

論文 フーチングの地震時挙動を考慮した耐震設計に関する解析的研究

安藤 高士*1・幸左 賢二*2・足立 幸郎*3・白戸 真大*4

要旨：地震時に橋脚に生じる慣性力により，引張杭側のフーチング部材は上面引張状態となるがその損傷メカニズムは未だ明らかになっていない．そこで，地震時挙動再現実験を対象として2次元弾塑性FEM解析による検討を行った．その結果，上面引張側フーチングには曲げ先行せん断損傷が生じ，せん断損傷は作用水平せん断力によりフーチング上面鉄筋が降伏に達した後に生じると考えられる．また，せん断損傷後はフーチング下面主鉄筋の効果により脆性的な破壊には至らない傾向にあると考えられる．

キーワード：フーチング，せん断損傷，FEM解析，破壊メカニズム

1. はじめに

杭基礎フーチングは，地震時に橋脚に生じる慣性力の作用により，下面引張になる側と上面引張になる側が存在する．このうち下面引張側については，これまでに多くの研究がなされている¹⁾．一方，上面引張側では，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はほとんどなく，破壊メカニズムは明らかになっていない．その上，阪神大震災以降，道路橋示方書では作用水平震度が従来の2倍に設定され，上面引張側での抵抗力によりフーチング形状が決まる事例が多く報告されている²⁾．このような背景から，フーチングの引張作用力に対する損傷メカニズムを十分把握することは，効果的な耐震設計を行うために重要であると考えられる．そこで，フーチングの地震時挙動再現実験³⁾を対象として2次元弾塑性FEM解析を行い，上面引張側での破壊メカニズムの検討を行った．

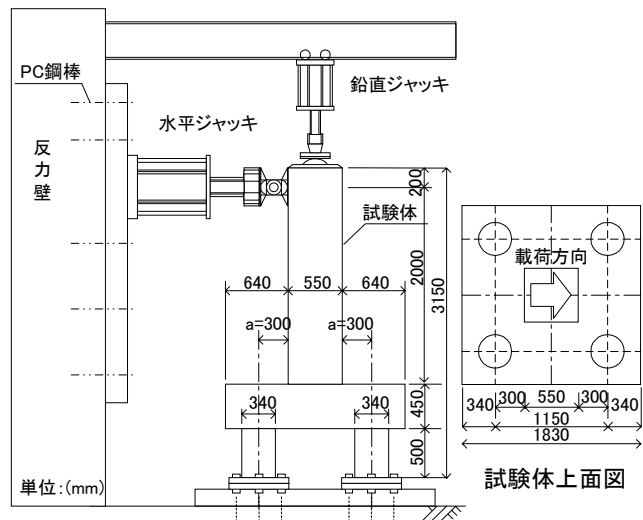


図-1 実験試験体構造図 (No.1)

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	
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
フーチング鉄筋量		H2道示鉄筋量		1.5×H2道示鉄筋量	H2道示鉄筋量	

2. 実験概要

2.1 試験体諸元および実験方法

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-1に試験体構造を，表-1に試験体構造諸元一覧を示す．フーチング形状は，全高・有効高を同

*1 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学助教授 工学部建設社会工学科 Ph.D. (正会員)

*3 阪神高速道路公団工務部 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 (正会員)

一とし、 a/d (せん断スパン比) を 0.39, 0.75, 1.0 と変化させた。No.3 試験体はNo.1 試験体に対してフーチング上下主鉄筋量を 1.5 倍にしている。

荷重方法は、上部工死荷重に相当する鉛直荷重 (1.6N/mm^2) を橋脚天端に荷重した状態で、地震力に相当する水平荷重を荷重した。

2.2 フーチング損傷形態

(1) フーチング上面損傷状況

各試験体で支配的な損傷は引抜側フーチング上面に認められた。図-2 にフーチング上面の損傷状況を、以下に損傷進展状況を示す。

- フーチング上面に、柱中央から側面方向と引張側上面方向に向かうひび割れ確認。
- フーチング上面主鉄筋が引張側柱付け根位置で降伏ひずみ近傍に達した後、圧縮側フーチング下面主鉄筋が降伏ひずみ近傍に到達。
- 最大荷重に達し、フーチング上面で柱隅角部からフーチング隅角部に向かうひび割れ発生。
- 最大荷重以降、荷重-変位曲線に滑らかな下降曲線が見られ、引張側フーチング上面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-2 黒色部)。

(2) 水平荷重荷重点での荷重-変位関係

図-3 に各試験体の荷重点での水平荷重-変位の関係を示す。各試験体はフーチング上面主鉄筋が降伏し、その後最大耐力に達すると荷重のなだらかな低下現象が見られた。せん断スパン比が大きなNo.2 試験体においては、最大耐力までは同様な挙動を示したが、荷重の低下現象の途中で圧縮側フーチングにおいて押抜きせん断破壊が生じた。

(3) フーチング断面の損傷状況

No.4 試験体のみ引張側フーチング断面におけるコアを採取した。図-4 にコアより確認できた損傷状況を示す。柱および杭の引張力による斜め方向のひび割れが確認できた。フーチングの破壊形態として引張側での浮き上がり現象が見られたことから、この引張せん断損傷が破壊に対して支配的であると考えられる。

(4) フーチング損傷に対するじん性能

表-2 に試験体耐力およびじん性能一覧を示

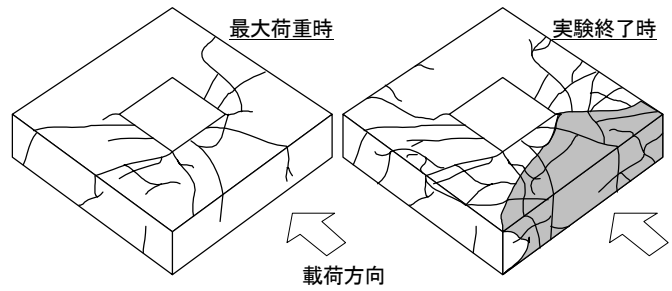


図-2 フーチング上面損傷状況

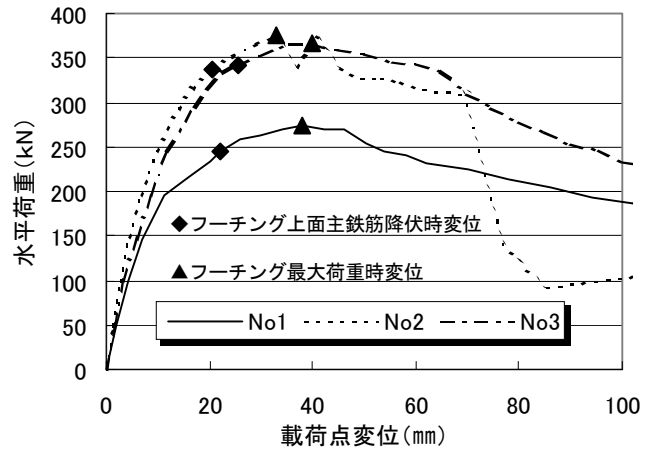


図-3 各試験体の荷重点での水平荷重-変位の関係

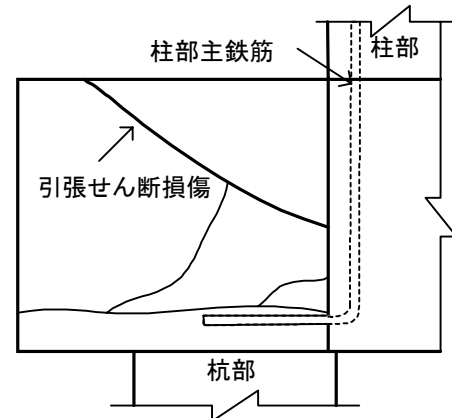


図-4 フーチング断面でのひび割れ状況 (No.4)

表-2 試験体耐力およびじん性能

		No.1	No.2	No.3	No.4	
降伏耐力	水平荷重 (kN)	P_y	245	338	342	814
	水平変位 (mm)	δ_y	22	21	25	25
最大耐力	水平荷重 (kN)	P_{max}	273	370	367	1032
	水平変位 (mm)	δ_{max}	38	33	40	60
100%×降伏耐力	水平荷重 (kN)	$P_{100\%}$	245	338	342	814
	水平変位 (mm)	$\delta_{100\%}$	54	45	60	150
じん性		δ_{max}/δ_y	1.7	2.1	1.6	2.4
		$\delta_{100\%}/\delta_y$	2.5	2.3	2.4	6.0

す。ここで、100%×降伏耐力とは最大耐力後、降伏耐力相当まで荷重荷重が低下した時点の結果を示している。水平荷重が最大荷重を経てフーチング上面鉄筋降伏荷重まで低下した変位をフ

ーチングのじん性性能とすると、じん性率2程度を期待できると考えられる。

3. 解析概要

3.1 解析手法

本解析では解析手法として FEM による 2 次元弾塑性解析を用いた。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、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 次元解析では 3 次元的な奥行き幅の取り方が問題になる。実験では、フーチング上面に支配的なひび割れが生じ、上面主鉄筋が初めに降伏に至ったので、フーチングの有効幅を上面主鉄筋ひずみ分布状況から、 $b(\text{柱幅})+d(\text{フーチング有効高})=940\text{ mm}$ ⁴⁾とした。また、柱および杭部は柱幅 550 mmとしている。

荷重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荷重した状態で柱上部に変位増分による単調荷重を与え、境界条件として杭下端を完全固定としている。

3.2 材料モデル

要素特性は、コンクリートに平面応力要素、鉄筋に線材要素を使用し、鉄筋とコンクリートは完全付着としている。表-3 にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。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、引張側では最大主応力基準を用いた⁵⁾。コンクリートの応力-ひずみモデルを図-5 に示す⁵⁾。圧縮上昇域では圧縮強度までを 2 次放物線とし、その後は応力を直線的に減少させている。引張域では、最大引張応力 (f_t) まで直線的に応力が増加するとし、その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。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。このとき要素の等価長さ (l_{eq}) が必要となるが、本解析では要素の対角線を等価長さとして用いた。ひび

表-3 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	28.03	2.11	2.2×10^4	0.20
フーチング部	25.28	1.64	2.2×10^4	0.20
	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

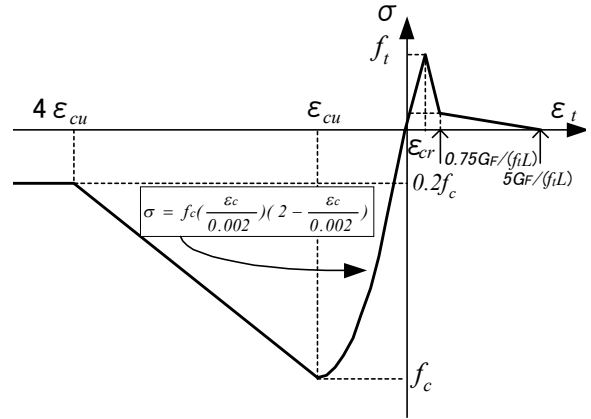


図-5 コンクリートの応力-ひずみ

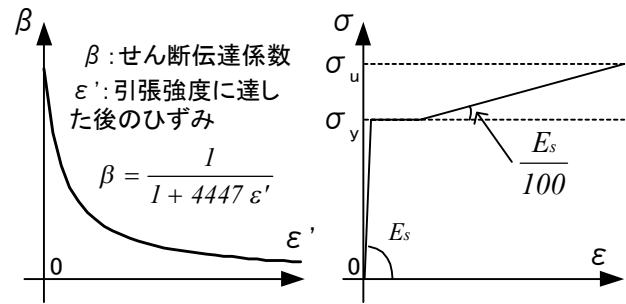


図-6 せん断伝達係数 図-7 鉄筋の応力-ひずみ

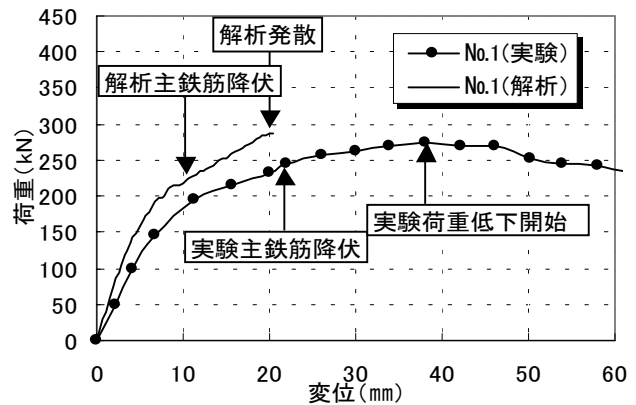


図-8 解析の水平荷重位置荷重-変位関係

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-6 に示す⁶⁾。鉄筋の応力-ひずみ関係は、図-7 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。

4. 解析結果および考察

実験において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 試験体のみを用いた損傷メカニズムの検討を行った。ここでは、引張ひずみを正、圧縮ひずみを負で表している。

4.1 曲げ降伏までの挙動の検討

(1) 水平荷重—変位関係

図-8 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、水平変位が増加し、最大耐力以降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、荷重の低下現象を再現できなかった。この原因としては、フーチングの鉄筋量が少ないことや、2次元モデル化の影響が考えられる。

(2) フーチング上面引張側での最大主ひずみ

図-9 に水平変位 9 mm 時における引張側フーチングの最大主ひずみを示す。また、図-10 に最大荷重時におけるひび割れ分布状況を示す。実験では支配的なひび割れはフーチング上面に生じ、柱前面位置からの曲げひび割れが確認できた。解析においても引張側フーチング上面に水平方向の最大主ひずみが発生しており、フーチングの柱前面において曲げ損傷が発生していると考えられる。

(3) 引張側フーチング上面主鉄筋ひずみ

図-11 に引張側フーチングにおける上面鉄筋ひずみ分布を示す。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。

4.2 曲げ降伏後の挙動の検討

(1) 引張杭側フーチングのせん断損傷の検討

図-12 に水平変位 14 mm 時における引張側フーチングでの最大主ひずみ分布を示す。実験では、図-10 に示すようなフーチング側面に上面から下面に達する斜め方向のひび割れが確認できた。この損傷に対し、解析では図に丸で示す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。このひずみ

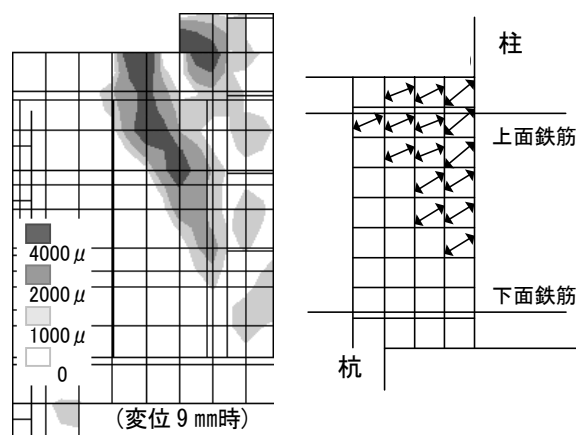


図-9 引張側フーチング最大主ひずみ分布

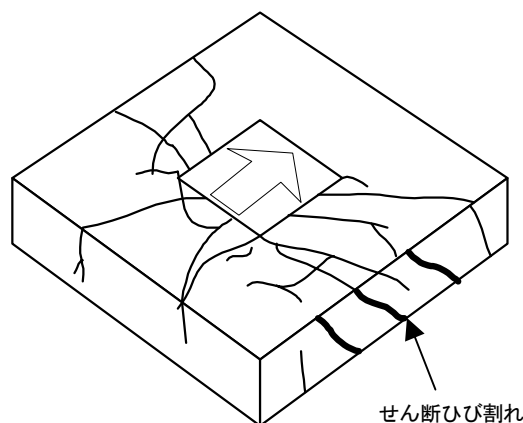


図-10 フーチング最大荷重時ひび割れ状況

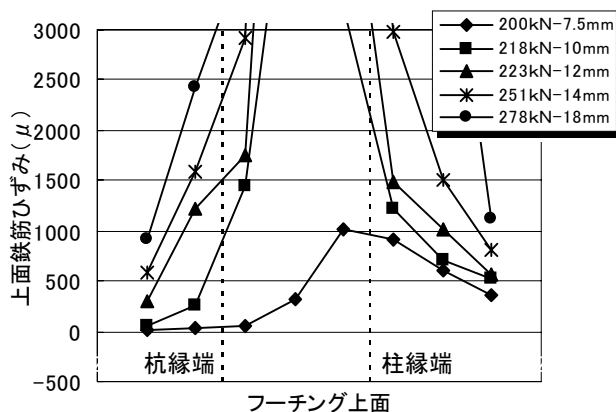


図-11 引張側フーチング上面主鉄筋ひずみ分布

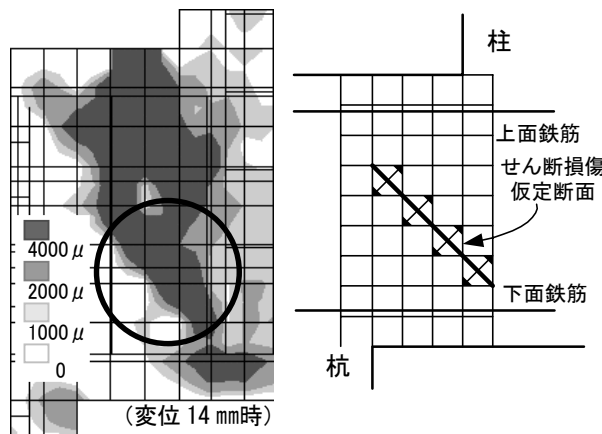


図-12 引張側フーチング最大主ひずみ分布

は 45 度方向に発生していたためせん断損傷であると考えられ、ひずみに対して垂直なせん断損傷断面を仮定した。

図-13 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、せん断損傷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の急増が見られた。また、図-14 に引張側フーチングにおける下面主鉄筋ひずみ分布を示す。フーチング下面主鉄筋は荷重が小さい段階では圧縮ひずみが生じているが、フーチング上面鉄筋が降伏すると、下面鉄筋にも引張りひずみが生じる現象が実験・解析ともに見られた。

(2) フーチング部材の作用せん断力

図-15 にフーチング部材での作用せん断力の模式図を示す。フーチングのせん断損傷に支配的な力としては、作用慣性力による水平方向のせん断力と、柱および杭の引抜き作用による鉛直方向のせん断力が考えられる。ここで、図-12に見られるようなせん断損傷は、フーチング上面鉄筋降伏以降急激に発生し、その後フーチング下面鉄筋においても引張力が生じたことからフーチング主鉄筋が影響を受ける方向、すなわち、水平方向のせん断力が支配的であると考えられる。

(3) 引張側フーチングに作用する水平方向せん断力の検討

図-16 に引張杭側フーチングの作用水平せん断力を示す。ここで、水平せん断力は柱基部に作用する水平力から杭頭に作用する水平力を差し引くことにより算出した。水平変位の増加に伴い、作用水平せん断力は単調に増加しており、急激な増加や減少は見られなかった。

図-17 に作用水平せん断力に対するコンクリートおよび鉄筋の負担状況と載荷点変位との関係を示す。ここで、鉄筋の負担せん断力は図-15に示す水平せん断照査断面を横切る鉄筋に作用する応力より算出し、コンクリートの負担するせん断

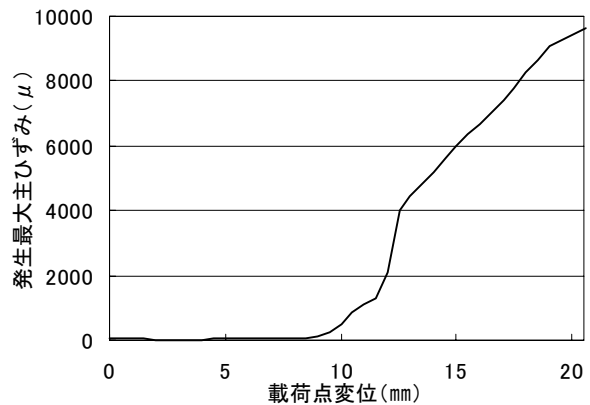


図-13 引張側フーチング最大主ひずみ分布

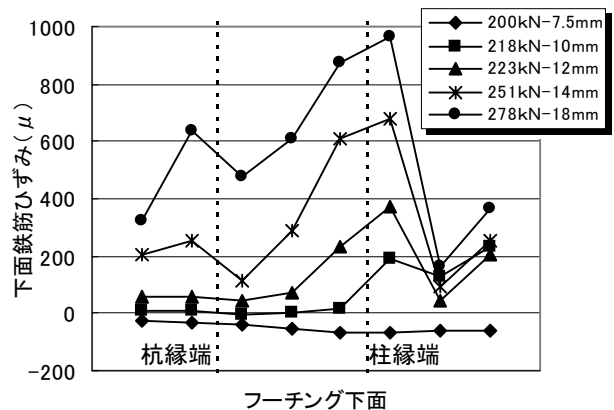


図-14 引張側フーチング下面主鉄筋ひずみ分布

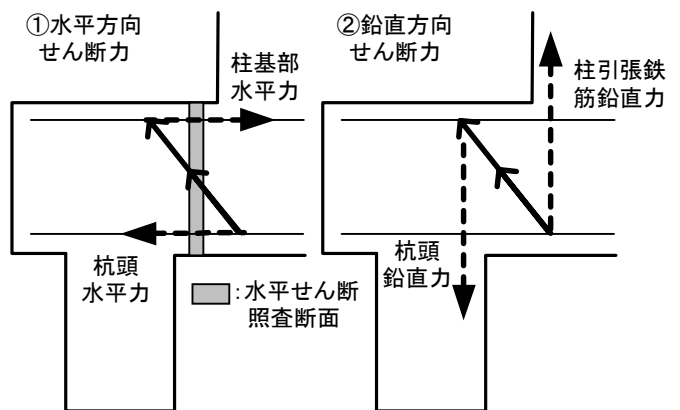


図-15 フーチング部材のせん断作用力の模式化

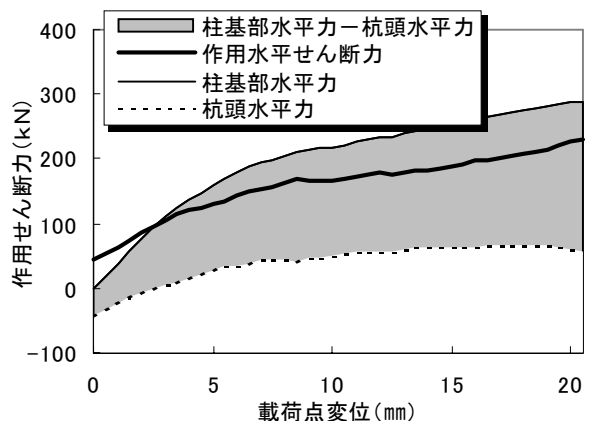


図-16 作用水平せん断力-載荷点変位の関係

力は作用せん断力から鉄筋の負担せん断力を差し引くことにより求めた。

フーチングが弾性状態であるときはコンクリートによってほとんどの水平力を受け持っているが、フーチング上面にひび割れが生じはじめると考えられる変位7mm時からコンクリートの負担せん断力は減少し、上面鉄筋の負担せん断力が上昇していることが分かる。このことから、この区間の挙動は比較的曲げ挙動に近いものと考えられる。

上面鉄筋が降伏状態に達した後、通常の曲げ挙動であればフーチング下面鉄筋に大きな圧縮力が作用すると考えられるが、ここでは引張力の発生が見られ、下面鉄筋負担せん断力が上昇しコンクリート負担せん断力がさらに減少していることが分かる。このとき、フーチングにせん断損傷が生じていると考えられ、せん断損傷後は下面鉄筋が水平せん断力に対して抵抗していると考えられる。

(4) フーチングのせん断損傷メカニズム

図-18 に作用水平せん断力によるフーチングせん断損傷の模式図を示す。フーチングのせん断損傷は、杭および柱基部に作用する水平力により生じると考えられる。このとき、柱の回転挙動によりフーチング上面が引張状態となるが、上面主鉄筋が降伏すると作用せん断力に対してはコンクリートでしか抵抗できないため、フーチングの腹部においてせん断損傷が生じると考えられる。また、せん断損傷が生じても下面鉄筋が抵抗することにより脆性的な破壊には至らないと考えられる。

5. 結論

フーチングの地震時における損傷形態を、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) フーチングのせん断損傷は作用水平せん断力により、フーチング上面鉄筋が降伏に達した後生じると考えられる。
- (3) 作用水平せん断力による損傷は、フーチング

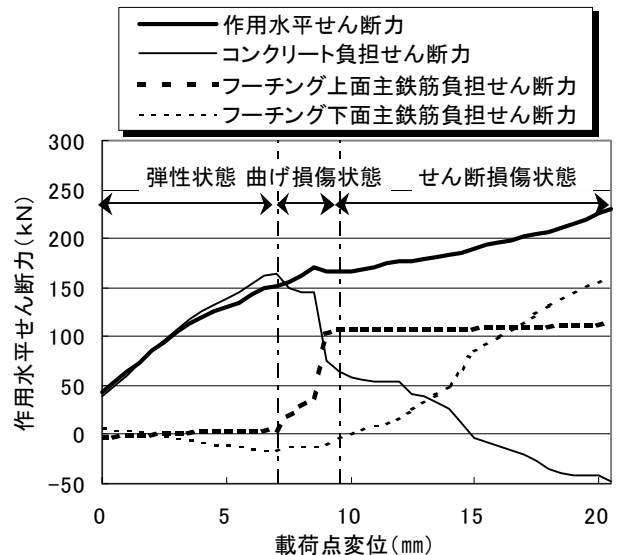


図-17 作用水平せん断力の負担状況

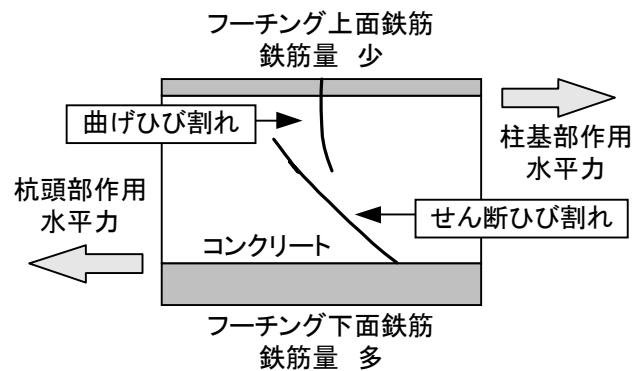


図-18 フーチングのせん断損傷模式図

下面主鉄筋の効果により脆性的な破壊には至らない傾向にあると考えられる。

参考文献：

- 1) 白戸真大, 福井次郎, 幸左賢二, 梅原剛：ディーブーム・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
- 2) 藤井康男, 幸左賢二, 桶田健一：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集, Vol.21, pp.1231-1236, 1999
- 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) 日本道路協会：道路橋示方書IV下部工編, 1996
- 5) 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
- 6) Jan G.Rots：Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988