

4.1 はじめに

本章は、兵庫県南部地震による地盤の液状化についての報告である。まず液状化の一般的なメカニズムについてまとめておこう。よく知られているように、砂地盤の液状化は水で飽和した砂が負のダイレイタンス特性のため、地震時のような短時間に載荷が行われる場合、排水が不十分であると、間隙水圧の増加をとともう有効拘束圧の消失により地盤が破壊する現象である。一方、液状化は被圧した間隙水の流れによっても発生する。この場合は、地震動で液状化しなかった地盤も、地震後の間隙水の流れによって有効応力が減少し液状化に至ることになる。実際、液状化した土が地震後数十分にわたって噴出していたことが目撃されていることなど間隙水の流れの証拠である。

液状化の別の特徴は、その免震効果である。液状化した地盤は、液体状になりせん断応力を伝えなくなるため、液状化層以浅の層の地震荷重は軽減されることになる。兵庫県南部地震によって西宮市の芦屋浜では液状化のため住宅が被害を受けたが、比較的家具などの倒壊が少なかったと言われている。これなども1つの免震効果と考えられる。ただし、液体は圧縮波を伝播させるため、上下震動は液状化によっても免震できない。本章は各委員、分科会委員、特別委員各位の調査に基づいて執筆された。まとめは以下の委員によって行われた。4.2節－4.6節は岡、柴田、角南、八嶋、三宅、田口、三村、加藤、渦岡委員によって、4.7節は高橋委員、4.8-4.9節は安田委員各位によってまとめられた。

4.2 液状化発生地点の概要

1995年1月17日5時46分に発生した兵庫県南部地震により多くの地点で液状化現象が観測された。図4-2-1は今回の地震で記録された最大水平加速度の分布を示す。この地震では、神戸市では海洋気象台で最大水平地動818galが記録されているが、臨海部のみでなく内陸部でも大きな水平動が観測された。図4-2-2は上下方向の最大加速度に対する水平最大加速度の比を記入してあるが（上段NS成分、下段EW成分）、図4-2-3と比較すると、上下動の大きかった場所は、臨海部の埋め立て地や沖積地盤の地下水位の高かった地域に対応している。図4-2-4に示すように、兵庫県南部地震による液状化現象は多くの地点で観測された。兵庫県や大阪府の臨海部においては大規模な液状化が観測された。特に神戸市のまさ土で埋め立てられた人工島で大規模な液状化が見られた。一方、内陸部においても地下水位の高い埋め立て地、たとえば古池の埋め立て地（たとえば宝塚市売布(めふ) 小学校グラウンドや西宮市市立西宮高校グラウンドなど）や旧河道などでも液状化が発生した。

図4-2-4中の地点番号：地名

1	： 神戸工業高校	20	： 天保山（大阪港）
2	： メリケンパーク	21	： 南港
3	： ポートアイランド（第一期）	22	： 大正区鶴町
4	： ポートアイランド（第二期）	23	： 中の島公園
5	： 神戸港	24	： 靱公園
6	： 六甲アイランド	25	： 堺泉北
7	： 東部第3工区（住吉浜）	26	： 泉大津
8	： 東部第4工区（魚崎浜）	27	： 忠岡
9	： 南芦屋浜	28	： 岸和田
10	： 西宮浜	29	： 岩屋松帆
11	： 芦屋浜	30	： 岩屋漁港
12	： 甲子園浜	31	： 大磯漁港
13	： 鳴海浜	32	： 仮屋漁港
14	： 西宮北高校	33	： 生穂漁港
15	： 市立西宮高校	34	： 志築

1 6	：	ニテコ池	3 5	：	富島漁港
1 7	：	売布小学校	3 6	：	浅野漁港
1 8	：	段上町	3 7	：	育波漁港
1 9	：	淀川左岸			

臨海部のみでなく内陸部でも大きな水平動が観測されている。このことは、内陸部での液状化の発生と対応している。この地震の震央は淡路島の約15km北である。栗林、龍岡のマグニチュード(M)に対する震央と液状化地点の最大距離は、 $M=7.2$ で約88kmである。液状化の東端の滋賀県矢橋が約90kmであり、ほぼ推定距離と一致する。液状化発生範囲の南端は徳島市川内町であり、西は加古川市である。図4-2-3に示す江戸時代以降の臨海部埋め立て地の分布と今回の液状化発生領域はよく対応している。もっとも高い標高で確認された液状化現象は、芦屋断層近くの芦屋市奥山芦屋カントリー倶楽部(標高約500m)であった(松岡, 1995)。

液状化が発生した地域は沿岸部埋め立て地盤、内陸部埋め立て地盤や自然堆積地盤に分類されるが、以下各発生地点の特徴について述べる。

ポートアイランド

ポートアイランドは六甲アイランドの西に位置する人工島である。この人工島は2つの期間に建設された。第一期は、1966年から1981年にかけて436haが造成され、続く第二期(1986-1996)には390haが建設されている。

図4-2-5と図4-2-6はポートアイランドにおいて液状化した土や液状化に伴って噴出した砂、粘土、レキや石が見られた地点を示す。これらの図からわかるように、面積の約50%以上が液状化の影響を受けている。ポートアイランドは茶色の土で覆われ、その厚さは平均20cmであり厚いところでは50cmであった。特に倉庫やコンテナヤード地区は大量の噴砂で覆われた。液状化による沈下によってポートライナーの基礎と地盤の間には約50cmの段差が生じた。液状化現象は第二期の造成地より、第一期の方が顕著であった。

図4-2-5と図4-2-6からポートアイランドはサンドドレーン、サンドコンパクションやロッドコンパクションなどの方法で改良されていたことがわかる。図4-2-7は神戸市とポートアイランドの地質断面図である。水深は第一期地区で約10-12m、第二期地区で約15-18mである。埋め土層の厚さは第一期地区で約18m、第二期地区で約24mである。

第一期の埋め立てには風化した花崗岩よりなるまさ土が用いられ、第二期地区では砂岩、泥岩や凝灰岩を含む神戸層群の堆積岩を母岩とする土が用いられた。ポートアイランドの液状化は主に標準貫入試験で得られるN値が5から10のまさ土の層で発生した。液状化現象は非常に大規模であり、多くの珍しい現象が見られた。護岸は約3m海側へ移動し、護岸の後背部には多くのクラックが発生した。クラックの回りには、噴砂が見られた。

六甲アイランド

六甲アイランドは神戸市の南東部に1972年から1990年にかけて建設された人工島である。3.4km×2kmの長方形の形をしており、面積は約580haである。図4-2-8は液状化が地表で観測された地域を示している。液状化はポートアイランドに比べて顕著でなかった。液状化は主に北部の護岸に沿って発生していた。地表部の最大沈下量は護岸背部で約3mであり、海側へ約2m移動している。岸壁に平行に多くの深いクラックが発生していた。北部の六甲ライナーの桁の落下は、液状化による側方流動によって基礎が海側へ移動したことが原因と考えられる。地盤と六甲ライナー(新交通システム)の基礎とのギャップ量はほぼポートアイランドと同様であった。図4-2-8に示すように、地盤改良地域では液状化は顕著でなかった。ただし、地盤改良地区においても、小規模な噴砂は発生している。図4-2-9は神戸内陸部から六甲アイ

ランドにわたる地層断面図である。水深はポートアイランド第一期地区とほぼ等しい。人工島の北部は建設初期にまさ土で埋め立てられたが、その後、南部は神戸層群（凝灰岩、砂岩、泥岩）の土塊や建設残土で埋め立てられた。この埋め立て材料の違いがポートアイランドと六甲アイランドでの液状化の規模の差の主な原因であると考えられる。

兵庫県東部の人工島

神戸市臨海部の埋め立ては1953年より始められた。東部と西部の埋め立て地の全面積は約530haである。図4-2-4に示すように芦屋の西部に東部1工区（灘浜）、東部2工区（御影浜、住吉浜）、東部3工区（魚崎浜）、東部4工区（深江浜）の4つの埋め立て地が建設された。これらの埋め立て地は山地部から運ばれたまさ土で建設されている。地盤のN値はばらついている。これらの埋め立て地盤は工業用地として売却されたが、これらの地域でも液状化が発生した。特に液状化による護岸の移動によってタンクや工場に被害が発生した。東灘では下水道処理場で液状化による被害が顕著であった。旧海岸線に沿っては自然砂が堆積しており、埋め立て地では地下水位が高く、至る所で噴砂が観測された。

南芦屋浜、西宮浜、甲子園浜と鳴尾浜の埋め立て地は、まさ土を用い兵庫県によって建設された。この地域では、埋め立て土の液状化と岸壁の側方移動が発生し、基礎の側方移動によって橋脚に被害が発生した。図4-2-10は甲子園浜での液状化領域を示す。ここでは、顕著な液状化が発生し、阪神高速道路の西宮港大橋が落橋した。この地区では埋め土のまさ土が液状化したが、埋め立てに用いられた粘性土が同時に地上に噴出した。

図4-2-11に示す鳴尾浜は、1971年から1975年にかけて山砂で埋め立てられた。図4-2-12に示すように、下部沖積砂層の上に沖積粘土層、上部沖積砂層からなる原地盤を埋め立てたものである。図4-2-13は液状化が確認された噴砂域を示す。サンドドレーン（SD）で改良された地区では地盤変状は顕著でなかった。図4-2-14は地震直前の沈下量を双曲線法で推定し（図4-2-15）、地震による沈下量を求めている。図4-2-16は地震前後における図4-2-14中のC'とC''地点での標準貫入試験結果である。ここでは地震によるN値の増加は認められなかった。

鳴尾浜の埋め立て地の岸壁、護岸は図4-2-17の平面に示すように、C1、B3岸壁、東南の角にある鋼管杭による栈橋式耐震岸壁および南東の角の石積み傾斜護岸を除いて、ほとんどがケーソンによる重力式岸壁もしくは直立護岸である。これらのケーソン岸壁・護岸、耐震岸壁および石積み傾斜護岸の標準設計断面は図4-2-18、図4-2-19、図4-2-20にそれぞれ示されている。

C1岸壁の標準設計断面は図4-2-21に示すように、原地盤である沖積粘性土層の下端まで淡路産の良質な山砂で置換し、その中へ長さ $L=16\text{m}$ 、YSPU-15型の鋼矢板を打設して岸壁としている。この鋼矢板は20m陸側に打設されたSTK-41型（直径 $\phi=457.2\text{mm}$ 、肉厚 $t=10\text{mm}$ 、長さ $L=13\text{m}$ ）の鋼管杭と直径 $\phi=45\text{mm}$ のハイテンションタイロッドで結ばれている。置換砂層のN値はO.P.-18.5mまで10前後の様な地盤である。地震後の水平変位量を表4-2-1に示す。変位の特徴として、岸壁前面から背面側20mまではタイロッドに連結されて一体として変位しており、岸壁前面の水平変位量は岸壁前面20-35mまでの間に生じた水平変位量の総和として現れている。また、C1岸壁法線中央付近の岸壁背面20mの位置では最大17cmの段差を生じているが、岸壁としての機能にはほとんど支障がない。

B3岸壁の標準設計断面は図4-2-22に示すように、置換砂地盤上に直径 $D=9.0\text{m}$ の鋼矢板セルを設置し、セル前面に沿わせて直径 $\phi=405.4\text{mm}$ 、肉厚 $t=9.5\text{mm}$ 、長さ $L=12.0\text{m}$ の諸元を持つ鋼管杭を4m程度の根入れ長さを持つように打設している。岸壁延長は200mである。B3岸壁の被害状況はC1、B3岸壁の交点のB3岸壁の鋼管杭部が海側へ17cm、その交点からB3岸壁延長方向へ30mの地点で海側へ25cmの水平変位を起こしているが、この交点から50m離れた位置からは岸壁の水平変位は認められない。なお、鋼矢板セルはほとんど変位していないが、鋼矢板セルの背面から15mまでの陸側は10cm-15cm沈下しており、多量の噴砂が認められた。この領域は3m-13.5m厚さの置換砂層上に位置しており、置換砂の液状化による沈下と考

えられる。C1、B3岸壁は震災復旧の基地として関係多方面で利用された。

芦屋浜の低層住宅の被害

芦屋浜の埋め立ては1969年から1975年にかけて行われた。従って、埋め立て終了後20年後に大きな地震動を受けたことになる。旧海底面下の沖積粘土層の厚さは3m-5mであり、埋め立て層の厚さは13-15mである。図4-2-23はこの地区の地層断面図である。地下水面は地表下3.5mである。埋め立て材料は山砂と海砂であり、地表から約5mのところにある海砂のN値は約10である。図4-2-24は山砂と海砂の粒径加積曲線である。噴砂は海砂であった。

図4-2-25は芦屋浜の液状化マップである。道路のクラック、建物の基礎や電柱のまわりから砂が噴出し多くの2階建ての家屋が傾き不等沈下が発生した。家屋は約2度傾いても在宅者は不快な感じを受ける。このため、住民の避難があった。図4-2-23、図4-2-24と図4-2-25の比較から、海砂層の厚い地区で液状化の被害が顕著である。このことは海砂が液状化し易いことを示しており、図4-2-24の粒径分布との比較は興味深い。

尼崎

海水面より低い地盤の沈下を抑制するために河口にいくつかの閘門が設置されている。閘門は重要な構造物のため基礎は改良が加えられているため、閘門の構造物の被害なかったが、周辺の構造物は液状化によって被害を受けた。

神戸市西部

神戸市西部では和田岬地区、垂水区、兵庫港と長田港で多くの液状化が発生している。この地区の地盤は、海岸部の非常に液状化し易い河砂と海砂および埋め立て地とから構成されている。垂水区の埋め立て地（約13万 m^2 では図4-2-26に示すような噴砂、クラックが観察され、液状化が発生している。地表面から約10mくらいまでがN値10程度の埋め立てまき土層であり、その下部は砂礫である。テトラポッドで囲まれた岸壁の被害は確かではないが、すべての防波堤は沈下を起こした。これは、液状化によるものと考えられる。港近くの小さなタンクは傾き、大きなタンクまわりでは噴砂が見られた。神戸工業高校のグラウンドでは、地割れに沿ってレキや石を含む噴砂が見られた。図4-2-27は和田岬地区における液状化マップである。

神戸港の防波堤

神戸港にはいくつかの防波堤があるが、これらは、粘土層を掘削し、砂で置き換えた置換砂の上に碎石マウンドを置き、その上にケーソンを設置して建設されている。ケーソンは約2m沈下し、その機能を失った。ただし、ほぼ鉛直に沈下し、水平方向の変位は少なかった。このケーソンの沈下は置換砂層の液状化が原因と考えられる。

淡路島と徳島県

図4-2-4に示すように、淡路島では海岸線に沿って液状化が発生した。特に、漁港において液状化が見られた。淡路島北部の岩屋松帆の田圃においては北東方向のクラックに沿って噴砂が見られた。また、漁港の岸壁背後で液状化による噴砂が観測された。また、鳴門市や徳島市の吉野川河口付近の海岸部で噴砂が見られている。

兵庫県その他の地域

図4-2-4に示すように、臨海部のみでなく、西宮市、神戸市や宝塚市の内陸部の古池を埋め立てた場所や、池の近くでも液状化による噴砂が観測された。日本道路公団の中国道の近くの売布小学校の校庭でクラックからの噴砂が見られた。この地点は有馬高槻構造線の支断層である南清荒神断層に近く、大変興味深い。近くの中山寺境内でも噴砂が認められた。

西宮市新池にある西宮市立西宮高校のグラウンドにおいてクラックからの噴砂が見られたが、グラウンドは約60cm沈下し、グラウンドに面した校舎に大きな被害が見られた。この高校は甲陽断層の近くに位置しており、断層運動との関連が指摘されている。甲陽断層に沿って、多くの噴砂が見られた。ニテコ池の北や満地谷墓地公園等である。ニテコ池も液状化によって池の護岸と中仕切の2つの堤体は崩壊した。水位以下の地盤が液状化したと見られる。この池の東、北地域は旧谷地形であったことから、地下水位が高かったのであろう。南側堤体にもクラックが入ったが、地震当日幸いに水位が低く下流側の堤体は大崩壊を免れた。同じ甲陽断層の北の西宮市仁川百合野町での斜面崩壊も旧谷地形で地下水の条件によって液状化が発生した可能性が大きい。

西宮北高校は海拔約200mに位置するが、グラウンドは池を埋め立てた地盤である。この高校は芦屋断層に近く、断層活動との関係も深いと考えられる。神戸市の西部垂水区青山台3丁目の垂水東中学校でもグラウンドで噴砂が見られた。これら4つの学校のグラウンドはいずれも古池を埋め立てて造られている。標高約500mの芦屋断層沿いの芦屋市奥山の芦屋カントリー倶楽部内でも噴砂が見られたが、この地点がもっとも標高が高い地点であろう。西宮市と宝塚市を流れる武庫川の河川堆積砂（旧及び現在の河床）でも噴砂が見られた。神戸市東灘区の魚崎南町では東灘下水処理場が液状化によって大きな被害を受けた。

大阪府（淀川河川堤防における被害と復旧）

大阪市は震央から約35km離れているが、臨海部や河川付近で液状化が発生した。図4-2-4に示すように、淀川の左岸の此花区西島地区において顕著な液状化が発生した。図に堤防の変形を示す。

兵庫県南部地震による淀川の被災箇所は19ヶ所であり、このうち堤防の被災箇所は16ヶ所、被災延長は5,660mに達する。さらにこのうち19ヶ所、延長5,270mは河口から9km地点より下流側に集中している。堤防被災の主因は、淀川によってもたらされた自然堆積砂と堤防盛土の液状化である。淀川下流部は、明治時代の改修により新たに開削された放水路であり、左右岸の堤防はその後発生した災害のたびに拡幅、嵩上げが繰り返されている。淀川下流部において堤体の沈下などの被災が最も著しかったのは、左岸下流部の西島地区（距離程0.1km～2.2km）、左岸下流部の高見地区（距離程3.4km～4.1km）、右岸下流部の西島地区（距離程1.1km～1.9km）の3地区である。西島地区は、淀川下流部の中で最も大規模な変状が長い区間に及んだ地区である。典型的な被災断面を図4-2-28に示す。被災した堤防は、全幅にわたり多くの縦断亀裂が走り、堤防天端は最大3m以上に及ぶ沈下を生じた。また特殊堤構造のパラペット及びコンクリート護岸部は堤外地側へ大きく滑動しており、岸壁構造物と同様の被災パターンを示している。また、大きく破損したコンクリート護岸部には多くの噴砂の痕跡が認められ、今回の堤防の被災に液状化が大きく関わっていることがわかる。一般的に、こうした大規模な被災を受けた原因としては、比較的厚い（平均10m）の沖積砂層が堆積していること、河川堤防であり地下水位が高いこと、堤防断面（矢板、根固めの有無）、施工履歴など種々のファクターが複合的に関係していると考えられる。

高見地区は西島地区の上流に位置する地域であり、堤内地側は高見団地、阪神電鉄・千鳥橋駅などの市街地を有している。典型的な被災断面を図4-2-29(b)に示す。被災は堤防天端～堤内地側斜面を中心に生じており、堤防天端中央に縦断亀裂と段差を生じており、天端全体が20cm程度の沈下を生じている。また、堤内地側斜面上部に沈下、同下部にはらみだしが認められ、斜面先端部に隆起が見られる箇所もあった。右岸下流部の西島地区における典型的

て求められている。

4.4 液状化の特徴と地盤の破壊

本節では、液状化による地盤変状の特徴について述べる。

今回の液状化発生に関して、次のような特徴があげられる。

- (1) まさ土による大規模埋め立て地での液状化
- (2) レキの噴出
- (3) 粘性土の噴出
- (4) 噴砂の形態、クラック型と噴砂丘のクレーター型
- (5) 噴砂時間(数十分以上)に関する伝聞
- (6) 活断層との関係、内陸部では断層近くでの液状化
- (7) 地盤改良の効果、サンドドレーンの役割の解明
- (8) 液状化による港湾構造物の被害
- (9) 液状化した地盤と橋脚や杭基礎など構造物との相互作用
- (10) 液状化過程の明確な定義、半液状化や部分液状化の認識
- (11) 液状化した地盤の液状化強度の変化
- (12) 液状化した地盤の深さ
- (13) 上下地震動の影響
- (14) 液状化地盤の免震効果

液状化した地盤と粒径加積曲線

一般にレキを含む土は液状化しにくいと考えられてきたにもかかわらず、今回の地震は風化花崗岩よりなるまさ土が液状化することを明らかにした。水はけもよく締め固めやすいまさ土は、ポートアイランド一期および六甲アイランドの北部や他の埋め立て地で埋め立て材料として用いられてきた。レキを含む土と豊浦砂のような自然砂とでは液状化強度が異なる。

埋め立てに用いられた土は遠く離れた山地から運ばれてきたものであり、輸送中に粒径分布に変化が生じた。粒子破碎や風化によって自然状態よりも細粒分が増加した。土材料は風化花崗岩や神戸層群の砂岩、泥岩や凝灰岩である。これらには、風化しやすいレキや石が含まれている。

西宮市から尼崎にかけての臨海部や河口近くには緩く堆積した沖積砂が厚く堆積している。これらの材料は粒径分布から見て容易く液状化する材料である。

図4-4-1は3つの典型的な土材料の粒径加積曲線である。まさ土は相対的に大きな粒子を含んでいる。神戸層群の土はまさ土に似ているが、細粒分が多い。この土はまさ土より液状化しにくいと考えられる。一方、緩く堆積した沖積の細砂は実験により液状化することが知られている。図4-4-2は150mm以上の粒径の粒子を含めた粒径加積曲線である。

実際、この地震によってまさ土は液状化した。これは初めての経験である。締め固め易いまさ土で構成された地盤の性質は液状化発生形態に影響を与えているようであって、縦方向の地割れが多く見られたこと、マンホールの浮き上がりはあまり見られなかった点などの特徴があった。

まさ土の液状化強度

主にまさ土で埋め立てられた人工島であるポートアイランドは、津波かと思わされるよ

うな土と水との混合体でその約50%が覆われたが、特に注目されたのは、レキから細粒分まで含む粒度配合の良いまさ土が液状化した点である。液状化強度の大きさは繰り返し非排水三軸試験によって評価されている。まさ土の強度の評価に関する初期の研究は谷本(1974)によって行われたが、谷本はまさ土の液状化の可能性について、4.8mmを越す粒径を除いた土について研究を行っている。繰り返し応力比と繰り返し回数の関係を図4-4-3示す。

一方、不攪乱のまさ土に対する繰り返し試験が最近行われるようになってきた。図中には、これらの結果も破線と黒点で示されている。これらのケースではひずみ発生のための繰り返し応力比は他に比べて小さい。谷本による結果は、1990年に試験法が確立される以前のものであり、この様な点が結果に反映されているかもしれない。谷本は200gal程度の地震では液状化に対する限界N値は約12、300galで19としているが、今回の埋め土のN値は10以下であり、地震動の大きさから考えて十分液状化する地盤であったと言える。

ポートアイランド港島地区で採取したまさ土試料を用いた室内振動三軸試験を実施した。現地の地盤条件を図4-4-4に示す。地表面から深度14.7mまでは砂礫混じりの細砂の埋立土層があり、その下に玉石混じりの砂層をはさんで、沖積粘土層（旧海底）が堆積している。深度23.4mからは自然の沖積砂層が続いている。液状化実験は上部埋立層で2ヶ所、自然堆積沖積砂層で1ヶ所の計3グループについて実施した。原位置の応力条件を勘案し、浅い位置に存在する埋立層の試料については有効拘束圧 0.5 kgf/cm^2 で、深度23m付近の沖積砂層の試料に対しては 2.0 kgf/cm^2 で圧密させた後（いずれも背圧 1.0 kgf/cm^2 ）、応力振幅一定の振動三軸試験を行った。実験によって得られた液状化強度曲線を図4-4-5に示す。グループごとの差はほとんど見られず、ひずみ5%で評価した場合繰り返し回数10回での液状化強度は応力比で約0.23程度となっている。特に埋立層と異なり、構造を有していると考えられる沖積砂層から採取した試料の強度があまり高くないのが特徴的である。この原因として、サンプリングの方法が通常のトリプルチューブによるものであり、採取時にかなりの乱れを与えた可能性が指摘できる。いずれにしても全層を通じてかなり液状化抵抗が小さいことが明らかであり、ポートアイランドで激しい液状化被害が生じた事実と符合する結果となっている。

図4-4-6はポートアイランドの鉛直アレー観測点で採取された土の液状化強度曲線である。砂質土はトリプルチューブサンプラー、沖積粘土ならびに埋め立て層は固定ピストン式サンプラーによって採取された。深さ22.0-22.8m以外は埋め土層に当たるが、この地点でのSPTによるN値が5前後から10前後へ地震後増加した点を考慮すると、地震前の強度はこの図以下であった可能性がある。いずれにしても結果のばらつきもあり、サンプリングによる攪乱もあるので不攪乱まさ土の液状化強度については今後一層の研究が必要である。

まさ土について、当初これまで液状化に強いと考えられていたのに何故液状化が起こったのか？との疑問がでたが、まず細粒分が粘土のような活性度の高い成分を含んでいたのかを考える必要がある。単に、細粒分の多少が液状化強度を左右しているわけではない。つぎに、既往の研究によって、同じ相対密度をもつ場合、まさ土は豊浦砂などの自然砂に比べて、せん断時の体積圧縮量つまりダイレイタンスーが大きい材料であることが知られていた（鳥居・龍岡, 1982）。このことは、地震力によっては液状化する可能性を持っていた材料と考えられる。この性質は、この材料が締め固めし易い原因にもなっていると考えられる。

地盤改良の効果

図4-2-5、図4-2-6中ポートアイランドのサンドコンパクションやサンドドレーンによって地盤改良された領域では液状化は顕著ではない。図中でサンドドレーンによって地盤改良を受けた部分でも、液状化が顕著でなかったことから、サンドドレーンの液状化に対する有効性が指摘された。液状化対策としては締め固め工法が代表的である。しかしながら、ポートアイランドや六甲アイランドではサンドドレーン工法の有効性が指摘されている。サンドドレーンは沖積粘土層の圧密沈下を促進するために行われたものである。しかしながら、図4-2-5に示すように埋め立て層からサンドドレーンを行ったところでは液状化は顕著ではな

かった。サンドドレーンの有効性には2つの理由が考えられる。1つは、締め固め効果による埋め立て層の密度の増加と間隙水圧の排水効果促進である。石原(1995)によれば、サンドドレーン設置前にN値が9-15の地盤で、設置後には10-25とN値の増加が見られた。また、サンドコンパクションとロッドコンパクションによって、ポートアイランドと六甲アイランドではN値は17-31まで増加していたとされている。未改良地盤の沈下量は40-50cmであったのに対し、サンドドレーンによる改良地盤では10-20cmであった。また、サンドコンパクションによる改良地盤での相対沈下は小さかった。

六甲アイランド中央部の埋め立て材料と同様な材料である神戸層群の材料で埋め立てられたポートアイランド第二期地区では、図4-2-5に示すように埋め立て面からサンドドレーンを打設した領域は、海底面からサンドドレーンを打設した領域(2)に比べ、比較的液状化による噴砂は少ない。この事実からサンドドレーンが直接埋め土層の液状化低減に有効であったことと、その排水効果が役だったと考えることができる。いずれにしても、今後サンドドレーンの役割を定量的に明らかにする必要がある。

レキの噴出

埋め立てに用いられたまさ土はレキも含んでいるため、臨海部や人工島でレキの噴出が確認された。大きなものとしては、粒径75mm以上の石も噴出していた。特に、六甲アイランドの南西部のクレーンが倒壊した岸壁の背後で粒径10cm以上の石を含むレキの噴出が確認された。ポートアイランドでは、神戸港大橋近くの取り付け道路そばで大きなレキの噴出があった。

粘土の噴出

少なくとも2つの場所で粘性土の噴出が確認された。西宮市甲子園浜では噴砂の表面に数mmの薄い粘土が観測された。現場調査により、この粘性土は埋め立てに用いた浚渫粘土であることがわかっている。ポートアイランド南公園そばのポートピアランドの駐車場で、最大約10cm厚の粘性土の噴出が1kmにわたって確認された。ここは、ポートアイランド第一期の旧護岸で、第二期との境界部であり、埋め立てに用いられた粘土の可能性が大きい。粘性土の下側にはまさ土が堆積しており、まさ土の液状化に伴って、高圧液状化砂の流動とともに地震動で軟化した粘土が噴出したと考えられる。

液状化した地盤の構造

液状化跡としてクレーター状の噴砂丘がよく知られているが、今回人工島ではこのほかに、クラック状の地割れからの噴砂が多く見られた。これは、比較的堅く締め固められた表層の地盤のクラックから下部で液状化した土が噴出したと考えられる。内陸部で見られた、池を埋め立てたグラウンド等でみられた噴砂形態もこのようなクラック型であった。クラックの方向は表層地盤の運動と関連していると考えられる。

現地調査において、いくつかの液状化地盤の特徴が観察された。富士山型の噴砂丘、列状の噴砂や溝状の細長いクラックや地盤の側方移動などである。富士山型の噴砂丘は典型的な液状化の跡である。火山型の噴砂丘は淀川堤防付近や和田岬地区の自然砂の地盤でよく見られた。一方、溝状のクラックからの噴砂は人工島(ポートアイランド、西宮浜や芦屋浜など)で観察された。溝状クラックの破壊面からの噴砂を研究するために、ポートアイランドの南公園で掘削が行われた。図4-4-7はそのスケッチである。溝の厚さは約2cmであって、噴砂で満たされている。クラックはシルト質の砂で満たされていた。この砂は埋め立て時に用いられたものと考えられる。クラックの発生は地表近くの地盤が堅く締め固められているため容易に噴出できず、地震動によって表面に発生したクラックから深いところで液状化した砂が噴出したのであろう。一方、地盤が軟らかい場合は液状化した砂の圧力によって表面近くの地盤を壊し噴火口

状に噴出する。溝状のクラックからの噴砂については他の地震での報告もあるが、図4-4-7と同様の溝状のクラックの構造がいくつか報告されている(たとえば、Audemard and de Santis, 1991)。

側方流動

側方流動は液状化による地盤の変形がよく知られた変形パターンである。側方流動は人工島で観察された。図4-4-8はポートアイランドでの岸壁付近での地盤の側方移動の例である。図に見られるように地盤の側方移動は地表で多くの溝状のクラックを伴っていた。六甲アイランドやポートアイランドでの最大地盤の移動は六甲アイランドで6.9m、ポートアイランドで5.8mであった。側方流動は杭やケーソン基礎など地下構造物の被害の主要な原因と考えられる。地盤との相互作用として調査、解明されるべき課題である。

港湾構造物の被害

港湾構造物の被害において、液状化が果たした効果は今回少し違っていた。当初調査にあたった当時、被害に比べて護岸付近に噴砂が少なく、むしろかなり離れた地点で噴砂が多かったのである。このため、港湾構造物は大きな加速度によって被害を受けたという意見も多かったであろう。しかしながら、レキの噴出に見られるように、かなりの圧力を持った水-土混合体の存在を考えると、護岸の大きな移動によって圧力の低下があったと考えることには合理性があろう(井合, 1995)。

4.5 N値と弾性波速度の変化

図4-5-1は地震前後でのN値の変化を示す。地震後埋め土層ではN値の増加が見られる。これは、液状化の発生とその後の間隙水の移動による地盤の締め固め効果によると考えられる。一方、図4-2-16のようにN値の増加が見られなかった場合もあるので注意を要する。図4-5-2、表4-5-1は地震前後の弾性波速度の変化である。S波については、波速の変化は顕著ではないが、P波については浅い部分でかなりの増加が見られる。

4.6 地震動とポートアイランドの液状化特性

図4-2-1に示すように、400以上の地点で兵庫県南部地震の地震動記録が得られている。図4-2-5に示す地点では鉛直アレーでの地震記録(図4-6-1)が神戸市によって得られた。また、ここでは液状化が発生していた。図4-6-2に土質柱状図を示す。上部に層厚が約18mの埋土層、その下に10mの沖積粘土層、9mの沖積砂礫層、22.5mの洪積砂礫、さらに洪積粘土層Ma12へと続いている。この地点での地下水位はPS検層結果から見るとG.L.-5mである。地震後のボーリングからはG.L.-3.5mの位置にあった。地震前は水位がK.P.+1.6mであったことと、地震での沈下(約50cm)を考えると地下水位はG.L.-2.4mと考えるのが妥当であろう(神戸市開発局, 1994)。図4-6-3は各深さでの変位軌跡である。G.L.-83mでは各深さの記録に対して約22度反時計方向にずれていることがわかる。この深さでの記録の方向補正をしたものが図4-6-4である。地震による地盤の主運動方向は北から約30度反時計方向にずれているが、これは主な断層の方向に対して、ほぼ直交しているようである。この事実は基本的に断層運動のダブルカップル理論に対応している。また、この変位の主方向は濱田による永久変位の方向とほぼ一致している。図4-6-5は最大加速度の深さ方向分布を示す。図4-6-4は各深さでの加速度記録である。これらの図より、水平動は表層付近で減衰し、また図の時間軸の約6秒付近(真の時間軸約14秒)で、振動の周期が増大している。これは埋め立てに用いられたまさ土の液状化による地盤の軟化と剛性の低下によると考えられる。一方、上下動については、地表付近で増幅されており興味深い。

液状化深度については観測が容易ではなく推定は困難であるが、土質データから解析を通しての推定はある程度可能となっている。また、ポートアイランドのように鉛直アレー観測がされた場合は波形から大まかに読みとることも可能である。この点、間隙水圧の観測についても鉛直アレー観測が今後なされることが強く望まれる。現地調査に加え、簡易液状化判定や種々の方法による液状化の数値解析が行われた（岡他、八嶋他、吉田他、安田他、1995など）。岡らは深さ方向の液状化分布を求めるため、Biot型の2相混合体理論と繰り返し弾塑性構成式で地盤をモデル化し水の移動を考慮した液状化解析を行った（岡他、1996）。図4-6-6はG.L.-83mで2方向（N S、E W）波形を入力とした場合のG.L.-32m、G.L.-16mと地表での水平加速度波形である。観測波形とシミュレーションはよく一致している。図4-6-7はG.L.-83mで3方向（N S、E Wと上下動方向）波形を入力とした場合のG.L.-32m、G.L.-16mと地表での鉛直加速度波形である。水の圧縮性を導入することによって鉛直波の増幅がよく説明できている。図4-6-8は各深さでの間隙水圧波形である。この有効応力による水-土連成の液状化解析では表層の約20mの埋め土層とG.L.-32m辺りの沖積砂礫層の液状化が推定されている。また、解析において、水の圧縮性の導入により上下動の増幅が説明されているが、図4-2-2に示すように、鉛直動が水平動より大きい地点が地下水位の高い埋め立て地や沖積低地に多かった点は興味深い。一方、図4-6-9に示すようにポートアイランド第二期地区で地震後14分後に計測されたG.L.-37mの深さでの砂礫層で観測された過剰間隙水圧はアレー観測地点の鉛直有効応力の約61%であった。この事実は、この深さでかなりの間隙水圧の上昇が見られたことを示している。この点、解析結果との対比は今後より詳しく検討する必要がある。吉田(1995)もG.L.-32mの記録を入力としてG.L.-32m以浅の応答について非線形性を考慮した一次元の全応力と有効応力解析を行っており、ほぼ観測値と解析値でよい結果を得ている。

4.7 埋立地盤の地盤改良とその効果

兵庫県南部地震により、大阪湾を囲む沿岸部の埋立地盤で液状化現象が多く認められ、特に神戸港内の大規模人工島であるポートアイランドおよび六甲アイランドでの液状化現象（噴砂現象、地盤沈下）が顕著に見られた。両島においては、幾種類かの地盤改良工法が施工されており、地震後の被災調査によると改良域（特に締固め工法により改良された範囲）と非改良域において明瞭な被害の相違があることが報告されている（谷本、1995）。本節では、各種地盤改良工法（液状化対策工法以外も含む）について、既往文献と資料による調査、および現地における実測沈下量測定結果に基づき、両島における地盤改良効果について示すものである。

埋立地盤の特性

ポートアイランドの埋め立てには、須磨の丘陵地から採取されたまさ土（風化花崗岩）が用いられ、一部に建設残土、鉾さいも用いられている（谷本、1995；谷林ら、1981）。また、六甲アイランドではまさ土、神戸層群、大阪層群からなる土砂で埋め立てられているが、神戸層群の砂岩、泥岩、凝灰岩を破碎した土砂が大部分を占めており、一部に浚渫土を含んでいる。図4-4-1にこれら埋立地に使われたまさ土と神戸層群の粒度分布の範囲を示すが、両者ともかなりのレキ分を含んでおり、六甲アイランドで使われた神戸層群の細粒分が多いことがわかる。N値はばらつきがあるもののレキの影響を除けば一般に10前後であり、埋立層厚は20m程度である。

両人工島における地盤改良工法

ポートアイランド、六甲アイランドでは、埋立層下の沖積粘性土層の圧密沈下促進を目的としてプレロード工法とサンドドレーン（SD）工法、埋立層の支持力増加、液状化防止を目的として振動締固め工法が施工されている。振動締固め工法についてはポートアイラン

ドではロッドコンパクション(RC)工法、六甲アイランドではサンドコンパクションパイル(SCP)工法が採用されている。各種地盤改良工法は、ほとんどが建築施設を対象に施工されており、圧密沈下促進工法は支持杭基礎の中～高層建築物を、締固め工法は摩擦杭または直接基礎の低層建築物を対象としている。港湾施設については、六甲アイランドでクレーン基礎の支持力増加を目的として一部に締固め工法が採用されている。図4-7-1に両島の地盤改良平面図を示す(Tanimoto, 1995)。同図には航空写真に基づく噴砂発生状況も併せて示しているが、プレロード工法が施工されている区域を除けば、地盤改良工法が施工されている区域ではほとんど噴砂、噴水が認められない。

地盤改良工法の締固め効果

埋立地盤の締固めを目的として、ポートアイランドではRC工法、六甲アイランドではSCP工法が施工されている。両島で工法が異なるのは地盤の粒度特性が異なるためで、細粒分の少ないポートアイランドでは振動による締固め効果を期待するRC工法(地表面から現地砂を補給)、細粒分の多い六甲アイランドでは振動および圧入によって締固めるSCP工法(ケーシング内から地盤中に海砂を補給)が用いられている。前者の仕上がり径は50～60cm、後者は70cmである。

SD工法は、埋立層の下の中積粘土層の圧密沈下促進を目的として陸上から埋立層中をケーシングにより振動貫入して施工している。図4-7-2に示すように、ドレーン長が30～45mと長く、埋立層中にレキが混入していることや一部では鉋さいが堆積しているため、バイプロの振動を用いたケーシング貫入に多くの時間を要し、埋立層が締め固まることがポートアイランドの初期のSD工事で報告されている(池谷, 1980)。また、SCPの置換率 a_s (改良面積に対する砂杭の割合)よりは小さいが、SDの $a_s=2\sim5\%$ の圧入効果も埋立層の締固めに寄与していると考えられる。

表4-7-1に、ポートアイランド、六甲アイランドで施工された各種地盤改良工法の置換率、改良前後のN値、N値の増加量(ΔN)を示す(池谷, 1980; 堯天ら, 1981; 棚橋ら, 1987; 中島ら, 1992)。図4-7-3には置換率 a_s と増加N値 ΔN の関係を示すが、図中には設計でよく用いられているSCPの施工実績のライン(土質工学会, 1988)(原地盤N値10で $a_s=5\sim20\%$)も併せて示してある。埋立層の土質特性のバラツキから ΔN の現場によるバラツキは大きい、以下のことが言える。

- 1) SDによる増加N値は3.7～11.5と明らかに締固め効果が認められる。
 - 2) ポートアイランドでの締固め工法による ΔN のバラツキは大きい、特に置換率5%前後の効果が顕著である。
 - 3) 六甲アイランドでは ΔN と a_s の間に良い相関性が見られる。ポートアイランドではバラツキが大きい。
 - 4) 置換率5%以上のデータは少ないが、全体として置換率の増加とともにN値は増加する傾向にある。
 - 5) SCPの既往の施工実績と比較すると、ほとんどの現場で大きな効果が得られている。
- ポートアイランドでは、前述したように埋立層の一部に鉋さい、レキなどの堅い層が挟在していた場所でのSDの増加N値が大きいことが3)の原因と考えられ、2)、5)の理由としては、特にポートアイランドの細粒分が少なく均等係数の大きいまさ土に対して振動による締固め効果が大きいためと考えられる。いずれにせよ、置換率の増加とともに ΔN が大きくなるのは砂の圧入効果と振動エネルギーによるものと考えられる。

N値と沈下量の関係

地震発生直後、ポートアイランド、六甲アイランドの各地盤改良区域と非改良域で沈下量の測定が行われている(石原ら, 1995)。沈下の測定は、地震前の各地点での標高が明確でな

いため、杭基礎で施工されている主要な建屋は沈下していないものと仮定して、その周辺部の相対沈下量で評価されている。ただし、これには沖積粘土層の残留沈下が含まれていることと、一部の施設は直接基礎、摩擦杭基礎であるため、若干の誤差が含まれているようである。図4-7-4に各地盤改良工法別の相対沈下量の測定結果を示す。同図より非改良域では平均して40～50cm程度の相対沈下がみられるのに対し、SD改良域では平均で15～18cm、振動締固め改良域ではほぼ相対沈下なしという結果が得られており、地盤改良工法による液状化抑止効果が認められる。この結果は、改良の程度により地盤の強度が異なり、その強度によって液状化の程度に差が生じたためであると考えられる。そこで、ポートアイランドにおいて非改良域と改良域で、相対沈下が計測された箇所の近傍に土質調査結果がある事例（福井, 1982）について、平均N値と相対沈下量の関係を示すと図4-7-5のようになる。図より、平均N値の増加とともに相対沈下量が減少していることが分かり、平均N値と相対沈下量には明らかに相関性が認められる。

まとめ

兵庫県南部地震でのポートアイランドおよび六甲アイランドでの液状化対策とその効果について、既往文献と資料の調査、現地沈下量の測定結果などから検討を加えた結果、以下のようにまとめられる。現地調査結果から、サンドコンパクションパイル工法、ロッドコンパクション工法の液状化に対する有効性が確認された。サンドドレーン工法の振動締固め効果、圧入効果で埋立土のN値が増加している、このことが液状化の被害の低減をもたらした1つの原因と考えられる。また、地盤の平均N値と沈下量には明らかに相関性が認められた。

4.8 液状化した地点を含む縦断地質断面図

地質断面図を作成したのは、神戸市の三宮駅・深江駅付近、西宮市の甲子園町・高須町付近を通る4測線である(図4-8-1)。神戸市にては関しては「神戸の地盤」(神戸市, 1980)、西宮市に關しては「大阪地盤図」(土質工学会関西支部, 1987)から土質柱状図を抽出して断面図を作成した。図4-8-2に各測線での推定地層断面を示す。

まず三宮駅付近を通るA-A'地層断面を見てみると、地表から数m～十数mの深さまで海岸部では埋立土層があり、内陸にはいると沖積砂礫層や、盛土層が堆積している。また、山際には崖すいが堆積している。これらの下部には沖積の砂質土・粘性土・砂礫層が海側で堆積し、さらにその下部には洪積の砂礫と粘性土の互層が存在している。深江駅付近を通るB-B'地層断面でも表層に埋立土層、沖積砂質土層、崖すいが堆積し、その下部に沖積の粘性土や砂質土と粘性土の互層、洪積の砂礫・粘性土の互層が堆積している。液状化は埋立土層と、沖積砂質土層および沖積砂質土と粘性土の互層の一部で発生したとの結果となった。

西宮市の甲子園町と高須町付近を通るC-C'、D-D'断面では、いずれも、地表から沖積の砂質土層・粘性土層・砂礫層が堆積し、その下部に洪積の砂礫層が堆積している。

4.9 液状化簡易判定方法の適用性について

検討方法

現在、わが国の設計基準類では、N値による液状化の簡易判定方法が多く用いられている。ここではそれらの適用性を検討した。このために検討地盤として、1. 海岸から山裾までの断面と、2. 地盤を締め固めてあった箇所の2種類の検討対象地盤を選んだ。前者は神戸市から西宮市にかけて、海岸付近では液状化が発生し、内陸になると発生していなかったため、これらを通る断面をとったものである。このため、図4-8-1に示す、神戸市の三宮・深江、西宮市の甲子園町・高須町を通る2測線をとった。そして、神戸市に關しては「神戸の地盤」、

西宮市に関しては「大阪地盤」から土質柱状図を抽出して断面図を作成した（安田ら, 1995）。後者は、ポートアイランドや六甲アイランドで地盤をロッドコンパクションやサンドコンパクション工法で締め固めてあった地区で噴砂・噴水が発生せず、地盤の沈下も発生しなかった（Yasudaら, 1995）ため、完全に液状化しなかった例として、これを検討対象地盤として選んだ。ただし、代表的な地盤モデルとして、埋め立て層厚が17m、地下水位がGL.-4mの地盤モデルを設定した。そして、ポートアイランドでの締め固め後のN値が18～31であったため、埋め立て層の中間深度でこれらの値をとり、最深部と地表とでN値が±2となるように設定した。

液状化層の推定は道路橋示方書・同解説、建築基礎構造設計指針、原子力発電所耐震設計技術指針、港湾の施設の技術上の基準・同解説に示されている、N値を用いる簡易方法で行った。この際、平均粒径、細粒分含有率、単位体積重量については不明なため、道路橋示方書・同解説に示されている土質名からの推定方法に従って推定した。ただし、神戸市の埋立土は主にまさ土から構成されているため、神戸市の断面およびポートアイランドで締め固めた地盤に対しては、ポートアイランドでのまさ土の試験結果から $D_{50}=1.2\text{mm}$ 、 $FC=8\%$ と仮定した。また、西宮市の沖積砂層の粒径については、採取した噴砂の試験結果（安田ら, 1995）から $D_{50}=0.25\text{mm}$ 、 $FC=10\%$ と仮定した。地表最大加速度としては4つの断面に対しては加速度の影響をみるため、300、500、700galの3種類で計算した。ただし、以下に図示する液状化範囲の推定は、小林がまとめている距離減衰関係（小林, 1995）をもとに、A、B、C、D断面それぞれに対し、600gal、500gal、400gal、400galの値で行った。また、ポートアイランドの締め固めた地盤モデルに対しても距離減衰関係から600galで推定を行った。なお、基準類によっては20m以深や洪積層では液状化の対象外としているものもあるが、ここではその制限をはずしてある。したがって、純粋に各基準類の適用性を論じているのではないことを、お断りしたい。

2つの地層断面での液状化層の推定結果

図4-8-1に示した4つの断面のうち、紙面の都合上、A-A'断面とC-C'断面の結果のみを図4-9-1、図4-9-2に示す。ただし、B-B'断面、D-D'断面はそれぞれA-A'、C-C'断面の結果に傾向は似ていた。図4-9-1、図4-9-2のうち、液状化検討結果の図では300、500、700galのときの地震時発生せん断力比を△、○、□印で示し。液状化層の推定を行った600、400galでのそれを実線で示し、また、液状化強度比を●印で示した。ただし、港湾の方法だけはN値で表現されるため、外力と強度に相当する値を同様の記号で示した。さらに、筆者たちが地震後に現地で噴砂・噴水を見た範囲も図中に示した。

まず図4-9-1の三宮駅付近を通るA-A'断面で、地表最大加速度の違いによる液状化発生層の相違についてみると、埋立土層(F)では300galですでにほとんど液状化したとの結果になり、それより大きな加速度では結果が変わらない。これに対して、港湾の方法を除いてその他の方法では、300gal以上の加速度で発生せん断力比が加速度に比例するため、埋立土層以外の地層では液状化層が加速度に応じて変化する結果となった。

次に、この地区で発生したと考えられる600galの地表最大加速度のもとでの、推定液状化層（図中に網がけしてある層）についてみると、沖積砂層(A_s)では道路橋の方法ではほとんど液状化したとの結果になった。これに対して、他の方法では一部液状化していないとの結果となった。これは、N値が20程度以上での液状化強度比の違いに起因しているようである。海側の沖積粘土層下の沖積砂礫層(A_{sg})では4つの方法ともほとんど液状化したとの結果となった。実際にはポートアイランド内の同じ層で過剰間隙水圧比が50%程度上昇していたとの報告もあり、ここでの判定結果はある程度合っているかもしれない。洪積砂礫層(D_{sg})では道路橋および原子力の方法ではかなり液状化したとの結果となり、その他の方法では一部で液状化したとの結果となった。この層のN値はかなり大きい、深さが深いので、このような結果になったと考えられる。ただし、前述したように、この層は洪積層であり、また、深いので、本来基準類の適用範囲を超えている。

図4-9-2の西宮市の甲子園町を通るC-C'断面での地震動を考えた、400galの地表最大加速度

による液状化層の推定結果をみると、沖積砂層(A_s)ではどの方法ともかなり内陸部まで液状化したとの結果となった。ただし、層の中間深度付近のN値が20程度以上の部分では、道路橋以外の方法では液状化していないとの判定結果となっている。沖積砂礫層(A_{sg})では港湾の方法では一部しか液状化しないとの結果となり、道路橋の方法ではほとんど液状化するとの結果となった。そして、その他の方法ではその中間の推定結果となった。この層はN値が20程度以上はあるが、深度は深い。洪積砂礫層(D_g)については、道路橋の方法で一部液状化したとの結果となり、その他では30m付近の洪積砂礫層を除いて液状化しなかった結果となった。

噴砂が見られた範囲と液状化推定層の関係

図4-9-1、図4-9-2に示した噴砂・噴水が見られた範囲と、推定した液状化層が存在する範囲との関係を見てみると、A-A'断面では建築および港湾の方法ではほぼ範囲が一致している。これに対し、道路橋および原子力の方法では内陸の方まで推定した液状化がはいりこんでいる。一方、C-C'断面ではいずれの方法とも、推定した液状化層の方が噴砂・噴水が見られた範囲よりかなり内陸まで入りこんでいる。

さて、地盤内のある層で液状化したといえども、それで噴砂・噴水が地表に現れるとは限らない。例えば、石原は液状化層厚とその上の非液状化層厚の関係で、地表に噴砂・噴水が現れたり被害が生じるか否かが異なると考え、図4-9-3の関係を提案している(安田ら,1995)。そこで、今回の推定結果をこの図にプロットしてみた。ただし、今回の両断面とも内陸部に向かって推定液状化層厚が薄くなっていくため、ここでは簡単化のため、噴砂・噴水が見られた区域と見られなかった区域との境の位置における液状化層厚と非液状化層厚の関係をプロットしてみた。また、液状化層の下部に非液状化層があり、さらにその下部に液状化層がある場合には、上部の液状化層の厚さだけをカウントした。ただし、A-A'断面においては、境付近を挟んで海側と内陸側で液状化層が大幅に異なり、判断がつかかねるので、両側の液状化・非液状化層厚ともプロットした。

図4-9-3を見ると、まず、A-A'断面の場合、道路橋の方法では600gal程度の曲線(地表に変状が発生するか否かの境界)よりはるかに内側にはいつている。その他の方法では液状化層が厚い内陸側のデータをとると曲線より内側になり、海側のデータをとると、曲線よりはるかに外側となった。したがって、もし400-500galより少し外側に600galの曲線があるとする、道路橋では液状化層厚を多く見積もりすぎていることになる。その他の方法では海側のデータと内陸側のデータがかなり離れているため、これだけでは議論をしかねる。

一方、C-C'断面では、いずれの方法でもこの境付近の液状化・非液状化層の厚さは似ているため、図では1点で示した。これと400-500galの曲線とを比較してみると●印はかなり内側にプロットされている。したがって、図4-9-2では液状化層厚を厚く推定していると言えよう。なお、前述したように、この断面の沖積砂層(A_s)には中間深度にN値が大きい部分があり、道路橋以外ではこの層が非液状化層となるため、図4-9-3のプロットも真下に少し下がる可能性もある。ただし、それでも曲線上の $H_2=1\text{m}$ 程度までは薄くならず、また、内陸側でそのような非液状化部分がないデータもあるため、やはり、いずれの方法でも液状化層を実際より厚く推定している可能性があると言えよう。

ポートアイランドで締め固めてあった地盤での推定結果

ポートアイランドで締め固めてあった地盤のモデルに対する液状化層の推定結果を図4-9-4に示す。前述したように、締め固め後のN値は18~31であったため、その最低値と最高値で推定を行ってある。図を見ると、道路橋および原子力の方法ではN値が31でも、600gal地表最大加速度を想定すると液状化したとの結果となった。建築および港湾の方法でも、N値が18ではやはり液状化したとの結果となった。ただし、N値が31では液状化しない結果となった。

N値と液状化強度比の関係としては、N値が20程度まではどの方法でもあまり大きな差

がないが、これより大きいN値で差があることが、これまでに指摘されてきていた。道路橋の方法ではこれまであまり大きいN値を対象としていなかったため、小さいN値での式(1/2乗)をそのまま大きなN値に当てはめるとあまり液状化強度比は増加しない。これに対し、建築の方法ではN値が20程度以上で、また、原子力の方法では30程度以上で液状化強度比が急激に大きくなる式となっている。したがって、上記の液状化推定結果の差はこれに主に起因して生じたと考えられる。つまり、道路橋の方法ではN値が31と大きくてもあまりRは大きくならないのに対し、Lの方は通常想定している80~180gal程度より数倍であったため、液状化したとの判定結果にならざるをえなかったと考えられる。原子力の方法でもN値が30程度以上でないとRは急増しないため、同様の結果となったと考えられる。これに対し、建築の方法ではN値が20程度から τ_1/σ'_z が急増するため、N値が31になると600galといった大きな地震力でも液状化していないとの結果になったものと考えられる。また、港湾の方法では等価加速度が300gal以上では等価N値(ここでは他の方法と比較するため限界N値と記している)が16と一定値に設定してあるため、N値が16程度以上(この値は深さによって異なる)になると液状化しなかったとの結果になったものと考えられる。なお、港湾の方法では液状化の判定は4段階で示されるようになっているが、ここでは中間を考え、IIとIIIの境界で液状化、非液状化を判断している。

簡易液状化判定方法の問題点

以上の結果をもとに、今回のような大きな地震動に対して、液状化簡易判定方法を適用する場合の問題点および修正の可能性に関して少しコメントしてみる。

まず、液状化強度比に関しては、ポートアイランドでの締固め地盤の結果等をもとに考えて、N値が20程度以上に締め固めてあると、大きな地震動でも液状化はしそうになく、液状化強度比を大きく判断するようにした方がよいようである。ただし、自然堆積地盤でも同じなのか、また、砂の種類などによってどう変わるかといった、細かい検討は必要であろう。

次に、波形の違いに関する補正係数に関しては、直下型の地震等の場合、補正係数を変えたほうが良いことが考えられる。これに関しては、石原がまさ土に今回の地震波荷重と正弦波荷重を加え、液状化試験を行って、補正係数を求めている(石原, 1995)。そこではポートアイランドの地表で記録された加速度記録を平面的に合成し、卓越する方向に投影した波を用いている。また、緩く詰めた場合と密に詰めた場合で実験してある。それによると、密度によって差がなく、0.43なる値が得られている。道路橋などの場合、通常この値としては、0.625がとられているので、この分だけ今回の検討では差し引ける可能性がある。また、吉田の解析結果(吉田, 1995)によると、地震応答解析の内でも、SHAKEのような等価線形法による場合と有効応力法などによる場合とで、得られる発生せん断力が違って、前者が2割程度大きいことが述べられている。道路橋等のLの推定式はSHAKEによる解析結果をもとに作られているため、今回の検討でもLを2割程度大きく見積もっている可能性がある。そこで、波形の補正係数と地震応答解析の問題を単純に掛け合わせてみると、Lに0.55倍したものが今回の地震で発生した実際のせん断力比とすることができる。このように考えて、図4-9-3の例えば原子力の結果を眺めてみると、内陸部でかなり液状化層が減り、図4-9-4とつじつまがあってくる可能性があると考えられる。

参考文献

1. 鳥居 剛・龍岡文夫(1982): 砂礫土の三軸液状化強度の考察, 第17回土質工学研究発表会講演概要集, 1669-1671.
2. 井合進(1995): ケーソン式岸壁の被害の特徴, 土木学会誌, 80, 46-49.
3. Sugito, M., K. Sekiguchi, A. Yashima, F. Oka and Y. Taguchi (1996): Correction of orientation error of borehole strong motion array records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan. 17, 1995,

土木学会論文集, 第1分科, 1996年1月号掲載予定.

4. Bardet, J.P., F.Oka, S.Sugito and A.Yashima (1995) : The Great Hanshin Earthquake Disaster - Preliminary Investigation Report-, Report of NSF、University of Southern California and Gifu Univeristy.
5. 八嶋厚・岡二三生・田口洋輔・立石章 (1995) : 水の圧縮性を考慮した三次元液状化解析, 第40回土質工学シンポジウム, 地盤工学会, 257-264.
6. 松岡篤 (1995) : 六甲山地の地質と1995年兵庫県南部地震における地盤変状, 形の科学会報, 10-1, 24-25.
7. 谷本喜一 (1995) : 兵庫県南部地震の地盤災害, 阪神大震災調査報告, 第30回土質工学研究発表会特別セッション, 地盤工学会, 1-24.
8. Shibata, T., F.Oka and Y.Ozawa (1996) : Characteristics of ground deformation due to liquefaction, Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake.
9. 徳島大学工学部 (1995) : 兵庫県南部地震淡路島震災調査報告書.
10. 土質工学会関西支部 (1987) : 新編関西地盤図.
11. 岡二三生・八嶋厚・田口洋輔・立石章・古川浩司・福島研一 (1996) : 鉛直アレー観測記録を用いたポートアイランドの連成3次元液状化解析, 阪神淡路大震災に関する学術講演会, 土木学会.
12. 柴田徹・岩崎好規 (1987) : 大阪地盤の液状化, 大阪地盤図, 61.
13. 吉田望 (1995) : 1995兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, 43-10, 49-54.
14. 安田進・坪田邦治・西川修・浅香寛之・内藤福隆 (1996) : 兵庫県南部地震による液状化発生層の推定, 阪神淡路大震災に関する学術講演会, 土木学会.
15. 島田健一 (1995) : 淀川河川堤防の地震被害とその対応, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'95発表論文集, 地下水地盤環境に関する研究協議会, 85-94.
16. Audemard, A. and de Santis, F. (1991) : Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes, Bulletin of Engineering Geology, 44, 5-16.
17. 石原研而・安田進・原田健二・新川直利 (1995) : 兵庫県南部地震により液状化した地盤の沈下量と改良工法の関係, 土木学会第50回年次学術講演会, 第3部, 1520-1521.
18. 土質工学会関西支部 (1992) : 関西地盤.
19. 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会 (1987) : 新編大阪地盤図, コロナ社.
20. Kuribayashi, E. and F.Tatsuoka (1975) : Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan, Soils and Foundations, 15-4, 81-92.
21. 永瀬英生、辻野修一、木村耕三 (1995) : 過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度, 第30回土質工学会研究発表会講演集, 326, 845-846.
22. 国土地理院 (1995) : 平成7年兵庫県南部地震災害現況図.
23. (株)大林組技術研究所 (1995) : 1995兵庫県南部地震調査報告書.
24. 運輸省港湾局・運輸省港湾技術研究所・運輸省第三港湾建設局 (1995) : 阪神淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書.
25. 谷本喜一 (1974) : ポートアイランドの耐震調査, 神戸市開発局.
26. 運輸省港湾局技術課・運輸省港湾技術研究所・運輸省第三港湾建設局 (1995) : 阪神淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書 (第2集).
27. 東洋建設技術研究所 (1995) : 鳴尾浜地区震災調査報告書.
28. 神戸市開発局 (1994) : ポートアイランド(No.2)土質調査報告書.

29. 神戸市開発局 (1995) : 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査 (ポートアイランド、六甲アイランド) 報告書.
30. 神戸大学工学部 (1996) : 神戸大学工学部兵庫県南部地震被害調査報告書, 第1集, 第2集.
31. Ishihara, K., S. Yasuda and H. Nagase (1996) : Soil characteristics and ground damage, Soils and Foundations, Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake.
32. 濱田政則・磯田龍二・若松加寿江 (1995) : 1995年兵庫県南部地震液状化, 地盤変位及び地盤条件, 地震予知総合研究振興会.
33. 中央開発株式会社 (1995) : 1995年兵庫県南部地震阪神大震災災害調査報告書.
34. 落合英俊・梅村順 (1995) : 第3次及び第4次土木学会阪神淡路大震災調査団報告, 土木学会誌, 80, 37.
35. 岐阜大学工学部土木工学科地盤機能第3講座 (1995) : 阪神大震災 (1995年兵庫県南部地震) 被害調査速報.
36. 谷本喜一 (1995) : 兵庫県南部地震の地盤災害, 第30回土質工学研究発表会特別セッション, 1-24.
37. 谷林和好・小堀隆治 (1981) : 埋立地に建つ高層団地における各種杭試験, 基礎工, 9-11, 100-110.
38. Tanimoto, K. (1995) : Keynote Lecture "Damages to reclaimed lands and performance of improved ground during South Hyogo Earthquake", International Geotechnical Meeting, Kansai Branch of Japanese Geotechnical Society.
39. 池谷幹夫 (1980) : サンドドレーン工法による地盤改良の施工例, 下水道協会誌, 17, 190.
40. 堯天義久・福住忠裕・福井實・水畑耕治・小堀隆治 (1981) : 神戸ポートアイランドにおける地盤改良工事に伴う振動試験報告, 日本建築学会近畿支部研究報告集.
41. 棚橋秀光・内田直樹・福井實・川村政美 (1987) : 埋立地盤における各種基礎形式を有する建物の沈下測定, 日本建築学会近畿支部研究報告集.
42. 中島信・福井實・谷本喜一 (1992) : 新交通車両基地の基礎工, 基礎工, 20-5, 73-79.
43. 土質工学会 (1988) : 軟弱地盤対策工法－調査・設計から施工まで, 125.
44. 福井實 (1982) : 埋立地盤における打込み杭に関する実験的研究, 神戸大学博士論文.
45. 神戸市企画局総合調査課 (1980) : 神戸の地盤.
46. 安田進・坪田邦治・小林利雄・西川修・野村博之 (1995) : 兵庫県南部地震による液状化発生地点での地層構成, 第23回地震工学研究発表会講演概要, 217-220.
47. Yasuda, S., K. Ishihara, L. Harada and N. Shinkawa (1996) : Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake.
48. 安田進・小林利雄・野村博之・西川修 (1995) : 兵庫県南部地震による液状化地点での判定方法の適用性, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第3部(A), 528-529.
49. 小林啓美 (1995) : 兵庫県南部地震1995の地震動強さの検討, 土と基礎, 43-11, 55-58.
50. Ishihara, K. (1985) : Stability of natural deposits during earthquakes, Proc. 11th Int. Conf. on S.M.F.E., 1, 321-376.
51. 石原研而 (1995) : 私信.

Locations of Strong Motion Stations with Horizontal Peak Accelerations
(Numerals with bracket represent horizontal peak velocity)

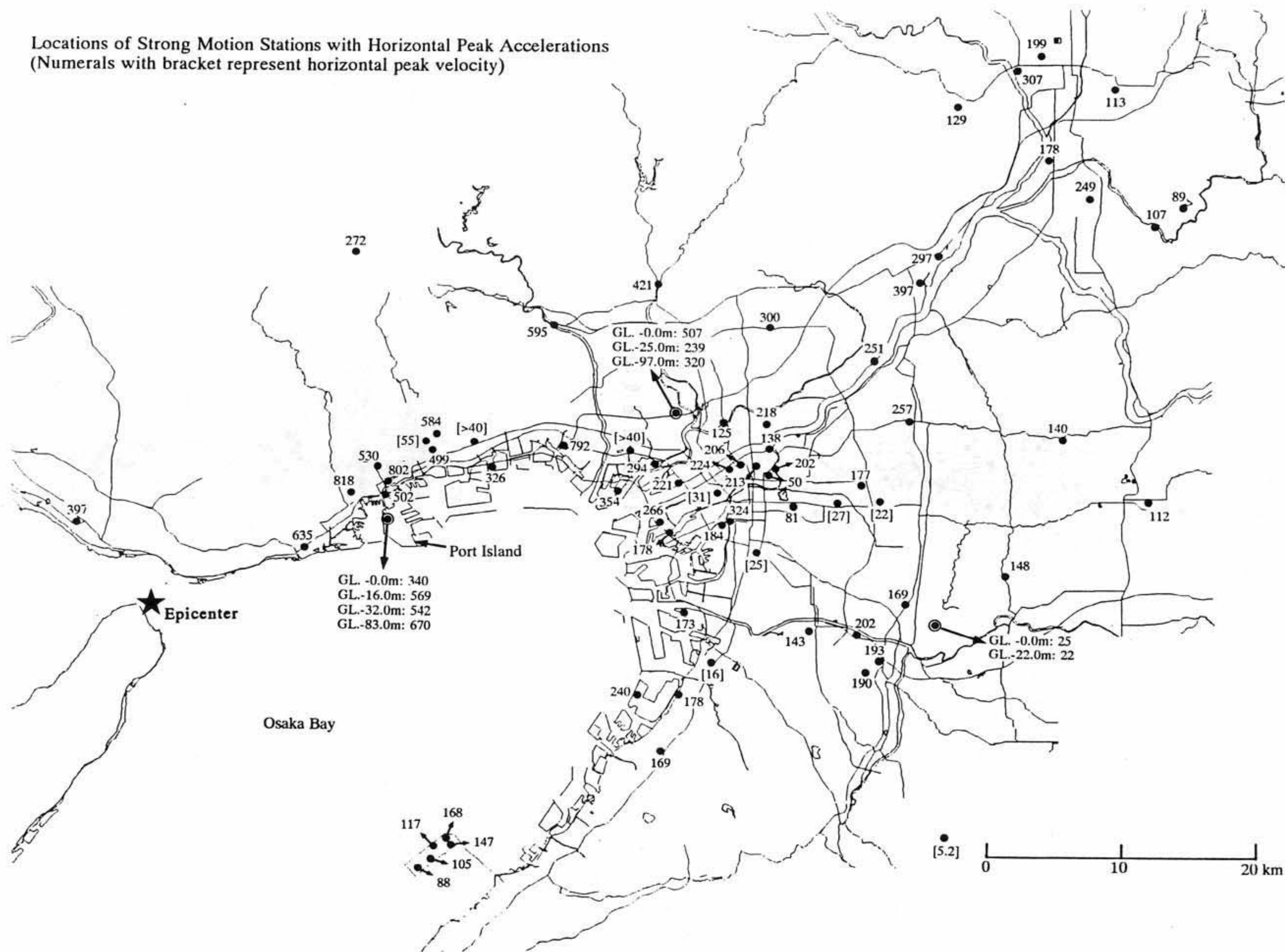


図4-2-1 水平加速度の分布

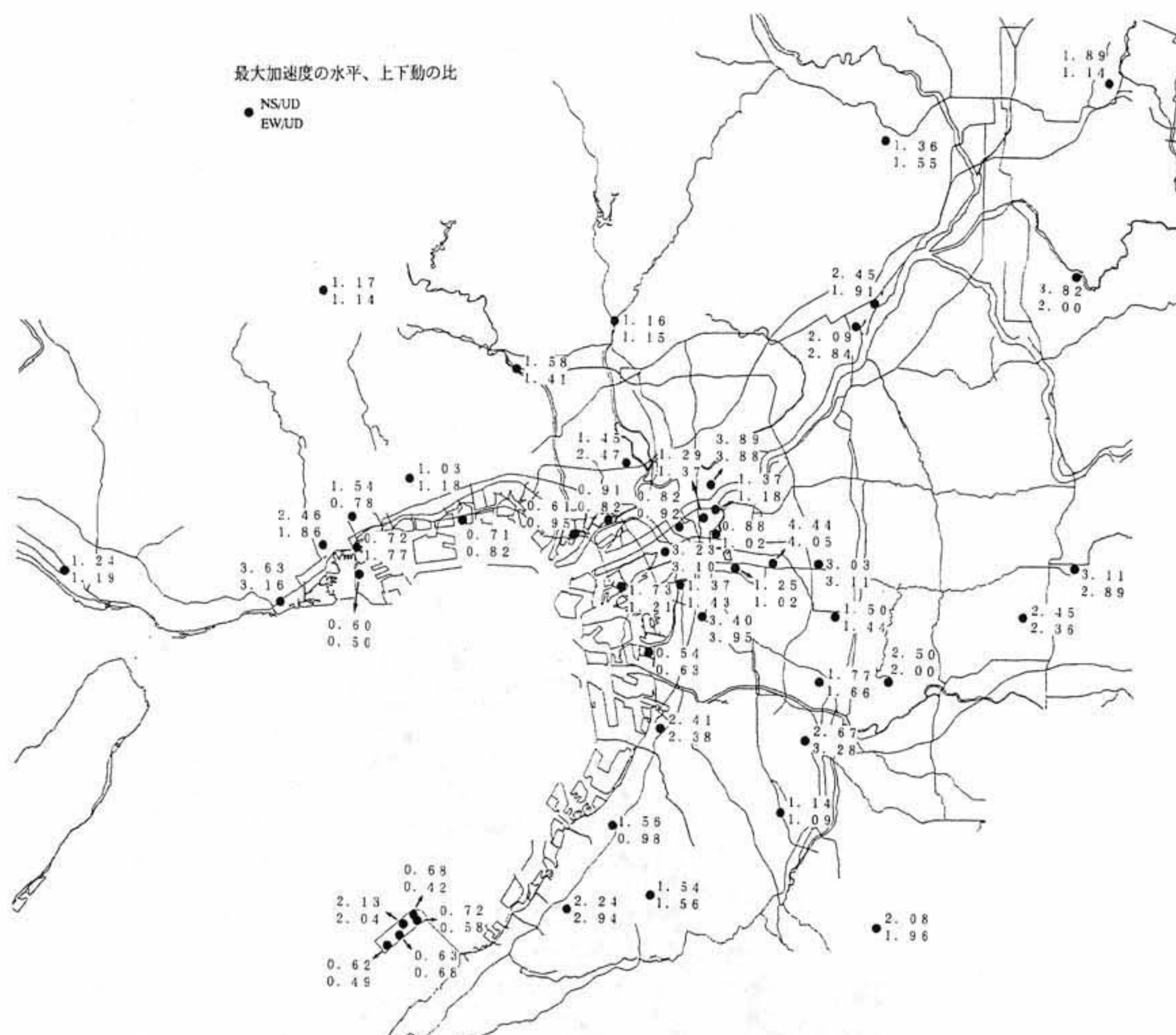


図4-2-2 水平最大加速度と鉛直最大加速度の比



図4-2-3 埋め立て履歴図

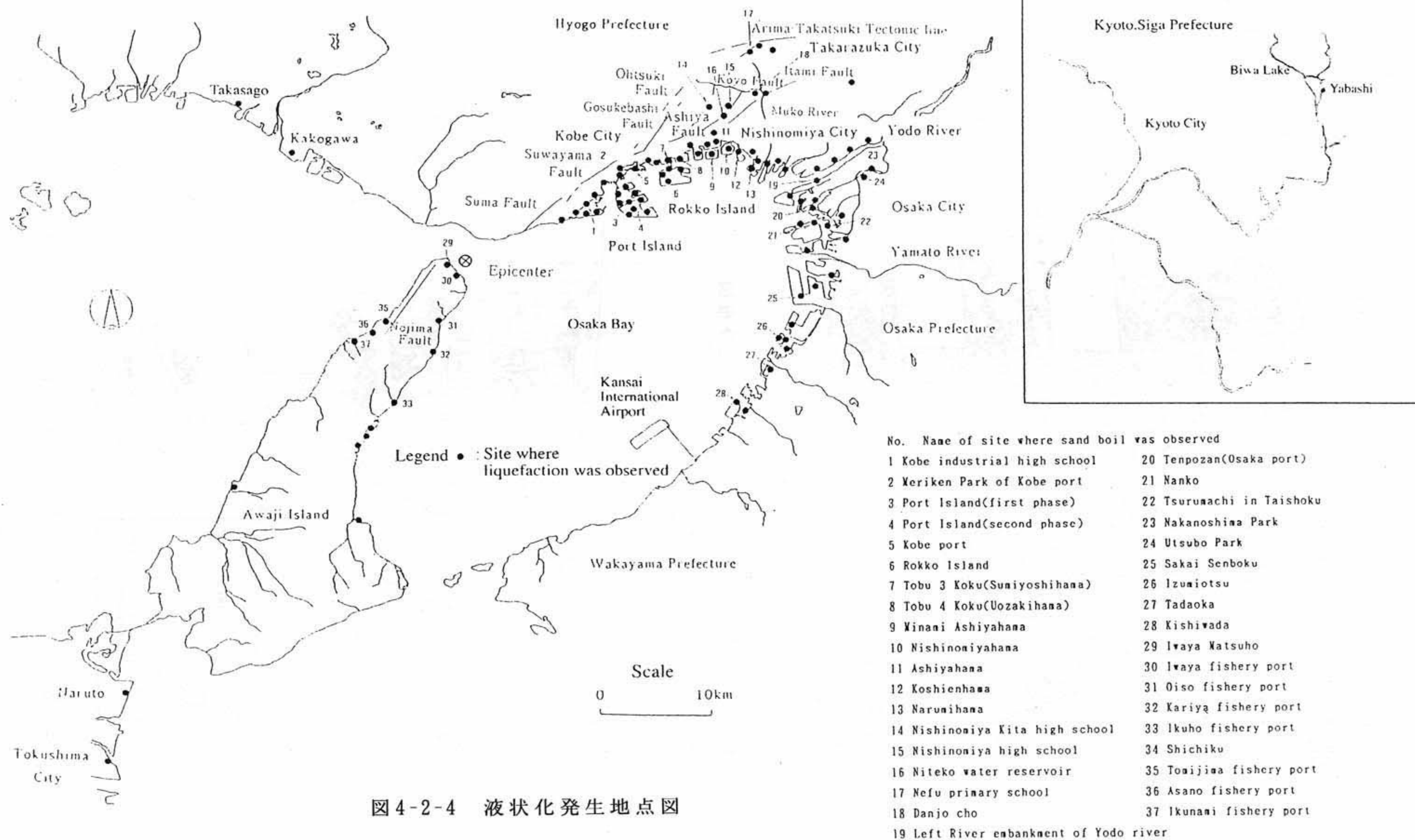


図4-2-4 液状化発生地点図

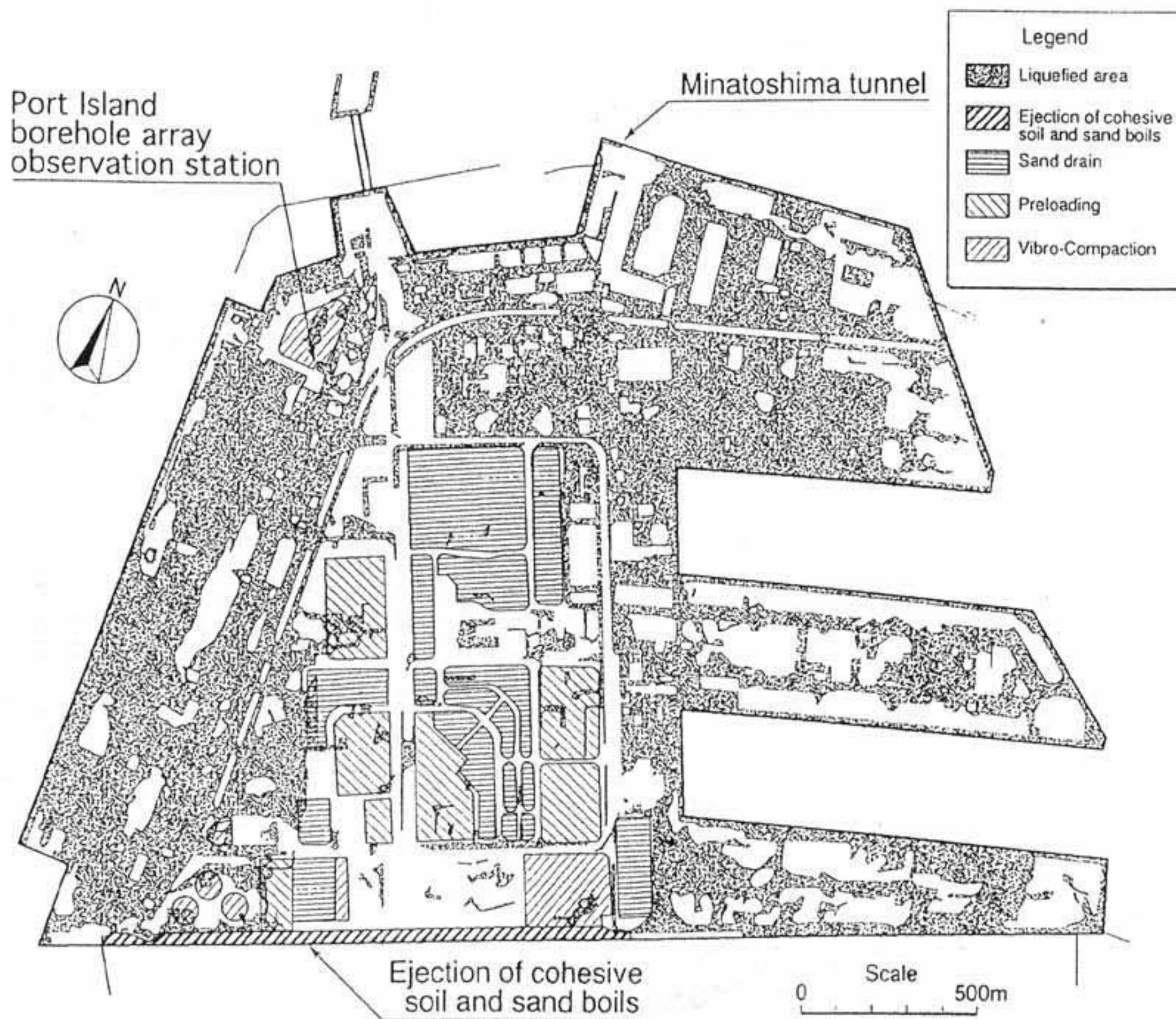


図4-2-5 ポートアイランドでの液状化分布図（第一期地区）（グラビア参照）

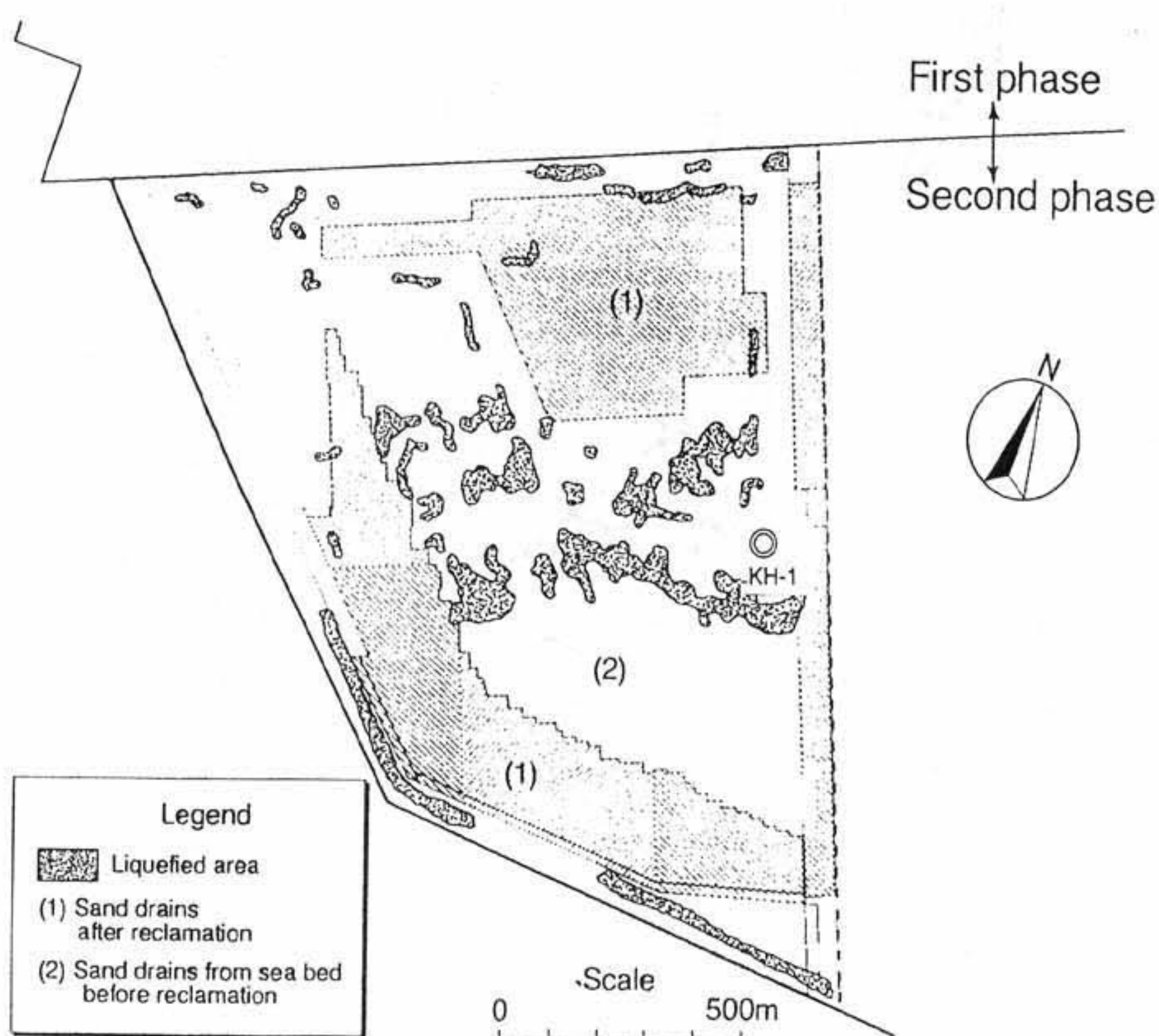


図4-2-6 ポートアイランドでの液状化分布図（第二期地区）

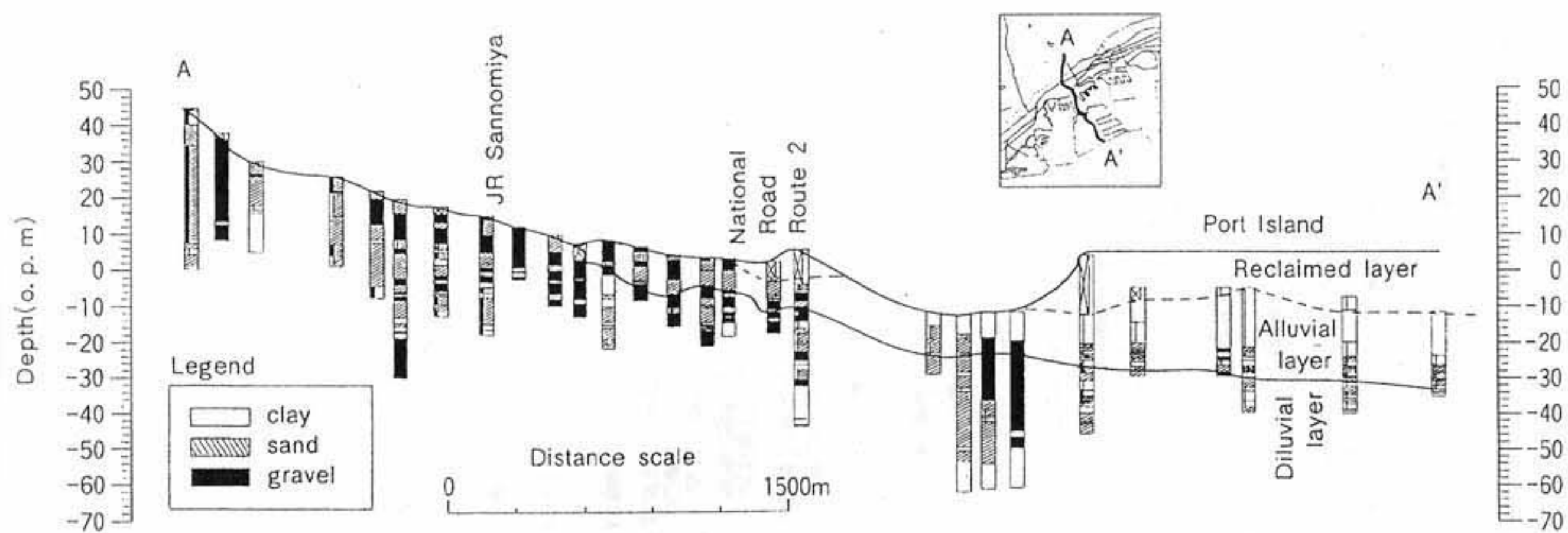


図4-2-7 地盤縦断面図（ポートアイランドと神戸市中心部）

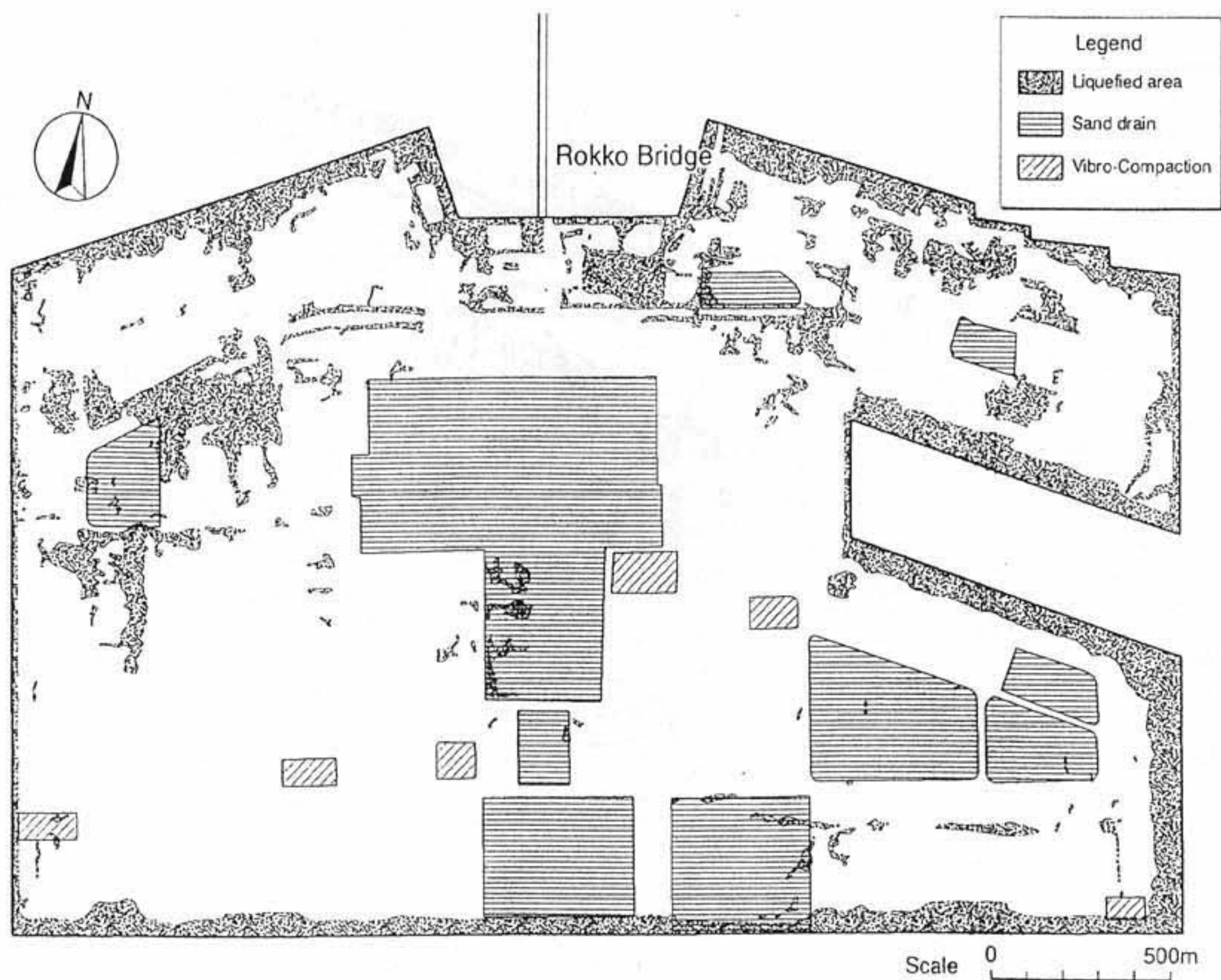


図4-2-8 六甲アイランドでの液状化分布図（グラビア参照）

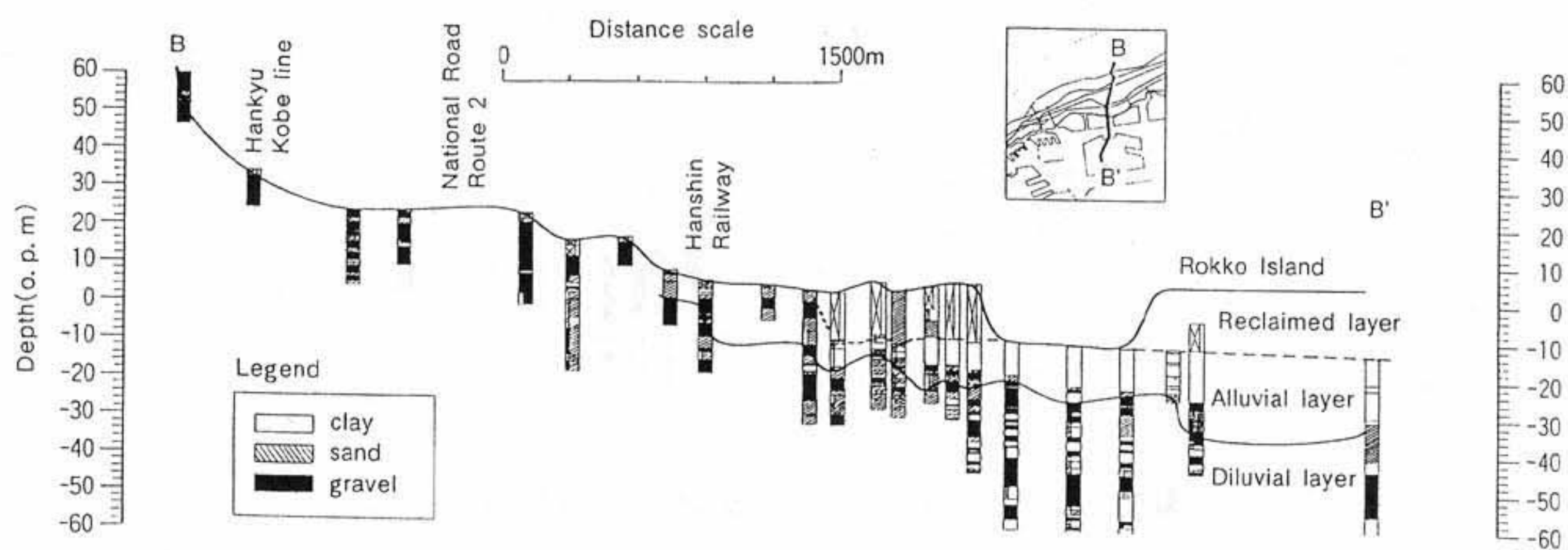


図4-2-9 地盤縦断面図（六甲アイランドと神戸市市域）

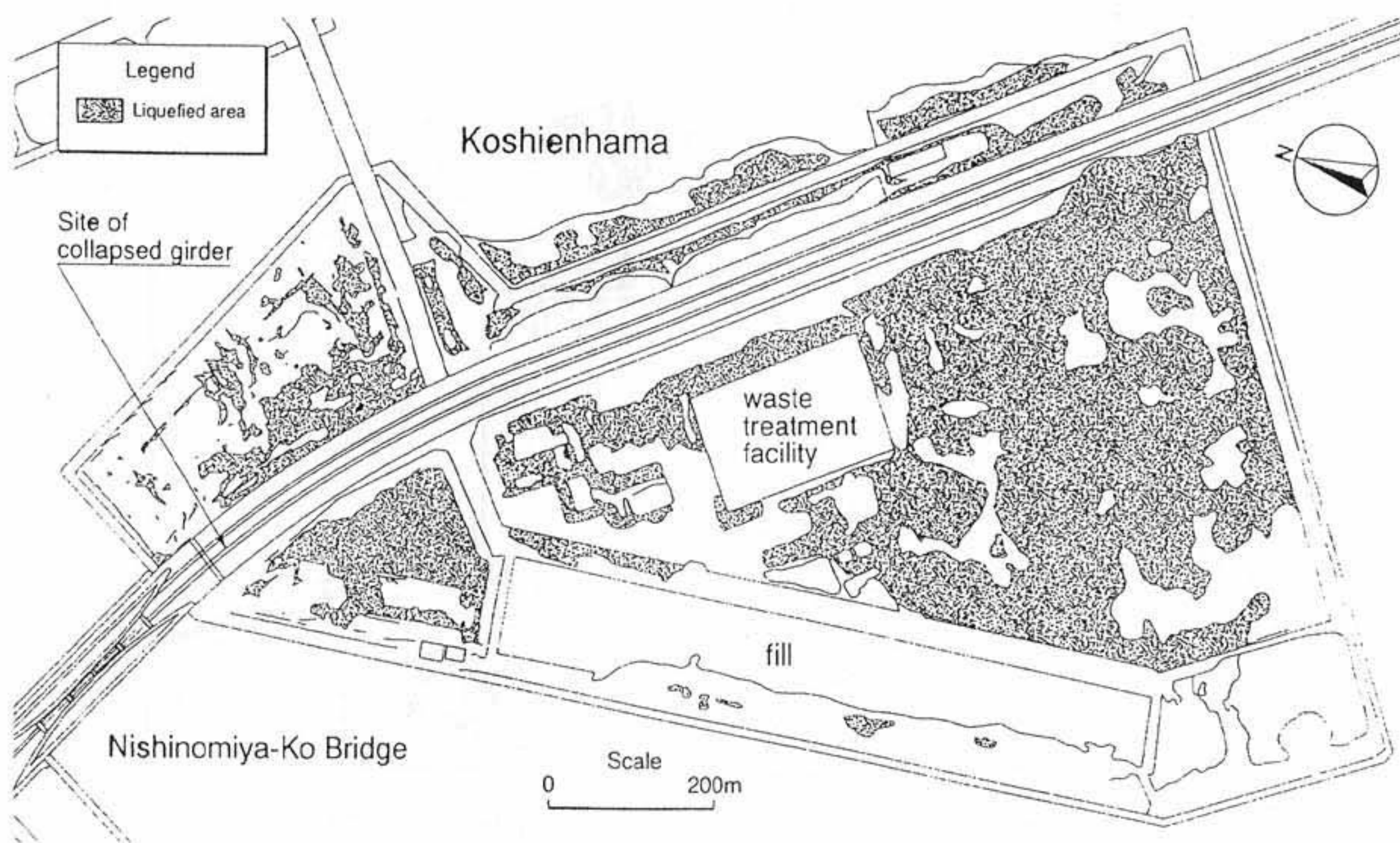


図4-2-10 甲子園浜での液状化分布図

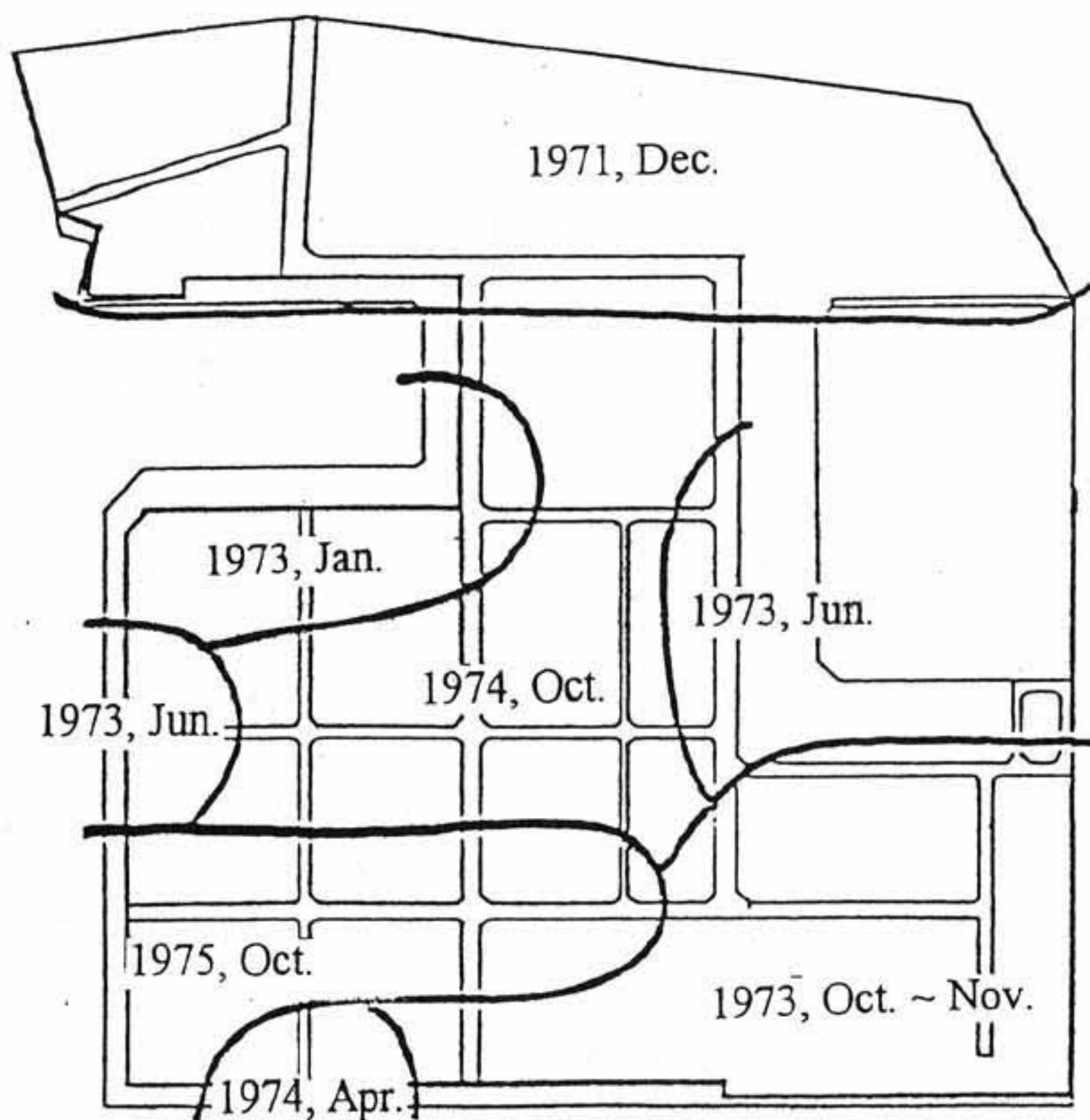
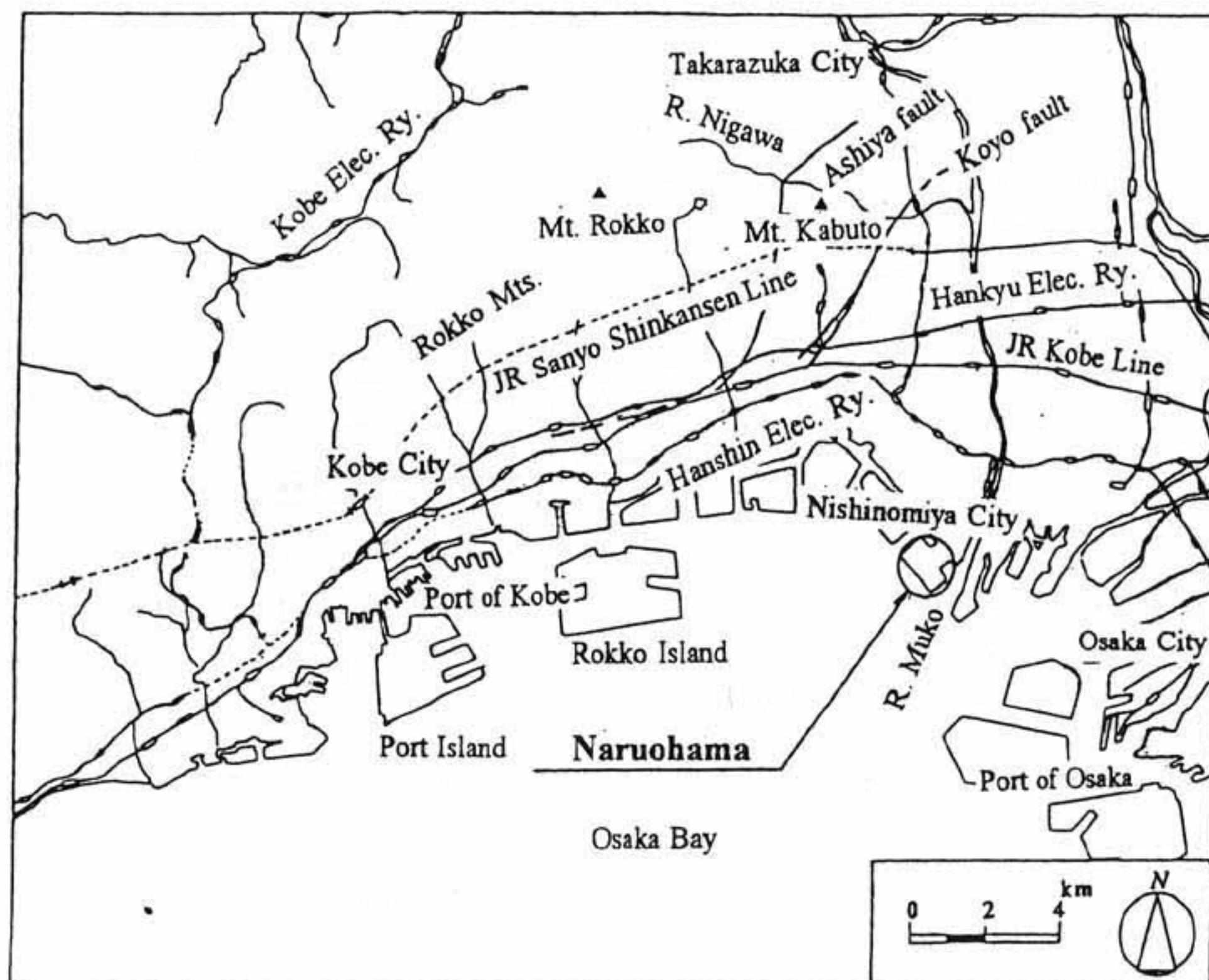


図4-2-11 鳴尾浜の位置と埋め立て履歴

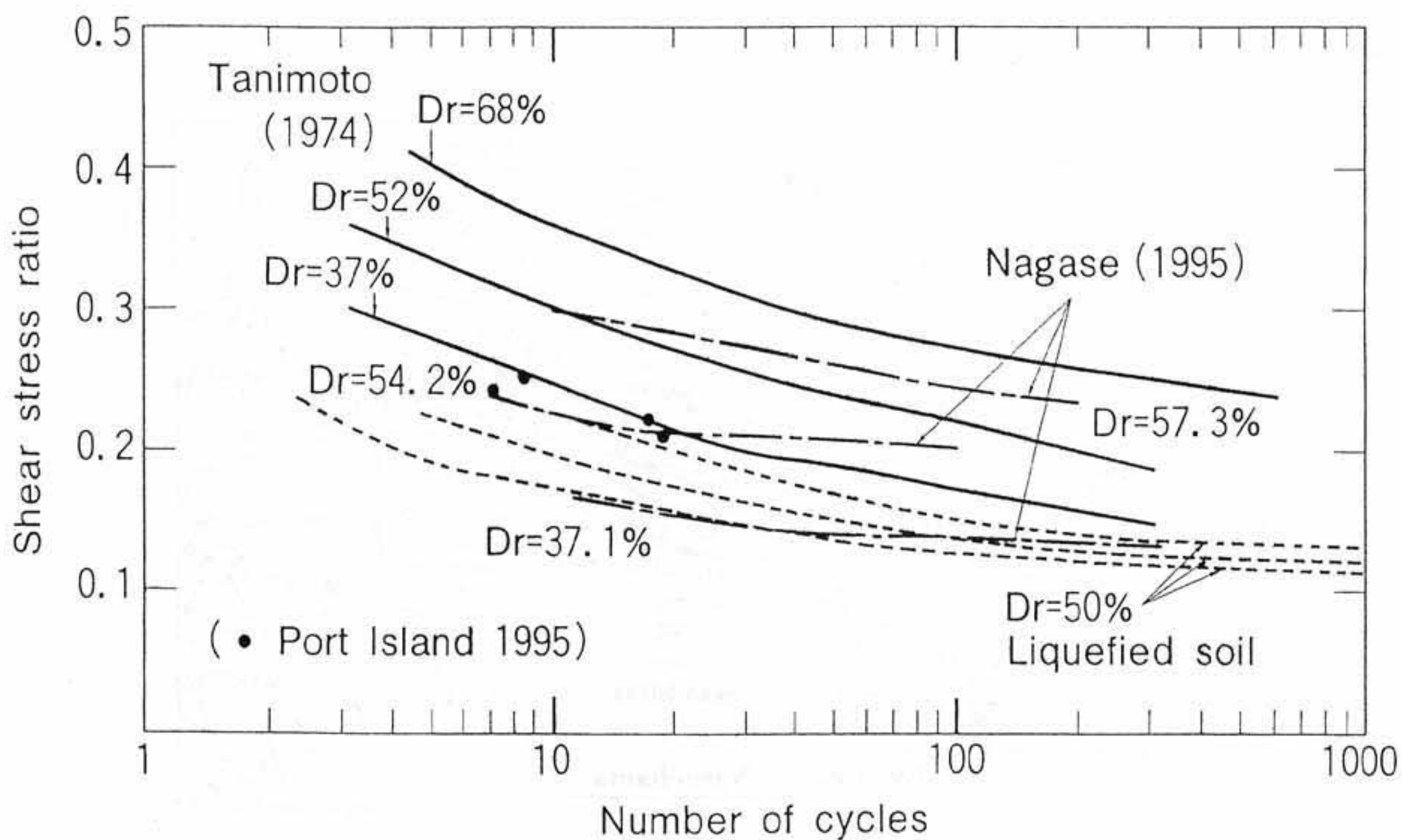


図4-4-3 液状化強度曲線

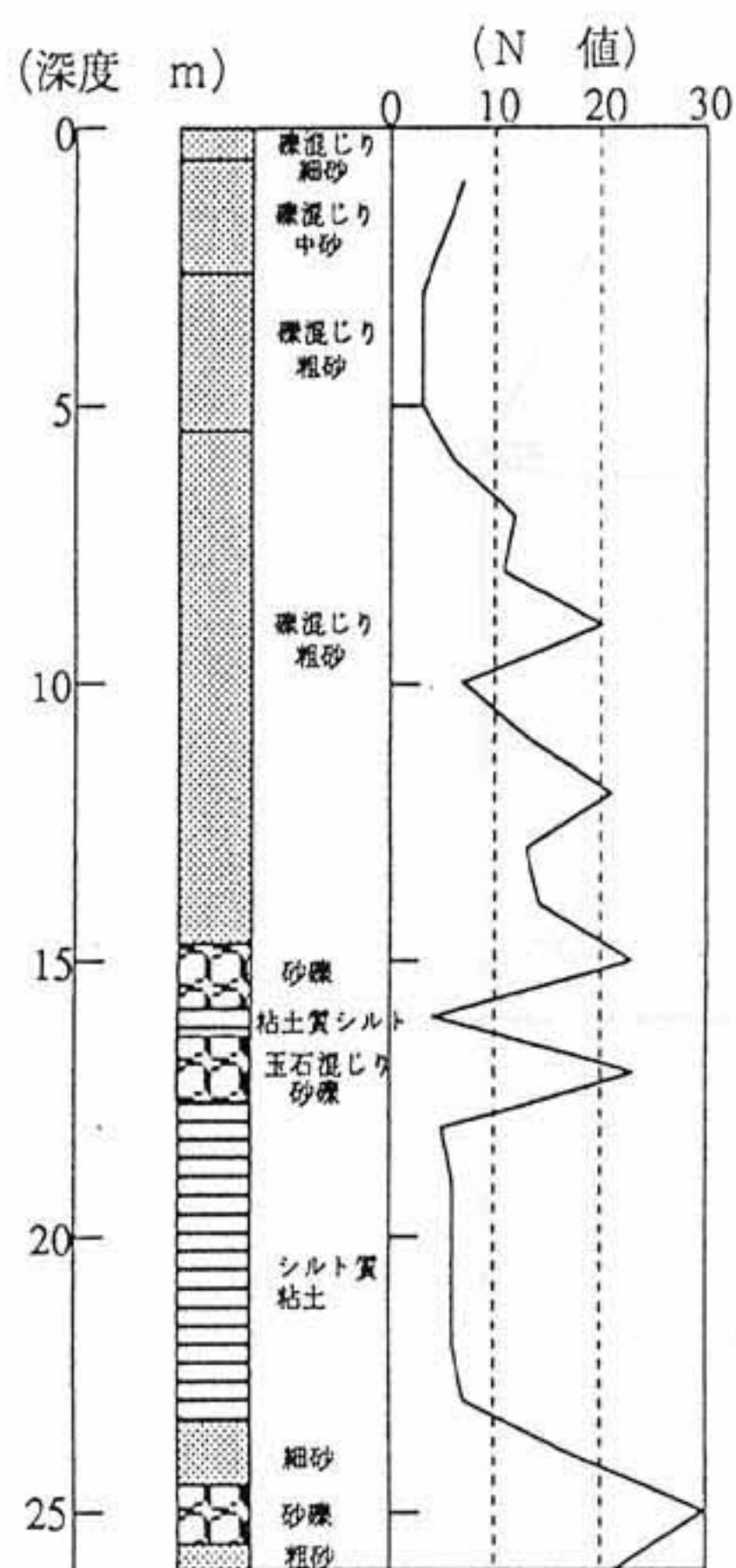


図4-4-4 地盤柱状図

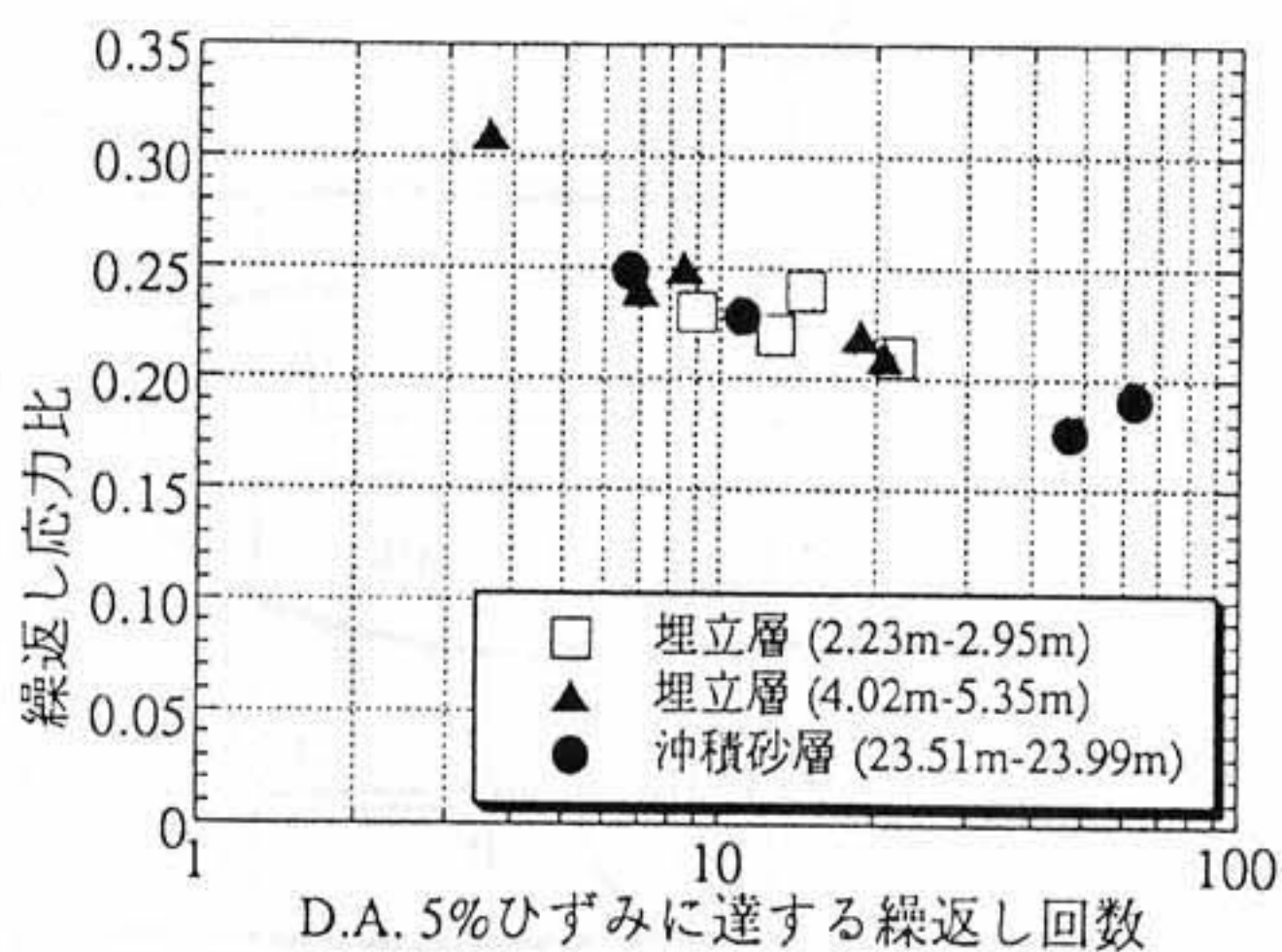


図4-4-5 液状化強度曲線

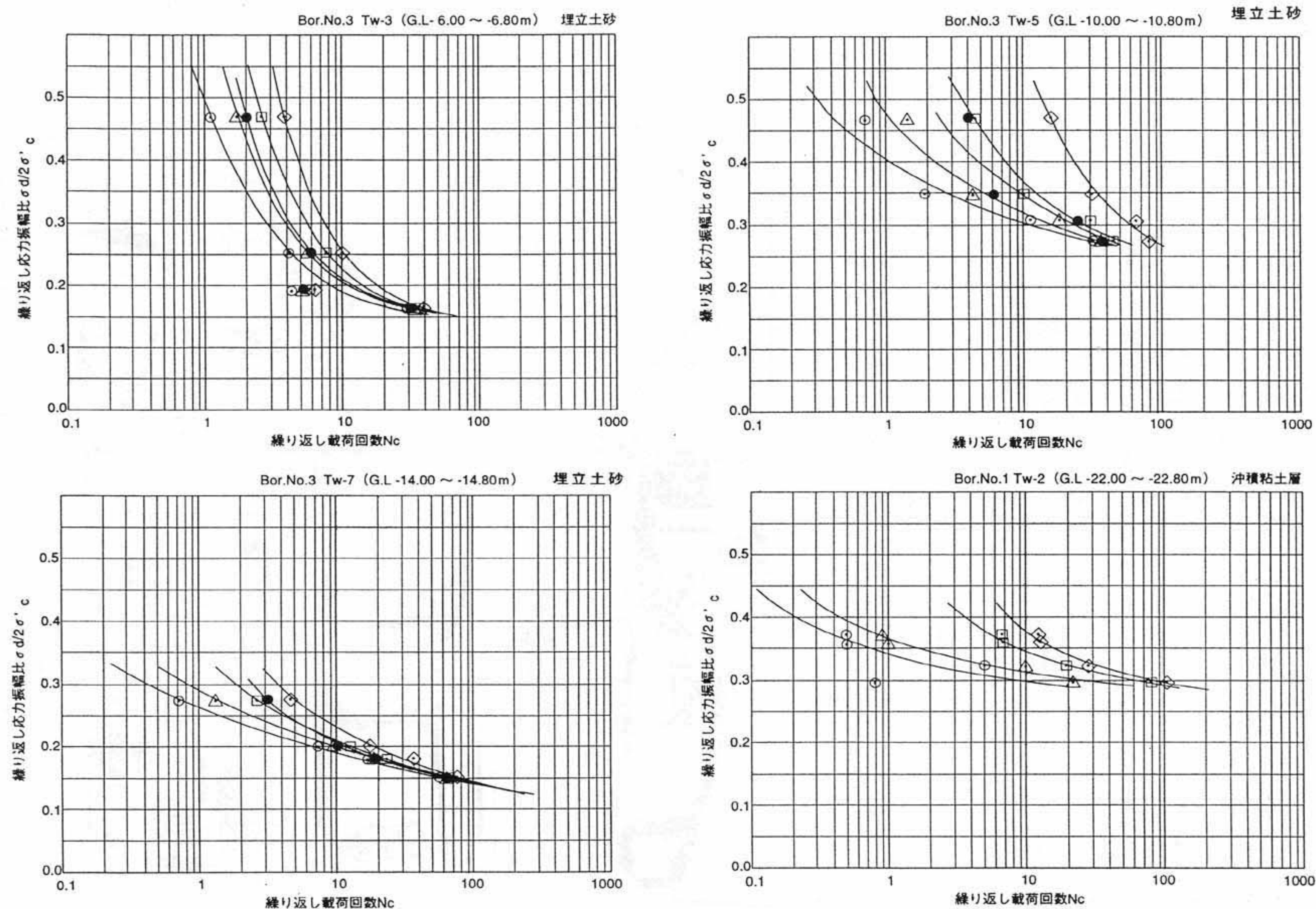


図4-4-6 ポートアイランド地震計設置地点での液状化強度曲線²⁹⁾

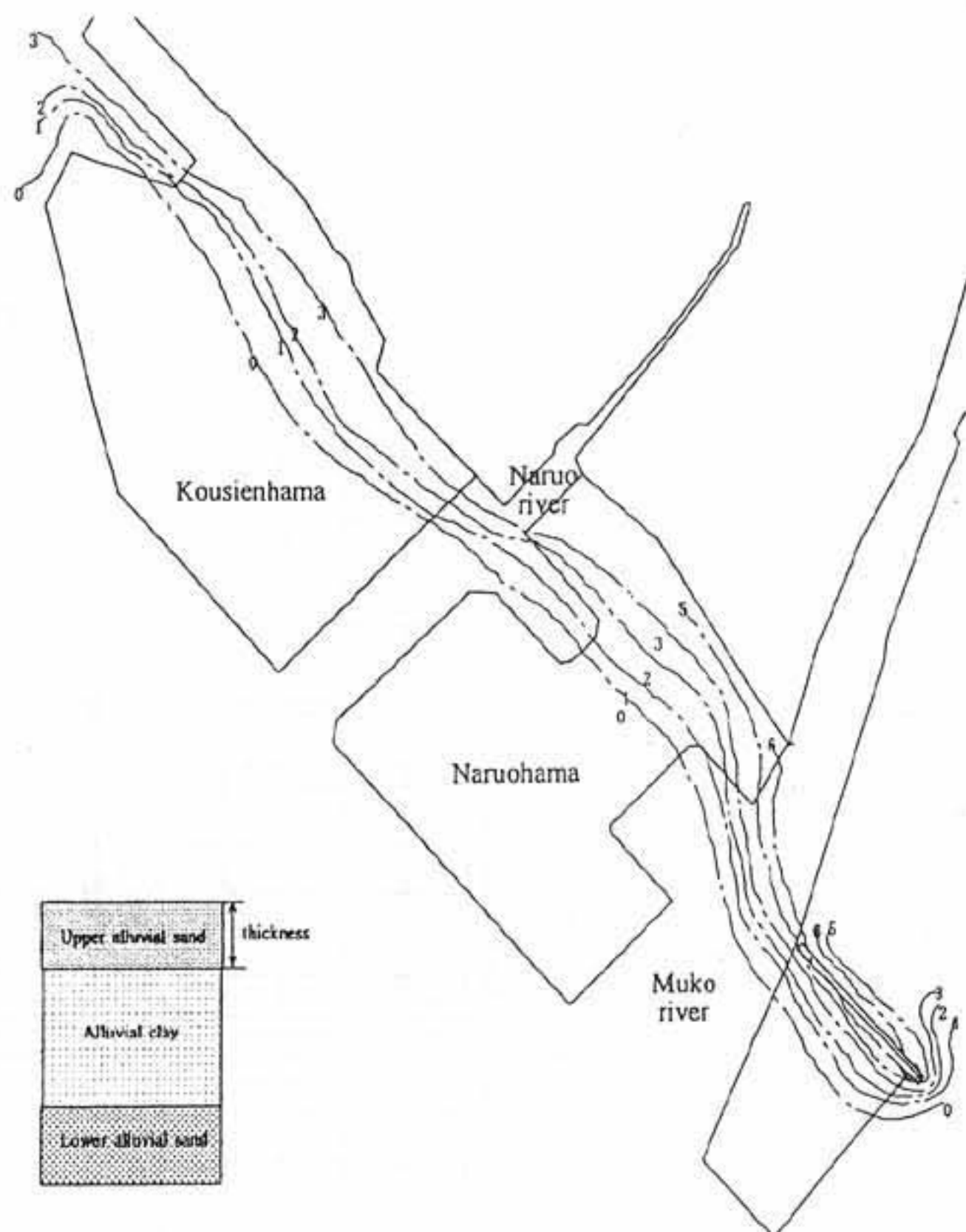


図4-2-12 埋め立て前の上部沖積層の厚さ

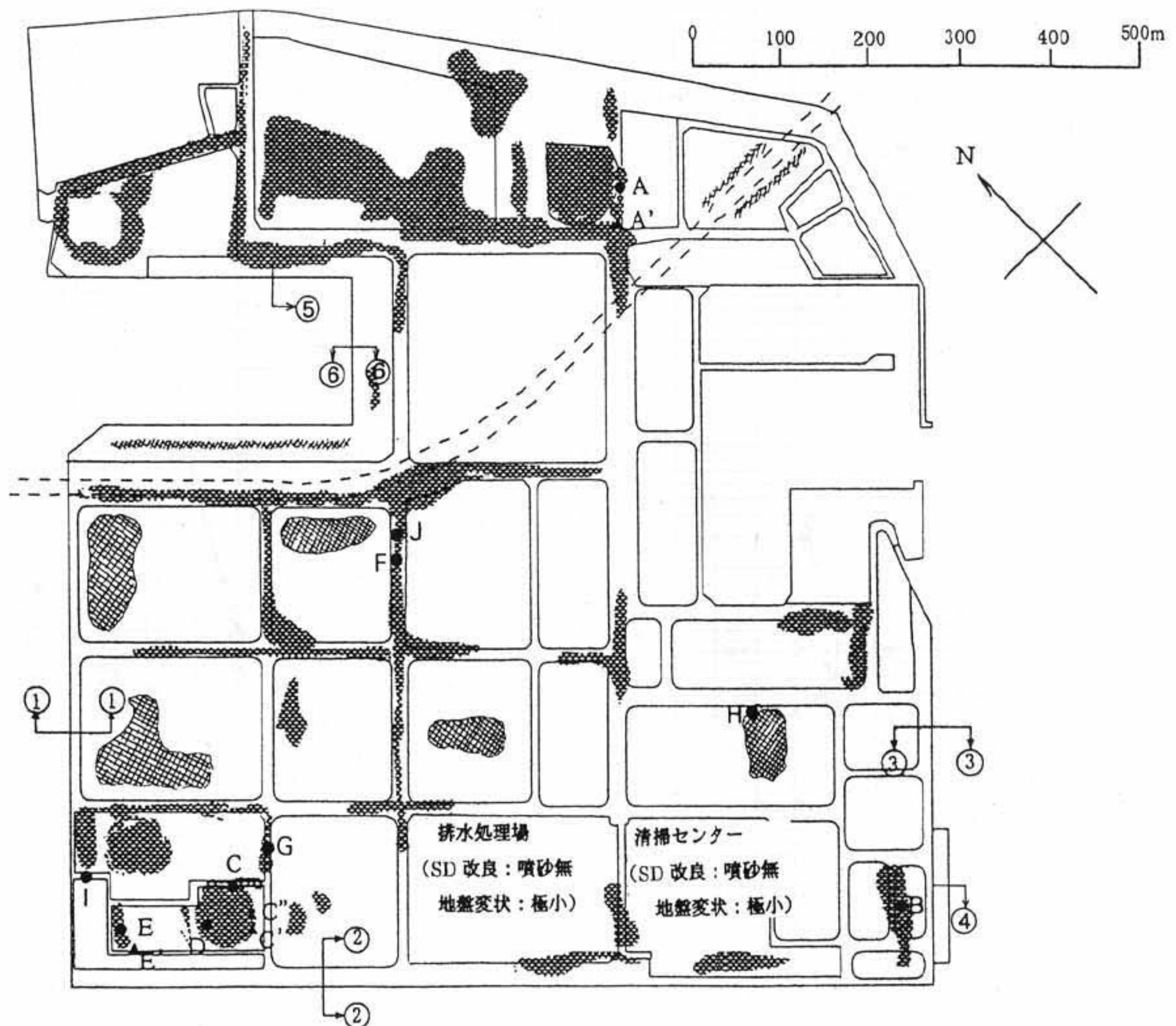


図4-2-13 鳴尾浜での液状化が確認された噴砂域

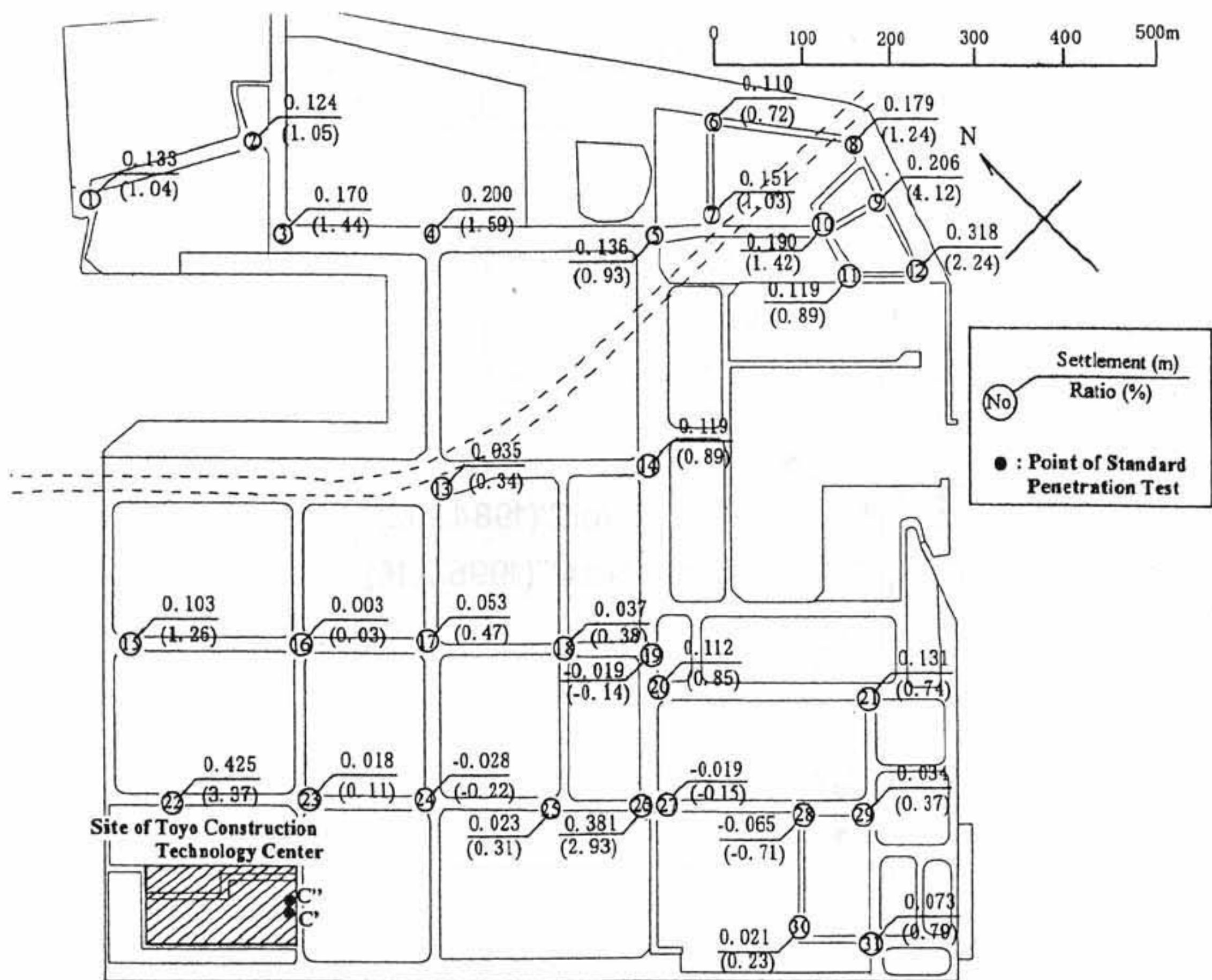


図4-2-14 地震による表面沈下量

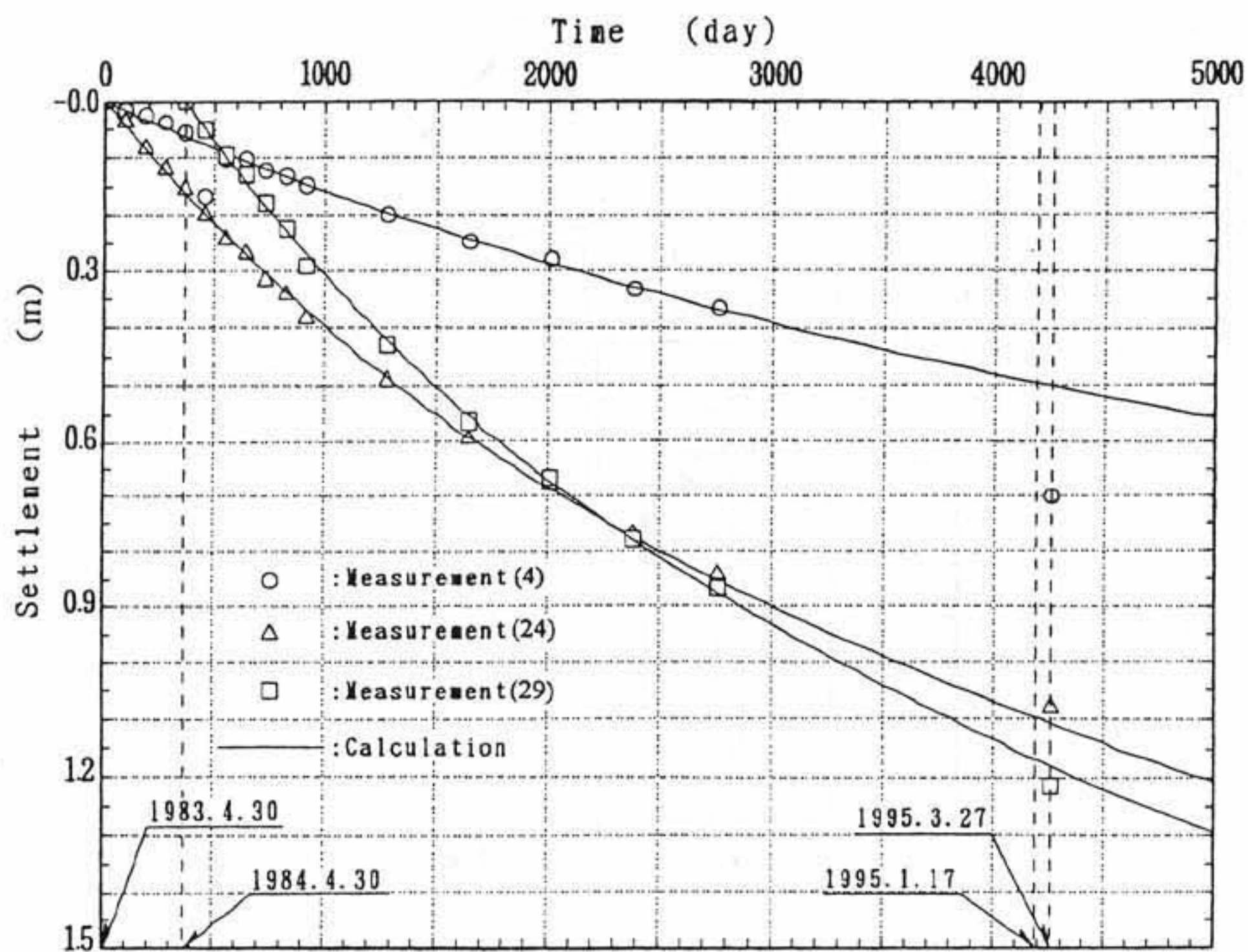


図4-2-15 圧密沈下量の推定

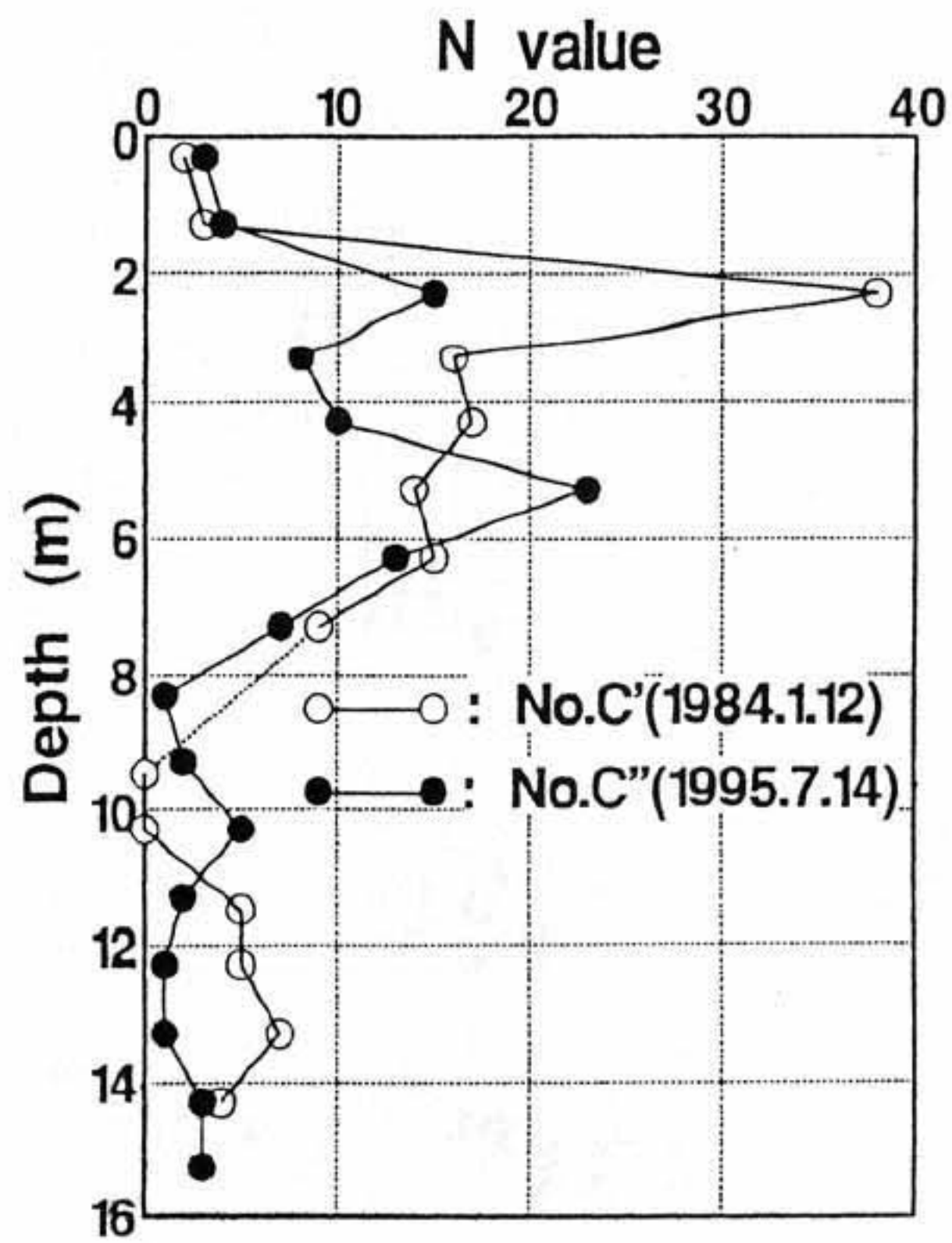


図4-2-16 地震前後での図4-2-14のC'、C''地点でのN値

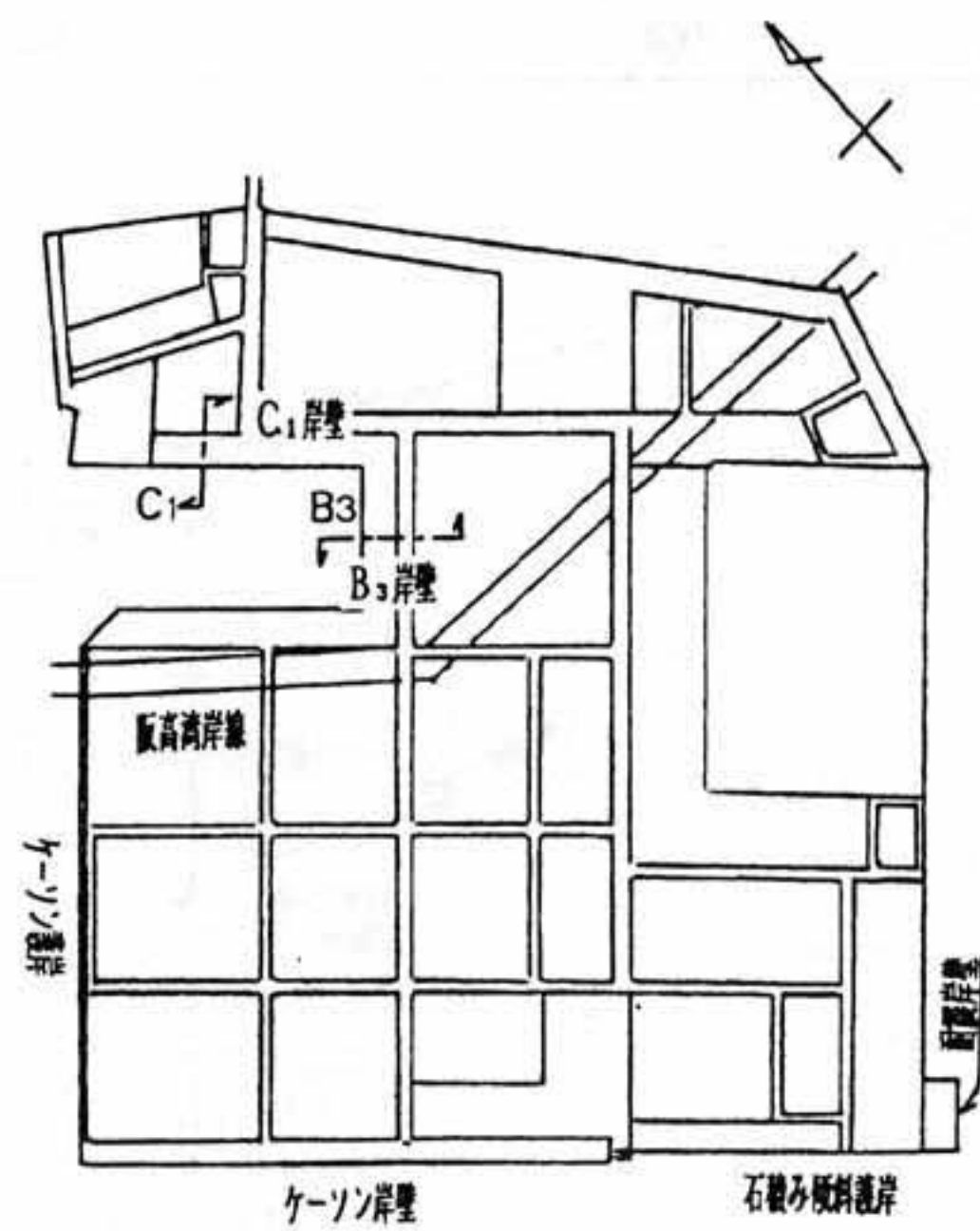


図4-2-17 鳴尾浜埋め立て地の平面図

表4-2-1 C1岸壁の水平変位量

C ₁ , B ₃ 岸壁の交点 からの距離(m)	岸壁前面からの各距離における水平変位量(cm)					岸壁前面の 水平変位量(cm)
	20.0m	23.4m	26.8m	30.2m	33.6m	
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	5.0	1.5	4.5	2.0	0.0	13.0
96	20.0	0.0	0.0	0.0	4.5	24.5
168	10.0	3.0	4.5	5.5	2.5	25.5
340	17.0	5.5	0.0	0.0	0.0	22.5

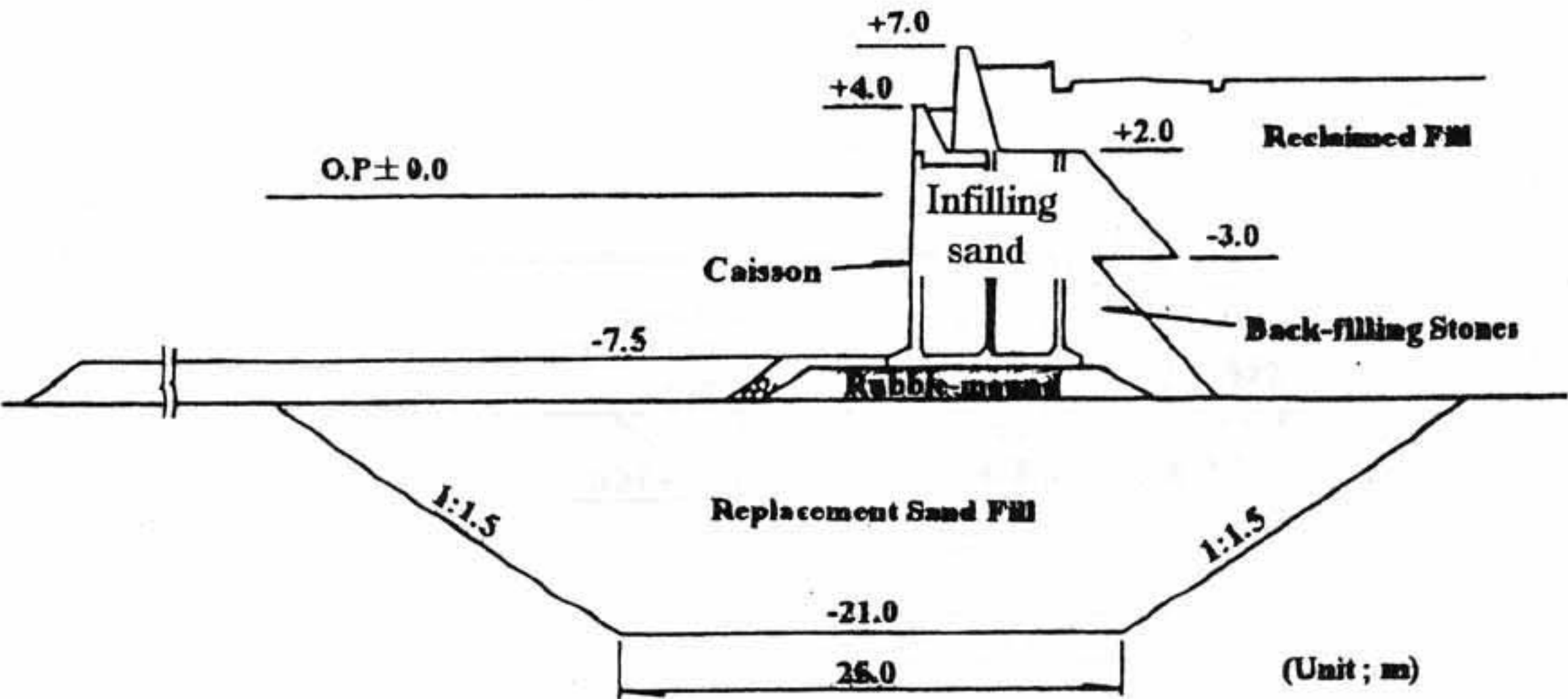


図4-2-18 埋め立て地西護岸の標準断面図

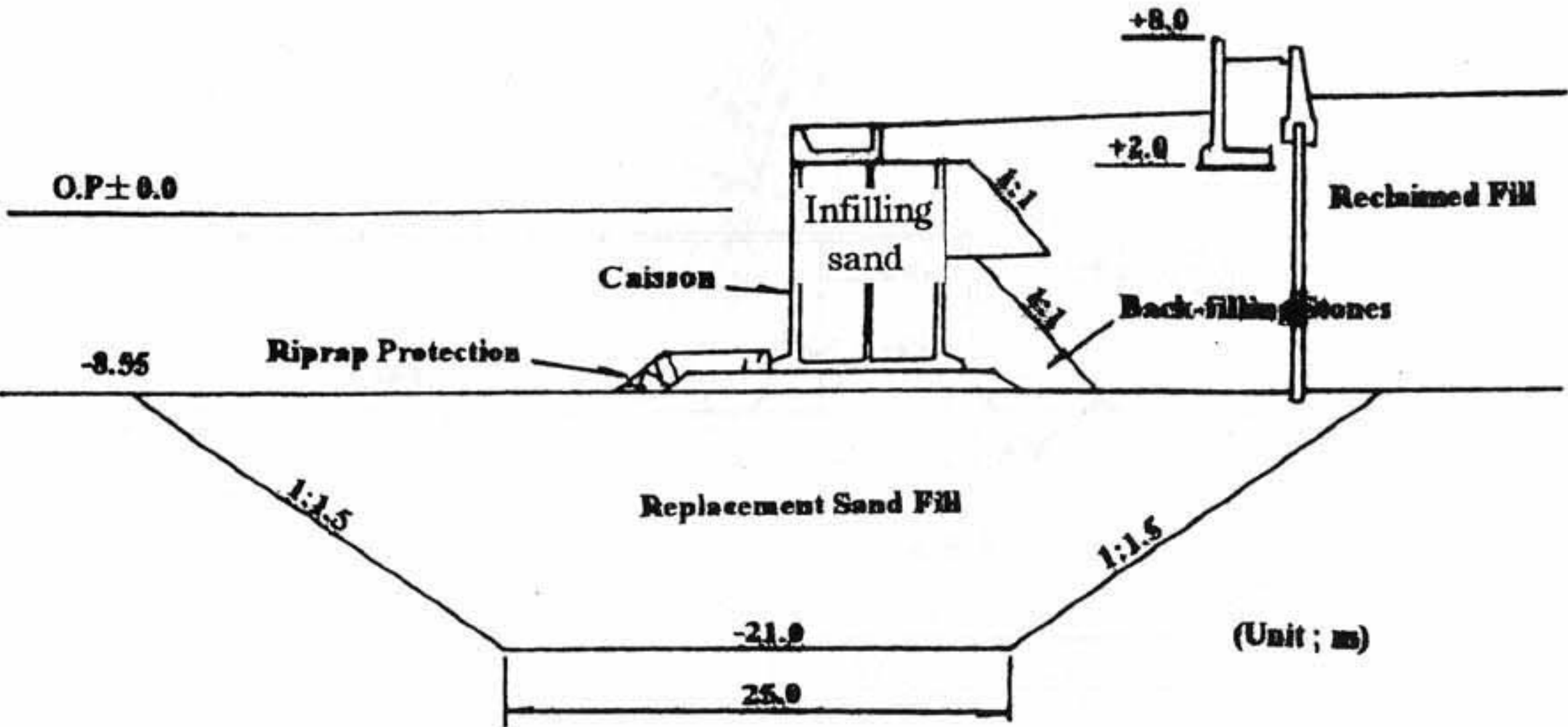


図4-2-19 埋め立て地南護岸の標準断面図

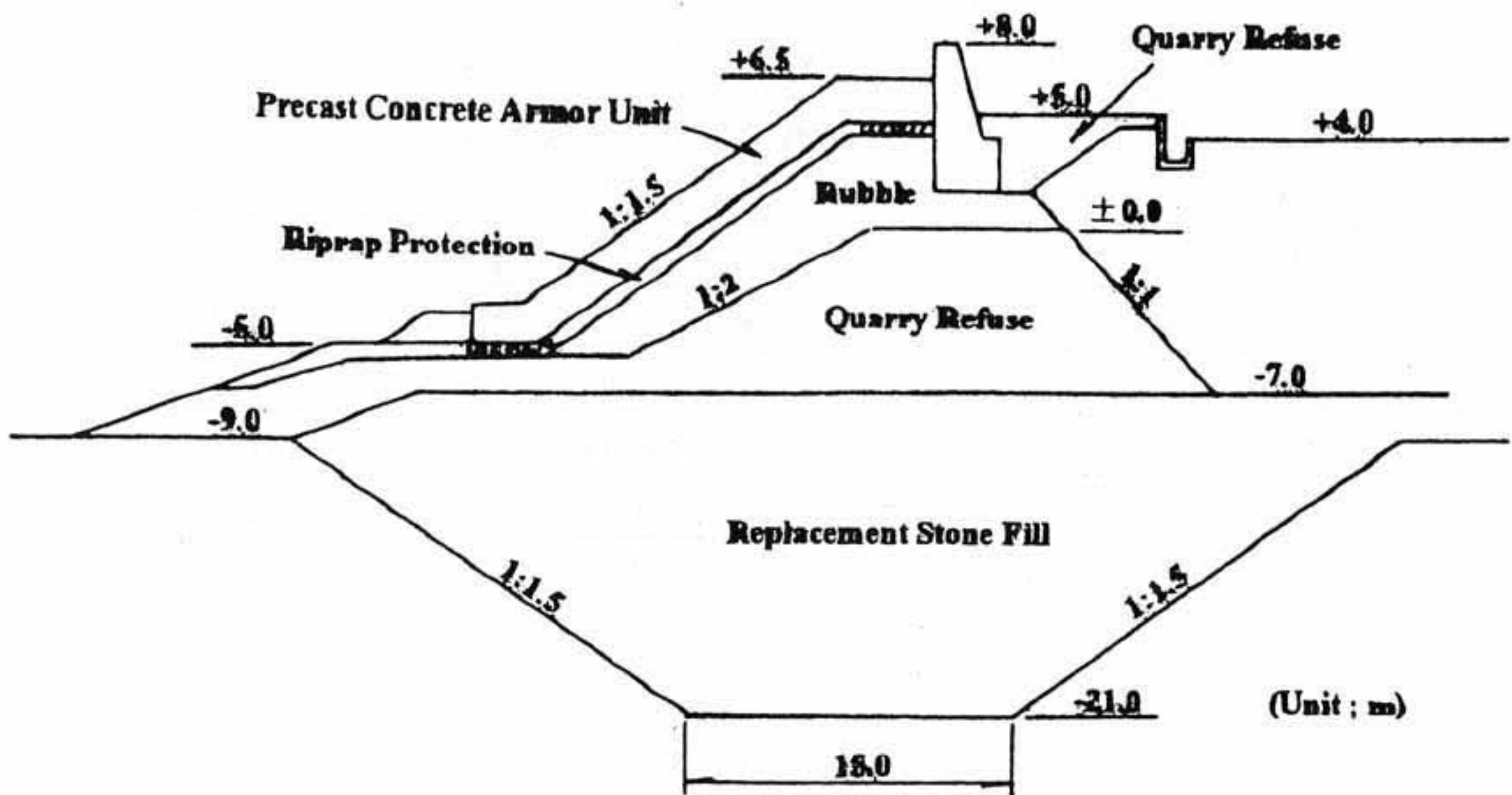


図4-2-20 埋め立て地東護岸の標準断面図

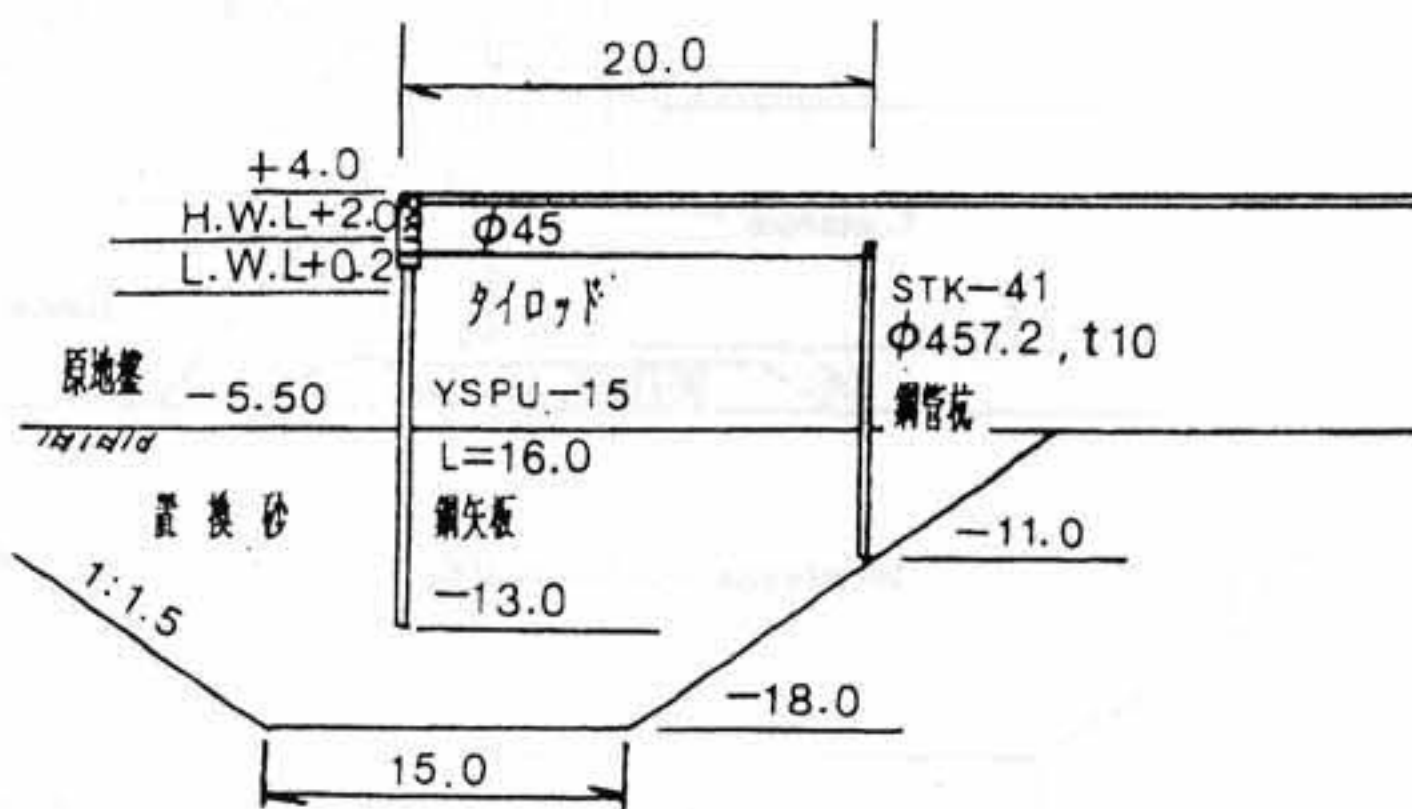


図4-2-21 C1岸壁の標準設計断面図

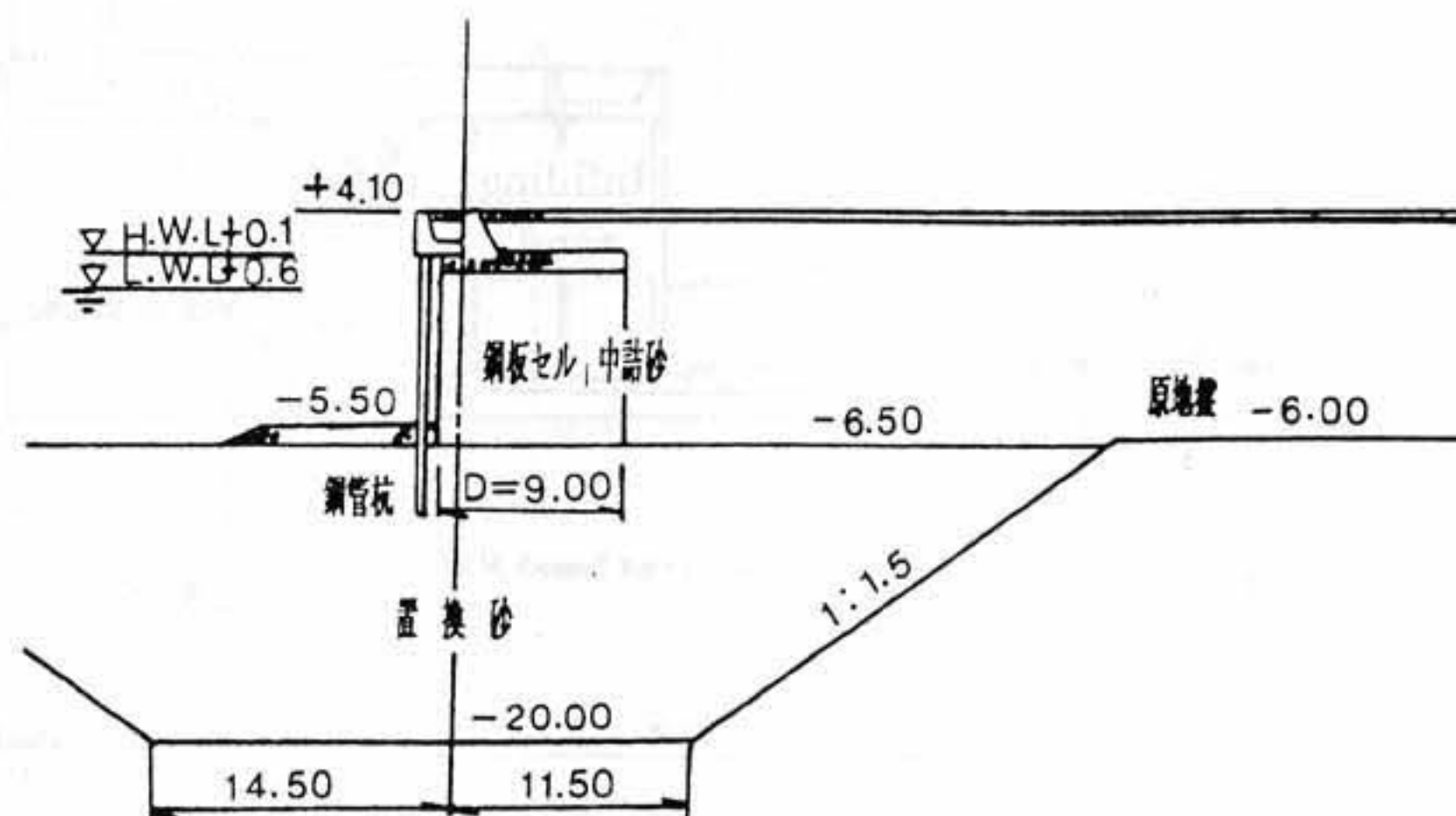


図4-2-22 B3岸壁の標準設計断面図

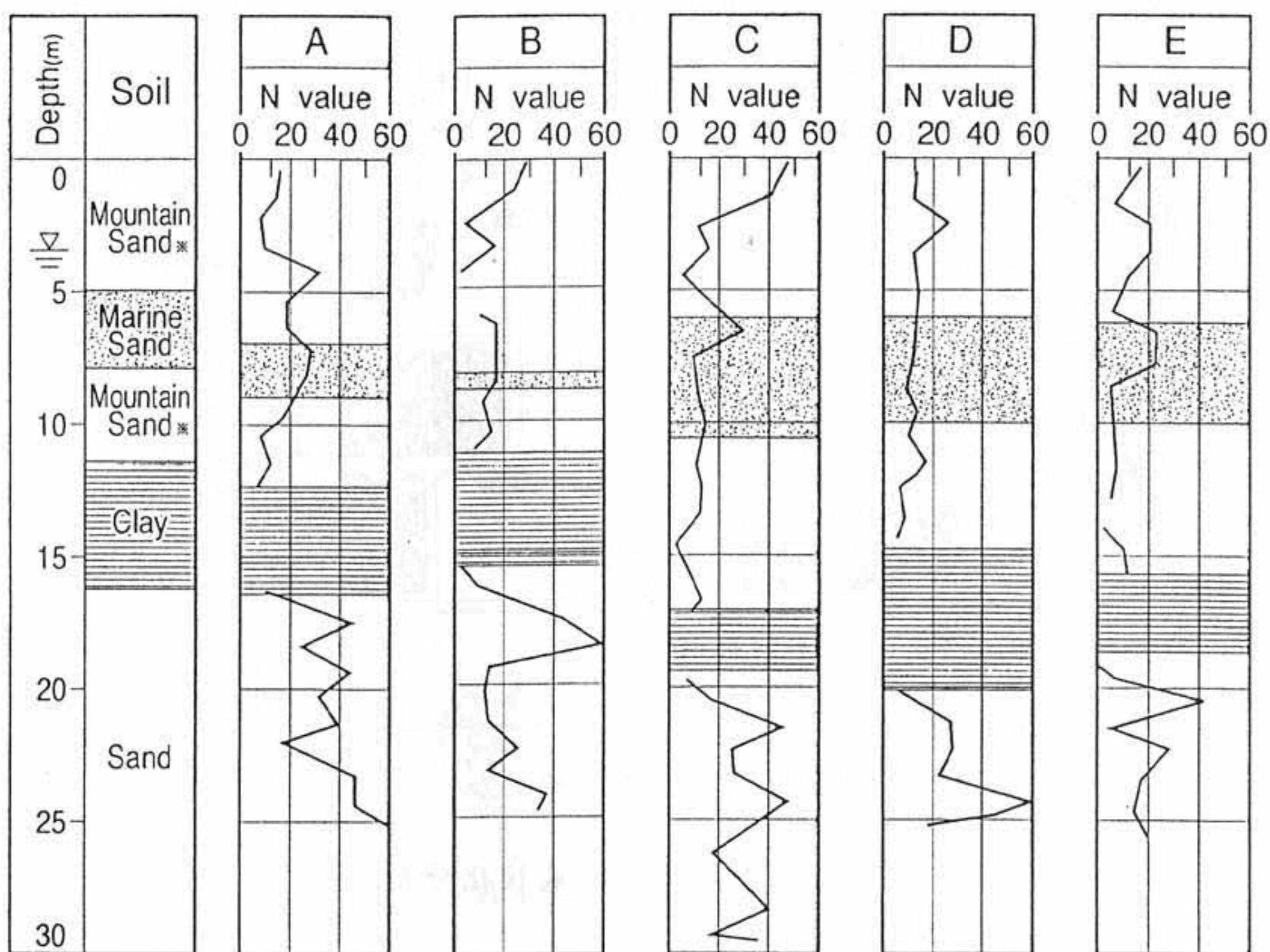


図4-2-23 芦屋浜の地盤柱状図

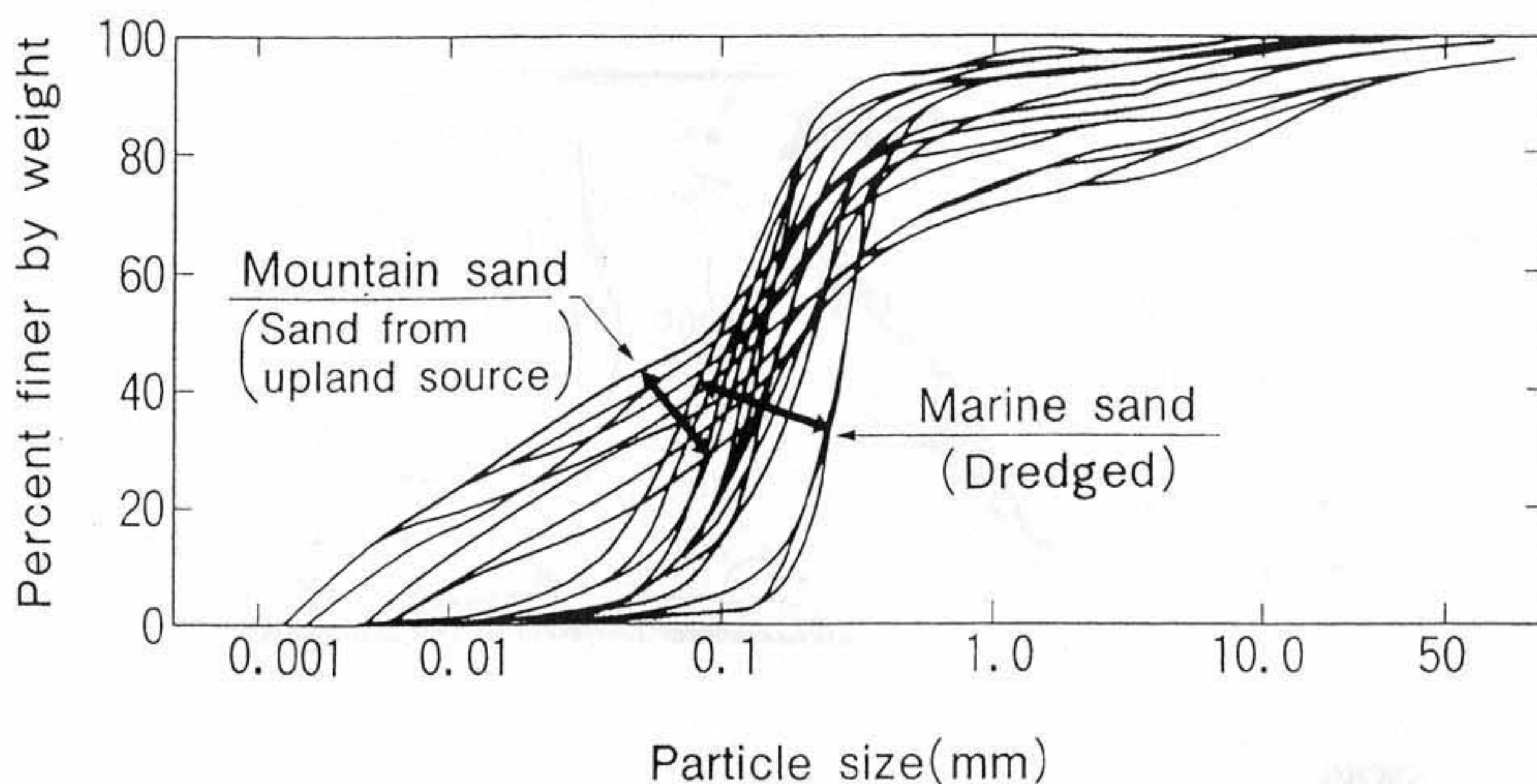


図4-2-24 粒径加積曲線

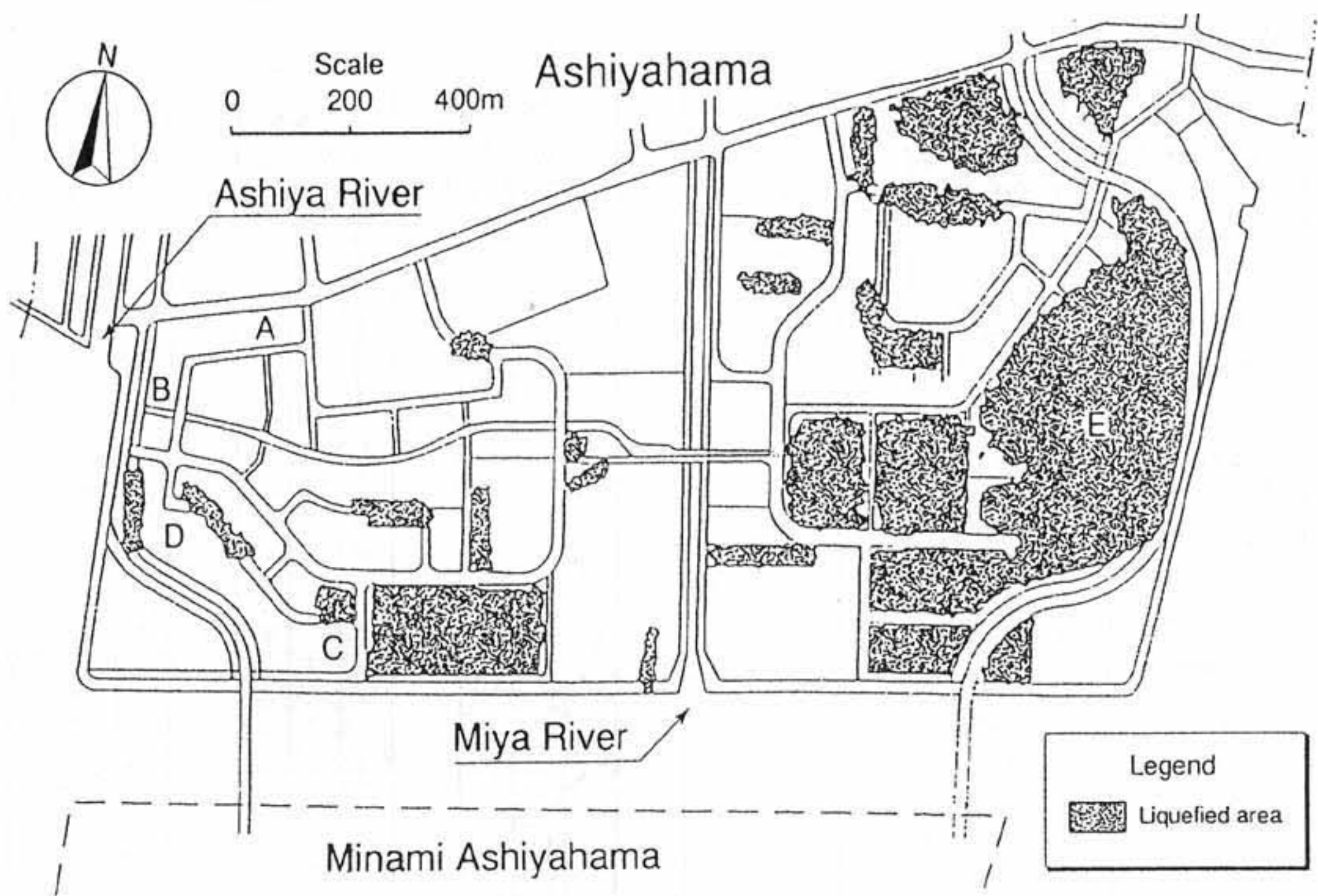


図4-2-25 芦屋浜での液状化分布図

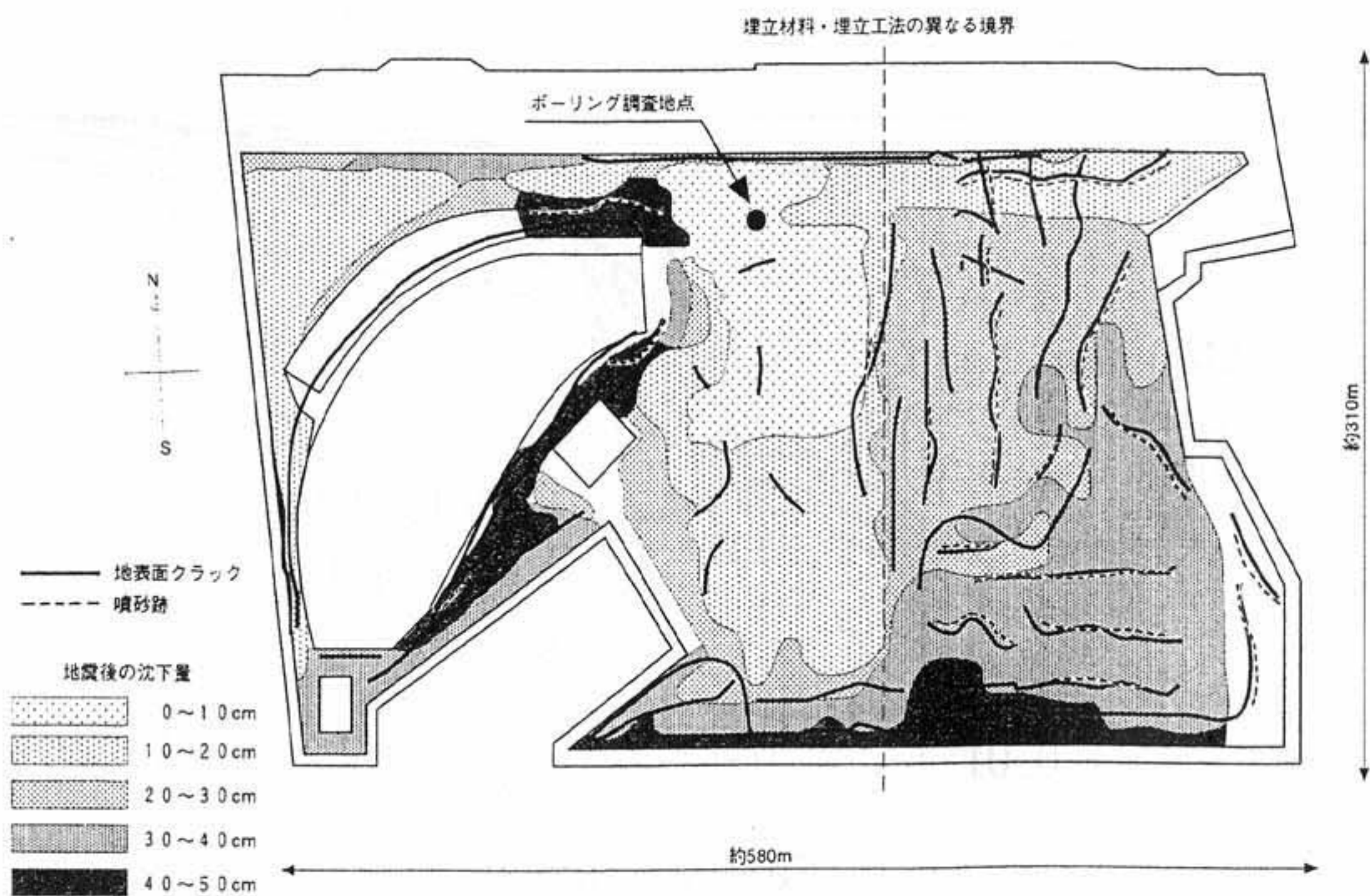


図4-2-26 神戸市垂水区漁港西の埋め立て地 (グラビア参照)

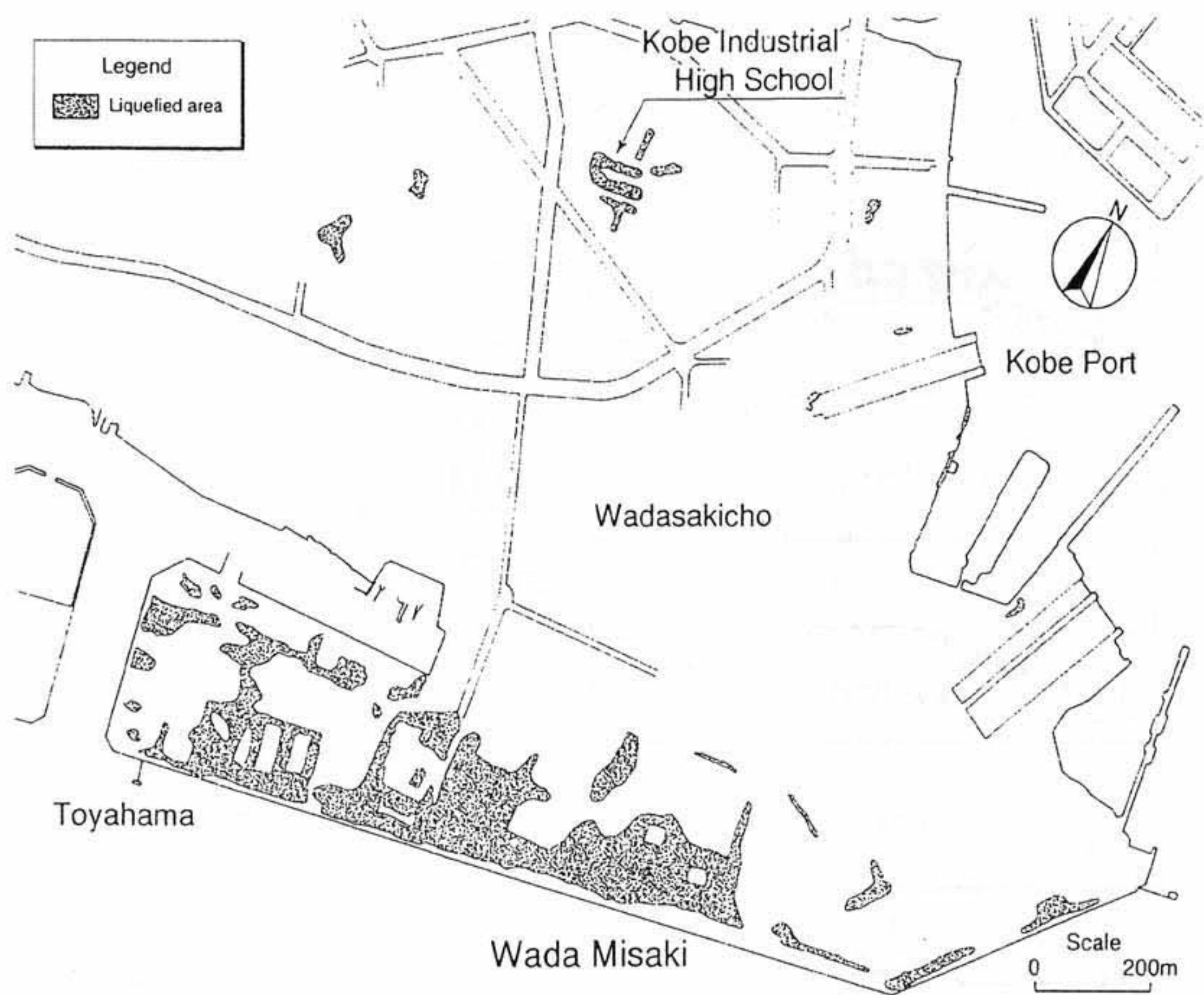


図4-2-27 和田岬地域での液状化分布図

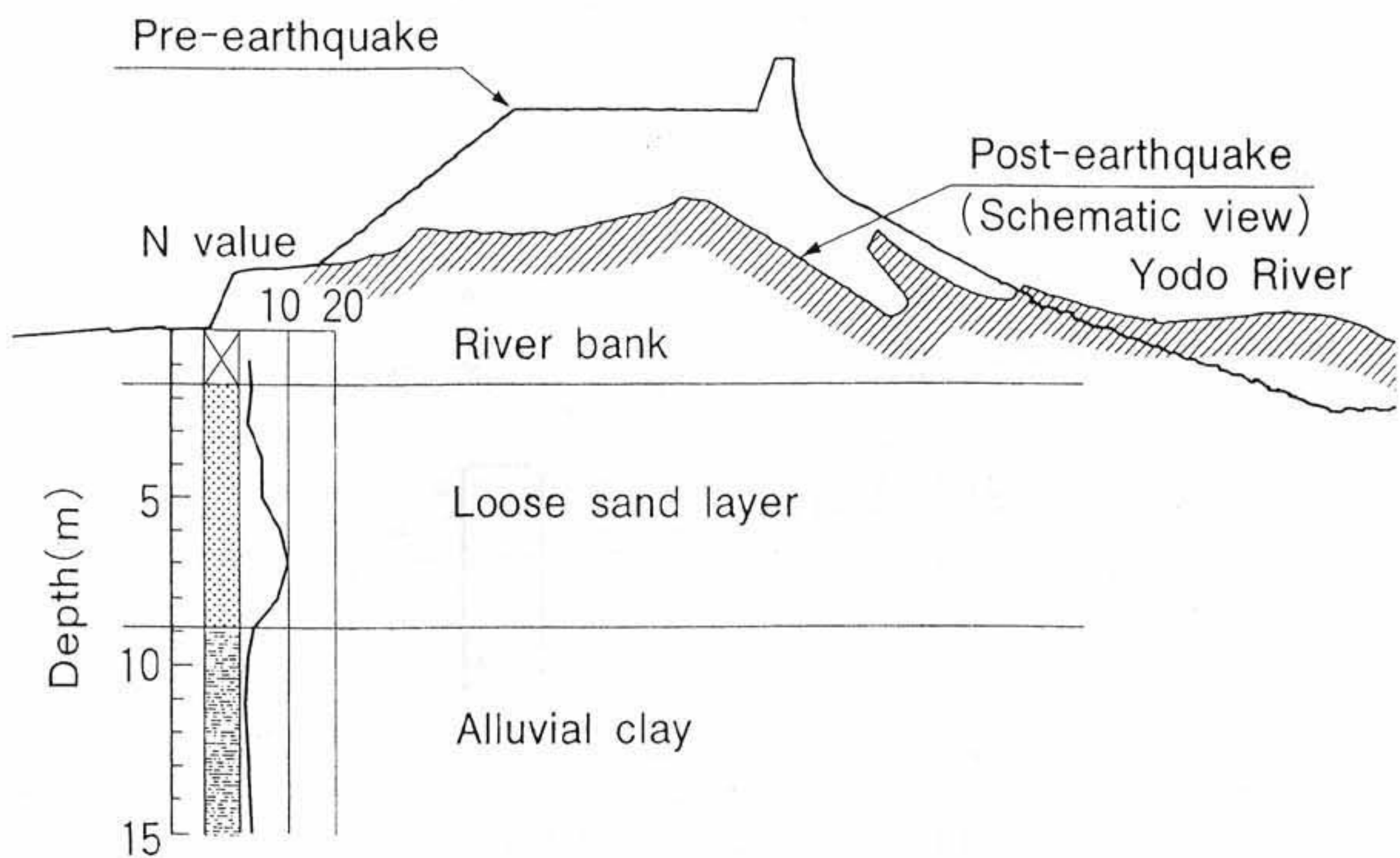
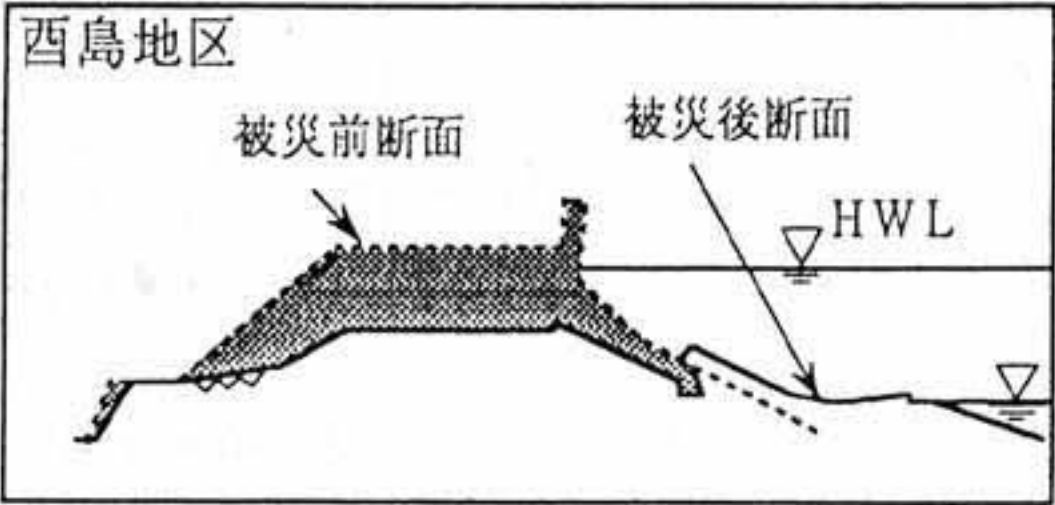
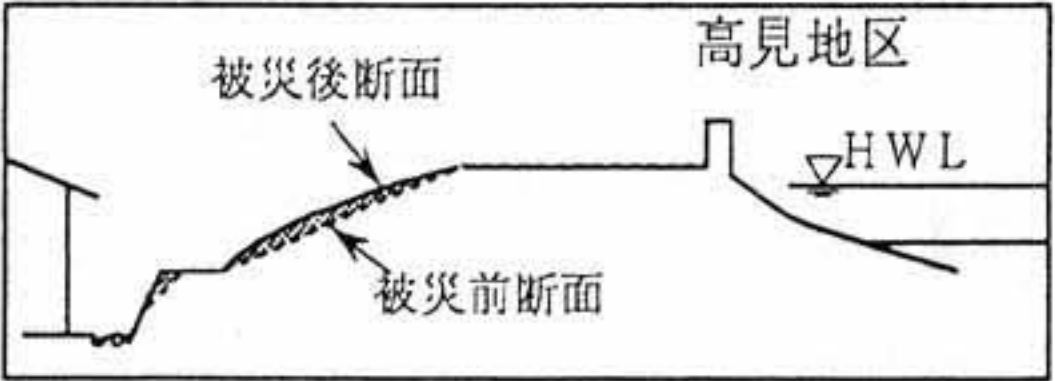


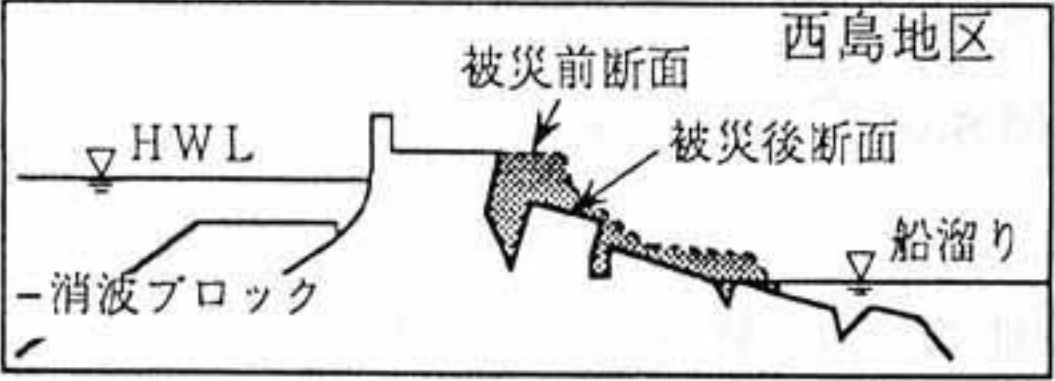
図4-2-28 西島地区での被災断面



(a)



(b)



(c)

図4-2-29 淀川堤防の被災断面

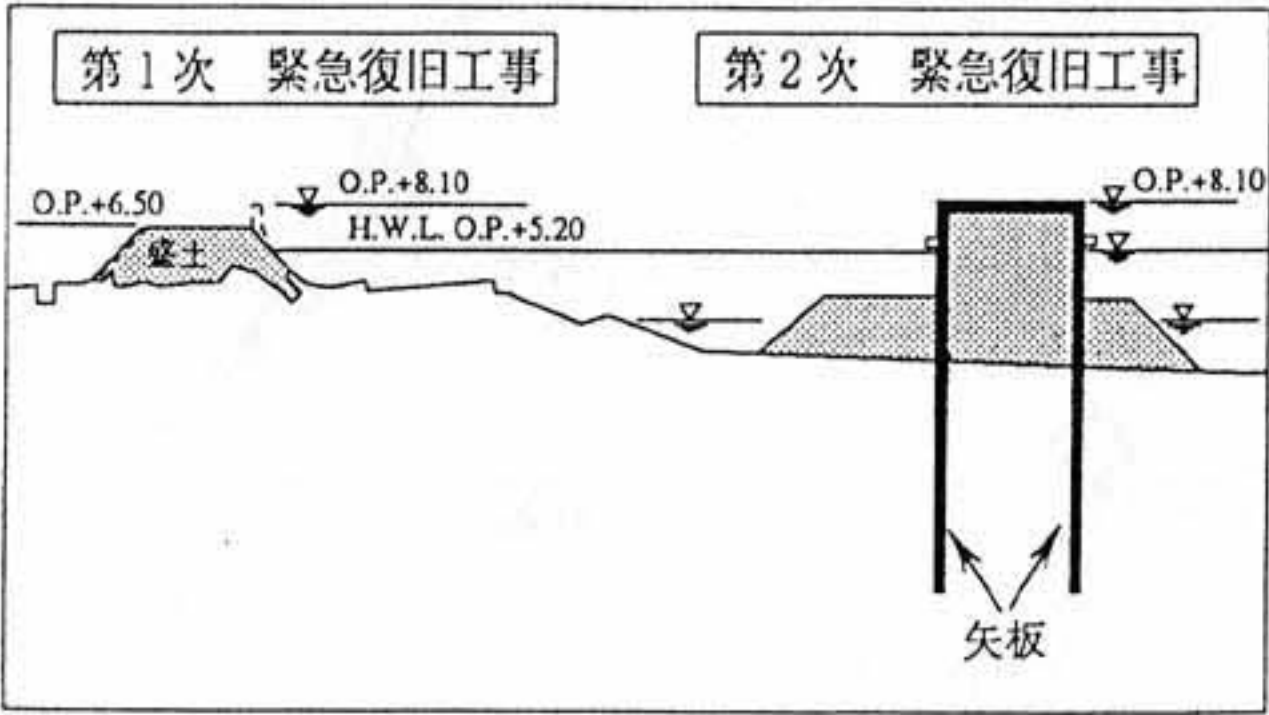


図4-2-30 緊急復旧工事断面

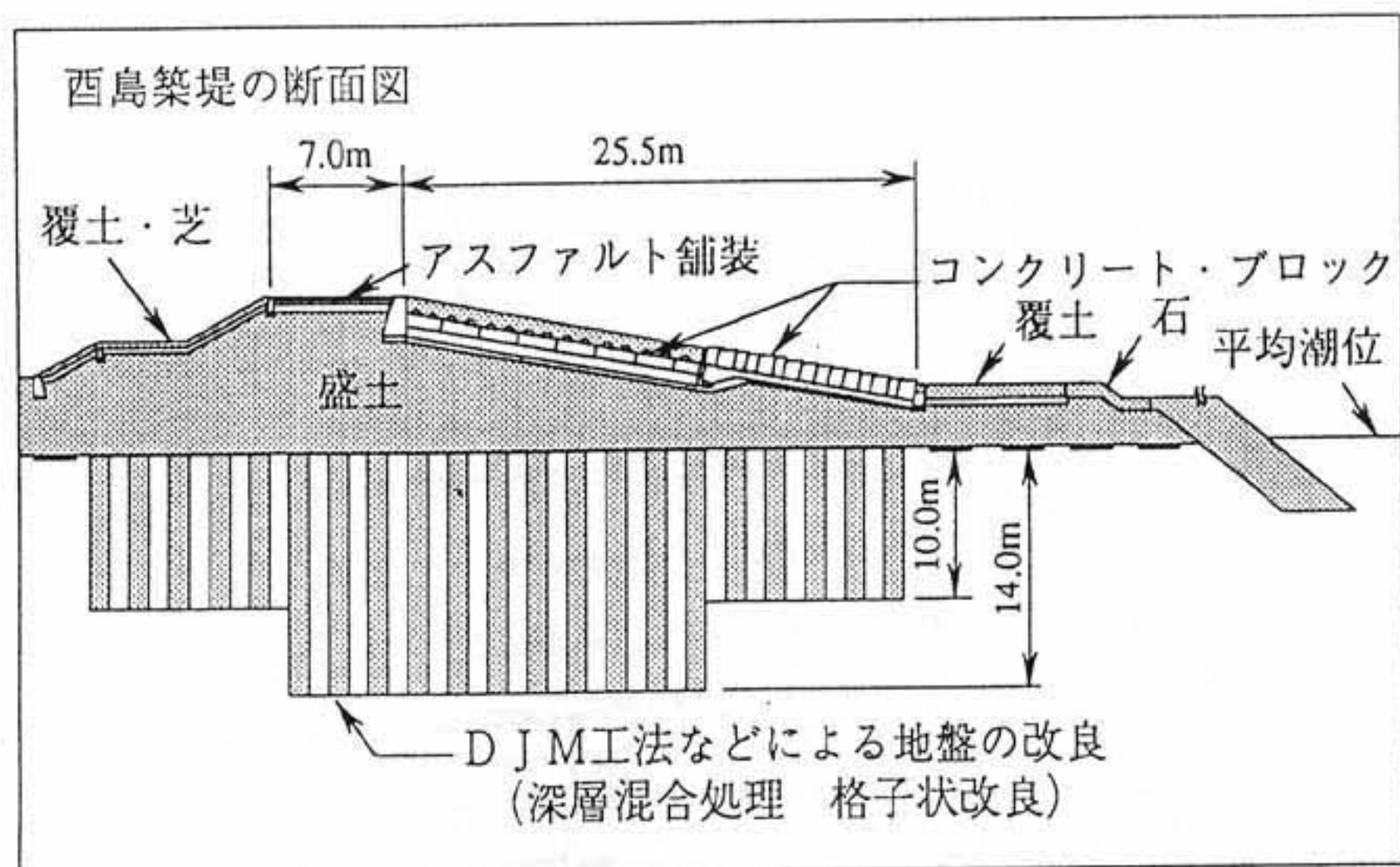


図4-2-31 本格復旧断面

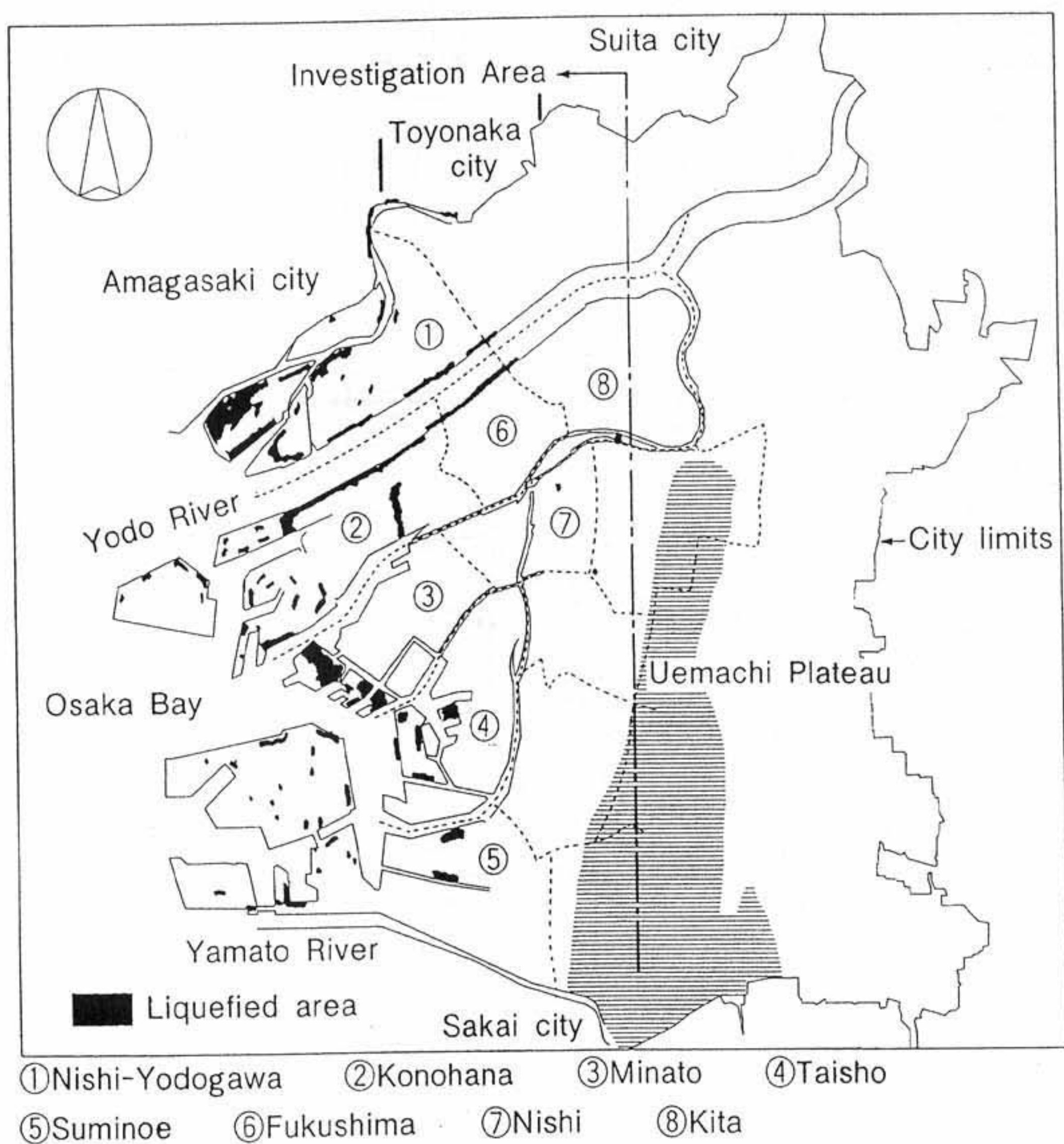


図4-2-32 大阪市域の液状化分布図



図4-3-1 地震による地盤沈下量の分布（ポートアイランド第1期）²⁹⁾

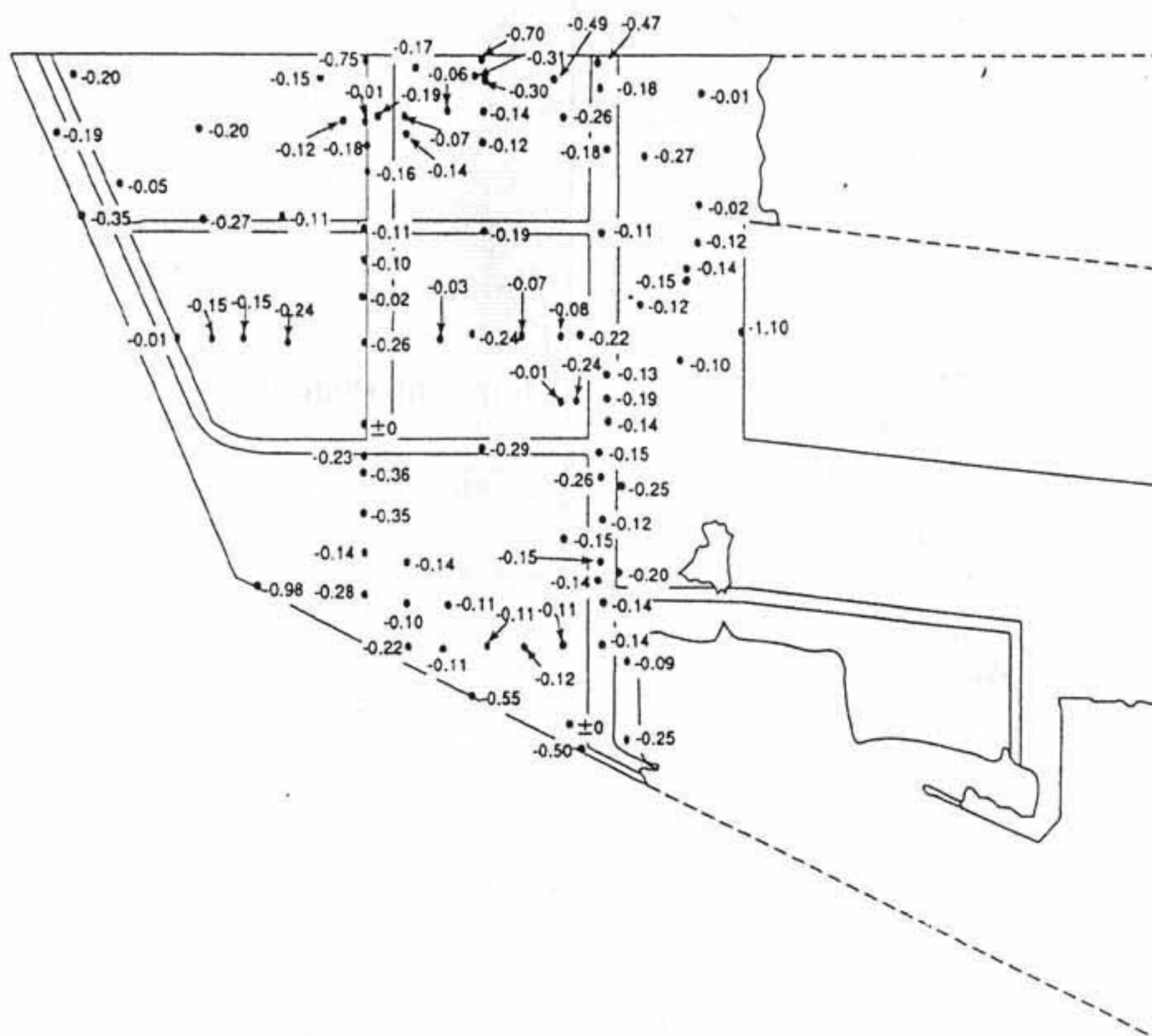


図4-3-2 地震による地盤沈下量の分布（ポートアイランド第2期）²⁹⁾

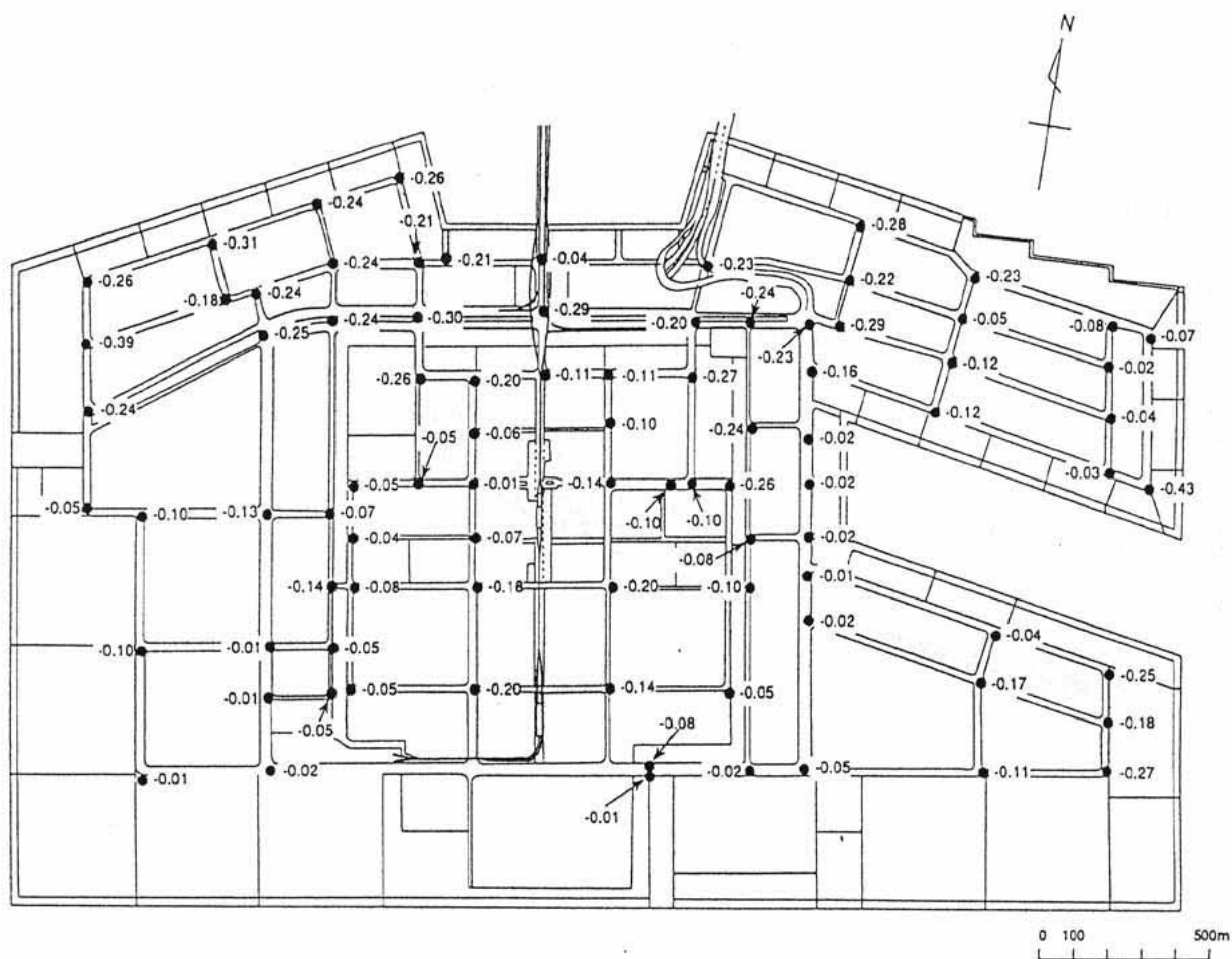


図4-3-3 地震による地盤沈下量の分布（六甲アイランド）²⁹⁾

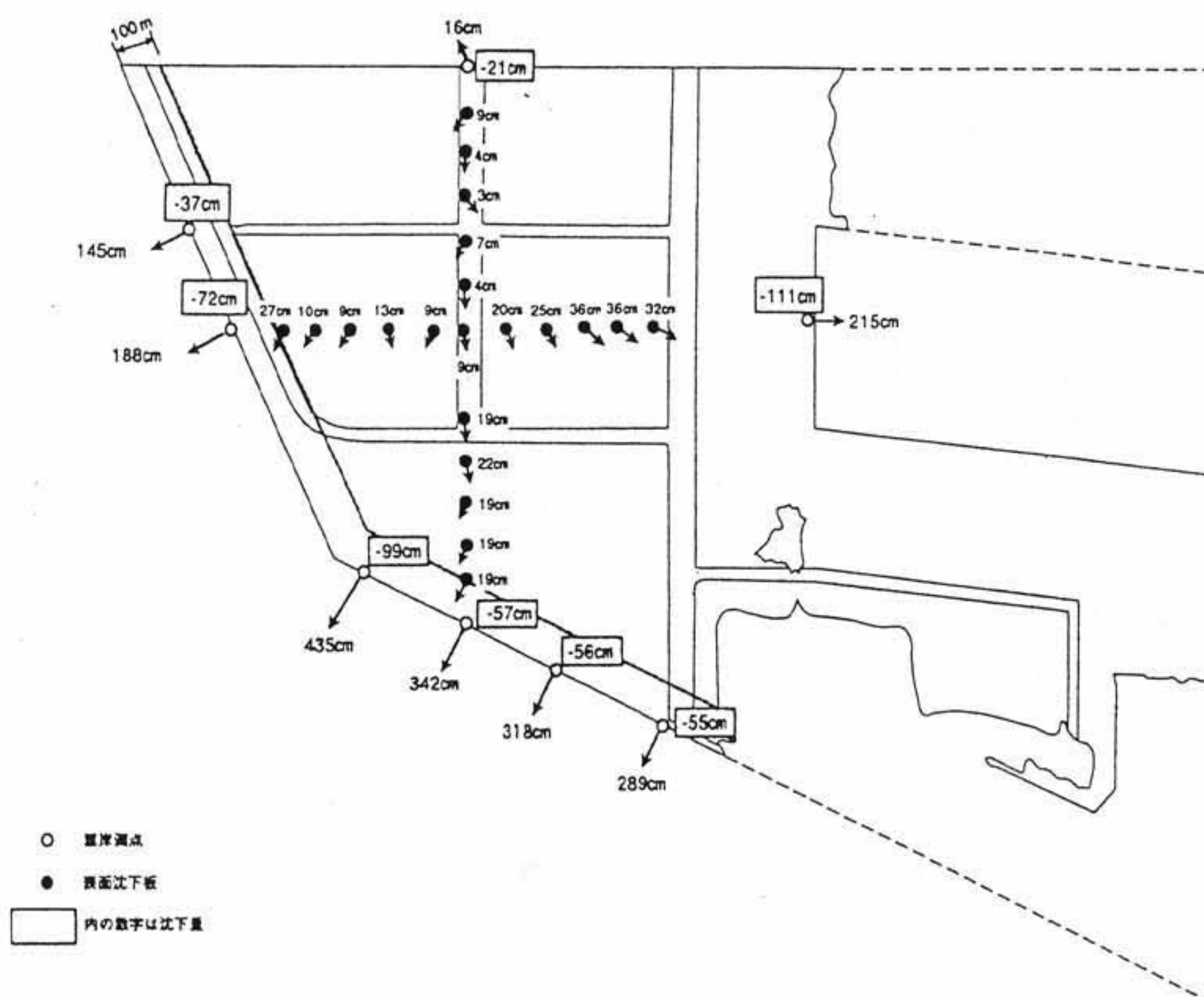


図4-3-4 護岸および地盤の水平移動量分布（ポートアイランド第2期）²⁹⁾

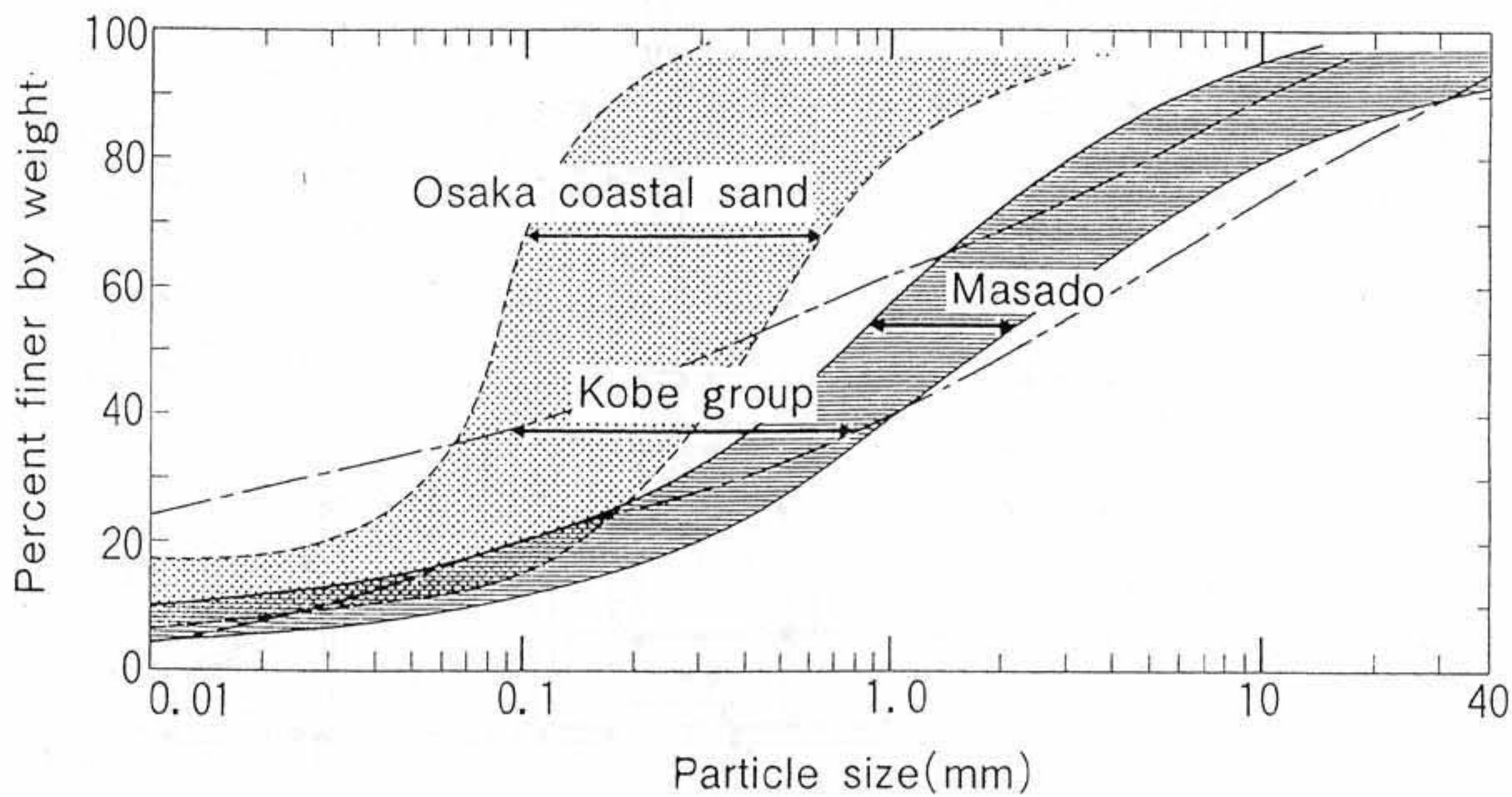


図4-4-1 粒径加積曲線

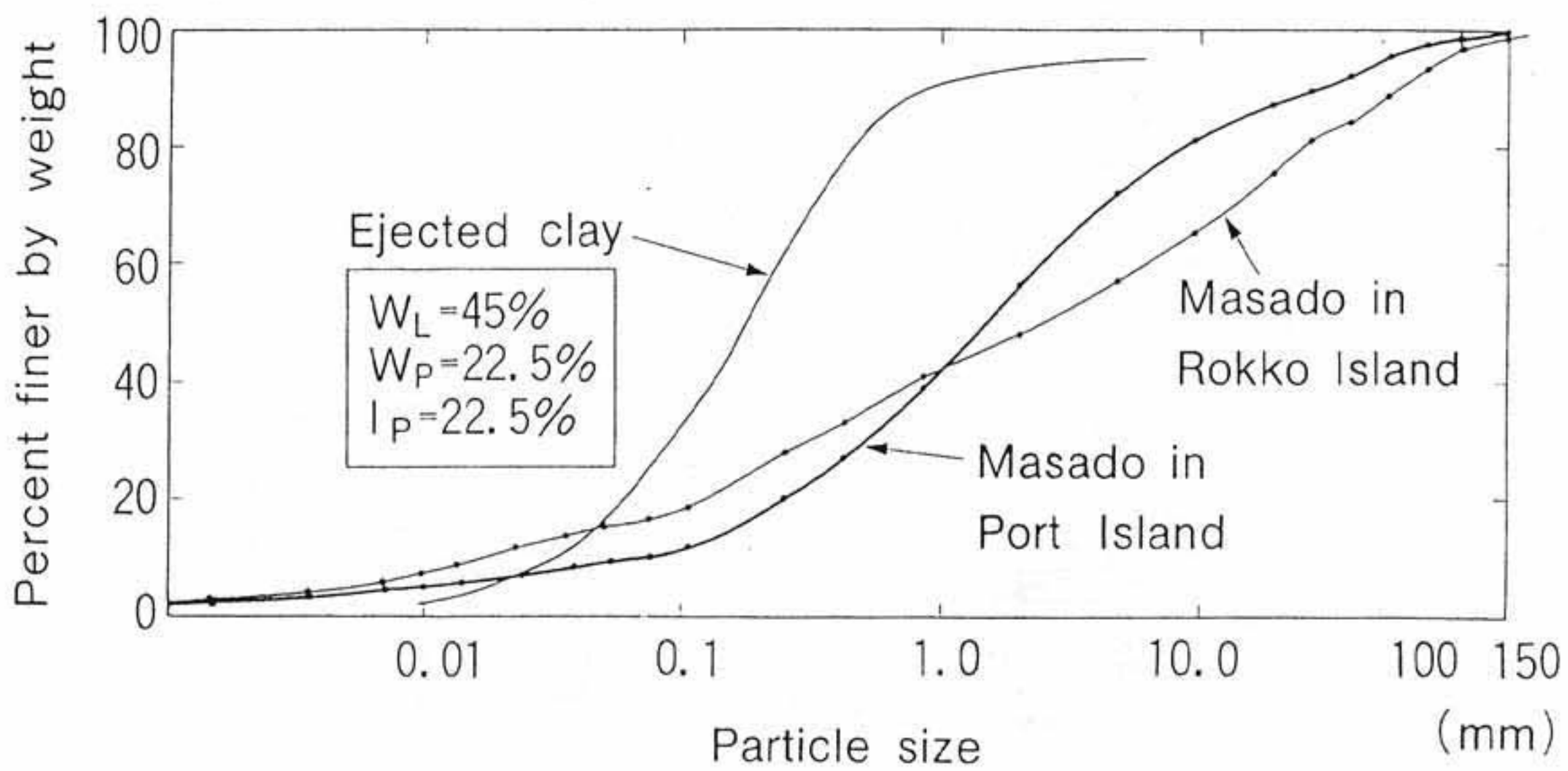


図4-4-2 粒径加積曲線

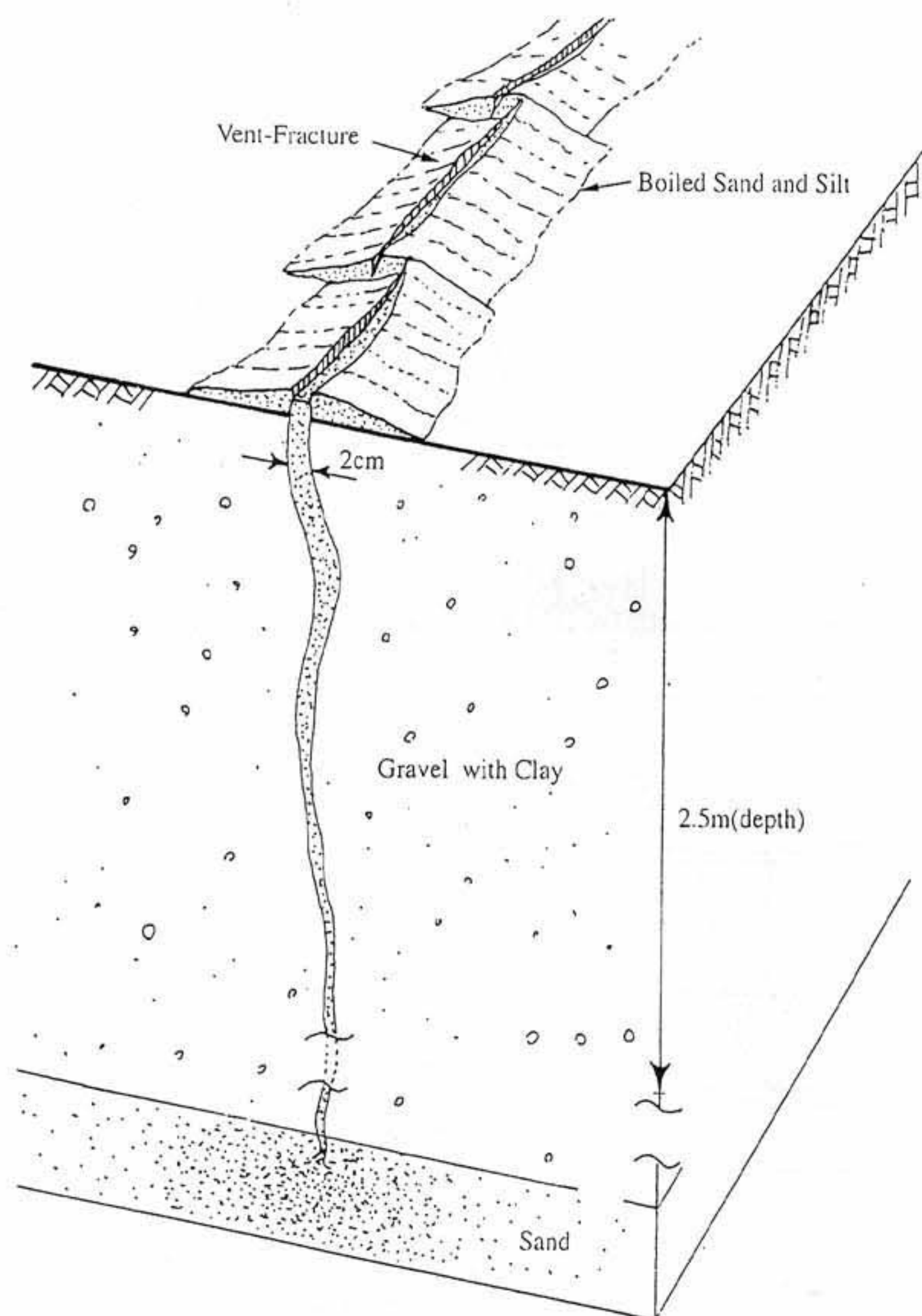


図4-4-7 ポートアイランド南公園での地割れのスケッチ

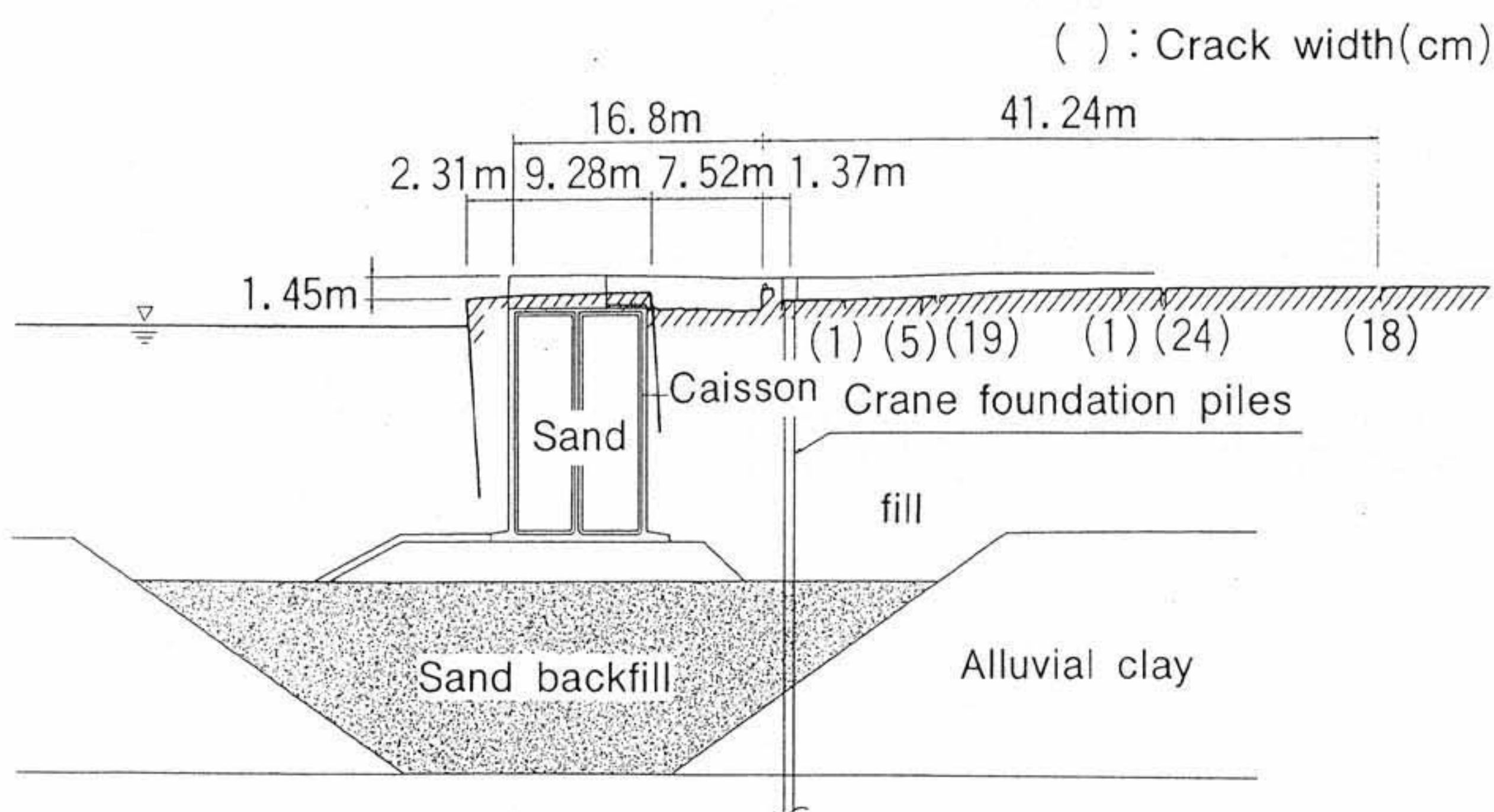


図4-4-8 ポートアイランド西岸壁での地盤変形

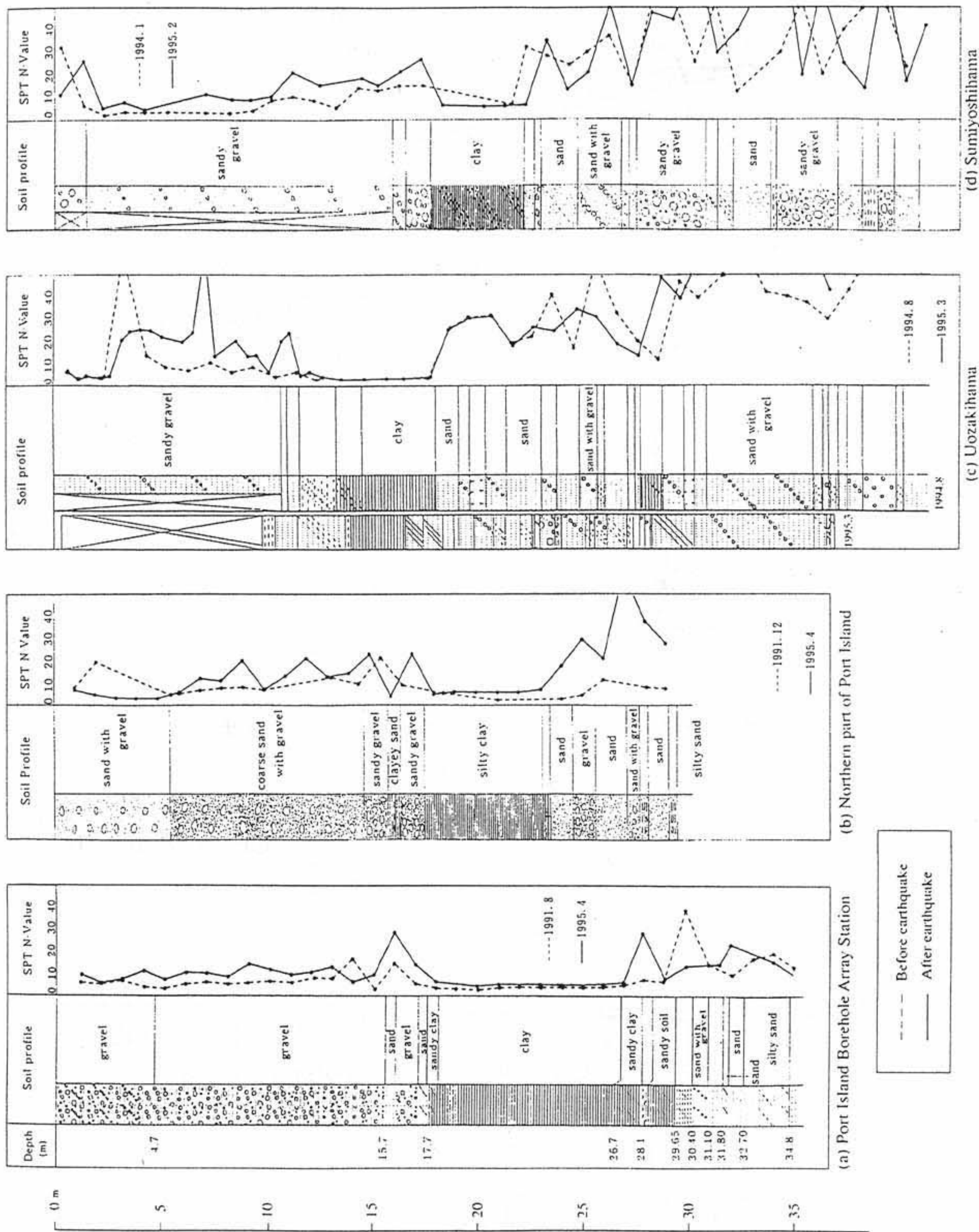


図 4-5-1 地震前後の N 値の分布

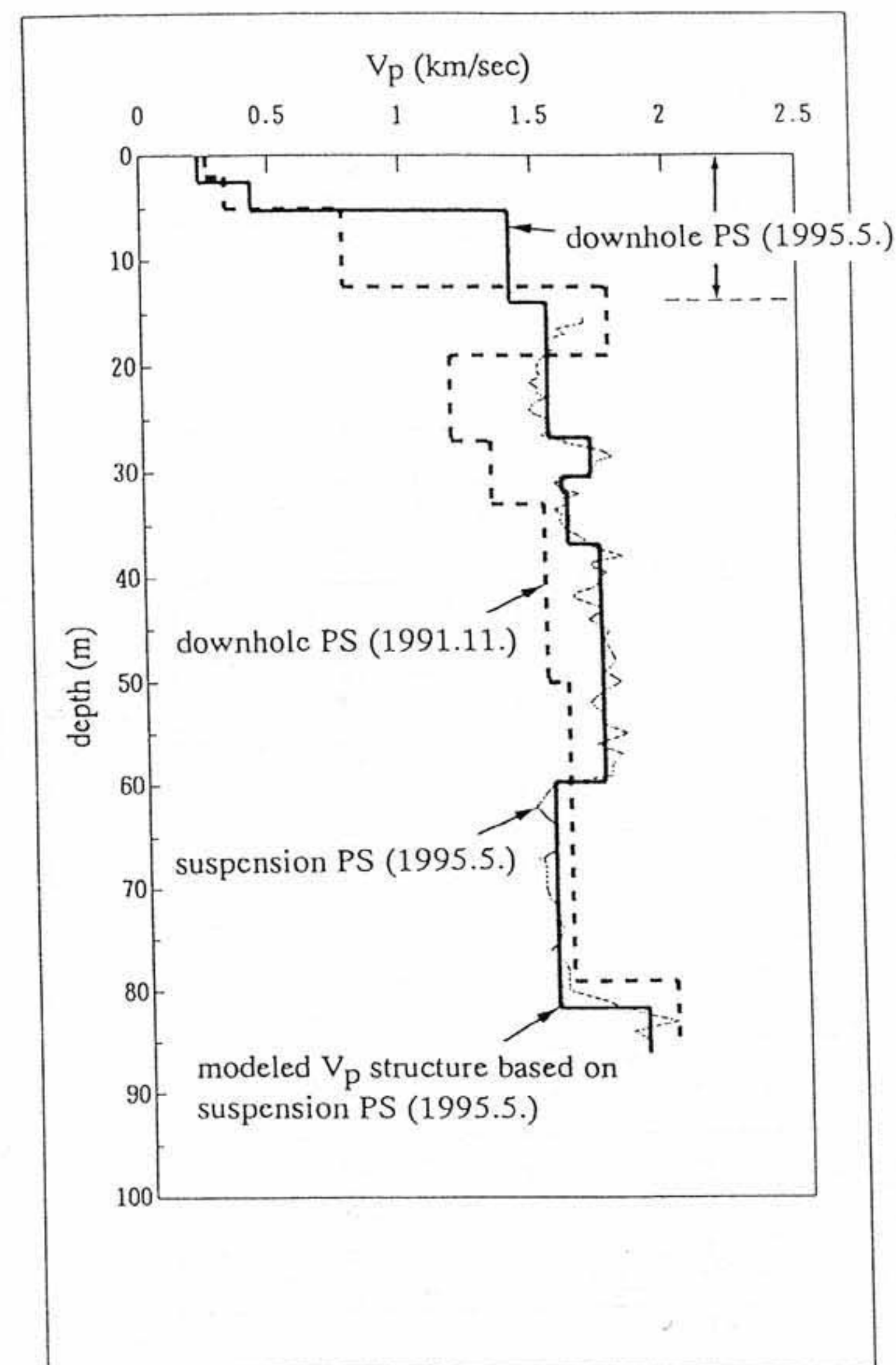
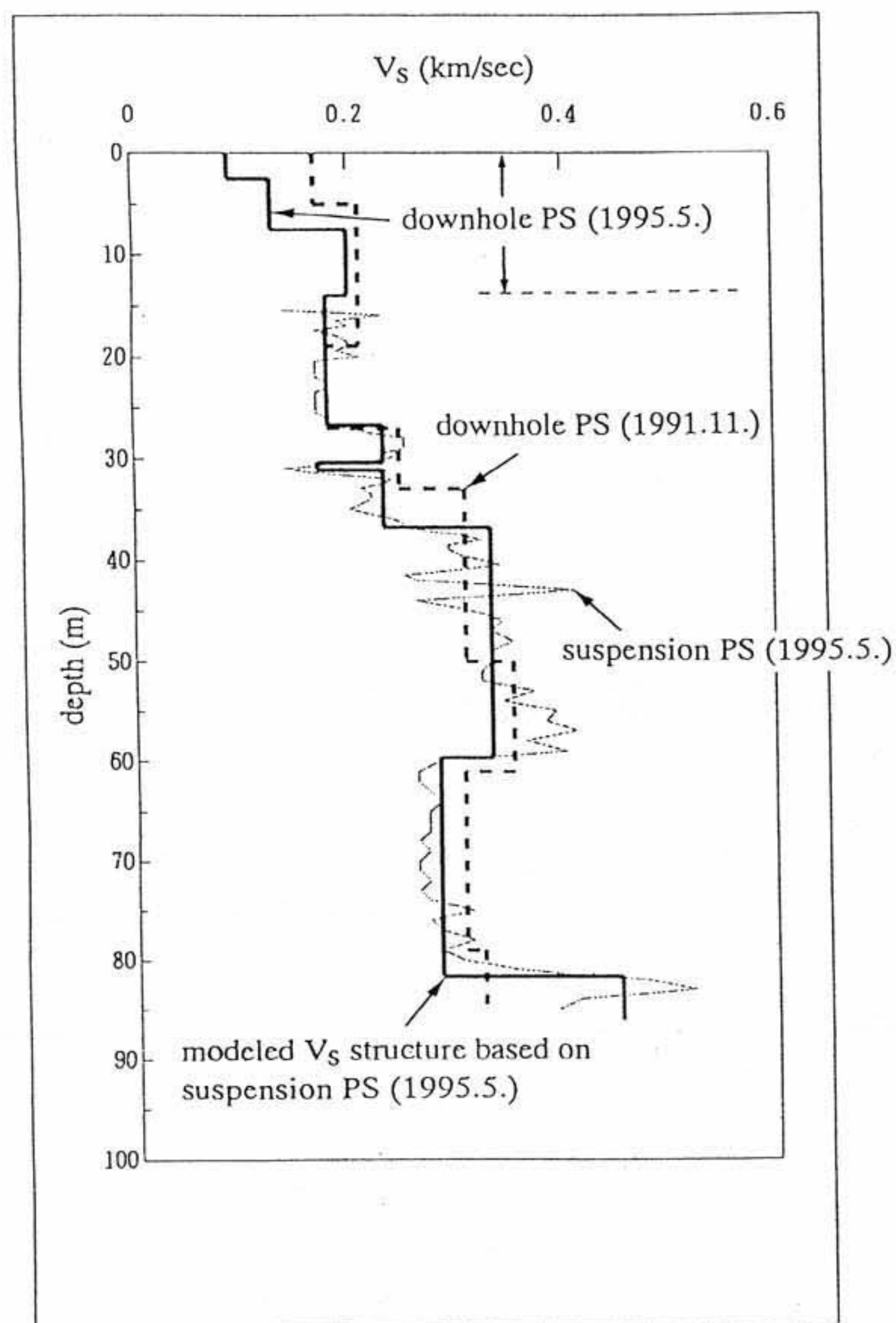


圖 4-5-2 P S 檢層結果

表4-5-1 ポートアイランド鉛直アレー観測地点でのP波とS波の分布

depth (m)	soil type	P-velocity (km/sec)	S-velocity (km/sec)	Poisson's ratio	location of seismometer
0 - 2.0	sandy gravel	0.26	0.170	0.127	⊙ GL -0.0m
2.0 - 5.0	sandy gravel	0.33	0.170	0.319	
5.0 - 12.5	sandy gravel	0.78	0.210	0.461	
12.6 - 19.0	sand with gravel	1.48	0.210	0.490	⊙ GL -16.0 m
19.0 - 27.0	alluvial clay	1.18	0.180	0.488	
27.0 - 33.0	alluvial sand	1.33	0.245	0.482	⊙ GL -32.0 m
33.0 - 50.0	sand with gravel	1.53	0.305	0.479	
50.0 - 61.0	diluvial sand	1.61	0.350	0.475	
61.0 - 79.0	diluvial clay	1.61	0.303	0.482	⊙ GL -83.0 m
79.0 - 85.0	sand with gravel	2.00	0.320	0.487	

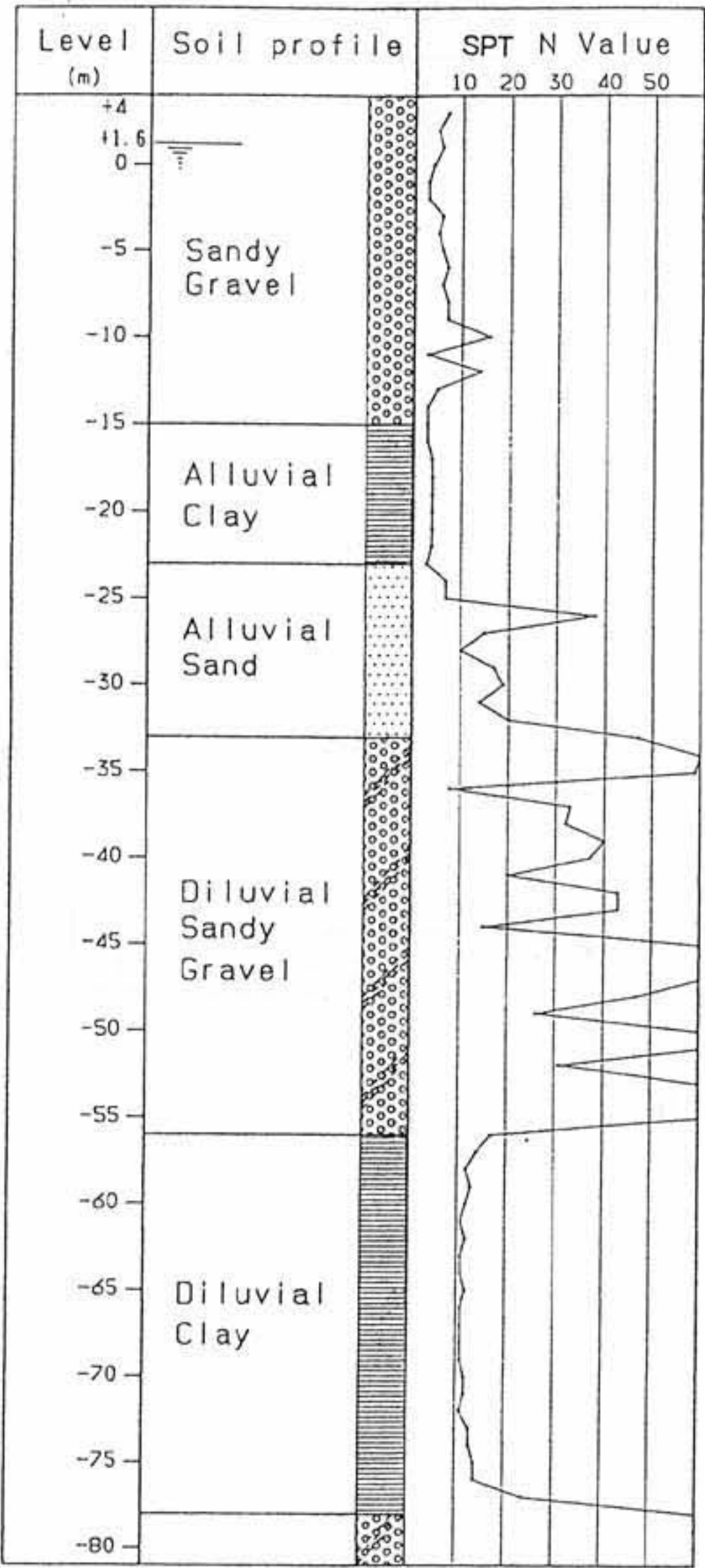


図4-6-2 地盤柱状図

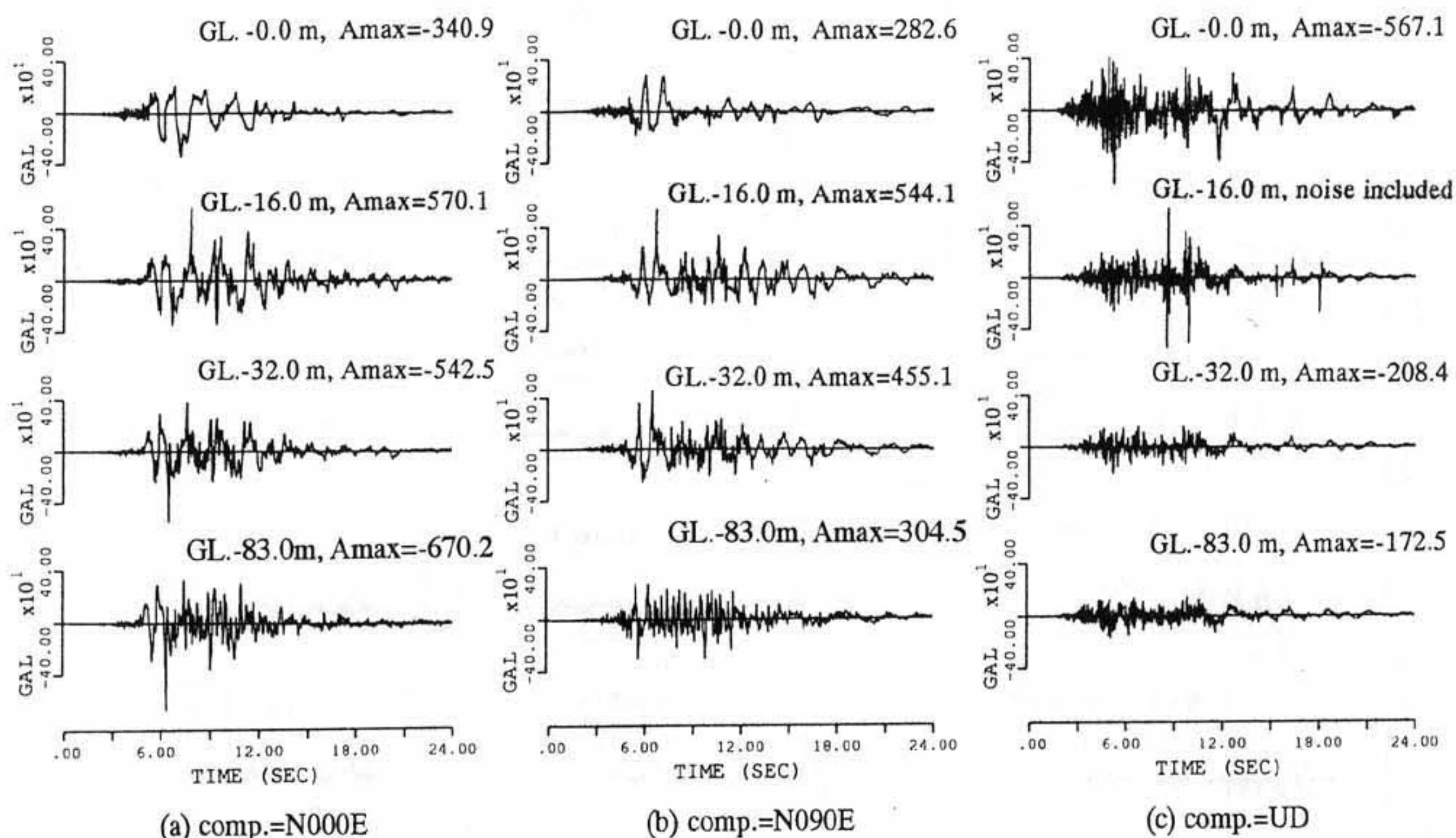


図4-6-1 鉛直アレー観測結果²⁹⁾

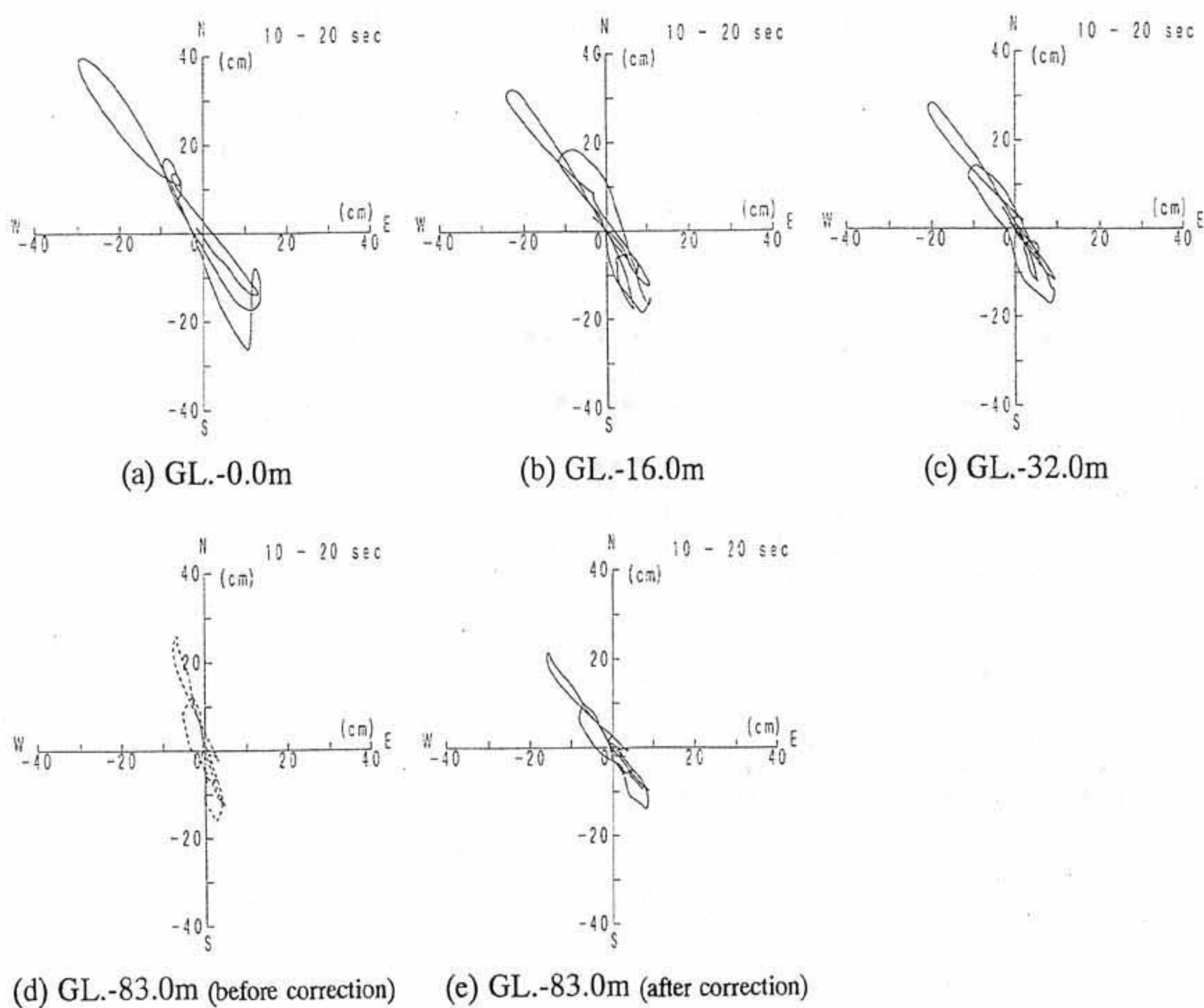


図4-6-3 変位軌跡図

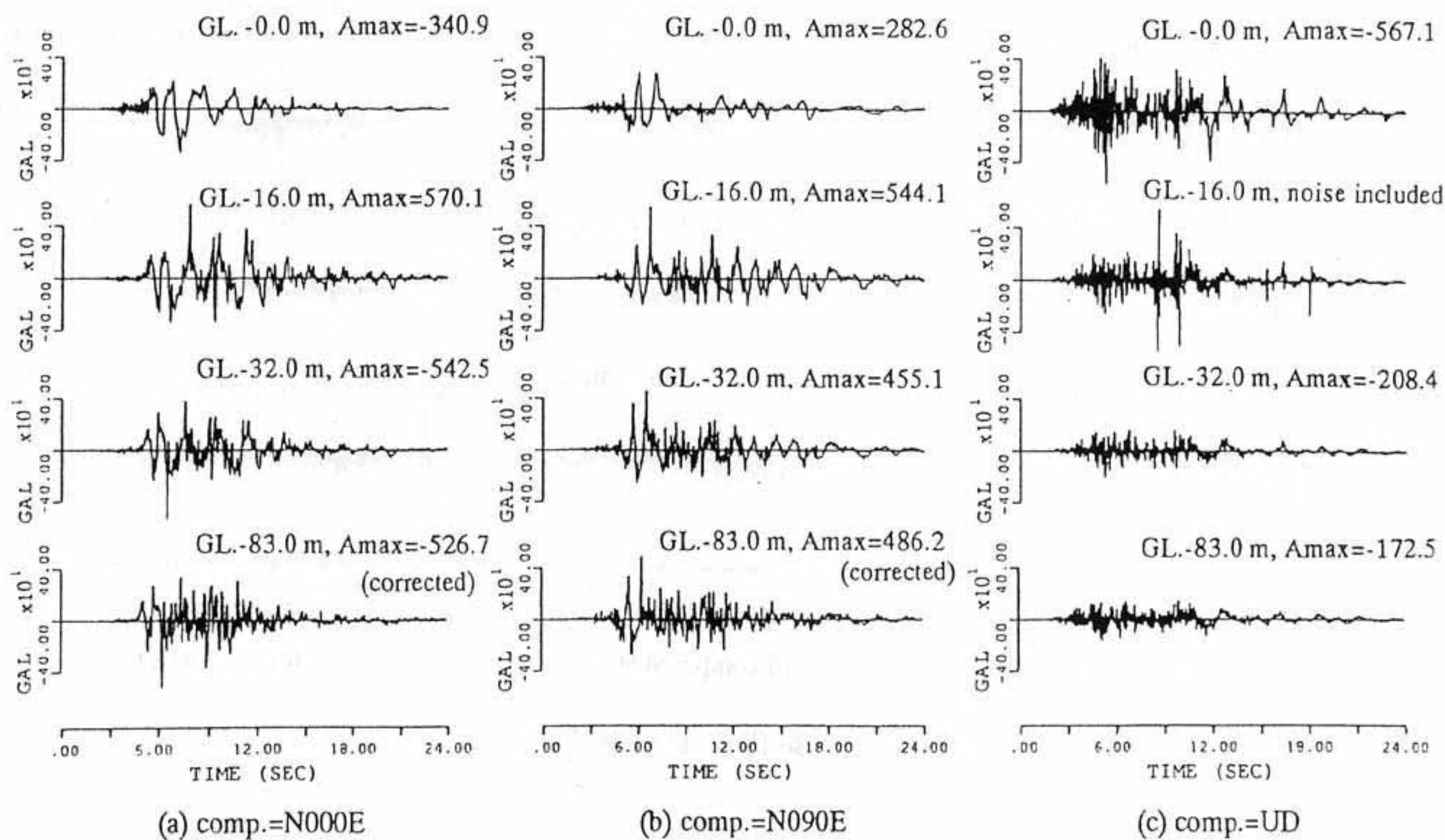


図4-6-4 補正された鉛直アレー観測結果

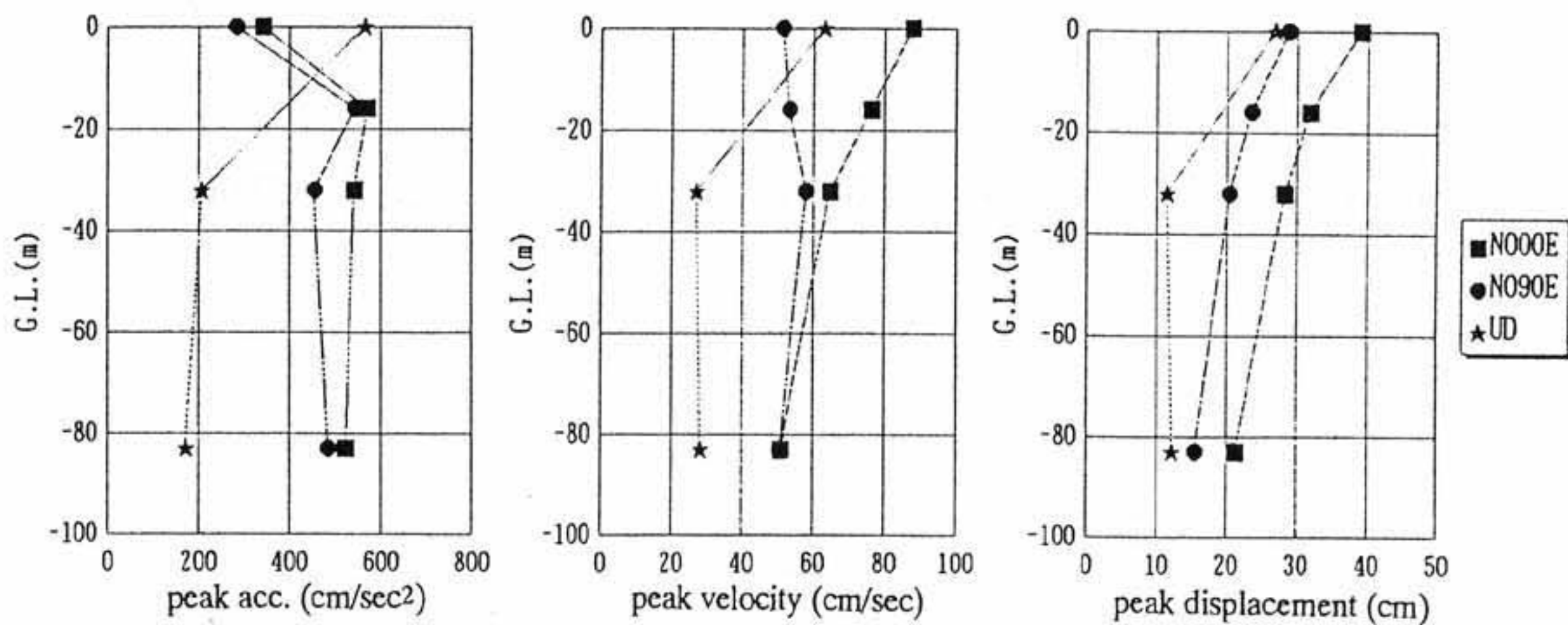


図4-6-5 深さ方向の最大加速度分布

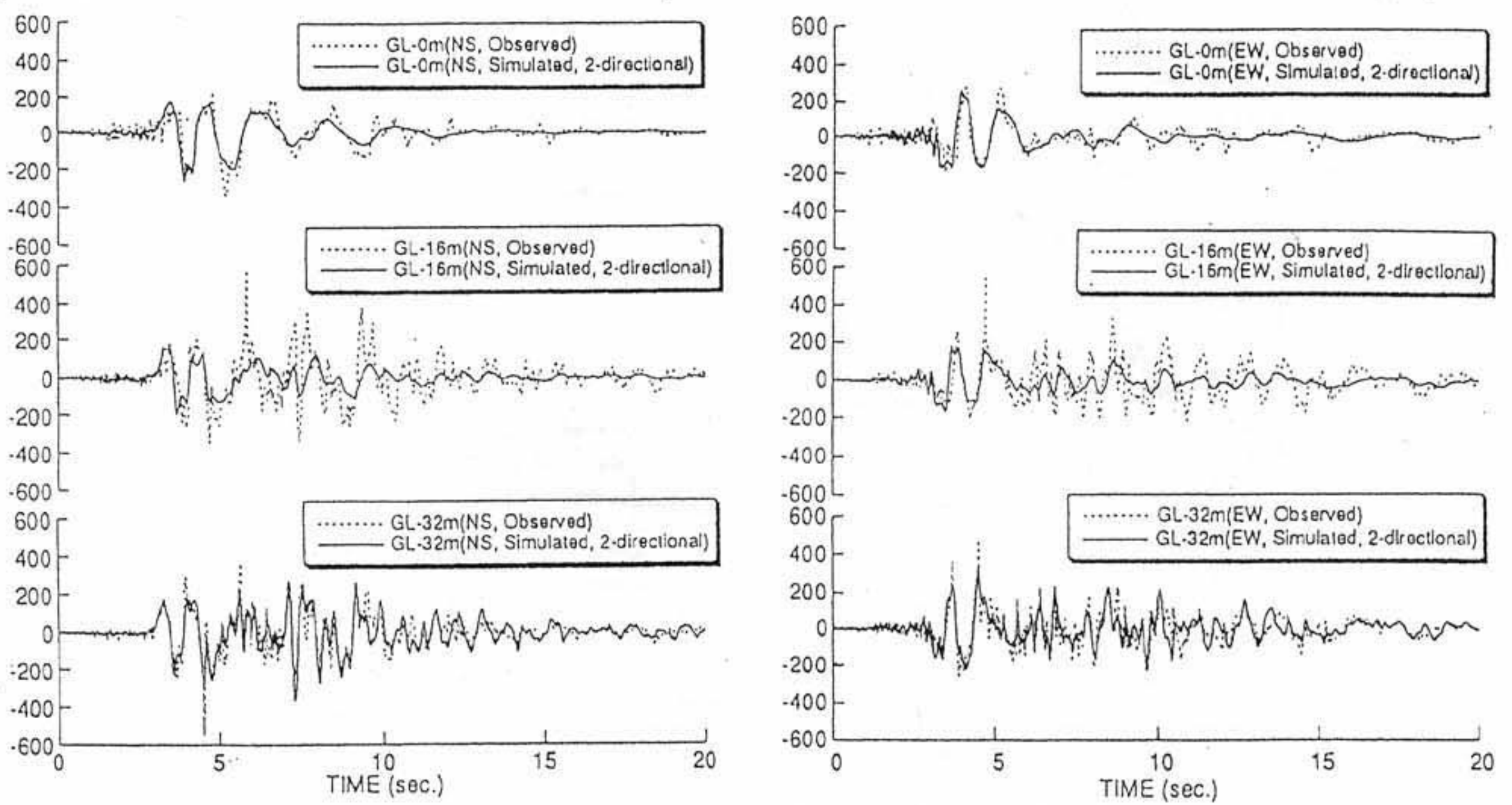


図4-6-6 水平加速度の観測記録と解析結果の比較（2方向入力）

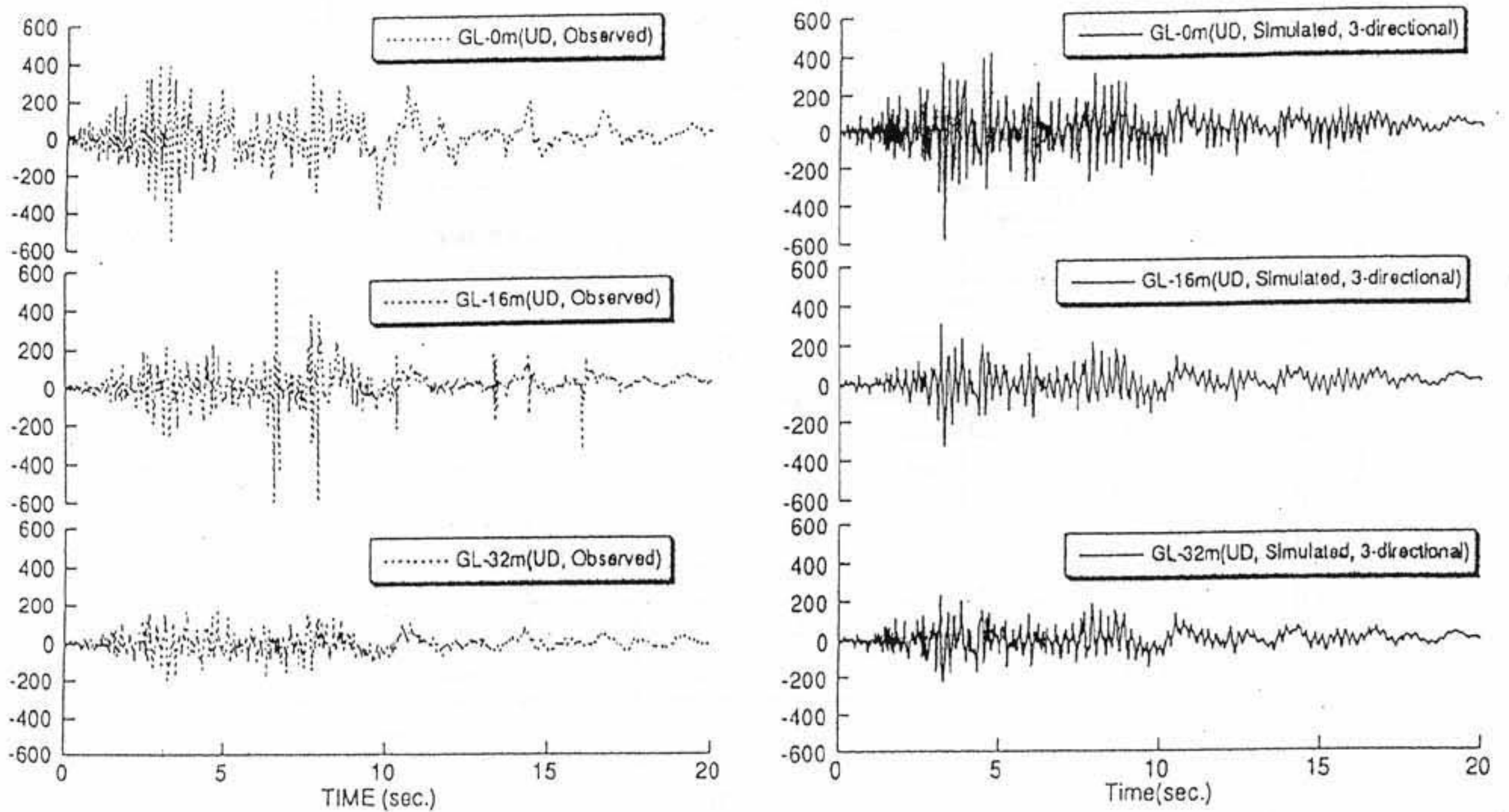


図4-6-7 鉛直加速度の観測記録と解析結果の比較（3方向入力）

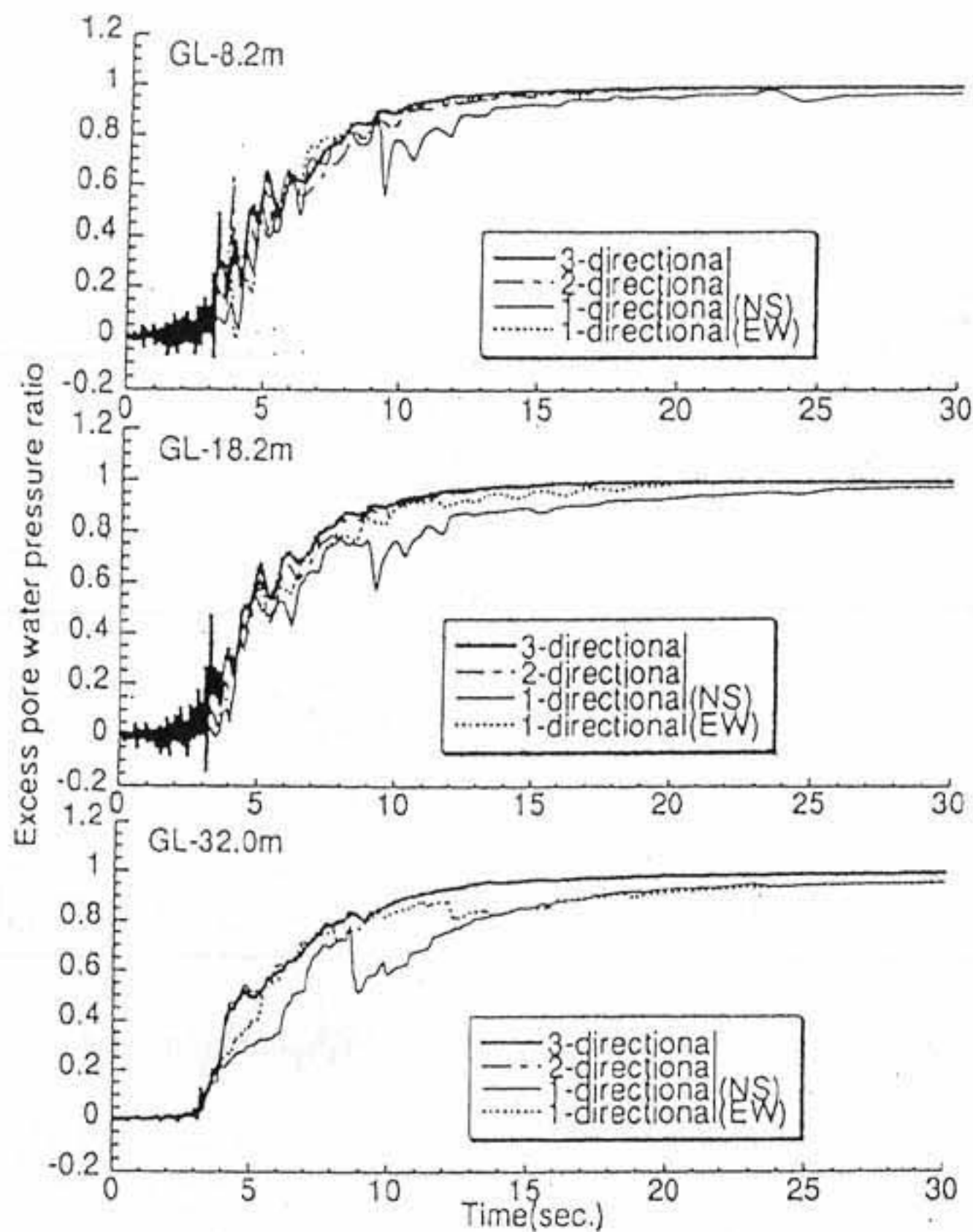
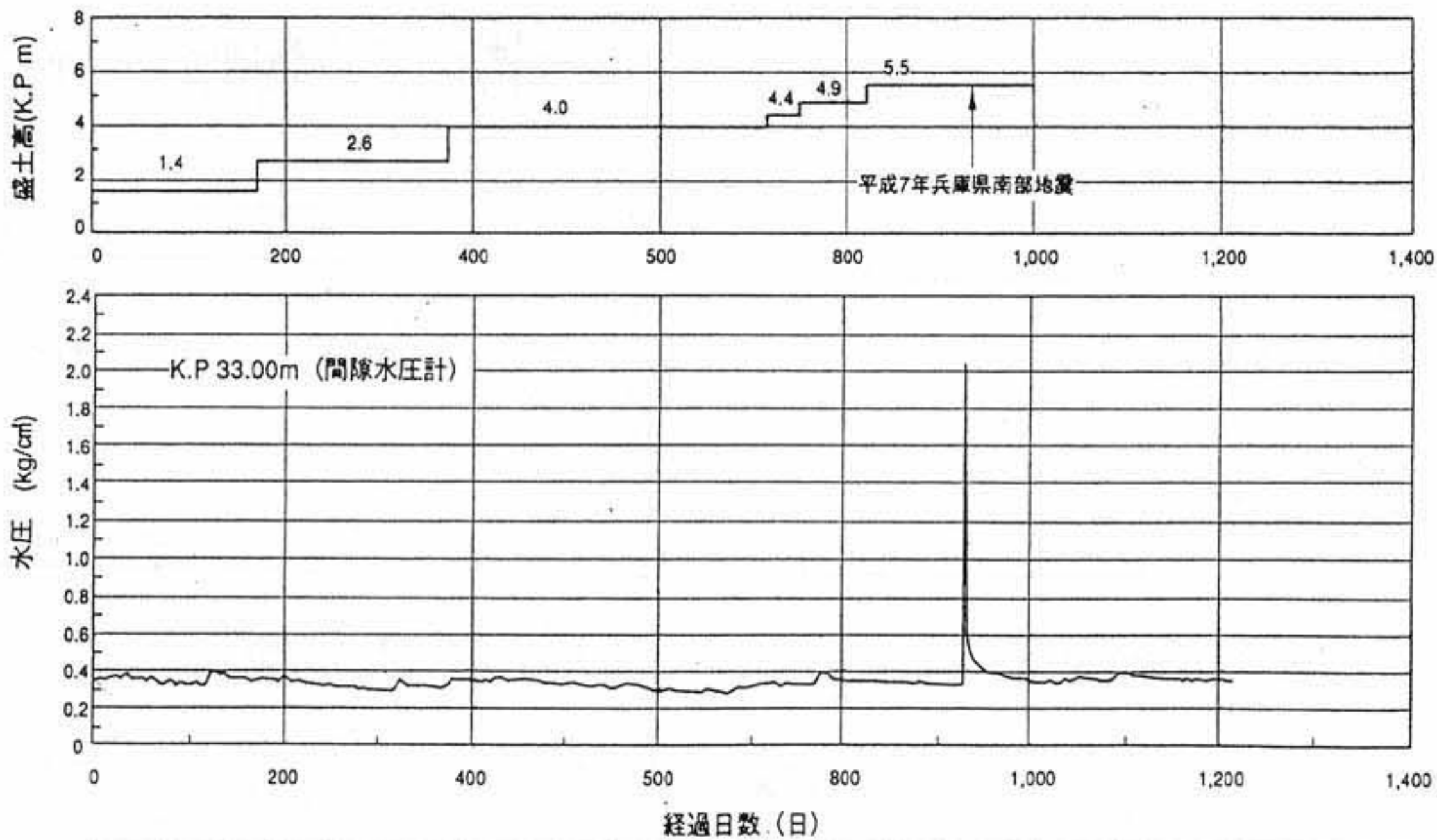


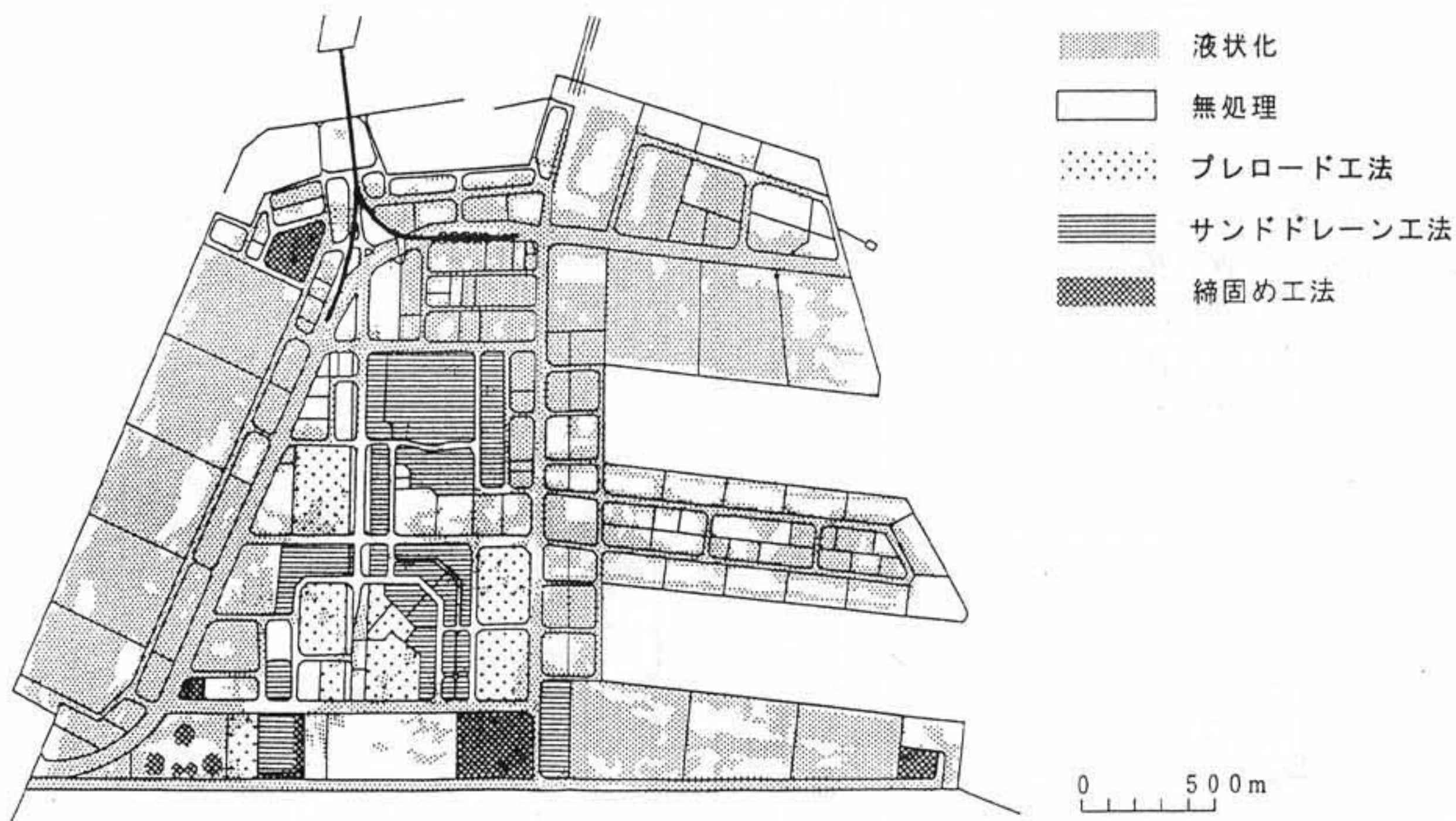
図4-6-8 過剰間隙水圧時間履歴

地 区	対象層	測定深度 (K.P)	地震前の 間隙水圧	地震による 過剰間隙水	過剰間隙 水圧比	地盤 改良
ポートアイランド2期 (KH-1地点) 標高 K.P+5.5m	沖積砂層	-33.0m	0.35kgf/cm ²	1.71kgf/cm ²	0.49	S D

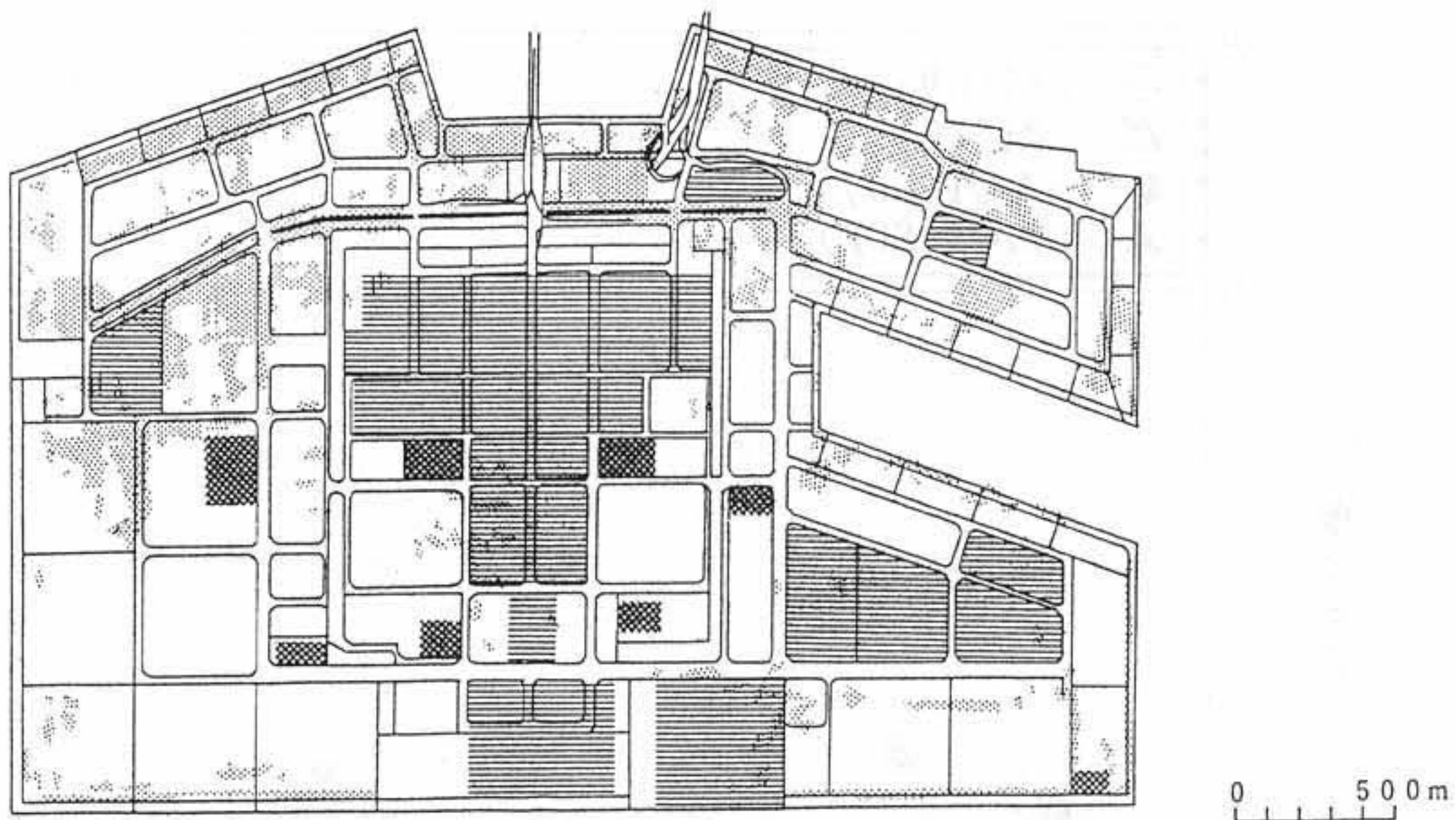


1992年	1993年	1994年	1995年	
8 10 12	2 4 6 8 10 12	2 4 6 8 10 12	2 4 6 8 10 12	2

図4-6-9 ポートアイランド第2期(KH-1: 図4-2-6に明記) における間隙水圧変化



ポートアイランド



六甲アイランド

図4-7-1 ポートアイランドと六甲アイランドでの地盤改良平面図

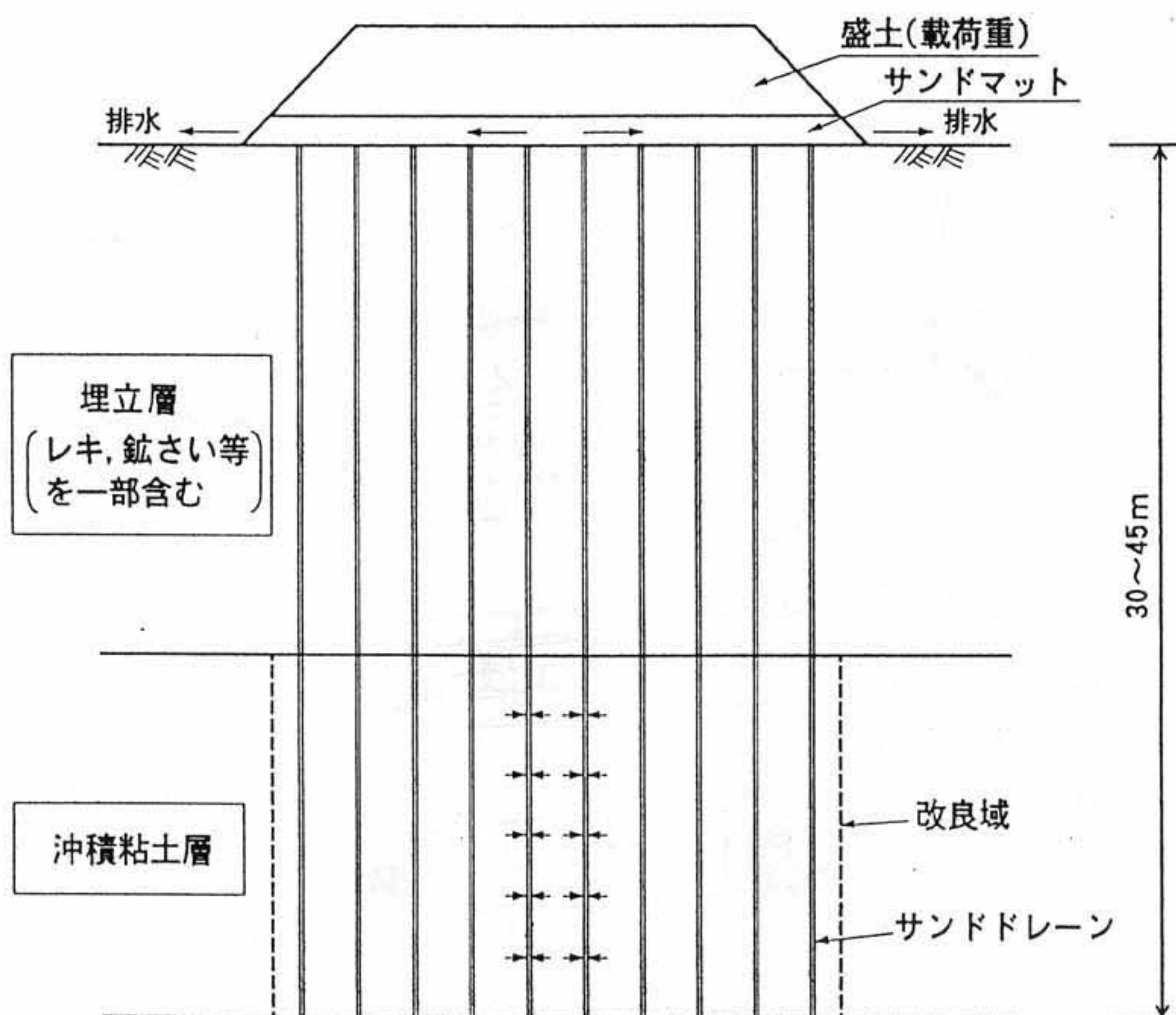


図4-7-2 ポートアイランドでのサンドドレーン施工

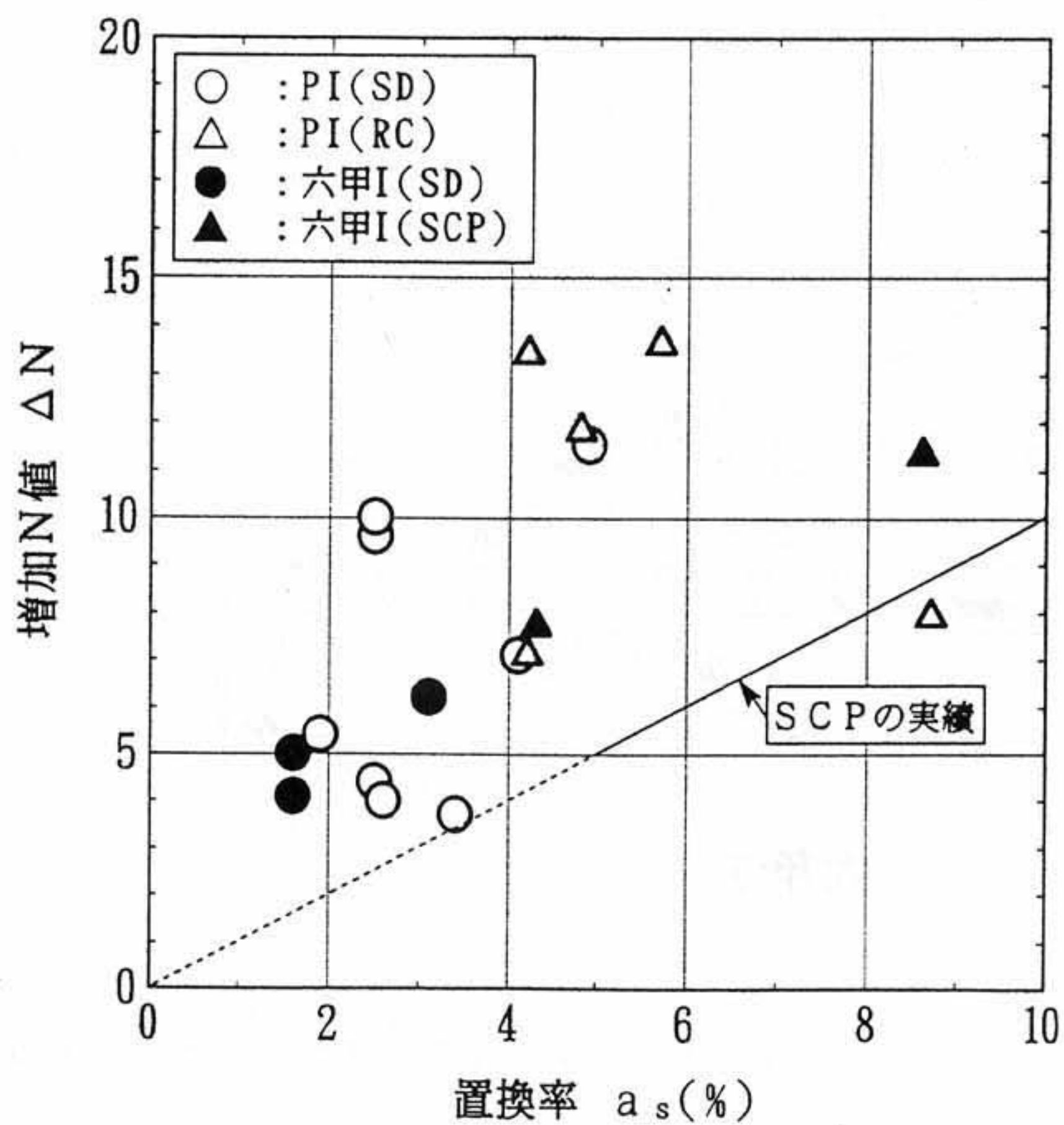


図4-7-3 増加N値と置換率の関係

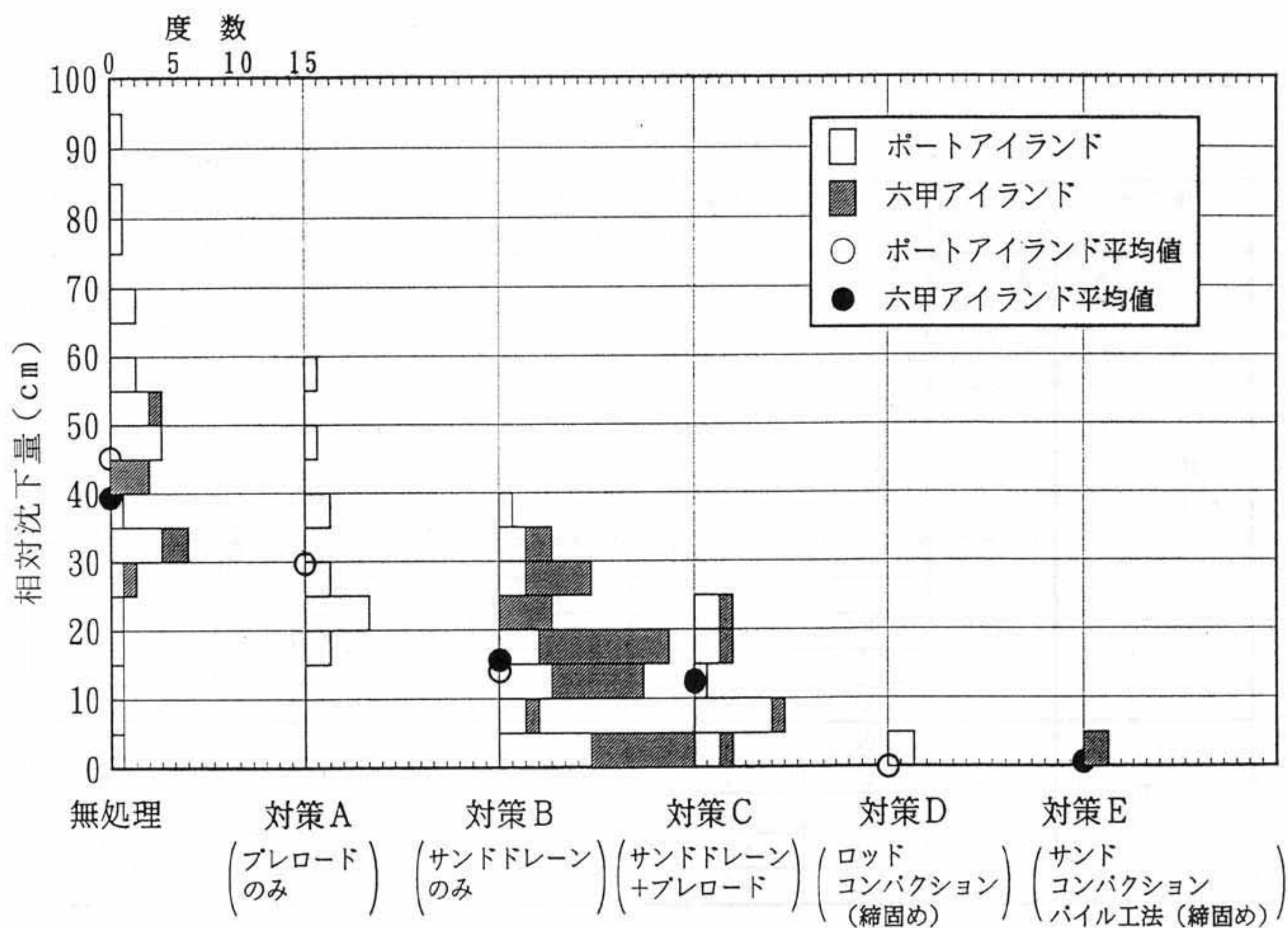


図4-7-4 改良工法と相対沈下量の関係

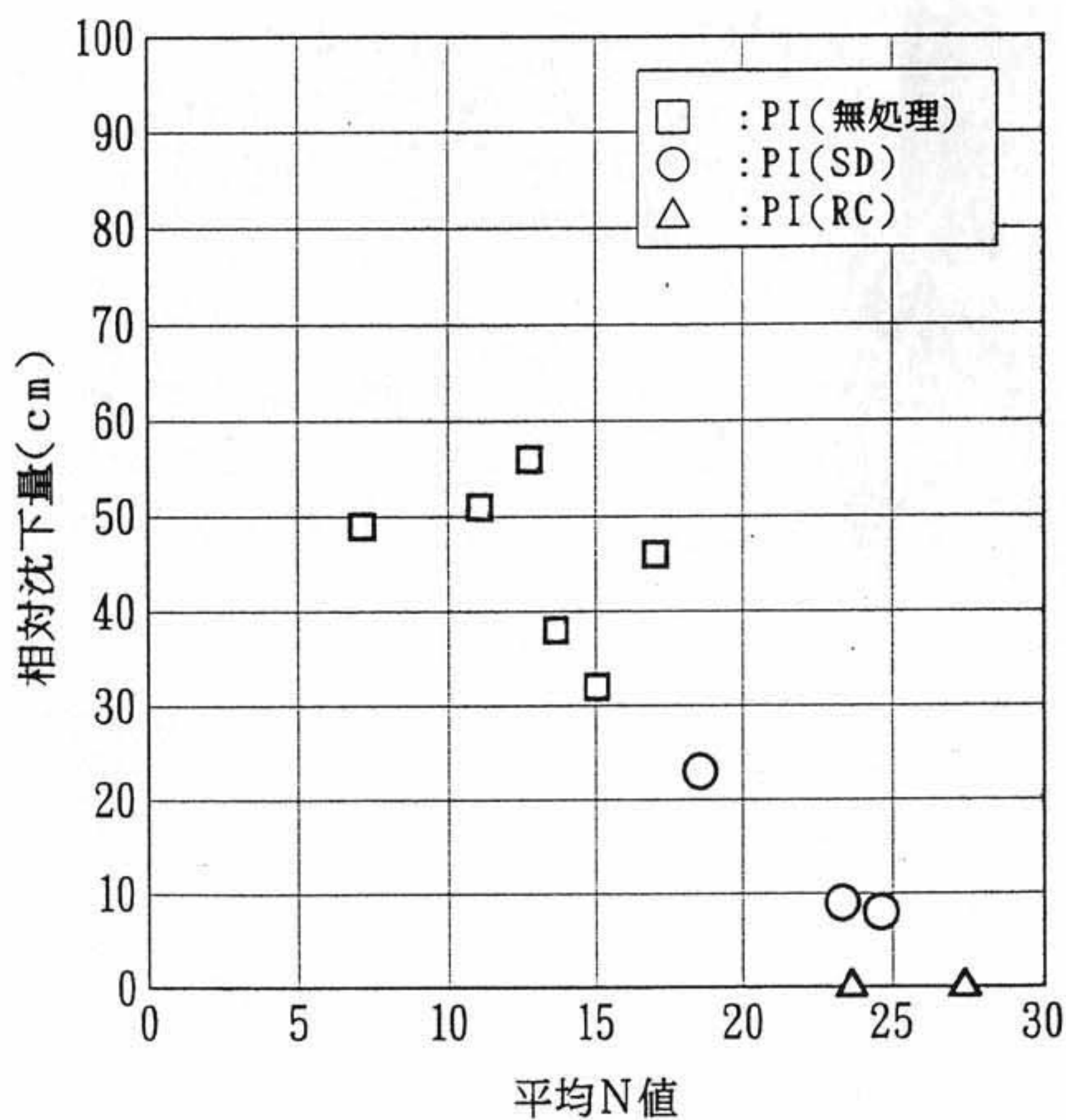


図4-7-5 平均N値と相対沈下量の関係

表4-7-1 各種地盤改良工法の改良効果

埋立地	工法	現場名	置換率 (%)	事前		事後		増加N値
				平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
ポート アイランド	SD	A	4.9	13.1	9.5	24.6	9.9	11.5
		B	2.5	13.7	6.7	23.3	12.7	9.6
		C	2.5	24.3	8.4	28.7	8.8	4.4
		D	1.9	21.0	7.0	26.4	8.4	5.4
		E	2.5	14.8	8.8	24.8	11.4	10.0
		F	3.4	14.8	8.1	18.5	9.5	3.7
		G	4.1	10.2	7.6	17.3	8.6	7.1
		H	2.6	7.9	5.5	11.9	7.7	4.0
	RC	I	4.2	16.5	6.3	23.6	7.2	7.1
		J	4.8	12.7	5.5	24.5	7.6	11.8
		K	8.7	13.1	9.5	21.0	8.5	7.9
		L	5.7	13.7	3.4	27.3	4.4	13.6
		M	4.2	8.0	3.3	21.4	6.8	13.4
		N	1.6	10.4	5.6	15.4	8.4	5.0
六甲 アイランド	SD	O	3.1	10.4	4.8	16.6	9.9	6.2
		P	1.6	10.1	7.3	14.2	8.3	4.1
		Q	8.6	8.1	4.1	19.4	12.1	11.3
	SCP	R	4.3	8.1	4.1	15.8	9.8	7.7

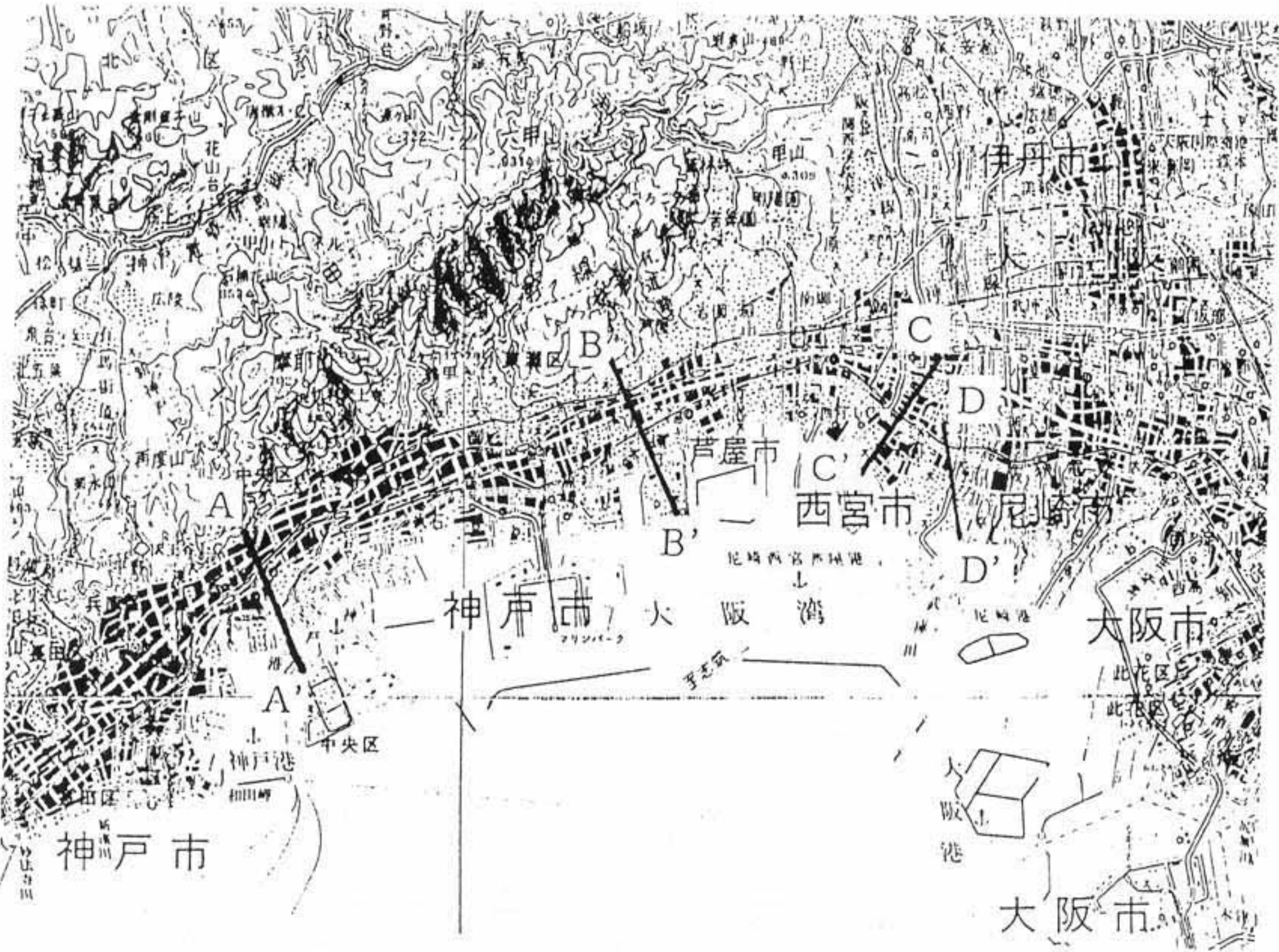
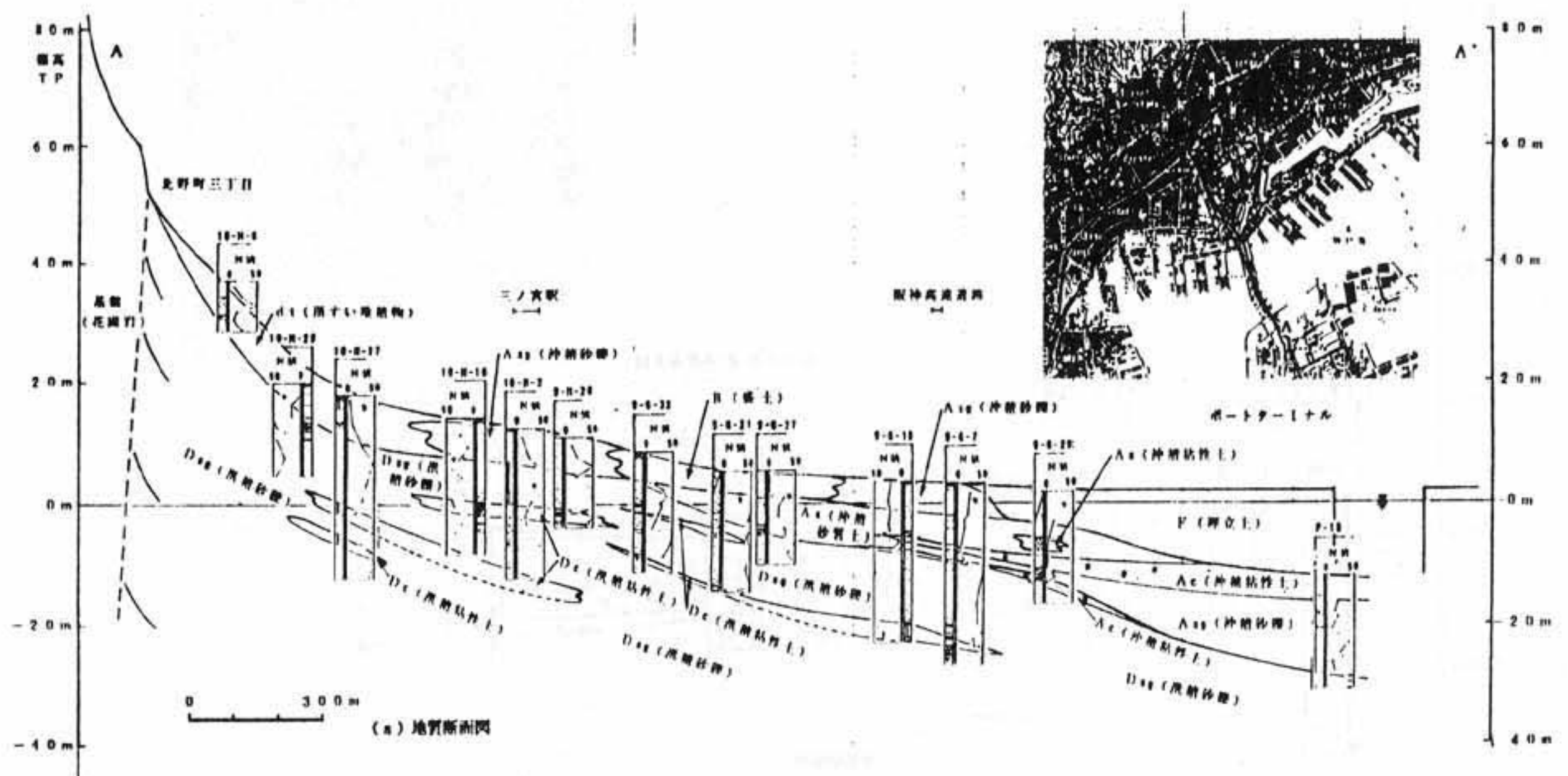
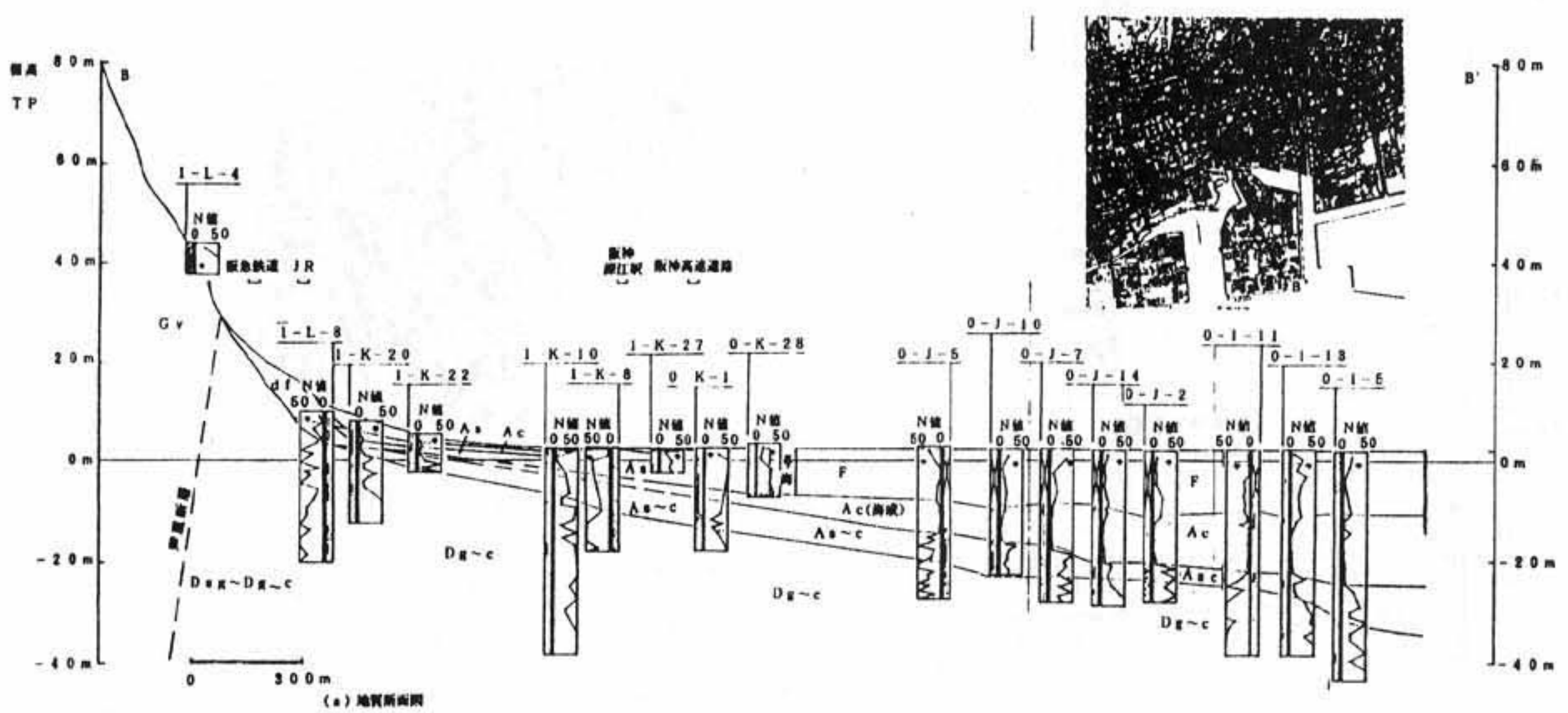


図4-8-1 検討断面位置

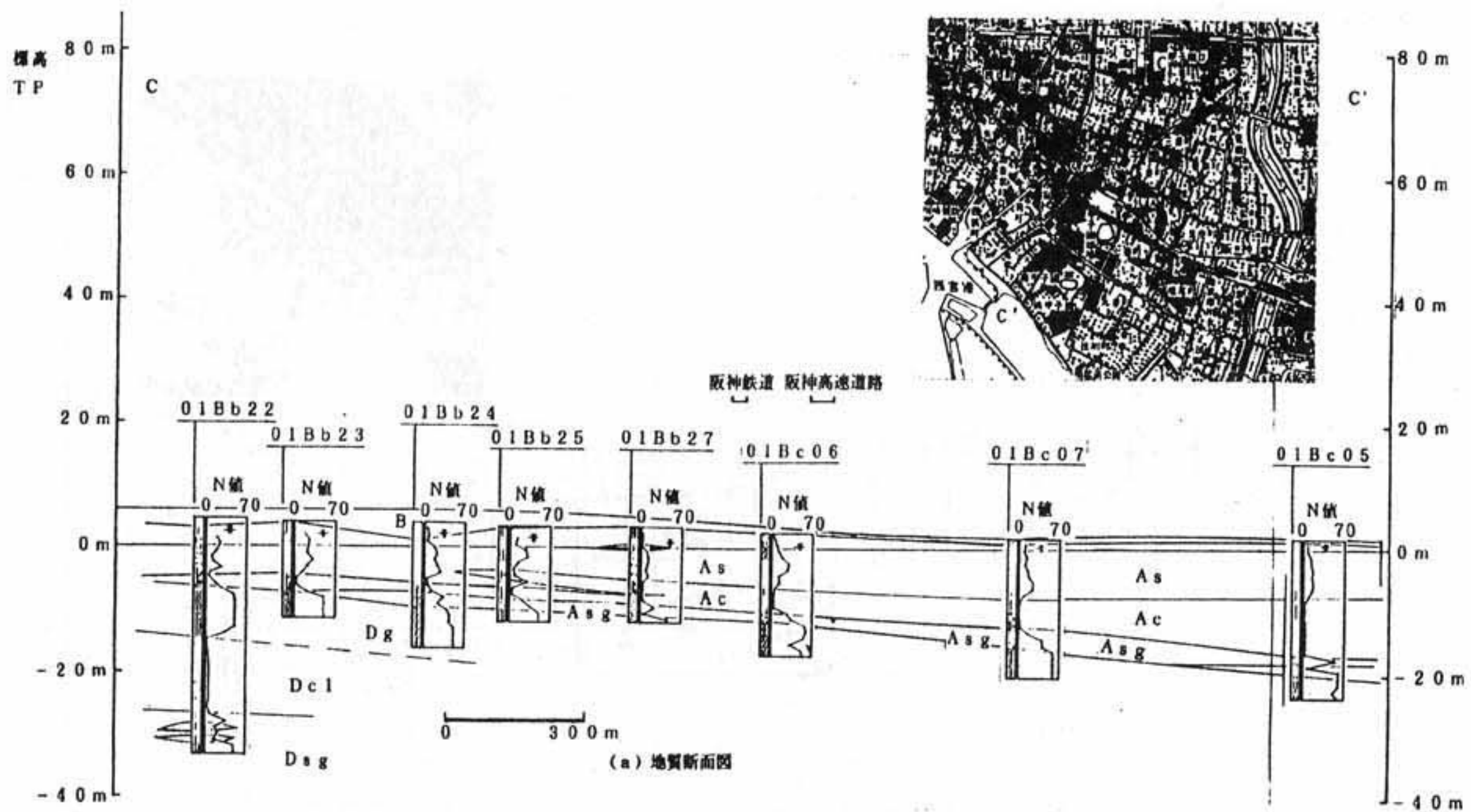


A-A' 断面

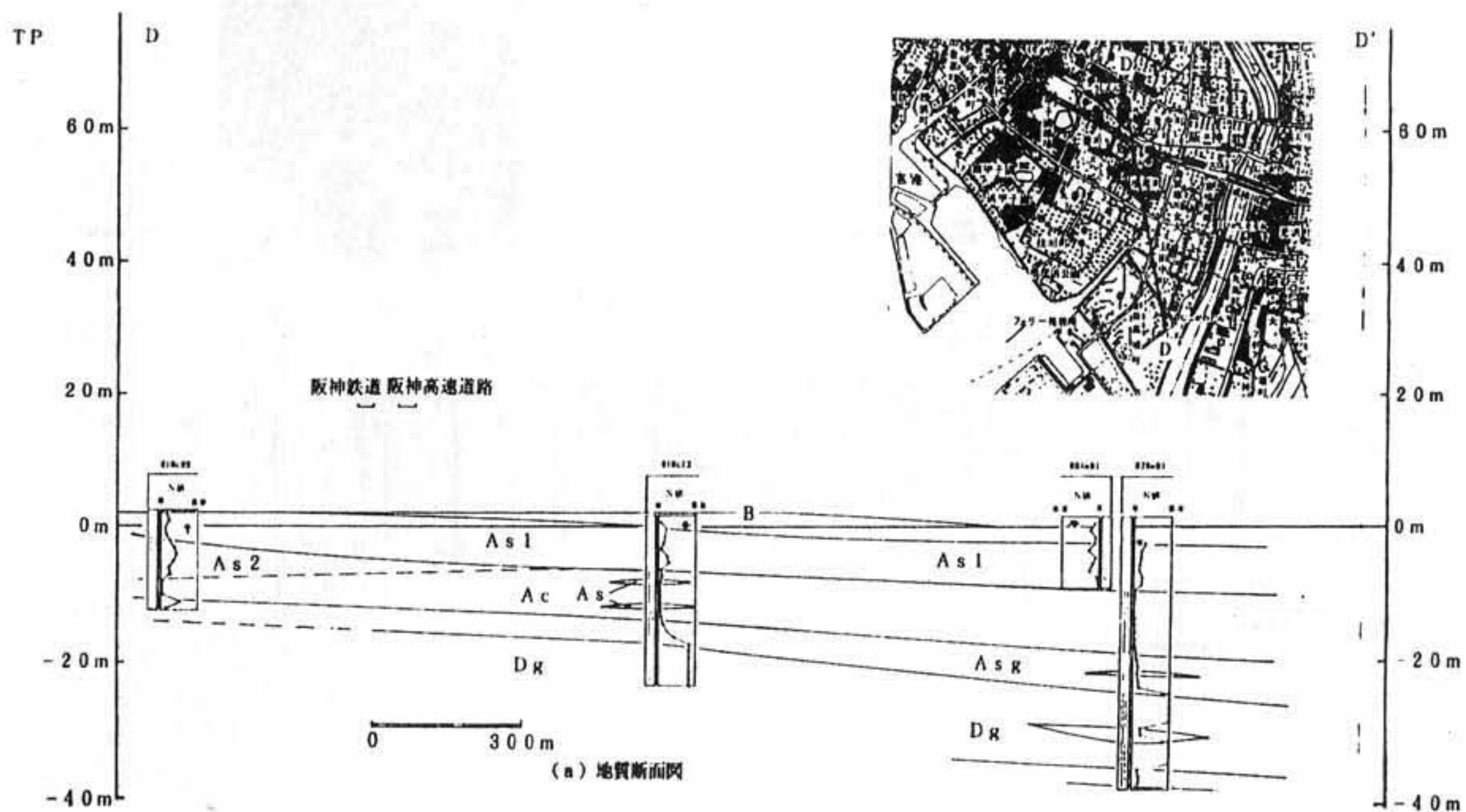


B-B' 断面

図4-8-2 推定地層断面図



C-C' 断面



D-D' 断面

図4-8-2 推定地層断面図 (続)

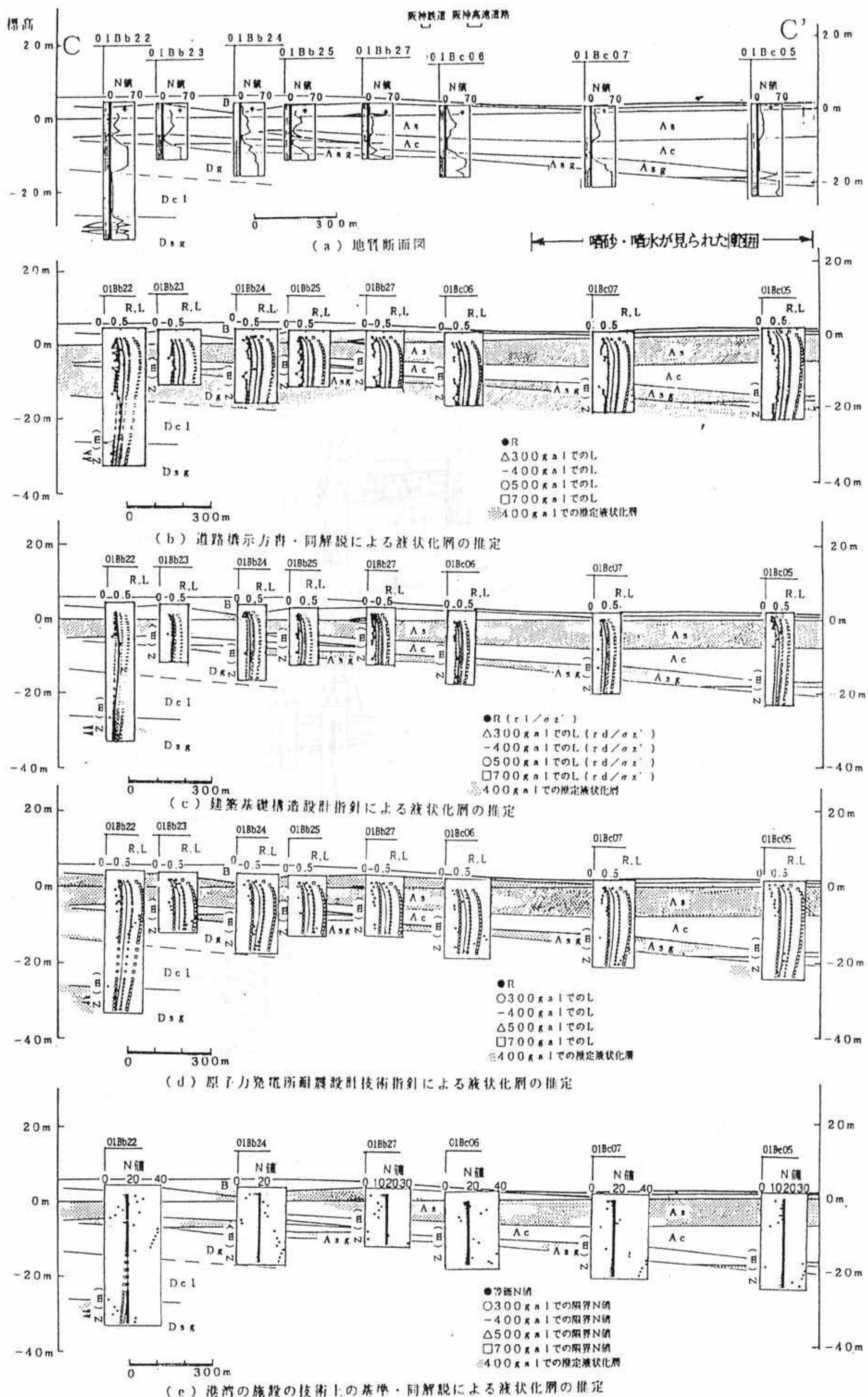


図4-9-2 西宮市の甲子園町付近を通る推定地層断面図と液状化層の検討結果

A - A' 断面(600gal)

○道路橋 △建築

□原子力 ▽港湾

C - C' 断面(400gal)

● 4つの方法で同じ

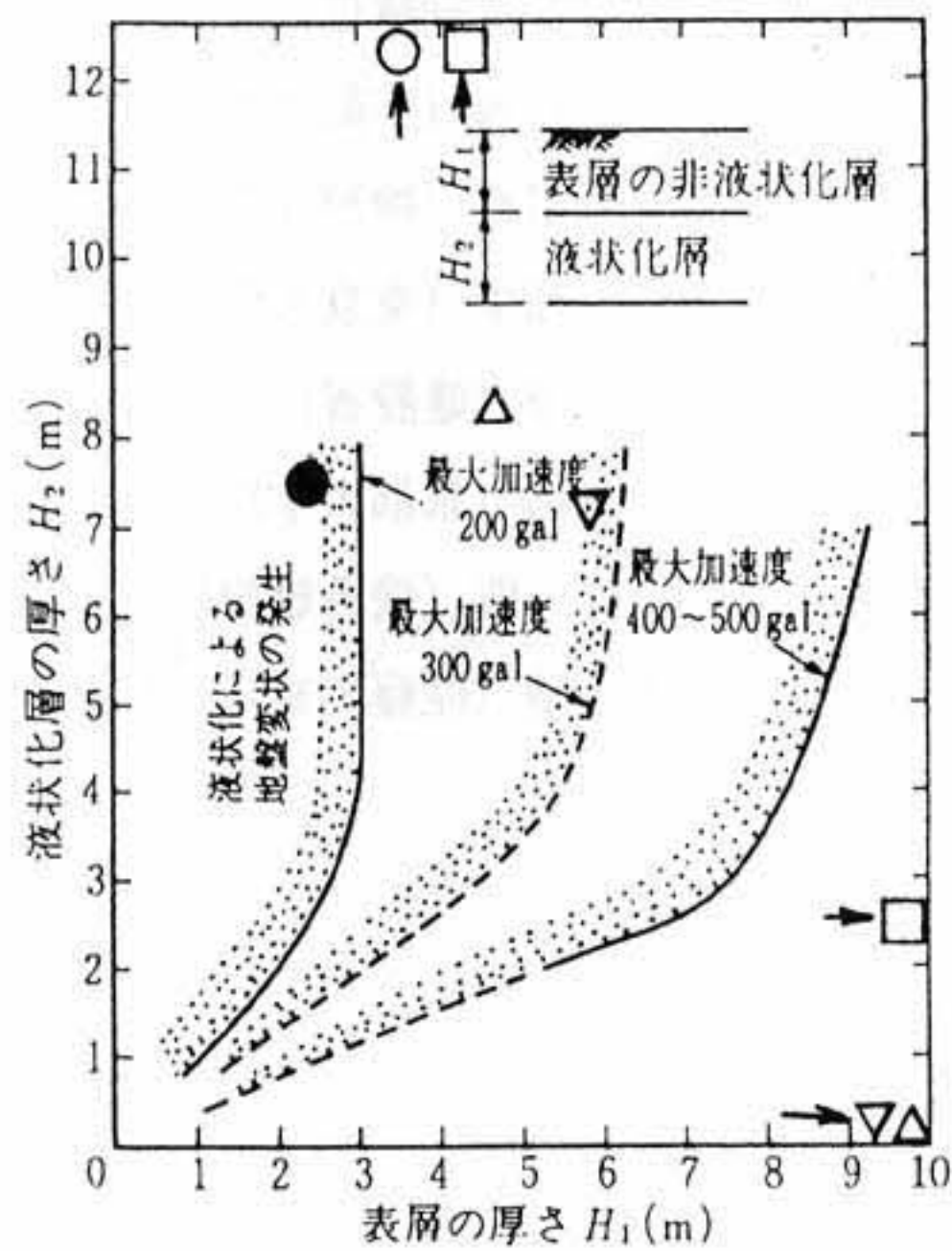


図4-9-3 液状化層厚と非液状化層厚の関係⁴⁸⁾

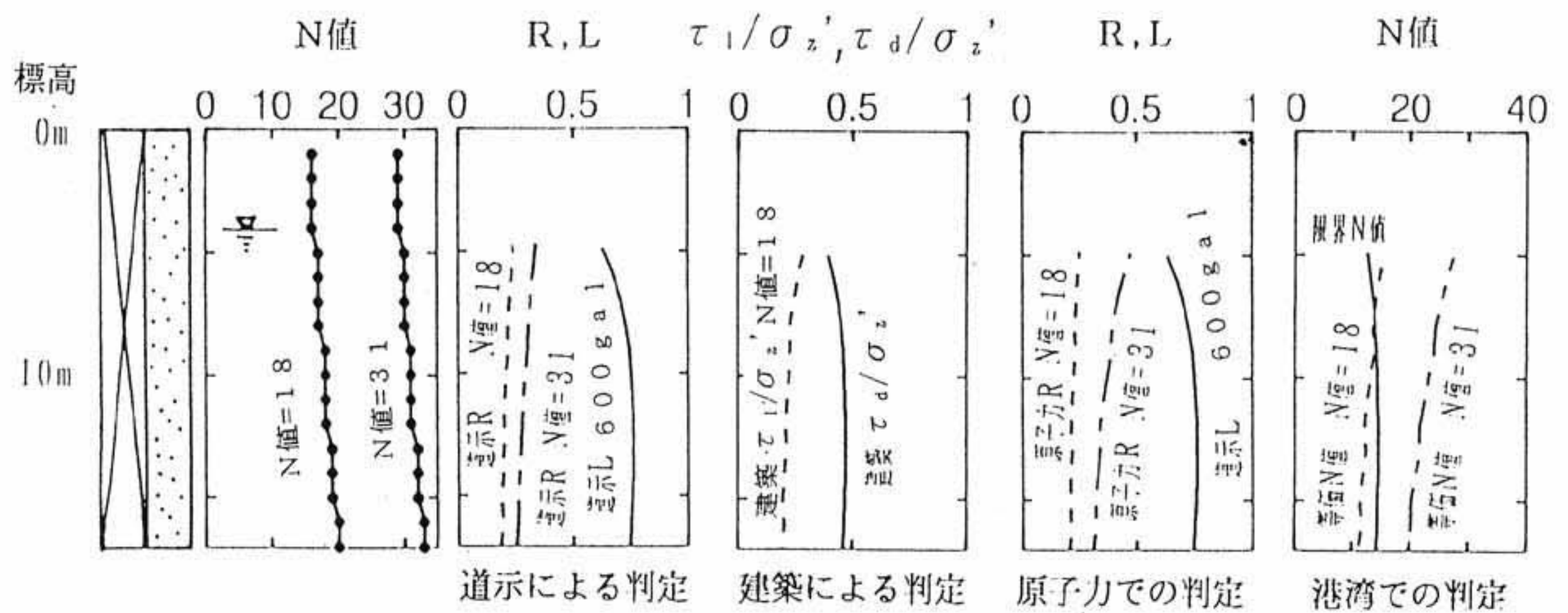


図4-9-4 ポートアイランドで締固めた地盤のモデルと液状化層の検討結果

ワーキンググループ構成

柴田 徹（主査：福山大学）
石川 裕（清水建設）
渦岡 良介（間組）
小野 紘一（鴻池組）
塩見 忠彦（竹中工務店）
関口 宏二（NKK）
田口 洋輔（大成建設）
田中 幸久（電力中央研究所）
福島 伸二（フジタ）
松田 隆（大林組）
三宅 達夫（東洋建設）
八嶋 厚（岐阜大学）
安田 進（東京電機大学）

岡 二三生（主査：岐阜大学）
井合 進（運輸省）
大保 直人（鹿島建設）
加藤 満（鴻池組）
角南 進（日建設計）
高橋 嘉樹（不動建設）
田中 泰雄（神戸大学）
東畑 郁生（東京大学）
松尾 修（建設省）
三村 衛（京都大学）
森 伸一郎（飛島建設）
吉田 望（佐藤工業）