

論文 弾塑性 FEM 解析によるフーチングの終局挙動分析

安藤高士*¹・幸左賢二*²・足立幸郎*³・水田和之*⁴

要旨：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、その破壊メカニズムおよび終局挙動を最大耐力、変形状況、鉄筋のひずみ分布およびコンクリートのひずみ分布などにより検討した。その結果、フーチングの損傷は柱・フーチング接合部における挙動が支配的でフーチング上面に生じ、また接合部の損傷に対してフーチング上面鉄筋は有効であると考えられる。

キーワード：フーチング、破壊メカニズム、接合部、FEM 解析

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、特にフーチングには損傷度の高いものはなく、比較的軽微な損傷が数基に発生したのみであった。このことから、既設橋梁においてもフーチングは比較的大きい耐力を有していると考えられる。また、損傷したフーチング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。

一方、この地震による被害を契機に、下部構造に地震時保有水平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た。損傷の少なかったフーチング設計においても例外ではなく、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、フーチングの鉄筋量は従来の鉄筋量と比較して大幅に増大した。これは、フーチングの形状が複雑で破壊メカニズムや終局挙動が明確でないことから、ある程度の安全を見込んだ設計をする必要性があるためである^{1) 2)}。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、終局挙動を十分把握することが

必要である。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³⁾を対象として 2 次元弾塑性 FEM 解析を行い、その破壊メカニズムおよび終局挙動を最大耐力、変形状況、鉄筋のひずみ分布およびコンクリートのひずみ分布などにより検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体諸元

実験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・フーチング・杭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。実験ではフーチングを柱より先行破壊させる必要から、柱の終局耐力をフーチングの降伏耐力以上になるように設計している。フーチングの形状は全高・有効高を同一とし、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) を 0.75, 1.0 と変化させている。フーチング下面主鉄筋量は、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、また上面鉄筋量は下面鉄筋量の 1/3 を配筋している。No.3 試験体は

*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新構造技術(株)大阪支店 (正会員)

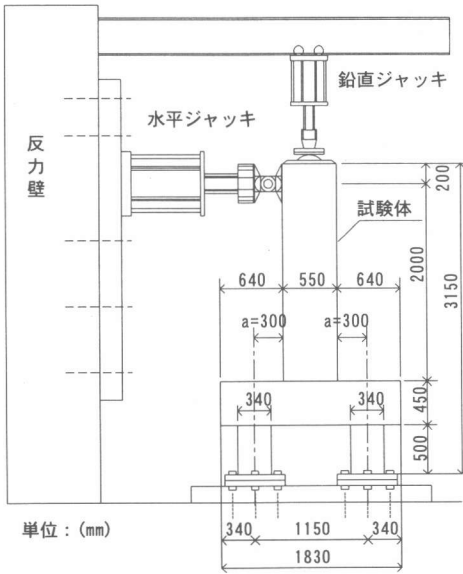


図-1 実験試験体構造図

鉄筋の補強効果を評価するために、No.1 試験体の上面鉄筋量を 1.5 倍に増加させた試験体である。

2. 2 実験方法および破壊状況

(1) 実験方法

図-1 に示すように、試験体は杭下端をH鋼により固定し、そのH鋼と試験体ベッドはPC鋼棒により緊張し固定している。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軸載荷である。このうち鉛直荷重は、上部工死荷重に相当する鉛直反力（上部工死荷重相当力 474kN）を柱天端に一定荷重として載荷している。なお、鉛直ジャッキは水平変形に追随し柱水平変形に対して常に鉛直方向を保つようにした。水平荷重載荷方法は、所定の鉛直荷重を保持した状態で柱基部から2000 mmの位置に単調漸増水平荷重を載荷している。

(2) 破壊状況

図-2, 3 に実験での損傷状況図を示す。No.1 試験体の耐力(最大荷重)は約 273kN, No.2 は約 370kN, No.3 は約 366kN であった。実験での試験体の破壊形態としては、No.1, No.3 試験体は最大荷重以降ならかな下降曲線を示し、最終的には引き抜き側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た。一方、No.2 は最大荷重後急激に耐力が低下し、最終的には柱・フーチング接合部と押し込み側杭

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 ($A_s=108.388\text{cm}^2$)		
フーチング	a/d	0.75	1.00	0.75
	全幅	1830mm	2030mm	1830mm
	全高	450mm		
	有効高	390mm		
鉄筋	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	φ 340		
	杭間隔	1150mm	1350mm	1150mm
	杭鉄筋量	10本×D25 ($A_s=50.67\text{cm}^2$)		
使用材料	コンクリート	柱 設計基準強度=27N/mm ²		
	フーチング・杭	" =24N/mm ²		
	鉄筋	SD345		

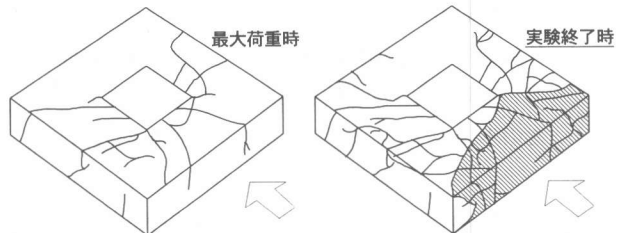


図-2 損傷状況 (No.1, 3)

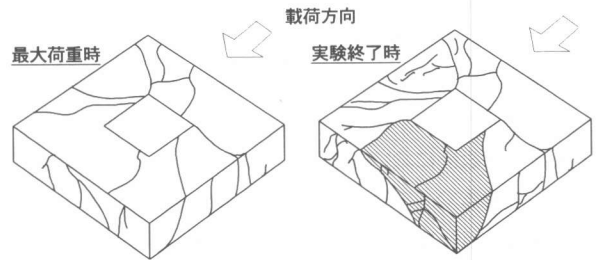


図-3 損傷状況 (No.2)

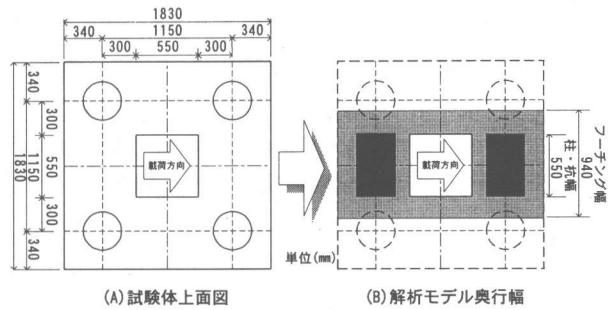
との圧縮領域のコンクリート抵抗面が押し抜き破壊を生じた。

3. 解析概要

3. 1 解析手法

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。しかしこの場合、鉄筋コンクリート構造物の非線形材料特性を考慮すると膨大な計算時間が必要となり、

また評価方法も複雑であると考えられる。一方、2次元モデルによる解析は、解析対象試験体のモデル化が大きな問題になるが適切なモデル化を行えば、その解析結果は簡易的に評価を行うことができ、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。そこで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試みた。3次元な奥行き幅の取り方を図-4に示す。実験結果においてフーチング上面に支配的な損傷が生じたので、フーチング部の有効幅を**b(柱幅)+d(フーチング有効高)=940mm**とし、この幅を今回の解析モデルでのフーチングの奥行き幅とした⁴⁾。また、柱および杭部は柱幅550mm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。



(A) 試験体上面図 (B) 解析モデル奥行き幅

図-4 2次元解析モデルにおける奥行き幅

表-2 コンクリート・鉄筋の材料特性

	弾性係数 $E_c(N/mm^2)$	圧縮強度 $f_c(N/mm^2)$	引張強度 $f_t(N/mm^2)$	ポアソン比
柱部	22000	28.03	2.11	0.2
フーチング・杭部	22000	25.28	1.64	0.2
	弾性係数 $E_s(N/mm^2)$	降伏点強度 $\sigma_{sy}(N/mm^2)$	降伏ひずみ (μ)	引張強度 $\sigma_{su}(N/mm^2)$
鉄筋	200000	350	1750	508

3.2 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圧縮による体積変化を考慮した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⁵⁾。また鉄筋にはVon-Misesの降伏基準を用いた。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、その後は応力が直線的に減少するモデルを用いた。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、引張強度に達した後 ϵ_t まで直線的に応力が減少するモデルとした。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-6に示す⁷⁾。このモデルは、ひび割れ幅が大きくなるにつれてせん断伝達係数を低減させることにより、コンクリートのせん断応力の負担率を減少させている。また、鉄筋の応力-ひずみモデルとしては、図-7に示すように鉄筋降伏強度に達した後のひずみ硬化を考慮したトリリニアモデルを用いた。

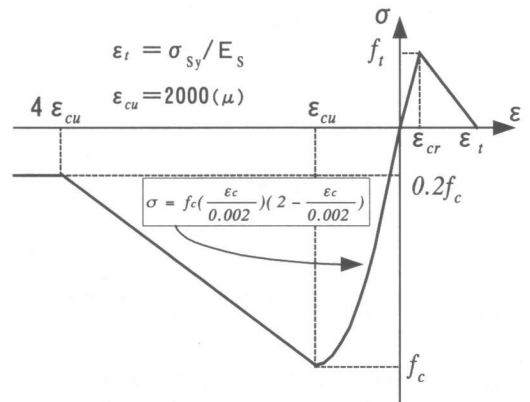


図-5 コンクリートの応力-ひずみモデル

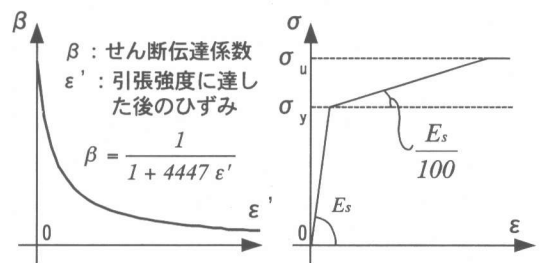


図-6 せん断伝達モデル 図-7 鉄筋の応力-ひずみモデル

4. 実験結果および解析結果

4.1 水平荷重-水平荷重載荷点変位関係

図-8に各試験体における水平荷重載荷点位置での荷重-水平変位関係を示す。ここでは、白抜きが解析結果、黒塗りが実験結果である。各試験体におい

で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。しかし、解析において実験での最大耐力付近で解が収束不能になったため、塑性変形が大きくなる下降域までの挙動を再現することはできなかった。この原因については現在検討中であるが、フーチングの破壊に支配的な応力が引張応力でありフーチングの引張鉄筋比が小さいことなどが影響していると考えられる。

4. 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。なお、収束不能直前の荷重を解析での最大耐力とした。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し、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、1.5~2.0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鉄筋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捉えていると考えられる。

4. 3 フーチング損傷状況の検討 (No.1 試験体)

(1) フーチングの変形

図-9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載荷方向に傾くとともに浮き上がりが生じていることがわかる。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、浮き上がり範囲は杭端部にまで達しているが、フーチング端部は両端とも大きな変位は見られない。この変形状態から、水平荷重増加に伴うフーチング・柱接合部の挙動が破壊に対して支配的であると考えられる。

(2) 柱軸方向鉄筋ひずみ

図-10に柱軸鉄筋(引張側)のひずみ分布を示す。ここでは引張ひずみを正、圧縮ひずみを負で表している。ひずみ分布状況は実験と解析で同じ傾向を示し、柱は柱基部を中心とした曲げ挙動を示し、試験体の最大荷重に達しても降伏ひずみまでには至っていないことが分かる。

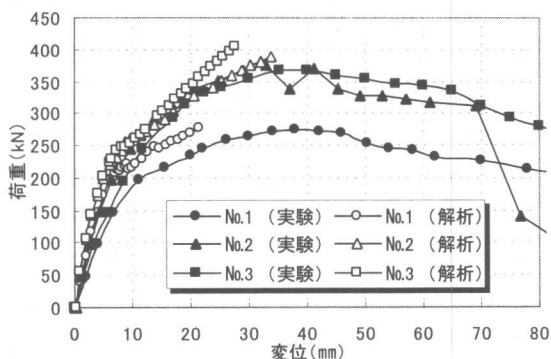


図-8 各試験体の柱天端での水平変位-荷重の関係

表-3 実験結果および解析結果耐力一覧

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	277.0	390.0	405.1
	フーチング鉄筋降伏荷重	233.8	286.3	295.1
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

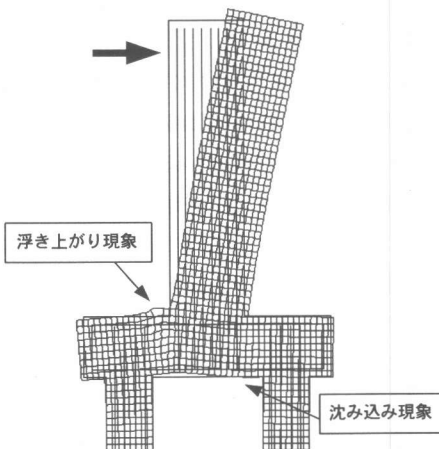


図-9 最大荷重時の変形図 (変形量 20倍)

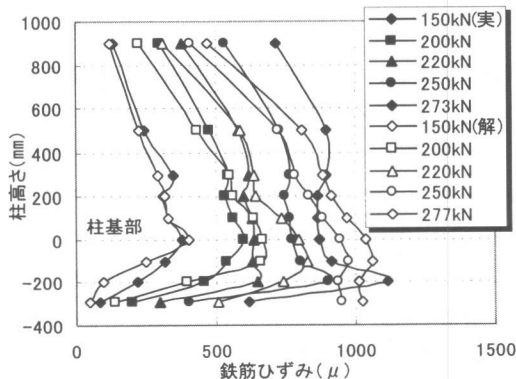


図-10 柱軸鉄筋(引張側)ひずみ分布

(3) フーチング上面鉄筋ひずみ

図-11にフーチング上面鉄筋の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。また、部分的に実験に対し解析でのひずみが大きいのが、これは2次元解析での杭のモデル化が3次元的な影響を考慮できていないため、鉄筋の応力分担が杭部で異なっているためであると考えられる。

(4) フーチング下面鉄筋ひずみ

図-12にフーチング下面鉄筋のひずみ分布を示す。下面では、押込み側の柱外縁部付近に大きなひずみが生じているが、実験・解析ともに、フーチング下面鉄筋が降伏ひずみに達するよりも先に上面鉄筋が降伏ひずみに達していた。このことから、試験体の降伏耐力はフーチング上面の損傷度によって決まると考えられる。

(5) フーチングのひずみ分布

図-13に解析における最大荷重付近(荷重271kN, 変位20mm)の最大主ひずみ分布を示す。実験では、図-2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、最終的には載荷側にコーン状の引き抜き破壊を生じた。解析においても載荷側のフーチング上面に大きな引張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から、この位置で大きなひび割れが生じると考えられる。

(6) 破壊メカニズム

以上の実験・解析結果より地震時におけるフーチング破壊メカニズムは、柱部の回転により柱・フーチング接合部上面載荷側に引張力が作用し、損傷は柱・フーチング接合部の載荷側近傍から生じると考えられる。そこで解析において得られた引き抜き側フーチング断面(図-13:フーチング照査断面)における水平方向ひずみ分布を図-14に示す。フーチング上面鉄筋降伏荷重以降、コンクリートに大きな引張ひずみが発生し、最大荷重時におけるひずみ分布状況ではフーチングの深さ方向2/3までが引張状態となっている。このため、終局はコンクリートの引張応力によって支配されていると考えられる。

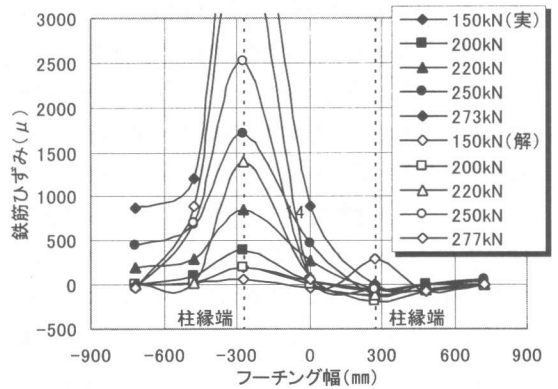


図-11 フーチング上面鉄筋ひずみ分布

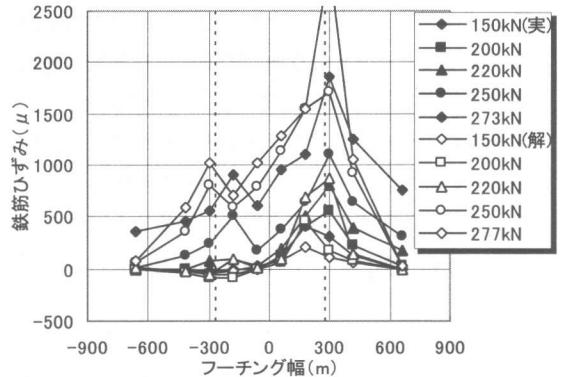


図-12 フーチング下面鉄筋ひずみ分布

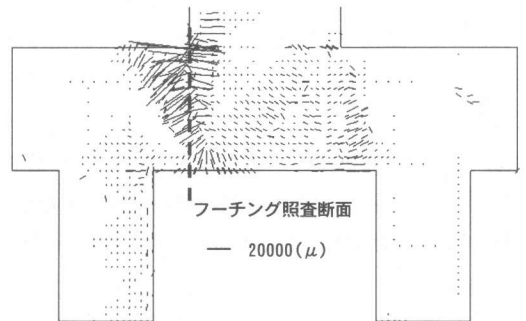


図-13 最大主ひずみ分布(No.1:荷重271kN, 変位20mm)

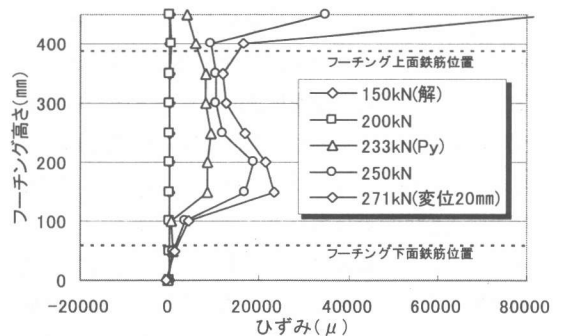


図-14 No.1 フーチング断面の水平方向ひずみ分布(解析値)

4. 4 各試験体の解析結果の比較

図-8および表-3よりせん断スパン比をパラメータとしたNo.2, 鉄筋量をパラメータとしたNo.3試験体の解析結果において実験と同程度の最大耐力の増加が見られた。図-15, 16に解析におけるNo.2, No.3での引き抜き側フーチング断面における水平方向ひずみ分布を示す。各試験体ともフーチング上面鉄筋が降伏するような荷重段階から大きな水平ひずみが生じていることが分かる。変位20mm時のひずみを比較すると、荷重がそれぞれ271kN, 325kN, 343kNと異なるにも関わらず分布状況や大きさに違いがみられずフーチング上面に大きなひずみが発生している。よって、フーチング耐力の増加は鉄筋量の増加による効果であると考えられる。このことは、No.2でも同様でせん断スパン比を大きくしたことにより設計上の鉄筋量が増加したためと考えられる。従って、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。

5. 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挙動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評価できている。
- ②フーチングの破壊形態は、道路橋示方書で想定しているような曲げやせん断破壊とは異なり、柱・フーチング接合部における挙動が支配的で、通常の場合、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2/3が引張応力となり、その区間におけるコンクリート引張力および鉄筋量が支配的な抵抗力となる。
- 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

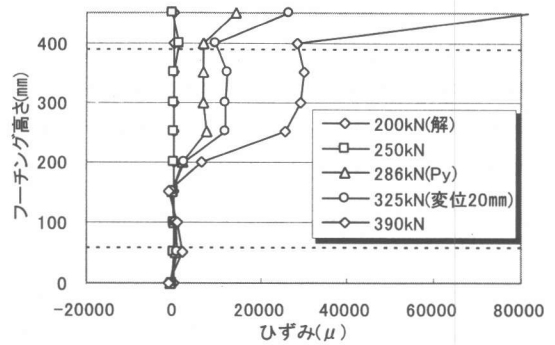


図-15 No.2 フーチング断面の水平方向ひずみ分布(解析値)

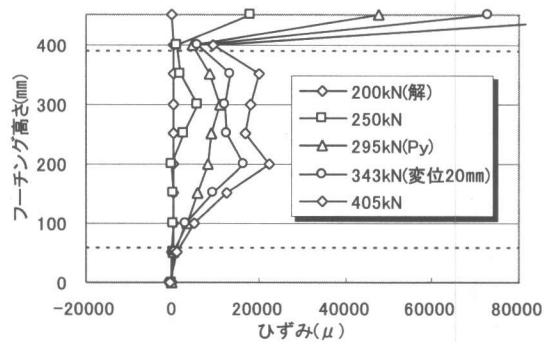


図-16 No.3 フーチング断面の水平方向ひずみ分布(解析値)

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, March-April, 1999
- 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, 1998.3
- 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, pp.1405-1412, 2000.3
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説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, 1885
- 6) 三木・二羽・濱田: コンクリート構造物の局所的圧縮破壊に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.151-156, 2000
- 7) J.G.Rots : Computational modeling of concrete fracture, Dissertation Delft Univ. of Technology, 1988