

11.1 はじめに

兵庫県南部地震において建築構造物、すなわち、建物は甚大な被害を受けた。殊に、人々は建物の中で生活を営んでおり、早朝に起きた地震ではほとんどの人が自宅におり、多くの建物が倒壊・大破したため、建物あるいは家具の下敷きになり、一瞬のうちに5500人を超える尊い命が奪われ、地震の後遺症で亡くなった方も含めると6300人を有に超える結果となった。

建物の被害の特に酷かった場所は、JRの須磨駅辺りから神戸市、芦屋市を横切り、JRの西宮駅に向かって、JRあるいは国道2号線に沿って幅約1～2kmの带状の地域である。ただ、地震に弱い地盤として臨海埋立地が一般にあげられているが、今回の地震では、ポートアイランド、六甲アイランドでの建築構造物の被害は意外にも軽かった。これは、埋立地ということで、慎重に設計・施工が行われたためだと思われる。ただ、地盤の液状化により建物と周辺地盤との間に大きな段差が生じ、生活をする上で必要となる水道、ガスの供給が断たれ、住民は不自由な生活を長期に亘り余儀なく強いられた。

なお、本調査報告書の母体は地盤工学会であるので、ここでは、建築基礎の被害調査に的を絞って解説を進めることにする。

11.2 調査方法

まず、本章を分担したワーキング・グループのメンバーは、

井上 豊（大阪大学工学部教授）

日下部 馨（神戸大学工学部教授）

である。ところで、兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造を問わずあらゆる構造種別の多くの建物が倒壊したり、または損傷を受けた。ただ、地上に出ている上部構造は、外観から目視によりある程度の損傷を見つけることができるが、建物の下部構造、すなわち、建築基礎、基礎梁、杭、地下壁等の被害については周囲の土を掘り起こさねば見つけることができない。ところで、大学の研究者等が他人の建物周囲を勝手に掘って、建築基礎の震害調査を行うことはできないので、当ワーキンググループでは、建築基礎の被害調査・復旧工事を行っている建設会社、建築設計事務所等に依頼して、被害調査の資料を提供して頂くことにした。もっとも、建物の所有者は、一部には国や地方自治体等の公共的なものもあるが、ほとんどの建物は民間企業や個人が所有しており、被害建物の調査結果を建物の実名をあげて公表すると、その所有者に迷惑を掛けることが多々ある。そこで、資料の収集には敢えて建物を特定しない代わりに、多くの資料を提供して頂くようお願いした。ここにあげた資料のみでは、被害の分析・解析を行うには十分とは云えないかもしれないが、一般的な被害例を示すだけでも、これからの建築基礎、とりわけ、杭基礎の耐震設計を考える上で有用な資料となるので、できるだけ多くの被害パターンを列挙するよう努めている。したがって、建物名称・場所については、詳しくは尋ねていないが、地盤の柱状図はできる限り提供していただくようお願いした。しかし、設計図書が行方不明となっているもの、被災度調査は行ったが設計には関与されていないもの等で、集まった柱状図は調査建物数の3分の1程度しかなかった。

今回提供頂いた杭基礎の被害例はほんの一部で、現実には建築基礎で、相当な被害を受けているものが多い筈である。ただ、調査をせずに取り壊したもの、調査はしたが公表されなかったもの等が沢山あるが、なかには被害に気付かずにそのまま使用されている建物も少なからずあるのではと思われる。建築基礎の被害調査は、周囲の地盤を掘り起こすことが必要であり、上部構造の外部からの観察・観測により建物の傾斜が確認されるものについてはともかく、例えば、杭が破断していても、基礎で大きな沈下が生じていなければ、被害に気付かず調査復旧対象から外されることになる。このような建物のないことを願う。

各建物の調査資料および写真は資料編に譲ることにし、ここでは、杭の種類（基礎形式）、建物構造・規模、建築基礎と上部構造の被害概要等をまとめ、表11-1に「調査建物および被害一覧表」として示す。さらに、地盤の柱状図は基礎の被害を検討する上で参考になるので、その有無についても一覧表に明示し、有る場合には資料編に載せているので、活用して頂ければ幸いである。

表11-1 調査建物および被害一覧表（その1）

資料 番号	基礎の被害概要	所在地	杭		建 物				周辺の地盤状態	写 真	柱 状 図	備 考
			種 類	径/長さ	構 造	階 数	用 途	被 害 状 況				
1	杭頭圧壊、鉄筋座屈	神戸市北区	P C 杭	φ300	R C	地上5	住 宅	上部構造の被害軽微 1/40傾斜	建物周辺のみ沈下	有		
2	杭頭圧壊	神戸市須磨区	P C 杭	φ500	S R C	地上12	住 宅	上部構造中破 1/30傾斜		有		
3	杭頭圧壊 杭頭クラック	神戸市中央区	P C 杭	φ350 ℓ=13m	R C	地上7	事務所	上部構造1/200傾斜	顕著な液状化はない	有		1972年施工
4	杭頭圧壊 杭頭亀裂	神戸市中央区 (人工島)	P C 杭		R C	地上4	消防署		液状化	有		
5	杭頭圧壊 縦クラック	神戸市東灘区 (人工島)	P C 杭	φ600 ℓ=38m	S	地上4	工 場	上部構造1/32傾斜	液状化、側方流動、 沈下	有		杭頭-2m縦クラック
6	杭頭破壊、爆裂破壊	神戸市東灘区	P H C 杭	φ500 ℓ=32m	S	地上3 26.6m	駅 舎	上部構造被害大、 解体。	液状化、側方流動 沈下あり	有	有	
7	杭頭圧壊	神戸市東灘区	P C 杭	φ350 ~450 ℓ=25m	R C	地上3	倉 庫	不同沈下により中破 梁端せん断ひび割れ	液状化、側方流動、 沈下	有	有	
8	杭頭圧壊 杭頭縦ひび割れ	神戸市東灘区	P H C 杭 C種	φ600 ℓ=11m	R C	地上7	共 同 住 宅	構造体中破 傾斜1/53, 沈下213mm		有		
9	杭頭圧壊	神戸市東灘区	P H C 杭 B種	φ600 ℓ=15m	R C	地上8	共 同 住 宅	構造体中破 傾斜1/64, 沈下281mm		有		
10	杭頭圧壊	神戸市東灘区	P C 杭 A種	φ450 ℓ=10m	S R C	地上11	寄宿舍	梁に曲げひび割れ 傾斜1/358		有		

表11-1 調査建物および被害一覧表（その2）

資料 番号	基礎の被害概要	所在地	杭		建 物				周辺の地盤状態	写真	柱状図	備 考
			種 類	径/長さ	構 造	階 数	用 途	被 害 状 況				
1 1	杭頭亀裂・杭頭破断	神戸市東灘区	P C 杭	φ350 ~ φ450	R C	地上6 地下1	工 場	上部構造の被害軽微	側方流動、沈下	有		埋立地
1 2	杭頭亀裂	神戸市東灘区	P C 杭		S	地上1	タンク	無被害	液状化、沈下	有		
1 3	杭頭曲げひび割れ、 ずれ	神戸市東灘区	P C 杭	φ250	R C 屋根S	地上2 地下1	体育館	上部構造被害なし	地すべり	有		フーチング下 900mm
1 4	杭中間部でひび割れ 幅1.0mm	神戸市中央区	場所打ち RC鋼管杭	φ1000 ~1700	S R C	地上10 地下1	ホール	上部構造建設中 杭施工後の被災	側方流動 沈下若干有り	有	有	沖積層と洪積層の境界 あたりで被害集中
1 5	基礎梁ひび割れ 杭頭部クラック	神戸市東灘区	場所打ち R C 杭	φ800 ~1800	S R C	地上10	住 宅 店 舗	上部構造中破		有	有	
1 6	杭頭・中間部にクラ ック	西宮市	P C 杭 埋め込み	φ350 ℓ=10m	R C	地上2	体育館	上部構造中破 柱の傾斜1/60	地すべり（傾斜部） 約10cmの地盤沈下	有	有	傾斜地
1 7	杭頭破壊 （鉄筋が露出）	神戸市東灘区	ペデスタ ル杭	φ510 ℓ=26m			サイロ			有	有	
1 8	杭頭の提灯座屈	神戸市東灘区	鋼管杭	φ508 ℓ=27m	S R C		サイロ		杭頭部は液状化、側 方流動により露頭	有	有	
1 9	杭頭座屈	神戸市東灘区 （人工島）	鋼管杭	φ508 ℓ=27m	S R C		サイロ		液状化、側方流動、 沈下	有		
2 0	鋼管杭が約1/10の曲 げ変形	神戸市中央区 （人工島）	鋼管杭 打ち込み	φ600 ℓ=40m	S	地上1	倉 庫	上部構造大破 1/30傾斜	側方流動、水平で 1.2m移動、液状化	有	有	

表11-1 調査建物および被害一覧表（その3）

資料 番号	基礎の被害概要	所在地	杭		建 物				周辺の地盤状態	写真	柱 状 図	備 考
			種 類	径/長さ	構 造	階 数	用 途	被 害 状 況				
21	基礎底と杭頭との間で上下のずれ	神戸市灘区	鋼管杭		S	地上2	研修所	地中梁の曲げ亀裂 建物傾斜		有		
22	基礎フーチングにひび割れ	西宮市	場所打ち RC杭	φ1200 ℓ=7m	S	地上2	体育館	上部構造被害なし 床組みの鉄骨に座屈	基礎梁上面に地割れ	有		斜面地のため、基礎梁に角度があり被害集中
23	フーチングの破壊 杭頭部かけ	神戸市東灘区	場所打ち RC杭	φ1500 ℓ=18m	SRC	地上8	共同住宅	傾斜・沈下なし 非構造壁のひび割れ 程度で無被害		有		
24	フーチングの破壊 杭頭部のコンクリート欠け	神戸市灘区	場所打ち RC杭	φ1500 ℓ=15m	SRC	地上11	共同住宅	構造体中破 傾斜1/217, 沈下70mm		有		
25	護岸移動するが土の流動なし	神戸市中央区	杭基礎	φ1500 ℓ=32m	S	地上14	ホテル	地盤改良範囲は液状化無し	液状化、側方流動、沈下	有	有	杭周囲の深層混合処理による改良壁使用
26	建物の移動20cm 杭頭部損傷なし	神戸市中央区	PHC, パデスタル	φ450 φ500 ℓ=17m	RC	地上7	事務所	上部構造ひび割れ軽微、海側へ20cm移動	護岸崩壊、沈下・側方流動大	有		
27	杭基礎損傷なし	神戸市中央区	場所打ち RC杭	φ1000 φ1100 ℓ=14m	SRC ・RC	地上12	住宅	上部構造は中間層(4F)で崩壊		有	有	
28	直接基礎の不等沈下	神戸市中央区	ベタ基礎	GL-1.5m	RC	地上5	店舗	上部構造1/130 傾斜 ジャッキアップ		有		
29	液状化による地盤沈下、杭中間部で破断	西宮市	PC杭	φ400 ℓ=14m	RC	地上6	共同住宅	上部構造(1階)に亀裂	水路擁壁崩壊 液状化	有	有	杭頭より4～5mの所で杭が破損
30	護岸の移動による土砂の流出	芦屋市潮見町	直接基礎		RC	地上5	老人ホーム	約2.4度の傾斜 約1m不等沈下	液状化、側方流動、沈下	有	有	ジャッキアップによる沈下修正

表11-1 調査建物および被害一覧表（その4）

資料 番号	基礎の被害概要	所在地	杭		建 物				周辺の地盤状態	写 真	柱 状 図	備 考
			種 類	径/長さ	構 造	階 数	用 途	被 害 状 況				
3 1	地盤の液状化による 戸建て住宅の傾斜	芦屋市潮見町	直接基礎		W	地上2	住 宅	上部構造の損傷無し	液状化	有	有	
3 2	地盤の液状化による タウンハウスの傾斜	芦屋市潮見町	直接基礎		R C	地上3	住 宅	上部構造の損傷無し	液状化	有		
3 3	地中梁・耐圧盤にひ び割れ	神戸市中央区	ベタ基礎		S R C	地上9	事務所	柱の一部にひび割れ 傾斜1/222, 沈下315		有		
3 4	擁壁下部側溝圧壊、 エキスパンション部割れ	芦屋市	なし		なし					有		擁壁W=300mm
3 5	杭・直接基礎併用 基礎沈下	神戸市垂水区	P C杭・ 直接基礎	φ350 ℓ=9m	S	地上3	住 宅	直接基礎部で25cmの 沈下				
3 6												
3 7												
3 8												
3 9												
4 0												

11.3 調査結果

建築基礎（特に、杭基礎）の被害および側方流動・液状化等による建物被害で集められた資料を元に被害例を分類し、以下に示す。

(a) PC杭・HPC杭の被害

PC杭・HPC杭の主な被害パターンとしては、

- ① 杭頭破断（資料番号11）
- ② 杭頭圧壊・爆裂破壊（1～10）
- ③ 杭中間部の水平破断・横ずれ（12, 13, 16）
- ④ 杭の縦ひび割れ（5, 8）
- ⑤ 基礎底・杭頭間の鉄筋引抜き（1）

等があげられる。

① 杭頭破断の被害は、杭周の地盤が側方流動等で横方向に移動し、地盤に拘束された杭と基礎底との相関変位が大きくなり、杭が引きちぎられる状態になったものである（写真1）。地盤が横にずれると杭には非常に大きな力が作用するので、側方流動が生じないように護岸や擁壁の設計には慎重を期すべきである。② 杭頭圧壊・爆裂破壊は、地盤の液状化や沈下等により、杭周地盤の横方向抵抗が無くなり、杭頭で想定以上の曲げモーメント、せん断力が作用して被害が出たものである（写真2）。した

がって、液状化を起こす可能性のある場所・位置での杭の設計には、横方向の抵抗の無い、露出したものとして地震荷重に耐えるように対策を講じておくべきである。写真2には、杭にボルトの様なものが打ち込まれているが、これは非破壊試験を行う準備をしているところで、このボルトをハンマーで叩き反射波を測定することにより杭の損傷・亀裂を調べるものである。③ 杭中間部の水平破断は、大きな引張力が急激に作用するとき、または、地層の変わり目で、地震時に大きなせん断力が杭に作用して生じる（写真3）。現在



写真1 杭頭破断

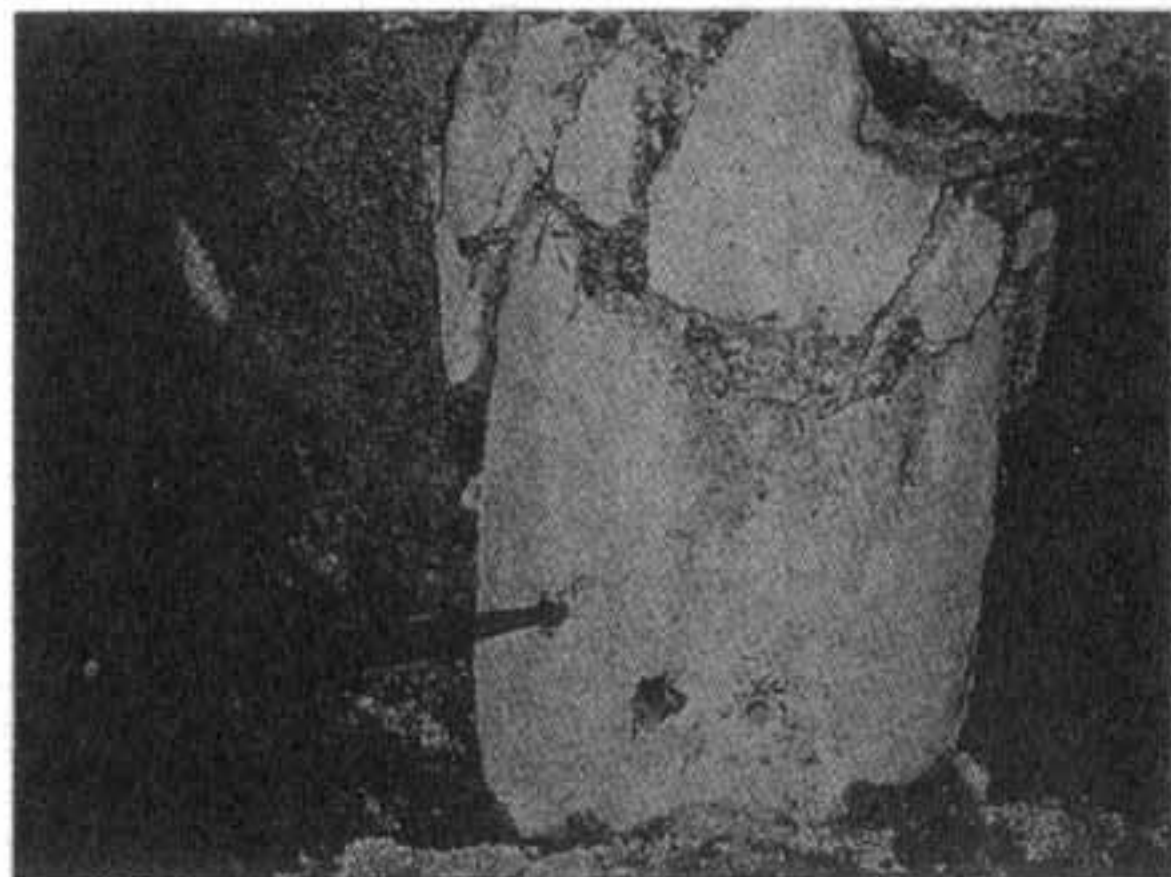


写真2 杭頭圧壊

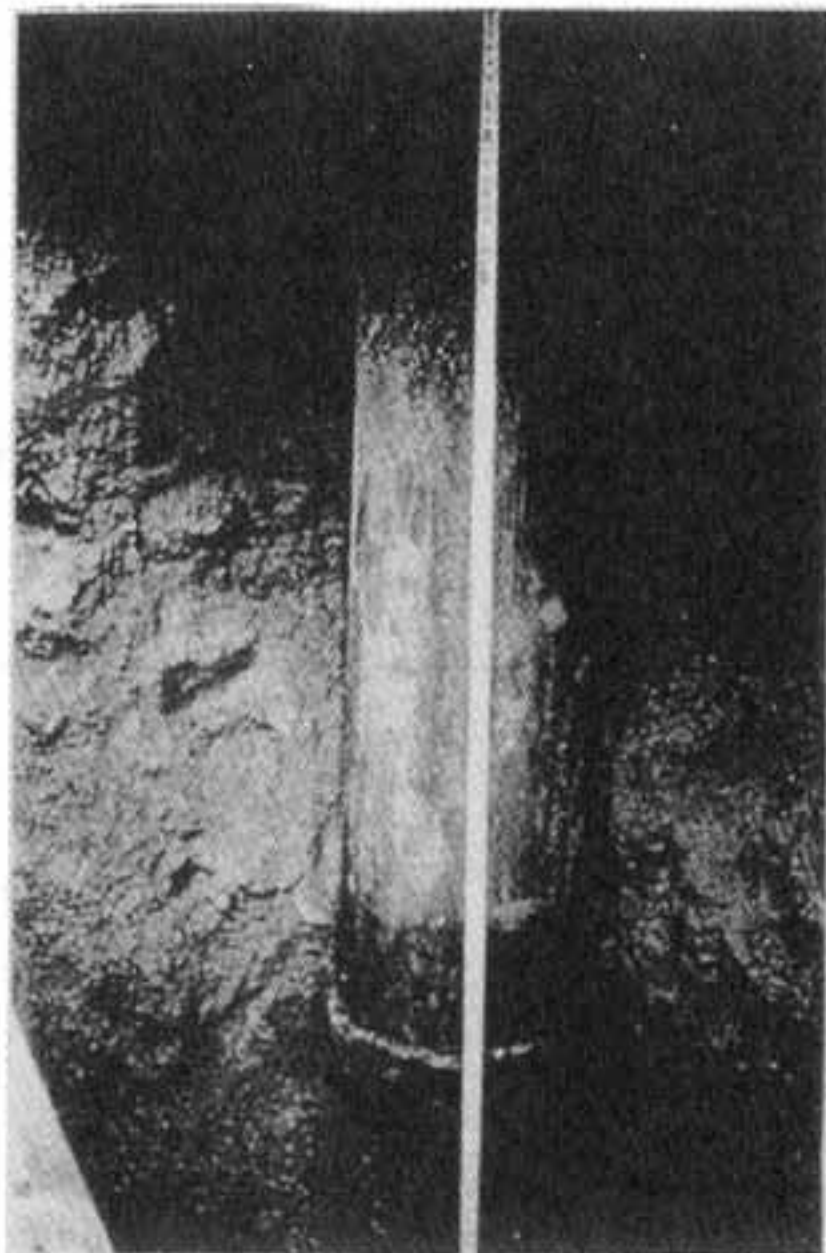


写真3 杭中間部の水平破断・横ずれ



写真4 杭の縦ひび割れ

のところ、建築基礎構造の設計では、地盤インピーダンス（波動の伝播速度と密度の積）の急激に変化する位置での杭の設計については何も規定されていない。しかし、かかる場所では杭に応力集中が起こる可能性があるため、この分野の研究が大切である。④ 杭の縦ひび割れの被害は、杭頭での破壊が進展したのではないかと考えられる（写真4）が、はっきりした理由は判らない。⑤ 基礎底・杭頭間の鉄筋の引抜き被害は、基礎底で浮き上がりが生じたとき、コンクリートから鉄筋の引き抜きが起こり、そのまま残ったものと考えられる。

（b） 場所打ちRC杭・ペデスタル杭

場所打ちRC杭およびペデスタル杭の被害例はあまり見つかっていない。これは被害が少ないのか、十分な調査が行われていないのか不明である。今回判った被害例からは、

① 杭中間部の水平亀裂（14，15）

② 杭頭圧壊・鉄筋座屈（17）

等があげられる。

① 杭中間部の水平亀裂は、場所打ちRC杭を杭軸に沿ってボーリングし、ボアホールカメラで観察して発見した損傷である（写真5）。これは杭工事が終わり、上部構造の工事に取り掛ったところで地震に遭遇したもので、杭頭ではほとんど無荷重状態での被害である。② 杭頭圧壊・鉄筋座屈は、ペデスタル杭に想定していた以上の地震水平力および軸力が作用して生じたものである（写真6）。ここでは、地盤の液状化および側方流動が起こっており、杭の被害を助長したものと考えられる。

（c） 鋼管杭

鋼管杭の主な被害パターンとしては、

① 杭頭提灯座屈（18）

② 杭頭局部座屈（19）

③ 曲げ変形による傾斜（20）

④ 基礎底と杭頭の上下のずれ（21）

等があげられる。

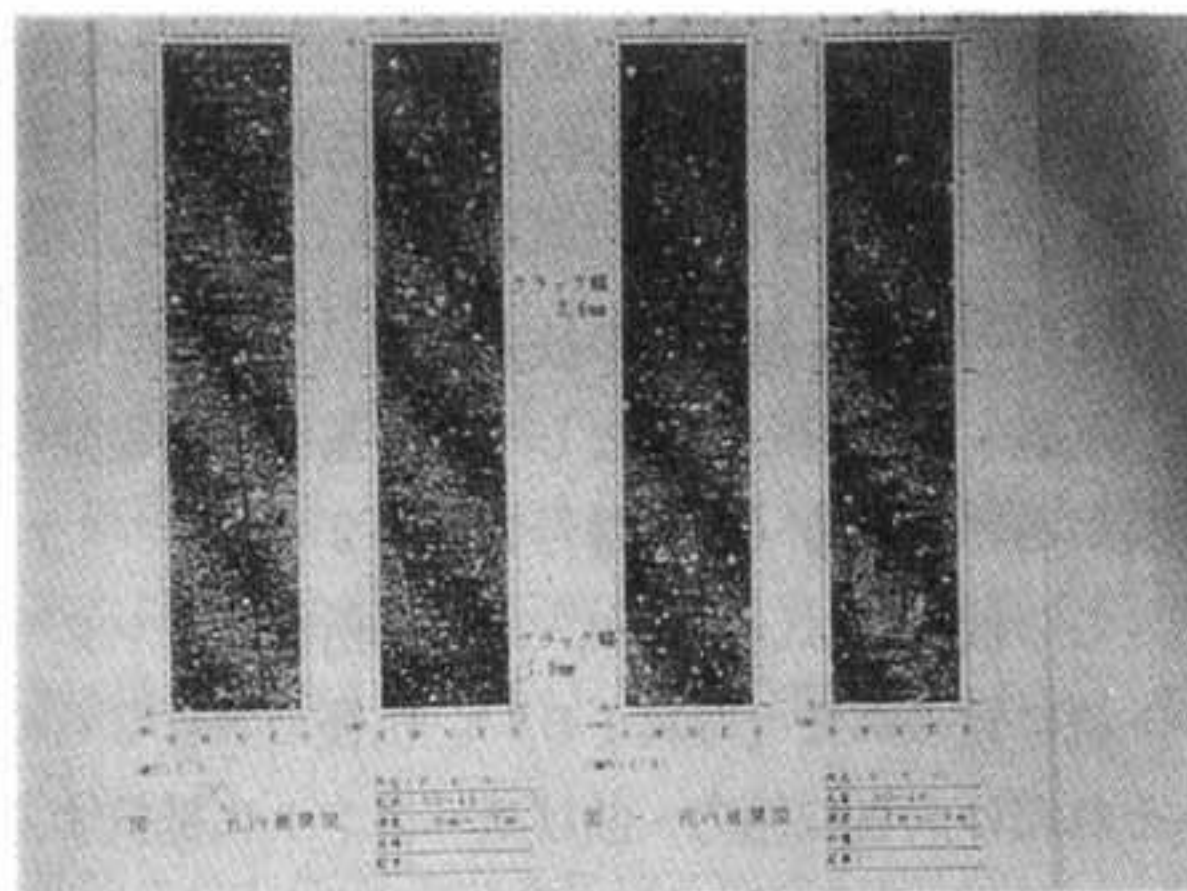


写真5 ボアホールカメラによるひび割れ

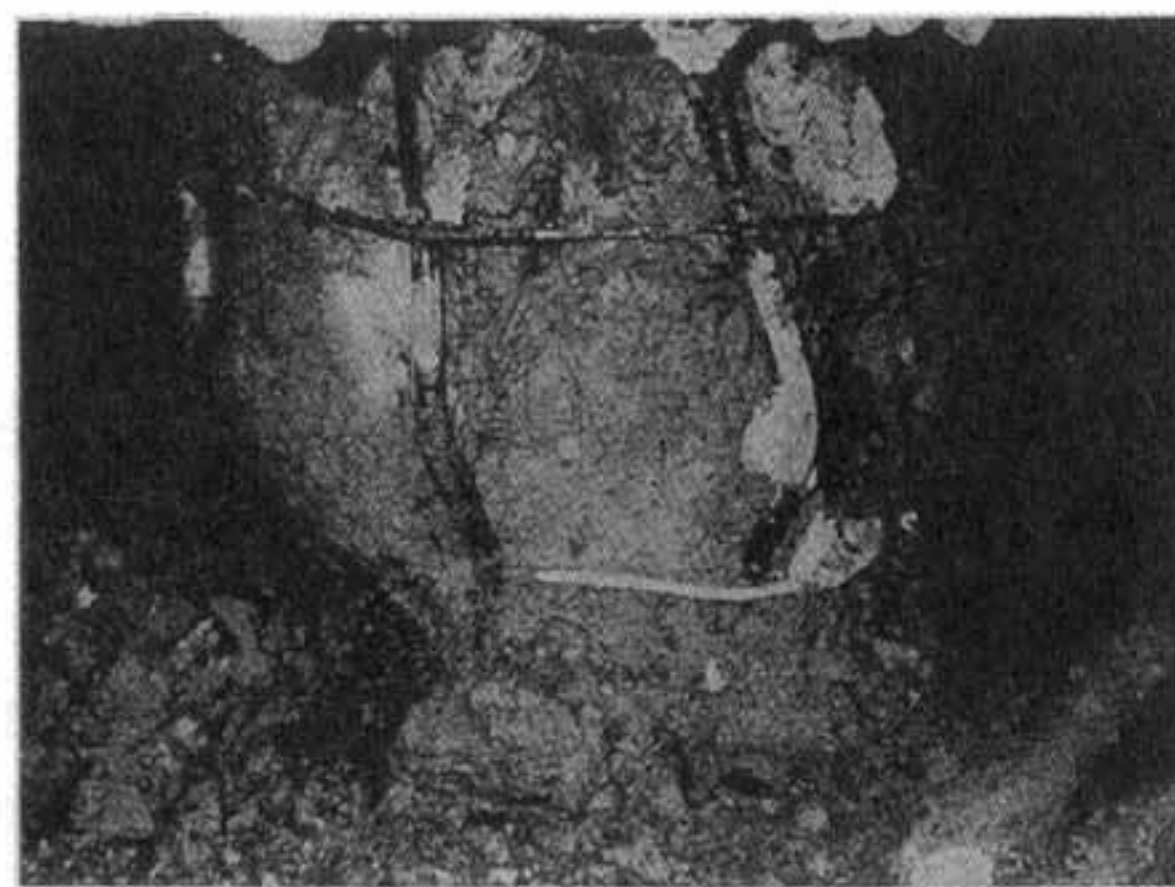


写真6 杭頭圧壊・鉄筋座屈

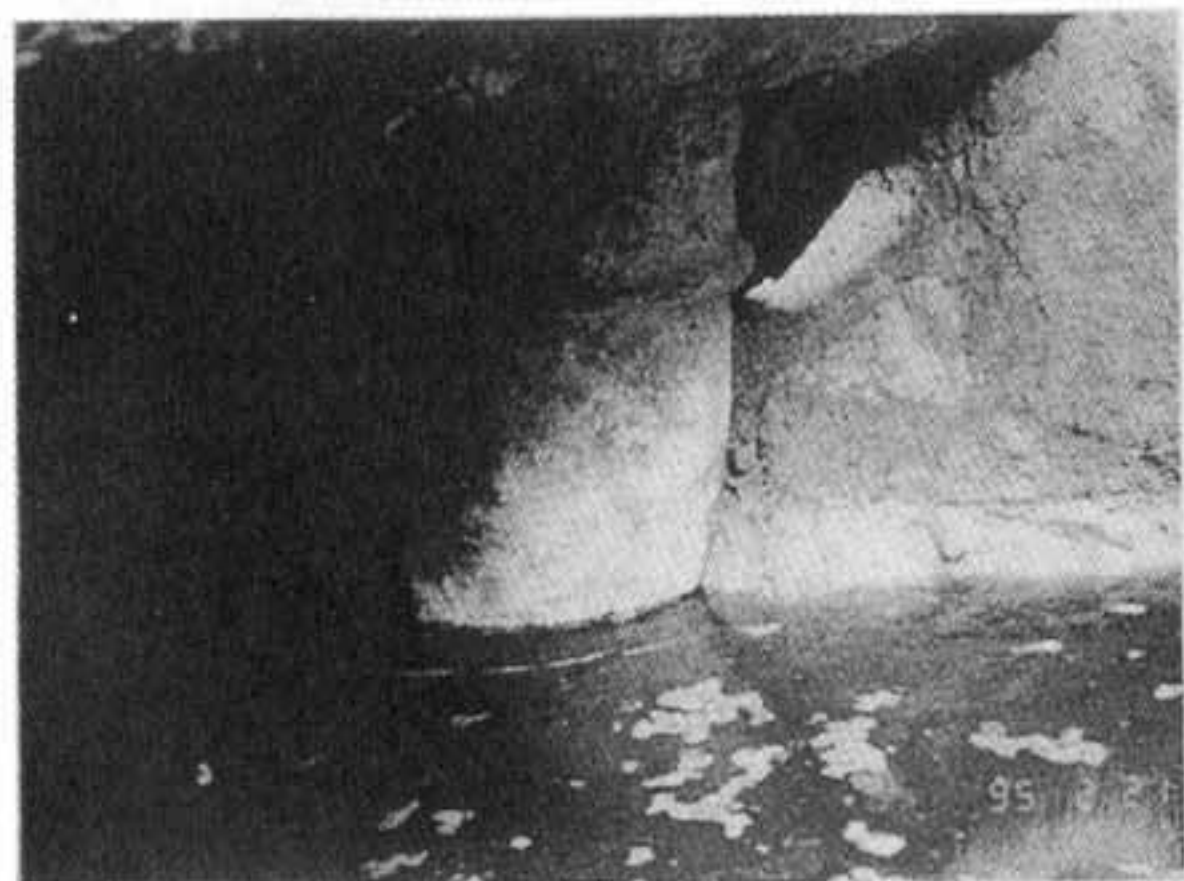


写真7 杭頭提灯座屈

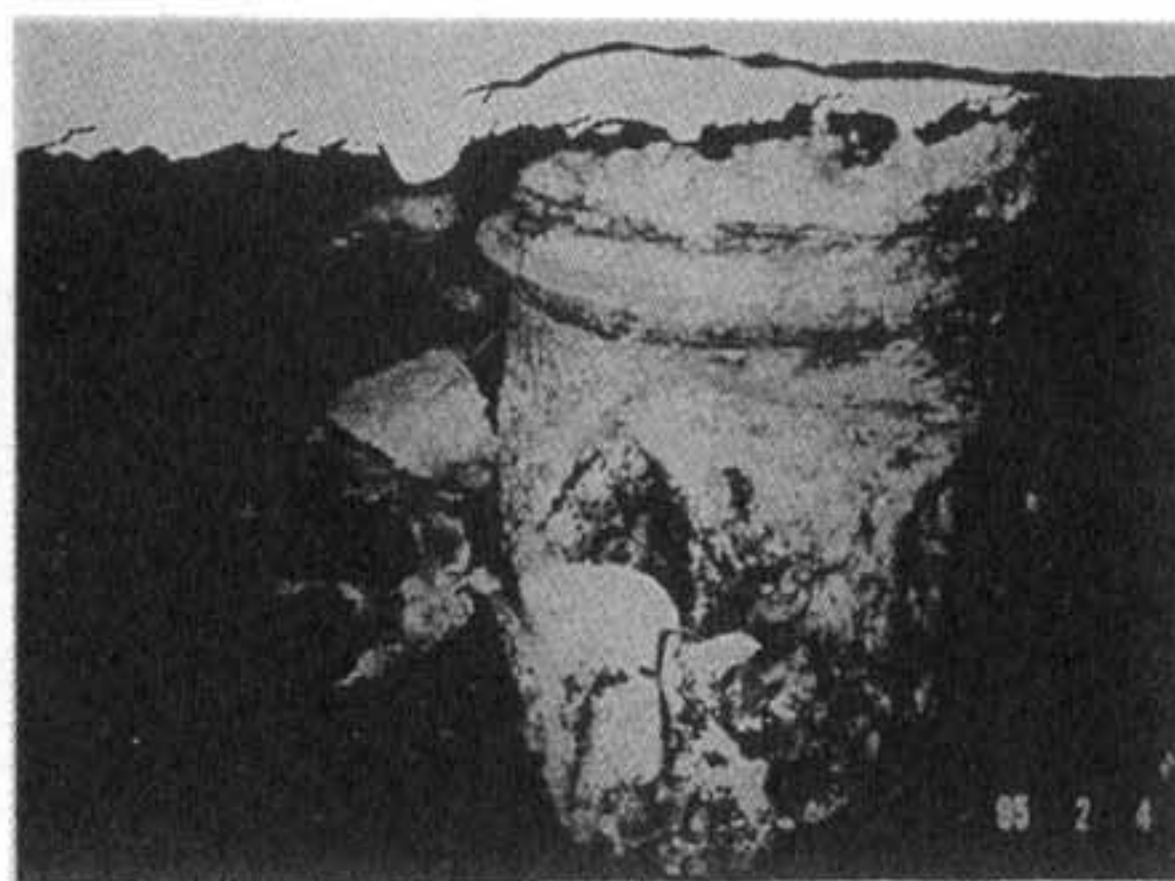


写真8 杭頭局部座屈

① 杭頭提灯座屈、② 杭頭局部座屈、③ 杭の曲げ変形による傾斜等は、すべて杭周地盤の液状化や沈下により杭頭部での地盤による拘束が弱まった状態で起っている（写真7～9）。特に、肉厚の薄い鋼管杭では、座屈や曲げ変形に弱いので、液状化の可能性のある地盤に対しては、慎重な検討が要求される。④ 基礎底と杭頭の上下ずれは、上部構造が鉄骨造2階建ての比較的軽い建物で起きていた。この建物では、杭頭の基礎底への埋込み長さが短かったため、地震時に基礎底が杭頭から浮き上がると同時に横にずれ、元の基礎底の凹みの中に杭頭が納まらなかったから生じたのである。

（d） 基礎・基礎梁の被害

基礎・基礎梁の被害としては、基礎・基礎梁の亀裂があげられる（資料番号22～24）。

この被害例は、杭径が大きな場所打ちコンクリート杭に見られた（写真10）。杭径の大きなものは、それだけ大きな軸力・曲げモーメントに抵抗するため、基礎・基礎梁に跳ね返る力も大きくなる。したがって、基礎等に被害の出る可能性が高まるので、特に、大きな径のコンクリート杭を設計する場合には、基礎・基礎梁の検討が重要となる。

（e） 液状化・側方流動による建物被害

地盤の液状化、側方流動が建物に与える被害としては、直接被害を及ぼす

① 側方流動による建物の被害（25, 26, 30）

② 液状化による不等沈下（28, 29, 31, 32, 35）があり、間接的には先に述べたように、杭周の地盤による拘束が無くなり、杭の破断、座屈と言った被害をもたらす。

① 側方流動による建物の被害としては、地盤の移動・地割

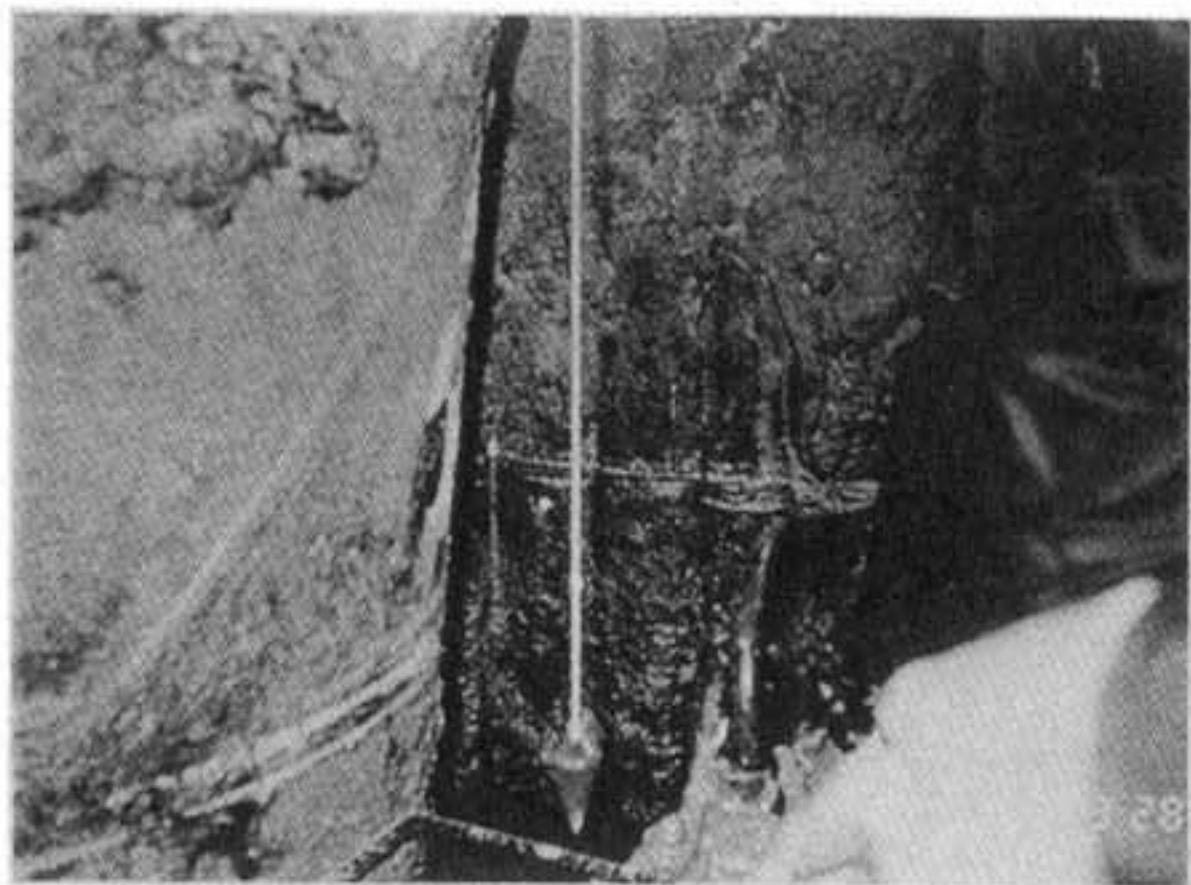


写真9 杭の曲げ変形による傾斜

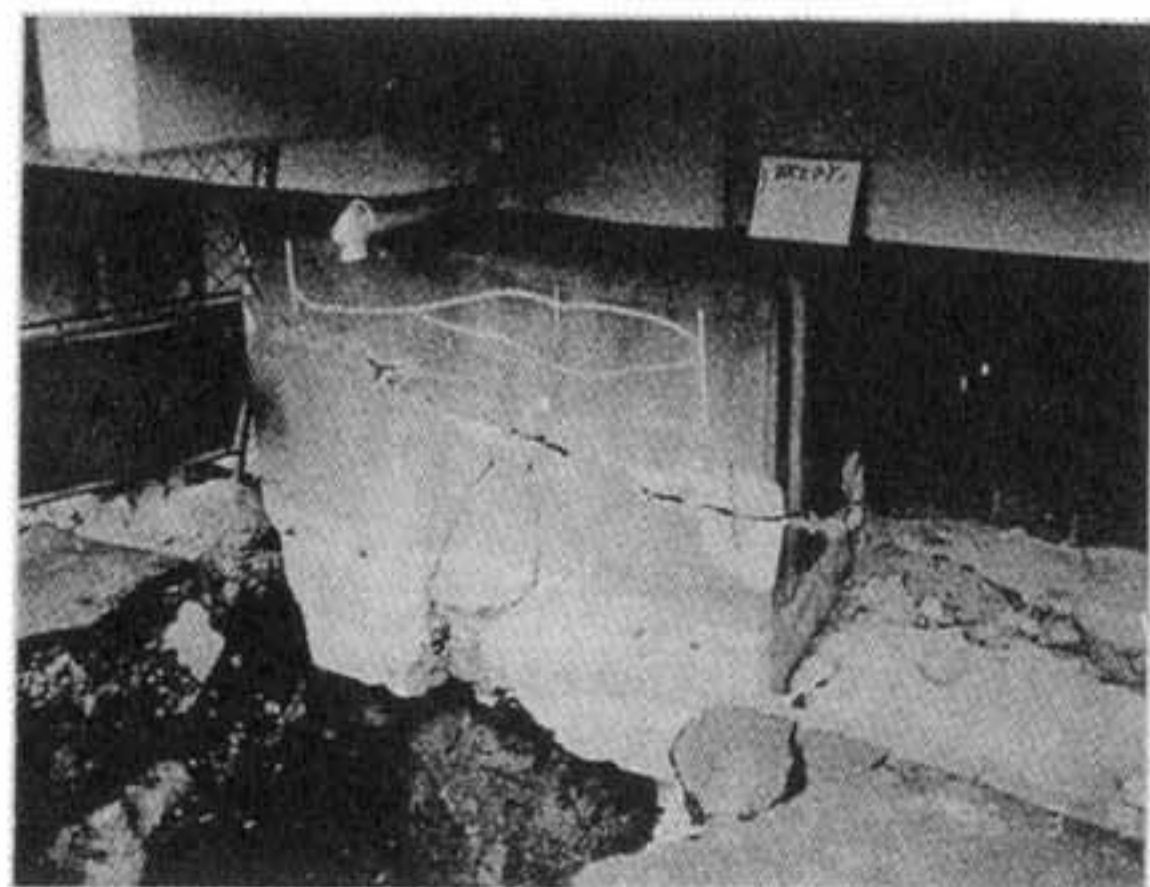


写真10 基礎（フーチング）の亀裂

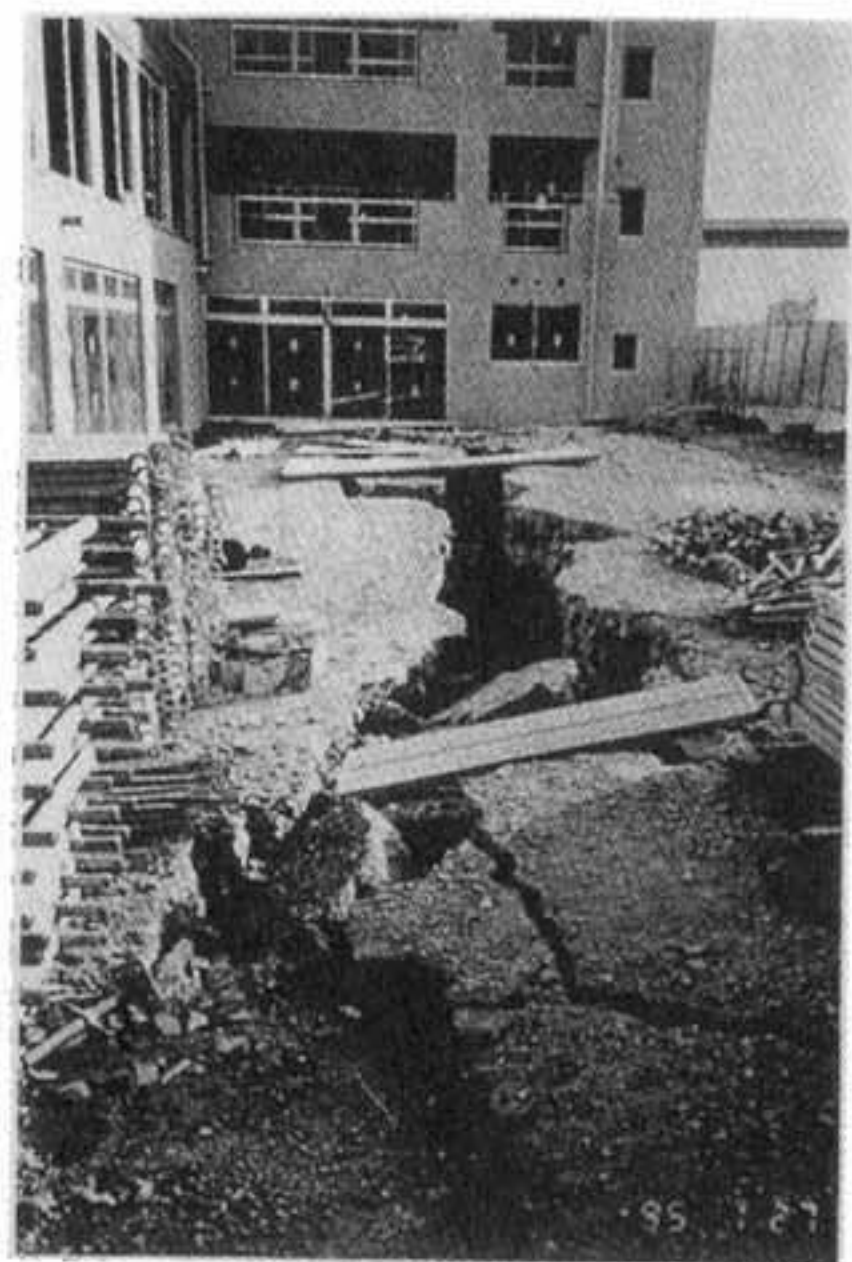


写真11 側方流動による地盤の亀裂

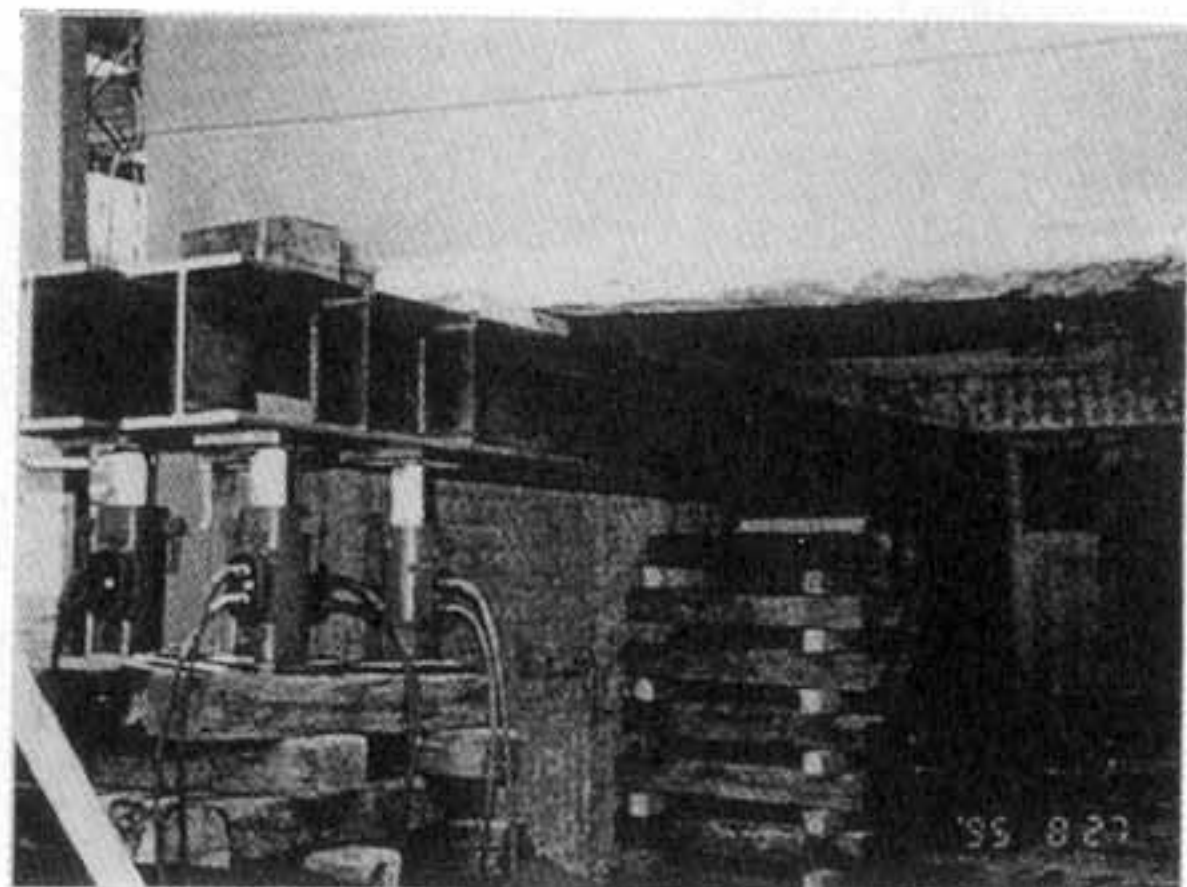


写真12 ジャッキアップの状況

れによる建物の移動、傾斜、破損があげられる（写真11）。② 液状化による建物の被害としては、地盤の支持力喪失により建物の不等沈下が生じる。不等沈下では、傾斜が大きな場合には建物は取り壊されるが、傾斜の少ない場合にはジャッキアップに

より建物を起こすことが可能である。写真12は、建物の傾斜を修正するために行っているジャッキアップの状況を示している。

(f) その他

その他の建物・建築基礎被害として、今回調査した資料の中には、①基礎梁、耐圧版のひび割れ(資料番号33)、②擁壁エキスパンション部の分離(資料番号34)および③建物崩壊、杭無被害(27)と言うのがある。③は、12階建て建物で4階部は層崩壊したが、杭(場所打ちRC杭)は無被害であった例である。

11.4 むすび

建築基礎、特に、杭基礎の震害は、先に述べたように、あらゆる種類の杭に対して現れた。これらの被害には、想定していた以上の荷重がかかり、杭そのものの耐力が不足したものもあるが、杭を取り巻く地盤の液状化、側方流動、沈下により、杭が地盤と一体となって抵抗させようとして設計されていたものが、当てが外れ、杭のみで抵抗するとか、最悪の場合には、周辺の土が杭に余分な外力として働き、杭を破壊に導いた場合が多々ある。したがって、杭の耐震設計には、地盤の状態変化も考慮するべきだと言える。

建築基礎の被害調査は、被害を見つけるのが大変なこと、被害が有ると判っていても他人の所有物と費用の点で杭の掘り起こしが大変なこと、建物の所有者が個人または民間企業等で被害を公表すると私権を侵す恐れがあること等、いろいろな事柄・事情が関係し、被害調査が自由に行えないところに問題点があり、それらの解決が今後の課題として残るところである。

さらに、今回の兵庫県南部地震を契機として、旧基準で設計された既存建物の基準不適格が問題となっており、耐震補強が行われているが、これはほとんどが補強のしやすい上部構造について行われているだけで、下部構造の耐震補強はほとんど為されていないのではないかとと思われる。本報告の被害例でも示したようにあらゆる種類の杭基礎に対して、多くの被害が出ていることを考え合わせると、建物基礎の耐震診断も重要であり、杭基礎等の補強についても然るべき手段を講じておくべきである。

〈謝辞〉

今回の建築基礎に関する被害調査には、(株)新井組、(株)大林組、(株)鴻池組、(株)昭和設計、(株)竹中工務店、(株)東畑建築事務所、(株)長谷工コーポレーション、から快く資料を提供して戴いた。上記企業の関係諸氏に感謝の意を表します。