

論文 水平ひび割れと剥離を有する鋼板接着補強 RC 部材の補修

松廣 優哉*1・樋口 竜己*2・東山 浩士*3・西 敏臣*4

要旨：鋼板接着補強された RC 床版における鋼板の浮き・剥離や床版内部の水平ひび割れなどの損傷事例が報告されている。水平ひび割れは上段鉄筋付近、下段鉄筋付近、あるいはその両方に発生しており、交通荷重や環境影響、鋼板接着補強時の RC 床版の損傷状態などに起因していることが多い。本研究では、鋼板接着した RC 梁を用いて、内圧充填接合補強工法による鋼板の剥離部と種々の水平ひび割れ部へエポキシ樹脂を注入した補修効果を実験的に検討した。その結果、鋼板端部に接着不良箇所があった試験体を除き、健全な試験体の耐力まで回復することが確認できた。

キーワード：RC 床版、鋼板接着補強、水平ひび割れ、浮き・剥離、樹脂注入、補修

1. はじめに

鋼板接着補強後、30～40 年が経過した RC 床版において、鋼板の浮き・剥離や床版内部の水平ひび割れが確認されている¹⁾。この調査結果によれば、鋼板接着補強 RC 床版では、下段鉄筋付近に発生している水平ひび割れが多いようであるが、上段鉄筋付近に発生しているケースもいくらか見受けられる。RC 床版に発生する水平ひび割れの要因は様々であり、その発生メカニズムに関する研究がなされている^{例えば 2)}。松田ら²⁾は、RC 床版の上段鉄筋付近に発生する水平ひび割れは直射日光による床版上アスファルト舗装の温度上昇と通行車両の繰返し荷重が要因のひとつであると述べている。すなわち、鋼板接着施工時の RC 床版の損傷状態によっては、その時点で上段鉄筋付近に水平ひび割れがすでに発生しており、その後に下段鉄筋付近にも水平ひび割れが発生したケースも考えられる。

一方、変状を有する鋼板接着補強 RC 床版の補修方法やその効果に関する研究がなされている^{3)～5)}。鶴澤ら⁴⁾は特殊なアンカーボルトを開発し、このアンカーボルトを介して鋼板の剥離部や水平ひび割れ部へエポキシ樹脂を注入・充填できることを明らかにしている。著者らも鋼板接着補強 RC 床版の鋼板の剥離部や水平ひび割れ部へ内圧充填接合補強(IPH)工法⁶⁾を用いた補修効果を検討してきた⁵⁾。文献 5)では、鋼板接着補強 RC 床版の鋼板の剥離と上段鉄筋付近の水平ひび割れを模擬した梁試験体を用いて IPH 工法によるエポキシ樹脂注入後の補修効果を載荷試験結果から評価した。

本研究では、上記の検討をさらに発展させるために、鋼板接着補強 RC 床版の鋼板の剥離と、下段鉄筋付近、あるいは上段・下段鉄筋付近の水平ひび割れを模擬した梁試験体を用いて IPH 工法による補修効果を載荷試験に

より検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で準備した試験体は、文献 5)に示した試験体を含めて、表－1 に示す 8 体である。試験体 CB-1 および CB-2 は鋼板が梁下面に接着されている健全な状態を模擬しており、作製年度は異なるが、両試験体の諸元は同じである。試験体の詳しい作製方法は後述する。試験体 DBU および DBU-RI は上段鉄筋下面の水平ひび割れと鋼板の剥離を模擬した試験体である。試験体 DBL および DBL-RI は下段鉄筋上面の水平ひび割れと鋼板の剥離を模擬した試験体である。さらに、試験体 DBUL および DBUL-RI は上段鉄筋下面および下段鉄筋上面の水平ひび割れと鋼板の剥離を模擬した試験体である。なお、“-RI”を付した試験体は、IPH 工法により、剥離部と水平ひび割れ部に樹脂を注入して補修を行ったことを示す。また、表－1 の材料種別 R5 は文献 5)の試験体である。

表－1 試験体の種類

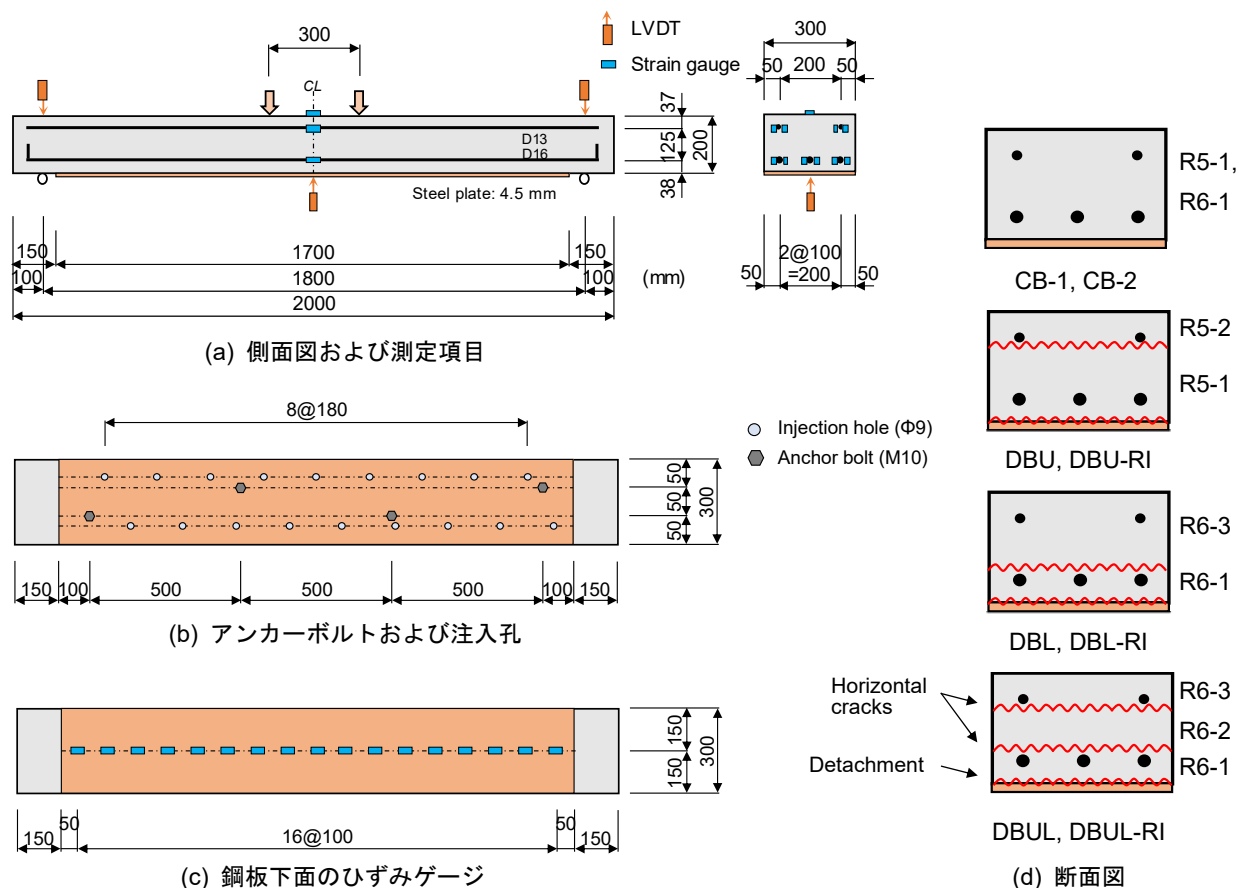
試験体	水平ひび割れ	鋼板剥離	注入補修	材料種別
CB-1	—	—	—	R5
CB-2	—	—	—	R6
DBU	上段	○	—	R5
DBU-RI	上段	○	○	R5
DBL	下段	○	—	R6
DBL-RI	下段	○	○	R6
DBUL	上下段	○	—	R6
DBUL-RI	上下段	○	○	R6

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科 (学生会員)

*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科

*3 近畿大学 理工学部社会環境工学科教授 博(工) (正会員)

*4 (株)九検 (正会員)



図－1 試験体の形状寸法

梁試験体の形状寸法を図－1 に示す。試験体は幅 300mm、高さ 200mm、長さ 2000mm の複鉄筋断面 RC 梁である。上段鉄筋には D13 (SD295A) 2 本、下段鉄筋には D16 (SD295A) 3 本を使用し、それぞれのかぶり深さは 30mm とした。なお、せん断補強筋は配置していない。また、下段鉄筋上面に水平ひび割れを設けた試験体を除いて、引張側鉄筋端部には直角フックを設けている。

水平ひび割れを作製するため、コンクリートは 2 回、あるいは 3 回に分けて打設した。ここでは、試験体 DBL を例に説明する。型枠内に下段鉄筋を配置し、下段鉄筋上部までコンクリートを打設した。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)。実験室内にて 1 週間の養生後、打設面にポリ塩化ビニリデンフィルム (厚さ 0.011mm) を敷設、上段鉄筋を配置 (写真－2) し、2 回目のコンクリートを打設した。コンクリートが硬化した後は上下部のコンクリートを分離し、ワイヤーブラシによりすべてのフィルムを取り除いた。

樹脂を充填するためのコンクリート下面と鋼板との隙間はアンカーボルト (M10) 位置に厚さ 1.6mm のワッシャーを 2 枚重ねて挟み込むことで確保した。なお、試験体 DBU, DBL, DBUL の 3 体は、鋼板の剥離状態を模擬するため、コンクリート下面に厚さ 0.1mm の剥離紙を



写真－1 粗骨材露出



写真－2 フィルム敷設

貼付け、樹脂がコンクリートと接着しないようにした。アンカーボルトは図－1 に示したように、500mm 間隔の千鳥配置とした。また、厚さ 4.5mm の鋼板には樹脂注入孔 (φ 9mm) を予め設け、その数は標準とされる 1m² あたり 36 箇所を基にその間隔を決定した。

2.2 使用材料

使用したコンクリートの配合表を表－2 に示す。また、載荷試験時における各層の圧縮強度を表－3 に示す。なお、図－1(d)の断面図右側に付した各層の記号は表－3 に示した年度・打設回数に該当する。表－3 より、各層の圧縮強度に大きな差異はなかったと言える。

表-2 コンクリートの配合

年 度	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE 剤
R5	57	46.7	173	304	838	982	3.04
R6	57	47.1	175	307	844	971	3.07

表-3 コンクリートの圧縮強度

年度	打設回数	圧縮強度 (N/mm ²)
R5	1	36.9
	2	34.4
R6	1	39.3
	2	38.5
	3	36.3

表-4 鋼材の機械的性質

種類	年度	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
鉄筋 D13 (SD295A)	R5	358	486	22
	R6	370	500	23
鉄筋 D16 (SD295A)	R5	370	505	24
	R6	366	509	26
鋼板 (SS400)	R5	296	453	37
	R6	274	450	38

表-5 エポキシ樹脂の材料特性

項目	規格値 ⁶⁾	試験値 ⁶⁾
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
圧縮強度 (N/mm ²)	50 以上	57
引張強度 (N/mm ²)	15 以上	42.7
曲げ強度 (N/mm ²)	40 以上	62
ヤング係数 (N/mm ²)	—	2710 ⁵⁾
硬化収縮率 (%)	3 以下	2

次に、鉄筋および鋼板の機械的性質を表-4 に示す。また、使用した湿潤対応型注入用高流動エポキシ樹脂の材料特性を表-5 に示す。このエポキシ樹脂は主剤と硬化剤を質量比 2:1 で混合して使用するものである。

2.3 樹脂注入

本実験では、水平ひび割れ部への樹脂注入を行うため、上段に水平ひび割れを有している試験体では下面から深さ 180mm まで、下段に水平ひび割れを有している試験体では下面から深さ 80mm まで径 7mm のドリルにより図-1(b)に示した注入孔と同じ位置に穿孔を行った。



写真-3 台座接着



写真-4 側面シール



写真-5 注入状況



写真-6 充填状況

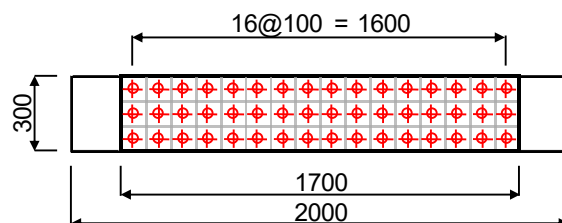


図-2 打音検査箇所

次に、注入孔に台座を接着（写真-3）、水平ひび割れ部およびコンクリートと鋼板の境界部側面をシール（写真-4）し、樹脂注入を行った（写真-5）。樹脂硬化後、試験体側面から樹脂の充填状況を目視により観察、確認した。一例として、水平ひび割れ部の充填状況を写真-6 に示す。

2.4 打音検査

樹脂充填状況を確認するため、注入前後に AI 打音検査器（株式会社電子製：PCD-200A）による打音検査を行った。鋼板側から図-2 に示す 100mm 間隔の箇所に対して、注入前後に各 5 回の打撃を行い、その打音のスペクトルを入力データとした局所外れ値因子法に基づく判定手法⁷⁾ から、樹脂充填、あるいは剥離の有無を判定するスコア値を求めた。

試験体 CB-1, CB-2, DBU-RI, DBL-RI, DBUL-RI の注入前後におけるスコア値のヒストグラムを図-3 に示す。注入前のスコア値は 2.7～9.1 の広い範囲に分布しているが、注入後は 0.9～2.5 の範囲に概ね分布している（2.8 を超える箇所が 3 箇所あった）。この結果から、樹脂充填、あるいは剥離の有無を判断する値は 2.0～3.0 の範囲であると考え、本研究では閾値をやや厳しい 2.0 とした。これを基にスコア値が 2.0 を超えた試験体とその判定箇所

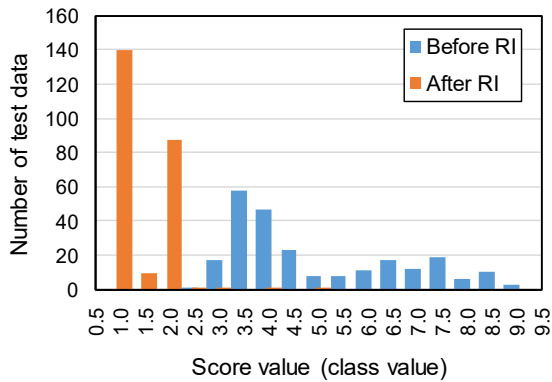


図-3 注入前後のスコア値比較

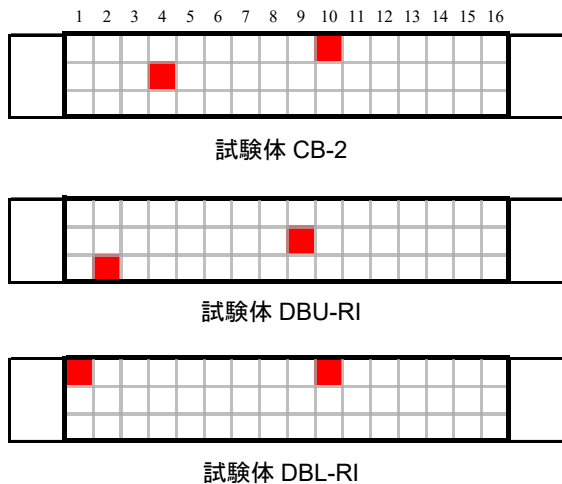


図-4 スコア値 2.0 を超えた試験体およびその箇所



写真-7 荷重試験状況

は図-4 に示す結果となった。いずれの試験体もスコア値 2.0 を超えた面積は、鋼板全体の面積に対して 4%前後であると想定される。

2.5 荷重方法および計測項目

本研究では、図-1 に示したように、荷重スパン長 300mm、スパン長 1800mm の静的 4 点荷重（単純支持）により各試験体の挙動を比較検討した。荷重状況を写真-7 に示す。荷重方法は、荷重約 30kN まで荷重した後、一旦除荷し、その後は最大荷重に到達するまで漸増荷重

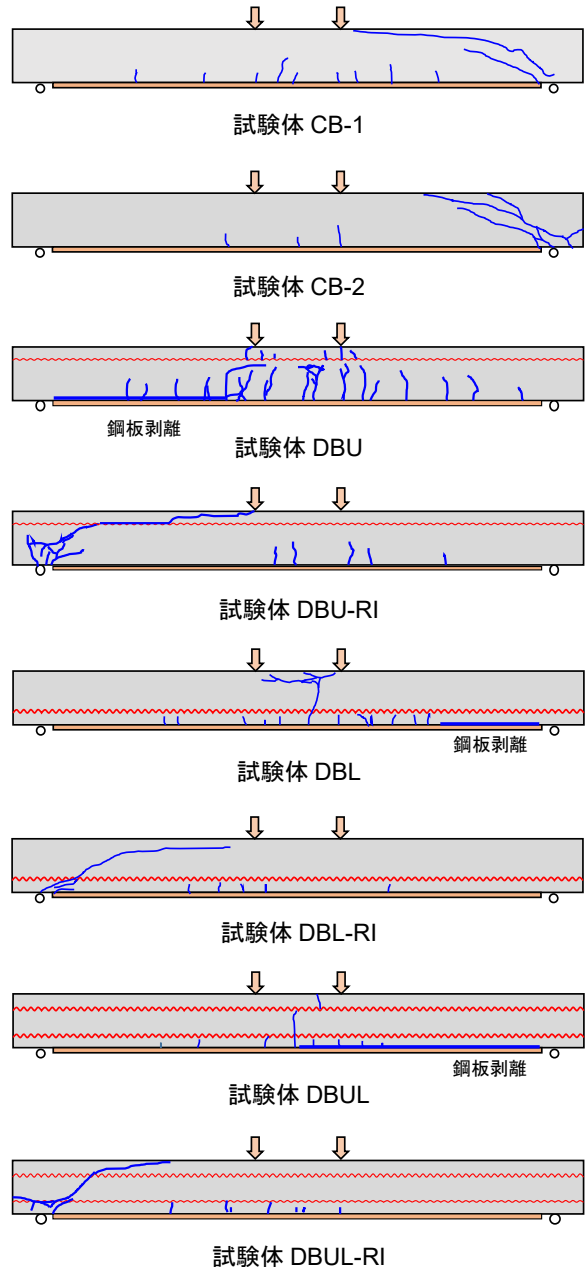


図-5 ひび割れ発生状況

を行った。なお、荷重点および支点には不陸調整のため石膏を敷設した。計測項目は、図-1 に示した荷重、梁中央点の鉛直たわみ、支点沈下、ならびに鉄筋、鋼板下面およびコンクリート上面のひずみである。

3. 試験結果および考察

3.1 破壊性状

図-5 に荷重試験後のひび割れおよび鋼板の剥離発生状況（青線）を示す。健全な試験体 CB-1 および CB-2 は、曲げひび割れの本数および進展が少なく、引張側鉄筋および鋼板が降伏する前に支点付近および鋼板端部から進展したせん断ひび割れの発生により終局状態に至った。なお、鋼板の剥離は生じなかった。樹脂注入による補修

を施さなかった試験体 DBU, DBL および DBUL は、水平ひび割れの位置によって曲げひび割れの発生状況は異なるが、曲げひび割れが発生・進展、水平ひび割れ部の水平ずれが生じた後に鋼板を固定していた端部側のアンカーボルトが破断して終局状態に至った。一方、補修を施した試験体 DBU-RI, DBL-RI および DBUL-RI では、水平ひび割れ部の開口やずれ、鋼板の剥離は見られず、健全な試験体 CB-1 および CB-2 と同様であり、引張側鉄筋および鋼板が降伏する前に支点付近および鋼板端部からのせん断ひび割れの発生により終局状態に至った。支点部付近の破壊状態の一例を写真-8 に示す。

3.2 中央たわみ

各試験体の荷重-中央たわみ関係を図-6 に示す。ここで、補修していない試験体 DBU, DBL および DBUL は 40mm を超える大きな変形を呈した一方で、補修した試験体のたわみはせん断破壊したために小さい。そこで、比較しやすいよう、図-6 の横軸は 20mm までとした。また、各試験体の最大荷重を表-6 に示す。補修した試験体と健全な試験体を比較すると、試験体 DBL-RI を除いてほぼ同様の変形挙動を呈し、耐力も健全な試験体と同等、あるいはそれを超えるまで回復した。このことから、樹脂注入による鋼板および水平ひび割れ部の再接着による補修効果が確認できた。しかし、試験体 DBL-RI は、図-4 に示した鋼板端部の接着不良が影響したものと考えられる。一方、補修していない試験体では、試験体 DBU の最大荷重は試験体 CB-1 の 56%、試験体 DBL および DBUL は、試験体 CB-2 の 9% および 10% であった。本研

究では、極端な損傷状態を模擬した試験体であることに留意が必要であるが、下段鉄筋付近に水平ひび割れが存在すると、図-6 に示したように、断面の引張抵抗力が大きく低下するとともに、梁中央部に曲げひび割れが局所化することで耐力が大幅に低下したと考えられる。

3.3 鋼板下面ひずみ

補修した試験体の各荷重レベルにおける鋼板下面のひずみ分布を図-7 に示す。補修した試験体の鋼板ひずみは、試験体 CB-1 および CB-2 を含め、最大荷重に至るまで降伏していなかった。ここで、試験体 DBL-RI の梁中央点および右側端部付近のひずみは荷重初期から小さく、ひずみゲージの接着不良であった可能性がある。また、最大荷重に到達した直後の左側端部におけるひずみの低下が他の測定箇所より早期に生じていたことから、鋼板端部の接着不良箇所の存在により、耐力の回復が低かったと考えられる。この点を除き、他の試験体と同程度のひずみ値を示しており、分布形状からも最大荷重まで剥離は生じていなかったと言える。

3.4 耐力計算

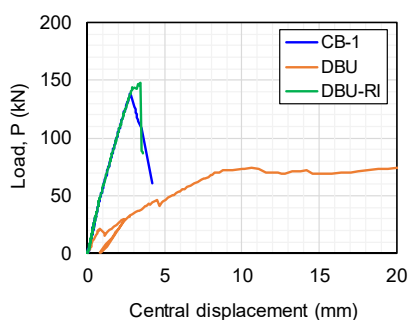
写真-8 に示したように、健全な試験体および補修した試験体では、支点付近および鋼板端部からせん断ひび割れが発生したことから、二羽ら⁸⁾のせん断耐力式を基にした文献⁹⁾を参考に、支点部引張側鉄筋に向かう圧縮パスと鋼板端部に向かう圧縮パスを仮定した。それぞれの圧縮パスによるせん断抵抗を V_{c1} と V_{c2} とし、 d_1 と d_2



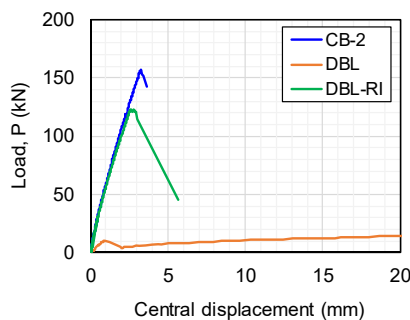
試験体 CB-2 試験体 DBUL-RI
写真-8 支点部付近の破壊状態

表-6 最大荷重と計算耐力

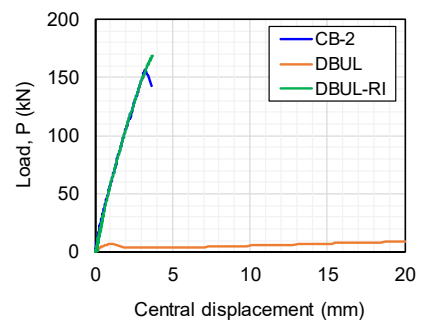
試験体	①最大荷重 P_{max} (kN)	②計算耐力 $2 \times V_c$ (kN)	①/②
CB-1	138.7	143.5	0.97
CB-2	157.3	146.5	1.07
DBU	77.5	—	—
DBU-RI	147.4	143.5	1.03
DBL	14.3	—	—
DBL-RI	122.8	146.5	0.84
DBUL	15.9	—	—
DBUL-RI	168.4	146.5	1.15



(a) 試験体 DBU・DBU-RI



(b) 試験体 DBL・DBL-RI



(c) 試験体 DBUL・DBUL-RI

図-6 荷重-中央たわみ関係

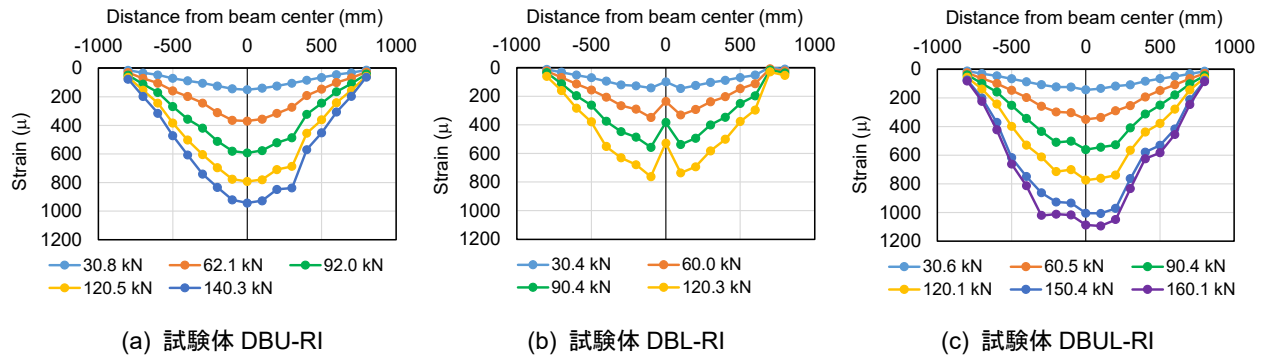


図-7 鋼板下面のひずみ分布

の重複が生じないように次式を提案する。

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} \quad (1)$$

$$V_{c1} = 0.2(p_1 f_c')^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_1}{103} \right)^{-\frac{1}{4}} \left[0.75 + 1.4 / \left(\frac{a}{d_1} \right) \right] b d_1 \quad (2)$$

$$V_{c2} = 0.2(p_2 f_c')^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_2}{103} \right)^{-\frac{1}{4}} \left[0.75 + 1.4 / \left(\frac{a}{d_2} \right) \right] b (d_2 - d_1) \quad (3)$$

$$p_1 = 100 A_s / (b d_1), p_2 = 100 (b_s t_s + A_s) / (b d_2) \quad (4)$$

ここに、 f_c' はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 b は梁幅 (mm)、 b_s は鋼板幅 (mm)、 t_s は鋼板厚 (mm)、 A_s は引張側鉄筋の断面積 (mm²)、 d_1 は引張側鉄筋までの有効高さ (mm)、 d_2 は引張側鉄筋と鋼板の図心までの高さ (mm)、 a はせん断スパン長 (mm) である。

表-6 に計算耐力を示す。健全な試験体 CB-1 および CB-2 の計算耐力は実験値とよく一致している。一方、支点からのせん断ひび割れのみを考慮した式(2)から求まる試験体 CB-1 および CB-2 の計算耐力は 113.6kN、116.0kN であり、実験値に対してやや過小評価することから、鋼板を考慮する方がよい結果を与える。一方、試験体 DBL-RI の実験値は上記の計算耐力 116.0kN に近く、鋼板端部の局所的な接着不良が影響したと考える。

4. まとめ

水平ひび割れおよび鋼板剥離を有する RC 梁に内圧充填接合補強工法を用いた補修効果について比較検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 接着不良箇所のあった試験体 DBL-IR を除き、上段鉄筋付近、上段・下段鉄筋付近の水平ひび割れ部および鋼板剥離部に樹脂充填できた試験体のせん断耐力および剛性は健全な状態にまで回復した。
- (2) 鋼板端部付近における接着不良箇所の存在はせん断耐力の回復程度に及ぼす影響が大きいことから、樹脂充填の確認、再注入を検討する必要がある。

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) 永井伴英, 鈴木英之, 藤田賢司, 出淵貴之, 平山智啓: 阪神高速道路における鋼板接着 RC 床版詳細調査報告, 第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.145-148, 2022.10
- 2) 松田伸隆, 武田三弘: RC 床版に発生する水平クラックの要因に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.652-657, 2023.7
- 3) 関口幹夫, 石田教雄, 栗塚一範: 鋼板接着補強床版の接着材再注入による補修効果, 土木学会第 72 回年次学術講演会, CS7-022, 2017.9
- 4) 鶴澤祐人, 田ノ上誠次, 山名晋平, 神谷陽介, 鈴木英之, 越野まやか: 鋼板接着補強済み RC 床版に対する特殊アンカーボルトを用いた水平ひび割れ補修工法の開発, 第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.213-218, 2022.10
- 5) 角南玲多, 村橋建祐, 東山浩士, 西 敏臣: 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, 第 13 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.63-68, 2024.10
- 6) 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) の設計施工法に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリー No.20, 2022.3
- 7) 西 敏臣, 古賀美知恵, 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, Vol.3, No.J2, pp.879-888, 2022
- 8) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.167-176, 1986.8
- 9) 西原知彦, 仲井裕司, 水越睦視, 東山浩士: PAE 系ポリマーセメントモルタルを用いた補強はりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1375-1380, 2011.7