

移動載荷により損傷した RC 床版の応力状態

Stress state of reinforced concrete slab Damaged by Wheel Load

(株)北武研究所                      ○正 員 細川 真利(Masatoshi Hosokawa)  
北武コンサルタント(株)        正 員 坂口 淳一(Junichi Sakaguchi)  
北武コンサルタント(株)        正 員 渡辺 忠朋(Tadatomo Watanabe)

1. はじめに

これまで高度経済成長期に大量に建設された道路橋の鉄筋コンクリート床版（以後、RC 床版と呼ぶ）は、一斉に耐用期間を向かえるが、我が国の経済状況から新たな架け替えは難しい状況にある。そのため、財政支出の平準化などのためには、適切な補修・補強を行い長寿命化を図ることが急務である。また、新設 RC 床版に対しても新たな構造形式により長寿命化を図ることが求められている。

このような社会的な背景を受け近年では、様々な補修・補強工法や新たな構造形式が開発されている。

RC 床版の主な損傷原因は過積載等による疲労損傷であり、そのメカニズムも多くの実験的及び解析的アプローチから解明されてきた。

実験的なアプローチでは、模型供試体による輪荷重走行試験により疲労寿命予測式が提案されている<sup>1)</sup>。

一方、解析的なアプローチとしては、前川・藤山らが有限要素法により床版の疲労損傷を再現している<sup>2)</sup>。解析条件として疲労損傷を考慮した材料構成則を用いることで良好に再現できることが示されている。

これを受け著者らは、コンクリートの材料レベルでの疲労損傷に着目し、RC 床版上面側の圧縮域コンクリートの圧縮疲労損傷に基づき、部材の疲労破壊を評価することを試みた<sup>3)</sup>。この評価手法は、応答値を圧縮域コンクリートの最小主応力 $\sigma'_2$ 、限界値をコンクリートの圧縮疲労強度 $f'_{\alpha}$ とするもので、破壊条件は応答値が限界値を超える場合である。評価の方法は断面幅を設定し RC 床版を 2 次元の梁部材に置き換えコンクリートの圧縮域に作用する最小主応力を求めるものである。検討の結果この手法は、断面幅を適切に設定することで、疲労損傷を評価できる可能性があることが示唆している。

本稿ではさらに移動載荷により損傷した RC 床版の 3 次元での応力状態を確認するため、3 次元有限要素解析を用いて損傷段階や損傷範囲を変えて検討した。本検討は、応力状態の基礎的な傾向を把握するため弾性解析で行った。

2. 解析方法

解析ツールは三次元鉄筋コンクリート非線形解析 COM3D を用いた。

解析対象は、既往の研究で実施された輪荷重走行試験<sup>4), 5)</sup>とした。解析モデルを図一1 に解析条件及び解析ケースを表一に示す。

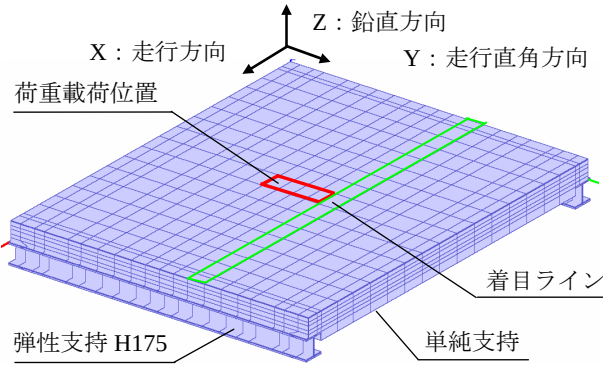
損傷モデルは、輪荷重により床版下面側のコンクリー

トがひび割れ損傷した状態を模擬するため、図一2 のように上面側から 2 層目より下の要素の弾性係数を低下させることとした。解析のパラメータはひび割れ損傷した RC 床版を評価するため、損傷度と損傷範囲とした。

損傷度は、コンクリート全断面が有効の状態を 0.0、ひび割れ断面の状態を 1.0 とした。損傷度 1.0 の弾性係数は、最上段の要素を健全な弾性係数  $E_c$  としひび割れ断面の断面二次モーメント  $I_y$  となるように設定した。

損傷範囲は図一3 に示すように 5 つのエリアに分けた。

載荷条件は T 荷重に相当するように載荷荷重を 100kN、載荷範囲を 200mm×500mm とし節点荷重で供試体中央部に与えた。

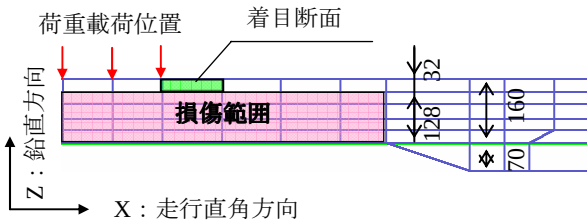


図一1 解析モデル

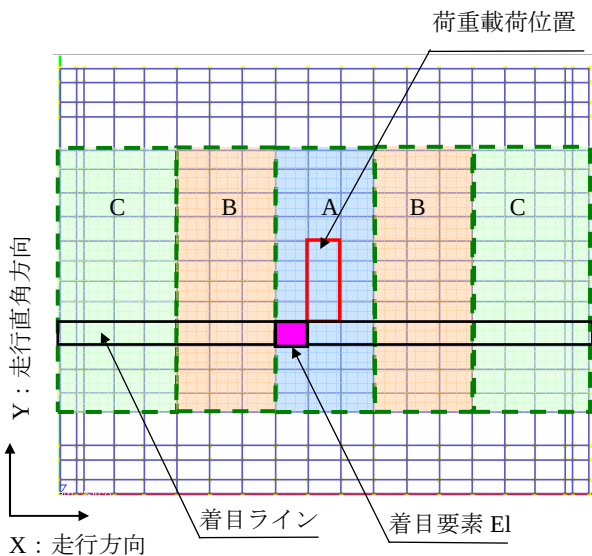
表一 解析条件および解析ケース

|                  | 床版本体      |                    | 弾性支持               |
|------------------|-----------|--------------------|--------------------|
|                  | $E_c$     | $2.54 \times 10^4$ | $2.05 \times 10^5$ |
| 弾性係数 $N/mm^2$    | コンクリート全断面 |                    | $I_G$              |
|                  | ひび割れ断面    |                    | $I_y$              |
| 断面二次モーメント $mm^4$ |           |                    | $3.41 \times 10^8$ |
|                  |           |                    | $9.86 \times 10^7$ |
|                  | 損傷度       |                    | 弾性係数 $N/mm^2$      |
|                  | 0.0       |                    | $2.54 \times 10^4$ |
|                  | 0.5       |                    | $1.45 \times 10^4$ |
|                  | 1.0       |                    | $3.61 \times 10^3$ |
|                  | 損傷度       |                    | 損傷範囲               |
|                  | 0.0       |                    | なし                 |
| ケース1             | 0.0       |                    | なし                 |
| ケース2             | 0.5       |                    | A                  |
| ケース3             | 0.5       |                    | A + B              |
| ケース4             | 0.5       |                    | A + B + C          |
| ケース5             | 1.0       |                    | A                  |
| ケース6             | 1.0       |                    | A + B              |
| ケース7             | 1.0       |                    | A + B + C          |

解析条件は、図—1 に示すように走行直角方向の 2 辺を単純支持(支間 2350mm)、走行方向の 2 辺を横桁による弾性支持とした。2 辺単純支持は RC 床版の下面の節点を拘束した。2 辺弾性支持は弾性支持材(175×175mm の H 型鋼)をソリッド要素でモデル化した。



図—2 Y-Z 断面の損傷範囲



図—3 X-Y 断面の損傷範囲

### 3. 解析結果

#### 3. 1 最小主応力ベクトル

解析結果の一例としてケース 1、5、7 の最上段の要素の最小主応力ベクトル図を図—4 に示す。全断面にわたって健全なケース 1 は縦長の楕円状を呈しているが、損傷が進みさらにその範囲が広がったケース 5、7 では円状になり、最小主応力が傾くことがわかる。

これは損傷により走行直角方向の単純支持による一方スラブから走行直角方向と弾性支持材による走行方向の支持による二方向スラブへと変化することを示していると思われる。

#### 3. 2 最小主応力の分布

図—2、図—3 に示す着目断面で X-Y 平面での最小主応力の分布図を図—5、図—6、図—7 に示す。

損傷段階を変えた図—5 では損傷度が進行するにつれて最小主応力は大きくなる傾向がみられる。また、損傷度が 0.5 で損傷範囲を変えた図—6 でも同様に、損傷範囲が広くなるにつれて最小主応力は大きくなる傾向がみられる。

図—5 及び図—6 の載荷点近傍の 1650mm の最小主応力の不連続に小さな値は、荷重を節点に集中して与えているためと思われる。

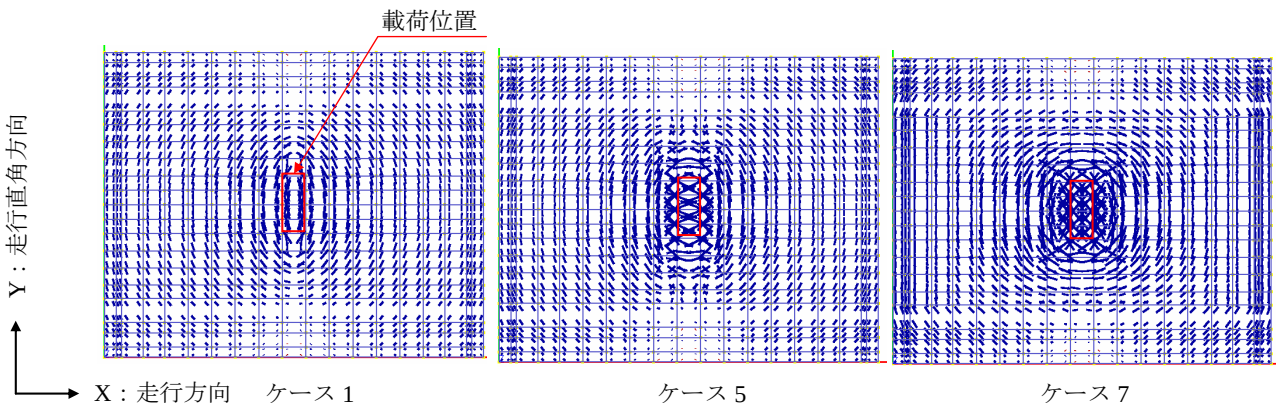
図—7 より損傷度が 1.0 の場合の最小主応力は、図—6 の損傷度 0.5 の場合と同様に損傷範囲が広がるにつれて大きくなるものの、全範囲にわたって損傷したケース 7 では端部に異なった傾向がみられる。これは、全範囲に損傷が広がった場合には RC 床版に比べて相対的に弾性支持の剛性が大きくなり支持条件が固定状態に近くなったためと思われる。

損傷段階を変えた図—5 の最小主応力の分布から、各ケースの最小主応力の最大値を抽出したものを図—11 に示す。損傷度が大きくなるにつれて最小主応力も大きくなることがわかる。損傷範囲を変えた図—6、図—7 から、各ケースの最小主応力の最大値を抽出したものを図—12 に示す。損傷度 0.5、1.0 とともに損傷範囲が広がるにつれて最小主応力が大きくなる傾向がみられる。ただし、損傷度 1.0 で全範囲に損傷が広がったケース 7 はケース 6 に比べて若干小さな値となった。これは、床版の剛性が全範囲に低下すると弾性支持の剛性が相対的に大きくなって 4 辺支持に近くなったためと思われる。

以上より、損傷が進み、その範囲が広がると最小主応力は大きくなる可能性がある。

#### 3. 3 最小主応力の角度

図—8、図—9、図—10 に走行直角方向との最小主応力の角度を示す。



図—4 最小主応力ベクトル図

損傷段階を変えた図—8 では、供試体中央部の 1650mm で 90° に変化するものの、その他のラインではほぼ同じ値であった。

損傷度が 0.5 で損傷範囲を変えた図—9 では、損傷範囲の影響を受けずほぼ同じ結果となった。

一方損傷度が 1.0 で損傷範囲を変えた図—10 では、損傷範囲が広がるにつれて、角度が変化した。

移動載荷が主応力の回転にどのように影響するかを評価するため、図—3 に示す載荷位置から一つ隣の要素 E1 に着目する。損傷度が最小主応力の回転角度に与える影響を図—13 に、損傷度 0.5 と損傷度 1.0 で損傷範囲が最小主応力の回転角度に与える影響を図—14 に示す。

図—13 より各ケースの角度は概ね 30° であり、損傷度が最小主応力の回転角度に与える影響は小さいものと思われる。

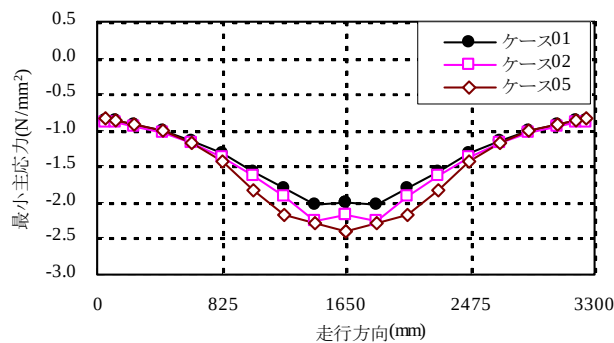
図—14 より損傷度が 0.5 でその範囲が広がった場合でも角度は概ね 30° であり、損傷範囲が広がることで回転角度に及ぼす影響は小さいと思われる。

一方、損傷度が 1.0 になると、損傷範囲が広がったケース 6 では約 50°、ケース 7 では約 45° まで傾いていることがわかる。

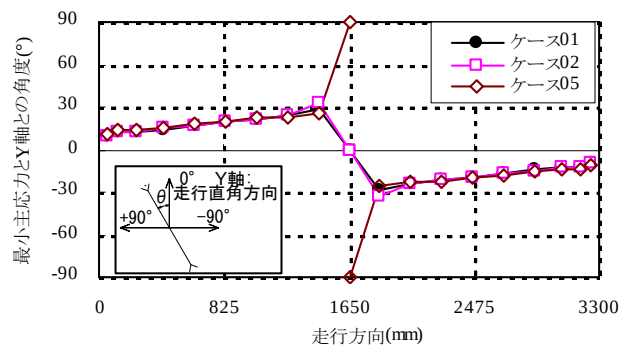
以上より、最小主応力の回転角度は損傷が進みその範囲が広がった場合に大きくなる可能性がある。

主応力の回転は、コンクリートマトリックス内に新たに別な角度でひび割れを発生させ、一定方向の作用に比べ早期に損傷が進む原因になる可能性がある。このことは、損傷が進みその範囲が広がった最終段階の RC 床版は、大きな主応力を受けるだけでなく回転作用によりさらに損傷が進むことを示唆するものと思われる。

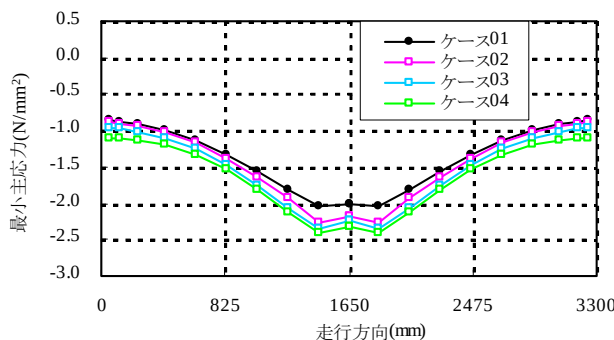
実際の RC 床版に対して行われる目視や非破壊試験による点検では、RC 床版の主応力が回転するまで損傷が進んだかを把握することは非常に困難であると思われる。ただし、ひび割れ密度や幅、貫通ひび割れにより発生したと思われるエフロレッセンスの析出などによる間接的な情報を把握することにより損傷段階を推定することは可能であると思われる。



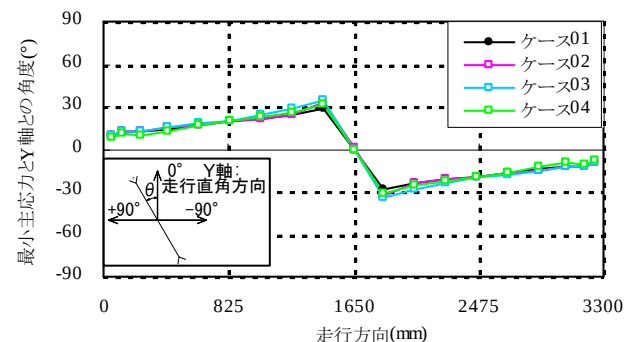
図—5 各損傷段階の最小主応力の分布図



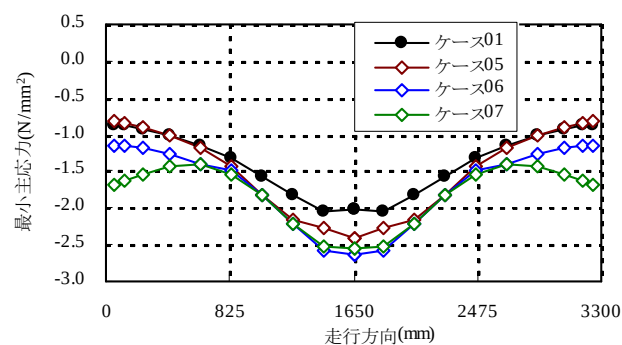
図—8 各損傷段階の最小主応力の角度



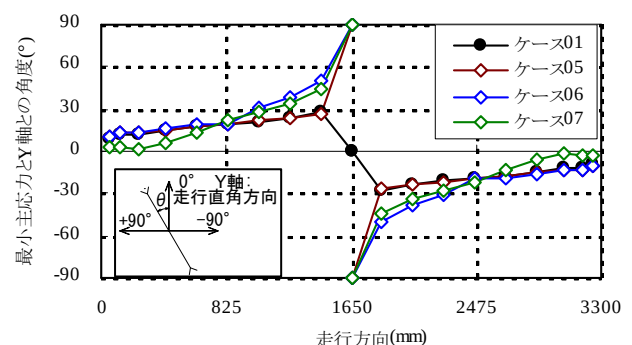
図—6 各損傷範囲の最小主応力の分布図 (損傷度 0.5)



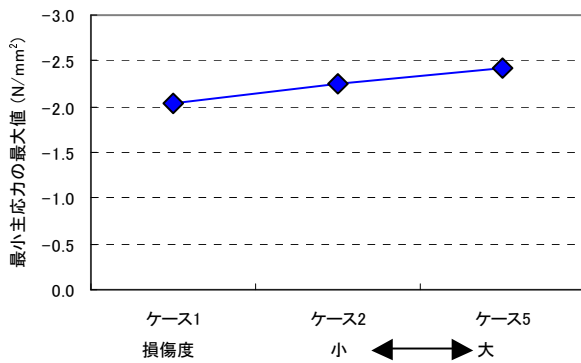
図—9 各損傷範囲の最小主応力の角度 (損傷度 0.5)



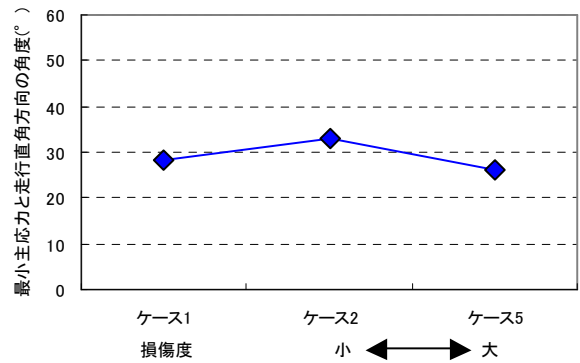
図—7 各損傷範囲の最小主応力の分布図 (損傷度 1.0)



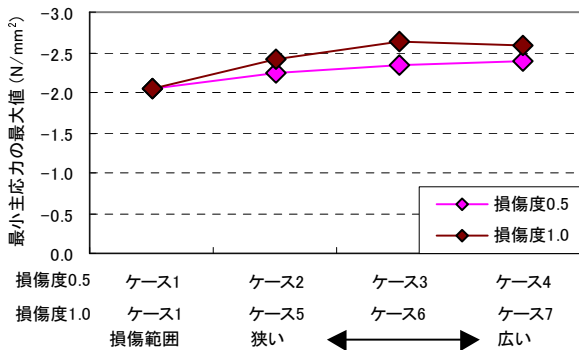
図—10 各損傷範囲の最小主応力の角度 (損傷度 1.0)



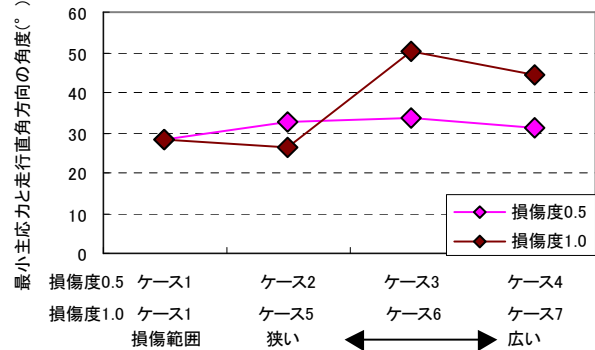
図一11 損傷度が最小主応力に与える影響



図一13 損傷度が最小主応力の回転角度に与える影響



図一12 損傷度範囲が最小主応力に与える影響



図一14 損傷範囲が最小主応力の回転角度に与える影響

さらに、詳細に応力状態を把握するためには、車両走行時の下面のひび割れの3次元的な測定や、輪荷重により発生する床版の応力やひずみを載荷試験により測定することも有効であると思われる。

#### 4. おわりに

移動載荷によりひび割れ損傷した RC 床版の応力状態を3次元有限要素法解析により検討した。検討方法は損傷段階や損傷範囲をパラメータとして行った。

- (1) RC 床版の圧縮領域の最小主応力ベクトルは損傷が進みその範囲が広がると楕円状から円状に変化する。これは RC 床版の剛性が弾性支持に比べて相対的に小さくなり、一方向スラブから二方向スラブへと変化したものと思われる。
- (2) 損傷段階が進むほど、また、その範囲が広がるほど、圧縮領域の最小主応力は大きくなる。
- (3) 移動載荷による圧縮領域の主応力の回転角度は、ひび割れ損傷が進みさらにその範囲が広がった場合大きくなる。主応力の回転は、コンクリートマトリックス内に新たに別な角度でひび割れを発生させ、一定方向の作用に比べ早期に損傷が進む原因になる可能性がある。このことは、損傷が進みその範囲が広がった最終段階の RC 床版は、

大きな主応力を受けるだけでなく回転作用によりさらに損傷が進むことを意味するものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007.10
- 2) 藤山知加子，商 峰，櫻井信彰，前川宏一：直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード，土木学会論文集，Vol.66，No.1，pp.106-116，2010
- 3) 坂口淳一，渡辺忠朋，土屋智史，久部修弘：補強 RC 床版の補強メカニズムとコンクリートの圧縮疲労損傷に基づく RC 床版の疲労破壊評価に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.421-426，2013
- 4) 赤代 恵司，坂口 淳一，三田村 浩，岸 徳光：丸鋼を用いた RC 床版の疲労耐久性（その 1. 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検討），土木学会第 66 回年次学術講演会，Vol.66，I -011.pp.21-22，2011
- 5) 西 弘明，三田村 浩，赤代 恵司，岸 徳光：丸鋼を用いた RC 床版の疲労耐久性（その 2. 輪荷重走行試験による疲労耐久性の検討），土木学会第 66 回年次学術講演会，Vol.66，I -012.pp.23-24，2011