

# 鋼板接着補強RC床版の橋梁全体モデルによる耐荷力解析

立花徳啓<sup>1</sup>・越野まやか<sup>2</sup>・鈴木英之<sup>2</sup><sup>1</sup> (一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部<sup>2</sup> 管理本部管理企画部保全技術課

## 要約

鋼板接着工法により補強しているRC床版は経年による劣化が徐々に発生しており、耐荷力に影響を及ぼす懸念がある。本稿ではコンクリートの圧縮強度に着目し、コンクリート強度とRC床版の耐荷力の関係を定量的に評価するため、有限要素法 (FEM) により解析した結果について報告する。

キーワード: 鋼板接着工法, RC 床版, 耐荷力

## 1. はじめに

阪神高速道路では、道路構造物の老朽化により建設後30年以上経過したストックが約5割を占めており、計画的・戦略的な維持管理が求められており、様々な検討がなされている。鋼桁の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）については、昭和47年に大阪堺線および大阪守口線で発生した床版陥没損傷を契機に、損傷メカニズム、損傷度の評価、疲労破壊機構、疲労寿命予測、補修・補強工法など多岐にわたる検討を実施し<sup>1)</sup>、基本的な補強工法として鋼板接着工法を選定している。鋼板接着工法を施工後は良好な状態で管理されてきたが、耐久性に影響を及ぼすRC床版の劣化が徐々に発生している<sup>1)</sup>。

これまでに下段鉄筋の主鉄筋位置に水平ひび割れが発生している既設RC床版を切り出し、輪荷重走行試験を実施することで鋼板接着補強済みRC床版の疲労耐久性について検討を行った。鋼板が剥離した場合と樹脂を再注入または鋼板取替を施した場合を比較した結果、樹脂の再注入や鋼板取替を施すことで疲労耐久性の向上が確認された。しかし、コンクリート自体の圧縮強度が低下することにより、鋼板接着補強済みRC床版の耐荷力にどのような影響を及ぼすかは明らかになっていない。本稿では、コンクリートの圧縮強度に着目し、コンクリート強度とRC床版の耐荷力の関係を定量的に評価するため、有限要素法 (FEM) により解析した結果について報告する。また、鋼板の再接着工事時に鋼板を撤去した際の耐荷力への影響を確認するために、鋼板を撤去したモデルについても解析を行い、耐荷力の比較を行った。

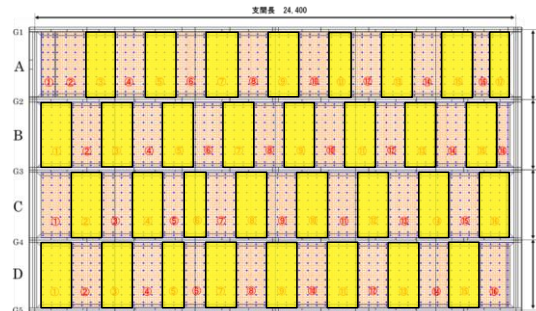
## 2. 解析条件

### (1) 解析ケース

解析ケースは、表-1 に示すように無補強の RC 床版をベースモデルとし、全面を鋼板接着により補強したフルモデル、フルモデルから鋼板を 1 枚撤去した鋼板 1 枚撤去モデル、フルモデルから図-1 に示すように鋼板を撤去した千鳥撤去モデルの 4 パターンとした。RC 床版のコンクリート強度を設計基準強度相当 (28.0 N/mm<sup>2</sup>)、設計基準強度の 3/4 相当 (21.0 N/mm<sup>2</sup>)、設計基準強度の 1/2 相当 (14.0 N/mm<sup>2</sup>) の 3 点変化させて解析を実施した。

表-1 解析ケース

解析モデル	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
	$\sigma_{ck}$ (28.0)	$3/4\sigma_{ck}$ (21.0)	$1/2\sigma_{ck}$ (14.0)
ベースモデル (補強前RC床版)	○	○	○
フルモデル (全面鋼板補強)	○	○	○
鋼板1枚撤去 モデル	○	-	○
鋼板千鳥撤去 モデル	○	○	○

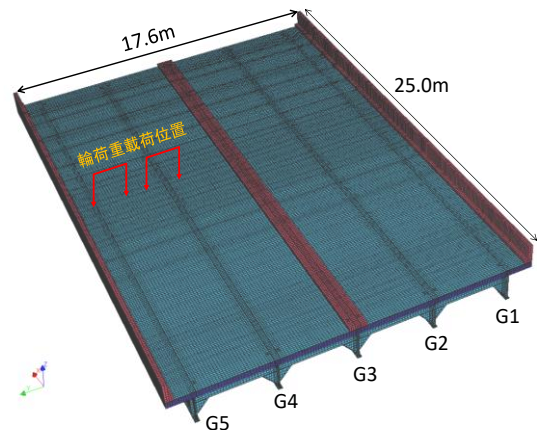


■ : 鋼板撤去箇所

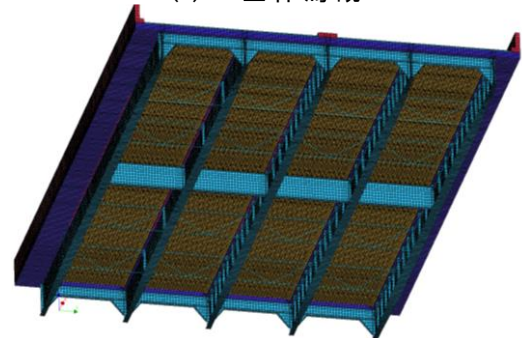
図-1 鋼板千鳥撤去モデルの撤去箇所

## (2) 解析モデル

図-2に解析モデルを示す。橋長 25.0 m、幅員 17.6 m の 5 主桁の合成鈹桁橋である。主桁作用の影響、高欄、横桁、配筋筋、ハンチ鉄筋などを可能な限り現実に近い挙動で把握するために上部構造全体をモデル化した。荷重載荷位置は床版モーメントが最大となる位置を選定した。支持条件は、実構造物の端部で、固定端は橋軸方向を固定、可動端は橋軸方向を自由とした。いずれの支点部も鉛直方向、橋軸直角方向は固定とした。総節点数は 362,116 であり、表-2 に示す要素数のモデルとした。



(a) 全体鳥観



(b) 3Dモデル(下面より望む)

図-2 解析モデル図

## (3) 材料特性

本解析に用いた材料特性を表-3 に示す。圧縮状態のコンクリートの応力-ひずみは、道路橋示方書モデルを用い、最大圧縮応力は  $28 \text{ N/mm}^2$  とした<sup>2)</sup>。コンクリートの使用限界ひずみを 0.002、終局限界ひずみを 0.0035 と定義し<sup>3)</sup>、引張域については、収束性を確保するために引張強度の 1/2 までは直線的に増加し、その後は一定と仮定している。鉄筋は降伏応力を  $295 \text{ N/mm}^2$  とし、降伏後は応力を一定とするバイリニアモデルとした。舗装は圧縮強度  $4.5 \text{ N/mm}^2$  のバイリニアモデルとした。本解析における使用限界、終局限界は以下のように定義した。なお、押抜きせん断破壊モードは下記の終局限界状態以降で発生すると想定し、評価しないこととした。

- 1) 使用限界状態：コンクリート圧縮ひずみが 0.002 あるいは鉄筋ひずみが降伏に達する状態
- 2) 終局限界状態：コンクリート圧縮ひずみが 0.0035 あるいは鉄筋ひずみが 0.015 に達する状態

## (4) 構成部材と要素

図-3 に各構成部材の要素を示す。RC 床版、舗装、壁高欄および中央分離帯はソリッド要素とし、主桁および補強鋼板はシェル要素でモデル化した。RC 床版コンクリートは  $45 \text{ mm}$  の 4 層でソリッド要素とした。RC 床版と補強鋼板の接着剤はソリッド要素とし、解析モデルを簡素化させるため対傾構は梁要素とした。鋼板のアンカーボルトは、アンカーボルト位置に RC 床版と補強鋼板を剛結合とするバネ要素とし、RC 床版-接着剤間、接着剤-補強鋼板間は接着剤の効果を検討できるように接着要素を用いた。

表-2 全要素数

部材	要素	要素数
RC床版・高欄・舗装	ソリッド要素	166,144
主桁・横桁・補強鋼板	シェル要素	104,630
対傾構	梁要素	
鉄筋	埋込み鉄筋要素	795

表-3 材料特性

部材	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ポアソン比
RC床版	$2.7\text{E}+04$	-	28.0	2.0	0.17
補強鋼板	$2.0\text{E}+05$	235	-	-	0.30
鉄筋	$2.0\text{E}+05$	295	-	-	0.30
接着剤	$1.5\text{E}+03$	-	59.0	-	0.40
舗装	$1.5\text{E}+03$	-	4.5	-	0.35

## (5) 解析結果の着目点

図-4 に解析結果の着目点を示す。以下に示すように大きなひずみが発生する 3 箇所において使用限界ひずみおよび終局限界ひずみに達する箇所を評価した。

- 1) a 点：配力鉄筋ピッチが変化している位置、応力が大きく変化する
- 2) b 点：床版支間中央位置、桁を固定と仮定するとモーメントが最大となる
- 3) c 点：G4 主桁ハンチ付近、負の曲げモーメントが大きくなるため、応力が大きく変化する

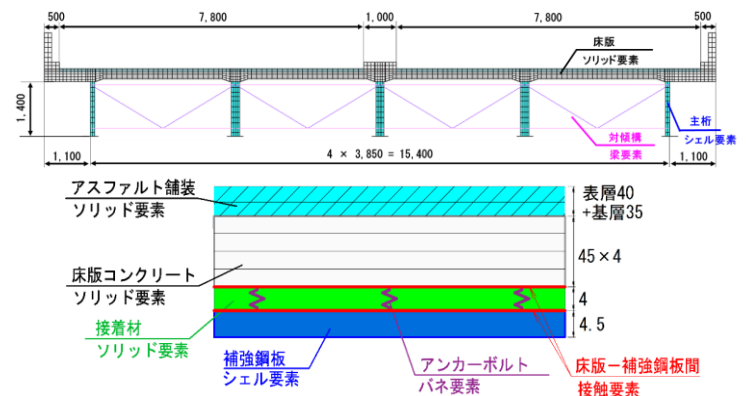


図-3 各構成部材の要素

### 3. 解析結果

#### (1) ベースモデルの解析結果

ベースモデルにおける解析結果を図-5 に示す。

RC床版のコンクリート強度に関わらずc点（G4主桁ハンチ付近）が使用限界ひずみに、b点（床版支間中央）が終局限界ひずみに達した。使用限界に達した載荷荷重（以下、使用限界荷重）を比較するとコンクリート強度を $\sigma_{ck}$ としたケース（以下、 $\sigma_{ck}$ ）が450.5 kNに対し、コンクリート強度を $3/4\sigma_{ck}$ としたケース（以下、 $3/4\sigma_{ck}$ ）は266.5 kNであり約41%載荷荷重の低下が確認された。コンクリート強度を $1/2\sigma_{ck}$ としたケース（以下、 $1/2\sigma_{ck}$ ）では164.9 kNであり、 $\sigma_{ck}$ と比較し約63%載荷荷重の低下が確認された。また、終局ひずみに達した時の載荷荷重（以下、終局限界荷重）を比較すると、 $\sigma_{ck}$ が552.0 kNであったのに対し、 $3/4\sigma_{ck}$ は418.8 kNであり約24%終局限界荷重の低下が確認された。 $1/2\sigma_{ck}$ では291.8 kNであり、 $\sigma_{ck}$ と比較し約47%終局限界荷重の低下が確認された。さらに支間中央のたわみ量と載荷荷重の関係から、コンクリート強度が低いほど小さいたわみ量で使用限界および終局限界に達することが確認された。よってRC床版のコンクリート強度と床版の耐荷力は相関関係にあることがわかった。

#### (2) フルモデルの解析結果

フルモデルにおける解析結果を図-6 に示す。ベースモデルと同様にRC床版のコンクリート強度に関わらずc点（G4主桁ハンチ付近）が使用限界ひずみに、b点（床版支間中央）が終局限界ひずみに達した。使用限界荷重を比較すると $\sigma_{ck}$ が539.3 kNに対し、 $3/4\sigma_{ck}$ は425.1 kNであり約21%使用限界荷重の低下が確認された。 $1/2\sigma_{ck}$ では329.9 kNであり、 $\sigma_{ck}$ と比較し約39%使用限界荷重の低下が確認された。載荷荷重の低下度合いはベースモデルと比較し小さいことから、鋼板接着による耐荷力が向上していることが確認された。また、終局限界荷重を比較すると、 $\sigma_{ck}$ が659.9 kNであったのに対し、 $3/4\sigma_{ck}$ は501.3 kNであり約24%終局限界荷重の低下が確認された。 $1/2\sigma_{ck}$ では361.7 kNであり、 $\sigma_{ck}$ と比較し約45%終局限界荷重の低下が確認された。さらに、支間中央のたわみと載荷荷重の関係から、コンクリート強度が低いほど小さいたわみ量で使用限界および終局限界に達しており、ベースモデルと同様の傾向が得られた。よってRC床版のコンクリート強度と床版の耐荷力の関係はベースモデルとほぼ同様であり、相関関係が認められる。

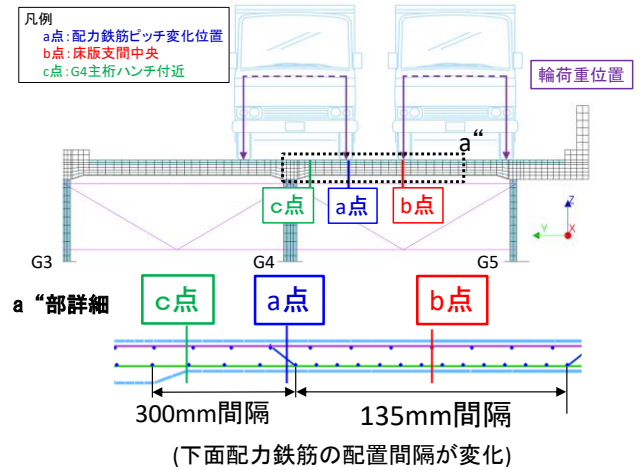


図-4 解析結果の着目点

使用限界:c点の床版下面コンクリートひずみが使用限界ひずみに達した  
終局限界:b点の床版上面コンクリートひずみが終局限界ひずみに達した

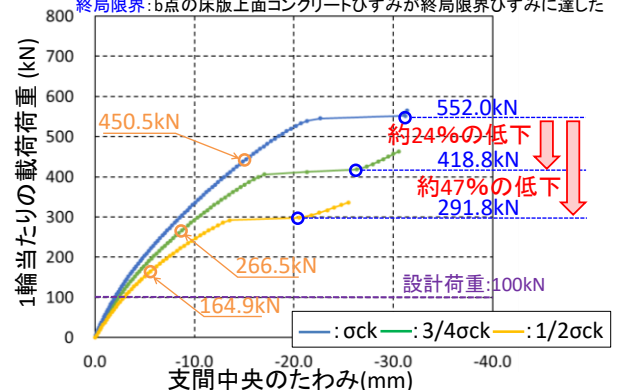


図-5 ベースモデルの解析結果

使用限界:c点の床版主鉄筋が降伏ひずみに達した  
終局限界:b点の床版上面コンクリートひずみが終局限界ひずみに達した

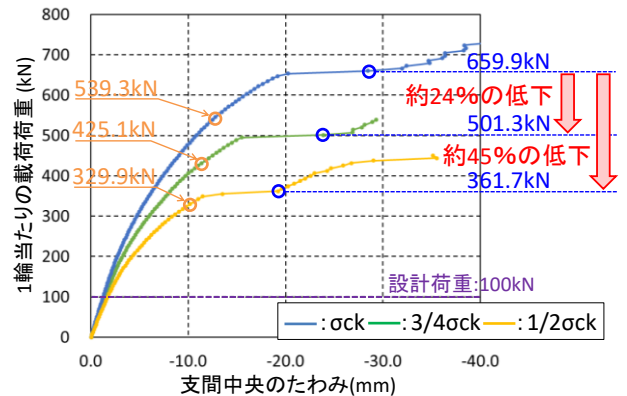


図-6 フルモデルの解析結果

使用限界:c点の床版下面コンクリートひずみが使用限界ひずみに達した  
終局限界:b点の床版上面コンクリートひずみが終局限界ひずみに達した

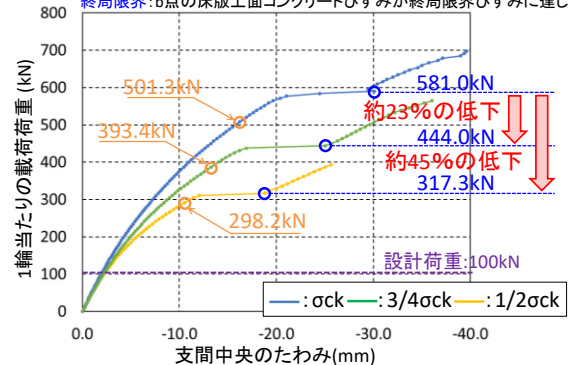


図-7 鋼板千鳥撤去モデルの解析結果



### (3) 鋼板千鳥撤去モデルの解析結果

鋼板千鳥撤去モデルにおける解析結果を図-7に示す。RC床版の各コンクリート強度においてc点(G4主桁ハンチ付近)が使用限界ひずみに、b点(床版支間中央)が終局限界ひずみに達しており、ベースモデルおよびフルモデルと同様である。コンクリート強度が低下することによる耐力荷重の低下割合についてもベースモデルおよびフルモデルと同様  $3/4\sigma_{ck}$  で約23%減、 $1/2\sigma_{ck}$  で約45%減となった。

支間中央のたわみと耐力荷重の関係もベースモデルおよびフルモデルと同様にコンクリート強度が低いほど小さいたわみ量で使用限界、終局限界に達することが確認された。

### (4) 鋼板千鳥撤去の妥当性

各モデルにおける  $\sigma_{ck}$  時の比較結果を図-8に示す。鋼板1枚撤去モデルと鋼板千鳥撤去モデルを比較すると、使用限界耐力荷重は鋼板1枚撤去モデルは494.9 kNであるのに対し、鋼板千鳥撤去モデルは501.3 kNであり、同等であることが確認された。また、終局限界耐力荷重は鋼板1枚撤去モデルは590.1 kNであるのに対し、鋼板千鳥撤去モデルは581.0 kNであり、同等であった。

各モデルにおける  $1/2\sigma_{ck}$  時の比較結果を図-9に示す。鋼板1枚撤去モデルと鋼板千鳥撤去モデルを比較すると、使用限界耐力荷重は鋼板1枚撤去モデルは304.6 kNであるのに対し、鋼板千鳥撤去モデルは298.2 kNであり、同等であることが確認された。また、終局限界耐力荷重は鋼板1枚撤去モデルは323.6 kNであるのに対し、鋼板千鳥撤去モデルは317.3 kNであり、同等であった。

支間中央のたわみ量は、鋼板による補強量に対応しており、補強量が多い順に使用限界耐力荷重および終局限界耐力荷重が大きくなる傾向にある。これはコンクリート強度によらず同様の傾向であることが確認できた。

鋼板1枚撤去モデルと鋼板千鳥撤去モデルでは使用限界および終局限界に達する耐力荷重は同等であることから、現場において鋼板を撤去する方法として千鳥撤去を採用しても問題ないと考えられる。

## 4. まとめ

本解析の結果により、コンクリート強度とRC床版の耐力には相関関係があることがわかった。よってコンクリート強度をRC床版の健全度の評価指標の一つとすることが考えられる。図-10に終局限界耐力荷重とコンクリート強度の関係を示す。横軸にはコンクリート強度  $\sigma_{ck}$  時を1.0として無次元化し、縦軸に終局限界耐力荷重をプロットした。 $\sigma_{ck}$ の強度におけるベースモデル(無補強)の終局限界耐力荷重は552.0 kNであるのに対し、 $3/4\sigma_{ck}$ の強度におけるフルモデル(全面鋼板補強)の終局限界到達時の耐力荷重

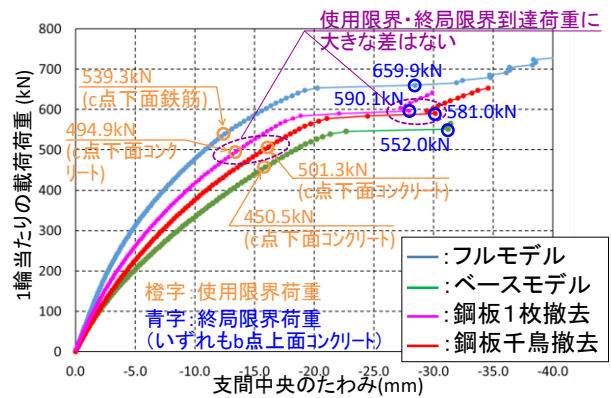


図-8  $\sigma_{ck}$ における各モデルの耐力力比較

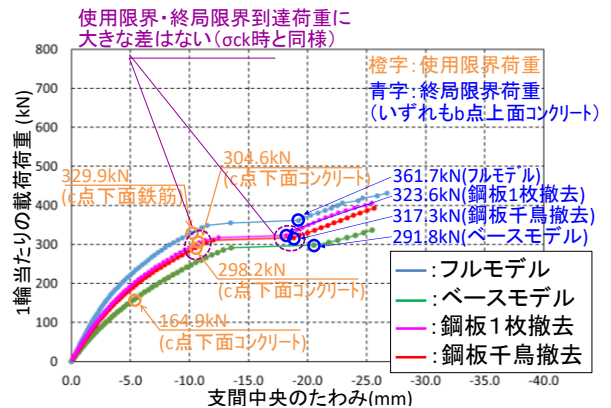


図-9  $1/2\sigma_{ck}$ における各モデルの耐力力比較

縦軸を終局限界時耐力荷重(1輪当たり)、横軸はコンクリート強度を  $\sigma_{ck}$  時1.0として無次元化

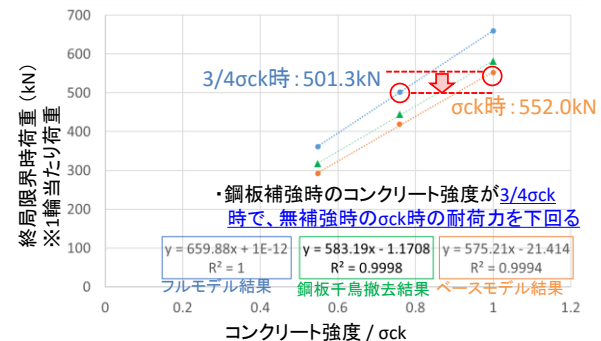


図-10 終局限界耐力荷重とコンクリート強度の関係

は501.3 kNであり、 $\sigma_{ck}$ における無補強時の耐力力よりも低くなる。よって、鋼板補強済みRC床版の耐力力が約20%低下すると設計基準強度のコンクリートの無補強RC床版と同等の耐力力となる。RC床版の健全度を評価する上で無補強RC床版相当の耐力力を閾値と仮定すると、鋼板接着補強RC床版のコンクリート強度が設計基準強度に対して低減率20%未満が管理値になると考えられる。

### 参考文献

- 1) 佐々木一則, 十名正和: 鋼板接着補強床版の維持管理に関する検討, 阪神高速道路株式会社技報第23号, 2006年1月。
- 2) 日本道路協会, 道路橋示方書II鋼橋編, 2012年3月。
- 3) 土木学会, コンクリート標準示方書, 2008年3月。