

RC 床版における水平ひび割れのメカニズム分析と鋼板接着の補強効果

法政大学 学生会員 ○南波謙太 正会員 藤山知加子

阪神高速道路(株) 正会員 青木康素 正会員 伊佐政晃 正会員 新名勉

1. はじめに

鋼板接着補強された RC 床版を対象に水平ひび割れに関する解析的検討を実施した。輪荷重走行試験の再現解析によって構築した RC 床版モデルを用いて、水平ひび割れの発生および進展メカニズムの解明や、再劣化を想定した鋼板接着による補強効果を定量的に評価することを目的とした。

2. 解析モデル

解析モデルは、既設 RC 床版の切出しパネルに鋼板接着をした試験体による輪荷重走行試験に基づく。鋼板接着部材や異形鉄筋はソリッド要素によってモデル化した(図 1,2)。既往の研究より、解析では試験体より破壊に至った回数がかかなり多くなったが、破壊時のたわみや内部のひずみ性状は試験の傾向を概ねとらえることができた。また下側鉄筋に沿うような連続的な厚さ方向のひずみ(Z ひずみ) 分布がみられた(図 3)。

3. 水平ひび割れの発生

ここでは無補強状態の RC 床版モデルを用いた。輪荷重走行 1 回目(157kN)より、床版中央位置の下かぶりコンクリートと下側主鉄筋において変形差(図 4)が生じた。この発生要因として鉄筋とコンクリート間の付着切れが考えられる。また鉄筋とコンクリート要素の節点より、輪荷重走行時の主軸方向の相対変位を算出した(図 5)。破壊力学における破壊モードを適用すると、き裂方向を主鉄筋方向(X 方向)としたとき、X 方向が他方向より卓越したことから、付着切れは主に破壊モード II の面内せん断変形により発生すると考えられた。

次に床版中央位置における下側主鉄筋高さのコンクリート要素(図 6 中の A-1 要素)の主鉄筋方向(X ひずみ)、鉛直方向(Z ひずみ) ひずみと走行回数関係を算出した(図 7)。荷重初期においては、X ひずみのほうが大きかったが、4 万回走行時では Z ひずみが増加し X ひずみを上回った。鉄筋とコンクリートにおけるモード II のせん断変形によって付着切れが発生した後、繰返し荷重に伴いモード I の開閉変形によって Z ひずみが増加したと考えられる。さらに 4~8 万回走行時において、Z ひずみは、ひび割れ発生相当の 200μ を上回った。ひずみの増加は荷重 STEP の増加に伴う荷重の増加、あるいは繰返し荷重による疲労効果が要因として考えられる。対象要素(図 6)における Z ひずみの推移(図 8)より、輪荷重直下である A-I、B-I の Z ひずみが 4~8 万回走行時に 200μ を上回ったことから、水平ひび割れは輪荷重直下位置から先行して発生すると考えられる。その後 Z ひずみは 16 万回走行以降に急増した。たわみは 20 万回以降に急増し、24 万回時には破壊に至ったと考えられた。

4. ひずみ指標による評価

偏差ひずみの第 2 不変量($\sqrt{J'_2}$) による評価手法²⁾を用いて、RC 床版の損傷評価を試みた。 $\sqrt{J'_2}$ は斜めひび割れや曲げひび割れの開口といった引張損傷

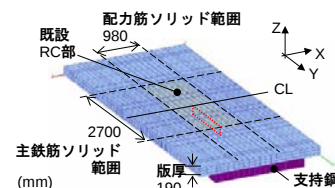


図 1 解析モデル概観

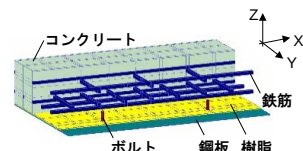


図 2 解析モデル内部

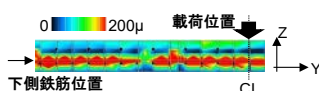


図 3 下側鉄筋に沿う Z ひずみ

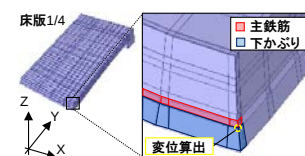


図 4 変形図 (倍率 200)

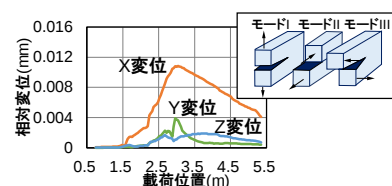


図 5 相対変位

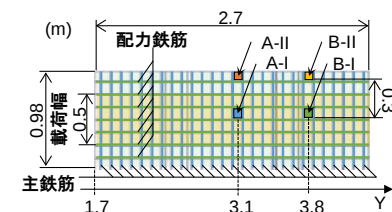


図 6 対象要素 (鉄筋ソリッド範囲)

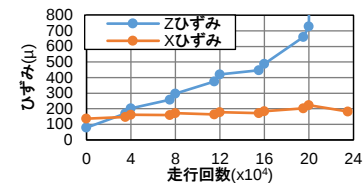


図 7 A-I の X, Z ひずみ推移

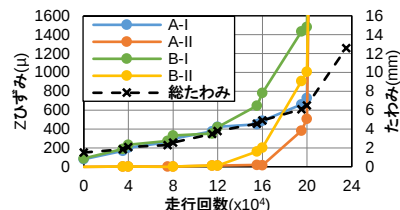


図 8 対象要素 Z ひずみとたわみ推移

キーワード: COM3D RC 床版 水平ひび割れ ひずみ指標 鋼板接着
連絡先: 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 TEL 03-5228-1406

の指標であり、スカラー量であるため重みつきで空間平均化することにより、要素寸法依存性を低減することができる。 $\sqrt{J'_2}$ の算出式を式(1)に示す。

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_y - \varepsilon_z}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_z - \varepsilon_x}{2} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{yz}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{zx}}{2} \right)^2} \quad (1)$$

初めに静的载荷を実施し（図 9），ひずみ指標を用いたひび割れ発生評価の感度分析を実施した。平均化領域の半径は $r=150^2$ を基準としてひび割れ発生を評価した結果，ひび割れ発生による床版の剛性低下時期を概ね求めることができ（図 10），その時期における $r=50, 100$ のひび割れ発生の限界値を特定した（表 1）。次に平均化領域（ $r=50\text{mm}$ ）の中心位置を主鉄筋高さの要素（図 6）とし， $\sqrt{J'_2}$ を用いて水平ひび割れの発生を評価した（図 11）。16 万回走行時に A-I および B-I の領域は限界値に概ね達した。よって $\sqrt{J'_2}$ を用いた評価では，水平ひび割れの発生時期は約 16 万回走行時であることがわかった。3 章の Z ひずみによる評価では，水平ひび割れの発生時期は 4~8 万回走行時であると考えられ，16 万回走行時は急増した時期であった。 $\sqrt{J'_2}$ を用いた評価は，床版の破壊に起因するような開閉量が大きいひび割れの発生を評価すると考えることができる。

5. 鋼板接着の補強効果

輪荷重の繰返し载荷時における鋼板接着補強をシミュレーションした。補強鋼板と床版下面の樹脂による付着を考慮したケースを樹脂ケース，鋼板の浮きを想定したケースを剥離ケースと呼ぶ。表 2,3 に各ケースのたわみ低減率を示す。補強時期は载荷開始時，12 万回走行後，20 万回走行後である。樹脂ケースにおける補強前後のたわみ比(A)/(B)は 30~51%となったが，剥離ケースにおけるたわみ比(A)/(B)は 68~73%となり，樹脂による付着効果の影響が顕著にみられた。また剥離ケースのたわみ比(A)/(B)は補強時期に関係なくほぼ一定であった。図 12 に载荷開始時，12 万回，20 万回走行後に補強を実施したときのたわみ推移を示す。補強後のたわみ増加量は，樹脂ケースは補強時期に関係なくほぼ同等であったことから，補強によって床版全体の剛性が回復されたことを確認した。剥離ケースは補強時期が遅れるごとに補強後のたわみ増加量は大きくなる傾向がみられた。図 13,14 に各ケースにおける 20 万回走行後の補強前後の Z ひずみコンターを示す。下側主鉄筋高さの鉄筋ソリッド範囲を対象とした。両ケースともに载荷幅直下位置における 200μ を超える Z ひずみが低減されたことから，水平ひび割れの発生に対する効果がみられた。ここでも樹脂ケースのほうが Z ひずみの低減された範囲が広がったことから，補強効果が大きかったと言える。

6. まとめ

RC 床版の下側鉄筋高さに発生する水平ひび割れは，主鉄筋とコンクリート間の付着切れを起点に発生し，繰返し载荷による開閉変形により進展すると考えられた。鋼板接着は水平ひび割れの発生に対する効果がみられたが，樹脂の剥離を想定するケースでは補強効果は小さくなった。

参考文献

- 1) 南波謙太，藤山知加子，新名勉，青木康素：鋼板接着 RC 床版における水平ひび割れ進展過程の分析，第 10 回道路橋床版シンポジウム，pp.313-318，2018。
- 2) 公益社団法人土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2017

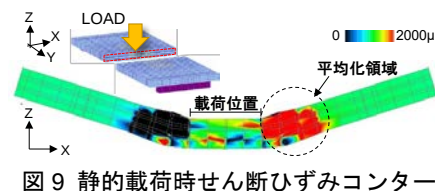


図 9 静的载荷時せん断ひずみコンター

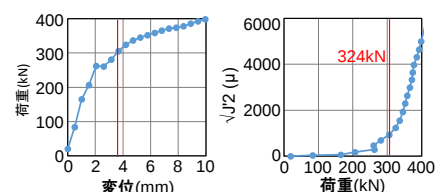


図 10 荷重-変位- $\sqrt{J'_2}$ 関係

表 1 領域半径による $\sqrt{J'_2}$ の限界値

半径 r (mm)	載荷荷重 (kN)	$\sqrt{J'_2}$ (μ)
150	324.0	1236
100	324.0	1282
50	324.0	1722

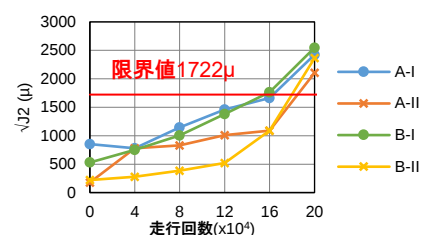


図 11 対象要素の $\sqrt{J'_2}$ 推移

表 2 たわみ低減率（樹脂）

時期	補強前(B)	補強後(A)	(A)/(B)
開始時	1.52 mm	0.77 mm	0.51
12 万後	3.44 mm	1.33 mm	0.39
20 万後	5.93 mm	1.81 mm	0.30

表 3 たわみ低減率（剥離）

時期	補強前(B)	補強後(A)	(A)/(B)
開始時	1.47 mm	1.08 mm	0.73
12 万後	3.26 mm	2.24 mm	0.69
20 万後	5.86 mm	3.97 mm	0.68

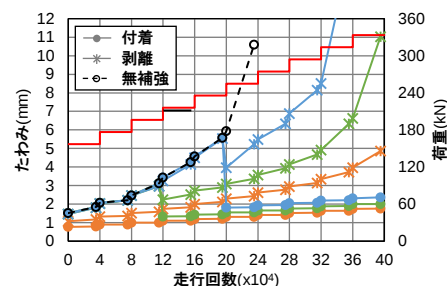


図 12 補強前後のたわみ推移

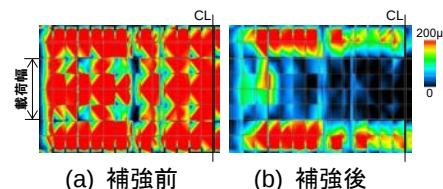


図 13 20 万回走行時 Z ひずみ（樹脂）

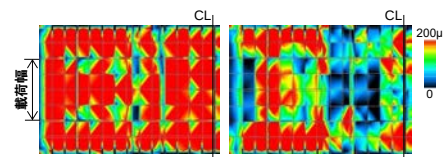


図 14 20 万回走行時 Z ひずみ（剥離）