

[建築構造]

阪神・淡路大震災における建築基礎・杭の被害分析

—某事務所ビルの基礎被災調査・復旧—

亀井 功 河辺 美穂
 (本社 設計本部設計第12部) (本社 設計本部設計第12部)
 秋野 矩之

概 要

阪神・淡路大震災における建築物基礎の被害の実状について明らかにし、今後の基礎の耐震設計・施工法へ反映させることが重要である。基礎の被災調査は、基礎が地中に埋設されていて調査作業に困難な面が多く、基礎全体の詳細な調査は無理であり、データも少ない。ここに示す被災調査の事例は、上部構造の損傷は比較的軽微であり、継続使用するために、杭基礎の掘り出し調査を行い、これに基づき復旧工事を行っている。基礎の被災調査により、杭頭部での損傷状態を明らかにし、さらに、上部構造と杭基礎の被災状況について分析した。また、復旧の検討および実施について示した。

1. はじめに

阪神・淡路大震災における構造物基礎の被災状況は、被災基礎の掘り出し調査により次第に明らかにされてきている。しかし、これまでも震災報告で指摘されていることであるが、上部構造の場合に比べ、基礎の被災調査は、土中に埋没しているため数段困難であり、限られた建物しか調査がされておらず調査件数も少ないのが実状である。さらに、市街地での基礎の掘り出し調査では、周辺に建物が近接しており、調査箇所が制約され、また、基礎の支持機能を損なうことなく調査するため調査箇所が限定される。建物中央部での調査はスラブを壊して掘削する必要があり、実施が困難である。さらに、杭基礎の場合は、杭頭部の調査は容易であるが深部での目視の調査は困難である。以上のことなどから、基礎の被災調査はデータ数が少ないばかりでなく、各データは、調査対象の基礎全体を必ずしも正確に把握し得ない点があることに留意する必要がある。その意味で、ここに示す調査事例は、調査内容が比較的充実していて、破損基礎の復旧実施までを入念に検討しており、今後の耐震検討に貢献できると考えている。

2. 被害の概要

前述のように基礎に関する被災調査事例は必ずしも多くないが、これまでの被災調査結果および文献^{1)~3)}に基づき、基礎の被災の特徴を概括する。

(1) 地盤の液状化 埋立地盤・人工島(ポートアイランド、六甲アイランド)のかなりの部分で液状化現象が見られた。しかし、新潟地震のような甚大な建物被害は少

なかった。ただし、護岸部に関しては、護岸が海側に側方流動し、それに引きずられて建物も傾斜・水平移動を生じている。杭基礎にあつては、杭が地盤に引きずられた形で杭の頭部または中間部で損傷している場合が多い。この側方流動の影響は護岸から50m以上に及ぶものが多々見られた。側方流動のない内陸部での液状化の場合は、ライフラインに被害があつたものの建物については直接基礎、杭基礎ともそれほど甚大な被害はなかつた。これは、液状化発生により深部地盤での加速度が地表ではかなり減衰したことによる。すなわち、液状化により地盤の水平抵抗が減少するが、同時に水平外力も小さくなったためと考えられる。ただし、杭基礎にあつては、液状化による揺すり込みにより地盤が沈下し、地盤と建物の間に段差が生じた。また、地盤改良の効果が大きかつたことが挙げられている。側方流動を生じた場所で杭を深層混合による格子状の壁で囲むことにより流動化を防いだ例が発表されているが、当社の液状化防止のために開発したRC連壁による格子状基礎も有効な対応工法と言えよう。

(2) 液状化地盤の側方流動と同じ様な被害が丘陵地帯の傾斜地を造成した地域で見られた。建物を含む傾斜地盤のスベリや建物近傍の擁壁の変位に伴う支持地盤の移動により建物の沈下・傾斜が生じている。

(3) 地下室のない建物で基礎梁の根入れが小さいものに被害が多く、地下室や基礎の根入れが大きい建物の被害は少なかつたが、これは、地震時に根入れ部での地盤の受動抵抗が有効であつたことを示している。

(4) 上部構造の被害が比較的小さく、杭の損傷が大きいもの。逆に、上部構造の被害が大きく、基礎がほとんど損傷していないものが何例も見られた。これは、地盤からの外力が建物に伝わる段階で杭が先に損傷すれば、建物に

伝わる外力は小さくなり、建物は維持される。杭が外力に耐え、その外力に上部構造が耐えきれなくなると上部が損傷するという上下構造の強弱関係依存性を示している。ただし、上部構造も基礎構造も同時に損傷している例も示されている。

(5) 場所打ち杭の被害例で、杭頭部に引っ張り、せん断き裂、圧壊が生じ、鉄筋の外周コンクリートが剥離するものが多々見られた。この原因の一つとして、杭のコンクリート打設時に、コンクリートの回りが悪くて劣化した部分が杭頭外周部に残ったことが考えられる。

(6) GL-70mまで掘削中の地中壁の泥水壁面が激震にもかかわらず崩壊しなかった。溝中に泥水を満たしたただけのあまり強固とは思えない支持機構であるが、意外に安定性が優れていることが立証された。

基礎の被災について全体総括するにはまだ時間を要するが、より多くの調査データを集積し、早急に今後の基礎の設計・施工に反映することが望まれる。

3. 建物・地盤概要

本建物は兵庫県南部地震により基礎が被災したことが被害調査により判明したため、基礎機能の原状復旧をはかるべく復旧工事を実施したものであり、以下、その被害調査、復旧計画、復旧工事の概要についてまとめる。

3.1 建物概要

所在地 兵庫県西宮市
 用途 事務所
 竣工 昭和60年11月
 階数 地上6階 地下なし 塔屋2階
 高さ 軒高 21.70m 建物高さ 30.15m
 構造概要 上部構造：SRC造，基礎：杭基礎（GL-16.0以深の砂礫層を支持層とする），使用杭はPHC杭（A種），埋込杭工法
 設計基準 新耐震設計基準による。ただし，基礎の地震時水平力に対する検討はされていない。構造概要を Fig. 1 に示す。

3.2 地盤概要

所在地は標高3.5mの沖積低地であり、地質構成は以下の通りである。各層は水平方向の連続性が良く、GL-9.0m付近を境に沖積層と洪積層に大別される。

①埋土（GL-1.3m以浅）。②最上部砂層（GL-1.3~7.5m）部分的に礫混じり砂層となるが、大半は粒度配合の良い細中砂より成る。③上部粘性土層（GL-7.5~9.0m）砂分を多く混入する粘性土で軟質である。④中部礫・砂互層（GL-9.0~16.0m）砂礫と砂の互層，相対密度「中位~密実」。⑤下部砂礫層（GL-16.0~20m）六甲花崗岩類および有馬層群起源の硬質礫が密集する密実な地層である（本建物の支持層）。⑥最下部礫・砂・粘土互層（GL-20m以深，層厚10m以上）土質は砂質粘土，シルト質砂，砂，砂礫と複雑に変化する。粘性土は過圧密と考えられる。

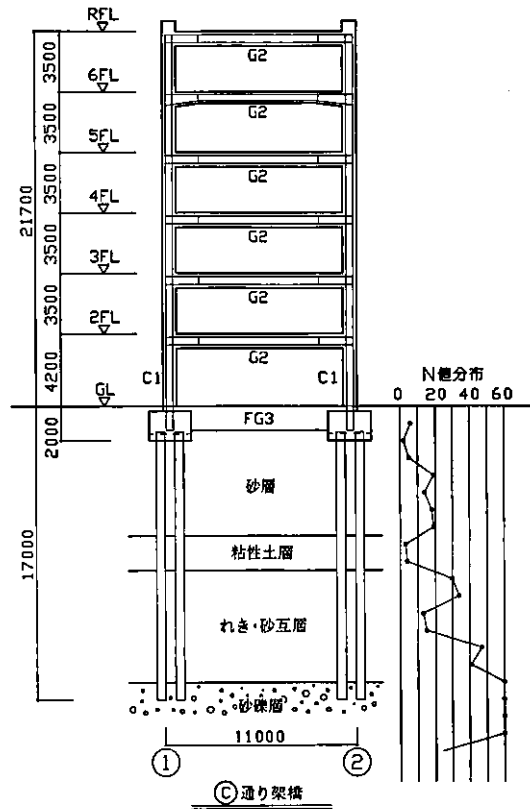


Fig. 1 構造概要図
Profile of the Structure

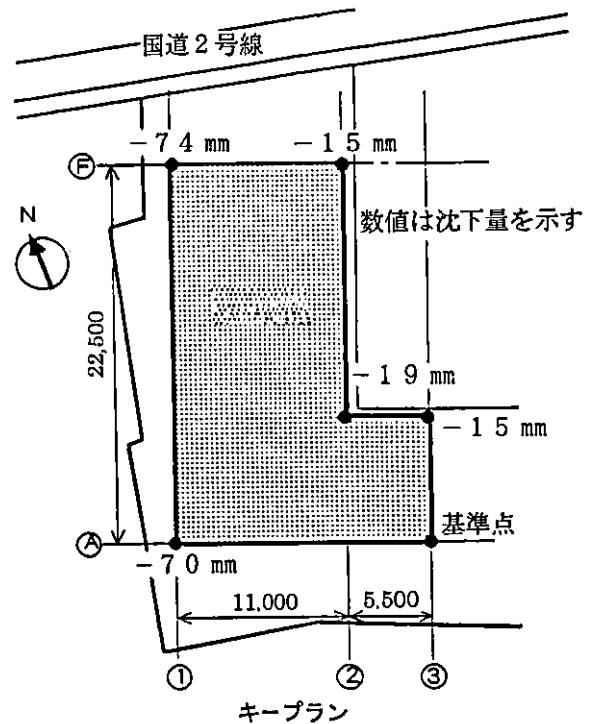


Fig. 2 不同沈下測定結果
Result of Measurement of
Differential Settlement

(3) D-2基礎-南杭 Photo 1やFig. 4のスケッチに見られるように斜めと縦方向のき裂が数箇所発生している。また、コンクリートが数箇所剥離し、その内の一つでPC鋼棒が露呈しているが切断されており、その端部は引っ張り破断した状態にある。破断した鉄筋は3.5cm程ラップしており、いったん上に引き上げられた後、下方に押し下げられたものと見られる。

(4) D-2基礎-中杭 Photo 1およびFig. 4のスケッチに見られるように杭頭部の北側の一部のコンクリートが剥離しPC鋼棒が露呈している。PC鋼棒の1箇所D-2-南杭で見られたと同様引っ張り破断した状態にあった。

(5) D-2基礎-北杭 Photo 1およびFig. 4のスケッチに見られるように杭頭部の両側(北,南)の一部が剥離している。また縦および斜めき裂が発生している。

4.3 調査結果について

上部構造の損傷は軽微であるが、基礎杭が杭頭部分において圧縮とせん断で圧壊している。建物の短辺方向(東西方向)において、杭頭圧壊による基礎不同沈下が生じ、このために建物全体が傾斜したものと判断される。

杭体のPC鋼棒は、基礎浮き上がりによる引張力で破断し、以降の揺さぶりで戻り、圧壊とともに沈下したものと考えられる。杭の損傷範囲は、フーチング下端から1m強の範囲にあり、以深での損傷はなさそうである。CCDカメラでの観察結果でもそのような結果が得られている。杭頭部の損傷は、杭頭固定度が高いことによる杭頭部への応力集中のためと考えられる。

本建物の場合、設計当時の一般的状況から、地震時水平力に対する特別な配慮はされておらず、設計想定以上の地震荷重が作用したと相まって被害が大きくなったものと推察される。

調査結果および基礎設計条件等から、本調査杭以外の杭も同様の損傷状況にあるものと推察され、基礎全体として鉛直支持力および水平抵抗力の機能が期待できない程度に被災しているものと考えられ、全面的な基礎復旧が必要であると判断される。

5. 被害の分析

5.1 上部構造損傷度から予想される応答水平せん断力の検討

短辺方向を対象に実施した代表的架構の弾塑性漸増載荷解析結果をFig. 5に示した。図中には各層柱梁の曲げひびわれと降伏発生点を印した。解析による荷重-変形-部材損傷関係と被災調査による損傷度との対応性について検討することにより上部構造の最大応答せん断力を予想すると、1階の水平せん断力係数でおおむね $C_b = 0.25 \sim 0.38$ となる。ここで、被災損傷度(部材損傷度ランクII)に対応する弾塑性領域として、概略の柱梁曲げひびわれ発生時の平均的荷重ステップ(Fig. 5の第1層でA点)を下限とし、柱梁曲げ降伏発生時の平均的荷重ステップ

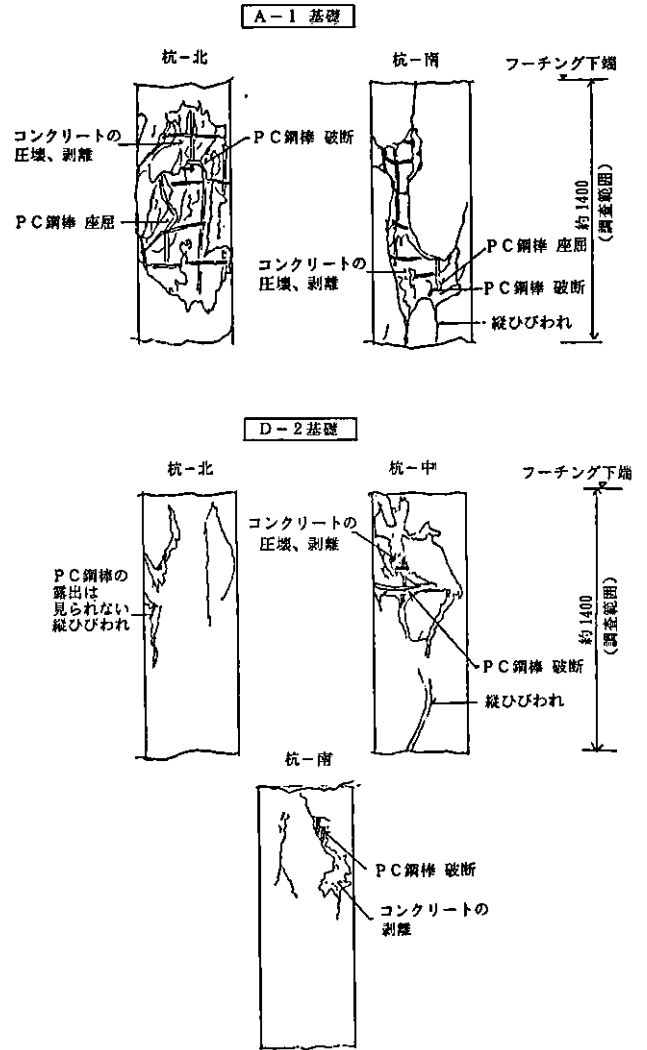


Fig. 4 杭被災状況スケッチ
Sketch of Damaged Piles

(Fig. 5の第1層でB点)に至るまでの中間荷重ステップを上限とするゾーンを想定した。

5.2 上部構造推定応答地震荷重に対する杭の検討

地震時の杭の発生応力を推定し、杭の終局強度と比較検討するために5.1の検討をもとに1階の水平せん断力係数 $C_b = 0.25 \sim 0.38$ 相当時の杭体応力を杭地盤連成モデルによる応力解析より求め、使用杭の終局軸力-曲げ耐力曲線と比較した結果をFig. 6に示す。図中のDfは、フーチングの根入れ深さを示す。なお、軸力は、 $C_b = 0.25, 0.38$ の各々の地震時変動範囲を示す。

簡易検討のため、本結果では引張-曲げ破壊をするように見られるが以下の理由により、実際には圧縮-せん断破壊が支配的ではないかと考えられる。

- 1) 引張側杭の水平剛性低下により圧縮側杭への応力集中が生じ、特に、短辺方向は1スパン架構に近くこの傾向が顕著である。
- 2) 鉛直地震動も以上の傾向に拍車をかけるものである。

5.3 杭終局耐力時の基礎水平せん断力の検討

杭全体の終局水平耐力を、略算的に杭の長期直圧に対する終局曲げ耐力時杭頭水平せん断力の和として求めた結果は、1階の水平せん断力係数で $C_b=0.31$ に相当する。

5.4 被害状況の分析

当地域（震度VI～VII）の最大地動加速度は約600gal程度と推定されるが、このような地動に対して、5.1と5.3の対応関係および5.2による地震時杭状態の予想から本建物の挙動はおおむね以下のように推測される。

地動東西成分（建物短辺方向）の大きな第1波の入力過程において浮き上がり側杭はP C鋼棒が引張り破断し耐力低下すると同時に、圧縮側杭への応力集中が生じ圧縮・せん断破壊が発生。

短辺方向は基本的に1スパンの架構のため揺りもどしの過程で杭破壊が全体に及ぶ。

杭全体の破壊進行と同時に、杭頭水平耐力が低下することにより上部構造への入力がかットされ、上部架構はこれ以上の応答を受けることなく軽微なひびわれ程度の損傷に留まったが、杭の圧壊による基礎沈下によって建物全体が傾斜。

被害状況の分析については、5.2および5.3の検討に加え、今後、部材レベル弾塑性地盤応答解析などの詳細な解析によって、より明確にされるものと考えられる。

6. 復旧概要

6.1 復旧目的

基礎復旧については、建築主、設計者と協議の上、以下の復旧計画を確認の上実施した。

- 1) 被災前の構造耐力と同等以上の耐力まで復旧する。
- 2) 建物の傾斜については現状の通りとする。

6.2 杭の検討

建物の復旧計画のために、杭が健全であるとし、基礎復旧方法に関連し基礎の根入れ条件を変えた場合について検討を行う。

原設計時地震荷重に対する杭の検討

(1) 基礎の根入れ $D_f=2.0$ mの場合 設計用地震荷重時の基礎の根入れによる地震力の低減を考慮した場合の杭頭水平せん断力に対し、杭地盤連成モデルによる応力解析より杭体応力を求め (Fig.7参照)、杭の短期耐力検討を行った結果は以下の通り。

軸力と曲げモーメントに対して N.G (Fig.6参照)
せん断力に対して O.K

特に、建物短辺方向（東西方向）の場合は、隅柱のみでなく中柱も含めた全杭において曲げ耐力を上回る。

なお、杭頭水平せん断力算定においては、建物傾斜による付加せん断力を考慮している。

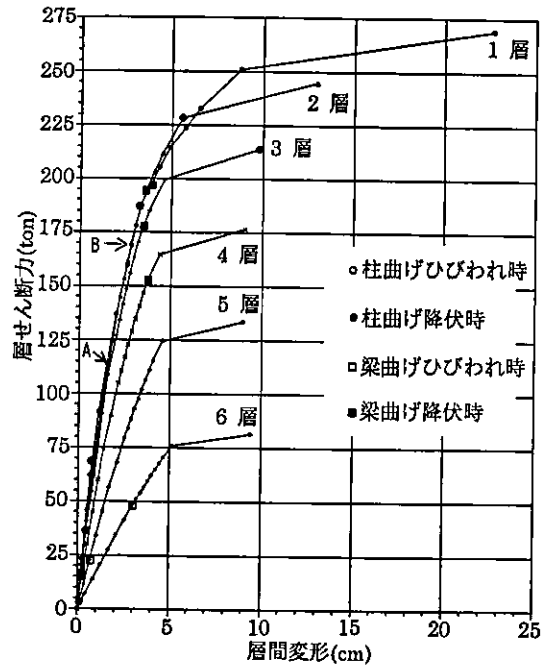


Fig. 5 上部架構損傷解析
Result of Structural Analysis of Damaged upper Structure

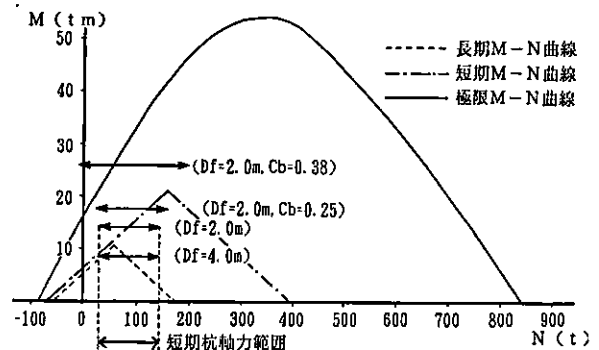


Fig. 6 杭の耐力検討
Comparison of Manufacturer's Strength and Calculated Load of Pile

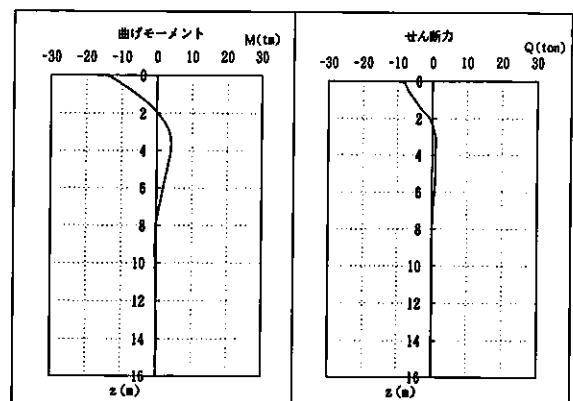


Fig. 7 杭応力分布
Distribution of Bending and Shear Stress of Pile

(2) 基礎の根入れDf=4.0 mの場合 杭頭損傷部を基礎フーチングと一体にコンクリートで固める復旧方法の場合、この効果を基礎の根入れ深さの増加とみなし、ここでは、仮に基礎の根入れDf=4.0 mとした場合の同様な検討を行った結果は以下の通り

軸力と曲げモーメントに対して O.K (Fig. 6 参照)
せん断力に対して O.K

6.3 復旧方法

基礎復旧方法については、工事に対する種々の制約条件の下、工期、信頼性、安全性、経済性等比較検討の結果、現在の基礎形式を変更しない方法として、「杭健全部を残し、杭損傷部を含む杭頭部全体を、基礎フーチング直下からコンクリートで巻き込み固定する方法」を採用することとした。具体的な復旧内容は以下の通りである。

1) 安全確保のために、原則として杭内部にモルタルを充填する。

2) 杭損傷部を含む杭頭部を固定するためのコンクリートは、ジェットグラウト工法によるコンクリート固結体の連続造成法によって築造する。コンクリート固結体の造成深さは、杭のひびわれ発生部分を含み、かつ、杭の水平抵抗力がより発揮できるよう地盤状況を考慮の上、6.2の検討結果をもとに、フーチング下端から2.0mとする。

3) コンクリート固結体の強度は、杭への伝達応力およびコンクリート固結体直下の地盤反力が生じたとした場合の支圧強度等を考慮して設定し、現場管理する。

4) 復旧工事は原則として基礎1箇所ずつ順次施工するものとし、かつ、工事中予想される基礎の支持力低下への安全対策として1階に鉛直プレースによる仮設補強を講じる。

基礎の復旧法概要をFig. 8に示す。コンクリート固結体造成状態をPhoto 2に示す。写真の赤い円マークはコンクリート固結体の設計造成範囲を示す。

7. おわりに

阪神大震災における基礎の被災の調査・復旧事例について示した。本事例を含む基礎の被災調査・復旧で感じたことであるが、上部構造に比べ基礎、特に杭基礎は被災調査が困難であり、杭の復旧についても制約が多い。したがって、基礎の基本的な耐震設計の考え方として、上部構造以上に、より耐震性能の余裕を確保するよう配慮することが望まれる。

なお、本被災調査・復旧工事は、本店工務部の辻 千広職員および本店建築設計、工務部の関係各位に依るもの

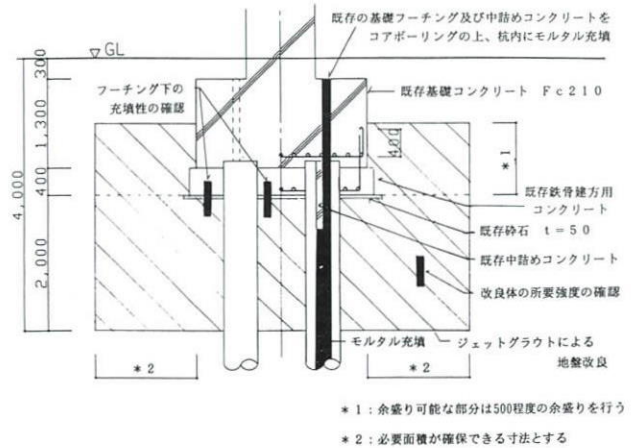


Fig. 8 基礎の復旧法概要 (一般部)
Method of Restoration on Pile



Photo 2 コンクリート固結体造成状態
Soil Improvement

であり、本報告をまとめるにあたり多大なるご協力を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大林組技術研究所:「兵庫県南部地震被害調査報告書」(1995.3)
- 2) 山肩邦男:兵庫県南部地震による建築基礎構造の被害, GBRC 82 [(財)日本建築総合試験所機関誌], p.13~35, (1996.4)
- 3) 風間 了:建築基礎構造, 理工総研報告特集号—1995 兵庫県南部地震調査—早稲田大学理工学総合研究センター ASTE, Vol.B1, p.115~145, (1996.1)