

(18) 清洲橋バックルプレート床版の 損傷機構の解明

真部 洋大¹・藤山 知加子²・関口 幹夫³・大石 雅登⁴

¹学生会員 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学専攻 (〒162-0843 新宿区市谷田町2-33)
E-mail:yota.manabe.6s@stu.hosei.ac.jp

²正会員 法政大学准教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (〒162-0843 新宿区市谷田町2-33)

³正会員 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 江東区新砂一丁目9番15号)

⁴非会員 東京都土木技術支援・人材育成センター 技術支援課 (〒136-0075 江東区新砂一丁目9番15号)

本研究では、重要文化財である清洲橋のバックルプレート床版の破壊特性を検討した。清洲橋に採用されているバックルプレート床版は、コンクリートとの界面にずれ止めが無いことが特徴である。初めに、鋼コンクリート界面の初期付着力と摩擦係数をパラメータとした感度解析を行い、初期付着力が耐荷重のピーク値に、また摩擦係数がポストピーク挙動に影響を及ぼすことを示した。次に、静的載荷試験の再現解析を行い、コンクリート内部のひずみの推移から、押抜きせん断破壊に至る損傷過程を示した。最後に、輪荷重走行試験の再現解析、および試験では実施されなかった過大な輪荷重を用いたシミュレーションを行った。これより、過大な輪荷重繰返し下ではコンクリートのブロック化が生じる可能性を示唆した。

Key Words : バックルプレート, 付着, FEM解析, 押抜きせん断破壊, 輪荷重走行試験

1. はじめに

本研究の目的は、数値解析を用い、重要文化財に指定されている清洲橋のバックルプレート床版の基礎的・疲労による破壊特性を明らかにすることである。

清洲橋は、1923年の関東大震災後の帝都復興事業において、復興局が建設した隅田川6大橋の1つである。清洲橋の特徴は大きく2つ挙げられる。1つ目は、清洲橋が重要文化財であり、歴史的価値を持つ鋼橋ということである。清洲橋の形式は、鋼自碇式吊橋であり、かつて世界最良と呼ばれたケルンの吊橋と同形式、かつ優美な曲線も再現されている¹⁾。2つ目は、清洲橋にはバックルプレート床版が採用されていることである。

バックルプレートとは、中央部が凹状に加工された鋼板である。清洲橋のバックルプレート床版は、主桁と横桁に4辺をリベット接合されたバックルプレート上にコンクリートを打設したものであり、バックルプレートとコンクリートの間にスタッド・リブが無いのが特徴的である。

現在、東京都ではバックルプレート床版延命化技術開

発を実施している。歴史的価値を有する橋の補修・補強では基本的機能を満足させる他に外観の維持が重要であり²⁾、効果的な延命化技術開発のためには、バックルプレート床版の破壊機構の理解が必要不可欠である。しかし、現存するバックルプレート床版は国内では数橋あるのみで、破壊機構に対する知見の蓄積が十分ではない。

そこで、本研究では、東京大学で開発された非線形有限要素解析ソフトCOM-3Dを用い、清洲橋実物大バックルプレート床版試験体を使った静的載荷試験・輪荷重走行試験の破壊過程の分析を行うものとした。

2. 解析モデルの検討

(1) 解析モデル概要

解析モデルの概要を図-1に示す。ここで用いられたコンクリートの平面寸法は、橋軸方向1700mm、橋軸直角方向1500mmで単純支持されている。床版厚は238mmで、バックルプレート厚は8mmとする。材料特性を表-1に示す。ここで示すコンクリートの材料特性は、軽量コンクリートを考慮しておらず、実験から得られたヤング係数、圧

縮強度から設定したものである。また、底鋼板と載荷板の材料特性は同様であると仮定する。載荷板の寸法は、200×500mm、載荷方法は変位制御とする。載荷板上面55点の鉛直方向の変位を拘束し、30秒で0.1mm、最大変位7mmまで載荷を行う。

(2) 検討条件

a) バックルプレートとコンクリートの境界面特性

鋼とコンクリートの界面には付着が存在し、複合構造全体の挙動に大きな影響を与えている。本研究では、バックルプレートとコンクリートの間にスタッド・リブが無く、また軽量コンクリートを用いているため、付着特性を忠実に再現する必要がある。鋼とコンクリート間の付着強度に関する既往の研究³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾の一例を表-2に示す。本研究で用いた解析ソフトCOM-3Dでは、鋼とコンクリート間の付着特性を、ボンド要素として表現している。ボンド要素の値は、境界面閉合時の開閉・せん断剛性、境界面開口時の開閉・せん断剛性、初期付着力、摩擦係数から成り立っている(図-2)。境界面閉合時の開閉剛性をコンクリートのヤング係数16700N/mm²、せん断剛性をコンクリートのせん断剛性6958.3N/mm²、境界面開口時の開閉・せん断剛性を非常に小さな値3N/mm²と仮定し、表-3に示すように初期付着力、摩擦係数の検討を行った。

b) 床版支持条件

床版支持条件を表-4に示す。図-3に示した主桁・横桁、スタッド・リベット、補剛材がモデルに与える影響を検討した。スタッドは、床版の浮き上がりを防止するために主桁とコンクリート間に用いられている。

表-2 鋼とコンクリート間の付着強度に関する研究⁸⁾

試験体名称	最大荷重(kN)	最大せん断応力(N/mm ²)	最大荷重時すれ変位(mm)	残留荷重(kN)	残留せん断応力(N/mm ²)	残留荷重時すれ変位(mm)
P04a	27.67	0.628	0.032	10.29	0.234	7.534
P04b	23.04	0.524	0.143	9.62	0.219	7.526
P10a	43.91	0.998	0.223	18.89	0.429	7.531
P10b	46.05	1.047	0.217	20.71	0.471	7.555
P20a	71.14	1.617	0.201	35.24	0.801	7.547
P20b	78.63	1.787	0.231	35.53	0.807	7.572
S04a	123.86	2.815	4.228	—	—	—
S04b	122.63	2.787	2.920	—	—	—
S10a	133.73	3.039	3.986	—	—	—
S10b	132.74	3.017	3.589	—	—	—
S20a	149.10	3.389	2.971	—	—	—
S20b	169.63	3.855	3.580	—	—	—
H20a	85.41	1.941	0.135	38.75	0.881	7.500
H20b	82.86	1.883	0.171	37.13	0.844	7.575
HS20a	147.48	3.352	3.474	—	—	—
HS20b	141.78	3.223	3.746	—	—	—

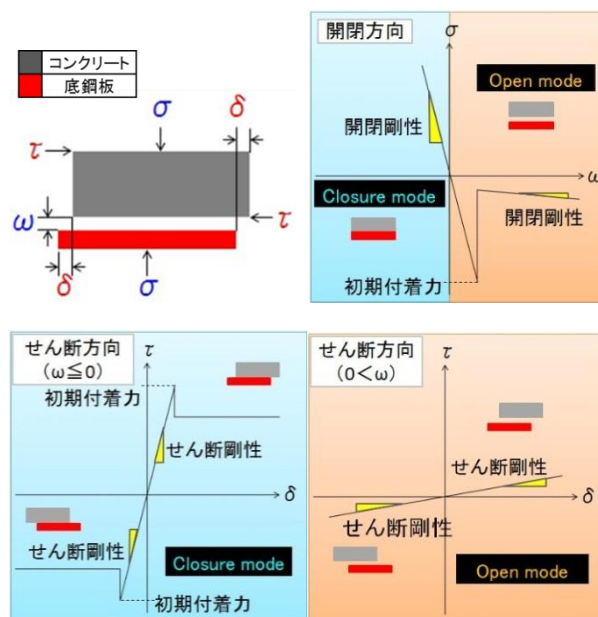


図-2 底鋼板とコンクリートの境界面条件

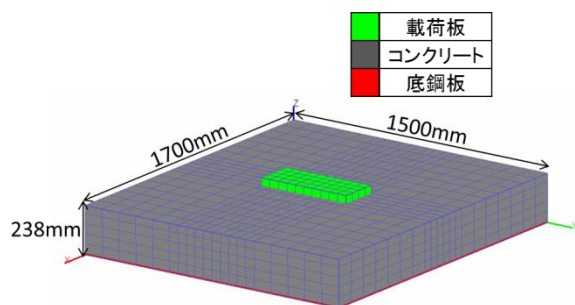


図-1 解析モデル

表-1 材料特性

コンクリート		底鋼板	
弾性係数	16700 N/mm ²	弾性係数	200000 N/mm ²
圧縮強度	25.5 N/mm ²	降伏強度	340 N/mm ²
引張強度	2.55 N/mm ²	引張強度	420 N/mm ²
ポアソン比	0.2	ポアソン比	0.3
単位重量	23kN/m ³	単位重量	77kN/m ³

表-3 検討項目

ケース名	初期付着力
B-0	0 N/mm ²
B-1	1 N/mm ²
B-2	2 N/mm ²
B-3	3 N/mm ²
B-4	4 N/mm ²
B-5	5 N/mm ²

ケース名	摩擦係数
F-0.6	0.6
F-1	1
F-2	2
F-3	3

表-4 床版支持条件検討表

ケース名	主桁・横桁	スタッド・リベット	補剛材
M-1	×	×	×
M-2	○	×	×
M-3	○	○	×
M-4	○	○	○

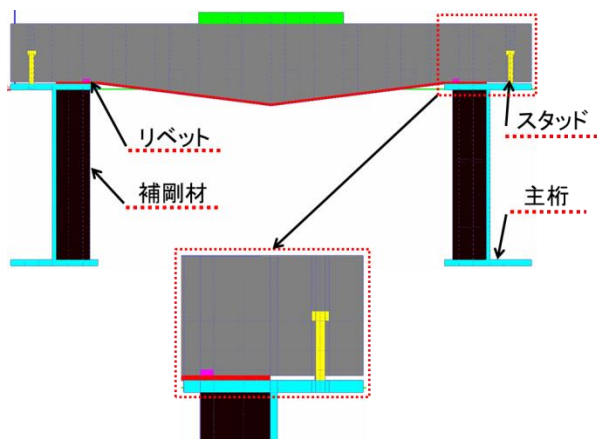


図-3 橋軸直角方向断面図

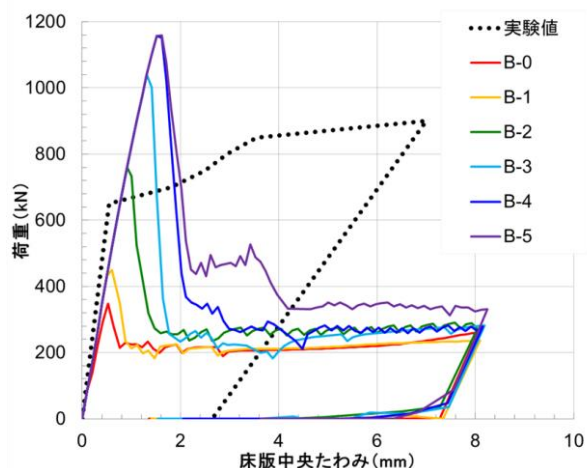


図-4 荷重-床版中央たわみ図

(3) 解析結果（荷重-床版中央たわみ図）

a) 初期付着力

図-4の解析結果に着目すると、初期付着力を変えたことによる耐荷力ピークの変化が顕著に表れた。実験での押抜きせん断耐力は約650kNであることを考えると、解析での耐荷力ピークが500kN程度～750kNとなるケースB-1とB-2の間、つまり初期付着力の値は1～2N/mm²が妥当と推察される。初期付着力を全く考慮しないケースB-0においても、耐荷力のピークは設計荷重の倍程度と算出されており、鋼コンクリート境界面の摩擦のみでも、ある程度の合成効果が鋼とコンクリートとの間で発揮されることがわかった。

b) 摩擦係数

図-5の解析結果に着目すると、摩擦係数を変えることによる押抜きせん断耐力を超えた後の最大耐荷力に違いが見られた。特に摩擦係数の値が1～2の間で大きな変化が起きた。摩擦係数の値が2を超えると、最大耐荷力を超えた後、実験値と同様な挙動を示していることがわかる。摩擦係数の変化によって影響を受けるのは最大耐荷力を超えた後であり、初期剛性には影響が小さいと思われる。

c) 床版支持条件

図-6に荷重とバックルプレート中央のたわみの関係を示す。主桁・横桁の効果によって押抜きせん断耐力後も荷重を保持し、スタッド・リベットの効果によって実験に良く整合した結果を得ることが確認された。また、補剛材がモデルに与える影響を確認すると、補剛材無しのモデルでは、主桁の上フランジが大きく曲がり、コンクリート内のスタッドも曲がっていたため、補剛材の再現は重要と思われる。

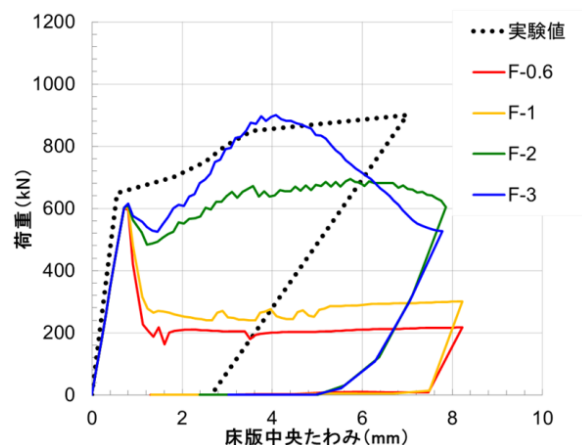


図-5 荷重-床版中央たわみ図

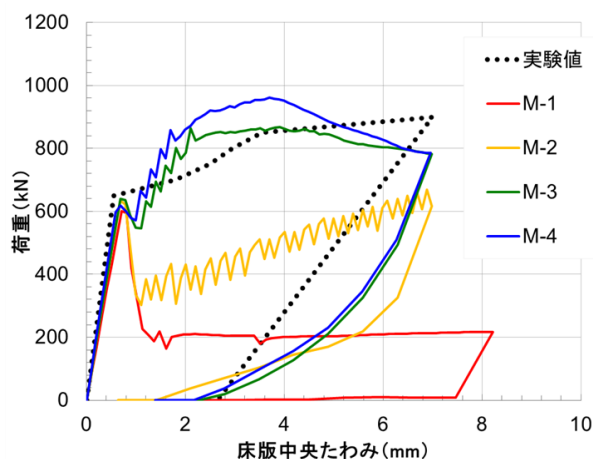


図-6 荷重-床版中央たわみ図

3. 静的載荷試験の再現解析

東京都では、バックルプレート床版の延命化技術開発という計画の下、清洲橋の実物大バックルプレート床版のモデル試験体を用いた静的載荷試験が行われた。今回、この静的載荷試験の再現解析を行うことで、実際の実験結果と解析結果の比較から、モデルの妥当性を検証する。また、床版内部の応力・ひずみの状態から、バックルプレート床版の破壊モードを検討する。

(1) 静的載荷実験

a) 実験概要

平成22年度に行われた予備試験の試験体の概要を図-7に示す。ここで用いられた試験体の平面寸法は、橋軸方向1.9m、橋軸直角方向1.8m、支間1.5mで単純支持されている。縦桁と底鋼板はリベットで接合されていて、また、浮き上がり防止のため縦桁とコンクリートの間にスタッドが用いられている。バックルプレート厚は4.5mm、6mm、8mmの3パターンとする。4.5mmは補修が必要とされる状態、6mmは現在の厚さ(S60調査2mm消耗)、8mmは設計当初の7.9mmを想定している。

b) 載荷条件

載荷方法を図-8に示す。載荷板の寸法は200×500mm、荷重は50kNピッチで鉛直方向に床版が破壊するまで載荷が行われた。(写真-1)

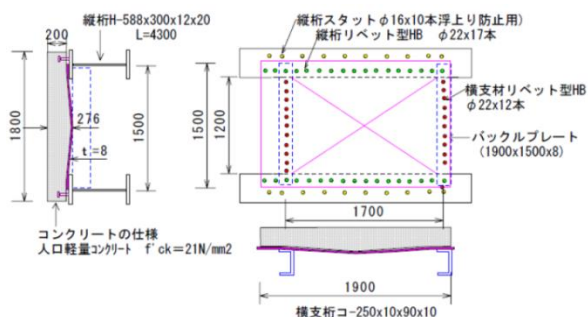


図-7 試験体概要⁹⁾

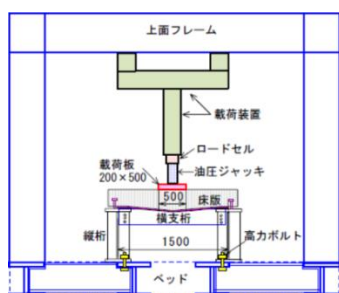


図-8 載荷方法
(東京都提供資料)



写真-1 載荷状況
(東京都提供資料)

c) 実験結果（最大耐荷力）

実験より、バックルプレート厚8mmの押抜きせん断耐力は650kN、最大耐荷力は850kN、最大鋼板応力度は209.4N/mm²となった。床版破壊状況を写真-2に示す。写真-2より、破壊形態は押抜きせん断破壊であることがわかる。



写真-2 破壊断面

(2) 静的載荷試験の再現解析

a) 解析モデル概要

図-9に解析モデルの概要を示す。ここで用いられた床版モデルの平面寸法は、橋軸方向1.9m、橋軸直角方向1.8mである。縦桁と底鋼板のリベットで接合、また、浮き上がり防止のため縦桁とコンクリートの間に用いられたスタッドを実験と同様に再現している。バックルプレート厚は8mmとする。拘束条件は、主桁の下フランジの下面全点はZ軸方向の変位を拘束し、下フランジ内側の10点は全方向の変位を拘束する。載荷板の寸法は200×500mm、載荷方法は変位制御とする。載荷板上面121点の鉛直方向の変位を拘束し、70Stepに分けて載荷を行う（1Step30秒で0.1mm.）。

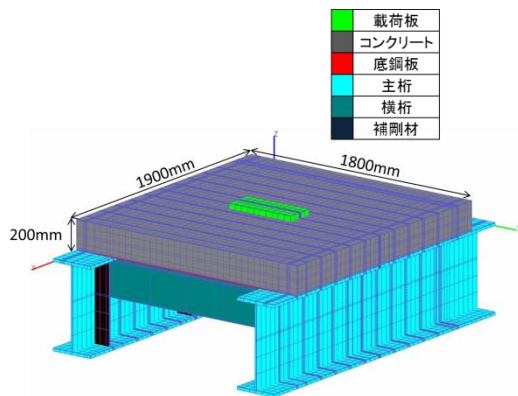


図-9 解析モデル

b) 解析結果（変形特性）

荷重-たわみ図による解析結果と実験結果の比較を図-10に示す。最初の耐荷力変化点・最大耐荷力・残留たわみに着目すると、解析は最初の耐荷力変化点および残留たわみについて実験結果をおおむね精度よく再現できている。しかし、付着切れが原因と推察される最初の耐荷力変化点後の挙動は、解析結果と実験結果で違いが見られた。

0.7mmの時、荷重制御のため床版支間距離750mm（床版中央）のひずみが最も大きくなったと考えられる。変位制御による載荷板の押込みが7mmの時、解析結果で床版支間距離1000mmのひずみの値が大きく出ているのは、モデル化したスタッド・リベットの影響が考えられる。

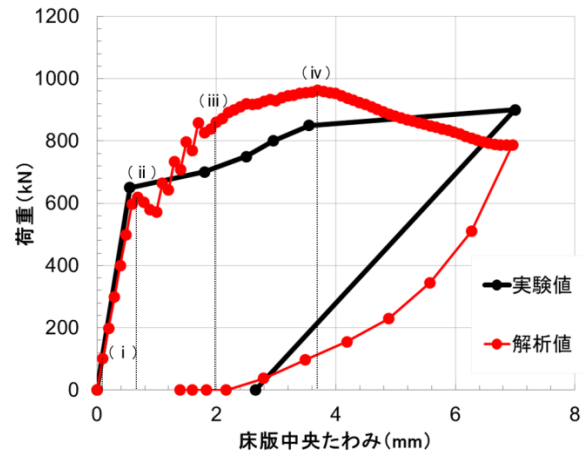


図-10 荷重-床版中央たわみ図

c) 解析結果（コンクリート要素の最大主ひずみ）

図-11に荷重ごとの主ひずみ分布を示す。載荷始めは、コンクリート下面全体に主ひずみの集中が見られるが、たわみ0.7mmの時点で、コンクリート下面2箇所主ひずみの集中が移動した。この時点で、コンクリートとバックルプレートの付着切れが起こり、コンクリートに曲げひび割れが生じたと考えられる。その後たわみ2mmの時点で、コンクリートせん断スパン中間部に主ひずみが集中し、たわみ3.7mm（最大荷重960kN）の時点で斜めひび割れによるせん断破壊が起こったと推察される。実験結果と比較からも明らかのように、バックルプレート床版の破壊形態は、最終的には斜めひび割れによる押抜きせん断破壊である。

d) 解析結果（バックルプレートの橋軸直角方向ひずみ）

図-12に変位制御による載荷過程でのバックルプレートの橋軸直角方向ひずみの値を示す。ひずみの最大値は、解析結果で約1150 μ 、実験結果で約1050 μ となった。ひずみの値に関しては、解析結果と実験結果共にほぼ同程度であった。実験結果での特徴は、変位制御による載荷板の押込みが4mm、7mmとなった時のW型の変形であるが、解析結果でも良く再現できていると考えられる。変位制御による載荷板の押込みが0.7mmの時、解析結果で床版支間距離500mm～1000mmでのひずみが同値なのは、変位制御の特徴である載荷板のエッジ部分の押込みによるものと思われる。実験結果では同じ載荷板の押込みが

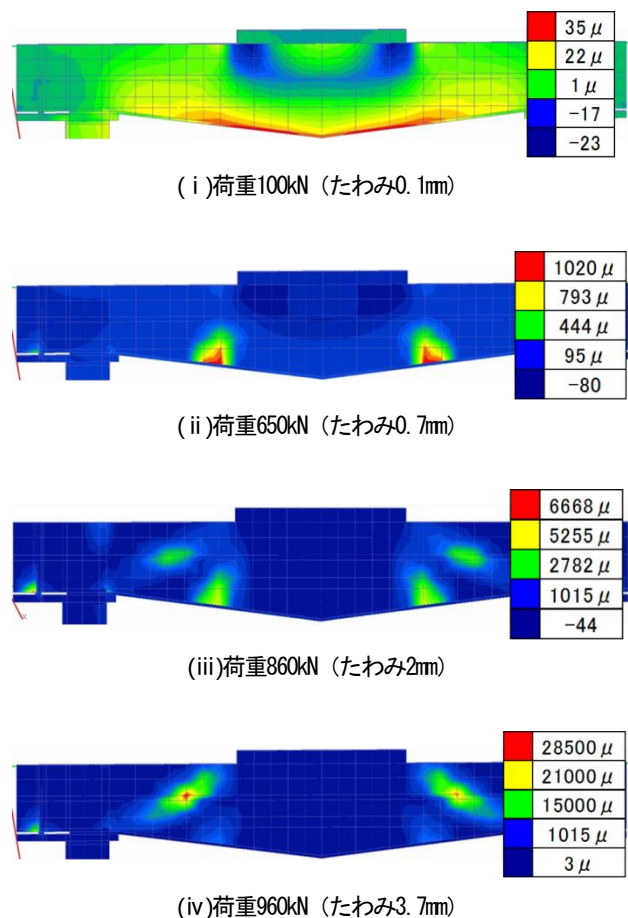


図-11 橋軸直角方向断面の主ひずみ分布

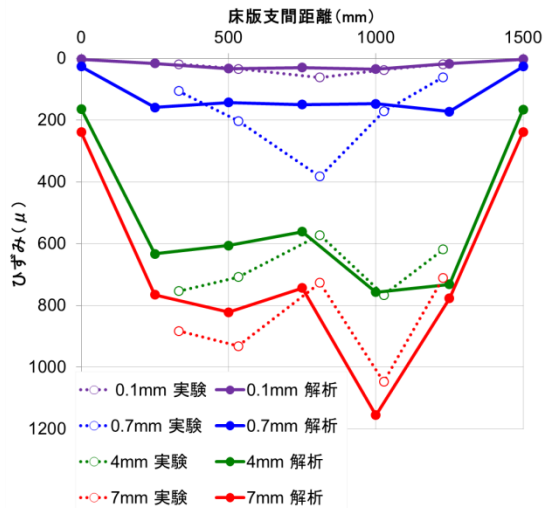


図-12 橋軸直角方向ひずみ

4. 輪荷重走行試験の再現解析

輪荷重走行試験の再現解析を行うことで、実際の実験結果と解析結果の比較、床版内部の応力・ひずみの状態から疲労による破壊モードの検討を行う。

(1) 輪荷重走行試験

a) 実験概要

バックルプレート床版の延命化技術開発の計画の下、現在行われている輪荷重走行試験¹⁰⁾ (写真-3) の試験体は、静的載荷試験で用いた試験体と同じ諸元のものを3つバックルプレート厚別に並べたものである。ここで用いられた試験体の平面寸法は、橋軸方向5.34m、橋軸直角方向1.8m、支間1.5mで単純支持されている。



写真-3 輪荷重走行試験状況
(東京都戸田実験場2012/7/12撮影)

b) 実験結果

図-13に底鋼板中央の活荷重たわみ図を示す。バックルプレート厚6mm、8mmの試験体は、走行回数90万回までは

際立った変化が起こらなかった。バックルプレート厚4.5mmの試験体は、荷重が200kNに変わった走行回数30万回から徐々にたわみが増加し、走行回数45万回以降急激な増加が確認された。バックルプレート厚4.5mmの試験体は、荷重200kNに変わった所から床版内にひび割れが生じ、走行回数45万回の時点ではひび割れの進展・新たなひび割れ等によりたわみが急増したと推察される。

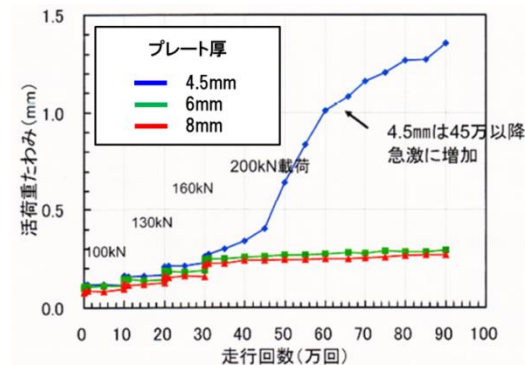


図-13 走行回数ごとの活荷重たわみ
(東京都提供資料)

(2) 輪荷重走行試験の再現解析

a) 解析モデル概要

図-14に解析モデルを示す。このモデルは、図-8の解析モデルから載荷板を取り除いたものと同様のもので、バックルプレート厚は8mmである。載荷範囲は、床版上面の橋軸方向に1900mmとし、一輪分の載荷幅は、390×340mmとする。載荷方法は荷重制御とし、90万回まで載荷を行う。実験と同様に、荷重は走行回数0～10万回まで100kN、10万～20万回まで130kN、20万～30万回まで160kN、30万～90万回まで200kNとした。

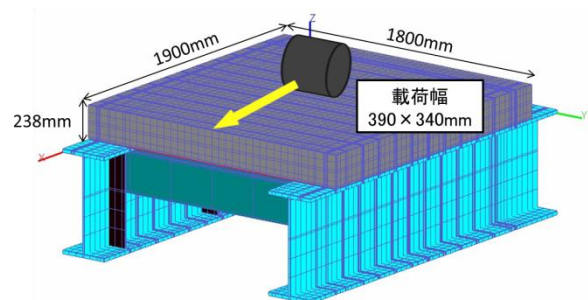


図-14 解析モデル

b) 解析結果

図-15に、解析で得た走行回数毎の底鋼板中央の活荷重たわみを示す。解析から得られたたわみの値は、常に実験を上回る結果となった。特に、解析では荷重が160kNに変わった20万回の時点からたわみの増加が顕著

に表れた。解析上では、実験よりも早期にコンクリートとバックルプレート間の付着切れが起こったことによってたわみの過大算出につながったと考えられる。さらに、解析では荷重が200kNに変わった時点から1000万回まで荷重を続けたが、たわみは約0.55mmで一定であった。

図-16に、荷重160kN終了時、繰り返し回数30万回の時点での床版内部のひずみ分布を示す。主ひずみと橋軸直角方向のひずみ分布・ひずみの値がほぼ一致しているため、この時点では床版中央コンクリート下面のひび割れのみが先行して発生・進展していると推察される。これは、コンクリートとバックルプレート間の早期の付着切れにより、鋼とコンクリートの合成効果が無くなったためであると考えられる。橋軸方向・床版上下方向のひずみ分布は、主ひずみ分布と異なっているが、ひずみの値自体が非常に小さく、この時点で変形の主たる要因ではないことがわかる。

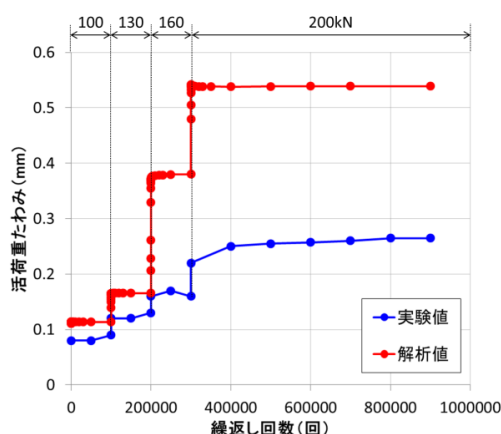
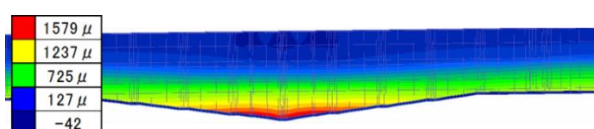
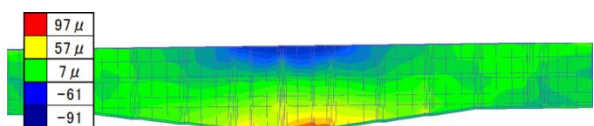


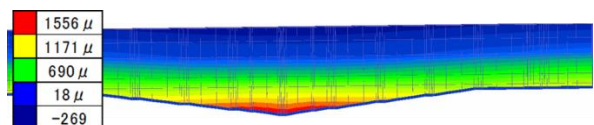
図-15 走行回数ごとの活荷重たわみ



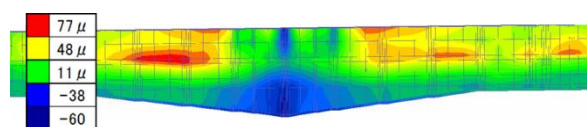
(i) 主ひずみ



(ii) 橋軸方向のひずみ



(iii) 橋軸直角方向のひずみ



(iv) 床版上下方向のひずみ

図-16 繰返し回数300000回における床版内ひずみ分布

(3) 輪荷重走行試験による床版の破壊予測

荷重200kNまでの輪荷重走行試験の再現解析では、床版の疲労による破壊は生じなかった。本節では、破壊モードを推定するため、荷重を500kNと設定し、解析によって床版の破壊形態の推定を試みた。

a) 解析結果（荷重500kNの繰返し載荷）

図-17に走行回数ごとの床版中央たわみ図を示す。この図から、たわみの段階的な上昇が確認された。

図-18に橋軸方向断面の主ひずみ分布を示す。載荷100回目の時点で、載荷始めの位置から床版中央にかけて上下方向に多数の主ひずみの集中が見られた。この主ひずみ分布は、橋軸方向のひずみ分布とほぼ一致するため、コンクリートに縦方向のひび割れが多数生じたと考えられる。また、載荷を更に続けると、縦方向のひび割れが更に増加・進展する結果となった。以上より、過大な荷重で繰返し載荷を行うと、縦方向のひび割れの発生・進展によってコンクリートがブロック化し、破壊に至ると推察される。

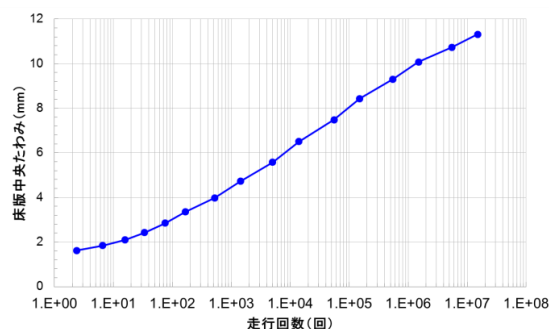
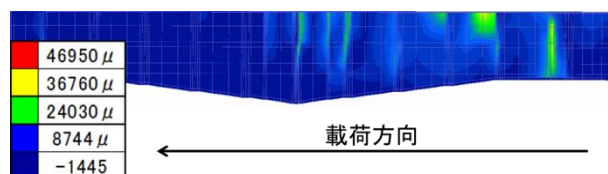
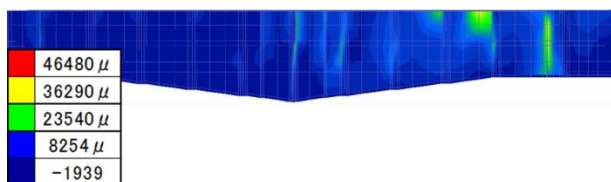


図-17 走行回数ごとの床版中央たわみ図



(i) 載荷100回目 主ひずみ



(ii) 載荷100回目 橋軸方向ひずみ

図-18 橋軸方向ひずみ分布

5. 結論

本研究では、清洲橋バックルプレート床版の基礎的・疲労による損傷機構を解明することを目的とした。本研究で得られた成果を以下に列挙する。

I) 底鋼板とコンクリートの界面の付着特性の検討から、初期付着力、摩擦係数がモデルに与える影響を明らかにし、ずれ止めがない本形式床版における付着特性検討の重要性を示した。

II) 静的載荷試験の再現解析により、設計荷重レベルでは付着切れが起きず、鋼とコンクリートの合成効果が保たれることを示した。また、バックルプレート床版の基礎的な破壊形態は、押抜きせん断破壊であることを確認した。

III) 輪荷重走行試験による床版の破壊予測から、過大な繰り返し荷重をかけると、多数の上下方向のひび割れによるコンクリートのブロック化が起これと推察された。破壊の要因は、鋼とコンクリート間の付着切れと考えられることから、早期の付着切れは床版の耐久性に大きな影響を与えると示唆された。

本研究で得られた成果を踏まえ、今後はバックルプレ

ート床版の疲労による破壊形態の解明・長期耐久性の評価を目指したい。

謝辞：本論文を作成するにあたり、東京大学前川教授から、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中井祐：帝都復興事業における隅田川六大橋の設計方針と永代橋・清洲橋の設計経緯，土木史研究 論文集 Vol.23, pp.13-21, 2004.
- 2) 五十畑弘，堀井滋則，神田恭太郎，中村一史：歴史的価値を有する鋼橋の補修・補強に関する調査，土木学会平成 18 年度全国大会研究討論会資料，pp.1-2, 2006.
- 3) 八十島章，坂本篤：丸鋼とコンクリートの付着特性に関する研究(その 1 付着実験)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.125-126, 2012.9.
- 4) 坂本篤，八十島章：丸鋼とコンクリートの付着特性に関する研究(その 2 付着解析)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.127-128, 2012.9.
- 5) 洪成，荒木秀夫，加藤順一：低強度コンクリートと丸鋼の付着強度(その 1 丸鋼の付着強度)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.105-106, 2010.9.
- 6) 荒木秀夫，洪成，加藤順一：低強度コンクリートと丸鋼の付着強度(その 2 エポキシ樹脂注入の補修効果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.107-108, 2010.9.
- 7) 荒木秀夫，吉田俊太郎，洪成，加川順一：低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.2, pp.883-888, 2010.
- 8) 中島章典，猪股勇希，斎川幾美，大江浩一：付着，機械的作用を有する鋼コンクリート接触面の静的・疲労性状に関する実験的検討，土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.758-767, 2007.
- 9) 関口幹夫，大石雅登，内山博文：バックルプレート床版の耐荷性能について，土木学会第 67 回年次学術講演会，2012.9.
- 10) 関口幹夫，大石雅登，藤山知加子：清洲橋バックルプレート床版の疲労耐久性に関する実験的検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，2013.9.

DAMAGE MECHANISM OF KIYOSU-BRIDGE BUCKLE PLATE SLAB

Yota MANABE, Chikako FUJIYAMA, Mikio SEKIGUCHI, and Masato OISHI

This study presents the damage mechanism of bridge deck of the Kiyosu-bridge, important cultural property. The slab consists of concrete slab and curved plate called “buckle plate”. The buckle plate is not accompanied with any shear connectors such as studs and ribs. First, the interface properties of buckle plate including initial sticking and friction of plate surface are examined by sensitivity analyses. Second, static behavior of buckle plate slab is analyzed. It clarifies the failure process of the slab to the punching shear. Finally, repetitive wheel loads are applied to analysis model to focus on the fatigue damage process. The result demonstrates the multiple cracks in vertical direction due to sequential movement of loading area. This suggests that buckle plate slab probably lose load carrying capacity because of the separation of concrete due to multiple cracks in vertical direction.