

10－1. 構造物基礎：鉄道関係

以下に鉄道基礎ワーキンググループによる調査結果の概要を記すが、この執筆時期は「資料編」より約4ヶ月早く、その時点では各鉄道会社も調査・復旧工事資料を整理中であって、公表の段階ではなかった。したがって、この報告は調査活動中の印象の域を出ないものである。また、山陽電気鉄道と神戸電鉄に言及していないが、これは両鉄道共に大規模に被災した基礎が少なかったことと、調査を開始した当時、神戸市街が壊滅状態であって、ワーキンググループとしては三宮以东しか直接に調査できなかったためである。ワーキングメンバーは次表通りである。担当欄は、担当路線（および、親委員会における担当）を示している。

ワーキングメンバー表（50音順）

氏 名	所 属 等	担 当
岩崎 哲雄	(株)ソイルコンサルタンツ大阪事務所長	阪急電鉄
岡田 勝也	(財)鉄道総合技術研究所施設研究部長	JR 関係（委員）
軽部 大蔵	神戸大学工学部建設学科教授	——（主査）
木村 亮	京都大学工学部交通土木工学科助教授	阪神電気鉄道（幹事）
高武 秀年	神戸市都市計画局都市計画部主査	神戸市関係（委員）
小林 育夫	(株)鴻池組技術本部副部長	阪神電気鉄道（委員）
杉木 孝行	J R 西日本建設工事部主幹	JR 関係（特別委員）
龍岡 文夫	東京大学生産技術研究所教授	補強盛土（主査）
鶴ヶ崎 和博	神戸大学工学部建設学科助手	阪急電鉄（連絡幹事）
藤原 照幸	神戸大学工学部建設学科教務職員	(データベース委員)

ワーキンググループとしての活動経過は次表の通りである。これに加えて、担当路線毎に「資料編」用の原稿作成作業を行った。また、出版物としてのフォーマットに合致させるための編集作業は鶴ヶ崎を中心に神戸大学で行った。なお龍岡主査委員は、ワーキンググループとは別に調査を行い、別途報告書を提出した。各鉄道会社および神戸市関係部局の方々には、現地調査や資料提供等で大変お世話になった。深謝を表す。

ワーキンググループとしての活動経過（平成7年分）

月. 日	内 容	参加者数
3.22	阪急電鉄・阪神電気鉄道予備調査（現地）	1 名
4. 7	WG 会議（地盤工学会関西支部）	5 名
12	WG 打合せ会（大阪建設交流館）	3 名
13	阪急電鉄・阪神電気鉄道現地調査	5 名
26	親委員会主催 WS にて中間発表（大阪厚生年金会館）	3 名
5.22	WG 会議（地盤工学会関西支部）	8 名
6. 1	神戸市営地下鉄・ポートライナー・六甲ライナー現地調査	9 名
7. 3	WG 会議（地盤工学会関西支部）	7 名
9.14	同 上（同上）	7 名
11. 6	同 上（同上）	8 名

10-1-1. まえがき

兵庫県南部地震の震害は神戸市と大阪市の間の帯状の平地に集中したが、そこには、図 10-1-1 に示すように、輸送能力の大きい鉄道路線が 4 路線併走している。JR 山陽新幹線は、複線の長距離超高速鉄道で、神戸－大阪間の断面輸送量は 1 日当り 11 万人、JR 東海道線は、複々線の長距離鉄道で、1 日当り 30 万人、阪急電鉄及び阪神電鉄は、ともに神戸と大阪を結ぶ都市間鉄道で、それぞれ 1 日当り 21 万人、14 万人を輸送していた。また、神戸市を中心とする鉄道として、西方へ延びる山陽電鉄、六甲山系をくぐり抜けて北方へ延びる神戸電鉄と神戸市営地下鉄、さらに神戸市内の中量鉄道としてポートライナーと六甲ライナーが稼働していた。

地震が起きた 1 月 17 日当日は、すべての鉄道が止った。翌日には、東方からは武庫川（神戸市の都心、三宮から東へ約 20km）付近まで、北からは六甲山の北麓まで、また同月 23 日までに、西からは須磨（三宮から西へ約 10km）までがほぼ開通したが、これらの内側、東西約 30km の区間及び山陽新幹線は多くの個所で崩壊していて、復旧には少なくとも 4 ケ月が必要と予想された。

神戸－大阪間の大量交通手段としては、高速道路も 2 路線あったが、これらもまた壊滅していた。高速道路は構造物が鉄道のそれより大規模であり、また被害も一層大きかったので、早急な復旧は望めなかった。このため、鉄道の復旧が急がれた。

4 月 1 日、JR 東海道線が 2.5 ケ月ぶりに開通したのを始めとして、6 月中にポートライナーと六甲ライナー以外の鉄道路線が開通した。当初の見通しより 2 ケ月程早い復旧であった。このように短期間に復旧が成し遂げられた理由はいくつかあげられるが、構造物基礎に関していえば、構造物の地上部分がそのままあるいは小修理によって使用可能と判断されると、その基礎は検査が省略されることが多かった。地上構造物の破壊が、基礎の破損や変位によって引き起こされたことが明らかな場合は、まず基礎を復旧させなければな

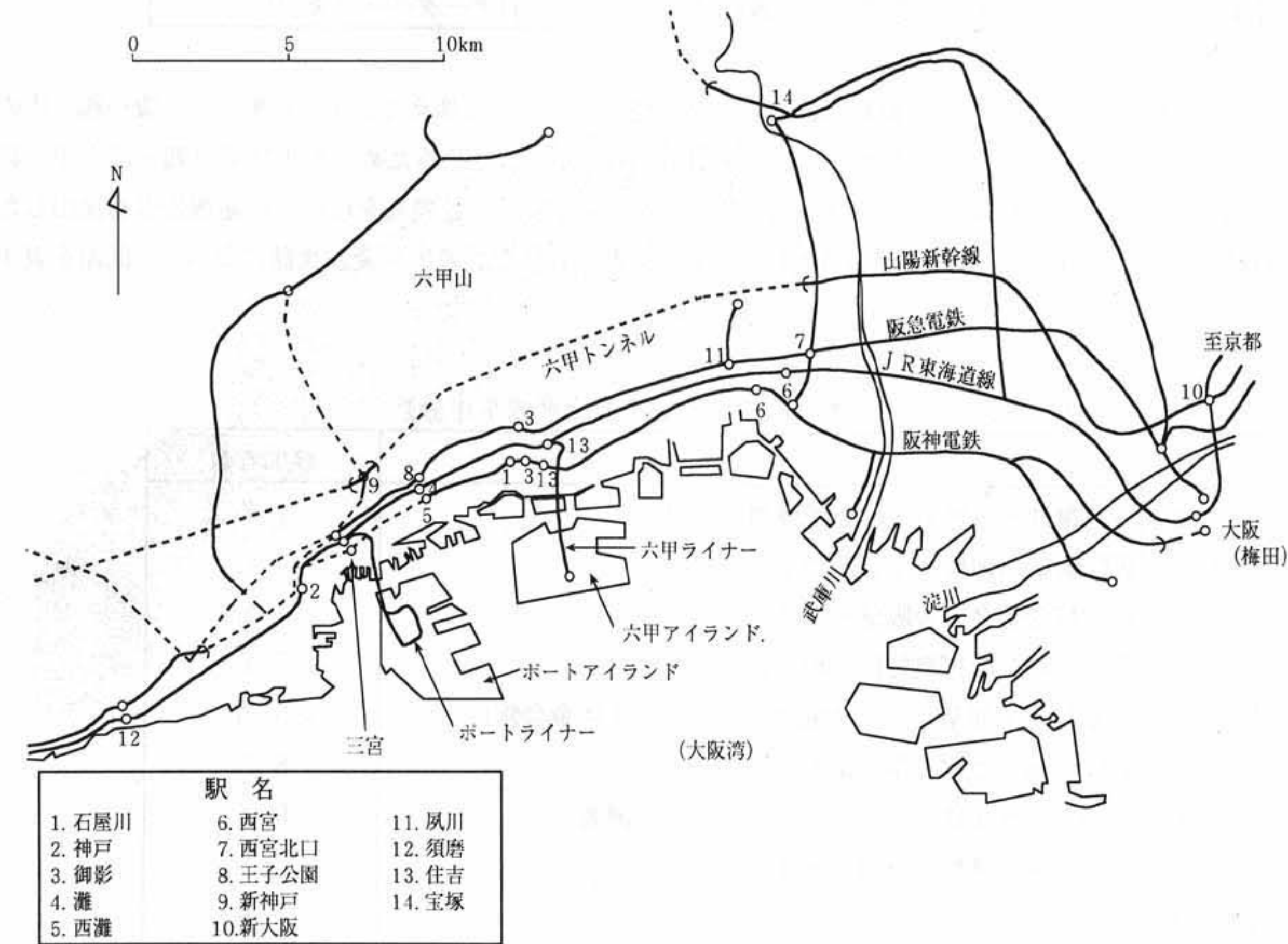


図 10-1-1. 対象地域および路線

らない。ポートライナーと六甲ライナーの復旧が7月下旬となったのは、基礎の復旧に時間がかかったためである。

鉄道路線の主な構造物は、盛土、高架橋、大河川を渡る橋梁である。被災地帯を流れる大河川は、武庫川と淀川であるが、これらを渡る鉄道橋のうち、被災したのはJR新幹線の武庫川橋梁だけであり、しかもその被災の様子は基礎が関わっているとは思えない。また、鉄道盛土は多数の地点で崩壊したが、これについては他の報告で扱われている。したがって、本報告では、主として高架橋の基礎を扱うことにする。

10-1-2. 神戸新交通六甲アイランド線
(六甲ライナー)

六甲ライナーは、神戸市東部の海を埋立てて造られた六甲アイランドと本土を結ぶ中量鉄道であり、1990年に開通した。島と本土を連絡する橋梁の島側の side span が落橋した。この原因は、島の護岸が海側に約1m動き、同時に背後の地盤も海側に動いたため、橋脚のケーソン基礎が傾いたためである。図10-1-2は、橋脚ケーソンの変位と、基礎の復旧設

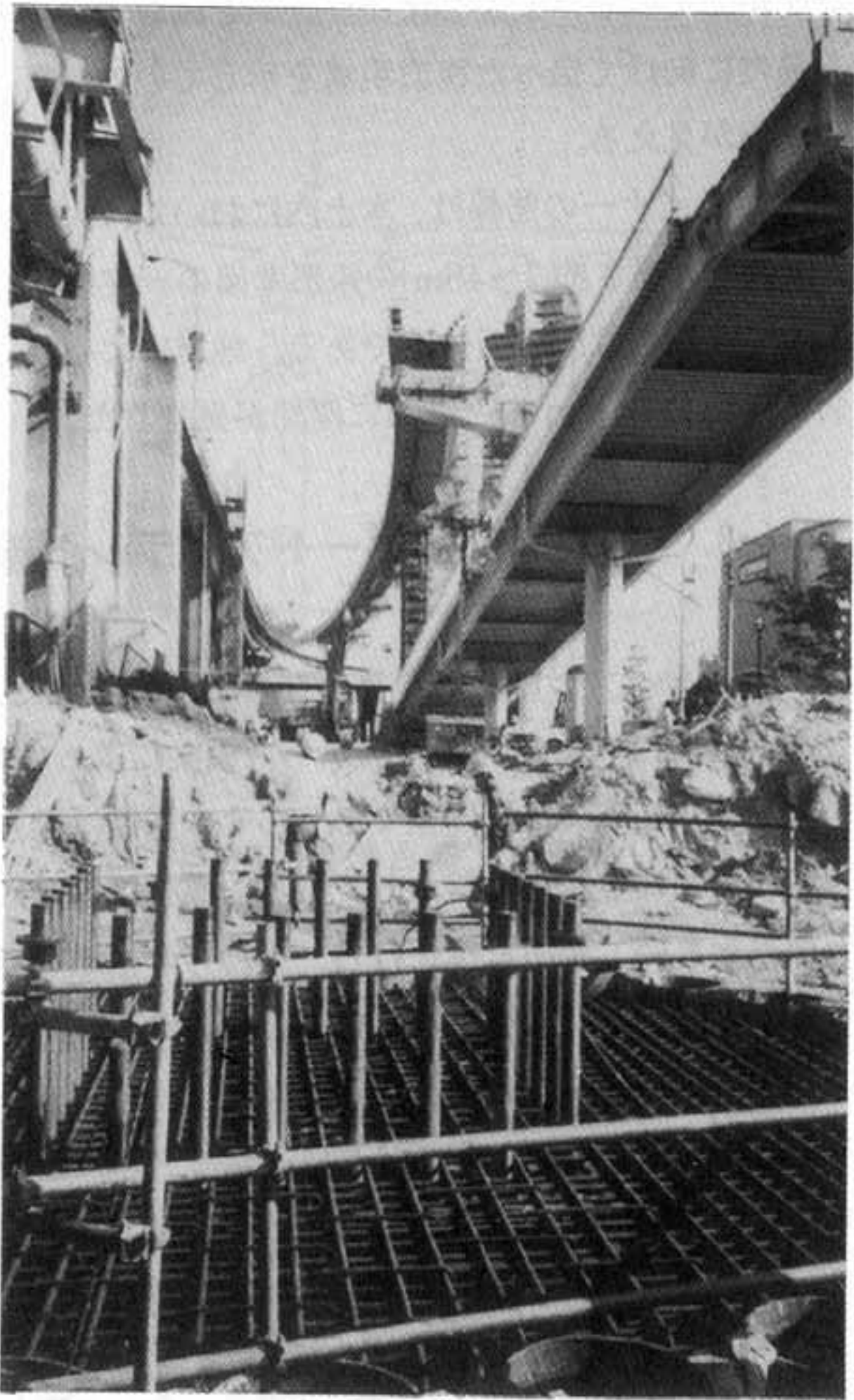


写真 10-1-1. 橋脚基礎の復旧工事

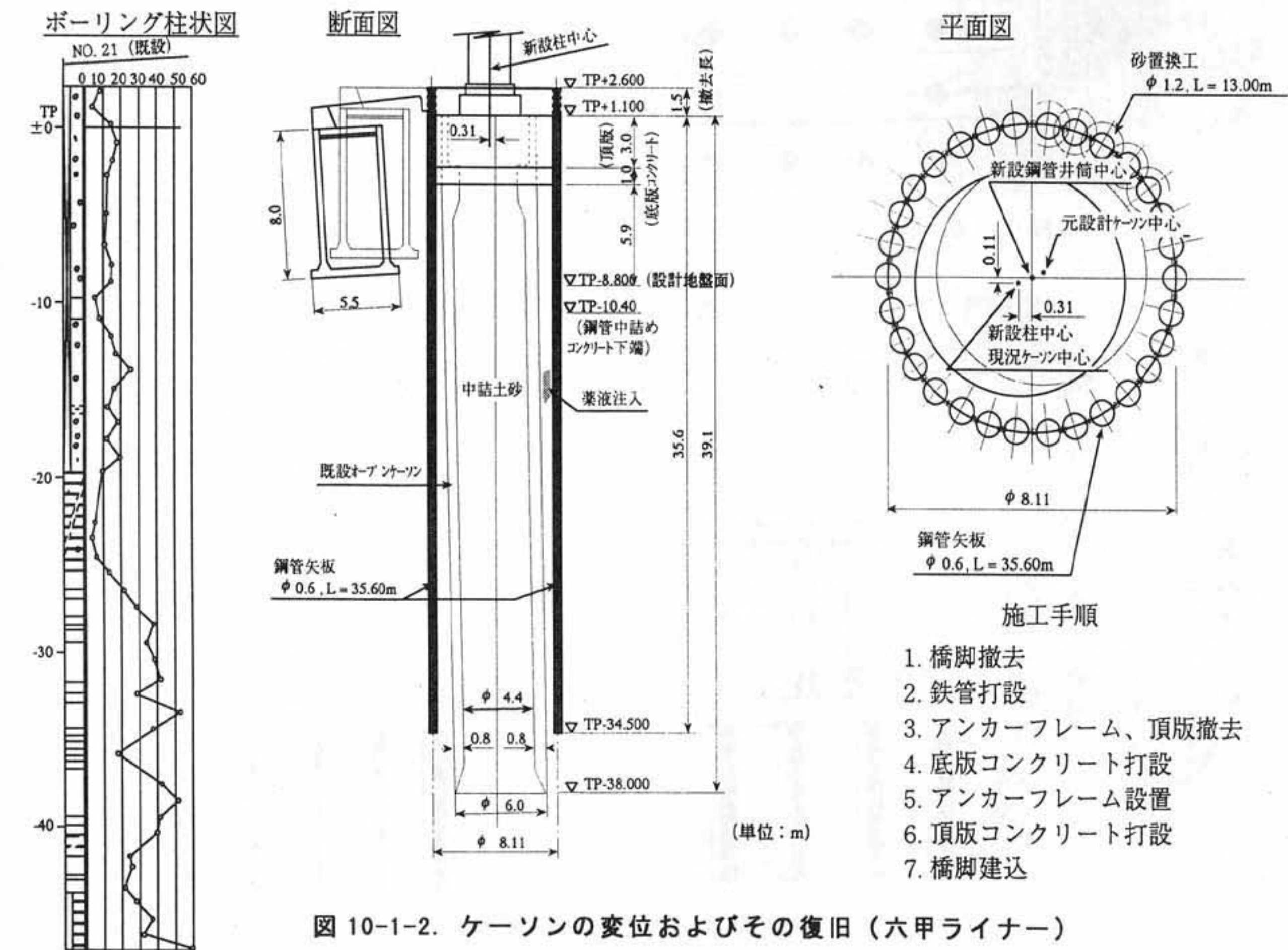


図 10-1-2. ケーソンの変位およびその復旧 (六甲ライナー)

計を示している。変位したケーソンを鋼管矢板で囲んで新しい基礎としている。写真 10-1-1 は、護岸側から島内に向けて撮った復旧現場を示している。画面下半分が工事中的新基礎であり、画面上方中央に高架橋の断面が見える。

六甲ライナーの路線は、本土内においては大部分が住吉川の西岸堤防の上に設けられている。高架橋は鋼製であり、高さ約 7～18m の矩形断面の支柱構造である。その堤防上の部分の基礎は独立フーチングが主であって、深さは河床面付近である。地震によって、橋脚は路線の直角方向に 1° 前後傾いた。一部の脚の側面には地上 1～2m のところに座屈が発生した。

10-1-3. 神戸新交通ポートアイランド線（ポートライナー）

ポートライナーは、神戸港の沖合に造成された人工島ポートアイランドと本土を結ぶ中量鉄道であり、1981 年に開通した。路線は島から大橋梁によって海を渡ると本土から延びた既設の突堤上の高架橋になる。高架橋は支柱式または門型であり、その基礎は深さ 3m 程度の独立フーチングであって、地下に埋っていた古い石積突堤を基礎地盤としている。橋脚は地震によって西側に数度傾いた。この復旧工法は、上記の古い石積みを貫いて場所打杭を打ち、それらの杭頭を新たな版で受けるものである。図 10-1-3 は、突堤上の駅舎の基礎の復旧断面を例示している。突堤から三宮ターミナルの間の高架橋は、ターミナル付近を除いてやはり支柱式が主であるが、基礎は群杭が多い。地上部に損傷のない高架橋がかなりあったが、これらについて杭を調べてみると、その多くにクラックが発見された。また、地上部が破損したものについては、補強工がなされたため、自重が増加した。これらの理由で、杭基礎は補強される必要が生じた。補強工法はやはり既設基礎の外側に新たな場所打杭を施工する方法で行われている。

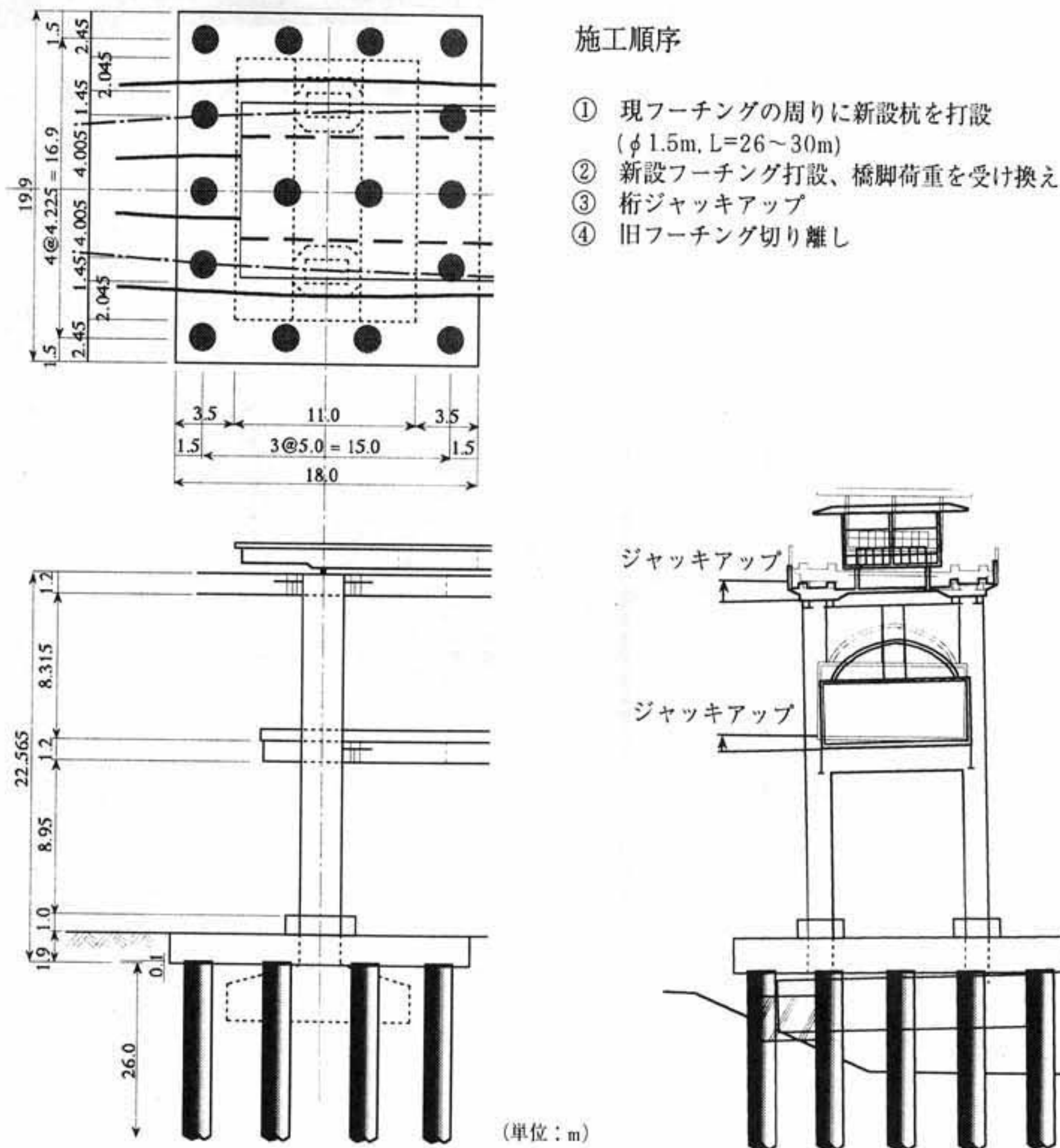


図 10-1-3. 突堤上駅舎の基礎の復旧断面図（ポートライナー）

10-1-4. 阪神電気鉄道

阪神電鉄の路線は、神戸市の中心地にある三宮駅から東（大阪方）へ約 3km は地下トンネル及び掘削構造であるが、これらの区間はほとんど被災していない。これより東方の約 3km の区間は、1968 年に開通した西灘－石屋川高架区間 2.0km を含む高架橋と盛土から成る区間であって、構造の如何によらず、ほぼ全般的に被災した。主力車庫の一つである高架構造の石屋川車庫もこの区間にあり、完全に破壊された。しかし、さらに東に続く 1929 年完成の御影－住吉高架橋区間（1.2km）は、非常に古いにもかかわらずほとんど被災しなかった。この対照的な状況は今後分析される必要がある。

さて、激しく被災した西灘－石屋川高架区間における標準的な構造は複線軌道用の RC 造スパン 8m×4 径間の立体ラーメンである。その基礎は図 10-1-4 に示すように横断方向に地中梁で連結された直接フーチングである。基礎底面の土質は主として礫混りシルトであって、地下水面は、高いところではフーチングの上面に達している。本線高架橋基礎全数について、フーチングの下端まで掘削し、目視による調査がなされた。その結果、フーチングについては、少数のものにおいて軽微なクラックが発見された程度であったが、橋脚の地中部分については、写真 10-1-2 に示すように網目状のクラックが発達したものがかなり見られ、また、ごく少数ではあるが、写真 10-1-3 に示すように完全にせん断破壊した物も見られた。地中部の破損は、重大さ、頻度とも地上部に比べてずっと軽いが、地中部の破損の要因（地質、連続ラーメンでの位置、地上部の破損状況など）を統計的に明らかにしておく必要がある。

本線の復旧は、基礎については、クラックに注入を施す程度で、そのまま使用し、橋脚については、被害の程度により新設または鉄筋及びコンクリートを修復した上で、すべての橋脚について全長にわたって厚さ 9mm または 6mm の鋼板で覆い、隙間に無収縮モルタルを注入した。さらに地中部分については、鋼板の外周を鉄筋コンクリートで巻立てている。

また、車庫の復旧は、配線変更の関係より従前の基礎は再利用せず、新たに基礎杭を有する鉄骨造ラーメン高架橋として再建している。

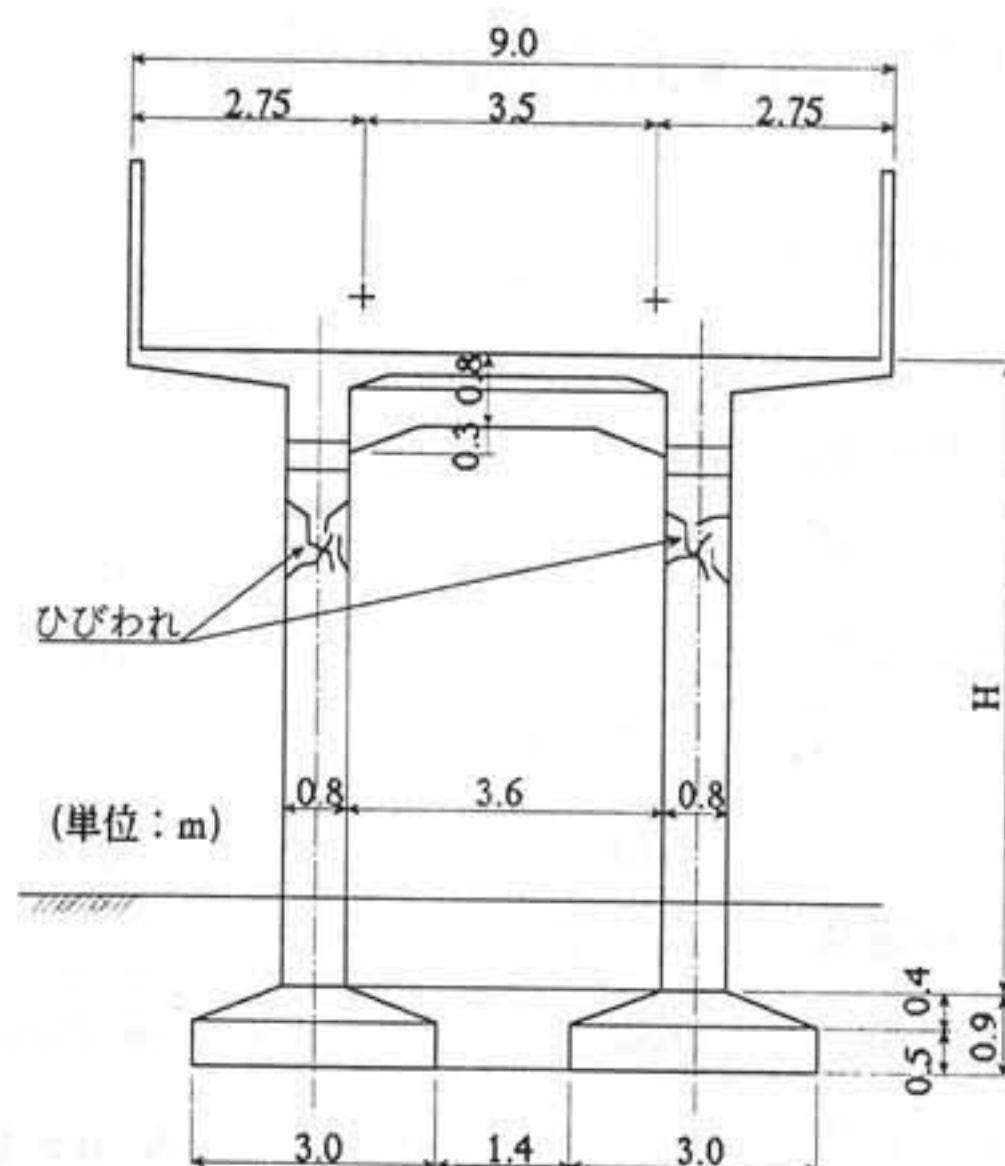


図 10-1-4. 本線西灘・御影間
高架橋断面図（阪神電鉄）



写真 10-1-2. 柱下端部の網目状クラック

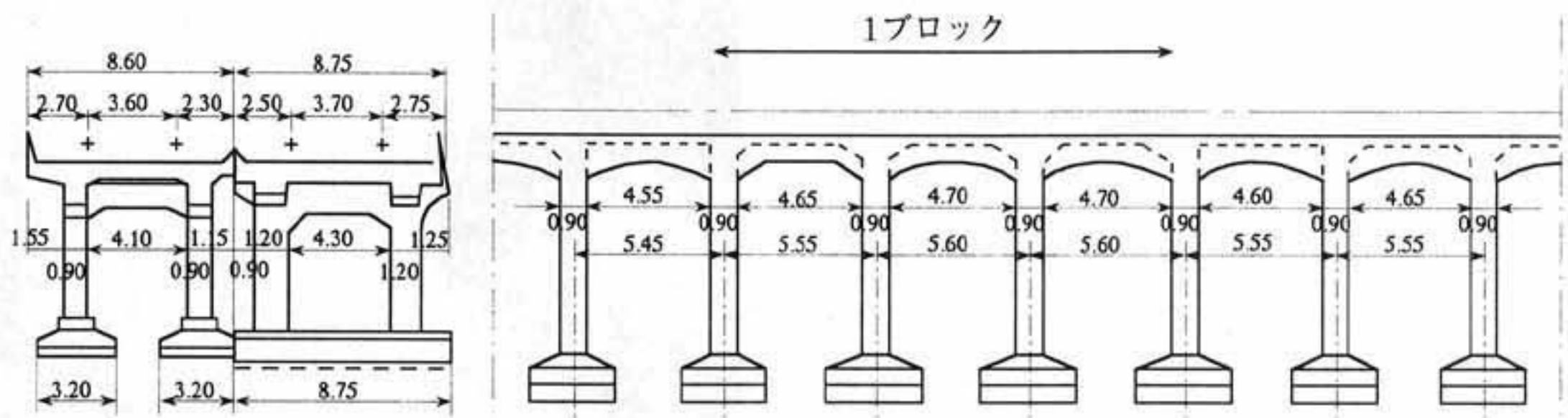


写真 10-1-3. 柱下端部におけるせん断破壊

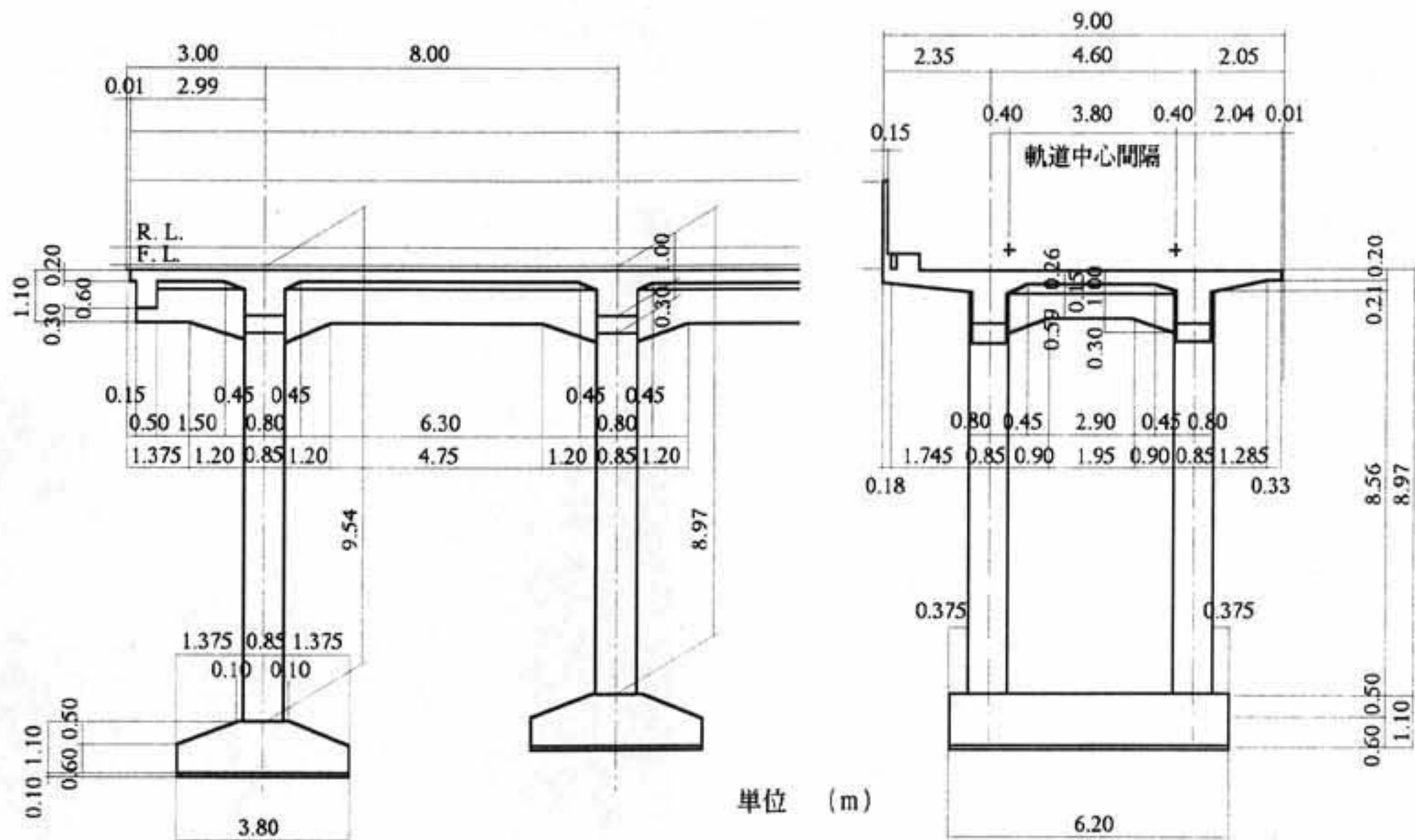
10-1-5. JR 東海道・山陽線

JR の路線は、神戸市域（住吉－灘間及び灘－鷹取間）ではほとんどが複線用高架橋を 2 つ並べた複々線高架橋である。このうち、神戸市の都心部を含む灘－鷹取間約 10km は第 2 次世界大戦以前の 1926 年に着工し 1938 年に完成したもので、完成以来、大洪水と戦火にもかかわらず生き残り、今回の地震でも被害は比較的小さかった。しかし、その東に連なる 1976 年に完成した延長約 3.5km の住吉－灘高架区間は六甲道駅を中心にして大きな被害を受けた。図 10-1-5(a)、(b)は古い高架橋と新しい高架橋のそれぞれ代表的な構造を示している。両者とも鉄筋コンクリート連続ラーメン橋であって、その基礎は地中梁で連結されたフーチングであって、杭は部分的にしか用いられていない。古い方が、縦断方向の橋脚のスパンが小さく、また、梁と柱の接合部分のハンチが大きい。

住吉－灘区間の基礎地盤は、マトリックスがシルト～砂であり、転石を多く含んでいる。N 値は転石に当たらない限り、地表から約-5m までは、N=5～10、-10m～-20m までは N=20 である。地下水位は西寄（灘側）は GL-1～-3m と浅く、東寄（住吉側）は GL-10m 程度と深い。区間の中間部で、石屋川を越える前後に延長 0.3km にわたって小径の場所打杭を基礎とした区間があるが、柱の破損の程度は他のフーチング部と大差はないようである。基礎の形式にかかわらず、柱上端の曲げ破壊及び柱中間部でのせん断破壊を起こしたものが多数見られた。



(a) 生田川・三宮間



(b) 弓ノ木高架橋

図 10-1-5. 既設高架橋（JR 東海道線）

橋脚の復旧は、鉄筋とコンクリートを修復した後、厚さ 6mm の鋼板で覆い、コンクリート表面との隙間に無収縮モルタルを注入する方法で行われた。地上部の復旧後、高架橋に衝撃を与えて、その応答振動数により基礎を含めた構造物全体としての健全性が確認された。

住吉より東方（大阪方）は、地上線であり、比較的被害は少なかったが、土留壁で一部倒壊に近いものがみられた。

10-1-6. 阪急電鉄

阪急電鉄は、六甲山系の南麓を通る路線である。神戸市の中心、三宮駅から東方へ王子公園駅までの約 3km は、1936 年開通の複線用のコンクリート連続立体ラーメン高架橋であるが、損傷は小さかった。また、ここから東方へ御影駅までの約 3.5km は地上線であり、ほとんど被害はなかった。

路線は御影駅の東方で住吉川を渡る。この川は、1938 年の大洪水の時、河床が約 4m 高くなった。このために川を渡る橋へのアプローチの盛土高が 8m にも達していた。盛土の法面はもたれ式擁壁で覆われていたが、この擁壁の天端が地震によって延長約 0.5km にわたって外方へ最大 0.75m 移動し、不安定となった。復旧は、盛土を完全に撤去し、新たに鉄筋コンクリートで高さ 8m の溝型構造物を施工し、中詰めは土圧軽減のために発泡モルタルを注入した。

さらに東方の、三宮駅から約 14km の夙川駅から次の西宮北口駅の間に、1967 年に完成した延長 1.6km にわたる西宮高架橋があった。図 10-1-6 はその横断面を示している。元来、複線の地上線であった軌道を、単線ずつ高架化したため、橋は単線用の一柱式高架橋を 2 列に併設したものとなった。しかも、左右の高架橋は、全く連結されていなかった。基礎は図に示すように、1 脚当たり 5 本の場所打杭が設置されていた。地震によって、北側の高架橋が延長 0.35km にわたって北側

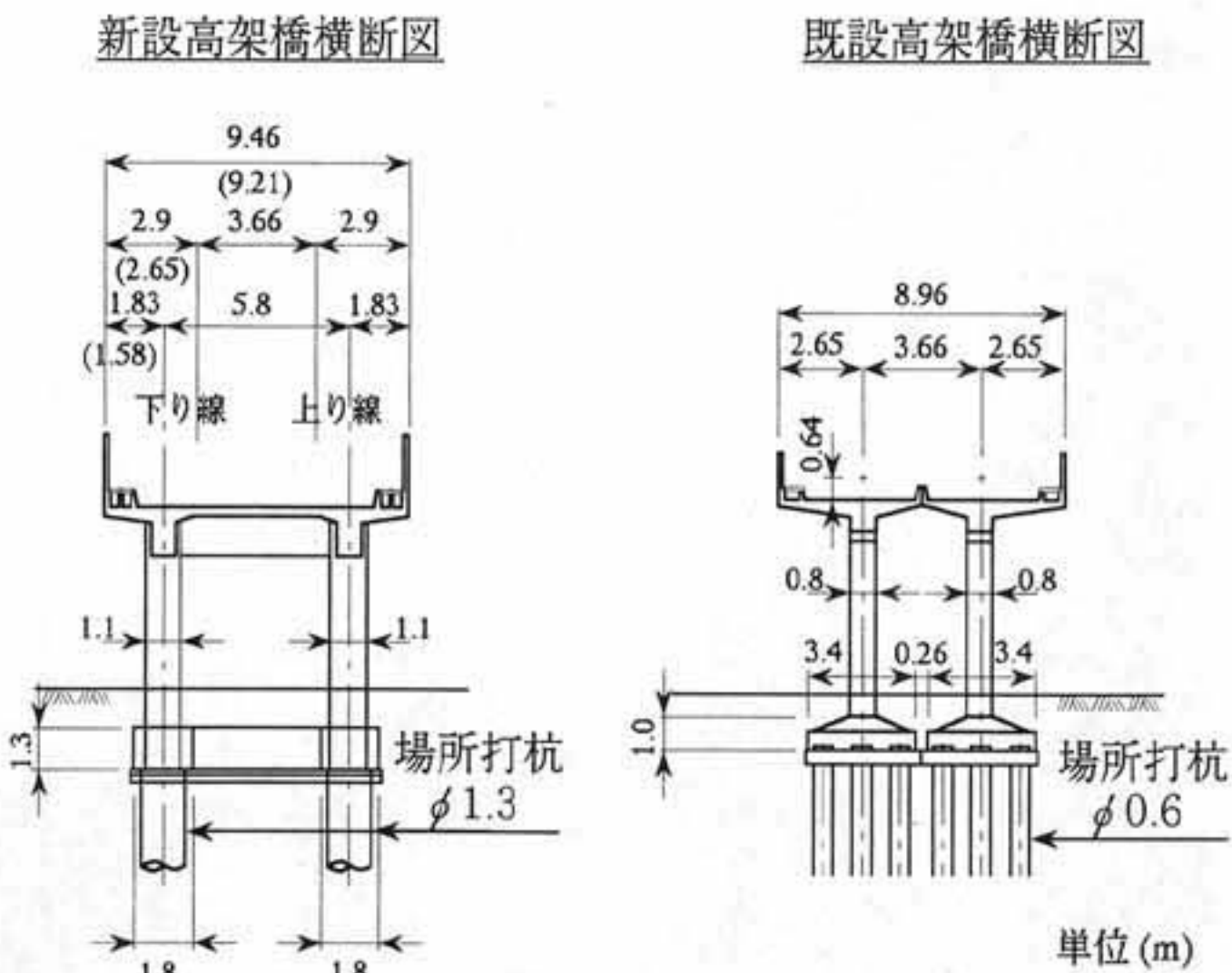
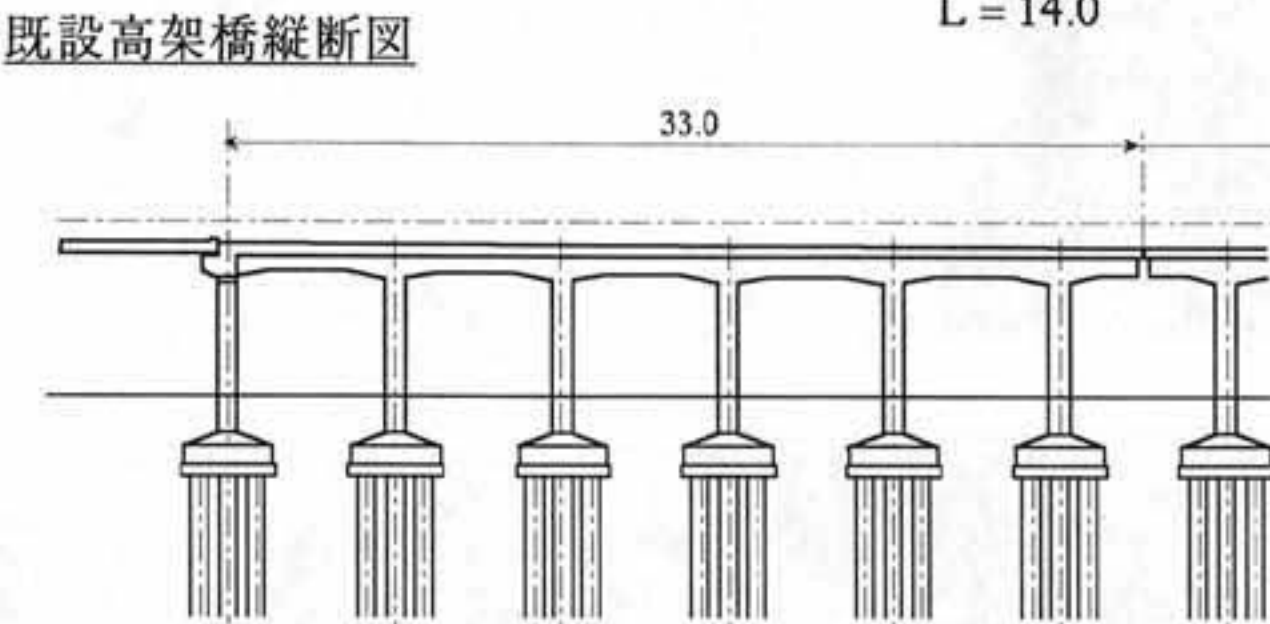
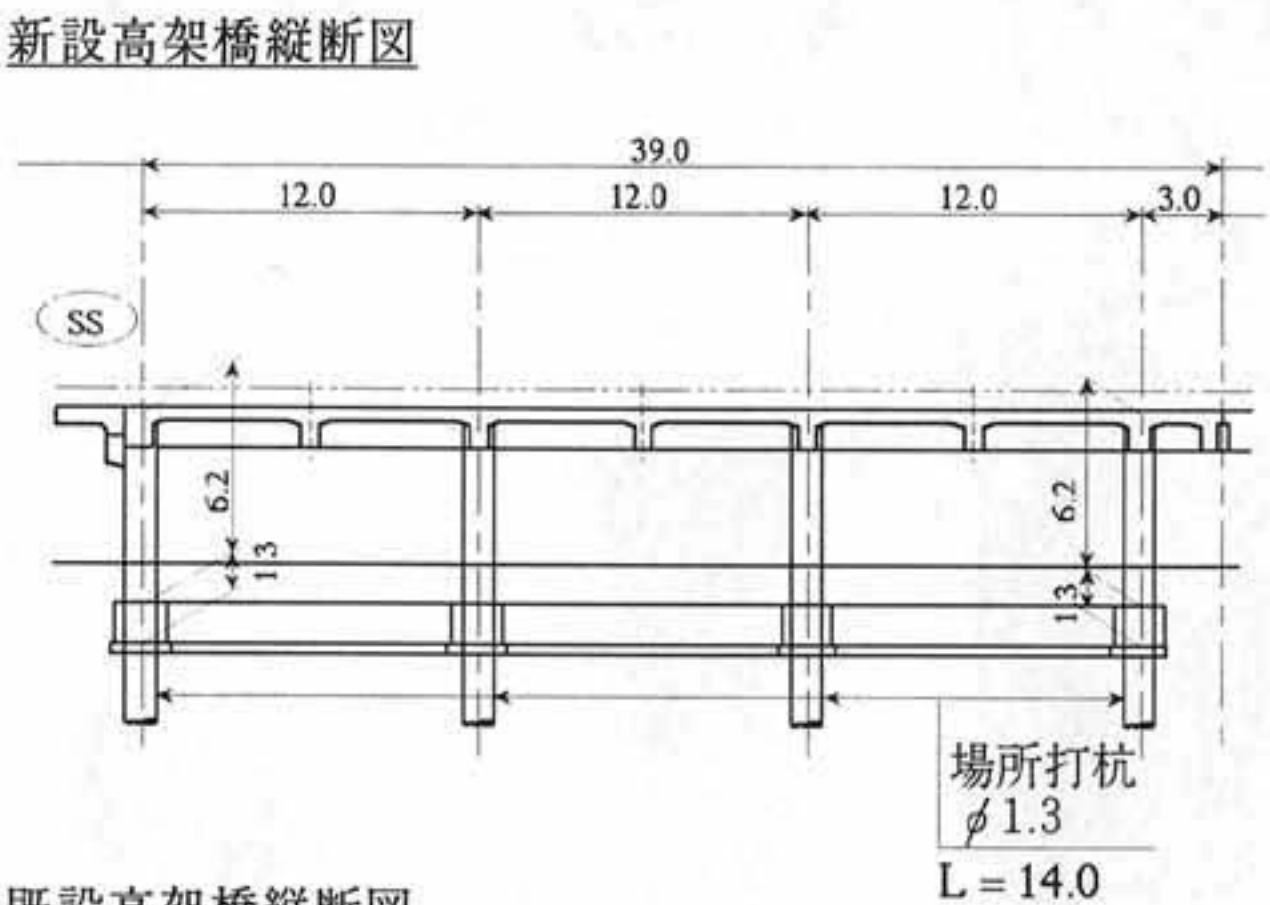


図 10-1-6. 高架橋横断面図
(阪急電鉄、西宮高架橋)



新、旧高架橋基礎平面図

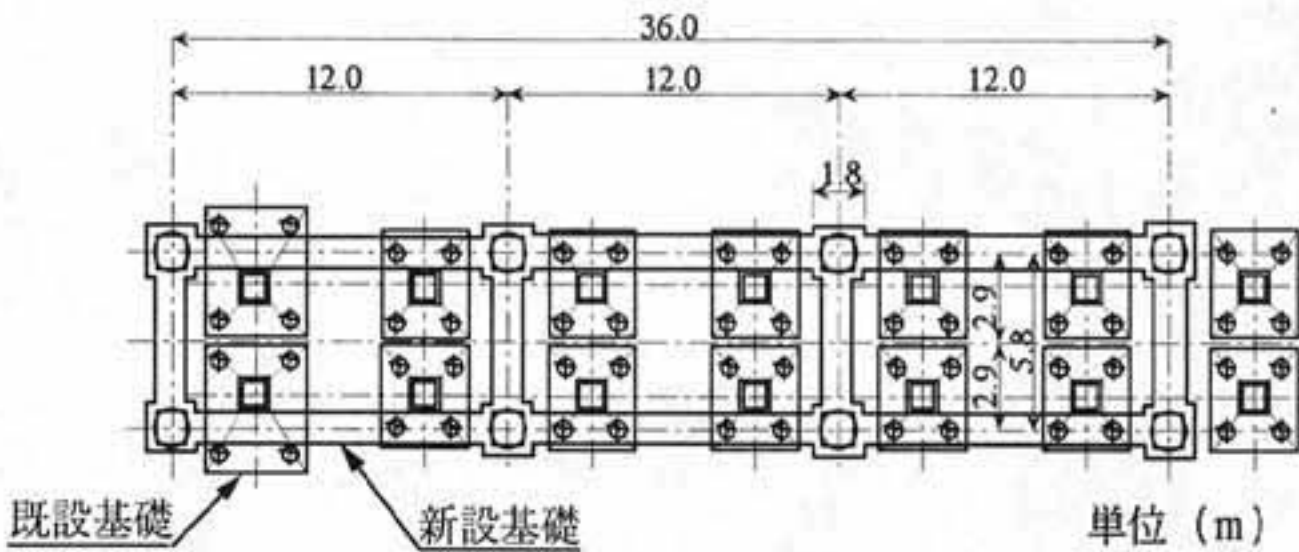


図 10-1-7. 高架橋縦断面図および基礎平面図
(阪急電鉄、西宮高架橋)

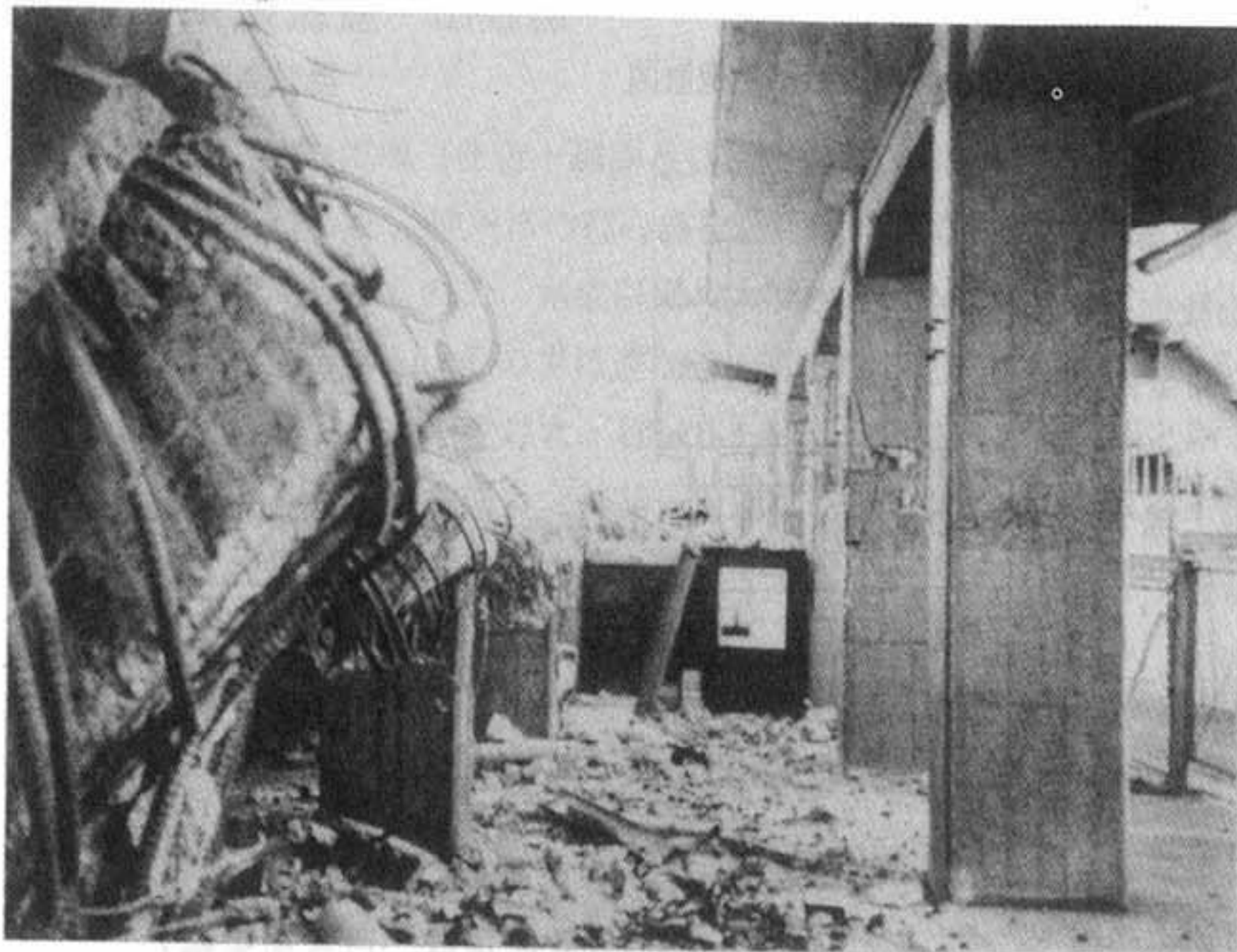


写真 10-1-4.

完全に倒壊した単柱高架橋

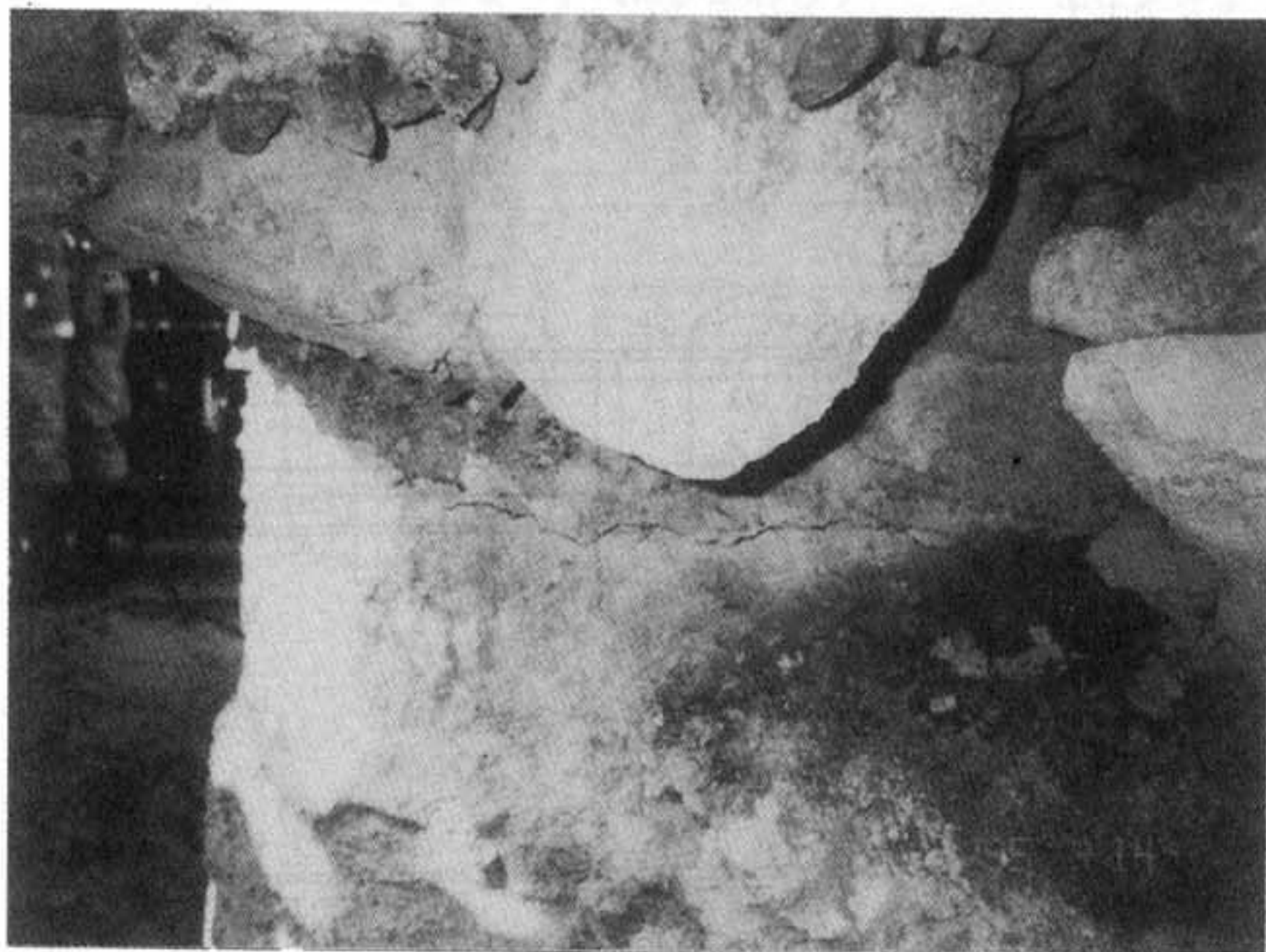


写真 10-1-5.

杭頭部の水平クラック



写真 10-1-6.

フーチング内部のクラック

に完全に倒壊した（写真 10-1-4）。

復旧工事として、先ず、倒壊しなかった南側を含めて、高架橋は基礎を残して撤去され、図 10-1-7 に示す鉄骨・鉄筋コンクリート構造の連続立体ラーメン高架橋が新設された。図に示すように、新設の基礎は縦横に鉄骨・鉄筋コンクリート地中梁で結ばれるために、それを妨げる従来の基礎が必要に応じて掘削、切除された。一部の基礎について、杭頭部まで掘削したところ、高い頻度で写真 10-1-5 に示すような水平クラックが発見された。また、写真 10-1-6 は、フーチングの切断面に現われたクラックを示している。

10-1-7. JR 山陽新幹線

図 10-1-1 に示された区間は、1972 年に営業を始めた。路線は、東西方向の主要鉄道としては最も内陸を通っている。落橋地点は、表 10-1-1 に示すように神戸市西区から尼崎市までの 43km にわたって点在しているが、特に六甲トンネルの東坑口から東方へ 1km の区間への集中が目立っている。高架橋の構造は、図 10-1-8 に示す複線用の鉄筋コンクリート 3 連ラーメンが基本的であるが、その他に、図 10-1-9 に示す 2 層ラーメンやラーメン橋台+PC 桁等が用いられている。標準的な基礎は杭基礎であるが、地盤条件によっては直接基礎も用いられており、地盤に応じてフーチングの大きさや地中梁の有無が決められている。表 10-1-1 に、重大な被害を受けた個所の基礎の種類が示されている。表より、特に被害が多かった上部構造あるい

表 10-1-1. JR 山陽新幹線の重大被害箇所

キロ程	構造物 名 称	被 害 (被害延長)	基 礎 構 造 (寸法：m)	表層地質
523.159	下食満BL けま	高架橋落下 (70m)	場所打杭，1杭／柱 (ϕ 1.2× ℓ 8.0) 地中梁厚1.7	沖 積 粘土層
527.784	第1野間BL	高架橋破壊 (48m)	独立フーチング (4×4)	洪 積 礫 層
528.900	時友BL	高架橋落下 (65m)	独立フーチング (8.9×4.6)	沖 積 砂 層
529.413	武庫川B	桁ずれ	ケーソン (ϕ 8× ℓ 14)	沖 積 礫 層
* 530.551	阪水BL	高架橋落下 (130m)	場所打杭，1杭／柱 (ϕ 1.2× ℓ 8.0) 地中梁厚1.7	沖 積 砂 層
* 530.874	甲東園BL	桁落下 (40m)	場所打杭，1杭／柱 (ϕ 1.2× ℓ 8.0) 地中梁厚1.5	沖 積 砂 層
* 530.990	阪急今津線BL	桁落下 (80m)	ラーメン橋台+場所打群杭 10杭／柱 (ϕ 1.2× ℓ 7.0)	沖 積 砂 層
* 531.301	神呪Bv	桁落下 (40m)	壁式橋脚+場所打群杭 5杭／柱 (ϕ 1.0× ℓ ?)	崖 錐
566.100	伊川Bv	桁落下 (80m)	特殊杭，群杭99本 (ϕ 0.35× ℓ 8.0)	沖 積 砂 層
571.880	谷八木川B	桁外れ (1ヶ所)	ラーメン橋台+場所打群杭 16杭／柱 (ϕ 0.98× ℓ 13.0)	沖 積 砂 層

*被害集中区間内

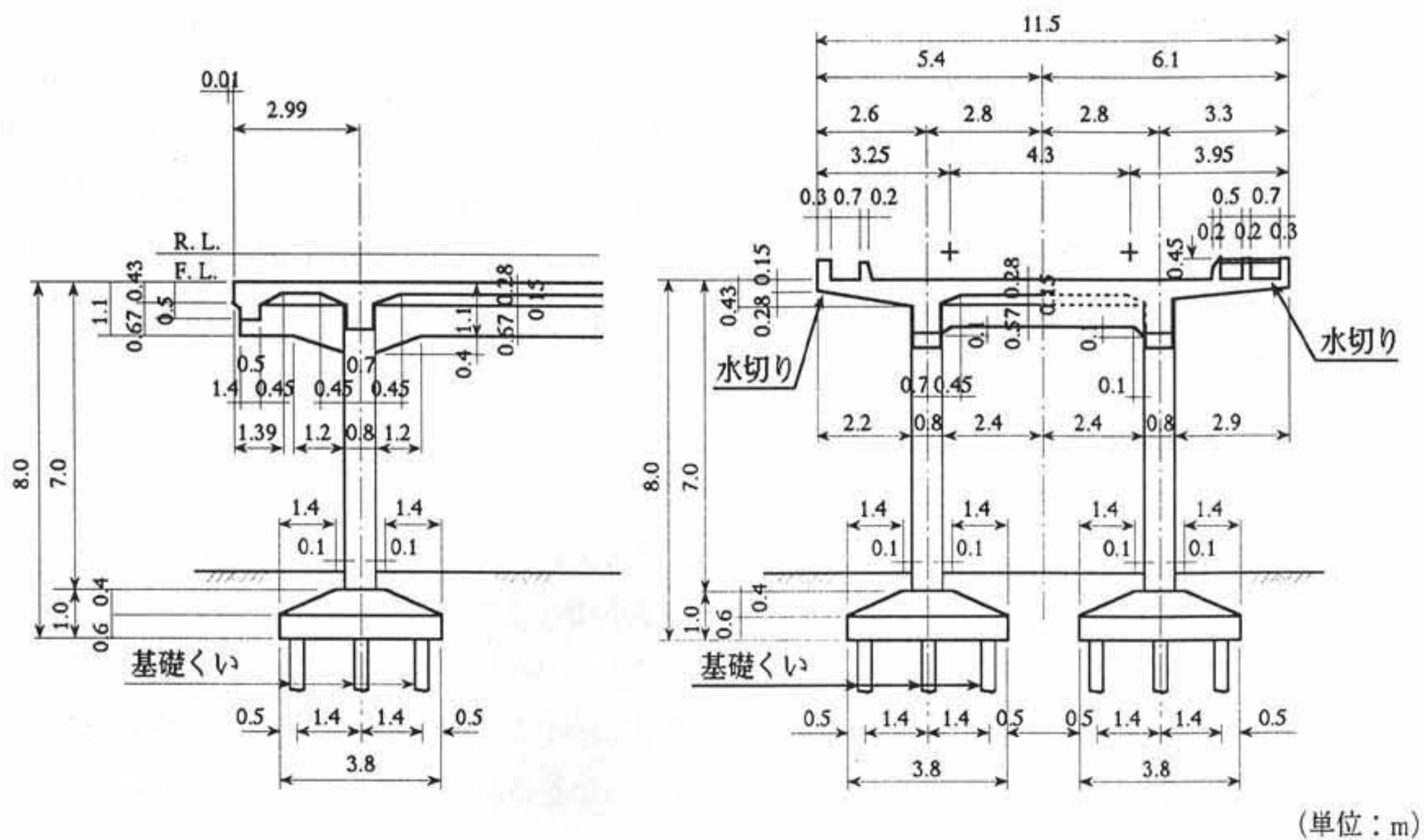


図 10-1-8. 標準断面図（山陽新幹線）

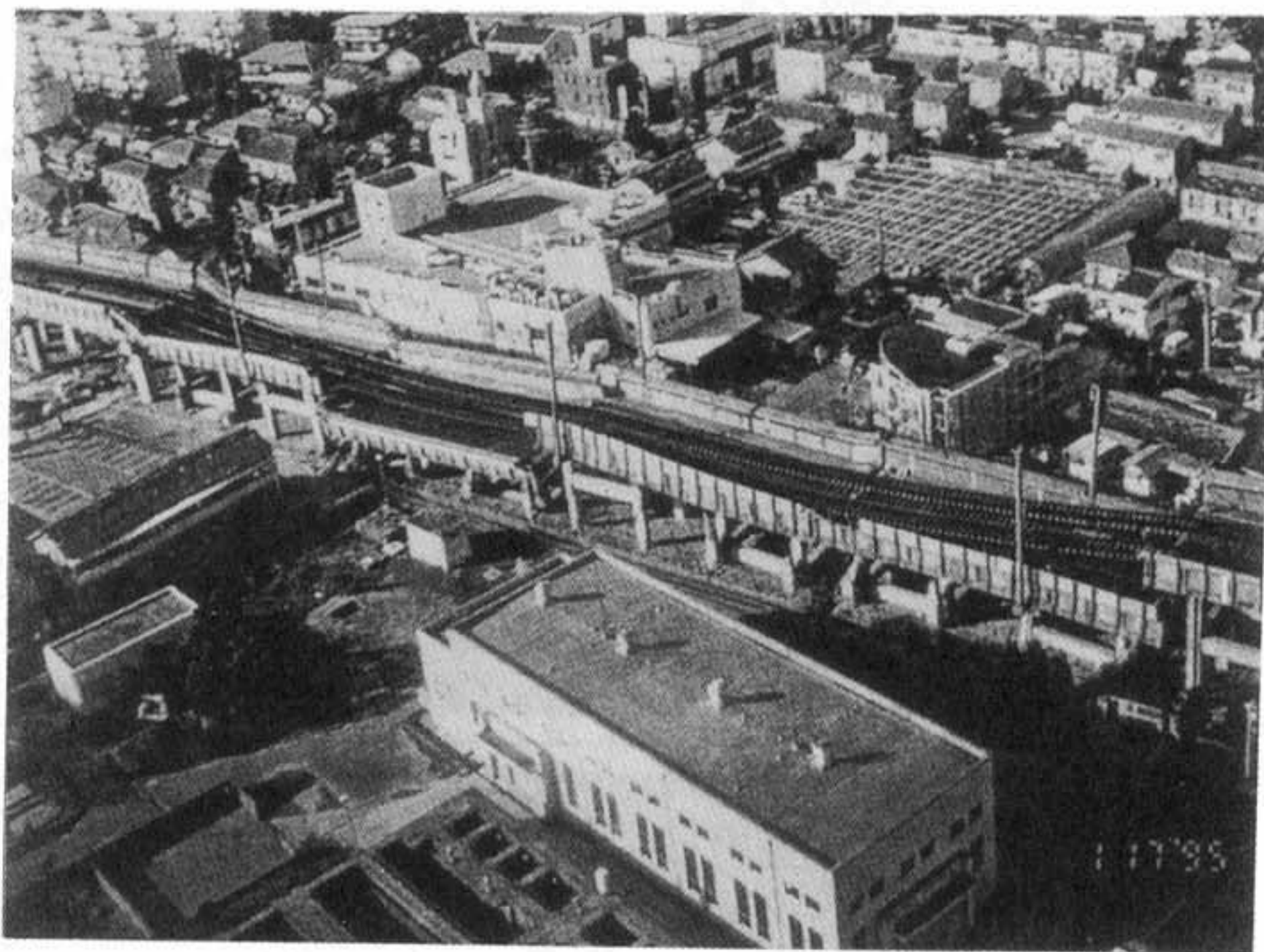


写真 10-1-7. 阪水高架橋の被害

は基礎構造の種類は特定できない。写真 10-1-7 は被害例であって、その設計図は図 10-1-9(a)、(b)に示されている。

本路線は、さまざまな地質の地域を通っているので、被害と地質条件の関係を調べることができる。表 10-1-1 に示すように、被災した構造物はほとんどが沖積砂層上にある。ただし、表に示した 49km の区間のうち、高架橋の延長は約 18km であるが、表層が沖積砂～沖積粘土で占められる延長はその約 32%に当たる。

高架橋の復旧工法及び復旧構造物の健全性の確認は、JR 東海道線と同様の方法で行われた。

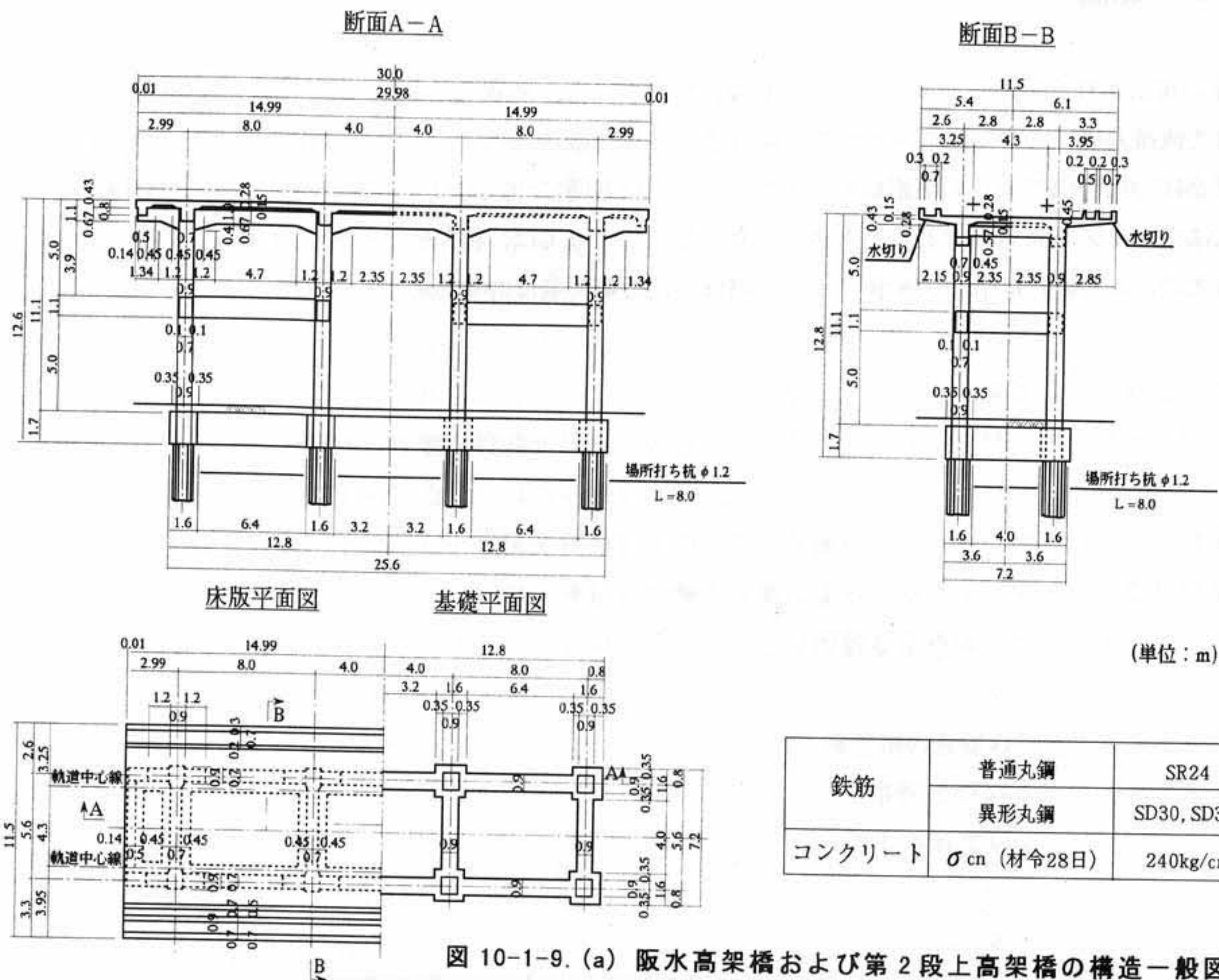


図 10-1-9. (a) 阪水高架橋および第 2 段上高架橋の構造一般図
(山陽新幹線)

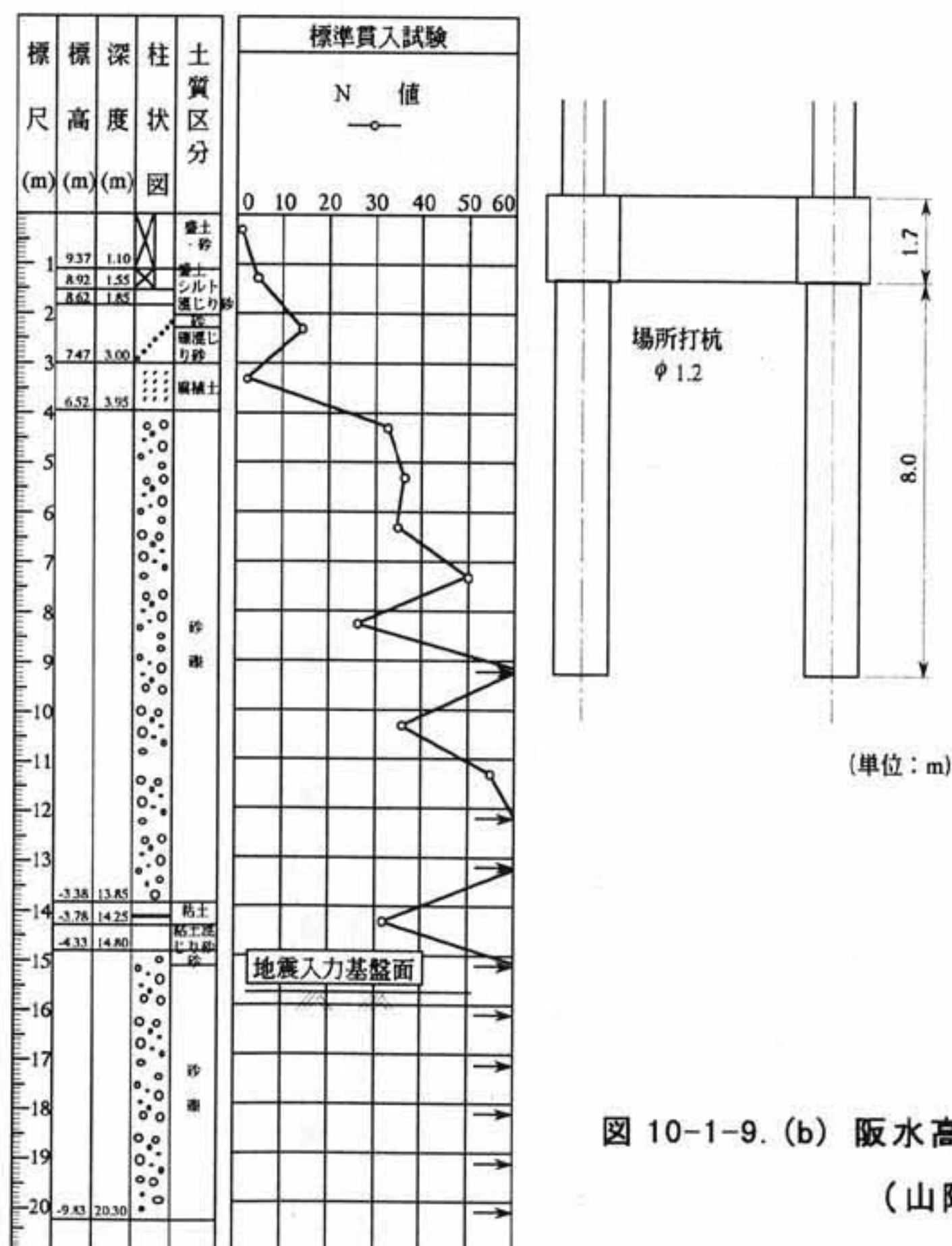


図 10-1-9. (b) 阪水高架橋杭基礎と周辺地盤柱状図
(山陽新幹線)

10-1-8. 結論

鉄道の復旧が社会的に急を要したため、基礎に焦点を当てた調査は部分的にしか行われなかった。調査が行われた直接基礎については、フーチングの大きな移動や破壊はほとんど発見されなかった。しかし、フーチングと柱の接合部での柱の破損は珍しくなかった。杭基礎については、少なくとも一柱式高架橋の場合には、杭にクラックが発見されることが多かった。路線によっては、杭基礎は補強工事なしに用いられることとなったが、この場合は構造物全体としての剛性が、衝撃荷重に対する応答を測定することによって確認された。

10-2. 構造物基礎：道路関係

10-2-1 はじめに

大阪北部から兵庫県南部の阪神地域には、大阪と神戸を結ぶ都市間幹線道路のみならず、西日本と東日本とを結ぶ主要な幹線道路が集中して存在している。特に、中国自動車道を除くほとんどの幹線道路は六甲山地と大阪湾に挟まれた狭い地域を通過している。兵庫県南部地震により、これらの道路は何らかの損傷を受け、特に、高架道路橋は倒壊を含む著しい損傷を受けた事例もみうけられた。この道路橋の被害は阪神・淡路大震災において生じた土木構造物の被害の中でも最も象徴的なものの一つである。

一般に、構造物は地盤に支持されているが、土木構造物はそのほとんどが重量構造物であるため、上部構造物を支える基礎構造物は重要な役割を担っている。したがって、健全な構造物とは上部構造物のみならず基礎構造物も含むものでなくてはならない。

阪神・淡路大震災において生じた土木構造物の被害のうち、直接目視できる損傷のほとんどは上部構造物において発生している。しかし、地盤の液状化や側方流動によって基礎構造物に大きな残留変形が生じている事例も少なくない。したがって、直接目視することが困難な基礎構造物にも場合によっては損傷が生じていることは十分考えられる。

本報告では、阪神・淡路大震災における道路橋を中心とした土木構造物の基礎の被害事例を収集し、構造物基礎の被害の全体像を明らかにしている。さらに、特徴的な被害事例についてそのメカニズムが検討されている。また、損傷を受けた杭基礎の水平耐荷力についても言及されている。

本調査・研究は以下の分科会メンバーによって行われた。

委員名		所属
主査	松井 保	大阪大学工学部
委員	安藤 進	鹿島建設（株）関西支店
〃	小田 和広	大阪大学工学部
〃	沢藤 尚文	大成建設（株）大阪支店
〃	霜上 民生	建設省近畿地方建設局
〃	中須 誠	日本道路公団試験研究所
〃	中平 明憲	（株）建設技術研究所大阪支店
〃	東尾 啓司	鹿島建設（株）関西支店
〃	三浦 昭爾	（株）大林組本店

10-2-2 高架道路橋の被害

図 10-2-1 は兵庫県南部地震による高架道路橋の上部構造および橋脚の被害状況を示している。ほとんどの被害は兵庫県南東部域において起こっている。表 10-2-1¹⁾ は主要な幹線道路橋の被災状況を示している。調査対象として、一般国道（2 号，43 号，171 号および 176 号），高速自動車国道（名神高速道路，中国自動車道）および阪神高速道路（3 号神戸線，5 号湾岸線）が，また，調査区間として川西市，宝塚市，伊丹市，尼崎市，西宮市，芦屋市および神戸市が選ばれている。表中の被災度の分類は，「道路震災対策便覧・震災復旧編」に準じて決定されている。この被災度は同じ構造部材の中では相対的な損傷の程度を表すものであるが，異なる構造部材間では同じ被災度であっても損傷の程度は必ずしも対応するものではない。橋脚，支承および上部構造における顕著な被害のほとんどは，国道 43 号線，阪神高速道路 3 号神戸線および名神高速道路において生じている。これに比して，阪神高速道路 5 号湾岸線では 1 カ所落橋が生じた以外，橋脚および上部構造には大きな被害が生じていないことが分かる。

10-2-3 高架道路橋の基礎の被害

10-2-3-1 基礎の種類

図 10-2-1 に示す路線のうち、①阪神高速道路 3 号神戸線、②同 5 号湾岸線、③ハーバーハイウェイ、④国道 2 号線浜手バイパス、⑤名神高速道路・中国自動車道について、採用されている基礎形式をまとめると図 10-2-2 のようになる。いずれの路線においても杭基礎の占める割合は約 80% であり、支配的な基礎形式であることが分かる。また、このうち、そのほとんどが大口径の鉄筋コンクリート場所打ち

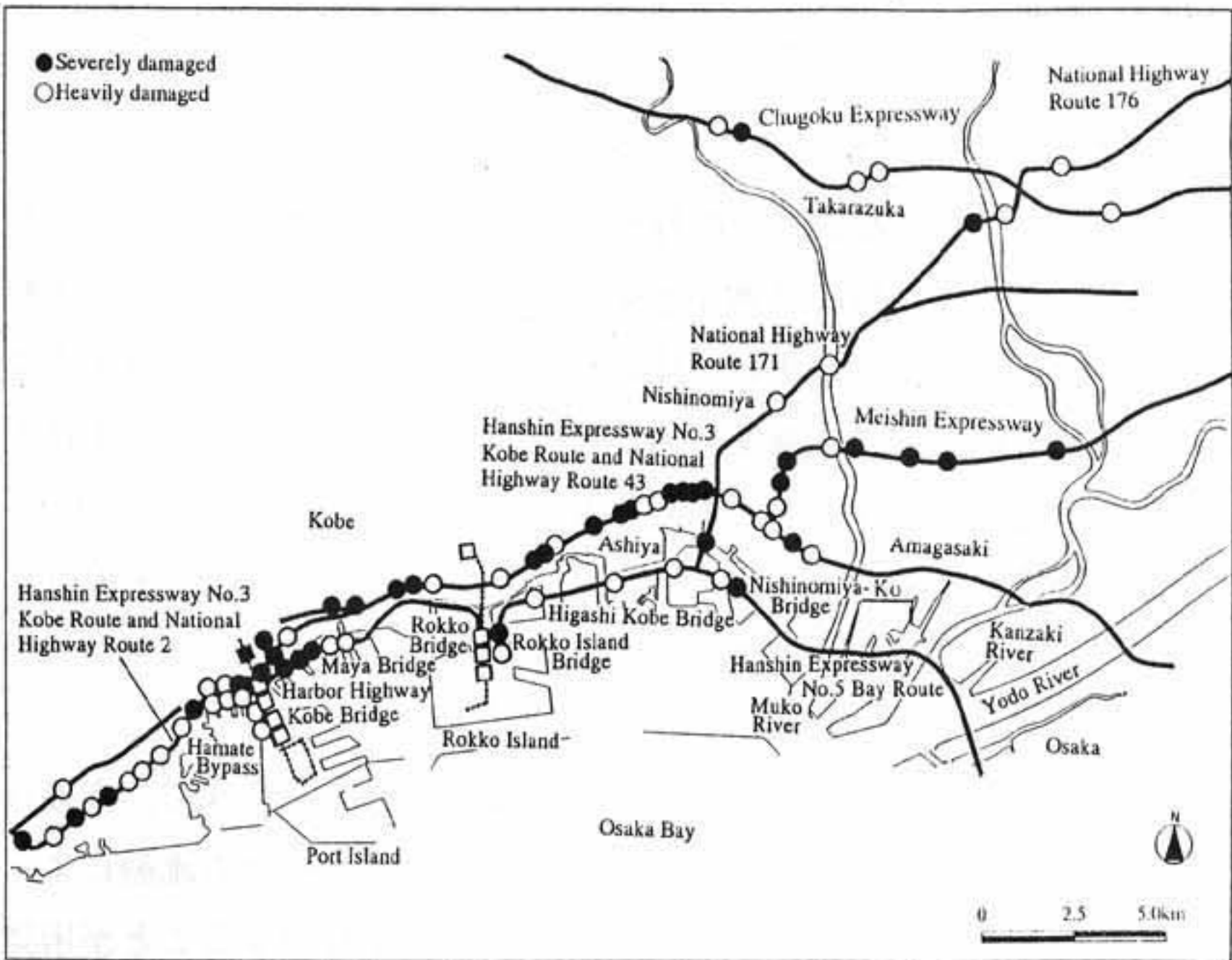


図 10-2-1 高架道路橋の上部構造および橋脚の被害状況

杭によって占められている。阪神高速道路 3 号神戸線および中国自動車道では、良好な支持地盤が地表面近くに存在する場合に限り、直接基礎が用いられている。水路を跨ぐような長大橋梁の基礎には、主にケーソン基礎が用いられている。数例ではあるが、特殊な基礎形式として、地中連続壁基礎および鋼管矢板井筒基礎も用いられている。

10-2-3-2 基礎の調査方法

基礎構造物の健全性を調査するために、①地盤を掘削し基礎の外観を直接目視により観察する方法、②コアボーリングを行いボーリングコアを直接目視する方法、③コアボーリングによって削孔された孔の壁面をボアホールテレビシステムによって観察する方法、④非破壊検査（速度検層法および衝撃波動法等）が適用された。図 10-2-3²⁾ は阪神高速道路 3 号神戸線の杭基礎に対する適用例を示している。基礎の外観を直接目視により観察する方法は、地盤の掘削が必要なため、地表面付近のごく限られた深度までしか適用できない。非破壊検査のうち速度検層法では伝播速度または振幅が変動する位置において、また、衝撃波動法では加速度波形が顕著に変化する位置において、基礎に何らかの損傷が生じている可能性があることが指摘される。これに対し、ボアホールテレビシステムによる調査は、ボーリング孔が到達している範囲であれば、深度に関係なくクラックの存在をカメラの画像を通じ観察できる。写真 10-2-

表 10-2-1 主要幹線道路の被災状況

路線名	部材名	被災度					計
		As	A	B	C	D	
一般国道 2 号	鋼製橋脚	0	0	9	5	21	35
	R.C. 橋脚	0	0	19	15	46	80
	支承		63	10	2	190	265
	上部構造	0	10	52	15	153	230
一般国道 4 3 号	鋼製橋脚	1	3	0	0	4	8
	R.C. 橋脚	13	23	1	2	105	144
	支承		8	13	13	272	306
	上部構造	15	31	3	8	142	199
一般国道 1 7 1 号	鋼製橋脚	0	0	2	0	0	2
	R.C. 橋脚	0	6	11	60	79	156
	支承		6	5	16	195	222
	上部構造	1	3	8	22	174	208
一般国道 1 7 6 号	鋼製橋脚	0	0	0	0	0	0
	R.C. 橋脚	0	0	0	0	20	20
	支承		0	0	2	45	47
	上部構造	0	0	0	0	77	77
阪神高速道路 3 号神戸線	鋼製橋脚	3	8	12	112	28	163
	R.C. 橋脚	64	78	102	225	474	943
	支承		371	274	383	1090	2118
	上部構造	26	67	243	215	753	1304
阪神高速道路 5 号湾岸線	鋼製橋脚	0	0	13	21	109	143
	R.C. 橋脚	0	0	1	22	179	202
	支承		30	72	196	286	584
	上部構造	1	0	8	28	425	462
名神高速道路	鋼製橋脚	0	0	0	0	0	0
	R.C. 橋脚	2	40	21	312	664	1039
	支承		401	65	11	974	1451
	上部構造	3	27	247	651	229	1157
中国自動車道	鋼製橋脚	0	0	0	0	4	4
	R.C. 橋脚	0	9	4	121	323	457
	支承		112	174	85	377	748
	上部構造	0	24	31	193	272	520
計	鋼製橋脚	4	11	36	138	166	355
	R.C. 橋脚	79	156	159	757	1890	3041
	支承		991	613	708	3429	5741
	上部構造	46	162	592	1132	2225	4157

1はボアホールテレビシステムの適用画像例を示している。この画像は孔壁の展開図であり、クラックの発生位置、その幅およびその方向等の情報を正確に評価することができる。ただし、ボアホールテレビシステムによって観察されるクラック幅は、コンクリートの削孔時にクラック周辺のコンクリートまでを削り取ったり、撮影時の照明によるクラック周辺の陰影のため、実際の幅よりも大きく観察される場合もある。

10-2-3-3 基礎構造物の被害

1. 杭基礎の被害

(a) 場所打ち杭の被害

図 10-2-4¹⁾ および 10-2-5²⁾ は、それぞれ、阪神高速道路 5 号湾岸線およびハーバーハイウェイにおいて観察された基礎杭の被害事例を示している。図 10-2-1 から分かるように、阪神高速道路 5 号湾岸線は、阪神間にあってはそのほとんどが埋立造成地盤上を通過している。また、ハーバーハイウェイは六甲アイランドとポートアイランドを湾岸伝いに結んでおり、阪神高速道路 5 号湾岸線と同様に埋立造成地盤上に位置している。いずれの事例においても杭頭部においてクラックが発生している。これは、杭頭がフーチングと剛結されているため、杭頭部において最大モーメントが生じたためであると考えられる。杭頭部分以外にも、杭の中間部分や支持層への根入れ付近においてもクラックが生じている事例が見うけられる。これらについては、地盤の液状化や

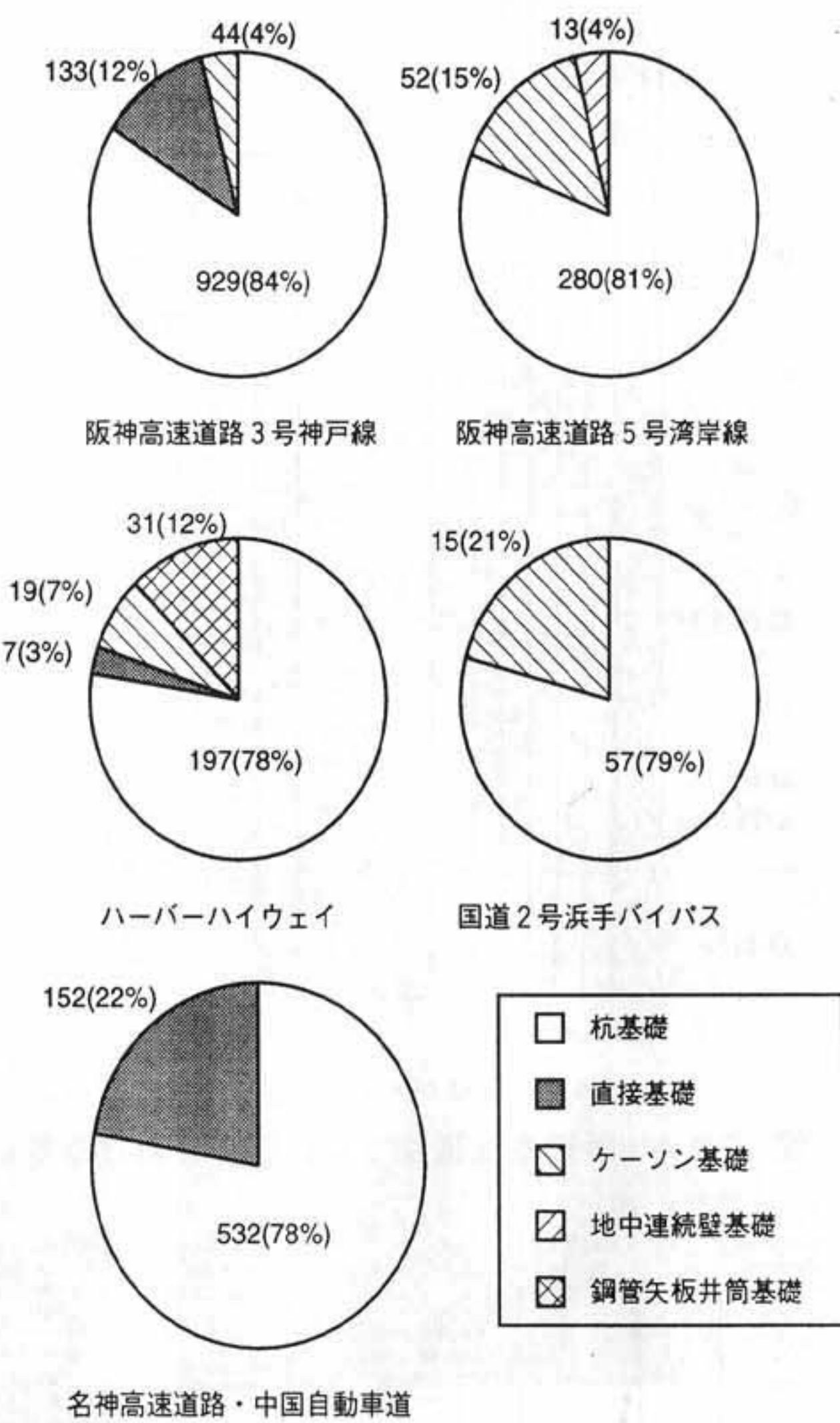


図 10-2-2 主要幹線道路における基礎の形式

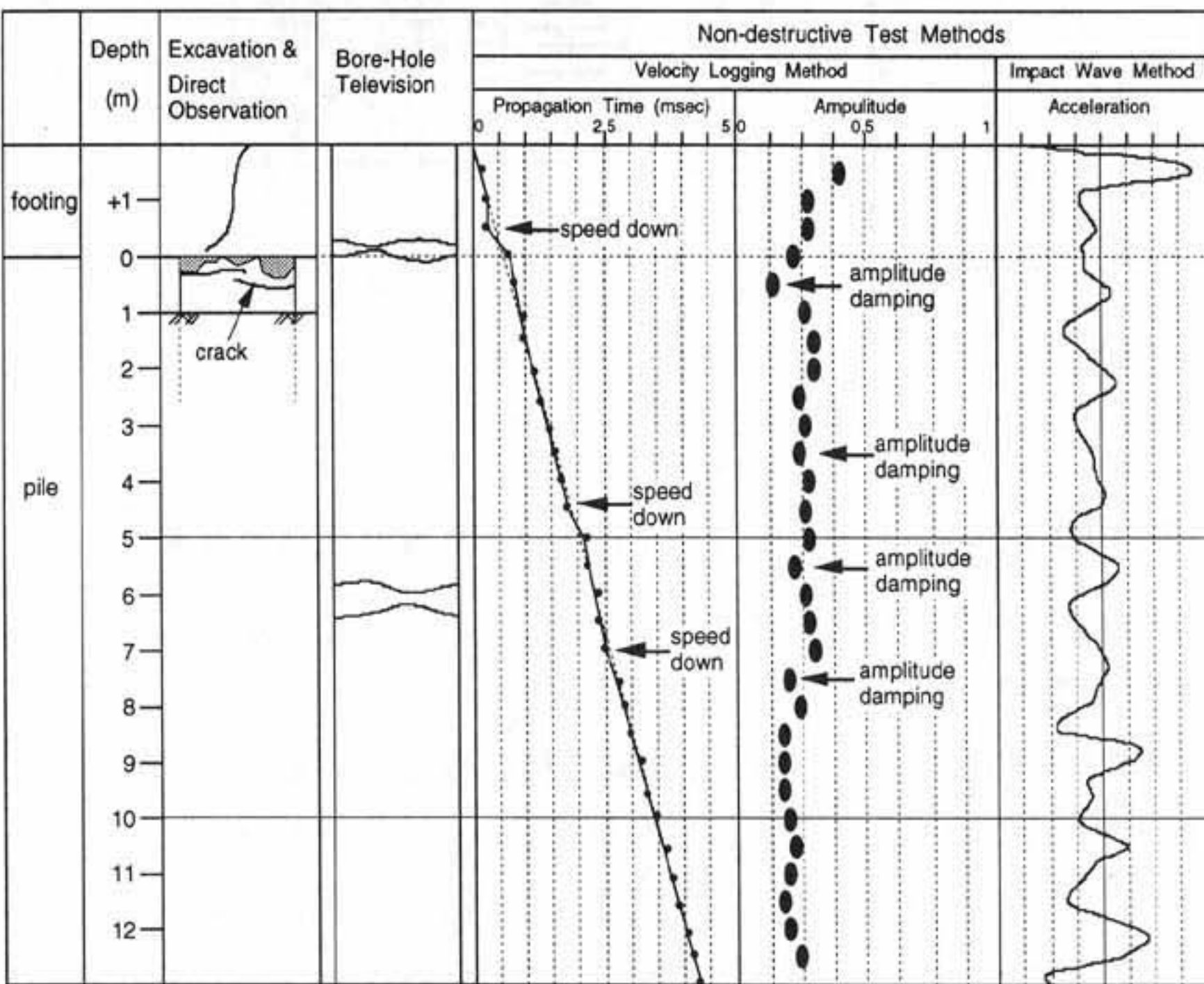
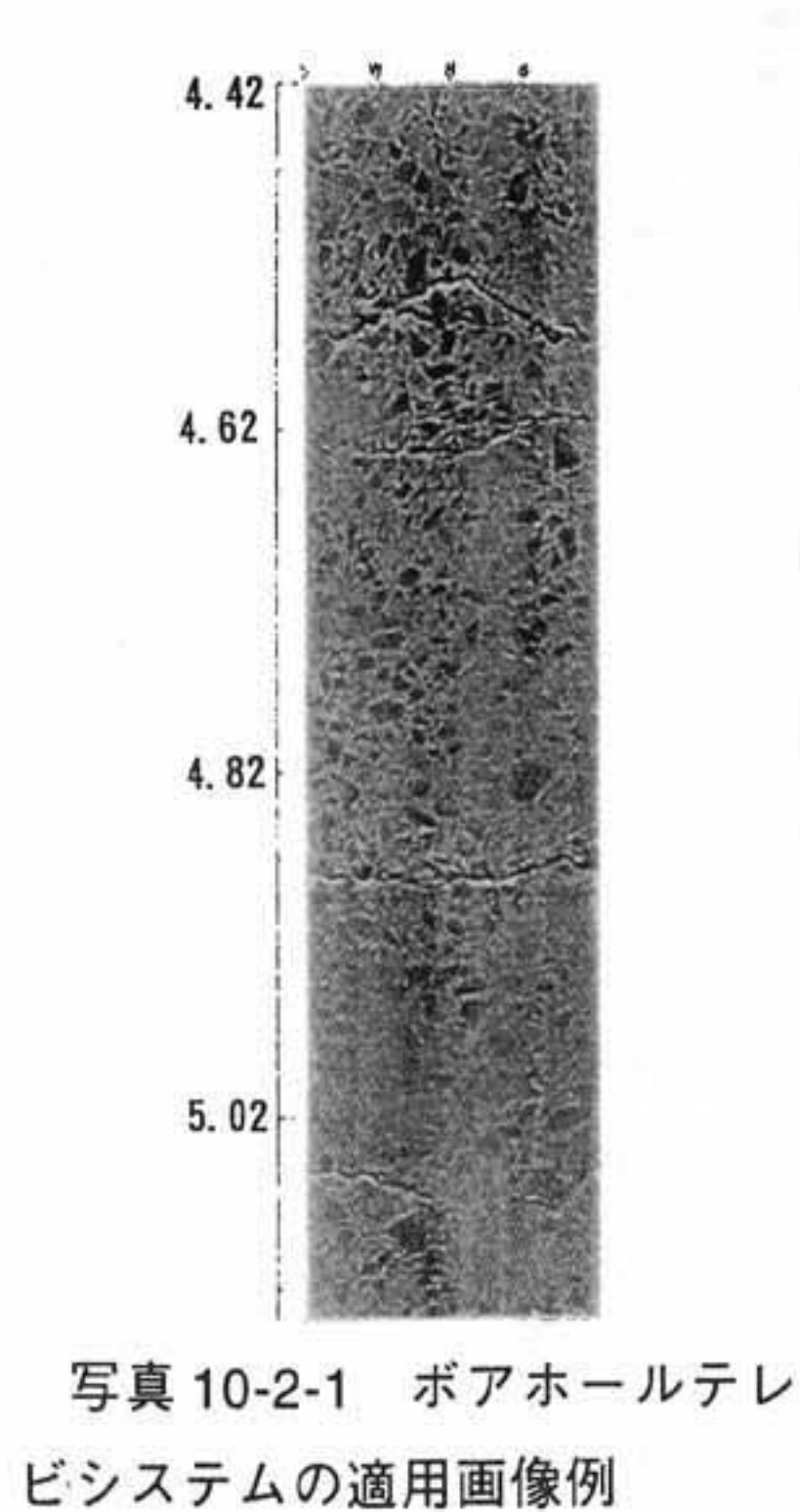
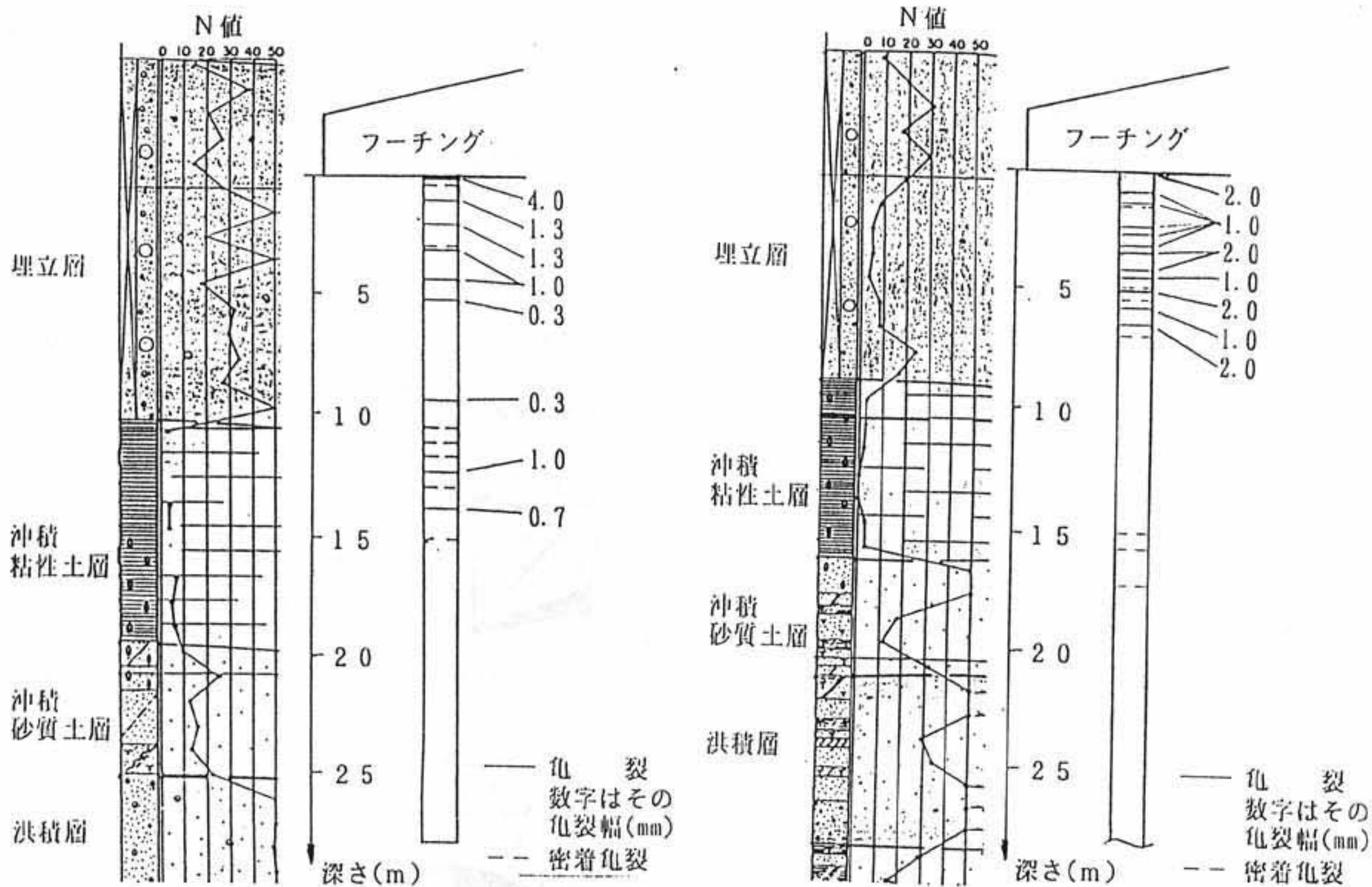


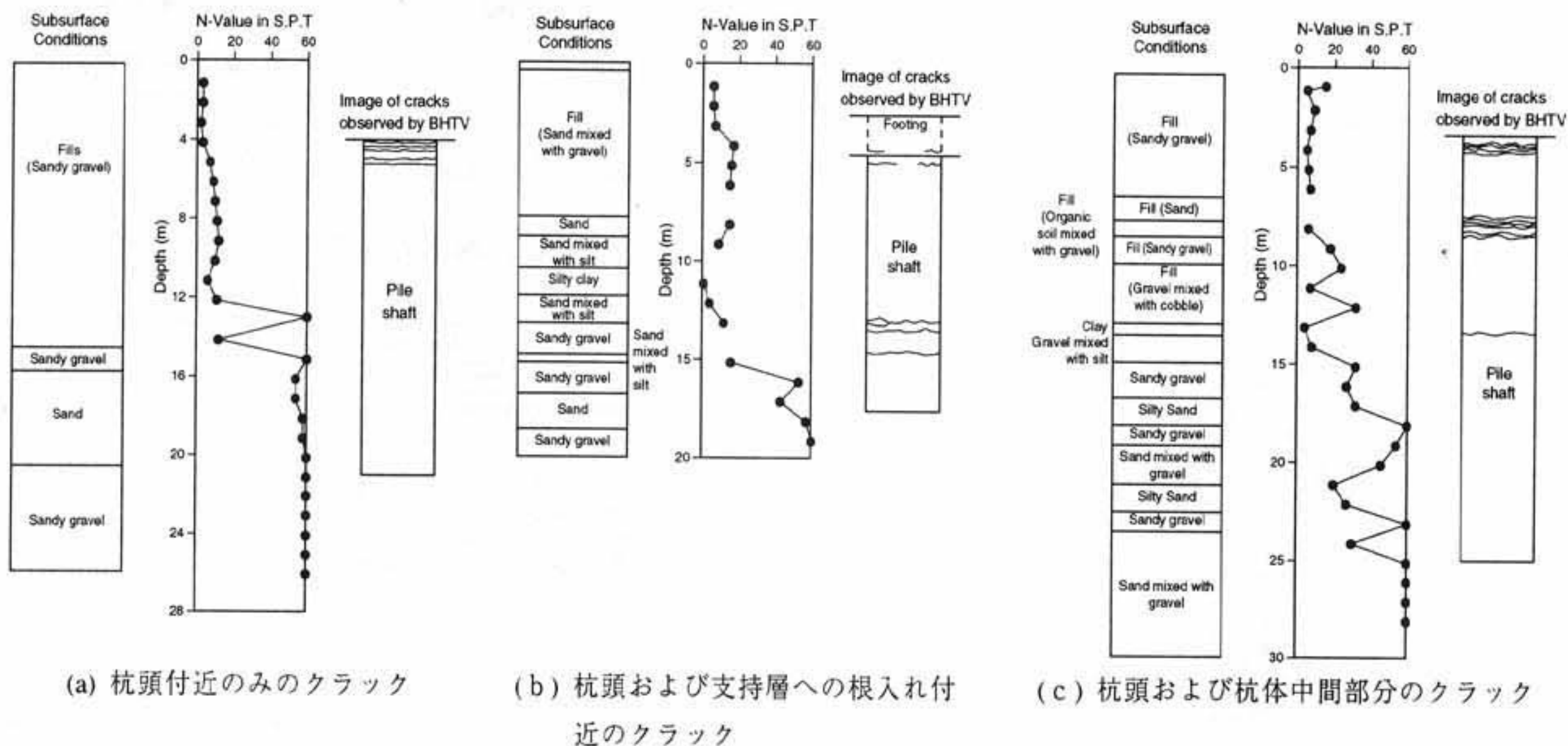
図 10-2-3 基礎杭の健全性の調査例



(a) 亀裂幅が大きい事例

(b) 橋脚の残留水平変位が大きい事例

図 10-2-4 阪神高速道路 5 号湾岸線における基礎杭の被害事例



(a) 杭頭付近のみのクラック

(b) 杭頭および支持層への根入れ付近のクラック

(c) 杭頭および杭体中間部分のクラック

図 10-2-5 ハーバーハイウェイにおける基礎杭の被害事例

側方流動，杭体の配筋および地盤の振動特性などが複雑に影響しあって生じたものと考えられる。

(b) 鋼管杭

鋼管杭は場所打ち杭の施工が困難な海岸線近くや海中に位置する橋脚の基礎として用いられることが多い。写真 10-2-2²⁾ は摩耶埠頭西側突堤の被害状況を示している。突堤に位置している橋脚はハーバーハイウェイのものであり、その基礎形式には直径 1 m の鋼管杭が採用されている。写真から分かるように、突堤護岸の海側への移動に伴う地盤の側方流動により、フーチング側面がむき出しになっている。また、一部の橋脚では基礎杭まで露出していた。したがって、杭には橋軸直角方向の側方土圧が作用して

いることが容易に予想される。このため、フーチング底面から約2 m掘削し、杭体の健全性の検証が行われた。写真10-2-3²⁾はその状況を示している。目視による観察およびX線調査法などによる調査の結果、杭体には損傷がないことが確認された。

図10-2-6²⁾は地震によって被害を受けた栈橋の断面を示している。栈橋は直径70 cmの鋼管杭によって支持されていた。また、栈橋は護岸から離れて設置されているため、護岸の移動の影響を直接には受けない。図10-2-7²⁾は栈橋を再建するために引き抜かれた杭の変形状況を示している。いずれの杭もほぼ同一深度において海側に向かって変形している。この深度は護岸下の置換砂が存在する深度と対応していることから、置換砂の液状化による地盤の側方流動、もしくは、置換砂の支持力減少による滑り破壊によるものと考えられる。

(c) PC 杭

一般に、PC杭は比較的軽量の構造物の基礎として用いられることが多い。図10-2-8²⁾は神崎川の高潮防潮堤の断面を示している。防潮堤の基礎として直径35 cmのPC杭が用いられている。地震後、防潮堤の周辺では液状化による噴砂現象の痕跡と地盤沈下が観察された。また、防潮堤自身は川に向かって2～3°傾斜した。写真10-2-4²⁾は杭頭付近における杭の損傷状況を示している。杭の損傷は地盤の液状化と

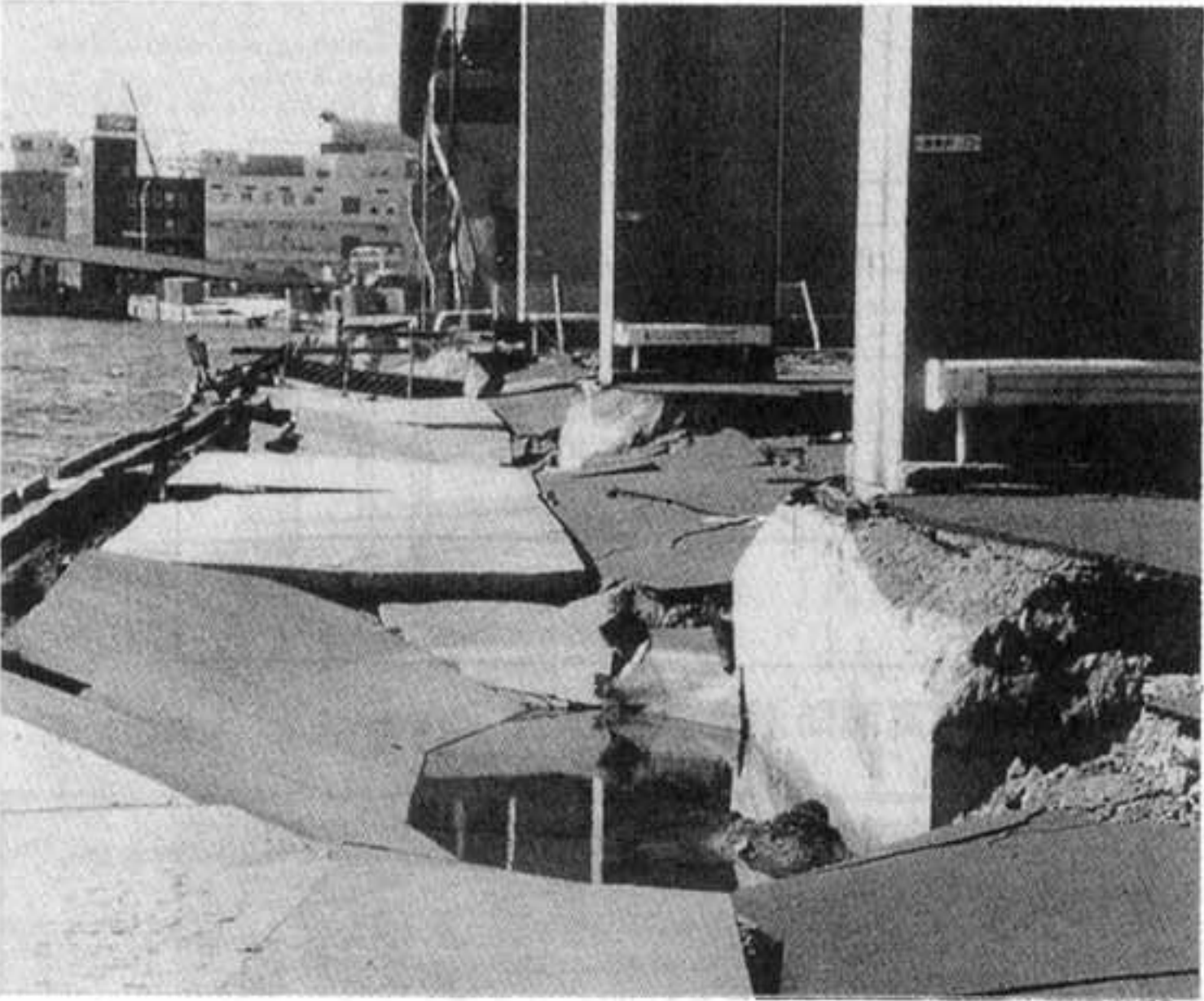


写真10-2-2 摩耶埠頭西側突堤の被害状況

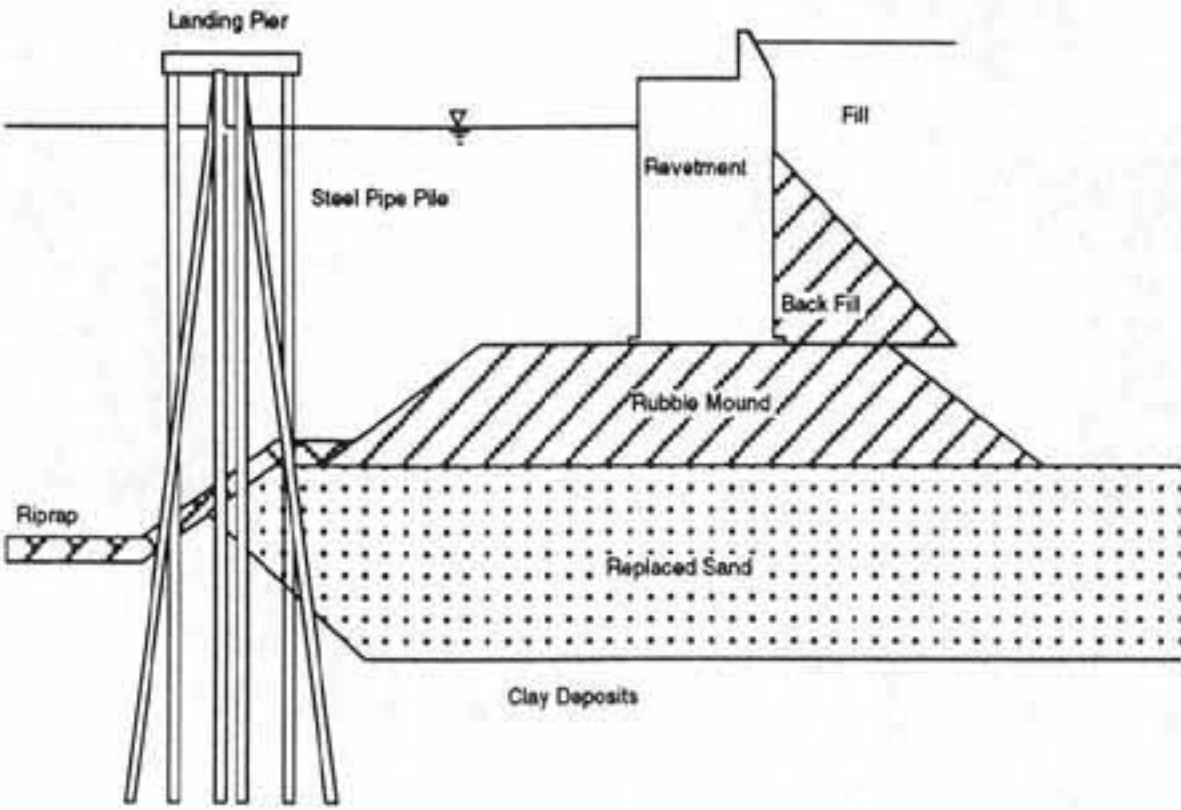


図10-2-6 被害を受けた栈橋の断面

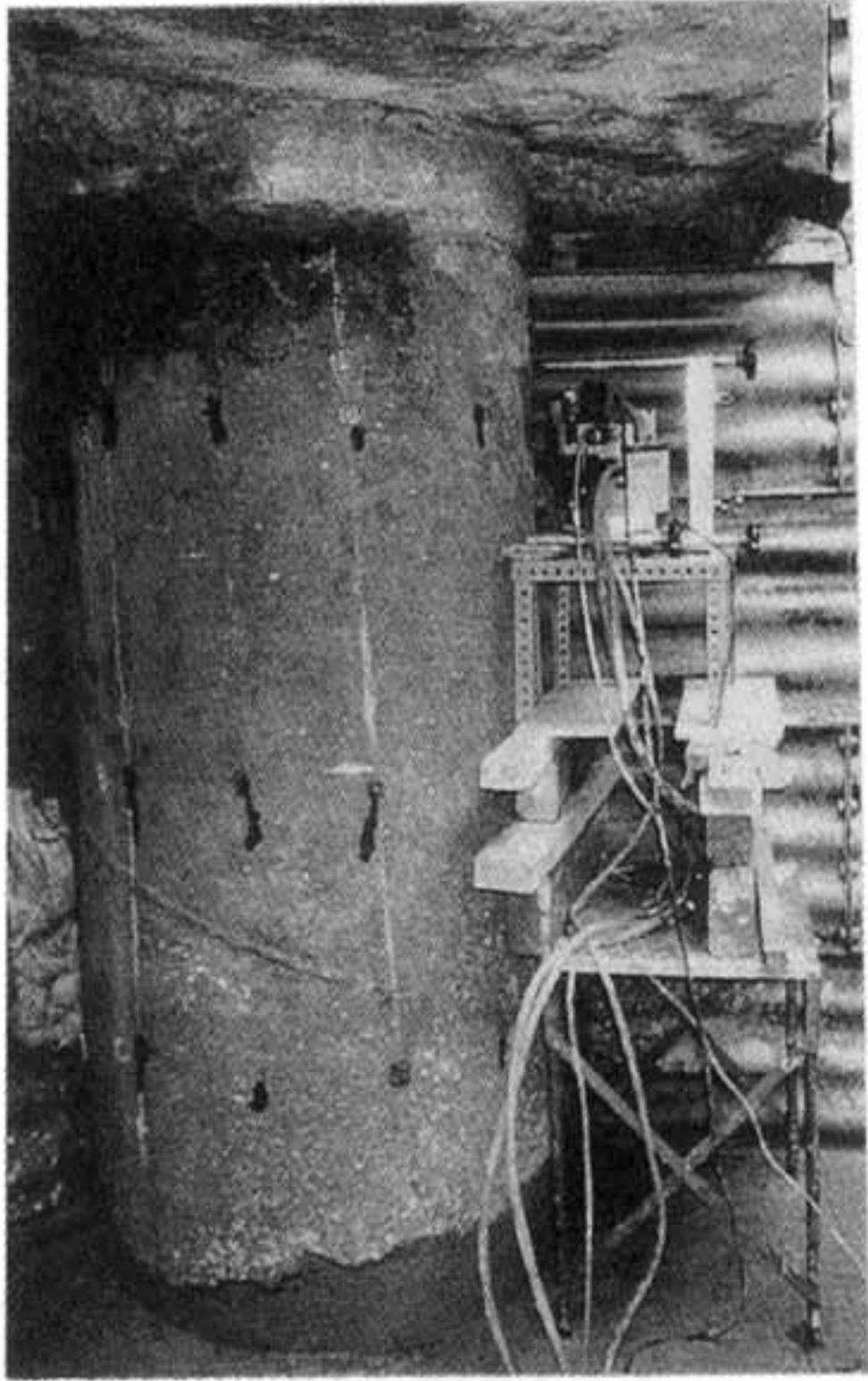


写真10-2-3 鋼管杭の状況

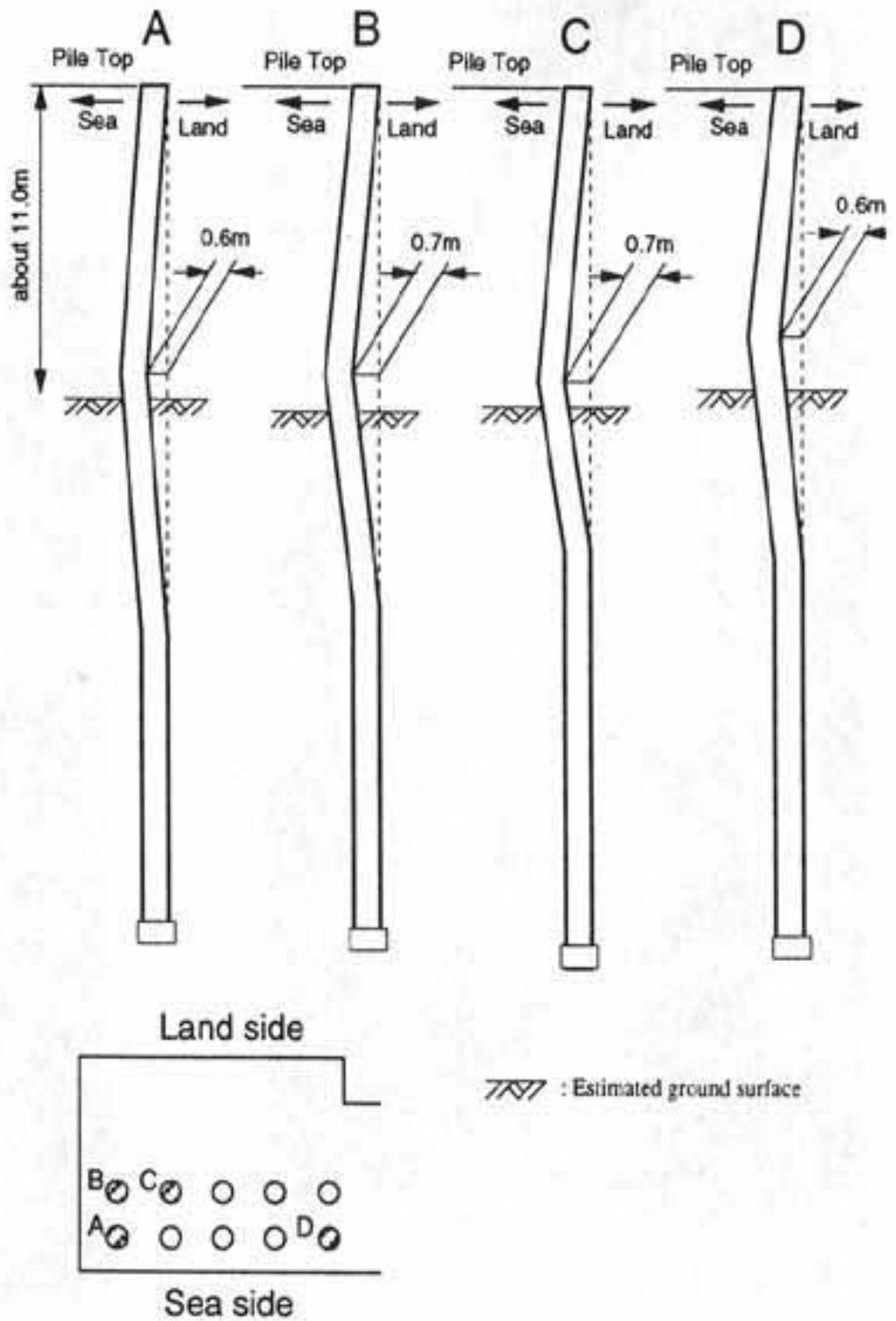


図10-2-7 被害を受けた基礎杭の変形状況

それに伴う地盤の側方流動によって生じたものと考えられる。

2. 直接基礎

写真 10-2-5²⁾ は国道 1 7 1 号の高架道路橋における直接基礎の被害事例を示している。フーチングとの接合部付近において橋脚にクラックが生じていた。ただし、フーチング自体にはクラックの発生は認められなかった。基礎地盤の沈下および移動が認められなかったことから、クラックは、地震による上部構造および橋脚の慣性力によって引き起こされる曲げモーメントによって生じたものと考えられる。

写真 10-2-6²⁾ は神戸港第 4 突堤上における神戸大橋へのアプローチ高架橋の被害事例を示している。右側の橋脚の基礎形式は直接基礎であり、約 8 m の厚さを持つ捨石マウンドに支持されていた。また、左側の橋脚の基礎は杭基礎である。右側の橋脚が傾斜し、かつ、沈下したため、桁が乗っている横梁が傾斜している。右側橋脚の傾斜ならびに沈下は、直接基礎の支持層である捨石マウンド周辺が液状化し、その支持力が低下したことに起因するものであると考えられる。

3. ケーソン基礎

ケーソン基礎は水路を跨ぐ長大橋梁の基礎として用いられることが多く、したがって、護岸近傍に位置していることが多い。ボアホールテレビシステムによる調査の結果、基礎自体にクラックが発生した事例は阪神高速 5 号湾岸線において一例みられるだけであり、その損傷も比較的小さなものであった。

写真 10-2-7³⁾ は神戸大橋の神戸側支承を示している。支承が設置されている橋台はケーソン基礎であり突堤の護岸を兼ねている。地震後、支承が約 60 cm 神戸側に移動した。支承はポートアイランド側が固定、神戸側が可動条件であるため、両側のケーソン基礎が水路側へ移動し、その合計した変位量が約 60 cm になったものと考えられる。また、橋台に隣接する突堤の護岸は約 1.5 m 水路側に移

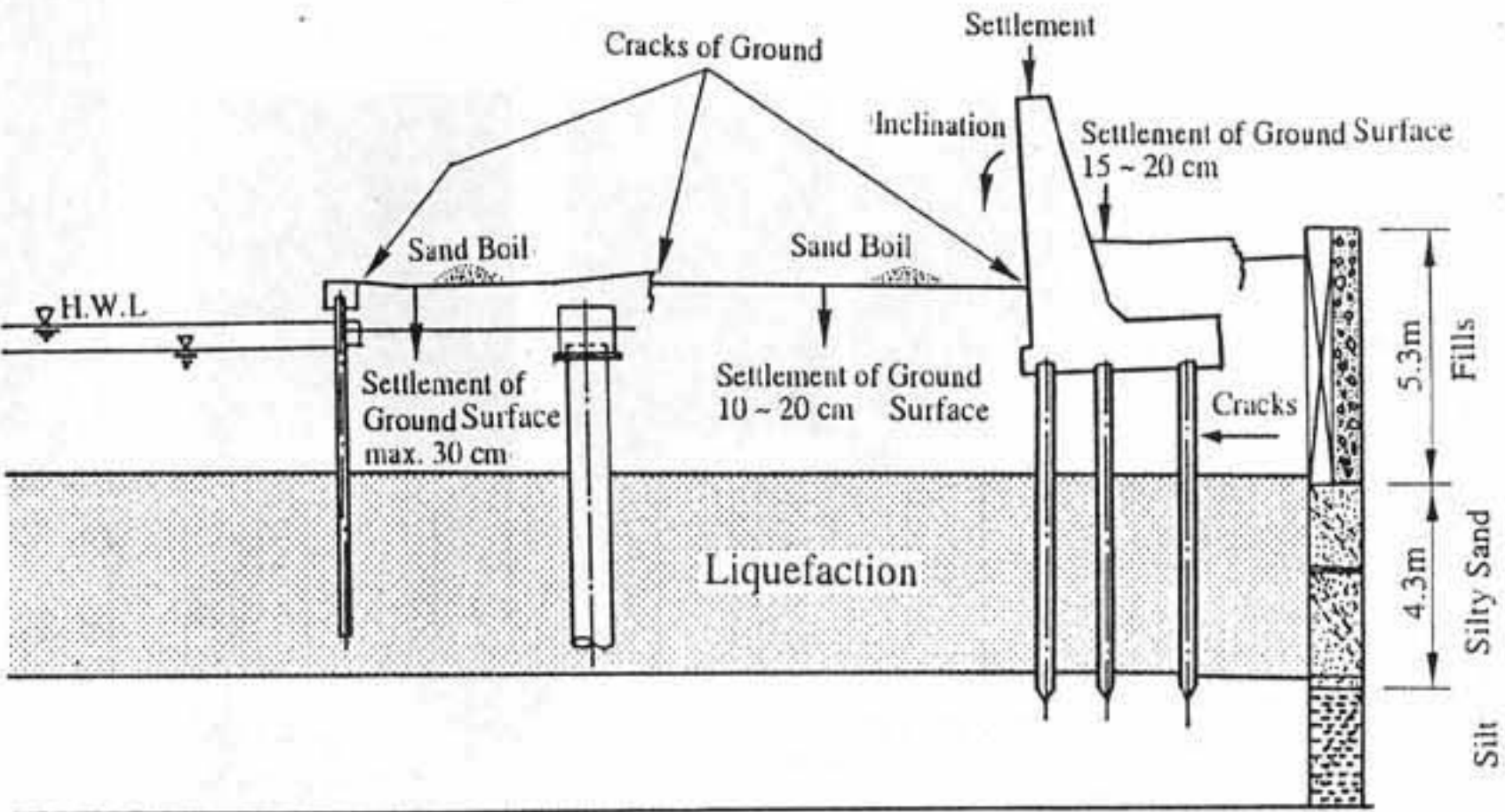


図 10-2-8 神崎川の高潮防潮堤の断面図

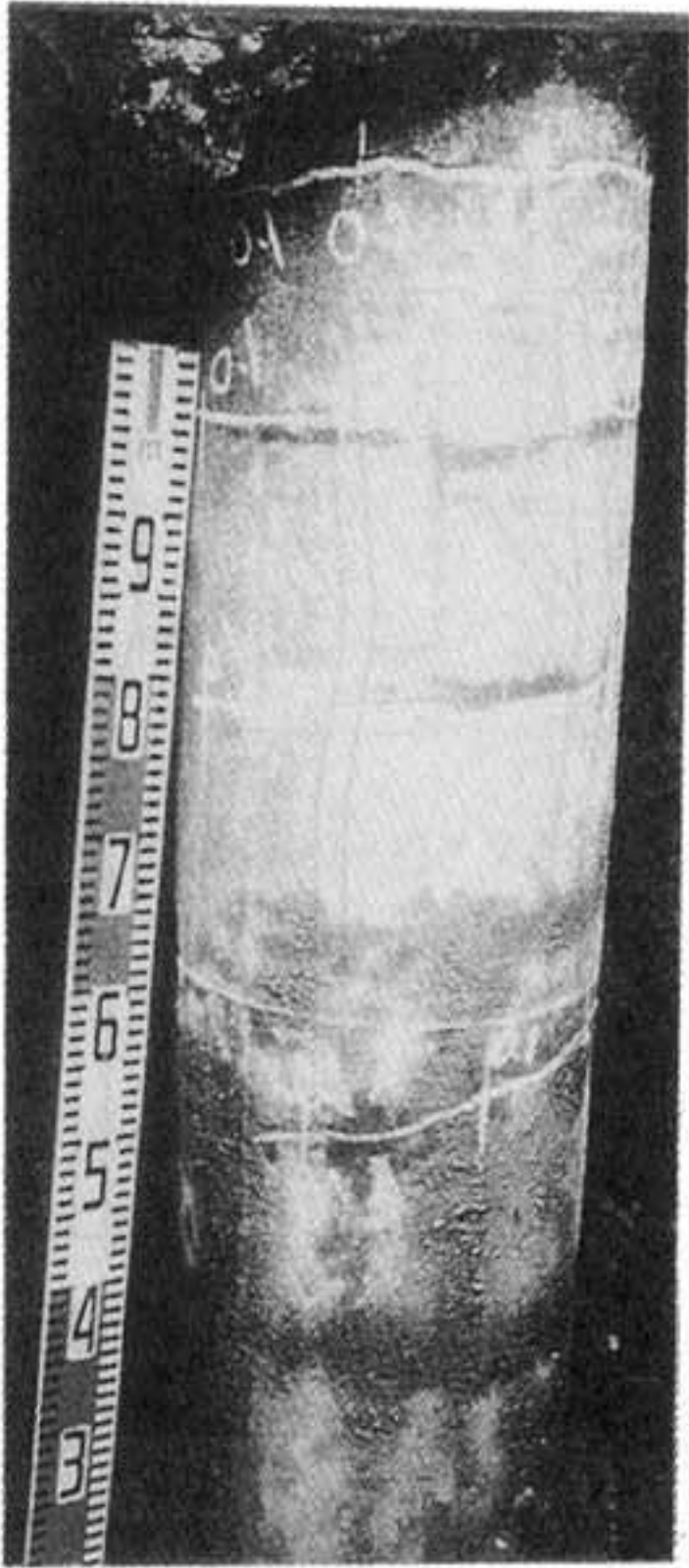


写真 10-2-4 杭頭付近における損傷状況

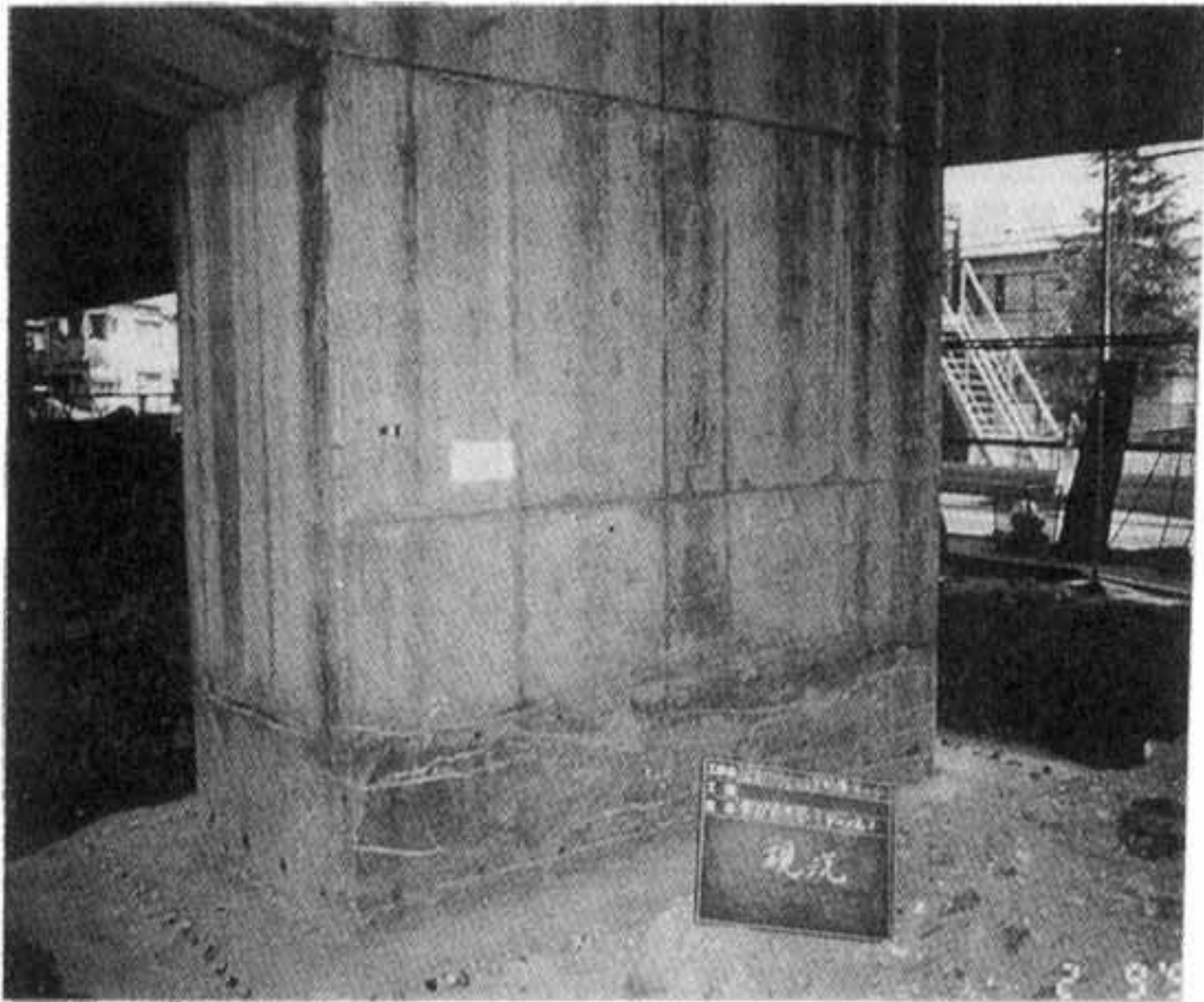


写真 10-2-5 国道 1 7 1 号における直接基礎の被害例

動するとともに約1m沈下していた。これらは、地盤の液状化による側方流動現象に起因して発生したものであると考えられる。

10-2-4 考察と課題

10-2-4-1 被災の地域性

表10-2-2¹⁾は阪神高速道路3号神戸線ならびに5号湾岸線、一般国道2号浜手バイパスおよび名神高速道路・中国自動車道における杭基礎の被災状況を示している。表中の被災度は、表10-2-3¹⁾に示す判定基準によって決定されている。阪神高速道路3号神戸線では、杭体に損傷がないと考えられる被災度dと判定される杭基礎の割合が、調査が実施された基礎の84%であるのに対し、阪神高速道路5号湾岸線および一般国道2号浜手バイパスでは約50%となっている。一方、名神高速道路・中国自動車道では、調査された基礎杭すべてが被災度dと判定されている。また、表中には示されていないが、ハーバーハイウェイにおいても、その基礎杭は阪神高速道路5号湾岸線や一般国道2号浜手バイパスと同程度の損傷を受けている。

阪神高速道路5号湾岸線、一般国道2号浜手バイパスおよびハーバーハイウェイにおける基礎の被災度が他に比べて大きい理由は、これらの高速道路が埋立造成地盤上に建設されているため、地盤の液状化や側方流動の影響を顕著に受けたことが主因であると考えられる。図10-2-9¹⁾は六甲アイランド、魚崎浜および深江浜における阪神高速道路5号湾岸線の橋脚の残留水平変位と橋脚周辺地盤の水平変位との関係を示している。橋脚周辺地盤の水平変位の増加にともない、橋脚自身の残留変位量も大きくなっている。つまり、地盤の液状化により、橋脚周辺地盤の水平抵抗機能が失われるだけでなく、地盤の側方流動により基礎には側方流動圧が加わり、地震時の基礎構造物にとってより厳しい条件下におかれ、基礎の移動が生じたものと考えられる。これは、杭基礎に比して剛性が大きいケーソン基礎や地中連続壁基礎では、杭基礎の場合に比べ残留水平変位が小さくなっていることから伺える。地震時に側方流動圧を受ける基礎、特に、杭基礎の場合、「地震時受働

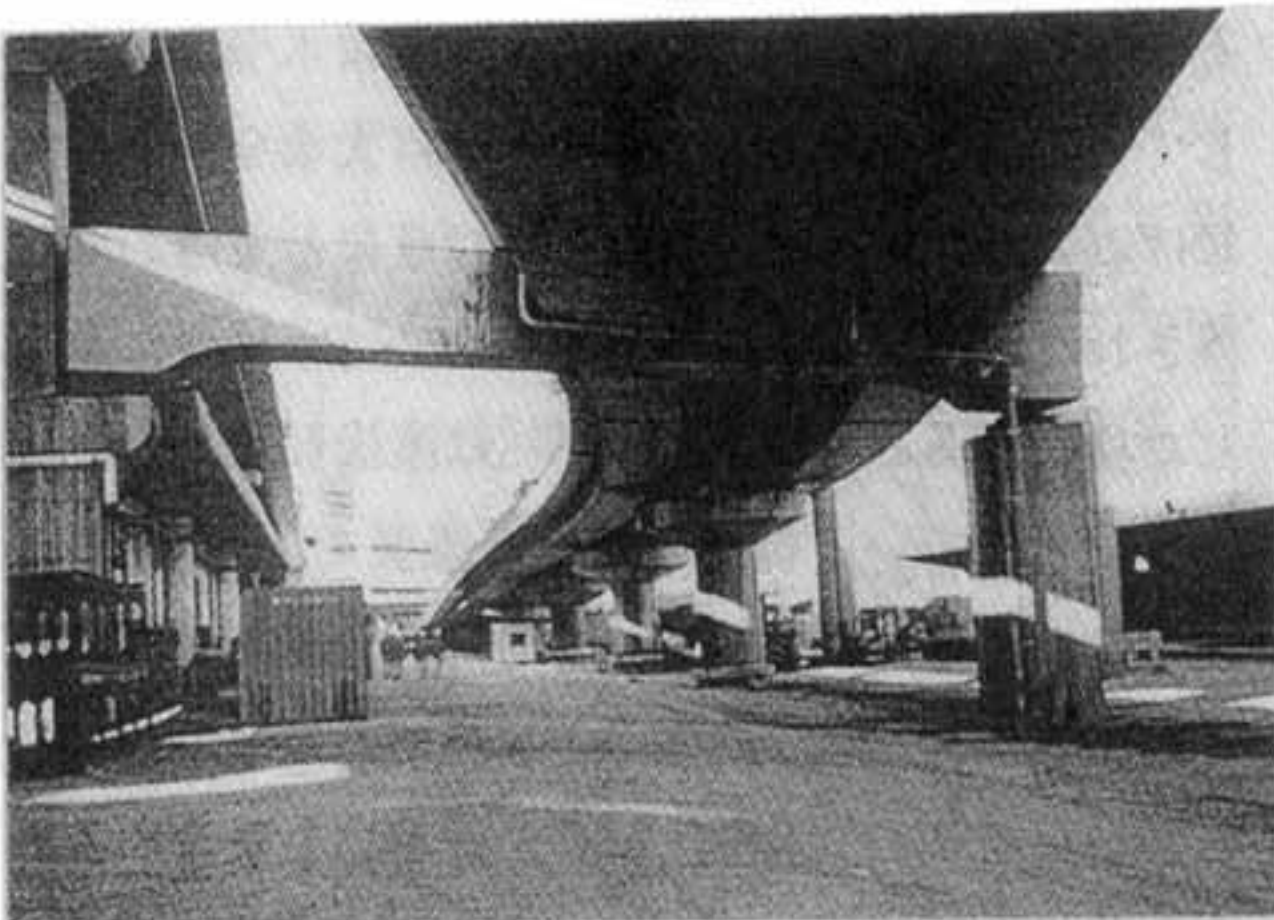


写真 10-2-6 神戸港第4突堤上における神戸大橋へのアプローチ高架橋

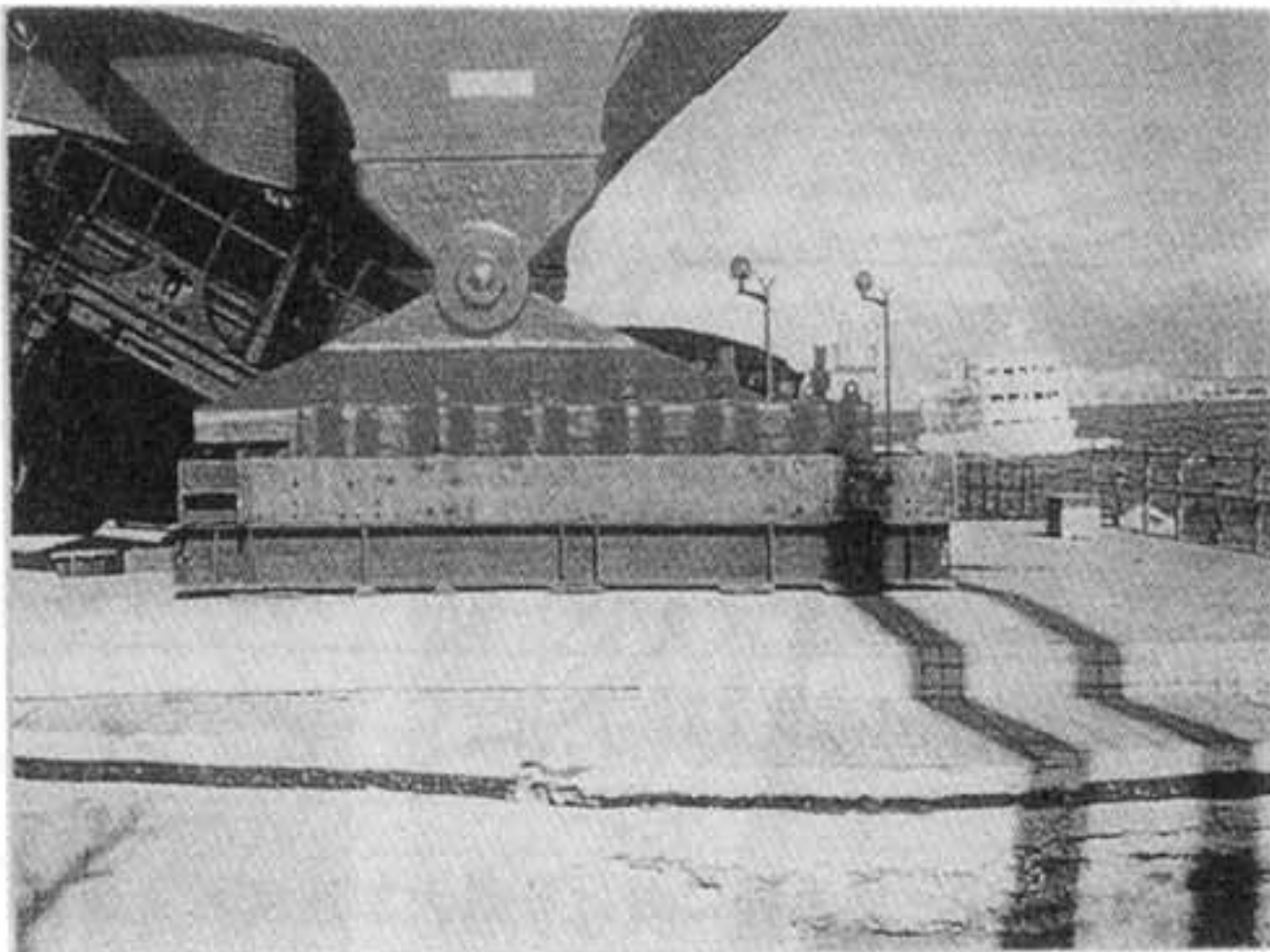


写真 10-2-7 神戸大橋の神戸側支承

表 10-2-2 基礎杭の被災状況

路線名	被災度				計
	a	b	c	d	
阪神高速道路 3号神戸線	0(0%)	0(0%)	17(16%)	92(84%)	109
阪神高速道路 5号湾岸線	0(0%)	17(11%)	57(37%)	79(52%)	153
一般国道2号 浜手バイパス	0(0%)	0(0%)	10(50%)	10(50%)	20
名神高速道路 中国自動車道	0(0%)	0(0%)	0(0%)	21(100%)	21

表 10-2-3 杭基礎の被災度の判定基準

被災度	定 義
a	基礎の沈下と同時に大きな残留水平変位がみられるもの。
b	基礎に大きな残留変位が認められるもの。 杭体に曲げ亀裂がみられるもの。
c	杭体に小さな曲げ亀裂がみられるもの。
d	杭体に損傷がないか、曲げ亀裂があっても軽微なもの。

杭」⁴⁾と呼ばれるが、今後、地震時受働杭としての検討法の確立が不可欠であろう。

また、図10-2-10¹⁾における解析結果から、阪神高速道路3号神戸線の立地位置と阪神高速道路5号湾岸線の立地位置とでは地震動の特徴に違いがあったことが示唆される。さらに、この両者は、建設された年代が異なっているため準拠した設計基準が異なっているだけでなく、上部構造および橋脚の構造特性も異なっている。これらの要因も基礎の被害に影響を与えていると考えられる。今後、被害メカニズムの解明にあたっては、上部構造、橋脚および基礎ごとにそれぞれの視点からの検討もむろん重要であるが、これらすべてを含んだ構造物全体としての挙動の解明、さらには構造物全体として整合性のある設計法の開発が望まれる。

10-2-4-2 護岸の変状と基礎構造物

阪神・淡路大震災では、水際線近傍に位置する高架道路橋の橋脚に海側への大きな残留水平変位が生じているものも見受けられた。図10-2-11¹⁾はその一例として、六甲アイランドならびに対岸の魚崎浜における六甲アイランド大橋アプローチ部付近の地盤の水平変位を橋脚の残留水平変位とともに示している。これらの橋脚は杭基礎によって支持されている。護岸近傍の橋脚に特に大きな残留水平変位が生じていることが分かる。また、神戸大橋を例として挙げるように、護岸近傍もしくは護岸と兼用して設置されたケーソン基礎でも大きな残留水平変位が生じた場合がある。図10-2-12²⁾は護岸とそれに近接して位置している橋脚の被害の概要を示している。護岸の海側への移動により背面地盤の側方流動が引き起こされ、橋脚の海側への移動および傾斜が生じる。したがって、水際線付近に構造物を建設する場合、基礎と護岸との系統的な設計が必要となろう。

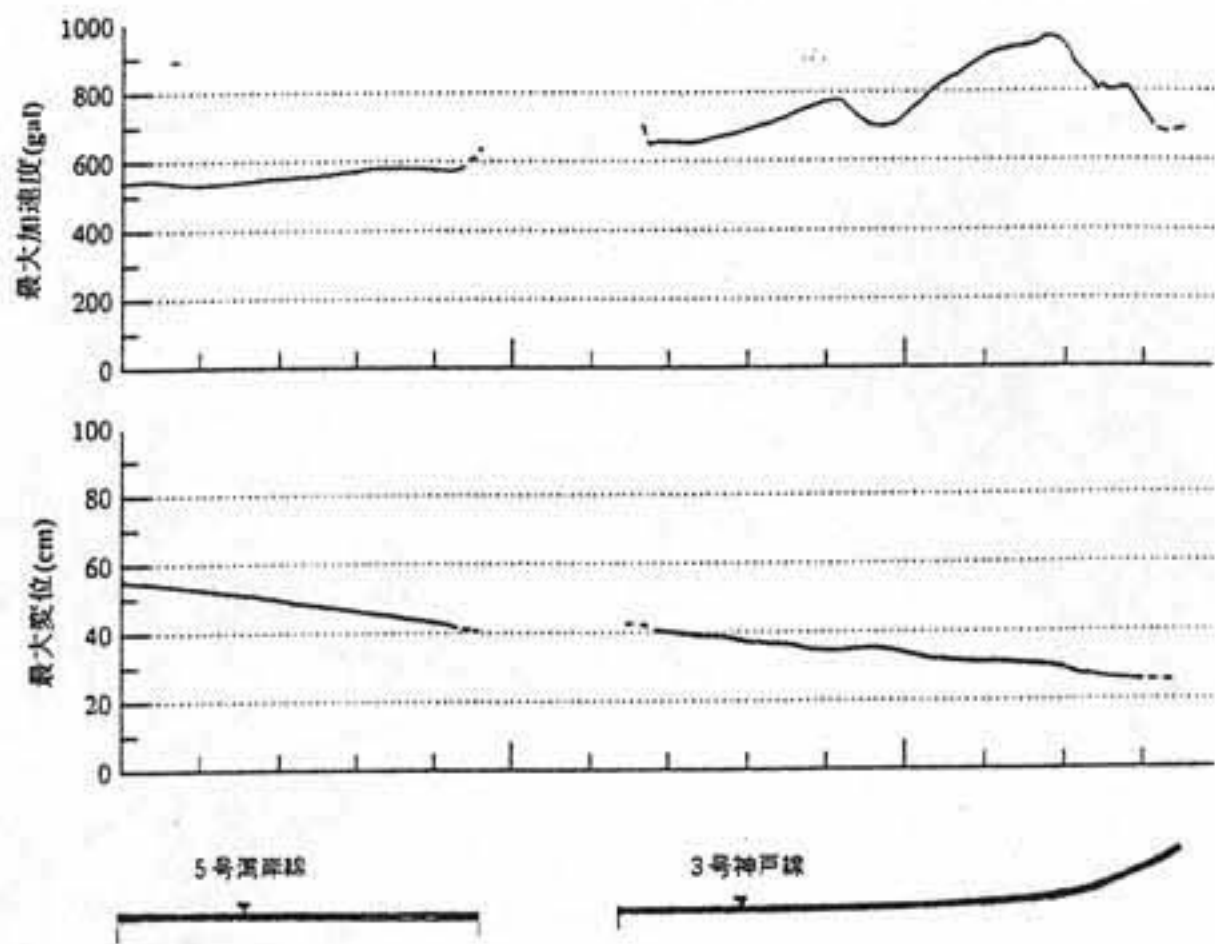


図10-2-10 地表面における最大加速度および最大変位の分布

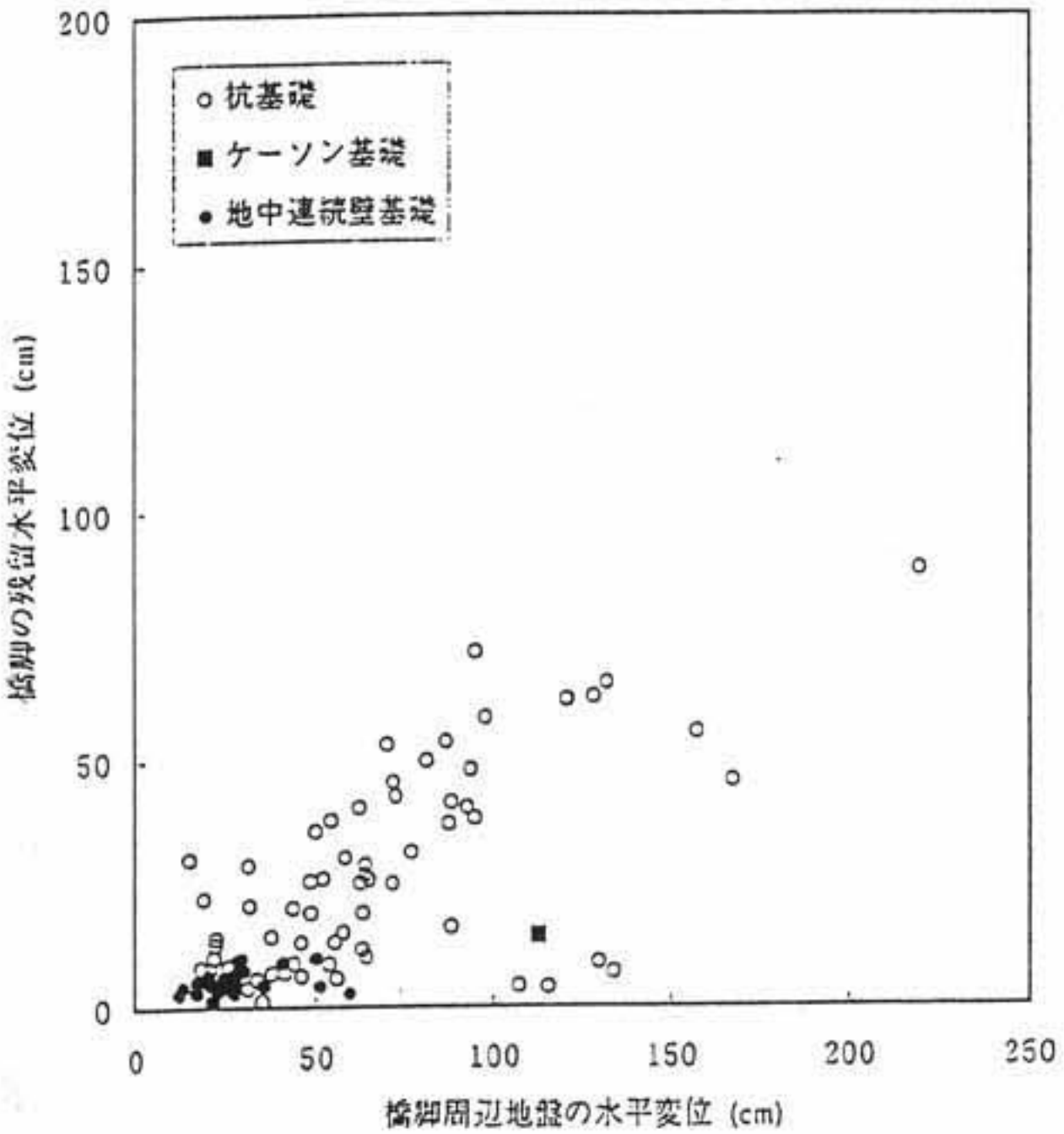


図10-2-9 橋脚の残留水平変位と橋脚周辺地盤の水平変位との関係

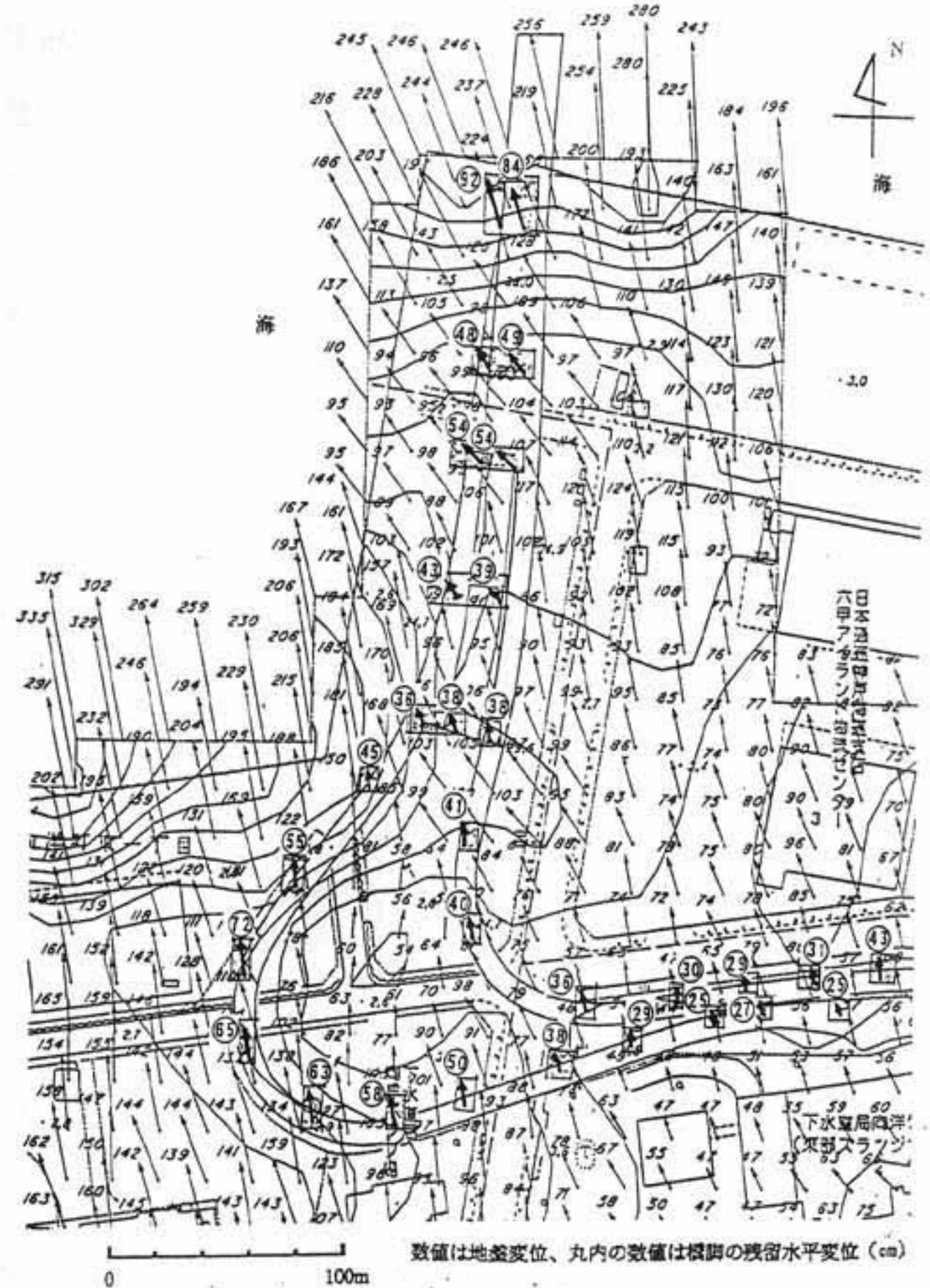


図10-2-11(a) 六甲アイランドにおける地盤変位および橋脚の残留水平変位

10-2-4-3 損傷を受けた基礎の耐力

損傷を受けた杭基礎の耐力を確認するために、損傷を受けた基礎杭を使用した杭体曲げ試験、鉛直載荷試験および水平載荷試験が行われた。試験杭として、神戸市東灘区深江本町において倒壊を起こした阪神高速道路3号神戸線の基礎杭が選ばれている。写真10-2-8¹⁾は試験杭の杭頭付近の状況を示している。表10-2-3に基づく試験杭の被災度はcランクに判定される。また、杭体から採取されたコンクリートコアおよび鉄筋に対する材料試験の結果、コンクリートは十分に大きな強度を有していることが確認されたが、鉄筋はいくつかの部材が降伏点を越す応力履歴を受けたことが示唆された。

図10-2-13¹⁾と図10-2-14¹⁾

は、それぞれ杭体曲げ試験の概要と載荷試験における水平荷重～水平変位の関係を示している。図10-2-14には、杭頭部が健全であると仮定し、解析的に求められた水平荷重～水平変位関係も示されている。杭頭部の損傷に起因する剛性の低下により、載荷試験結果は解析結果に比べ、同一荷重に対して大きな水平変位量を示している。

鉛直載荷試験および水平載荷試験では、2本の杭をそれぞれフーチング下面から1.2mの位置において切断し、それ以深

の杭体を用いて載荷試験を行っている。図10-2-15¹⁾および10-2-16¹⁾は、それぞれ、鉛直載荷試験における杭頭荷重～杭頭沈下量関係ならびに水平載荷試験における載荷重～水平変位関係を示している。

杭基礎全体の挙動におよぼす損傷の影響を明らかにするために、基礎の非線形挙動を考慮したシミュレーション解析が行われた。図

10-2-17¹⁾は解析モデルを示している。地盤の抵抗および杭体の曲げ剛性は、載荷試験および材料試験から得られた結果に基づき設定されている。特に杭体の曲げ剛性については、図10-

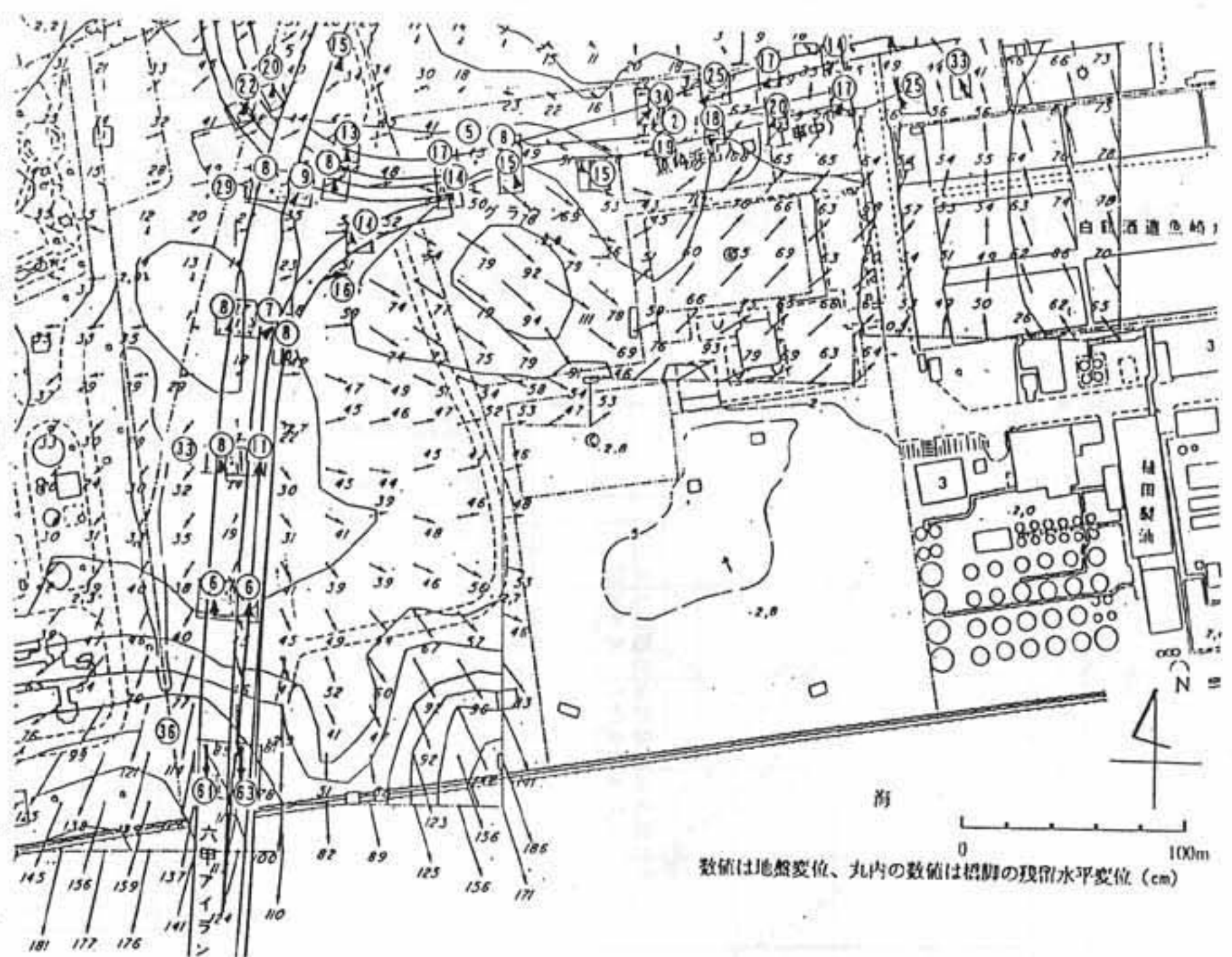


図10-2-11(b) 魚崎浜における地盤変位および橋脚の残留水平変位

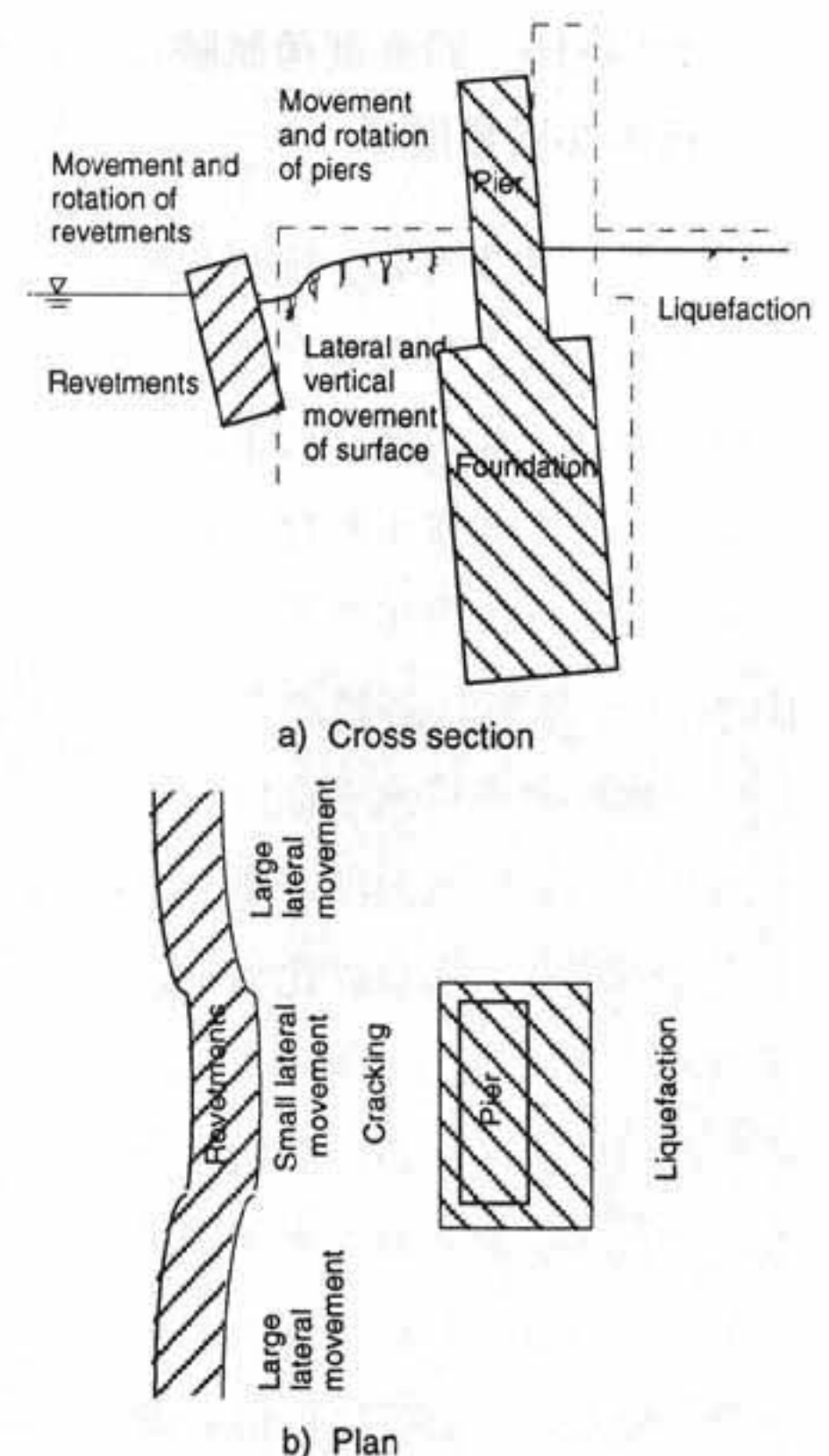


図10-2-12 護岸と近接している橋脚の被害の概要

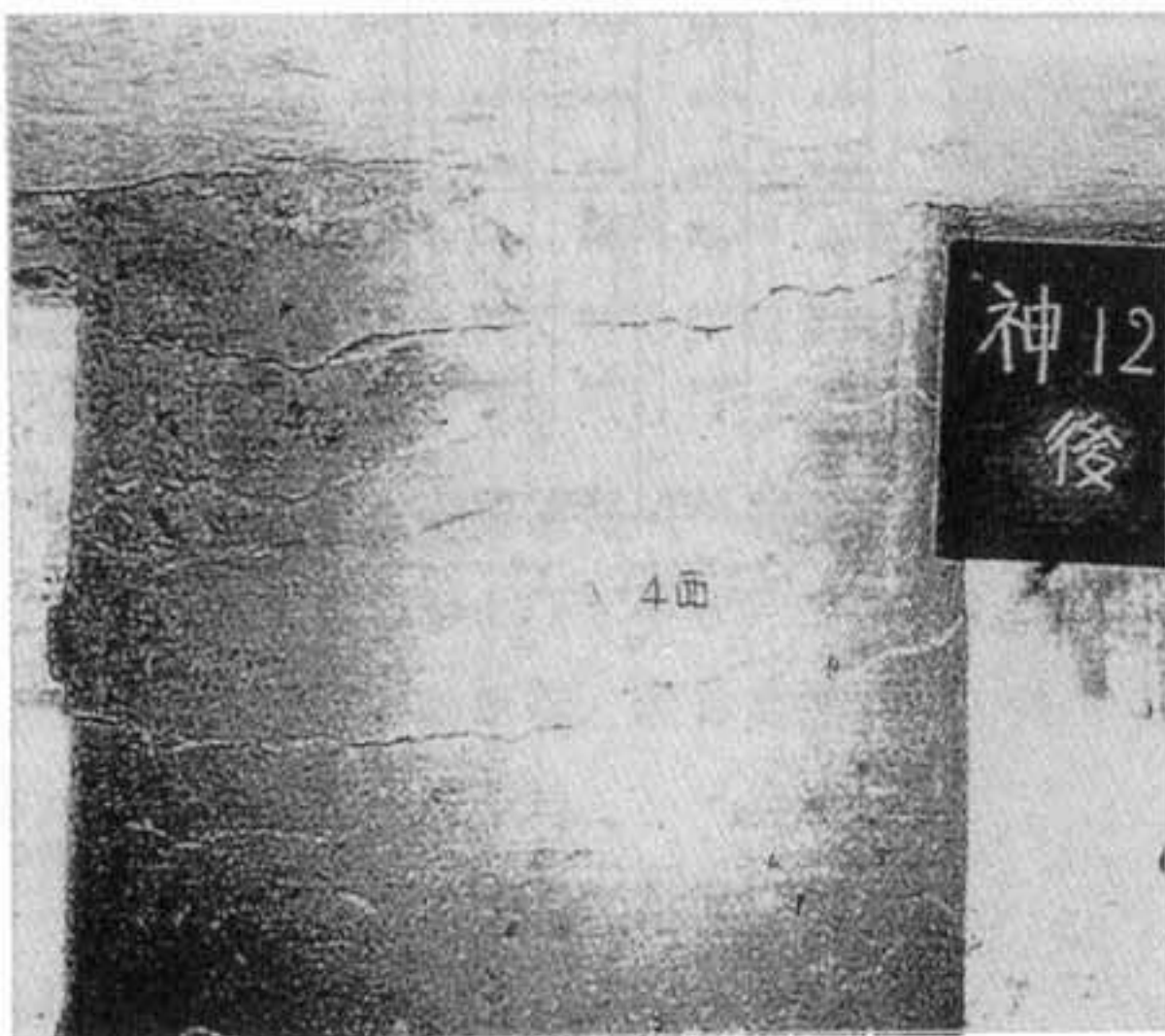


写真10-2-8 試験杭の杭頭付近の状況

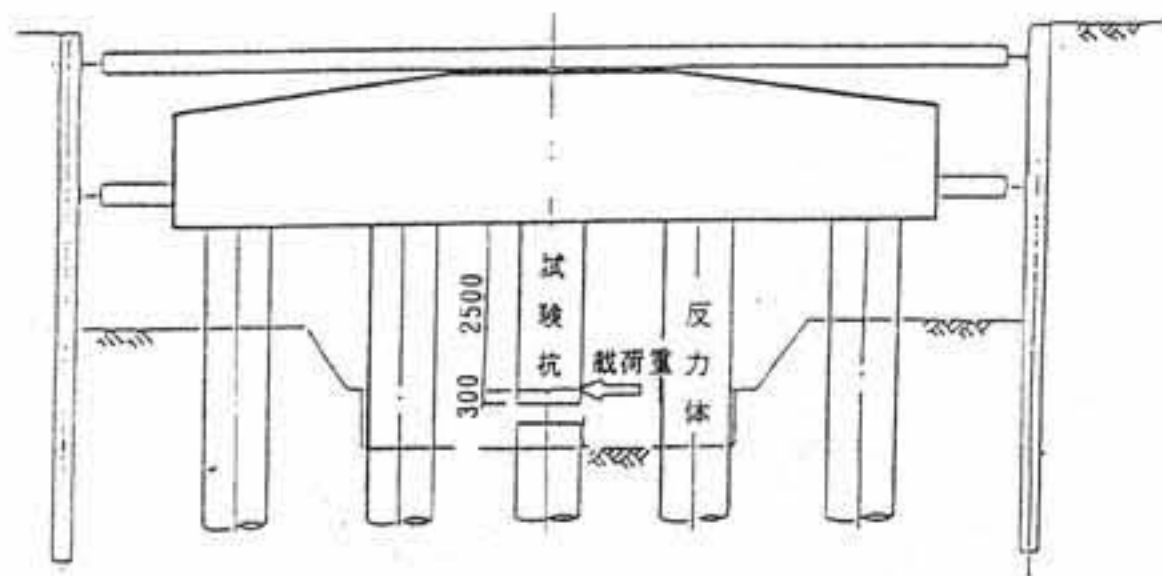


図 10-2-13 杭体曲げ試験の概要

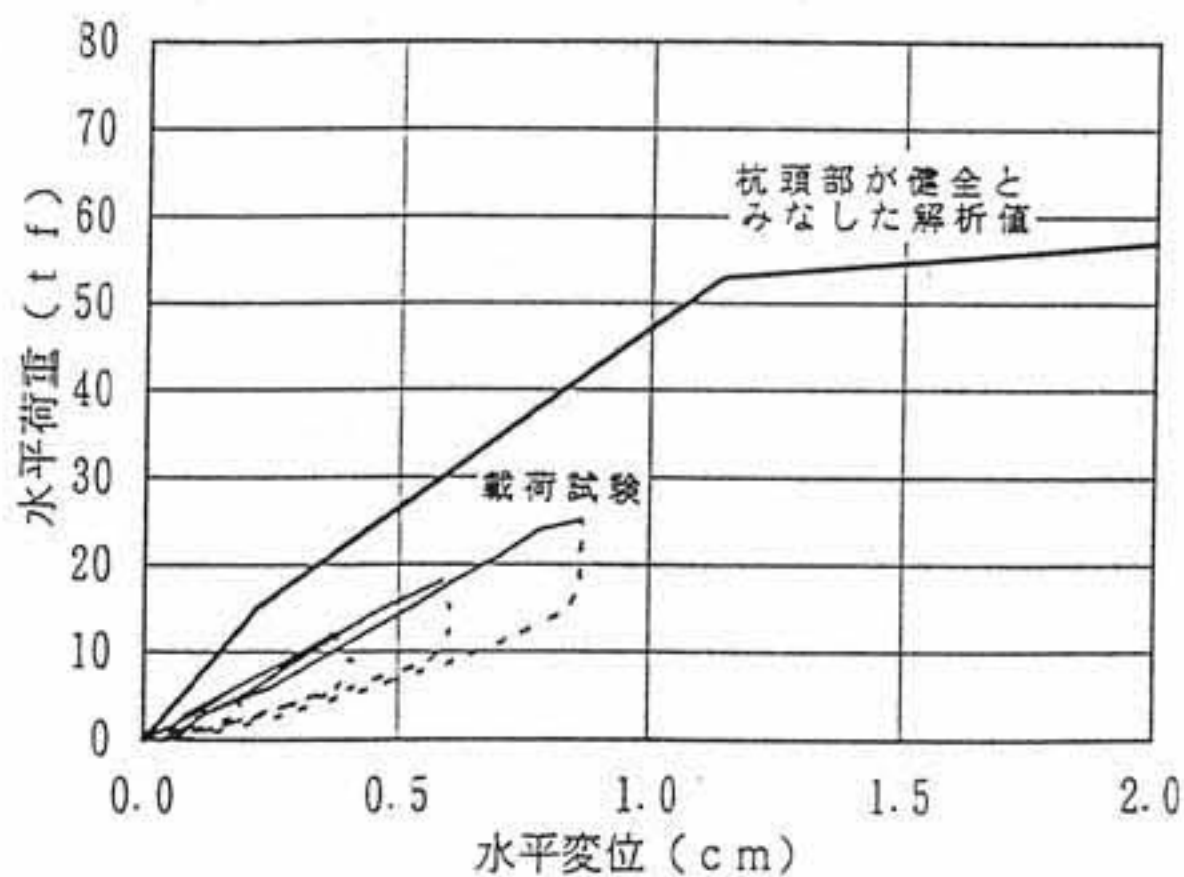


図 10-2-14 水平荷重～水平変位関係

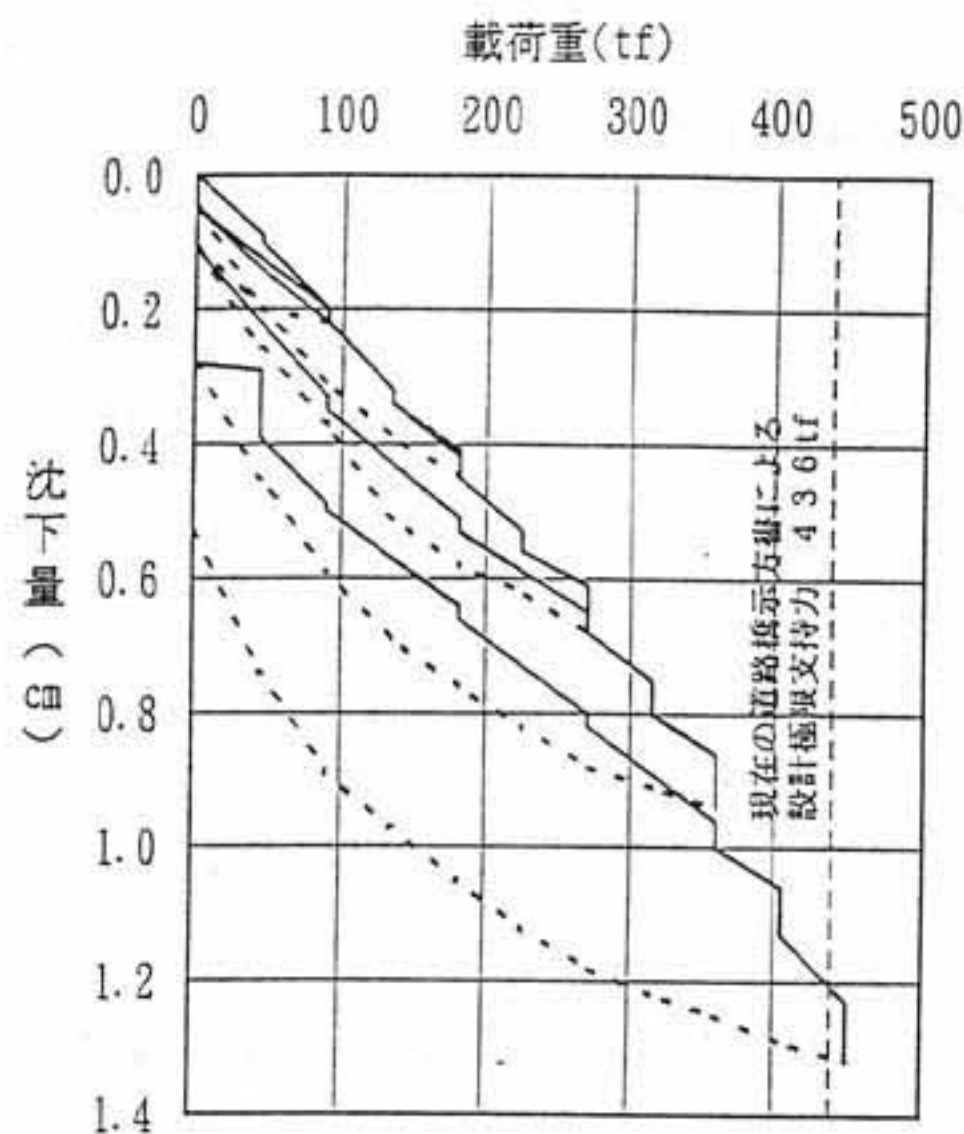


図 10-2-15 鉛直載荷試験における杭頭荷重～杭頭沈下量関係

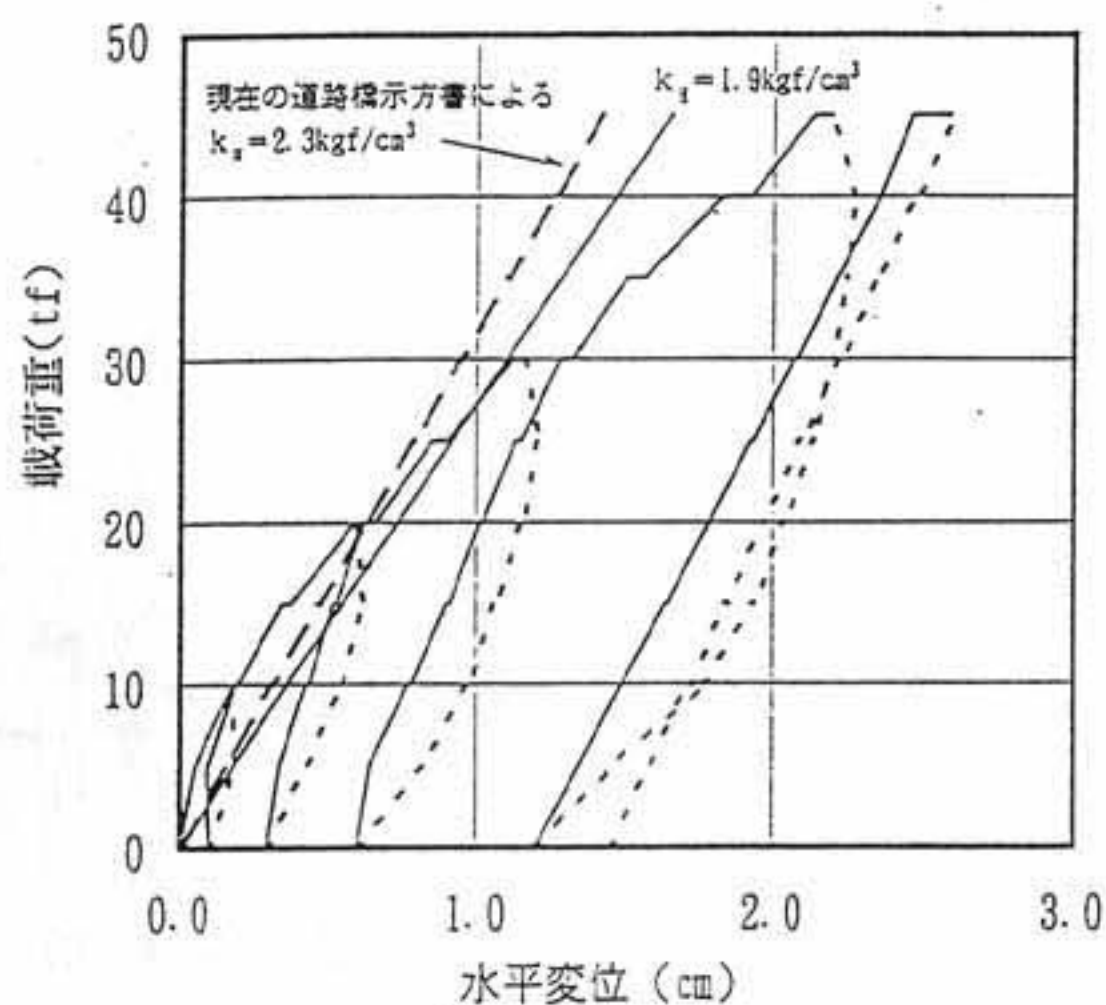


図 10-2-16 水平載荷試験における載荷重～水平変位関係

2-18¹⁾ に示すように、杭頭が健全であると仮定した場合における剛性の $2/3$ の値に低下させて剛性低下を考慮すれば、載荷試験結果がほぼ再現できる。図 10-2-19¹⁾ は群杭基礎の全体としての水平荷重～水平変位関係を示している。杭頭部が健全であると仮定した場合に比べ杭頭部の損傷を考慮した場合には、載荷の初期段階において同一荷重に対し多少大きめの水平変位が生じている。しかし、水平方向の耐荷力については損傷の影響がほとんど認められない。

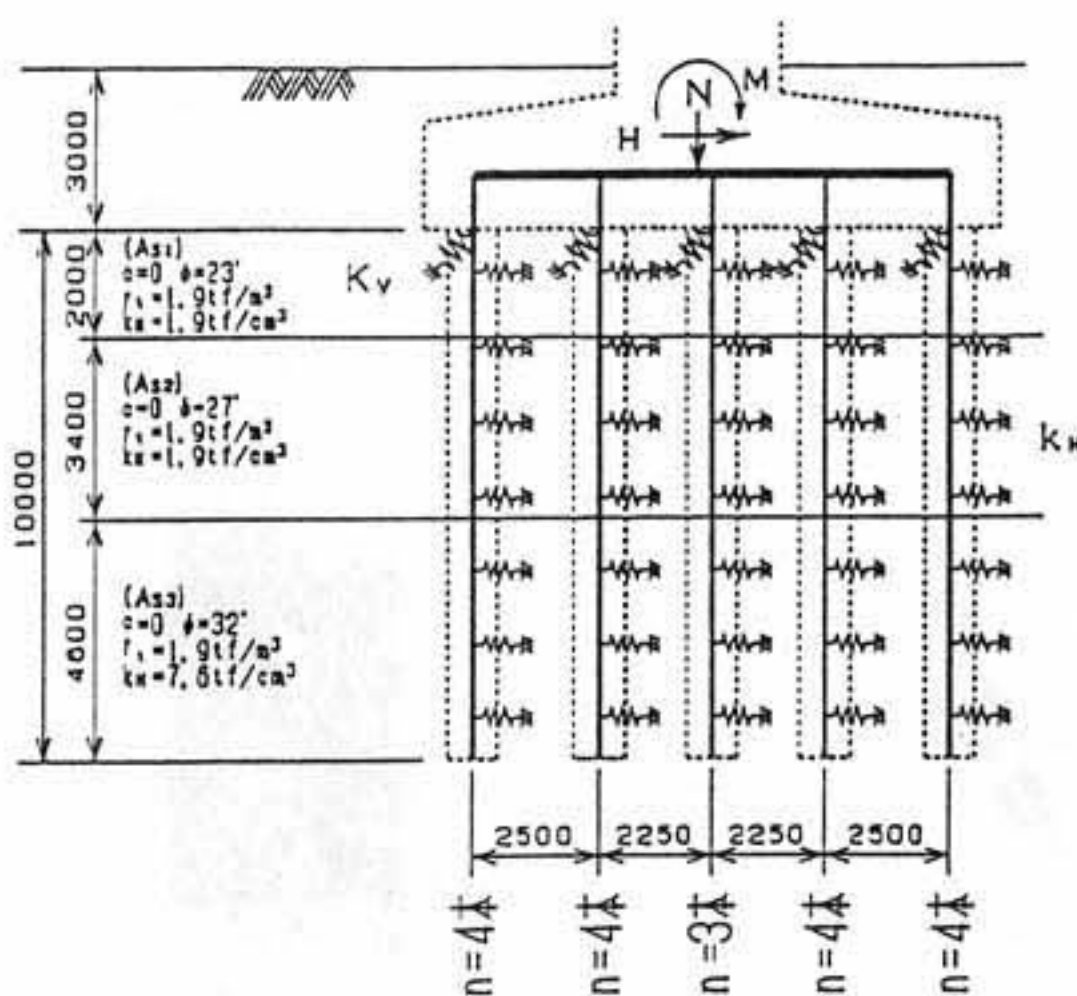
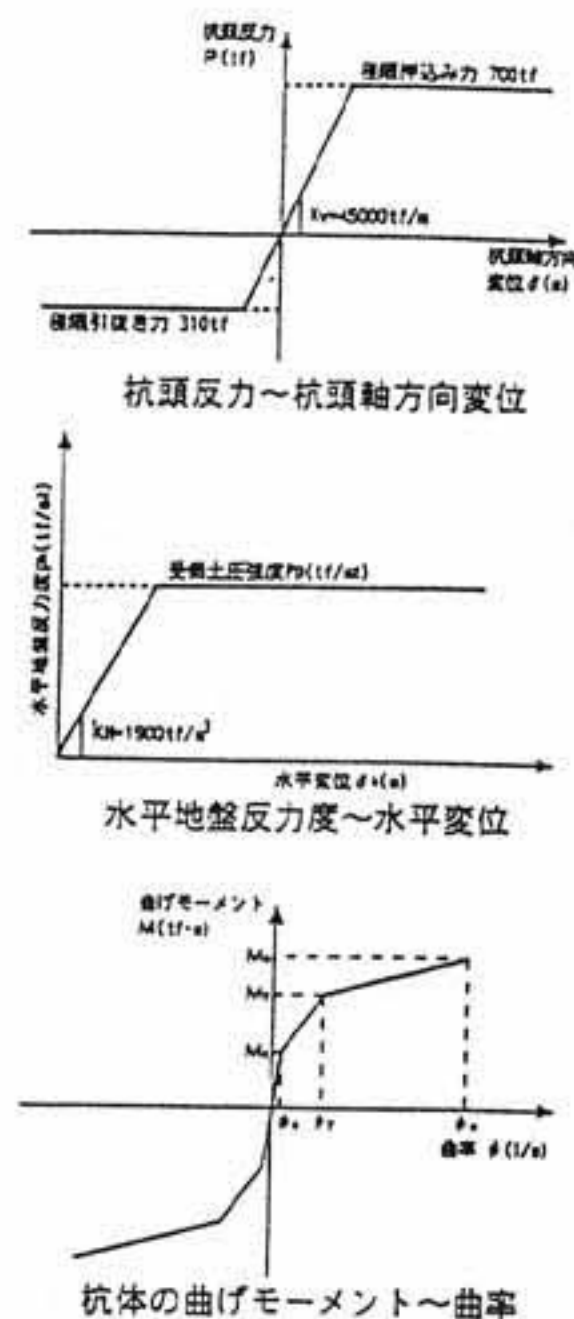


図 10-2-17 解析モデル



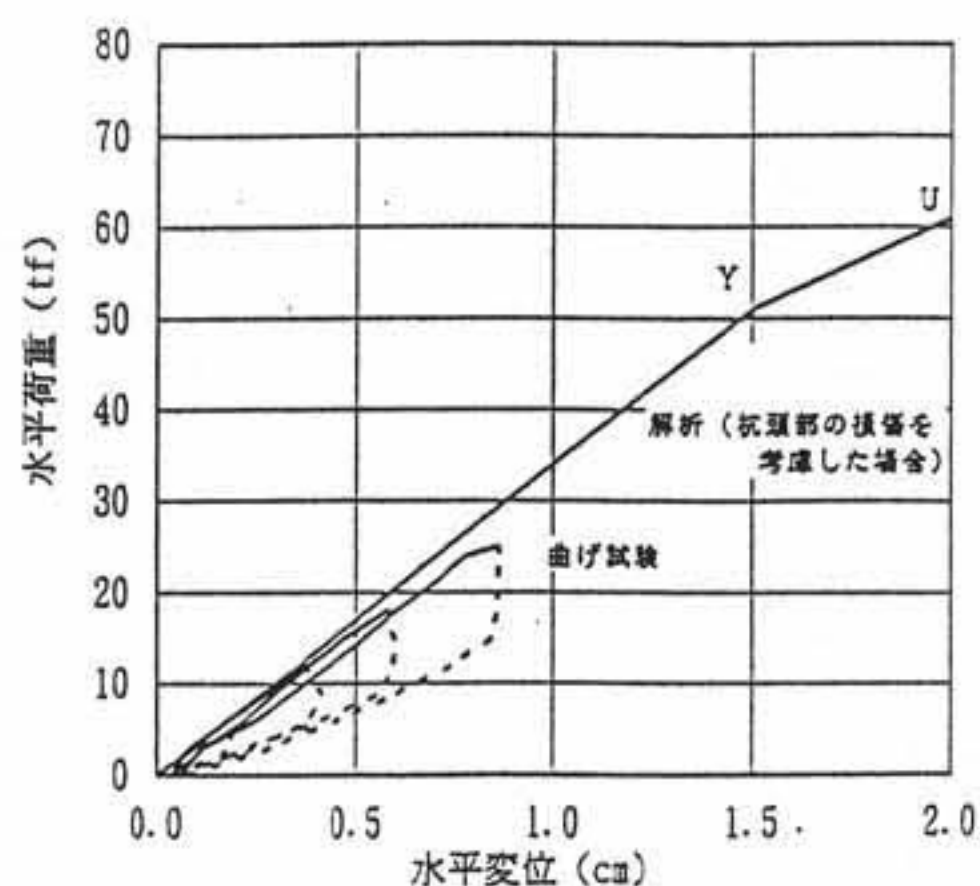


図 10-2-18 杭体の損傷を考慮した水平荷重～水平変位関係

最後に、実大群杭の水平載荷試験について述べる。図 10-2-20⁵⁾ は試験杭の配置を示している。試験杭は 1 m の直径を有する場所打ち杭であり、9 本をもって群杭基礎を構成している。図 10-2-21⁵⁾ は載荷重～水平変位関係を示している。載荷の最終段階では 40 cm を越える水平変位が生じているが、水平変位の増加に対して載荷重は単調

に増加する傾向を示している。写真 10-2-9 図 10-2-20 試験杭の概要

2) は載荷試験終了後における試験杭の損傷状況を示している。表 10-2-3 に基づくと、この杭は b ランクの被災度に判定される。

以上の結果は、載荷が静的かつ一方向繰返し載荷である場合のものではあるが、損傷を受けた杭の水平耐力は減少をまねいていないことを示している。今後、動的な荷重を受ける際の基礎の変形性能と耐力について、液状化および側方流動を含む地盤の非線形挙動を考慮した詳細な検討が必要となろう。

10-2-5 まとめ

本報告では、高架道路橋を中心とした構造物の基礎についての被害調査結果が示されている。調査を通じ得られた知見を以下に要約する。

- 1) 阪神間を通っている主要な幹線道路（一般国道 2 号、43 号、171 号および 176 号、名神高速道路および中国自動車道、阪神高速道路 3 号神戸線および 5 号湾岸線、ハーバーハイウェイ）の基礎形式は杭基礎が主流であり、全体の約 8 割を占めている。また、そのほとんどは、場所打ち鉄筋コンクリート杭で

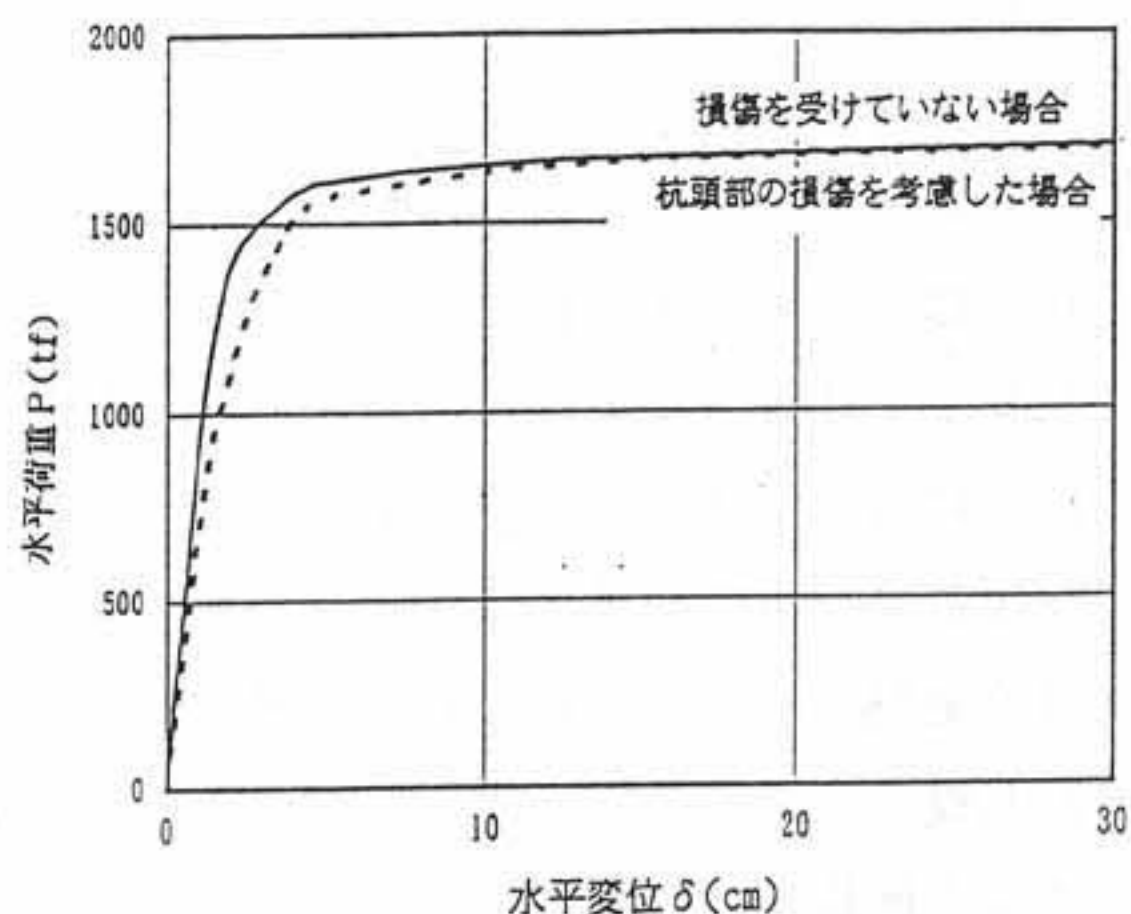


図 10-2-19 群杭基礎の全体としての水平荷重～水平変位関係

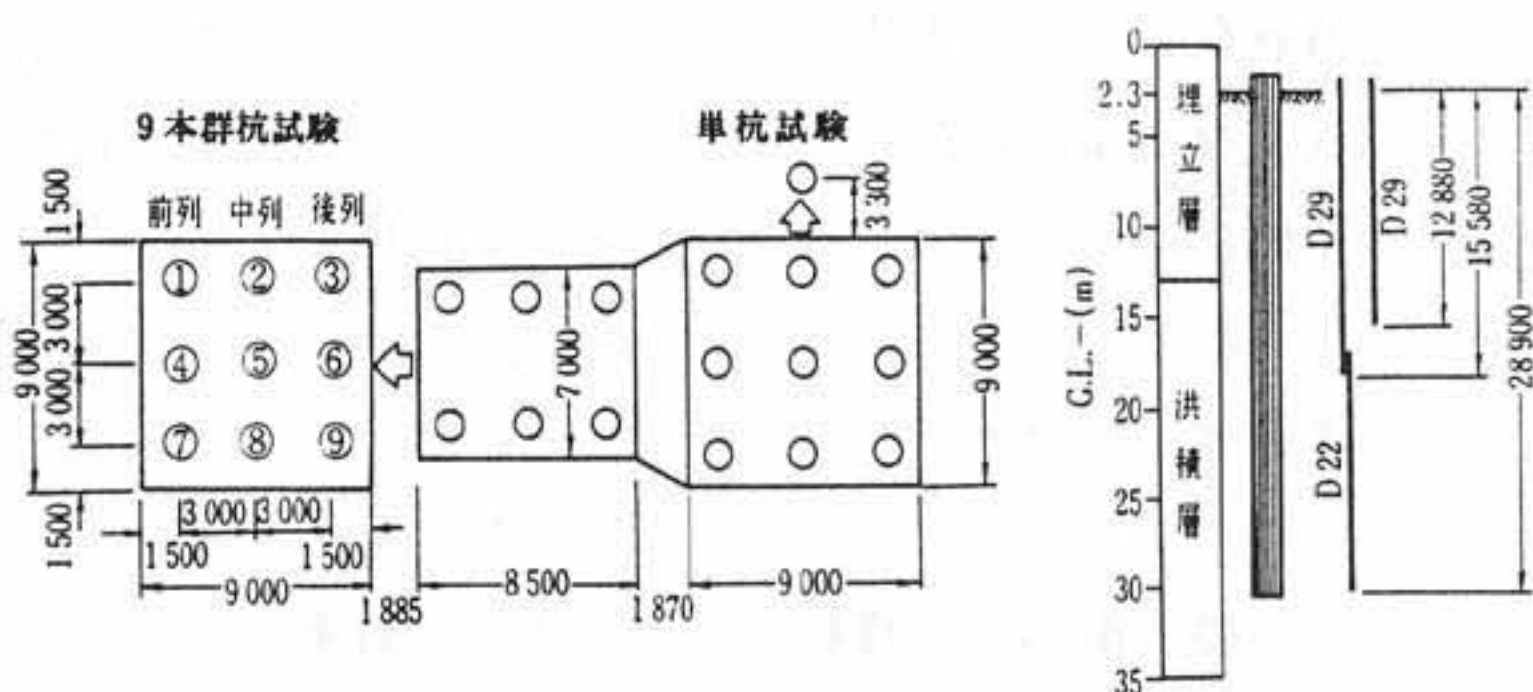


図 10-2-20 試験杭の概要

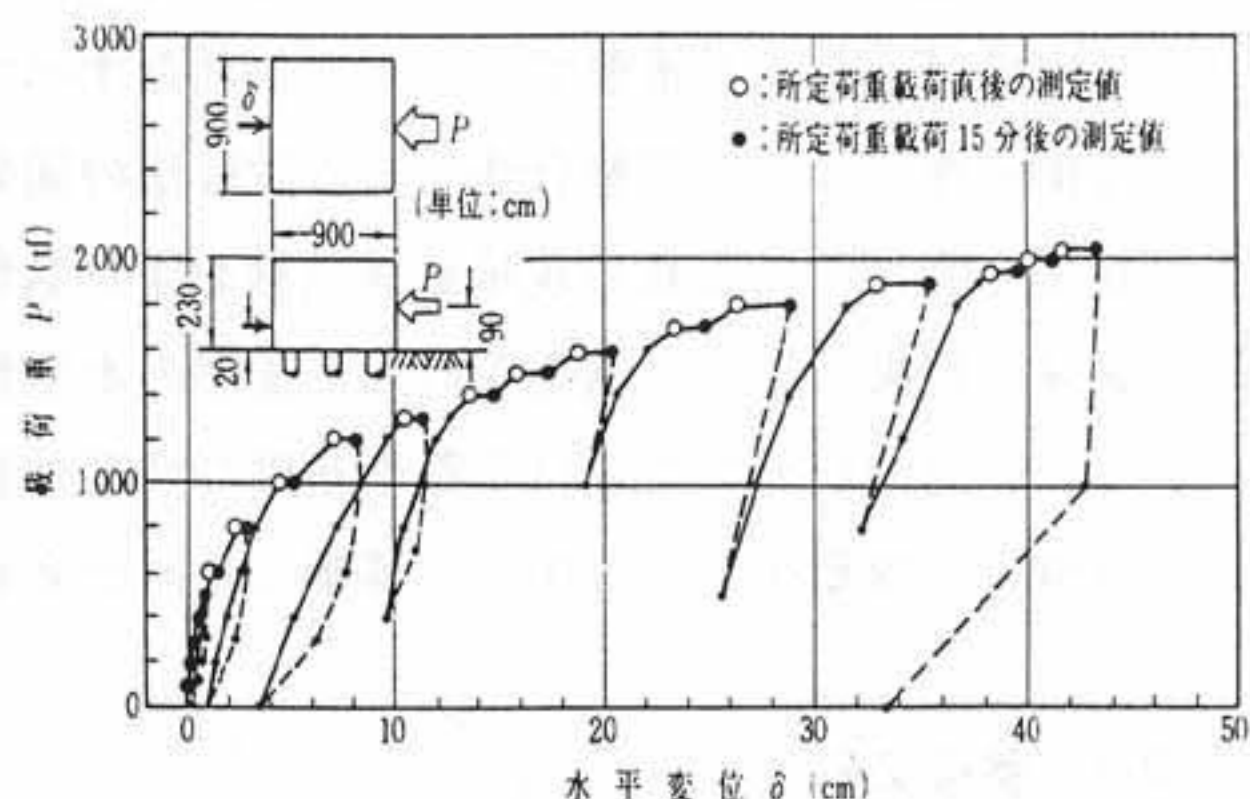


図 10-2-21 載荷重～水平変位関係



写真 10-2-9 載荷試験終了後の試験杭の損傷状況

ある。

- 2) 基礎の健全性を調査するために適用されたいくつかの方法のうち、杭体を直接目視する方法ならびにボアホールテレビシステムによる方法は最も信頼のおける調査方法である。
- 3) 杭基礎のうち、場所打ち鉄筋コンクリート杭の場合、その損傷は杭頭部分のみならず、杭の中間部分や支持層への根入れ付近においても生じている事例も見受けられた。また、鋼管杭やP C杭にも被害を受けた事例が見受けられた。直接基礎やケーソン基礎の場合、基礎が移動、沈下および傾斜した事例が見受けられたが、基礎自体が損傷を受けた事例はほとんどなかった。
- 4) 埋立地盤上に建設されている阪神高速道路5号湾岸線と浜手バイパスの橋脚基礎では、調査された基礎のうち約半数に何らかの損傷が認められた。また、その立地条件から、ハーバーハイウェイにも同程度の損傷が生じている。一方、阪神高速道路3号神戸線では、調査された基礎の約16%にしか損傷が認められず、名神高速道路および中国自動車道にいたっては損傷を受けたとされる基礎は認められなかった。
- 5) 液状化および側方流動によると考えられる地盤の残留変位の増加とともに、橋脚の残留変位も大きくなる傾向が認められる。これは、地盤の液状化が生じたと考えられる場所に設置されている基礎には、地震時に地盤の水平抵抗機能が失われるだけでなく、地盤の側方流動による側方流動圧が加えられたためであると考えられる。今後、地震時受働杭をはじめ、側方流動圧を受ける基礎の検討法の確立が不可欠であろう。
- 6) 護岸の海側への移動に伴う背面地盤の側方流動により、水際線付近に位置する構造物の傾斜および基礎の海側への移動が生じた事例が数多く見受けられた。今後、水際線付近に構造物を建設する場合、基礎と護岸との系統的な設計が必要となろう。
- 7) 今後の被害メカニズムの解明にあたっては、上部構造、橋脚および基礎ごとにそれぞれの視点からの検討もむろん重要であるが、これらすべてを含んだ構造物全体としての挙動の解明、さらには構造物全体として整合性のある設計法の開発が望まれる。
- 8) 損傷を受けた基礎杭の現場載荷試験および数値シミュレーション、ならびに実大群杭の水平載荷試験の結果から、損傷を受けた杭基礎の水平耐力は減少をまねいていないことが示唆される。今後、動的な荷重を受ける際の基礎の変形性能と耐力について、液状化および側方流動を含む地盤の非線形挙動を考慮した詳細な検討が必要となろう。

10-2-6 参考文献

1. 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書
2. Matsui, T. and Oda, K. : Foundation damage of structures, A Special Issue of Soils & Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, (in press)
3. 松井保・小田和広：構造物基礎被害，土木学会阪神大震災震災調査 第二次報告会資料，pp. 29-36, 1995.
4. 土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー 38・地盤の側方流動，第4章，1994.
5. 幸左賢二・木村亮・森田悠紀雄・伊藤恭平：場所打ち杭を用いた群杭の大変形水平載荷試験，土と基礎， Vol. 43, No. 5, pp. 43-45, 1995.