

博 士 論 文

ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法の提案

2021 年 2 月

神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

小坂 崇

主査 三木 朋広 准教授

副査 芥川 真一 教 授

長尾 毅 教 授

森川 英典 教 授

論文要旨

本研究の主たる目的は、

1. 超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC という ; Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete）を用いた道路橋床版を提案すること
2. ワッフル型 UFC 床版の構造計画、および実物大の供試体等による実験や解析による性能照査によって、道路橋床版の要求性能を満たすだけでなく、高い性能を有することを示すこと
3. ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法の提案として要求性能と照査方法の標準を示すことである。

UFC は、高い強度（圧縮強度の特性値 180N/mm^2 ，設計引張強度 8.8N/mm^2 ）を有することと、配合、構成材料、および製造方法を限定することによって、高い耐久性を有する材料である。本研究における着目点は、この UFC の特徴を活かし、鋼床版と同等に軽量、かつ疲労破壊に対して高い安全性を有するコンクリート系床版の開発することと、このような新しい材料を適用した床版の性能照査型設計法を提案することである。

第 1 章「序論」では、本研究の背景として、既設の鋼床版や RC 床版に顕在化している損傷の状況を述べ、軽量かつ疲労破壊に対する高い安全性を有する床版が求められていることを述べた。また、道路橋床版および UFC を用いた床版構造に関する既往の研究を調査することにより、本研究の課題や方向性を示した。最後にこれらの背景や課題を踏まえた本研究の目的、着目点を示した。

第 2 章「構造計画と構造詳細の設定」では、要求性能の設定、構造計画、および構造詳細の設定を示した。構造計画においては、床版、接合部、鋼桁および床組構造の計画における考え方を示した。本床版は、輪荷重を直接受ける版状のスラブと格子状のリブからなり、形状からワッフル型 UFC 床版と呼称している。2 方向のリブ内には PC 鋼材を配置しおり、2 方向のプレストレスを与える PC 床版である。構造詳細の設定においては、床版の断面形状に関する検討として、最小部材厚、スラブ厚、リブ間隔、リブ高、および支間長に対する床版厚の検討を示した。床版厚 123mm の断面を設定し、この断面設定における床版質量を 1 とすると鋼床版の質量は 0.98 であり、ほぼ同等の質量を実現した。

第 3 章「解析および動的載荷による使用性に関する照査」では、解析および動的載荷による使用性の照査を示した。ここでは、第 2 章の構造計画で設定した床版（床版厚 123mm ）に対して、3 次元弾性 FEM 解析を用いた応答値の算出について、解析方法と解析結果および考察を示した。土木学会の UFC 指針（案）の設計に用いる応力度の制限値以下となることを確認した。また、主応力の最大および最小値は、床版の上下縁で生じ、スラブに対するリブ付根付近の断面急変部や隅角部に大きな応力度が生じていないことを確認した。3 次元弾性 FEM 解析を用いた、たわみの制限値に関する検討についても示した。また、使用性に関する振動の照査として、実物大の床版

を用いて、動的載荷による振動試験および実車両による載荷試験による検討を示した。振動試験では固有周期を算定し、土木研究所による実験によって算出されたタンデム式ダンプトラックのバネ下振動数と共振の可能性が低いことを確認した。

第4章「解析および静的載荷による断面破壊の照査」では、解析および静的載荷による断面破壊の照査を示した。輪荷重走行試験後の試験体である床版に静的載荷し、破壊の形態、および耐力を確認し、断面破壊に対する安全性の照査を示した。ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）に静的載荷し、最大荷重は 750.8kN であり設計荷重の約 7.5 倍であることを確認した。破壊形態は、曲げ圧縮破壊であり押抜きせん断破壊のような脆性的な破壊でないことを確認した。また、UFC 床版内の鋼繊維の配向状態を洗い出し試験で確認するとともに、梁試験体から抜き出した引張強度試験、梁試験体の静的載荷試験によるせん断力による断面破壊の安全性照査を示した。

第5章「輪荷重載荷による疲労破壊の照査」では、輪荷重載荷による疲労破壊の照査を示した。載荷装置を説明した上で、輪荷重静的載荷試験の試験方法と試験結果を示した。次に輪荷重走行試験の概要、試験方法、試験結果を示し、その結果の考察と疲労破壊の照査を示した。100kN から設計荷重の2倍以上である 220kN の輪荷重を、計 20 万回の載荷を行い、最大荷重載荷時点でも床版のたわみおよび UFC のひずみは弾性範囲内であることを確認した。試験を実施した載荷回数範囲においては疲労破壊しないことを明らかにした。載荷終了時点の荷重および回数は、阪神高速道路における実測軸重によって算出した 100 年の等価繰返し回数の 86 倍であり、高い安全性を有していることを示した。正規化したたわみによる他の床版形式との比較の結果、高い耐久性を有することを確認した。考察においては、輪荷重走行試験で生じたリブ側面のひび割れについて、梁の動的載荷試験によるひび割れの再現に関する検討を示した。

第6章「静的および動的載荷による接合部の照査」では、静的、および動的載荷による接合部の照査を示した。UFC 床版と鋼桁の、スタッドを用いた接合部について、接合部の充填材料の検討を行い、充填材料として PE 繊維を混入したモルタルの充填性を試験で確認した。

接合部の押し抜き試験による使用性および安全性の照査、動的載荷による疲労破壊に対する安全性の照査を示した。押し抜き試験の結果、充填材料ごとの接合部の耐力を確認し、PE 繊維を混入したモルタルを用いた接合部の耐力が、最も高くなった。また、床版同士の接合部についても、静的載荷試験による断面破壊に対する安全性の照査を示した。静的載荷によって得られた最大荷重は、設計荷重の 6.4 倍であり、十分な安全性を有していることが確認できた。

第7章「性能照査型設計法の提案」では、近年の性能照査型設計法に関する状況を示した上で、第2章から第6章の成果を踏まえた、UFC 床版の性能照査型設計法を提案した。設計の流れ、要求性能の設定、安全係数、構造計画、構造詳細の設定を示した上で、使用性、安全性、および接合部に対する照査方法の標準を示した。また、UFC 床版の維持管理計画として、維持管理の流れと、点検の精度向上、および維持管理の効率化に関する検討を示した。

第8章「結論」では、以上の章で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後に残された課題と展望を示した。

用語の定義

A. 設計に関する用語

- **設計耐用期間**：設計時において、構造物または部材が、その目的および機能を十分果たさなければならないと規定した期間。
- **要求性能**：施工中および設計耐用期間において、その目的および機能に応じて構造物に求められる性能。
- **使用性**：構造物の使用者が快適に構造物を使用する、もしくは周辺の人が構造物によって不快となることのないようにするための性能。
- **安全性**：構造物が使用者や周辺の人々の生命や財産を脅かさないための性能。
- **復旧性**：地震の影響などの偶発作用等によって低下した構造物の性能を回復させ、継続的な使用を可能にする性能。
- **耐久性**：構造物が設計耐用期間にわたり安全性、使用性、および復旧性を保持する性能。
- **照査指標**：要求性能を定量評価可能な物理量に置き換えた照査の指標。
- **限界状態**：構造物が要求性能を満足しなくなる限界の状態。
- **照査**：構造物が要求性能を満たしているか否かを、実物大の供試体等による確認実験や、経験的かつ理論的検証のある解析による方法等により判定する行為。
- **性能照査型設計**：構造物に要求性能を規定し、その性能を実現するプロセス、手法は原則的に自由にした設計体系。要求性能を規定し、構造計画、構造詳細の設定を行い、設計耐用期間に対する要求性能を照査する。
- **構造計画**：要求性能を満たすように、構造特性、材料、施工、維持管理、環境性、経済性等を配慮した上で、冗長性や頑健性を有する構造物となるように、構造を計画すること。
- **構造詳細の設定**：計画した構造に対し、用いる材料の諸元、断面形状、PC 鋼材の種別および本数等の構造照査を設定すること。
- **材料物性の特性値**：定められた試験法による材料物性の試験値のばらつきを想定した上で、試験値がそれを下回る確率がある一定の値となることが保証される値。
- **材料物性の規格値**：材料物性の特性値とは別に、規準等の規定により定められた材料物性の値。
- **設計基準強度**：設計において基準とする強度で、コンクリートの圧縮強度の特性値。
- **設計強度**：材料強度の特性値を材料係数で除した値。
- **設計応答値**：設計作用により生じる応答値に構造解析係数を乗じた値。
- **設計限界値**：材料物性の設計値を用いて算定した部材または構造物の性能を部材係数で除した値。要求性能に応じて設定される照査の限界値。

- **応力度の制限値**：構造物の使用状態において、過度な変形、有害なひび割れの発生を防ぐために、曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの圧縮応力度や引張応力度に設定する応力度の上限値。
- **材料係数**：材料物性の特性値からの望ましくない方向への変動、供試体と構造物中との材料物性の差異、材料物性が限界状態に及ぼす影響、材料物性の経時変化等を考慮するための安全係数。
- **構造解析係数**：構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的影響等を考慮するための安全係数。
- **部材係数**：限界値の計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度、すなわち対象とする部材がある限界状態に達したときに構造物全体に与える影響等を考慮するための安全係数。

B. 床版に関する用語

- **床版**：橋梁を通行する自動車、歩行者などを直接支え、その荷重を直接あるいは床組を経て橋の主桁に伝達させる版構造。床版上面には、防水層およびアスファルト等の舗装が施工される。
- **鋼床版**：鋼製の部材からなる床版。輪荷重を直接支持する鋼板のデッキプレートと、デッキプレートを支持する鋼製の横リブと縦リブで構成する床版。
- **RC 床版**：鉄筋コンクリート (RC) からなる平板の床版。
- **PC 床版**：プレストレストコンクリート (PC) からなる平板の床版。
- **鋼コンクリート合成床版**：鋼板または形鋼とコンクリートを力学的に一体化させた床版。
- **疲労**：繰返し荷重によって発生する応力が、静的破壊を生じる応力より低い応力であっても、構造物がその機能を失うこと。
- **疲労き裂**：繰返し荷重の作用に対する疲労によって生じる溶接部等を起点とするき裂。鋼構造の疲労損傷のひとつの形態。
- **土砂化**：RC 床版や PC 床版におけるコンクリートが、輪荷重の繰返し載荷や水等の環境作用によって、土砂のように変化する損傷の状態。
- **輪荷重走行試験**：輪荷重の繰返し走行作用を再現できる試験機を用いた疲労試験。モーターの回転運動を台車の往復運動に変換する方式と、自走式の台車による方式がある。
- **S-N 曲線**：材料の疲労において、一定の振幅で繰り返される応力と疲労破壊までの作用の繰返し数（疲労寿命）の関係を示した曲線。通常、応力範囲と疲労寿命の関係は、両対数で直線関係となる。
- **等価繰返し回数**：ある応力度 σ_1 での繰返し数を、基本応力度 σ_0 での繰返し数に換算した、基本応力度に等価な繰返し回数。

C. UFC 床版に関する用語

- **プレミックス結合材**：個別に吟味，調達された個々の材料をもとに，専用の混合装置によりあらかじめ混合されたマトリクス粉体．AFt 系 UFC のプレミックス結合材は，ポルトランドセメント，ポゾラン材およびエトリングait水和物生成系材料からなる．
- **ポゾラン材**：シリカ質混合材料の総称．フライアッシュ（石灰灰），高炉スラグ，シリカフェームなど．
- **シリカフェーム**：集積回路に使用されるシリコンウェハー等を製造する際に発生するダストを，集塵することで得られる高純度 SiO_2 の非晶質球状粒子．
- **エトリングait水和物**：セメント水和物の一つ．セメントが水和する時に，セメント中のアルミネート相と石膏との反応で，水和初期に針状結晶として析出する水和物．
- **熱養生**：UFC の強度特性や耐久性を向上させる目的で，コンクリートの硬化後に熱を加える養生．AFt 系 UFC の養生は，脱型やプレストレスの導入に必要な初期強度が得られるまで実施する 5°C 以上の常温の一次養生後に，二次養生として最高温度 85°C の蒸気養生を 20～24 時間行う熱養生が標準である．
- **引張軟化特性**：引張荷重を受ける部材にひび割れが生じ引張強度に達した後，伝達される引張応力が漸減する特性．
- **等価検長**：ひび割れ間隔に相当．引張軟化特性をあらわすパラメータ．
- **プレテンション方式**：緊張材の引張力を与えておいてコンクリートを打ち込み，コンクリート硬化後に緊張材に与えておいた引張力を緊張材とコンクリートの付着によりコンクリートに伝えてプレストレスを与える方法．
- **ポストテンション方式**：コンクリートの硬化後，緊張材に引張力を与え，その端部をコンクリートに定着させてプレストレスを与える方法．
- **鋼コンクリート合成桁**：鋼桁とコンクリート床版を力学的に一体化させた桁．
- **スラブ**：ワッフル型 UFC 床版上層部の版状の構造部分（図 1）．
- **リブ**：ワッフル型 UFC 床版下層部の梁状の構造部分（図 1）．スラブを格子状の梁で支え，補剛する．

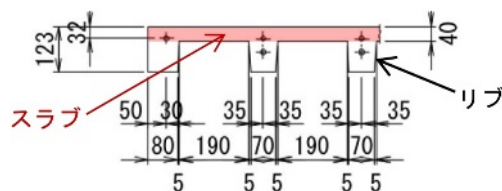


図 1 ワッフル型 UFC 床版の断面図

- **鋼横リブ**：UFC 床版を支持し鋼床組を構成する鋼構造（図 2）．
- **鋼床組**：床版を支持し，それらに作用する荷重を主桁に伝える橋の鋼構造部分．

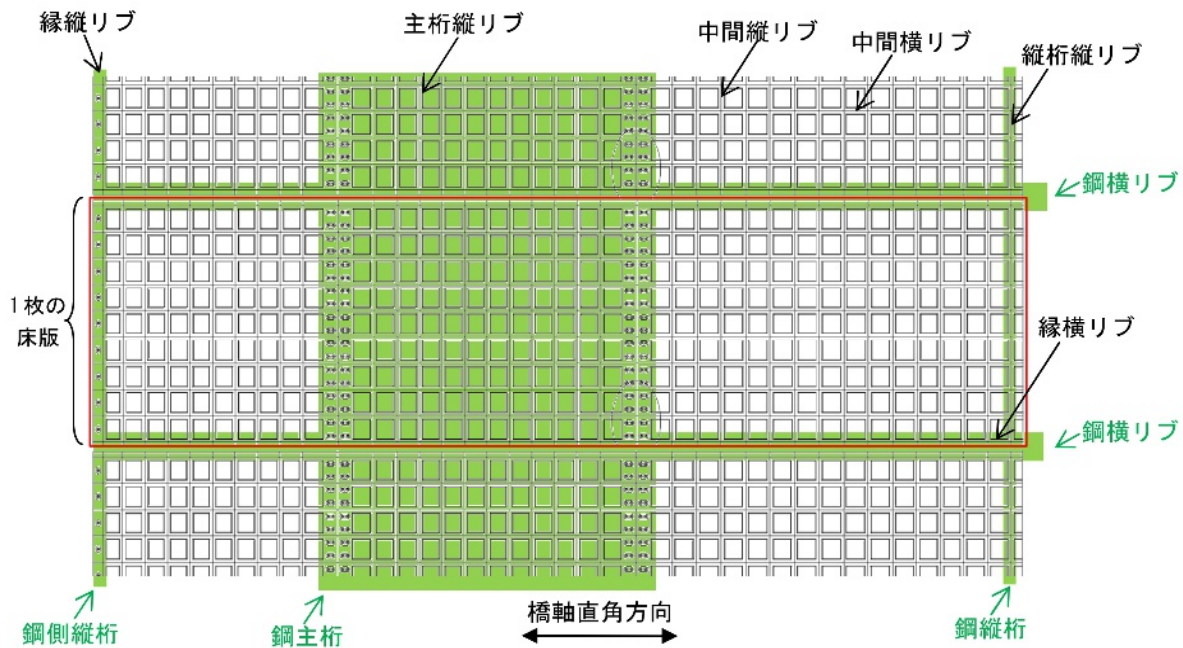


図 2 ワッフル型 UFC 床版および鋼構造各部の名称 (緑字が鋼構造)

- **接合部**：プレキャスト部材同士または、プレキャスト部材と他の部材が接合する構造部位。UFC 床版同士または、UFC 床版と他の部材（鋼桁、鋼床組、壁高欄、伸縮装置等）が接合する部位。
- **ウェットジョイント**：プレキャスト部材同士が接する部分に、場所打ち部を設けた接合部。場所打ち部を設けない接合部をドライジョイントという。
- **スタッド**：ずれ止め的一种。鋼とコンクリートとを結合し、一体化するための棒状の結合材。鋼製で JIS B1198 に規格がある。スタッドの基部において鋼と溶接接合される。
- **孔あき鋼板ジベル (PBL)**：ずれ止め的一种。鋼とコンクリートとを結合し、一体化するための孔を有する鋼板状の結合材。孔部におけるせん断抵抗に加えて、鉄筋を孔に貫通させることによってせん断抵抗が得られる。鋼板の基部を鋼と溶接接合される。

D. 解析に関する用語

- **二次応力**：ある仮定に基づいて計算された応力を一次応力というのに対し、仮定と実際の相違によって生ずる一次応力以外の付加的な応力。
- **有限要素法 (FEM)**：連続体の構造解析に用いられる数値解析法の一つで、無限の自由度を有する連続体を、有限の自由度を有する有限要素の集合体として近似化し、その集合体に対して成立する方程式を解く方法のこと。
- **板シェル要素**：2次元の板要素。板厚方向の伸縮を無視する。
- **ソリッド要素**：3次元の立体要素。要素の変形に関する拘束条件を課さない。

記号の定義

第 1 章

- f_{ck} : UFC の圧縮強度の特性値, 設計基準強度
 f_{tk} : UFC の引張強度の特性値
 E_c : UFC のヤング係数

第 2 章

- c : かぶり
 e : PC 鋼材のあき
 ϕ : PC 鋼材の径
 V_{pcd} : 設計押抜きせん断耐力
 f_{vd} : UFC の斜めひび割れ直角方向の設計平均引張強度
 u_p : 載荷面から $d/2$ 位置の設計断面の周長
 d : 有効高さ
 γ_b : 部材係数
 t : UFC 床版のスラブ厚
 M_L : 設計曲げモーメント (道路橋示方書)
 L : T 荷重に対する床版の支間
 P : 設計活荷重 T 荷重 $P=100$ kN (道路橋示方書)
 α : 鋼床組支持および 4 辺支持に関する曲げモーメント低減係数
 σ_{pu} : PC 鋼材の引張強度
 f_{crd} : UFC の設計ひび割れ発生強度
 δ_c : 床版のたわみ
 M_c : 両端固定梁の進化中央の曲げモーメント
 I : 断面二次モーメント

第 3 章

- i : 衝撃係数
 γ_a : 構造物解析係数
 f_0 : 卓越振動数
 $\Delta f'$: 振幅 1/2 位置の振動振幅
 h : モード減衰比
 δ_l : 床版支点位置の鋼横リブのたわみ
 δ_2 : 床版支間中央のたわみ

第 4 章

i	: 衝撃係数
γ_a	: 構造物解析係数
σ_{pud}	: PC 鋼材の設計引張強度
γ_c	: 材料係数
ε_l	: UFC の引張軟化曲線における平坦部終点のひずみ
ε_{cr}	: UFC の引張軟化曲線における平坦部始点のひずみ
ε_2	: UFC の引張軟化曲線における応力ゼロ点のひずみ
w_{1k}	: UFC の引張軟化曲線における平坦部終点の開口変位
w_{2k}	: UFC の引張軟化曲線における応力ゼロ点の開口変位
h_b	: 断面の高さ
L_{eq}	: 等価検長
G_F	: 破壊エネルギー
V_y	: 斜め引張破壊耐力
V_{wc}	: 斜め圧縮破壊耐力
b_w	: ウェブ幅
d	: 有効高さ
f_v	: UFC の斜めひび割れ直角方向の引張強度
β_u	: 軸方向と斜めひび割れ面のなす角度
τ	: 平均せん断応力
σ'_{xu}	: 軸方向の平均圧縮応力
β_0	: 軸力を受けない場合の斜めひび割れが部材軸から 45°の直線となす角度
V_{pc}	: UFC の押抜きせん断耐力
f_v	: UFC の斜めひび割れ直角方向の引張強度

第 5 章

f'_c	: UFC の圧縮強度
f_t	: UFC の引張強度
f_b	: UFC の曲げ強度
N_{eq}	: 等価繰返し回数
P_i	: 輪荷重
P_0	: 基本輪荷重
n_i	: 1 車線あたりの輪荷重ごとの計測軸数
m	: 設計疲労曲線の逆数の絶対値
R_δ	: 正規化たわみ

- δ_m : 計測たわみ
 P_{li} : 載荷荷重
 δ_0 : 初期荷重載荷時のたわみ

第 6 章

- P_{max} : スタッド接合部の最大耐力
 P_y : スタッド接合部の降伏耐力
 $\Delta\tau$: 疲労強度 (スタッド 1 本の変動応力範囲)
 N : 載荷回数
 ΔP : スタッド 1 本あたりの変動荷重
 d : 有効高さ
 l : 支点間距離
 h : UFC 床版厚

第 7 章

- C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度
 C_0 : 表面の塩化物イオン濃度
 c_d : かぶり
 D_d : 塩化物イオンに対する拡散係数
 t : 年数
 C_i : 初期塩化物イオン濃度
 γ_f : 作用係数
 γ_i : 構造物係数
 S_d : 設計応答値
 R_d : 設計限界値
 F_k : 作用の特性値
 F_d : 設計作用
 f_k : 強度の特性値
 f_d : 設計強度

図, 写真, および表の一覧

図 1.1	圧縮強度試験結果の比較	6
図 1.2	曲げ強度試験結果の比較	7
図 1.3	硬化体組織の緻密化イメージ	7
図 1.4	羽田国際空港 D 滑走路着陸帯部の UFC 床版	8
図 1.5	鋼橋の床版形式	10
図 1.6	論文の構成	12
図 2.1	UFC 床版の設計の流れ	17
図 2.2	ワッフル型 UFC 床版	19
図 2.3	ワッフル型 UFC 床版の構造概要	19
図 2.4	平板型 UFC 床版	20
図 2.5	平板型 UFC 床版の構造概要	20
図 2.6	床版質量の比較	21
図 2.7	床版同士の接合部	22
図 2.8	床版と鋼桁の接合部	22
図 2.9	ワッフル型 UFC 床版と鋼桁による合成桁	23
図 2.10	最小部材寸法	24
図 2.11	スラブ厚ごとの押抜きせん断耐力	25
図 2.12	支点部の応力度 (スラブ厚とリブ中心間隔を変数)	27
図 2.13	支点部上縁の応力度 (スラブ厚とリブ中心間隔を変数)	27
図 2.14	支間中央部の応力度 (スラブ厚とリブ中心間隔を変数)	27
図 2.15	リブ高変化に対する PC 鋼材位置	29
図 2.16	支点部の応力度 (スラブ厚とリブ高を変数)	29
図 2.17	支点部上縁の応力度 (スラブ厚とリブ高を変数)	30
図 2.18	支間中央部の応力度 (スラブ厚とリブ高を変数)	30
図 2.19	活荷重による支間中央のたわみ	31
図 2.20	両端固定梁によるたわみ算出	31
図 2.21	床版支間 2.5m における質量の比較	32
図 2.22	床版支間 2.5m における床版形状の比較	32
図 2.23	床版支間 2.5m におけるコストの比較	33
図 2.24	床版支間長に対する最小床版厚	34
図 3.1	解析対象の UFC 床版の構造	38
図 3.2	プレストレス導入時の解析モデル	39

図 3.3	活荷重載荷時の解析モデル	39
図 3.4	活荷重載荷パターン	41
図 3.5	最大主応力分布（活荷重載荷パターン[1]）	43
図 3.6	最小主応力分布（活荷重載荷パターン[1]）	43
図 3.7	最大主応力の断面内分布（活荷重載荷パターン[1]）	43
図 3.8	床版のたわみ（活荷重載荷パターン[1]）	44
図 3.9	解析対象の UFC 床版－鋼合成桁の断面図	46
図 3.10	ワッフル型 UFC 床版の解析モデル図（上面側）	47
図 3.11	ワッフル型 UFC 床版の解析モデル図（下面側）	47
図 3.12	解析モデルの境界条件および支持条件	48
図 3.13	PC 鋼材の配置	49
図 3.14	鋼桁および鋼床組みの解析モデル	49
図 3.15	活荷重載荷パターン	50
図 3.16	解析対象の UFC 床版の断面図	51
図 3.17	UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]）	52
図 3.18	UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸方向断面）	52
図 3.19	UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸直角方向断面）	52
図 3.20	鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]）	53
図 3.21	鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸方向断面）	53
図 3.22	鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸直角方向断面）	53
図 3.23	試験体の構造	55
図 3.24	常時微動計測による加速度（X3）	56
図 3.25	常時微動の振動数スペクトル	56
図 3.26	自由振動計測による加速度（X3）	57
図 3.27	自由振動の振動数スペクトル	57
図 3.28	静的載荷時のたわみ（橋軸方向）	59
図 3.29	実車による動的載荷時のたわみ比較	59
図 4.1	静的載荷試験の載荷装置	64
図 4.2	載荷位置（平面図）	64
図 4.3	変位計設置位置	65
図 4.4	ひずみ計測位置	65
図 4.5	荷重－試験体中央変位関係	66
図 4.6	載荷終了後のひび割れ図	67
図 4.7	荷重－試験体角部変位関係	68
図 4.8	荷重－下面ひずみ関係	68

図 4.9	荷重－上面ひずみ関係	69
図 4.10	解析モデル（全体図）	70
図 4.11	解析モデル（床版下面のリブ形状）	70
図 4.12	解析に用いる PC 鋼材の応力－ひずみ関係	71
図 4.13	解析に用いる UFC の応力－ひずみ関係（圧縮側）	71
図 4.14	解析に用いる UFC の応力－ひずみ関係（引張側）	71
図 4.15	荷重載荷位置	72
図 4.16	載荷荷重－鉛直変位関係	73
図 4.17	床版下面のひび割れ分布図（リブ直上載荷 500kN）	73
図 4.18	床版上面の主応力図（リブ直上載荷 500kN）	74
図 4.19	床版下面の主応力図（リブ直上載荷 500kN）	74
図 4.20	床版下面の最大ひずみ分布（リブ直上載荷 500kN）	75
図 4.21	荷重－変位関係の比較	75
図 4.22	洗い出し位置	78
図 4.23	直接引張試験体の形状寸法	79
図 4.24	梁部材における直接引張試験体の採取位置	80
図 4.25	静的載荷によるせん断実験試験体	81
図 4.26	荷重－変位	82
図 4.27	荷重－ひずみ関係（試験体 1）	82
図 4.28	せん断耐力の検討に用いる 2 次元弾塑性 FEM 解析のモデル図	84
図 4.29	UFC の応力－ひずみ関係	84
図 4.30	荷重－変位関係の比較	84
図 4.31	ひずみ分布（ケース 1 / 実強度）	84
図 4.32	ひずみ分布（ケース 2 / 引張強度を 43%低減）	85
図 5.1	輪荷重走行試験の試験体 構造図（その 1）	90
図 5.2	輪荷重走行試験の試験体 構造図（その 2）	91
図 5.3	自走式輪荷重移動載荷装置	93
図 5.4	輪荷重載荷位置と計測位置（床版[2]）	94
図 5.5	リブ側面の鉛直ひずみ	94
図 5.6	スラブ上面の走行直角方向ひずみ	95
図 5.7	スラブ下面の走行直角方向ひずみ	95
図 5.8	解析によるリブ側面の鉛直方向ひずみ	96
図 5.9	輪荷重走行試験載荷プログラム	98
図 5.10	橋軸方向たわみ分布（床版[2]）	101
図 5.11	載荷荷重－計測たわみ（床版[2]）	101

図 5.12	計測たわみー等価繰返し回数（床版[2]）	101
図 5.13	橋軸方向ひずみ分布（床版[2]）	102
図 5.14	リブにおけるひび割れの概要	102
図 5.15	ひび割れ図（床版[1]～[3]下面，[2]リブ側面）	103
図 5.16	ひび割れ図（床版[3]，橋軸方向リブ表面）	103
図 5.17	ひび割れ図（床版[3]，橋軸直角方向リブ表面）	104
図 5.18	床版切断後の断面におけるひび割れ図（床版[3]）	105
図 5.19	床版同士を接合する高力ボルトの軸力変化	105
図 5.20	床版同士の接合部における変位	106
図 5.21	パイ型変位計の設置状況	106
図 5.22	プレストレス導入時における PC 鋼材円周方向の引張応力度	109
図 5.23	静的繰返し載荷後のひび割れ	109
図 5.24	載荷ステップの比較	111
図 5.25	載荷荷重ー計測たわみ	111
図 5.26	計測たわみー等価繰返し回数	112
図 5.27	正規化たわみー等価繰返し回数	112
図 5.28	ワッフル型 UFC 床版の正規化たわみー等価繰返し回数	113
図 6.1	UFC 床版を用いた鋼合成桁の接合部	117
図 6.2	UFC 床版と鋼桁の接合構造	118
図 6.3	繊維量ーJ14 漏斗流下値	122
図 6.4	繊維量ーモルタルフロー	122
図 6.5	繊維量ー圧縮強度	123
図 6.6	繊維量ー曲げ強度	123
図 6.7	引張応力度ー仮想ひび割れ幅	124
図 6.8	押抜き載荷試験の試験体	125
図 6.9	スタッド 1 本あたりの載荷荷重ーH 鋼とモルタル間のずれ変位	128
図 6.10	最大耐力ーモルタルの圧縮強度	129
図 6.11	接合部の降伏耐力 P_y の算出（試験体 No.6）	129
図 6.12	疲労試験結果（ずれ変位ー載荷回数）	130
図 6.13	せん断力ーずれ変位（試験体 No.5，10）	131
図 6.14	疲労強度式と試験結果の比較	133
図 6.15	床版同士の接合部	134
図 6.16	静的載荷試験体および載荷の概要	135
図 6.17	変位計設置位置	135
図 6.18	荷重ー鉛直変位	136

図 6.19	荷重－ひずみ	137
図 6.20	試験体のひび割れ（載荷終了後）	138
図 7.1	設計の流れ	143
図 7.2	塩化物イオンの侵入に対する抵抗性の比較	145
図 7.3	鋼桁および鋼床組	147
図 7.4	構造詳細の設定の流れ	148
図 7.5	床版支間長ごとの床版厚の目安（ワッフル型 UFC 床版）	149
図 7.6	床版支間長 2.5m に対する断面形状の設定	149
図 7.7	床版同士の接合部の構造	150
図 7.8	床版同士の接合部の緊張試験状況	150
図 7.9	使用性の照査の流れ	153
図 7.10	安全性の照査の流れ	155
図 7.11	床版と桁の接合部の照査の流れ	157
図 7.12	床版同士の接合部の照査の流れ	158
図 7.13	UFC 床版の維持管理	160
図 7.14	床版のリブ下面の光ファイバ設置状況	161
図 7.15	試験体の設置状況	161
図 7.16	重機による静的載荷	161
図 7.17	ひずみ分布計測結果（中央部橋軸方向）	162
図 7.18	ひずみ分布計測結果（三次元表示）	162
図 7.19	光ファイバ付き PC 鋼より線設置状況	163
図 7.20	PC 鋼材のひずみ計測結果（プレストレス導入前からの差分）	164
図 7.21	ボルト固定式スタッドの概要	165
写真 1.1	鋼床版における疲労き裂	2
写真 1.2	RC 床版の土砂化	2
写真 1.3	鋼繊維と UFC	5
写真 1.4	米国 FHWA における UHPC 床版（Little Cedar Creek 橋）	9
写真 2.1	平板型 UFC 床版架設状況（阪神高速道路 玉出入路橋）	21
写真 3.1	振動試験	54
写真 3.2	実車による載荷試験	55
写真 4.1	床版上面の圧縮破壊状況	66
写真 4.2	床版下面のひび割れ状況	67
写真 4.3	UFC 床版の打設状況	77

写真 4.4	洗い出し試験実施状況	78
写真 4.5	UFC 床版内の鋼繊維の配向状況	78
写真 4.6	直接引張試験用の UFC 梁部材の打設状況	79
写真 4.7	静的載荷によるせん断実験状況	81
写真 4.8	静的載荷後のひび割れ状況 (試験体 1)	82
写真 5.1	輪荷重走行試験	89
写真 5.2	試験体 (裏面)	91
写真 5.3	静的載荷用ダブルタイヤ	93
写真 6.1	モルタル充填確認試験	121
写真 6.2	溶接金網設置状況	126
写真 6.3	押抜き載荷試験状況	127
写真 6.4	間詰め部のひび割れ (載荷終了後)	128
写真 6.5	試験体の疲労破壊状況 (試験体 No.8)	131
写真 6.6	スタッドの破断面 (試験体 No.8)	132
写真 6.7	スタッドの破断面 (試験体 No.10)	132
写真 6.8	床版同士の接合部の試験体製作状況	134
写真 6.9	静的載荷試験状況	136
写真 6.10	試験体のひび割れ発生状況 (載荷終了後)	137
写真 7.1	鋼桁および鋼床組 (阪神高速道路 信濃橋入路橋)	148
写真 7.2	床版同士の接合部の緊張状況 (阪神高速道路 信濃橋入路橋)	150
写真 7.3	大型切削機による切削試験状況	151
写真 7.4	大型切削機のビット	151
写真 7.5	切削試験後の UFC 床版の状況	152
写真 7.6	切削試験後の PC 床版と UFC 床版の比較	152
写真 7.7	製作工場での UFC 床版の仮置き状況	165
表 1.1	AFt 系 UFC の標準配合	5
表 1.2	UFC と従来のコンクリートの比較	6
表 1.3	国内外の既往 UFC 床版とワッフル型 UFC 床版の比較	11
表 2.1	本論文の対象とする UFC 床版の要求性能	18
表 2.2	2 種類の UFC 床版の構造的な特徴	21
表 2.3	リブ間隔の検討パラメータ	25
表 2.4	スラブ厚およびリブ高の検討パラメータ	28
表 2.5	床版支間長に対する検討パラメータ	34

表 3.1	解析に用いる材料特性	40
表 3.2	活荷重載荷パターンの着目点	40
表 3.3	3次元弾性 FEM 解析による応力度	42
表 3.4	床版の剛性比較	45
表 3.5	解析に用いる材料特性	48
表 3.6	3次元弾性 FEM 解析によるたわみ（2 辺固定）	59
表 4.1	試験に用いた UFC 床版の材料特性	63
表 4.2	採取試験片の直接引張試験による引張強度	80
表 4.3	試験に用いた UFC 梁の材料特性	81
表 5.1	材料試験結果	92
表 5.2	荷重装置の仕様	93
表 5.3	活荷重実態調査による計測軸重の特性	99
表 5.4	計測軸重の等価繰返し回数	99
表 5.5	荷重荷重の等価繰返し回数	100
表 5.6	3次元弾性 FEM 解析による床版の応力度	107
表 6.1	無収縮モルタルの標準配合	120
表 6.2	試験に用いた充填材料	120
表 6.3	押抜き荷重試験の試験体および荷重方法	125
表 6.4	押抜き荷重試験による最大耐力および降伏耐力	127
表 6.5	疲労試験の試験体および試験条件	130
表 7.1	設計法の比較	142
表 7.2	要求性能	144
表 7.3	安全係数	145
表 7.4	2 種類の UFC 床版の特徴	147
表 7.5	使用性に関する要求性能と照査指標	153
表 7.6	安全性に関する要求性能と照査指標	155
表 7.7	接合部の要求性能と照査指標	157

目 次

1. 序 論	1
1.1 概 説	1
1.2 道路橋床版の損傷	1
1.3 道路橋床版の既往研究	3
1.4 UFC を用いた道路橋床版	4
1.4.1 UFC	4
1.4.2 既往の UFC を用いた構造物と既往研究	7
1.4.3 UFC 床版のコンセプト	9
1.4.4 既往の UFC 床版との比較	10
1.5 本研究の目的と構成	11
1 章参考文献	14
 2. 構造計画と構造詳細の設定	 17
2.1 概 説	17
2.2 設計の流れ	17
2.3 要求性能の設定	17
2.4 構造計画	19
2.4.1 床版の構造	19
2.4.2 接合部の構造	21
2.4.3 鋼桁および床組構造	22
2.5 構造詳細の設定	23
2.5.1 最小部材厚の検討	23
2.5.2 スラブ厚およびリブ間隔の検討	25
2.5.3 スラブ厚およびリブ高の検討	28
2.5.4 床版支間長に対する床版厚の検討	33
2.6 まとめ	34
2 章参考文献	36
 3. 解析および動的載荷による使用性に関する照査	 37
3.1 概 説	37
3.2 弾性解析による応力度およびたわみの照査	37
3.2.1 解析対象	37

3.2.2	解析方法の概要	39
3.2.3	解析結果	42
3.2.4	解析結果の考察	44
3.3	弾性解析によるたわみ制限値の検討	45
3.3.1	検討の概要	45
3.3.2	解析方法の概要	46
3.3.3	解析結果	51
3.3.4	検討結果の考察	54
3.4	動的载荷による振動の照査	54
3.4.1	検討の概要	54
3.4.2	振動試験	56
3.4.3	载荷試験	58
3.4.4	試験結果の考察	60
3.5	まとめ	60
3	参考文献	62
4.	解析および静的载荷による断面破壊の照査	63
4.1	概 説	63
4.2	静的载荷および弾塑性解析による曲げ破壊の照査	63
4.2.1	静的载荷試験	63
4.2.2	弾塑性解析	69
4.2.3	試験および解析結果の考察	75
4.3	静的载荷によるせん破壊の照査	76
4.3.1	検討の概要	76
4.3.2	繊維の配向に関する検討	77
4.3.3	梁部材の静的载荷試験	80
4.3.4	押し抜きせん断破壊の照査	85
4.3.5	試験結果の考察	86
4.4	まとめ	86
4	参考文献	88
5.	輪荷重载荷による疲労破壊の照査	89
5.1	概 説	89
5.2	試験体および载荷装置	89
5.2.1	試験の概要	89

5.2.2	試験体の構造および製作	90
5.2.3	試験体の材料特性	92
5.2.4	載荷装置	92
5.3	輪荷重静的載荷試験	93
5.3.1	試験方法	93
5.3.2	試験結果	94
5.3.3	試験結果の考察	96
5.4	輪荷重走行試験	97
5.4.1	試験の概要	97
5.4.2	試験方法	97
5.4.3	試験結果	100
5.4.4	試験結果の考察	106
5.4.5	疲労破壊の照査	110
5.5	まとめ	114
5	章参考文献	116
6.	静的および動的載荷による接合部の照査	117
6.1	概 説	117
6.2	床版と鋼桁の接合部	118
6.2.1	接合部の構造	118
6.2.2	充填材料の検討	119
6.2.3	押し抜き載荷による変形性能の照査	124
6.2.4	動的載荷による疲労破壊の照査	130
6.3	床版同士の接合部	133
6.3.1	接合部の構造	133
6.3.2	静的載荷による曲げ破壊の照査	134
6.4	まとめ	138
6	章参考文献	140
7.	性能照査型設計法の提案	141
7.1	概 説	141
7.2	性能照査型設計法	141
7.3	設計の流れ	142
7.4	要求性能の設定	143
7.5	安全係数	145

7.6 構造計画	146
7.6.1 床版形式の選定	146
7.6.2 鋼桁，鋼床組の設定	147
7.7 構造詳細の設定	148
7.7.1 断面形状の設定	148
7.7.2 施工および維持管理の配慮	150
7.8 使用性の照査	153
7.8.1 照査の流れ	153
7.8.2 応力度，たわみの照査	154
7.8.3 振動の照査	154
7.9 安全性の照査	155
7.9.1 照査の流れ	155
7.9.2 断面破壊の照査	156
7.9.3 疲労破壊の照査	156
7.10 接合部の照査	157
7.10.1 照査の流れ	157
7.10.2 床版と鋼桁の接合部の照査	158
7.10.3 床版同士の接合部の照査	159
7.11 維持管理計画	159
7.11.1 維持管理の流れ	159
7.11.2 点検精度の向上	160
7.11.3 維持管理の効率化	164
7.12 まとめ	166
7 章参考文献	168
 8. 結 論	 169
 謝 辞	 175
 関連論文	 179
I. 審査論文	179
II. その他論文，報告	180

1章 序論

1.1 概説

本研究の主たる目的は、

- ・ 超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC という；Ultra-high strength Fiber reinforced Concrete）を用いた道路橋床版を提案すること
- ・ ワッフル型 UFC 床版の構造計画，および実物大の供試体等による実験や解析による性能照査によって，道路橋床版の要求性能を満たすだけでなく，高い性能を有することを示すこと
- ・ ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法の提案として，要求性能と照査方法の標準を示すこと

である．

本章においては，上記の目的に関する実務的背景として，既設の道路橋床版における損傷と，このような状況に対する現状の維持管理，および建設時の状況を述べた後，UFC 床版の開発が必要となった理由を述べる．次に，道路橋床版に関する既往の研究をレビューし，本研究の課題と方向性を述べる．また，UFC の材料特性，既往の UFC を用いた構造物を示した上で，UFC 床版のコンセプトを述べる．最後に，これらの背景を踏まえた，本研究の着眼点について述べる．

1.2 道路橋床版の損傷

阪神高速道路は，1964 年の土佐堀から湊町間の供用開始以来，2020 年時点で延長 258.1km を供用し管理している．橋梁は 9,797 径間であり，構造種別は，橋梁区間が 78.3%，土工区間およびトンネル区間が 21.7%であり，橋梁の内訳は，鋼桁 67.8%，RC 桁および PC 桁が 32.2%である．

鋼床版形式の上部構造は 1,443 径間，延長 88.2km であり，全供用延長の約 1/3 となっている．これまで，埋め立て地などの軟弱地盤区間に架設され，死荷重低減を必要とした阪神高速 4 号，および 5 号湾岸線や，兵庫県南部地震の復旧工事において工事期間の短縮が求められた阪神高速 3 号神戸線の復旧区間において，多数採用されている¹⁻¹⁾．

都市高速道路の橋梁は，建設時に橋脚の設置位置や基礎の寸法規模が制約されたり，非常に短い期間での建設が要求されたりすることから，軽量かつ現場架設時間が短い鋼床版の使用頻度が他の道路と比べ相対的に高い．しかし，この鋼床版において，写真 1.1 に示すような，主に溶接部を起点とした疲労き裂が顕在化している．鋼床版の損傷発生率（損傷径間の比率）は，U リブ鋼床版で約 19%，バルブリブ鋼床版で 6%である¹⁻²⁾．このような鋼床版の，劣化に対する補修や補強などの対策の確実な実施が，道路管理上の課題であるが，維持管理の負担となっている．

新設橋梁に鋼床版を採用する場合、開断面縦リブ（バルブリブ）の採用や、道路橋示方書（以下、道示）¹⁻³⁾におけるデッキプレートの増厚，構造細目を準拠することにより，疲労き裂に対する発生リスクの，低減が図られているが，根本的な解決には至っていない。

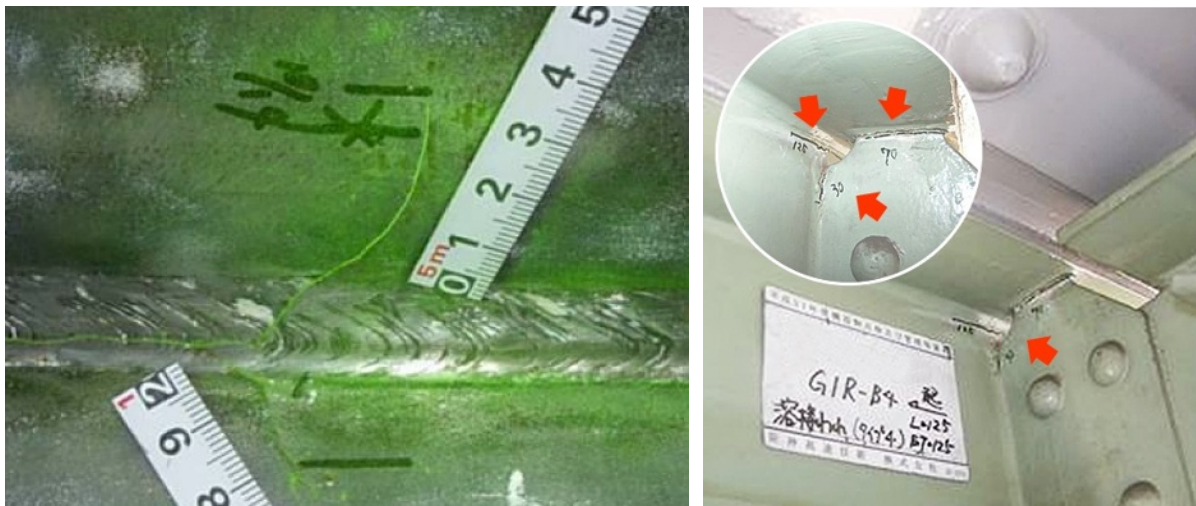


写真 1.1 鋼床版における疲労き裂

RC 床版では，1960 年代後半に供用開始した，旧基準¹⁻⁴⁾で設計された床版において，劣化が顕在化している．この床版厚が小さいこと，および重交通の繰返し作用によって疲労劣化が生じ，1970 年代後半以降に床版下面に鋼板を接着する補強が行われてきた¹⁻⁵⁾．近年，このような鋼板を接着する補強が行われた床版の一部で土砂化が生じている（写真 1.2）．

このような鋼床版や RC 床版における劣化の顕在化に対し，阪神高速道路では，2015 年度から大規模更新・修繕事業において，床版の補修，補強，および取替えを実施している．



写真 1.2 RC 床版の土砂化

新設橋の建設においては，橋脚の設置位置や基礎の寸法規模が制約され長支間の上部構造となる場合や，非常に短い現場工事期間での建設が要求されたりする場合，軽量の鋼床版を用いた上

第1章 序論

部構造形式を選定せざるを得ない場合がある。しかし、前述のように、鋼床版は疲労損傷の発生リスクが高いことから、鋼床版と同等に軽量、かつ疲労破壊に対する高い安全性を有する道路橋床版の開発が必要とされている。

また、RC 床版の劣化損傷に対しては、床版取替えを視野に検討が行われるが、既設の RC 床版は 170mm から 180mm と床版厚が小さい。よって、床版取替えにおいて、道路の縦断高を変更しないように、新設床版の床版厚を既設 RC 床版と同等以下に抑えられる床版が必要であった。また、床版を支える鋼桁や下部構造、および基礎構造への質量増の影響、特に地震に対する安全性に対して、既設 RC 床版よりも質量が重くならない軽量の床版が求められた。

1.3 道路橋床版の既往研究

道路橋床版に関する既往の研究を調査し、UFC床版の研究における課題や研究手法を整理した。

道路橋床版の設計に用いる曲げモーメント式は、前田ら（1976）¹⁻⁶⁾による、RC床版の引張側コンクリートを無視した断面での直交異方性を考慮した設計式として提案され、道示の設計曲げモーメント式に採用されている。1970年代後半に顕在化した、RC床版の劣化損傷に対して、岡田ら（1982）¹⁻⁷⁾は、多点移動繰返し載荷方法によって、RC床版の損傷度が残留たわみの変化によって評価できること、残留たわみが大きくなると床版が押し抜きせん断破壊することを示した。さらに、前田ら（1984）¹⁻⁸⁾は、輪荷重を往復走行させる輪荷重移動装置による試験機を製作し、実物大RC床版の輪荷重走行試験を行った。この疲労試験によって、実橋の損傷と多点移動繰返し載荷方法による損傷の差は、作用せん断力、およびねじりモーメントの大きさと作用回数の差にあることが明らかにした。また、松井ら（1986）¹⁻⁹⁾はこれらのRC床版の疲労試験を踏まえ、「たわみ」および「ひび割れ密度」を指標とした、既設RC床版の劣化度判定法が提案した。

1980年代後半からは、鋼コンクリート合成床版の研究が行われ、松井らの研究¹⁻¹⁰⁾において、輪荷重走行試験を用いることによって、走行荷重下における合成床版の疲労特性が明らかされた。橋軸方向にプレストレスしたコンクリート床版や、コンクリートと鋼部材やFRP部材を組み合わせた合成床版についても、同様の照査方法によって疲労特性が明らかにされている^{1-11)~1-14)}。輪荷重走行試験を主体とした床版研究の経緯や動向は、文献1-15)にまとめられているが、現時点、我が国においては、床版の疲労破壊に対する安全性は、輪荷重走行試験による照査手法が標準といえる。

近年の道路橋床版の研究としては、藤山ら（2010, 2014）^{1-16), 1-17)}によって、高サイクル繰返し応力を受けるコンクリートの非線形過程を解析的評価することによって、鋼コンクリート合成床版の疲労損傷の過程が解析的に評価できることが示されている。この解析的評価では、移動荷重を3次元有限要素法（以下、FEMという）のモデルに作用させることで、床版の損傷過程が再現され、床版の疲労損傷過程や疲労寿命の推定が行えるものとされている。今後、床版の疲労破壊に対する安全性の評価が、輪荷重走行試験に加えて、解析的に評価が可能となることが示されて

いるものといえる。

一方、道路橋におけるRC床版、PC床版、および鋼コンクリート合成床版の設計法については、床版支間に対して、最小床版厚と設計曲げモーメント式が、道示に規定されている。従来の床版形式については、鋼主桁や鋼床組みの構造に応じて、床版支間を設定すれば、その床版支間に応じて設計曲げモーメント式の断面力に対して応力度を算定し、設計をおこなうことが可能である。

しかし、本論文で提案するUFC床版のように、道示に規定の無い材料や、新しい構造の床版形式については、道示をそのまま使用して設計することはできない。よって、要求性能を定め、その要求性能に対して限界状態を設定し、性能照査しなければならないといえる。性能照査は実験や解析によって、要求性能を満たしているか否かを確認するものである。床版の性能照査としては、疲労破壊に対する安全性の照査が重要といえる。本研究においては、輪荷重走行試験によって照査することとした。前述のように解析的評価することも将来的には可能と推測するが、現時点では、UFC要素における繰返し作用に対する材料の構成則が確立されていないため、解析的評価の適用は、難しいと判断した。また、このような新しい床版形式の、解析や実験に基づく、性能照査型設計法を確立することが課題といえる。

1.4 UFC を用いた道路橋床版

1.4.1 UFC

1.2 節で述べた既設床版における劣化の顕在化を踏まえ、鋼床版が必要とされるような新設橋や、既設床版の取替えに適用可能な、軽量かつ性能の高い床版の開発を目指した。

舗装下面が、鋼構造となる鋼床版は路面の凍結リスクが高くなるため、床版材料の選定にあたっては、PC 床版または合成床版等の、複合構造を検討対象とした。しかし、従来の PC 床版や合成床版は、鋼床版の約 2~4 倍程度の質量となる。よって、橋脚や基礎の構造規模が大きくなり、鋼床版と同程度の質量の床版を構成できる可能性から、UFC を用いた床版を検討することとした。

土木学会の超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）¹⁻¹⁸⁾（以下、UFC 指針という）では、UFC を次のように定義している。「UFC は、圧縮強度の特性値が 150 N/mm^2 以上、ひび割れ発生強度の特性値が 4 N/mm^2 以上、引張強度の特性値が 5 N/mm^2 以上のセメント質複合材。マトリクスは、粒径 2.5 mm 以下の骨材、セメント、ポゾラン材から構成され、水結合材比は 0.24 以下、鋼繊維（引張強度 2 kN/mm^2 以上で、直径 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、長さ $10 \sim 20 \text{ mm}$ ）を $2 \text{ vol.}\%$ 以上で混入したものを、標準としている。標準として熱養生を行う。」と定義されている。

現在、我が国では、前述の定義に合致する UFC として、2 種類の UFC が利用されている。反応性粉体コンクリート由来の UFC（以下、RPC 系 UFC という）とエトリンサイト生成系の UFC¹⁻¹⁹⁾（以下、AFt 系 UFC という）である。それぞれの UFC は、材料構成が若干異なり超高強度の

第1章 序 論

発現機構が異なるが，どちらも UFC 指針に示す UFC の定義を満足する材料である．

本研究では AFt 系 UFC を使用して研究を行った．表 1.1 に AFt 系 UFC の標準配合を示す．

写真 1.3 に AFt 系 UFC の鋼繊維および硬化前後の UFC の状態を示す．AFt 系 UFC の補強用繊維は，引張強度 2 kN/mm^2 ，直径 0.2 mm ，長さ 15 mm と 22 mm の 2 種類を混合した鋼繊維を $1.75 \text{ vol.}\%$ 混入することと規定されている¹⁻¹⁹⁾．

本研究では既往の AFt 系 UFC を使用して行うことを前提条件とし，UFC の材料構成等は研究対象に含まないものとした．よって，本研究を踏まえ，コスト縮減等の観点から材料構成を見直す場合は，別途，構造部材に対する性能の検証が必要といえる．

表 1.1 AFt 系 UFC の標準配合

フロー値 (mm)	水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				AFt系 UFC用 鋼繊維 (kg)
			水	プレミックス 結合材※	細骨材	高性能 減水剤	
250 ± 20	15	2.0	195	1,287	905	32.2	137.4 (1.75 vol.%)

※ セメント，エトリンガイト生成系混和材，シリカヒュームなどのポゾラン材



(a)鋼繊維



(b)UFC (硬化前)



(c)UFC (硬化後：UFC 床版の下面)

写真 1.3 鋼繊維と UFC

AFt 系 UFC と，従来の一般的なコンクリートとの材料特性の比較を表 1.2 に示す．UFC は水結合比が小さく，構成材料および配合の範囲が限られているため，透気係数，透水係数，および塩化物イオンの拡散係数が小さい．よって，硬化体中の物質移動に対する抵抗性が高い．加えて，設計において，使用状態で設計ひび割れ発生強度以下に応力度を制限しているため，物質浸透に対する抵抗性が長期にわたって維持される材料である．

収縮ひずみについては，凝結の始発からの合計が約 750μ （そのうち熱養生時の収縮ひずみは約 430μ ）である¹⁻¹⁹⁾．表 1.2 に示す設計に用いる収縮ひずみは，熱養生後に生じる収縮ひずみ 50μ であり，一般的なコンクリートに比べて小さいといえる．クリープ係数 0.7 についても，一般的なコンクリートと比較すると小さい値であるということが，設計に用いる材料の条件としての特徴的といえる．

表 1.2 UFC と従来のコンクリートの比較

項 目	単 位	AFt 系 UFC ¹⁻¹⁹⁾	一般的なコンクリート
圧縮強度の特性値 f'_{ck}	N/mm ²	180	21~50
引張強度の特性値 f_{tk}	N/mm ²	8.8	1.7~3.1
ヤング係数 E_c	N/mm ²	46,000	24,000~33,000
水結合材比	—	0.15	0.3~0.6
透気係数	m ²	4.5×10^{-20} 以下	$1 \times 10^{-17} \sim 1 \times 10^{-15}$
透水係数	cm/s	4.0×10^{-17}	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10}$
塩化物イオンの拡散係数	cm ² /年	0.0018	0.14~0.9
細孔空隙量	vol. %	3~4 程度	10 程度
設計に用いる収縮ひずみ	—	50 μ (熱養生後)	180 μ 程度
クリープ係数	—	0.7 (熱養生後)	1.5~2.2 程度

AFt 系 UFC と普通コンクリートの圧縮強度試験結果（直径 100 mm 高さ 200 mm の円柱供試体）の比較例を図 1.1 に示す。曲げ強度試験結果（100×100×400 mm の矩形供試体）の比較例を図 1.2 に示す。一般的なコンクリートは、設計圧縮強度 40 N/mm² の普通コンクリートである。

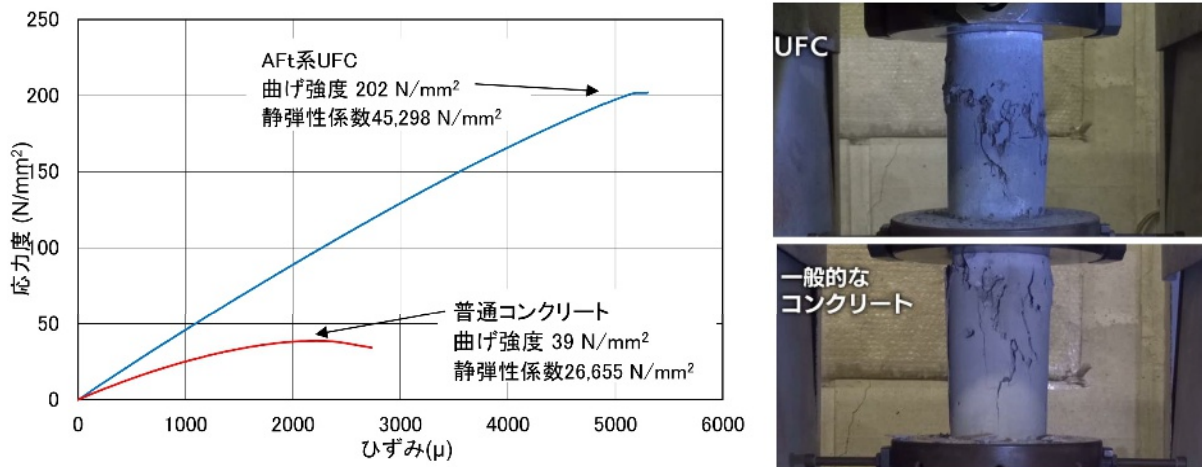


図 1.1 圧縮強度試験結果の比較

第1章 序論

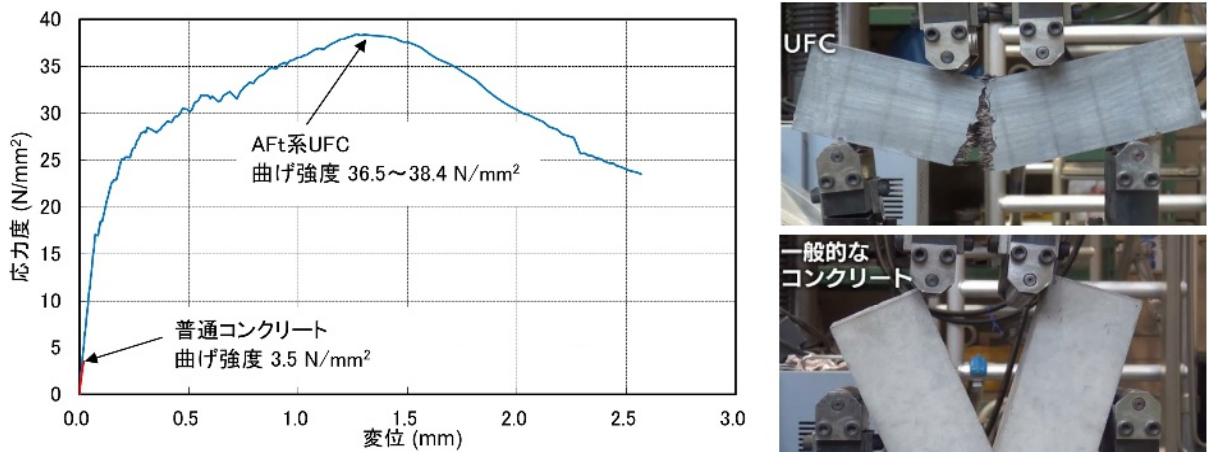


図 1.2 曲げ強度試験結果の比較

AFt 系 UFC の強度発現のメカニズムは、多硬質材料であるコンクリートの毛細管空隙 ($0.05 \sim 10 \mu\text{m}$) に、シリカフェームが充填するとともに、さらにエトリンガイト生成系混和材によってエトリンガイト水和物が生成することによって、毛細管空隙が減少し、それによってコンクリート硬化体組織の緻密化、高強度化が進む結果として強度が発現するというものである¹⁻²⁰⁾。AFt 系 UFC の硬化体組織の緻密化イメージを、図 1.3 に示す。

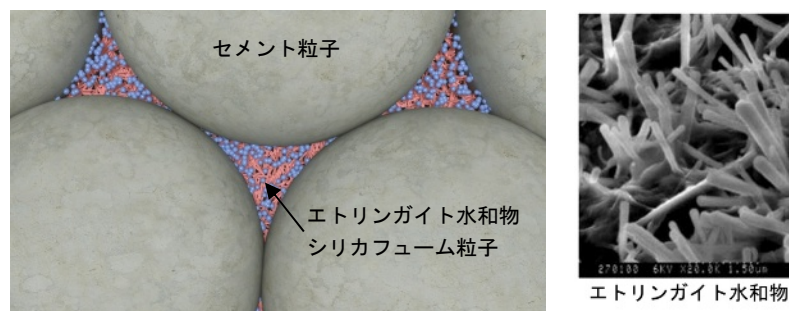


図 1.3 硬化体組織の緻密化イメージ

UFC の特徴である高い圧縮強度によって、部材厚の縮小と、高いプレストレス力の導入が可能となる。この部材厚の縮小は、部材に生じるプレストレス力による圧縮応力度が、大きくなるという効果もある。よって、UFC を用いることで、PC 構造として、より合理的な構造の実現が可能となるといえる。

1.4.2 既往の UFC を用いた構造と既往研究

国内では、2002年に歩道橋の酒田みらい橋に初めてUFCが使用された¹⁻²¹⁾。それ以降、歩道橋^{1-22), 1-23)}、空港のGSE橋梁の桁¹⁻²⁴⁾、道路橋の桁¹⁻²⁵⁾、鉄道橋の桁¹⁻²⁶⁾など多数の施工実績がある。

床版については、2010年に空港着陸帯においてUFC床版^{1-27), 1-28)}が施工されている。これは、羽

第1章 序論

田国際空港のD滑走路の着陸帯に6,934枚（約192,000m²）のUFC床版が使用されたものである（図 1.4）。このUFC床版は、標準寸法約7.8m×約3.6mで、1方向リブを有するUFC床版である。本床版は床版厚が250 mm（スラブ厚75 mm，リブ高 175mm）である。本研究の対象とするUFC床版は、この床版の構造をベースに研究を開始したものである。

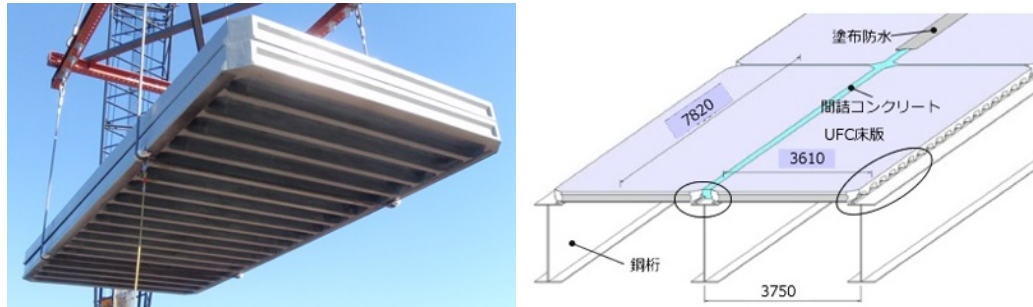


図 1.4 羽田国際空港 D 滑走路着陸帯部の UFC 床版¹⁻²⁹⁾

鋼桁と組み合わせて使用する道路橋床版の事例としては、既設床版の取替え用の床版として、UFCを用いた鋼桁に2辺支持されるRPC系UFC床版が研究されている^{1-30), 1-31)}。この床版は、スラブ厚が40mm，2方向のリブを有しリブの高さが100~185mmである。プレストレスは、PC鋼棒とPC鋼より線を併用している。平均床版厚さは144mm程度とされており、PC床版と比較して30%程度の軽量化が可能とされている。

海外においては、UFCと同様の超高強度繊維補強コンクリートが、UHPC（Ultra-High Performance Concrete）、UHPFRC（Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Cementitious composite）と呼ばれている。

1994年に、P. RichardとM. H. CheyrezyによってRPC系UHPCが開発され¹⁻³²⁾、1997年に、カナダにおいてSherbrooke橋（歩道橋、プレキャスト製、ポストテンション方式PC、3次元トラス構造）が世界で初めてのUHPCを用いた橋梁として完成した¹⁻³³⁾。2002年に、フランス土木学会（AFGC）からUHPFRCの基本的な指針が示された¹⁻³⁴⁾。2020年時点で、北米の300箇所以上の橋梁に適用されるなど、世界各国の橋梁でUHPC、UHPFRCが使用されている¹⁻³⁵⁾。

道路橋床版については、米国の連邦道路管理局FHWA（Federal Highway Administration）において、2011年にPC桁に支持される床版に、UHPCワッフル床版を採用したLittle Cedar Creek橋が施工されている（写真 1.4）。本橋には、RPC系UFCと同等のUHPCが使用されている。本床版は、既設橋梁の床版取替えにも適用されている。スラブ厚が64 mm，リブの高さが140 mm，リブ間隔が914 mmであり、部材内に鉄筋が配置されており、PC鋼材は配置されていない。

このUHPCワッフル床版、およびPC桁との接合部の構造性能を評価するために、室内載荷実験として、接合部を有する床版供試体の静的載荷試験および定点の繰返し載荷による疲労試験、接

第1章 序論

合部単体の試験体による終局荷重載荷実験，床版スラブ部の押抜きせん断破壊実験が行われている．また，実橋施工後に現場での重荷重積載トラックによる載荷を行い設計の検証が行われている．

このプロジェクトの報告書は，Publication No.FHWA-HIF-13-032としてまとめられ，2013年にUHPCワッフル床版の設計ガイドラインとしてまとめられている¹⁻³⁶⁾．床版本体と接合部の設計について規定されており，AASHTOの荷重と床版形状，配置するPC鋼材の対応表が示されている．仕様規定型設計法といえるが，多種多様な橋へ対応できるように，かつ設計計算を簡潔にするためのガイドラインが示されている．



撮影・提供: 齋藤公生氏 (2019/9, Iowa 州 Wapello County)

写真 1.4 米国 FHWA における UHPC 床版 (Little Cedar Creek 橋)

欧州においては，フランスの国家プロジェクトMIKTIによって鋼桁に2辺支持されるUHPFRCを用いたワッフル型床版の検討事例がある¹⁻³⁷⁾．スラブ厚が50mm，2方向のリブを有しリブの高さが330mm，リブ間隔が600mmであり，プレストレスはプレテンションPC鋼材とリブ間の外ケーブルを併用している．

このUHPFRC床版に対する研究としては，静的載荷による押抜きせん断耐力の確認が行われている¹⁻³⁸⁾．床版のリブで囲まれたスラブを対象としており，載荷試験の結果，Eurocodeの輪荷重設計値の約2～3倍の耐力が得られている．また，疲労載荷試験によってEurocodeに準拠した疲労耐力性能の確認が行われている¹⁻³⁹⁾．これは， $2 \times 100\text{kN}$ の定点載荷を200万回，さらに $2 \times 150\text{kN}$ の荷重振幅で10万回の繰返し載荷されている．これに対して剛性低下しないことによって安全性が確認されている．

1.4.3 ワッフル型 UFC 床版のコンセプト

鋼橋の床版形式の分類を，図 1.5 に示す．UFC はコンクリートの一種であり，UFC 床版はPC 鋼材によるプレストレストコンクリート床版であるため PC 床版に分類される．また，UFC 床版は工場で製作される床版であるため，プレキャスト PC 床版に分類される．

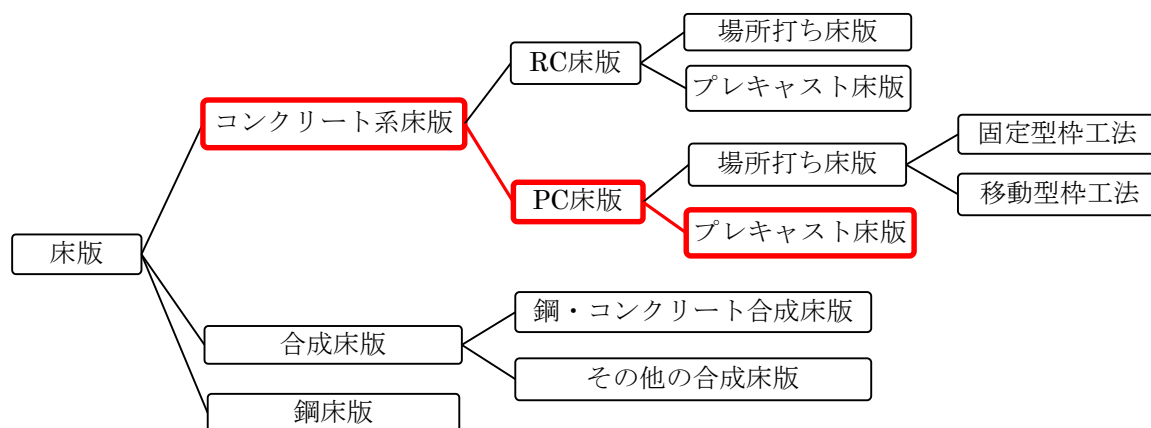


図 1.5 鋼橋の床版形式

UFC は緻密な透水係数や透気係数が小さく、材料として環境作用による影響を受けにくいことから耐久性の高い材料といえる。また、UFC の高い圧縮強度を活かし、大きなプレストレスを導入することによって部材厚を小さくすることで、鋼床版と同等の軽量化が可能となるといえる。よって、UFC 床版のコンセプトは、「軽量かつ性能の高いコンクリート系床版」として、研究を行うこととした。

1.4.4 既往の UFC 床版との比較

床版構造の比較について、国内外の既往のUFC床版と本研究におけるワッフル型UFC床版の比較を表 1.3に示す。既往構造は、いずれも主桁によって2辺支持される床版支間方向を橋軸直角方向とする構造である。本論文のUFC床版は、鋼横桁によって支持することで床版支間方向を橋軸方向に設定することで、広幅員の橋梁にも対応可能な構造とし、リブ間隔を密にすることによって床版厚を小さくし軽量化を追求した床版構造である。羽田D滑走路やFHWAでは実構造に対して施工実績があり、設計・施工が可能であることは示されている。一方、本床版のように床版厚を小さくすることが、疲労破壊に対する安全性など床版としての性能については、既往構造物の実績には無い部材厚の領域であることから新規性のある研究といえる。

研究内容については、FHWAのUHPC床版やMIKTIのUHPFRC床版については、前述のとおり、床版単体もしくは複数の床版を接合した試験体を対象とした載荷試験、定点の繰返し載荷による疲労試験が行われていた。接合部についても、接合部単体の引張もしくは曲げ載荷実験が行われていた。1.3節で述べた国内における輪荷重走行試験による疲労破壊に対する安全性の検証は海外では研究事例が確認できなかった。よって、ワッフル型UFCを用いた道路橋床版の輪荷重走行試験による疲労破壊に対する安全性の確認は、性能確認方法の点からも新規性を有する研究といえる。

第1章 序論

表 1.3 国内外の既往 UFC 床版とワッフル型 UFC 床版の比較

	UFCを用いた床版に関する既往研究, 構造				本研究
	羽田D滑走路 UFC床版 ¹⁻²⁹⁾	RPC系 UFC床版 ¹⁻³¹⁾	FHWA(米) UHPC床版 ¹⁻³⁶⁾	MIKTI(仏) UHPFRC床版 ¹⁻³⁷⁾	ワッフル型 UFC床版
床版厚	250mm	140～225mm	204mm	380mm	123mm
床版支間長	3.75m	3.1m	2.2m	6.5m	2.5m
床版支間方向	—	橋軸直角方向	橋軸直角方向	橋軸直角方向	橋軸方向
支持辺	4辺支持	2辺支持	2辺支持	2辺支持	4辺支持
リブ間隔	400mm	675mm	914mm	600mm	250mm
質量(概算)	0.34 t/m ²	0.32 t/m ²	0.60 t/m ²	0.40 t/m ²	0.18 t/m ²
開発段階	2010年施工	研究段階	2011年施工	研究段階	2019年施工

床版の設計法については、道路橋床版としての実績がある前述のFHWAのUHPC床版について、ガイドラインが示されている。本ガイドラインでは、実験等を踏まえた上で設計を簡潔にするために仕様規定型となっている。よって、本研究で指向する要求性能を示した上で、性能を直接的に確認するような、性能照査型の設計法をUFC床版に適用することは、新規性のある研究であるといえる。

このように、ワッフル型UFC床版の性能照査型設計法に関する研究は、床版構造（床版支間方向を橋軸方向とする部材厚が小さい極めて軽量のUFC床版）、UFC床版の疲労破壊に対する安全性確認方法（輪荷重走行試験）、設計法の検討（性能照査型）というそれぞれの点について新規性を有する研究といえる。

1.5 本研究の目的と構成

上記に述べた背景、課題を踏まえ、本研究の目的、着目点は以下の3点である。

- ・ UFCの特徴を活かし、鋼床版と同等に軽量、かつ疲労破壊に対して高い安全性を有するコンクリート系床版の開発
- ・ 性能照査型を指向した研究。構造計画、構造詳細の設定、輪荷重走行試験による疲労破壊の照査など、解析や実験による床版および接合部の性能照査を行う
- ・ 新しい床版形式に対する汎用的な性能照査型設計法の提案

本論文の構成は図 1.6に示すとおりであり、各章の概要は以下のとおりである。

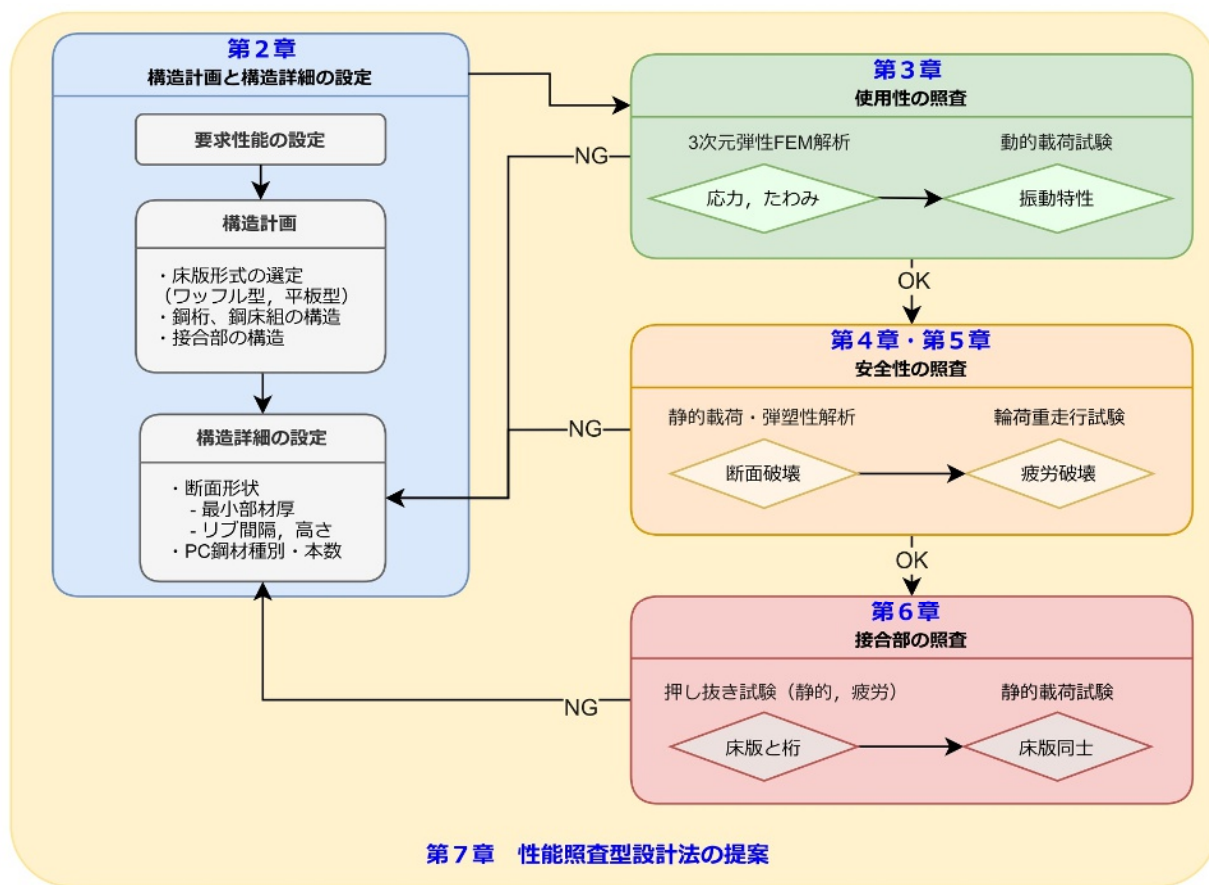


図 1.6 論文の構成

第1章では、本研究の背景として、既設の道路橋床版に顕在化している損傷の状況と求められる床版を示している。次に、道路橋床版に関する既往の研究をレビューすることにより、本研究の課題や方向性を示している。また、UFCの材料特性、既往のUFCを用いた構造物を示した上で、UFC床版のコンセプトを述べている。最後にこれらの背景や課題を踏まえた本研究の目的、着目点を示している。

第2章では、UFC床版の設計の流れ、要求性能の設定、構造計画、および構造詳細の設定を示している。UFCの材料特性と、既往のUFCを用いた橋梁や床版を示した上で、UFC床版のコンセプトを示している。構造計画においては、床版、接合部、鋼桁および床組構造の計画における考え方を示している。構造詳細の設定においては、床版の断面形状に関する検討として、最小部材厚、スラブ厚、リブ間隔、およびリブ高の検討と、支間長に対する床版厚の検討を示している。

第3章では、解析、および動的荷重による使用性の照査を示している。ここでは、第2章の構造計画で設定した床版形状に対して、3次元弾性FEM解析を用いた応答値の算出について、解析方法と解析結果および考察を示している。また、3次元弾性FEM解析を用いた、たわみの制限値に

第1章 序論

関する検討についても示している．使用性に関する振動の照査として，動的載荷による振動試験および実車両による載荷試験による検討を示している．

第4章では，解析，および静的載荷による断面破壊の照査を示している．輪荷重走行試験後の試験体である床版に静的載荷し，破壊の形態，および耐荷力を確認し，断面破壊に対する安全性の照査を示している．また，UFC床版内の鋼繊維の配向性状を洗い出し試験で確認し，梁試験体から抜き出した引張強度試験，梁試験体の静的載荷試験によるせん断力による断面破壊の安全性照査を示している．また，押抜きせん断破壊の照査についても示している．

第5章では，輪荷重載荷による疲労破壊の照査を示している．試験体と載荷装置を説明した上で，輪荷重静的載荷試験の試験方法と試験結果を示している．次に輪荷重走行試験の概要，試験方法，試験結果を示し，その結果の考察と疲労破壊の照査を示している．考察においては輪荷重走行試験で生じたひび割れについて，原因推定のために実施した，梁の動的載荷試験によるひび割れの再現に関する検討を示している．

第6章では，静的，および動的載荷による接合部の照査を示している．UFC床版と鋼桁の，スタッドを用いた接合部について，接合部の充填材料の検討，および接合部の押し抜き試験による使用性および安全性の照査，動的載荷による疲労破壊に対する安全性の照査を示している．また，床版同士の接合部についても，静的載荷による断面破壊に対する安全性の照査を示している．

第7章では，近年の性能照査型設計法に関する状況を示した上で，**第2章**から**第6章**の成果を踏まえた，UFC床版の性能照査型設計法を提案している．設計の流れ，要求性能の設定，安全係数，構造計画，構造詳細の設定を示した上で，使用性，安全性，および接合部に対する照査方法の標準を示している．また，UFC床版の維持管理計画として，維持管理の流れと，点検の精度向上，および維持管理の効率化に関する検討を示している．

第8章では，以上の章で得られた知見を結論としてまとめるとともに，今後に残された課題と展望を示している．

1 参考文献

- 1-1) 阪神高速道路株式会社，都市高速道路研究会：大震災から学ぶ都市高速道路における地震対策，電気書院，2005
- 1-2) 阪神高速道路株式会社，一般財団法人阪神高速道路技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策，第3版，2012
- 1-3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017
- 1-4) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，1964
- 1-5) 阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性，1991
- 1-6) 前田幸雄，松井繁之：道路橋 RC 床版の設計曲げモーメントに関する一考察，土木学会論文報告集，第252号，11-22, 1976
- 1-7) 岡田清，岡村宏一，園田恵一郎，島田功：道路鉄筋コンクリート床版のひび割れ損傷と疲労性状，土木学会論文報告集，第321号，49-61, 1982
- 1-8) 前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演論文集，221-224, 1984
- 1-9) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，Vol.374, 419-426, 1986
- 1-10) 松井繁之，佐々木洋，福本嘯士，梶川靖治：走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.34A, 409-420, 1988
- 1-11) 東山浩士，松井繁之：橋軸方向プレストレスしたコンクリート床版の走行荷重に対する疲労耐久性に関する研究，土木学会論文集，No. 605/I-45, 79-90, 1998
- 1-12) 真鍋英樹，松井繁之：チャンネル形状プレキャスト PC 床版の力学特性および設計手法に関する研究，土木学会論文集，No. 745/I-65, 89-104, 2003
- 1-13) 街道浩，渡辺滉，橘吉宏，松井繁之，堀川都志雄：鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol. 50A, 1119-1129, 2004
- 1-14) 久保圭吾，長尾千瑛，石崎茂，松井繁之：鋼・FRP 複合永久型枠を用いた打替え用合成床版の耐荷特性と疲労耐久性，構造工学論文集，Vol. 54A, 902-909, 2008
- 1-15) 松井繁之：輪荷重走行試験機を主体とした床版研究の動向，構造工学論文集，Vol. 55A, 1408-1419, 2009
- 1-16) 藤山知加子，商峰，櫻井信彰，前川宏一：直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード，土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, 106-116, 2010
- 1-17) 藤山知加子，松村寿男，高須賀丈広：3次元非線形 FEM 解析に基づく移動荷重下の鋼・コンクリート合成床版破壊過程の考察，土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 2, 227-237, 2014

第1章 序論

-
- 1-18) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 1-19) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No. 3, 2006
- 1-20) 寺村悟，坂井悦郎：高強度化のための混和材の開発，セメント・コンクリート，No.546, 1992
- 1-21) 武者浩透，大竹明朗，関文夫，大熊光，児玉明彦，小林忠司：無機系複合材料（RPC）を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol. 36, No. 11, 2-11, 2002
- 1-22) 南雲広幸，一宮利通，安宅之夫，石井精一：リバーサイド千秋連絡橋（仮称）の設計と施工～超高強度繊維補強コンクリートおよび制震橋脚構造を用いた歩道橋～，橋梁と基礎，12月号，5-12, 2007
- 1-23) 武者浩透，大島邦裕，細谷学，稲原英彦：UFC を用いた PC 歩道橋の事例とその特徴，プレストレストコンクリート，Vol. 49, No. 6, 48-56, 2007
- 1-24) 武者浩透，渡辺典男，福原哲，一戸秀久：UFC を用いた GSE 橋梁の設計と実験，プレストレストコンクリート，Vol. 50, No. 6, 13-20, 2008
- 1-25) 別府教，伊藤康輔，森田遼，一宮利通：デンカ小滝川橋の設計―場所打ちによる UFC 製道路橋―，プレストレストコンクリート，Vol. 57, No. 1, 20-25, 2015
- 1-26) 篠田貴宏，綱島竜大，岩本篤史，山口卓，北村健，趙唯堅：UFC 鉄道橋の設計と施工―京王井の頭線下北沢駅付近橋梁架け替え工事―，橋梁と基礎，Vol.52, No.4, 15-20, 2018
- 1-27) 武者浩透，大竹明朗，横井謙二，野口孝俊：高耐荷 UFC 床版構造と量産化システムの開発：コンクリート工学，Vol. 48, No. 11, 2010
- 1-28) 渡邊有寿，南浩郎，大野俊夫，三浦一浩：UFC 床版製作における AFt 系 UFC の製造・品質管理，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，289-292, 2010
- 1-29) サクセム研究会：羽田空港 D 滑走路棧橋部床版，www.suqcem.com/sekou/sekou04.html
- 1-30) 趙唯堅，大島邦裕，安波博道：UFC プレキャスト PC 床版の技術的検討，土木学会第 64 回年次学術講演会，I-358, 715-716, 2009
- 1-31) 北村健，岩崎郁夫，趙唯堅，岸田政彦，石原陽介，岩城一郎：道路橋 UFC プレキャスト床版の耐荷性および耐疲労性に関する検証，構造工学論文集，Vol. 63A, 806-819, 2017
- 1-32) P. Richard, M. H. Cheyrezy: Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP144-24, 507-518, 1994
- 1-33) Pierre Y. Blais, Marco Couture: Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure, PCI Journal, Vol.44, No.5, 60-71, 1999
- 1-34) Association Francaise de Genie Civil: Ultra high performance fibre-reinforced concrete: Interim recommendations, Bagneux, AFGC-Setra, 2002

- 1-35) Benjamin A. Graybeal, Eugen Brühwiler, Byung-Suk Kim, François Toutlemonde, Yen Lei Voo, Arash Zaghi, International Perspective on UHPC in Bridge Engineering, ASCE Journal of Bridge Engineering Volume 25 Issue 11, 0420094-1-16, 2020
- 1-36) Federal Highway Administration: Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections, FHWA -HIF-13-032, 2013
- 1-37) F. Toulemonde, and Resplendino, J: Design and Building with UHPFRC, Chapter 17 UHPFRC Waffle Deck Concept for a Bridge at Livron-Loriol, 249-262, 2011
- 1-38) F. Toutlemonde, J.C. Renaud, L. Lauvin, S. Brisard and J. Resplendino: Local bending tests and punching failure of a ribbed UHPFRC bridge deck, 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-6), pp.1481-1489, 2007
- 1-39) F. Toutlemonde, L. Lauvin, J.C. Renaud, T. Kretz and S. Brisard: Fatigue performance of an UHPFRC ribbed slab applied as a road bridge deck verified according to the EUROCODES, 5th International Conference on Concrete Under Severe Conditions (CONSEC07), pp.1191-1200, 2007

2章 構造計画と構造詳細の設定

2.1 概 説

本章においては，UFC 床版の設計の流れ，要求性能および限界状態の設定と，UFC 床版の構造，UFC 床版と組合せる鋼桁および床組構造，および接合部の構造について述べる．本章の最後に，構造詳細の設定として，床版断面形状について床版部材の最小断面の設定，スラブおよびリブの寸法等に関する検討を述べる．

2.2 設計の流れ

従来の道路橋床版は，道路橋示方書²⁻¹⁾（以下，道示という）に準拠して設計されるが，UFC は，道示に規定されていない材料であることから，UFC 床版に求める性能を設定し，床版の性能を照査することによって設計をおこなうこととした．UFC 床版の設計の流れを図 2.1 に示す．床版の設計は，要求性能の設定，構造計画，構造詳細の設定，性能照査で構成し，これらの内容は施工および維持管理に関する計画と同時に行うものとした．要求性能，構造計画，構造詳細の設定に関する検討を本章の次節以降に，床版の使用性および安全性の照査に関する検討を第 3 章～第 5 章に，接合部の照査に関する事項を第 6 章で述べる．

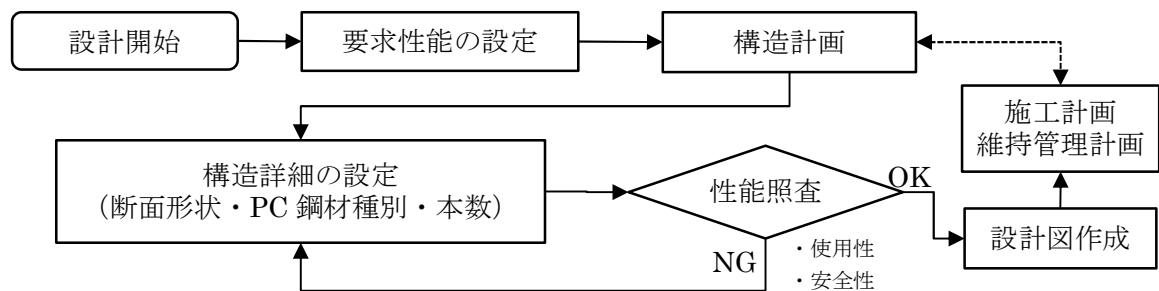


図 2.1 UFC 床版の設計の流れ

2.3 要求性能の設定

要求性能は，土木学会の 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】²⁻²⁾（以下，コン示という）に準拠し使用性および安全性を設定した．本論文の対象とする要求性能，性能項目，限界状態，照査指標，および考慮する作用を表 2.1 に示す．なお，車両の輪荷重の繰返し作用による疲労破壊については，疲労耐久性として耐久性に分類される場合もあるが，本論文ではコン示に準拠し，安全性に分類することとした．

表 2.1 本論文の対象とする UFC 床版の要求性能

要求性能		限界状態	照査指標	考慮する作用
使用性	床版として機能が健全であり，車両走行が可能である	過度な変形・ひび割れの発生を防ぐ	応力度	永続作用 変動作用
			たわみ	永続作用 変動作用
	快適に車両走行が可能である	走行性の限界	振動数	永続作用 変動作用
		外観の阻害	応力度	永続作用 変動作用
安全性	UFC 床版が，使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさない	断面破壊	耐荷力 破壊形態	永続作用 変動作用 偶発作用
		疲労破壊	破壊回数 破壊形態	変動作用

使用性における応力度の照査は，UFC に生じる圧縮応力度，および引張応力度に制限値を設けるもので，具体的な限界状態は設定していない．コンクリート標準示方書では，応力度の制限を「構造物の使用状態において，過度な変形，有害なひび割れの発生を防ぐために，曲げモーメントおよび軸方向力によるコンクリートの圧縮応力度，鉄筋の引張応力度は，適切な制限値を設定し，それ以下となるようにしなければならない」とされている．これは，過度なクリープひずみ，大きな圧縮力に起因して軸方向ひび割れ等を避けるために，コンクリートの圧縮応力度を制限されているものである．UFC の応力度についても，従来のコンクリートと同様にクリープ等による過度な変形，有害なひび割れの発生を防ぐために，応力度の制限値が設定されている．

コン示に要求性能として示される復旧性については，地震後等の偶発作用に対して損傷に対して，修復方法等を設定すること前提に，本論文の対象としないこととした．材料の耐久性については，設計耐用期間にわたり使用性および安全性を保持する性能であるが，UFC 指針²⁻³⁾では，材料の特性から，中性化，塩化物イオンの侵入，凍結融解作用，化学的浸食およびアルカリシリカ反応に関する照査を省略できるものとされている．よって，材料の耐久性は，本論文の対象としないこととした．

2.4 構造計画

2.4.1 床版の構造

ワッフル型UFC床版（図 2.2，図 2.3）は，主に新設橋に適用することを想定した軽量の床版である．鋼床版と同等の質量とするために，輪荷重を受けるスラブとPC鋼材を配置した2方向リブからなる床版である．

UFC床版は，既往実績の空港着陸帯における床版^{2-4), 2-5)}を参考に，部材厚のより小さいスラブをリブで補剛する床版構造として検討を開始した．UFC床版は，工場で製作するプレキャスト床版であり，1枚の平面形状は，短辺を陸上輸送および鋼横桁間隔（約2.5m）とし，長辺を製作可能な長さ（橋梁幅員を分割）とすることとした．

UFC床版内に配置するPC鋼材は，部材内に大きなプレストレス力を導入するために高強度PC鋼材を使用する．鉄筋については，UFC指針に準拠し構造部材としては配置しないものとした．ただし，壁高欄や伸縮装置との接合部にのみ配置するものとした．

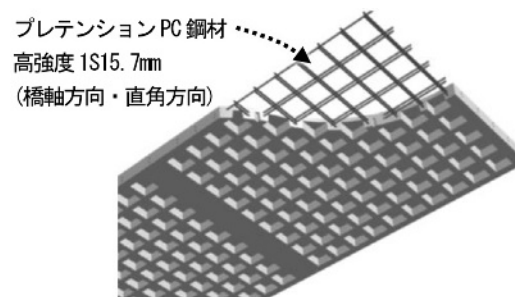


図 2.2 ワッフル型 UFC 床版

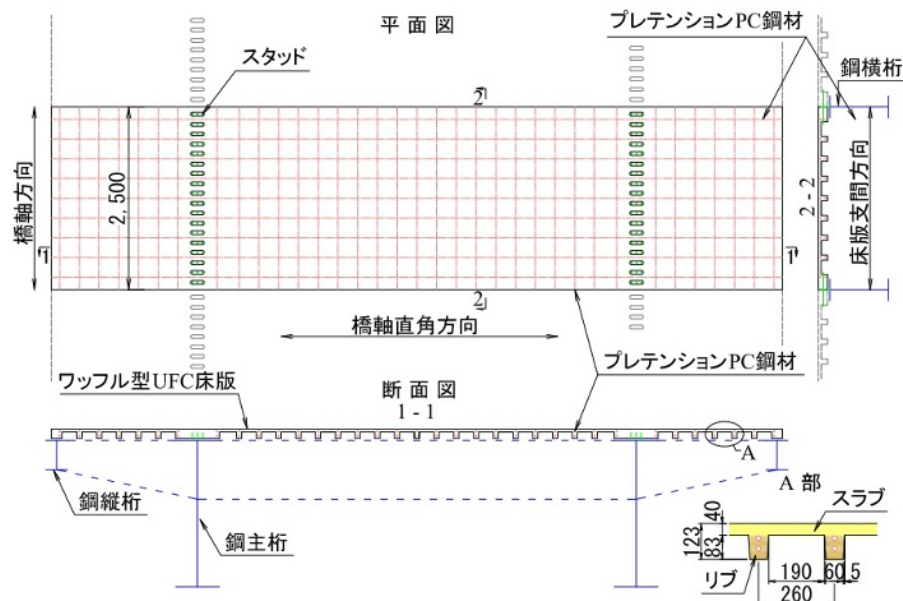


図 2.3 ワッフル型 UFC 床版の構造概要

平板型UFC床版（図 2.4, 図 2.5）は、本論文の対象としないが構造概要を説明する．主に既設RC床版の取替え用の床版に適用することを想定した軽量の床版である．平板型UFC床版は、ワッフル型UFC床版より重いが、旧基準²⁻⁶⁾の床版厚が小さい既設RC床版と同等以下に軽量であり、リブの無い平板とした．また、1方向のプレテンション方式とすることによって製作コストの削減をはかった床版である．平板型UFC床版の解析による使用性の照査、輪荷重走行試験による安全性に関する疲労破壊の照査、試験製作による施工性の照査を行っている²⁻⁷⁾⁻²⁻¹⁰⁾．

2018年に阪神高速道路15号堺線・玉出入路橋の床版取替え工事において、試験施工を実施している²⁻¹¹⁾⁻²⁻¹³⁾．写真 2.1に玉出入路橋における平板型UFC床版の架設状況を示す．架橋地点は、本線と街路に挟まれた狭隘な架橋地点であったため、工事に合わせて開発した自走式重機「アームローラ」によって運搬および架設した．

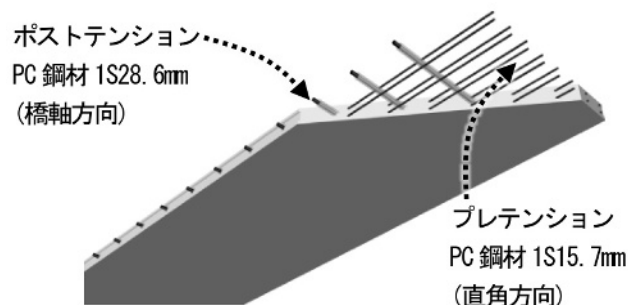


図 2.4 平板型 UFC 床版

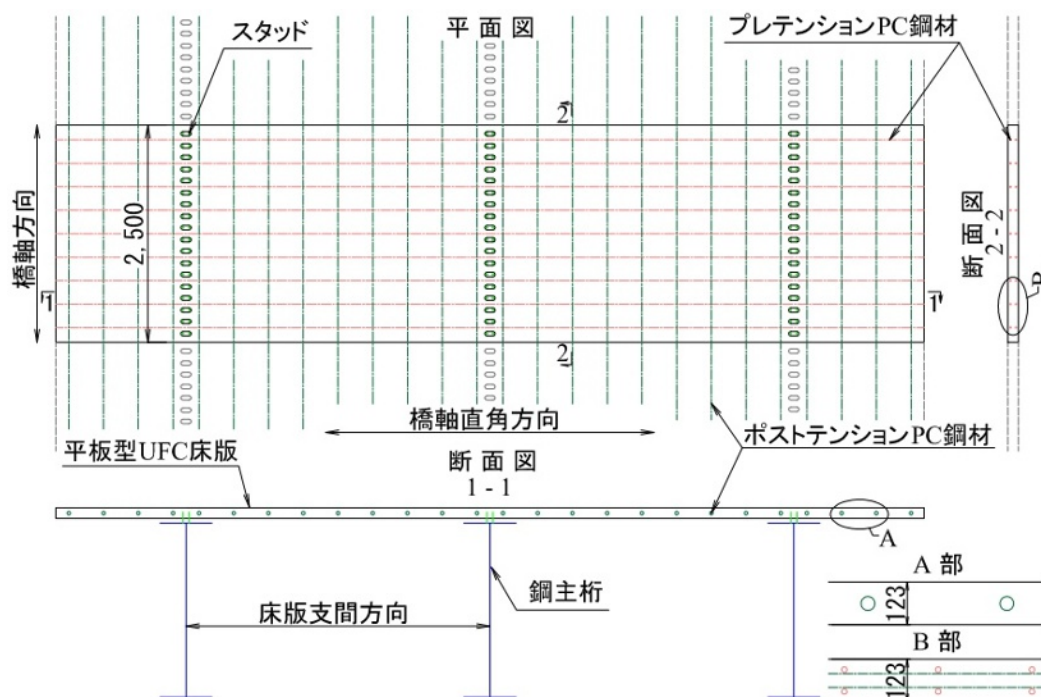


図 2.5 平板型 UFC 床版の構造概要



写真 2.1 平板型 UFC 床版架設状況（阪神高速道路 玉出入路橋）

ワッフル型UFC床版と平板型UFC床版の構造的な特徴を表 2.2にまとめる。ワッフル型UFC床版（床版厚123mm）、平板型（123mm）と、他の床版形式との質量の比較を図 2.6に示す。

表 2.2 2 種類の UFC 床版の構造的な特徴

		ワッフル型	平板型
床版形状		スラブ+2方向リブ	平板（リブ無し）
床版の支持辺数		4辺支持	2辺支持
主たる支間方向		橋軸方向	橋軸直角方向
プレストレス方式	橋軸	プレテンション	ポストテンション
	直角	プレテンション	プレテンション

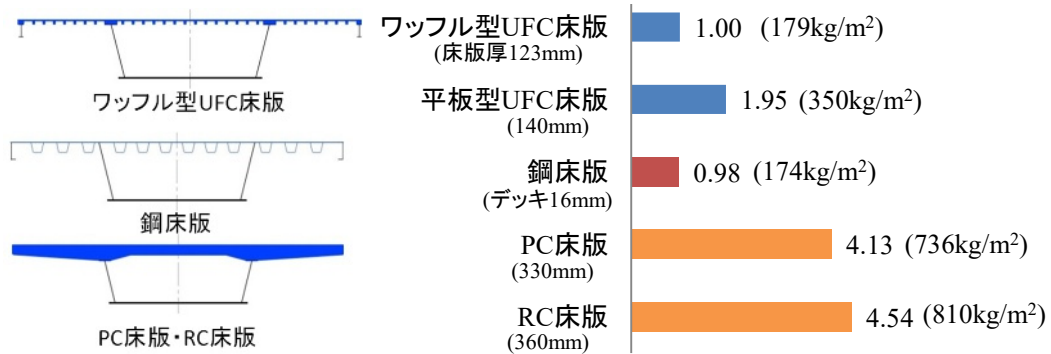


図 2.6 床版質量の比較

2.4.2 接合部の構造

ワッフル型 UFC 床版同士の接合部の構造を図 2.7 に示す。床版同士の接合は鋼横桁上で、床版の橋軸方向の端部リブ間を結合する構造である。結合部は UFC 床版同士の隙間に、場所打ち UFC を充填するウェットジョイントである。この接合部に、高力ボルトまたは PC 鋼棒によって

軸力を導入する PC 構造とした。高力ボルトの軸力は降伏軸力の 75%とし、活荷重作用時に高力ボルトの軸力による圧縮応力によって目地に引張応力を生じないようにボルト径、本数を決定する。鋼横桁上には孔あき鋼板ジベル (PBL) を設け、間詰め部のモルタルを介して床版と鋼横桁を接合する構造である。

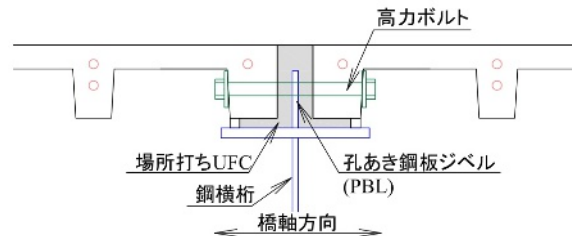


図 2.7 床版同士の接合部

床版と鋼桁の接合部を図 2.8 に示す。この接合構造は、従来のプレキャスト PC 床版を用いた合成桁と同様に UFC 床版にスタッド用孔を設け、鋼桁上に設けたずれ止め (頭付きスタッドジベル) と接合する構造である。

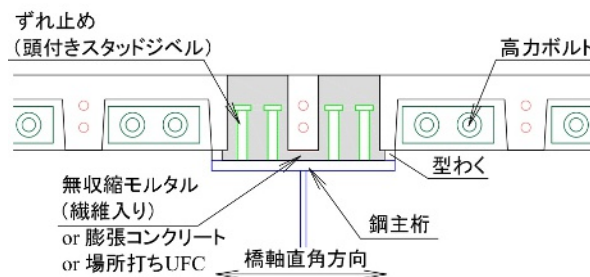


図 2.8 床版と鋼桁の接合部

鋼桁上フランジと床版間に、縦断勾配および横断勾配への対応や床版の高さの調整を考慮して高さ 50mm 程度の間詰めを設けることとしている。この間詰め材としては、合成繊維を混入した無収縮モルタルまたは場所打ち UFC を必要耐力や施工条件に応じて使用する。スタッド用孔の間詰め材としてはフランジ上と同材料または膨張材入りのコンクリートを使用する。

フランジ上およびスタッド用孔の間詰めには、剥落防止を目的として施工時の流動性に関する充填試験を踏まえ、超高分子ポリエチレン繊維 (以下、PE 繊維という) 繊維長 6 mm を 0.2 vol.% 混入するものとした²⁻¹⁴⁾。なお、この PE 繊維による充填材料に関する検討と、ずれ止めの押抜きせん断試験、疲労試験に関する検討については、6.2 節に示す。

2.4.3 鋼桁および床組構造

図 2.9 にワッフル型 UFC 床版と鋼桁による合成桁を示す。UFC 床版は、鋼縦桁、横桁等の床組

および鋼主桁によって支持される。床組または主桁とずれ止めによって接合した合成桁として上部構造を形成する。よって、UFC床版は床組または主桁によって4辺支持される床版である。4辺支持とすることによって、輪荷重の通過による交番せん断力やねじりモーメントの作用を橋軸直角方向に分散させ、床版の疲労破壊に対する安全性を高める効果がある^{2-15), 2-16)}。

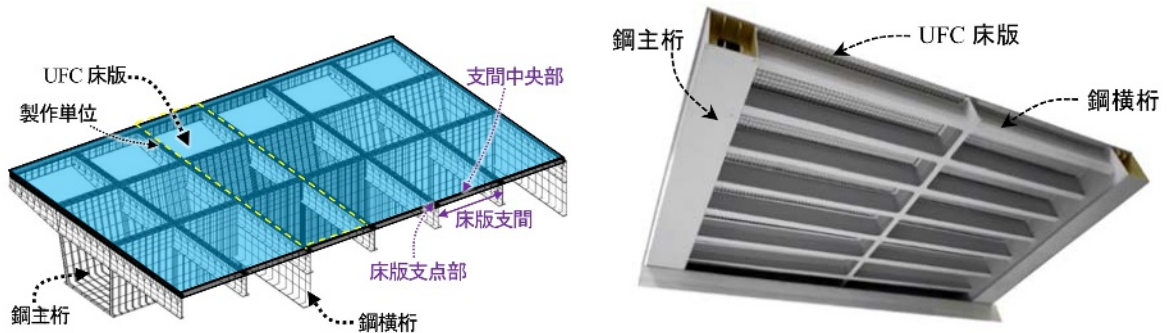


図 2.9 ワッフル型 UFC 床版と鋼桁による合成桁

鋼横桁を橋軸方向に2.5m程度の間隔で配置し、橋軸方向を主たる曲げが作用する床版支間方向とする。このように、床組構造によって支持された橋軸方向を床版支間方向とすることによって、図 2.9のように鋼主桁を少数化し主桁間の間隔が広がった場合も、主たる床版支間は変わらず対応が可能である。よって、床版支間を橋軸方向とすることによって、UFC床版を様々な鋼桁の橋梁に汎用的に使用することができるといえる。

2.5 構造詳細の設定

2.5.1 最小部材厚の検討

(1) かぶり・あき

AFt 系 UFC は、鋼繊維（長さ 15mm もしくは 22mm）を 1.75vol.%混入している²⁻¹⁷⁾。22mm の繊維が部材直角方向に配向した場合に突出しない部材寸法は 30mm である。一方、舗装補修の防水層撤去時に切削機によって床版が 2mm 程度切削されることがある²⁻¹⁸⁾。よって、維持管理の確実性に配慮し、スラブの最小部材厚を 40mm とする。ただし、今後、切削技術が向上することもあると考えられるため、感度分析として本章では 30mm についても検討対象とした。

UFC 指針に準じた最小かぶりおよびあきを反映した床版の最小寸法を図 2.10 に示す。PC 鋼材は橋軸方向、直角方向の 2 方向に 2 本ずつ 4 段配置するため、それぞれのかぶり、平行に配置する PC 鋼材同士のあきを考慮した配置とした。

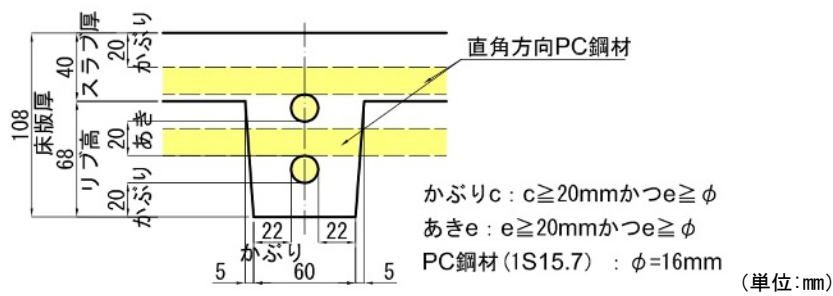


図 2.10 最小部材寸法

(2) スラブの押抜きせん断に関する検討

道示の設計活荷重 (T 荷重) に対する, 抵抗断面にリブを含めないスラブの押抜きせん断耐力による照査を実施した. T 荷重は, 道示に準拠し橋軸方向 0.2m×直角方向 0.5m に 140kN (衝撃含む) を分布荷重として載荷されるものとして, この面積に対するスラブの押抜きせん断耐力を算出した. UFC の押抜きせん断耐力は, 式(2.1)に示す UFC 指針における面部材に対する設計押抜きせん断耐力 V_{pcd} の算出式によって算出した.

$$V_{pcd} = f_{vd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (2.1)$$

ここに,

f_{vd} : UFC の斜めひび割れ直角方向の設計平均引張強度 (N/mm²) $f_{vd} = f_{tk} / \gamma_c = 8.8 / 1.3 = 6.8$ N/mm²

u_p : 載荷面から $d/2$ 位置の設計断面の周長 (m)

d : 有効高さ (m), γ_b : 部材係数 1.3

図 2.11 に UFC によるスラブの押抜きせん断耐力を示す. 参考に, コン示および道示から算出した 50N/mm² のコンクリートの押抜きせん断耐力を示す.

UFC 床版の押抜きせん断耐力は, スラブ厚 30~70mm に対して 238.5kN~615.1kN であり 50N/mm² のコンクリートと比較して 2.3~2.8 倍大きく, T 荷重 (衝撃込み) 140kN に対して 1.7~4.4 の安全率を有している. よって, スラブ厚が 30mm 以上あれば, T 荷重に対する押抜きせん断破壊に安全性を有するといえる.

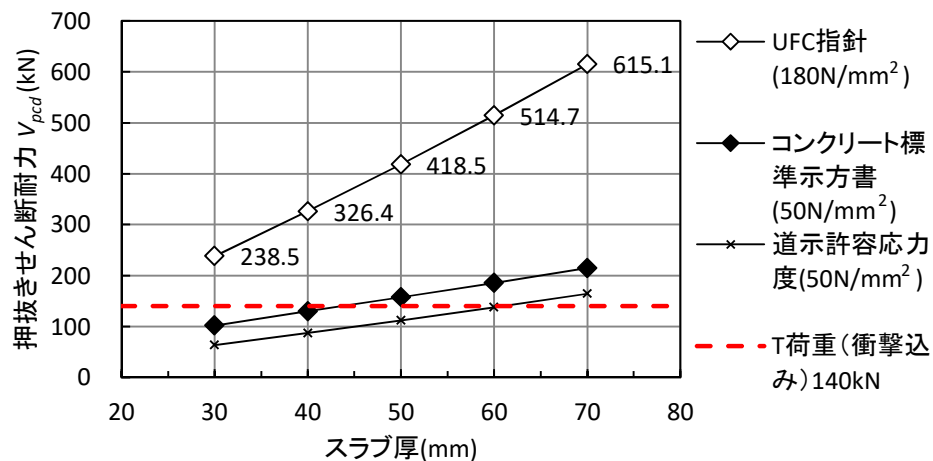


図 2.11 スラブ厚ごとの押抜きせん断耐力

2.5.2 スラブ厚およびリブ間隔の検討

(1) 検討内容

リブ間隔の検討として、表 2.3 に示すように、床版支間 2.5m、床版厚 123mm を固定値、スラブ厚とリブ間隔（リブ中心間の距離）を変数として、床版の応力度を算出した。荷重は床版自重、プレストレス力、活荷重、舗装とし、これらによって生じる応力度を合計した活荷重時の合成応力度を算出した。

表 2.3 リブ間隔の検討パラメータ

部 位	床版形状	変 数
床版支間長	2.5 m	固 定
スラブ厚 t	30~70 mm	○
リブ高	123mm-スラブ厚	固 定
リブ間隔	150~500	○

活荷重による断面力は道示に準拠して算出した。床版支間方向（車両進行方向に平行）および曲げモーメントの向き（支間方向）を踏まえ、衝撃を含む T 荷重による床版の単位幅あたりの設計曲げモーメント M_L (kN・m) を式(2.2)によって算出した。なお、式(2.2)はコンクリート橋における 1 方向版を想定しているため、鋼床組による柔な支持、および 4 辺支持に伴う橋軸方向と直角方向の曲げの分散の影響について第 3 章に示す 3 次元弾性 FEM 解析の結果によって活荷重応力度の補正をおこなうものとし、鋼床組による支持および 4 辺支持に関する曲げモーメントの低減係数 α を乗じることとした。 α は道示の設計曲げモーメントによる支点部または支間中央部

の応力度と、3 次元弾性 FEM 解析における支点部のスラブ上縁および支間中央部のリブ下縁の応力度との比率によって算出した低減係数である。

$$M_L = \pm(0.22L + 0.08) P \times 0.8 \times \alpha \quad (2.2)$$

ここに、

L : T 荷重に対する床版の支間 (m)

P : 道示の設計荷重, T 荷重 $P=100$ (kN)

α : 4 辺支持に関する曲げモーメントの低減係数 支点部 0.7, 支間中央部 : 0.3

プレストレス力については、リブごとに上縁から 40mm と 85mm の位置に PC 鋼材 1S15.7(SWPR7HT)を 2 段配置するものとし、活荷重時の有効プレストレス $0.6\sigma_{pu}=1,332\text{N/mm}^2$ によって算出したプレストレス力によって断面力を算出した。

設計に用いる UFC の応力度の制限値は下記の通りである。

圧縮応力度の制限値 $0.6f'_{ck}$, ($0.6 \times 180 = 108\text{N/mm}^2$) ここに、 f'_{ck} 圧縮強度の特性値

引張応力度の制限値 f_{crd} , (8.0N/mm^2) ここに、 f_{crd} 設計ひび割れ発生強度

(2) 検討結果

図 2.9 における床版支点部の応力度を図 2.12 に示す。図の上下にハッチングしている部分は UFC の制限値 (圧縮 $0.6f'_{ck} = 108\text{N/mm}^2$, 引張 $f_{crd} = 8.0\text{N/mm}^2$) を超過している範囲を示している。応力度の符号は正が引張, 負が圧縮である。下縁側は、スラブ厚 30mm かつリブ間隔 150mm において圧縮応力度が 101.2N/mm^2 (制限値 108N/mm^2 の 93.7%) であった。他の組合せの場合にも 67.1N/mm^2 以上の圧縮応力度が生じていた。上縁側の引張応力度について拡大図を図 2.13 に示す。スラブ厚 30mm かつリブ間隔 400mm 以下およびスラブ厚 40mm かつ 250mm 以下においては引張応力度が制限値 8N/mm^2 以下であった。

図 2.9 における床版支間中央部の応力度を図 2.14 に示す。上縁側の圧縮応力度は、スラブ厚 30mm かつリブ間隔 500mm が最大となり 40.76N/mm^2 (制限値の 37.7%) であった。下縁側の引張応力度は、スラブ厚 30mm の場合はリブ間隔 400mm 以上、それ以外のスラブ厚の場合はリブ間隔 350mm 以上で引張応力度が制限値を超過した。

第 2 章 UFC 床版のコンセプトと構造計画

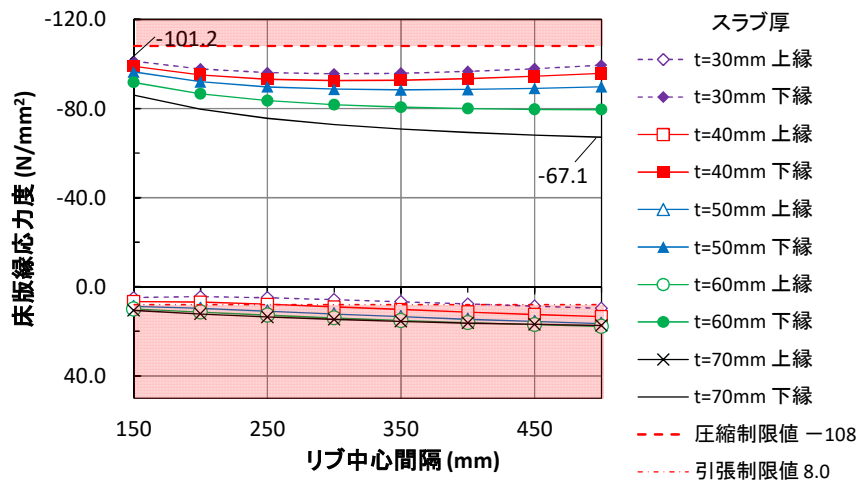


図 2.12 支点部の応力度（スラブ厚とリブ中心間隔を変数）

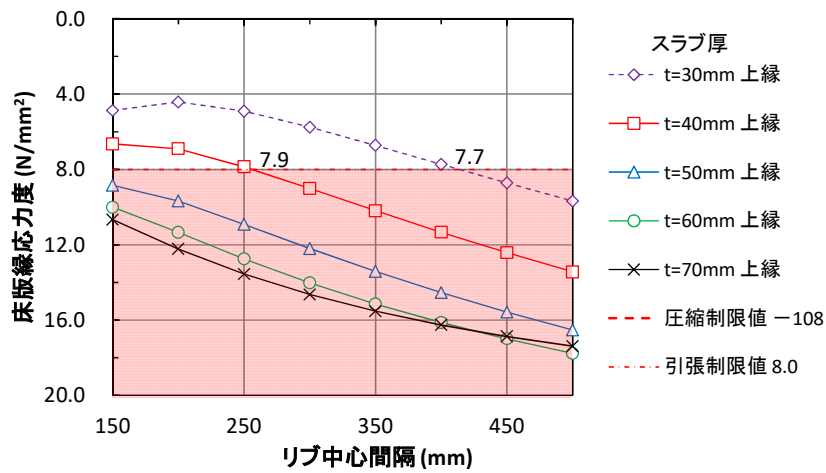


図 2.13 支点部上縁の応力度（スラブ厚とリブ中心間隔を変数）

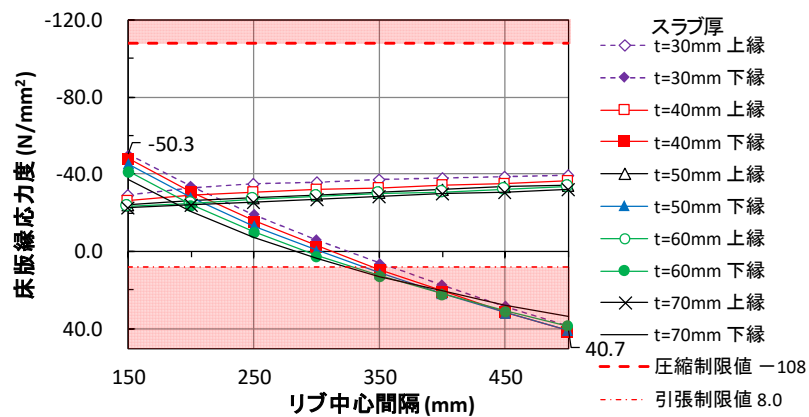


図 2.14 支間中央部の応力度（スラブ厚とリブ中心間隔を変数）

(3) 検討結果の考察

床版支点部の圧縮応力度は最大 101.2N/mm^2 程度生じており制限値に対して余裕がないことから、リブあたりの PC 鋼材本数を 2 段配置した場合が最大といえる。よって、プレストレス力を固定とすると、支点部上縁の引張応力度から、床版厚 123mm の場合、スラブ厚 50mm 以上は設計が成立せず、スラブ厚 30mm の場合はリブ間隔を 350mm 以下、スラブ厚 40mm の場合は 250mm 以下とする必要があるといえる。

スラブ厚が大きくなると設計上不利になる理由は、断面図心より断面の下縁側に位置するスラブの断面積が大きくなることによって図心位置が下がること、断面積が大きくなるためプレストレスによって導入できる圧縮応力度が小さくなること、床版自重が増加することによるものである。

2.5.3 スラブ厚およびリブ高の検討

(1) 検討内容

スラブ厚およびリブ高の検討として、表 2.4 に示すように、床版支間 2.5m 、リブ間隔 250mm を固定値、スラブ厚とリブ高（床版厚－スラブ厚）を変数として、床版の応力度を算出した。床版厚を最小寸法の 108mm から 5mm ずつ 130mm まで増加させた。荷重は床版自重、プレストレス力、活荷重、舗装とした。活荷重は式(2.2)によって算出した。プレストレス力による断面力は、図 2.15 に示すようにリブ高変化に対して 2 段目 PC 鋼材の位置を断面図心から 44mm の位置として算出した。

表 2.4 スラブ厚およびリブ高の検討パラメータ

部 位	床版形状	変 数
床版支間長	2.5 m	固 定
スラブ厚 t	$30\sim70\text{ mm}$	○
リブ高	$(108\sim250\text{mm}) - \text{スラブ厚}$	○
リブ間隔	250mm	固 定

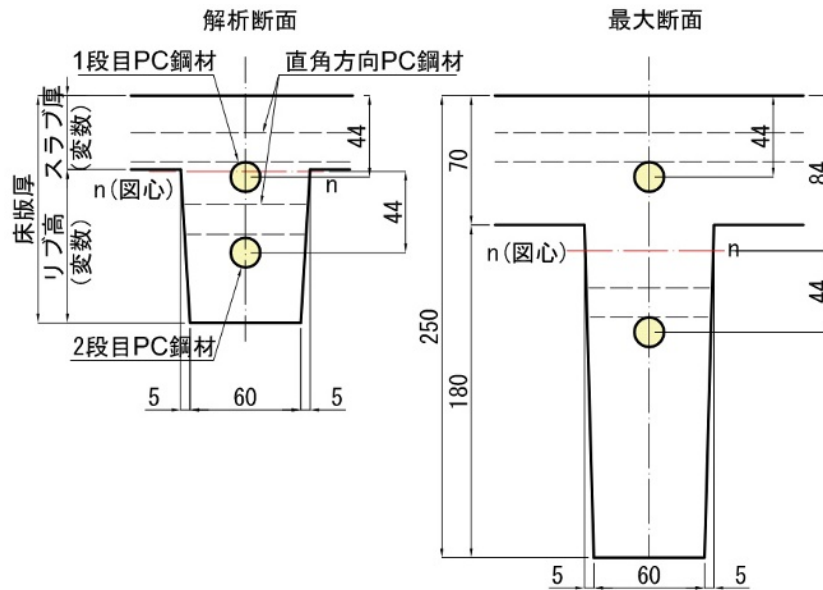


図 2.15 リブ高変化に対する PC 鋼材位置

(2) 検討結果

床版支点部の応力度を図 2.16 に示す．スラブ厚 30mm かつ床版厚が 108mm の場合は，圧縮応力度 118.5N/mm^2 ，引張応力度 12.2N/mm^2 が生じている．床版厚 113mm 以下については下縁の圧縮応力度，上縁の引張応力度とも制限値を超過しており，この部材設定では応力度を制限値内とすることができない．上縁側の引張応力度について拡大図を図 2.17 に示す．床版厚 118mm 以上で引張応力度が制限値以下となった．

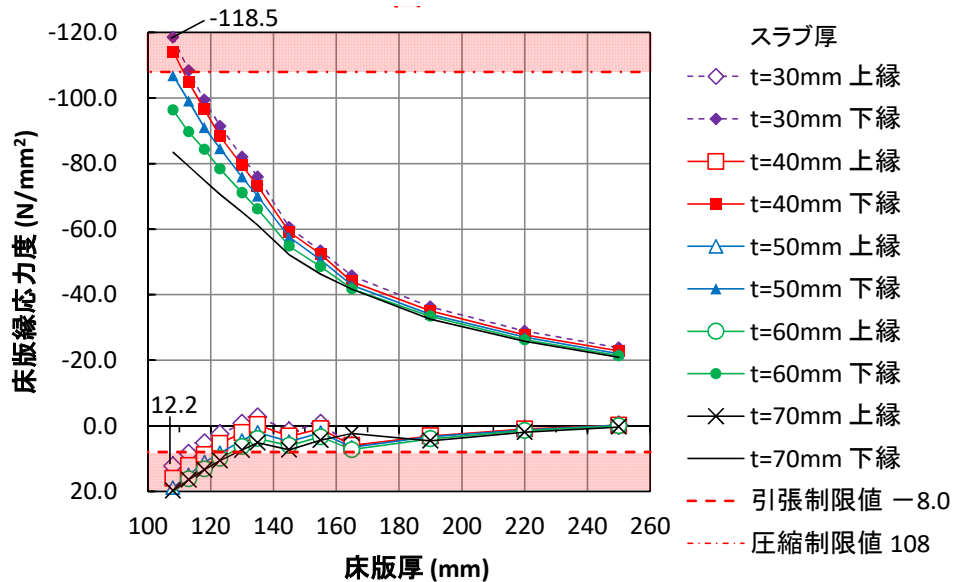


図 2.16 支点部の応力度（スラブ厚とリブ高を変数）

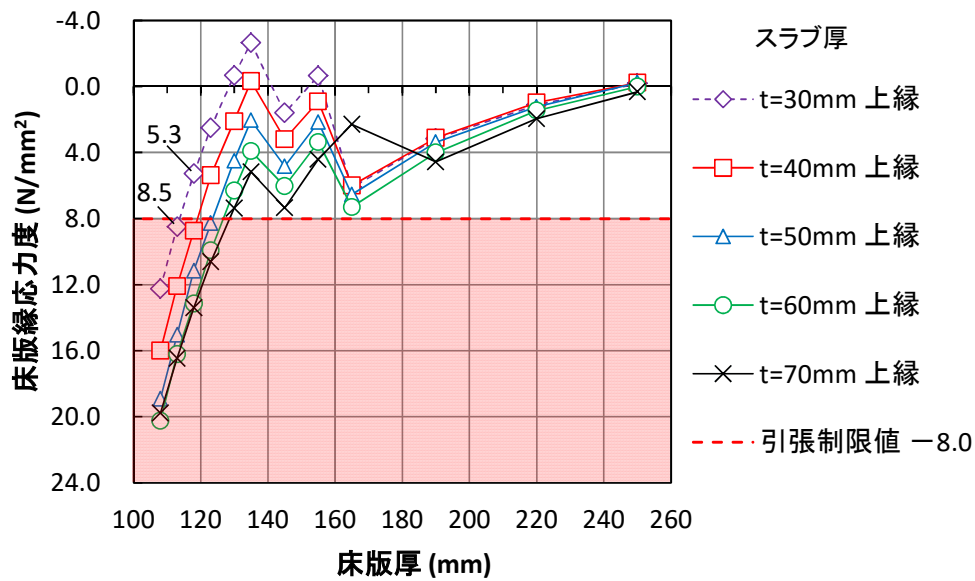


図 2.17 支点部上縁の応力度 (スラブ厚とリブ高を変数)

支間中央部の応力度を図 2.18 に示す．支間中央部については，上下縁とも引張応力度は生じておらず，圧縮応力度の最大は 36.5N/mm^2 であり制限値以下であった．

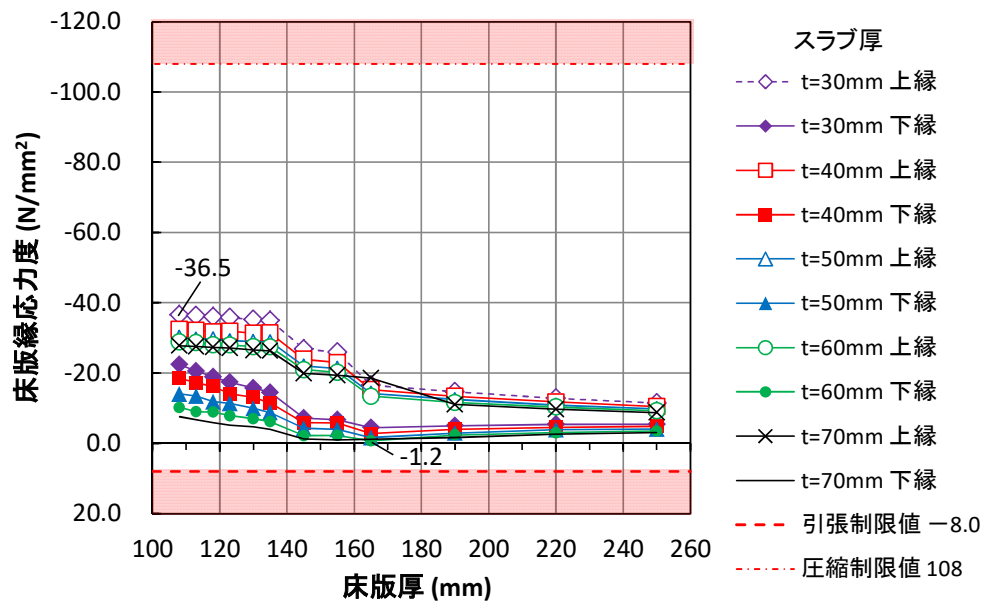


図 2.18 支間中央部の応力度 (スラブ厚とリブ高を変数)

活荷重によるたわみを図 2.19 に示す．たわみは，図 2.20 に示すように，補正係数 α を考慮しない式(2.2)の曲げモーメント M_L を，両端固定梁の支間中央の曲げモーメントと仮定して，たわみ δ を算出したものである．参考に縦桁支間が 2.5m の鋼床版のたわみを示す．床版厚 123mm スラブ厚 40mm のたわみは最大 5.04mm であった．

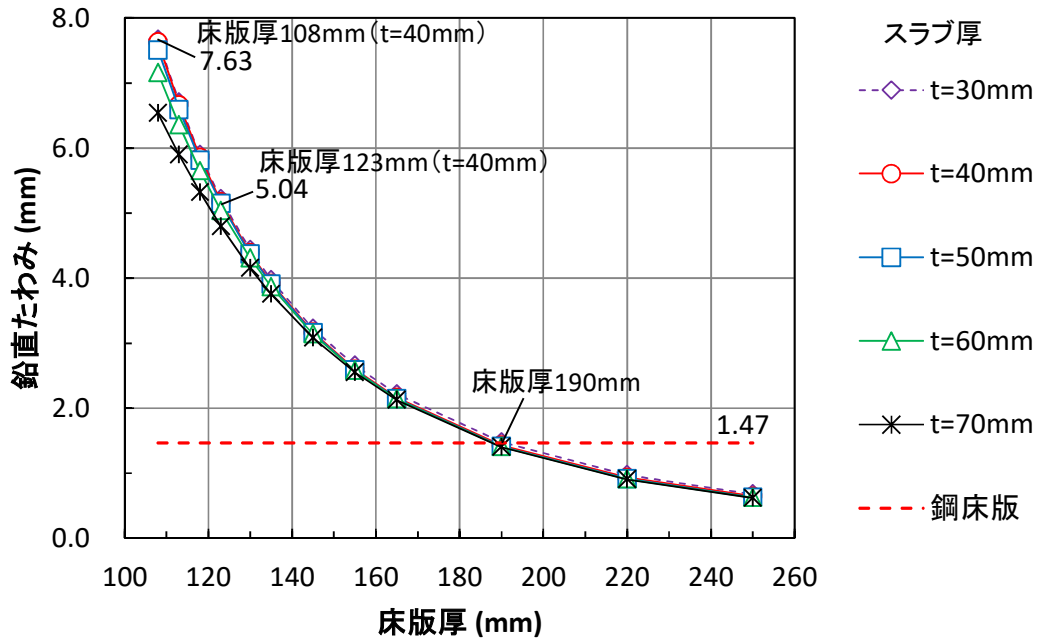


図 2.19 活荷重による支間中央のたわみ

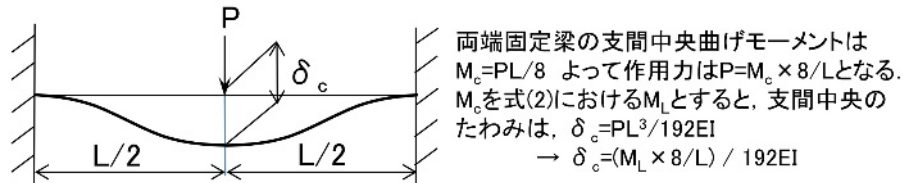


図 2.20 両端固定梁によるたわみ算出

(3) 検討結果の考察

支点部上縁の引張応力度は、制限値に対してプレストレス量を調整するため床版厚による変動は小さいことがわかる。下縁側は床版厚を大きくすると圧縮応力度が低下する傾向にある。よって、UFC 床版は圧縮応力度の制限値が 108N/mm^2 と従来のコンクリートと比較して高いため、床版厚を小さくし、プレストレス力による圧縮応力度を大きくすると同時に、自重による引張応力度を小さくすることが合理的といえる。

床版のたわみについては、床版厚が 120mm 以下は、プレストレス力による上反りの影響で変動作用時のたわみが小さくなり、床版厚が 150mm 以上の場合、床版剛性が大きくなる影響で変動作用時のたわみが小さくなっているものと推測される。鋼床版のたわみ 1.47mm と同程度にたわみを抑える場合は、UFC 床版の床版厚を 180mm とする必要がある。

(4) 質量の比較

前項で検討したスラブ厚と床版厚の組合せのうち、要求性能を満たす構造の断面について、質量の比較を図 2.21 に示す。質量比は鋼床版（デッキ厚 16mm ）を 1 とした場合の比率である。

最小断面（スラブ厚 30mm，床版厚 118mm）は鋼床版に対して 0.876，スラブ厚 70mm かつ床版厚 135mm では 1.440 であった．鋼床版と質量が同等になるスラブ厚 40mm かつ床版厚 123mm のワッフル型 UFC 床版と，同支間長の鋼床版の断面比較を図 2.22 に示す．

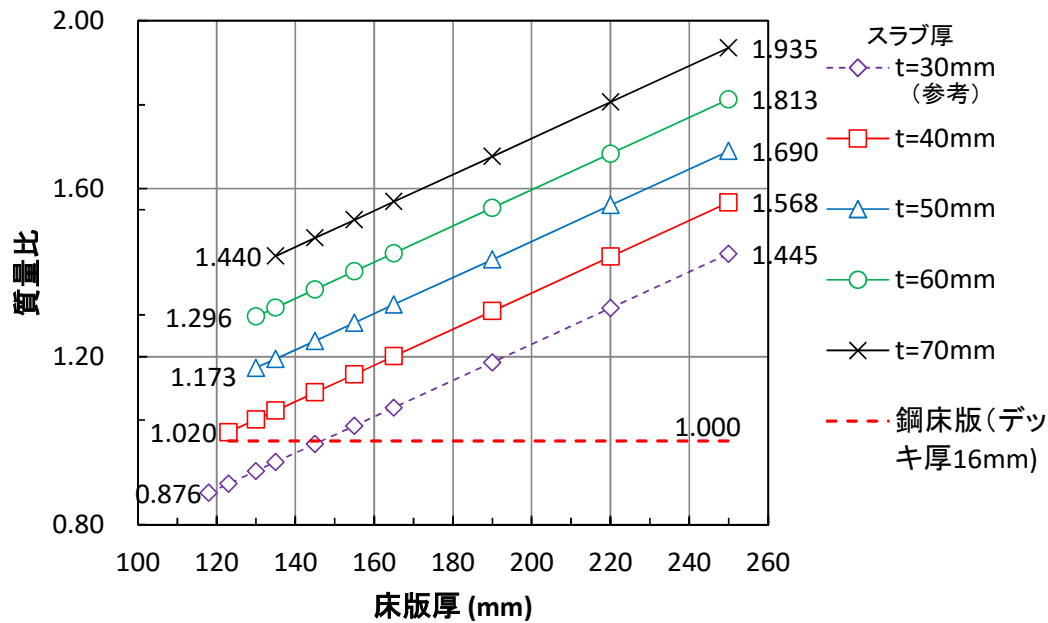


図 2.21 床版支間 2.5m における質量の比較

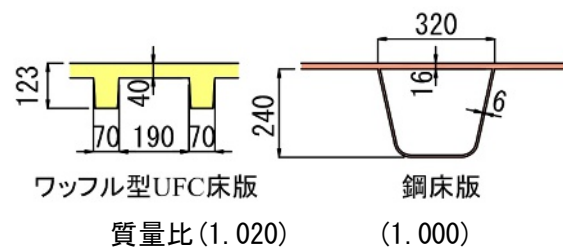


図 2.22 床版支間 2.5m における床版形状の比較

(5) コストに関する考察

鋼床版と同等の質量となるスラブ厚 40mm，床版厚 123mm を基準とした床版形状ごとのコスト比を図 2.23 に示す．

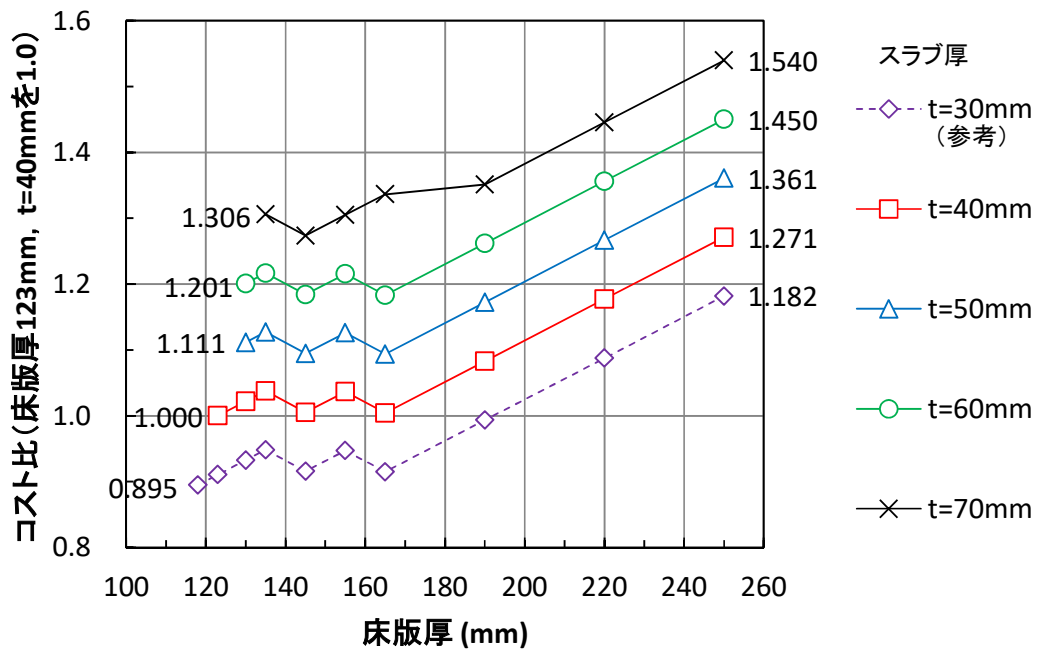


図 2.23 床版支間 2.5m におけるコストの比較

UFC と PC 鋼材に関する費用を計上して概算費用を算出しその比を示している。スラブ厚を 30mm とする場合は、床版厚 190mm 以下で基準ケースよりも安価となった。一方、スラブ厚 40mm 以上で床版厚を 123mm 以上とする場合は、いずれのケースも基準ケースより安価にはならなかった。床版厚を大きくすると PC 鋼材を 1 段配置とすることが可能となるが、UFC の使用体積が増える事によるコスト増の影響が大きいことを示している。

2.5.4 床版支間長に対する床版厚の検討

床版支間に対する検討として、表 2.5 に示すように、リブ間隔 250mm を固定として、床版支間、スラブ厚、リブ高を変数として、各床版支間長に対してスラブ厚ごとに最小床版厚を算定した。荷重およびプレストレスは 2.4 節と同条件である。

床版支間長 1.0～4.0m に対する、スラブ厚 30～70mm ごとの最小床版厚を図 2.24 に示す。スラブ厚が大きくなると最小床版厚が大きくなる傾向がある。これは断面図心が下がることと断面積が大きくなることによってプレストレス力による応力度が小さくなり、活荷重時の引張応力度が大きくなるためである。よって、床版支間に応じた最小スラブ厚、最小床版厚で計画することが合理的といえる。

表 2.5 床版支間長に対する検討パラメータ

部 位	床版形状	変 数
床版支間長	1.5～4.0 m	○
スラブ厚 t	30～70 mm	○
リブ高	(108～250mm) –スラブ厚	○
リブ間隔	250mm	固定

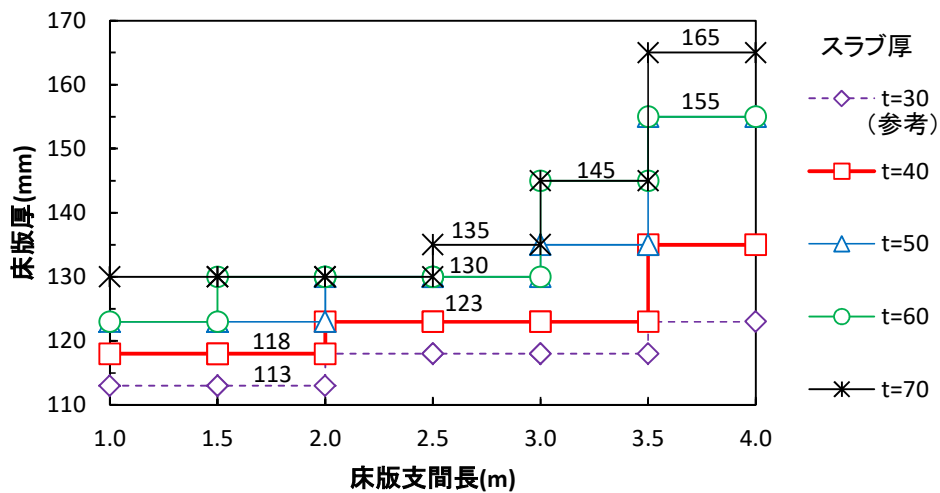


図 2.24 床版支間長に対する最小床版厚

2.6 まとめ

2.2 節では、UFC 床版の設計の流れを述べた。UFC は道示に規定の無い材料であることから、UFC 床版の要求性能を設定し、構造計画、構造詳細の設定をした上で、その構造に対して使用性、および安全性を照査することを述べた。

2.3 節では、UFC 床版の要求性能の設定を述べた。本論文における要求性能に対する照査の対象は、使用性および安全性を設定することを述べた。それぞれ性能項目、限界状態、照査指標、考慮する作用を示した。

2.4 節では、UFC 床版の構造計画を述べた。提案するワッフル型 UFC 床版と、平板型 UFC 床版の構造的な特徴、および質量の比較を述べた。次に、接合部の構造として、ワッフル型 UFC 床版の床版同士の接合部と、床版と鋼桁の接合部の構造を述べた。また、UFC 床版を支える鋼桁および床組構造を述べた。

第2章 UFC 床版のコンセプトと構造計画

2.5 節では、構造詳細の設定として、床版の断面形状に関する検討を述べた。最小部材厚の検討として、UFC 指針に規定される「かぶり」および「あき」を踏まえた床版の最小寸法を示した上で、スラブの押抜きせん断に関する検討を述べた。次に、スラブ厚およびリブ間隔、スラブ厚およびリブ高、および支間長に対するパラメトリックスタディを行い、質量とコストについて考察した上で、床版支間長に対する最小床版厚の検討について述べた。

本章の結論は以下の通りである。

- 1) 既設の鋼床版および RC 床版に顕在化している劣化損傷を踏まえ、従来の床版を代替する AFt 系 UFC を用いた軽量な道路橋床版として、リブを有するワッフル型 UFC 床版と平板型 UFC 床版を提案した。これらの床版の要求性能として、使用性、安全性に対して照査を行うものとし、限界状態と照査指標、および考慮する作用を示した。
- 2) ワッフル型UFC床版の形状に関して、UFC指針のかぶり・あき、およびスラブの押抜きせん断耐力を踏まえた最小断面を示した。また、リブ間隔、スラブ厚およびリブ高をパラメータとして応力度およびたわみを算定した。UFCは、圧縮応力度の制限値が 108N/mm^2 と従来のコンクリートより大きいため、床版厚を小さくし、プレストレスによる圧縮応力度を大きくすると同時に、自重による引張応力度を小さくすることが合理的である。
- 3) スラブ厚を40mm、床版厚123mmのワッフル型UFC床版の質量を1とすると、デッキ厚16mmのU型リブを有する鋼床版の質量は0.98であり、ワッフル型UFC床版の質量は同支間長の鋼床版とほぼ同等である。
- 4) 床版支間長に対する床版厚は、スラブ厚を40mmの場合、床版支間2.0m～3.0mに対して123mmが最小床版厚である。ただし、床版厚123mmの場合の活荷重による支間中央のたわみは5.04mmであり、これを同支間長の鋼床版のたわみ1.47mmと同程度にするには、床版厚180mmが必要である。

2章参考文献

- 2-1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017
- 2-2) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2018
- 2-3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 2-4) 武者浩透，大竹明朗，横井謙二，野口孝俊：高耐荷 UFC 床版構造と量産化システムの開発：コンクリート工学, Vol. 48, No. 11, 2010
- 2-5) 渡邊有寿，南浩郎，大野俊夫，三浦一浩：UFC 床版製作における AFt 系 UFC の製造・品質管理，第 19 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，289-292, 2010
- 2-6) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，1964
- 2-7) 小坂 崇，金治英貞，佐藤彰紀，一宮利通，藤代勝：床版取替えに対応した UFC 道路橋床版の開発，橋梁と基礎, Vol.51, No.5, 41-44, 2017
- 2-8) 小坂 崇，金治英貞，一宮利通，齋藤公生：超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の既設橋への適用に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集, Vol.14, 195-200, 2014
- 2-9) 小坂 崇，金治英貞，一宮利通，藤代勝：超高強度繊維補強コンクリートを用いた平板型 UFC 床版による既設床版の取替え検討，第 9 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，187-192, 2016
- 2-10) 小坂 崇，金治英貞，一宮利通，藤代勝：床版取替えに対応した UFC 床版の疲労耐久性に関する検討，第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，569-574, 2017
- 2-11) 橋爪大輔，大西和行，齋藤公生，村岸聖介：平板型 UFC 床版による道路橋床版の更新－阪神高速道路 15 号堺線 玉出入路橋－，土木施工, Vol. 60, No. 7, 114-117, 2019
- 2-12) 橋爪大輔，大西和行，一宮利通，齋藤公生，村岸聖介，藤代勝：平板型 UFC の設計・製作・架設，橋梁と基礎, Vol.53, No.7, 23-28, 2019
- 2-13) 橋爪大輔・大西和行・齋藤公生・村岸聖介：平板型 UFC 床版による道路橋床版の更新，土木施工, Vol.60, No.7, 114-117, 2019
- 2-14) 横田祐起，金治英貞，小坂崇，一宮利通：UFC 床版と鋼桁の接合部に関する検討，第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2017
- 2-15) 松井繁之：道路橋床版，森北出版，2007
- 2-16) 松井繁之：道路橋床版の長寿命化技術，森北出版，2016
- 2-17) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー, No. 3, 2006
- 2-18) 谷口惺，篠田隆作，小坂 崇：既設 RC 床版上に施工する塗膜系防水層(As 加熱型)の性能評価，舗装，Vol. 52, No. 3, 14-19, 2017

3章 解析および動的載荷による使用性に関する照査

3.1 概 説

本章においては、UFC 床版の使用性に関する照査として、第 2 章で構造計画および構造詳細を設定したワッフル型 UFC 床版を対象として、3 次元弾性 FEM 解析による応力度およびたわみの算定と照査、たわみの設計限界値の検討を述べる。次に、実験による振動の照査として、実物大の供試体を用いた振動に対する使用性の照査を示す。

3.2 弾性解析による応力度およびたわみの照査

第 2 章に述べた床版形状の検討結果をふまえて設定した床版断面に対して、3 次元弾性 FEM 解析によって、UFC の応力度および床版の変形量を算定し、使用性を評価した。床版の応力度およびたわみを算定し、構造の実現性を確認するとともに、リブなど断面急変部や隅角部などに大きな応力や変形が生じないか応力度および変形を照査した。

本論文では床版に着目した設計（床版作用）について述べる。橋脚間の支間長に応じた合成桁に生じる断面力に対する設計（桁作用）については、参考文献 3-1) に示す 3 次元弾性 FEM 解析を用いた試設計による検討によって、構造が成立することを確認している。

3.2.1 解析対象

解析は、阪神高速道路に実在する鋼 5 径間連続鋼床版箱桁（平均支間長 70m）の、鋼床版デッキプレートおよび鋼縦リブ部分を UFC 床版に置き換えた橋梁を対象に実施した。解析対象の UFC 床版の構造を図 3.1 に示す。鋼箱桁は開断面の 2 箱桁（上下線 4 車線一体断面）であり、鋼横桁と鋼縦桁で床版を支持する構造である。UFC 床版の断面形状は、第 2 章で述べた床版形状の検討を踏まえ、床版支間長 2.5m に対する最小床版厚であるスラブ厚 40mm、床版厚 123mm を解析対象とした（図 3.1 の A 部および B 部）。

なお、第 2 章の検討において、スラブ厚 30mm、床版厚 118mm についても実現可能であることは確認しているが、前述の通り、供用後の舗装補修時における防水層の除去時に UFC 床版が切削される可能性があることから、最小スラブ厚を 40mm とした。リブ間隔については T 荷重（幅 500mm）を 2 本以上のリブで支えることとして、橋軸直角方向のリブ間隔 250mm を基準として設定し、リブの割り付けから、橋軸直角方向を 230mm、橋軸方向を 260mm とした。

第3章 解析および動的載荷による使用性に関する照査

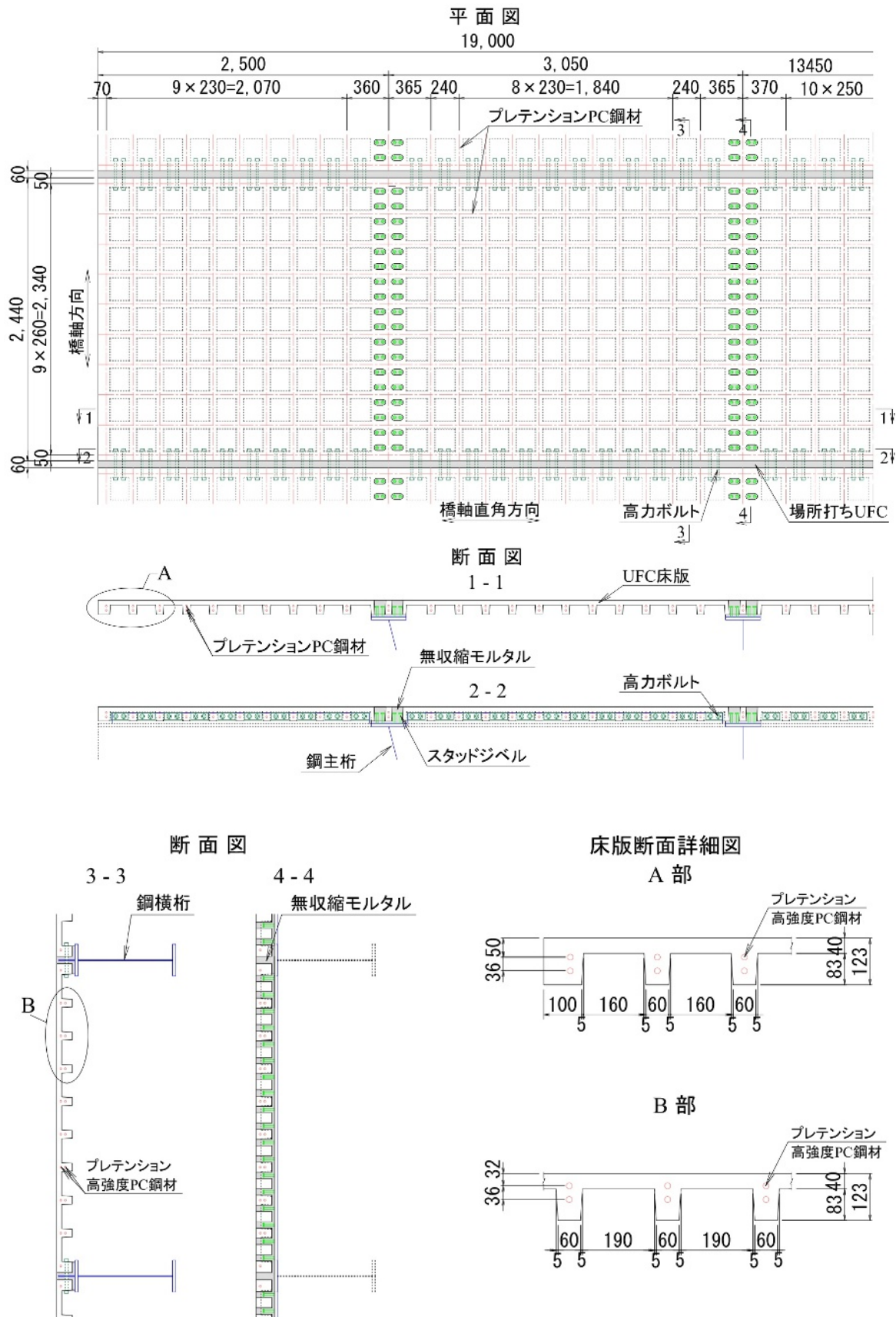


図 3.1 解析対象の UFC 床版の構造

3.2.2 解析方法の概要

(1) 解析方法、解析モデルおよび境界条件

3次元弾性 FEM 解析は、汎用ソルバーコードである NX NASTRAN7.1 を使用した。

プレストレス導入時の解析モデルと境界条件を図 3.2 に示す。プレストレス導入時は床版 1 枚を単体でモデル化した。支持条件としては床版の四隅をピン支持とした。また、橋軸直角方向を判断面（1/2 モデル）としているため、床版中央において対称条件となるように設定した。

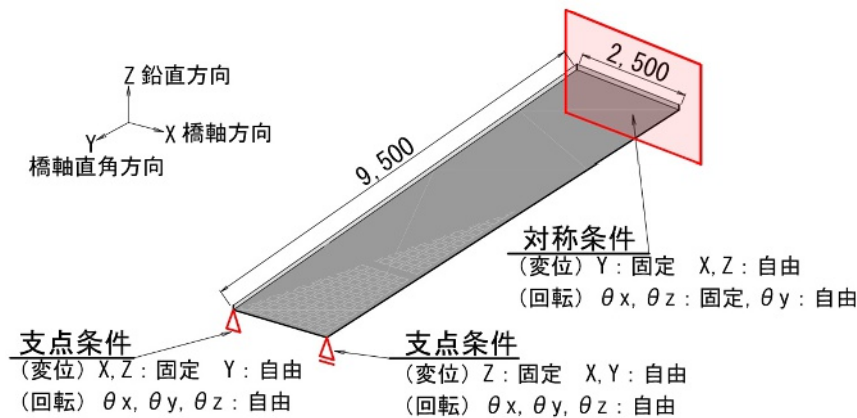


図 3.2 プレストレス導入時の解析モデル

活荷重作用時の解析モデルと境界条件を図 3.3 に示す。合成桁の支間中央付近の 15m（橋軸方向 2.5m の床版 6 枚分）における合成桁をモデル化した。支持条件は鋼箱桁のウェブ下を線支持とした。また、橋軸直角方向を半断面（1/2 モデル）としているため、合成桁中央において対称条件となるように設定した。

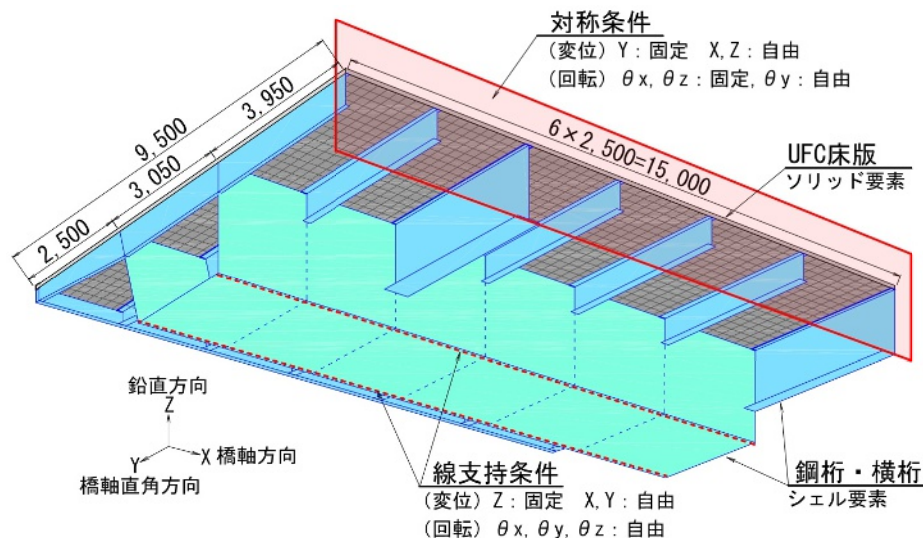


図 3.3 活荷重載荷時の解析モデル

各材料の解析に用いる材料特性を表 3.1 に示す。材料構成則は弾性部材として設定した。各部材の要素は、UFC 床版をソリッド要素、鋼桁をシェル要素によってモデル化した。PC 鋼材についてはバー要素によってモデル化し、UFC とは完全に付着しているものとするが、床版端部から 600mm 区間を伝達長として緊張力の分布を解析に反映した。

表 3.1 解析に用いる材料特性

	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
UFC	4.6×10^4	0.2
鋼材, PC 鋼材	2.0×10^5	0.3

(2) 荷重

荷重は、床版自重（物体力）、橋面荷重（面分布荷重）、プレストレス力および活荷重（面分布荷重）である。橋面荷重は高欄、舗装を考慮した。

プレストレス力は、床版製作時にプレテンションによる緊張によって導入されるため、プレストレス導入時の解析モデルは、図 3.2 に示すように UFC 床版のみをモデル化しプレストレス力を載荷した。

活荷重は道示の T 荷重 $100\text{kN} \times (1 + \text{衝撃係数 } i = 0.4) \times \text{構造物解析係数 } \gamma_d = 1.1 = 154\text{kN}$ を、橋軸直角方向幅 500mm、橋軸方向幅 200mm に面分布荷重（ 1.54 N/mm^2 ）として載荷した。活荷重は張出し床版先端付近や箱桁間など 6 パターンに載荷した。それぞれのパターンと着目点を表 3.2 に、載荷のイメージ図を図 3.4 に示す。T 荷重は床版の各部に対して曲げもしくはせん断が厳しくなると想定される箇所に載荷するものとした。

表 3.2 活荷重載荷パターンの着目点

	活荷重の載荷パターン	設計における着目点	
[1]	張出し床版・先端付近 (曲げ着目)	箱桁－箱桁間 (曲げ着目)	箱桁内部 (曲げ着目)
[2]	箱桁－箱桁間・主桁ウェブ付近 (せん断着目)	箱桁内部 (曲げ着目)	箱桁－箱桁間 (曲げ着目)
[3]	箱桁－箱桁間・横桁付近 (せん断着目)	箱桁－箱桁間・主桁ウェブ－横桁交差部 (せん断着目)	
[4]	張出し床版主桁ウェブ付近 (せん断着目)	箱桁内部・主桁ウェブ付近 (せん断着目)	
[5]	張出し床版部・主桁ウェブ－横桁交差部 (せん断着目)	箱桁内部・主桁ウェブ－横桁交差部 (せん断着目)	
[6]	箱桁内部・横桁付近 (せん断着目)		

第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

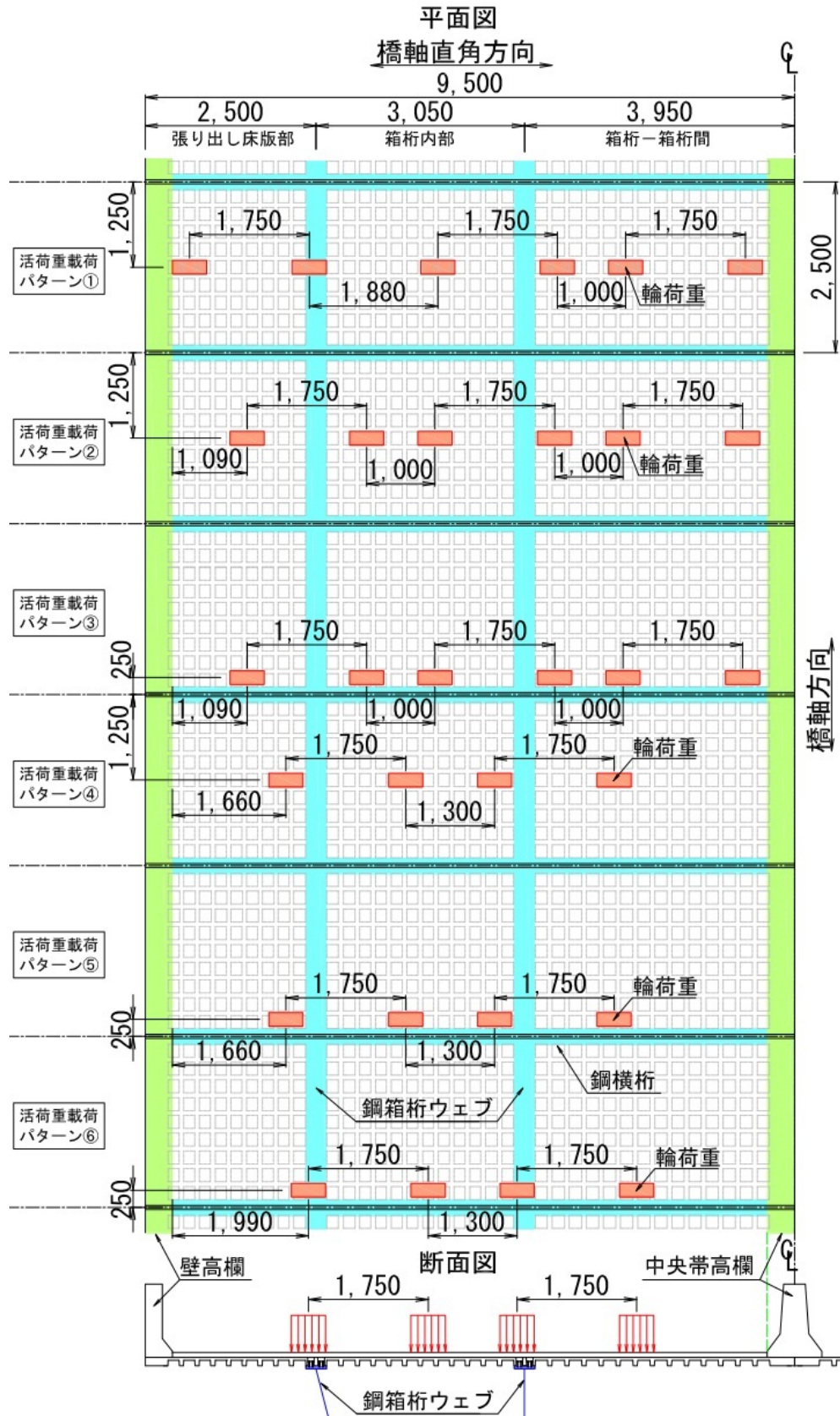


図 3.4 活荷重载荷パターン

3.2.3 解析結果

(1) 応力度の制限値

UFC の曲げ圧縮応力および軸方向圧縮力の使用性に関する応力度の制限値は，UFC 指針³⁻²⁾に準拠し，永久荷重作用時において $0.6 f'_{ck}=108\text{N/mm}^2$ とした (f'_{ck} は UFC の圧縮強度の特性値)．引張応力の制限値は，設計ひび割れ発生強度 f_{crd} の 8.0N/mm^2 とした．

ここで，従来のコンクリート系床版では，床版のたわみ（変位・変形）に対して設計限界値は設けられていない．本検討においては，これを踏襲し床版のたわみに対して設計限界値は設けないこととした．たわみの設計限界値については 3.3 節に別途検討した結果を示す．

(2) 応力度

解析結果として自重，プレストレス力および活荷重による床版の応力度と活荷重によるたわみを表 3.3 に示す．最大主応力は引張応力度 $5.6\sim 7.1\text{N/mm}^2$ であり制限値に対して 70～88%であった．最小主応力は圧縮応力度 $60.7\sim 80.2\text{N/mm}^2$ であり制限値に対して 56～74%であった．

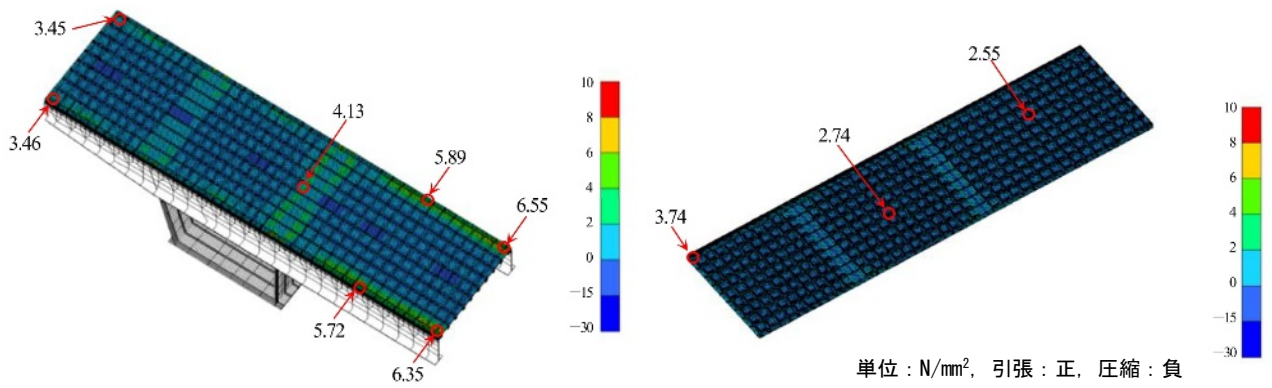
表 3.3 3次元弾性 FEM 解析による応力度

(引張：正，圧縮：負)

載荷 パターン	主応力(N/mm ²)		橋軸方向応力(N/mm ²)		橋軸直角方向応力(N/mm ²)		たわみ(mm)
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
[1]	6.6	-80.2	6.4	-31.3	6.2	-28.6	4.9
[2]	7.1	-70.2	6.7	-35.1	6.3	-66.1	4.7
[3]	6.0	-61.2	2.7	-17.1	6.3	-41.5	1.6
[4]	5.6	-63.2	4.8	-27.9	5.4	-53.8	2.6
[5]	6.7	-60.9	2.9	-13.6	6.3	-39.8	0.5
[6]	6.4	-60.7	2.9	-11.9	6.2	-22.2	0.6

載荷パターン[1]による最大主応力分布を図 3.5 に，最小主応力分布を図 3.6 に示す．最大主応力は図 3.5(a)に示すように鋼横桁付近の床版上面で引張応力度 6.6N/mm^2 が生じており，最小主応力は図 3.6(b)に示すように箱桁一箱桁間における鋼主桁付近の床版下面で圧縮応力度 80.2N/mm^2 が生じた．最大主応力は，図 3.7 に示すように，床版上縁（スラブ上縁），最小主応力は床版下縁（リブ下縁）で生じており，リブなどの断面急変部や隅角部において，大きな応力は生じなかった．

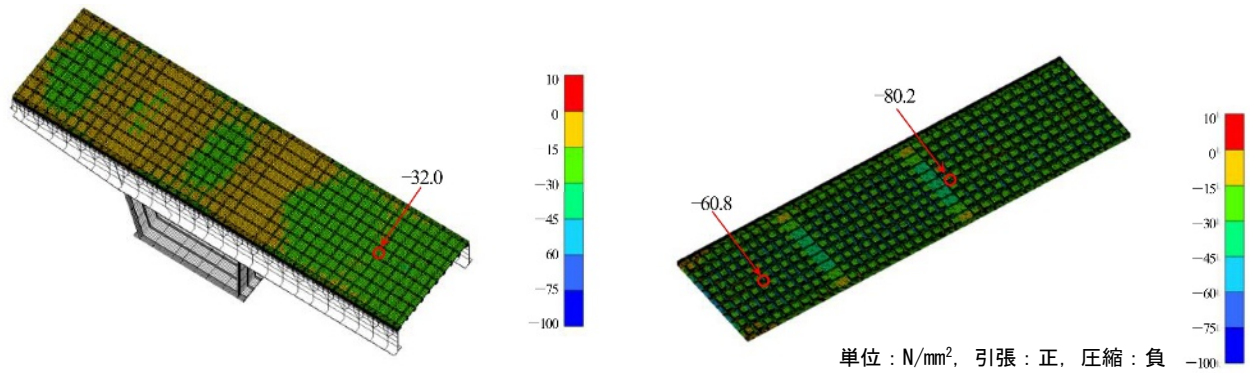
第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査



(a) 床版上面

(b) 床版下面

図 3.5 最大主応力分布（活荷重载荷パターン[1]）



(a) 床版上面

(b) 床版下面

図 3.6 最小主応力分布（活荷重载荷パターン[1]）

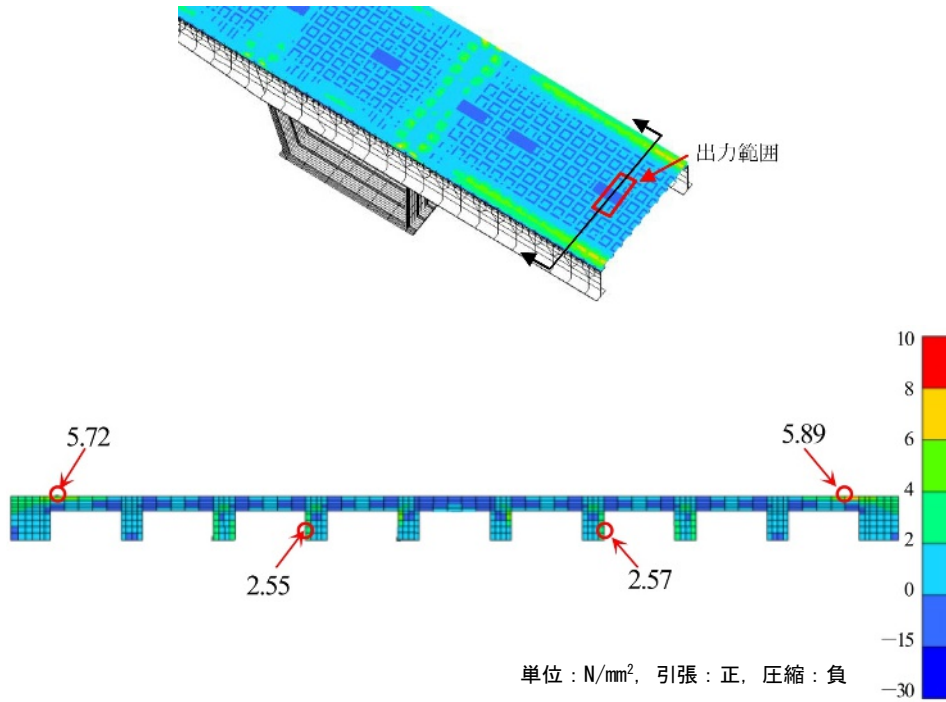


図 3.7 最大主応力の断面内分布（活荷重载荷パターン[1]）

(3) たわみ

載荷パターン[1]の活荷重によるたわみを図 3.8 に示す．鋼横桁のたわみが 2.92mm であるため，床版自体のたわみは $7.82 - 2.92 = 4.90\text{mm}$ である．表 3.3 のたわみは同様に算出した鋼横桁に対する床版自体のたわみである．

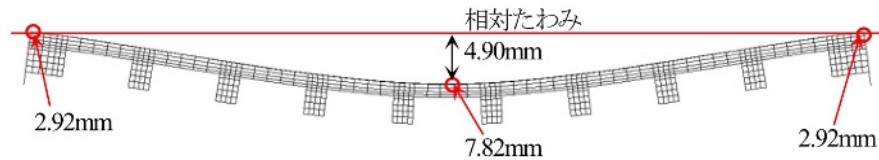


図 3.8 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[1]）

3.2.4 解析結果の考察

(1) 応力度

上縁と下縁の応力度の差は大きいものの，部材厚および PC 鋼材量の設定に対して，設定寸法に対して構造が成立することを確認した．プレストレス量は引張応力度によって決定しており，このプレストレス力が導入された部材においても，当該載荷条件において圧縮応力度が最大 74% のため部材寸法には若干余裕のある状態である．

最大主応力，最小主応力とも床版上下縁で生じており，リブなど断面急変部や隅角部において大きな応力度は生じていなかったことから，床版として挙動するために十分なリブ寸法やリブ間隔の設定となっていることがわかる．

(2) たわみ

鋼横桁に対する UFC 床版自体の相対たわみは最大 4.9mm であった．一方，鋼床版について，縦桁支間を本検討と同様に 2.5m として，鋼床版の設計において従来から使用される有限帯板法 (FSM) による解析によって算出したたわみは約 1.5mm であった．

UFC 床版のたわみ形状は図 3.8 に示すように，鋼横桁を支点とする梁のたわみであり，鋼床版の疲労や鋼床版上の舗装への影響の原因となる縦リブを支点とするデッキプレート変形のようなスラブがリブ間で変形するたわみは生じていない．床版のたわみの制限値は道示や UFC 指針に規定されていないため，実構造物の設計においては，同支間長の鋼床版のたわみを制限値の目安とすることとした．

床版のたわみが鋼床版よりも大きいのは，UFC 床版の曲げ剛性が，表 3.4 に示すように床版支間方向である橋軸方向において鋼床版の 0.131 倍と小さいためである．また，図 3.8 に示すように，鋼横桁のたわみおよびねじり方向の変形が床版のたわみに影響している．そこで，鋼横桁の影響を解析によって検討し，鋼横桁の間隔，横桁剛性を変更することで UFC 床版のたわみを鋼床版と同等にできることを確認した³⁻³⁾．

表 3.4 床版の剛性比較

		ワッフル型 UFC 床版 (床版厚 123mm)	鋼床版 (デッキ厚 16mm)
橋軸方向 (床版支間)	曲げ剛性(N mm ²)	6.997×10^{13} (0.131)	5.308×10^{14} (1.000)
	軸剛性 (N)	3.041×10^9 (0.707)	4.301×10^9 (1.000)
橋軸直角方向	曲げ剛性(N mm ²)	8.351×10^{11} (5.013)	1.666×10^{11} (1.000)
	軸剛性 (N)	2.912×10^9 (0.910)	3.200×10^9 (1.000)

3.3 弾性解析によるたわみ制限値の検討

3.3.1 検討の概要

3.2 節に述べた通り，床版厚 123mm の活荷重による床版のたわみは 4.9mm と同支間の鋼床版のたわみ 1.5mm よりも大きくなった．この床版厚に対して UFC 床版の応力度は制限値を満足しているが，鋼床版よりもたわみが大きくなることについては，舗装の耐久性への影響や二次応力による鋼桁や鋼床組の疲労への影響が懸念される．よって，UFC 床版の使用性に関する照査としては，応力度の制限だけでなく，変位・変形であるたわみに制限値を設け照査する必要があるといえる．

鋼床版のたわみについては，道路橋示方書³⁻⁴⁾（以下，道示という）に舗装への影響に着眼して下記が規定されている．

1. デッキプレートの剛性が不足していると舗装に悪影響を及ぼすので，デッキプレートの輪荷重によるたわみを縦リブ間隔の 1/300 以下に制限するのがよい．
2. 車道部に主桁又は縦桁が配置される場合には，腹板上の舗装のひび割れの抑制に配慮することとし，活荷重によって生じる腹板上のデッキプレートの曲率半径を 20m 以上とするのが望ましい（道示に，輪荷重に対するデッキプレートの曲率半径を 20m 以上とし，かつ縦リブ間のたわみ量を 0.4mm 以下とした場合の縦リブの剛性と横リブ間隔の関係が示されている）．
3. 上記のデッキプレートの縦リブ間におけるたわみ，および腹板上のデッキプレートの曲率半径を制限することで，舗装の著しい劣化や剥離，流動，き裂が生じない．

鋼床版上の舗装は、基層にグースアスファルト混合物が用いられる。一方、コンクリート系床版所の舗装は防水層および基層に密粒アスファルト混合物を用いられることが多い。UFC 床版は、従来のコンクリート系床版に比べて変位が大きいため、舗装の変形性能の点では鋼床版と同様にグースアスファルトの適用が必要となる可能性もある。

UFC 床版のたわみが舗装や鋼構造の疲労へ与える影響については、今後、別途検討する必要があるが、本論文においては、UFC 床版と鋼床版のたわみを比較することによって、UFC 床版のたわみの設計限界値を設定することとした。

3.3.2 解析方法の概要

本検討の対象とする橋梁の主桁断面を図 3.9 に示す。その状態で同程度の支間における鋼床版と床版のたわみが同程度以下となる床版厚を算定した。解析対象は鋼 3 主合成箱桁（閉断面細幅箱桁）であり、床版は支間を橋軸方向に 2.5m とするワッフル型 UFC 床版と鋼床版を想定した。

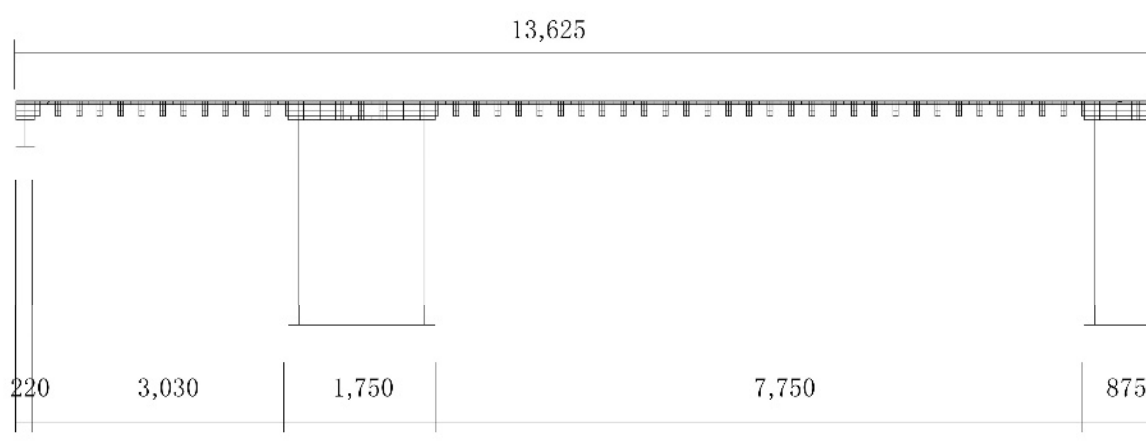


図 3.9 解析対象の UFC 床版－鋼合成桁の断面図

解析は、3 次元弾性 FEM 解析によって実施した。汎用ソルバーコードである NX NASTRAN を使用した。解析モデルを図 3.10、図 3.11 に示す。解析モデルにおける要素設定は UFC 床版をソリッド要素、鋼床版および鋼桁をシェル要素、プレテンション PC 鋼材をトラス要素してモデル化した。解析に用いる物性値を表 3.5 に示す。材料構成則は弾性部材として設定した。

第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

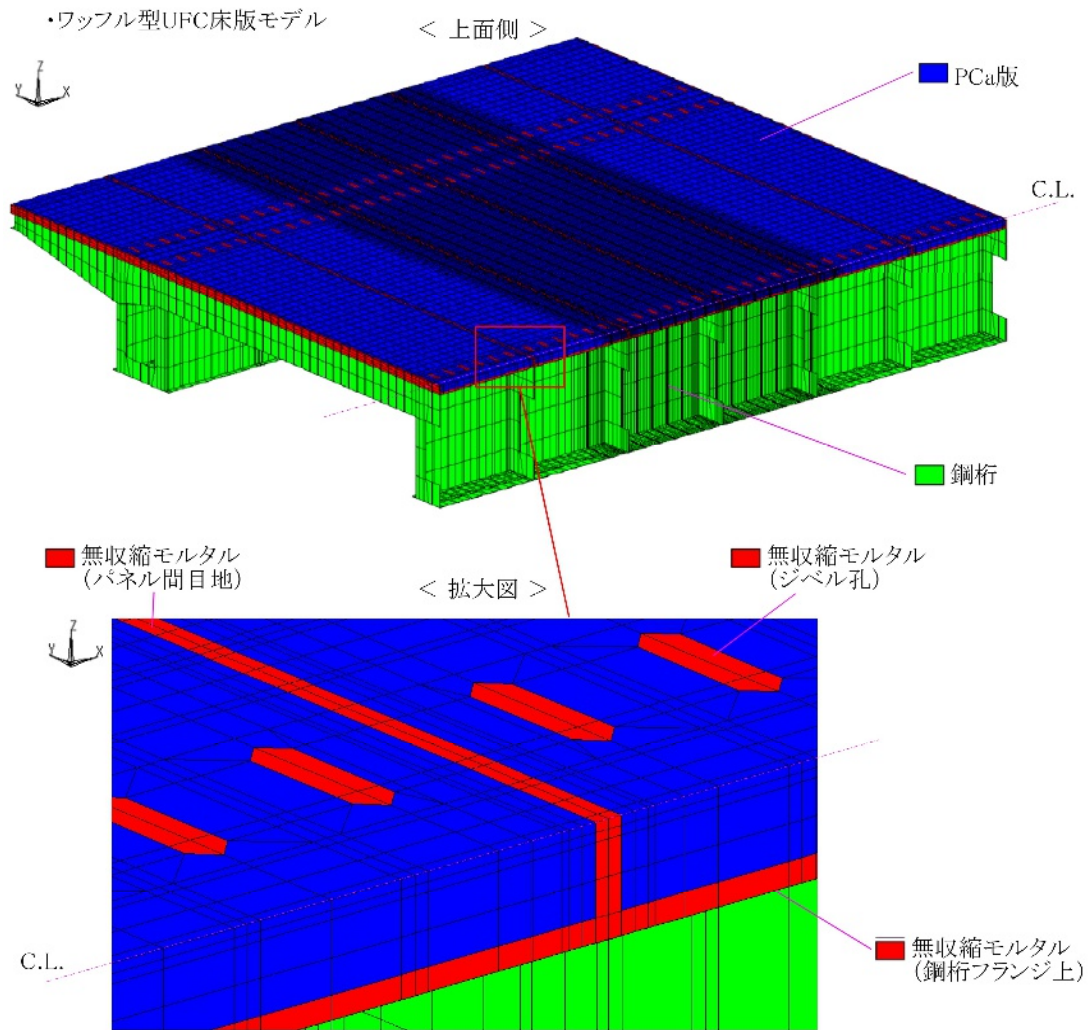


図 3.10 ワッフル型 UFC 床版の解析モデル図（上面側）

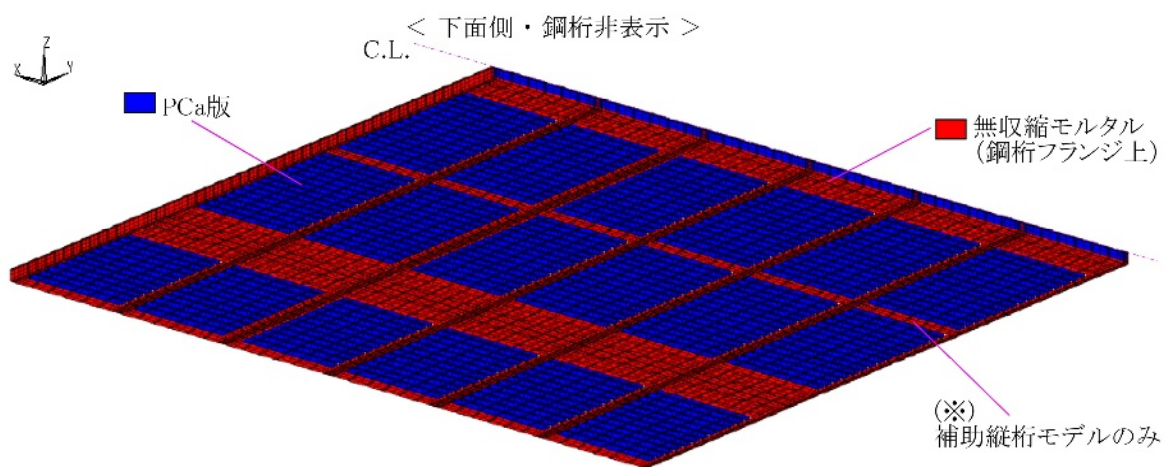


図 3.11 ワッフル型 UFC 床版の解析モデル図（下面側）

表 3.5 解析に用いる材料特性

	単位	UFC	間詰モルタル	PC 鋼材 1S15.7 (SWPR7HT)
設計基準強度 f'_{ck}	N/mm ²	180	80	—
ヤング係数 E	N/mm ²	46,000	30,000	200,000
単位体積重量	kN/m ³	24.5	21.0	77.0
ポアソン比	—	0.2	0.2	0.3
断面積	mm ²	—	—	150

解析モデルの境界条件および支持条件を図 3.12 に示す。合成桁の支間中央付近の 15m（橋軸方向 2.5m の床版 6 枚分）における合成桁をモデル化した。支持条件は鋼箱桁のウェブ下を線支持とした。また、橋軸直角方向を半断面（1/2 モデル）としているため、箱桁中央において対称条件となるように設定した。

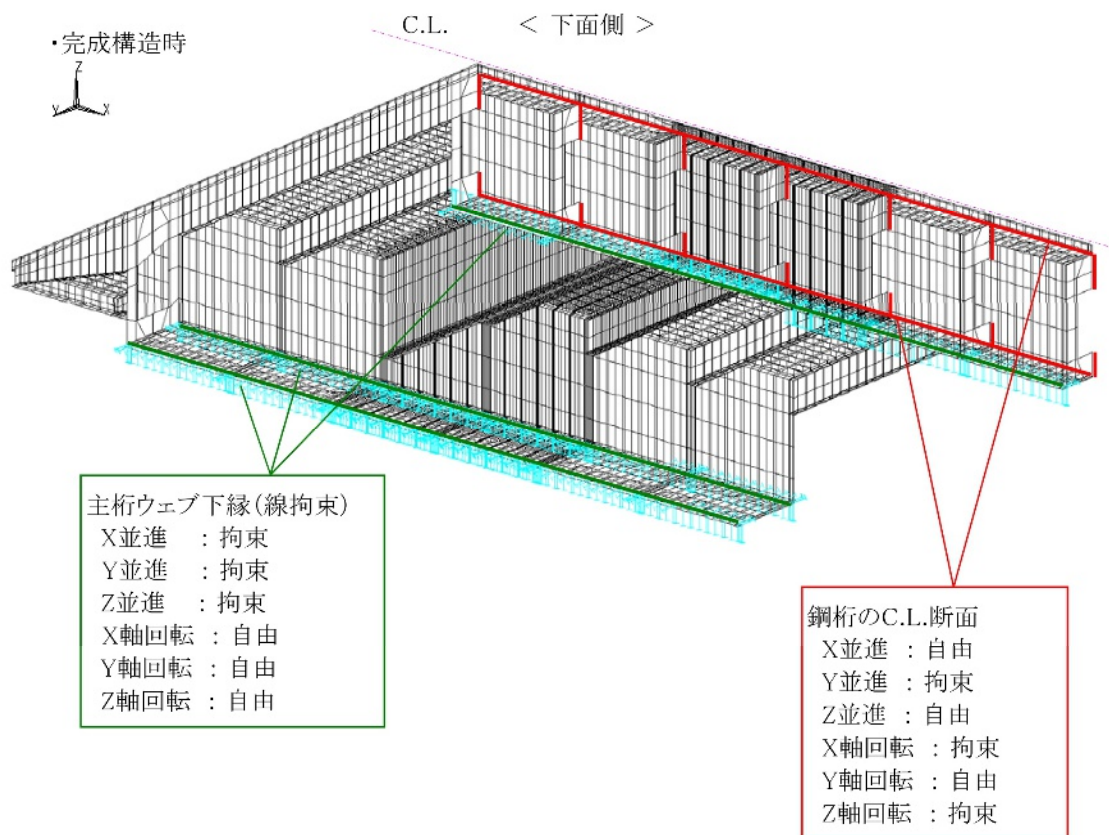


図 3.12 解析モデルの境界条件および支持条件

第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

作用する荷重は自重（UFC 床版，無収縮モルタル，鋼桁，PC 鋼材），橋面荷重（舗装，中央分離帯，壁高欄，遮音壁），活荷重，プレストレスである．プレストレスは，部材端から定着長 600mm の間を二次放物線のプレストレス分布で作用させた．PC 鋼材の配置を図 3.13 に，鋼桁および鋼床組みの解析モデルを図 3.14 に示す．

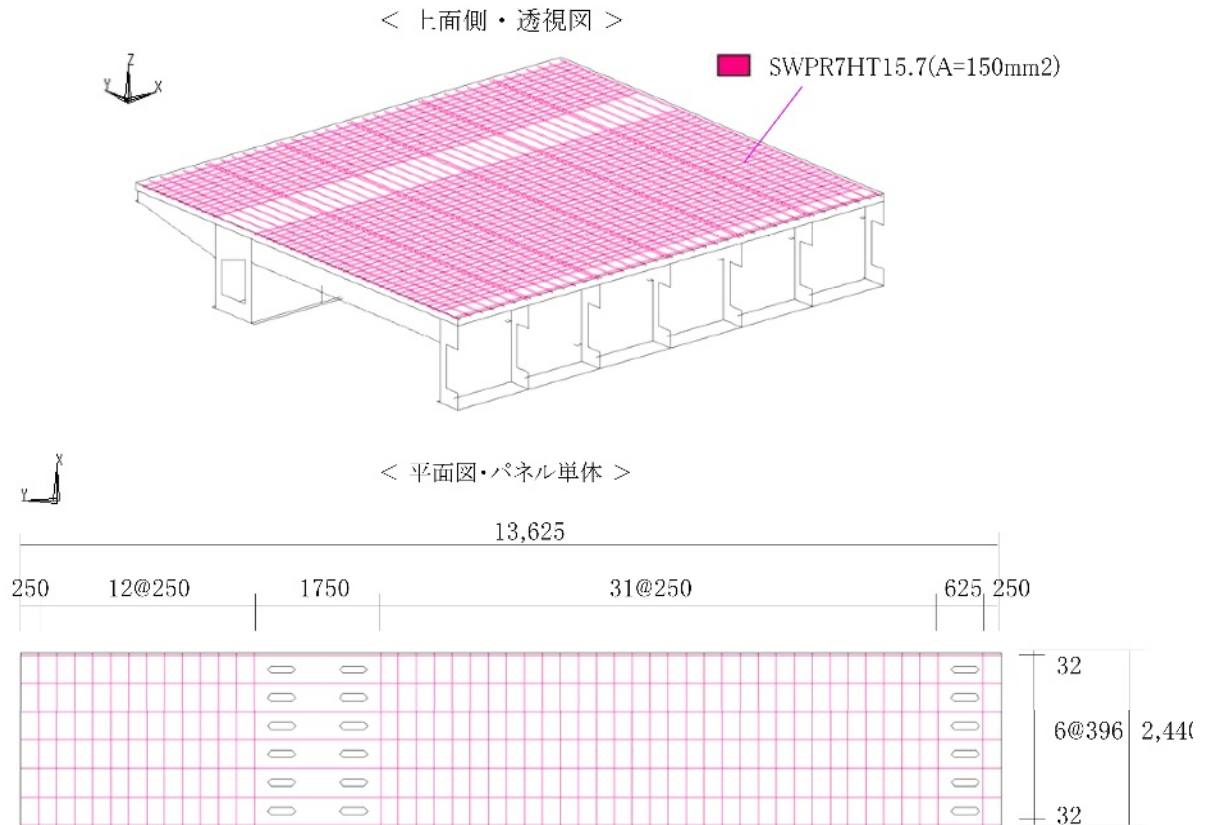


図 3.13 PC 鋼材の配置

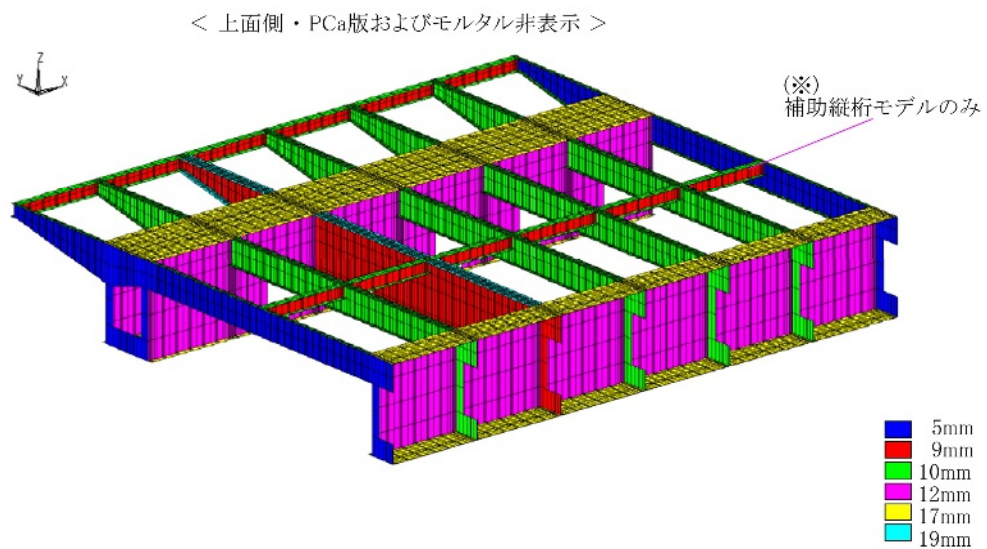


図 3.14 鋼桁および鋼床組みの解析モデル

活荷重は道示の T 荷重 154kN（衝撃係数 $i=0.4$ ，構造物解析係数 $\gamma_a=1.1$ ）を，橋軸直角方向幅 500mm，橋軸方向幅 200mm に面分布荷重（1.54 N/mm²）として載荷した．活荷重は図 3.15 に示す 7 パターンに載荷することとした．

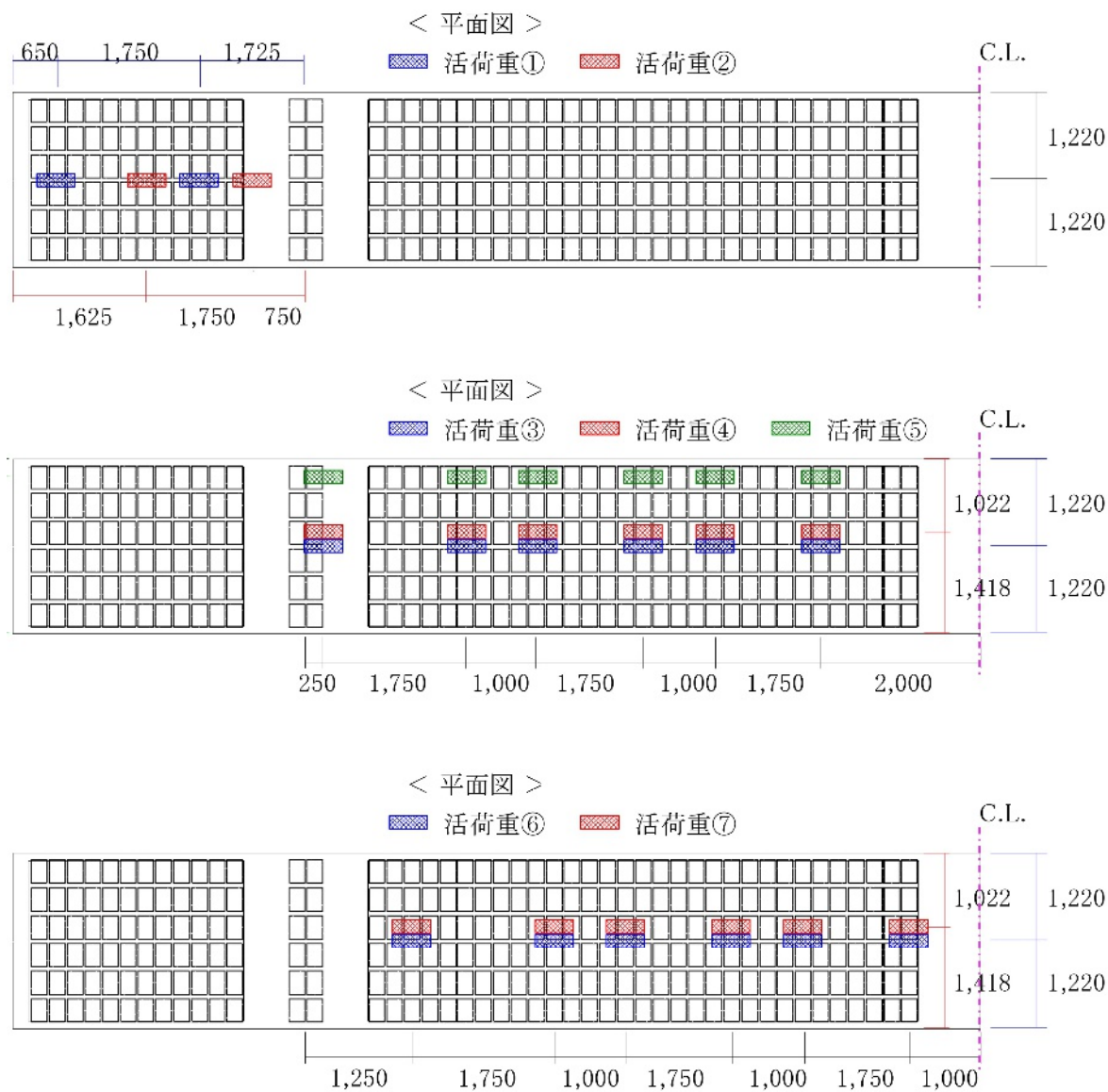


図 3.15 活荷重載荷パターン

解析を実施した UFC 床版の断面形状を図 3.16 に示す．床版厚を 180mm とした．同程度の支間を有する鋼床版のたわみを算定した結果約 1.5mm であり，UFC 床版の床版厚 180mm は，たわみが約 1.5mm になるように，図 2.25 より設定したものである．

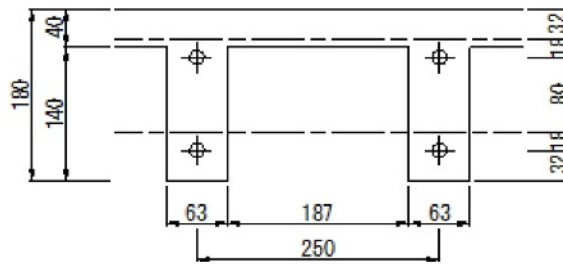


図 3.16 解析対象の UFC 床版の断面図

3.3.3 解析結果

3次元弾性 FEM 解析結果として、活荷重③による UFC 床版のたわみを図 3.17～図 3.19 に、鋼床版のたわみを図 3.20～図 3.22 に示す。

主たる床版支間方向の、最大たわみと鋼横リブ位置（図における「パネル端」）のたわみの差（図における「Z 変位差」）は、UFC 床版で 2.30mm、鋼床版で 2.96mm であった。このたわみ差は鋼横リブで支持される間隔を床版支間とみなした場合の、床版の活荷重たわみを示している。UFC 床版の床版厚を 180mm とすることによって、鋼床版のたわみと同等以下となることが確認できた。

3.3.1 節で述べたように、鋼床版は縦リブ間のたわみをデッキプレートの剛性で制限しているが、図 3.22 (A 部) に示すように、縦リブ(U 型トラフリブ)間に局所的なたわみが生じているのが確認できる。一方、UFC 床版については図 3.19 に示すようにリブ間に局所的なたわみは生じておらず、UFC 床版のスラブとリブが一体とした滑らかなたわみの形状となっている。よって、鋼床版のようなリブ間のたわみに起因する舗装への影響は生じないものと推測される。

また、3.3.1 節で述べた鋼床版の腹板上の舗装のひび割れの抑制への配慮としてデッキプレートの曲率半径を制限していることについても、図 3.22 (B 部) に示すように主桁の腹板上でデッキプレートが変形しており、箱桁側に 0.203° のたわみ角が生じている。一方、UFC 床版については、主桁腹板上のたわみ角が最大となっているが、最大たわみ角 0.025° と鋼床版の $1/10$ 以下であった。

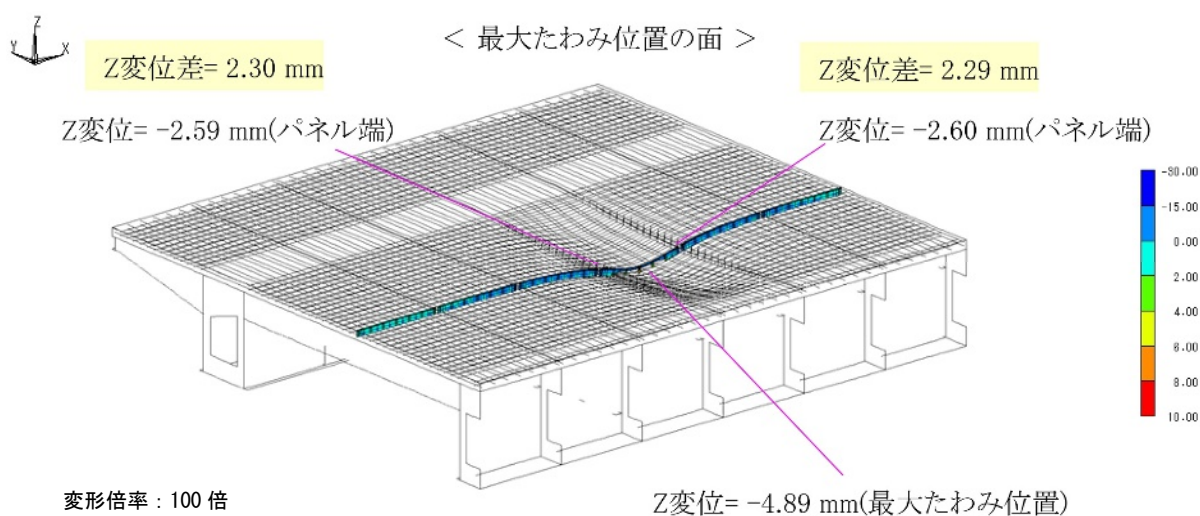


図 3.17 UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]）

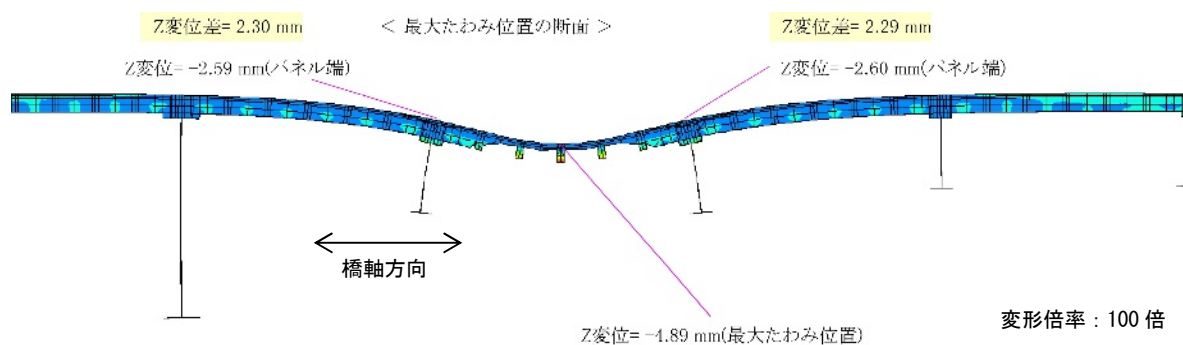


図 3.18 UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸方向断面）

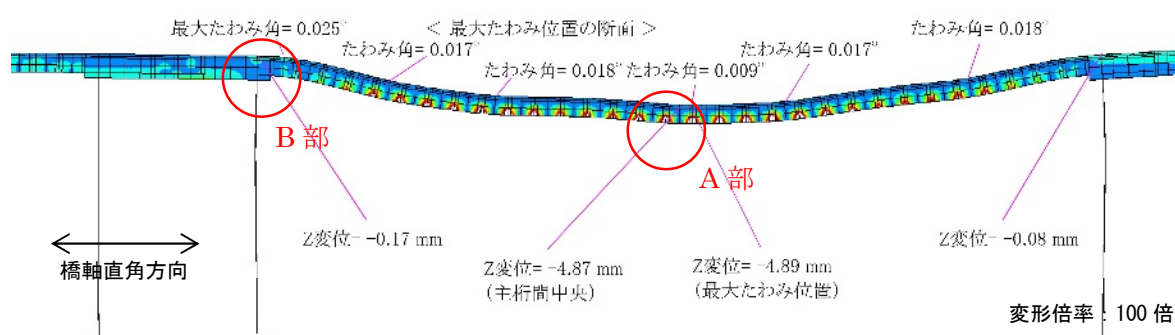


図 3.19 UFC 床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸直角方向断面）

第3章 解析および動的載荷による使用性に関する照査

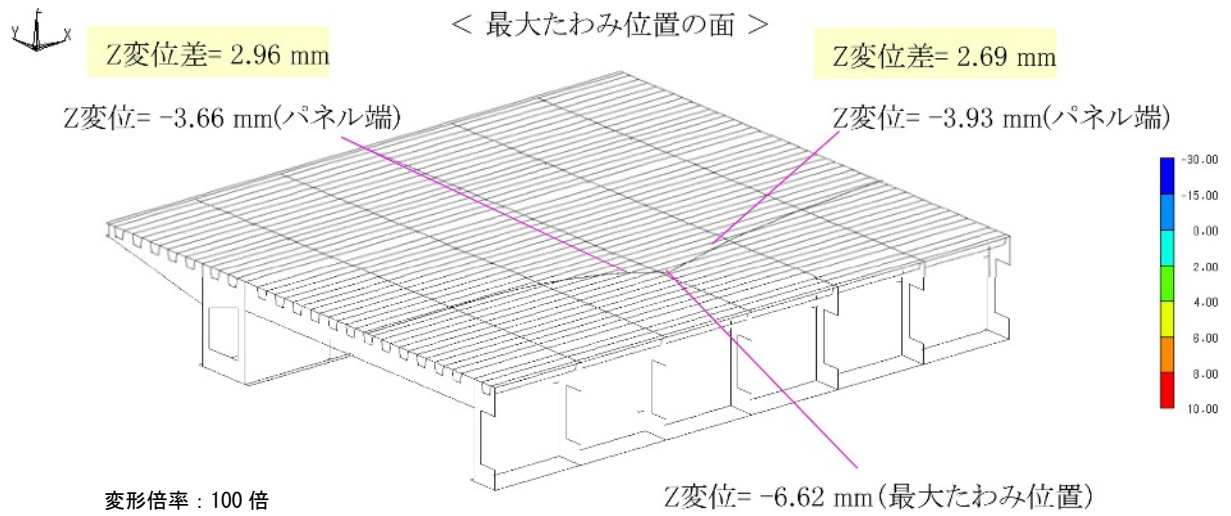


図 3.20 鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]）

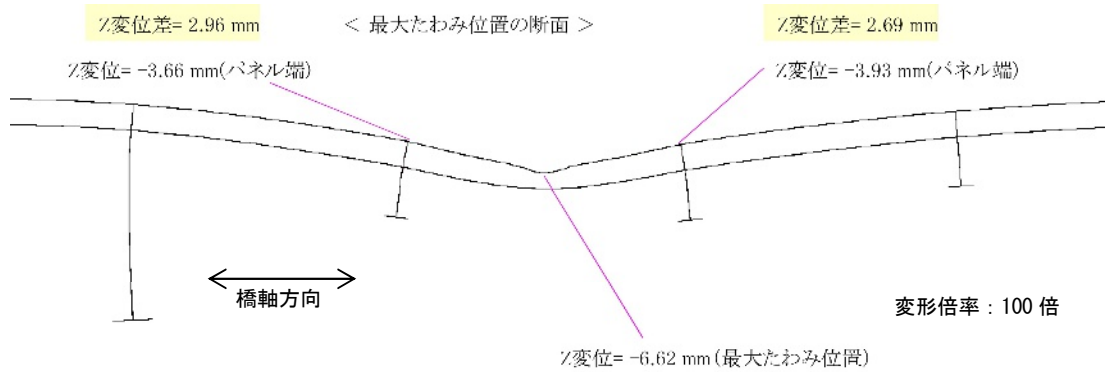


図 3.21 鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸方向断面）

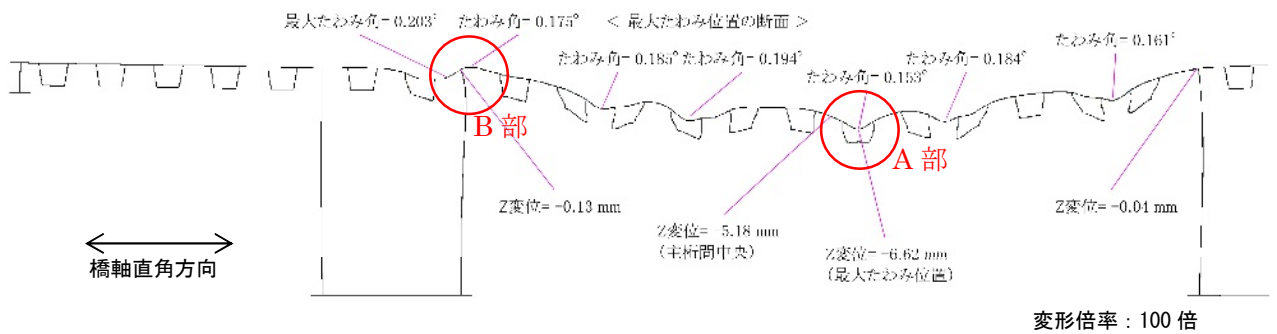


図 3.22 鋼床版のたわみ（活荷重載荷パターン[3]／橋軸直角方向断面）

3.3.4 検討結果の考察

UFC 床版の床版厚を設定する際に、同じ床版支間の鋼床版のたわみと同等にすることを目安に設定することで、舗装の耐久性に影響が生じるリブ間の局所的なたわみや、主桁腹板上のたわみが生じないことがわかった。

UFC 床版については、鋼床版よりたわみの制限値を大きくしても舗装の耐久性に影響が生じないことが推測されるが、UFC 床版上の舗装構造が未確定であり、従来のコンクリート系床版と同等の舗装構造となる可能性を考えると、過度に床版のたわみを大きくすることは、舗装の耐久性に対しての影響が懸念される。また、UFC 床版のたわみによる、鋼桁や鋼床組に生じる二次応力が、鋼桁や鋼床組みの疲労破壊の要因となる可能性がある。ただし、これについては、UFC 床版の支持構造である鋼桁および鋼床組みは鋼床版と同様の構造であることから、鋼床版において二次応力による疲労破壊が問題とならないたわみで設計するということによって回避できる課題といえる。

よって、以上を踏まえ、UFC 床版のたわみの制限値は、舗装と鋼桁等の二次応力による疲労破壊の影響がないように、同程度の支間を有する鋼床版のたわみ以下とすることが望ましいといえる。しかし、実構造物の設計等においては、上記の影響を具体的に検討することによって、鋼床版よりも大きくたわみを生じさせるように UFC 床版の床版厚を小さくすることも可能といえる。

3.4 動的載荷による振動の照査

3.4.1 検討の概要

振動試験（写真 3.1）および載荷試験（写真 3.2）によって、ワッフル型 UFC 床版の振動特性および車両走行時の挙動を確認することによって使用性を評価した。

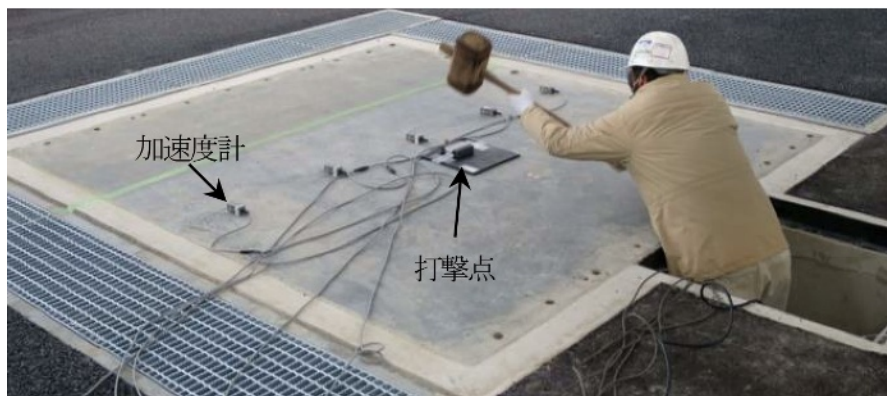


写真 3.1 振動試験

第3章 解析および動的載荷による使用性に関する照査



写真 3.2 実車による動的載荷試験

振動試験および載荷試験には、図 3.23 に試験体の構造を示す。試験体として、図-5.1 に示す輪荷重走行試験の試験体の床版[1]を使用した。この床版を簡易な橋台（鋼横桁を模擬）上に設置した。床版は支間中央部における 2 辺支持の状態となるように、硬質ゴムで 2 辺を支持している。

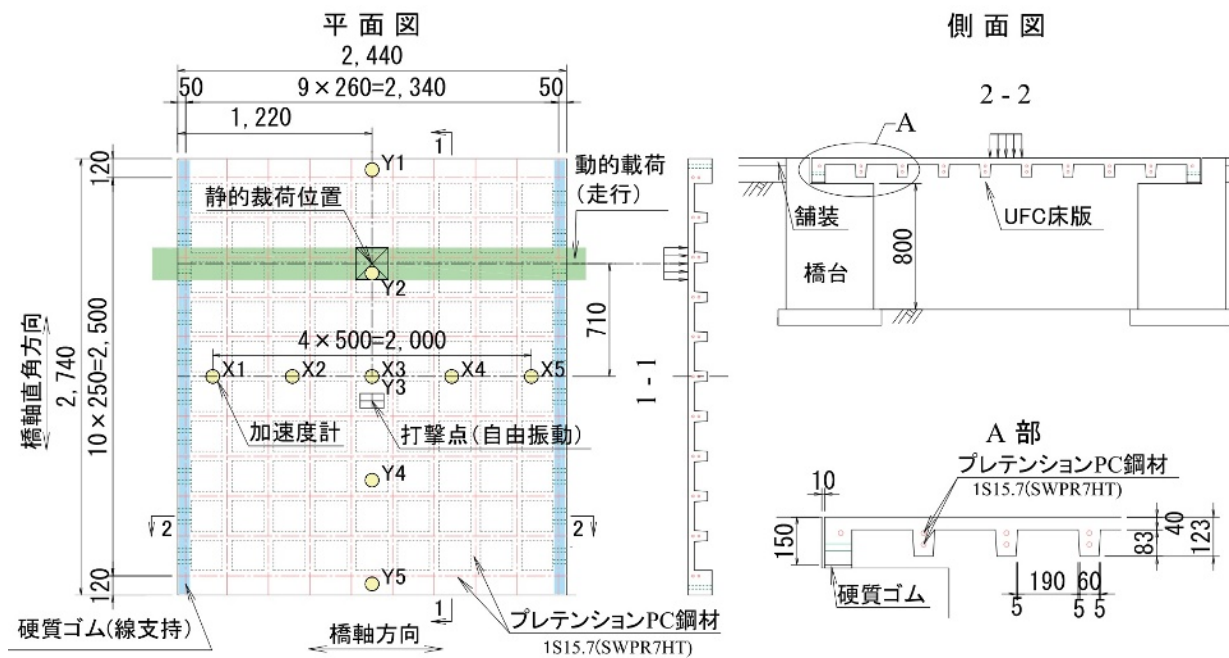


図 3.23 試験体の構造

3.4.2 振動試験

(1) 試験方法

常時微動計測および自由振動計測し、ワッフル型 UFC 床版の振動特性を評価することとした。

常時微動は、図 3.23 に示す橋軸方向に加速度計を設置した場合と、橋軸直角方向に設置した場合それぞれ 600 秒間の計測を行い、卓越振動数を確認した。自由振動計測は、床版中央の打撃点にゴム板を敷き、写真 3.1 のように木槌で打撃し床版の振動数を計測し、振動モードおよび減衰比を確認した。

(2) 試験結果

常時微動を計測した加速度の一例として加速度計 X3 における 10 秒間の計測結果を図 3.24 に示す。計測加速度によって算出した振動数スペクトルを図 3.25 に示す。橋軸方向に加速度計を設置した場合の床版中央 (X3) の卓越振動数は 53.8Hz、橋軸直角方向に加速度計を設置して計測した場合の同位置 (Y3) の卓越振動数は 53.4Hz であった。

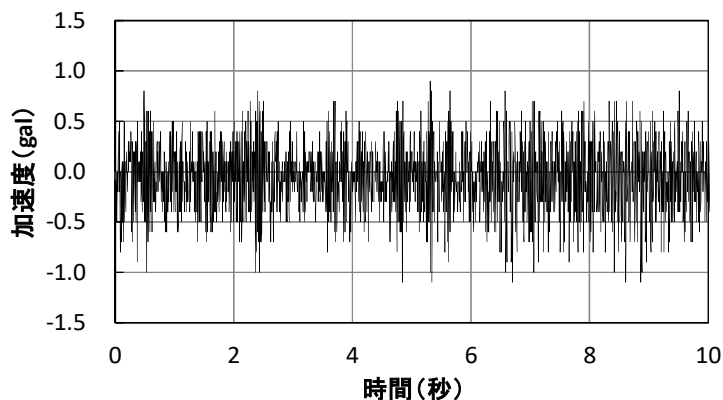


図 3.24 常時微動計測による加速度 (X3)

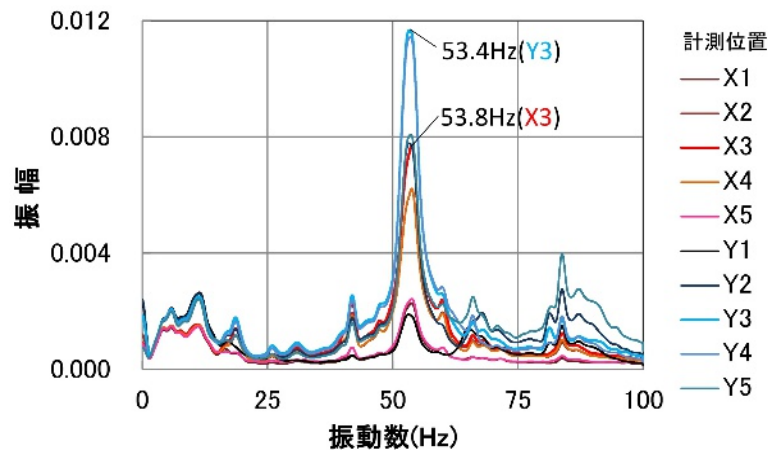


図 3.25 常時微動の振動数スペクトル

第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

自由振動を計測した加速度の一例として床版中央（X3）における計測結果を図 3.26 に示す．振動数スペクトルを図 3.27 に示す．橋軸方向に加速度計を設置して計測した床版中央（X3）の卓越振動数は 51.5Hz，橋軸直角方向に加速度計を設置して計測した同位置（Y3）の卓越振動数は 51.6Hz であった．

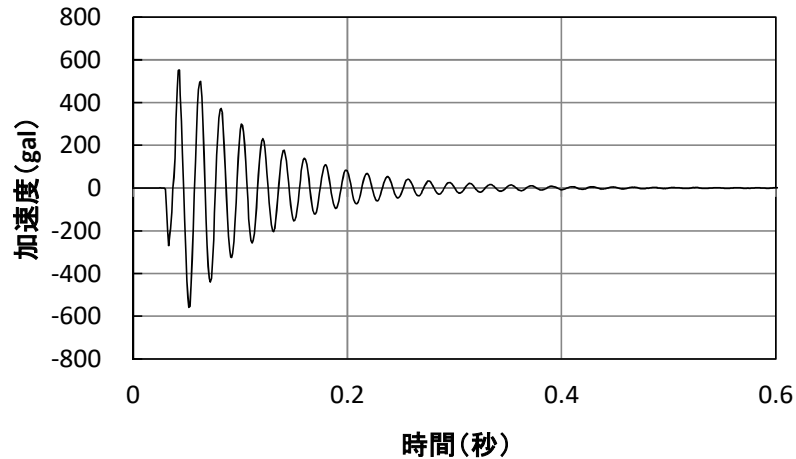


図 3.26 自由振動計測による加速度（X3）

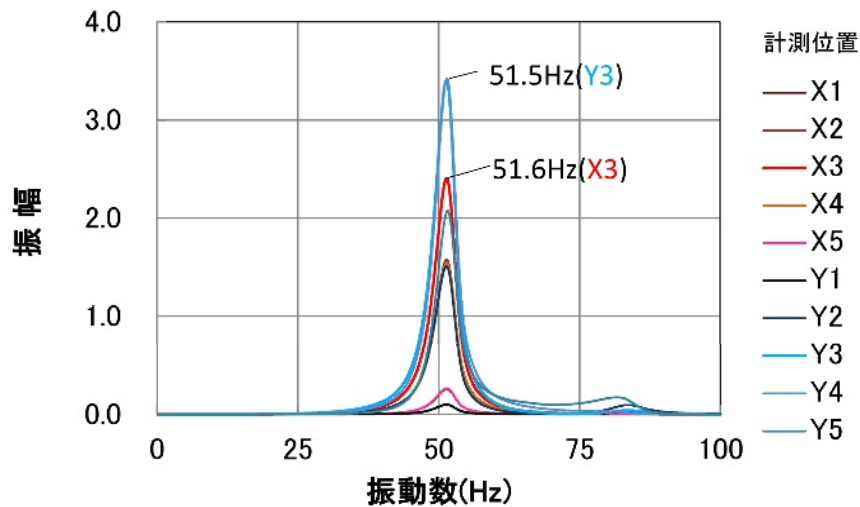


図 3.27 自由振動の振動数スペクトル

自由振動による振動数スペクトルから，半値幅法によってモード減衰比を算出した．橋軸方向測定時の卓越振動数 $f_0=53.4$ ，振幅 1/2 位置の振動数幅 $\Delta f'=0.0397$ より，モード減衰比 h は $\Delta f'/2f_0$ より 4.0%と算定された．

(3) 試験結果の考察

実験によって算出した固有振動数を評価するために，UFC 床版と曲げ剛性が同等となるシェル要素による固有値解析として，2 辺単純支持版と 2 辺固定支持版の 2 ケースを実施した．解析

の結果 2 辺単純支持版の固有振動数は 34.9Hz, 2 辺固定支持版の振動数は 75.7Hz と算定された。

振動試験によって算出した固有振動数 51.5~53.8Hz は、解析における単純支持と固定支持の中間値である。これは、振動試験における硬質ゴムによる支持状態および端部リブの剛性の影響と推測される。また、常時微動計測と自由振動計測で得られた卓越振動数の差は振幅の違いによるものと推測され、常時微動の振動数が大きいことから固定支持版の振動数に近くなっていると考えられる。

床版の固有振動数に対する車両の振動数との共振については、土木研究所において大型車が伸縮継ぎ手の段差部を走行した場合に生じる変動荷重および衝撃力についての実験・研究が行われており³⁻⁵⁾、タンデム式ダンプトラックのバネ下振動数は、中軸で 13Hz, 後軸で 18Hz となっている。よって、UFC 床版は鋼床版と比較して橋軸方向の曲げ剛性が小さいが、今回計測によって算出された UFC 床版の固有振動数は、ダンプトラックのバネ下振動数に対して 2.9~4.0 倍と乖離していることから、車両との共振の可能性は小さいと推測される。

3.4.3 载荷試験

(1) 試験方法

ダンプトラック (10t 仕様) による静的载荷と動的载荷をおこなった。载荷試験の状況を写真 3.2 に示す。前方片輪による载荷時のたわみを計測する。前方軸重は車検証より 4,480kg のため、前方片側輪荷重は 22.0kN である。床版のたわみは、図 3.23 の橋軸方向 (X 方向) 加速度計と同位置の床版下面に設置した 5 台の変位計 (D1~D5) によって計測した。

静的载荷試験は、ダンプトラックの前方片輪を、図 3.23 に示すように床版中央から橋軸直角方向に 710mm の位置に载荷し、たわみを計測した。動的载荷試験は、ダンプトラックを床版中央から橋軸直角方向に 710mm の位置に前方片輪が载荷するように 10 km/h, 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h で走行させ、たわみを計測した。

(2) 試験結果

静的载荷試験におけるたわみの計測結果を図 3.28 に示す。床版中央载荷時のたわみは 0.813mm であった。床版中央から 710mm 位置に载荷時のたわみは 0.472mm であった。動的载荷試験における床版中央たわみの計測結果を図 3.29 に示すように、0.358~0.551mm であった。

第 3 章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

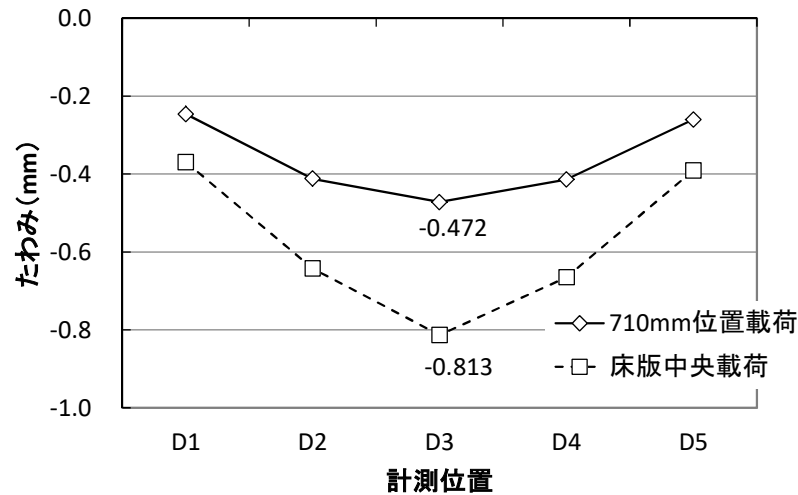


図 3.28 静的载荷時のたわみ（橋軸方向）

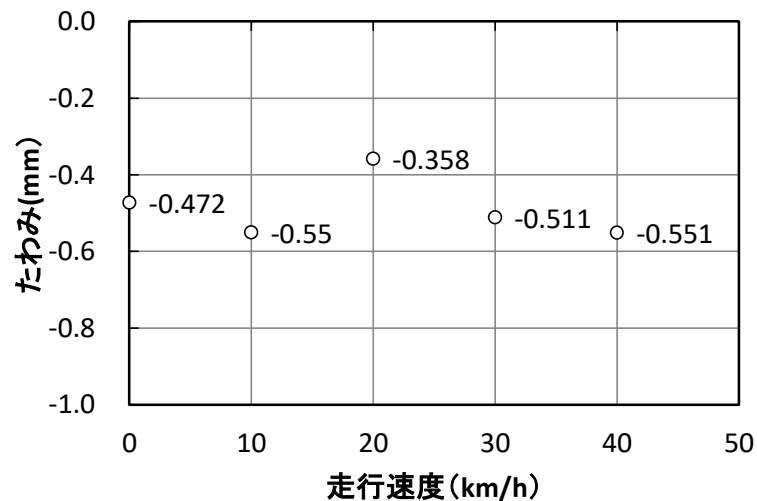


図 3.29 実車による動的载荷時のたわみ比較

(3) 試験結果の考察

試験体と同様の床版を 3.2 節と同条件の解析モデルを用い 3 次元弾性 FEM 解析によってたわみを算出した結果を表 3.6 に示す。静的载荷試験時の荷重 22.0kN で換算したたわみは 0.46mm であった。载荷試験のたわみは 0.81mm と解析の 1.76 倍であった。これは、解析時の支持条件が 2 辺固定支持であるのに対し、载荷試験時は床版の回転を許容する硬質ゴムによる 2 辺支持であるためと推測される。

表 3.6 3 次元弾性 FEM 解析によるたわみ（2 辺固定）

FEM 解析 ($P=154\text{kN}$) たわみ			22.0kN 換算たわみ
床版支点位置の 鋼横リブのたわみ δ_1	床版支間中央のたわみ δ_2	相対たわみ $\delta_2 - \delta_1$	
-0.07 mm	-3.27 mm	-3.20 mm	-0.46 mm

動的載荷時のたわみについて、速度 20km/h のたわみが静的載荷時のたわみの 0.76 倍と小さくなっていたが、これは輪荷重走行位置がずれていたものとして除外する。一方、各速度における動的載荷時たわみは、静的載荷時のたわみの 1.196~1.290 倍であった。よって、車両の速度や固有振動数、路面の状況によって変化すると考えられるが、今回の試験の範囲では、衝撃係数は 0.2~0.3 である。UFC 床版の設計では鋼床版と同様の衝撃係数として 0.4 を考慮しているため、安全側の設計条件となっていることが確認できた。

3.4.4 試験結果の考察

ワッフル型 UFC 床版について、設定した断面に対する FEM 解析を用いた応力や変位の算定、振動試験および実車による載荷試験による使用性の評価を実施した。検討によって得られた結論は以下の通りである。

- 1) ワッフル型 UFC 床版の試験体を用い、常時微動計測および自由振動計測を実施し、固有振動数は 51.5~53.8Hz と算定した。土木研究所における実験³⁻⁵⁾によって算出されたタンデム式ダンプトラックのバネ下振動数は 13~18Hz であり、床版の振動数と乖離しているため共振の可能性は少ない。
- 2) 動的載荷によって算定した衝撃係数は 0.2~0.3 であり、UFC 床版の設計に用いる衝撃係数 0.4 が安全側の設計条件となっていることを確認した。

3.5 まとめ

3.2 節では、弾性解析による応力度およびたわみの照査を述べた。第 2 章の成果を踏まえ断面寸法を設定した UFC 床版、および合成桁について、3 次元弾性 FEM 解析を用い応答値を算出した。応力度およびたわみの照査についての考察を述べた。

3.3 節では、弾性解析によるたわみ制限値の検討を述べた。2.6.3 項の検討で、鋼床版と同程度のたわみとなると推測された床版厚 180mm の UFC 床版と、UFC 床版と同じ支間長の鋼床版について、3 次元弾性 FEM 解析によってたわみを算定し比較した結果および考察を述べた。

3.4 節では、動的載荷による振動の照査を述べた。輪荷重走行試験に用いた床版を用いた振動試験による固有振動数の算定、および車両の振動数との比較を述べた。また、実車両の走行による載荷試験を実施し、設計に用いる衝撃係数の妥当性を確認に関する検討について述べた。

本章の結論は以下の通りである。

- 1) 構造計画および断面詳細の設定で検討し、部材寸法を仮定した UFC 床版（スラブ厚 40mm,

第3章 解析および動的载荷による使用性に関する照査

床版厚 123mm) および合成桁について、3 次元弾性 FEM 解析を用い、床版作用に対する UFC の応力度を算定し、UFC 指針の設計に用いる応力度の制限値以下となることを確認した。また、主応力の最大および最小値は床版の上下縁で生じ、スラブに対するリブ付け根付近の断面急変部や隅角部に大きな応力度が生じていないことを確認した。

- 2) UFC 床版の床版厚を 180mm として、3 次元 FEM 解析を用い、たわみを算定して比較を行った結果、同支間長の鋼床版とたわみが同程度になり、かつ UFC 床版では、鋼床版のたわみにおいて生じているような舗装への影響が生じる局所的にたわみが大きくなることを確認した。
- 3) ワッフル型 UFC 床版の試験体を用い、常時微動計測および自由振動計測を実施し、固有振動数は 51.5~53.8Hz と算定した。土木研究所による実験によって算出されたタンデム式ダンブトラックのバネ下振動数は 13~18Hz であり、床版の振動数と乖離しているため共振の可能性は少ない。
- 4) 動的载荷によって算定した衝撃係数は 0.2~0.3 であり、UFC 床版の設計に用いる衝撃係数 0.4 が安全側の設計条件となっていることを確認した。

本章で明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- (1) スラブ厚 40mm、床版厚 123mm の UFC 床版の場合、床版の曲げ剛性に起因して床版支間長が同じ鋼床版よりたわみが大きくなり、鋼床版と同程度にするには、床版厚を 180mm とする必要があることが明らかになった。UFC 床版のたわみを制限することは、間接的に舗装の耐久性や鋼桁における二次応力による疲労への影響を制御するためである。よって、これらの影響を直接的に検討することが課題といえる。舗装については、床版上の舗装のひずみを粘弾性解析によって算定する研究が進められており³⁻⁶⁾、このひずみを用いて舗装の耐久性への影響を定量的に評価できるようになると考える。鋼桁の二次応力による疲労についても、解析によって鋼桁に生じる応力度を算定し疲労の影響を照査することは可能であり、今後の実橋の設計で検討すべきといえる。このような検討により、UFC 床版の断面設定の最適化を図ることができるといえる。
- (2) 試験体を用いた振動試験によって、車両のバネ下振動数との共振が生じる可能性が小さいことが示されたが、鋼桁によって支持された状態と支持条件が異なるため、今後の施工時に、実構造物における振動特性を検証する必要がある。

3 章参考文献

- 3-1)小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 連続合成桁に用いる超高強度繊維補強コンクリート道路橋床版の開発, 第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集, pp. 5-1-5-8, 2013
- 3-2)土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004
- 3-3)小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝: ワッフル型床版床組の構造および剛性に関する検討, 第 71 回土木学会年次学術講概要集, 2016
- 3-4)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017
- 3-5)建設省土木研究所構造研究室: 橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書 (I-1987), 土木研究所資料, No. 2508, 1987
- 3-6)戸田圭彦, 小坂 崇, 一宮利通, 鎌田 修: 線形粘弾性解析による UFC 道路橋床版上のアスファルト舗装の変形特性に関する研究, 土木学会論文集 E1, Vol.73, No.3, I_9-I_17, 2017

4 章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

4.1 概 説

本章においては、UFC床版の安全性に関する断面破壊の照査を述べる。まず、静的載荷試験による断面破壊に関する検討と、弾塑性解析による静的載荷試験結果と比較について述べる。また、安全性に関する断面破壊の照査について、設計時の応力度の制限との関係について考察した。次に、せん断力による断面破壊の照査を述べる。UFCはマトリクスに鋼繊維を混入しているが、構造の形状や打設方法によって繊維の向きが一定方向に偏る配向性を有する場合がある。ワッフル型UFC床版については、リブの長手方向に繊維が配向する傾向にあるため、曲げに対しては有利に、せん断に対しては不利となることが推測された。よって、床版内の配向性を確認するとともに、せん断力の載荷実験を行い、安全性に関する断面破壊の照査をおこなった。

4.2 静的載荷および弾塑性解析による曲げ破壊の照査

4.2.1 静的載荷試験

(1) 試験体および試験方法

静的載荷試験の試験体は、図-5.1 に示す輪荷重走行試験の試験体のうち中央の試験体（床版 [2]）を用いた。輪荷重走行試験後に鋼桁と UFC 床版を解体し、その床版を用い、曲げに対する断面破壊に対する安全性の照査を目的として、静的載荷試験を実施することとした。

試験体の UFC の材料特性を表 4.1 に示す。圧縮強度は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体、引張強度は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の曲げ強度から UFC 指針⁴⁾¹⁾に準拠して換算したものである。

表 4.1 試験に用いた UFC 床版の材料特性

UFC 強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (N/mm ²)
圧縮強度	引張強度	
198	9.3	43,300

載荷装置を図 4.1、載荷位置（平面図）を図 4.2 に示す。試験体を鋼横リブの位置で 2 辺を単純支持し、試験体の中央において橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 500mm の載荷板を介して載荷を行った。載荷により試験体の角部が浮き上がると考えられるが、安全側の評価になると考えられるため拘束はしなかった。荷重は単調に増加させ、載荷開始から終了まで、載荷荷重をロードセルにより、試験体のたわみを変位計により計測した。

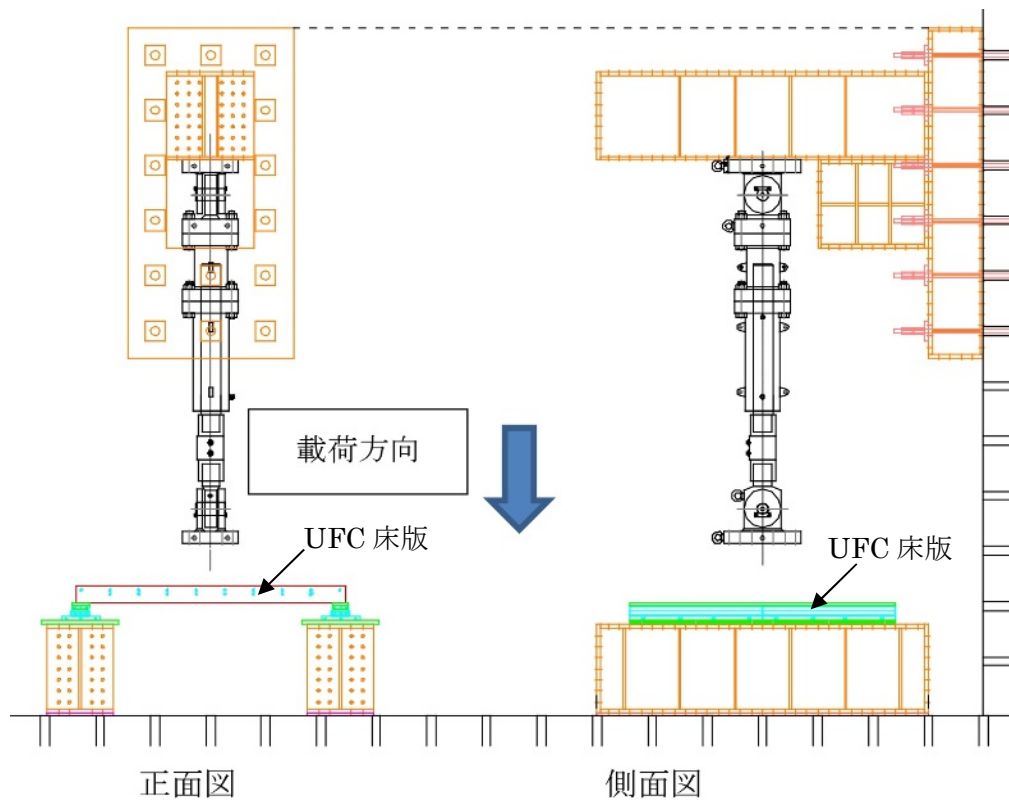


図 4.1 静的載荷試験の載荷装置

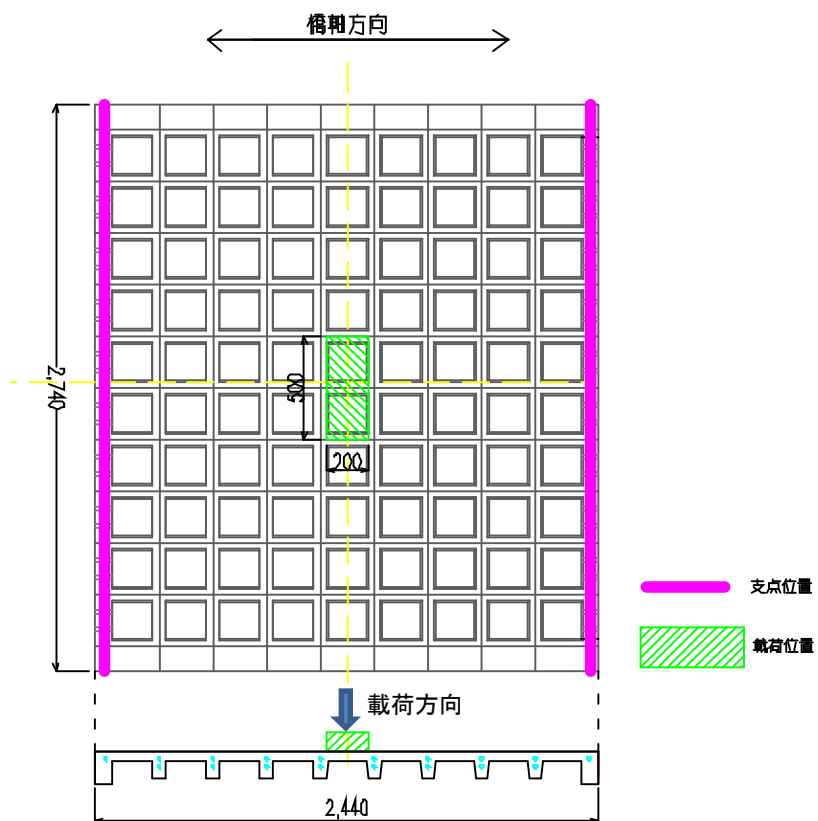


図 4.2 載荷位置 (平面図)

第4章 解析および静的载荷による断面破壊の照査

計測位置を、図 4.3 および図 4.4 に示す．試験体下面および上面において，UFC のひずみをひずみゲージで，たわみを変位計で計測した．

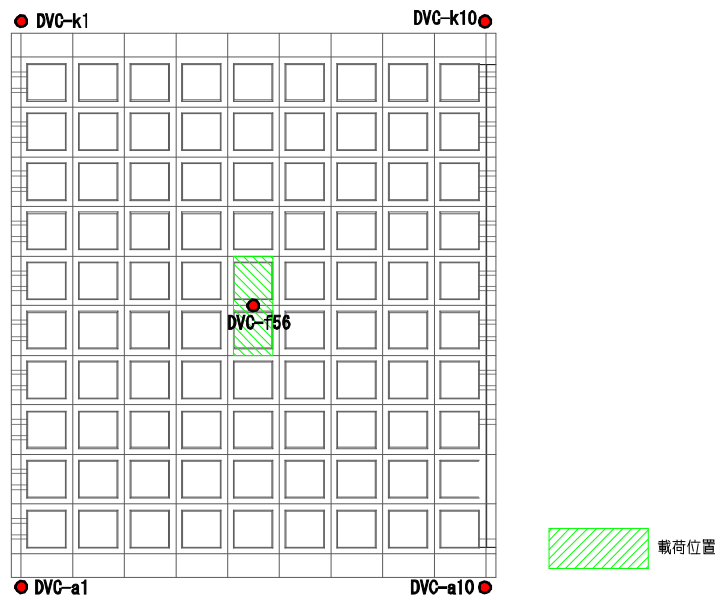
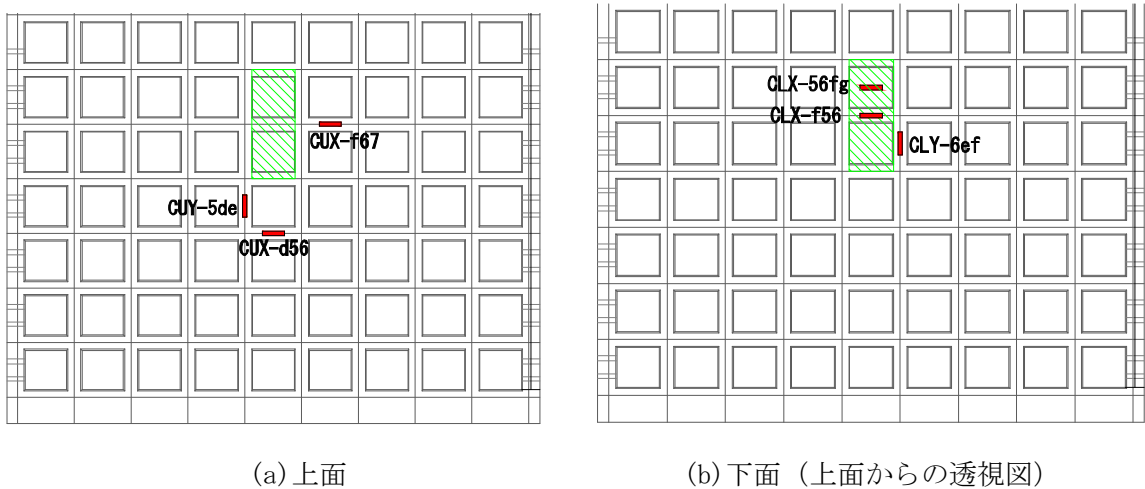


図 4.3 変位計設置位置



(a) 上面

(b) 下面（上面からの透視図）

図 4.4 ひずみ計測位置

(2) 試験結果

荷重と試験体中央（DVC-f56 位置）変位の関係を図 4.5 に示す．なお，変位はいずれも载荷方向（床版の鉛直方向下向き）が正である．約 270kN で橋軸方向のリブのうち中央のリブ下面に目視でひび割れの発生が確認された．約 380kN で荷重変位関係の勾配が低下し始めた．荷重が 750.8kN に到達したところで，大きな音とともに荷重が 567.9kN まで急激に低下したため，载荷を終了した．最大荷重時の中央変位は 88mm であった．最大荷重は道路橋示方書^{4,2)}（以下，道示という）における T 荷重 100kN/箇所約 7.5 倍であった．

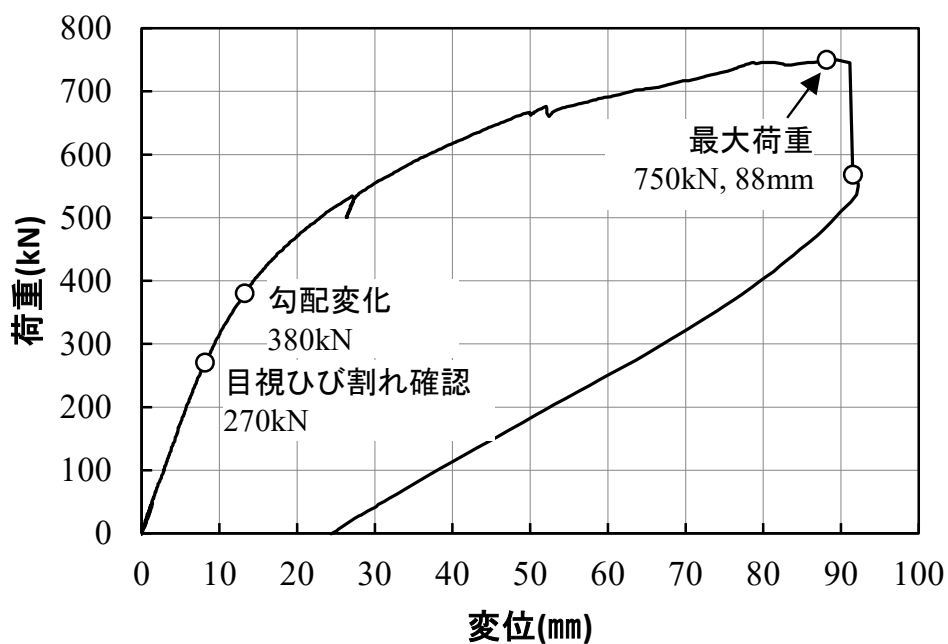


図 4.5 荷重－試験体中央変位関係

床版上面の圧壊を写真 4.1, 床版下面のひび割れを写真 4.2 に示す。載荷終了後におけるひび割れ図を図 4.6 に示す。破壊モードは曲げ圧縮破壊と推測され、押抜きせん断破壊ではなかった。載荷板の角から主として床版下面の橋軸直角方向にひび割れが生じ、床版上面の圧縮破壊領域が広がった。

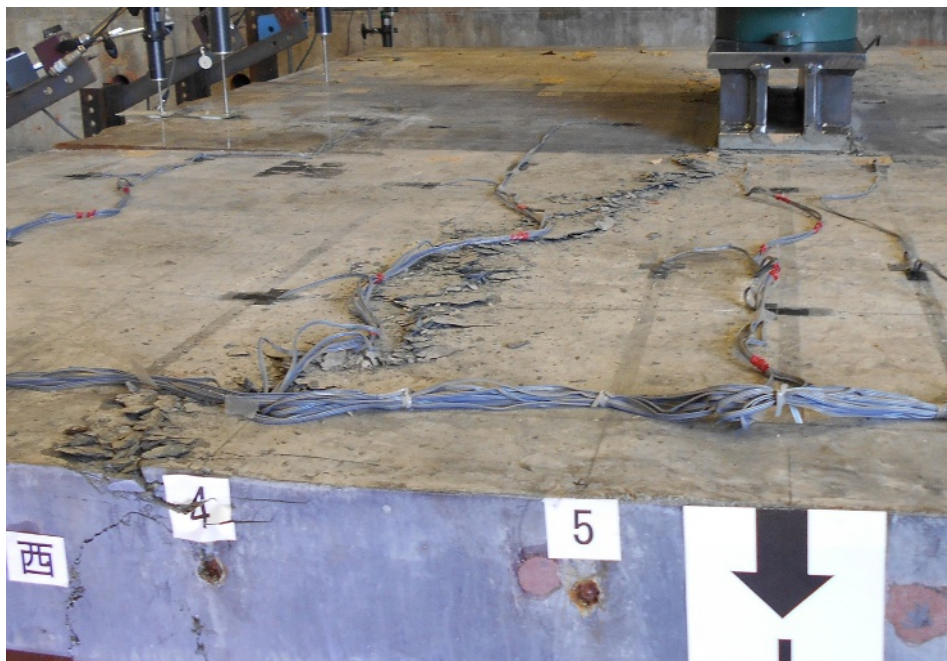
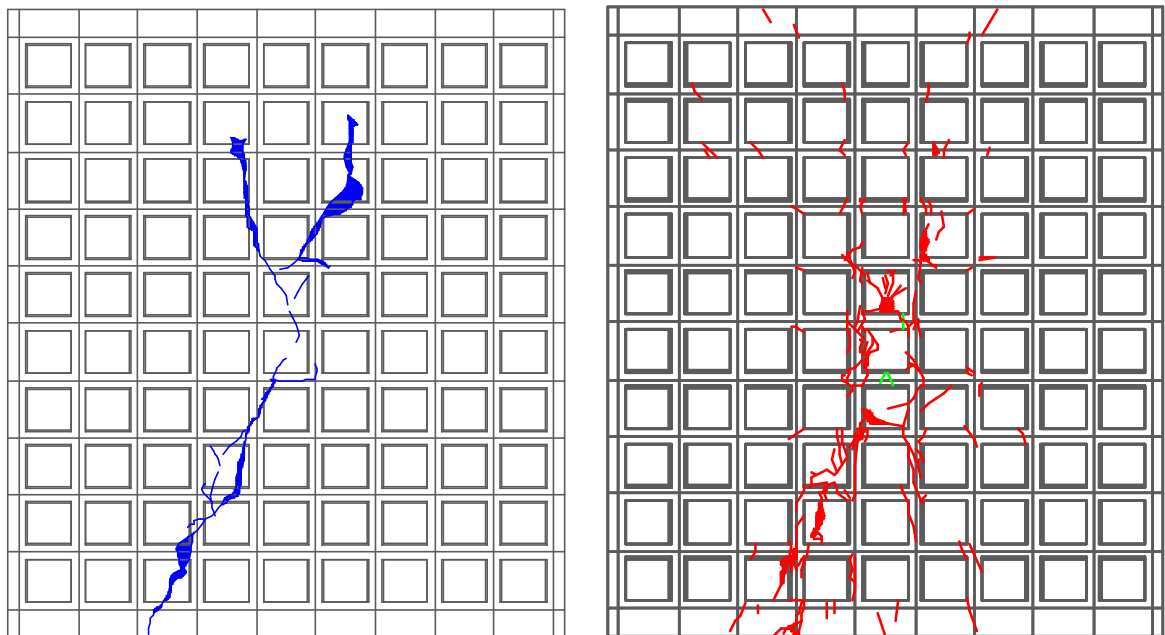


写真 4.1 床版上面の圧縮破壊状況

第4章 解析および静的載荷による断面破壊の照査



写真 4.2 床版下面のひび割れ状況



(a) 上面

(b) 下面（上面からの透視図）

図 4.6 載荷終了後のひび割れ図

荷重と試験体角部変位の関係を図 4.7 に示す。試験体の角部の変位は荷重が 400kN を超えたあたりから浮上りが生じ、破壊時には最大 2mm の浮上りが生じた。なお、PC 鋼材のひずみは計測していないため、PC 鋼材が降伏したかどうかは確認できていない。

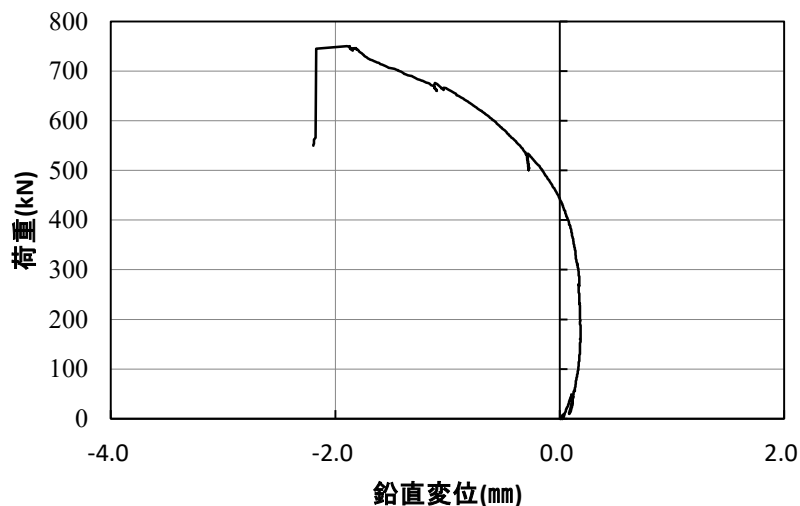


図 4.7 荷重－試験体角部変位関係

荷重と下面ひずみの関係を図 4.8 に示す．約 240kN で荷重と橋軸方向（床版支間方向）リブ下面のひずみ（CLX-f56）の関係が非線形となる挙動が確認されたためひび割れが生じたと推定される．試験後の残留ひび割れ幅は約 0.3mm であった．

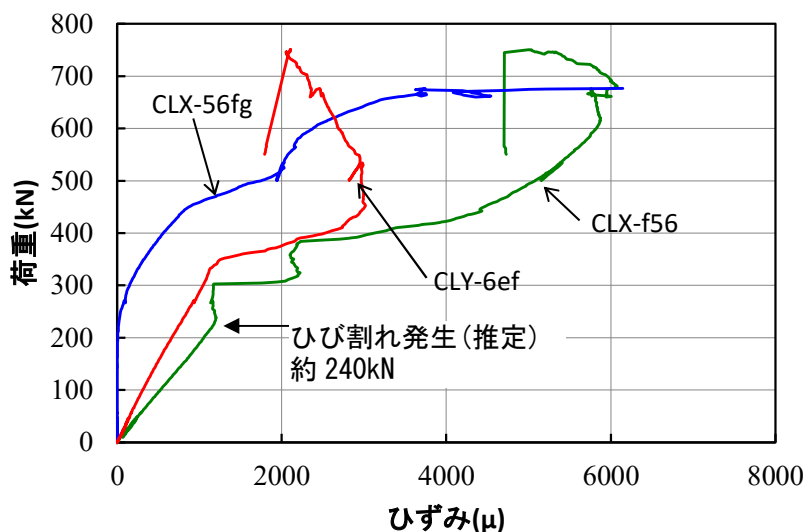


図 4.8 荷重－下面ひずみ関係

橋軸直角方向リブ下面のひずみ（CLY-6ef）は、橋軸方向リブ下面のひずみ（CLX-f56）に比べると小さいが、荷重が約 320kN で非線形となる挙動が確認され、ひび割れが生じたと考えられる。支間方向は橋軸方向であるが、橋軸直角方向のリブが荷重を伝達していることがうかがえる。厚さ 40mm のスラブ下面の橋軸方向ひずみ（CLX-56fg）は荷重が約 220kN まではほぼゼロであったが、これはスラブ下面が床版の中立軸の位置にあたるためと考えられる。橋軸方向リブにひび割れが発生した 240kN 以降は中立軸がスラブ内に移動したため引張ひずみが発生していると考えら

れる．なお，破壊後はスラブ下面にもひび割れが確認された．

荷重と上面ひずみの関係を図 4.9 に示す．圧縮破壊した箇所と近い位置における橋軸方向のひずみ（CUX-d56）は約 3700μ であった．UFC の圧縮応力ひずみ曲線はピークまではほぼ直線であるため，終局ひずみは圧縮強度をヤング係数で除した値である約 4600μ に近いと考えられるが，破壊した箇所から若干離れているため，これに比べると小さい値であった．破壊が橋軸直角方向に進行したため，載荷点の支点側における橋軸方向ひずみ（CUX-f67）は約 1300μ ，橋軸直角方向のひずみ（CUY-5de）は約 310μ と小さい値であった．

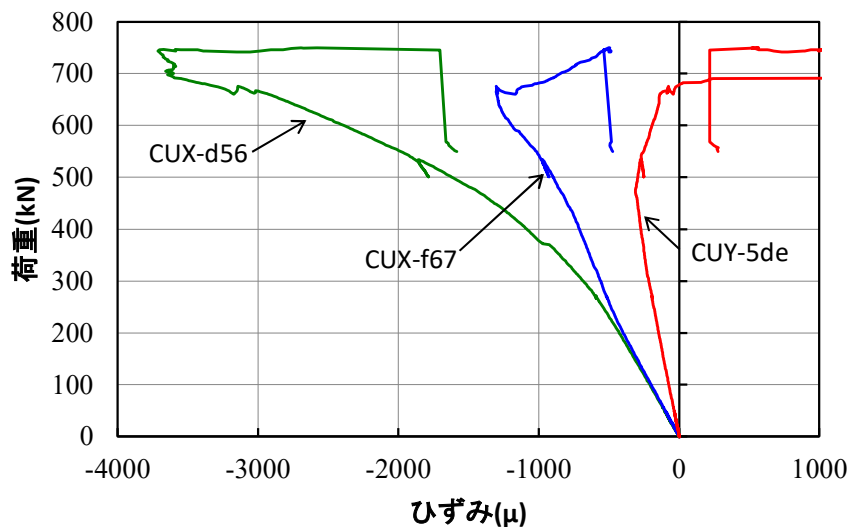


図 4.9 荷重－上面ひずみ関係

静的載荷試験により，中央に荷重を載荷した際の UFC 床版の破壊モードは，曲げ圧縮破壊であることが明らかになった．橋軸直角方向のリブが荷重を伝達することによって主として橋軸直角方向に破壊が進行することが確認された．

また，UFC 床版の設計は，輪荷重（約 140kN ）に対して設計ひび割れ発生強度 f_{crd} で応力制限しているが，本床版のひび割れ発生荷重は 270kN と設計作用よりも大きく，最大荷重は 750kN であるため，ひび割れが生じた後に大きな靱性を有するということがわかった．これは，設計で想定する作用を超過する外力が作用した場合において，ひび割れが生じたとしても最大荷重に到達するまで十分な性能を有しているといえる．

4.2.2 弾塑性解析

(1) 解析モデル

UFC 床版の安全性に関する断面破壊の照査のために，曲げ耐荷力および破壊性状を確認することを目的に，材料非線形を考慮した 3 次元弾塑性 FEM 解析モデルに漸増載荷する解析を実施し

た．3次元弾塑性 FEM 解析は，汎用ソルバーコードである DIANA を使用した．

解析モデルは図 4.10 に示す鋼横リブに2辺単純支持されたワッフル型 UFC 床版である．2.5m（橋軸方向）×7.5m（直角方向）の UFC 床版 1 枚を対象としてモデル化した（図 4.11）．

解析対象の床版は，製作時の反り（プレテンション PC の影響）を初期変形（変形のみ，初期応力およびひずみは無視）として考慮する．初期変形を算出する際の解析は4点支持とした．弾塑性解析における線支持の条件は，単純支持または回転固定の2ケースとした．

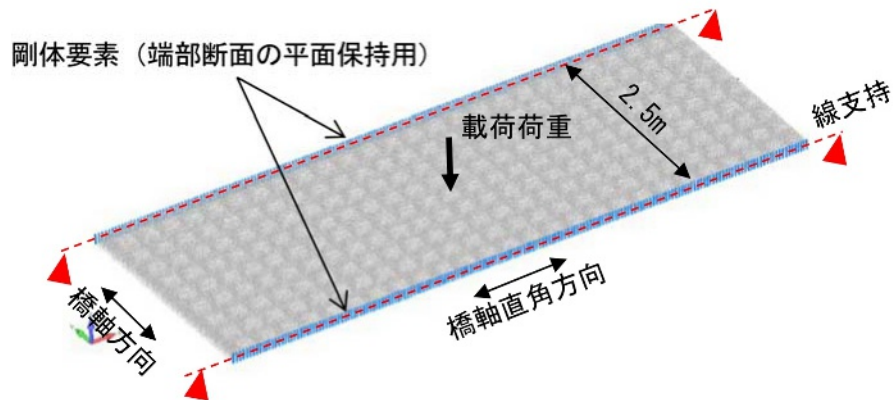


図 4.10 解析モデル（全体図）

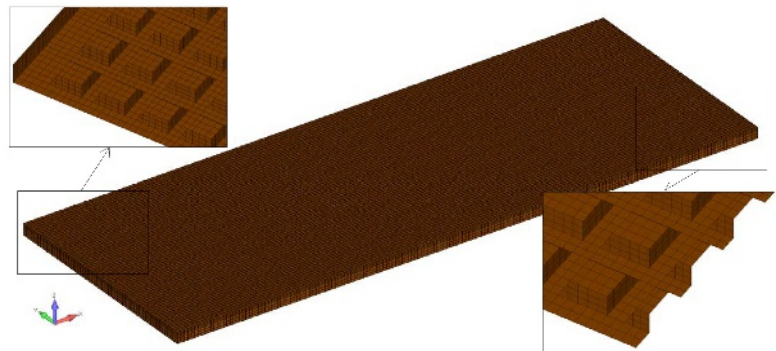


図 4.11 解析モデル（床版下面のリブ形状）

(2) 材料の構成則

PC 鋼材 1S15.7 (SWPR7HT) は，高強度 PC 設計施工指針^{4,3)}に準拠し，非線形特性はトリリニア型でモデル化した．解析に用いた PC 鋼材の応力-ひずみ関係を図 4.12 に示す．解析に用いた UFC の応力-ひずみ関係は，圧縮側はバイリニア型（図 4.13），引張側は軟化を考慮したモデル（図 4.14）とした．

第 4 章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

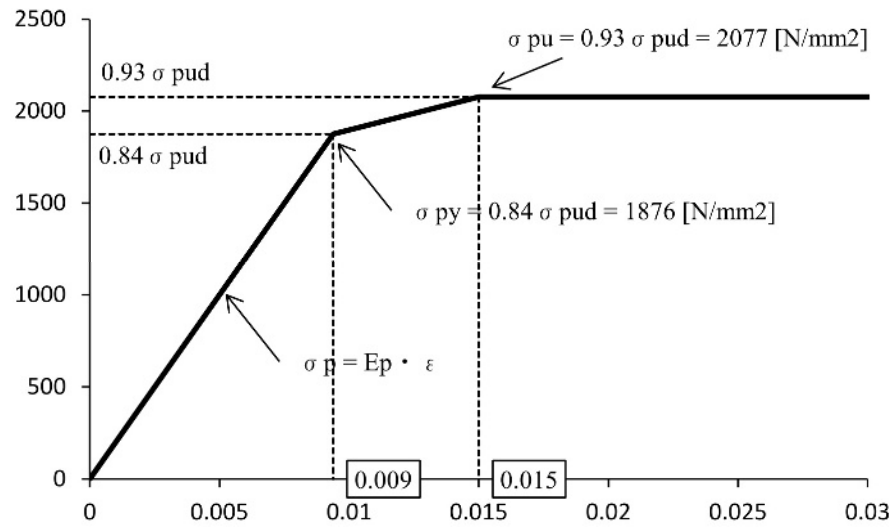


図 4.12 弾塑性解析に用いる PC 鋼材の応力-ひずみ関係

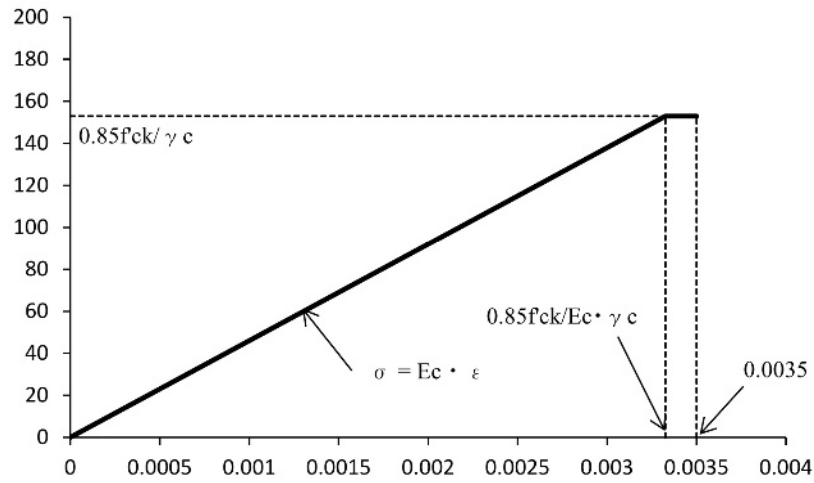


図 4.13 弾塑性解析に用いる UFC の応力-ひずみ関係（圧縮側）

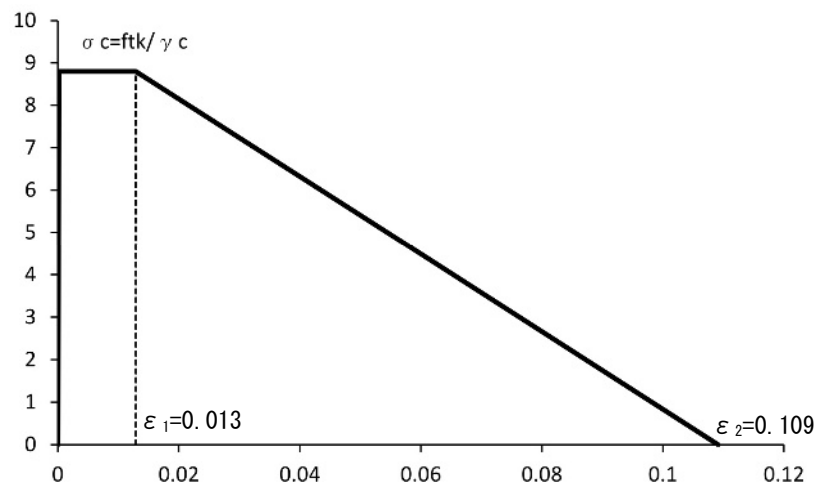


図 4.14 弾塑性解析に用いる UFC の応力-ひずみ関係（引張側）

図 4.14 における ε_l および ε_2 の算出を下記に示す. w_{lk} および w_{2k} については, AFt 系 UFC の指針⁴⁴⁾に準拠して, それぞれ $w_{lk}=0.5\text{mm}$, $w_{2k}=4.3\text{mm}$ として計算した. また, 等価検長を算出する断面の高さ h_b については, UFC 床版の床版厚である 123mm とした.

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{cr} + w_{lk} / L_{eq} = 0.0001913 + 0.5/39.4 = \underline{0.012882}$$

$$\varepsilon_{cr} = (f_{tk}/\gamma_c) / E_c = (8.8/1.0)/46,000 = 0.0001913$$

w_{lk} : ひび割れ発生後, 一定応力を保持できる開口変位 0.5mm

$$\text{等価検長 } L_{eq} / h_b = 0.8 \times \{1 - 1 / (1.05 + 6h/l_{ch})^4\}$$

$$\rightarrow L_{eq} = 123 \times 0.8 \times \{1 - 1 / (1.05 + 6 \times 123/8520)^4\} = 39.4\text{mm}$$

部材厚 $h=123\text{mm}$

$$\text{特性長さ } l_{ch} = G_F E_c / f_t^2 = 8,520 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_2 = w_{2k} / L_{eq} = 4.3 / 39.4 = \underline{0.109137}$$

w_{2k} : ひび割れ発生後, 引張応力が 0 となる開口変位 4.3mm

(3) 荷重

荷重は, 解析モデル中央付近のリブ直上またはリブ間に $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ の範囲に単位面分布荷重を漸増載荷する. なお, 単位面分布荷重は自重およびプレストレスを導入した後に載荷する載荷荷重は, 図 4.15 に示すリブ直上およびリブ間の 2 パターンとする.

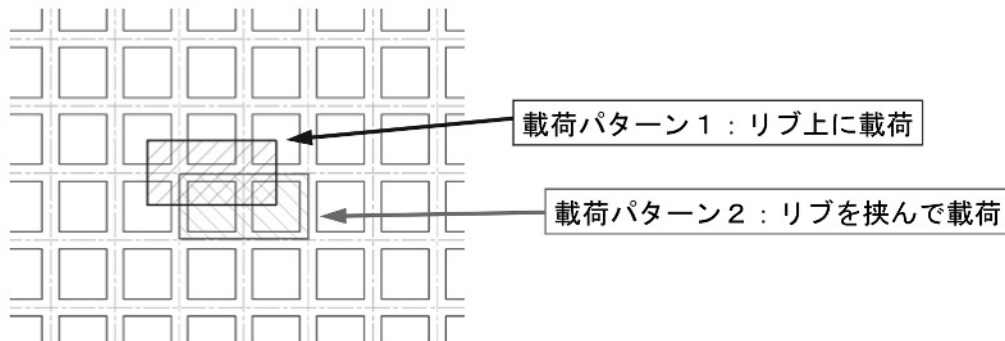


図 4.15 荷重載荷位置

(4) 解析結果

図 4.16 に解析によって算定した荷重－変位曲線を示す. ワッフル型 UFC 床版の曲げ耐力は $700 \sim 800\text{kN}$ であった. 道示の設計輪荷重である T 荷重の 100kN/箇所 の 7～8 倍程度の耐力があり, 断面破壊に対して十分な安全性を有するといえる.

第4章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

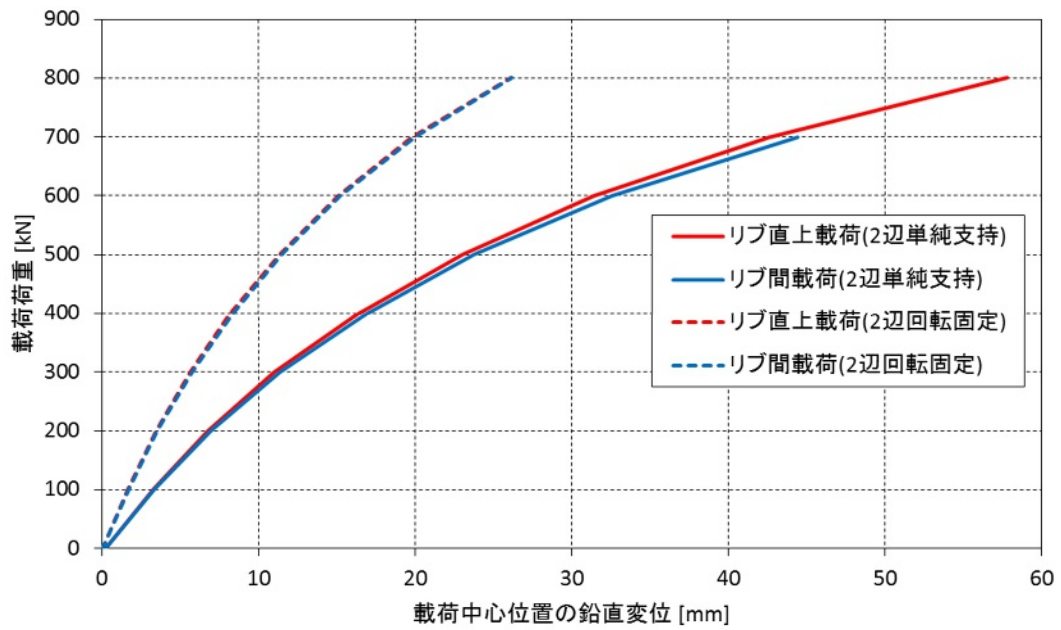


図 4.16 載荷荷重—鉛直変位関係

2辺支持でリブ直下に載荷したケースについて、500kN 載荷時のひび割れの分布図を図 4.17 に示す。着色部にひび割れが生じており、拡大図に示すようにリブ交差部の付け根付近でひび割れ幅が大きくなっており、静的載荷試験におけるひび割れ状況（写真 4.2）と一致した傾向を示している。

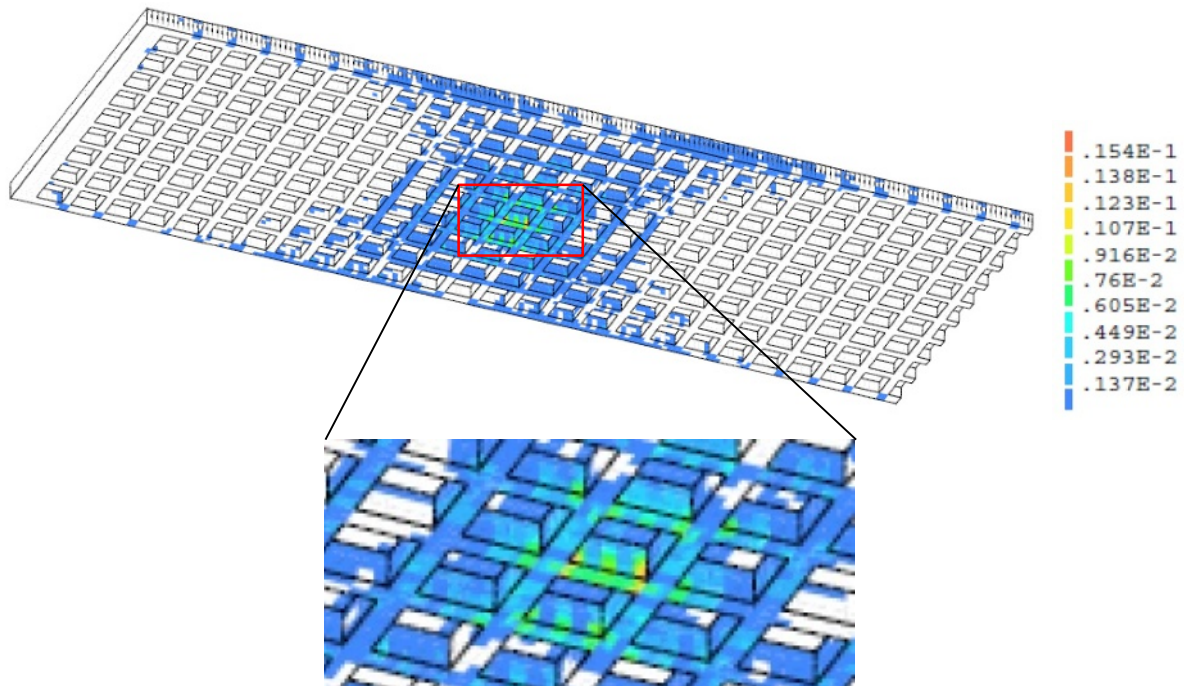


図 4.17 床版下面のひび割れ分布図（リブ直上載荷 500kN）

図 4.18 および図 4.19 にリブ直上 500kN 載荷時（プレストレス力+床版自重考慮）の応力分布図を示す。床版上面の載荷位置付近は、 150N/mm^2 の圧縮応力度が生じている。図 4.17 に示す床版下面のひび割れ範囲の方が広く生じているため、床版下面のひび割れが先行して生じ、その後、床版上面の圧縮応力度が UFC の強度に達し圧壊が生じることを示しており、この順序についても、静的載荷試験の傾向と一致することがわかった。

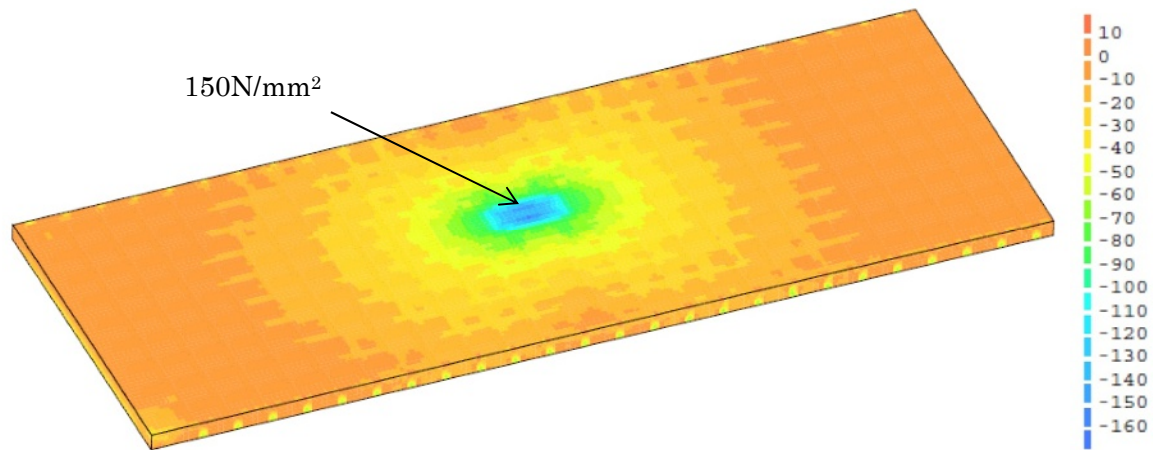


図 4.18 床版上面の主応力図（リブ直上載荷 500kN）

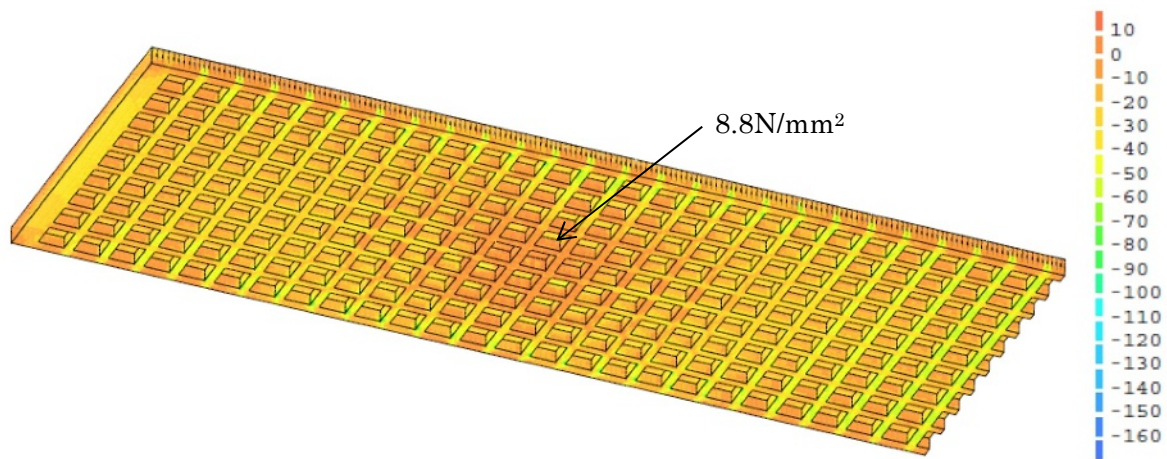


図 4.19 床版下面の主応力図（リブ直上載荷 500kN）

図 4.20 に床版下面の最大ひずみ分布を示す。500kN 載荷時の最大ひずみは 0.0171 であり、図 4.14 に示す引張側の応力-ひずみ関係では、 $\varepsilon_1=0.013$ を超えてはいるが $\varepsilon_2=0.109$ 以下であり、繊維の架橋効果によって引張抵抗している状態といえる。

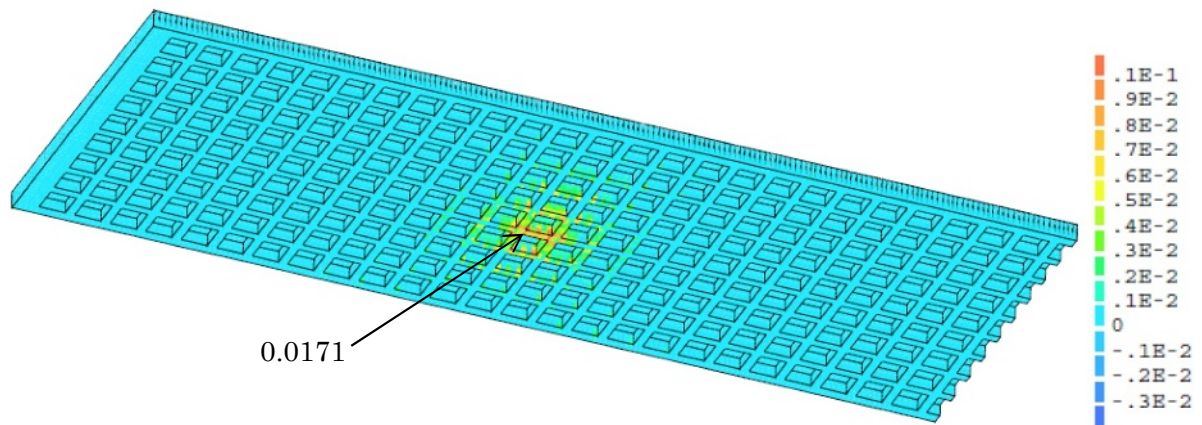


図 4.20 床版下面の最大ひずみ分布（リブ直上載荷 500kN）

4.2.3 試験および解析結果の考察

4.2.1 項の静的載荷試験の結果（図 4.5）と 4.2.2 項の弾塑性解析（リブ間載荷）の結果（図 4.16）の重ね合わせを図 4.21 に示す。静的載荷試験の最大荷重 750.8 kN に対して、解析での破壊は 700～800kN であり概ね一致する結果であった。また破壊形態についても、4.2.1 項で述べたように床版下面のリブに生じたひび割れが進展後、床版上面が圧縮強度に達する曲げ圧縮破壊でありその傾向は一致していた。弾塑性 FEM 解析によって UFC 床版の挙動が再現できることを示している。

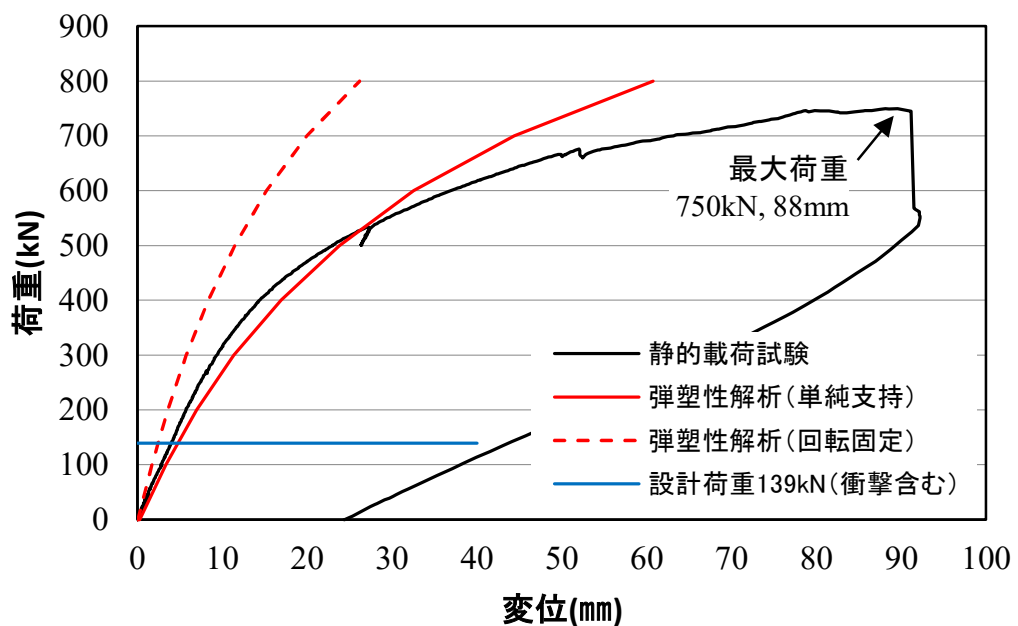


図 4.21 荷重－変位関係の比較

400kN 付近までの剛性は、載荷試験より解析の方が若干小さくなっているのは、図 4.14 の解析に用いた UFC の応力-ひずみ関係（引張側）において設計引張強度 8.8N/mm^2 で実施していることが影響していると推測する。また、400kN 以降のひび割れ後の剛性は解析の方が大きくなっている。これは、解析に用いた応力-ひずみ関係（引張側）における等価検長を 39.4mm と設定していること（4.2.2(2)）が影響していると推測する。等価検長はひび割れ間隔を表しているが、UFC 床版のひび割れは写真 4.2 に示すようにリブ交差部において生じているため、ひび割れ間隔は 200mm 程度といえる。よって、等価検長が大きくなると、応力-ひずみ関係（引張側）の引張軟化しはじめるひずみ ε_1 や、引張抵抗がゼロになるひずみ ε_2 が小さくなるため、床版としての剛性低下の割合が実験の方が大きくなったものと推測する。

設計活荷重に対して 7~8 倍程度の耐荷力であることから安全性に関する断面破壊の照査としては、十分に耐荷力をもって満足していることが確認できた。このことから、使用性に関して定めている応力度の制限（圧縮側は $0.6f'_{ck}=108\text{N/mm}^2$ ，引張側は設計ひび割れ強度 $f_{crd}=8.8\text{N/mm}^2$ ）を適用して設計することによって、設計で想定する作用を超過する外力が作用して、ひび割れが生じたとしても断面破壊までは設計荷重に対して 7~8 倍の余剰耐力を有しているといえる。

4.3 静的載荷によるせん断破壊の照査

4.3.1 検討の概要

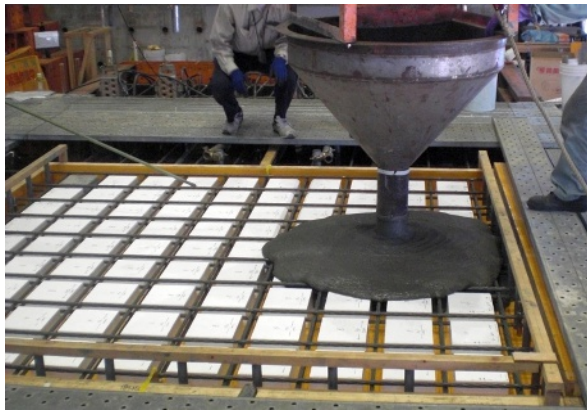
UFC 床版のせん断破壊に対する安全性の検討を行った。既往の研究により打設時の UFC が流動することによって繊維が配向するため打設方法によって構造性能が異なることが知られている^{4,5)}。リブに沿って UFC が流動することによってリブの軸方向に繊維が配向すると考えられ、繊維の配向性はせん断耐力にも影響を与えると考えられる。そこで、UFC 床版の打設方法を反映して製作したリブ 1 本分の梁部材から試験体を採取し、直接引張試験を行って配向性の影響が引張強度に与える影響を確認した。

繊維がリブの軸方向に配向することによって曲げに対しては有利に、せん断に対しては不利になると考えられる。特に、プレストレスが導入される部材では斜めひび割れ角度が小さくなるためせん断耐力に与える影響が大きいと考えられる。また、リブの幅が小さい UFC 床版ではリブとスラブが分断されるような破壊モードが生じることが懸念される。そこで、UFC 床版のリブ 1 本分の断面を模擬した 2 種類の梁部材のせん断破壊実験を行ってせん断破壊耐力を直接確認することとした。また、3 次元弾塑性 FEM 解析を行い、引張強度がせん断耐力に与える影響について検討した。さらに、UFC 指針に準じて 2 種類の方法で押抜きせん断耐力を試算し、押抜きせん断に対する安全性を検討した。

4.3.2 繊維の配向に関する検討

(1) UFC の打設方法

羽田国際空港 D 滑走路の UFC を用いた 1 方向のリブ付き床版の既往研究において、打設方法の違いにより構造性能が異なることが、床版の載荷実験によって確認されている。その結果、丸口バケットを用いて短辺方向中央部を長辺方向に移動させながら打設する方法が採用されている⁴⁻⁵⁾。本 UFC 床版もリブを有する床版であることから、上記の打設方法を採用することとし、輪荷重走行試験の試験体製作や実橋適用時の床版製作において同方法で打設した（写真 4.3）。



(a) 輪荷重試験用の試験体



(b) 実橋用のワッフル型 UFC 床版

写真 4.3 UFC 床版の打設状況

文献 4-5)によると、上記の打設方法ではリブの軸方向に UFC が流動することにより繊維がその方向に配向し、ひび割れ発生後の剛性が大きくなるとされている。一方、文献 4-6)の周らの研究によると、部材軸方向に流動させた場合でも、UFC が部材端部に到達して前方に流れなくなると UFC は上方に流れ始め、部材軸方向ではなく鉛直に近い方向に繊維が配向することが指摘されている。本床版の場合は、部材の幅に比べて高さが小さいこと、リブに配置された PC 鋼材が流動を阻害することから、UFC が部材端部に到達する前に床版の大部分で充填が完了するため、繊維は、リブは軸方向に、スラブ内は水平方向のランダム方向に配向していると推測する。

(2) 洗い出し試験による繊維の状態確認

リブ内の繊維の配向状況を確認する目的でリブと同形状の梁試験体による洗い出し試験を実施した（写真 4.4）。UFC の凝結始発直前（打設の約 6 時間半後）にハイウォッシャーで図 4.22 に示す位置を洗い出し、繊維の配向を確認した。繊維の配向状況を写真 4.5 に示す。

繊維は、リブ、フランジ（床版におけるスラブ）とも、部材軸方向（型枠に平行）繊維が指向する配向性を確認した。この繊維の配向性は曲げ引張応力に対しては有効といえるが、せん断に対しては抵抗しにくい方向となっているため、4.3.3 項以降の検討を実施することとした。なお、繊維の分散性については均等に分散していることが確認できた。



(a) UFC の打設



(b) 洗い出し試験

写真 4.4 洗い出し試験実施状況

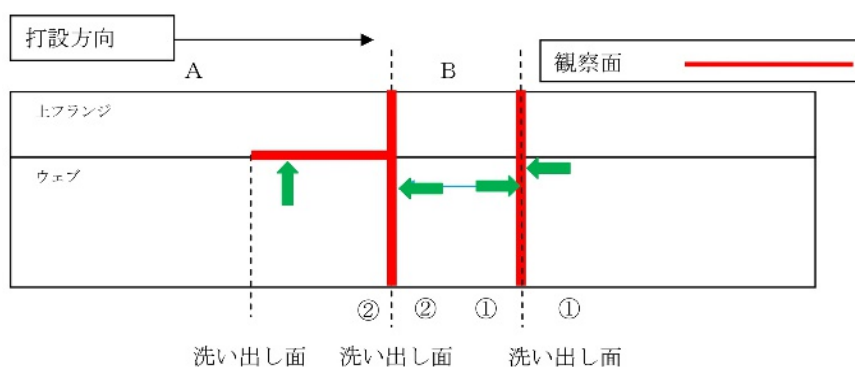


図 4.22 洗い出し位置

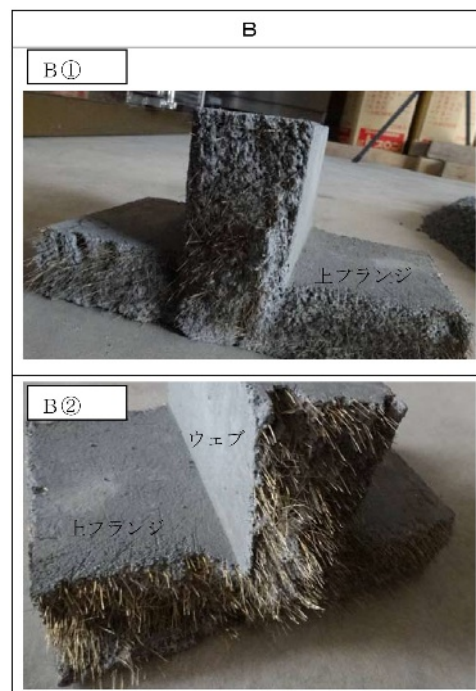
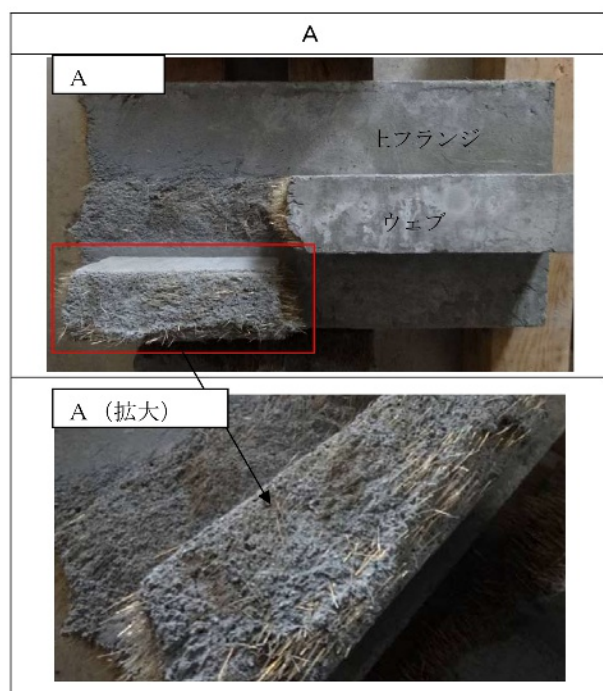


写真 4.5 UFC 部材内の鋼繊維の配向状況

(3) 引張強度試験による繊維の配向性の影響検討

部材軸方向に配向した場合，引張強度にどのような影響を与えるか確認するため，UFC を部材軸方向に流動させて製作した梁部材から試験体を採取して直接引張試験を行った．梁部材は UFC 床版のリブ 1 本分を模擬した断面とした．ただし，PC 鋼材は配置しなかった．UFC の打設は部材端部から UFC を流動させて行ったが，UFC が部材端部に到達する前に試験体採取区間のリブは，ほぼ充填が完了した（写真 4.6）．



写真 4.6 直接引張試験用の UFC 梁部材の打設状況

試験体の形状寸法を図 4.23，採取位置を図 4.24 に示す．試験体は 60mm×40mm の断面で長さ 140mm とし，部材軸方向および鉛直方向に 4 体ずつ採取した．試験体には長さ方向中央位置の 4 辺に 15mm と 7.5mm の切欠きを設けた．試験方法は直接引張試験とし，試験体の両端を治具に固定して変位制御で引張力を与えた．

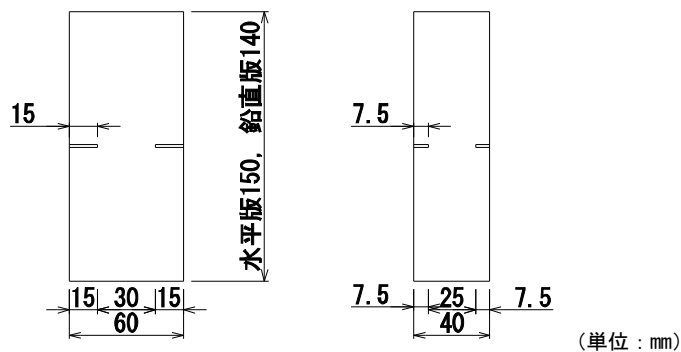


図 4.23 直接引張試験体の形状寸法

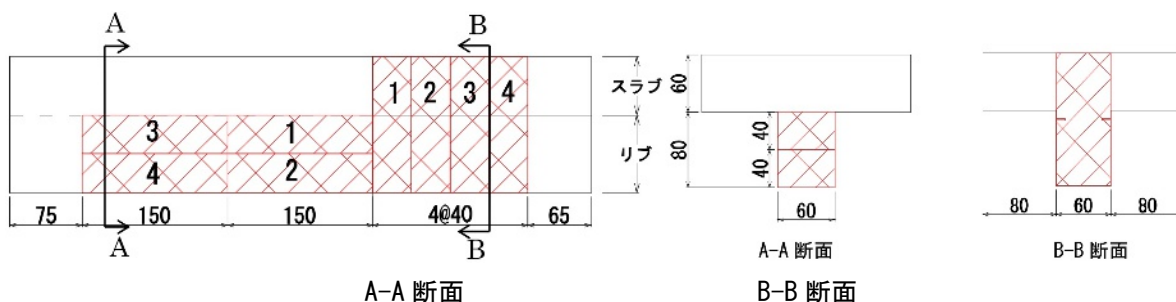


図 4.24 梁部材における直接引張試験体の採取位置

試験に用いた UFC は表 2.1 の標準配合によって製作した。養生は常温の封緘養生を 24 時間行い、85°C の蒸気養生を 24 時間行った。試験時の圧縮強度は 19.5 N/mm^2 、引張強度は 12.5 N/mm^2 であった。ただし、圧縮強度は $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体、引張強度は $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の曲げ強度から UFC 指針に準拠して換算したものである。

表 4.2 に試験結果を示す。鉛直方向の引張強度は水平方向の引張強度の 43%（平均値の比較）となっており、部材軸方向に鋼繊維が配向した影響であると考えられる。なお、水平方向に採取した試験体の No.2 と No.4 が No.1 と No.3 よりも引張強度が大きくなっているのは、No.1 と No.3 が上下面とも切断面であるのに対し、No.2 と No.4 では下面が型枠面であり、切欠きは設けたものの鋼繊維が型枠面に沿って鋼繊維が配向した影響があったと考えられる。

表 4.2 採取試験片の直接引張試験による引張強度

試験体 採取方向	引張強度 (N/mm^2)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	平均
水平方向	14.7	17.8	15.7	19.4	16.9
鉛直方向	7.2	7.3	7.7	6.8	7.3

4.3.3 梁部材の静的載荷試験

(1) 試験体

試験体の概要を図 4.25 に示す。試験体は、UFC 床版のリブ 1 本分を模擬したプレテンション梁部材（試験体 1）、および異形 PC 鋼棒を軸方向筋として配置した RC 梁部材（試験体 2）の 2 体とした。前者はプレテンション方式でプレストレスを導入した梁部材のせん断耐力を確認すること、後者は支点より外側の部材長を短くすることによりリブとスラブ（梁部材ではフランジであるがスラブと呼ぶ）が分断される破壊の抵抗断面を小さくしてこの破壊モードが起こらないことを確認することを目的としている。

第 4 章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

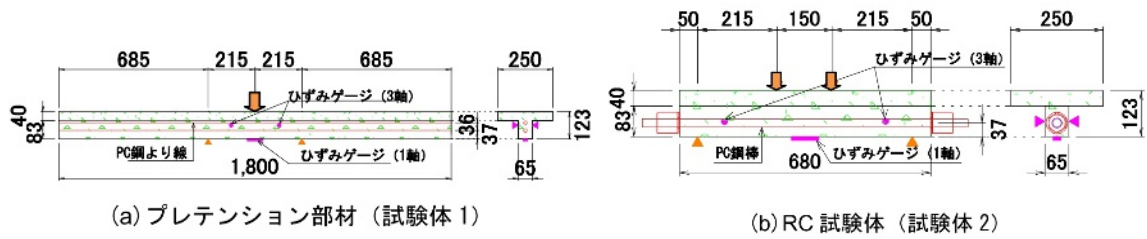


図 4.25 静的載荷によるせん断実験試験体

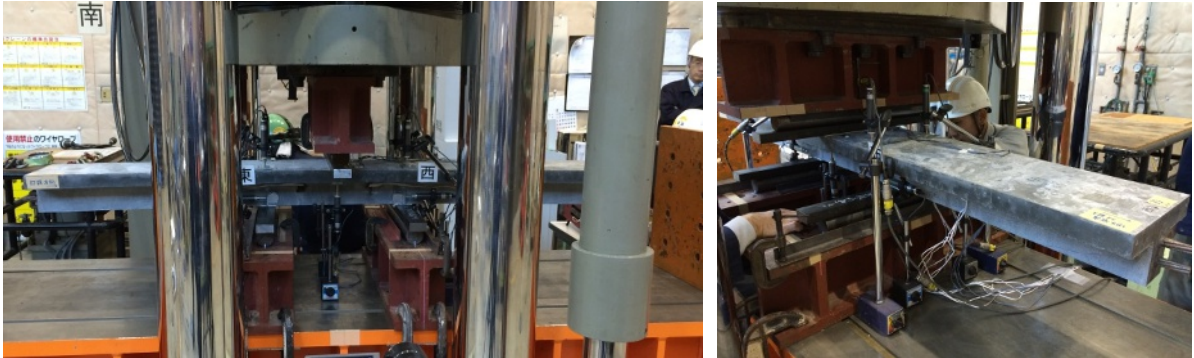


写真 4.7 静的載荷によるせん断実験状況（試験体 1）

いずれの試験体も直接引張試験を採取した試験体と同様，繊維が部材軸方向に配向するように留意して製作した．実験時の UFC の圧縮強度，引張強度および有効プレストレスを表 4.3 示す．ただし，圧縮強度は $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体，引張強度は $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の曲げ強度から UFC 指針に準拠して換算した．試験体 1 では，PC 鋼材の緊張力を 240kN/本 としてプレテンション方式でプレストレスを与えた．文献 4-7) を参考に有効係数を 0.7 として推定した有効平均圧縮応力度は 21.8N/mm^2 であった．

表 4.3 試験に用いた UFC 梁の材料特性

	UFC 強度 (N/mm^2)		ヤング係数 (kN/mm^2)	有効プレストレスによる平均圧縮応力度 (N/mm^2)
	圧縮強度	引張強度		
試験体 1	213	13.1	46.1	21.8
試験体 2	205	13.6	46.3	—

(2) 試験方法

試験体を単純支持し，幅 50mm の載荷板を介して試験体 1 では 1 点載荷，試験体 2 では 2 点載荷で載荷を行った（図 4.25）．荷重は単調に増加させ，載荷開始から終了まで，載荷荷重をロードセルにより，試験体中央のたわみを変位計により計測した．また，試験体下面および側面において，UFC のひずみをそれぞれ 1 軸ゲージおよび 3 軸ゲージで計測した．

(3) 試験結果

実験結果として荷重と試験体中央鉛直変位の関係を図 4.26 に示す。また、荷重とひずみの関係の計測例として、試験体 1 の下面のひずみ、ならびに側面の 3 軸ゲージから求めた最大主ひずみの計測結果を図 4.27 に示す。写真 4.8 に試験終了後のひび割れ状況を示す。

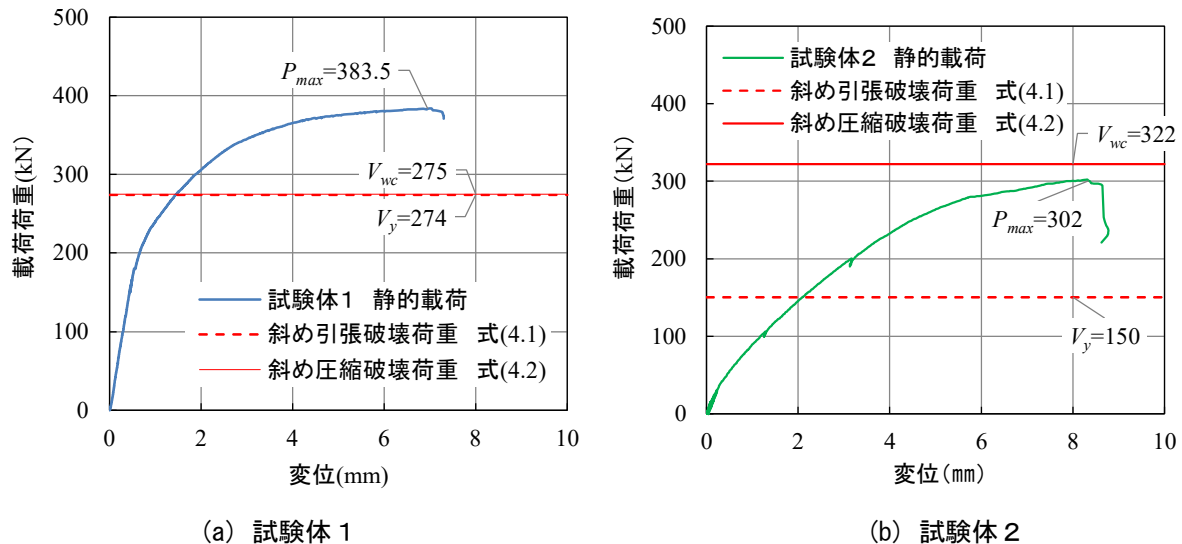


図 4.26 荷重－変位

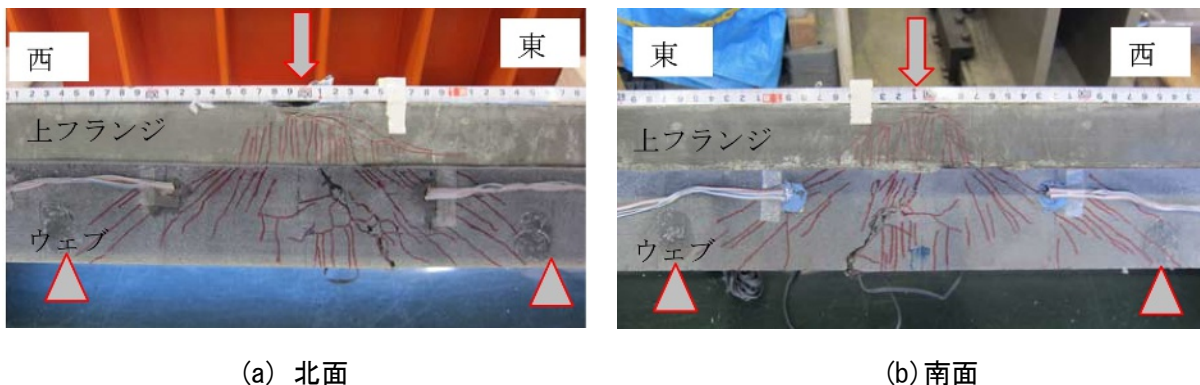
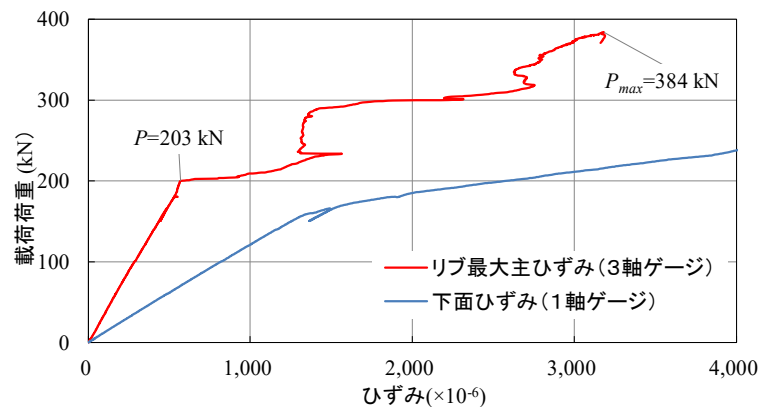


写真 4.8 静的載荷後のひび割れ状況（試験体 1）

第4章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

試験体 1 では、載荷荷重 166kN で試験体下面のひずみに、203kN で試験体側面の 3 軸ゲージから求めた最大主ひずみに、荷重との関係が非線形となる挙動が確認され、それぞれ曲げひび割れおよび斜めひび割れが発生したと推定された。その後、荷重の増加とともに微細な曲げひび割れおよび斜めひび割れの本数が増加し、載荷荷重が 384kN に到達したところで荷重が低下したため載荷を終了した。破壊モードは斜め圧縮破壊と推定された。

試験体 2 では、試験体 1 と同様な挙動および破壊モードであり、計測ひずみから推定される曲げひび割れ発生荷重および斜めひび割れ発生荷重はそれぞれ 15kN および 41kN、最大荷重は 302kN であった。両試験体ともリブとスラブの境界にひび割れは観察されなかった。

図 4.26 には、UFC 指針に規定されるせん断耐力を併記している。斜め引張破壊耐力 V_y は式(4.1)、斜め圧縮破壊耐力 V_{wc} は式(4.2)によって算出した。

$$V_y = 0.18 f'_{ck}{}^{1/2} \cdot b_w \cdot d + (f_v / \tan \beta_u) \cdot b_w \cdot d / 1.15 \quad (4.1)$$

$$V_{wc} = 0.84 f'_{ck}{}^{2/3} \cdot \sin(2\beta_u) \cdot b_w \cdot d \quad (4.2)$$

ここに、 f'_{ck} : UFC の圧縮強度の特性値、 b_w : ウェブ幅、 d : 有効高さ、 f_v : UFC の斜めひび割れ直角方向の引張強度、 β_u : 軸方向と斜めひび割れ面のなす角度で、式(4.3)による。なお、ウェブ幅 b_w はリブの平均幅 65mm、有効高さ d は上段の PC 鋼材が図心に近いことから下段の PC 鋼材までの高さ 86mm とした。

$$\beta_u = 1/2 \tan^{-1}(2\tau / \sigma'_{xu}) - \beta_0 \quad (4.3)$$

ここに、 τ : 平均せん断応力、 σ'_{xu} : 軸方向の平均圧縮応力、 β_0 : 軸力を受けない場合の斜めひび割れが部材軸から 45°の直線となす角度（ここでは 5°）である。UFC 指針では β_u の最大値を 30°としているが、ここでは σ'_{xu} を有効プレストレス 21.8N/mm² として計算される 25°とした。また、圧縮強度および引張強度は実強度を用い、安全係数は 1.0 とした。

UFC 指針による斜め引張破壊耐力は安全側に評価されるため、両試験体とも計算値よりも実験結果の方が大きかった。斜め圧縮破壊耐力については、試験体 2 では実験値と計算値がほぼ同程度であったが、試験体 1 では実験値が計算値の約 1.4 倍程度であった。試験体 1 の耐力が大きくなったのはプレストレスが影響していると考えられるが、今後検討が必要である。

(4) 試験結果の考察

UFC の引張強度がせん断耐力に与える影響を検討するために、試験体 1（プレテンション部材）の実験について材料非線形を考慮した 2次元弾塑性 FEM 解析を行った。2次元弾塑性 FEM 解析は、汎用ソルバーコードである DIANA を使用した。図 4.28 に解析モデルを示す。対称性を考慮して 1/2 モデルとし、鉛直方向の分割数をスラブでは 4 分割、ウェブでは 8 分割とした。

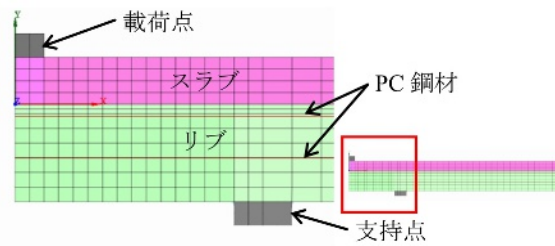


図 4.28 せん断耐力の検討に用いる 2 次元弾塑性 FEM 解析のモデル図

図 4.29 に UFC の応力ひずみモデルを示す．ケース 1 では，引張強度を表 4.3 に示す実測値 13.1N/mm^2 を用いた．ケース 2 は，4.3.2(3) で述べた抜き取り試験片による引張試験による水平方向の引張強度 16.9N/mm^2 と鉛直方向の引張強度 7.3N/mm^2 の比から，引張強度を 5.7N/mm^2 とした．ただし，水平方向と鉛直方向の引張強度が異なるモデル化はできないため，両方向とも引張強度は同一とした．等価検長 L_{eq} は，ケース 1 では $L_{eq}=42\text{mm}$ ，ケース 2 では $L_{eq}=23\text{mm}$ とした．圧縮側は $0.85f_c$ をピークとして応力度が低減するモデルとした．PC 鋼材はコンクリート標準示方書^{4,8)}に準拠し，トリリニアでモデル化し，UFC とは完全付着とした．プレテンションによるプレストレスは，UFC に生じる平均圧縮応力度が 21.8N/mm^2 になるように PC 鋼材の要素に温度荷重を作用させて与えた．

解析結果として荷重変位曲線を図 4.30 に，ケース 1 およびケース 2 の最大荷重時におけるひずみ分布を図 4.31 および図 4.32 に示す．

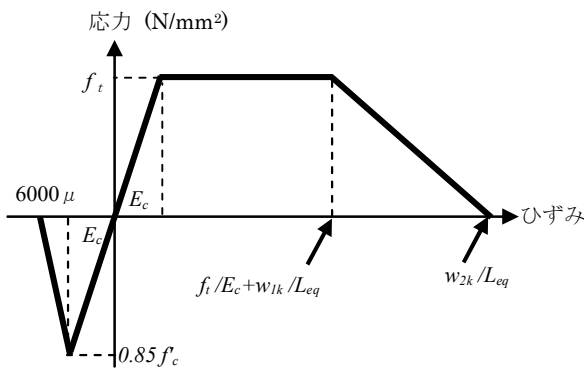


図 4.29 UFC の応力－ひずみ関係

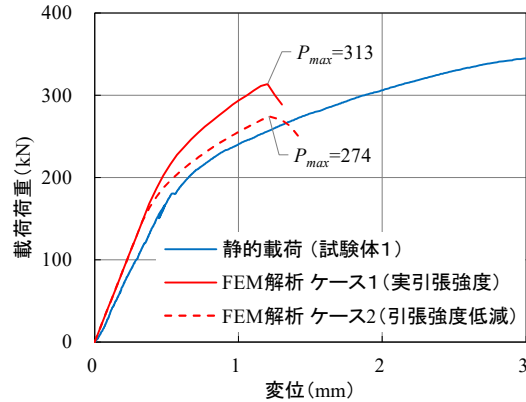
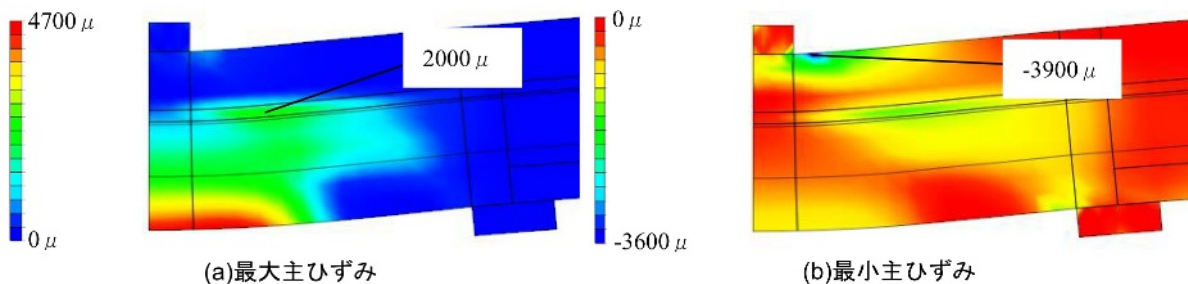


図 4.30 荷重－変位関係の比較



(a)最大主ひずみ

(b)最小主ひずみ

引張：正，圧縮：負

図 4.31 ひずみ分布（ケース 1／実強度）

第4章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

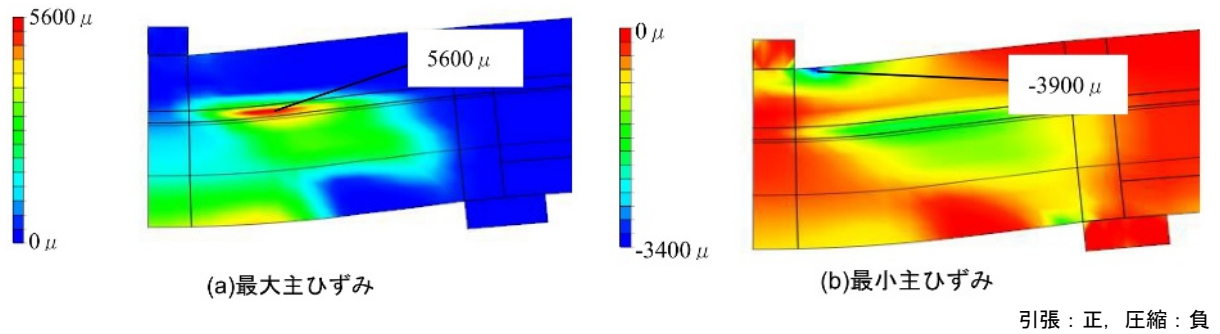


図 4.32 ひずみ分布（ケース 2／引張強度を 43%低減）

ケース 1 で 313kN，ケース 2 で 274kN に達したところで載荷点近傍の上縁ひずみが $0.85f'_{ck}/E_c = -3900\mu$ に達し，荷重が低下し始めたことから，両者とも斜め圧縮破壊したと判断される．ケース 1 とケース 2 の耐力の違いは主として部材軸方向の引張強度の違いによるものと考えられる．最大主ひずみを比較すると，ケース 2 ではリブ付け根で引張ひずみが 5600μ と大きくなっているが，ケース 1 ではこの位置でのひずみは約 2000μ であった．引張強度が小さいことでリブ付け根に引張ひずみが卓越することが確認された．しかし，範囲は限定的であり，試験体軸方向に範囲が拡大しなかったことから，実験ではリブとスラブが分断するような破壊には至らなかったと考えられる．

UFC 指針に準じて計算した斜め圧縮破壊耐力は 275kN であり，解析結果（ケース 1：313kN，ケース 2：274kN）と同程度であった．実験で 384kN と大きくなったのは，上縁ひずみが圧縮破壊ひずみに達した後も直ちに応力が低下せず，同程度の応力を伝達したためと推定される．しかし，試験体 2 では UFC 指針に準じて計算した斜め圧縮破壊耐力に近い 302kN で破壊しているため前述のようにプレストレスの影響が一因と考えられる．

4.3.4 押抜きせん断破壊の照査

UFC 床版に輪荷重が作用した場合の破壊モードは，斜め圧縮破壊だけでなく押抜きせん断破壊が想定されるため，押抜きせん断破壊耐力について検討する必要がある．UFC 指針には UFC 部材の押抜きせん断耐力の算定方法が規定されている．しかし，UFC 床版は 2 方向リブ付き床版であるため，この方法を直接適用できない．そこで，ここでは，簡易的な方法により，押抜きせん断破壊耐力の推定を試みた．

輪荷重の作用範囲は橋軸方向 200mm，橋軸直角方向 500mm である．リブの間隔が最大 260mm ピッチで橋軸直角方向の輪荷重作用範囲 500mm には最低 2 本のリブが含まれることになることから，リブ 2 本分の梁部材の斜め引張破壊耐力の 2 倍（パターン 1）として算定した．また，参考として厚さ 40mm の版部材のみで抵抗すると考えた場合の押抜きせん断耐力（パターン 2）としても算定した．UFC 指針に規定されている押抜きせん断耐力算定式を式 4.4 に示す．

$$V_{pc} = f_v \cdot u_p \cdot d \quad (4.4)$$

ただし、 V_{pc} ：押抜きせん断耐力、 f_v ：斜めひび割れ直角方向の引張強度、 u_p ：載荷面から $d/2$ 位置の設計断面の周長である。UFC の圧縮強度は 180N/mm^2 、斜めひび割れ直角方向の平均引張強度は 8.8N/mm^2 、式(4.1)による斜め引張破壊耐力算定時の有効高さ d は 86mm 、式(4.4)による押抜きせん断耐力算定時の有効高さ d は 40mm とした。これらの条件で求めた押抜きせん断耐力は、パターン 1 では 521kN 、パターン 2 では 419kN であり、それぞれ設計輪荷重の約 5 倍および約 4 倍となった。よって、UFC 床版は十分な押抜きせん断耐力を有しているといえる。

4.3.5 試験結果の考察

UFC 床版のせん断破壊に対する安全性を検討するため、直接引張試験、リブ 1 本分の梁部材のせん断実験、せん断実験の FEM 解析および押抜きせん断耐力の試算を行った。

静的載荷試験の結果、UFC 指針の強度式で計算される斜め引張破壊耐力の約 1～1.4 倍の耐力があることを確認した。破壊モードは斜め圧縮破壊であり、懸念されたリブとスラブが分断されるような破壊モードは生じなかった。

リブ2本分の梁部材の斜め引張破壊耐力、ならびに厚さ40mmの版部材のみで抵抗すると考えた場合の押抜きせん断耐力は設計輪荷重の4～5倍であり、押抜きせん断破壊に対して安全であることが確認された。

4.4 まとめ

4.2 節では、静的載荷および弾塑性解析による曲げ破壊の照査について述べた。輪荷重走行試験後の試験体を対象に、静的載荷試験によって、破壊形態の確認と耐荷力の算定について述べた。次に、3次元弾塑性 FEM 解析によって、破壊形態の確認と耐荷力の算定について述べ、試験結果および解析結果の考察として、荷重－変位関係の比較について述べた。

4.3 節では、静的載荷によるせん断破壊の照査について述べた。UFC 床版の繊維の配向性について、既往の研究に基づく打設方法の設定、洗い出し試験による繊維の状態確認、および梁から抜き取った試験体を用いた引張強度試験による繊維の配向性の影響について述べた。次に、梁部材の試験体を用いた静的載荷試験による、せん断破壊に対する安全性の照査について述べた。

本章の結論は以下の通りである。

- 1) ワッフル型 UFC 床版 (床版厚 123mm) について、断面破壊に対する安全性を照査することを目的として、輪荷重走行試験後の試験体を用いた静的載荷試験を行った。約 270kN で目視

第4章 解析および静的載荷による断面破壊の照査

によってひび割れが確認され、約 380kN で荷重－変位関係の勾配が低下し始めた。荷重が 750.8kN で上面が圧縮破壊した。道示における T 荷重 100kN/箇所約 7.5 倍程度あることを確認した。

- 2) UFC 床版の破壊は、床版下面側のリブにひび割れ発生後、床版上面の載荷板角から主として橋軸直角方向にひび割れ、圧縮破壊領域が拡大した。破壊形態は曲げ圧縮破壊であり、押抜きせん断破壊ではなかった。
- 3) ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）について、漸増荷重を載荷する 3 次元弾塑性 FEM 解析を行った。UFC の圧縮破壊時の荷重は、リブ間載荷の場合約 800kN であった。静的載荷試験結果と比較し、最大荷重や破壊形態が同様の結果となっており、3 次元弾塑性 FEM 解析で静的載荷試験を再現できることを確認した。
- 4) ワッフル型 UFC 床版のリブ内における鋼繊維の配向性を、硬化直前にハイウォッシャーで洗い出すことで確認した。鋼繊維はリブの長手方向（軸方向）に配向していることを確認した。
- 5) 鉛直方向の引張強度を確認するために、製作した梁部材から切り出した試験体で直接引張試験を実施した。水平方向に採取した試験体の平均引張強度が 16.9 N/mm^2 であったのに対して、鉛直方法に採取した試験体の平均引張強度は 7.3 N/mm^2 であり、水平方向の引張強度の 43% であった。
- 6) 鋼繊維を、部材軸方向に配向させて製作した 2 種類（試験体 1：プレテンション PC、試験体 2：RC）の梁部材の試験体を用いて、静的載荷によるせん断試験を行った。試験体 1 は最大荷重 384kN、試験体 2 は最大荷重 302kN で破壊形態は両試験体ともせん断圧縮破壊であった。UFC 指針の算定式によるせん断圧縮破壊耐力は試験体 1 が 275kN、試験体 2 が 322kN であり、試験体 1 は試験値が算定式値の 1.40 倍、試験体 2 が 0.94 倍であった。いずれの試験体でも、リブとスラブが分断されるような破壊モードは生じなかった。
- 7) 2 次元弾塑性 FEM 解析では、引張強度を低減したケースにおいて、リブ付根の引張ひずみが卓越することを確認したが、範囲が限定的であり載荷試験結果を踏まえ、リブとスラブが分断する破壊は生じないと推測した。
- 8) リブ 2 本分の梁部材の斜め引張破壊耐力の算定値は 521kN であり、厚さ 40mm のスラブのみで抵抗すると考えた場合の、押抜きせん断耐力は 419kN であった。よって、道示の T 荷重 100kN/箇所の 4.19～5.21 倍であり、押抜きせん断破壊に対して十分な耐力を有しているといえる。

本章で明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- ・ 本研究において梁試験体における鋼繊維の配向性を洗い出し試験によって確認したが、実構造物においてはこの方法は適用できない。よって、床版の品質管理に対しては、UFC の硬化後によって繊維の配向性を確認する手法の確立が課題である。今後、非破壊検査等の手法によって繊維の配向を確認する手法の検討が必要である。

4章参考文献

- 4-1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 4-2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017
- 4-3) プレストレストコンクリート技術協会：高強度PC鋼材を用いたPC構造物の設計施工指針，2011
- 4-4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.3，2011
- 4-5) 一宮利通，大野俊夫，野口孝俊，南浩郎：超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版の打設方法が構造性能に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，1453-1458，2008
- 4-6) 周波，Ha Duy Nhi，内田裕市：超高強度繊維補強コンクリート曲げ供試体中の繊維の配向，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，268-273，2012
- 4-7) 一宮利通，曾我部直樹，本田智昭，日紫喜剛啓：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，505-510，2006
- 4-8) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2018

5 章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

5.1 概 説

本章においては、UFC床版の疲労破壊に対する安全性の照査を述べる。まず、写真 5.1に示す輪荷重試験装置を用いた静的載荷によるUFC床版の応力度、および変位・変形を把握することによる静的特性を確認した。次に、輪荷重走行試験による疲労破壊の照査を述べる。なお、試験対象のUFC床版は、第2章の構造計画および構造詳細を設定した床版について、第3章の使用性の照査をした諸元の床版である。

疲労破壊の照査については、輪荷重走行試験によってUFC床版が疲労破壊するか否か確認した上で、都市高速道路で実測した活荷重データをもとに算出する、設計耐用期間である100年に等価な載荷回数以下で疲労破壊しないことを確認することで照査することとした。また、PC床版における既往の輪荷重走行試験結果と比較することによって、UFC床版の疲労破壊に対する安全性の確認を述べる。



写真 5.1 輪荷重走行試験

5.2 試験体および載荷装置

5.2.1 試験の概要

実物大試験体と輪荷重載荷試験装置を用い、輪荷重静的載荷試験および安全性に関する疲労破壊の照査のための輪荷重走行試験を実施した。それぞれの試験には共通の試験体および載荷装置

を使用して実験を行った。

5.2.2 試験体の構造および製作

試験体の構造図を図 5.1, 図 5.2に示す。橋軸方向2.44m, 橋軸直角方向2.74mのUFC床版を, 3枚製作した。床版の製作は, PC鋼材をプレテンション方式で緊張した状態で丸口バケットを用いて床版の中央にUFCを打ち込み, 放射状に流動させながら充填した。充填を目的とする振動締固めは行わず, リブ交差部などは突き棒によって, かき乱して鋼繊維の配向を分散させた。UFCの打ち込み方法によって, 鋼繊維(直径0.2mm, 長さ15mmと22mm, 1.75vol.%)は, リブ軸方向およびスラブ内は水平方向のランダムな方向に繊維が配向するように打設した。

打設後, 一次養生として20~30℃の常温で湿潤養生を2日行い, UFCの圧縮強度が100~120N/mm²生じたことを確認後, PC鋼材の緊張力を解放してUFC床版にプレストレスを導入した。その後, 85℃の蒸気養生を24時間おこなった。試験体を写真 5.2に示す。

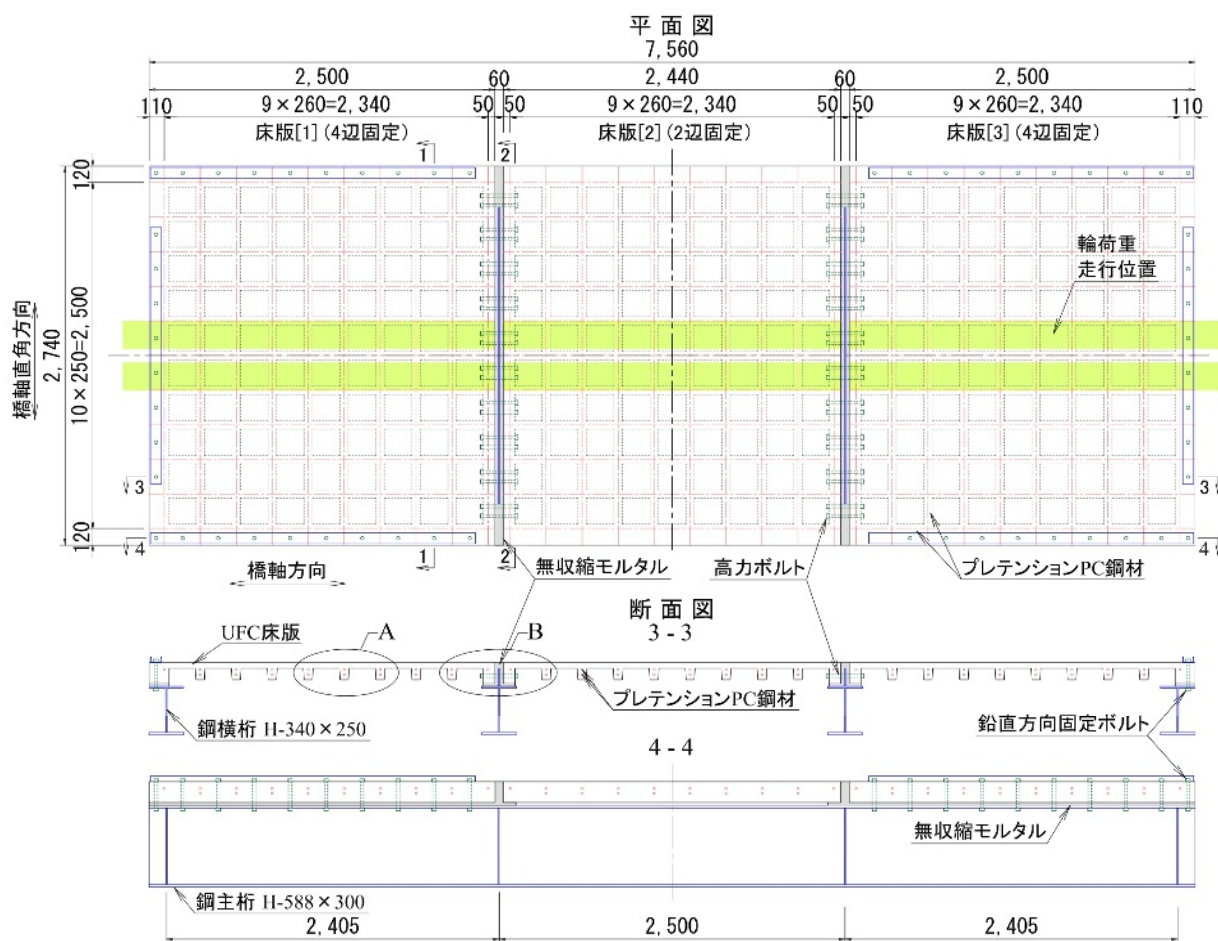


図 5.1 輪荷重走行試験の試験体 構造図 (その 1)

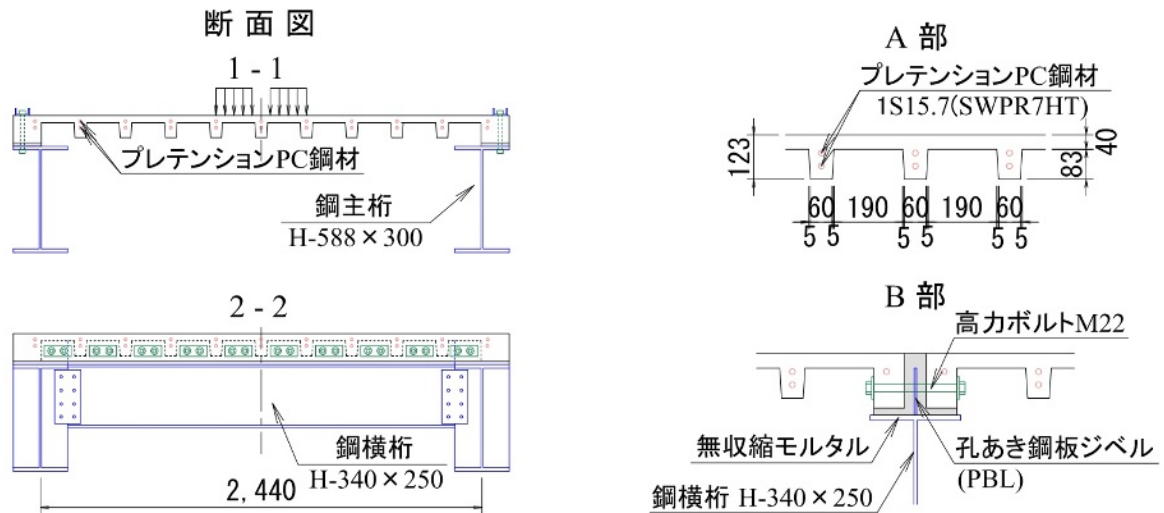


図 5.2 輪荷重走行試験の試験体 構造図（その2）

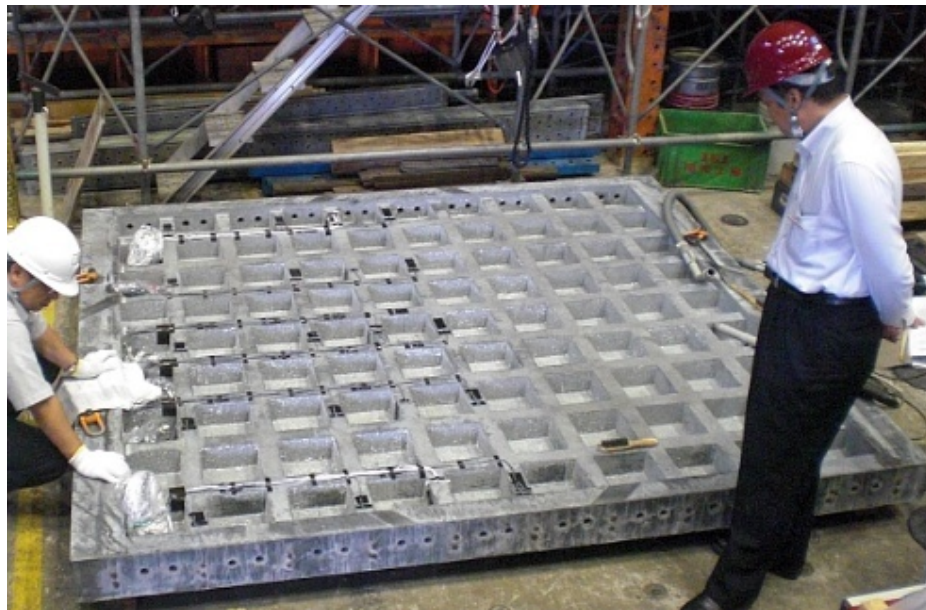


写真 5.2 試験体（裏面）

輪荷重走行試験の試験体は、床版を橋軸方向に3枚並べ2か所で床版同士を接合した。橋軸直角方向の長さは、実橋における開断面箱桁のウェブ間隔または鋼縦桁の間隔を想定し2.5mとした。

図 5.1 の床版[2]は、主桁間の中央付近を想定し横桁のみで支持される2辺支持とし、床版[1]および床版[3]は、鋼主桁および床組みで支持されることを想定し4辺を鋼桁で支持される構造とした。

床版同士の接合部は、高力ボルトの軸力によって、活荷重作用時に引張応力度が生じないように設計した。M22の高力ボルトをリブ間に配置し（ひとつの床版横目地あたり計20本）、床版間60mmに無収縮モルタルを充填し、そのモルタルが所定の圧縮強度を発現後、1本あたり205kN（ボルト降伏軸力の75%）の軸力を導入した。

5.2.3 試験体の材料特性

本実験に用いたUFCは、表2.1のAFt系UFCの標準配合を使用した。UFCの材料試験結果を表5.1に示す。UFCの圧縮強度 f'_c は、直径100mm高さ200mmの円柱供試体を用い、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」の試験によって算出した。曲げ強度 f_b は、100×100×400mmの矩形供試体を用い、JSCE-G552「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度およびタフネス試験方法」の試験によって算出した。UFCの引張強度 f_t は、UFCの曲げ強度 f_b から、UFC指針⁵⁻¹⁾に示される関係式 $f_t = (f_b - 1.54) / 2.59$ によって算出した。

材料試験によって実験開始時の圧縮強度の平均値が、UFC指針における設計に用いる特性値の180 N/mm²以上、引張強度の平均値が特性値の8.8N/mm²以上あることが確認できた。

表 5.1 材料試験結果

	プレストレス導入時			輪荷重載荷試験開始時				
	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
床版 [1]	2	120.8	35.4	49	187.1	42.6	31.9	11.7
		121.8	34.8		190.2	43.7	28.8	10.5
		120.9	36.0		191.6	40.6	27.4	10.0
							32.2	11.8
	平均	121.3	35.4	平均	189.6	42.3	30.0	11.0
床版 [2]	1	99.8	31.0	29	198.4	42.7	25.6	9.3
		101.5	33.2		195.4	44.2	24.6	8.9
		101.2	33.5		199.6	43.2	26.6	9.7
							23.3	8.4
	平均	100.8	32.6	平均	197.8	43.4	25.0	9.1
床版 [3]	1	97.5	32.4	17	183.6	42.7	32.4	11.9
		103.9	33.1		180.2	43.8	30.5	11.2
		100.5	32.9		181.8	43.4	28.9	10.6
							32.3	11.9
	平均	100.6	32.8	平均	181.9	43.3	31.0	11.4

5.2.4 載荷装置

実験に用いた大阪工業大学が所有する自走式輪荷重移動載荷装置の概要を図5.3に示す。試験機の仕様を表5.2に示す。この装置は空気入りのタイヤの車輪を油圧モーターによって走行させる駆動方式である。大型重量車（ダブルタイヤ）および航空機等のタイヤ（ジャンボタイヤ）を用いて走行する大きな輪荷重載荷がシミュレートできるようになっている。本研究では、静的特性に関する試験に、大型重量車の載荷状況を再現できるダブルタイヤを使用し、疲労破壊に関する試験には、最大載荷重量が大きいジャンボタイヤを使用することとした。

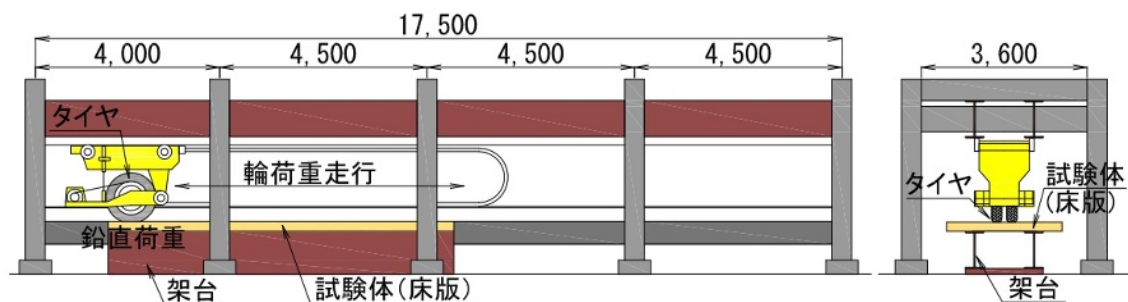


図 5.3 自走式輪荷重移動載荷装置

表 5.2 載荷装置の仕様

	ジャンボタイヤ (シングルタイヤ)	ダブルタイヤ (幅 20cm×2,あき 10cm)
載荷荷重	70～220 kN 程度	50～120 kN(60kN /タイヤ)
走行速度	2～5 km/h (約 7,000 回/日)	
載荷長	2～14.5 m (助走区間を含む)	

5.3 輪荷重静的載荷試験

5.3.1 試験方法

静的載荷によって2方向リブの挙動を確認した。写真 5.3に示す実際の大型車のタイヤを模擬したダブルタイヤを用い、走行方向には図 5.4に矢印で示す位置に、直角方向には二つのタイヤが中央のリブを跨ぐように、床版設計用の活荷重であるT荷重と同じ100kNの輪荷重を静的載荷した。それぞれの載荷位置に輪荷重を静的に載荷した時にスパン中央の計測位置において、リブ側面、スラブ上面、スラブ下面のUFCのひずみを計測した。



写真 5.3 静的載荷用ダブルタイヤ

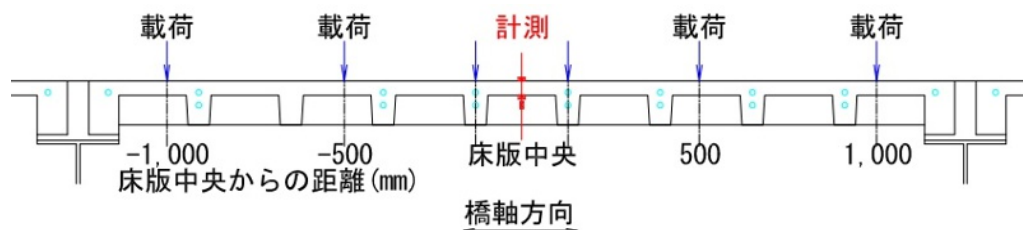


図 5.4 輪荷重載荷位置と計測位置（床版[2]）

5.3.2 試験結果

計測したひずみを図 5.5 から図 5.7 に示す。プロット点の横軸は、床版中央の計測位置から載荷位置の距離である。なお、計測は輪荷重載荷時点から開始しているため、いずれも載荷荷重のみによるひずみであり、プレストレスによるひずみは含んでいない。ひずみの符号は正が引張、負が圧縮である。

(1) リブ側面の鉛直方向ひずみ

スラブの曲げ変形にともないリブが開く方向に変形することによって、リブ側面に鉛直方向のひずみが生じることが推測されたため、リブの鉛直方向のひずみを計測することとした。リブ側面の鉛直方向ひずみを図 5.5 に示す。リブ R1 のスラブ下面から 30mm の位置のひずみを計測した。鉛直ひずみは、計測点の直近に載荷された場合にひずみが最も大きくなっており、リブの両側とも圧縮ひずみが生じ、載荷位置の内側の圧縮ひずみ 61×10^{-6} (表 5.1 の床版[2]におけるヤング係数の平均値 43.4 kN/mm^2 を使用して圧縮応力度に換算すると 2.7 N/mm^2)、外側が 5×10^{-6} (圧縮応力度 0.2 N/mm^2) であった。

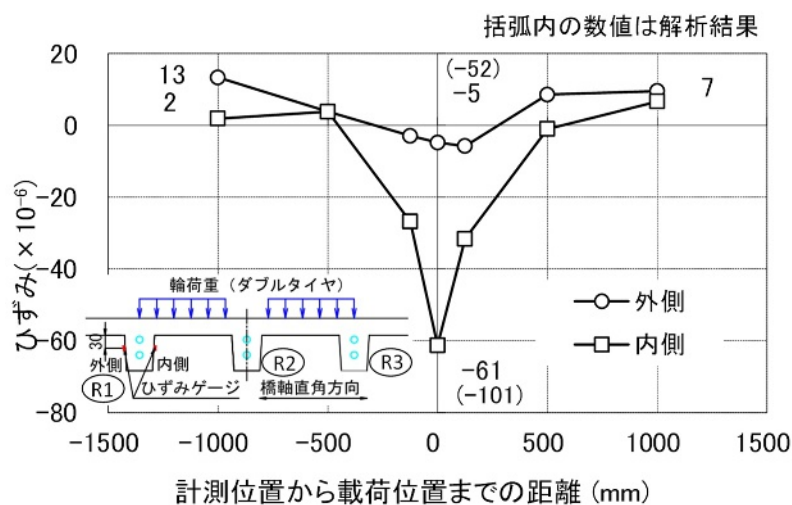


図 5.5 リブ側面の鉛直ひずみ

(2) スラブ上面の走行直角方向ひずみ

スラブ上面の走行直角方向ひずみを図 5.6 に示す．計測位置の直上に載荷された場合の圧縮ひずみは 54×10^{-6} (圧縮応力度 2.3 N/mm^2) であった．

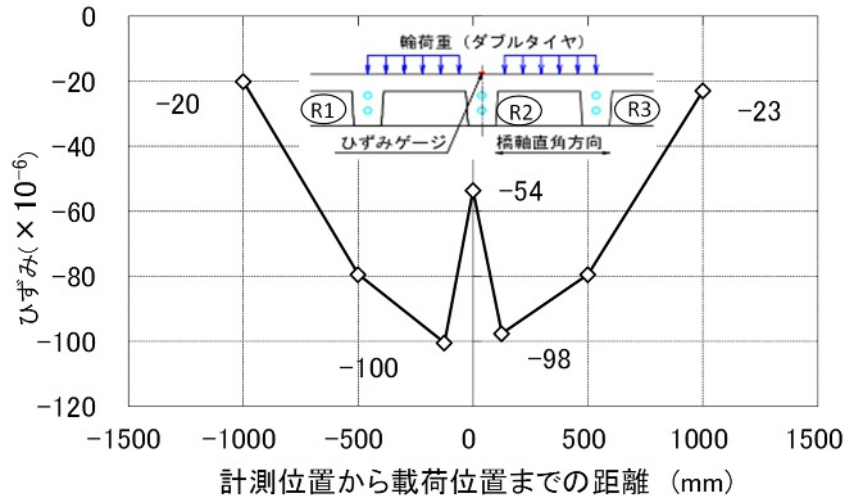


図 5.6 スラブ上面の走行直角方向ひずみ

(3) スラブ下面の走行直角方向ひずみ

リブ R1 と R2 間におけるスラブ下面の走行直角方向ひずみを図 5.7 に示す．床版中央の計測位置直上に輪荷重が載荷された場合に，引張ひずみ 78×10^{-6} (引張応力度 3.4 N/mm^2) が生じた．

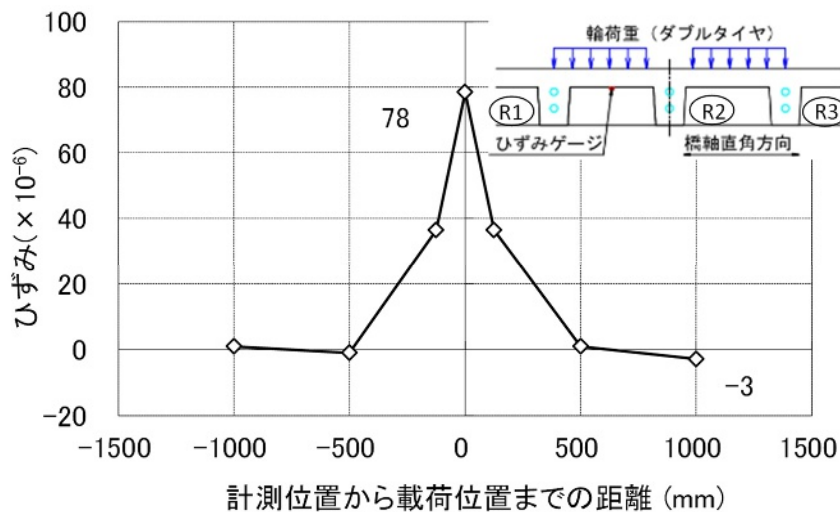


図 5.7 スラブ下面の走行直角方向ひずみ

5.3.3 試験結果の考察

(1) リブ側面

床版中央に載荷した場合に、図 5.5 のリブ R1 において、載荷点に近いリブ側面（内側）の鉛直方向の圧縮ひずみが -61×10^{-6} 、リブ側面（外側）の圧縮ひずみが -5×10^{-6} と内側の方が大きくなったのは、輪荷重の載荷によって走行方向リブが横に開こうとするのを、走行方向に直角方向のリブが拘束したために、走行方向リブの変形が生じリブ内側に圧縮ひずみが生じたものと推測される。3次元弾性FEM解析（ヤング係数 UFC : $4.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、鋼部材 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、FEMのソルバーはNX NASTRAN7.1）によって算出した。リブ側面のひずみを図 5.8 に示す。楕円で囲む部分が図 5.5 の R1 リブと同位置であり、解析によるひずみはスラブ下面から 5mm の位置であり、計測は 30mm の位置であるため、解析によるひずみの方が大きくなっているが、載荷位置付近のリブ側面には圧縮ひずみが生じており、リブに着目すると荷重載荷の外側（リブの左側）は引張応力が生じる傾向となっており実験結果と整合している。

計測位置から載荷位置までの距離が 1,000mm における内側は引張ひずみ 2×10^{-6} (0.1 N/mm^2) となっているため、輪荷重の通過にともなってリブ側面に $0.1 \sim 2.7 \text{ N/mm}^2$ の応力振幅が生じていることがわかった。ほぼ圧縮側の応力振幅であり、引張応力度もひび割れ発生強度の特性値に比べると小さいが、2方向リブの影響によってリブ側面の鉛直方向に 3 N/mm^2 程度の応力振幅が生じることを確認した。

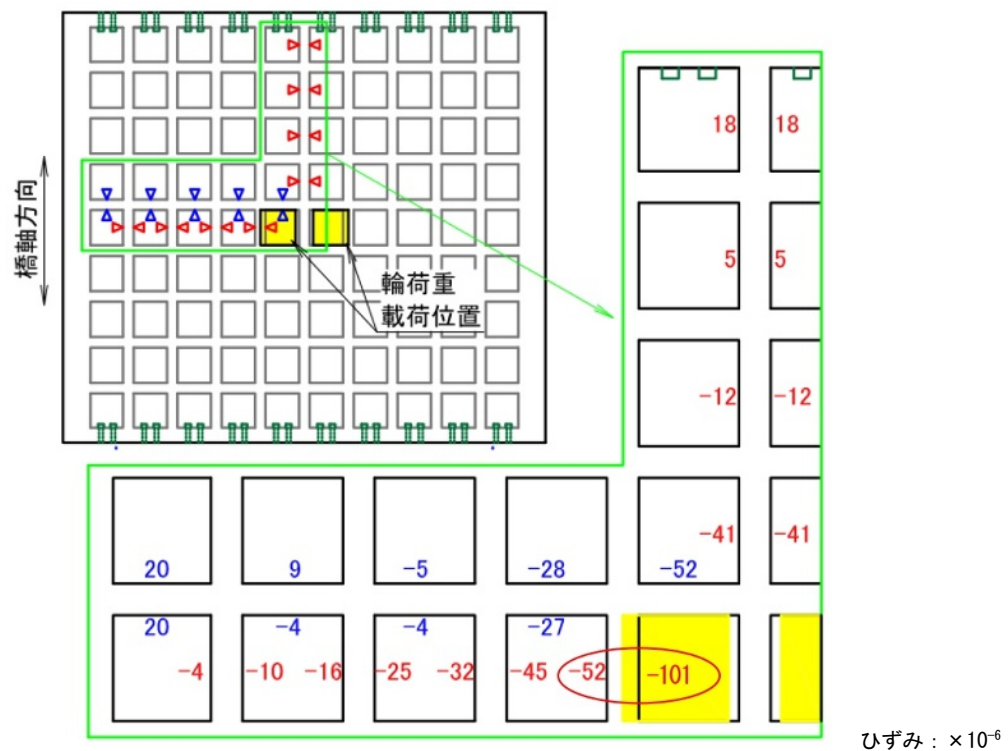


図 5.8 解析によるリブ側面の鉛直方向ひずみ

(2) スラブ上面

スラブ上面の走行直角方向ひずみについて、計測位置直上に載荷する場合に圧縮ひずみが低下している。これは、リブを跨いでダブルタイヤが載荷されることによって、タイヤ間（橋軸直角方向）に引張ひずみ生じるためである。ただし、床版上面には圧縮ひずみ 54×10^{-6} (2.3N/mm^2) が生じ、ひび割れ等の発生はないといえる。

(3) スラブ下面

スラブ下面の走行直角方向ひずみについては、500mmより計測位置に近い位置については、輪荷重の作用によってスラブ下面に引張ひずみが生じる。1,000mm以上離れた位置に載荷した場合も圧縮ひずみ -3×10^{-6} が生じたが、計測誤差の範囲と推測されることから、1,000mm程度、輪荷重が計測位置から離れると荷重の影響が生じないことがわかった。また、輪荷重が2倍になった場合でもスラブ下面に生じる引張応力度は 6.8N/mm^2 であり、ひび割れ発生強度の特性値 8.0N/mm^2 以下であること、この計測値は活荷重のみによる応力度であり、プレストレス力によって橋軸方向に約 20N/mm^2 、橋軸直角方向に約 10N/mm^2 の圧縮応力が導入されていることから、ひび割れ発生の可能性は極めて小さいといえる。

5.4 輪荷重走行試験

5.4.1 試験の概要

床版は活荷重を直接支持する構造部材で、車両の走行によって常時繰返し荷重が作用する部材であるため疲労による劣化が生じる可能性がある。また、輪荷重の載荷位置は車両走行にともなって移動するため、床版には正負交番するせん断が作用し、疲労劣化が生じる。

このような繰返し載荷される輪荷重の作用に対するコンクリート床版の疲労破壊については、旧基準⁵⁻²⁾（昭和47年3月制定版の道路橋示方書以前の基準）で設計されたRC床版の劣化に対し、疲労破壊の機構が、輪荷重走行試験によって解明されてきている（1.3節）。本研究においてもこれら既往の研究における試験方法を踏襲し、輪荷重走行試験によって安全性に関する疲労破壊を照査することとした。

5.4.2 試験方法

(1) 載荷ステップ

輪荷重の移動繰返し載荷に対する安全性を確認するための試験では、最大220kNまで載荷できるジャンボタイヤ（シングルタイヤ）を用いて、床版設計用の活荷重であるT荷重と同じ100kNからその約2倍である220kNまで、30kN刻みで階段状に荷重を増加させながら各荷重で4万回ずつ

繰返し載荷し、合計20万回（10万往復）輪荷重を移動走行させた。各荷重載荷開始前（0回）および4万回載荷後（4万回）に、静的載荷試験を行い、床版のたわみおよびひずみを計測した。図 5.9 に載荷荷重のステップを示す。阪神高速実測の100年等価回数は、5.4.2(2) に算出過程を示す疲労破壊に対する照査の目安である。

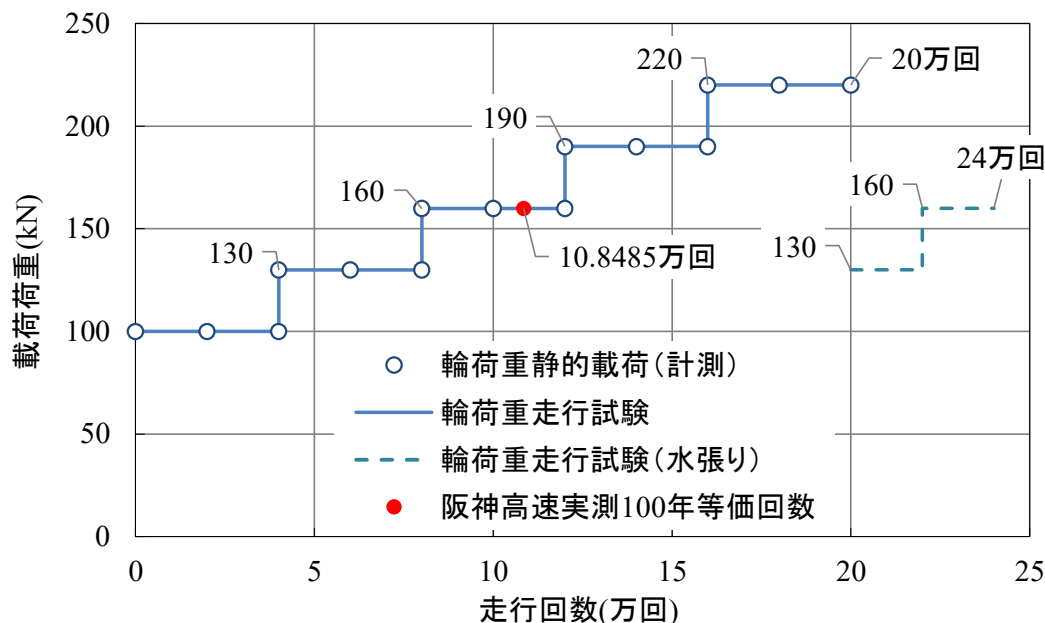


図 5.9 輪荷重走行試験載荷プログラム

輪荷重は図 5.1 に示す輪荷重走行位置を約3km/hの速度で往復するものであり、この載荷ステップの実施に約2ヶ月間の連続的な載荷を行った。

また、既往のRC床版の研究によると、床版のひび割れ後の変状はひび割れ内の浸水によって促進され、疲労に対する寿命が短くなることが指摘されている⁵⁻³⁾。よって、UFC床版についても乾燥状態で階段状に合計20万回載荷後、床版表面に水を張って4万回の輪荷重走行試験（以下、水張り試験という）を行った。

(2) 設計耐用年数に対する疲労破壊の照査

載荷ステップは、試験機の最大載荷荷重と阪神高速における活荷重に対するRC床版の疲労破壊に対して、100年に相当する等価繰返し回数を目安に決定した。等価繰返し回数の算出において、阪神高速道路における活荷重実態調査⁵⁻⁴⁾、⁵⁻⁵⁾における軸重の計測結果を用いて100年に相当する等価繰返し回数を算出した。計測した軸重特性を表 5.3 に示す。表における平均値は軸数を考慮して算出している。このデータは阪神高速道路5号湾岸線、3号神戸線、14号松原線の集約料金所に設置される軸重計により、2010年度（4月～11月）に各地点において24時間計測されたものである。

表 5.3 活荷重実態調査による計測軸重の特性

		神戸線		湾岸線			松原線
		芦屋	尼崎	南芦屋浜	中島	高石	大和川
軸重 (kN)	最大値	172	218	170	253	185	181
	最小値	1	4	4	2	8	2
	平均値	19	37	45	27	41	17
計測軸数		69,188	13,007	31,340	65,990	23,250	60,309

基本荷重に換算した等価繰返し回数 N_{eq} を式(5.1)によって算出した。式(4.1)の m は設計疲労曲線の傾きの逆数の絶対値であるが、UFC床版の疲労曲線が設定されていないため、今回の検討においては、RC床版の実験結果⁵⁻⁶⁾から12.76を用いた。 P_i の算出における衝撃係数は、同様の試験体による実車両走行試験と静荷重試験のたわみ比から設定した。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m \times n_i \quad (5.1)$$

ここに、

P_i : 輪荷重（計測軸重に衝撃の影響を考慮した係数 1.3 を乗じ、輪数 2 で除して算出）(kN)

P_0 : 基本輪荷重 100 (kN)

n_i : 1 車線あたりの輪荷重ごとの計測軸数（回）

m : 設計疲労曲線の逆数の絶対値（ $m = 12.76$ ）

基本荷重 100kN に換算した等価繰返し回数によって、100 年相当の等価繰返し回数を算出した結果を表 5.4 に示す。中島集約料金所における等価繰返し回数が最も多く 1263.7 万回と算定した。

表 5.4 計測軸重の 100kN 等価繰返し回数

	神戸線		湾岸線			松原線
	芦屋	尼崎	南芦屋浜	中島	高石	大和川
24 時間	15.4	55.5	18.8	346.2	21.5	19.6
100 年	562,100	2,024,533	687,417	12,637,517	782,925	713,575

図 5.9 の輪荷重走行試験における載荷荷重を、100kN に換算した等価繰返し回数を表 5.5 に示す。計測軸重による 100 年相当の等価繰返し回数 1263.7 万回に相当する載荷ステップは 160kN 時点（10.8 万回）である。また、試験終了時までの載荷は 100 年相当の等価繰返し回数の 87.5 倍である。なお、この等価繰返し回数は限られた日数の活荷重調査結果により算出されたものであるため、調査日数を増やすことや実態活荷重の経年変化を踏まえ今後も検討が必要といえる。

表 5.5 載荷荷重の等価繰返し回数

輪荷重走行試験の載荷ステップ			100kN 換算の 等価繰返し回数(回)		100 年に 対する 比率
荷重	回数(回)				
(kN)	各ステップ	累積	各ステップ	累積	
100	40,000	40,000	40,000	40,000	
130	40,000	80,000	1,137,567	1,177,567	0.09
160	28,485	108,485	11,459,949	12,637,517	1.00
160	11,515	120,000	4,632,827	17,270,344	1.37
190	40,000	160,000	144,196,905	161,467,249	12.78
220	40,000	200,000	936,210,265	1,097,677,514	86.86
130	20,000	220,000	568,784	1,098,246,298	86.90
160	20,000	240,000	8,046,388	1,106,292,686	87.54

5.4.3 試験結果

(1) たわみ、ひずみ

床版[2]は2辺支持であることから、4辺支持の床版[1][3]よりも約5%たわみが大きくなった。よって床版[2]の試験結果を以下に示す。載荷荷重100kN、160kNおよび220kNで0回（各荷重で繰返し載荷する前）および4万回（各荷重で繰返し載荷した後）における床版[2]のたわみの変化を図 5.10に示す。図 5.11に載荷荷重と計測たわみの関係、図 5.12に等価回と計測たわみの関係を示す。輪荷重除荷時の計測値と載荷時の計測値の差をプロットした。100kN載荷時は0回は1.79mm、4万回は1.80mm。160kN載荷時は0回が2.79mm、4万回は2.84mm。220kN時載荷時は0回が3.97mm、4万回は4.02mmであった。0回と4万回の差はそれぞれ0.01mm（変動率0.6%）、0.05mm（1.8%）、0.05mm（1.2%）であった。

第 5 章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

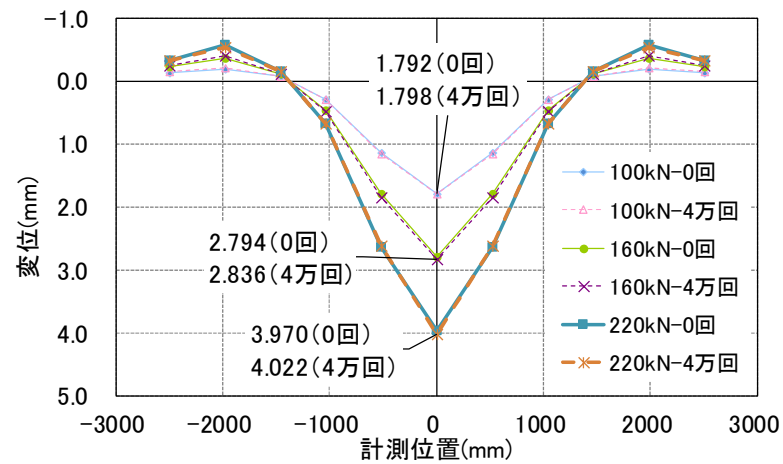


図 5.10 橋軸方向たわみ分布（床版[2]）

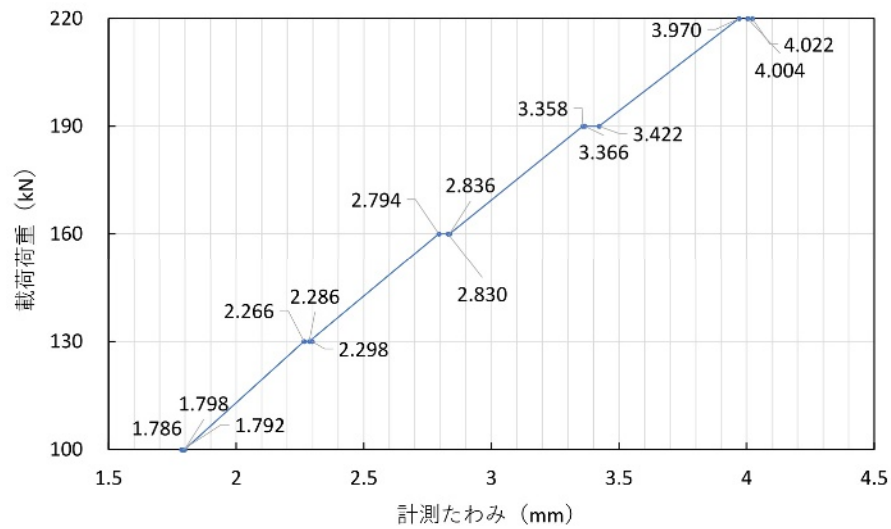


図 5.11 載荷荷重－計測たわみ（床版[2]）

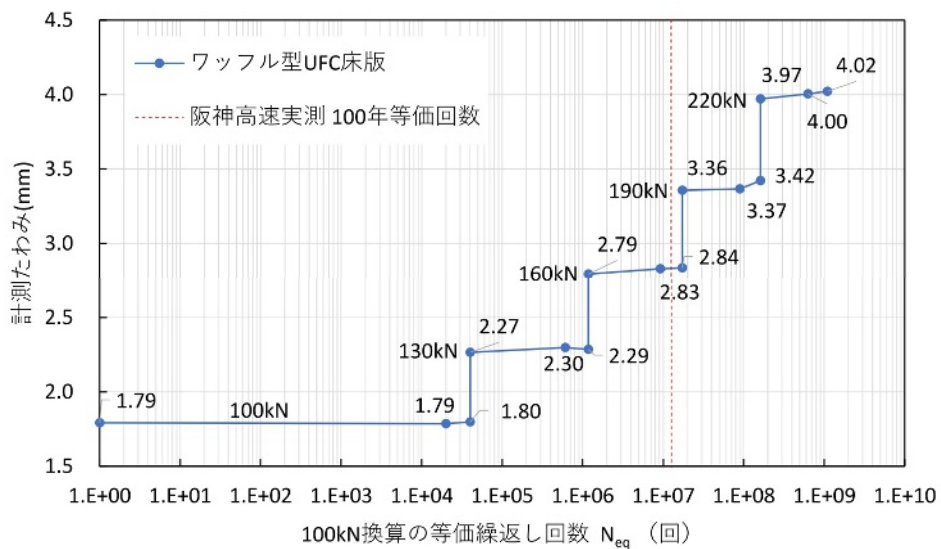


図 5.12 計測たわみ－等価繰返し回数（床版[2]）

床版[2]における橋軸方向のひずみ分布の変化を図 5.13 に示す。床版上縁の圧縮ひずみに着目すると、0回は -118×10^{-6} 、4万回は -121×10^{-6} 。160kN 載荷時は0回が -183×10^{-6} 、4万回は -187×10^{-6} 。220kN 時載荷時は0回が 255×10^{-6} 、4万回は -265×10^{-6} であった。0回と4万回の差はそれぞれ -3×10^{-6} (変動率2.5%)、 -4×10^{-6} (2.2%)、 -10×10^{-6} (3.9%) であった。

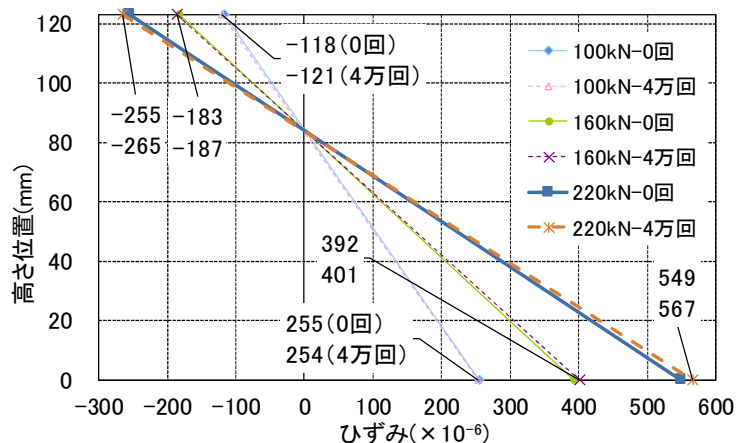
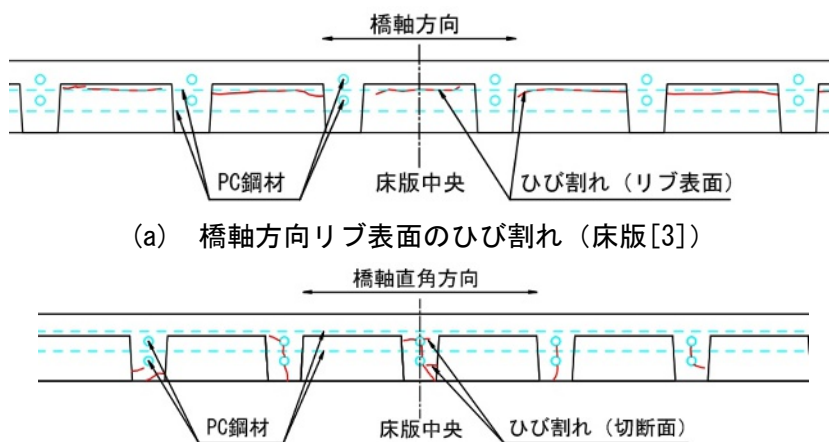


図 5.13 橋軸方向ひずみ分布 (床版[2])

(2) ひび割れ

床版同士の接合部を含むスラブ上面、水張り試験後もひび割れは確認されなかった。190kN の 4 万回載荷後において、床版[2][3]のリブ側面にアセトンの蒸発状況の違いにより目視で確認できる程度の幅 0.04mm 未満のひび割れを確認した。リブ側面のひび割れおよび切断面のひび割れの概要を図 5.14 に示す。全ひび割れを図 5.15～図 5.17 に示す。なお、ひび割れ図は、水張り試験終了後に確認したものである。

図の破線はリブ内の PC 鋼材位置を示す。図 5.14(b)は、実験終了後、床版[3]を橋軸直角方向に切断し、橋軸方向リブの表面で目視したひび割れについて、リブ内の状況を確認したものである。部材内のひび割れについても表面のひび割れと同様に幅 0.04mm 未満の微細なひび割れであり、PC 鋼材につながるひび割れが確認された。



(b) 橋軸方向 (床版中央) リブの断面におけるひび割れ (床版[3])

図 5.14 リブにおけるひび割れの概要

第5章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

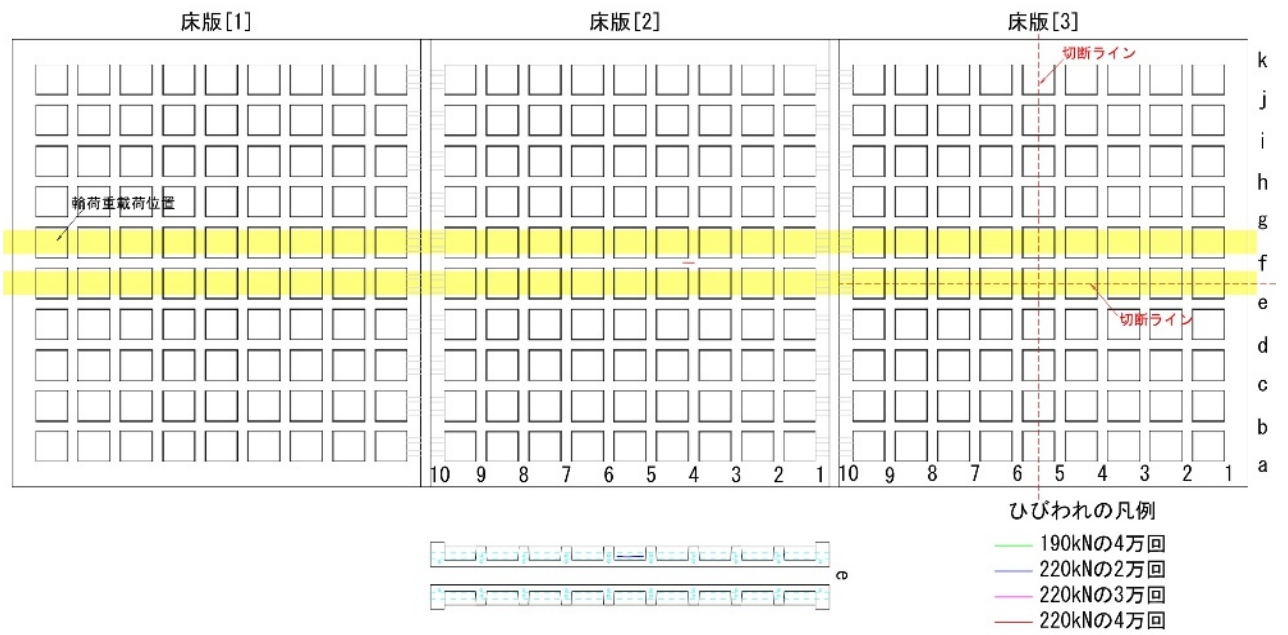


図 5.15 ひび割れ図（床版[1]～[3]下面，[2] リブ側面）

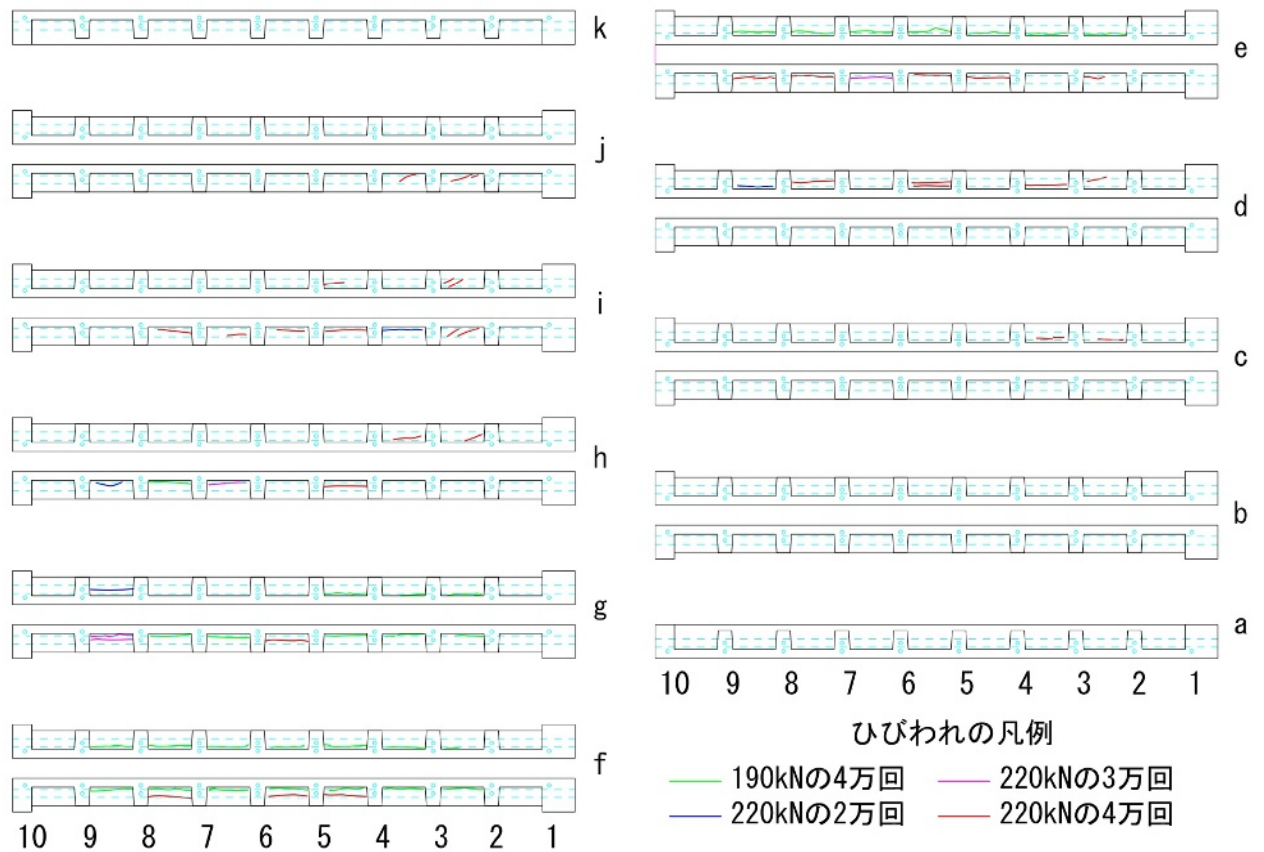


図 5.16 ひび割れ図（床版[3]，橋軸方向リブ表面）

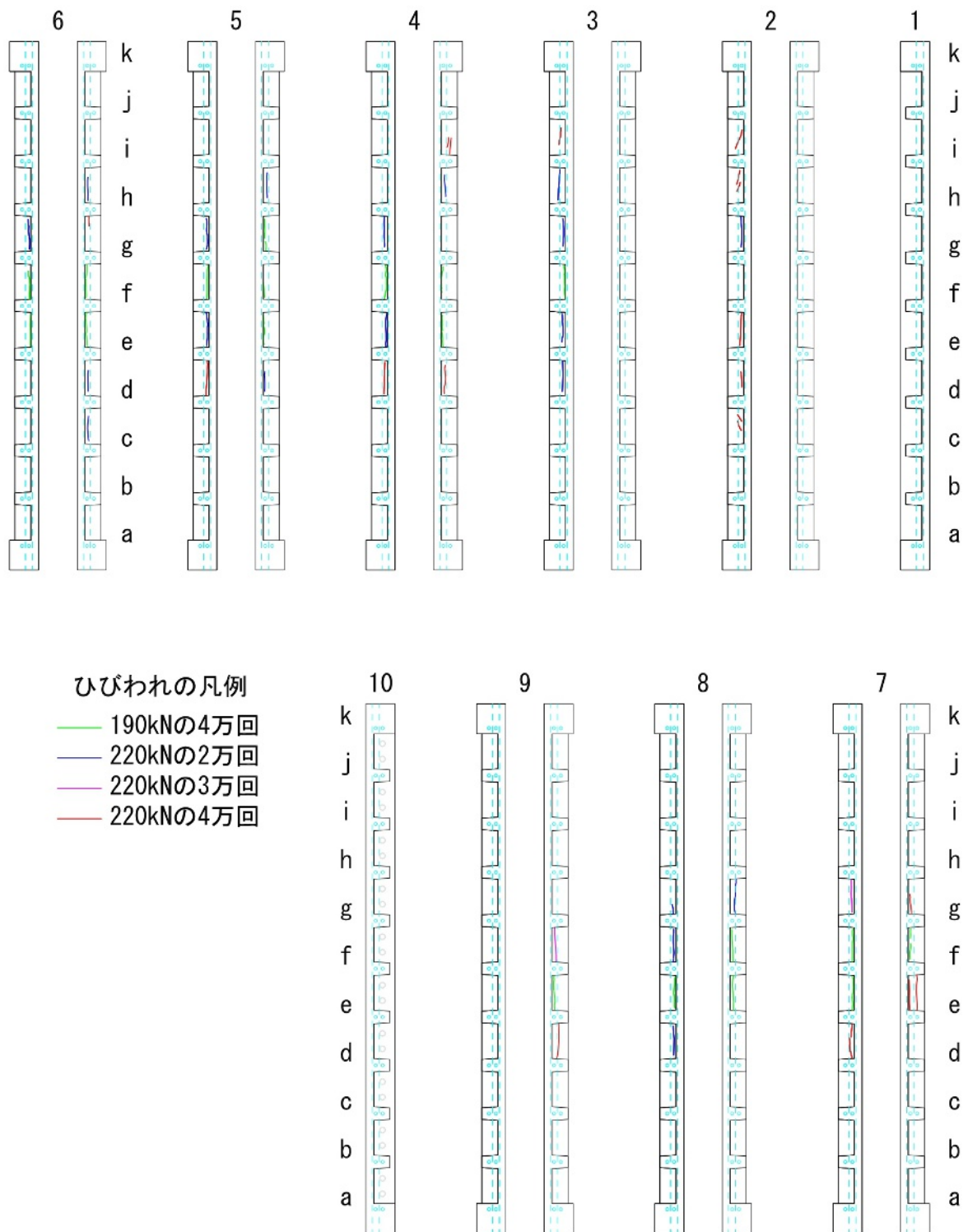


図 5.17 ひび割れ図（床版[3]，橋軸直角方向リブ表面）

床版[3]の中央付近で橋軸方向（リブ e とリブ f の中央），橋軸直角方向（リブ 5 とリブ 6 の中央）に切断しひび割れの状況を確認した（図 5.15 に図示）．切断位置は，それぞれの床版断面のひび割れを図 5.18 に示す．

第5章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

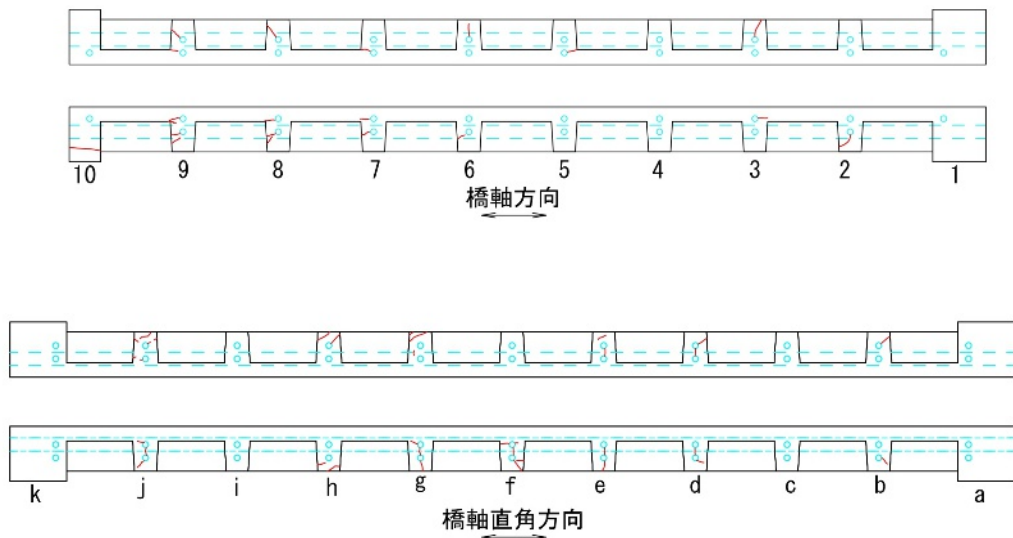


図 5.18 床版切断後の断面におけるひび割れ図（床版[3]）

(3) 床版同士の接合部

図 5.19に、床版同士を接合する高力ボルトの軸力の経時変化を示す。各載荷ステップごとに静的載荷した結果を表しており、「載荷時－除荷時」は弾性変形分を表している。除荷時における張力変動は、張力の経時変化であり、20万回載荷時点において 7.2kNの軸力低下であった。

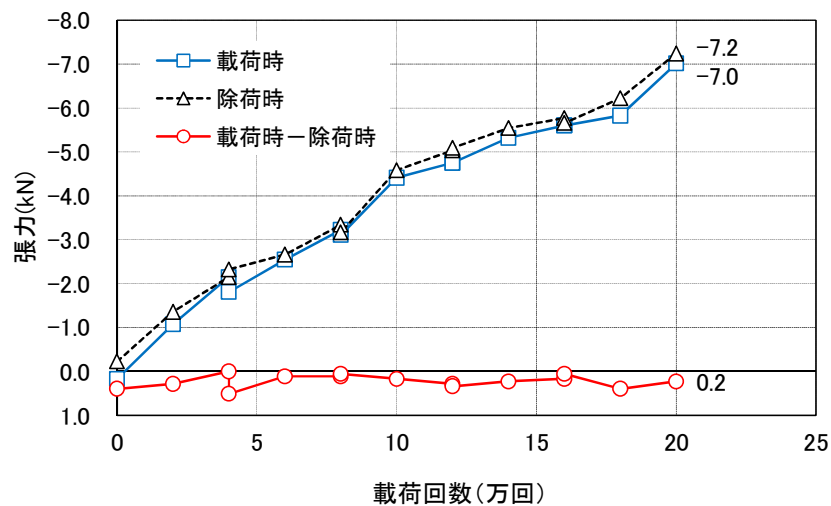


図 5.19 床版同士を接合する高力ボルトの軸力変化

図 5.20に床版同士の接合部におけるパイ型変位計によって計測した変位を示す。床版同士の接合部におけるパイ型変位計の設置状況を図 5.21に示す。変位計は接合部の無収縮モルタルと UFCの境界面を跨ぐように設置し、図 5.21におけるA-B間の変位を計測するものである。図 5.20の「載荷時－除荷時」は静的載荷時の弾性変位である。20万回載荷時の弾性変位で0.006mmであった。

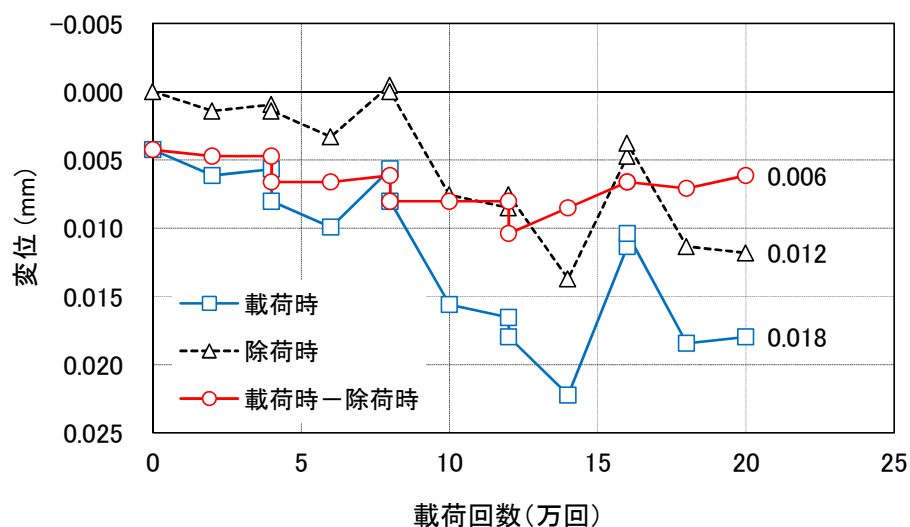


図 5.20 床版同士の接合部における変位

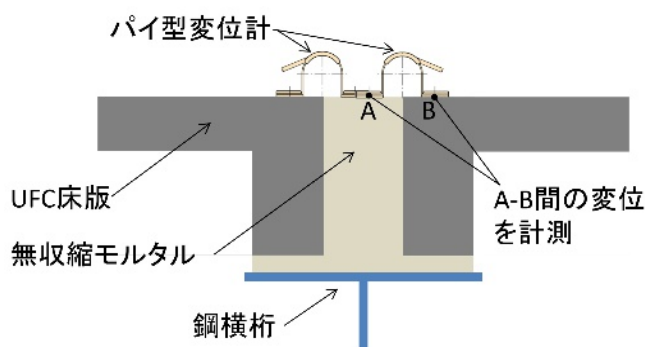


図 5.21 パイ型変位計の設置状況

5.4.4 試験結果の考察

(1) たわみ, ひずみ

たわみ, ひずみとも, 階段状載荷の荷重の増加に比例して増加したが, それぞれの荷重における繰返し載荷前後で差は, たわみについては 0.6~1.8%, ひずみは 2.2~3.9%と小さいため, 輪荷重の繰返し載荷による疲労による床版の剛性の低下は極めて小さいことがわかる。

床版同士の接合部の高力ボルトにおける 7.2kN (導入軸力の 3.5%) の軸力低下のたわみへの影響は, パイ型き裂変位計の計測値が 0.018mm と小さく, 目視によっても接合部にひび割れや目開きが確認されなかったことから, 極めて小さいと推測される。

(2) ひび割れ

輪荷重走行試験に用いた床版について, 3次元弾性FEM解析によって応力度を算出した。UFC床版にプレストレス導入後, 床版支間中央に100kN, 154kN, および220kNの輪荷重を載荷した

第5章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

場合の応力度を算出した結果を表 5.6 に示す。設計活荷重である 154kN 載荷時において、支間中央部（下縁）は 11.7N/mm^2 の圧縮応力度、支点部（上縁）は 7.6N/mm^2 の引張応力度が生じており、支点部の引張応力度が制限値の 8.0N/mm^2 に近い値となっている。

輪荷重走行試験の最大荷重である 220kN 載荷時において、支間中央部（下縁）は橋軸方向に 7.0N/mm^2 の引張応力度であるが、直角方向に 10.0N/mm^2 の引張応力度が生じている。支点部（上縁）は橋軸方向に 10.8N/mm^2 の引張応力度が生じている。これらの引張応力度は、設計における制限値である設計ひび割れ強度 8.0N/mm^2 は超過している。

表 5.6 3次元弾性 FEM 解析による床版の応力度

載荷 荷重 (kN)	着目	UFCの応力度 (N/mm ²) 引張：正，圧縮：負					
		支間中央部		支点部		設計制限値	
		橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	引張	圧縮
100	上縁	－21.9	－23.3	5.0	－2.6	8.0	－108
	下縁	－27.0	－6.4	－14.0	－4.0		
154	上縁	－30.2	－26.6	7.6	－2.4		
	下縁	－11.7	1.0	－21.6	－6.1		
220	上縁	－40.3	－30.6	10.8	－2.2		
	下縁	7.0	10.0	－30.9	－8.7		

設計ひび割れ強度は、文献5-7)によると、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ 供試体を用いた曲げ強度試験から求めた曲げひび割れ発生強度（平均値 14.8N/mm^2 ，標準偏差 1.5N/mm^2 ）に対して、危険率5%となる値 12.4N/mm^2 を割裂ひび割れ強度に換算した 8.5N/mm^2 を安全側に数字を丸めたものである。よって、220kN の載荷に対して支点部に生じている引張応力度 10.8N/mm^2 では、曲げひび割れは生じない可能性が高いと推測される。

この解析によって算定した応力度と曲げひび割れ強度の関係は、輪荷重走行試験の載荷後において、床版の上下面にひび割れが生じていなかったことと、載荷荷重の大きさに対するひび割れ発生点で整合している。また、輪荷重走行試験を踏まえると、このように床版に曲げひび割れが生じていない状態であれば、繰返し載荷によるひび割れ発生等の疲労による損傷が生じないといえることから、設計において活荷重作用時において 8.0N/mm^2 （引張）および 108N/mm^2 （圧縮）で制限することによって、設計耐用期間における疲労の影響が生じないように設計できると推測される。

荷重によって断面破壊（曲げひび割れ等）した場合の疲労損傷が進展するかどうかは不明な点ではあるが、設計時の応力状態、断面破壊および疲労損傷に相関があることが推測される。今回の輪荷重走行試験の載荷荷重220kNを超える想定外の荷重（例えば、荷物落下による衝撃力、火災作用、超過積載、大型船舶の衝突など）が作用した場合には、曲げひび割れ等の断面破壊が生じ、その状態で繰返し載荷されると疲労損傷が生じる可能性がある。よって、UFC床版に曲げひび割れが生じた後の、繰返し載荷による疲労損傷の過程や破壊モードの解明については、今後、検討が必要な事項といえる。

(3) 載荷中のひび割れに対する耐久性の考察

輪荷重走行試験では、5.4.3(2)に示すようにリブ側面に0.04mm未満のひび割れを確認したため、このひび割れの耐荷性能への影響について考察する。UFC指針に一定の引張応力を保持できる開口変位は0.5mmとされており、開口変位が0.5mm以上については、開口変位4.3mmまで比例的に保持できる引張応力が漸減する引張軟化曲線が示されている。リブ側面に生じたひび割れは0.04mm未満であるため、引張応力はひび割れが生じる前と同様に保持されているといえる。

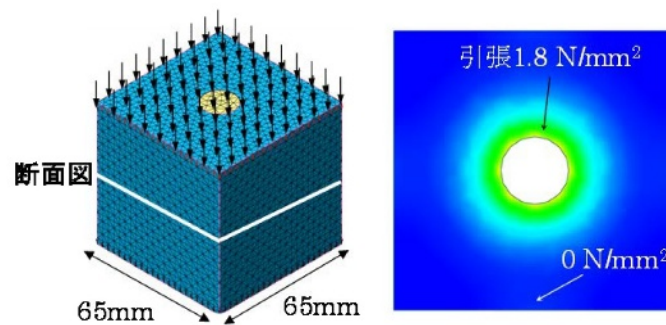
ひび割れ発生後の耐久性については、UFC指針の参考資料6に、残留ひび割れ幅0.1mm以上で促進養生した供試体と促進養生を行わない供試体に対する曲げ試験によって、曲げ強度が低下しないことが示されている。AFt系UFCについても同様の試験結果が示されており⁵⁻⁷⁾、0.1mmのひび割れが発生した場合にあっても、部材の耐荷性能を低下させるような鋼繊維の腐食は発生しないものと判断されたことが示されている。

また、既往の報告において、繊維補強コンクリートにおけるひび割れと鋼繊維の腐食については、十分なデータが得られていないことが指摘されており⁵⁻⁸⁾、ひび割れ後の耐久性については、今後解明すべき点はあるが、ひび割れが 0.5mm 以下であれば、鋼繊維に顕著な腐食が生じないという報告⁵⁻⁹⁾がある。このようなこれまでの知見を踏まえると、リブ側面の 0.04mm 未満のひび割れによって、耐久性が低下することはほぼないと考えられる。

(4) ひび割れの原因推定に関する検討

リブ側面にひび割れが生じた理由を推察し、UFCとPC鋼材のポアソン比の差の影響という仮説を設定した。ポアソン比はUFCが0.2、鋼が0.3である。プレストレス導入時において、UFCとPC鋼材のポアソン比の差によって、UFC床版にPC鋼材直角方向の引張応力が生じ、引張応力が残留した状態のリブ側面に輪荷重の繰返し載荷による除荷側への変動応力が作用することによってひび割れが顕在化した可能性があるとして推測した。この仮説に対し、リブのひび割れについて、解析および静的繰返し載荷によるひび割れの再現性を確認する検討を行った⁵⁻¹⁰⁾。

まず、UFCとPC鋼材のそれぞれのポアソン比を反映した3次元弾性FEM解析（NASTRAN）を実施し、図 5.22に示すように、PC鋼材周辺のUFCにおいてPC鋼材円周方向に1.8N/mm²程度の応力が生じることがわかったが、ひび割れ発生強度8.0N/mm²以下の応力度であった。

図 5.22 プレストレス導入時における PC 鋼材円周方向の引張応力度⁵⁻⁹⁾

次に静的繰返し載荷試験について述べる．試験体は，UFC床版のリブ1本分を切り出したプレテンション梁試験体である（図 5.23）．PC鋼材は床版と同様に高強度PC鋼材1S15.7を用い，233kN/本で緊張してUFCを打設した．試験体のプレストレス導入時の圧縮強度は153N/mm²，二次養生後の圧縮強度，ひび割れ発生強度および引張強度はそれぞれ205N/mm²，10.6N/mm²，13.6N/mm²であった．繰返し載荷として，60kN，90kN，120kNでそれぞれ2万回ずつ合計6万回載荷した．

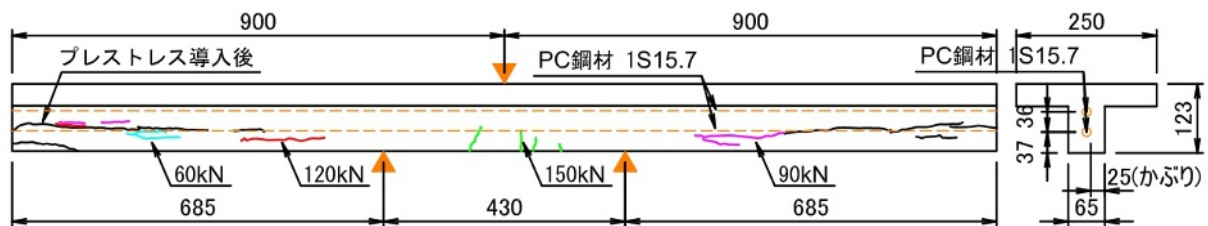


図 5.23 静的繰返し載荷後のひび割れ

プレテンション方式でプレストレスを導入する時点で，試験体端部付近にリブに水平ひび割れが生じたのが目視により確認された．プレストレス導入のみでひび割れが生じたのは，試験体端部ではPC鋼材の付着切れによってPC鋼材の軸方向ひずみが大きくなったためと考えられる．UFC床版では，プレストレス導入時にはひび割れが確認されなかったが，直角方向のリブが拘束することによってひび割れが抑制されたためと考えられる．

繰返し載荷試験によって生じたひび割れを図 5.23に示す．載荷荷重60kN（等価輪荷重95kN）で2万回載荷中に支点の外に水平ひび割れ（図の水色）が生じ，載荷荷重を大きくしていくとともに水平ひび割れが増加した（図のピンク，赤）．載荷荷重150kNでは曲げひび割れ（図の緑）が生じたため載荷を終了した．このひび割れは，UFCとPC鋼材のポアソン比の差による割裂ひび割れと推測し，プレストレス導入時のひび割れが進展したものと推察した．

梁試験体による静的繰返し載荷試験によって図 5.23に示すようにリブ側面のひび割れが再現することができた．PC鋼材に沿ったリブ側面のひび割れはPC鋼材の付着劣化を生じさせること

が懸念されるため、リブ側面にひび割れが生じた試験体の曲げ載荷実験によって破壊性状に与える影響を確認した。その結果、PC鋼材が降伏する前に上縁のUFCが圧縮破壊した。試験体端部においてPC鋼材の引込みは確認されなかったことから、PC鋼材の付着力低下による付着破壊することがなく、曲げ破壊形態にリブのひび割れが影響しないことを確認した。

(5) 床版同士の接合部

ボルトの軸力変化である7.2kNの軸力低下は、導入軸力205kNの3.5%であり、輪荷重載荷試験に要した期間である1.5ヶ月を考慮すると高力ボルト軸力のリラクセーションによる軸力変化と推測される。

パイ型亀裂変位計の計測値は20万回載荷時の変位で0.018mmと小さく、目視によっても接合部ひび割れ等は確認されなかったことと、水張り試験において水の浸透についても確認されなかったことから、接合部にひび割れ等の目開きは生じていなかったと推測される。

よって、輪荷重走行の繰返し作用によるボルト軸力の変化や、床版同士の接合部にひび割れ等の目開きが確認されなかったことから、床版同士の接合部に疲労による劣化は生じなかったといえる。

5.4.5 疲労破壊の照査

既往の PC 床版を対象とした輪荷重走行試験との比較によって、UFC 床版の疲労破壊に対する安全性を照査した。既往の PC 床版の輪荷重走行試験として、土木研究所で実施された平成 8 年版道示で設計された PC 床版の試験結果⁵⁻¹¹⁾と比較する。この PC 床版は、本研究における UFC 床版と同様に床版支間 2.5m（床版支間方向は本研究と異なり橋軸直角方向）に対して設計された床版厚 180mm の床版である。本検討は、PC 床版の輪荷重載荷試験における破壊までのたわみを、UFC 床版と比較することによって、その性状の違いを明らかにするものである。

各試験の階段載荷のステップを図 5.24 に示す。この載荷に対して、図 5.25 に載荷荷重と計測たわみを、図 5.26 に横軸を載荷荷重 100kN とした等価繰返し回数、縦軸を計測たわみとした比較を示す。ワッフル型 UFC 床版は、曲げ剛性が PC 床版と比較して小さいことから、載荷開始時のたわみが 1.8mm と大きい。5.4.3(1)に述べたように、荷重の増加に比例してたわみが大きくなり 220kN 載荷時に 4.0mm で破壊せず実験を終了している。一方、PC 床版は、たわみが 4.6～5.5mm から急激にたわみが大きくなり、353kN（40.3 万回）、392kN（48.6 万回）で破壊に至っている。

図 5.24 に示すように PC 床版の階段載荷のステップが本試験と異なるため、図 5.27 に示すように、横軸を載荷荷重 100kN とした等価繰返し回数、縦軸を正規化たわみとして比較することとした。正規化たわみ R_d は式 (5.2) によって算出した。

$$R_{\delta} = \frac{\delta_m}{P_i \delta_0} \times 100 \quad (5.2)$$

ここに,

δ_m : 計測たわみ (mm)

P_{li} : 載荷荷重 (kN)

δ_0 : 初期荷重載荷時のたわみ (mm)

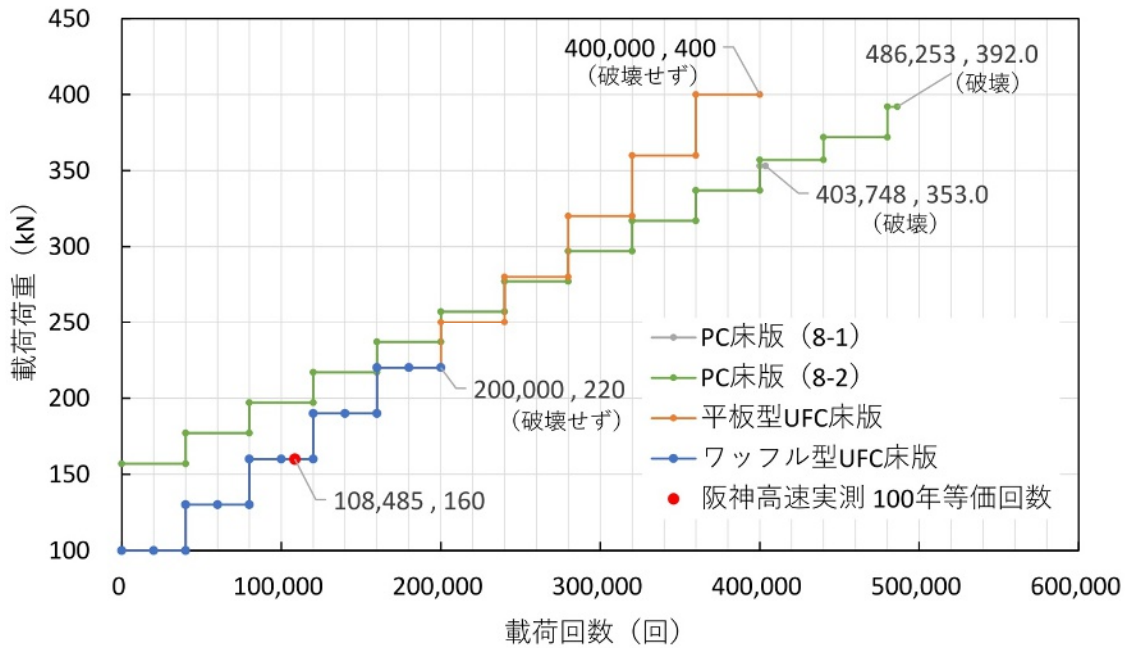


図 5.24 載荷ステップの比較

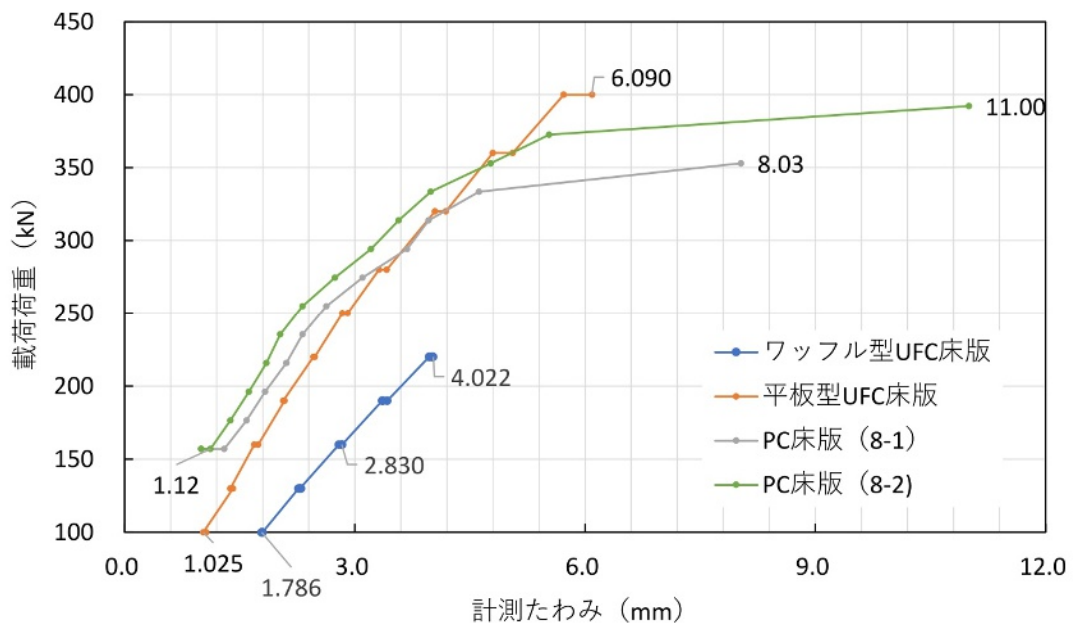


図 5.25 載荷荷重－計測たわみ

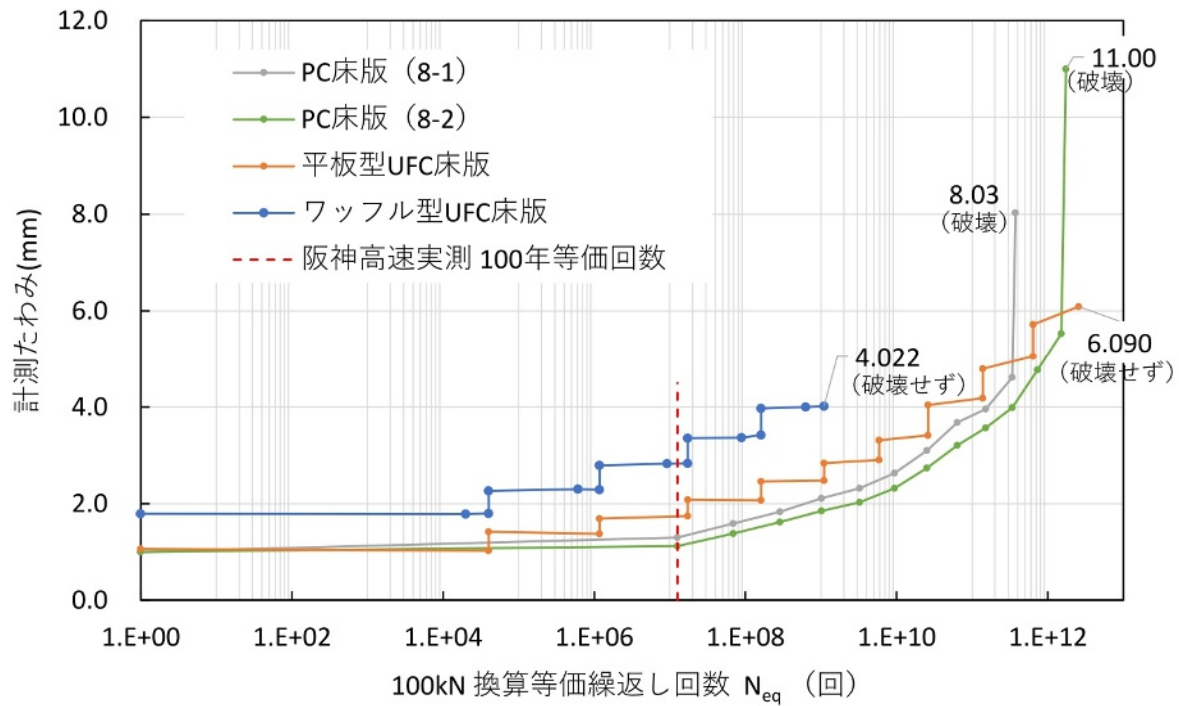


図 5.26 計測たわみー等価繰返し回数

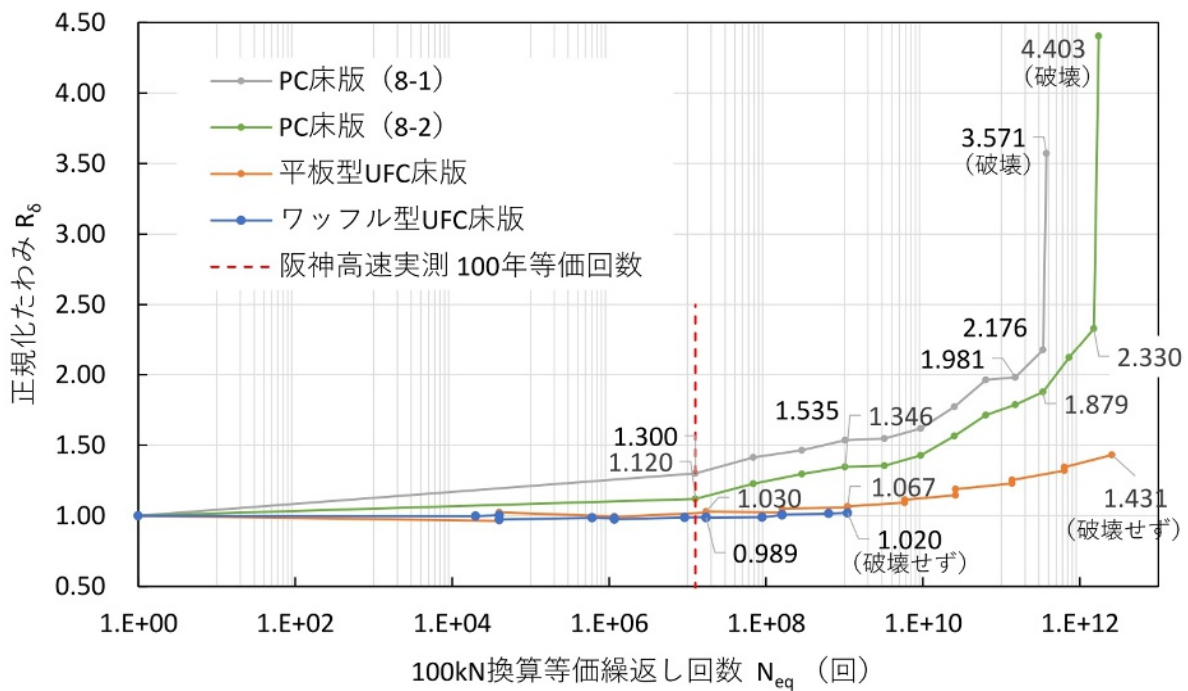


図 5.27 正規化たわみー等価繰返し回数

ワッフル型 UFC 床版の輪荷重試験結果は図の通り正規化たわみ R_g が 1.02 で破壊することなく試験を終了している。一方、PC 床版についても 100 年等価繰返し回数を超える载荷回数まで疲

第5章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

劣破壊せず十分な安全性を有しているといえる。100 年等価繰返し回数を超える載荷回数において、正規化たわみが約 2.00～2.50 を超えたあたりで、たわみが大きくなって破壊に至っている。

ワッフル型 UFC 床版については、床版の破壊に至るまで試験を実施していないが、試験終了時点の等価繰返し回数における正規化たわみを比較すると、ワッフル型 UFC 床版の 1.02 に対して、PC 床版は 1.35, 1.54 であり、ここまでの等価繰返し回数の範囲においては正規化たわみの増加率が UFC 床版の方が小さかった。また、この等価繰返し回数は 100 年等価繰返し回数の 86 倍の等価繰返し回数であり、UFC 床版は、この回数に対して正規化たわみが 1.02 ということから、道示に規定される荷重や床版に求められる性能に対して、UFC 指針に基づいて設計された UFC 床版は、疲労破壊に対して十分に高い安全性を有しているといえる。

ワッフル型 UFC 床版のみ表示した等価繰返し回数－正規化たわみを、図 5.28 に示す。130kN 以降の正規化たわみについては、漸増しているため、微小ではあるが、疲労による剛性低下は生じていたと考えられる。

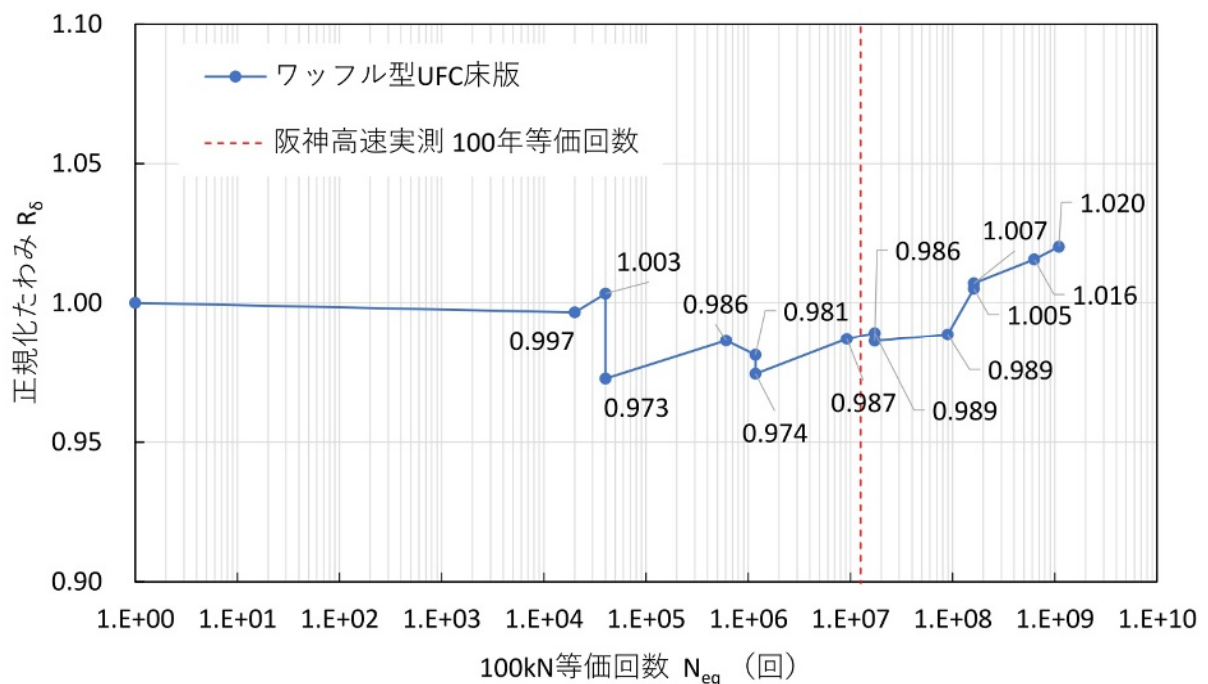


図 5.28 ワッフル型 UFC 床版の正規化たわみ－等価繰返し回数

なお、2 方向リブを有さず、スラブ（スラブ厚さ 130mm）のみで製作した平板型 UFC 床版についても疲労破壊に関する試験として輪荷重走行試験を実施している⁵⁻¹²⁾。この試験は階段状載荷で 40 万回（400kN）載荷しており、図 5.27 に示すようにワッフル型と同様の曲線を描き PC 床版の実験よりも等価繰返し回数が多い状態で正規化たわみが 1.431 で床版が破壊せずに実験を終了している。

従来の RC 床版の疲労による劣化損傷過程は、鋼桁による乾燥収縮の拘束や重車両の走行によ

る曲げひび割れによる一方向ひび割れによる梁状化，走行荷重の繰返し載荷によるひび割れの二方向化，走行荷重の繰返しにより発生する垂直せん断力やねじりモーメント，せん断力の作用によってひび割れの貫通が生じ，輪荷重による押抜きせん断により局所的な陥没破壊が生じるものとされている⁵⁻⁶⁾。

PC 床版については既往の輪荷重走行試験結果において，床版へのプレストレスの導入が，たわみやひび割れが抑制されることなどによって疲労破壊しにくくなることが確認されている⁵⁻¹¹⁾。また，RC 床版と同様に床版破壊時に内部の鉄筋の破断は生じず，床版コンクリートの押し抜きせん断破壊によるたわみの増大で実験が終了しており，これらの結果から PC 床版の疲労でも RC 床版同様に床版コンクリートのせん断破壊が支配的になる可能性が高いとされている⁵⁻¹¹⁾。

一方，UFC 床版は RC 床版や PC 床版と比べて，UFC の高い圧縮強度ならびに鋼繊維の補強効果によってせん断耐力が高い。また，曲げによるひび割れが生じた後の繊維の補強効果によってひび割れが進展しにくい^{5-10) 5-7)}。本試験では，ひび割れが発生する前の段階で試験を終了しており，繊維の補強効果を確認することはできていないが，RC 床版や PC 床版の疲労による劣化過程ならびに押し抜きせん断破壊が支配的であることに対して，UFC 床版のせん断耐力が相対的に高い特徴をふまえ，UFC 床版は従来の RC 床版や PC 床版よりも高い疲労破壊に対する安全性を有しているものと推測する。

5.5 まとめ

5.2 節では，輪荷重載荷による疲労破壊の照査における，試験の概要，試験体の構造および製作，試験体における UFC の材料特性，載荷装置である自走式輪荷重移動載荷装置の概要を述べた。

5.3 節では，輪荷重静的載荷試験について述べた。試験方法として載荷位置と計測位置を示した。試験結果として，リブ側面の鉛直方向ひずみ，スラブ上面の走行直角方向ひずみ，スラブ下面の走行直角方向ひずみを示し，リブ側面とスラブ上面および下面のひずみについて考察を述べた。

5.4 節では，疲労破壊に対する安全性を照査することを目的に行った，輪荷重走行試験について述べた。試験方法として，載荷ステップと照査指標の検討について述べた。試験結果として，床版のたわみとひずみの変化，リブ側面に生じたひび割れについて述べた。試験結果の考察として，生じたひび割れについて，耐久性に与える影響についての考察と，ひび割れの再現実験を踏まえた考察を述べた。また，等価繰返し回数と正規化たわみの関係について，他形式の床版との比較した上で考察を述べた。

第 5 章 輪荷重載荷による疲労破壊の照査

本章の結論は以下の通りである。

- 1) 静的特性を把握するため、実物大試験体による輪荷重静的載荷試験を行い、2 方向リブの影響を確認した。その結果、載荷点に近い側のリブ側面の鉛直方向のひずみとして引張が 13×10^{-6} (0.6 N/mm^2)、圧縮が 61×10^{-6} (2.8 N/mm^2) が生じていることを確認した。直交するリブの影響であるが UFC 指針の設計ひび割れ発生強度以下である。
- 2) 安全性に関する疲労破壊の照査をするため、輪荷重走行試験として、100kN から設計荷重の 2 倍以上である 220kN の輪荷重を計 20 万回の載荷を行った。その結果、最大荷重載荷時点でも、床版のたわみおよび UFC のひずみは弾性範囲内であることがわかった。また、床版同士の接合部についてもボルト軸力も弾性範囲内であり、複数枚が連続する床版構造として、試験を実施した載荷回数の範囲においては疲労破壊しないことを明らかにした。
- 3) 20 万回載荷後に床版上に水を張った状態で 130kN～160kN の輪荷重を計 4 万回載荷したが、床版に劣化は生じず健全な状態であった。このため、浸水状態においても、試験をおこなった範囲においては疲労破壊しないことを明らかにした。
- 4) 190kN 載荷後に幅 0.04mm 未満のひび割れがリブ側面に確認されたが、床版の挙動からは剛性の低下は確認されなかった。よって、試験における載荷範囲である設計荷重の 2 倍程度までにおいては、剛性低下しないことがわかった。また、0.04mm 未満のひび割れは UFC 指針の引張軟化特性において引張応力が低下しない領域であることから、このひび割れの輪荷重に対する耐荷性能への影響はなく、耐荷性能が長期的に低下することもほぼないと考えられる。
- 5) 輪荷重走行試験終了時の等価繰返し回数において、既往の PC 床版の実験結果⁵⁻¹¹⁾と比較すると、正規化たわみが小さい。また、この等価繰返し回数は阪神高速道路における実測軸重によって算出した 100 年の等価繰返し回数の 86 倍であり、安全性に関する疲労破壊しにくい構造といえる。

本章で明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) UFC 床版が輪荷重走試験によって十分高い耐疲労性を有することは確認できたが、床版の疲労限界状態となるまでは載荷しておらず、本床版がどこから劣化するかは明らかとなっていない。実構造の維持管理において、どの部位に着目して点検するかという観点から、今後、UFC 床版の疲労限界状態における劣化を把握することが望ましい。
- 2) UFC 床版の疲労破壊は、ひび割れの開口後に荷重が繰返し載荷されることによって、ひび割れの開口が進むと推測する。よって、使用性における変動作用時の応力状態が、疲労破壊に影響することといえる。使用性の照査においてひび割れを許容しない現設計であれば問題ないが、今後、使用性においてひび割れを許容する場合は、疲労破壊への影響が懸念されるため、変動作用時の応力状態、ひび割れ状態と疲労破壊に対する安全性の関係を明らかにすることが課題といえる。

5 章参考文献

- 5-1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 5-2) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書解説，1964
- 5-3) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，627-632, 1987
- 5-4) 閑上直浩，杉山裕樹，薄井王尚，仲田慶正：阪神高速道路における活荷重実態調査，第 66 回土木学会年次学術講概要集，2011
- 5-5) 杉山裕樹，閑上直浩，広野邦彦，薄井王尚：阪神高速道路における実態活荷重の把握とその評価，土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 1, 158-172, 2018
- 5-6) 松井繁之：道路橋床版，森北出版，2007
- 5-7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.3, 2011
- 5-8) 内田裕市：繊維補強コンクリート構造物の設計技術の現状と課題，コンクリート工学，Vol. 50, No. 5, 514-518, 2012
- 5-9) Nemegeer, D., Vanbrabant, J. and Stang, H. : Brite Euram Program on Steel Fiber Concrete Subtask: Durability: Corrosion Resistance of cracked fiber Reinforced Concrete, Test and Design Methods for Steel fiber reinforced concrete :Background and Experiences, Proceeding of the RILEM TC 162-TDF Workshop, RILEM Proceedings PRO 31, 47-66, 2003
- 5-10) 一宮利通，金治英貞，小坂崇，樽谷早智子：薄肉 UFC プレテンション部材の構造性能に関する検討，第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，599-644, 2014.
- 5-11) 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第 28 号，2002.
- 5-12) 小坂崇，金治英貞，一宮利通，藤代勝：床版取替えに対応した UFC 床版の疲労耐久性に関する検討，第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，569-574, 2017

6 章 静的および動的载荷による接合部の照査

6.1 概 説

本章においては、UFC床版における接合部の安全性に関する照査について述べる。UFC床版を用いた鋼合成桁の接合部を図 6.1 に示す。このうち、本章では図の(1)床版と鋼桁の接合部、(2)床版同士の接合部を対象とする。それぞれの接合部の構造と、間詰部の充填材料に関する検討、安全性に関する断面破壊および疲労破壊の照査を示す。

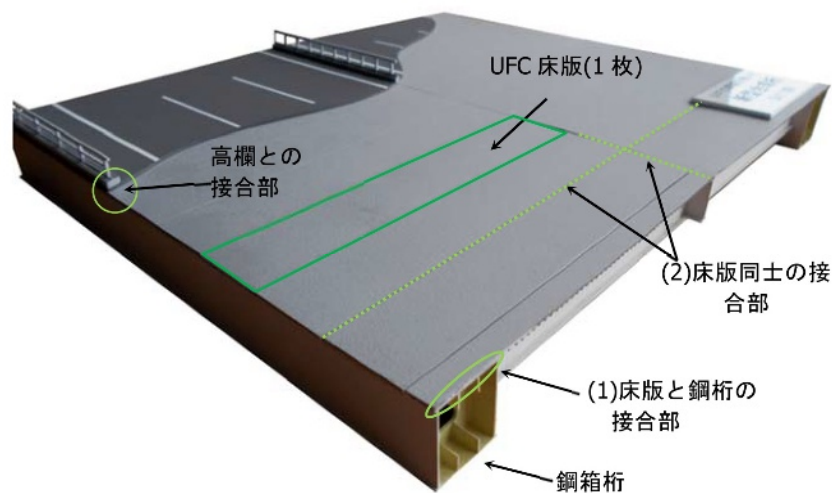


図 6.1 UFC 床版を用いた鋼合成桁の接合部

床版と鋼桁の接合部は、十分に固定されていないと、車両の通行により衝撃の影響が生じること、相互のずれ作用により、鋼桁の摩耗や腐食の原因となるなど、橋梁の全体挙動への影響を及ぼす可能性がある。また、車両の加速、制動及び地震等による水平力に対し、床版が所定の位置を保持するようにする必要がある。更に、鋼桁のフランジを床版に定着させることは、鋼桁の圧縮フランジの局部座屈、横倒れ座屈に対して有効であることから、接合部が十分に固定する機能を有する必要がある。

床版同士の接合部についても、十分に固定されていないと、温度及び乾燥による変形の違いや剛性の違い等により、接合面に発生する引張力に抵抗できないという影響や、床版が一体化して作用に抵抗できないという影響が生じる可能性がある。よって、床版同士の接合部は、床版が一体化して連続性を保ち、構造上の弱点とならないように考慮する必要がある。

このように、接合部は床版を含む上部構造全体の耐荷性能や安全性に影響を及ぼす部材といえることから、想定外の作用によって断面破壊を生じたとしても、フェイルセーフ機能や靱性を有することが望ましい。接合部のUFC床版が損傷する場合は、ひび割れ後も鋼繊維の架橋効果による引張応力の伝達機構を有するため靱性のある損傷形態が期待できる。

6.2 床版と鋼桁の接合部

6.2.1 接合部の構造

UFC 床版を用いた鋼合成桁における接合部に要求される機能は「床版と桁の密着を確保すること」「車両の加速および制動並びに地震などによる水平力に対して所定の位置を確保できること」「桁と床版との間のせん断力に対して安全であること」である⁶⁻¹⁾。

UFC 床版と鋼桁の接合部におけるずれ止めは、従来の PC 床版などによる合成桁と同様に、鋼桁に溶接した頭付きスタッドを用いる。接合部の構造は、UFC 床版には通常のプレキャスト PC 床版と同様に、ずれ止め用孔を設けて製作し、現場において鋼桁上に床版を架設後、ずれ止め用孔に無収縮モルタルなどを充填し、UFC 床版と鋼桁を一体化する構造である。充填材料に関する検討を 6.2.2 に示す。

ずれ止めに用いるスタッドは、軸径が 19mm および 22mm を標準として、材質、形状、寸法および許容差については JIS B 1198「頭付きスタッド」による。ずれ止めの最大間隔および最小間隔は道路橋示方書⁶⁻¹⁾（以下、道示という）に準拠することとした。ずれ止め用孔内に 3 本のスタッドを配置する場合の最小寸法を図 6.2 に示す。

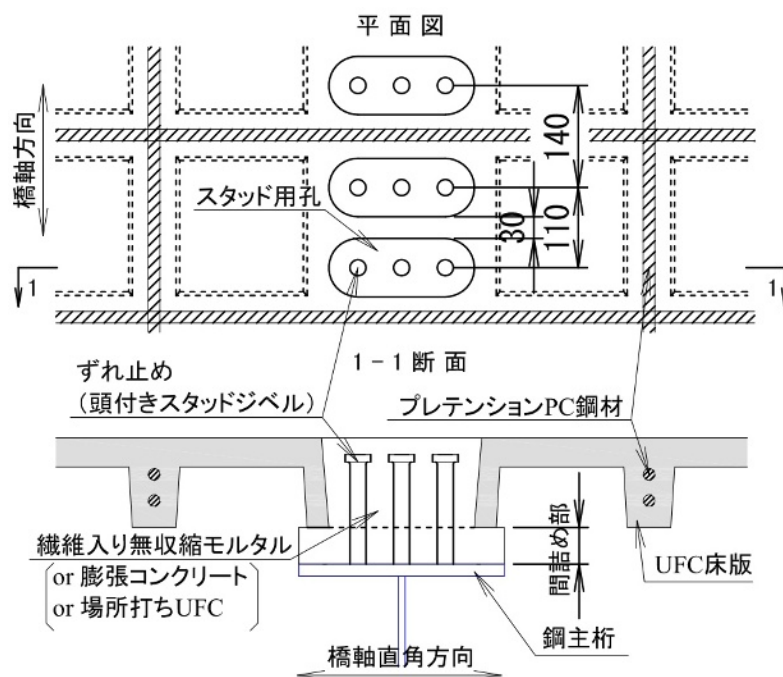


図 6.2 UFC 床版と鋼桁の接合構造

橋軸方向間隔は最小 110mm としており、ずれ止め用孔間の最小離隔は 30mm である。これは、UFC の最小部材厚、本検討の対象とする AFt 系 UFC⁶⁻²⁾に混入される鋼繊維（繊維長 15mm と

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

22mm) が部材から突出しない寸法かつ製作実績から 30mm としたものである。ずれ止め用孔間に PC 鋼材を配置する場合は、PC 鋼材のかぶりは、土木学会の UFC 指針⁶⁻³⁾に準拠して 20mm とし、ずれ止め用孔の最小離隔は $20\text{mm} \times 2 + \text{PC 鋼材径}$ となる。UFC 床版内には構造部材として鉄筋を配置しないため、ずれ止め用孔の最小間隔を従来の RC 床版や PC 床版と比べ小さくすることが可能である。

UFC 床版下面と鋼桁フランジの間に、縦横断勾配への対応や床版架設時の高さ調整代を設けている(以下、間詰め部という)。間詰め部もずれ止め用孔と同時に無収縮モルタルなどを充填する。間詰め部の厚さは 20mm から 50mm 程度を標準とする。UFC 床版を既設床版の取替えへ適用する場合、取替え前よりも床版厚が小さくなることもあり、間詰め部の厚さで調整することが重量抑制の観点からは合理的である。ただし、6.2.4 に述べる接合部の押抜きせん断耐力が、間詰め部で決定する場合があるため、床版にハンチを設けるなどの構造対応によって、間詰め部の厚さが過度に大きくならないように留意する必要がある。床版にハンチを設けない場合は、間詰め部の厚さに応じた押抜きせん断試験を実施した上で、設計をおこなう必要がある。

ずれ止めの設計は、道示に示される「スタッドが受け持つ鋼桁と床版の間のせん断力」の制限値の算出式によって設計することによって疲労破壊、合成桁の降伏や断面破壊に対して安全性が確保されるものとされている。許容せん断力式は、土木研究所における実験結果に基づき設定されており、コンクリート強度とスタッド軸径と全高によって算出される。

一方、UFC の圧縮強度の特性値は 180N/mm^2 と従来のコンクリートよりも高く、UFC 床版の厚さが小さいことから、道示の許容せん断力の式を準用できない可能性がある。よって、本接合構造を再現した試験体を用いて押抜き試験方法⁶⁻⁴⁾によるせん断試験および疲労試験を実施し、設計に用いる許容せん断力の算定と既往の疲労強度式の適用性について検討することとした。

6.2.2 充填材料の検討

(1) 検討の概要

本検討においては、ずれ止め用孔および間詰め部の充填材料は無収縮モルタルを用いることとした。従来のプレキャスト PC 床版では、ずれ止め用孔の部分のみ膨張コンクリートを用いる場合がある。また、ずれ止めの押抜きせん断耐力を大きくする必要がある場合は、場所打ち UFC⁶⁻²⁾を用いることも想定されるが施工性の低下が懸念されるため、現場での施工性を考慮し、本論文では、無収縮モルタルを充填材料とした検討を行った。

無収縮モルタルの圧縮強度は 50N/mm^2 から 100N/mm^2 程度と UFC の 180N/mm^2 よりも小さく、ひび割れが生じる可能性があるため、剥落を防止するために繊維を混入することとした。繊維を混入すると充填性が低下することが想定されたため充填性試験を実施し、曲げ強度から剥落防止性能を評価することとした。

(2) 充填材料の仕様

充填性試験に用いたモルタルは、収縮補償型のプレミックスモルタルとして高強度型（以下，U）と小空隙充填用（以下，IS）の 2 種類を使用した．それぞれの標準配合を表 6.1 に示す．プレミックス材はセメント，砂，混和材（カルシウム サルフォ アルミネート系膨張材によるセメント系無収縮グラウト材）によって構成される．

無収縮モルタルに混入した繊維は、高密度ポリエチレン繊維（以下，PE）とポリプロピレン繊維（以下，PP）である．試験に用いた無収縮モルタルと繊維の組合せを表 6.2 に示す．繊維を混入することによって流動性が低下する場合，混和剤として高性能減水剤（以下，SP）を後添加した．後添加した SP は，高強度コンクリート用のポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤である．

表 6.1 無収縮モルタルの標準配合

記号	目標軟度 J_{14} (秒)※	W/(C+T) (%)	単位量 (kg/m ³)	
			プレミックス材	水
U (高強度型)	7±2	29.5	2,050	302
IS (小空隙充填型)	6±2	38.0	1,825	347

※ J_{14} 漏斗流下値

表 6.2 試験に用いた充填材料

モルタル種類	繊維			
	種類	長さ(mm)	径(μm)	混入量(vol.%)
U (高強度)	PE	3	12	0, 0.1, 0.2
		6	12	0, 0.05, 0.1
IS (小空隙)	PE	3	12	0, 0.1, 0.2
		6	12	0, 0.05, 0.1, 0.2
	PP	12	64	0, 0.05

(3) 試験方法

1) フレッシュ性状確認試験

フレッシュ性状に関する試験として，J14 漏斗試験（JSCE-G505）およびモルタルフロー試験（JSCE-F541）を実施した．また，写真 6.1 に示すように UFC 床版のスタッド孔と間詰部を模

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

擬した模型を用いて充填確認試験を実施した。スタッド用孔からモルタルを流し込み約 500mm 離れた位置に設けた孔 ($\phi 22$) からモルタルが排出されることによって充填性を確認した。

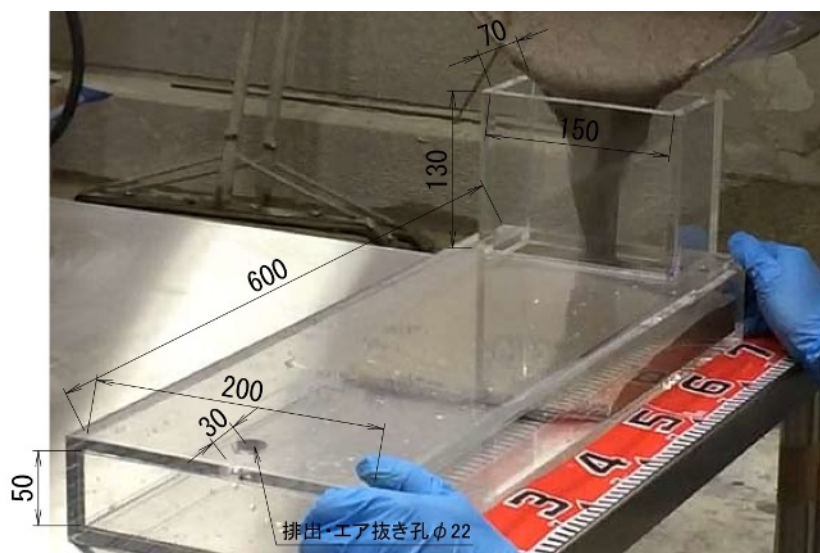


写真 6.1 モルタル充填確認試験

2) 強度試験

間詰の強度試験として、 $\phi 50\text{mm} \times$ 高さ 100mm の円柱供試体による圧縮強度試験 (JIS A 1108)、 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱供試体による曲げ試験 (JIS A 1106) を実施した。

3) 剥落防止性能に関する試験

剥落防止性能の評価に関する試験として「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001-2003)」に準拠した $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体による曲げ試験を実施し、この試験方法の付属書「コンクリートの引張軟化曲線の推定方法」に準拠した逆解析によって引張軟化曲線を推定した。

(4) 試験結果

1) モルタル充填確認試験

J14 漏斗試験の結果を図 6.3 に示す。使用した無収縮モルタルの J14 漏斗流下値に関するメーカーが規定する目標軟度の上限值は U が 9 秒、1S が 8 秒であるが、J14 漏斗流下値は、繊維を混入すると目標軟度の上限值以上となった。1S-PE(6mm)を 0.1%混入した場合は閉塞したが、1S-PE(6mm)0.2%に SP を添加すると 9.22 秒となった。

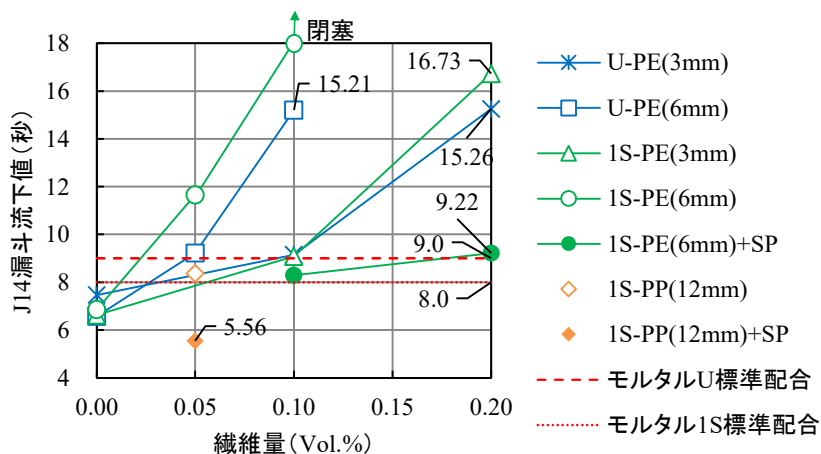


図 6.3 繊維量－J14 漏斗流下値

モルタルフロー試験の結果を図 6.4 に示す。繊維を 0.1%混入するとモルタルフローが 150mm 以下となり繊維長が 6mm の場合は 98.5mm であった。1S-PE(6mm)0.2%に混和剤を添加すると 209.5mm 以上となった。

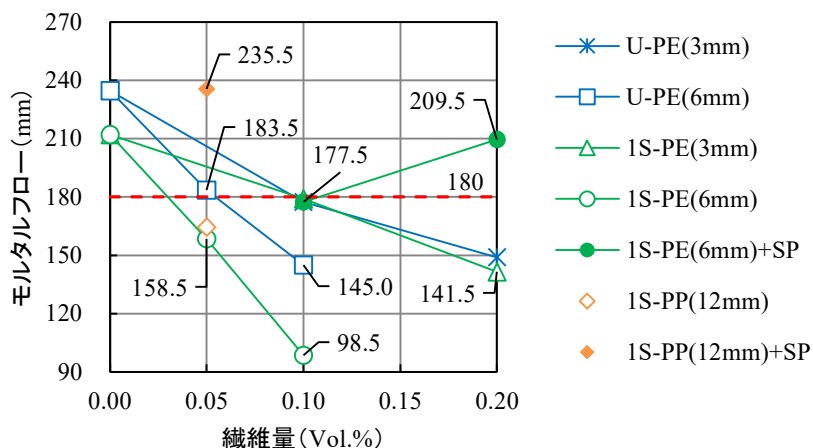


図 6.4 繊維量－モルタルフロー

写真 6.1 の、UFC 床版のスタッド孔と間詰部を模擬した模型を用いた、モルタル充填確認試験の結果、PE 繊維を混入した場合においても SP を後添加することによって充填されること確認した。PP 繊維については繊維長が 12mm と長いことから充填性が劣る結果であった。

2) 強度試験

圧縮強度試験結果を図 6.5 に示す。繊維を混入すると圧縮強度が大きくなる結果であった。U-PE(3mm)0.2%については 93.8N/mm^2 、1S-PE(3mm)0.2%については 69.9N/mm^2 であり繊維無しの場合と比べてそれぞれ 2.2%, 9.6%大きくなった。

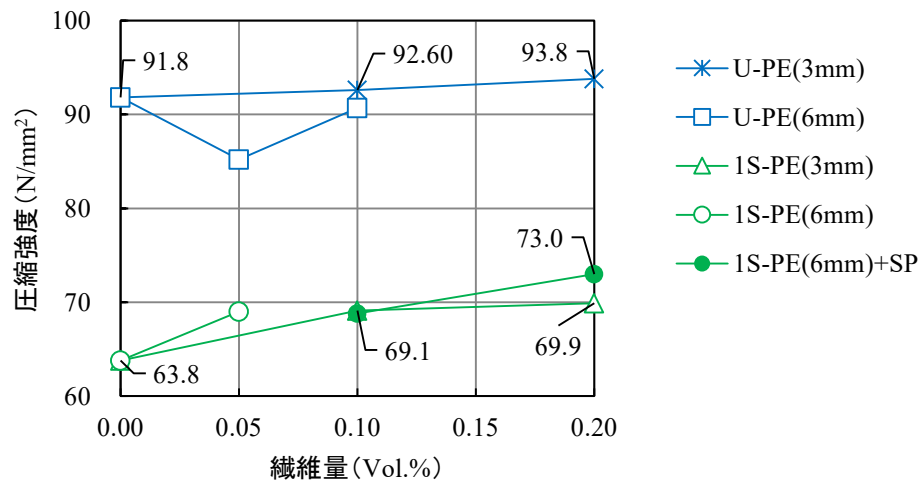


図 6.5 繊維量－圧縮強度

曲げ強度試験結果を図 6.6 に示す。曲げ強度についても概ね繊維を混入すると大きくなる結果であった。U-PE(3mm)0.2%については 6.76N/mm^2 、1S-PE(3mm)0.2%については 5.07N/mm^2 であり繊維無しの場合と比べてそれぞれ 8.0%、44%大きくなった。

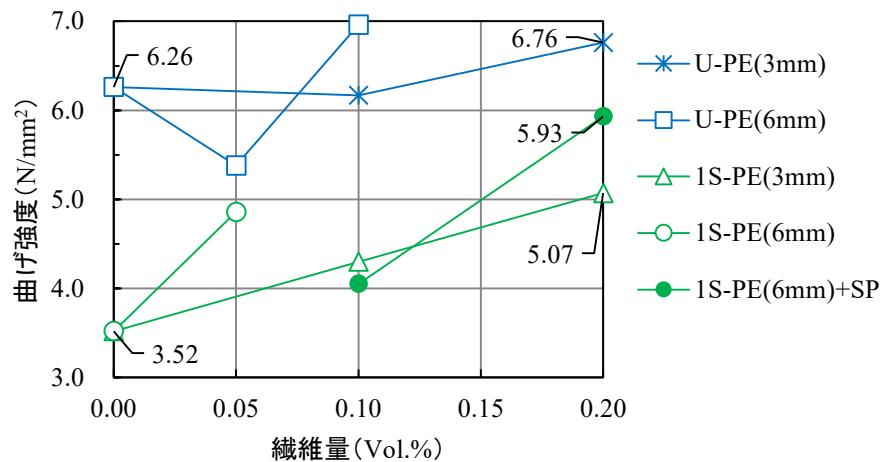


図 6.6 繊維量－曲げ強度

(5) 剥落防止性能の検討

切欠きはりをを用いた曲げ試験結果の逆解析から算定した引張応力度と仮想ひび割れ幅（開口変位）の関係を図 6.7 に示す。PE(6mm)0.2%は、ひび割れが生じると 1N/mm^2 程度まで低下するが、仮想ひび割れ幅 0.12mm 程度までは引張応力 1N/mm^2 程度を保持した。

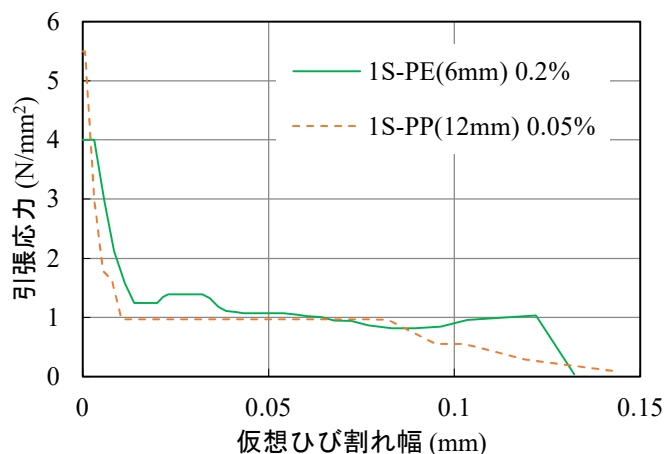


図 6.7 引張応力度－仮想ひび割れ幅

(6) まとめ

フレッシュ性状については、J14 漏斗試験およびモルタルフロー試験結果から、繊維を混入すると流動性が低下するが SP を添加することによって、繊維無しの場合と同等以上の流動性が得られることが分かった。間詰部を模擬した充填確認試験によっても繊維を混入したモルタルの充填性に問題がないことを確認した。

強度については、圧縮強度試験については 2.2%～9.6%大きくなったが、曲げ強度については 8%～44%大きくなり、繊維を混入することによって曲げ強度の増加率が大きいことが分かった。

剥落防止性能については、一般的に剥落防止材に用いられる仕様である PP(12mm, 0.05vol.%)と比較して、PE(6mm, 0.2vol.%)の引張応力－開口変位曲線は同程度か若干大きい剥落防止性能を有するということがわかった。よって、PP 繊維混入モルタル(12mm, 0.05vol.%), PE 繊維混入モルタル(3mm, 0.2vol.%), PE 繊維混入モルタル(6mm, 0.2vol.%)の 3 ケースを接合部の充填材料として選定し、6.2.3 の押抜き载荷試験に用いることとした。

本検討では、間詰部を模擬した充填確認試験によって充填性に問題がないことを確認したが、実橋では、橋梁の縦断勾配や横断勾配があるため、現場施工において流動性の影響を確認することが課題である。今後、実橋への施工時には事前試験で検討する必要がある。

6.2.3 押抜き载荷による変形性能の照査

(1) 試験体の概要

試験体の概要を図 6.8 および表 6.3 に示す。UFC 床版部の厚さは 150mm とした。頭付きスタッド(JIS B 1198-2011)の径は $\phi 22$ mm で全高は 150mm とし、鋼桁を模擬した H 形鋼の両フランジに 2 本ずつ配置した。H 形鋼のフランジ幅は 200mm、床版と鋼桁間の間詰め部の厚さは 50mm、幅は H 形鋼のフランジ幅と同じ 200mm とした。

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

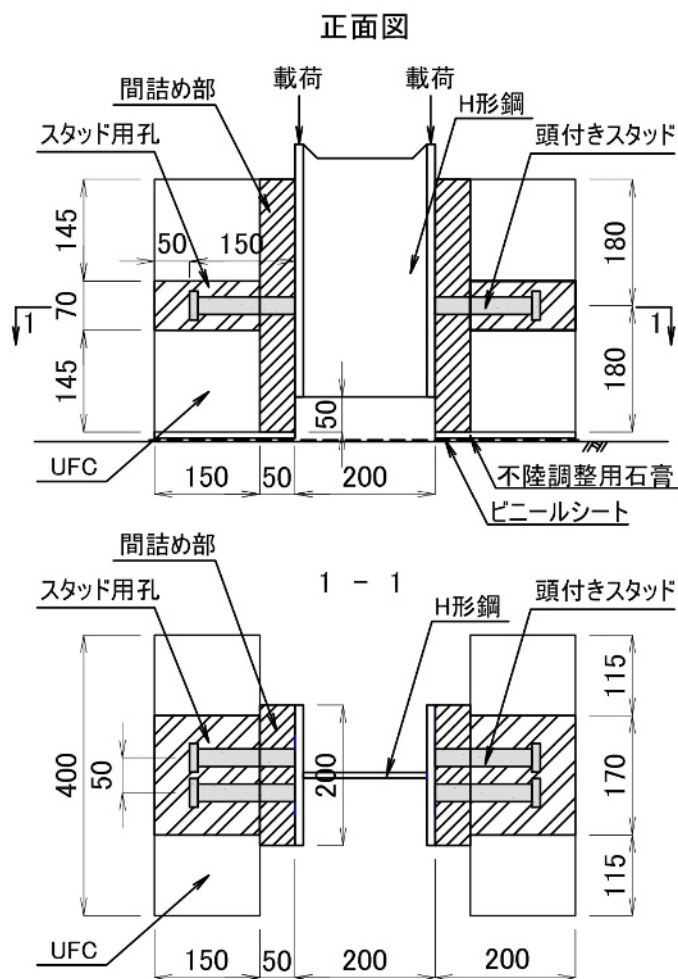


図 6.8 押抜き载荷試験の試験体

表 6.3 押抜き载荷試験の試験体および载荷方法

No.	間詰め部		床版部		頭付きスタッド		載荷方法
	仕 様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕 様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕 様	引張強度 (N/mm ²)	
1	モルタル＋溶接金網	59.2	UFC	200.3	φ22 2 本／面 全高 150mm	469	静的単調載荷
2		59.2					漸増繰返し載荷
3	PP 繊維混入モルタル (12mm, 0.05vol.%)	60.0		198.5			静的単調載荷
4	PE 繊維混入モルタル (3mm, 0.2vol.%)	64.9					静的単調載荷
5	PE 繊維混入モルタル (6mm, 0.2vol.%)	71.7					静的単調載荷
6		59.6					漸増繰返し載荷
7		69.6					

間詰め部のモルタルの充填は、床版を水平にして実施し、同日の数時間後に両側の間詰めを完了した。なお、本試験では箱抜き部にも厚さ 50mm の間詰め部と同時にモルタルを充填した。

表 6.3 に使用材料の強度試験結果を示す。間詰め部の材料は 6.2.2 の検討を踏まえ、モルタルには収縮補償型のプレミックスモルタル 1S（小空隙充填用）を使用し、試験体 No.3 から No.7 は合成繊維を混入（No.3 には長さ 12mm の PP 繊維を、No.4 および No.5 には長さ 3mm、6mm の PE 繊維をそれぞれ混入した。）、SP を後添加した。

UFC には Aft 系 UFC を使用した。床版部の UFC は、養生として常温の封緘養生を 24 時間行い、その後 85℃の蒸気養生を 24 時間行った。なお、表 6.3 のモルタルおよび UFC の圧縮強度は両側の平均値である。試験体 No.1 から No.5 には、間詰め部の補強および剥落防止を目的としてそれぞれで異なる仕様とした。No.1 および No.2 は写真 6.2 に示すように、間詰め部を直径 3.2mm の鋼材を 75mm 間隔で配置する溶接金網で補強した。



写真 6.2 溶接金網設置状況

(2) 試験方法

接合部の耐力は、押抜き载荷試験によることとし、試験体 No.1, No.3 から No.5 は静的単調载荷、試験体 No.2 は漸増繰返し载荷とした。载荷試験の状況を写真 6.3 に示す。

漸増繰返し载荷では、スタッド 1 本あたりの荷重増分を 10kN/本、下限荷重を 1.25kN/本としてずれ変位（床版部と H 形鋼の鉛直方向相対変位）が約 1mm に達するまで荷重制御で繰返し载荷を実施した。その後はずれ変位の増分を 0.5mm、下限荷重 1.25kN/本としてずれ変位が約 2.0mm に達するまで繰返し载荷後、最後は終局に至るまで押抜き载荷を実施した。鋼製の台座上に敷いたビニールシート上に不陸調整用の石膏を敷設し、その上に試験体を設置した。床版部の開きは拘束しなかった。

試験体 No.1 から No.5 の試験実施後、採用する間詰め部の仕様を選定し、同仕様を用いた試験体 No.6 および No.7 の漸増繰返し载荷試験を実施した。



写真 6.3 押抜き载荷試験状況

(3) 試験結果

試験結果を表 6.4 に示す。最大耐力 P_{max} は、ケース No.5 が最も大きく 155.4kN であった。静的単調载荷および漸増繰返し载荷試験時のせん断力とずれ変位（床版部と H 形鋼の鉛直方向相対変位）関係を図 6.9 に示す。いずれの試験体もずれ変位が約 1mm で荷重の増加が小さくなり最大耐力に到達した。その後、異音が発生して耐力が低下し、写真 6.4 のように頭付きスタッド直下の間詰め部にひび割れが観察された。ひび割れ発生後も試験体 No.1 ではずれ変位が約 7mm まで、そのほかの試験体では約 10mm まで最大耐力に近いせん断力を保持した。

表 6.4 押抜き载荷試験による最大耐力および降伏耐力

No.	試験条件		試験結果	
	間詰め部の仕様	载荷方法	最大耐力 P_{max} (kN)	降伏耐力 P_y (kN)
1	モルタル+溶接金網	静的単調载荷	130.1	86.1
2		漸増繰返し载荷	135.4	59.0
3	PP 繊維混入モルタル (L=12mm, 0.05vol.%)	静的単調载荷	128.2	93.3
4	PE 繊維混入モルタル (L=3mm, 0.2 vol.%)	静的単調载荷	143.4	97.5
5	PE 繊維混入モルタル (L=6mm, 0.2 vol.%)	静的単調载荷	155.4	107.6
6		漸増繰返し载荷	137.1	99.8
7			149.3	96.2

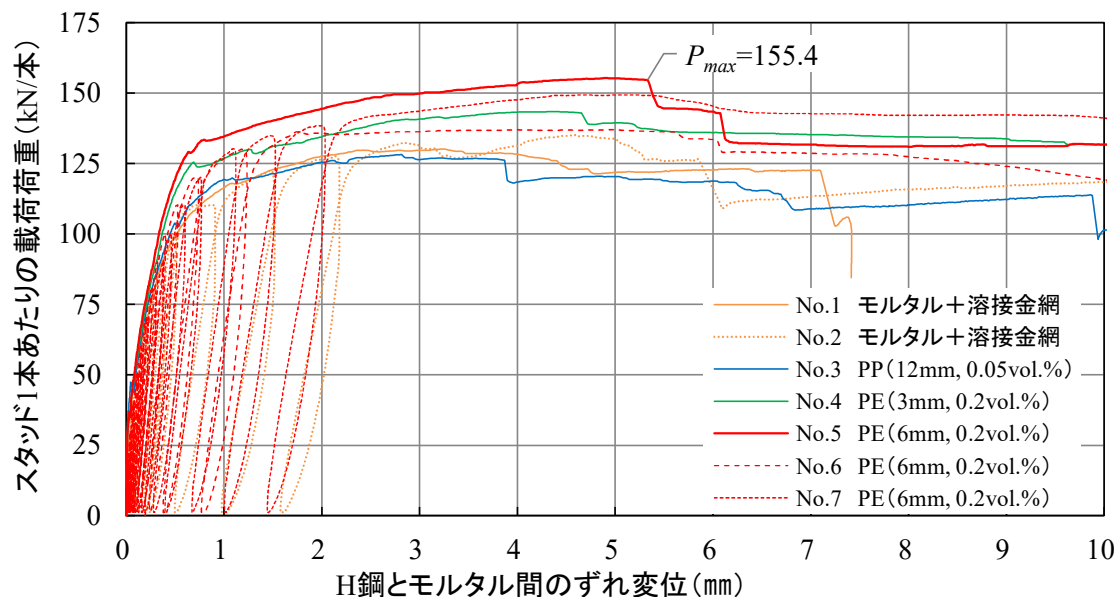


図 6.9 スタッド 1 本あたりの載荷荷重－H 鋼とモルタル間のずれ変位



写真 6.4 間詰め部のひび割れ（載荷終了後）

(4) 試験結果の考察

試験体 No.1 から No.5 の最大耐力 P_{max} は、130.1kN/本から 155.4kN/本であり、試験体 No.5（PE 繊維 $L=6\text{mm}$ ，0.2%混入のケース）がもっとも耐力が大きかった。試験体 No.1 および No.2 のように間詰め部を溶接金網で補強すると、無対策の場合に比べて最大耐力が 2 割程度増加することが筆者らのこれまでの検討⁶⁻⁵⁾で確認されているが、モルタルに PE 繊維を混入する補強方法（No.4～No.7）でも、溶接金網補強と同程度以上の効果が得られた。

試験体 No.5 がもっとも耐力が高く、また溶接金網は腐食することが懸念されるため、間詰め

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

部の仕様は、試験体 No.5 に適用した長さ 6mm の PE 繊維を 0.2% 混入したモルタルを使用する案を採用することとした。

図 6.10 に試験体 No.5 と同様の仕様とした試験体 No.6 および No.7 の最大耐力とモルタルの圧縮強度の関係を示す。最大耐力は試験体 No.5 とほぼ同程度であったが、モルタルの圧縮強度が高いほど最大耐力も大きくなる傾向がみられた。

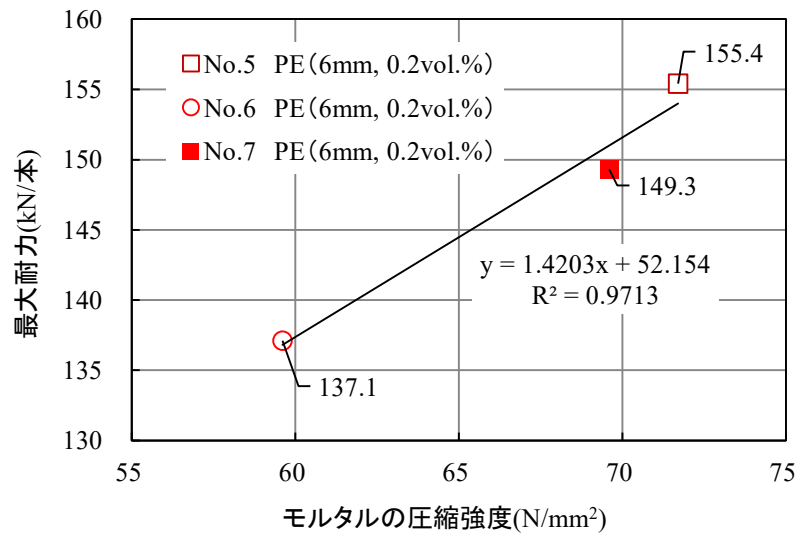


図 6.10 最大耐力ーモルタルの圧縮強度

文献 6-4) に準じて、最大荷重 P_{max} の 1/3 の点の割線を、ずれ変位が 0.2mm の位置にオフセットし、その直線と実験結果が交差する荷重を降伏耐力 P_y として求めた結果を、図 6.11 および表 6.4 に示す。

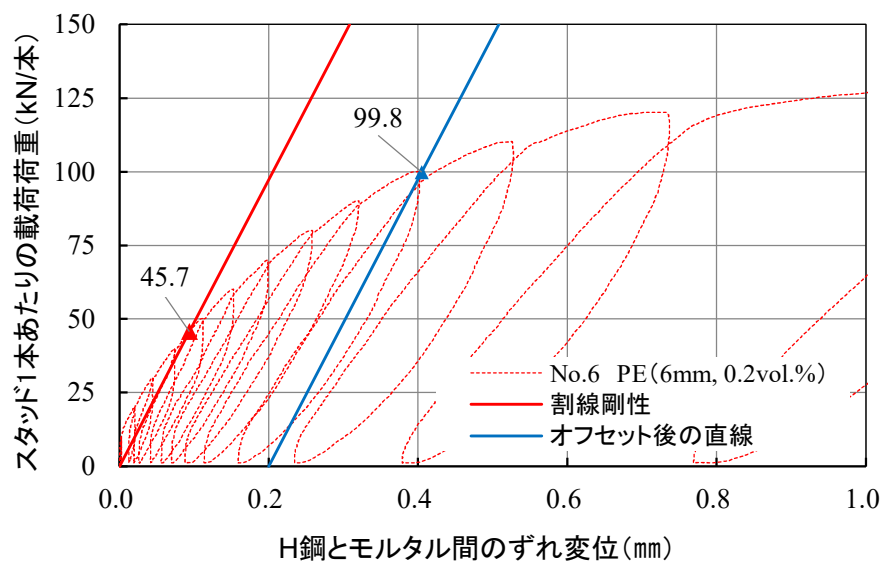


図 6.11 接合部の降伏耐力 P_y の算出 (試験体 No. 6)

6.2.4 動的載荷による疲労破壊の照査

(1) 試験体の概要

試験体および試験条件を表 6.5 に示す。試験体の寸法と形状は押抜きせん断試験と同一である。間詰め部の材料は、押抜きせん断試験で選定したものと同一の長さ 6mm の PE 繊維を 0.2vol.%混入した無収縮モルタルとした。

表 6.5 疲労試験の試験体および試験条件

No.	間詰め部		床版部		頭付きスタッド		疲労載荷試験		
	仕 様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕 様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕 様	引張強度 (N/mm ²)	スタッド1 本あたりの 変動荷重 ΔP(kN/本)	最大耐力比 Pmax 比	下限荷重 Pmin(kN)
8	PE 繊維混	62.0	UFC	186.0	φ22 2 本 ／面	469	82.3	60%	5.0
9	入モルタル	66.9		175.6			68.6	50%	
10	(6mm, 0.2vol.%)	71.0					48.0	35%	

(2) 試験方法

載荷方法は、押抜きせん断試験と同様であるが、下限荷重を 5kN、スタッド 1 本あたりの載荷荷重の荷重振幅を No.6 試験体の最大耐力 137.1kN の 60%(82.3kN)、50%(68.6kN)および 35%(48.0kN)として 5Hz で繰返し載荷を行った。

(3) 試験結果

疲労試験結果として、ずれ変位（床版部と H 形鋼の鉛直方向相対変位）と載荷回数（回）の関係を図 6.12 に示す。試験体 No.8、9 では、ずれ変位が 0.5mm を越えてからずれ変位の増加が早まり、写真 6.5 に示すように頭付きスタッドが付根で破断した。試験体 No.10 は、200 万回載荷完了時でも疲労破壊に至らなかった。

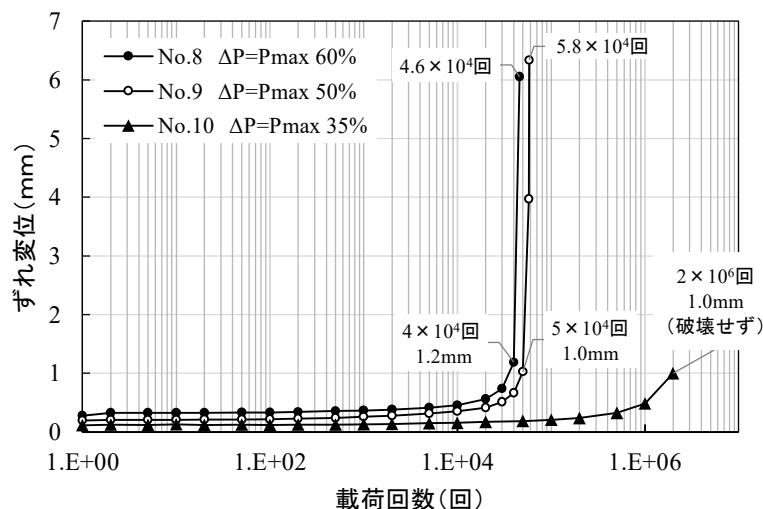


図 6.12 疲労試験結果（ずれ変位－載荷回数）



写真 6.5 試験体の疲労破壊状況（試験体 No. 8）

(4) 試験結果の考察

本構造のスタッドの降伏耐力の 1/3 は 32kN/本から 36kN/本であった．このことに加え，48kN/本の変動荷重を繰返し載荷する疲労試験(試験体 No.10)で 200 万回載荷後も疲労破壊に至らなかったことから，降伏耐力の 1/3 を許容せん断耐力とすることは耐疲労性の観点からも妥当であると考えられる．

試験体 No.10 は 200 万回載荷完了後に静的に押抜き載荷を実施した．試験体 No.10 の破壊形態も頭付きスタッドの付根での破断であったが，最大耐力は図 6.13 に示すように 96.1kN/本であり，間詰めの仕様が同一で試験時のモルタル圧縮強度が同程度である試験体 No.5 の耐力の約 6 割程度であった．No.10 のスタッドの破断面には，写真 6.6 および写真 6.7 に示すように金属が疲労破断する際にみられる貝殻状模様がみられ，静的載荷に先行して実施した繰返し載荷により，スタッドの疲労亀裂が進展したと考えられる．

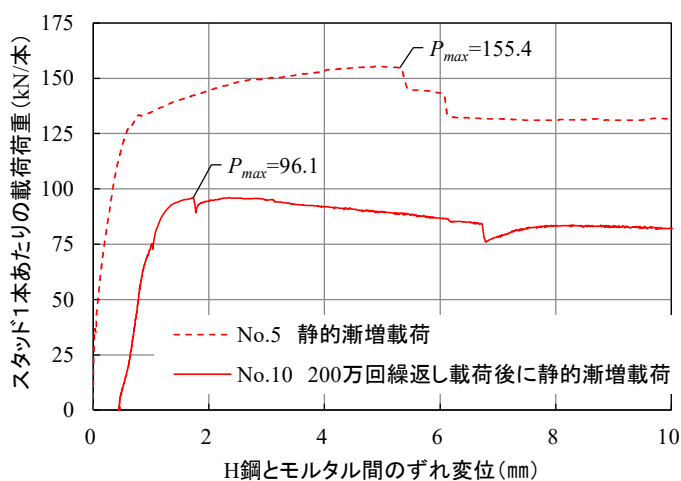


図 6.13 せん断力-ずれ変位（試験体 No. 5, 10）



写真 6.6 スタッドの破断面 (試験体 No. 8)



写真 6.7 スタッドの破断面 (試験体 No. 10)

最大耐力到達後は、ずれ変位が 10mm 程度となるまでは最大荷重に近いせん断力を保持した。変形性能が小さい場合、桁端部に設置されたスタッドから順に破壊する進行性破壊が懸念されるが、本構造は疲労亀裂が進展した場合であっても脆性的に破壊することはなかったため、進行性破壊は生じにくいと考えられる。

鋼構造物設計指針 PART B⁶⁻⁶⁾ (以下, PART B) に規定される合成桁用に用いられるずれ止めのせん断疲労強度式を式(6.1)に示す。

$$\log \Delta \tau = 1.75 - 0.117 \log N \quad (6.1)$$

ここに、

$\Delta \tau$: 疲労強度 (スタッド 1 本の変動応力範囲) (kgf/mm²)

N : 载荷回数 (回)

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

使用したスタッドφ22 の公称断面積 380mm² を用い、せん断力 ΔP (kN)に関するせん断疲労強度式 (SI 単位系) に変換すると式(6.2)となる。

$$\begin{aligned}\Delta\tau &= 1,000 / 380 / 9.8066 \Delta P = 0.268 \Delta P \text{ (kN)} \\ \log 0.268 \Delta P &= 1.75 - 0.117 \log N \\ \rightarrow N &= 10^{1.75 - \log(0.268 \Delta P) / 0.117}\end{aligned}\quad (6.2)$$

ここに、 ΔP ：スタッド 1 本あたりの変動荷重 (kN/本)

式(6.2)と試験結果の比較を図 6.14 に示す。試験結果はいずれも疲労強度式による予測値を超えており、この疲労強度式を用いた本構造の疲労寿命は、安全側であることを確認した。

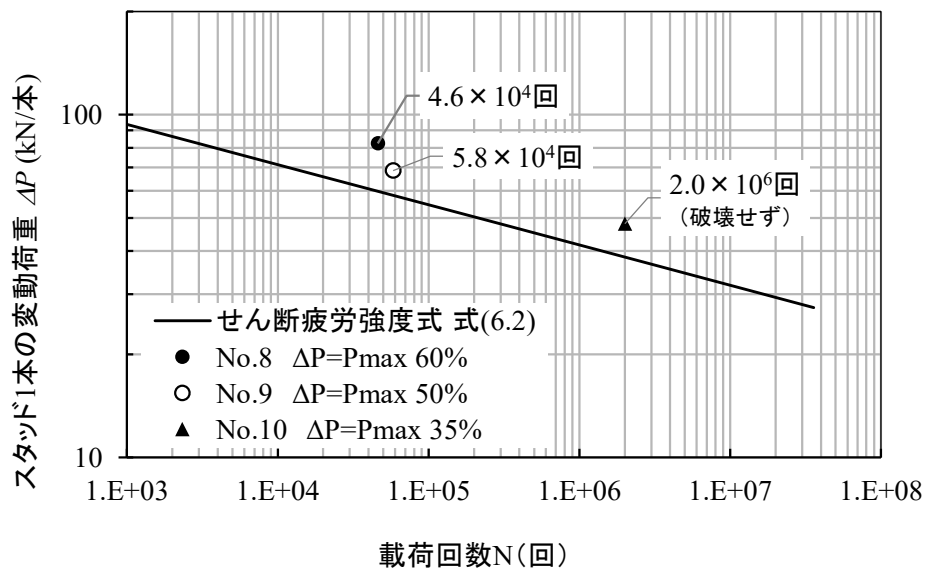


図 6.14 疲労強度式と試験結果の比較

6.3 床版同士の接合部

6.3.1 接合部の構造

UFC 床版同士は橋軸方向に床版を配置して接合する。床版同士の接合部の概要を図 6.15 に示す。接合位置は鋼横桁または鋼横リブ上で、床版間には孔あき鋼板を挟み無収縮モルタルで床版間を充てんして高力ボルトで一体化する。この接合部は床版を支持する横リブ上で接合するため、輪荷重によって橋軸方向に負曲げが発生し、接合部の床版上面は目開きを発生しようとする作用が発生する。これに対し本構造は、UFC 床版の端部リブ同士を設計荷重では目開きが生じないようにボルトに軸力を導入する構造として設計しており、輪荷重走行試験では、設計荷重の 2 倍程度の輪荷重に対しても目開きを生じることが無かったことを確認している。

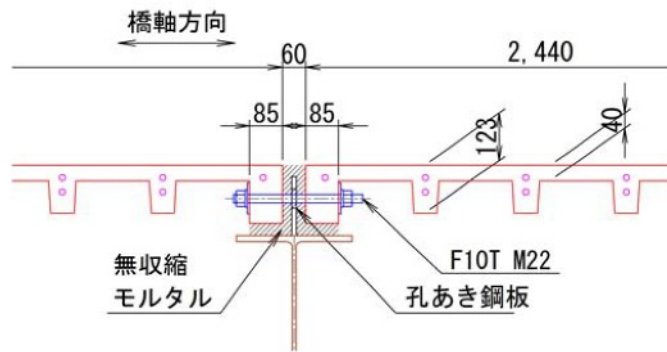


図 6.15 床版同士の接合部

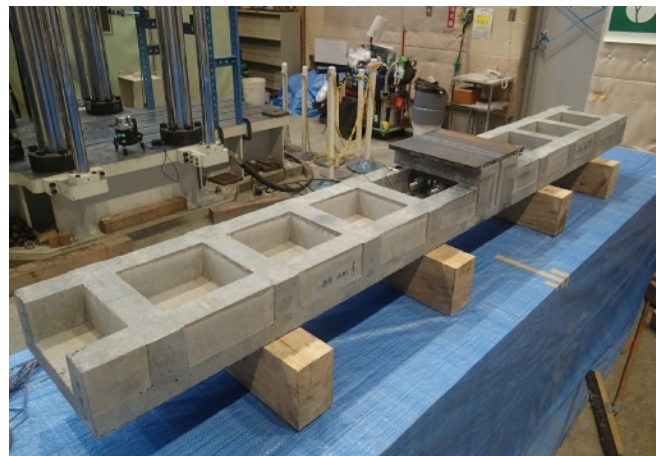
6.3.2 静的載荷による曲げ破壊の照査

(1) 試験方法

接合部の破壊に対する安全性を確認するため、図-5.1 に示す輪荷重走行試験の試験体のうち床版[3]から切り出した実構造を用いて、静的載荷実験を行い接合部の破壊耐力を確認した。試験体の製作状況と試験状況を写真 6.8 に示す。



(a) 輪荷重走行試験の試験体から切り出し



(b) 試験体

写真 6.8 床版同士の接合部の試験体製作状況

静的載荷試験の試験体および載荷の概要を図 6.16、変位計設置位置を図 6.17 に示す。試験状況を写真 6.9 に示す。載荷方法は、試験体を反転し、床版上縁側に負曲げモーメントを再現させるような指示条件とし、実際の接合構造を再現して鋼桁のフランジに相当する鋼板を介して載荷するものとした。接合部の有効高さ d は 95mm（間詰厚さ 30mm，端リブ下端からボルトまでの距離 65mm）である。床版部でせん断破壊しないように支間長 l は 600mm（床版厚 $h=123\text{mm}$ に対して $l/h=4.9$ ，有効高さに対し $l/d=6.3$ ）とした。計測は支点変位，載荷点床版下面の鉛直変位，接合ボルトのひずみおよび床版上面のひずみ（試験では下面）等を計測した。

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

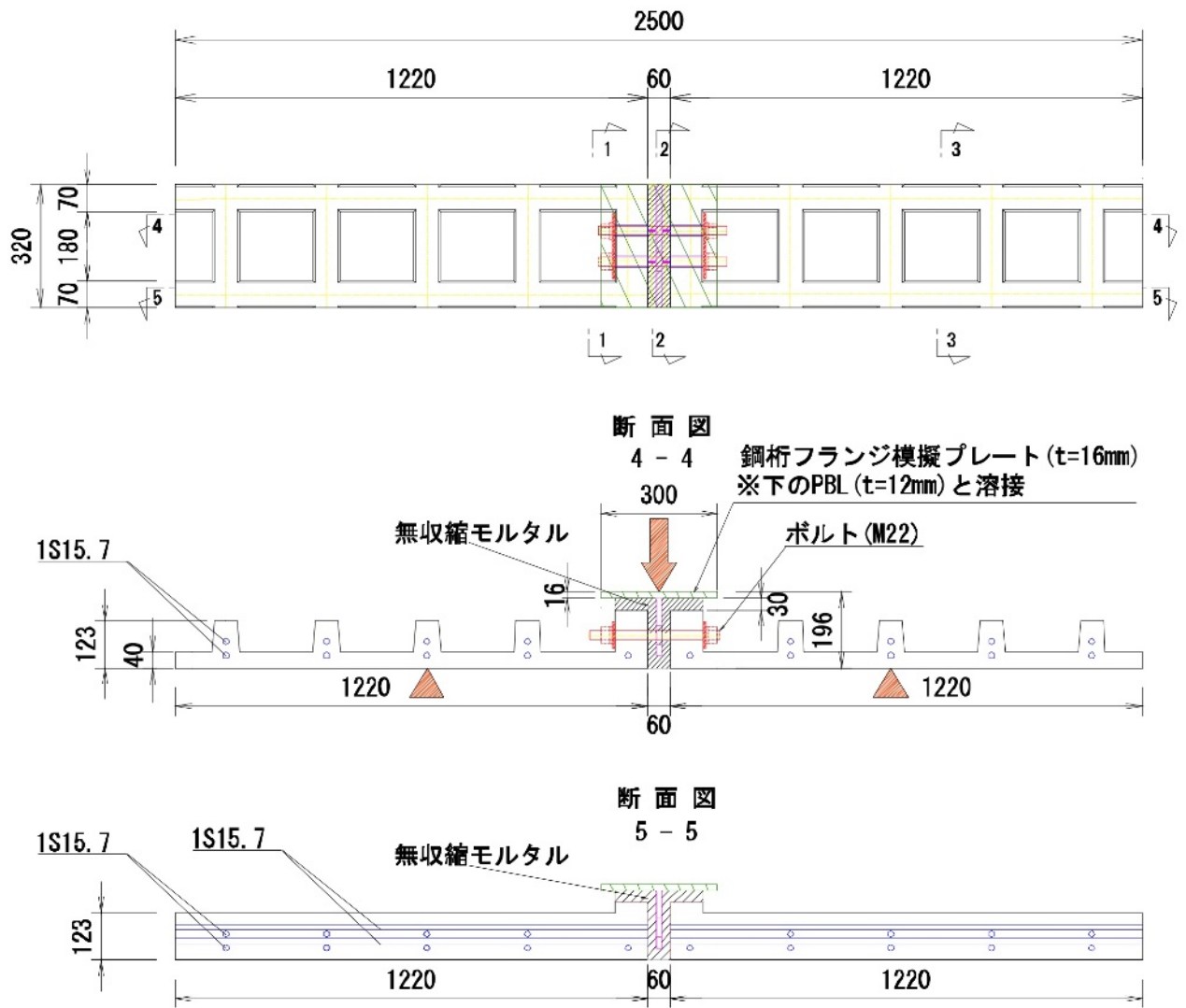


図 6.16 静的载荷試験体および载荷の概要

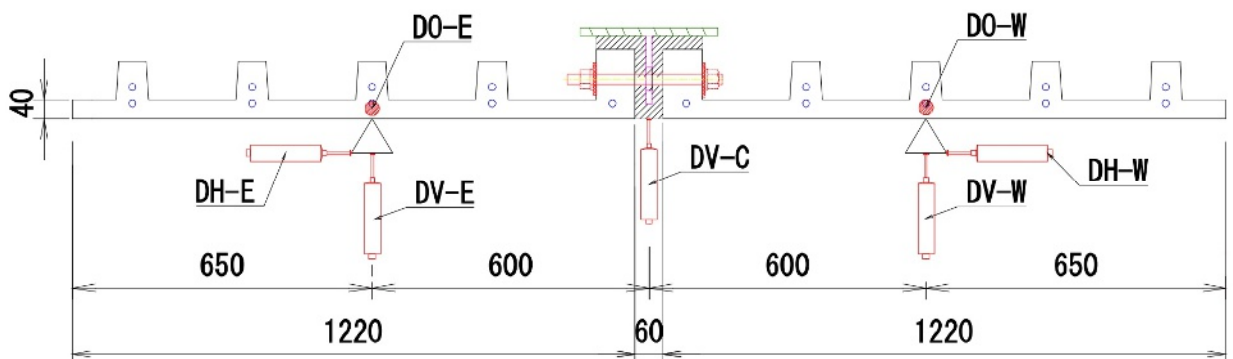


図 6.17 変位計設置位置



(a) 載荷装置への設置状況



(b) 載荷状況

写真 6.9 静的載荷試験状況

(2) 試験結果

荷重－鉛直変位関係 (DV-C) の試験結果と解析結果を図 6.18 に示す。青線で示す解析値は、試験と同様の条件で 3 次元弾塑性 FEM 解析（ソルバーコード DIANA，材料構成則は UFC 指針準拠）によって算出した荷重－変位関係である。解析における UFC の引張強度は 8.0 N/mm^2 とした。赤破線で示す 7.9 kN は、床版支間 2.5 m の UFC 床版に T 荷重 100 kN を載荷した場合の接合部の応力度に相当する本試験体における載荷荷重の推定値である。静的載荷によって算定した最大荷重は 50.8 kN であり、T 荷重相当荷重 7.9 kN の 6.4 倍であった。

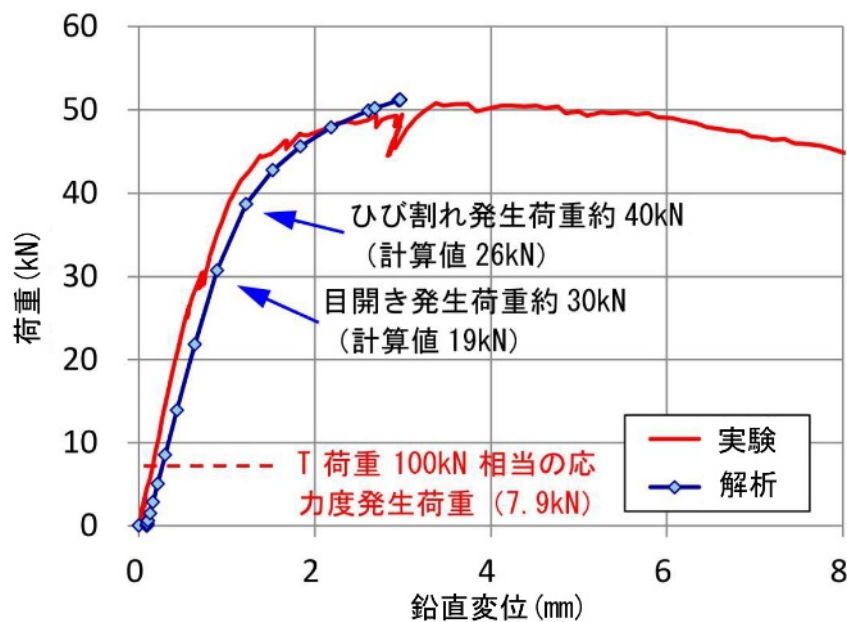


図 6.18 荷重－鉛直変位

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

ボルトおよび床版下面のひずみを図 6.19 に示す。試験体接合部の目開き発生荷重は、UFC 床版下面ひずみおよびボルトひずみが増加傾向を示す 30kN と推定した。この荷重は高力ボルトに導入する軸力に対して、圧縮応力度がゼロになる荷重 19kN の 1.5 倍であった。UFC 床版のひび割れ発生荷重は、下面のひずみから約 40kN と推定された。この荷重は UFC 下面応力度がテストピースのひび割れ発生強度 12.4N/mm^2 となる荷重 26kN の 1.5 倍であった。

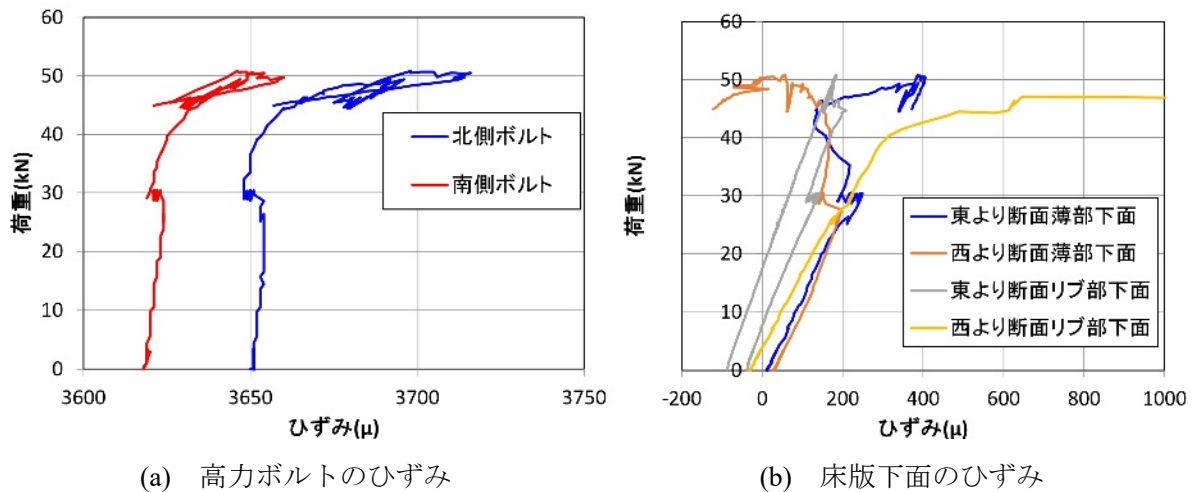


図 6.19 荷重－ひずみ

試験後の試験体におけるひび割れ発生状況を写真 6.10 に、ひび割れ図を図 6.20 に示す。端部リブの付け根で床版側のひび割れが開口して破壊に至った。

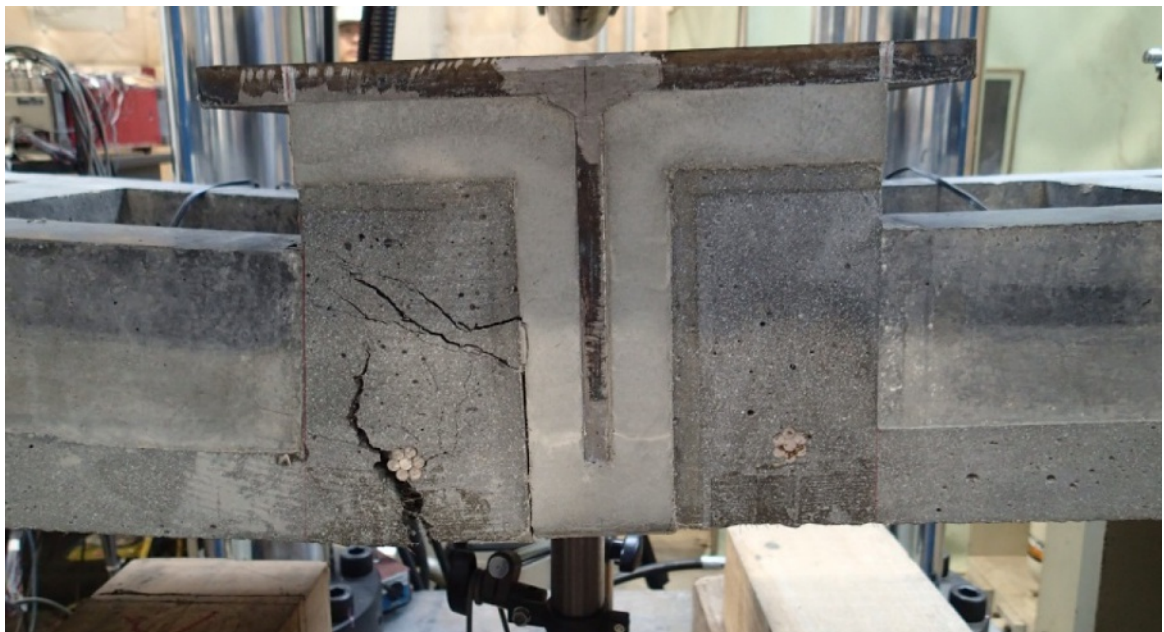


写真 6.10 試験体のひび割れ発生状況（載荷終了後）

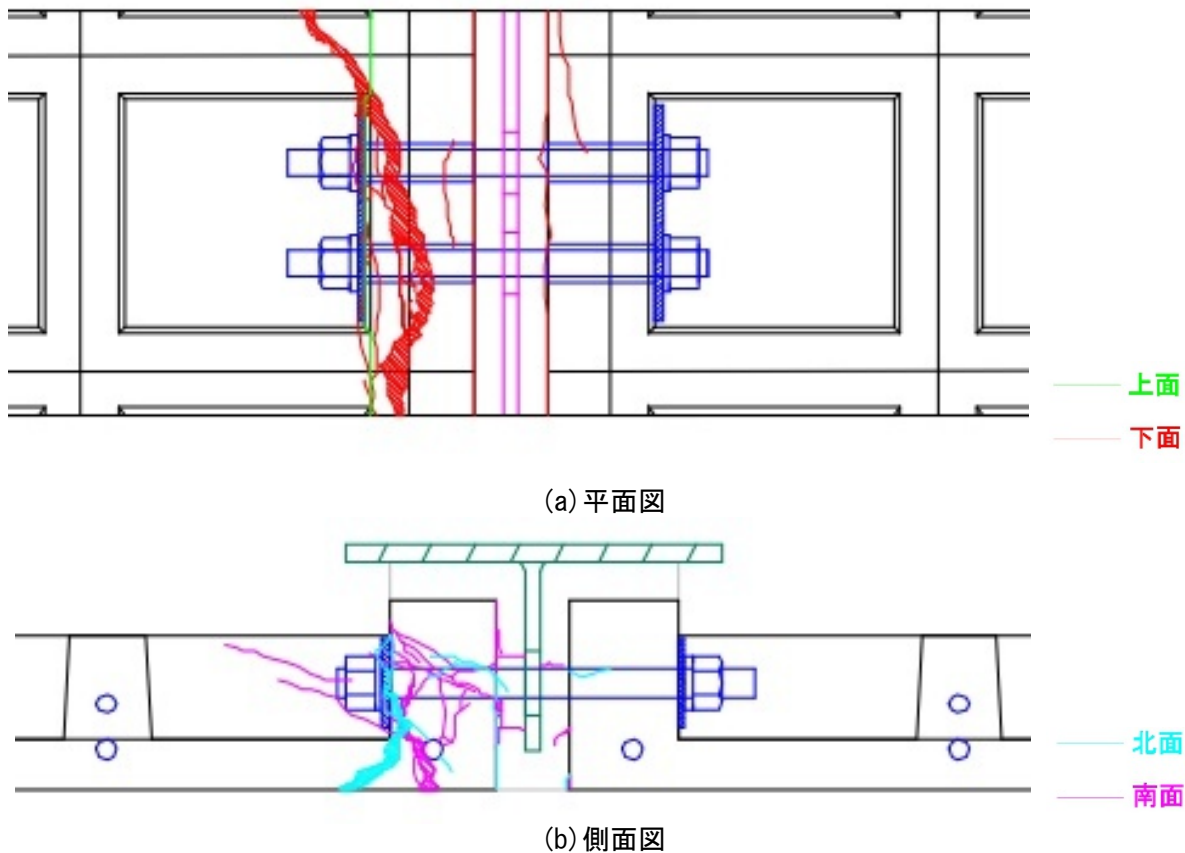


図 6.20 試験体のひび割れ（載荷終了後）

(3) 試験結果の考察

床版同士の接合部は引張応力の発生を許容しない設計を行っているが，その設計結果である構造について，設計荷重の約 6 倍程度の耐力を有していることが確認できたことから，超過外力に対しても十分な安全性を有しているといえる。

ひび割れについては，端リブの付け根から中央寄りに生じている．よって，UFC 床版内の PC 鋼線の端部における付着伝達と高力ボルトのプレストレスの伝達の交差部であることによるプレストレス分布が影響していると推測し，設計においては，床版を含む接合部のプレストレス分布が均等になるように端部リブの橋軸方向寸法を大きくする等の対応が必要といえる。

6.4 まとめ

6.2 節では，UFC 床版と鋼桁の接合部の照査を述べた．接合部の構造概要を述べた上で，ずれ止め用孔および間詰め部の充填材料の検討について，充填材料の仕様，および試験方法について述べた．次に，スタッドを用いた接合部の，押抜き静的載荷による変形性能の照査，および押抜

第 6 章 接合部の安全性に関する照査

き動的載荷による疲労破壊の照査について述べた。

6.3 節では、UFC 床版同士の接合部の照査を述べた。試験方法を示した上で試験結果として床版の荷重－変位関係と、ボルトの荷重鉛直変位、試験体に生じたひび割れを述べた。

本章の結論は以下の通りである。

- 1) ずれ止め用孔および間詰め部に充填する材料について、無収縮モルタルに PE 繊維（長さ 3～6mm，径 $12\mu\text{m}$ ）を 0.2vol.% 混入すると、J14 漏斗流下値が規準値を満足しなかったが、高性能減水剤を混和剤として用いることによって、モルタル充填確認試験を満足することを確認した。強度については、繊維を混入することによって圧縮強度、曲げ強度とも大きくなることを確認した。剥落防止性能は、また、一般に剥落防止材として用いられる PP 繊維（長さ 12mm，径 $64\mu\text{m}$ ，0.05vol.% と同等以上の性能を有することを確認した。
- 2) 間詰め部の無収縮モルタルの補強法として、溶接金網による補強，PE 繊維を混入について押抜きせん断試験を行い，PE 繊維（長さ 6mm，径 $12\mu\text{m}$ ，0.2vol.%）の耐力が 155kN と最も大きくなることがわかった。
- 3) ずれ止めに耐力の 60%，50%，35%の変動荷重を動的載荷し，PART B⁶⁻⁶⁾に規定される合成桁のずれ止めのせん断疲労強度式の破壊回数を上回る結果となることを確認した。
- 4) 床版同士の接合部に関する断面破壊の照査として，輪荷重走行試験に用いた試験体から切り出した試験体による静的載荷試験を行った。床版下面のひずみおよびボルトのひずみ増加から，約 30kN で目開きが生じたと推測した。ひび割れは 40kN で生じ，端部リブの付け根で UFC 床版のひび割れが開口し 50.8kN で破壊に至った。T 荷重 100kN に相当の荷重は 7.9kN であることから，接合部の耐力は設計荷重の 6.4 倍であった。
- 5) 床版同士の接合部における静的載荷によるひび割れ発生状況を踏まえ，接合部のプレストレス分布が均等になるように，床版内 PC 鋼線の付着伝達長と，高力ボルトのプレストレス分布を踏まえて，端部リブの寸法を決定する必要があるといえる。

本章で明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) 本検討では，間詰め部を模擬した充填確認試験によって充填性に問題がないことを確認したが，実橋では，橋梁の縦断勾配や横断勾配があるため，現場施工において流動性の影響を確認することが課題である。今後，実橋への施工時には事前試験で検討する必要がある。
- 2) 接合部の安全性について照査し，十分な安全性を有することを確認したが，床版本体や鋼桁等の上部構造における接合部以外の部位の耐力や破壊順序などが明らかとなっていない。今後，耐力や破壊順序の階層化について，検討が必要である。

6 章参考文献

- 6-1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017
- 6-2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.3, 2006
- 6-3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）, 2004
- 6-4) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, 1996.
- 6-5) 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 樽谷早智子：UFC 床版と鋼桁の接合に関する基礎的研究, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2015.
- 6-6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物[平成 9 年版], 1997.

7 章 性能照査型設計法の提案

7.1 概 説

本章においては、第 2 章から第 6 章の検討で得られた知見を踏まえ、要求性能の設定と、照査方法の標準を示すことにより、性能照査型設計法の提案について述べる。

性能照査型設計法について概説した上で、UFC 床版の設計の基本、構造計画、構造詳細の設定、使用性、安全性および接合部に関する照査について述べる。提案する UFC 床版の性能照査型設計法は、UFC 床版の構造計画や照査の標準を示すものであり、本設計法を適用することによって、要求性能を満足する UFC 床版が実現する。最後に、UFC 床版の維持管理の効率化について述べる。維持管理は、設計耐用期間において、要求性能が確保されていることを手点検等で確認し、必要に応じて適切な対策が講じることであるが、UFC 床版の特徴を活かした更なる維持管理の効率化について述べる。

7.2 性能照査型設計法

近年の性能照査型設計法に関する状況について、本設計法に関する背景とあり方を整理し、UFC 床版の性能照査型設計法の方針性を定める。

性能照査型設計法については、1990 年代後半頃、性能照査型設計法のあり方や国内の基準の対応について議論が活発化した。文献 7-1)で、性能照査型設計法は「構造物に必要とされる性能のみを規定し、その性能を実現するプロセス、手法は原則的に自由にした設計体系」とされ、この設計法を導入することの必要性を以下のように整理されている。

- ・ WTO（世界貿易機関）の TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）に関連し、国際化対応の基準類に整合させるため
- ・ 新技術の導入機会の拡大、迅速化およびそれに伴う技術開発意欲の向上を図るため
- ・ 公共事業のアカウンタビリティの向上を目指すため
- ・ コスト低減の可能性を増大させるため

一方、性能照査型設計の課題は、要求性能の項目をどう選定するのか、それぞれ必要となるレベルをどう表現するか、それを満足することをどのように証明するか、そしてそれをどのように検査するかということであった⁷⁻²⁾。2002 年には、国交省から土木・建築の分野構造種別を超えた設計の基本方針⁷⁻³⁾が示されており、この方針は性能照査型設計法を指向したものである。道路橋示方書についても、2002 年の改訂から性能規定化が進められている。

土木学会のコンクリート標準示方書⁷⁻⁴⁾（以下、コン示という）では、2002 年に性能照査型の示方書として各編の足並みをそろえる改訂が行われた。2007 年の改定では、性能照査・性能規

定を原則とする[本編]と適用範囲を限定することで簡易な取り扱いを可能とする[標準]を組み合わせた構成とすることで、性能照査型に適度な使用規定型な取り扱いの利点を組み入れた示方書となっている。道路橋床版に関する指針類についても、2000 年に土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会（松井繁之委員長）から文献 7-5)が出されている。本文献では鋼橋床版の性能照査型設計指針（試案）が示されている。

文献 7-6)では、性能照査型と仕様規定型の特徴の比較を、表 7.1 にまとめている。UFC 床版については、UFC という新しい材料を使った床版であり、個別条件に対応する必要があること、床版の形状や諸元に制約が少なく自由に最適設計を追求できるという点を踏まえると、性能照査型設計法によることによって、本技術の将来の進化や展開が期待できる。

表 7.1 設計法の比較⁷⁻⁶⁾

	性能照査型	使用規定型
目標性能	明確化（明示する）	概念的（明示なし）
達成方法 使用材料 計算方法	自由選択，性能適合とみなせる使用（みなし仕様）による	明示された仕様に従う
性能確認	直接的（性能照査）	間接的（仕様満足）
特徴	新知見・技術の反映 個別条件へ対応容易 自由に最適設計追及	手順は比較的勘弁 設計自由度は小さい

7.3 設計の流れ

UFC 床版の性能照査型設計法の構成は、コンクリート標準示方書に準拠することとした。設計の流れを、図 7.1 に示す。要求性能の設定において、使用性および安全性に関する限界状態、照査指標および照査限界値の目安を設定する。次に、構造計画においては、ワッフル型 UFC 床版もしくは平板型 UFC 床版の選定、支持する鋼桁や鋼床組の構造等を選定する。構造詳細の設定においては、UFC 床版の断面形状の検討を行う。このような過程を経て構造計画、構造詳細を設定した UFC 床版について、保有性能の照査を行うものである。設計後は、図に示すように床版の施工段階を経て、完成すると維持管理段階となる。設計においては、これらの施工や維持管理への配慮した設計を行うことが必要といえ、提案する設計法において、これらの配慮事項についても述べる。

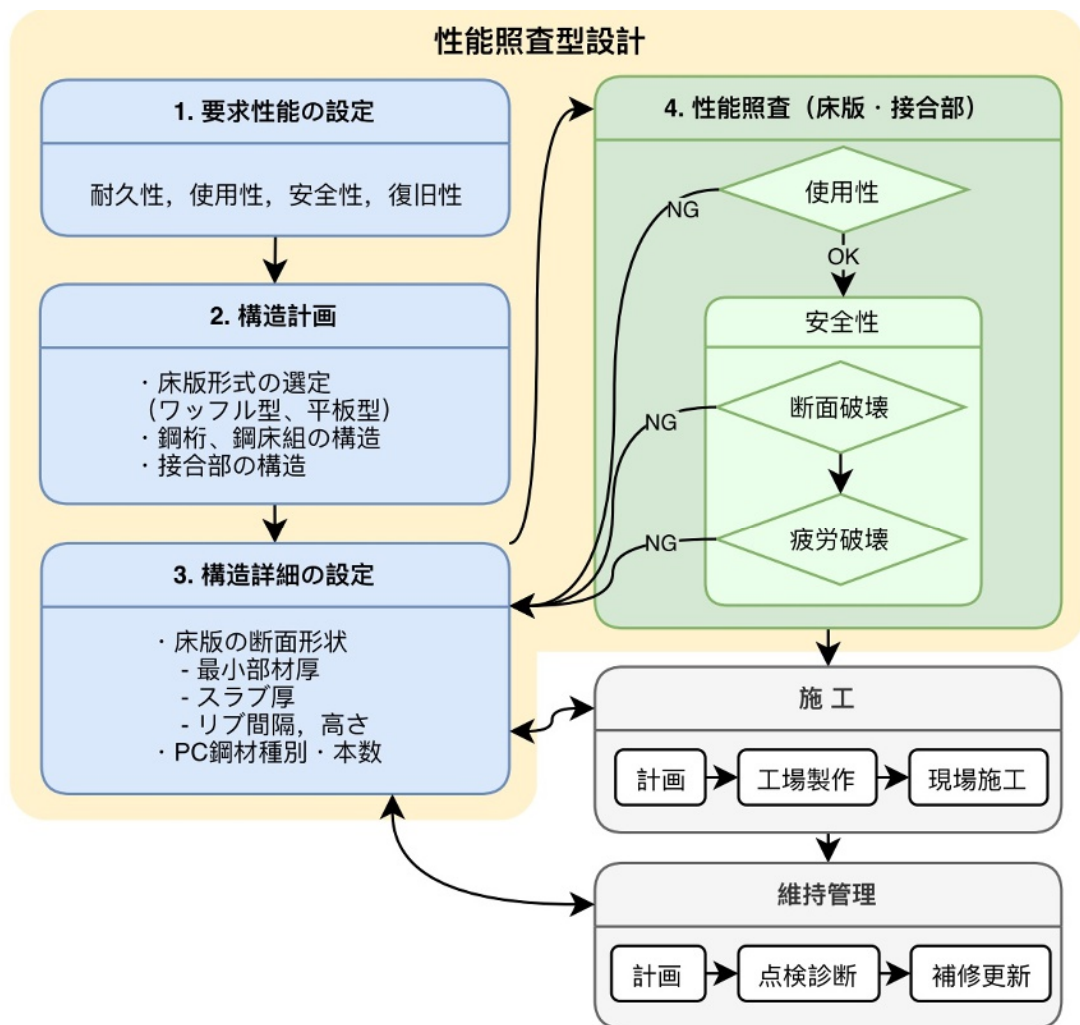


図 7.1 設計の流れ

7.4 要求性能の設定

UFC 床版の要求性能の設定を表 7.2 に示す。UFC 床版の設計耐用期間は 100 年とする。

要求性能として、使用性と安全性を設定した。コン示に要求性能として規定される復旧性および材料の耐久性については、本論文の対象としないこととした。復旧性は、「地震等の偶発作用によって低下した構造物の性能を回復させ、継続的な使用を可能にする性能」とされる。UFC 床版については、偶発作用によって損傷した場合の修復方法や取替え方法は、別途検討することとし、本設計法の照査の対象としないこととした。

使用性の要求性能は、「床版として機能が健全であり、車両走行が可能であることと、快適に車両走行が可能であること」と設定した。安全性の要求性能は、「想定するすべての作用のもとで、UFC 床版が、使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさない」と設定した。これらの要求性能に対する、照査方法の標準については、7.8～7.10 で述べる。

表 7.2 要求性能

要求性能		限界状態	考慮する作用
使用性	床版として機能が健全であり，車両走行が可能である	過度な変形 ひび割れの発生	永続作用 変動作用
			永続作用 変動作用
	快適に車両走行が可能である	走行性の限界	永続作用 変動作用
		外観の阻害	永続作用 変動作用
安全性	想定するすべての作用のもとで，UFC 床版が，使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさない	断面破壊	全ての作用
		疲労破壊	変動作用

材料の耐久性については，UFC 指針では，①水結合材比が小さく，また構成材料および配合の範囲が限定されるため，硬化体中の物質移動に対する抵抗性が高い，②ブリーディングや材料分離のおそれが無く，自己充填性を有し締固めが不要であることなどから，適切な製造を行えば，欠陥の少ない良質なコンクリートとなる，③使用状態で引張応力を設計ひび割れ強度以下に制限しているため，物質浸透に対する抵抗性が長期わたって維持されるという点を挙げている．このような UFC が材料として保有する高い耐久性から，中性化，塩化物イオンの侵入，凍結融解作用，化学的浸食およびアルカリシリカ反応に関する照査を省略できるものとされている．よって，UFC 床版についても，材料の耐久性は照査の対象としないこととした．

一例として，塩化物イオンの侵入に対する抵抗について，PC 床版と UFC 床版の比較を図 7.2 に示す．鋼材位置における塩化物イオン濃度 C_d は式(7.1)によって算出した．

$$C_d = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left\{ 0.1 \cdot \frac{c_d}{2\sqrt{D_d t}} \right\} \right) + C_i \quad (7.1)$$

ここに， C_0 ：表面の塩化物イオン濃度（海岸からの距離 0.25km として $C_0=13.0\text{kg/m}^3$ ）， c_d ：かぶり（UFC 床版 20mm，PC 床版 70mm）， D_d ：塩化物イオンに対する拡散係数（UFC 床版 0.002～0.006，PC 床版 0.25）， t ：年数， C_i ：初期塩化物イオン濃度 0.3kg/m^3 である．

UFC の塩化物イオンに対する拡散係数 D_d は，文献 7-8)の，30 ヶ月間の浸せき試験結果では $0.0018 \text{ cm}^2/\text{年}$ であったが，ここでは 0.002，0.004，0.006 の 3 ケースについて計算した．

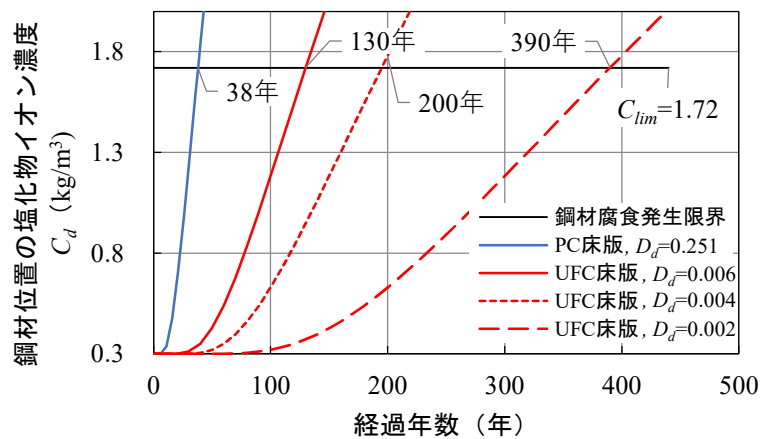


図 7.2 塩化物イオンの侵入に対する抵抗性の比較

鋼材腐食発生限界濃度は，早強セメント（ $W/C=40\%$ ）として， $C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 = 1.72 \text{ kg/m}^3$ とする．この限界濃度に達する年数は，PC 床版の場合 38 年，UFC 床版は 130～390 年と算定された．UFC 床版については，塩化物イオンの侵入に対して安全側の条件（拡散係数 $D_d=0.006$ ）でも，設計耐用期間 100 年を上回る性能を有していることが確認できた．よって，UFC 指針における PC 鋼材のかぶりを設定することによって，設計耐用期間において鋼材の腐食は生じないといえ，材料の耐久性の照査の省略は妥当といえる．

7.5 安全係数

安全係数を表 7.3 に示す．設計に用いる安全係数は，本研究成果およびコンクリート標準示方書⁷⁻⁴⁾，UFC 指針⁷⁻⁷⁾，AFt 系 UFC の指針⁷⁻⁸⁾を踏まえ設定した．

表 7.3 安全係数

		作用係数 γ_f	構造解析 係数 γ_a	材料係数 γ_c	部材係数 γ_b		構造物 係数 γ_i
					曲げ	せん断	
使用性		1.0	1.1	1.0	1.0		1.0
安全 性	断面破壊	1.0	1.1	1.3	1.1	1.3	1.0
	疲労破壊	1.0	1.1	1.3	1.0		1.0

構造解析係数 γ_a については，UFC 指針の 1.0 から 1.1 に変更することとした．これは，UFC 床版の応答値算出は，現時点では 3 次元弾性 FEM 解析によることを前提としているためである．解析モデルにおける要素分割や境界条件の不確実性に対する安全係数として 1.1 とすることとし

た．別の解析方法を用いる場合は，不確実性を考慮して係数を設定する必要がある．

材料係数 γ_c については，UFC 指針に配向性との関係が示されている．供試体と実構造物における繊維の配向性の差として，SETRA/AFGC 指針^{7,9)}においては，配向係数 $K_f=1.25$ （通常の軸力，曲げ，せん断を受ける場合）を推奨されている．UFC は標準配合粉体に熟養生を行う場合は， $\gamma_c=1.3$ で十分な安全性を確保することができるものとされている．UFC 床版の安全係数についても，この考え方に準拠し $\gamma_c=1.3$ とすることとした．

応答値を算出して照査する場合は，式(7.2)により行うものとする．

$$\gamma_i \times \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (7.2)$$

ここに， S_d ：設計応答値， R_d ：設計限界値， γ_i ：構造物係数

作用の特性値	F_k	強度の特性値	f_k
設計作用	$F_d = \gamma_f \times F_k$	設計強度	$f_d = f_k / \gamma_c$
断面力	$S(F_d)$	部材の耐力	$R(f_d)$
設計応答値	$S_d = \sum \{\gamma_a \times S(F_d)\}$	設計限界値	$R_d = R(f_d) / \gamma_b$

実験による照査は，実構造物を適切にモデル化した試験体を用いた載荷実験結果に基づいて行うこととする．ただし，その場合，実験条件と実構造物条件との差異を考慮して，適切な安全係数を設定するとともに，解析モデルや解析手法を併せて適用して，実構造物の照査を行うこととする．

7.6 構造計画

7.6.1 床版形式の選定

UFC 床版の構造計画として，床版形式の選定を行う．UFC 床版は，表 7.4 に示す 2 種類の床版形式から選定する．表 7.4 ①②に示すように，ワッフル型と平板型は床版支間方向と適用支間長が異なる．対象橋梁の幅員から決定する鋼主桁の配置に応じて，主桁間隔が大きくなる場合は，床版支間を橋軸方向に 2.5m など一定の幅に設定できるワッフル型が適する．

また，表 7.4 ③に示すように，単位面積あたりの重量はワッフル型の方が軽量である．鋼桁や下部・基礎構造の構造規模を縮小するために，床版に軽量を求める場合は，ワッフル型が選定される．例えば，橋脚の設置位置が限定され，上部構造の支間が大きくなる場合や，橋脚の設置空間が限定される場合や軟弱地盤の場合に，床版の軽量化の必要となる場合がある．

表 7.4 2 種類の UFC 床版の特徴

	ワッフル型	平板型
床版形状	スラブ+2方向リブ	平板（リブ無し）
① 主たる支間方向	橋軸方向	橋軸直角方向
② 適用支間長の目安	1.0～4.0m (標準：2.5m)	2.0～6.0m
③ 単位面積あたり重量 (参考：鋼床版 174kg/m ²)	179kg/m ² (床版厚123mm)	308kg/m ² (床版厚130mm)

形式ごとのコストについては、ワッフル型の方が高価になる傾向がある。これは、リブを形成する凹み部分に専用の型枠が必要となることと、2方向のプレテンション方式に対応した製造設備が必要となるためである。ただし、床版の使用枚数（数量）が多くなると、コスト差は小さくなり、UFC そのものの体積が小さいワッフル型のコストが安価になる場合もある。また、ワッフル型と平板型の重量の差が、鋼桁や下部・基礎構造のコストにも影響し、軽量のワッフル型の方が橋梁全体のコストは安価になる場合がある。よって、床版形式の選定にあたっては、構造計画の時点で、概略設計を実施し、橋梁全体のコストを比較した上で床版形式を選定する必要があるといえる。なお、7.6.2以降については、ワッフル型 UFC 床版について述べたものである。

7.6.2 鋼桁、鋼床組の設定

ワッフル型 UFC 床版を支える鋼桁および鋼床組の構造を図 7.3 および写真 7.1 に示す。ワッフル型 UFC 床版は、工場で製作する床版は、図の赤線囲み部分が 1 枚の単位であり、床版は主桁、縦桁、および横リブ（又は横桁）で支持する。よって、鋼床組の配置は床版単体の形状と整合させる必要がある。設計においては、鋼床組の鋼重に基づくコストを含む、床版を含む上部構造全体のコストを最小化するように、鋼桁、および鋼床組を設定する必要がある。

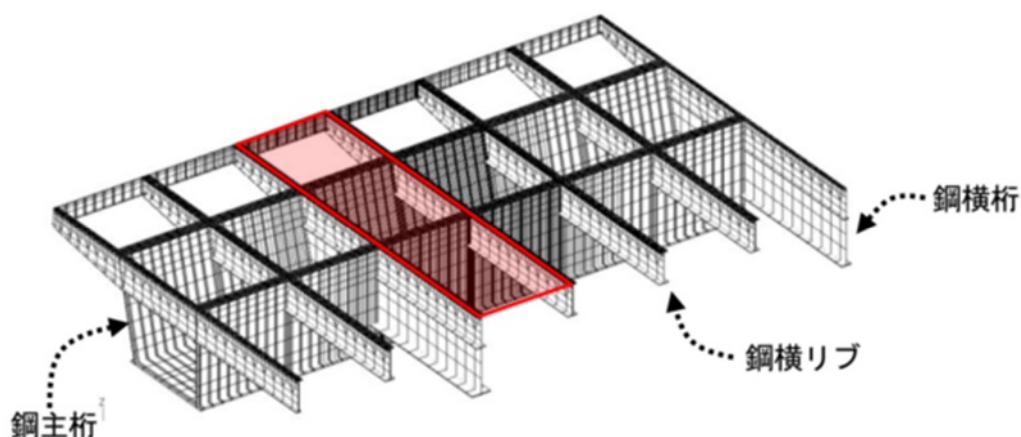


図 7.3 鋼桁および鋼床組（解析モデル）

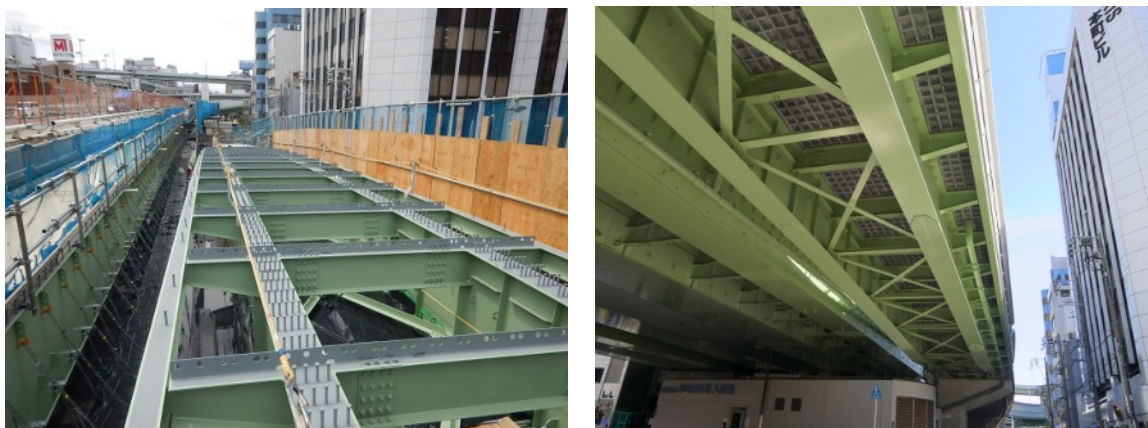


写真 7.1 鋼桁および鋼床組（阪神高速道路 信濃橋入路橋）

7.7 構造詳細の設定

7.7.1 断面形状の設定

2.5 節の検討を踏まえた、ワッフル型 UFC 床版の断面形状の設定の流れを図 7.4 に示す。構造計画において決定した床版支間に対して、断面形状の設定として、スラブの厚さを設定する。設定に際しては、UFC 内の鋼繊維長を踏まえ 30mm を最小部材厚とする。リブ幅は PC 鋼材のかぶりから設定するものとするが、輪荷重走行試験時に生じたリブ側面のひび割れを踏まえ、かぶりに余裕をもたす幅にする必要がある。次に設定したスラブ厚を踏まえ、リブ間隔、リブ高（床版厚）を設定する。床版厚については、舗装の耐久性および鋼桁の疲労への影響を踏まえ、たわみを制限するか否かを検討の上、設定する必要がある。

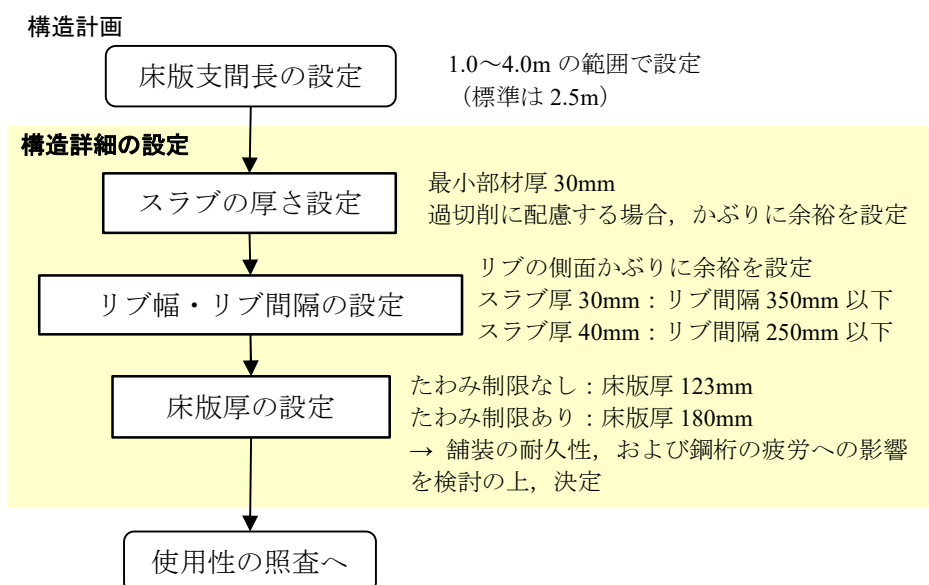


図 7.4 構造詳細の設定の流れ

第 7 章 UFC 床版の性能照査型設計法の提案

床版支間長ごとの床版厚の目安を図 7.5 に示す。スラブ厚 $t=40\text{mm}$ と $t=50\text{mm}$ について、応力度の制限のみを考慮した場合の床版厚と、変位・変形の制限として、たわみを制限した場合のそれぞれの床版厚の目安を示している。設計における構造詳細の設定では、これを参考に床版を設定してよい。以上を踏まえた床版支間長 2.5m に対するワッフル型 UFC 床版の断面形状の設定を図 7.6 に示す。

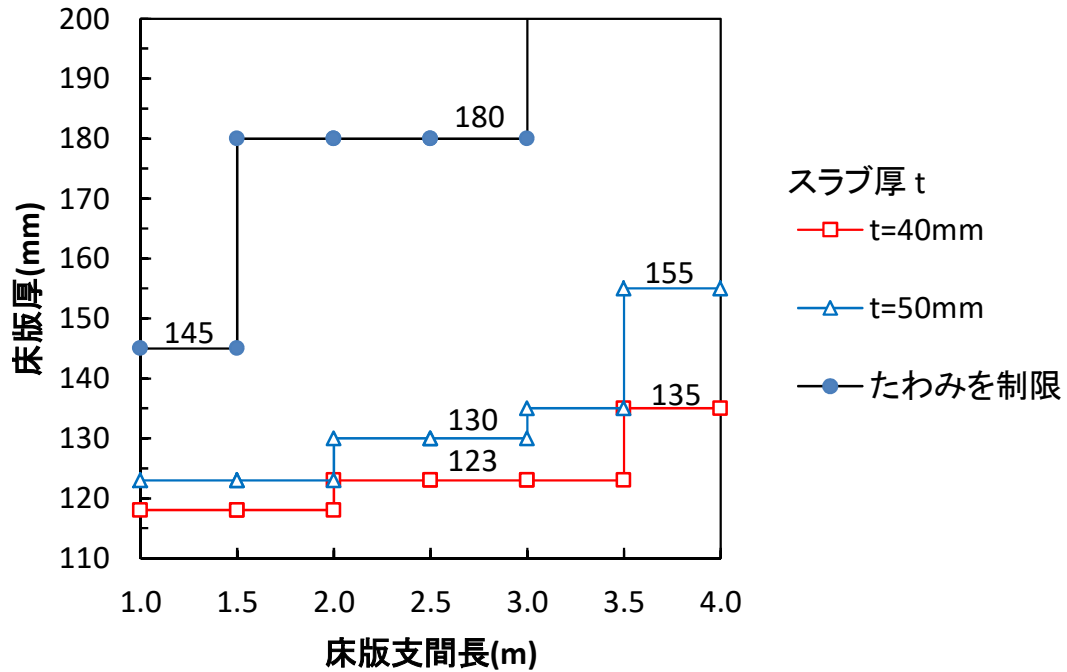


図 7.5 床版支間長ごとの床版厚の目安（ワッフル型 UFC 床版）

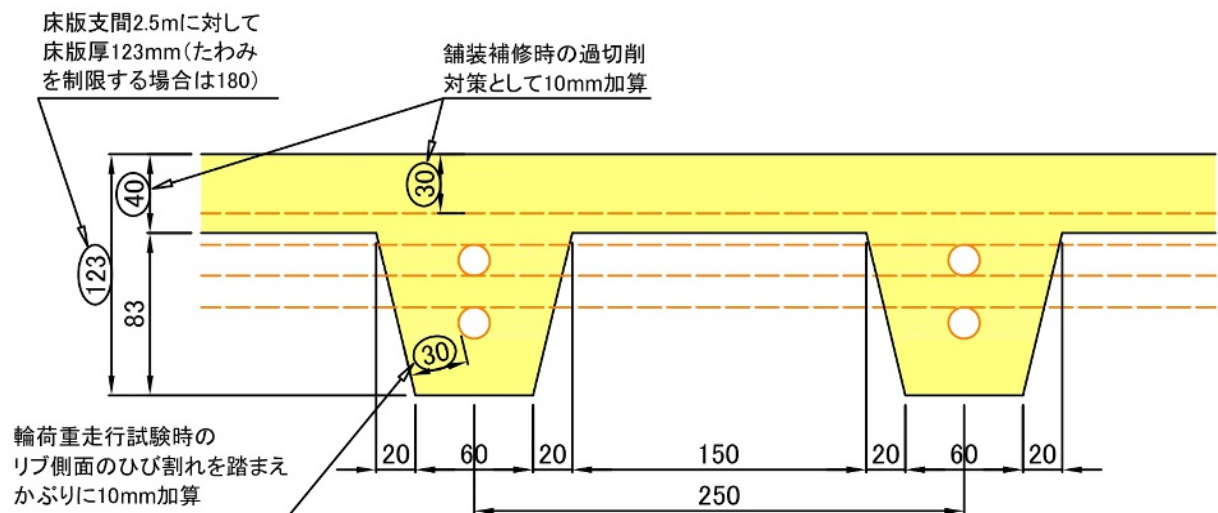


図 7.6 床版支間長 2.5m に対する断面形状の設定

7.7.2 施工および維持管理の配慮

(1) 施工に配慮した断面形状の設定

ワッフル型 UFC 床版の断面形状の設定においては、施工性にも配慮する必要がある。図 7.7 に、床版同士の接合部の構造を示す。この接合部は、阪神高速 1 号環状線の信濃橋入路橋における試験施工した UFC 床版のものである。床版同士の接合部におけるリブ間隔は、図 7.8 に示す PC 鋼棒を緊張する際の緊張器具（テンショナー）を設置するための空間の確保と、維持管理において、PC 鋼棒を抜き取る際に必要となる空間から設定した。実橋における施工状況を写真 7.2 に示す。

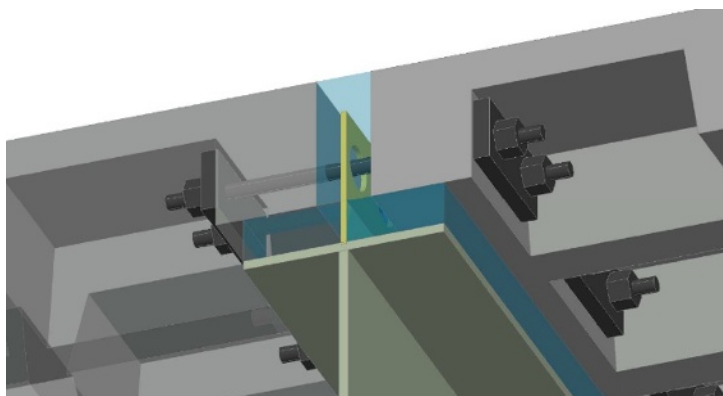


図 7.7 床版同士の接合部の構造

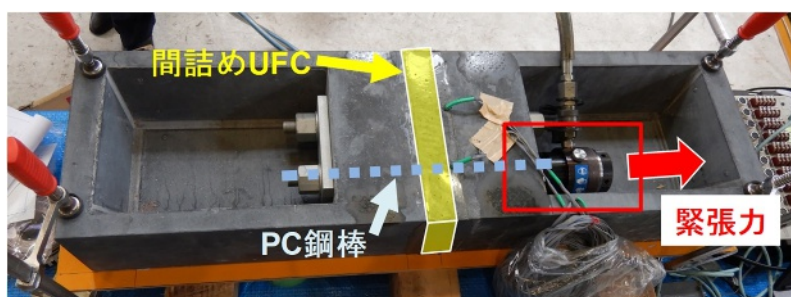


図 7.8 床版同士の接合部の緊張試験状況



写真 7.2 床版同士の接合部の緊張状況（阪神高速道路 信濃橋入路橋）

(2) 維持管理に配慮した床版形状の設定

ワッフル型 UFC 床版の断面形状の設定におけるスラブ厚について、維持管理における舗装補修時の切削について考慮する必要がある。舗装は 15～20 年ごとに更新されるが、舗装を更新する際は、大型切削機で舗装・防水層を切削・撤去するが、舗装の切削・撤去時に床版上面も切削する過切削が生じる場合がある。UFC 床版は、PC 鋼材のかぶりが 20mm 程度と従来の RC 床版や PC 床版の 50mm 程度よりも小さい。またワッフル型はスラブ厚が 40mm と部材厚も小さくなる傾向にある。よって、過切削は使用性、および安全性に影響が生じるといえる。

UFC 床版の切削量を把握するために、写真 7.3 に示す大型切削機による切削試験を実施した。大型切削機は、通常の舗装補修工事に使用される重機である。大型切削機の切削ビットを写真 7.4 に示す。ビットが写真に示す方向に回転することによって舗装および防水層を切削・撤去する。切削時には、舗装・防水層のみを撤去するように手動で切削位置を上下方向に調整される。



写真 7.3 大型切削機による切削試験状況



写真 7.4 大型切削機のビット

UFC 床版を 6 枚設置し防水層および舗装を施工した路面を大型切削機で切削した。切削後の UFC 床版の状況を写真 7.5 に、PC 床版との比較を写真 7.6 に示す。防水層を除去するレベルに切削すると、UFC 床版の上面も切削されることが確認された。1 回の切削で最大約 5mm 程度の深さまで切削され、繊維の毛羽立ちが確認された。

過切削への対応は、切削技術の技術開発による精度向上や舗装構成等を改良することで床版を保護する機能を設けるなど、舗装における対応が基本である。しかし、切削技術や舗装の技術開発には時間を要するため、現時点で可能な対策として、断面詳細の設定において、切削代として 10mm 程度 UFC 床版のかぶりを大きくしておくことが挙げられる。また、切削した部材を断面補修等しても PC 断面として機能回復はしないため、設計時には切削代を無視した設計をしておく必要がある。

過切削の原因は防水層の撤去が難しいため、UFC の材料特性を活かし、床版防水の省略も考えられるが、床版同士の接合部については、プレキャスト部材同士の目地部の観点で防水が必要となるため、接合部のみ防水層を施工するなど工夫が必要といえる。



写真 7.5 切削試験後の UFC 床版の状況（全景）

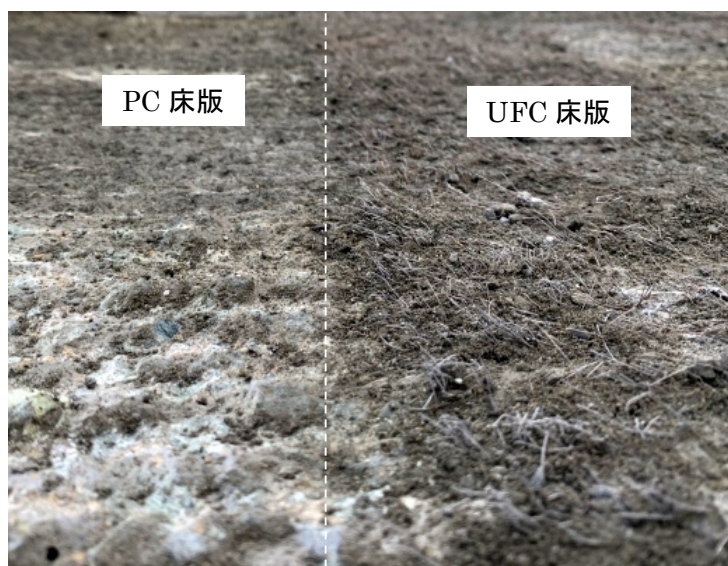


写真 7.6 切削試験後の PC 床版と UFC 床版の比較

7.8 使用性の照査

7.8.1 照査の流れ

使用性に関する限界状態と照査指標を表 7.5 に、照査の流れを図 7.9 に示す。構造計画および構造詳細を設定した UFC 床版について、応力度、たわみ、振動数を指標として照査する。

表 7.5 使用性に関する要求性能と照査指標

要求性能	限界状態	照査指標	照査限界の目安
床版として機能が健全であり、車両走行が可能である	過度な変形 ひび割れの発生	応力度	床版の主応力 ・ 制限値：設計基準強度の 60% ・ 制限値：設計ひび割れ強度
		たわみ	床版のたわみによる二次応力 ・ 舗装の耐久性が低下しない ・ 鋼桁等に疲労破壊が生じない
快適に車両走行が可能である	走行性の限界	振動数	床版の振動数 ・ 車両と共振しない
	外観の阻害	応力度	床版の主応力 ・ 制限値：設計ひび割れ強度

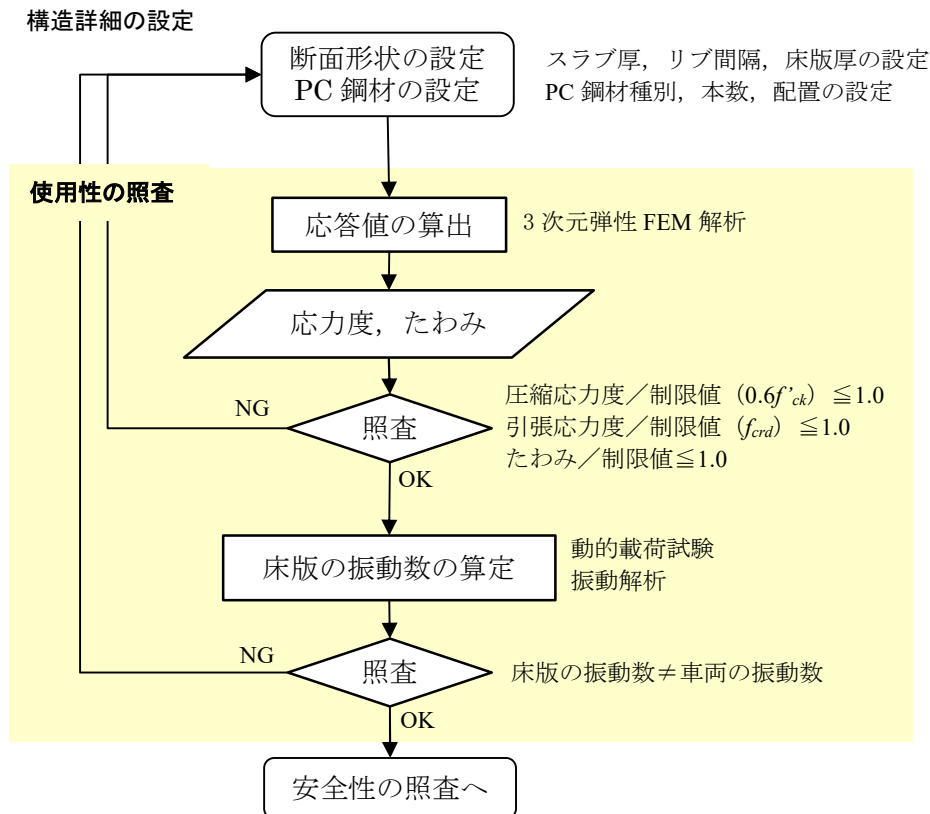


図 7.9 使用性の照査の流れ

7.8.2 応力度、たわみの照査

3.2 節の検討を踏まえ、使用性の照査として応力度およびたわみの照査を行うこととする。3 次元弾性 FEM 解析によって応力度を算定することとした。輪荷重作用は、輪荷重は 100kN に衝撃係数 $i=0.4$ 、構造解析係数 $\gamma_d=1.1$ を乗じ 154 kN を載荷する。輪荷重の設置位置は 1.75m の離隔をとって上記の 1 輪荷重を組み合わせた荷重を 1 組として、床版の各部に対して、曲げモーメントもしくはせん断力の応答値が大きくなると推定される個所に載荷する。算出した応力度に対して、圧縮応力度は $0.6 f'_{ck}=108\text{N/mm}^2$ 、曲げによる引張応力度およびせん断による斜め引張応力度は、UFC の主応力を設計ひび割れ発生強度の 8.0N/mm^2 を制限値として照査する。また、ワッフル型 UFC 床版については、スラブとリブの隅角部などの断面変化部に、局所的な大きな応力度が生じていないことを確認することもあるといえる。

たわみについては、舗装の耐久性への影響、および鋼桁・鋼床組の疲労破壊への影響を踏まえ設定する制限値に対して照査する。3.3 節に示すように検討のように、同支間の鋼床版と同等以下のたわみとなるように UFC 床版の床版厚を設定することで、間接的に舗装の耐久性への影響や鋼桁の疲労の検討を省略することも可能といえる。

第 4 章に示す断面破壊の検討では、永続作用時の応力状態に荷重が載荷されるため、UFC 床版にひび割れが生じる荷重は、永続作用時の応力状態によって変動する。また、第 5 章に示す疲労破壊についても、同様に使用性の照査で決まる変動作用時の応力状態によって、ひび割れが生じる荷重が変動する。疲労破壊については、ひび割れが生じてから、繰返し荷重がひび割れ部の開閉を促進し、疲労によってひび割れが進展し疲労破壊につながるため、永続作用時や変動作用時における応力度が、ひび割れ発生強度に余裕がある方が、安全性が高いといえる。よって、使用性の照査における応力度の制限が、安全性に関する断面破壊や疲労破壊に影響することを意識し、使用性の照査における応力度の制限においては、断面破壊や疲労破壊を避ける部位については、制限値に対して余裕のある応力状態となるように設計することが必要であるといえる。

7.8.3 振動の照査

3.4 節の検討を踏まえ、使用性の照査として動的載荷による振動の照査を行うこととする。動的載荷によって床版の固有振動数を算定し、走行車両の振動数と比較し共振が生じないことを照査する。ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）の固有振動数は、実験の結果 52～54Hz であり、解析の結果、2 辺単純支持版の場合 35Hz、2 辺固定支持版とした場合は 76Hz であった。タンデム式ダンプトラックのバネ下振動数は 13～18Hz であることから、床版と車両の共振の可能性は低いといえる（詳細は 3.4.2 参照）。よって、実構造物の適用にあたって、床版厚が 123mm より大きくする場合は、振動数も実験や解析で算出した値より大きくなり車両との共振は生じないと推測される。

7.9 安全性の照査

7.9.1 照査の流れ

安全性に関する限界状態と照査指標を表 7.6 に、照査の流れを図 7.10 に示す。構造計画および構造詳細を設定した UFC 床版について、安全性の照査として耐荷力、破壊回数、破壊形態の照査を行う。

表 7.6 安全性に関する要求性能と照査指標

要求性能	限界状態	照査指標	照査限界の目安
想定するすべての作用のもとで、UFC 床版が、使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさない	断面破壊	耐荷力 破壊形態	- 耐荷力が設計荷重に対して十分な安全性を有する - 破壊形態が脆性的でない
	疲労破壊	破壊回数 破壊形態	- 設計耐用期間において疲労破壊が生じない - 破壊形態が脆性的でない

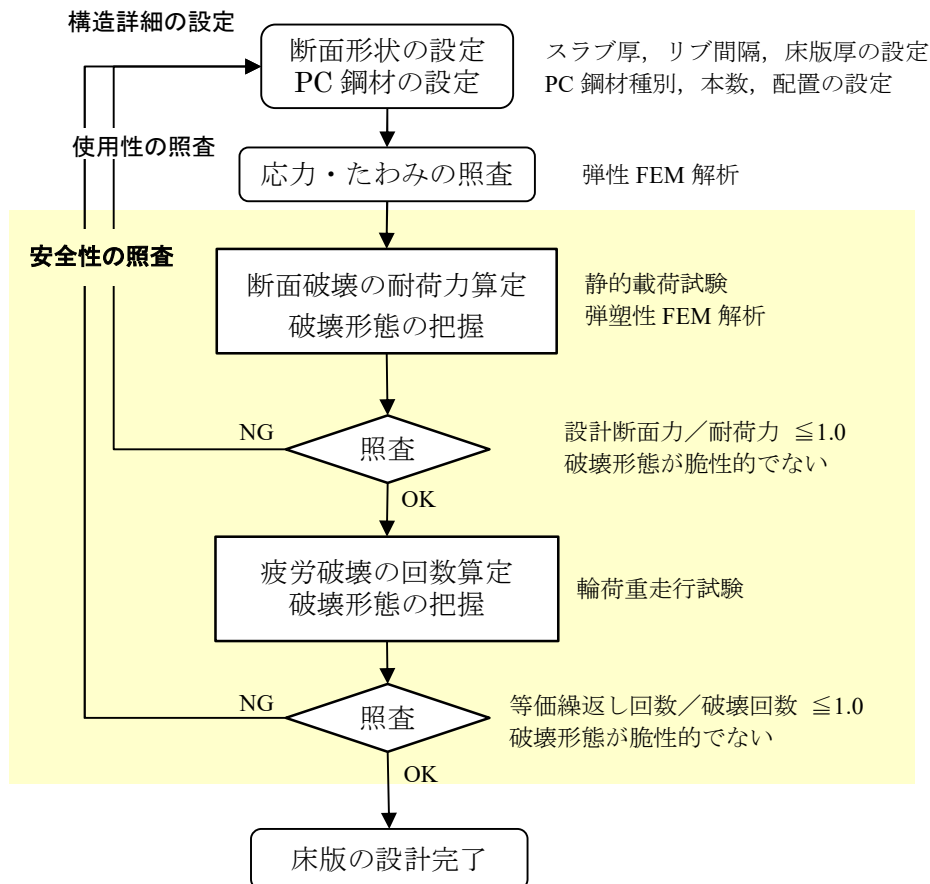


図 7.10 安全性の照査の流れ

7.9.2 断面破壊の照査

第 4 章の検討を踏まえ、安全性に関する照査として、断面破壊に対する耐荷力および破壊形態の照査を行うこととする。静的載荷、または弾塑性解析によって UFC 床版の耐荷力 R_d を算出し、設計断面力 S_d に対して、 $\gamma_i \times S_d / R_d \leq 1.0$ によって照査する。また、断面破壊が、押抜きせん断破壊のような脆性的な破壊でないことを照査することとした。

ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）の耐荷力は、静的載荷の結果、750.8kN であった。よって、設計耐荷力は 682.5kN（部材係数 $\gamma_b=1.1$ ）、設計活荷重は 139kN のため、 $\gamma_i \times S_d / R_d = 1.0 \times 139 / 682.5 = 0.20 \leq 1.0$ である。よって、構造詳細の設定、および使用性に関する応力度の制限を経た UFC 床版の断面については、安全性に関する断面破壊の照査は余裕をもって満足する可能性が高いといえる。本床版の破壊形態は、曲げ圧縮破壊であり脆性的な破壊ではなかった。

7.9.3 疲労破壊の照査

第 5 章の検討を踏まえ、安全性に関する照査として、疲労破壊に対する破壊回数および破壊形態の照査を行うこととする。輪荷重走行試験によって、疲労破壊に対する破壊回数を算出し、設計耐用期間に相当する等価繰返し回数に対して、等価繰返し回数／破壊回数 ≤ 1.0 によって照査する。また、疲労破壊が、押抜きせん断破壊のような脆性的な破壊でないことを照査する。

輪荷重走行試験は、実物大の試験体を用いるものとして、UFC 床版を複数枚からなる試験体と接合部を含む試験体とすることによって、接合部の疲労破壊についても確認できる。輪荷重走行による載荷は、階段状載荷によるものとし、水張り状態での載荷ステップも設けることとする。階段状載荷における載荷回数については、設計耐用期間 100 年に相当する等価繰返し回数以上とするものとし、等価繰返し回数の算出については、対象路線の活荷重実態調査等による計測軸重の特性を踏まえて設定する。

試験結果について、床版のたわみ、およびひずみの載荷ステップごとの初期と最終を比較することによって、繰返し載荷による疲労の影響を確認することができる。また、UFC 床版の疲労破壊は荷重を支持できない、または変位・変形が走行に支障が生じる状態であり、疲労破壊に至る輪荷重走行による載荷回数を確認するものとする。疲労破壊の照査は前述の設計耐用期間 100 年に相当する等価繰返し回数を、疲労破壊回数が上回ることを確認することである。

ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）の輪荷重走行試験では、100 年等価繰返し回数を超えた後、UFC 床版が疲労破壊に至らず試験を終了した。よって、本床版については、破壊回数は算定できなかったが、疲労破壊に対する破壊回数の照査は十分に満足していると判断できる。破壊形態についても、押抜きせん断破壊のような脆性的な破壊が生じることはなかった。

7.10 接合部の照査

7.10.1 照査の流れ

接合部の限界状態と照査指標を表 7.7 に示す。桁と床版の接合部の照査の流れを図 7.11 に示す。使用性の照査として応力度の照査，安全性の照査として耐荷力，破壊形態の照査を行う。

表 7.7 接合部の要求性能と照査指標

	要求性能	限界状態	照査指標	照査限界の目安
使用性	床版として機能が健全であり，車両走行が可能である	過度な変形 ひび割れの発生	応力度	床版と桁の接合部の応力度 ・ 許容水平せん断応力度 床版同士の接合部：圧縮応力状態
安全性	想定するすべての作用のもとで，UFC 床版が，使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさない	断面破壊	耐荷力 破壊形態	・ 耐荷力が設計荷重に対して十分な安全性を有する ・ 破壊形態が脆性的でない
		疲労破壊	破壊回数 破壊形態	・ 疲労破壊が生じない ・ 破壊形態が脆性的でない

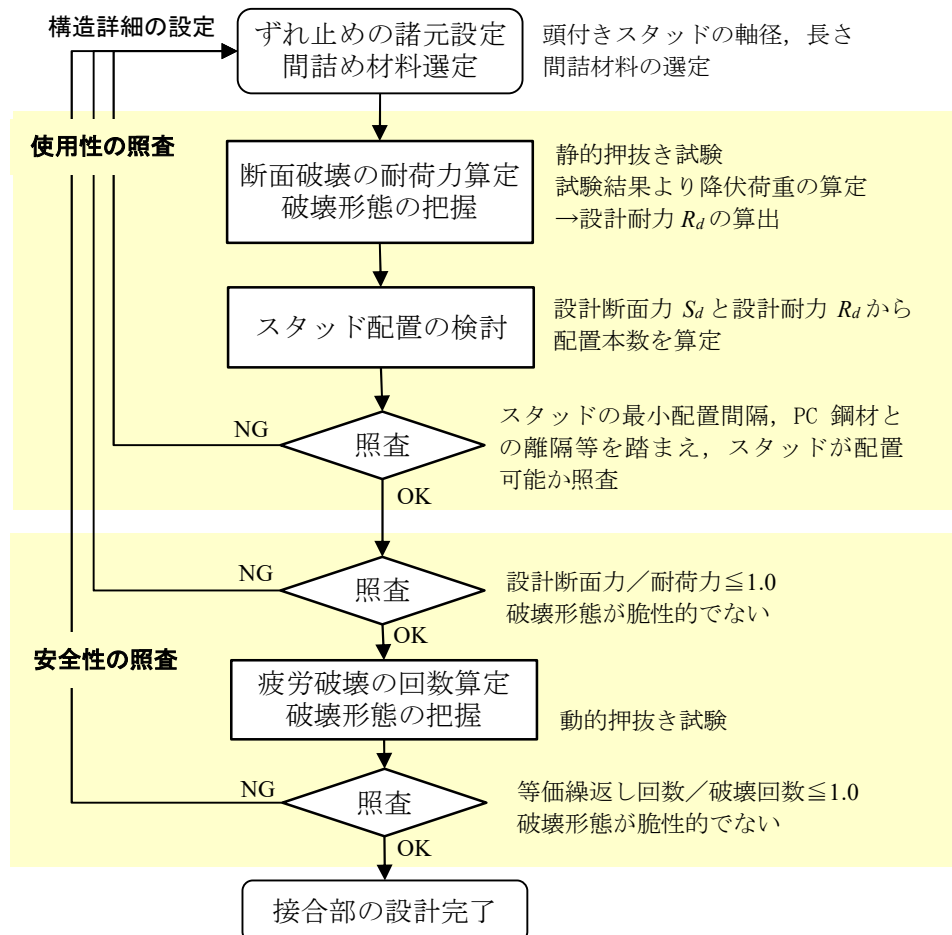


図 7.11 床版と桁の接合部の照査の流れ

ワッフル型 UFC 床版同士の接合部の照査の流れを、図 7.12 に示す。使用性の照査として応力度の照査、安全性の照査として破壊回数、破壊形態の照査を行う。

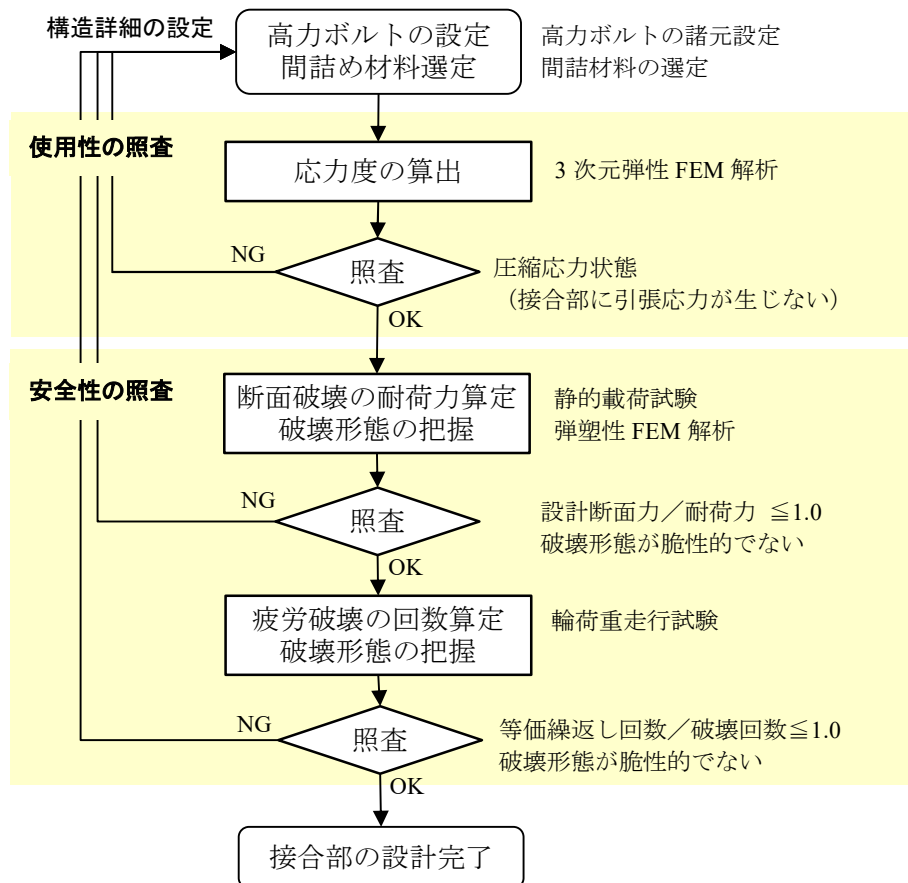


図 7.12 床版同士の接合部の照査の流れ

7.10.2 床版と桁の接合部の照査

6.2 節の検討を踏まえ、床版と桁の接合部における照査として、応力度、断面破壊に対する耐力および破壊形態の照査、疲労破壊に対する疲労破壊回数の照査を行うこととする。

接合部の構造計画として、ずれ止めの形式選定を行う。主桁との床版の接合部は、頭付きスタッドによるずれ止め構造を標準とする。構造詳細の設定においては、頭付きスタッドの軸径と長さ、および間詰め材料を設定する。頭付きスタッドの長さについては、床版の 1/2 以上の位置にスタッドの頭が位置するように設定する。間詰め材料については、無収縮モルタル、または場所打ち UFC 等の材料から選定する。鋼桁の上フランジと床版下面の間の間詰め高が高くなる場合は、接合部の破壊が、この間詰め部のひび割れに起因する場合もある。よって、間詰め材料に無収縮モルタルを用いる場合は、繊維を混入することを標準とする（PE 繊維の場合、長さ 6mm、0.2vol.%）。繊維を混入すると、モルタルの流動性が低くなり、施工性に影響するため、材料選定

の時点で試験によって流動性を確認する必要がある。

頭付きスタッドの設計に用いる設計耐力 R_d は、静的押抜き試験によって算出する降伏荷重から算定する。算定した設計耐力 R_d と設計水平せん断力 S_d から、 $S_d / R_d \leq 1.0$ となるように、スタッドの配置本数を決定する。配置本数が満足しない場合は、構造詳細の設定に戻り、スタッドの諸元を見直す必要がある。

疲労破壊の照査については、押抜きせん断試験と同じ試験体に対して、繰り返し載荷する疲労試験によって、既往の疲労強度式を下回らないことを確認する。繰り返し載荷に用いる応力振幅は、押抜きせん断試験によって算定された最大荷重の 35%～60%の振幅とする。

7. 10. 3 床版同士の接合部の照査

6. 3 節の検討を踏まえ、ワッフル型 UFC 床版同士の接合部における照査として、応力度、断面破壊に対する耐荷力および破壊形態の照査、疲労破壊に対する疲労破壊回数の照査を行うこととする。使用性の照査は、床版の端リブの応力度を制限するとともに、接合部は高力ボルト等によってプレストレスし、引張応力度を許容しないでフルプレストレス（圧縮応力状態）となるように応力度を制限する。3 次元弾性 FEM 解析によって算出する応答値に対して応力度の照査を行うものである。

断面破壊に対する安全性の照査は、静的載荷試験（詳細は 6. 3. 2 参照）、によって接合部の設計耐荷力 R_d を算出して設計断面力 S_d に対して、 $\gamma_i \times S_d / R_d \leq 1.0$ によって照査する。ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）については、静的載荷による最大荷重は 50.8kN であるため設計耐荷力は 46.2kN（部材係数 $\gamma_b=1.1$ ）、設計活荷重相当の断面力は 7.9kN のため、 $\gamma_i \times S_d / R_d = 1.0 \times 7.9 / 46.2 = 0.17 \leq 1.0$ であった。

7. 11 維持管理計画

7. 11. 1 維持管理の流れ

維持管理は、供用期間にわたって、性能照査型設計において設定した要求される性能が確保されていることを点検および診断によって確認し、必要に応じて、適切な対策を講じるものである。

定期的に点検を実施し、構造物の状態や保有性能を評価するためのデータを取得する。次に、点検の結果に基づき、劣化機構を推定し、さらには劣化の進行程度を予測して、構造物における現有の性能および予測された将来の保有性能が要求性能を満足しているかどうかを評価する。評価および判定の結果、性能確保のために何らかの対策が必要となる場合には、補修、補強あるいは取替え等の更新などの対策を講じる。

UFC 床版の診断における点検から対策の例を図 7.13 に示す。従来のコンクリート構造物と同様に近接目視による点検を基本とする。UFC 床版のひび割れは微細であるため、近接目視を補助するモニタリングを併用するものとする。近接目視によってひび割れが発見された場合は、ひび割れ幅に応じて補修、補強、床版取替えなどの対策を実施する。維持管理計画においては、補修（表面含侵工、ひび割れ注入など）が可能なひび割れ幅、ひび割れ幅に応じた性能照査を踏まえ、具体的なひび割れ幅の閾値を定める必要がある。

なお、補修材料については、UFC は、密実なセメント質複合材であり、かつ鋼繊維を使用するため、ひび割れ内への表面含侵材の浸透性や、ひび割れ注入材の浸透性については、ひび割れ幅に応じて材料（工法）ごとに適用可能かどうかを事前に試験等で確認する必要がある。

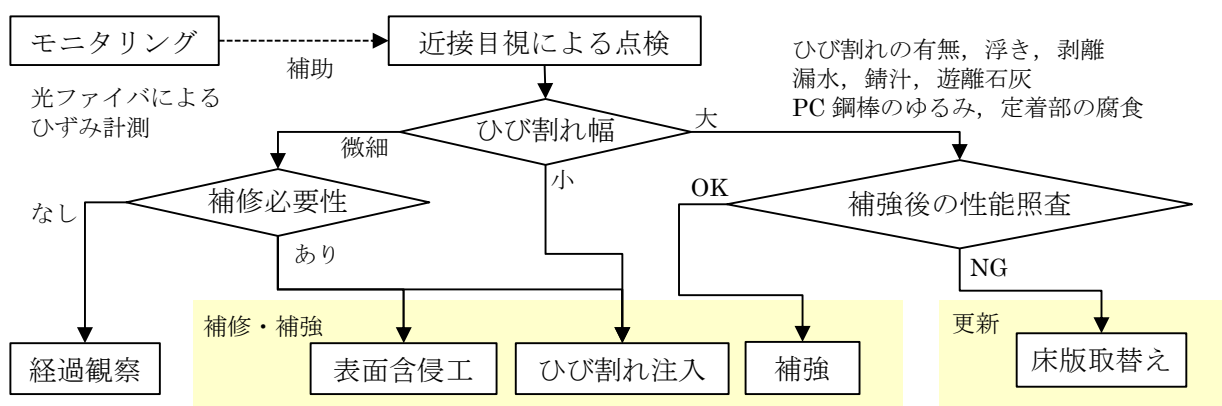


図 7.13 UFC 床版の維持管理

7.11.2 点検精度の向上

(1) UFC 部材表面のひび割れ検知

UFC 床版の維持管理においては、図 7.13 に示すように、微細ひび割れの早期発見や、近接目視を補助する目的でモニタリングを実施することで、点検精度の向上が期待できる。光ファイバを用いたひずみ計測を検討した。このひずみ計測方法は、AFt 系 UFC を用いた歩道橋で 10 年間モニタリングを実施した実績がある方法である⁷⁻¹⁰⁾。

本研究においても、光ファイバを用いたひずみ計測の検討を実施した。5.2 節に示す輪荷重走行試験後の試験体である床版[1]を用いた。光ファイバは、図 7.14 に示すように床版中央部の橋軸方向（直線部 D）を中心として 7 つの直線部を有するよう一筆書き状（赤線）に配置することとし、エポキシ接着剤を用いて床版下面のリブに固定した。この床版を図 7.15 に示すように、H 鋼上にゴム板を敷設し 2 辺支持による単純支持床版とした。光ファイバによる計測試験として、図 7.16 に示すラフタークレーンを静的載荷して計測を実施した。重機の前軸重は 13,190kg、後軸重は 13,150kg であった。試験時にはブームを下げた状態で左前輪が床版に乗るように載荷した。前輪の設置面積は $30 \times 30\text{cm}^2$ であった。

第 7 章 UFC 床版の性能照査型設計法の提案

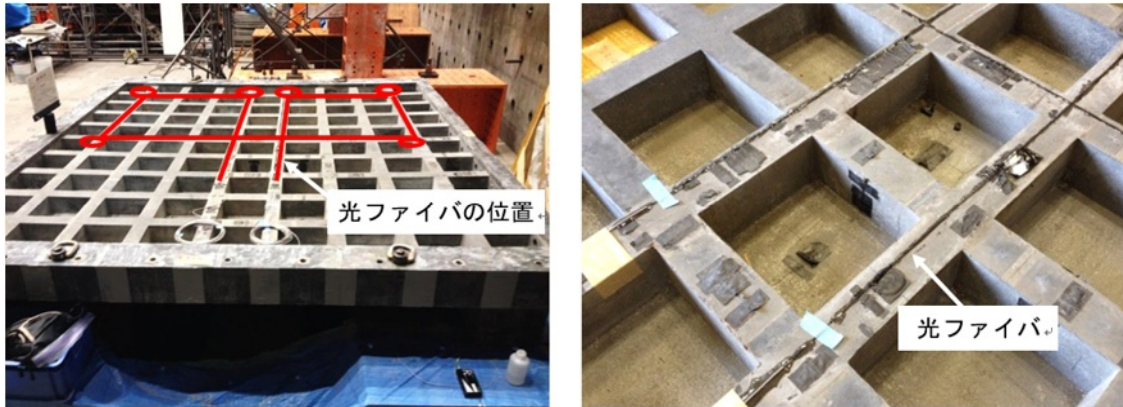


図 7.14 床版のリブ下面の光ファイバ設置状況

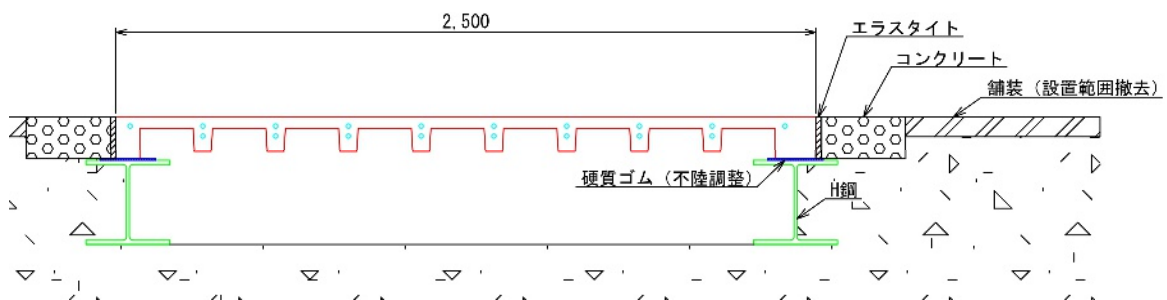


図 7.15 試験体の設置状況



図 7.16 重機による静的載荷

BOCDA 方式計測機器によって、光ファイバに沿ったひずみ分布を計測した。位置分解能 5cm (5cm の平均ひずみを計測)、参考文献 7-11)によれば 0.02mm のひび割れが生じた場合、約 20cm 範囲で最大約 300 μ の局所的なひび割れが生じることがわかっている (図 7.17 の赤破線)。

計測間隔約 3cm で計測した結果を図 7.17 に示す。この計測結果からは、赤破線のような局所的なひずみ変化が確認されないことから、0.02mm 以上のひび割れは生じていないということが確認できた。なお、ひずみ分布に 25cm 間隔の周期的な増減がみられるが、これは、ワッフル状のリブ形状の影響と推測される。

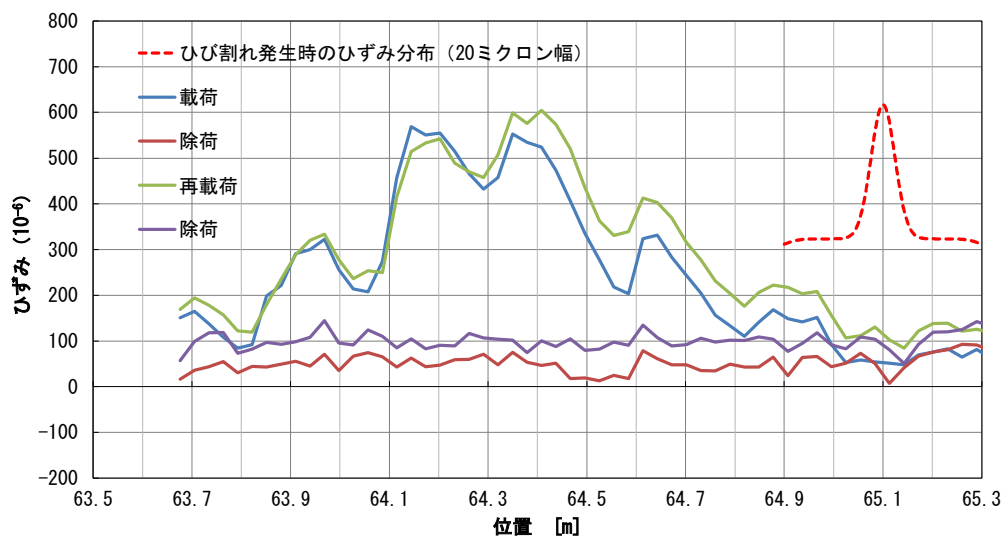


図 7.17 ひずみ分布計測結果（中央部橋軸方向）

重機の左前輪を床版中央部に停止させた後、段階的に後進して載荷位置を変えながら計測した結果を図 7.18 に示す。図の丸印の点が計測位置を示し、その間を面補間して三次元表示した結果である。徐々に、最大ひずみ発生位置が移動しえいる様子が把握できた。このように、光ファイバを床版に縦横に配置し、静的な載荷試験を行うことによって、最大ひずみ発生位置やひび割れの位置を面的に把握できることを確認した。

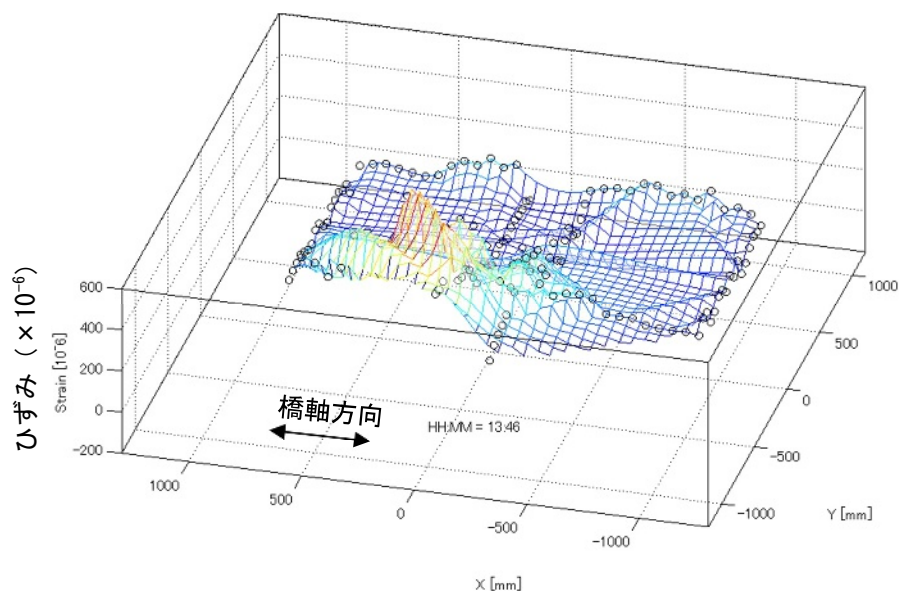


図 7.18 ひずみ分布計測結果（三次元表示）

本検討によって、光ファイバによるひずみ計測を行うことによって、近接目視のスクリーニングや微細ひび割れの早期発見を目的とした、UFC 床版のモニタリングに適用できることを確認した。一方、光ファイバを床版全面に設置することは困難であるため、ひび割れの発生が懸念される箇所を抽出して設置するなどの対応が必要といえる。

(2) PC 鋼材の緊張力モニタリング

UFC 床版は、PC 鋼材をプレテンション方式で緊張することによって、床版にプレストレスが導入されている。PC 鋼材やプレストレスの緊張力の状態は、UFC 床版の性能に直結するため、維持管理においては、その健全性を確認する必要がある。しかし、PC 鋼材は UFC 床版の内部に配置されているため、維持管理における近接目視では、外部から床版端部等に変状がないかを確認することしかできない。そこで、PC 鋼材および緊張力のモニタリングを目的に、光ファイバを用いた PC 鋼材のひずみ計測⁷⁻¹²⁾の UFC 床版への適用を検討した。光ファイバ付き PC 鋼より線の設置状況を図 7.19 に示す。図の青色部分に示すように PC 鋼より線に光ファイバが接着されている。

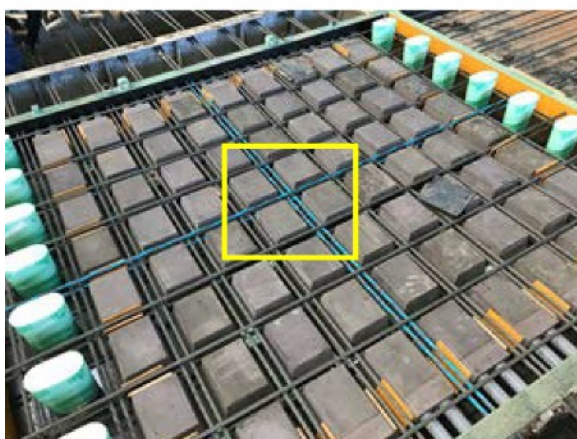
図 7.20 に光ファイバ計測による PC 鋼材のひずみ計測結果として、プレストレス導入前からの差分を示す。固定側については付着伝達が 0.36m 程度であることが確認された。緊張側については、PC 鋼材から光ファイバが剥がれて計測できなかったため、接着等に課題があることが明らかになった。



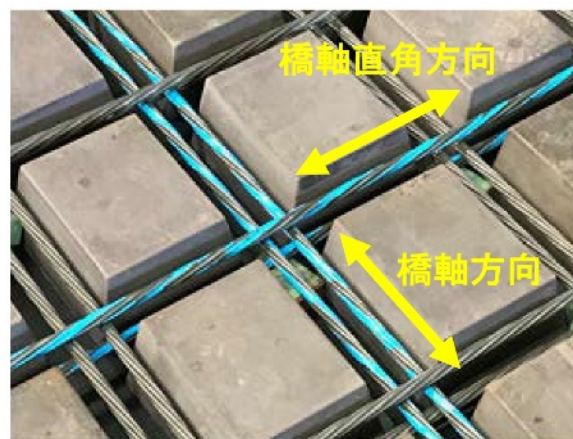
(1) 荷解き



(2) 設置状況



(3) 設置後（全体写真）



(4) 設置後（拡大図）

図 7.19 光ファイバ付き PC 鋼より線設置状況

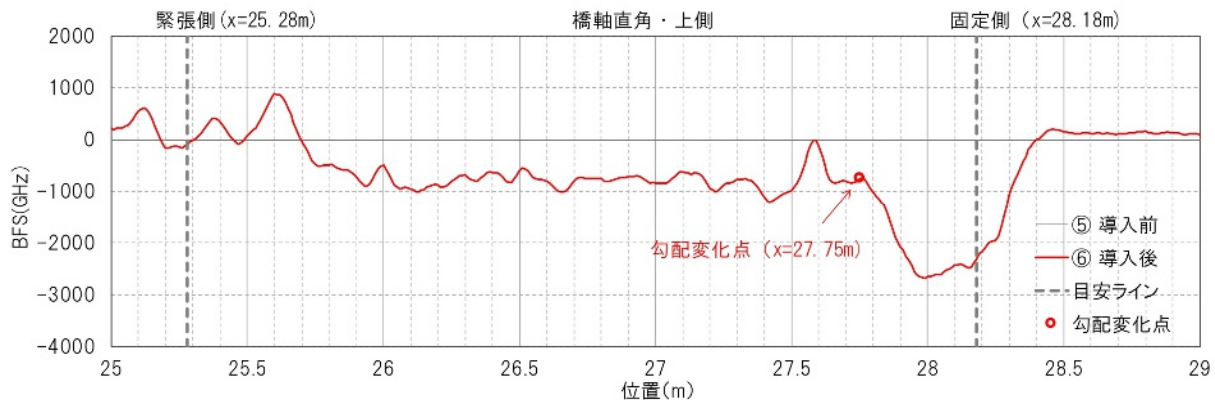


図 7.20 PC 鋼材のひずみ計測結果（プレストレス導入前からの差分）

7.11.3 維持管理の効率化

(1) 材料特性を活かした効率化

UFC は、セメントと細骨材によって構成され粗骨材を使用しないため、従来のコンクリートと比較して均一な材料といえる。また、水結合材比が 0.24 以下と小さいことから、空隙が少ない密実な材料である。この材料特性を活かした維持管理の効率化として、赤外線応力測定システム⁷⁻¹³⁾の適用が挙げられる。本システムは、対象構造物を赤外線撮影によって表面の温度変化を計測し、それによって応力度の変化を測定するものである。参考文献 7-13)では、鋼橋に適用し活荷重に対する応力度の変化を面的に計測することによって、鋼構造の損傷等を検知するものである。従来のコンクリートは、粗骨材とセメントから構成される上に空隙も多く、材料の均一性が低いことから表面の温度から応力度の変化へ換算することが困難とされていた。UFC については前述のとおり、比較的均一な材料であることから、このシステムが適用できる可能性があり、UFC 床版を下面から撮影することによって応力度の変化を把握できれば、損傷等の早期発見や近接目視が省略できる可能性がある。試行による計測の検証が今後の課題である。

(2) プレキャスト部材を活かした効率化

UFC 床版は、工場で製作するプレキャスト部材であるため、工場で仮置きしている状態（写真 7.7）において、画像撮影やレーザー計測によって、床版の形状の 3 次元データ化が可能である。例えば、文献 7-14)では、ハンディタイプの計測機によって形状を点群データとして取得し、その形状が視覚的に確認できること、任意の座標や寸法の取得が可能である。

UFC 床版の形状を、このような手法で 3 次元データ化し、そのデータを維持管理において活用することが考えられる。この点群データをもとに、CIM における構造モデルの作成や、大規模な解析^{7-15), 7-16)}に用いる解析モデルの作成に活用することが可能である。また、供用後の床版を 3 次元計測し、製作時の形状と比較することによって、損傷の検知や性能照査に活用することも可能といえる。



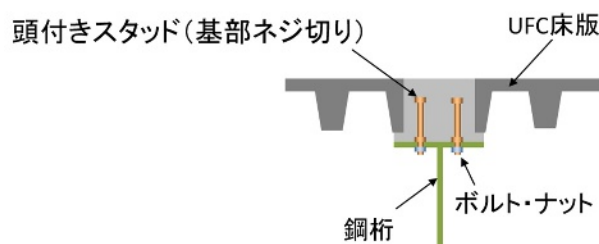
写真 7.7 製作工場での UFC 床版の仮置き状況

また、7.7.2 で述べた舗装補修時における、舗装撤去は事前に切削する舗装の厚さを把握した上で施工されるが、床版上面に凹凸があり舗装厚が一定でないこと、切削時の目視や音の変化によって手動で管理されていること等によって床版が過切削されてしまう。この点からも、床版の製作時に、UFC 床版の形状を計測しデータ化されていれば、舗装撤去時にこのデータをもとに切削することで、過切削を防止できると考えられる。

(3) 現場での接合部施工を活かした維持管理の効率化

供用中の高速道路では、車両からの重量物の落下による床版の損傷が生じることがある。UFC についても、同様の事故による損傷が生じる可能性がある。これに対し、UFC 床版は建設時に現場で接合部を施工する構造であるため、取替え時には接合部を撤去すれば、プレキャスト床版の単位で取替えが可能といえる。

桁と床版の接合部については、一般的に頭付きスタッドによるため、床版取替え時には、スタッド接合部を切断する場合が多い。この接合部に、図 7.21 に示すボルトナット固定式スタッドを適用することで、さらに取替えやすい床版となる。この構造を用いた撤去については試験施工を実施して、撤去可能であることを確認している。この構造の課題として、ボルトナット固定式スタッドの構造特性として、押し抜きせん断試験を実施した結果、降伏時に固定部でずれが生じることが確認されているため、適用にあたってはこの特性を明らかにする必要がある。



(a) 構造概要



(b) 押し抜き試験体（スタッド部）

図 7.21 ボルト固定式スタッドの概要

7.12 まとめ

本章においては、第2章から第6章の成果を踏まえUFC床版の性能照査型設計法を提案した。

7.2節では、性能照査型設計法に関する報文をレビューし、UFC床版の設計法への性能照査型設計法の適用について述べた。

7.3節では、性能照査型設計法における設計の流れについて述べた。

7.4節では、要求性能の設定として、使用性と安全性について、要求性能、限界状態、および考慮する作用について述べた。また、塩化物イオンの浸透に対するUFCの材料としての耐久性の高さを示し、材料の耐久性の照査は対象としないことを述べた。

7.5節では、安全係数の設定として、照査に用いる安全係数の設定について述べた。

7.6節では、構造計画として、床版形式の選定、鋼桁および鋼床組の計画について述べた。床版形式については、ワッフル型UFC床版と平板型UFC床版の選定の考え方を述べた。

7.7節では、構造詳細の設定として、ワッフル型UFC床版の断面形状の設定、施工性や維持管理の確実性を満足するための構造詳細の設定における配慮事項を述べた。

7.8節では、使用性に関する照査の内容を述べた。3次元弾性FEM解析によって算出した応力度とたわみの制限に関する照査、動的載荷による振動の照査について述べた。

7.9節では、安全性に関する照査の内容を述べた。断面破壊の照査については、静的載荷試験によって算定した耐荷力に関する照査について述べた。疲労破壊の照査に着いては、輪荷重走行試験による疲労破壊回数と破壊形態に関する照査を述べた。

7.10節では、接合部に関する照査の内容を述べた。床版と桁の接合部の照査と、ワッフル型UFC床版同士の接合部の照査について、それぞれ使用性の照査と安全性の照査について述べた。

7.11節では、維持管理計画として、維持管理の流れを示した上で、点検精度の向上と、維持管理の効率化に着眼し、UFC床版の特性を活かした検討について述べた。

本章の結論は以下の通りである。

- 1) UFC床版の性能照査型設計法を提案した。使用性と安全性に関する要求性能を設定した。材料の耐久性および復旧性については、床版として照査の対象としないこととした。
- 2) 構造計画、構造詳細の設定では、UFC床版の形式選定における考え方と、断面形状の設定方法を示した。また床版を支える鋼桁および鋼床組の計画についても方針を示した。断面形状の設定について、施工および維持管理への配慮として、床版同士の接合部における高力ボルトの取り外しに対するリブ間隔の設定や、舗装補修時の過切削に対する床版上面のかぶりの設定に留意が必要である。
- 3) 使用性の照査について、応答値の算出および照査、振動に関する照査の標準を示した。照査は、応力度の制限値に対する照査と、スラブとリブの付け根などに局所的な応力が生じてい

第 7 章 UFC 床版の性能照査型設計法の提案

ないことを確認する。また、床版の応力度について、第4章および第5章を踏まえ、設計ひび割れ強度を制限値として設計することで、断面破壊、および疲労破壊の安全性が確保されるといえる。

- 4) 安全性の照査について、断面破壊に対する耐荷力の算定および照査、疲労破壊に対して輪荷重走行試験による照査の標準を示した。断面破壊の照査は、耐荷力が設計断面力よりも大きいことの確認であり、疲労破壊の照査は、設計耐用期間において疲労破壊が生じないことを確認するものである。また、両破壊について脆性的な破壊とならないことを確認するものとする。
- 5) 接合部の照査について、床版と桁の接合部と床版同士の接合部について、使用性および安全性の照査の標準を示した。照査は、接合部の耐荷力が設計断面力よりも大きいことの確認である。また、破壊が脆性的な破壊とならないことを確認するものである。
- 6) UFC床版の維持管理について、維持管理の流れとして点検、対策の手順を示した。また、点検精度の向上策として、光ファイバによるひずみ計測によるひび割れ検知と、光ファイバによるPC鋼材の緊張力モニタリングが可能である。
- 7) UFC床版の特徴を活かした維持管理の効率化案として、材料の均一性を活かした赤外線応力計測の適用性、プレキャスト部材であることを活かした製作時の寸法のデータ化、現場での接合部施工を活かした、床版取替えが容易になる構造を示した。

本章で明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) 本研究では指針等を参考に設計に用いる安全係数を設定したが、今後、載荷実験結果や実施工における品質管理のデータを蓄積し、分析することで見直すことが必要といえる。
- 2) 構造詳細の設定において、維持管理への配慮として過切削対策の必要性を示した。かぶりに過切削を想定した付加的なかぶりを設けることを提案したが、質量やコストへの影響が課題である。今後、UFCの透水性の高さを活かした防水層や舗装の省略、および過切削技術の向上に向けた検討が必要といえる。
- 3) 使用性の照査については、3次元弾性FEM解析による応答値の算出することとしたが、実務の設計において、この手法で応答値を算出することは、設計に係る時間とコストへの点で課題である。今後、設計曲げモーメント式を検討する必要がある。
- 4) 疲労破壊に対する安全性の照査は、輪荷重走行試験によることとしているが、時間とコストを要する試験であることが課題である。今後、試験を代替する疲労破壊の解析的評価方法の開発が必要である。
- 5) 維持管理における点検精度の向上として、目視点検を補助する目的で光ファイバによるひび割れ検知の有効性を示したが、橋梁全長に設置することは、コストの面で現実的でない。今後、橋梁の中で設置する床版位置を、供用後の損傷発生状況などを踏まえ、検討する必要がある。

7 章参考文献

- 7-1) 二羽淳一郎：構造性能－土木構造物－，コンクリート工学, Vol.39, No.1, 35-42, 2001
- 7-2) 河野広隆：コンクリート分野の性能照査設計法の動向，第 1 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会, 31-38, 1998
- 7-3) 国土交通省：土木・建築に係る設計の基本, 2002
- 7-4) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】，2018
- 7-5) 土木学会鋼構造委員会鋼橋の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計, 2000
- 7-6) 井上晋：コンクリート構造物の設計の基本と最近の話題，第 25 回コンクリート構造の設計・施工・維持管理の基本に関する研修会講演資料, 2011
- 7-7) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 7-8) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリー, No.3, 2011
- 7-9) Association Francaise de Genie Civil: Ultra high performance fibre-reinforced concrete: Interim recommendations, Bagneux, AFGC-Setra, 2002
- 7-10) 今井道男・一宮利通・露木健一郎・早坂洋太・太田伸之：光ファイバセンサによる 10 年間の PC 橋梁ひび割れモニタリング，土木学会論文集 A1, Vol.75, No.1, pp17-25, 2019
- 7-11) Imai, Michio, et al. : Crack detection application for fiber reinforced concrete using BOCDA-based optical fiber strain sensor, Journal of structural engineering, Vol. 136, Issue 8, pp. 1001-1008, 2010
- 7-12) 大窪一正・今井道男・曾我部直樹・中上晋志・千桐一芳・二羽淳一郎：緊張管理・維持管理に適用可能な光ファイバを用いた PC 張力分布計測技術の開発，土木学会論文集 E2, Vol.76, No.1, pp.41 - 54, 2020
- 7-13) 藤林美早・西岡勉・渡邊武・入江 庸介：赤外線応力測定システムによる鋼道路橋に発生する応力測定，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，2017
- 7-14) FARO ファロー・ジャパン：三次元測定機・3D スキャナー，<http://www.faro.com/ja-jp/>
- 7-15) 東芝：コンピューター上に再現した橋梁で車両荷重影響を評価する超大規模解析技術を開発ーデジタルツインを用いた維持管理業務効率化・防災対応の高度化に向けた共同研究ー（プレスリリース），https://www.toshiba.co.jp/about/press/2018_08/pr_j2801.htm, 2018
- 7-16) 久國陽介・釘宮哲也・渡部一雄・篠原聖二・赤松伸祐：超大規模解析モデルを用いた鋼斜張橋の車両荷重作用時の変形解析，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，2018

8章 結 論

本論文は、本研究で提案する UFC 床版について、実験や解析による性能照査を行い高い性能を有することを示し、これらの検討を踏まえ、UFC 床版の性能照査型設計法の提案するものである。本研究における着目点は、UFC の高い強度（圧縮強度の特性値 180N/mm^2 ，設計引張強度 8.8N/mm^2 ）などの特徴を活かし、鋼床版と同等に軽量，かつ疲労破壊に対して高い安全性を有するコンクリート系床版の開発することであった。

研究にあたって、既設の道路橋床版に顕在化している損傷と、道路橋床版の既往研究を踏まえ、本研究の課題や方向性を示した。また、UFC の材料特性と、既往の UFC を用いた橋梁や床版を示した上で、UFC 床版のコンセプトを示した。構造詳細の設定においては、床版の断面形状に関する検討を行い、支間長に応じた床版厚を示した。その床版に対して、性能照査型を指向した実験や解析に基づく使用性および安全性の照査をおこなった。最後に、これらの成果をとりまとめて、性能照査型設計法を提案した。以下に、各章の結論と明らかとなった課題と今後の展望を示す。

第 2 章「構造計画と構造詳細の設定」では、要求性能の設定、構造計画，および構造詳細の設定を示した。構造計画においては、床版，接合部，鋼桁および床組構造の計画における考え方を示した。構造詳細の設定においては、床版の断面形状に関する検討として、最小部材厚，スラブ厚，リブ間隔，リブ高，および支間長に対する床版厚の検討を示した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 既設の鋼床版および RC 床版に顕在化している劣化損傷を踏まえ、従来の床版を代替する AFt 系 UFC を用いた軽量の道路橋床版として、リブを有するワッフル型 UFC 床版と平板型 UFC 床版を提案した。
- 2) ワッフル型 UFC 床版の形状に関して、UFC 指針のかぶり，あき，およびスラブの押抜きせん断耐力を踏まえた最小断面を示した。また、リブ間隔，スラブ厚およびリブ高をパラメータとして応力度およびたわみを算定した。UFC は、圧縮応力度の制限値が 108N/mm^2 と従来のコンクリートより大きいため、床版厚を小さくし、プレストレスによる圧縮応力度を大きくすると同時に、自重による引張応力度を小さくすることが合理的である。
- 3) スラブ厚を 40mm ，床版厚 123mm のワッフル型 UFC 床版の質量を 1 とすると、デッキ厚 16mm の U 型リブを有する鋼床版の質量は 0.98 であり、ワッフル型 UFC 床版の質量は同支間長の鋼床版とほぼ同等である。

第 3 章「解析および動的載荷による使用性に関する照査」では、解析，および動的載荷による使用性の照査を示した。ここでは、第 2 章の構造計画で設定した床版形状に対して、3 次元弾性 FEM 解析を用いた応答値の算出について、解析方法と解析結果および考察を示した。また、3 次

元弾性 FEM 解析を用いた、たわみの制限値に関する検討についても示した。使用性に関する振動の照査として、動的載荷による振動試験および実車両による載荷試験による検討を示した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 構造計画および断面詳細の設定で検討し、部材寸法を仮定した UFC 床版（スラブ厚 40mm, 床版厚 123mm）および合成桁について、3 次元弾性 FEM 解析を用い、床版作用に対する UFC の応力度を算定し、UFC 指針の設計に用いる応力度の制限値以下となることを確認した。また、主応力の最大および最小値は床版の上下縁で生じ、スラブに対するリブ付け根付近の断面急変部や隅角部に大きな応力度が生じていることを確認した。
- (2) UFC 床版の床版厚を 180mm として、3 次元 FEM 解析を用い、たわみを算定して比較を行った結果、同支間長の鋼床版とたわみが同程度になり、かつ UFC 床版では、鋼床版のたわみにおいて生じているような舗装への影響が生じる局所的にたわみが大きくなることを確認した。
- (3) ワッフル型 UFC 床版の試験体を用い、常時微動計測および自由振動計測を実施し、固有振動数は 51.5～53.8Hz と算定した。土木研究所による実験によって算出されたタンデム式ダンプトラックのバネ下振動数は 13～18Hz であり、床版の振動数と乖離しているため共振の可能性は少ない。

第 3 章の検討により、明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- (1) UFC 床版のたわみによる「舗装の耐久性への影響」や「鋼桁における二次応力による疲労への影響」を直接的、定量的に評価し、床版厚を最適化することが課題である。舗装については、床版上の舗装のひずみを粘弾性解析によって算定し、舗装の耐久性への影響を定量的な評価が可能である。鋼桁の二次応力による疲労についても、解析によって鋼桁に生じる応力度を算定し疲労の影響を照査することは可能であり、今後の実務の設計において最適化をはかることが必要といえる。
- (2) 試験体を用いた振動試験によって、車両のバネ下振動数との共振が生じる可能性が小さいことが示されたが、鋼桁によって支持された状態と支持条件が異なるため、今後の施工時に、実構造物における振動特性を検証することが必要といえる。

第 4 章「解析および静的載荷による断面破壊の照査」では解析、および静的載荷による断面破壊の照査を示した。輪荷重走行試験後の試験体である床版に静的載荷し、破壊の形態、および耐力を確認し、断面破壊に対する安全性の照査を示した。また、UFC 床版内の鋼繊維の配向性状を洗い出し試験で確認し、梁試験体から抜き出した引張強度試験、梁試験体の静的載荷試験によるせん断力による断面破壊の安全性照査を示した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) ワッフル型 UFC 床版（床版厚 123mm）について、断面破壊に対する安全性を照査することを目的として、輪荷重走行試験後の試験体を用いた静的載荷試験を行った。約 270kN で目視によってひび割れが確認され、約 380kN で荷重－変位関係の勾配が低下し始めた。荷重が

第 8 章 結 論

750.8kN で上面が圧縮破壊した。道示における T 荷重 100kN/箇所約 7.5 倍程度あることを確認した。

- 2) UFC 床版の破壊は、床版下面側のリブにひび割れ発生後、床版上面の載荷板角から主として橋軸直角方向にひび割れ、および圧縮破壊領域が拡大した。破壊形態は曲げ圧縮破壊であり、押抜きせん断破壊ではなかった。
- 3) 鋼繊維を、部材軸方向に配向させて製作した 2 種類（試験体 1：プレテンション PC、試験体 2：RC）の梁部材の試験体を用いて、静的載荷によるせん断試験を行った。試験体 1 は最大荷重 384kN、試験体 2 は最大荷重 302kN で破壊形態は両試験体ともせん断圧縮破壊であった。UFC 指針の算定式によるせん断圧縮破壊耐力は試験体 1 が 275kN、試験体 2 が 322kN であり、試験体 1 は試験値が算定式値の 1.40 倍、試験体 2 が 0.94 倍であった。いずれの試験体でも、リブとスラブが分断されるような破壊モードは生じなかった。2 次元弾塑性 FEM 解析では、引張強度を低減したケースにおいて、リブ付根の引張ひずみが卓越することを確認したが、範囲が限定的であり載荷試験結果を踏まえ、リブとスラブが分断する破壊は生じないと推測した。

第 4 章の検討により、明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- ・ 梁試験体における鋼繊維の配向性を洗い出し試験によって確認したが、実構造物においてはこの方法は適用できないため、床版の品質管理に対しては、UFC の硬化後によって繊維の配向性を確認する手法の確立が課題である。今後、非破壊検査等の手法によって繊維の配向を確認する手法の検討が必要である。

第 5 章「輪荷重載荷による疲労破壊の照査」では、輪荷重載荷による疲労破壊の照査を示した。試験体と載荷装置を説明した上で、輪荷重静的載荷試験の試験方法と試験結果を示した。次に輪荷重走行試験の概要、試験方法、試験結果を示し、その結果の考察と疲労破壊の照査を示した。考察においては輪荷重走行試験で生じたひび割れについて、原因推定のために実施した、梁の動的載荷試験によるひび割れの再現に関する検討を示した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 静的特性を把握するため、実物大試験体による輪荷重静的載荷試験を行い、2 方向リブの影響を確認した。その結果、載荷点に近い側のリブ側面の鉛直方向のひずみとして引張が 13×10^{-6} (0.6N/mm^2)、圧縮が 61×10^{-6} (2.8N/mm^2) が生じていることを確認した。直交するリブの影響であるが UFC 指針の設計ひび割れ発生強度以下である。
- 2) 安全性に関する疲労破壊の照査をするため、輪荷重走行試験として、100kN から設計荷重の 2 倍以上である 220kN の輪荷重を計 20 万回の載荷を行った。その結果、最大荷重載荷時点でも、床版のたわみおよび UFC のひずみは弾性範囲内であることがわかった。また、床版同士の接合部についてもボルト軸力も弾性範囲内であり、複数枚が連続する床版構造として、試験を実施した載荷回数の範囲においては疲労破壊しないことを明らかにした。
- 3) 20 万回載荷後に床版上に水を張った状態で 130kN～160kN の輪荷重を計 4 万回載荷したが、

床版に劣化は生じず健全な状態であった。このため、浸水状態においても、試験をおこなった範囲においては疲労破壊しないことを明らかにした。

- 4) 190kN 載荷時に幅 0.04mm 未満のひび割れがリブ側面に確認されたが、床版の挙動からは剛性の低下は確認されなかった。よって、試験における載荷範囲である設計荷重の 2 倍程度までにおいては、剛性低下しないことがわかった。また、0.04mm 未満のひび割れは UFC 指針の引張軟化特性において引張応力が低下しない領域であることから、このひび割れの輪荷重に対する耐荷性能への影響はなく、耐荷性が長期的に低下することもほばないと考えられる。
- 5) 輪荷重走行試験終了時の等価繰返し回数において、既往の PC 床版の実験結果と比較すると、正規化たわみが小さい。また、この等価繰返し回数は阪神高速道路における実測軸重によって算出した 100 年の等価繰返し回数の 86 倍であり、安全性に関する疲労破壊しにくい構造といえる。

第 5 章の検討により、明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) UFC 床版が輪荷重走試験によって十分高い耐疲労性を有することは確認できたが、床版の疲労限界状態となるまでは載荷しておらず、本床版がどこから劣化するかは明らかとなっていない。実構造の維持管理において、どの部位に着目して点検するかという観点から、今後、UFC 床版の疲労限界状態における劣化を把握することが望ましい。
- 2) UFC 床版の疲労破壊は、ひび割れの開口後に荷重が繰返し載荷されることによって、ひび割れの開口が進むと推測する。よって、使用性における変動作用時の応力状態が、疲労破壊に影響する。使用性の照査においてひび割れを許容しない現設計であれば問題ないが、今後、使用性においてひび割れを許容する場合は、疲労破壊への影響が懸念されるため、変動作用時の応力状態、ひび割れ状態と疲労破壊に対する安全性の関係を明らかにすることが課題といえる。

第 6 章「静的および動的載荷による接合部の照査」では、静的、および動的載荷による接合部の照査を示した。UFC 床版と鋼桁の、スタッドを用いた接合部について、接合部の充填材料の検討、および接合部の押し抜き試験による使用性および安全性の照査、動的載荷による疲労破壊に対する安全性の照査を示した。また、床版同士の接合部についても、静的載荷による断面破壊に対する安全性の照査を示した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 間詰め部の無収縮モルタルの補強法として、溶接金網による補強、高密度ポリエチレン繊維を混入した接合部について押し抜きせん断試験を行い、PE 繊維（長さ 6mm、径 12 μ m、0.2vol.%）の耐力が 155kN と最も大きくなることがわかった。
- 2) ずれ止めに耐力の 60%、50%、35%の変動荷重を動的載荷し、合成桁のずれ止めのせん断疲労強度式の破壊回数を上回る結果となることを確認した。
- 3) 床版同士の接合部に関する断面破壊の照査として、輪荷重走行試験に用いた試験体から切り出した試験体による静的載荷試験を行った。床版下面のひずみおよびボルトのひずみ増加か

第8章 結論

ら、約 30kN で目開きが生じたと推測した。ひび割れは 40kN で生じ、端部リブの付け根で UFC 床版のひび割れが開口し 50.8kN で破壊に至った。T 荷重 100kN に相当の荷重は 7.9kN であることから、接合部の耐力は設計荷重の 6.4 倍であった。

- 4) 床版同士の接合部における静的載荷によるひび割れ発生状況を踏まえ、接合部のプレストレス分布が均等になるように、床版内 PC 鋼線の付着伝達長と、高力ボルトのプレストレス分布を踏まえて、端部リブの寸法を決定する必要があるといえる。

第6章の検討により、明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) スタッド孔や間詰部の充填材料として、高密度ポリエチレン繊維を混入したモルタルが、充填性を満足し押抜き試験でも高い耐力が得られることを確認したが、橋梁の縦断勾配や横断勾配による流動に影響を確認することが課題である。今後、実橋への施工時には事前試験で検討する必要がある。
- 2) 接合部の安全性について照査し、十分な安全性を有することを確認したが、鋼桁等の上部構造全体における接合部以外の部位の耐力や破壊順序などが明らかとなっていない。今後、実橋の設計時には、上部構造全体における破壊順序の階層化について検討が必要といえる。

第7章「性能照査型設計法の提案」では、近年の性能照査型設計法に関する状況を示した上で、第2章から第6章の成果を踏まえた、UFC床版の性能照査型設計法を提案した。設計の流れ、要求性能の設定、安全係数、構造計画、構造詳細の設定を示した上で、使用性、安全性、および接合部に対する照査方法の標準を示した。また、UFC床版の維持管理計画として、維持管理の流れと、点検の精度向上、および維持管理の効率化に関する検討を示した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 構造計画、構造詳細の設定では、UFC床版の形式選定における考え方と、ワッフル型UFC床版の断面形状の設定方法を示した。また床版を支える鋼桁および鋼床組の計画についても方針を示した。断面形状の設定について、施工および維持管理への配慮が必要であり、床版同士の接合部における高力ボルトの取り外しに対するリブ間隔の設定や、舗装補修時の過切削に留意が必要である。
- 2) 使用性の照査について、応答値の算出および照査、振動に関する照査の標準を示した。照査は、応力度の制限値に対する照査と、スラブとリブの付け根などに局所的な応力が生じていないことを確認する。また、床版の応力度について、第4章および第5章を踏まえ、設計ひび割れ強度を制限値として設計することで、断面破壊、および疲労破壊の安全性が確保されるといえる。
- 3) 安全性の照査について、断面破壊に対する耐荷力の算定および照査、疲労破壊に対して輪荷重走行試験による照査の標準を示した。断面破壊の照査は、耐荷力が設計断面力よりも大きいことの確認であり、疲労破壊の照査は、設計耐用期間において疲労破壊が生じないことを確認するものである。また、脆性的な破壊とならないことを確認するものとする。

- 4) UFC床版の維持管理について、維持管理の流れとして点検、対策の手順を示した。また、点検精度の向上策として、光ファイバによるひずみ計測によるひび割れ検知と、光ファイバによるPC鋼材の緊張力モニタリングが可能である。また、UFC床版の特徴を活かした維持管理の効率化として、材料の均一性を活かした赤外線応力計測の適用性、プレキャスト部材であることを活かした製作時の寸法のデータ化、現場での接合部施工を活かした、床版取替えが容易になる構造を示した。

第 7 章の検討により、明らかとなった課題と今後の展望は以下の通りである。

- 1) 本研究では指針等を参考に設計に用いる安全係数を設定したが、今後、載荷実験結果や実施工における品質管理のデータを蓄積し、分析することで見直す必要があるといえる。
- 2) 構造詳細の設定において、維持管理への配慮として過切削対策の必要性を示した。かぶりに過切削を想定した付加的なかぶりを設けることを提案したが、質量やコストへの影響が課題である。今後、UFCの透水性の高さを活かした防水層や舗装の省略、および過切削技術の向上に向けた検討が必要といえる。
- 3) 疲労破壊に対する安全性の照査における輪荷重走行試験は、時間とコストを要する大規模な試験であることが今後の実務への適用における課題である。今後、輪荷重走行試験を代替する解析的評価手法の開発が必要といえる。
- 4) 点検精度の向上として、目視点検を補助する目的で光ファイバによるひび割れ検知の有効性を示したが、橋梁全長に設置することは、コストの面で現実的でない。今後、橋梁の中で設置する床版位置を、供用後の損傷発生状況などを踏まえ、検討が必要といえる。

謝 辞

本論文は、筆者が阪神高速道路株式会社において取り組んだ、UFC 床版に関する一連の研究成果を取りまとめたものです。この間、研究を進めるにあたり多くの方々から貴重なご指導、ご助言を賜りました。

神戸大学大学院准教授 三木朋広博士には、本論文をまとめる機会を与えて頂くとともに、本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり、終始暖かく懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました。また、「UFC を用いた道路橋床版に関する検討会」、「土木学会技術評価委員会」、「UFC 道路橋床版研究会 技術委員会」において、委員として研究内容を審議して頂きました。コンクリート構造物としての研究における原因究明や一般化の重要性を教えて頂き、UFC 床版の研究に関して筆者の認識を深めることができましたのも、三木朋広先生との出会いがあつてのことと確信をしております。ここに心より御礼を申し上げます。

本論文の審査をお引き受け頂きました神戸大学大学院教授 芥川真一博士、神戸大学大学院教授 長尾毅博士、神戸大学大学院教授 森川英典博士には、本論文のとりまとめにあたり、貴重なご指導とご助言を賜りました。森川英典先生には、「阪神高速道路株式会社 技術審議会 構造技術委員会 コンクリート構造分科会」、「大阪湾岸道路西伸部 技術検討委員会 コンクリート構造小委員会」において、委員として研究対象およびプロジェクトについてご指導を賜り、UFC の材料特性を踏まえた設計、施工および維持管理を踏まえた研究の重要性を教えて頂きました。ここに厚く御礼を申し上げます。

UFC 床版の研究開発は、「UFC を用いた道路橋床版に関する検討会」、「土木学会技術評価委員会」で、研究開発内容をご審議頂くことで、実構造物の実現に辿りつくことができました。大阪大学名誉教授 松井繁之博士には検討会委員として、床版研究全般、特に輪荷重走行実験による疲労耐久性に関する研究についてご指導を賜りました。長岡技術科学大学名誉教授 長井正嗣博士には検討会委員として、UFC 床版と鋼桁による合成桁としての設計、施工についてご指導を賜りました。東京工業大学大学院教授 二羽淳一郎博士には検討会委員、評価委員会委員長および研究会会長として、UFC の材料や構造に関する研究全般についてご指導を賜りました。岐阜大学教授 内田裕市博士には、検討会委員、評価委員会委員および研究会技術委員会委員長として、UFC の材料や施工と設計の関係性についてご指導を賜りました。埼玉大学大学院教授 奥井義昭博士には、研究会技術委員会委員として合成桁の設計についてご指導を賜りました。近畿大学教授 東山浩士博士には、研究会技術委員会委員として鋼桁上の床版に関する研究についてご指導を賜りました。公益財団法人鉄道総合技術研究所 谷村幸裕博士、中日本高速道路株式会社 青木圭一博士（委員当時、株式会社高速道路総合技術研究所）には評価委員会委員として実

務的視点から有意義なご意見を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。

UFC 床版の阪神高速道路の橋梁への適用にあたっては、阪神高速道路株式会社の「技術審議会 構造技術委員会 コンクリート構造分科会」、「大阪湾岸道路西伸部 技術検討委員会 コンクリート構造小委員会」において審議して頂きました。東京大学名誉教授、城西大学学長 藤野陽三博士には、技術検討委員会委員長として、先進技術の適用についてご指導を賜りました。京都大学名誉教授 宮川豊章博士には、技術検討委員会副委員長として、研究開発における論理の一貫性、整合性の大切さについてご指導を賜りました。大阪工業大学教授 井上晋博士には、分科会主査、小委員会幹事として、本床版のプレキャスト PC 構造についてのご指導を賜りました。横浜国立大学大学院教授 前川宏一博士には、湾岸道路西伸部に関する UFC 床版に関する有識者として、UFC の部材厚に対する設計上の配慮についてご指導を賜りました。大阪大学大学院教授 鎌田敏郎博士には分科会委員、小委員会委員として、PC 構造の設計および維持管理についてご指導を賜りました。東京工業大学大学院教授 岩波光保博士には小委員会委員として、繊維補強コンクリートの設計における繊維の配向性の評価についてご指導を賜りました。ここに諸先生に厚く御礼を申し上げます。

また、UFC 床版の研究は、共同研究など様々な場で諸先生にご指導を賜ることで研究開発を遂行することができました。横浜国立大学大学院准教授 藤山知加子博士には、疲労に関する解析の評価に関する共同研究を通じてご指導を賜りました。大阪工業大学教授 大山理博士には、耐火性評価に関する共同研究を通じてご指導を賜りました。宇都宮大学名誉教授 中島章典博士には、スタッドを用いた接合部の挙動についてご指導を賜りました。岐阜大学名誉教授 六郷恵哲博士には、FRC の国際シンポジウム BEFIB で本研究を海外に紹介する機会を賜りました。山口大学名誉教授 宮本文穂博士には、山口県での UHPFRC 国際ワークショップで国内外の研究者の方々と議論する機会を賜りました。これらの機会国内外における UHPC や UHPFRC 研究の視点から貴重なご意見を頂くことができました。スイス連邦工科大学ローザンヌ校 EPFL 教授 Eugen Brühwiler 博士には、上記の UHPFRC 国際ワークショップ後に宮本文穂先生と大阪で、UFC 床版の試験や建設現場をご視察頂き、UFC を用いた構造や設計のあり方についてご意見を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。また、神戸大学大学院工学研究科コンクリート構造研究室の皆様には、ゼミの場を通じて UFC 床版の構造や研究について貴重なご意見を賜りました。博士後期課程に在籍されていた生田麻実様には論文審査の折など励ましを頂き誠にありがとうございました。

UFC 床版の開発は、共同研究者である鹿島建設株式会社の多くの方のご支援がなければ成し得なかったと思っています。約 10 年間にわたり一宮利通氏、齋藤公生氏、藤代勝博士、村岸聖介氏、渡邊有寿氏には、膨大な解析や実験、試験施工にご尽力、ご助言を頂くとともに、検討会、

技術評価委員会、研究会の委員および事務局として多大なご協力を頂きました。株式会社総合技術コンサルタントの宮花邦宏氏、渡邊裕規氏には、合成桁としての設計に関する検討にご尽力を頂きました。UFC 道路橋床版研究会の会員各社の方々には、設計や施工についてご助言を賜りました。ここに厚く御礼を申し上げます。

本研究は、“軽量かつ耐久性の高いコンクリート系床版の開発”として阪神高速道路株式会社において、2011 年にスタートしました。UFC を用いた床版の開発を発案され、筆者にこのプロジェクトに参画する機会を与えて頂くとともに、三木朋広先生のもとで論文のとりまとめの機会を頂きました阪神高速道路株式会社フェロー金治英貞博士に深く感謝いたします。今日まで常に研究に対するご助言と励ましを頂いたことで、ここまで継続することができました。また、本研究は阪神高速道路株式会社の多くの方々のご支援がなければ成し得なかったことと思います。特に、加賀山泰一博士、鈴木威氏、佐々木一則博士、田畑晶子博士、杉山裕樹氏、篠原聖二博士、青木康素博士、飛ヶ谷明人博士、近藤恒樹氏（現神戸市建設局）、西海能史氏、西原知彦氏、UFC 床版検討会事務局、湾岸線橋梁計画プロジェクトチーム（長大橋技術レビュープロジェクトチーム）、技術継承コンクリートチームの皆様には、本研究へご支援、ご指導を頂きました。また、玉出入路橋の床版取替え、および信濃橋入路橋の新設における UFC 床版の設計、施工など、UFC 床版の開発に関係したすべての方に感謝の意を表します。建設事業本部 神戸建設部の皆様には、業務等でご迷惑をおかけすることもあったかと思いますが、本研究の遂行に多大なご支援を頂きました。感謝の念に堪えません、厚く御礼を申し上げます。

間接的ではありますが、私が阪神高速道路株式会社で本研究に恵まれましたのは、大阪工業大学橋梁工学研究室に入り、故大阪工業大学名誉教授 栗田章光博士という恩師に出会え、鋼コンクリート合成桁を研究することができたことと、前職において株式会社日本構造橋梁研究所で、10 年間にわたり橋梁の設計に携われた結果であると信じております。これまでのご指導に感謝の気持ちで一杯です。また、大学院の頃から委員として参画させて頂いた、鋼橋の外ケーブル補強研究会や、fib ネットワークの諸先輩方には、技術者としてあり方やつながりの大切さを教えていただくともに、本研究についても各所でバックアップして頂いております。貴重なご縁を頂いたことに感謝し、厚く御礼を申し上げます。

最後に、本研究の遂行のみならずこれまで心の支えとなった両親と、妻 奈保子、そして長男 敏寛、次男知之に感謝したいと思います。

関連論文

1. 審査論文

第2章と第7章は次の論文からなる.

- [1] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の既設橋への適用に関する検討, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.14, 195-200, 2014
- [2] Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI, Toshimichi ICHINOMIYA, Masaru FUJISHIRO : Development of a Bridge Deck Using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, Proceedings of the 9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 416-425, 2016
- [3] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代勝, 三木朋広: ワッフル型 UFC 床版の構造設計および使用性検討, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.3, 473-490, 2018

第3章は次の論文からなる.

- [4] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.22, 401-404, 2013
- [5] Takashi KOSAKA, Yoshifumi NISHIUMI, Toshimichi ICHINOMIYA, Kimio SAITO : Development and serviceability of a highway bridge deck using ultra-high performance fiber-reinforced concrete, Wiley Civil Engineering Design, Vol.1, Issue2, 54-63, 2019

第4章は次の論文からなる.

- [6] 一宮利通, 樽谷早智子, 金治英貞, 小坂 崇: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の安全性に関する実験的研究, コンクリート工学, Vol.53, No.8, 698-702, 2015
- [7] 小坂 崇, 佐藤彰紀, 一宮利通, 藤代 勝: UFC 道路橋床版の開発と大規模更新への適用性検討, コンクリート工学, Vol.54, No.1, 21-27, 2016
- [8] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝: 床版取替えに対応した UFC 道路橋床版の開発, プレストレストコンクリート, Vol.59, No.2, 108-111, 2017

第5章は次の論文からなる.

- [9] Takashi KOSAKA, Hidesada KANAJI, Toshimichi ICHINOMIYA, Kimio SAITO: Development of a Highway Bridge Deck Using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, Proceedings of the IABSE Conference Nara, NM-2(1-8), 2015

- [10] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤彰紀: 超高強度繊維補強コンクリート (UFC) を用いた道路橋床版の開発, 阪神高速道路技報, Vol.28, 46-53, 2016
- [11] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝, 三木朋広: ワッフル型 UFC 床版の輪荷重載荷による静的特性および耐疲労性, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.3, 491-503, 2018

第 6 章は次の論文からなる.

- [12] 横田祐起, 金治英貞, 小坂 崇, 一宮利通: UFC 床版と鋼桁の接合部に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.26, 575-580, 2017
- [13] 横田祐起, 小坂 崇, 佐藤彰紀, 一宮利通: UFC 床版と鋼桁の接合部における間詰め厚さの影響に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.27, 195-200, 2018

II. その他論文, 報告

2013 年

- [1] 小坂 崇, 金治英貞, 飛ヶ谷明人, 一宮利通, 齋藤公生: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の開発, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 861-862, 2013
- [2] 齋藤公生, 一宮利通, 平陽兵, 小坂 崇, 金治英貞, 飛ヶ谷明人: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い道路橋床版の輪荷重走行試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 863-864, 2013
- [3] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 連続合成桁に用いる超高強度繊維補強コンクリート道路橋床版の開発, 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 5-1-5-8, Vol.10, 2013
- [4] 一宮利通, 齋藤公生, 小坂 崇, 金治英貞: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の輪荷重走行試験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.22, 405-408, 2013
- [5] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: 軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発, 日本道路会議論文集, Vol.30, 5005(1-2), 2013

2014 年

- [6] 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 齋藤公生: 鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.1, 37-42, 2014
- [7] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 齋藤公生: UFC 道路橋床版の既設橋への適用に関する解析

的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 33-34, 2014

- [8] 樽谷早智子, 一宮利通, 齋藤公生, 小坂 崇, 金治英貞: UFC 道路橋床版の接合構造に関する実験的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 35-36, 2014
- [9] 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 樽谷早智子: 薄肉 UFC プレテンション部材の構造性能に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 599-604, Vol.23, 2014

2015 年

- [10] 一宮利通, 樽谷早智子, 小坂 崇, 金治英貞: UFC を用いたリブ付きプレテンション床版のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, 1129-1134, 2015
- [11] 藤代 勝, 一宮利通, 小坂 崇, 金治英貞: 橋梁床版取替えに UFC 床版を用いた場合の構造影響について, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 395-396, 2015
- [12] 一宮利通, 樽谷早智子, 金治英貞, 小坂 崇: UFC 床版と鋼桁の接合構造に関する基礎的研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 397-398, 2015
- [13] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤彰紀, 一宮利通, 藤代 勝: 平板型 UFC 道路橋床版の設計手法に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 399-400, 2015
- [14] 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 樽谷早智子: UFC 床版と鋼桁の接合に関する基礎的研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, 407-410, 2015
- [15] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤彰紀, 一宮利通, 藤代勝: 平板型 UFC 床版の既設 RC 床版更新への適用性に関する検討, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, Vol.15, 447-452, 2015

2016 年

- [16] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤彰紀, 一宮利通, 藤代 勝: ワッフル型 UFC 床版床組の構造および剛性に関する検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 715-716, 2016
- [17] 藤代 勝, 一宮利通, 小坂 崇, 金治英貞: ワッフル型 UFC 床版の振動およびたわみに関する検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 717-718, 2016
- [18] 一宮利通, 今井道男, 小坂 崇, 藤代 勝: 光ファイバを用いた UFC 床版のひずみ計測, 土木学会第 71 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 719-720, 2016
- [19] 藤代 勝, 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇: 超高強度繊維補強コンクリートを用いたワッフル型 UFC 床版の開発, 道路橋床版シンポジウム論文報告集, Vol.9, 181-186, 2016
- [20] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた平板型 UFC 床版による既設床版の取替え検討, 道路橋床版シンポジウム論文報告集, Vol.9, 187-192, 2016
- [21] 一宮利通, 金治英貞, 小坂 崇, 藤代 勝: UFC 道路橋床版の耐荷性状に関する検討, プレス

トレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.25, 173-178, 2016

2017 年

- [22] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤 彰紀, 一宮利通, 藤代 勝 : UFC 床版による既設 RC 床版の取替えに関する検討, 高速道路と自動車, Vol.60, No.3, 40-44, 2017
- [23] 小坂 崇, 金治英貞, 佐藤 彰紀, 一宮利通, 藤代 勝 : 床版取替えに対応した UFC 道路橋床版の開発, 橋梁と基礎, Vol.51, No.5, 41-44, 2017
- [24] 杉山裕樹, 小坂 崇, 金治英貞 : 阪神高速における更新・改築に適した新技術開発, 橋梁と基礎, Vol.51, No.8, 95-99, 2017
- [25] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝 : 床版取替えに対応した UFC 床版の疲労耐久性に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 309-310, 2017
- [26] 一宮利通, 金治英貞, 藤代 勝, 小坂 崇, 横田祐起 : UFC 床版と鋼桁の接合部の設計法に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 311-312, 2017
- [27] 藤代 勝, 小坂 崇, 一宮利通, 金治英貞 : ワッフル型 UFC 床版同士の接合構造に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 313-314, 2017
- [28] 田口翔大, 鎌田修, 小坂 崇, 一宮利通 : UFC 道路橋床版と舗装材料との付着特性に関する検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, 第 V 部門, 69-70, 2017
- [29] 横田祐起, 金治英貞, 小坂 崇, 一宮利通 : RC 床版の取替えに適した UFC 床版の輪荷重走行試験, 第 29 回構造物の診断と補修に関する技術・研究発表会論文集, 13-19, 2017
- [30] 戸田圭彦, 小坂 崇, 一宮利通, 鎌田 修 : 線形粘弾性解析による UFC 道路橋床版上のアスファルト舗装の変形特性に関する研究, 土木学会論文集 E1, Vol.73, No.3, I_9-I_17, 2017
- [31] 小坂 崇, 金治英貞, 一宮利通, 藤代 勝 : 床版取替えに対応した UFC 床版の疲労耐久性に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.26, 569-574, 2017

2018 年

- [32] Thi Thu Dung NGUYEN, Toshimichi ICHINOMIYA, Yuki YOKOTA, Akinori SATOU, Takashi KOSAKA : SHEAR CAPACITY OF HEADED STUD CONNECTION BY 3D FEM ANALYSIS, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集, CS2, 107-108, 2018
- [33] Yoshifumi NISHIUMI, Takashi KOSAKA, Toshimichi ICHINOMIYA, Kimio SAITO : Development and Serviceability of a Highway Bridge Deck Using Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, Proceedings of the 12th Japanese German Bridge Symposium, 1-11, 2018
- [34] Yojiro MURAKAMI, Takashi KOSAKA, Akinori SATO, Seisuke MURAGISHI, Kimio SAITO, Yasuo KAWABATA : Design and Construction of UHPFRC Deck for Replacement of Deteriorated Concrete Slab, Proceedings of the 40th IABSE Symposium Nantes, IABSE, S8, 17-24, 2018

- [35] Yuki YOKOTA, Hidesada KANAJI, Takashi KOSAKA, Toshimichi ICHINOMIYA, Masaru FUJISHIRO : Wheel Running Fatigue Test of UHPFRC Deck Slab for Highway Bridges, Proceedings for the 5th International fib Congress, 917-926, 2018

2019 年

- [36] Thi Thu Dung NGUYEN, Toshimichi ICHINOMIYA, Akinori SATOU, Takashi KOSAKA : PARAMETRIC STUDY ON SHEAR CAPACITY OF JOINT BETWEEN UFC SLAB AND STEEL GIRDER USING HEADED STUDS BY FEM ANALYSIS, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, 1039-1044, 2019
- [37] 小嶋進太郎, 一宮利通, 永井勇輔, 小坂 崇, 長澤光弥, 近藤恒樹 : 高強度繊維補強モルタルを間詰めとした UFC 床版と鋼桁の接合部にする検討, 土木学会第 74 回年次学術講演会概要集, 第 V 部門, 59, 2019
- [38] 小嶋進太郎, 小坂 崇, 長澤光弥, 一宮利通 : 高強度繊維補強モルタルを間詰めとした UFC 床版と鋼桁の接合部に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.28, 351-356, 2019

2020 年

- [39] 小坂 崇, 福岡純一, 杉山貴教, 藤原理絵, 一宮利通, 齋藤公生 : 都市高速道路の UFC 床版による長寿命化, 橋梁と基礎, Vol.54, No.8, 93-97, 2020
- [40] 一宮利通, 永井勇輔, 小坂 崇, 近藤恒樹 : 輪荷重走行試験によるワッフル型 UFC 床版の耐疲労性評価, 土木学会第 75 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 362, 2020
- [41] 藤代 勝, 一宮利通, 小坂 崇, 近藤恒樹 : ワッフル型 UFC 床版の損傷過程および破壊モードに関する解析的検討, 土木学会第 75 回年次学術講演会概要集, 第 I 部門, 363, 2020
- [42] 濱崎浩太, 小坂 崇, 一宮利通, 永井勇輔 : 動的および静的圧縮試験による UFC の剛性変化に関する検討, 土木学会第 75 回年次学術講演会概要集, 第 V 部門, 218, 2020
- [43] 永井勇輔, 一宮利通, 小坂 崇, 近藤恒樹 : 輪荷重走行試験によるワッフル型 UFC 床版の耐疲労性評価, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.29, 589-594, 2020
- [44] 藤代 勝, 一宮利通, 小坂 崇, 近藤恒樹 : ワッフル型 UFC 床版の輪荷重による損傷過程の解析的検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.29, 29-34, 2020

神戸大学博士論文「ワッフル型 UFC 床版の性能照査型設計法の提案」全 183 頁

提 出 日 2021 年 1 月 20 日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

©小坂 崇

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。