

地震時のフーチング挙動に関する検討

幸左賢二¹・藤井康男²・水田和之³・森田修二⁴

¹正会員 Ph. D. 九州工業大学 建設社会工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 阪神高速道路公団工務部 (〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

³正会員 新構造技術大阪支店 (〒541 大阪市中央区南本町4-5-7)

⁴正会員 奥村組 (株) (〒545 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

1. まえがき

兵庫県南部地震においては杭基礎フーチングの損傷が数基報告されている。これら被害フーチングの特徴としてはせん断スパン比 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) が小さく、また主なひび割れが上面に集中しており、通常の曲げやせん断損傷とは異なる損傷形態であった。そこで、過年度上記の損傷フーチングを対象として、1/2スケールの橋脚・フーチング・杭を一体化した試験体により損傷メカニズムを推定した。その結果、主として損傷はフーチング上面で生じるとともに、じん性に富んだ損傷形態であることが明らかとなった¹⁾。また、損傷は設計上考慮していない柱・フーチング接合部における応力集中が主原因と考えられることから、接合部の設計法を十分考慮する必要がある。しかしながら、この損傷形態が一般の a/d が1前後のフーチングでも支配的であるか、また抵抗に対する上面鉄筋の役割などについては不明確である。そこで、損傷形態の支配的要因と考えられるせん断スパン比およびフーチング鉄筋量をパラメータとした、単調載荷試験および有限要素法を用いた3次元応力変形解析により、地震時の終局挙動を評価した。

2. 実験概要

(1) 試験体諸元と材料特性

試験体はフーチングにCランク損傷が生じた橋梁をモデルとし、橋脚・杭・フーチングを一体とした1/3スケールとした。以下に具体的な構造諸元の決定手法を述べる。

①プロトタイプ橋脚の柱形状は直径1.8mの円形であったが、損傷発生方向を明確にするために、断面幅を同一とした矩形形状(0.55x0.55m)とし、基部付近で損傷を生じさせないように設計モーメントの2.5倍となるようにD22鉄筋を28本配筋した。

②フーチングの材料強度は、コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ (平均実圧縮強度No. 1: 258 kgf/cm^2 , No. 2: 262 kgf/cm^2 , No. 3: 264 kgf/cm^2)とし、鉄筋はSD345(D10実降伏強度: 3750 kgf/cm^2 , D13実降伏強度: 3500 kgf/cm^2 , D25実降伏強度: 3600 kgf/cm^2)を用いた。

③フーチングの形状は、全高、有効高を同一とし、 a/d を0.75, 1.0と変化させた。フーチングの下側主鉄筋量は、柱基部に生じる抵抗モーメントに対して許容応力度($\sigma_{sa}=3000\text{kgf/cm}^2$)以内となるように設計した。その結果、下側鉄筋量は、試験体No. 1がD13@12cm, 試験体No. 2がD13@10cmとなる。また、上面鉄筋量は、道路橋示方書の配筋細目に基づいて下面鉄筋量の1/3を配筋した。なお、No. 3試験は鉄筋の補強効果を評価するために、No. 1試験体から上下面鉄筋量を1.5倍に増加した。

表-1 構造緒元一覧表

		供試体No. 1	供試体No. 2	供試体No. 3
柱	柱 高	2, 200 mm		
	水平荷重作用高	2, 000 mm		
	柱 断 面	550 mm × 550 mm		
	柱鉄筋量	28本 × D22 ($A_s=108.388\text{cm}^2$)		
フーチング	a/d	0.75	1.00	0.75
	全 幅	1, 830 mm	2, 030 mm	1, 830 mm
	全 高	450 mm		
	有効高	390 mm		
	鉄筋			
杭	上 面	D10 ctc 240	D10 ctc 200	D10 ctc 154
	下 面	D13 ctc 120	D13 ctc 100	D13 ctc 77
杭	杭 径	$\phi 340$		
	杭 間 隔	1, 150 mm	1, 350 mm	1, 150 mm
	杭鉄筋量	10本 × D25 ($A_s=50.67\text{cm}^2$)		
使用材料	コンクリート	設計基準強度 = 270 kgf/cm^2		
	フーチング、杭	" = 240 kgf/cm^2		
	鉄 筋	SD345		

④杭体の設計は、杭先行型破壊を避けるために、柱終局荷重作用時に鉄筋応力度が $1000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度となるように設計した。また、杭体に過度の変形と破壊が生じないように、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 5cm の離隔を設けた。

以上により決定した試験体の構造諸元一覧表を表-1に示す。

(2) 試験手法

図-1に試験体載荷概要図を示す。図-1に示すように、試験体の杭下端をH鋼に固定し、そのH鋼と試験体ベッドをPC鋼棒により緊張し固定した。載荷荷重は、上部工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、上部工死荷重相当力($16\text{kgf}/\text{cm}^2$)を柱天端に一定荷重として載荷した。なお、鉛直ジャッキは水平変形に追従し、柱水平変位に対して常に鉛直方向を保つようにした。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、 2.0m の位置に単調載荷し、フーチング上面鉄筋が降伏した荷重(No. 1: 25.0tf , No. 2: 34.5tf , No. 3: 34.9tf)までは荷重制御で行い、それ以降は測定したフーチング上面鉄筋降伏時の変位を降伏変位(δy)とした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 5tf 、変位制御時の変位増加ステップは $0.5\delta y$ きざみとした。測定項目は、載荷点変位、柱の水平変位の高さ方向分布、フーチングの水平および鉛直変位、フーチング上面および下面の鉄筋ひずみなどである。図-2に変位計の配置を示す。

3. 実験結果および考察

(1) No. 1試験体

図-3にひび割れ進展状況模式図を示すとともに、図-4に最大載荷荷重 27.9tf における損傷状況を示す。試験体の主な荷重ステップにおける損傷状況を以下に示す。

①荷重 22tf 、柱天端変位 22mm でフーチング上面に、柱中央から側面方向と加力点方向に向かうひび割れを確認した(図-3のひび割れ①、②)。

②荷重 25tf でフーチング上面載荷軸方向鉄筋が、加力点側の柱付け根位置で降伏ひずみ近傍(1700μ)に達したので、この段階を便宜的に橋脚・フーチング全体系としての降伏と定義した。また、ほぼ同時に、フーチング下面鉄筋(載荷直角方向鉄筋)が降伏ひずみ近傍(1700μ)に達した。

③荷重 27.9tf 、変位 38.0mm で最大荷重に達するとともに、フーチング上面で柱隅角部からフーチング隅角

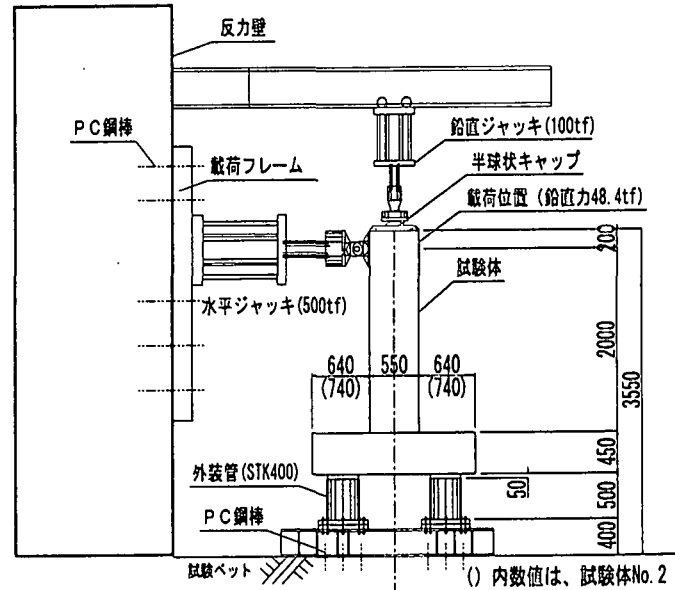


図-1 試験体載荷概要

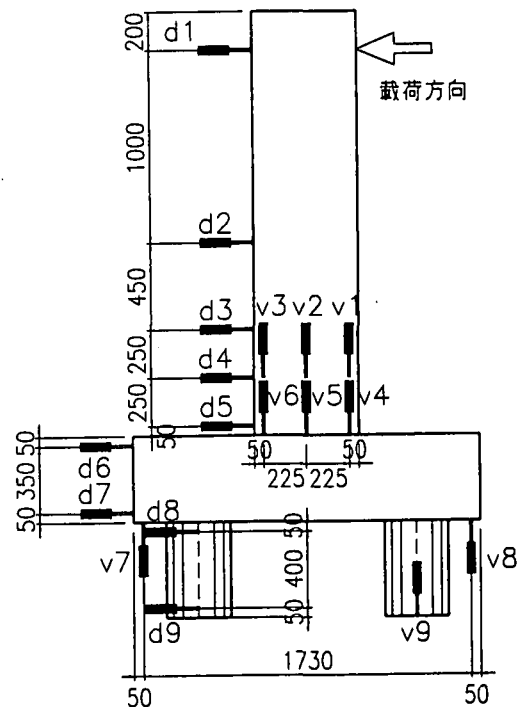


図-2 変位計の配置

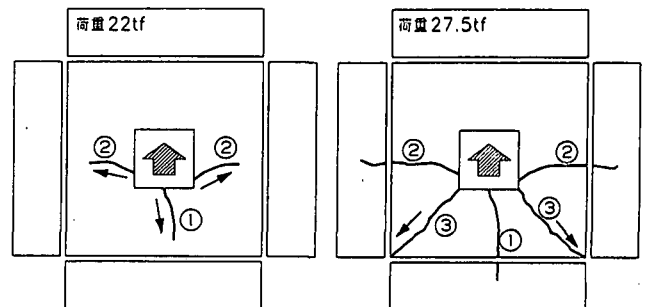


図-3 ひび割れ進展状況模式図(No. 1)

部（45°）方向に向かうひび割れが発生した（図-3のひび割れ③）。

④変位 $2\delta_y$ でひび割れ（図-3のひび割れ③）が進展し、フーチング隅角部に達するとともに、フーチング隅角部近傍で段差が生じた。

⑤変位 $7.5\delta_y$ で荷重14.6tf(0.5Pmax)に低下するとともに、鉛直ジャッキの柱天端回転変形追従能力が限界に達したため、実験を終了した。最終状態では、フーチング上面の加力点側のコンクリートが完全に浮き上がり、柱隅角部とフーチング隅角部を結んだ三角錘形状の破壊面が確認された。

（2）No. 2試験体

図-5にひび割れ進展模式図、図-6に損傷状況図を示す。試験体の主な荷重ステップにおける損傷状況を以下に示す。

①荷重25tfでフーチング上面に、柱隅角部からフーチングコーナーに向かうひび割れと柱中央から反対側に向かうひび割れを確認した（図-5のひび割れ①、②）。

②荷重34.5tf、変位20.5mmで載荷側柱付け根付近のフーチング上面鉄筋が降伏ひずみに達した。

③変位41.2mmで最大荷重37.8tfに達した。

④変位69mmで荷重が30tfから10tfに急減するとともに、フーチング前面の側面ひび割れがフーチング上面に進展した（図-5のひび割れ③）。

⑤変位150mmで実験を終了した。破壊形態は図-6に示すような柱前面と押し込み杭を結ぶ面が、前面に押し出される形の押し抜きタイプの損傷であった。

（3）No. 3試験体

図-7にひび割れ進展模式図を示すとともに、試験体の主な荷重ステップにおける損傷状況を以下に示す。

①荷重30tfで柱側面の中央から、フーチングコーナーに向かうひび割れを確認した（図-7のひび割れ①）。

②荷重35tf、変位25.4mmで、フーチング上面載荷軸方向鉄筋が、載荷側柱付け根付近で降伏ひずみに達した。

③変位40mmで最大荷重37.4tfに達するとともに、柱隅角部からフーチングコーナーに向かうひび割れを確認した（図-7のひび割れ③）

④荷重17.4tf、変位160mmで実験を終了した。最終破壊形態としては、No. 1試験体と同様にフーチング上面の載荷側のコンクリートが完全に浮き上がり、柱隅角部とフーチングコーナーを結んだ破壊面が確認された。

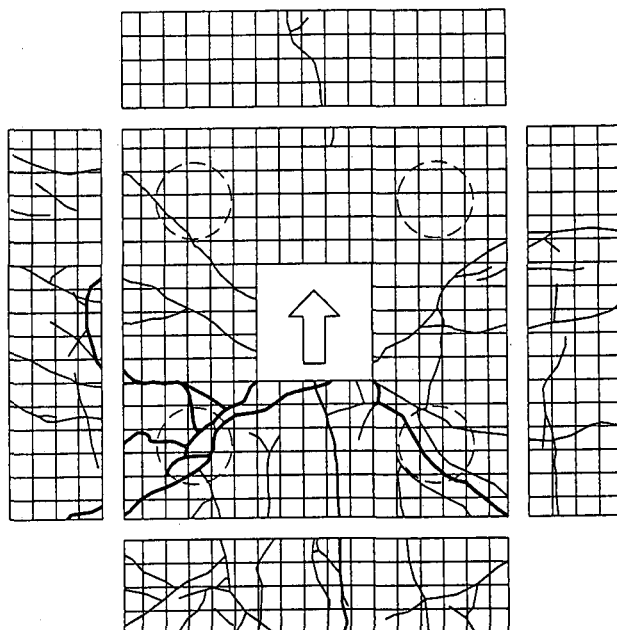


図-4 損傷状況図 (No. 1)

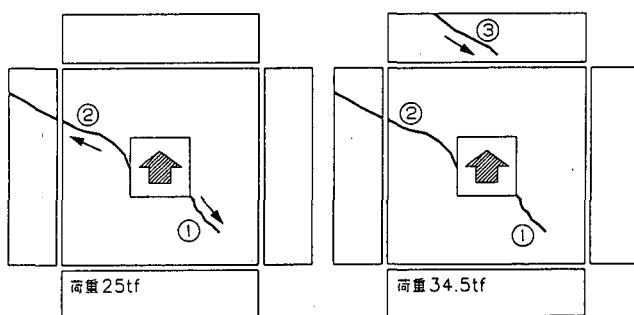


図-5 ひび割れ進展状況模式図 (No. 2)

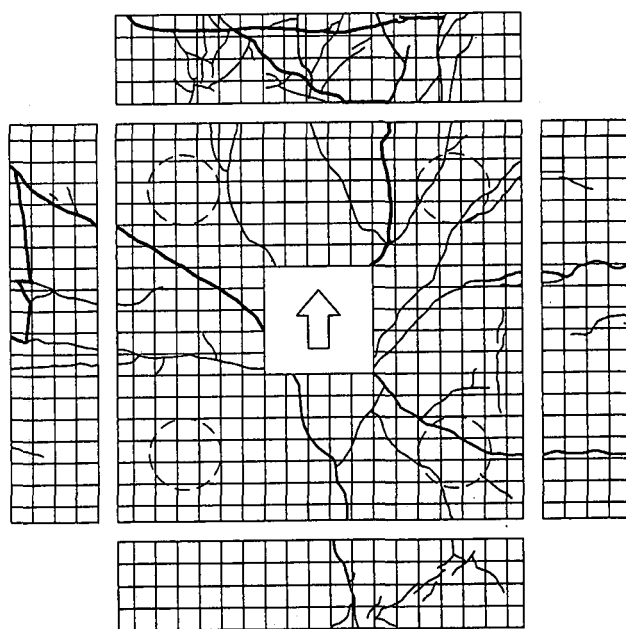


図-6 損傷状況図 (No. 2)

(4) 損傷形態に対する考察

今回の試験体の損傷状況は以下の2つの損傷形態に分類される。

a) 接合部損傷からコーン状破壊

試験体No. 1, 3および過年度実験の a/d が0.37から0.75までに認められる損傷形態である。最大荷重まではフーチング上面の柱載荷側前面および側面のひび割れが進展してゆき、最終的にはフーチングの載荷側がコーン状の破壊を起こす。この場合、荷重-変位曲線は滑らかな下降曲線を示す。特徴を以下に列記し、損傷モードを図-8に示す。

①鉄筋降伏時：接合部損傷

フーチング上面の柱載荷側前面が降伏する。

②最大荷重時：接合部損傷

フーチング上面鉄筋降伏領域が拡大するとともに、損傷がフーチング上面全域に及ぶ。

③最終破壊：コーン状破壊

接合部がフーチングと分離し、コーン状の引き抜き破壊を生じる。

b) 接合部損傷から押し抜き破壊

接合部No. 2の a/d が1.0の場合に認められる損傷形態である。最大荷重までは、前者と同様であるが、最終的には柱と押し込み側杭の間の圧縮力によって、柱基部載荷側背面がフーチング内にめり込むことによって押し抜きせん断損傷パターンとなる。この場合、荷重-変位曲線は急激な下降曲線を示す。特徴を以下に示し、損傷モードを図-9に示す。

①鉄筋降伏時：接合部損傷

フーチング上面の柱載荷側前面が降伏する。

②最大荷重時：接合部損傷

フーチング上面鉄筋降伏領域が拡大するとともに、損傷がフーチング上面全域に及ぶ。また、柱フーチング接合部と押し込み側杭との圧縮領域でのコンクリートの抵抗が最大となる。

③最終破壊：押し抜き破壊

柱フーチング接合部と押し込み側杭との圧縮領域のコンクリート抵抗面に押し抜き破壊を形成する。

以上のことから、いずれも最大荷重を決定する損傷は上面鉄筋の降伏および上面のひび割れ抵抗である。その後、 a/d が小さい場合は、柱背面の圧縮側の抵抗が大きく柱前面のコーン状の引き抜き破壊が、 a/d が1程度の場合は柱背面の圧縮側の押し抜きせん断破壊が支配的となる。また、No. 1とNo. 3を比較すると、上面鉄筋の増加によって鉄筋降伏および最大荷重が3割程度増加しており、接合部のひび割れに対しては上面鉄筋が有効であることが分かる。

4. 解析的検討

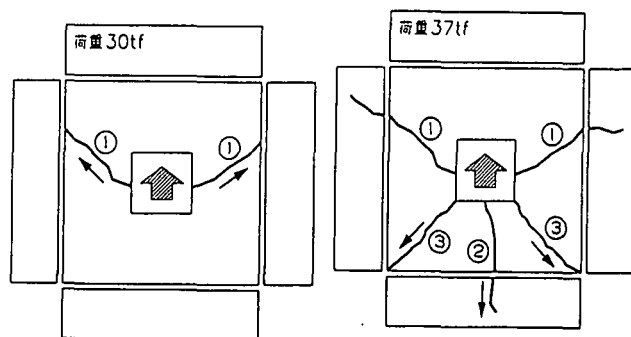


図-7 ひび割れ進展状況模式図 (No. 3)

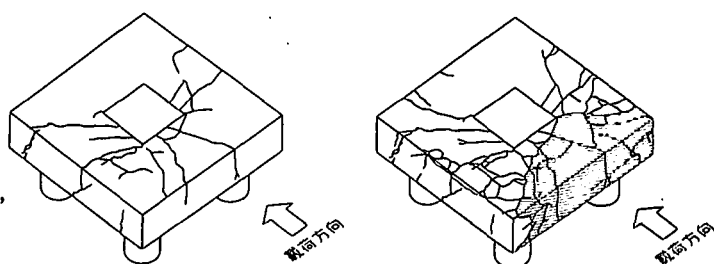


図-8 損傷状況 (No. 1, 3)

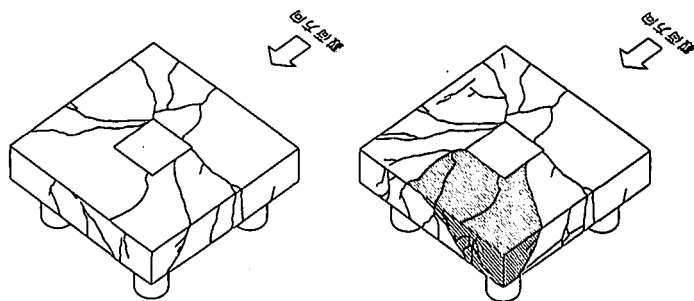


図-9 損傷状況 (No. 2)

表-2 コンクリートの物性値

供試体 番号	部材	引張り強度 σ_t (kgf/cm ²)	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	圧縮強度ひずみ ϵ_{cmax} (μ)	弾性係数E (kgf/cm ²)
①	柱	21.5	286	2072	1.38×10^5
	フーチング・杭	16.7	258	2031	1.27×10^5
②	柱	21.5	290	2109	1.38×10^5
	フーチング・杭	16.7	262	2071	1.27×10^5
③	柱	21.1	288	2079	1.39×10^5
	フーチング・杭	16.5	264	2050	1.29×10^5

(1) 解析モデル

解析手法には有限要素法を用いた静的な3次元応力変形解析を用いたが、実験模型がXY面に関して対称なので半分の領域を解析の対象とした。また、鉄筋については配筋の位置をほぼ実物に対応させてモデル化を行い、コンクリートにはソリッド要素、鉄筋にはトラス要素を用いており、剛性については土木学会コンクリート標準示方書にしたがいコンクリートはby-linearの非線形弾性のモデル、鉄筋はtri-linearのモデルを用いた。解析に用いたコンクリートの物性値を表-2に示す。圧縮強度と引張り強度は強度試験のデータから設定したが、弾性係数は圧縮強度近傍での非線形性を考慮するために、圧縮強度時のひずみ ϵ_{cmax} を実験式(1)を用いて圧縮強度

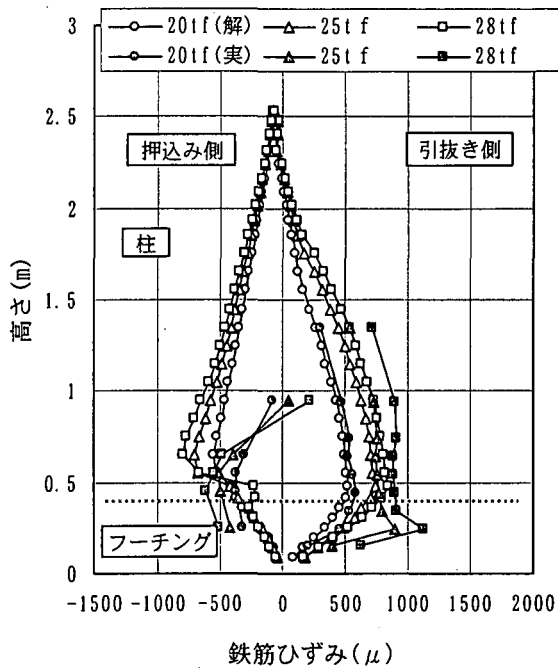


図-11 柱軸鉄筋のひずみ (No. 1試験体)

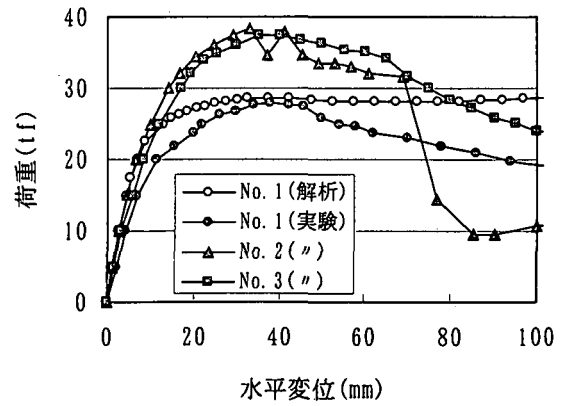


図-10 柱天端の水平変位

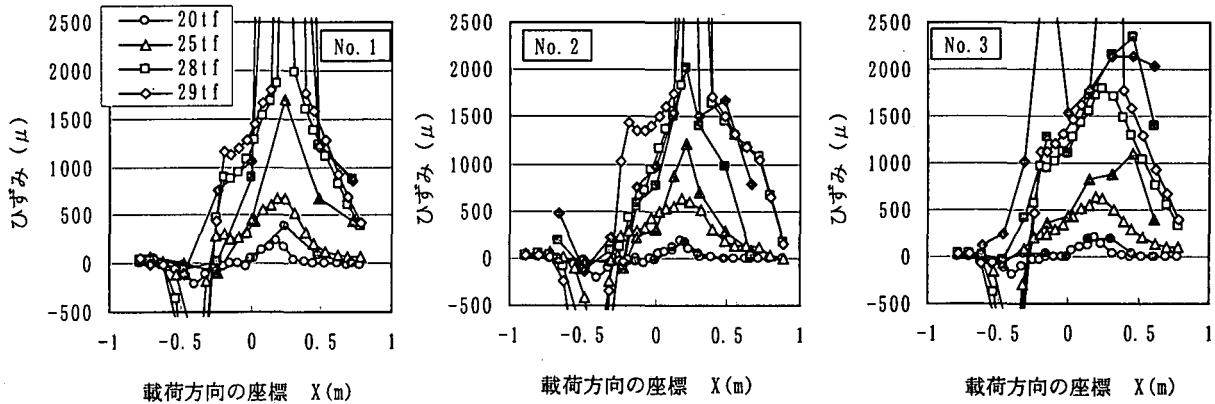
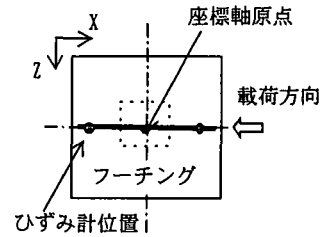


図-12 フーチング上面鉄筋のひずみ

σ_c から求め、式(2)から割線弾性係数を設定した。

$$\varepsilon_{\max} = (1.37 \times \sigma_c + 1690) \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$E = \sigma_c / \varepsilon_{\max} \quad (2)$$

なお、強度を超えた要素については、その剛性を解析に影響を与えずに無視できる程度に低減させた。また、鉄筋は部材によって材料は異なるが、引張り試験の結果に大差が見られないことから、降伏点強度を35(kgf/mm²)、引張り強度を50(kgf/mm²)、降伏ひずみを1640(μ)、弾性係数を2.0×10⁴(kgf/mm²)で全て同一の値を用いた。なお、tri-linearモデルの第1折点を降伏点強度、第2折点を引張り強度でコンクリートと同様に段階的に剛性を低減させた。

(2) 解析結果

a) 柱の水平変位

図-10に柱天端(計測点d1)の水平変位を示した。白抜きが解析結果、黒塗りが実験結果である。実験結果から、供試体No. 1の耐力(最大荷重)は約28tf、No. 2は約38tf、No. 3は約37tfである。No. 2は最大荷

重以後、急激に耐力が低下しており、せん断スパン比の大きさによる影響と推測される。No. 3の耐力の増加は鉄筋量の増加によるものと考えられる。一方、解析では供試体による耐力の変化が見られず、最大荷重以後の耐力低下が現れていない。解析ではコンクリートのひずみ軟化を考慮していないため、コンクリートの降伏後の剛性を相対的に大きく評価しており、鉄筋量の増加による耐力の増加が的確には評価できていないと考えられる。しかし、荷重制御から変位制御の段階に移行して、柱の変位が大きく進む点は解析でもよく再現できており、構造体としての挙動は評価できていると考えられる。

b) 柱軸鉄筋のひずみ

図-11には柱の軸方向に配筋した鉄筋で、引抜き側(荷重側)と押し抜き側の中央断面にある鉄筋の軸ひずみを示した。ここでは、供試体No. 1のみの結果を示す。荷重は20tfと25tf(フーチング上面鉄筋の降伏時)、28tf(最大荷重時)における結果で

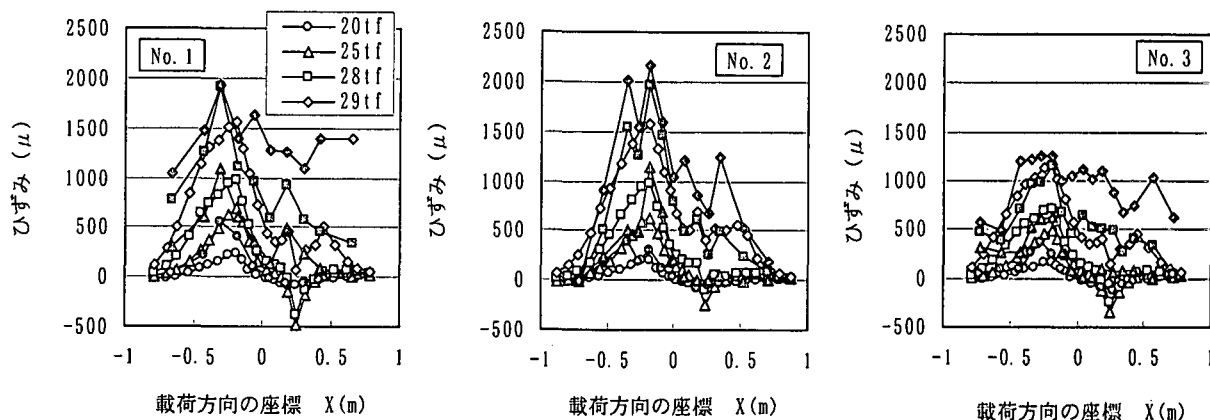


図-13 フーチング下面鉄筋のひずみ

ある。横軸がひずみ、縦軸が高さでフーチング下面からの高さを表している。高さが0.45mの位置が柱とフーチングの境界にあたる。実験と解析を比較すると、押込み側でやや異なる部分も見られるが、柱とフーチングの接合部でひずみがピーク値を示すなどよく一致している。一方、供試体No. 2やNo. 3では、実験結果は耐力の増加とともに引抜き側の鉄筋にさらに大きなひずみが生じるが、解析では耐力に変化がなくひずみの増加も見られなかった。

c) フーチング上面の鉄筋ひずみ

図-12にはフーチング上面の中央で水平载荷軸方向に配筋された鉄筋のひずみを示した。解析結果は荷重が20tf, 25tf, 28tf(最大荷重), 29tf(終局)におけるひずみを示したが、実験結果は供試体ごとに構造体としての挙動が解析と対応すると思われる荷重段階のひずみを示した。実験と解析を比較すると、解析の方がひずみが小さいが、引抜き側の柱の外縁部に大きなひずみが生じる点は一致している。特に、最大荷重では非常に大きなひずみが生じている。一方、実験とは異なり、解析では押込み側に大きな圧縮ひずみが生じている。この原因は明らかではないが、柱とフーチング接合部の柱の水平変位は解析の方が小さくなっており、フーチング上面の鉄筋が柱の水平変位をより拘束するために鉄筋に大きなひずみが発生していると推測される。フーチングの鉄筋量は供試体No. 1に比べて、No. 2は約1.2倍、No. 3は約1.5倍と増加してしているので、供試体No. 2やNo. 3の方がややひずみが小さくなる傾向が見られるが、鉄筋による荷重分担は増加していると考えられる。

d) フーチング下面の鉄筋ひずみ

図-13には、フーチング下面の中央で水平载荷軸方向に配筋された鉄筋のひずみを示した。荷重は上面と同じである。下面では押込み側の柱の外縁部に大きなひずみが生じているが、上面のような極端に大きいひずみには達していない。この傾向は、実験と解析ともに窺える。この結果から、フーチング下

面鉄筋の降伏よりも早い段階で構造体として終局に達していると推測される。

5. まとめ

フーチング損傷形態の支配的要因と考えられるせん断スパン比および鉄筋量をパラメータとした、3体の橋脚・杭・フーチングを一体系とした単調载荷試験により得られた主な結果を以下にまとめる。

- ①No. 1試験体 ($a/d: 0.75$, H2道示鉄筋量)は荷重22tfで柱フーチング接合部に発生したひび割れが、フーチング上面から側面に進展した。ついで、荷重27.9tf, 変位38.0mmで最大荷重に達したが、ひび割れが三方向に貫通するとともに、上面鉄筋もほぼ全面に渡って降伏ひずみに達した。その後、接合部がフーチングと分離し、コーン状の引き抜き破壊が生じた。
- ②No. 2試験体 ($a/d: 1.0$, H2道示鉄筋量)は最大荷重37.8tf, 変位41mmまではNo. 1試験体と同様の挙動を示した。その後、柱フーチング接合部と押し込み側杭との圧縮領域のコンクリート抵抗面に押し抜き破壊を生じた。
- ③No. 3試験体 ($a/d: 1.0$, H2道示の1.5倍の鉄筋量)は、ほぼNo. 1試験体と同様の挙動を示したが、最大荷重は37.4tfとNo. 1試験体の1.3倍の値を示した。このように、上面鉄筋は接合部のひび割れ制御に対して有効であると考えられる。
- ④今回の実験結果からは、フーチングの最大荷重を支配する損傷形態としては、 a/d のいずれの範囲においても接合部の損傷が支配的であると考えられる。
- ⑤有限要素法を用いた3次元応力変形解析を実施したが、ひずみの相対的な分布状況は実験と解析で一致している部分は多く、解析によっても構造体の挙動がある程度評価できることがわかった。

参考文献:

- 1) 幸左・小林・藤井・水田, フーチングの地震時終局挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, 1999. 3.