

フーチングの地震時終局挙動に着目した弾塑性FEM解析

幸左賢二・安藤高士・足立幸郎・水田和之

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

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

正会員 阪神高速道路公団工務部 (〒531 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)

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)

1. はじめに

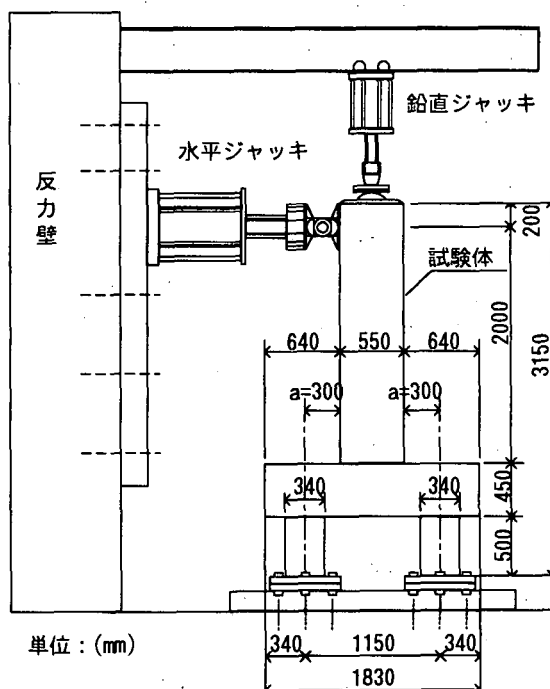
1995年に発生した兵庫県南部地震は阪神地方に甚大な被害を与えた。しかし、損傷調査から橋脚に比較して基礎構造物、特にフーチングは損傷度の高いものではなく、比較的軽微な損傷が数基に発生したのみであった。この地震による被害を契機に、下部構造の地震時水平保有耐力および変形性能の照査を基本とした設計体系が採用され、そのため、終局耐力を有することのみならず、十分な変形性能を有することが要求されるようになった。しかしながらフーチングの設計に着目すれば、一般的に支配的な荷重である地震時荷重が、震度法レベルから保耐力レベルに引き上げられたが、フーチングの鉄筋を降伏状態までに留めることを目標とした設計が実施されているままである。これは、フーチングの形状が複雑なことから、破壊メカニズムや終局挙動については明確にされていないため、終局時設計手法が確立されていない現状で、ある程度の安全を見込んだ設計をする必要があるためと考えられる^{1), 2)}。また同時に、耐震対策として支承部、柱部が補強されたが、この影響によるフーチングの耐震安全性が確保できているかは明らかにされていない。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鉄筋量をパラメーターとした単調載荷実験³⁾、および有限要素法を用いた2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

試験体は阪神大震災によりCランクの損傷が生じた橋梁を1/3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に試験体構造図を、表-1に試験体構造諸元一覧を示す。

橋脚形状は直径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



単位：(mm)

図-1 実験試験体構造図

表-1 構造諸元一覧表

		試験体No.1	試験体No.2	試験体No.3	
柱	柱高さ	2200mm			
	水平荷重載荷高	2000mm			
	柱断面	550mm×550mm			
	柱鉄筋量	28本×D22 (As=108.388cm ²)			
フーチング	a/d	0.75	1.00	0.75	
	全幅	1830mm	2030mm	1830mm	
	全高	450mm			
鉄筋	有効高	390mm			
		上面	D10 ctc 240	D10 ctc 200	D10 ctc 154
杭		下面	D13 ctc 120	D13 ctc 100	D13 ctc 77
	杭径	φ340			
	杭間隔	1150mm	1350mm	1150mm	
	杭鉄筋量	10本×D25 (As=50.67cm ²)			
使用材料	コンクリート	柱	設計基準強度=270N/mm ²		
		フーチング・杭	" =240N/mm ²		
	鉄筋	SD345			

2.5倍となるようにD22鉄筋を28本配筋した。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以内になるように設計した。なお、No.3試験体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倍に増加させた。

(2) 実験方法

図-1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相当する鉛直荷重(上部工死荷重相当力 $1.6\text{N}/\text{mm}^2$)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た。

3. 実験結果および考察

(1) 各試験体の荷重-変位関係

図-2に各試験体の柱天端の荷重と水平変位の関係を示した。白抜きが解析結果、黒塗りが実験結果である。No.1試験体の耐力(最大荷重)は約273kN, No.2は約378kN, No.3は約374kNである。No.2は最大荷重後、急激に耐力が低下した。また、No.2, 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。

(2) No.1試験体損傷状況

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。また、試験体の最終損傷状況図を図-3に示す。

- ①荷重220kN, 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確認。
- ②荷重250kNでフーチング上面載荷軸方向鉄筋が加力点側柱付け根位置で降伏ひずみ近傍(1700μ)に達する。ほぼ同時にフーチング下面鉄筋が降伏ひずみ近傍に到達。
- ③荷重273kN, 変位38mm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部に向かうひび割れ発生。
- ④変位150mmで実験終了。最終状態では、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。

(3) No.2試験体実験結果

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。また、試験体の最終損傷状況図を図-4に示す。

- ①荷重250kN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確認。
- ②荷重345kN, 変位20.5mmでフーチング上面鉄筋が加力

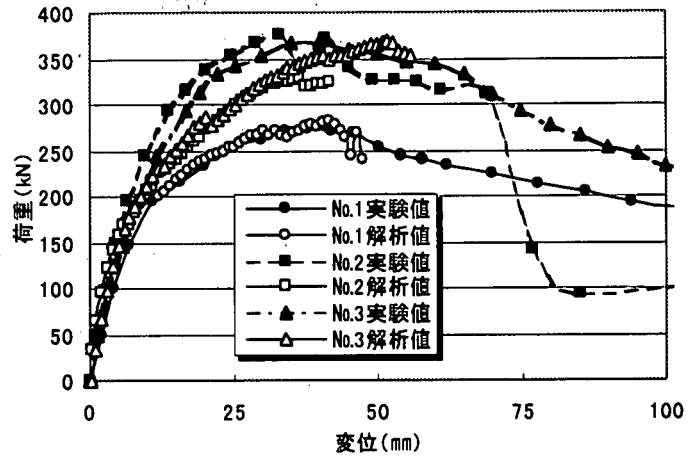


図-2 各試験体の柱天端の水平変位-荷重の関係

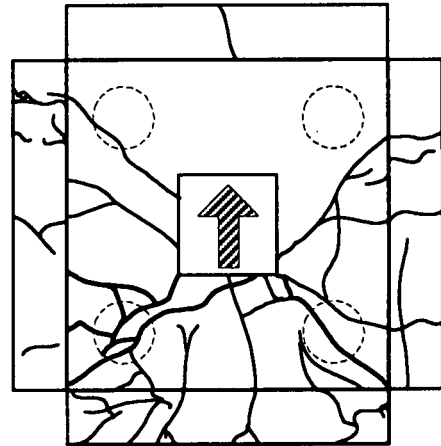


図-3 損傷状況図 (No.1, 3)

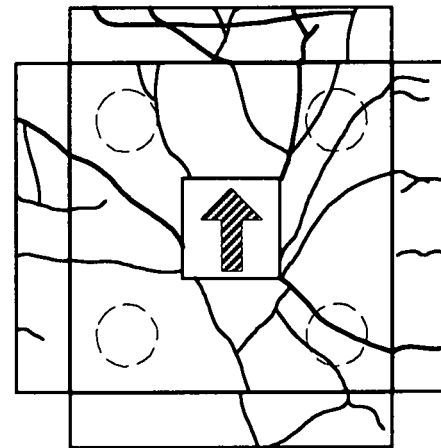


図-4 損傷状況図 (No.2)

- ②点側柱付け根位置で降伏ひずみに到達。
- ③変位41.2mmで最大荷重378kNに到達。
- ④変位69mmで荷重が300kNから100kNに急減し、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。
- ⑤変位160mmで実験終了。最終状態では、柱前面と押し込み側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を確認。

(4) No.3試験体実験結果

試験体の主な荷重ステップにおける損傷状況を示す。

- ①荷重 300kN で柱側面中央からフーチングコーナーに向かうひび割れを確認。
- ②荷重 350kN, 変位 25.4mm でフーチング上面荷重軸方向鉄筋が, 荷側柱付け根位置で降伏ひずみに到達。
- ③変位 40mm で最大荷重 374kN に達するとともに, 柱隅角部からフーチングコーナー部に向かうひび割れを確認。
- ④変位 160mm で実験終了。最終状態では, Na1 と同様の破壊面を確認。

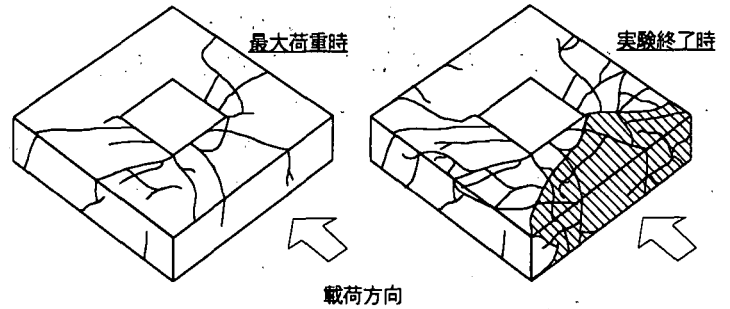


図-5 損傷状況 (Na1, 3)

(5) 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つに分類される。

a) 接合部損傷からコーン状破壊

試験体Na1, 3 ($a/d=0.75$)に認められる損傷形態であり, 最大荷重まではフーチング上面の柱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。損傷模式図を図-5に示す。

①鉄筋降伏時: 接合部損傷

フーチング上面の柱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Na2 ($a/d=1.00$)の場合に認められる損傷形態であり, 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。損傷模式図を図-6に示す。

①鉄筋降伏時: 接合部損傷

フーチング上面の柱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: 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コンクリートのひび割れ抵抗であると考えられる。

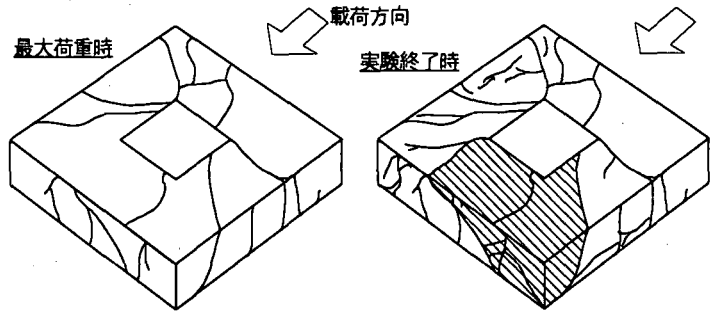


図-6 損傷状況 (Na2)

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

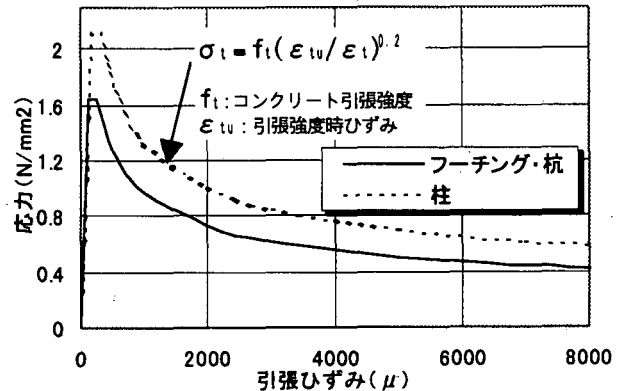


図-7 コンクリートの引張軟化モデル

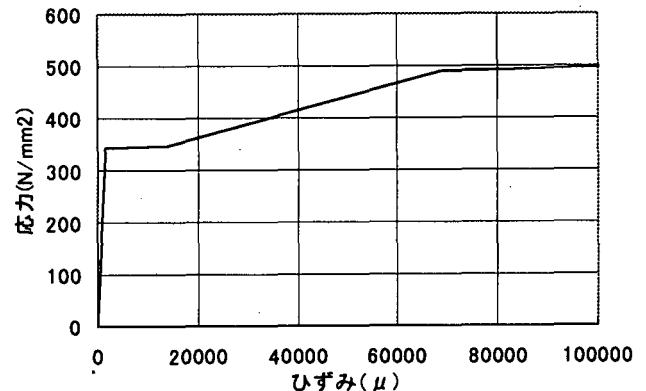


図-8 鉄筋の応力-ひずみモデル

4. 解析概要

(1) 解析方法

解析手法には FEM (有限要素法) による静的弾塑性解

析を用いた。本解析は2次元モデルを用い、コンクリートには平面応力要素、鉄筋には埋め込み鉄筋要素(コンクリート要素と完全付着している)を使用した。モデル化においては a/d 、鉄筋量および配筋を実験とできるだけ対応させた。また、2次元解析における奥行き幅の取り方は柱・フーチング・杭部を同一の奥行き幅としその幅を柱幅 550 mmとした。境界条件としては、柱天端に等分布荷重を載荷した状態で、柱上部に強制変位を与え、杭下端を完全固定としている。

(2) 材料モデル

解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の物性値を表-2に示す。コンクリートの応力-ひずみモデルは圧縮域では Von Mises の降伏規準によるパイリニアモデルとした。また引張域については、ひび割れを考慮した分布ひび割れモデルとし、ひび割れ後の引張軟化挙動については、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係⁴⁾をモデル化した方法を用いている。図-7に解析で使用した引張軟化モデルを示す。鉄筋については、部材によって材料は異なるが、引張試験の結果に大差が見られなかったため全て同一の材料定数を用いた。また、鉄筋の応力-ひずみモデルでは、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-8に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。

5. 解析結果および考察

(1) フーチングの損傷状況 (No.1 試験体)

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 試験体の変位や鉄筋のひずみについて実験値と解析値を比較・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。

a) 柱の水平変位

図-2に各試験体の柱天端における水平変位と荷重の関係を示した。No.1, No.3 試験体は最大荷重付近までは、実験・解析ともに同じような挙動が得られていることがわかる。No.2 試験体は耐力の向上は見られたが、実験と一致するほどではなかった。また、各試験体とも塑性変形が大きくなる領域では解析値が収束不能となった。

b) フーチングの変形

図-9にフーチングの鉛直変形と荷重の関係を、図-10に解析における最大荷重時の変形図を示す。フーチング中央部は荷重の進行に伴い荷重方向に傾くとともに浮き上がることがわかる。フーチング中央部の変位はフーチング上面鉄筋降伏以降急激に増加し、また、フーチング端部は両端とも鉛直下向きに変位していることから、フーチングは凸型に変形すると考えられる。

c) 柱軸方向鉄筋ひずみ

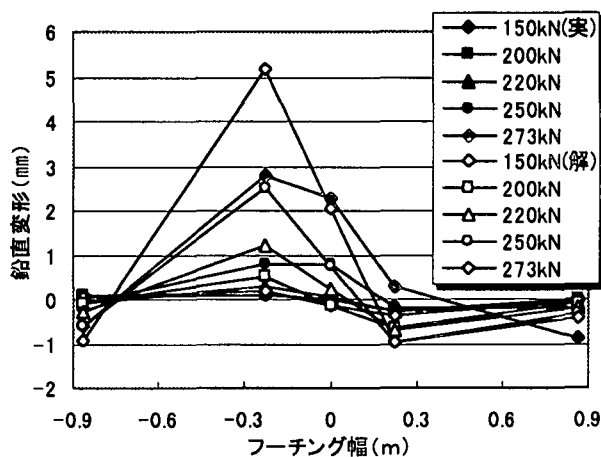


図-9 フーチングの鉛直変形-荷重の関係

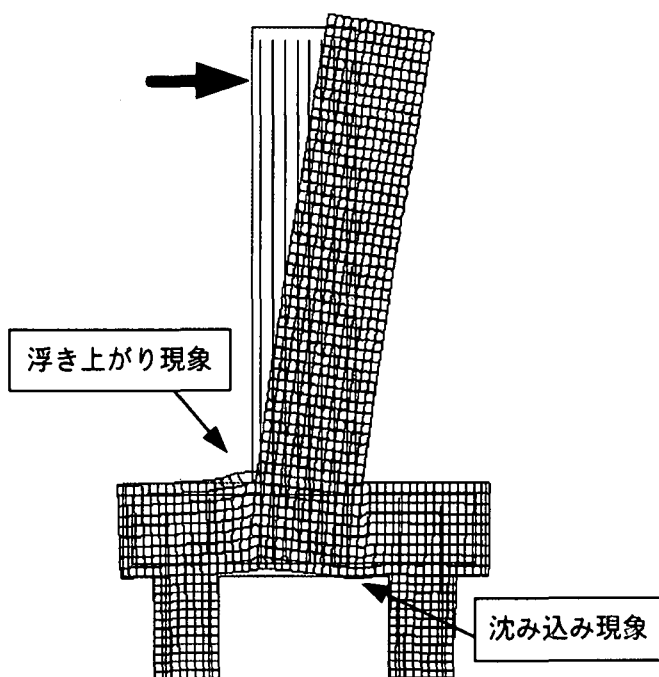


図-10 最大荷重時の変形図 (変形量10倍)

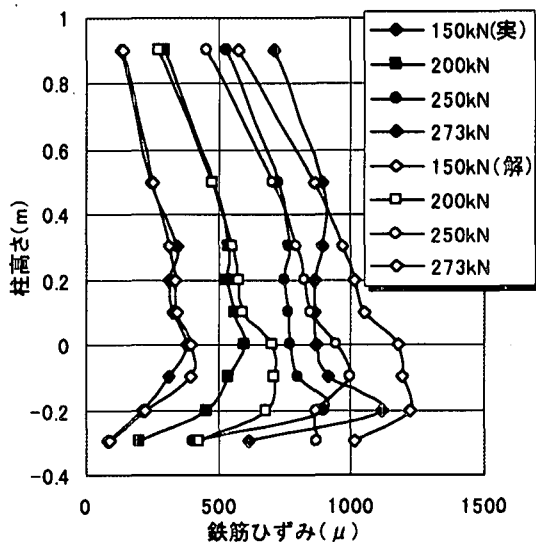


図-11 柱軸鉄筋(引張側)のひずみ分布

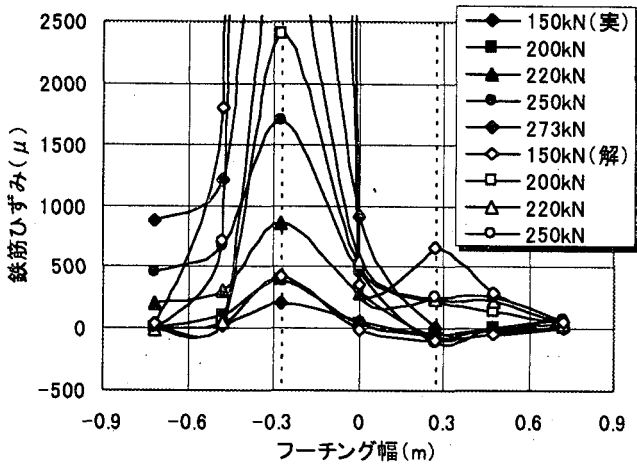


図-12 フーチング上面鉄筋ひずみ分布

図-11に柱軸鉄筋(引張側)のひずみ分布を示す。分布状況は実験と解析で同じ傾向を示している。柱・フーチング接合部にピークが生じるが降伏するまでには至っていないことがわかる。

d) フーチング上面鉄筋ひずみ

図-12にフーチング上面鉄筋のひずみ分布を示している。全体的に解析の方がひずみは大きいですが、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一致し、フーチング上面のひずみは載荷側の広い範囲に広がっていることが分かる。しかし解析では、実験よりも早い段階で降伏ひずみに達している。これは柱・フーチング接合部において応力集中が起きたためであると考えられる。

e) フーチング下面鉄筋ひずみ

図-13にはフーチング下面鉄筋のひずみ分布を示している。下面では、押し込み側の柱外縁部付近に大きなひずみが生じているが、上面鉄筋のひずみより小さい。また、実験・解析ともに、フーチング下面鉄筋よりも先に上面鉄筋が降伏ひずみに達した。

f) フーチングのひずみ分布

図-14に解析における最大荷重時のコンクリート最大主ひずみ分布を示した。実験では、支配的なひび割れはフーチング上面載荷側に生じ、最終的には載荷側にコーン状の引き抜き破壊を起こしている。これに対し、解析においても載荷側のフーチング上面に大きな引張ひずみが広く分布していることから、柱・フーチング接合部の載荷側近傍から損傷が生じると考えられる。これらのことから、フーチング上面の損傷が破壊に対して影響が大きいと考えられる。また、このときの載荷側柱前面断面における水平方向ひずみ分布を図-15に示す。深さ方向 3/4 までが三角形分布の引張状態となっており、引張力が主となる破壊が生じていると考えられる。

(2) 耐力の比較

表-3に実験結果および解析結果の耐力一覧を示す。

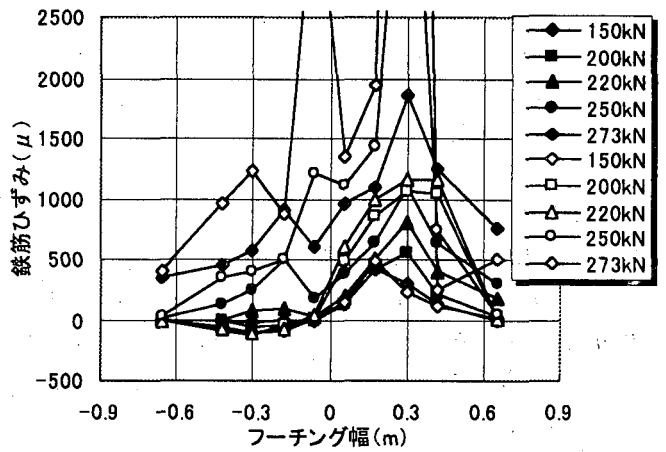


図-13 フーチング下面鉄筋ひずみ分布

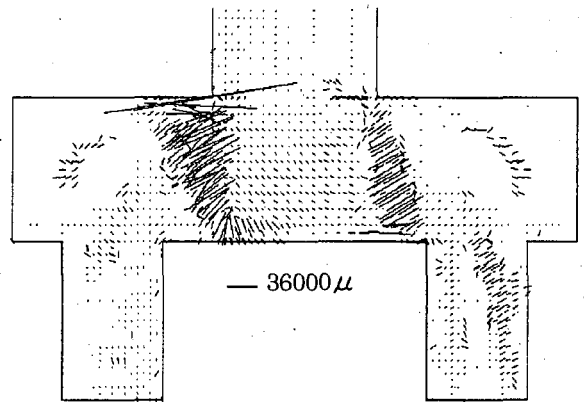


図-14 コンクリートの最大主ひずみ分布矢示図

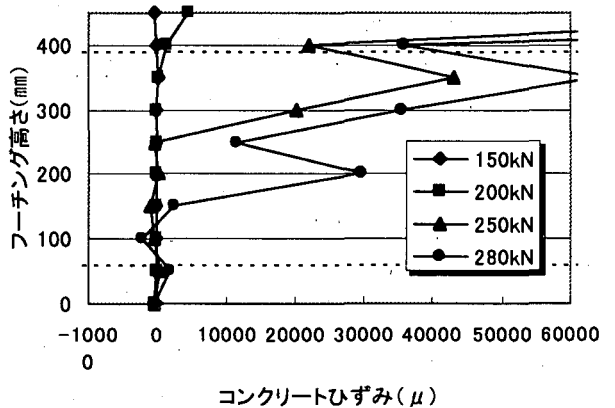


図-15 柱前面断面の水平方向ひずみ分布

表-3 実験結果および解析結果耐力一覧表

項目 (kN)		No.1試験体	No.2試験体	No.3試験体
実験値	最大荷重	273.4	370.4	366.5
	フーチング鉄筋降伏荷重	245.0	338.1	342.0
FEM解析値	最大荷重	281.2	331.2	368.7
	フーチング鉄筋降伏荷重	201.3	228.5	234.1
H8道示設計耐力	曲げ耐力	165.6	199.9	192.1
	せん断耐力	255.8	288.1	311.6

設計耐力はいずれもフーチング上面鉄筋降伏時の耐力を示す。なお、せん断耐力の計算値は梁としての照査を行った値である。実験・解析ともに設計耐力を上回り、1.5～1.8倍程度の余裕を持っていることが分かる。このことからフーチングはかなりの余剰耐力を有していると考えられる。解析結果はフーチングの降伏荷重がいずれも実験降伏荷重よりも低めになるなど再現性に問題があるものの最大荷重の傾向はとらえていると考えられる。また実験結果との比較より、フーチングの破壊メカニズムについてみれば解析により再現できていると考えられる。

(3) せん断スパン比の影響 (No.2 試験体)

図-9よりNo.2試験体の解析結果においても実験よりは小さいが耐力の増加が見られているが、これはNo.1と比較して相対的なフーチング鉄筋量が増加しているためと考えられる。図-16, 17にNo.1, No.2の解析結果における最大耐力付近での圧縮応力分布状況を示す。水平载荷によるフーチング部の圧縮応力はせん断スパン比が異なっても矢印①のように杭内側に向かって伝わると考えられる。しかし、せん断スパン比が大きくなると伝達方向は水平に近づいていくと考えられ、この現象によりせん断耐力が低下し最終的な押し抜きせん断破壊を引き起こしたと考えられる。また、試験体の浮き上がり現象は変形による矢印②方向の力により生じると考えられる。

(4) 鉄筋量増加の影響 (No.3 試験体)

図-9よりNo.3試験体の解析結果においても実験と同程度の耐力の増加が見られ、フーチング鉄筋ひずみの低下も見られた。このことから、フーチングの鉄筋量を増加させることはフーチング上面の損傷に対して有効であると考えられる。またNo.1試験体と比較して、実験・解析ともに終局にいたる挙動が大きく変わらなかった。このことから、鉄筋量増加は破壊メカニズムに対して影響しないと考えられる。

6. 結論

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フーチングの鉄筋量をパラメータとした地震時挙動実験を、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。

①2次元 FEM 解析によって得られた試験体の変位やひずみの分布状況などは実験と概ね一致しており、解析により試験体の終局挙動がある程度は評価できることがわかった。しかし、今回の解析モデルでは試験体の降伏荷重やせん断スパン比の影響を適切に再現することができなかった。

②フーチングの破壊形態は、道路橋示方書で想定してい

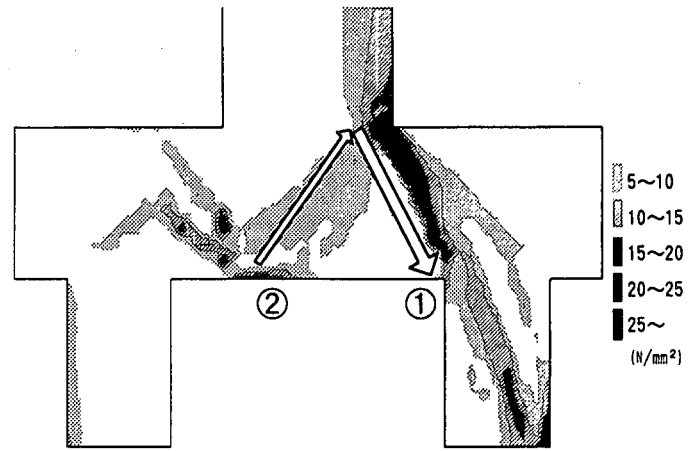


図-16 最大荷重付近での最小主応力分布図 (No.1 試験体)

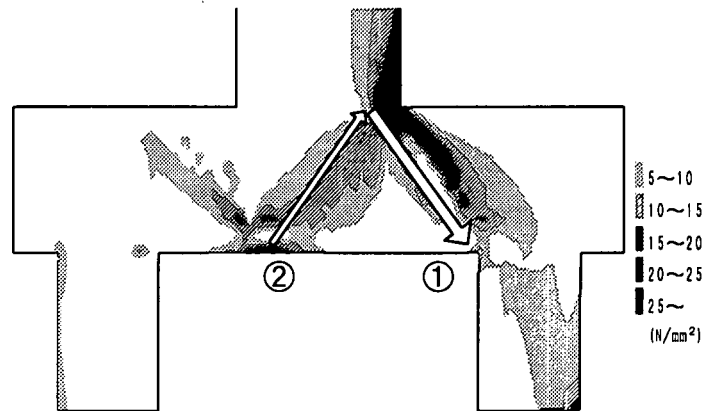


図-17 最大荷重付近での最小主応力分布図 (No.2 試験体)

ような曲げやせん断破壊ではなく、柱・フーチング接合部における挙動が支配的であり、損傷はフーチング上面に生じると考えられる。

③フーチングの破壊面を柱前面としたとき、その断面の応力分布は簡易的には上側 3/4 が引張応力負担部となる分布で表され、このことから、フーチング上面を破壊基準とした評価が必要であると考えられる。

④フーチングの鉄筋量を増加することによって、試験体の耐力が向上する傾向にあることが分かった。このことから、フーチング上面鉄筋は接合部の損傷に対して有効であると考えられる。

参考文献：

- 1) David I. Mclean, M. Lee March : Seismic Retrofitting of Bridge Foundations, ACI structural Journal pp.175-182, 1999. March-April
- 2) 建設省土木研究所構造橋梁部基礎研究室：フーチングの設計および補強方法に関する実験的研究，土木研究所資料第 3550 号 ISSN 0386-5878 1998年3月
- 3) 幸左・藤井・小林・水田，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,2000.3
- 4) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991