Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，2006

論文　既存ＲＣ学校構造物における基礎梁の静的水平載荷試験

壁谷澤 寿一[*1]・壁谷澤 寿海[*2]・真田 靖士[*3]・金 裕錫[*4]

要旨：建物―地盤相互作用において地盤の非線形性を考慮した解析的研究は多いが，実際のRC 構造物において大きな非線形レベルまでこの入力逸散効果の妥当性は検証されていない。本研究では既存の杭基礎 RC 構造物において基礎梁の静的漸増載荷実験を行い，基礎近傍地盤の Sway ばねの非線形性状を実験的に明らかにした。極限地盤反力により杭近傍地盤の非線形性を考慮した Winker ばねモデルによる解析結果は実験結果を大きく下回った。そこで解析結果に基礎の前面土圧および基礎底面の摩擦力を加算すると実験結果の最大耐力と概ね一致した。

キーワード：新潟県中越地震，余震観測，静的載荷試験，非線形性状，Winkler ばねモデル

1. 目的

近年，実際の構造物に入力する加速度は建物－地盤相互作用および支持条件の非線形効果によって自由地盤で観測された加速度よりも大幅に低減する可能性が指摘されており，建物の実効入力を評価する手法について様々な研究が行われている。しかし，いずれも解析的な研究あるいは地震被害を大局的にモデル化して評価した研究[例えば1)]であり，実際の構造物でこの支持条件の非線形効果の妥当性を実験的に検証している研究は少ない。

本研究では既存の RC 学校建築物を対象として基礎梁における静的水平載荷試験を行った。実際の構造物において入力データに N 値のみ用いる汎用性の高い質点系モデルの妥当性を検討するとともに，上部構造から伝達するせん断力による支持地盤の非線形応答性状を吟味する。

2. 既往の相互作用問題の解析手法

一般に建物－地盤相互作用を解析的に評価する場合，地盤と構造物を一体化してモデル化し周波数応答解析または時刻歴応答解析結果の検討・考察がなされている[2)]。杭基礎 RC 構造物の解析では主に以下の 2 つの手法によってモデル化される。

1) 質点系モデル　(Winkler ばねモデル)
2) 有限要素法解析　(FEM)

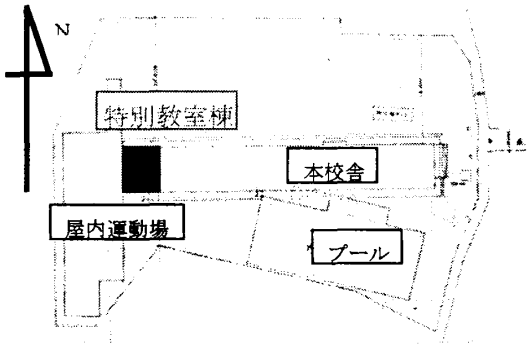
1)は地盤－建物相互作用効果を杭および近傍地盤の非線形性状に集約した汎用性が高い解析手法である。杭および杭近傍地盤の非線形性状は Chang の式[3)]または岸田らの手法[4)]を用いた研究が一般的である。このとき，大局的には基礎前面土圧および側面の摩擦抵抗力を計算し考慮可能であるが，中・大地震時の杭と杭近傍地盤，基礎底面と地盤との剥離の評価に関しては，解析モデル上の制約から考慮できていないのが現状である。これに対して，2)では基礎－地盤境界に引張応力を考慮しない復元力特性を仮定して基礎近傍での非線形性をモデル化した研究[5)]も行われているが，剥離モデルを付加した影響について具体的な検討は行われていない。また 2)は解析値と実験値の整合性を検討できるが，非線形地震応答における地盤－建物間の相互作用効果の理論的な解釈が困難である短所もある。

*1 東京大学大学院　工学系研究科建築学専攻　(正会員)
*2 東京大学　地震研究所　教授　(正会員)
*3 東京大学　地震研究所　助手　(正会員)
*4 東京大学　地震研究所　産学連携研究員　(正会員)

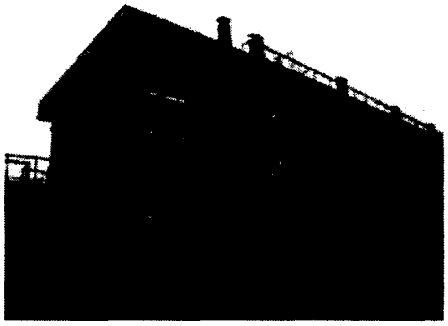
NII-Electronic Library Service

3. 実験対象構造物

静的漸増載荷実験は新潟県小千谷市字川井に所在する川井小学校で行った。小学校の本校舎は1973年に設計された杭基礎形式の2層鉄筋コンクリート(RC)構造物である。校舎の配置は図－1に示すように東西方向を桁行方向としており，周辺地域は田畑となっている。また，川井小学校は1975年に本校舎の東端に隣接する屋内運動場および特別教室棟の増築工事を行っており，本実験の対象構造物はこの特別教室棟とした（図－2)。特別教室棟は1スパン(5.4×8.3 m)の区画であり，東西方向の両端部でエキスパンションジョイントにより連結している。



図－1　川井小学校　配置図

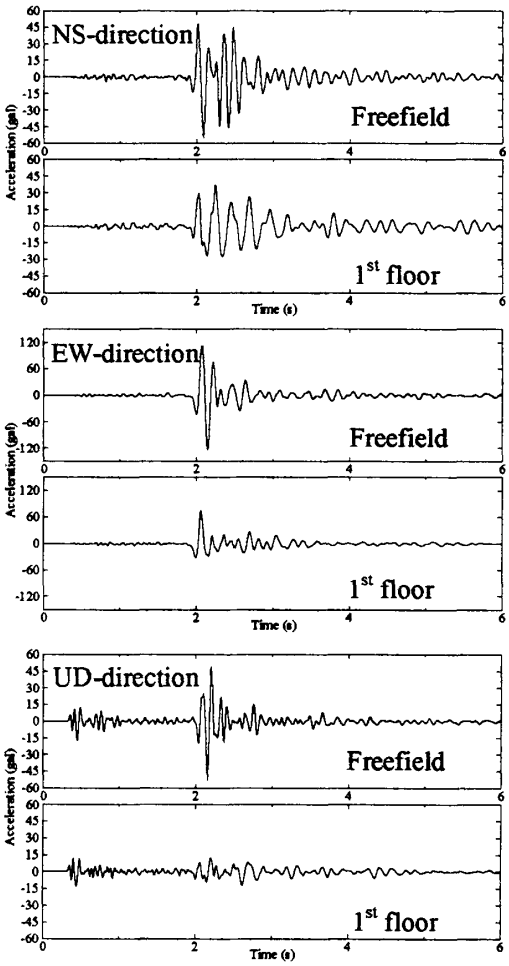


図－2　川井小学校　特別教室棟

4. 余震観測結果

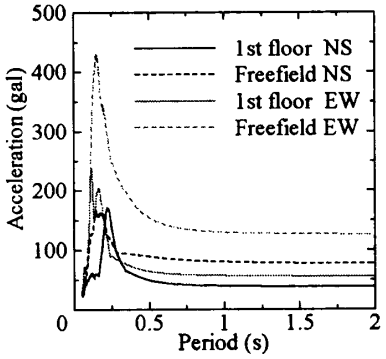
本小学校は2004年10月に発生した新潟県中越地震によって被災している。特別教室棟は基礎杭の損傷（杭の先端沈下またはせん断破壊)によって7~12cm程度構造物全体が沈下し，南北方向に傾斜していた。地震研究所災害部門は，地震発生直後の11月05日～28日にかけて被災後，特別教室棟および近傍のFree field (屋外プールのポンプ小屋)において余震観測を行った。最大余震である2004/11/19 06:03:43に観測された時刻歴加速度波形を図－3に示す。EW方向およびUD方向における加速度の最大応答値はFree fieldと特別教室棟1階で大きく異なり，NS方向ではあまり差異が見られなかった。

図－4にNSおよびEW方向の観測記録における加速度応答スペクトルを示す。スペクトルの大きさからEW方向の加速度記録が明らかに異なることがわかる。これは杭先端部分の沈下およびEW方向のせん断破壊によって地盤－構造物連成系(Sway および Rocking)の固有周期が大きく伸びたためであると考えられる。これに対して，NS方向では加速度応答スペクトルが最大150gal程度でほぼ等しく，若干ピーク時の固有周期が異なっている。これは弾性レベルでの相互作用による固有周期の違いによるものであり，杭の損傷はほとんどなかったと推察される。



図－3　余震観測波形

NII-Electronic Library Service



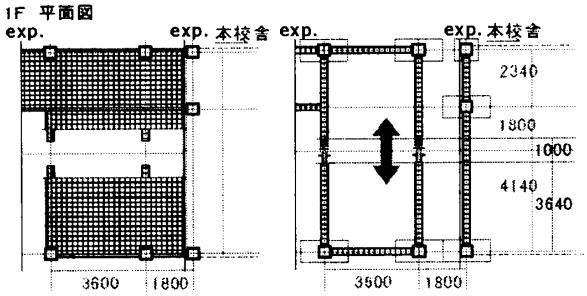
図－4　加速度応答スペクトル

5. 実験方法

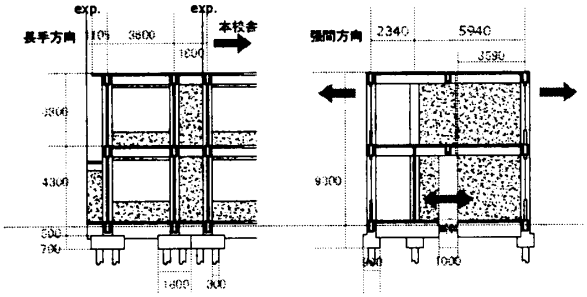
本実験では解析モデルでは考慮されていない杭基礎 RC 構造物における基礎－地盤間の剥離および底面の摩擦抵抗の影響を検討するため，杭が損傷していない NS 方向に載荷を行った。また，実験対象の地盤－構造物系は EW 方向に周期が伸びており，校舎の杭は EW 方向に非線形化していると推察されるため，NS 方向に静的載荷することにより上部構造と同様に連成系を 2 方向独立して解析する妥当性も検討する。

静的載荷実験における試験対象構造物の 1 階床平面図および断面図を**図—5**，**図－6** にそれぞれ示す。実験は南北方向の 2 本の基礎梁をスパン中間で 1m 切出し，その間隙部から梁端間の相対変形を拡大させることによって構造物基礎根入れ部に外力を与えた。なお上部構造の梁，床スラブ，耐震壁は全て直交方向に切断し，基礎部以外で摩擦および荷重を負担しないように計画した。また，特別教室棟と本校舎および渡り廊下との接合部(エキスパンションジョイント)は摩擦および荷重負担を避けるため，基礎以上で 5cm 程度の間隔を確認している。

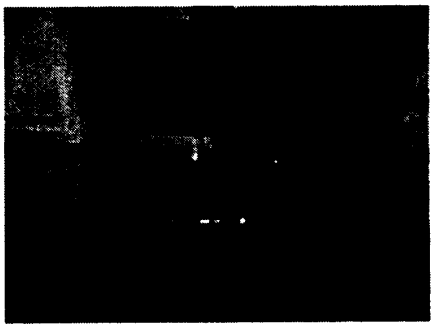
載荷部の詳細図を**図－7** に示す。基礎梁の両端部には鋼板で支圧力を受けている。また中間部には 100 ton センターホールジャッキ，ロードセル，ピン支持で建物を相互に反力として押し切り開くように載荷した。載荷方法は 1 方向繰返し載荷とし，載荷は小変位領域においては荷重制御，大変位領域においては変位制御によって載荷しました。変位は基礎梁端間，1 層床，2 層床，屋上における相対水平変形(載荷・直交方向)，本校舎および廊下に対する絶対水平変形，鉛直変形(Rocking 変形)の計 18ch を計測した。



図－5　特別教室棟　平面図



図－6　特別教室棟　断面図



図－7　載荷部　詳細図

表—1　基礎部材断面リスト

	B×D	主筋	杭
フーチング	900×1800 mm	D16@150	2本
	B×D	上端筋	下端筋
基礎梁	300×1000 mm	3D22	3D22
	杭径	杭長	主筋
中空 RC 杭	φ=200～300mm	8000 mm	8D10
上部重量	1F	2F	RF
	61.3 ton	52.6 ton	47.2 ton

NII-Electronic Library Service

表—2　N 値リスト

深度 (m)	土質	N 値	Vs(m/s)
-1.15	砂質シルト	3	155
-2.15	砂質シルト	4	162
-3.15	砂質シルト	8	180
-4.15	砂質シルト	10	186
-5.15	砂質シルト	7	176
-6.15	細砂	21	214
-7.15	細砂	27	230
-8.15	細砂	26	227

表－1 に特別教室棟の基礎部材断面リストおよび建物重量を示した。基礎杭は杭長 8m の中空遠心 RC 杭で，基礎フーチングあたり EW 方向に２本づつ，すなわち合計 8 本の杭が四隅に配置されている。基礎梁は下部 750 mm、基礎フーチング底面は 1200 mm 地中に埋まっている。

表—2 に特別教室棟の近傍地盤における N 値リストを示す。地下 5m 程度まで N 値が 10 以下の非常に脆弱な砂質シルトであり，5~8m までは N 値 が 20 程度の砂質土となっている。次節で解析モデルにおいて土のパラメータを定めるために必要なせん断波速度 Vs (m/s) は N 値および地盤種別から今井式（式(1)）[2] より推定した。

6. 解析方法

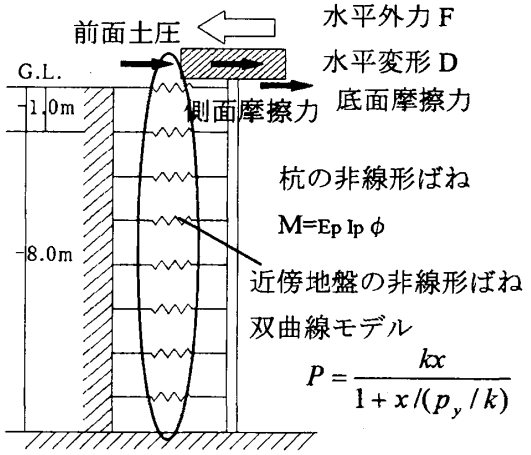
6.1 解析モデル

本研究における解析モデルを図－8 に示す。解析モデルは地震応答解析に対して汎用性の高い Winkler ばね型とし，杭近傍地盤の非線形性を考慮した。杭体は曲げを考慮した梁要素でモデル化し，杭下端は鉛直方向固定とした。地盤の分割数は N 値リストと等しい 8 とし，ばね接続点間で梁要素は 1 個とした。また，前面土圧および摩擦による抵抗力を考慮する。杭近傍地盤の履歴は双曲線モデル[6] とし，密度 γ は 1.7 (ton/m^3) と仮定した。RC 杭のモーメント－曲率関係は降伏耐力と原点を結んだ Bilinear モデルとし，降伏後の剛性は初期剛性の 1%とした。本解析では地震時の基礎に作用する外力とそれに対する基礎の変形に相当する値に実験結果を変換した。すなわち，実験結果の変形 (基礎梁端間)を 1/2 倍し，載荷荷重を 2 倍してプロットする。

6.2 極限地盤反力

杭基礎構造物の地盤反力—変位関係の非線形性は双曲線モデルであらわされ，弾性部分の傾きに相当する地盤反力係数と漸近する最大耐力である極限地盤反力により形状が決定する。

地盤反力係数は杭の前後の土を考慮した式(2)により求めた。なお表層の砂質シルトについては標準貫入試験 N 値より地盤の変形係数 Es を求め，地盤のポアソン比は 0.3 とした。本研究では杭近傍地盤の反力は岸田らの提案した手法[4] にしたがって，式(3)より極限地盤反力を算定した。



図－8　解析モデル

今井式　砂質シルト　$Vs = 131\,N^{0.153}$　(1)

細砂　$Vs = 87.8N^{0.292}$

$$kB = 1.3\frac{E_s}{1-\nu_s^2}\sqrt[12]{\frac{E_S B^4}{E_P I_P}}\ (E_S = 16N(kg/cm^2)) \quad (2)$$

B：杭径 $E_P I_P$: 杭曲げ剛性

$$p_y = F_\phi \gamma z \quad (3)$$

$$(F_\phi = \frac{\cos(\frac{\pi}{4}-\frac{\phi}{2})}{\cos(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2})}\frac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\exp\{(\frac{3}{2}\pi-\phi)\tan\phi\}-K_A)$$

$$K_A = \tan^2(\frac{\pi}{4}-\frac{\phi}{2}), K_0 = 0.5 \quad (4)$$

$$\phi\ (°) = \sqrt{8(N-4)}+25\ (N>4) \quad (5)$$

NII-Electronic Library Service

$$P_W = [0.5K_P\gamma Z_f^{\ 2} + K_W\delta(DL - Z_f)] \times B \qquad (6)$$

$$P_f = K_A \bullet 0.5\gamma DL^2 L \tan\delta \times 2$$

K_P: 受動土圧係数 K_W: 横地盤ばね係数

B, L : 基礎幅 DL : 根入れ深さ

Rankine の主働土圧係数 Ka，静止土圧係数 K_0 は式(4)により計算し，砂の内部摩擦角 ϕ は大崎等によって提案された実験式（式(5)）[4]を用いて算出した。また表層については ϕ=25° とした。

6.3 土圧および摩擦力

基礎前面土圧および基礎側面の摩擦力は建築基礎構造設計指針[3]に基づいて計算した (式(6))。また，一般的には杭基礎 RC 構造物の設計において，土と隙間が生じる可能性があるため，基礎フーチング底面の摩擦力を考慮しないが[7]，本研究では上部構造の重量から摩擦係数 μ=0.5 としたときの基礎底面摩擦力を計算した。

7. 実験結果

7.1 実験結果と解析結果の考察

実験および解析結果における基礎の水平せん断力ー変形関係を図ー9 に示す。解析結果は杭および杭近傍地盤のみの負担するせん断力，基礎フーチング前面土圧および側面摩擦を考慮した水平抵抗力，これに基礎底面での摩擦抵抗力を加算した結果を示す。

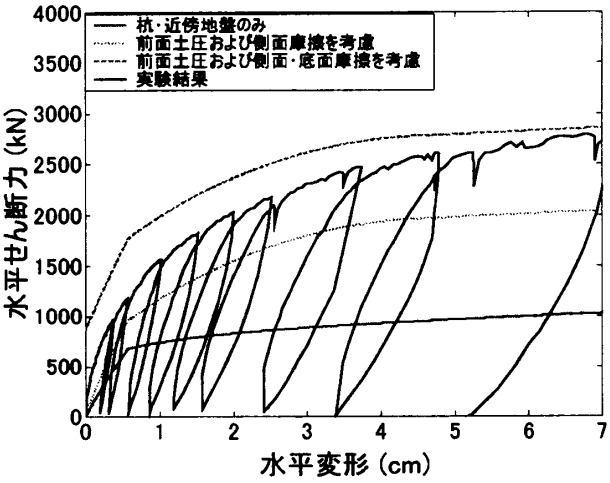
実験結果は初期剛性および非線形化後の最大耐力において杭および杭近傍地盤のみから計算される値よりかなり大きく，最終的に耐力は 2.5 倍程度になった。これは低層の杭基礎 RC 構造物によく見られ，基礎にくらべて杭があまり大きくないため，直接基礎と同様に基礎根入れ部の抵抗が比較的大きく作用したためと考えられる。基礎前面の受働土圧および側面の摩擦力を加算した解析結果では水平変形に対する耐力の増加は実験結果と近似するものの，初期剛性および最大耐力は実験結果をやや下回った。

この差異が実際の水平抵抗力によるものであれば基礎底面の摩擦力と考えられ，その他には基礎の回転または直交方向の変形にせん断力が寄与している可能性が考えられる。

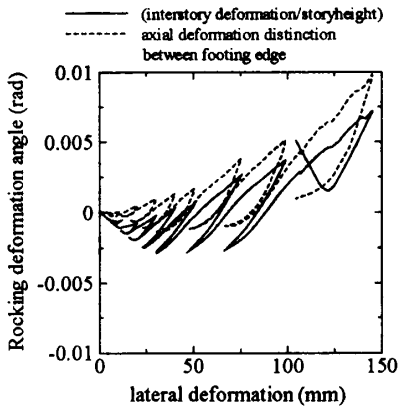
実験結果における非線形化後のせん断耐力は基礎底面の摩擦力を考慮した解析結果に徐々に漸近する結果となった。しかしながら，本解析モデルでは弾性レベルの剛性・耐力の推定できなかった。これは直接基礎と同様の基礎底面における地盤の非線形化を考慮していないためであり，この弾性挙動を把握するには杭基礎における地盤の剛性を含めたパイルドラフトの挙動を解析でモデル化する必要がある。

7.2 Rocking 変形

実験結果における基礎の水平変形に対する Rocking 変形角の推移を図ー10 に示す。Rocking 変形角は 2 層床と 1 層床の相対変形の差異を階高で除した値と基礎端部の鉛直変形の差異を基礎幅で除した値をそれぞれプロットした。

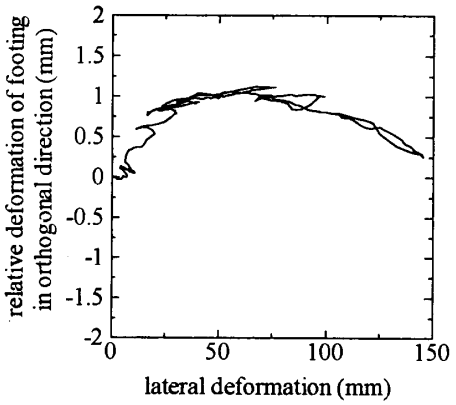


図ー9　水平せん断力—変形関係



図ー10　Rocking 変形

NII-Electronic Library Service



図－11　基礎の載荷直交(EW)方向変形

Rocking 変形は非線形化が進むにつれて徐々に上昇しているものの，最大で 1%程度であった。したがって，基礎の回転変形は水平(Sway)変形に比べて微小であり，せん断力の寄与は極めて小さかったと判断される。

7.3 載荷直交(EW)方向変形

実験結果における基礎の載荷方向の変形に対する直交(EW)方向の変形の推移を図－11 に示す。弾性変形レベルでは直交方向変形は徐々に増加し，その後載荷方向が非線形化すると徐々に減少する結果となった。余震観測の結果から直交方向に杭がかなり損傷していることが推測されるにも関わらず，直交方向の基礎変形は最大で 1mm 程度であった。この実験結果からかなり大きな非線形レベルまで杭基礎構造物を 2 次元的に解析する妥当性が示された。

8 まとめ

本研究は既存の杭基礎 RC 構造物に対して基礎梁の静的載荷試験および余震観測を行い，以下の知見を得た。

(1) 新潟中越地震により沈下した特別教室棟において余震観測を行い，近傍自由地盤との記録を比較したところ，杭基礎が損傷し EW 方向のみ大きく非線形化していたことがわかった。

(2) 既存の杭基礎 RC 構造物において基礎梁の静的水平載荷試験を行い，基礎スウェイの非線形応答性状を実験的に明らかにした。

(3) 非線形性に極限地盤反力を考慮した Winkler ばねモデルによる解析結果と実験結果を比較したところ，杭および近傍地盤による負担せん断力を大きく上回った。

(4) 解析結果に基礎前面の受働土圧および基礎の底面摩擦力を加算したせん断力によって実験結果の最大せん断耐力を概ね推定することができた。

(5) 初期剛性および弾性レベルの実験結果の推定には直接基礎と同様に底面の地盤の水平抵抗を考慮した評価方法が必要である。

(6) 載荷直交方向には杭が損傷しているにも関わらずほとんど変形しなかった。したがって，かなり大きな非線形レベルまで杭基礎構造物の 2 次元解析する妥当性が示された。

謝辞

本研究を行うに際して小千谷市教育委員会には多大なご協力を頂きました。なお，本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 B（代表者壁谷澤寿海，課題番号 16360272）により実施された。記して謝意を表します。

参考文献

1) Yasuhiro. H, Ikuo. T: Soil-Structure Interaction Effects on Building Response in Recent Earthquakes, Proceedings 3rd UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction, Mar.2004
2) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，1996.3
3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10
4) 岸田英明，中井正一：地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗，日本建築学会論文報告集，pp.41-53,1979.7
5) 電力中央研究所：鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化（その３），電力中央研究所報告 U02019，2003.1
6) 田蔵隆,広瀬利光,清水勝美,横田治彦,佐藤正義：地盤の非線形応答特性に関する研究，清水建設研究報告第 47 号，pp25-43，1988.4
7) 岸田英明，大和真一，中井正一：基礎の根入れを考慮したくいの水平抵抗，建築技術，pp147-163，1979.1

NII-Electronic Library Service