

多列杭を有する既設フーチングの耐震性に関する 実験的検討

安藤 高士¹・服部 匡洋²・篠原 聖二³

¹正会員 修士（工学） 一般財団法人阪神高速道路技術センター 企画研究部
（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

²正会員 博士（工学） 一般財団法人阪神高速道路技術センター 企画研究部
（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）

³正会員 博士（工学） 阪神高速道路株式会社 技術部（〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震による阪神高速道路のフーチング損傷としては、阪神高速3号神戸線において、RC橋脚では100基近くのAランク損傷が発生したが、フーチングでは、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）のものはなく、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）程度の損傷が数基発生したのみであった。また、損傷が発生したフーチングは、せん断スパン比 a/d （ a ：柱基部より最外縁杭までの距離、 d ：フーチング有効高）が1.0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)}。

杭基礎を有するフーチングは、地震時に上部構造および橋脚に生じる慣性力により、図-1のようにフーチング下面が引張りになる側とフーチング上面が引張りになる側が存在する³⁾。そのため、現在の道路橋示方書⁴⁾（以下、「道示」という）では、下面側が引張りになる場合と、上面側が引張りになる場合の両方について設計を行うことが定められ、せん断力に対する照査は、部材断面（柱前面から $h/2$ 離れた断面（ h ：フーチング厚さ））に加えて、杭中心位置においても行うこととされている。

この時、コンクリートの負担するせん断耐力はアーチ効果による影響を考慮しせん断スパン比による割増しが行われるが、柱前面から最外縁杭までの間に複数の杭列があるような多列杭を有するフーチングの場合のせん断スパンは、上載土砂のような分布

荷重や複数の杭からの荷重が作用する場合のせん断スパンの設定方法に不明点が多いことから、道示において最外縁の杭中心位置から柱又は壁前面までの距離（フーチングの上面側が引張り側となる場合のせん断スパンは上記に柱幅/2とフーチング有効高の小さい距離を加えた距離）と定められている。

これまで、地震時におけるフーチングの損傷メカニズムは、地震時の被災状況などを基に実験的及び解析的検討がなされているところである^{2),3),5),6)}が、既往の研究は、フーチングの破壊メカニズムが複雑であることやフーチングの損傷がせん断スパン比が比較的小さい構造物に生じていたことなどから、せん断スパン比が1.0前後と比較的小さく、また、単列杭のフーチング（4本の杭基礎を有するフーチングなど）を対象としたものが多く、多列杭を有するフーチングを対象としたものは少ないことが挙げられる。

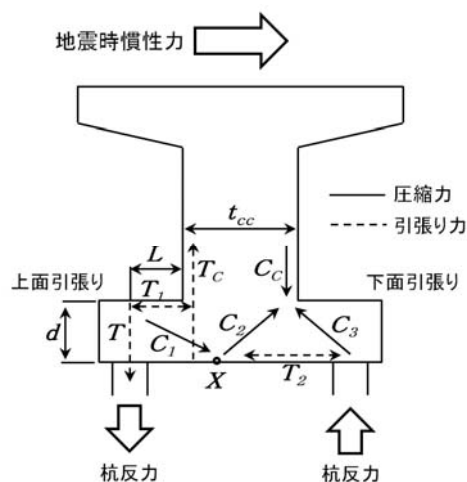


図-1 地震時のフーチングの応力状態³⁾

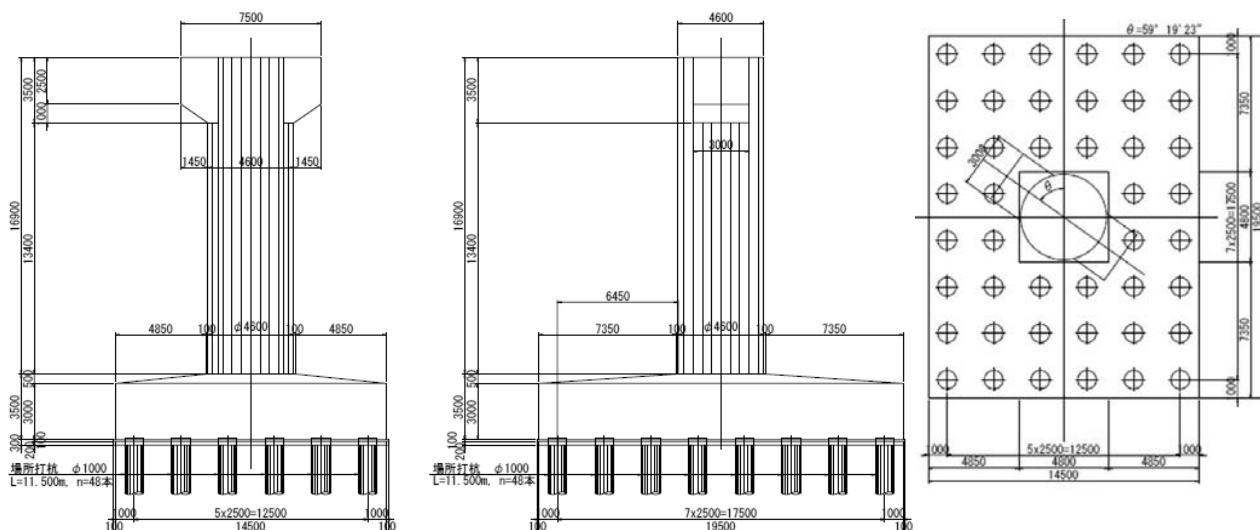


図-2 実験対象橋脚構造一般図 正面図（左）側面図（中央）平面図（右）（単位：mm）

そこで、本研究では、せん断スパン比が大きい傾向にある多列杭を有するフーチングを対象に、1/10スケールの橋脚、フーチング、杭頭部を一体とした試験体を製作し単調載荷実験を実施を行うことにより、多列杭を有するフーチングの地震時における損傷メカニズム、保有耐力及び複数の杭に支持されている場合の影響について検討を行った。

2. 模型載荷実験の概要

(1) 多列杭を有する実験対象フーチングの選定

今回の模型実験対象橋脚は、既設橋脚において下記を条件に選定した。模型実験対象橋脚の構造一般図を図-2に示す。

- (a) 多列杭を有する。
- (b) フーチングの平面寸法が大きく、フーチングの有効高が小さく、最外縁杭におけるせん断スパン比が大きい。
- (c) 道示による照査により、せん断破壊先行型になっている。

選定した橋脚は、昭和49年に竣工した橋脚で、橋脚高さ16.9m、直径4.6mの円形断面である。基礎構造は直径1.0mの場所打ち杭（44本）を有し、杭配置は橋脚直下には杭が配置されておらず、橋軸方向に8列、橋軸直角方向に6列の多列配置となっている。また、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、フーチングのせん断補強筋としては、組立筋のみの配筋となっている。

(2) 試験体諸元及び実験セットアップ

模型実験対象橋脚及び実験試験体の諸元を表-1に、

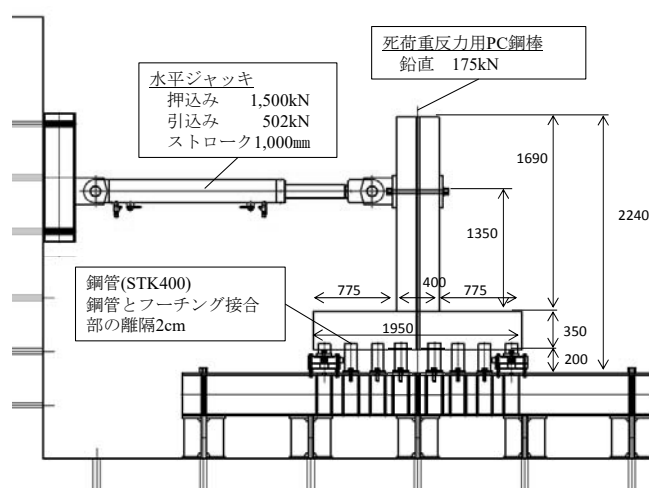


図-3 実験セットアップ（単位：mm）



図-4 実験状況

実験セットアップを図-3に、実験状況を図-4に示す。試験体は、実験対象橋脚の1/10スケールとし、橋脚、フーチング、杭頭部を一体として製作した。試験体における載荷方向（橋軸方向）の最外縁杭におけるせん断スパン比（下側引張）は、実験対象橋脚の2.0に対し2.4となっている。

表-1 模型実験対象橋脚及び実験試験体の諸元

			対象橋脚	試験体諸元 (1/10 スケール)
柱	柱高		16,900 mm	1,690 mm
	柱断面		ϕ 4,600 mm	400 mm×400 mm
	鉄筋量		D35@100 mm	16 本 D 32@
フーチング	せん断スパン比 a/d (最外縁杭)	下側引張	2.0(6,910 mm/3,375 mm)	2.4(675 mm/280 mm)
		上側引張	2.7(8,980 mm/3,375 mm)	3.1(875 mm/280 mm)
	幅×奥		19,500 mm×14,500 mm	1,950 mm×1,450 mm
	全高		3,500 mm (柱前面) 3,000 mm (フーチング端部)	350 mm
	有効高		3,375 mm (柱前面) 2,850 mm (フーチング端部)	280 mm
	鉄筋	上面	橋軸 D25@150 mm 橋直 D22@300 mm	橋軸 D 10@220 mm 橋直 D 6@260 mm
		下面	橋軸 D32@150 mm 橋直 D29@150 mm	橋軸 D 13@110 mm 橋直 D 10@130 mm
		せん断	D16@1200 mm	D 6@260 mm
杭	杭径		44 本 ϕ 1,000	44 本 ϕ 100 mm
	杭間隔		2,500 mm	250 mm
	鉄筋量		D13@150 mm	8 本 D 13
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

以下に、具体的な構造諸元の決定手法を記載する。

a) 柱（橋脚）

対象構造物の橋脚形状は直径4.6mの円形断面であったが、載荷試験の簡便化及び損傷発生方向を明確にするため、断面積を同等とした矩形形状とした。

フーチングの損傷を確実に先行させるため、柱基部の曲げ耐力が設計の2倍となるように主鉄筋を配筋し、柱基部近傍では損傷を生じさせないようにした。コンクリートの設計基準強度は27N/mm²とした。

b) フーチング

フーチングは上面にテーパを有していたが、実験の簡便化のためテーパは設けない構造とした。コンクリートの設計基準強度は24N/mm²とした。

c) 杭

杭基礎は、杭頭部分の200mmをモデル化した。杭体は鉄筋コンクリート杭であったが、杭先行型破壊を避けるために、設計で必要となった鉄筋量の2倍程度を配筋し、杭全周を鋼管で補強するとともに、杭頭部の回転を拘束させないために、鋼管とフーチング接合部に2cmの離隔を設けた。

(3) 試験体のプッシュオーバー解析

試験体の破壊過程を確認するために、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る事前解析を行った。モデル図を図-5に、水平荷重載荷位

置における荷重－変位関係を図-6に示す。

プッシュオーバー解析の結果、水平荷重150kNで押込み側のフーチング柱付け根部でせん断耐力に、220kNで引張り側のフーチング柱付け根部でせん断耐力に達した。その後、250kN程度でフーチング上面が引張りになる側で曲げ降伏に至った。従って、試験体においても、フーチングが曲げ降伏に至る前に、せん断破壊が先行する破壊過程になっていることを確認した。

(4) 試験方法

図-3に実験セットアップ図を示す。試験体は杭下端をH鋼の架台に固定し、架台については反力床にPC鋼棒により緊張し、固定した。

載荷荷重は、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。このうち鉛直荷重は、上部構造死荷重相当力（175kN）を試験体中心に配置したPC鋼棒により柱天端に一定荷重として載荷した。

水平載荷方法は、所定の鉛直荷重を保持した状態で、柱基部から1,350mmの位置に反力壁に設置したジャッキにより単調載荷を行うこととした。水平載荷により、フーチングの上面鉄筋が降伏した荷重までを荷重制御で行い、それ以降は、フーチングの上面鉄筋が降伏した水平変位13mmを基準変位 δ_0 とし

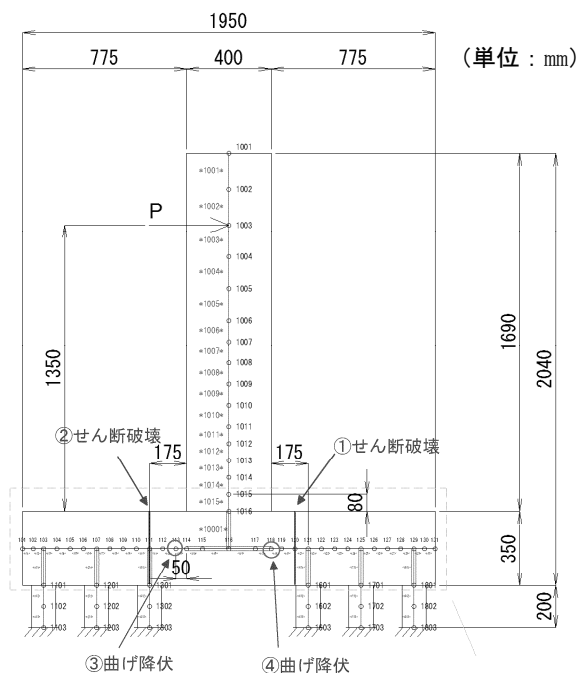


図-5 プッシュオーバー解析モデル（試験体）

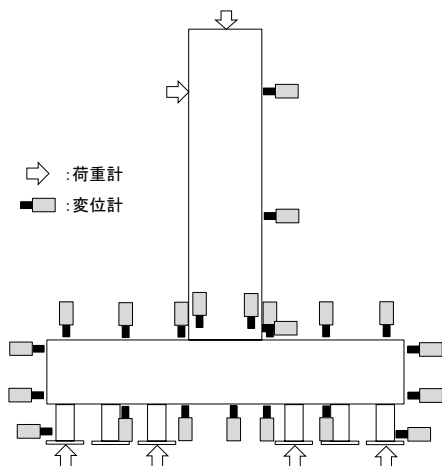


図-7 荷重及び変位計測箇所

変位制御で載荷した。また、荷重制御時の荷重増加ステップは50kN、変位制御時の変位増加ステップは水平荷重の大きな低下が見られるまでは $0.5\delta_0$ とし、その後は $1.0\delta_0$ として載荷を行った。なお、各ステップに達する毎に除荷を行うこととした。

(5) 計測箇所

計測項目は、載荷点の荷重、柱、フーチング、杭の変位及び鉄筋ひずみなどとした。荷重及び変位の計測箇所を図-7に、杭の荷重及び鉄筋ひずみ計測位置と杭のロードセル設置箇所を図-8に示す。

荷重は、鉛直荷重としたPC鋼棒の導入軸力、水平ジャッキの水平力に加え、多列杭における杭反力の分布状況を確認するため、44本の杭のうち、水平載荷方向の柱直下の杭列のうちの4本の杭において、杭反力を計測するため反力床との杭下端の間にロードセルを設置した。

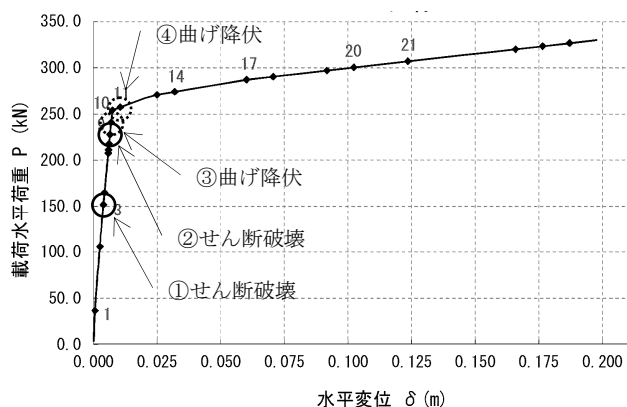


図-6 プッシュオーバー解析結果における荷重－変位関係

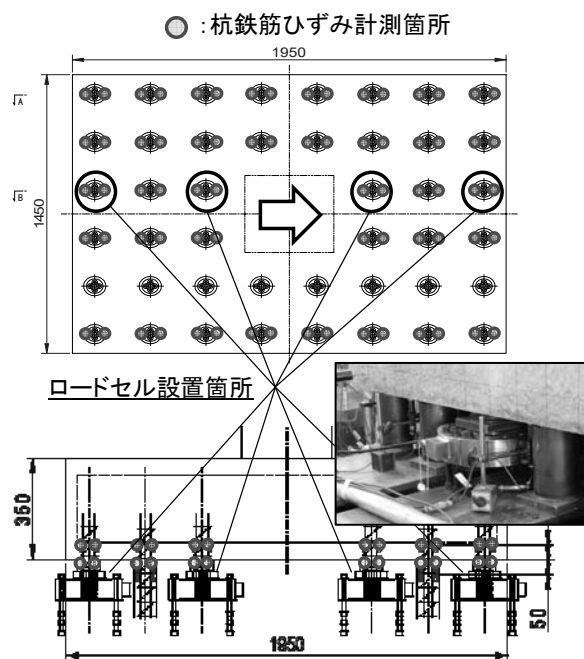


図-8 杭の荷重及び鉄筋ひずみ計測位置と杭のロードセル設置箇所

3. 実験結果

(1) 荷重－変位関係及び損傷過程

フーチング上面のひび割れ進展模式図を図-9に、水平荷重－水平変位関係を図-10に示し、試験体の主な載荷ステップにおける損傷過程を以下に示す。

- 1) 水平荷重130kNでフーチング上面の載荷側柱フーチング接合部隅角近傍よりひび割れが斜め方向に発生した。
- 2) 水平荷重250kNまでの間に、斜め方向のひび割れが進展し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新たなひび割れが放射状に発生した。
- 3) 水平荷重250kNでフーチング上面鉄筋が降伏ひずみ近傍（ $1,800\mu$ ）に達したため基準変位（1

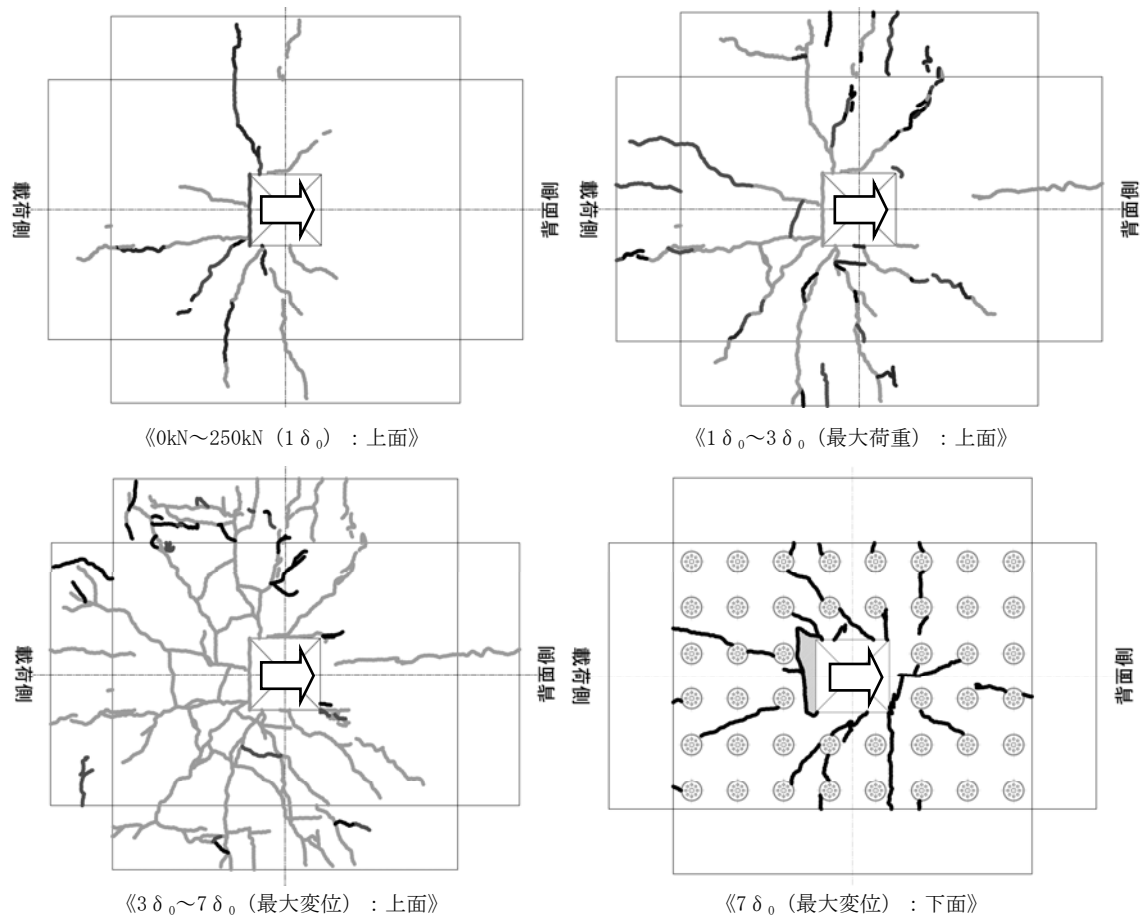


図-9 フーチングのひび割れ進展状況図

δ_0 =水平変位13mm)と定義した。

- 4) 2 δ_0 (水平荷重329kN) でフーチング下面鉄筋が降伏し, 2.5 δ_0 (水平荷重347kN) でせん断補強鉄筋の降伏が生じた。
- 5) 3 δ_0 (水平荷重349kN) で最大荷重に達した後, 徐々に荷重の低下が見られた。
- 6) 7 δ_0 までの間, 進展した放射状のひび割れをつなぐひび割れが発生し, 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) 7 δ_0 (水平荷重220kN) で, 最大荷重の6割程度まで荷重が低下したため, 載荷を終了した。最終的なひび割れの発生状況としては, フーチング載荷側に多くのひび割れが発生し, 柱押し込み側でのひび割れは少なかった。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の放射状のひび割れが確認された。

図-10に, 試験体におけるフーチングの設計上のせん断耐力および曲げ耐力を示す。設計上のせん断耐力は, 上面引張り側で151kN, 下面引張り側で227kNであったが, 実験では載荷終了までせん断破壊を示すような載荷荷重の急落を伴う損傷は見られず, じん性的な損傷形態を示した。

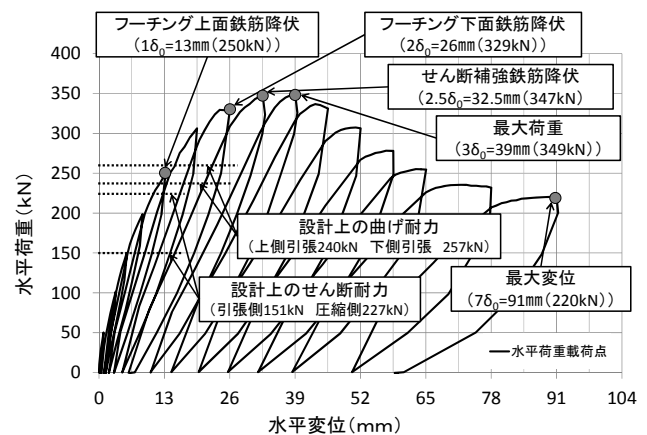


図-10 水平荷重－水平変位関係

(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状況を確認するために, 載荷終了後に試験体を切断した。図-11に, フーチング切断位置及びフーチングの内部ひび割れを示す。

切断面bに確認された損傷状況より, フーチング下面の柱フーチング接合部から発生したひび割れが引張り側のフーチング上面に向かって斜め方向に進展し, フーチングの上下主鉄筋の間を貫き, フーチング側面まで達していることが分かる。また, このひび割れは切断面a, 切断面cにも同様に見られた。

図-12に、 $3\delta_0$ （水平荷重最大時）における杭（杭フーチング接合部近傍）の鉄筋ひずみの発生状況（圧縮・引張）を示す。引張り側では引張り力により引張ひずみが面的に生じていることが分かる。ただし、最外縁の杭においては、圧縮ひずみが生じているものも見られた。

これらのことから、フーチング内部ひび割れは、水平荷重の載荷による柱と杭の引張力がフーチングに作用することにより発生し、フーチングの抵抗面積としては多列杭により多点支持となっている効果もあり奥行方向を含めた面的広がりを持っているものと考えられる。

4. まとめ

多列杭を有するフーチングの単調載荷実験結果から得られた知見を以下に示す。

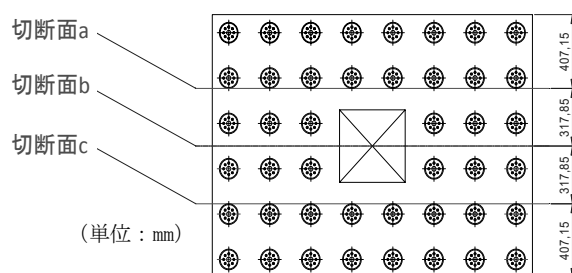
- (1) 試験体の設計上のせん断耐力は、上面引張り側で151kN、下面引張り側で227kNであったが、実験では載荷終了までせん断破壊を示すような載荷荷重の急落を伴う損傷は見られず、じん性的な損傷形態を示した。
- (2) フーチング下面の柱フーチング接合部から発生し引張側のフーチング上面に向かう水平方向のひび割れによる損傷が荷重低下に対し支配的であり、この損傷は柱と杭による引張力がフーチングに作用したことにより発生したと考えられる。また、このひび割れは鉄筋量の少ないフーチングの上下主鉄筋の間への進展が見られた。

本実験結果を踏まえ、多列杭を有するフーチングの抵抗メカニズムを明らかにするため、引き続き検討が必要である。

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る。

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－，1997。
- 2) 幸左賢二，安藤高士，白戸真大，水田和之：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
- 3) 白戸真大，川本篤志，福井次郎，幸左賢二：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



(a) 切断面a



(b) 切断面b



(c) 切断面c

図-11 フーチング切断位置及び内部ひび割れ状況

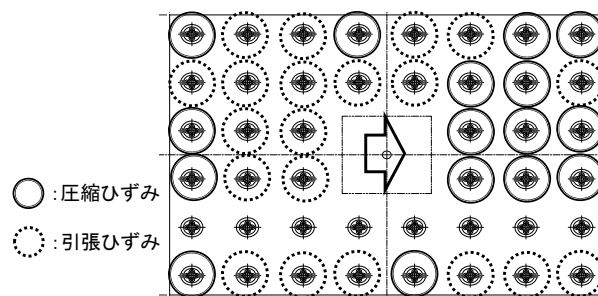


図-12 杭の鉄筋ひずみ発生状況（ $3\delta_0$ 時）

式，構造工学論文集，Vol.48A.pp. 1211-1220，2002.3

- 4) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3.
- 5) 幸左賢二，小林和夫，藤井康男，水田崇志：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) 幸左賢二，藤井康男，水田崇志，森田修二：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