

弾塑性FEM解析によるフーチングの耐震設計に関する検討

安藤高士¹・幸左賢二²・足立幸郎³・白戸真大⁴

¹正会員 九州工業大学大学院 工学部設計生産工学科 (〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水 1-1)

²正会員 Ph.D. 九州工業大学建設社会工学科助教授（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水 1-1）

³正会員 阪神高速道路公団工務部 (〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

⁴正会員 独立行政法人土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

フーチングにおける設計上の問題のひとつとして、杭および橋脚の接合部で形状が複雑であることから終局状態の想定が困難で世界的にも未だ終局状態設計手法が確立されていないことがあげられる。例えば、1995年に発生した兵庫県南部地震による被害としては、橋脚と比較するとフーチングの損傷は比較的軽微であったが、その損傷の特徴としてはせん断スパン比が小さく、上面にひびわれが集中していたことが挙げられ、通常の曲げやせん断損傷とは異なる損傷形態であったことが報告されている。

杭基礎フーチングは、地震時に橋脚に生じる水平力の作用により、図-1のように下面引張になる側と上面引張になる側が存在する。このうち下面引張になる側については、これまでに数多くの研究がなされるようになった^{1) 2)}。一方、地震による損傷が見られた上面引張となる側では、柱および杭からの引張力の作用に対して設計することになるが、そのような引張荷重状態を想定した載荷実験が行われた事例^{3) 4)}はほとんどなく、その耐力機構は明らかになっていない。また、現在の耐震設計法では、大地震に対応した終局状態設計法の確立が求められるようになり、道路橋示方書では作用水平震度が従来の0.2から0.4と2倍に設定されたが、フーチング抵抗側では変形を期待しない従来通りの主鉄筋降伏を終局とした設計としている。その結果、従来問題になっていなかったフーチング上面引張側でのせん断耐力によりフーチング形状が決まる事例が多くなっていることが報告されている⁵⁾。

このような背景から、フーチングのより合理的な設計法を確立するためにも、地震時におけるフーチングの引張作用力に対する破壊メカニズムを十分把握することが必要であると考えられる。そこで、本研究では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地震時挙動再現実験を対象として2次元弾塑性FEM解析を行い、特にフーチン

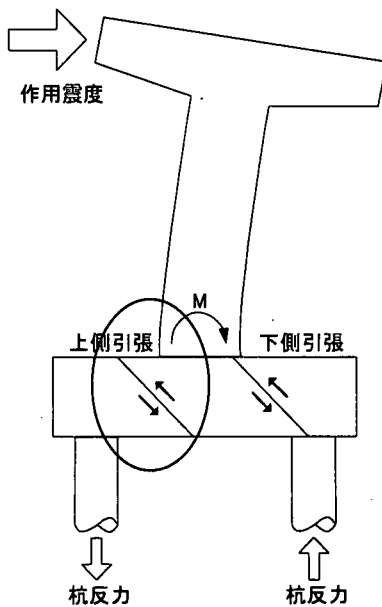


図-1 フーチングの荷重状態

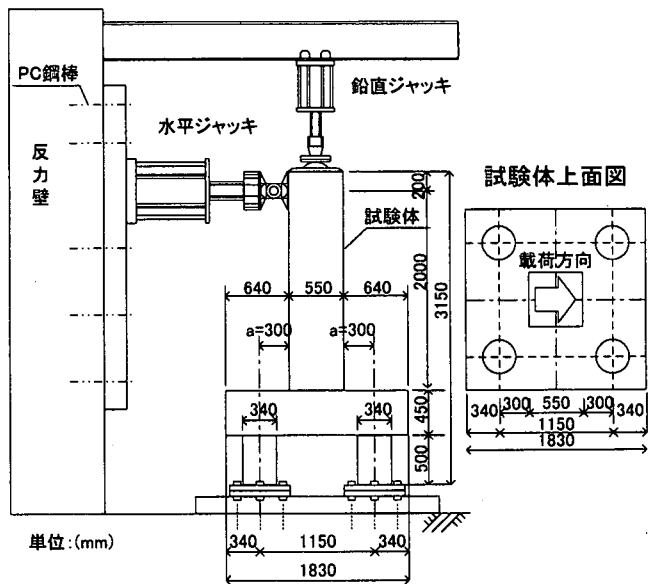


図-2 実験試験体構造図

グ部材に対して上面が引張になる損傷位置に着目した検討を行った。

2. 実験概要

(1) 試験体諸元

試験体は阪神大震災によりCランクの損傷が生じた橋梁を1/3および1/2スケールでモデル化し、橋脚・杭・フーチングを一体とした構造である。図-2に試験体構造図を、表-1に試験体構造諸元一覧を示す。

橋脚形状は円形であったが、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とし、基部付近で損傷を生じさせないために設計モーメントの2.5倍の耐力となるように配筋している。フーチングの形状は、全高・有効高を同一とし、a/dを0.39, 0.75, 1.0と変化した。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以内になるように設計した。なお、No3 試験体は鉄筋の補強効果を評価するために、No1試験体から上下面鉄筋量を1.5倍に増加させている。

(2) 実験方法

図-2に示すように、試験体の杭下端をH鋼により固定し、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（上部工死荷重相当力 1.6N/mm^2 ）を柱天端に一定荷重として載荷した状態で、地震力に相当する水平荷重を載荷する2軸載荷とした。なお、鉛直ジャッキは水平変位に追従し、柱水平変位に対して常に鉛直方向を保つようにしている。

(3) 損傷形態

a) フーチング上面損傷状況

各試験体において支配的な損傷は引抜側フーチング上面に認められた。図-3にフーチング上面におけるひびわれ進展模式図を示す。フーチングの損傷状況としては以下のものであった。

- ①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確認。
- ②フーチング上面載荷軸方向鉄筋が引張側柱付け根位置で降伏ひずみ近傍に達する。ほぼ同時に圧縮側フーチング下面鉄筋が降伏ひずみ近傍に到達。
- ③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部方向に向かうひび割れ発生。
- ④最大荷重以降は、荷重-変位曲線には滑らかな下降曲線が見られ、フーチング上面加力側が浮き上がり柱隅角部とフーチング隅角部を結んだ三角錐形状の破壊面を確認（図-3斜線部）。

b) フーチング断面の損傷状況

No.4試験体のみフーチング引張側断面におけるコアを採取した。図-4にそのコアより確認できた引張断面でのひび割れ状況図を示す。柱および杭の引張作用力によ

表-1 試験体諸元

		No.1	No.2	No.3	No.4	
試験体スケール		1/3			1/2	
柱	柱高さ (mm)	2200			3000	
	水平荷重載荷高 (mm)	2000			2800	
	柱断面 (mm)	550×550			900×900	
フーチング	a/d	0.75	1.00	0.75	0.39	
	全幅 (mm)	1830	2030	1830	2500	
	全高 (mm)	450			750	
	鉄筋比(%)	上面	0.080	0.108	0.120	0.075
		下面	0.266	0.320	0.408	0.144
杭	杭径 (mm)	φ340			φ550	
	杭間隔 (mm)	1150	1350	1150	1400	

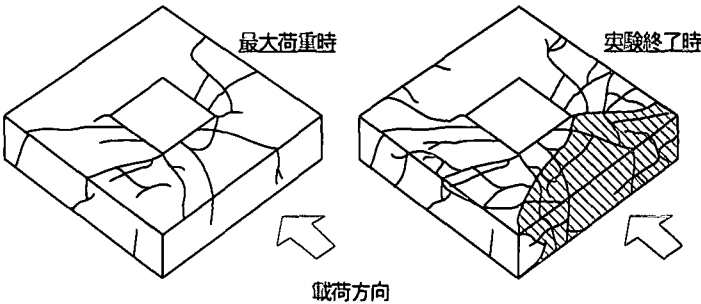


図-3 フーチング上面損傷進展状況

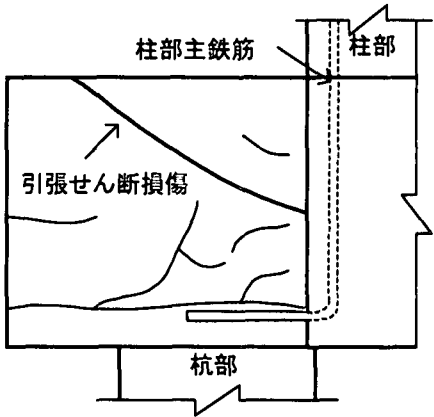


図-4 フーチング断面でのひび割れ状況 (No.4)

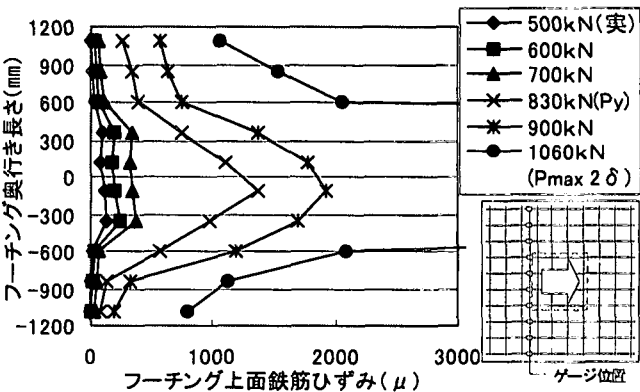


図-5 フーチング上面鉄筋ひずみ分布 (No.4)

る斜め方向のひび割れが確認できた。フーチングの最終的な破壊形態として浮き上がり現象が見られたことから、このひび割れの発生が破壊に対して支配的であると考えられる。

c) フーチング上面鉄筋ひずみ分布

図-5にフーチング上面鉄筋奥行き方向のひずみ分布状況を示す。フーチング主鉄筋の降伏は下面より先に上面に見られた。また、中央位置における主鉄筋が降伏した後、荷重の増加に伴いひずみ分布が幅方向に拡がり応力の再配分が生じていることが分かる。

以上のことから、地震時における最大荷重はフーチングの引張力に対する耐力により決まり、抵抗力としては、上面鉄筋およびコンクリートの斜めひび割れ抵抗力であると考えられる。

3. 解析概要

(1) 解析手法

本解析では解析手法として FEM(有限要素法)による 2 次元静的弾塑性解析を行った。フーチングのように複雑な形状の構造物は、一般的に 3 次元モデルによる解析的検討が適しているが、その評価方法は複雑であると考えられる。一方、2 次元モデルによる解析的検討では、対象試験体の適切なモデル化を行えば、その解析結果を簡易的に評価を行うことができ、また、2 次元モデルで実施されている設計手法に反映する上でも有効な手段であると考えられる。

2 次元解析におけるフーチング部材の 3 次元的な奥行き幅(有効幅)の取り方としては、実験において支配的な損傷はフーチング上面に生じ、図-5に示すような範囲で上面鉄筋が降伏に至っていたので、フーチング部の有効幅を b (柱幅) + d (フーチング有効高) = 940 mm とした⁶⁾。また、柱および杭部は柱幅 550 mm としている。載荷条件としては柱天端に上部工死荷重相当の等分布荷重を載荷した状態で柱上部に変位増分による単調載荷を与え、境界条件として杭下端を完全固定としている。

(2) 材料モデル

解析に用いた要素特性は、コンクリートには平面応力要素、鉄筋には線材要素を使用し、鉄筋とコンクリートは完全付着としている。表-2にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。各材料の破壊基準は、コンクリートの圧縮側では Drucker-Prager の破壊基準を用い、引張側でのひび割れ発生は最大主応力基準を用いた⁷⁾。コンクリートの応力-ひずみモデルを図-6に示す⁷⁾。圧縮上昇域では圧縮強度までを 2 次放物線とし、その後は応力が直線的に減少するモデルを用いた。引張域については、最大引張応力 (f_t) までは直線的に応力が増加すると仮定し、最大引張応力後は軟化特性と破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを用いた。ここで、コンクリートの破壊エネルギー G_F は 0.1 N/mm としている。破壊エネルギーを考慮したモデルを用いる場合、要素の等価長さ (l_{eq}) が必要となるが、本解析では要素の対角線を等

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
柱部	28.028	2.107	1.35×10^4	0.2
フーチング・杭部	25.284	1.637	1.24×10^4	0.2
	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)
鉄筋	2.0×10^5	345	1640	490

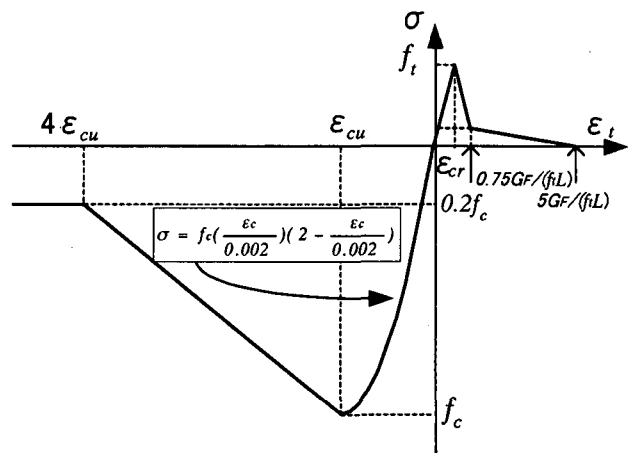


図-6 コンクリートの応力-ひずみ

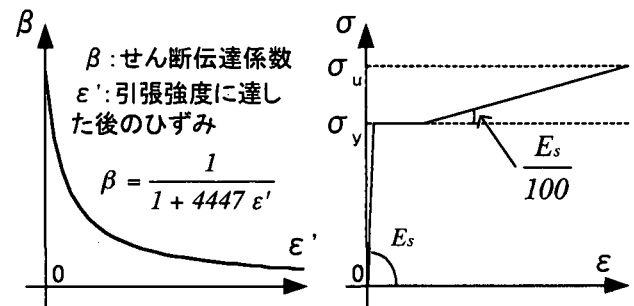


図-7 せん断低減係数

図-8 鉄筋の応力-ひずみ

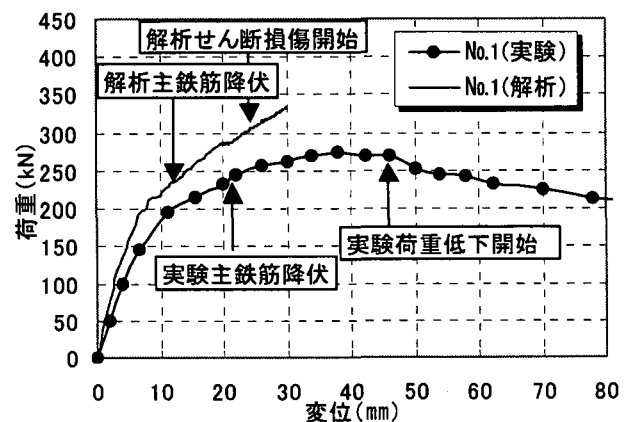


図-9 実験および解析の水平載荷位置荷重-変位関係
 価長さとして用いた。ひび割れ発生後におけるせん断応力の伝達係数とひずみの関係を図-7に示す⁹⁾。このモデルは、最大主ひずみが大きくなるにつれて主ひずみに直角方向のせん断剛性を、せん断伝達係数 (β) を低減させることにより低下させている。また、鉄筋の応力-ひずみモデルとしては、図-8に示すように鉄筋降伏強度に達した後降伏ひずみの 8.5 倍の降伏棚領域を設け、その後はひずみ硬化を考慮したモデルを用いている。

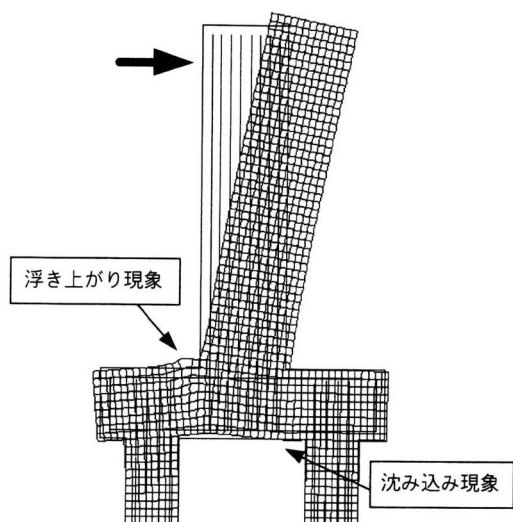


図-10 水平変位 20 mm時の変形図 (変形量 20 倍)

4. 解析結果および考察

実験で引張側の損傷が生じた最大荷重付近までは各試験体とも同様の挙動を示した。そこで、代表例としてNo.1試験体について検討した結果の一部を以下に示す。また、ここでは引張ひずみを正、圧縮ひずみを負で表している。

(1) 水平荷重載荷点での荷重-変位関係 (No.1 試験体)

図-9に水平荷重作用位置における荷重-変位関係を示す。実験では、フーチング上面鉄筋が降伏した後に、水平変位が急増し、 $2\delta y$ 程度変位した後に荷重の低下現象が見られた。解析結果においても、フーチング上面鉄筋が降伏することにより、水平変位の増加が見られたが、実験結果のような大きな増加は見られなかった。また、荷重下降域までの挙動を再現することは出来ていない。この原因としては、2次元モデルにおける杭形状や鉄筋比が非常に少ない構造物であることが挙げられる。

(2) 曲げ損傷に対する検討

a) 作用力の増加に伴うフーチングの変形状況

図-10に解析における水平変位 20 mm時の変形状況を示す。フーチング中央部は荷重の増加に伴い載荷方向に大きく傾くとともに浮き上がりが生じていることが分かる。フーチング上面の鉛直変位はフーチング上面鉄筋降伏以降急激に増加し、浮き上がり範囲は引張側杭端部にまで達していることが分かる。

b) 引張側フーチングにおける最大主ひずみ分布

図-11に水平変位 12 mm時における引張側フーチングでの最大主ひずみ分布コンター図および各要素に発生している最大主ひずみの方向を示す。実験では、図-3に示したように支配的なひび割れはフーチング上面載荷側に生じ、最終的には引張側で引抜破壊を生じた。解析においても載荷側のフーチング上面に大きな最大主ひずみがフーチングを左右に広げる方向に発生していること

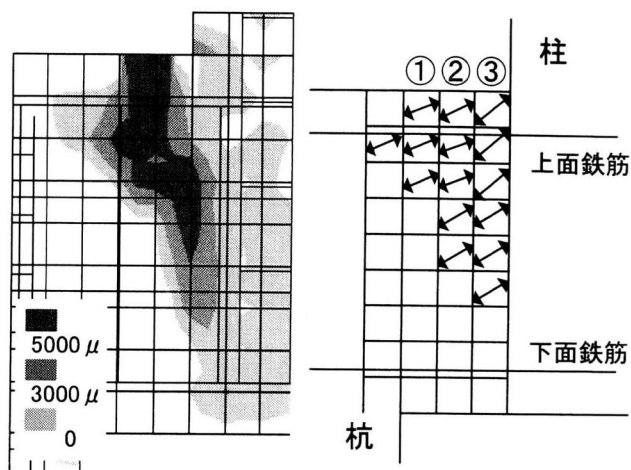


図-11 引張側フーチング最大主ひずみ分布 (変位 12 mm時)

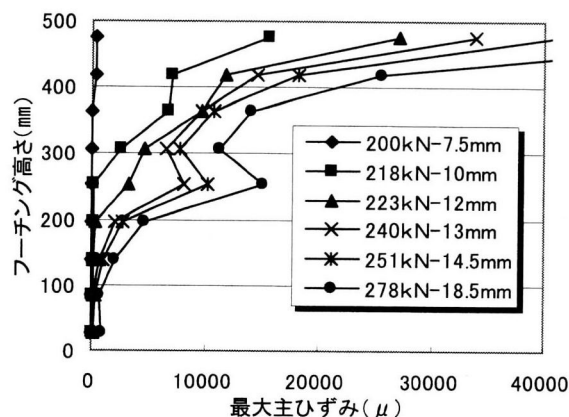


図-12 引張側フーチング②断面における最大主ひずみ分布

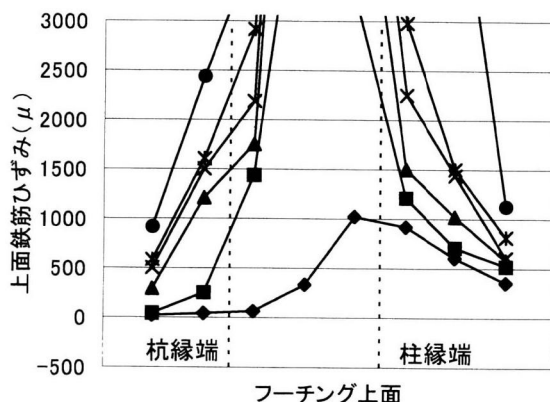


図-13 引張側フーチング上面鉄筋ひずみ分布

から、この位置で曲げひび割れが発生することが考えられる。

c) フーチング断面での最大主ひずみ分布

図-12に図-11でのフーチング②断面における荷重の増加に伴う最大主ひずみの分布を示す。荷重 200 kNまではひずみはほとんど発生していないが、フーチング上面主鉄筋の降伏に伴い上面から大きなひずみが発生していることが分かる。また、主鉄筋降伏以降、最大主応力発生位置がフーチングの深さ方向に進展しており、このことから、引張力が主となる破壊が生じていると考えられる。

d) 引張側フーチング上面主鉄筋ひずみ分布

図-13に引張側フーチングにおけるせん断スパン(=a)にあたる部位での上面鉄筋ひずみ分布を示している。荷重の増加に伴い載荷側の柱外縁部に大きなひずみを生じる点や分布状況は実験と一致していることが確認できた。フーチング上面のひずみは始め柱縁端で降伏すると、その後荷重の増加に伴い載荷側の広い範囲に広がっていることが分かる。

e) フーチングの曲げ挙動

地震時におけるフーチングの曲げ損傷は、柱部の回転により柱・フーチング上面引張側に引張力が作用し、損傷は柱・フーチング接合部近傍から生じると考えられる。また、フーチング上面鉄筋降伏荷重以降は、コンクリートに大きな引張力が発生し、荷重の増加に伴いフーチング断面での引張部が増加していることから、曲げとは異なる挙動に移行していると考えられる。

(3) せん断に対する検討

a) フーチング部材における作用力の検討

フーチングのせん断力の支配的な力として、一つは、上部工死荷重による鉛直力、作用慣性力による水平力および水平力によるモーメントによって決まると考えられる杭の鉛直反力、もう一方として、作用慣性力によりフーチング部材に水平方向に作用する力が考えられる。そこで、図-14に引張側の杭頭に作用する鉛直および水平反力と載荷点変位の関係を示す。杭の鉛直反力は水平変位の増加に伴い、単調に増加していることが分かる。しかし水平反力は、フーチング上面主鉄筋降伏以降、ほとんど増加が見られず、鉛直反力と比較してあまり大きな力が作用していない。このことから、せん断に対しては鉛直反力が支配的であると考えられる。

図-15に引張側フーチングにおけるせん断スパン(=a)にあたる部位での下面鉄筋ひずみ分布を示している。フーチング下面は荷重が小さい段階では曲げによる圧縮力が作用するため、圧縮ひずみが生じるが、フーチング上面鉄筋が降伏すると、下面鉄筋においても引張ひずみが生じる現象が実験解析ともに見られた。このことから、フーチング上面鉄筋が降伏すると通常の曲げやせん断とは異なりフーチング断面には水平方向の引張力も作用していると考えられる。

以上の結果より推定できるフーチング部材に作用するせん断作用力の模式図を図-16に示す。フーチングには、杭および柱における引抜作用により、鉛直方向のせん断力が作用すると考えられる。また同時に、フーチング上面鉄筋が降伏することによって、フーチング断面全体に水平力が作用することが、下面鉄筋のひずみ状況から考えることが出来る。したがって、上面引張側のフーチングのせん断損傷を評価する場合は、引張軸力の影響

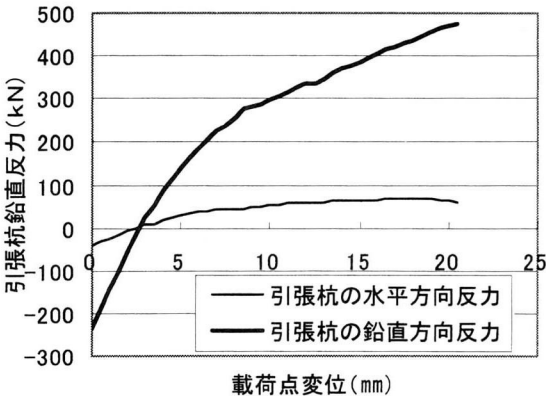


図-14 引張杭における作用力

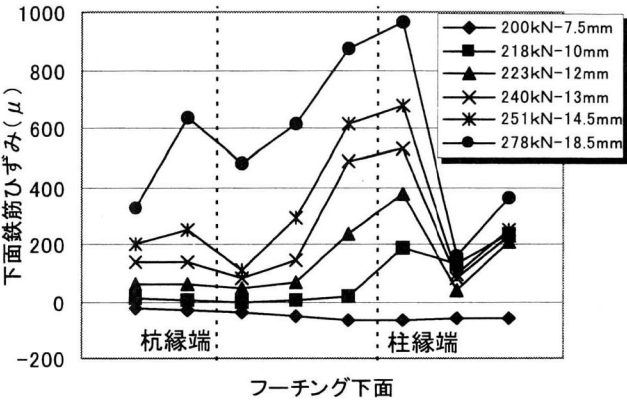


図-15 引張側フーチング下面鉄筋ひずみ分布

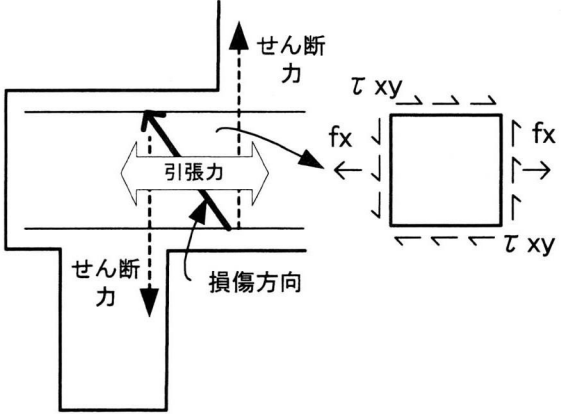


図-16 フーチング部材におけるせん断作用力の模式化

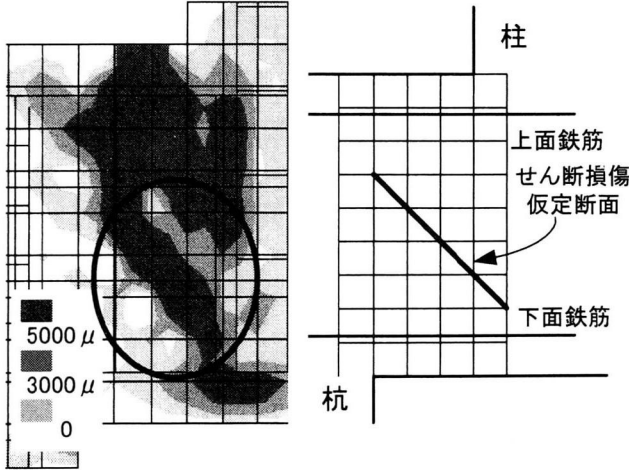


図-17 引張側フーチング最大主ひずみ分布(変位20mm時)

を考慮する必要が考えられ、また、その損傷箇所および方向は、せん断スパンにあたる位置の斜めひび割れであると考えられる。

b) 引張側フーチングにおける最大主ひずみ分布

図-17に水平変位 20 mm時における引張側フーチングでの最大主ひずみ分布コンター図を示す。実験では、図-4に示したような斜め方向のひび割れが確認できた。解析においても、図に丸で囲んでいるせん断スパンにあたる位置で曲げひび割れ損傷とは異なる斜め方向の最大主ひずみが生じた。この斜め方向のひずみは、フーチング上面鉄筋降伏以降急激に生じていたので、このひずみの発生を解析におけるせん断損傷と考えられ、図に示すようなせん断損傷断面を仮定した。

c) せん断損傷仮定断面に発生する最大主ひずみ

図-18にせん断損傷仮定断面に発生する最大主ひずみと載荷点変位の関係を示す。ここでの最大主ひずみは、仮定断面を横切る要素に発生している主ひずみの平均値である。フーチングが曲げ挙動をしていると考えられる上面鉄筋降伏までは、最大引張応力に達するようなひずみは発生していないが、上面鉄筋が降伏するとひずみが急激に発生していることが分かる。これは、フーチング部材はせん断スパン比が小さい上に主鉄筋比が小さいために、せん断挙動に対して曲げによる上面鉄筋の損傷状態の影響が大きくなるためであると考えられる。

図-19にせん断損傷仮定断面に発生する最小主応力と載荷点変位の関係を示す。せん断損傷位置では、大きな最大主ひずみが発生しているが、圧縮強度に達するような圧縮応力は発生していないことが分かる。このことから、このせん断損傷は圧縮応力よりも引張応力の作用が支配的な損傷であると考えられる。

d) フーチングのせん断挙動メカニズム

地震時におけるフーチングのせん断損傷は、杭および柱による引抜作用により生じると考えられる。このとき、せん断損傷はフーチング上面鉄筋の挙動の影響が大きく、上面鉄筋が降伏した後は、フーチング部材のコンクリートの引張せん断抵抗力により耐力が決定すると考えられる。

5. 結論

フーチングの地震時挙動再現実験を、FEM による 2 次元弾塑性解析により検討し得られた結果をまとめると以下のようである。

①上面引張側のフーチングの損傷形態は、フーチング主鉄筋量が少ないために曲げ先行せん断損傷が生じる傾向にあると考えられる。

②フーチングの曲げ損傷位置は柱前面としてよく、損傷は柱・フーチング接合部近傍から生じると考えられる。また、フーチング上面鉄筋が降伏するとすぐにせん断損

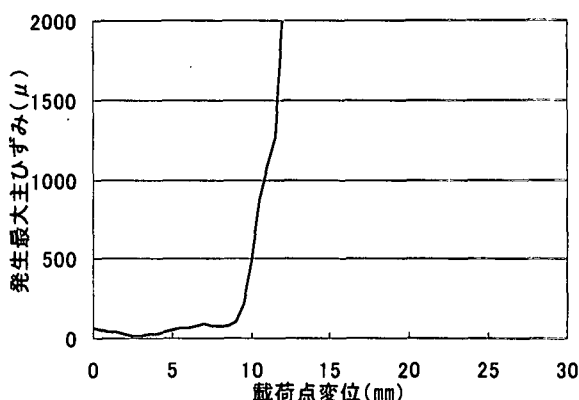


図-18 せん断損傷仮定断面での発生最大主ひずみ

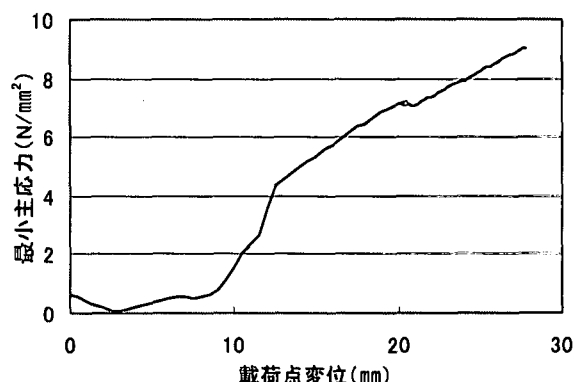


図-19 せん断損傷仮定断面での発生最小主応力

傷が生じると考えられる。

③フーチングのせん断損傷は、杭および柱による引抜作用が支配的であり、フーチング部材のコンクリートの引張せん断抵抗力により耐力が決定すると考えられる。

参考文献：

- 1) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディーブビームのせん断耐力力算定式，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983。
- 2) 白戸真大・福井次郎・幸左賢二・梅原剛：ディーブビーム・フーチングのせん断耐力算定式に関する研究，構造工学論文集，vol.47A，pp.1315-1325，2001.3。
- 3) 幸左賢二・藤井康男・小林和夫・水田和之，せん断スパン比に着目したフーチングの地震時挙動実験，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1405-1412，2000.3。
- 4) David I. Mclean, M. Lee March : Seismic Retrofitting of Bridge Foundations, ACI structural Journal pp.175-182, March-April, 1999
- 5) 藤井康男・幸左賢二・桶田健一・木村隆明：新道示式適用に伴うフーチングのせん断に関する影響度分析，コンクリート工学年次論文報告集，vol.21，pp.1231-1236，1999。
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部工編，1996。
- 7) W.F.Chen (色部・河角・安達：訳)：コンクリート構造物の塑性解析，丸善株式会社，1985。
- 8) J.G.Rots : Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988。