

上面鉄筋が少ない既設フーチングの正負交番載荷実験 (その2)

藤田亮一¹・松原拓朗²・引地宏陽²・押川亮彦¹・傅斌¹・小橋実咲¹

¹正会員 株式会社エイト日本技術開発（〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39）

²正会員 首都高速道路株式会社（〒100-8930 東京都千代田区霞が関1-4-1日土地ビル5F）

1. はじめに

首都高速道路では、杭基礎のフーチングの塑性化を考慮した耐震性能照査に関する検討をすすめており、その一環として上面鉄筋が少ない既設道路橋のフーチングに着目した正負交番載荷実験¹⁾を実施している。本文は、この実験結果をふまえて、その挙動をFEM解析により再現することを試みた結果を報告するものである。

2. 実験概要

実験結果については既報に詳細を示しているため、ここでは概要のみを述べる。実験供試体は図-1に示すとおりであり、実構造の約1/6のスケールである。この供試体を用いて正負交番漸増載荷試験（同一振幅の繰り返し回数は一回）を行った。実験で得られた荷重～変位関係を図-2に示す。

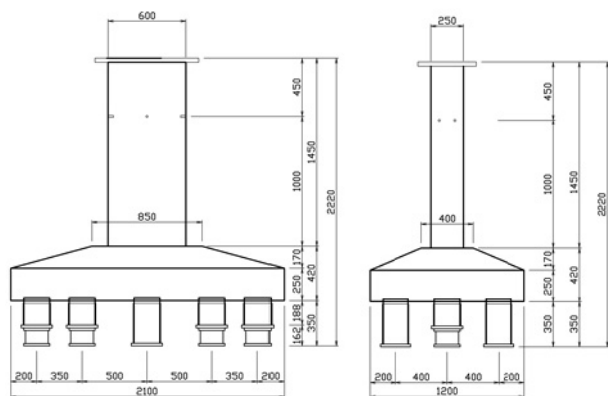


図-1 実験供試体の寸法形状

3. 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを以下に示す。橋脚・フーチング・杭の形状をソリッド要素を用いてモデル化し、鉄筋は埋め込み梁要素で実際に配置される位置にモデル化した。杭の下端はH鋼を組み合わせた架台に結合されているため実験前の事前解析では完全固定としたが、架台の剛性が無限大ではないことから、実験後の再現解析では剛性の大きなばね要素(1.0e5kN/m)で支持するモデルとした。計算にはDIANA²⁾を用いた。

(2) 材料物性値

解析は実験の前後で実施しており、事前解析と再現解析では異なる物性値を用いた。事前解析ではコンクリート強度を設計基準強度と仮定し、弾性係数は設計基準強度から道路橋示方書³⁾に準じて設定した。鉄筋についても降伏応力を規格に基づいて設定した。事後解析ではコンクリートの圧縮・引張・静弾性試験結果と、鉄筋の引張試験結果を反映させた。

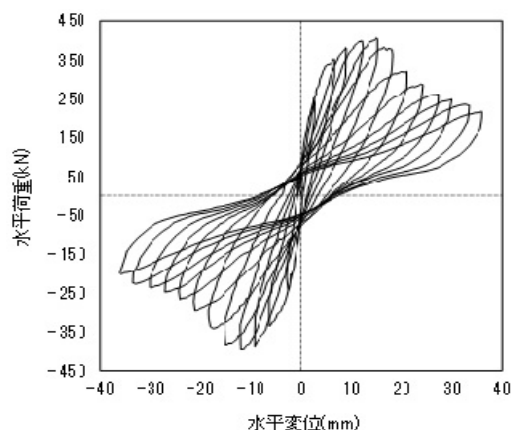


図-2 荷重～変位関係

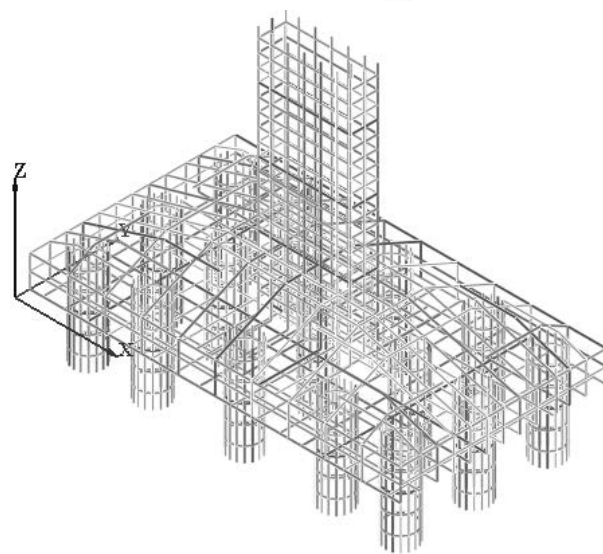
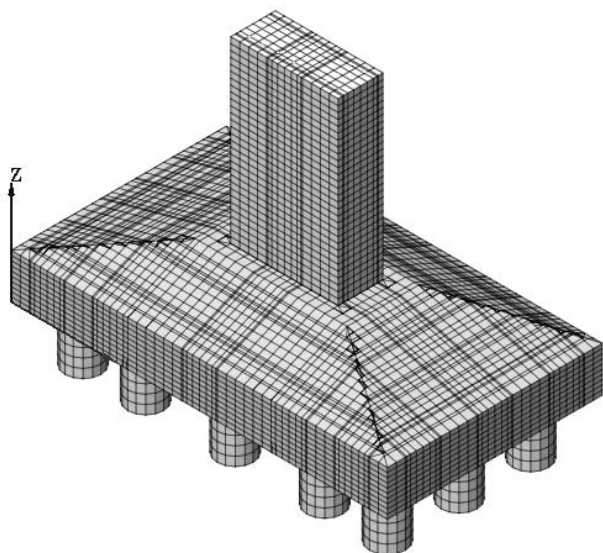


図-3 解析モデル(上：コンクリート，下：鉄筋)

表-1 使用材料

コンクリート	柱部	呼び強度27N/mm ² (早強セメント)
	フーチング部	呼び強度18N/mm ² (早強セメント)
	杭基礎部	呼び強度24N/mm ² (早強セメント)
軸方向鉄筋	柱部	D19 SD345
	フーチング部	上側：D6 SD295A 下側：D10 SD295A
	杭基礎部	D13 SD295 (ネジテツコン)

表-2 コンクリートの試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)			引張強度 (N/mm ²)			ヤング率 (N/mm ²)		
	柱	フーチング	杭基礎	柱	フーチング	杭基礎	柱	フーチング	杭基礎
1	35.5	25.7	37.9	2.65	2.12	2.61	26,200	24,300	26,000
2	34.2	26.3	36.8	2.83	1.63	2.74	26,000	24,000	26,900
3	36.1	25.6	37.3	2.61	2.22	2.48	26,800	23,800	25,900
平均	35.3	25.9	37.3	2.70	1.99	2.62	26,333	24,033	26,267

表-3 鋼材の試験結果

使用鋼材	降伏点 (D4, D6は耐力) (N/mm ²)					
	D4 (SD295A)	D6 (SD295A)	D10 (SD295A)	D13 (SD295A)	D13 ^{SP} (SD295A)	D19 (SD345)
1	393	348	365	365	359	404
2	386	335	379	365	365	405
3	379	350	366	358	365	407
平均	386	344	370	363	363	405

使用鋼材	ヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)					
	D4 (SD295A)	D6 (SD295A)	D10 (SD295A)	D13 (SD295A)	D13 ^{SP} (SD295A)	D19 (SD345)
1	1.82	1.85	1.92	1.91	1.94	1.99
2	1.86	1.84	2.00	1.95	1.94	1.99
3	1.79	1.88	1.94	2.29	1.93	1.99
平均	1.82	1.86	1.95	2.05	1.94	1.99

※は杭の軸方向鉄筋に使用 (ネジテツコン)

(3) 非線形特性

鉄筋の構成則はバイリニアモデル，コンクリートは圧縮と引張の軟化を考慮した構成則を採用した．コンクリートのひび割れは，ひび割れを含む一定領域の応力～ひずみ関係を平均的に考慮する分散ひび割れモデルを用いて表現し，せん断挙動を精度よく再現できる回転ひび割れモデルを適用した⁴⁾．

コンクリートの圧縮側の非線形特性は，圧縮軟化を考慮できる放物線モデルとし，実験後の再現解析では破壊エネルギーをパラメータとして軟化の程度を変化させた．引張側の非線形特性は，引張軟化を指数関数の組み合わせで表現するHordijk⁵⁾のモデルを用いた．引張についても実験後の再現解析では破壊エネルギーをパラメータとして軟化の程度を変化させた．

(4) 荷重

荷重は載荷点に強制変位として与えた．事前解析では降伏変位を4mmと仮定してその整数倍の振幅で正負交番漸増変位を作用させた(繰り返し回数は1回)．事後解析では実験で得られた変位履歴をそのまま作用させた(降伏変位3mm)．

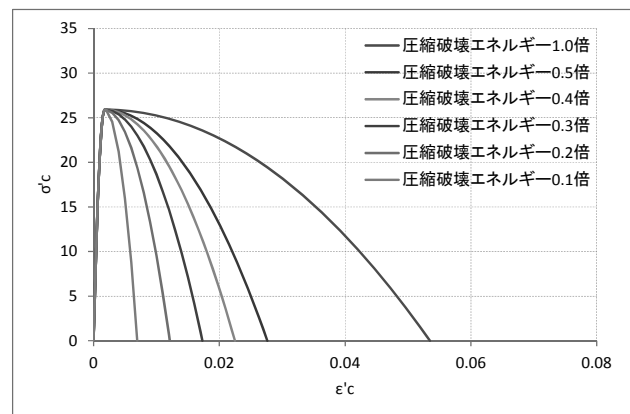


図-4 コンクリートの非線形特性(圧縮)

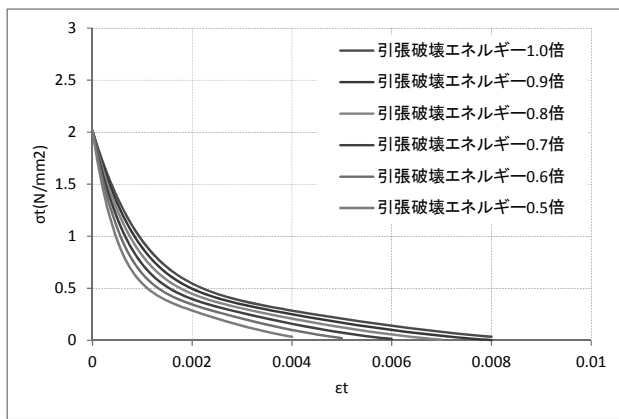


図-5 コンクリートの非線形特性(下：引張)

4. 解析結果

(1) 事前解析

実験前に実施した事前解析で得られた荷重～変位関係と実験結果を比較したものを図-6に示す。前述のとおり材料物性値に仮定したものを使っているが、おおむね整合しているといえる。主な差異は以下のとおりである。

① 最大荷重

解析の方が実験に比べて最大荷重が約1割大きく、実験よりも小さい変位で最大荷重に到達している。

② 履歴ループの形状・大きさ

解析の履歴ループは紡錘形で面積が大きい、実験の履歴ループは細長くやや逆S字型である。

③ 耐力低下

解析の方が実験に比べて耐力低下がゆるやかであり、変位が大きくなるにつれて解析結果が実験結果よりも大きくなる傾向である。

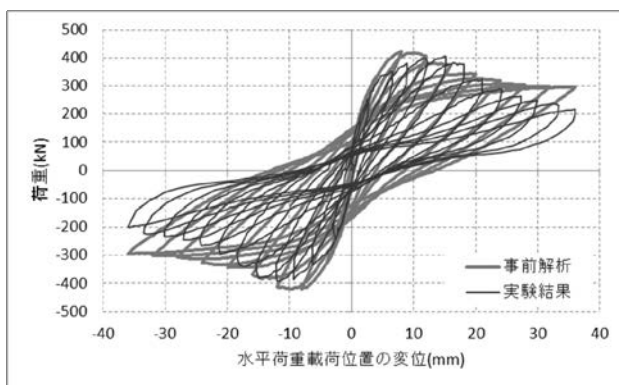


図-6 事前解析結果

(圧縮破壊エネルギー1.0倍、引張破壊エネルギー1.0倍)

(2) 圧縮側の非線形特性に着目した再現解析

コンクリートの圧縮側の非線形特性をパラメータ

として実験で得られた変位を作用させて計算した結果を図-7～図-10に示す。引張破壊エネルギーを1.0倍に固定し、圧縮破壊エネルギーを0.1倍から0.4倍まで変化させた。前述のとおり圧縮エネルギーを小さくするとコンクリートの軟化の勾配が急になるため、最大圧縮強度に達した後すぐに応力が低下する。これらの図の対比から、圧縮破壊エネルギーが小さいと耐力力が低下する傾向が確認でき、最大耐力力の包絡線が全体的に下がる傾向であることがわかる。事前解析では圧縮破壊エネルギーを1.0倍としており、変位増加後の耐力力低下が実験よりも緩やかであったが、圧縮エネルギーを0.3倍にした場合には各振幅での耐力力が実験とほぼ一致している。0.4倍とすると振幅が大きいところで解析結果が実験値よりも大きくなるため、今回の実験を再現するには圧縮エネルギーを0.3倍とするのが最適であることが確認できた。実験では上面鉄筋が少ないため早期に載荷方向に直交するひび割れがフーチングに生じ、フーチングが分断されて載荷方向前面のコンクリートで水平力を支持するようになっており、耐力力に対してコンクリートの圧縮側の非線形特性の影響が大きいことは実験結果と整合しているといえる。

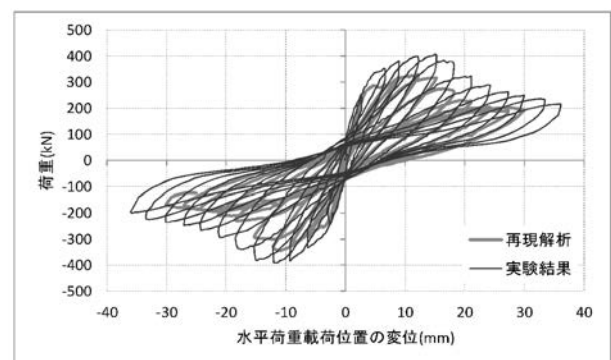


図-7 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.1倍、引張破壊エネルギー1.0倍)

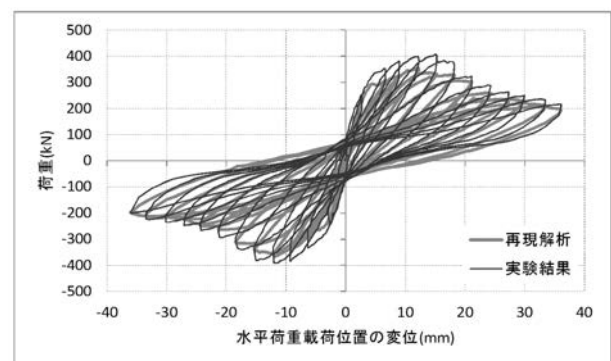


図-8 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.2倍、引張破壊エネルギー1.0倍)

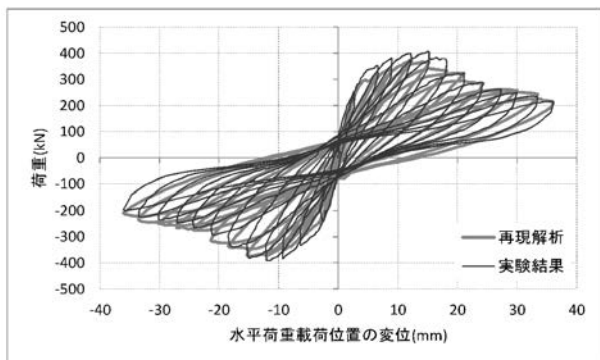


図-9 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.3倍, 引張破壊エネルギー1.0倍)

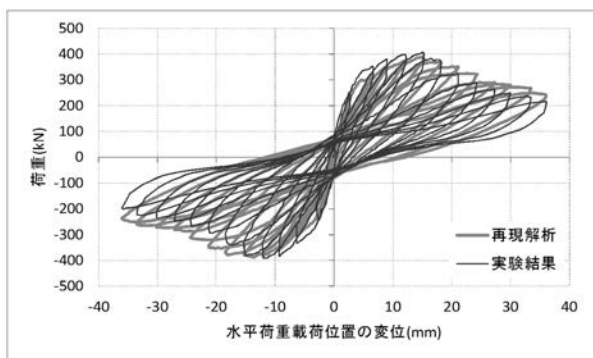


図-10 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.4倍, 引張破壊エネルギー1.0倍)

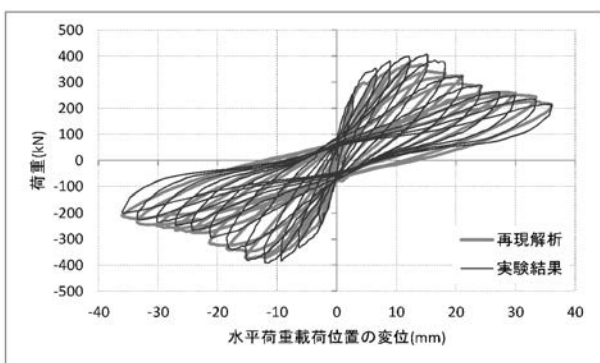


図-11 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.3倍, 引張破壊エネルギー1.0倍)

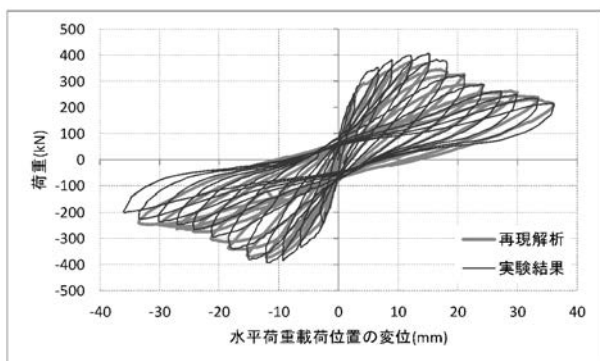


図-12 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.3倍, 引張破壊エネルギー0.9倍)

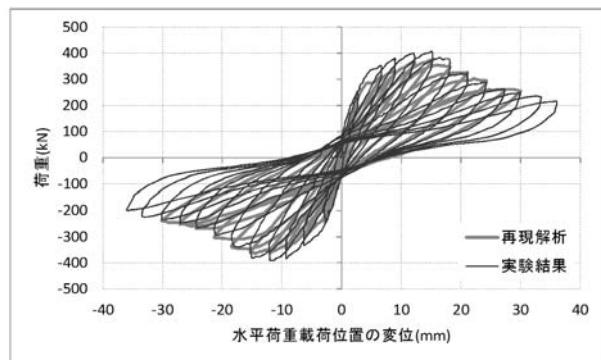


図-13 再現解析結果

(圧縮破壊エネルギー0.3倍, 引張破壊エネルギー0.8倍)

(3) 引張側の非線形特性に着目した再現解析

コンクリートの引張側の非線形特性をパラメータとして実験で得られた変位を作用させて計算した結果を図-11～図-13に示す。圧縮破壊エネルギーを0.3倍に固定し、引張破壊エネルギーを1.0倍～0.8倍に変化させたが、図に示すとおり荷重～変位関係に大きな変化は認められない。前述のとおり実験ではフーチングが早い段階で分断されており、コンクリートの引張力は水平耐荷力にあまり寄与していないと考えられることから、引張側の非線形特性の感度が小さいことは実験結果と整合しているといえる。

(4) ひび割れ分布

ひび割れひずみの分布と実際のひび割れ状況を対比したものを示す。実験でははじめに載荷方向に直交するひび割れが生じ、その後に載荷方向に平行にひび割れが生じたが、解析結果でもその傾向は表現できている。フーチングの切断面については、写真に示すようなすり鉢状のひび割れが橋脚下部に生じていたが、解析結果でも同様なひび割れが卓越する傾向が表現できている。

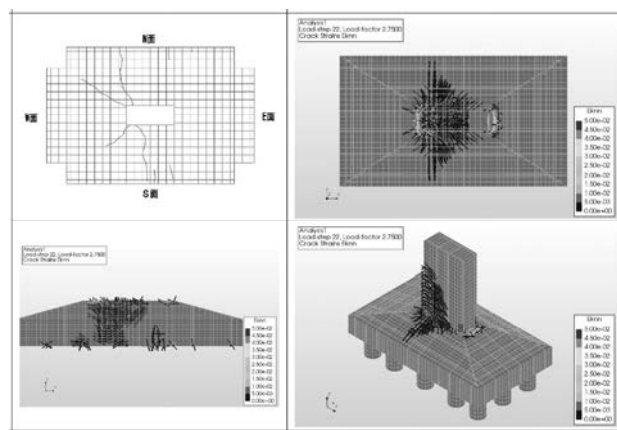


図-14 ひび割れ状況の比較(1 δ y, 3mm, 正側)

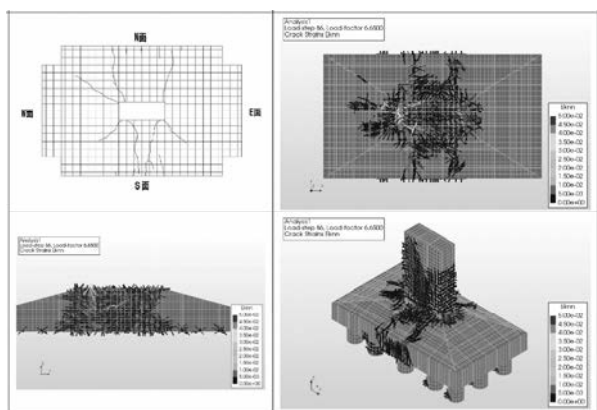


図-15 ひび割れ状況の比較(2 δy , 6mm, 正側)

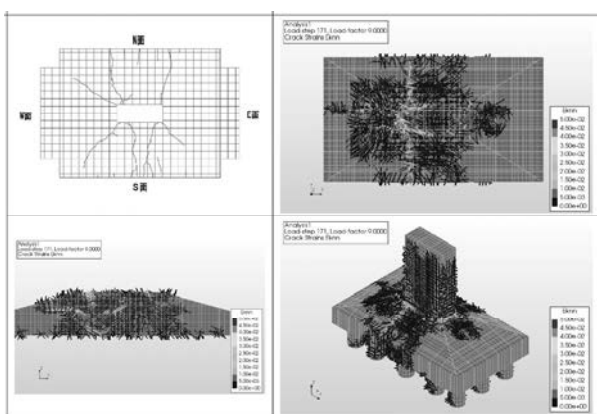


図-16 ひび割れ状況の比較(3 δy , 9mm, 正側)

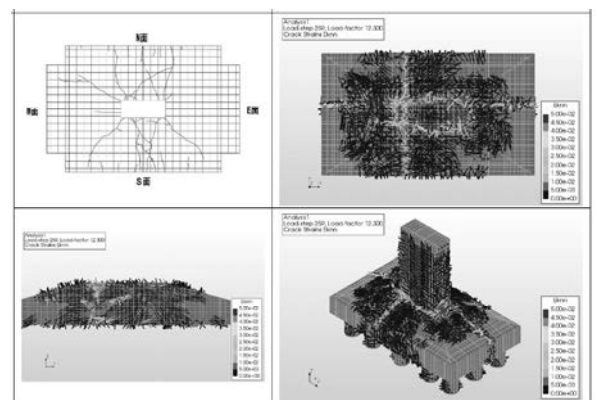


図-17 ひび割れ状況の比較(4 δy , 12mm, 正側)

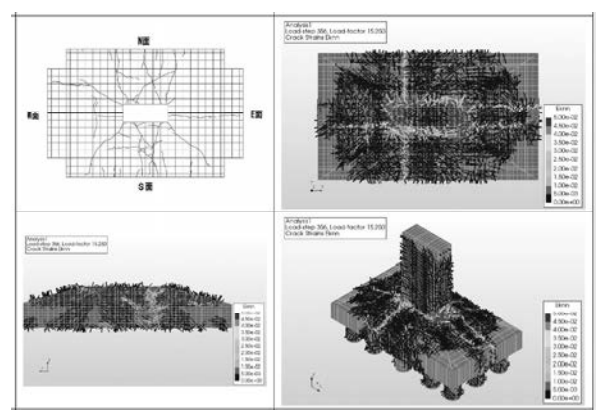


図-18 ひび割れ状況の比較(5 δy , 15mm, 正側)

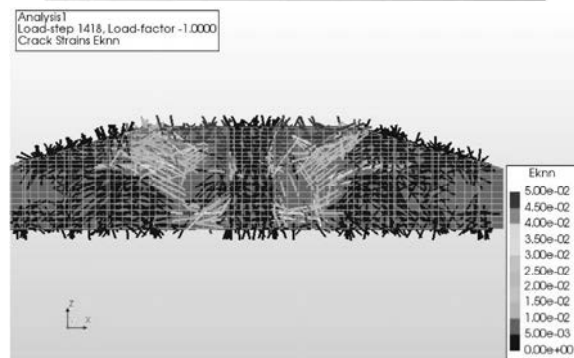


図-19 フーチング切断面のひび割れ状況の比較

(5) 杭反力

杭反力を比較した結果を図-20に示す．杭反力は9箇所で計測しており，対応する解析結果と比較している．中央の杭8の反力に着目すると，载荷開始から300ステップ程度までの初期段階においては，実験結果が圧縮側(正側)に偏っている．その後一旦正負対称に近い状態となり，600ステップ以降は再度圧縮側に偏る傾向が見られる．再現解析では载荷開始直後は引張側(負側)に偏っており実験結果と乖離しているが，後半で圧縮側に偏っていく傾向は実験と同様である．実験と解析では軸力の作用させ方が異なっており，実験では各ステップで軸力が一定になるように補正しているため，変形後の構造に対して軸力を再载荷しているようになるが，解析では初期に自重とあわせて軸力を導入した後は軸力を調整していないため，各杭には初期状態での軸力分担分のみが考慮された状態になっている．これが両者の差異を生んでいる可能性が考えられる．

5. おわりに

本文では，上面鉄筋が少ない既設道路橋のフーチングに着目した正負交番载荷実験の結果をふまえ，その挙動をFEM解析により再現した結果を報告した．コンクリートと鉄筋の非線形特性を考慮した3次元FEMモデルを作成し，実験と同様に正負交番荷重を作用させて実験結果と対比した．材料構成則

をパラメータとして試算した結果、圧縮軟化特性を適切に設定することで、荷重～変位関係やひび割れ分布等を精度良く再現することができた。

参考文献

- 1) 引地宏陽他: 上面鉄筋が少ない既設フーチングの正負交番載荷実験(その1), 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム, 2019年7月(投稿中)
- 2) DIANA FEA: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, Release 9.4.2.
- 3) (社)日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 平成29年
- 4) 山谷, 中村, 檜貝: 回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集No.620/V-43, pp187-199, 1999.5.
- 5) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991.

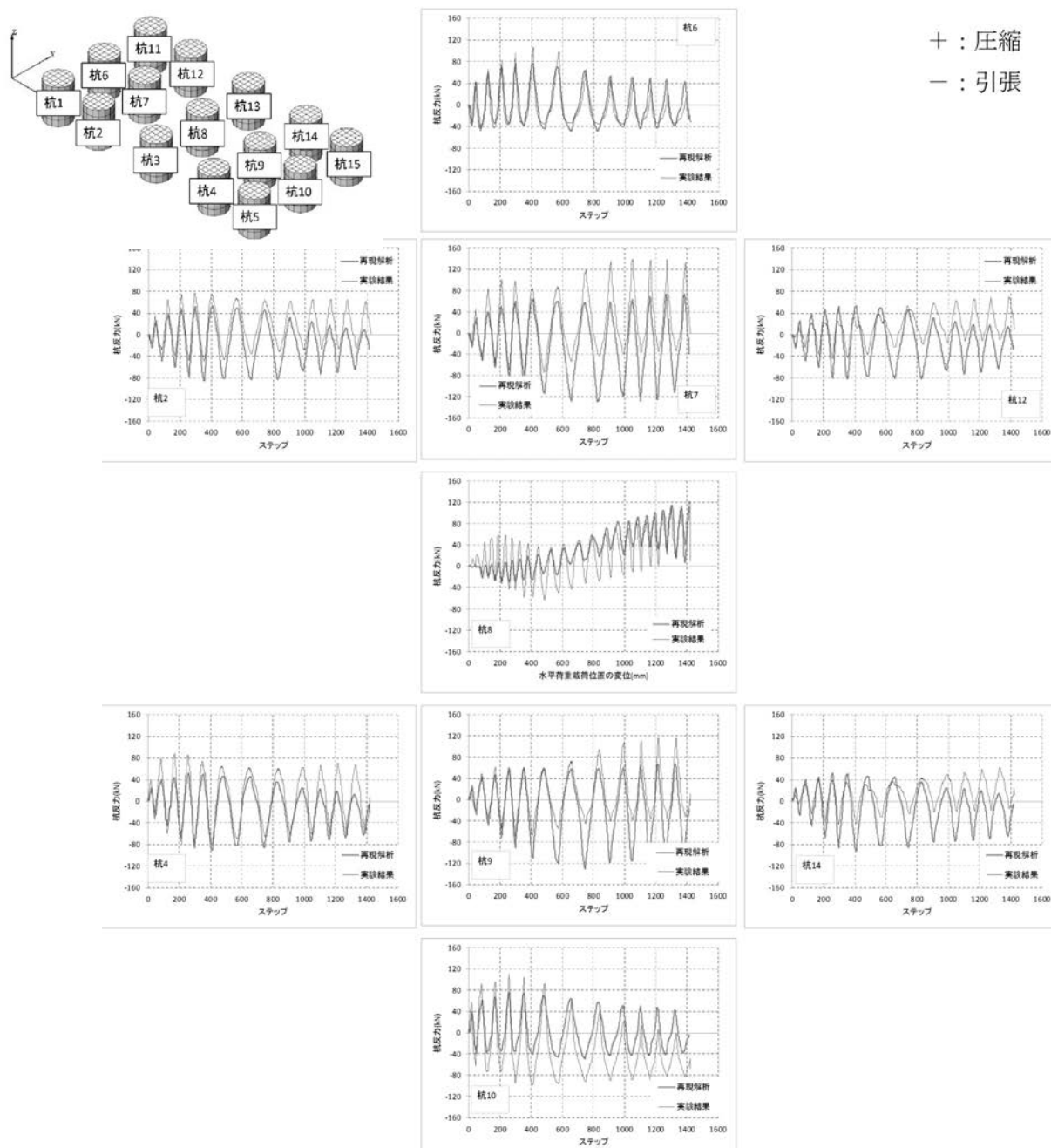


図-20 杭反力の比較