

報告

水平ひび割れを有する鋼板接着補強 RC 部材への樹脂注入による補修効果

角南玲多*, 村橋建祐**, 東山浩士***, 西 敏臣****

*神戸大学大学院，工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
（研究当時：近畿大学，理工学部社会環境工学科）

**村本建設（株），大阪支店土木部（〒543-0002 大阪市天王寺区上汐 4 丁目 2-26）
（研究当時：近畿大学，理工学部社会環境工学科）

***博（工），近畿大学教授，理工学部社会環境工学科（〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1）
****（株）九検（〒849-0932 佐賀市鍋島町八戸溝 166-35）

RC 床版の疲労損傷に対する補強工法のひとつとして鋼板接着補強工法が適用されてきた．しかし，鋼板接着施工から 30～40 年経過した後に鋼板のうきや剥離，漏水などが確認されている．また，RC 床版の上段や下段鉄筋位置付近に水平ひび割れが発生している場合もあり，鋼板接着補強 RC 床版の損傷が顕在化している．本研究では，以上のような劣化・損傷した鋼板接着補強 RC 床版の補修を目的として，鋼板の剥離，上段鉄筋位置付近の水平ひび割れを模擬した RC 梁に内圧充填接合補強工法を適用した際の補修効果を載荷試験により確認した．

キーワード：RC 床版，鋼板接着補強，内圧充填接合補強工法，補修効果

1. はじめに

自動車荷重の影響を直接受ける道路橋床版の劣化・損傷は，疲労や環境条件などの様々な要因に起因している．また，自動車による繰返し荷重や鉄筋の腐食膨張などにより，RC 床版の上段鉄筋位置付近に水平ひび割れが発生している事例が見られる¹⁾．これらの RC 床版の疲労損傷に対する補強工法のひとつに鋼板接着補強工法がある．しかし，鋼板接着した後，30～40 年で鋼板のうきや剥離，漏水^{2)~4)}，下段鉄筋位置付近に水平ひび割れの発生⁵⁾⁶⁾などが確認され，鋼板接着補強 RC 床版の損傷が顕在化している．このような鋼板接着補強 RC 床版の補修工法のひとつに樹脂接着材の再注入がある⁷⁾⁸⁾．著者のひとりとは，実橋の鋼板接着補強 RC 床版から切り出した試験体を用い，鋼板の剥離に対する内圧充填接合補強工法⁹⁾（以下，IPH 工法と称する）の適用について検討してきた¹⁰⁾．その結果，曲げ剛性の回復を確認するとともに，試験体の破壊モードから耐力の評価を行った．

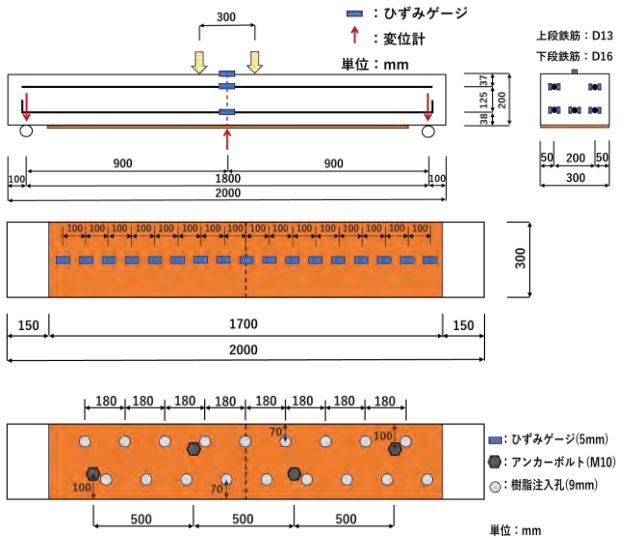
本研究では，上段鉄筋位置付近の水平ひび割れのみに焦点を当て，鋼板の剥離と上段鉄筋位置付近に水平ひび

割れが生じている鋼板接着補強 RC 床版の補修に着目し，それらを模擬した RC 梁に IPH 工法を適用した際の補修効果を静的載荷試験により検討した．

2. 試験概要

2.1 試験体

本研究に使用した試験体は，表－1 に示す 3 種類である．試験体 No.1 は鋼板接着した健全な試験体であり，基準となる試験体である．試験体 No.2-1 および No.2-2 は



図－1 試験体の概要図

表－1 試験体の種類

試験体	No.1	No.2-1	No.2-2
水平ひび割れ位置	—	上段	上段
鋼板剥離	—	○	○
IPH 補修	—	×	○



写真-1 表面状態



写真-2 上段鉄筋設置



写真-3 ワッシャー2枚で隙間を再現

鋼板の剥離と上段鉄筋位置に水平ひび割れを模擬した試験体である。試験体は、図-1 に示す幅 300mm、高さ 200mm、全長 2000mm の複鉄筋 RC 梁であり、上段鉄筋に D13 (SD295A) を 2 本、下段鉄筋に D16 (SD295A) を 3 本、それぞれのかぶり深さを 30mm として配置した。

試験体 No.2-1 および No.2-2 は水平ひび割れを作製するため、コンクリートを 2 回に分けて打設した。すなわち、1 回目は上段鉄筋下側まで打設し、コンクリートが硬化する前に洗いブラシを用いて粗骨材表面が露出するまでモルタル分を取り除いた (写真-1)。その後、完全に硬化したコンクリートの表面にポリ塩化ビニリデンフィルム (厚さ 0.011mm) を敷き、上段鉄筋を配置した後 (写真-2)、2 回目のコンクリートを型枠上面まで打設した。コンクリートが硬化した後は上・下部コンクリートを容易に分離することができ、フィルムをワイヤーブラシにより取り除いた。

上述したように、No.2-1 は鋼板の剥離を模擬していることから、コンクリート下面に剥離紙を貼り付けた。いずれの試験体においても厚さ 4.5mm の鋼板 (SS400) は、図-1 に示すように、500mm 間隔に千鳥配置したアンカーボルト (M10) 4 本により固定した。なお、コンクリート下面と鋼板の間はワッシャー (厚さ 1.6mm) 2 枚を挟み、樹脂を充填する隙間を確保した (写真-3)。健全な試験体 No.1 および試験体 No.2-2 の鋼板取り付けは上記と同様であるが、これらの試験体については剥離紙の貼り付けは行わず、コンクリート下面と鋼板の間、水平

表-2 コンクリートの配合表

コンクリートの配合 (kg/m ³)							
セメント	水	細骨材①	細骨材②	粗骨材	混和材	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
304	173	419	419	982	3.04	57.0	46.7

表-3 コンクリートと鋼材の強度特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度* (N/mm ²)	静弾性係数* (kN/mm ²)
1回目打設コンクリート	36.9	2.99	30.1
2回目打設コンクリート	34.4	2.86	29.3
平均	35.7	2.93	29.7

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
上段鉄筋 D13 (SD295A)	358	486	22
下段鉄筋 D16 (SD295A)	370	505	24
鋼板 (SS400)	296	453	37

*コンクリート標準示方書¹⁾に準拠して算出した値

表-4 エポキシ樹脂の性能

項目	規格値	試験値
可使時間 (分)	50 以上	88
硬化時間 (時間)	24 以下	16
混合粘度 (mPa・s)	100~1000	686
圧縮強さ (N/mm ²)	50 以上	57
引張強さ (N/mm ²)	15 以上	43
曲げ強さ (N/mm ²)	40 以上	62
硬化収縮率 (%)	3 以下	2

ひび割れ内部に樹脂を充填した。補修対象である試験体 No.2-2 への樹脂注入については後述する。

測定項目は、図-1 に示すように、梁中央断面における鉄筋のひずみ (ゲージ長 5mm)、コンクリート上面のひずみ (ゲージ長 60mm)、鋼板下面のひずみ (ゲージ長 5mm を 100mm 間隔)、梁中央点および支点の変位、ならびに荷重である。



写真-4 試験状況



写真-5 穿孔



写真-6 台座取付け

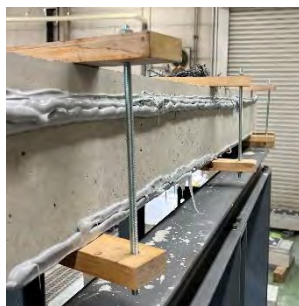


写真-7 シール材



写真-8 樹脂注入

2.2 使用材料

本試験体を使用したコンクリートの配合を表-2 に、荷重試験時におけるコンクリートの圧縮強度および鋼材の強度特性を表-3 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体による結果である。

次に、使用したエポキシ樹脂の材料特性を表-4 に示す⁹⁾。エポキシ樹脂は、湿潤対応型注入用高流動エポキシ樹脂 E-396H であり、主剤と硬化剤は質量比 2 : 1 で構成される。

2.3 静的荷重試験方法

本試験では、スパン長 1800mm、荷重スパン長 300mm の 4 点荷重試験を行った(写真-4)。なお、荷重点および支点には不陸を調整するための石膏を敷設した。荷重には油圧ジャッキを用い、各試験体ともに約 30kN まで荷重した後に一旦除荷し、その後は破壊に至るまで漸増

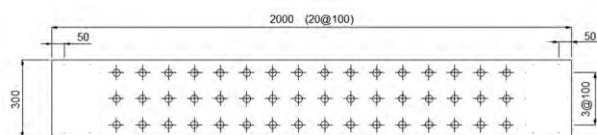
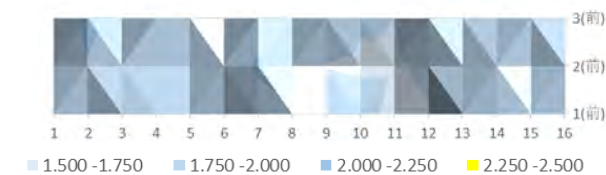
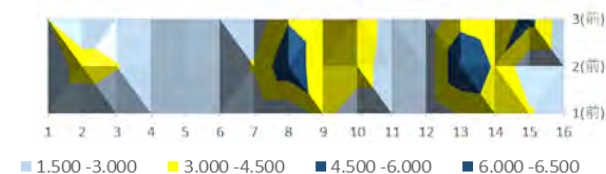


図-2 打音検査位置



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2-1



(c) 試験体 No.2-2

図-3 スコア値マップ

荷重を行った。

2.4 樹脂注入手順

本試験では、水平ひび割れ部まで樹脂を注入させるため、径 7mm のドリルにより水平ひび割れを貫通する深さまで穿孔した(写真-5)。穿孔箇所は、本工法の目安である 1m²あたり 36 箇所となるよう、180mm 間隔の 2 列とした(図-1)。なお、鋼板には穿孔箇所に径 9mm の削孔を予め設けた。次に、樹脂注入を行うための台座を穿孔箇所に接着し(写真-6)、水平ひび割れ部の側面およびコンクリートと鋼板の境界側面をシールした後(写真-7)、IPH 工法による樹脂注入を行った(写真-8)。

2.5 打音検査

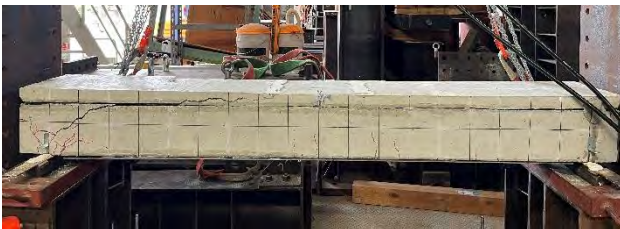
鋼板のうき・剥離部への樹脂充填状況を確認するため、AI 打音検査器(株ポート電子製:PCD-200A)による調査を行った。まず、健全な状態である試験体 No.1、補修の有無による違いを確認するための試験体 No.2-1、補修後の充填を確認するための試験体 No.2-2 に対して、鋼板側から図-2 に示す箇所にて打音検査(1 箇所につき 5 回打撃)を行い、スコア値¹²⁾を測定した。それぞれの試験体において測定されたスコア値のマップを図-3 に示す。図-3(a)に示した試験体 No.1 のスコア値は 1.7~2.1 の範囲に分布している。一方、図-3(b)に示した試験体 No.2-



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2-1



(c) 試験体 No.2-2

写真-9 各試験体の破壊性状

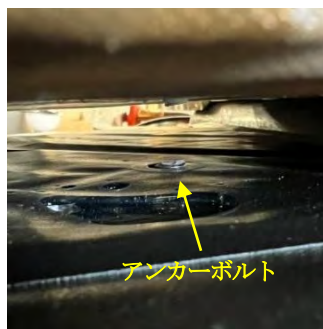


写真-10 アンカーボルトの破断

1 のスコア値は 1.7～7.0 の範囲にあり、大きな値を示す箇所があった。この結果では、試験体 No.1 と同じスコア値の範囲も包含しており、コンクリート表面と樹脂が接触している状態にある場合もスコア値は小さくなるといえる。しかし、補修後の鋼板とコンクリート下面の間における樹脂の充填状況を判断する上では有用な手法である。また、スコア値は材料や構造によって異なり、一般的に 1.0 程度を閾値とすることが多いが、今回は、健全な試験体と剥離試験体とのスコア値から閾値を設定しているため、検査結果から、その閾値としてスコア値を 2.2 とするのが妥当であると判断した。次に、図-3(c)に示し

た補修後の試験体 No.2-2 のスコア値は 1.7～2.1 を示しており、試験体 No.1 と同様の範囲に分布していることから、樹脂が充填されたと判断できる。

3. 試験結果および考察

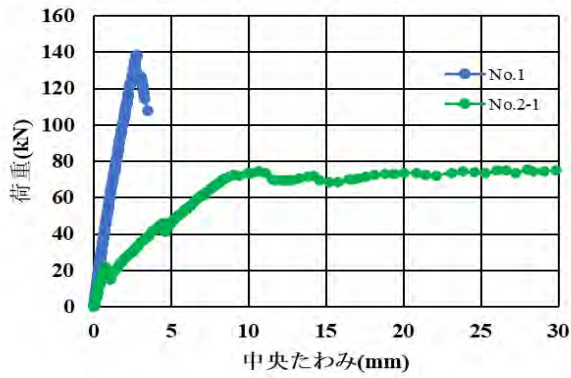
3.1 破壊性状

各試験体の破壊性状を写真-9 に示す。試験体 No.1 (写真-9(a)) では、梁中央付近に曲げひび割れが発生し、その後、鉄筋が降伏する前に支点部付近から進展したせん断ひび割れにより終局に至った。なお、鋼板とコンクリートの界面における剥離破壊は見られなかった。今回の試験体ではハンチを設けず、鋼板の接着は支点の手前までとしたことから、支点部からのせん断破壊が先行した。次に、試験体 No.2-1 (写真-9(b)) では、梁中央付近に曲げひび割れが発生した後、コンクリート下面と樹脂の接着が消失していることから、鋼板を固定しているアンカーボルトに大きなせん断力が作用し、写真-10 に示すように、端部のアンカーボルトが破断した。また、上段鉄筋位置に水平ひび割れを有していることから、上・下部のコンクリートが水平方向にずれ、下部のコンクリート上部が圧縮抵抗、下段鉄筋が引張抵抗する RC 断面を形成した状態で下段鉄筋が降伏し、大きな変形を伴って終局状態を迎えた。一方、試験体 No.2-2 (写真-9(c)) では、試験体 No.1 とほぼ同様の破壊性状を呈しており、梁中央付近に曲げひび割れが発生した後、鉄筋が降伏する前に支点部付近から進展したせん断ひび割れにより終局に至った。また、鋼板の剥離破壊は見られなかった。

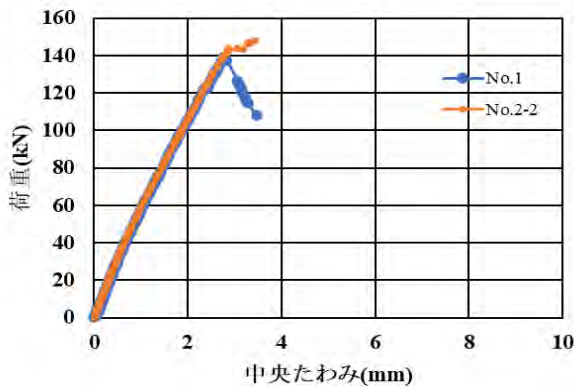
3.2 荷重-中央たわみ関係

各試験体の荷重と中央たわみの関係を図-4 に示す。図-4(a)は試験体 No.1 と試験体 No.2-1 を比較している。試験体 No.1 は 138.7kN でせん断破壊し、その時の中央たわみは 2.8mm であり、小さいたわみで急激な荷重低下を呈した。一方、試験体 No.2-1 は上段鉄筋位置の水平ひび割れ、ならびに鋼板の剥離を有していることから、剛性が著しく低下している。上述したように、鋼板を固定している端部のアンカーボルトが 46kN 付近で破断したことから、さらに剛性が低下し、77.5kN で最大荷重を迎えている。その後は、下段鉄筋の降伏によりたわみが増大する RC 断面としての挙動を呈した。最大荷重を試験体 No.1 と比較すると、試験体 No.2-1 は約 56%にまで低下した。

次に、図-4(b)は試験体 No.1 と試験体 No.2-2 を比較している。試験体 No.2-2 は試験体 No.1 とほぼ同じ挙動を呈しており、147.4kN でせん断破壊し、その時の中央たわみは 3.7mm であった。載荷初期からせん断破壊に至るまで試験体 No.1 と同様の挙動であったことから、水平ひび割れ部および鋼板の剥離部に注入した樹脂により剛性および耐力が回復したといえる。



(a) 試験体 No.1 と試験体 No.2-1 の比較



(b) 試験体 No.1 と試験体 No.2-2 の比較

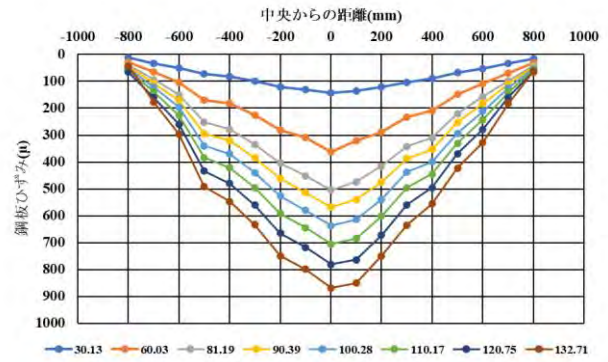
図-4 各試験体の荷重と中央たわみの関係

3.3 鋼板下面のひずみ分布

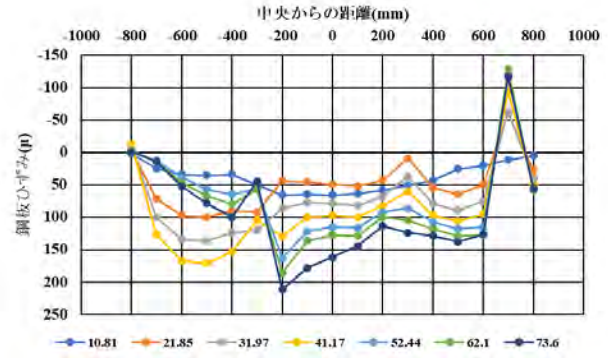
図-5 に各試験体の鋼板下面におけるひずみ分布の変化を示す。試験体 No.1 のひずみ分布 (図-5(a)) は、最大荷重 (138.7kN) 付近まで不連続な挙動は見られず、上述したように、終局状態まで鋼板が剥離していなかったことが分かる。また、せん断破壊を呈したため、鋼板は降伏していなかった。一方、試験体 No.2-1 のひずみ分布 (図-5(b)) は、曲げひび割れ発生後、大きな乱れが生じ始めており、アンカーボルトが破断 (46kN 付近) した梁左側で顕著な変化が見られた。梁右側の中央から 700mm の位置においても早期にひずみの低下が見られたが、これについてはアンカーボルトが鋼板のずれを拘束した影響であると推察される。次に、試験体 No.2-2 のひずみ分布 (図-5(c)) は、試験体 No.1 とほぼ同様な挙動を示しており、樹脂注入により補修した結果、終局状態まで鋼板の剥離は生じていなかったといえる。

3.4 最大荷重

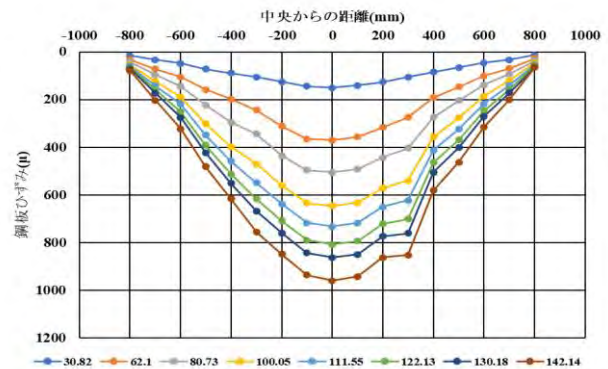
既往研究^{10), 13)}では、鋼板接着補強した RC 梁におけるせん断破壊耐力について、次式に示す土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾のせん断補強鋼材を有しない棒部材のせん断耐力式を基に評価している。ただし、下段鉄筋および鋼板を引張鋼材と見なしている。すなわち、有効高



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2-1



(c) 試験体 No.2-2

図-5 各試験体の鋼板下面のひずみ分布

さは梁上面から下段鉄筋および鋼板の図心位置まで、鉄筋比は下段鉄筋の断面積および鋼材の断面積を考慮して計算されている。なお、ここでは安全係数は考慮していない。

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p f_{vcd} b_w d \quad (1)$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt{f'_c} \quad (\text{ただし, } f_{vcd} \leq 0.72 N/mm^2) \quad (2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{\frac{1000}{d}} \quad (\beta_d > 1.5 \text{ の場合は } \beta_d = 1.5) \quad (3)$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v} \quad (\beta_p > 1.5 \text{ の場合は } \beta_p = 1.5) \quad (4)$$



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2-2

写真-11 支点部周辺のせん断ひび割れ

ここに、 b_w は梁幅 (mm)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 d は有効高さ (mm)、 p_v は引張鋼材比である。

上式により、鋼板を引張鋼材に加えた場合のせん断耐力は 85.5kN ($2 \times 85.5 = 171.0$ kN)、また、鋼板を無視した下段鉄筋のみを引張鋼材とした場合のせん断耐力は 51.4kN ($2 \times 51.4 = 102.8$ kN) であった。上述したように、試験体 No.1 および試験体 No.2-2 の最大荷重はそれぞれ 138.7kN および 147.4kN であり、両計算結果のおよそ中間値にある。この要因として、両試験体の支点部周辺において、写真-11 に示すように、支点上からのせん断ひび割れと鋼板端部からのせん断ひび割れが発生したためであると考えられる。このようなせん断破壊形態を考慮する必要がある。したがって、せん断耐力の評価については、試験体パラメータをさらに追加し、検討を行っていく予定である。

4. あとがき

本研究では、上段鉄筋位置付近に水平ひび割れを有し、鋼板を剥離させた RC 梁を作製し、その水平ひび割れ部と鋼板の剥離部に樹脂接着剤を注入して補修した試験体について静的曲げ載荷試験を行い、その補修効果の確認を行った。これらの試験結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験体 No.2-2 のように、上段鉄筋位置付近に水平ひび割れを有し、鋼板が剥離した RC 梁に対して、水平ひび割れを貫通する深さまで穿孔することで、鋼板の剥離と上段鉄筋位置付近の水平ひび割れに樹脂が確実に充填されることを確認した。
- (2) また、補修後の試験体 No.2-2 は、健全な試験体 No.1 の耐力および剛性と同等まで回復したことから、樹脂注入による補修効果が確認できた。
- (3) 一方、補修を行わなかった試験体 No.2-1 の耐力は健全な試験体 No.1 に比べて、約 56%まで低下した。

今後は、鋼板が剥離し、さらに下段鉄筋位置付近に水平ひび割れが発生している状態の試験体についても本工法による補修効果を確認していく予定である。

謝辞

本研究成果の一部は、JSPS 科研費 JP22K04294 の助成を受けたものであり、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，鋼構造シリーズ 35，2020.
- 2) 前川敬彦，久利良夫，佐々木一則：鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する検討，土木学会第 67 回年次学術講演会，I-587，2012.
- 3) 繪鳩武史，蒲 和也，深谷卓央：RC 床版に設置された補強鋼板の損傷実績，土木学会第 74 回年次学術講演会，VI-569，2019.
- 4) 玉越隆史，石尾真理，強瀬義輝：鋼板接着補強した道路橋コンクリート床版の劣化診断手法，土木技術資料，56-7，pp.6-9，2014.
- 5) 前川敬彦，佐藤彰紀，坂本直太，平山智啓：阪神高速道路における鋼板接着 RC 床版の健全性に関する検討，第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.77-82，2018.
- 6) 一色智彦，鈴木 真，藤原理絵，鎌田敏郎：供用中の鋼板接着補強 RC 床版における弾性波による内部損傷の非破壊調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.1309-1314，2018.
- 7) 佐野 正，山下幸生，松井繁之，堀川都志雄，久利良夫，新名 勉：浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.67，No.1，pp.27-38，2011.
- 8) 関口幹夫，石田教雄，今吉計二：鋼板接着補強床版の接着材再注入による補修効果に関する実験的検討，第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.53-58，2018.
- 9) 土木学会：「コンクリート構造物における IPH 工法 (内圧充填接合補強工法) の設計施工法」に関する技術評価，技術推進ライブラリー No.20，2017.
- 10) 黒柳拓海，東山浩士，森本祥平，廣 重幸，吉田彰男：実橋床版から切出した鋼板接着補強 RC 梁の樹脂再注入による補修効果と終局耐力，構造工学論文集，Vol.68A，pp.765-775，2022.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】2022 年制定，2022.
- 12) 西 敏臣，古賀美智恵，廣 重幸，黒田一郎：RC 部材補修における局所外れ値因子法に基づく樹脂充填判定手法に関する基礎的研究，AI・データサイエンス論文集，第 3 巻，第 J2 号，pp.879-888，2022.
- 13) 新山純一，溝口健二，渡辺忠朋，鈴木顕彰：鋼板接着工法の RC 構造への補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.881-886，1995.

(2024 年 7 月 12 日受付)