

論文

UHPFRC を用いた RC 梁の上面打替え補強に関する実験的研究

福岡 恵介^{*1}, Elham A. Mohamed^{*2}, Weichen Ning^{*1}, 三木 朋広^{*3}

Experimental Study on Overlay Repairing for RC Beams Using UHPFRC

Keisuke FUKUOKA^{*1}, Elham A. Mohamed^{*2}, Weichen Ning^{*1} and Tomohiro MIKI^{*3}

要旨：本研究では、高速道路高架橋の RC 床版の損傷に応じた補強方法を提案することを最終目的として、約 50 年供用された橋梁から撤去された RC 床版の調査ならびに超強度繊維補強コンクリート(UHPFRC)を用いて上面打替え補強した RC 梁の曲げ載荷試験を行った。曲げ載荷試験では、UHPFRC の厚さが異なる 2 体の UHPFRC-RC 梁を使用し、未補強の供試体を想定した非線形解析の結果と比較して、RC 梁の上面補強の効果について考察した。また、UHPFRC 層の剥離を把握するために、界面に埋込みゲージを設置し、界面のずれ挙動を計測した。実験結果から、UHPFRC の上面補強の厚さが大きいほど曲げ耐力は向上するが、変形性能が若干低下することがわかった。

キーワード： 上面補強、高速道路床版、UHPFRC、上面打替え、剥離

1. はじめに

近年、我が国では高速道路床版の損傷が問題になっている。重車両の繰返し走行による疲労劣化に加えて、凍結防止剤の使用量増加に伴う鉄筋腐食の事例が報告されており、劣化形態が多様化している。その劣化機構や損傷過程のいずれも明らかにならず、これらの劣化により損傷した床版では、補修後に比較的早期に再劣化する事例も見られることから、更新・補修技術へのニーズが高まっている¹⁾。

超高性能繊維補強コンクリート(UHPFRC; Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, 以下「UHPFRC」と称する)を用いた上面増厚工法が注目されている。UHPFRC は一般に粗骨材を用いず、補強用の鉄筋と一緒に用いないことが多いため、通常の鉄筋コンクリート構造物に比べて部材を非常に薄くできる。国内での事例は少ないものの、超高強度・高緻密という材料特性をもつ UHPFRC を上面増厚工法に適用することで、より耐久性の高い床版が構築でき、補強効果の飛躍的な上昇が期待できる²⁾。

高速道路高架橋の RC 床版の損傷に応じた補強方法を提案することを最終目的として、本論文ではまず約 50 年供用された橋梁から撤去された RC 床版を調査し、撤去床版における損傷状態について把握することを試みた。また、同様の断面幅、鉄筋比で撤去床版を再現した RC 梁を作製し、上面を UHPFRC で補強した試験体を用いて曲げ載荷試験を行うことによって、上面補強の効果を検討すると

ともに、今後実施予定の撤去床版に対する同様の実験の基準となるデータを得ることをめざした。載荷試験では、UHPFRC 層と RC 層の界面に埋込みゲージを設置し、界面の剥離の性状を調べた。

2. 高速道路撤去床版のひび割れ調査

2.1 概要

本研究では、豊中高架橋(下り線)から撤去された RC 床版の損傷状況を調査した。豊中高架橋は、西日本高速道路株式会社(以下「NEXCO 西日本」と称する)管内の中国自動車道に存在する高架橋であり、橋長 80m、最大支間長 20m の 4 径間を一連とした単純合成桁連結構造で構成された³⁾。RC 床版は場所打ちコンクリートで施工された。1970 年開催の大阪万博直前に供用を開始し、建設から約 50 年が経過している。NEXCO 西日本は、桁床版の取替え工事、および豊中高架橋を含む複数の高架橋に対し、鋼桁架替え工事を行っている³⁾。今回調査対象の床版は、その際に撤去されたものである。本研究では、豊中高架橋(下り線) P22-P26 の区間のうち、図-1 に示す位置の床版 E, F, N, O, P, Q, R, S に対してひび割れ調査を行った。

2.2 調査床版の寸法

今回調査した床版はほぼ同じ大きさになるように 3 分割され、図-1 の車両進行方向から順に n-3, n-2, n-1 (n には E, F, N, O, P, Q, R, S のいずれかが入る)と名前をつけた。床版は記名されている面を上面と

*1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士前期課程

*2 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 博士後期課程

*3 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 准教授

し、名前が読める向きを正面とした。分割された床版の寸法は床版ごとに異なるが、おおよそ幅 600mm、高さ 220mm、奥行き 3300mm であった。

2.3 目視調査の結果と考察

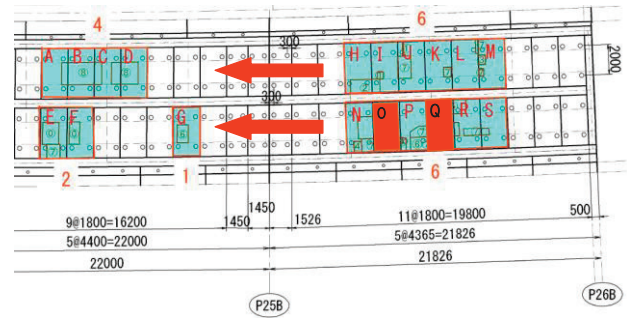
(1) 橋梁全体の損傷

床版の切断面の目視観察から、連続した位置にある床版でも損傷具合は一様ではなく、損傷の大きい床版と小さい床版が混在していることがわかった。今回調査した床版のうち、図-1 に示すように床版 N, O, P, Q, R, S は連続した位置に存在したが、これらの床版のうち床版 N, P では損傷が小さく、一方、床版 O, Q では損傷が大きいといった違いがみられた。一例として、図-2 に特に損傷が顕著だった床版 O-1、図-3 に比較的健全であった床版 N-1 の様子を示す。

(2) 各床版の様子

今回対象とした床版では、その位置によって損傷の程度に差がみられた。特に、床版 F と床版 E では損傷程度が著しく異なった。図-4 に床版 F の調査結果を示す。床版 F-3 に比べ、F-1 と F-2 の損傷は大きかった。特に、F-1 右側面、F-2 左側面でひび割れが多数確認された。床版 F は、中央左よりの部分の損傷が顕著であると考えられる。床版 F-3 の右隣にあった E-1 においても F-3 同様に損傷は小さかった。一方、E-2 と E-3 は E-1 に比べて損傷が大きかった。E-2 の右側面、E-3 の左側面、つまり床版 E の中央付近の損傷が顕著であったと考えられる。

今回調査した床版の中で、床版 O, Q は全体的に損傷の大きい床版であった。O-1, O-2, O-3 の 3 体とも、側面下部を中心にひび割れが顕著にみられた。Q-1, Q-2, Q-3 の 3 体は、側面下部を中心にひび割れが顕著にみられ、側面部に大きな欠損が確認された。一方、床版 N, P は比較的健全な床版であった。



* 図中の矢印は車両進行方向を示す。特に損傷が激しい床版を赤色で着色した。

図-1 高速道路高架橋における撤去床版の位置



図-2 床版 O-1 ひび割れの様子



図-3 床版 N-1 ひび割れの様子

N-1 と N-2 は、今回調査した全 24 体の床版の中で最も損傷が小さかったが、床版 O と接している N-3 右側面の損傷度合いは大きかった。床版 N は、左端部から中央部にかけて損傷が少ないが、床版 O 側に近づくにつれ損傷度合いが大きくなっていると考えられる。P-1 と P-2 は側面部の損傷が少なかった。P-3 は右側面のひび割れが目立ち、欠損も生じていた。床版 P は左端部から中央部にかけてひび割れが小さく、比較的健全であったと考えられる。

(3) 調査結果の考察

以上の調査より、床版によって損傷の程度に差があることが明らかになった。損傷の種類を把握する

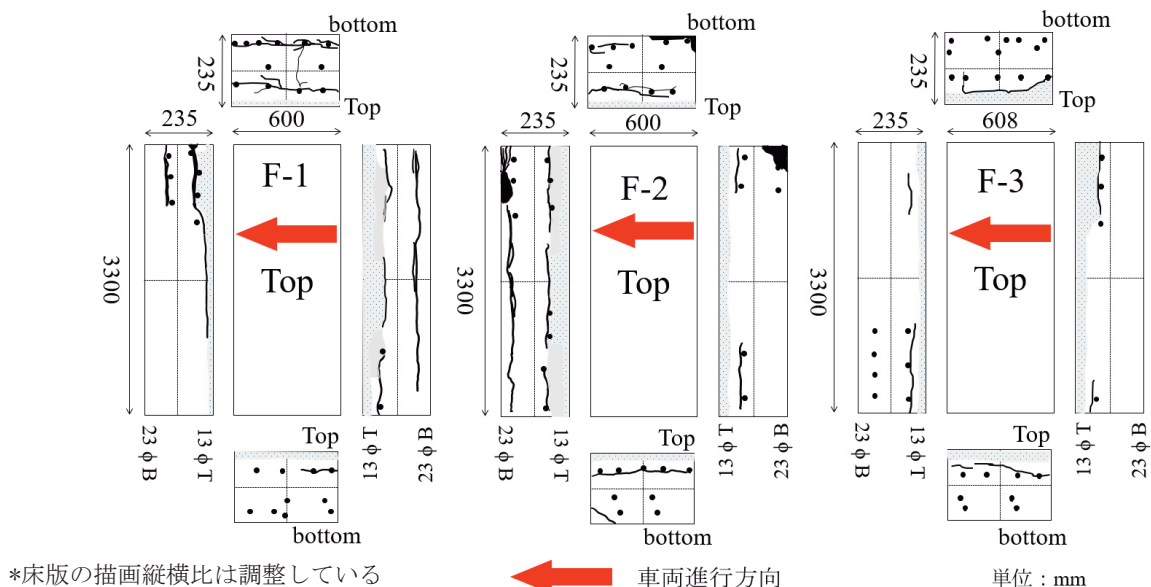
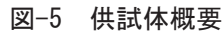


図-4 床版 F のひび割れ、剥離等の損傷図



*印はB-50のみ設置 単位：mm

表-2 本研究に使用した UHPFRC の配合

Figure 1 shows the cross-sectional diagrams of specimens B-50 and B-20. Both specimens have a total width of 750mm at the center. Specimen B-50 consists of a UHPFRC layer (10mm thick) with four horizontal bars (10mm spacing), a 20mm gap, and an RC layer (10mm thick). Specimen B-20 consists of a UHPFRC layer (10mm thick) with two horizontal bars (10mm spacing) and an RC layer. A vertical dashed line indicates the center of the specimen (750mm from the end). A red bar represents the 'ひずみゲージ' (strain gauge).

図-6 上面・側面ひずみゲージ位置

ートの圧縮応力-ひずみ関係には **Parabolic** モデルを採用した。また、コンクリートの引張応力-ひずみ関係には **Exponential** モデルを採用した。圧縮強度は 30 N/mm^2 とし、引張強度は 2.5 N/mm^2 、引張破壊エネルギーは 0.089 N/mm とした。離散鉄筋モデルの埋込み鉄筋要素を用い、完全付着を仮定し、破壊基準として **Von Mises** の降伏基準を適用した。

3.4 使用材料

NC には、早強ポルトランドセメントを使用し、混和剤として AE 減水剤を用いた。圧縮強度は 36.2 N/mm^2 、静弾性係数は 32100 N/mm^2 であった。

また、RC 床版の上面補強を目的として、UHPFRC を使用した。本研究に使用する UHPFRC の配合を表-2 に示す。この UHPFRC は、セメントと特殊混和材を含むプレミックス粉体、細骨材、特殊鋼繊維、特殊減水剤及び水で構成されている。使用したプレミックス粉体は、ポルトランドセメント、ポズラン材およびエトリンガイト生成系材料からなる。鋼繊維として、引張強度 2000 N/mm^2 以上、直径 0.2 mm で、繊維長が 15 mm の補強繊維を用いた。本研究では繊維混入率（体積率）を 3.0% とした。圧縮強度は 118 N/mm^2 、静弾性係数は 48400 N/mm^2 であった。

作製した B-20, B-50 とも, RC 部分の軸方向鉄筋には D13 を 3 本用い, 組立鉄筋に D6 を使用した.

3.5 UHPFRC-RC 境界面の条件と計測

B-20, B-50 とともに下層 RC を打設した後に, UHPFRC を打設した. 本研究では, RC と UHPFRC の境界面

-649-

に接着剤は使用しなかった。RC 打設時に生じた上面の凹凸は、グラインダーで研磨して取り除いた。

また、RC 層と UHPFRC 層をまたぐように埋込みゲージを設置した。下層の RC を打設し、上面を滑らかにならした後、コンクリートが硬化しないうちにゲージを RC に対して垂直方向に埋め込んだ。埋込みの深さはゲージの半分が埋まる位置とした。RC 層のコンクリートが硬化した後、上層の UHPFRC を打設し、ゲージを完全に埋めた。

供試体 1 体あたり 6 個の埋込みゲージを使用した。埋込みゲージの位置は、B-50、B-20 と同じ配置にした。また、図-5 中の北西方向に位置するゲージから順番に 6 個の埋込みゲージに対して、それぞれ A から F までのアルファベットを付した。

3.6 荷重方法

本研究では、2 体の UHPFRC-RC 梁に対して曲げ荷重試験を行った。荷重試験の概要を図-5 に示す。同図に示すように、供試体の向きを設定した。2 体とも供試体の向きは同じである。油圧式 2000kN 万能試験機を用いて 2 点荷重試験を行った。荷重試験は、B-20、B-50 の順で行った。図-5 に示すように、B-20 では、変位計を荷重点直下に 2 個、支点直上に 2 個設置した。一方、B-50 では、荷重点直下 2 個、支点直上 2 個に加えて、支点上の西側面に 2 個変位計を設置した。また、供試体の上面と東側面にひずみゲージを設置した。B-20 と B-50 に設置したゲージ位置を図-6 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 UHPFRC 層の厚さによる比較

図-7 に実験により得られた、B-20 と B-50 の荷重－供試体中央変位関係（以下、「荷重－変位関係」とする）を示す。図中には、曲げ耐力の断面計算による計算値と非線形解析による B-0 の結果も併記している。これらの結果はほぼ同程度の耐力を示しており、解析の妥当性を確認した。

B-20、B-50 の荷重－平均鉄筋ひずみ関係を図-8 に示す。ここで、本実験では 3 本の引張鉄筋中央にひずみゲージを設置し、鉄筋ひずみを計測した。3 本の鉄筋から得られたひずみデータを平均した値を平均鉄筋ひずみとして用いた。

図-7 より、B-20 のひび割れ発生荷重は 34.9kN 付近、B-50 は 29.3kN 付近であることが確認され、両者ともコンクリートのひび割れ発生に伴い剛性が低下した。また、B-20 では 98.8kN 付近、B-50 では 106kN 付近で鉄筋が降伏した。ここで、図-8 から B-20 において鉄筋が降伏したのは 114kN 付近と考えられ、荷重－変位関係から予想される降伏荷重と荷

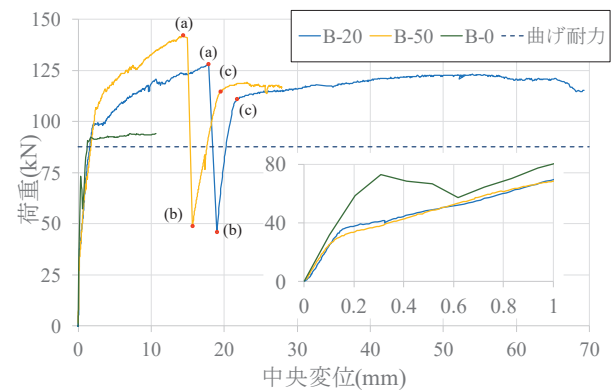


図-7 荷重－変位関係

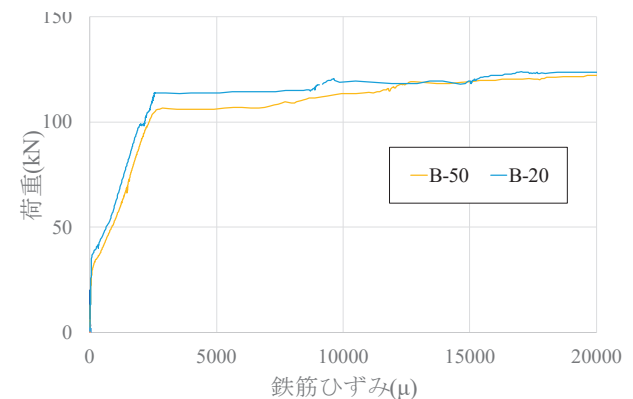


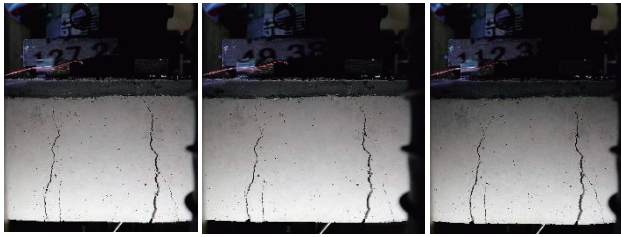
図-8 荷重－鉄筋ひずみ関係

表-3 実験、解析の結果まとめ

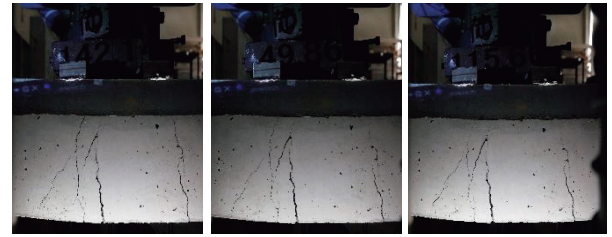
	最大荷重 (kN)	荷重点変位 (mm)
B-0 (解析)	94.2	8.0
B-20	128	17.8
B-50	142	14.4

重－鉄筋ひずみ関係から予想される降伏荷重に 15kN 程度の差が生じた。B-50 では、荷重－変位関係から予想される降伏荷重と荷重－鉄筋ひずみ関係から予想される降伏荷重が一致した。B-20、B-50 とともに、コンクリートの圧壊を終局状態とした。表-3 に荷重試験と解析により得られた、最大荷重とそのときの中央変位をまとめた。表-3 より、B-20、B-50 の最大荷重は、B-0 の最大荷重よりも大きいことがわかる。これは、UHPFRC の上面補強効果により、曲げ耐力が向上したことによると考えられる。

また、表-3 より、B-50 の方が B-20 に比べて最大荷重が大きくなったことがわかる。このことから、UHPFRC の補強厚さが大きいほど、曲げ耐力は大きくなると考えられる。しかし、B-50 の最大荷重時の中央変位（荷重点変位）は B-20 のそれよりも小さいこともわかった。上面補強の厚さによっては供試体全体の変形性能を低下させる可能性があることを示し、これは角間ら⁴⁾の実験でもみられた結果である。



(a) 最大荷重 (b) 荷重低下直後 (c) 荷重回復直後
図-9 B-20 供試体の様子



(a) 最大荷重 (b) 荷重低下直後 (c) 荷重回復直後
図-10 B-50 供試体の様子

図-7 より、曲げひび割れ発生から鉄筋降伏まで、荷重－変位関係の勾配にほとんど違いがなく、B-20 と B-50 の剛性はほぼ同程度であったことがわかる。

4.2 試験中・試験後における供試体の様子

図-9 に、B-20 の試験中における供試体の様子を示した。図-9(a)は最大荷重（荷重 128kN，中央変位 17.8mm）に達したとき、図-9(b)は荷重低下直後（荷重 49.4kN，中央変位 19.1mm）のとき、図-9(c)は荷重回復直後（荷重 112kN，中央変位 22.8mm）のときを示した。また、図-10 に、B-50 の試験中における供試体の様子を示した。図-10(a)は最大荷重（荷重 142kN，中央変位 14.4mm）に達したとき、図-10(b)は荷重低下直後（荷重 49.9kN，中央変位 15.7mm）のとき、図-10(c)は荷重回復直後（荷重 116kN，中央変位 19.8mm）のときを示した。図-9、図-10 は、供試体中央部の様子を示している。

B-20 の載荷試験後の様子を図-11 に示す。図-11 のように、UHPFRC 層が図-11 の左側方向にせり出し、下層の RC と約 14 mm ずれが生じた。UHPFRC が RC 層から剥離したと考えられ、その様子が目視によって確認できた。一方、右側方向では、UHPFRC 層の RC 層からのせり出しは確認されなかった。供試体中央部から左側にかけて、UHPFRC 層と RC 層の境界面に沿ってひび割れが確認された。一方、右側方向には、境界面のひび割れはみられなかった。図-11 の右側と左側で剥離の程度に違いがみられ、B-20 では中央部から左側にかけての剥離が顕著であった。

B-50 の載荷試験後の様子を図-12 に示す。図-12 のように、UHPFRC 層と RC 層の界面に隙間が確認された。隙間は供試体端部から中央部になるにつれて大きくなり、最も大きいところで 10mm 程度開いていた。UHPFRC が RC 層から剥離したと考えられ、その様子が目視によって確認できた。供試体端部では界面に沿ってひび割れが確認された。中央部から図-12 の右側方向のひび割れは供試体端部まで達していたのに対し、左側方向のひび割れは供試体端部まで達していなかった。また、UHPFRC 層が供試体右側にせり出し、下層の RC 層と約 3mm ずれが生じ



図-11 B-20 載荷試験後の様子



図-12 B-50 載荷試験後の様子

た。供試体の左側と右側で剥離の程度に違いがあり、B-50 では中央部から右側にかけての剥離が左側方向の剥離よりも顕著であった。B-50 では UHPFRC-RC 界面に明らかな隙間が確認されたが、B-20 では確認されず、剥離の程度としては B-50 の方が大きかったと考えられる。

4.3 埋込みゲージ

図-13、図-14 に、それぞれ B-20、B-50 のひずみ－変位関係を示した。横軸は中央変位であり、埋込みゲージによる計測ひずみ、ならびに荷重を併記した。

(1) B-20

図-13 からわかるように、埋込みゲージ B で特に大きなひずみが計測され、ゲージ D でもひずみが計測された。特に、ゲージ B では、変位 1mm 付近からひずみが計測されはじめた。変位 16mm 以降、大きなひずみを計測し、データが途切れるまでひずみを計測した。一方、ゲージ A、C、E、F では試験中、ほとんどひずみは計測されなかった。ゲージ B、D 付近では、初期の剥離が載荷試験中に進行していたと推察される。埋込みゲージのうち、A、B、C、D のデータが載荷試験中に途切れていた。このデータが途切れるタイミングは、荷重－変位関係において、荷重が低下するときと一致していた。ゲージ A、B、C、D の位置では、荷重が低下するタイミングで、ゲージが計測不能となったと考えられる。一方、ゲージ E、F のデータは載荷終了まで存在し、E、F の地点ではゲージが計測不能となるほどの引張ひずみは発生しなかったと考えられる。

(2) B-50

図-14 からわかるように、梁のスパン中央に位置

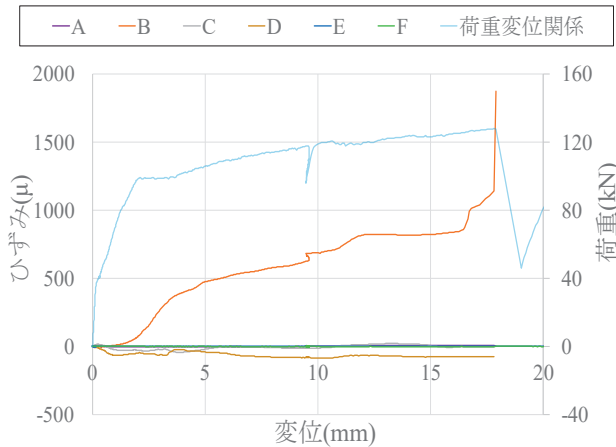


図-13 B-20 ひずみ－変位関係

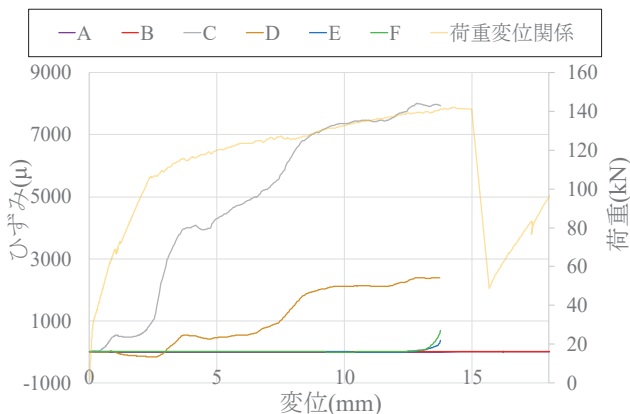


図-14 B-50 ひずみ－変位関係

する埋込みゲージ C, D において大きな引張ひずみが計測された。ゲージ C では、変位 0.5mm 付近からひずみが計測されはじめ、変位 2mm 以降、大きなひずみを計測した。ゲージ D では、変位 1mm 付近からひずみが計測されはじめ、変位 7mm 以降、大きなひずみを計測した。一方、梁の端部に位置するゲージ A, B ならびに E, F では試験中、ほとんど引張ひずみは計測されなかった。これらの結果から、ゲージ C, D が位置する供試体中央では、初期の剥離が載荷試験中に進行していたと推察される。埋込みゲージのうち、C, D, E, F のデータが載荷試験中に計測不能となったが、この直後に荷重－変位関係において荷重が低下していることがわかる。これらのゲージ位置では、荷重が大きく低下する時点より前に剥離を伴う挙動が見られたことがわかる。一方、A, B のデータは載荷終了まで存在しており、この位置では大きな引張ひずみは発生しなかったと考えられる。

5. まとめ

本研究では、高速道路撤去床版のひび割れ調査を行った。比較的近い位置に存在した床版でも、その床版内の位置によって損傷の程度に差がみられた。また、連続した床版でも、損傷具合は一樣ではなく、損傷の大きい床版と小さい床版が混在していること

が明らかになった。

さらに、UHPFRC の厚さが異なる 2 体の UHPFRC-RC 梁に対して、曲げ載荷試験を行った。試験結果は、UHPFRC の上面補強効果により、未補強の供試体と比べて曲げ耐力が向上することを示した。B-50 は、B-20 と比較して最大荷重が大きく、UHPFRC の厚みの大きい方が曲げ耐力は向上した。しかし、最大荷重の差は 15kN 程度であり、UHPFRC 上面補強を 2 倍以上厚くした割には曲げ耐力に与える影響は小さく、その効果は限定的だと考えられる。また、B-50 は、B-20 よりも最大荷重に達したときの中央変位が小さかった。UHPFRC 上面補強を厚くすると、曲げ耐力は向上するが、その反面、梁供試体全体の変形性能が低下する可能性がある。

今回の実験では、B-20, B-50 とともに目視により UHPFRC 層の剥離が確認された。UHPFRC-RC 梁によって、上層 UHPFRC の剥離が進行しやすい方向があると考えられる。また、今回の実験では UHPFRC-RC 界面に接着剤を用いていなかったため、今後は接着剤の使用有無が結果に与える影響についても検討する必要がある。さらに、異なる損傷状態の撤去床版に対して、様々な界面の状態における同様の梁の実験を行うことで、UHPFRC 補強効果を検討する予定である。

謝辞

鹿島建設株式会社の皆様には、UHPFRC の材料提供、施工時の助言などご協力いただきました。御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所ほか：短繊維補強コンクリートを用いた橋梁床版の耐久性向上技術に関する共同研究報告書，2024.3
- 2) 柳井修司，渡邊有寿，牧田通，北川寛和：超高強度繊維補強コンクリートの道路床版打替え工法への適用に関する研究，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，Vol.26, pp.469-474, 2017.10
- 3) 安里俊則，佐溝純一，大原和章，澤村良弘，松井隆行：関西圏都市部における中国自動車道リニューアル工事の概要，土木学会 第 24 回 橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.49-58, 2021
- 4) 角間恒，岡田慎哉，西弘明，松井繁之：超高強度繊維補強コンクリートで断面修復した RC 部材の曲げ耐荷性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.2, pp.1319-1324, 2015