

論文 水平ひび割れに樹脂を注入した RC 梁の曲げ挙動と補修効果

NING Weichen*1・東山 浩士*2

要旨：自動車荷重の繰返し作用や凍結防止剤散布による鉄筋腐食などが及ぼす RC 床版の劣化損傷のひとつに上段鉄筋位置付近に発生する水平ひび割れがある。この水平ひび割れが RC 床版の耐荷性能および耐疲労性能の低下に及ぼす影響に関する先行研究が見られる。本研究では、水平ひび割れを模擬した RC 梁に樹脂注入を施し、その曲げ挙動と補修効果について曲げ載荷試験による検討を行った。その結果、樹脂注入を行った RC 梁の曲げ挙動および曲げ耐力は健全な RC 梁と同程度まで回復した。一方、樹脂注入を行わず水平ひび割れを有する RC 梁は健全な RC 梁に対して曲げ耐力が約 20%低下した。

キーワード：RC 梁, 水平ひび割れ, 樹脂注入, 曲げ挙動, 補修

1. はじめに

自動車荷重の繰返し作用や凍結防止剤散布による鉄筋腐食などにより、鉄筋コンクリート (RC) 床版の上段鉄筋位置付近に水平ひび割れが発生する事例¹⁾が見られる。田中ら²⁾は RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりや上段鉄筋の抵抗機構、ならびに上面かぶりの剥離の影響について輪荷重走行試験結果を基に検討している。石黒ら³⁾や池端ら⁴⁾は上段鉄筋近傍の水平ひび割れや貫通ひび割れを模擬した RC 床版の押抜きせん断耐力の低下や抵抗機構を静的載荷試験結果および解析結果を基に検討しており、水平ひび割れにより押抜きせん断耐力が 79%に低下している。また、林田⁵⁾は凍結融解作用により RC 床版に発生した水平ひび割れの深さが押抜きせん断耐力に及ぼす影響を検討しており、水平ひび割れの発生位置によって破壊形式が異なることを示している。

以上の先行研究から、RC 床版の上段鉄筋位置付近に水平ひび割れが発生することにより、耐荷性能および耐疲労性能の低下が大きく、早期の対策による延命化や安全性の確保が重要である。RC 床版に対する種々の補修・補強工法が開発されているが、床版内部に発生しているひび割れを補修した上で何らかの対策を講じることがその後の延命化に繋がると考える。Venkitecla ら⁶⁾は水平ひび割れを模擬した RC 梁を用い、種々の補修材料を水平ひび割れ部に充填した際の変形挙動を 4 点曲げ載荷試験により評価している。しかし、水平ひび割れを有する RC 床版、あるいは RC 梁の補修後の曲げ挙動に関する先行研究は少ないといえる。

そこで本研究では、水平ひび割れを模擬した RC 梁を作製し、ひび割れ内部に内圧充填接合補強工法⁷⁾によるエポキシ樹脂の注入を行い、その補修効果を確認するため、4 点曲げ載荷試験による曲げ挙動および曲げ耐力について健全な RC 梁との比較を行った。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1 に示すように、幅 300 mm、高さ 200 mm、長さ 2000 mm の複鉄筋 RC 梁である。上段鉄筋は D13 (SD295A) を 2 本、下段鉄筋は D16 (SD295A) を 3 本配置し、それぞれのかぶりは 30 mm とした。試験体の種類は、表-1 に示すように、健全な RC 梁 (N)、上段鉄筋下側に水平ひび割れおよび予備載荷 (詳細は後述する) による曲げひび割れを有する RC 梁 (H-1: 樹脂注入有)、上段鉄筋下側に水平ひび割れを有する RC 梁 (H-2: 樹脂注入有)、および水平ひび割れの発生による曲げ耐力の低下を比較するための上段鉄筋下側に水平ひび割れを有する RC 梁 (H-3: 樹脂注入無) である。

試験体の作製および水平ひび割れの模擬は、まず水平ひび割れより下側のコンクリートを打設した後 (写真-1)、洗いブラシを用いて骨材表面が露出する程度まで表面のモルタル分を取り除いた (写真-2)。次に、硬化した下側コンクリート表面に、厚さ 0.011mm のポリ塩化ビニリデン製フィルム 2 枚を重ねて敷き、その上に上段鉄筋を所定の位置に配置 (写真-3) して上側コンクリートを打設した。このフィルムを敷設することにより硬化後の上下コンクリートを容易に分離でき、その後はワイヤーブラシを用いてフィルムをすべて取り除いた。

表-1 試験体の種類

試験体	水平ひび割れの有無	樹脂注入の有無	予備載荷の有無
N	無	無	無
H-1	有	有	有
H-2	有	有	無
H-3	有	無	無

*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教授 博 (工) (正会員)

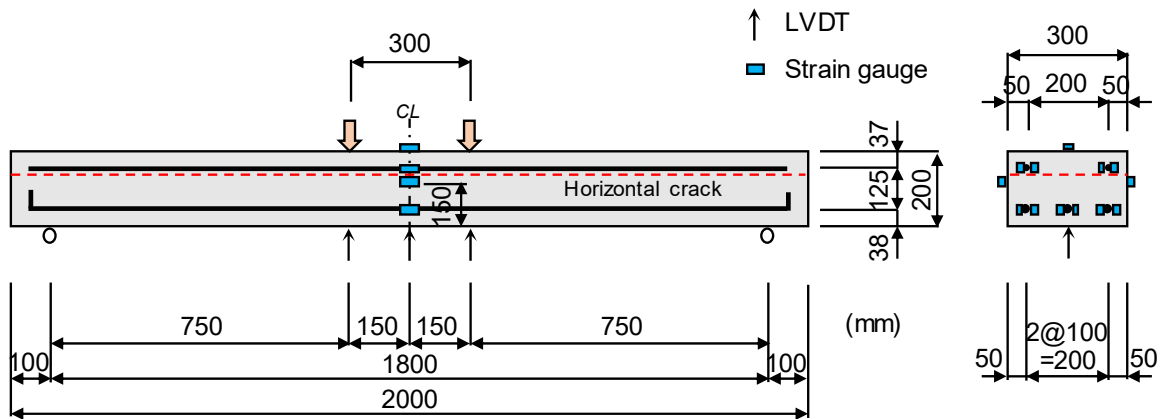


図-1 水平ひび割れを有する試験体の形状寸法および計測位置

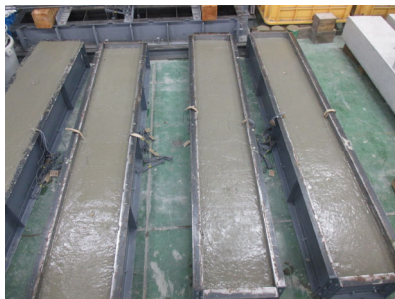


写真-1 下側コンクリート打設



写真-2 水平ひび割れの表面状態

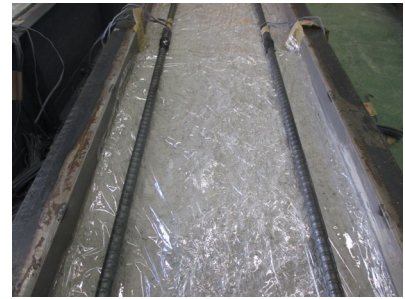


写真-3 上段鉄筋配置

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	AE 剤	高性能 AE 減水 剤
53.0	165	311	790	1003	3.11	2.18

表-3 材料強度

材料強度 (N/mm ²)					
上側コンクリート	下側コンクリート	上段鉄筋		下段鉄筋	
		降伏点	引張強度	降伏点	引張強度
29.3	30.5	374	486	370	519

2.2 使用材料

使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。粗骨材の最大寸法は 20 mm である。圧縮強度試験用の円柱供試体 (直径 100 mm, 高さ 200 mm) は, RC 梁と同様に, コンクリート打設後, 温度 20±2℃の室内にて荷重試験開始まで気中養生を行った。試験時における上・下側コンクリートの圧縮強度を表-3 に示す。上・下側コンクリートの打設は 2 週間の差であったが, 荷重試験まで 5 週

表-4 エポキシ樹脂の材料特性

圧縮強度 (N/mm ²)	57
ヤング係数* (N/mm ²)	2710
引張強度 (N/mm ²)	43
粘度 (mPa·s)	686
硬化収縮率 (%)	2

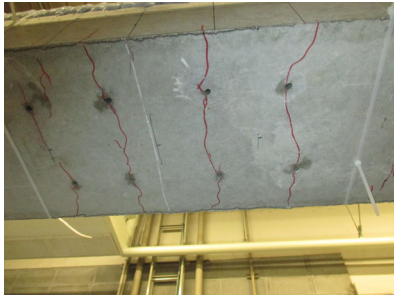
* 独自試験による結果

間ほどの養生を行っており, 両コンクリートの圧縮強度の差は小さかった。使用した鉄筋の降伏点および引張強度を表-3 に示す。

ひび割れ内部に充填するエポキシ樹脂は, 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 (2:1 質量比) で構成される。主な材料特性 (メーカー提供) を表-4 に示す。なお, ヤング係数のデータはメーカーから得ることができなかったため, 直径 50mm, 高さ 100 mm の円柱供試体を作製し, 圧縮荷重試験から求めた値である。

2.3 予備荷重

上述したように, H-1 試験体のみ樹脂注入前に予備荷重を行い, 曲げひび割れを導入した。目標荷重は道路橋示方書・同解説⁸⁾に規定されている鉄筋の引張応力度の制限値 120 N/mm² (下段鉄筋のひずみが 600 μ) に至る程



(a) 穿孔 (H-1 試験体)



(b) 穿孔 (H-2 試験体)



(c) シール



(d) 台座取付



(e) 樹脂注入



(f) 注入器具

写真-4 樹脂注入方法の概要

度とした。なお、水平ひび割れより上側のコンクリート部材が予備載荷時に破損することを避けるため、水平ひび割れより下側のコンクリート部材のみに載荷を行い、曲げひび割れを導入した。

2.4 樹脂注入方法

上段鉄筋下側に水平ひび割れおよび予備載荷による曲げひび割れを有する H-1 試験体に対しては、試験体下面の曲げひび割れ箇所を優先して穿孔（穿孔径 10 mm，穿孔深さ 170 mm）し、穿孔箇所数が 36 箇所/m² となるようにした（写真-4(a)）。穿孔深さは水平ひび割れを確実に貫通する 170 mm とした。ここで、予備載荷後の除荷時の曲げひび割れはほぼ閉塞しており、目視によるひび割れの開口が確認できなかったことから、アセトン塗布して試験体下面の曲げひび割れ位置を特定した。

上段鉄筋下側に水平ひび割れを有する H-2 試験体に対しては、穿孔箇所を一定間隔とし、36 箇所/m² となるようにした（写真-4(b)）。穿孔深さは H-1 試験体と同様に、水平ひび割れを貫通する 170 mm とした。

穿孔後に、試験体側面、下面の曲げひび割れ表面、および水平ひび割れ側面をシールし（写真-4(c)）、穿孔箇所に台座を取付け（写真-4(d)）、翌日にエポキシ樹脂を注入した（写真-4(e)）。具体には、内部にスプリングを装着した特殊なカセット内にエポキシ樹脂を充填したジャバラ容器をセット（写真-4(f)）し、スプリングの反発力（注入圧：0.06±0.01 N/mm²）によりエポキシ樹脂をひび割れ内部に注入する。その際、ひび割れ内部の空気を

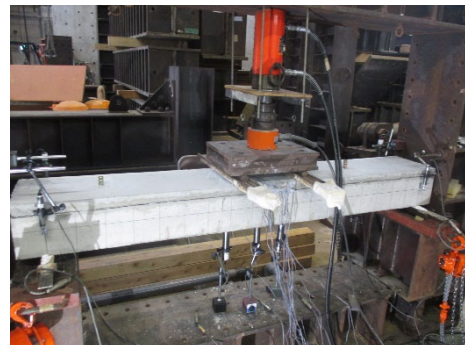


写真-5 4点曲げ試験

外部へ排出することにより、内部が負圧となり微細なひび割れまで樹脂が充填される機構である。

2.5 試験方法および計測項目

図-1 および写真-5 に示す 4 点曲げ試験を行った。支持条件はスパン 1800 mm の単純支持とし、載荷点間距離は 300 mm である。支持点および載荷点には不陸調整として、石膏を敷設した。いずれの試験体も下段鉄筋のひずみが 600 μ程度に達した段階で一旦除荷し、その後は破壊するまで漸増載荷した。

計測項目は、図-1 に示すように、スパン中央および載荷点下の変位 (LVDTs)、スパン中央の鉄筋およびコンクリートのひずみである。また、水平ひび割れより下側近傍のコンクリート（試験体底面から上方向 150 mm 位置の両側面）のひずみも測定した。

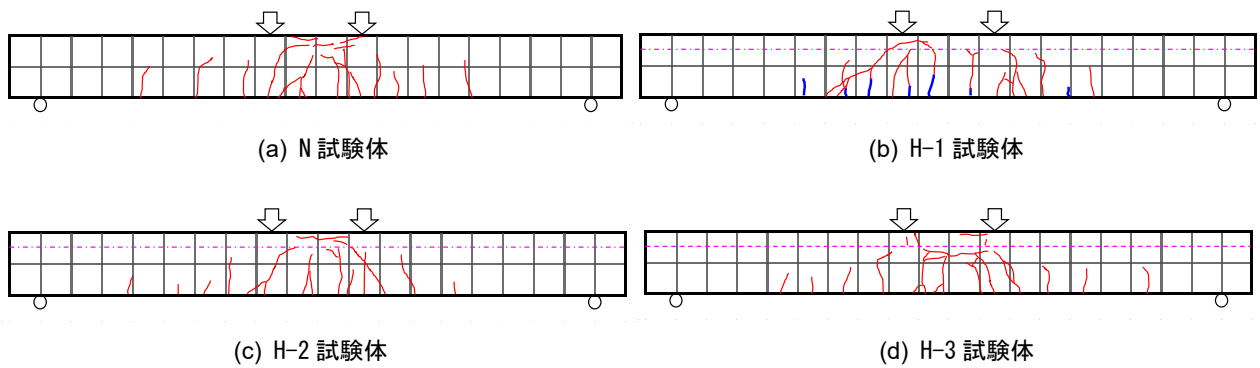


図-2 試験終了後のひび割れ状況

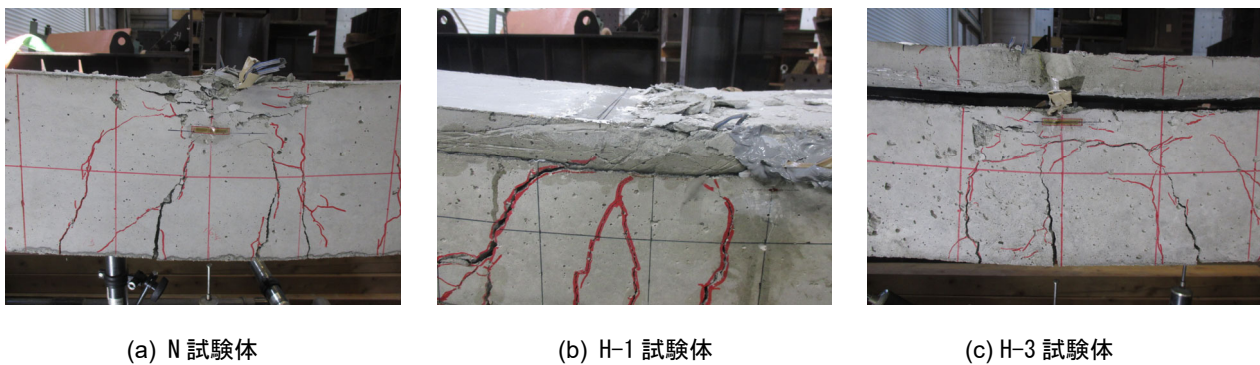


写真-6 試験後のひび割れ状況

3. 試験結果および考察

3.1 ひび割れ状況

荷重試験終了後のひび割れ状況を図-2 に示す。図-2(b)に示した H-1 試験体の青色が予備荷重時に発生したひび割れ、赤色がエポキシ樹脂注入後の荷重時に発生したひび割れである。曲げひび割れの発生に関しては、いずれの試験体も同様な状況である。N 試験体は、下段鉄筋降伏後、写真-6(a)に示すように、等曲げ区間のコンクリートの圧壊により終局状態となった。H-1 試験体、H-2 試験体ともに、梁上部に進展してきた曲げひび割れが水平ひび割れ部を通過し、写真-6(b)に示すように、水平ひび割れ上側の等曲げ区間のコンクリートの圧壊により終局状態となった。いずれの試験体も目視では水平ひび割れ部の付着切れによる層間剥離やずれは確認できなかった。試験終了後に、水平ひび割れに充填されていたエポキシ樹脂の厚さを測定したところ、3~4 mm 程度(写真-7)であった。実橋 RC 床版での調査結果から、幅 1 mm 以上の水平ひび割れが生じている事例⁹⁾も見受けられるが、それに比べて今回の幅はやや大きい状態であった。この原因として、エポキシ樹脂注入圧の影響により上側コンクリート部材が持ち上がった可能性がある。また、H-1 試験体については、曲げひび割れ内部への樹脂充填を目視により確認したところ、曲げひび割れ内部に樹脂の存在が見られず、上述したように、曲げひび割れの有無はアセトン塗布しないと確認できないほど微



写真-7 水平ひび割れ内部に充填された樹脂

細であったことが要因と考えられる。一方、H-3 試験体は、荷重の増加とともに水平ひび割れ部にずれが生じ、重ね梁に近い状態が確認できた。また、下側のコンクリート部材上部が先に圧壊し始め、続いて上側のコンクリート部材上部が圧壊して終局状態となった(写真-6(c))。

3.2 荷重-スパン中央変位関係

荷重-スパン中央変位関係を図-3 に示す。荷重初期の挙動を確認すると、H-1 試験体の予備荷重の影響は荷重-変位関係には顕著に現れていなかった。N 試験体、H-1 試験体、および H-2 試験体の荷重-変位関係は概ね同様であり、80 kN 付近で下段鉄筋の降伏による顕著な変化が現れている。N 試験体では、変位 23 mm 程度で圧壊による荷重低下が見られたが、H-1 試験体および H-2 試験体では、変位 45 mm 付近に至っても顕著な荷重低下が見られず、変位計が測定範囲を超えたため、変位の測

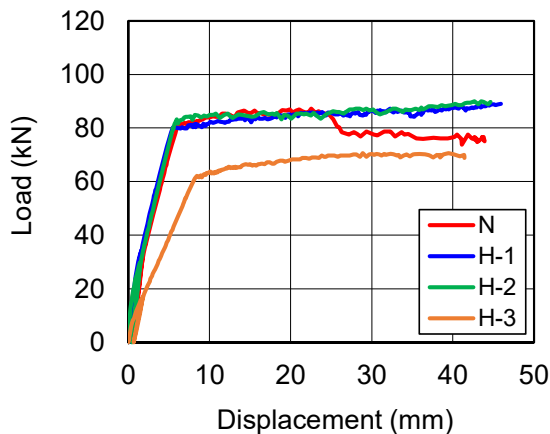


図-3 荷重-変位関係

表-5 試験結果

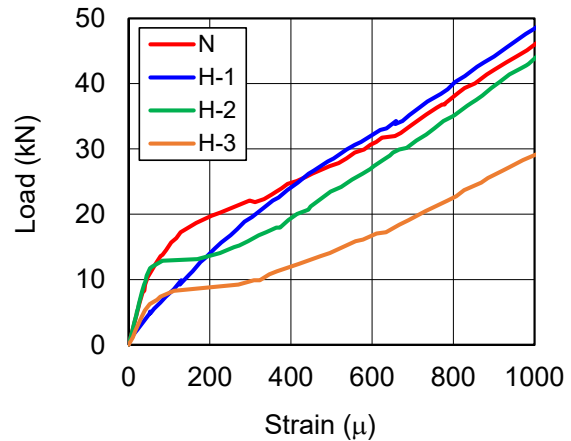
試験体	ひび割れ荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
N	13.6	84.4	87.2
H-1	—	81.4	89.9
H-2	12.9	84.6	90.4
H-3	6.2	57.5	70.6

定を中止した。健全な N 試験体との挙動の違いについて考察する。H-1 試験体および H-2 試験体の水平ひび割れ部に層間剥離やずれが見られなかったことから、N 試験体が最大荷重を呈した変位 23 mm 付近における各試験体のコンクリート上面、上段鉄筋および試験体底面から上方 150 mm の位置のひずみを比較した。その結果、H-1 試験体および H-2 試験体の中立軸位置は水平ひび割れより上側であったことから、引張りひずみ状態であった。エポキシ樹脂のヤング係数は 2710 N/mm^2 と低い値ではあるが、引張強度は 43 N/mm^2 と高い強度を有しており、引張抵抗していたと考えられる。

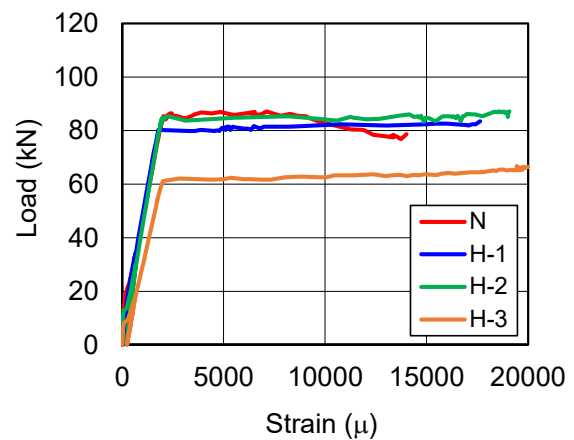
次に、各試験体の耐力を表-5 に示す。なお、降伏荷重は鉄筋のヤング係数を 200 kN/mm^2 として下段鉄筋の降伏ひずみが 1850μ に達した時の荷重である。H-1 試験体および H-2 試験体の降伏荷重および最大荷重は N 試験体とほぼ同程度であり、水平ひび割れ部への樹脂注入による補修効果が確認できた。一方、H-3 試験体は初期から曲げ剛性が大きく低下した状態にあり、最大荷重は N 試験体の 81% であった。

3.3 荷重-下段鉄筋ひずみ関係

荷重-下段鉄筋ひずみ関係を図-4 に示す。図-4(a) は荷重初期段階のひずみである。H-1 試験体は予備荷後に樹脂注入を行ったが、上述したように、曲げひび割れ内部に樹脂の存在が見られず、曲げひび割れの補修が



(a) 荷重初期段階



(b) 全体

図-4 荷重-下段鉄筋ひずみ関係

できておらず、初期段階からひずみが大きくなっている。また、H-2 試験体の初期段階では N 試験体と同様の挙動を呈しているが、やや早期に曲げひび割れが発生していると判断できる。H-3 試験体においては曲げひび割れの発生がさらに早まっている。図-4(b) はひずみを測定できた範囲に限っての全体の挙動を示しているが、H-3 試験体以外は概ね同様の挙動である。

3.4 ひずみ分布

各試験体のスパン中央断面におけるひずみ分布を図-5 に示す。なお、ひずみ分布は下段鉄筋のひずみ 600μ 付近、下段鉄筋の降伏ひずみ 1850μ 付近、およびコンクリートの上面ひずみ- 2000μ 付近（なお、図中では下段鉄筋のひずみ値で示している）の状態を示した。ここで、N 試験体の上段鉄筋位置がコンクリート打設時に当初設計の位置から下方へずれていたことが確認されたため、実測した位置（上面から 55 mm ）を用いて表記した。H-3 試験体を除く他の試験体のひずみ分布では、H-1 試験体および H-2 試験体の底面から上方 150 mm の位置のコンクリートひずみはコンクリートの上面ひずみ- 2000μ 付

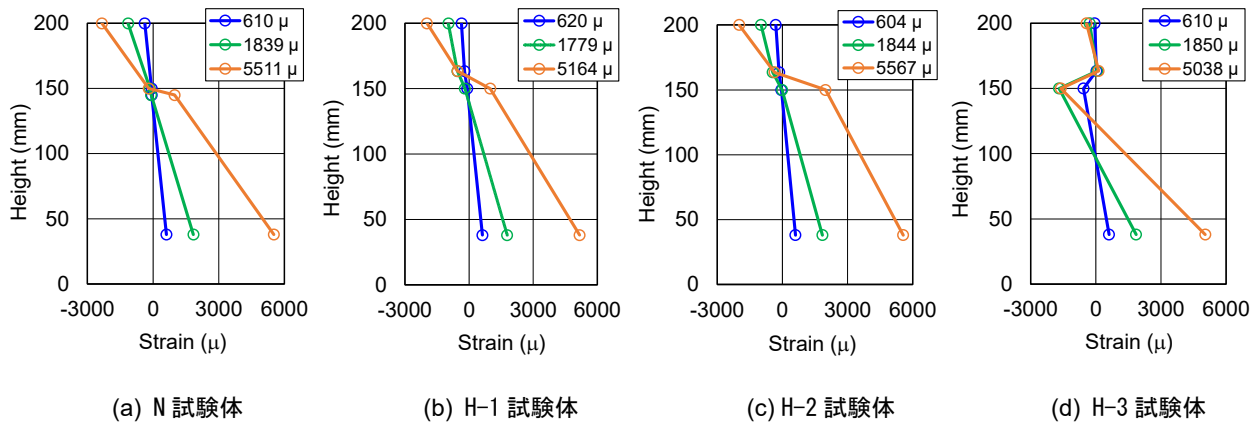


図-5 スパン中央断面のひずみ分布

近において引張ひずみとなり、やや大きなひずみを呈しているが、全体として平面保持の状態にあることが確認できる。一方、H-3 試験体は平面保持が見られず、上・下側のコンクリート部材が重ね梁の挙動をしていることが分かる。

4. まとめ

本研究では、上段鉄筋位置付近に水平ひび割れを有する RC 梁に対して、内圧充填接合補強工法を適用し、その補修効果を実験的に比較・検討した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 水平ひび割れ部に樹脂を注入した RC 梁は、下段鉄筋の降伏後もスパン中央たわみの測定可能範囲であった 45 mm 程度まで荷重を保持し、圧縮側コンクリートの圧壊により終局を迎えた。一方、樹脂を注入せず、水平ひび割れを有する RC 梁は、水平ひび割れより下側のコンクリート部材が先行して圧壊し、その後上側のコンクリート部材でも圧壊が生じて終局を迎えた。
- (2) 樹脂を注入せず、水平ひび割れを有する RC 梁の降伏荷重および最大荷重は、健全な RC 梁の 68% および 81% まで低下した。一方、水平ひび割れ内部に樹脂を注入した RC 梁は、健全な RC 梁の曲げ耐力と同等まで回復し、水平ひび割れ部への樹脂注入による補修効果が確認できた。

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) 田中良樹, 村越 潤, 長尾優子：道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.913-918, 2008
- 3) 石黒裕崇, 池端信哉, 中村 光, 三浦泰人：圧縮鉄筋近傍に模擬水平ひび割れを有する RC 床版の耐力低下に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.391-396, 2018
- 4) 池端信哉, 佐藤克樹, 中村 光：内部ひび割れが RC スラブの押抜きせん断耐力に与える影響に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.66A, pp.694-702, 2020
- 5) 林田 宏：水平ひび割れの位置や凍害劣化深さの違いが床版の耐力低下に与える影響, 寒地土研研究所月報, No.804, pp.2-13, 2020
- 6) Venkiteela, G., Klein, M., Najm, H. and Balaguru, P. N.: Evaluation of the Compatibility of Repair Materials for Concrete Structures, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.11, No.3, pp.435-445, Sep. 2017
- 7) 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
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017
- 9) 石田雅博：床版土砂化要因の早期検知技術, 第 13 回 CAESAR 講演会, 土木研究所構造物メンテナンスセンター, <https://www.pwri.go.jp/caesar/technical-information/caesar-meeting/lecture/lecture13.html> (閲覧日: 2023 年 3 月 16 日)