

多列杭を有する既設フーチングの耐震性能評価 実験及び損傷メカニズムに関する検討

安藤高士¹・服部匡洋¹・篠原聖二²

¹ (一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第一課

² 技術部技術推進室

要約

本研究では、多列杭を有する既設フーチングの耐震性を評価するために、橋脚、フーチング、杭頭部を一体とした1/10スケールの縮小模型試験体を用いた水平荷重載荷実験を実施し、更に、その損傷メカニズム及び荷重抵抗機構を明らかにするために3次元弾塑性有限要素法を用いた実験再現解析を実施した。その結果、多列杭を有する既設フーチングは設計上のせん断耐力を超えてもせん断破壊は生じず、柱の回転挙動と柱・杭の引張力による円弧状の引張破壊がフーチングの内部に発生するものの、その損傷に対しフーチングの全幅で面的に抵抗するため変形能を有するじん性的な破壊形態となることが明らかとなった。

キーワード: 既設フーチング, 耐震性, 損傷過程, 変形能, 実験, 弾塑性有限要素解析

1. はじめに

地震によるフーチングの損傷事例は少なく損傷程度も軽微であり1995年の兵庫県南部地震による阪神高速道路の下部構造物の損傷発生状況を見ても、阪神高速3号神戸線の100基近くのRC橋脚にAランクの損傷が発生したものの、フーチングには損傷度の高いA、Bランク（鉄筋破断や部材の変形を伴う損傷）の損傷はなく比較的軽微なCランク（ひび割れの発生や局部的なかぶりコンクリートの剥離が認められるもの）の損傷が数基に発生したのみであった。また、Cランクの損傷が確認されたフーチングはせん断スパン比 a/d （ a : 柱前面より最外縁杭までの距離、 d : フーチング有効高）が1.0程度と小さく、主なひび割れはフーチングの上面に集中して発生するという特徴を有していた^{1),2)}。

フーチングの耐震性については、上記を含む地震時の損傷事例などを基に実験及び解析的検討による評価がされている^{2),3),4),5),6),7),8)}が、フーチングは単柱式橋脚などと比べ複雑な構造（柱又は壁を支え、地盤又は基礎へ荷重を伝える版状の構造）であるため損傷メカニズム評価が難しいことや比較的せん断スパン比の小さなフーチングに損傷が生じていたことなどから、既往の研究はせん断スパン比が1.0前後と比較的小さなフーチングや杭本数の少ないフーチング（単列杭（4本杭など）を有するフーチングなど）を対象としたものが多く、杭本数の多い多列杭を有するフーチングの耐震性に

ついては不明な部分がある。

そこで、本研究では多列杭を有する既設フーチングの耐震性を評価するために、橋脚、フーチング、杭頭部を一体とした1/10スケールの縮小模型試験体を用いた水平荷重載荷実験を実施し、更に、その損傷メカニズム及び荷重抵抗機構を明らかにするために3次元弾塑性有限要素法を用いた実験再現解析を実施した。

本論文は、多列杭を有する既設フーチングを対象とした実験及び実験再現解析結果について述べるものである。

2. 水平荷重載荷実験の概要

(1) 多列杭を有する実験対象フーチングの選定

実験対象フーチングは、阪神高速道路の既設フーチングの中から下記を条件に選定した。

- ①杭基礎を有すること
- ②設計基準が古い（昭和55より前）こと
- ③曲げ耐力、せん断耐力ともに平成24年道路橋示方書（以下、「道示」という）が規定する耐力を超過すること
- ④実験事例の少ない多列杭を有する（フーチングの平面寸法及び最外縁杭位置におけるせん断スパン比が大きい）こと

以上の条件から選定した実験対象下部構造一般図を図-1に示す。

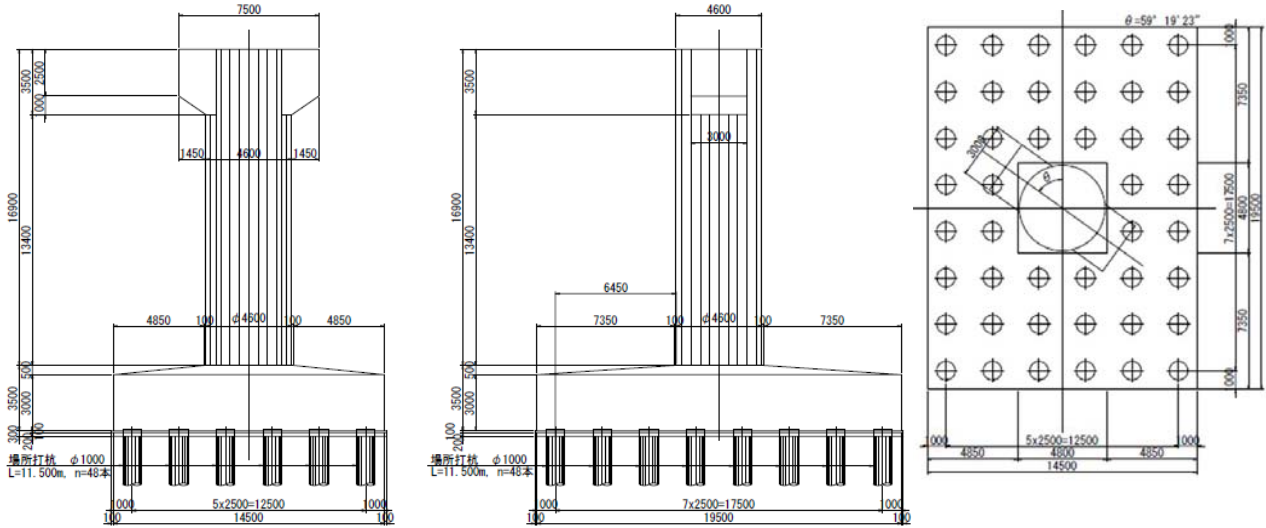


図-1 実験対象下部構造一般図 正面図（左）側面図（中央）平面図（右）（単位：mm）

表-1 実験対象下部構造及び実験試験体の諸元

		実験対象下部構造	実験試験体	
柱	柱高	16,900mm	1690mm	
	柱断面	φ4,600mm	400mm×400mm	
	鉄筋	軸方向鉄筋	D35@100mm	16本D32
フーチング	幅×奥	19,500mm×14,500mm	1,950mm×1,450mm	
	全高	3,500mm（柱前面）	350mm	
		3,000mm（フーチング端部）		
	テーパ（フーチング上面）	500mm	—（なし）	
	有効高	3,375mm（柱前面）	280mm	
		2,850mm（フーチング端部）		
	せん断スパン比 a/d （最外縁杭～柱近傍杭）	下側引張	2.0（6,910mm/3,350mm）	2.4（675mm/280mm）
			1.3（4,410mm/3,350mm）	1.5（425mm/280mm）
			0.6（1,910mm/3,350mm）	0.6（175mm/280mm）
		上側引張	2.7（8,980mm/3,375mm）	3.1（875mm/280mm）
1.9（6,480mm/3,375mm）			2.2（625mm/280mm）	
1.2（3,980mm/3,375mm）			1.3（375mm/280mm）	
鉄筋	上面鉄筋	橋軸D25@150mm	橋軸D10@220mm	
		橋直D22@300mm	橋直D6@260mm	
	上面引張鉄筋比	0.09%（橋軸）	0.14%（橋軸）	
	下面鉄筋	橋軸D32@150mm	橋軸D13@110mm	
		橋直D29@150mm	橋直D10@130mm	
下面引張鉄筋比	0.30%（橋軸）	0.25%（橋軸）		
せん断方向鉄筋	D16@1200mm	D6@260mm		
杭	杭径	44本φ1,000	44本φ100mm	
	杭間隔	2,500mm	250mm	
	鉄筋量	D13@150mm	8本D13	
使用材料	コンクリート	柱	27N/mm ²	27N/mm ² （35.2N/mm ² ）
		フーチング・杭	24N/mm ²	24N/mm ² （29.6N/mm ² ）
	鉄筋	SD30	SD345	

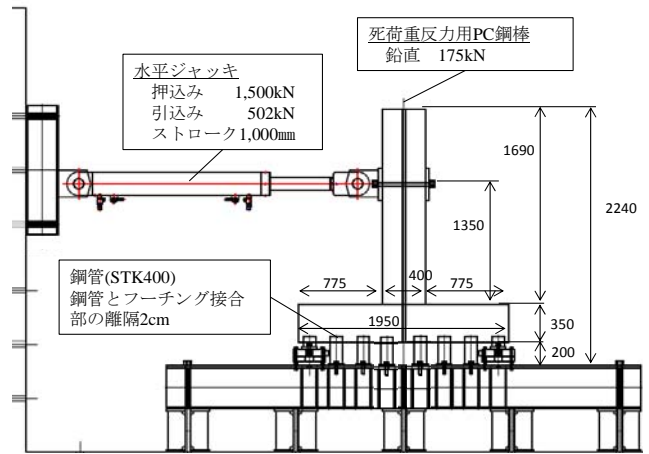


図-2 実験セットアップ（単位：mm）



図-3 片側繰返し水平荷重実験状況

昭和49年に竣工した下部構造物で、フーチングは高さ3.5m（テーパ部0.5m）、橋軸方向長さ19.5m、橋軸直角方向長さ14.5mの形状である。橋脚構造は高さ16.9m、直径4.6mの円形断面のコンクリート橋脚であり、杭構造は直径1.0mの場所打ち杭（44本）である。また、杭配置は橋軸方向に8列、橋軸直角方向に6列の多列配置であるが橋脚直下には杭配置のない構造となっている。

(2) 実験試験体諸元及び実験セットアップ

実験対象下部構造及び実験試験体の諸元を表-1

に示す。また、実験セットアップ状況を図-2に、実験状況写真を図-3に、実験試験体配筋図（フーチング・杭）を図-4に示す。実験試験体は、実験対象下部構造物の1/10スケールとし、橋脚（柱）、フーチング、杭頭部を一体として製作した。実験試験体の水平荷重載荷方向のせん断スパン比（下側引張時）は、2.4（最外縁杭位置）、1.5（外側から2列目杭位置）、0.6（柱近傍杭位置）となっている。また、フーチングの鉄筋量は下側主鉄筋比が

0.25%であり、上側主鉄筋比は下側主鉄筋比の1/2程度で0.14%とかなり少ない配筋となっている。せん断方向鉄筋についても建設当時の設計ではフーチングのスターラップに関する規定がなかったため、組立筋のみの非常に少ない配筋となっている。

今回の実験ではフーチングの損傷を確実に先行させるため、柱基部及び杭頭部の耐力が設計の2倍となるように鉄筋を配筋し杭全周は鋼管で補強した。また、対象フーチングは上面に0.5mのテーパを有していたが実験の簡便化のためテーパは省略した。柱主鉄筋の定着は、実験対象下部構造物の建設年次が昭和49年と古く折り曲げ部が10D ($D = \phi 35\text{mm}$)程度と短く現行基準では定着長が不足し抜け出しが懸念されること、また、定着長を確保し柱主鉄筋をフーチング下面鉄筋位置で折り曲げた場合はフーチング下面鉄筋と同様の効果を発揮してしまい耐震性評価に影響を与えることが懸念されるため、フーチング底部に鋼板を設置し柱主鉄筋を鋼板に直接固定する定着構造⁸⁾とした。

(3) 実験方法

実験試験体は杭下端をH鋼の架台に固定し、架台は反力床にPC鋼棒により緊張し固定した。

載荷方法は、上部構造反力に相当する鉛直荷重と地震力に相当する水平荷重の2軸載荷とした。

鉛直荷重は、柱天端に上部構造物の死荷重反力に相当する荷重(175kN)を実験試験体中心に配置したPC鋼棒により一定荷重として載荷した。

水平荷重は、既往の実験²⁾に倣い、所定の鉛直荷重を保持した状態で柱基部から高さ1,350mmの位置に反力壁に設置した水平ジャッキによる片側繰返し載荷により載荷した。水平荷重の載荷ステップは、フーチング主鉄筋が初降伏するまでは50kNステップとし、フーチング主鉄筋の降伏以降はフーチング主鉄筋の降伏変位を基準変位 δ_0 (本実験13mm)として変位量が $4\delta_0$ に達するまでは $0.5\delta_0$ ステップ、それ以降は $1\delta_0$ ステップとした。また、ステップ毎に0kNまで除荷を行うこととした。

計測項目は、載荷荷重、各部材の変位及び鉄筋ひずみに加え、多列杭の杭反力発生状況を確認するため載荷方向中心列の4杭の鉛直反力とした。

3. 実験結果

(1) フーチングの損傷状況

フーチング上面のひび割れ状況を図-5に、水平荷重載荷位置における水平荷重-水平変位関係を図-6に示す。ここで、図-6に示す設計上の曲げ耐力及びせん断耐力は、実験試験体の破壊過程を確認するために行った2次元骨組みモデルを用いたプッシュオーバー解析により算出した作用力に対する道示での耐力照査結果を示している。水平荷重約150kNで押込側の柱フーチング接合部付近でせん断耐力に達し、水平荷重約220kNで引張側の

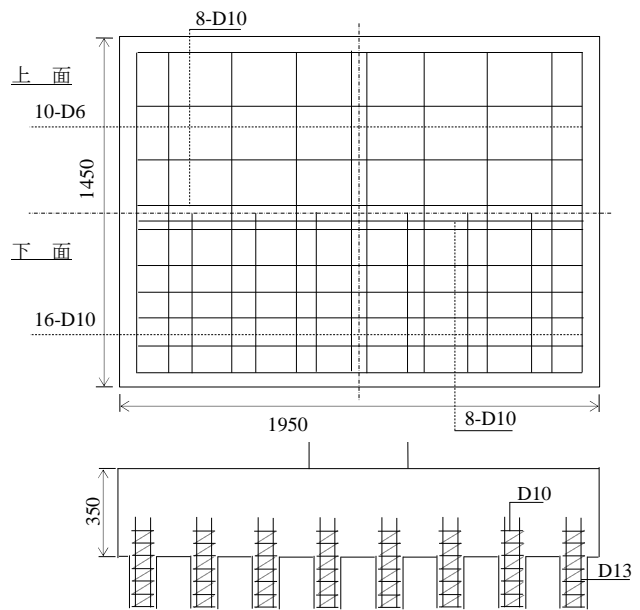


図-4 実験試験体配筋図(フーチング・杭 単位: mm)

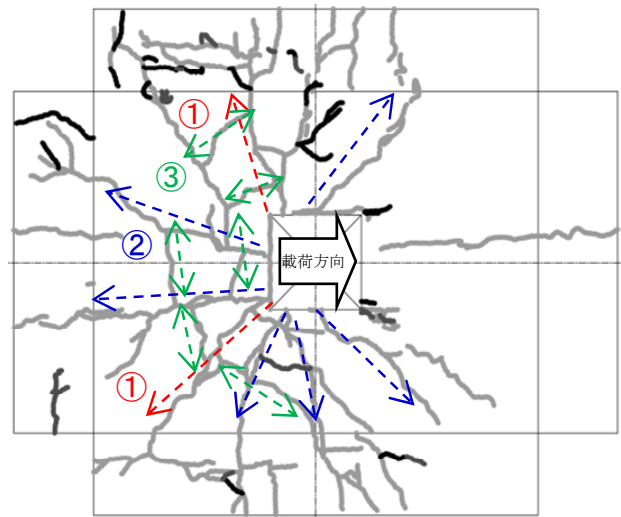


図-5 フーチング上面のひび割れ状況(実験終了時)

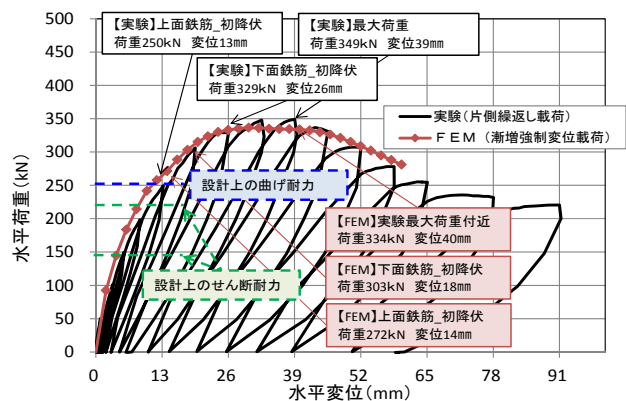


図-6 水平荷重-水平変位関係(水平荷重載荷位置)

柱フーチング接合部付近でせん断耐力に達した。また、水平荷重約240kNでフーチング上面主鉄筋が曲げ降伏に至ったことから、設計上はせん断破壊先行の破壊形態であることが示された。

実験試験体の主な載荷ステップにおけるフーチングの損傷過程を以下に示す。

- 1) 水平荷重130kNで、引張側フーチング上面柱フーチング接合部隅角近傍より斜め方向に進展するひび割れ①が発生し250kNまでの間にフーチング側面まで達した。また、柱フーチング接合部より放射状のひび割れ②が発生した。
- 2) 水平荷重250kNで、フーチング上面主鉄筋が降伏ひずみ ($1,845 \mu$) に達したため初降伏とし基準変位 (δ_0 =水平変位13mm) とした。
- 3) $2\delta_0$ (329kN) でフーチング下面主鉄筋が降伏し、 $2.5\delta_0$ (347kN) でフーチングせん断方向鉄筋が降伏した。
- 4) $3\delta_0$ (349kN) で水平荷重が最大荷重に達し、その後は水平変位の増加に伴い水平荷重の低下が見られた。
- 5) $7\delta_0$ までの間にフーチング上面の放射状のひび割れ①②を繋ぐ横方向のひび割れ③が発生し、フーチング上面コンクリートの一部に浮上りが見られた。 $7\delta_0$ (220kN) で水平荷重が最大荷重の6割まで低下したため実験を終了した。フーチング上面ひび割れは引張側に多く発生し押込側は少なかった。また、フーチング下面においても上面と同様に柱フーチング接合部から放射状のひび割れが確認された。

実験試験体の設計上のせん断耐力は引張側で約150kN、押込側で約220kNであったが、実験では $3\delta_0$ で最大水平荷重349kNを計測した。また、設計上の曲げ降伏荷重は約240kNであったが、実験では250kNでフーチング上面鉄筋が降伏ひずみに達しその後も349kNまで荷重の増加が見られた。

最大水平荷重以降は水平荷重がなだらかに低下するものの最終変位 $7\delta_0$ までせん断破壊を示すような荷重の急落を伴う脆性的な破壊は生じなかった。

(2) フーチング内部のひび割れ発生状況

フーチング内部のひび割れ発生状況を確認するため実験試験体の切断を行った。図-7にフーチングの切断位置及びフーチング内部ひび割れ発生状況を示す。切断面はフーチング中央断面と中央断面から杭一列分離れた2断面の合計3断面とした。

フーチング内部には図-7に示すA~Dの4種類のひび割れが確認された。全ての切断面において引張側のフーチング下面柱フーチング接合部から引張側のフーチング上面に向かう斜め方向のひび割れD(引張側内部斜め方向ひび割れ)が確認された。このひび割れDはひび割れ幅が非常に大きく引張側のフーチングの上下主鉄筋の間を進展しフーチングの側面にまで達していた。中央断面から離れた他の2断面では、押込側のフーチング上面柱フーチング接合部から引張側のフーチング下面柱フーチング接合部に向かう円弧状のひび割れC(接合部内部斜め方向ひび割れ)が確認された。このひび割れCは、引張側のフーチング下面柱フーチング接合部付近において引張側のフーチング内部に進展するひび割れDと繋がるように発生していた。

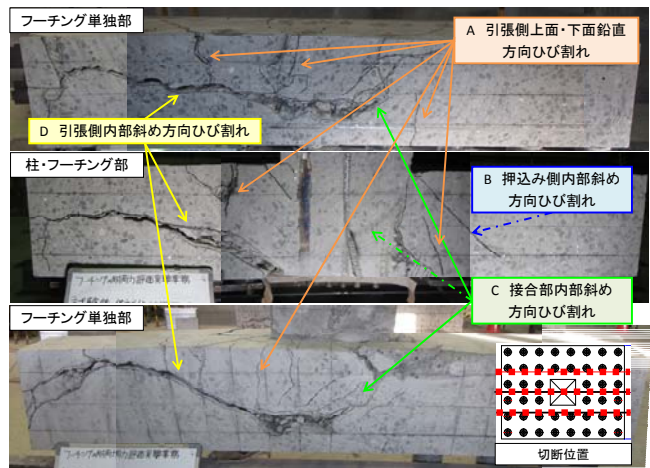


図-7 フーチング切断面での内部ひび割れ状況

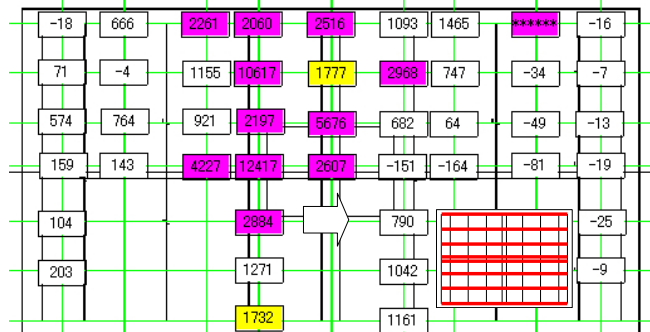


図-8 フーチング上面主鉄筋のひずみ発生状況 ($3\delta_0$) (降伏ひずみ以上を赤着色)

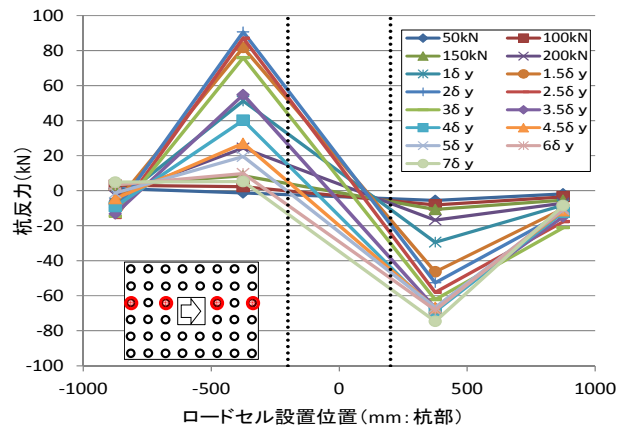


図-9 杭の鉛直反力発生状況

(3) フーチング上面主鉄筋のひずみ発生状況

図-8に、 $3\delta_0$ 時(水平荷重最大時)におけるフーチング上面主鉄筋の降伏ひずみ ($1,845 \mu$) 発生状況を示す。フーチング上面主鉄筋の降伏ひずみに達した箇所が面的に広がっていることが確認された。また、フーチング上面直角方向鉄筋も同様に降伏範囲が面的に広がっていることが確認された。

(4) 杭の鉛直反力発生状況

図-9に、フーチング中央部の杭4本の鉛直反力分布を示す。押込側の中央部の杭で最大約75kNの圧縮反力、引張側で中央部の杭で最大約90kNの引張反力の発生が確認された。一方で、最外縁杭では押込側、引張側ともに大きな反力は計測されなかった。このことから、今回の実験試験体におけ

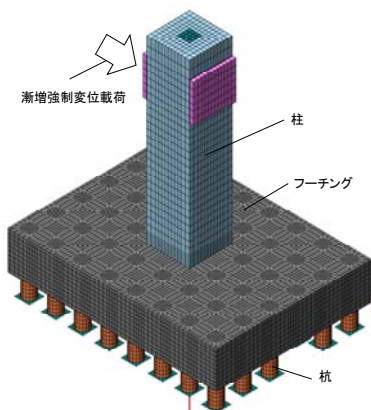


図-10 実験再現解析モデル

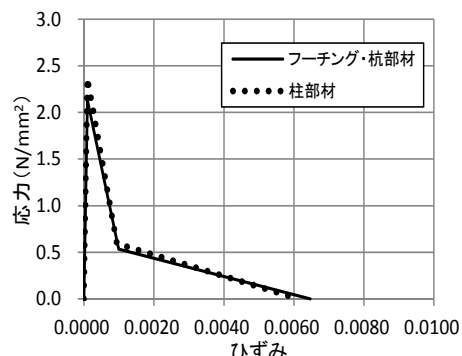
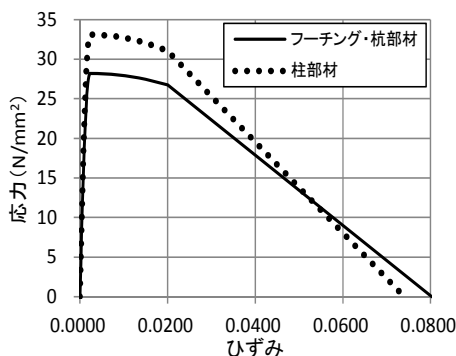


図-11 コンクリートの応力 - ひずみ関係 (左：圧縮側 右：引張側)

るフーチングは剛体挙動ではなく非線形挙動をしていると考えられる。引張側の杭で計測された杭反力は、 $2\delta_0$ 付近までは増加が見られたがそれ以降は杭反力の減少が確認された。このことは当該杭の上方にあるフーチングが損傷し引張力が伝達されなくなったことを示すものと考えられる。

表-2 コンクリートの材料特性

項目	単位	フーチング	杭	柱
圧縮強度	f_c N/mm ²	28.2	28.2	33.1
ヤング率	E_c N/mm ²	20,640	20,640	24,190
ポアソン比	ν_c	0.2	0.2	0.2
引張強度	f_t N/mm ²	2.1	2.1	2.4
粗骨材の最大寸法	d_{max} mm	20.0	20.0	20.0
引張破壊エネルギー	G_f N/mm	0.083	0.083	0.087
圧縮破壊エネルギー	G_c N/mm	46.6	46.6	50.5

4. 解析的検討及び実験結果との比較

多列杭を有する既設フーチングの耐震性を評価するために行った縮小模型試験体を用いた水平荷重重載荷実験により、フーチングは脆性的な破壊形態ではなく一定の変形能を有することが示された。そこで、実験で確認されたフーチングの破壊形態を以下の観点から評価するため、3次元弾塑性有限要素法による実験再現解析を行った。

表-3 鉄筋の材料特性

項目	単位	フーチングおよび柱			
		SD345			
種類	-	SD345			
径	-	D6	D10	D13	D32
断面積	mm ²	31.7	71.3	126.7	794.2
ヤング率	N/mm ²	202,400	199,400	197,960	207,930
ポアソン比	-	0.3			
材料構成則	-	VonMises			
降伏応力	N/mm ²	373.4	367.1	418.6	387.8
硬化係数	-	0.001			

- ①設計上のせん断耐力を超えてもせん断破壊が生じない理由
- ②フーチング鉄筋が降伏した以降においても水平荷重が増加する理由
- ③水平荷重が最大荷重に達した後に、荷重がじん性的に低下している理由

(1) 解析手法

解析手法は、汎用解析プログラムDIANAによる3次元弾塑性有限要素解析（以下、「FEM」という）とした。図-10に実験再現解析モデルを示す。

解析に用いた要素特性はコンクリートにはソリッド要素、鉄筋には埋め込み鉄筋要素を使用しコンクリートと鉄筋は完全付着モデルとした。材料特性はコンクリート及び鉄筋ともに材料試験のデータから弾塑性モデルを設定した。表-2及び表-3にコンクリート及び鉄筋の材料特性を、図-11にコンクリートの弾塑性モデルは引張側は引張破壊エネルギーを考慮できる引張軟化モデル、圧縮側は圧縮破壊エネルギーを考慮できる放物線モデルとした。また、コンクリートのひび割れモデルは回転モデルとした。载荷条件は、柱天端に上部構造死荷重相当の鉛直荷重をPC鋼棒を再現したモデルで与え、水平荷重は強制変位により与えた。境界条件は、

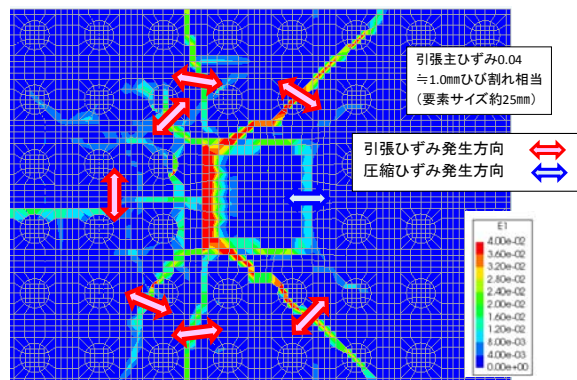


図-12 フーチング上面引張ひずみ発生状況（最大荷重付近）

杭下端を実験と同様に完全固定とした。

(2) 解析結果及び実験との比較

図-6示す水平载荷位置の水平荷重－水平変位関係にFEMで得られた水平荷重－水平変位関係をあわせて示す。FEMにおいても実験と同様の水平荷重－水平変位関係が得られた。フーチング上面鉄筋の降伏荷重（272kN）及び下面鉄筋降伏荷重（303kN）ともに実験と同様の降伏状況であったことから、FEMにより実験での破壊形態を再現できていると考えられる。図-12に実験最大荷重付近におけるフーチング上面の引張ひずみ（最大主ひずみ）発生状況を示す。FEMにおいても実験で確認されたひび割れ発生箇所での引張ひずみの発生が確

認められた。図-13に実験最大荷重付近での柱・フーチング接合部断面における圧縮応力（最小主応力）の発生状況を示す。押し込み側では①に示す圧縮ストラットの形成が確認された。また、②③に示す方向においても大きな圧縮応力が確認された。図-14に引張ひずみ（最大主ひずみ）の発生状況を示す。圧縮応力が発生していない④⑤⑥においても引張ひずみが確認された。ここで④⑤については曲げひび割れと考えられるが、⑥は柱の回転挙動と杭の拘束に伴う引張力により生じる引張ひずみであると考えられる。図-15にフーチング上面鉄筋のひずみ発生状況を示す。鉄筋降伏の範囲は軸方向に加え直角方向においても面的に広がっており、これは下面鉄筋も同様であった。図-16に引張ひずみ発生状況（5断面）を示す。引張ひずみの発生状況から円弧状の引張ひび割れは面的に生じ実験最大荷重時にはほぼ全幅に広がっていると考えられる。

5. 考察

実験及びFEMにより確認された多列杭を有する既設フーチングの破壊形態の要因を以下に示す。

a) 設計上のせん断耐力を超えてもせん断破壊が生じない理由

押し込み側の柱基部と杭の間に圧縮ストラットが形成され、せん断耐力が上昇したと考えられる。

b) フーチング鉄筋が降伏した以降においても水平荷重が増加する理由

上面鉄筋降伏後の鉄筋の抵抗（降伏）範囲が上面、下面鉄筋ともに面的に広がることにより水平荷重が増加したと考えられる。

c) 水平荷重が最大荷重に達した後に、荷重がじん性的に低下している理由

図-17に示す柱の回転挙動と柱・杭の引張力による円弧状の引張破壊により荷重の低下が生じるが、この破壊に対し引張側フーチングの全幅で面的に抵抗するため、面的な荷重分配を伴いながら変形能を有するじん性的な破壊が生じたと考えられる。

謝辞：本実験は、国立研究開発法人土木研究所の実験施設を借用して実施した。ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌一，1997.
- 2) 阪神高速道路公団：フーチングの地震時挙動に関する基礎的研究報告書，1999.3
- 3) 幸左ら：地震時における柱・フーチング接合部の損傷メカニズムに関する研究，土木学会論文集，No. 746/V-61, pp. 41-55, 2003.11
- 4) 白戸ら：上面側が引張りになる場合のフーチングのせん断耐力算定式，構造工学論文集，Vol.48A, pp. 1211-1220, 2002.3

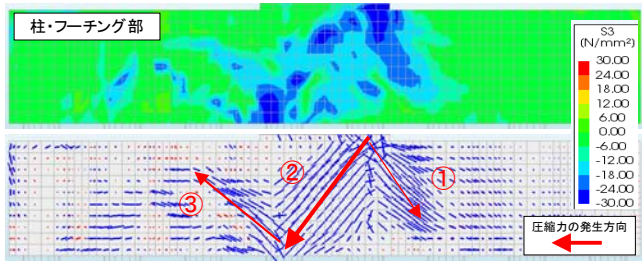


図-13 圧縮応力（最小主応力）発生状況（最大荷重付近 上：コンタ図，下：矢示図）

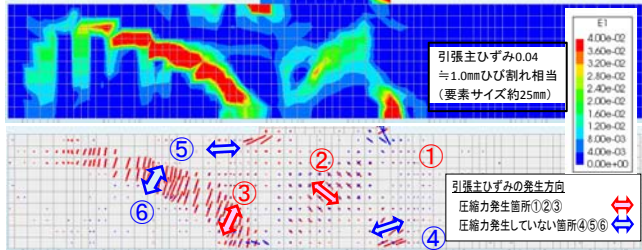


図-14 引張ひずみ（最大主ひずみ）発生状況（最大荷重付近 上：コンタ図，下：矢示図）

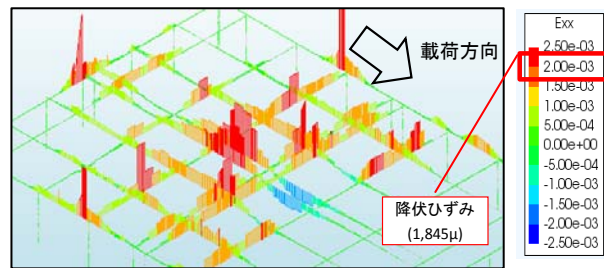


図-15 フーチング上面鉄筋ひずみ（最大荷重付近）

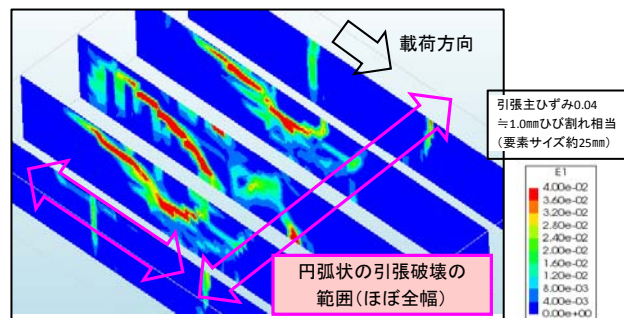


図-16 引張ひずみ発生状況（最大荷重付近：5断面）



図-17 フーチングの円弧状の引張破壊面

- 5) 幸左ら：フーチングの終局挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45AⅢ, pp. 1369-1376, 1999.3
- 6) 幸左ら：地震時のフーチング損傷メカニズムに関する研究，土木学会論文集，No. 655/V-48, pp. 63-74, 2000.8
- 7) M.JN.Priestleyら(川島一彦監訳)：橋梁の耐震設計と耐震補強，技報堂出版，1998.4
- 8) 独立行政法人土木研究所：アルカリシリカ反応による損傷を受けたフーチングに対する損傷度評価および補修・補強方法に関する研究，土木研究所資料第4304号, 2015.3