



兵庫県南部地震による自然地盤の液状化と地盤変状

西, 勝
吉田, 信之
奥村, 孝幸

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 1:41-51

(Issue Date)

1997-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/00317434>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00317434>



兵庫県南部地震による自然地盤の液状化と地盤変状

Liquefaction and Ground Deformation in Natural Deposits
due to Hyogo-ken Nanbu Earthquake

西 勝¹⁾

Masaru Nishi

吉田信之²⁾

Nobuyuki Yoshida

奥村孝幸³⁾

Takayuki Okumura

概要: 本報では、神戸市須磨区から尼崎市に至る地域における自然堆積地盤の液状化と地盤変状について論じた。噴砂痕の分布、地表変位および地盤構造の状況を概述するとともに、噴砂痕の集中する地域を選定しそこでの地盤変状の程度、地盤構造と厚生材料の特徴および土地利用と建物被害について詳述した。

キーワード: 液状化、自然地盤、噴砂痕、地表変位、地盤構造

1. 序論

兵庫県南部地震により六甲アイランドやポートアイランドのような埋立地盤では液状化による地盤被害が多発したことは周知の通りであるが、自然地盤における液状化についてはあまり知られていない。本報では、神戸市須磨区から尼崎市に至る地域を対象にして、自然地盤に発生した液状化と地盤変状を報告する。まず、対象地全域での液状化発生に関連する噴砂痕の分布、地表変位及び地盤構造の状況を概述する。つづいて、噴砂痕の集中する 2 地域を抽出し、その地域での地盤変状の程度、地盤構造と構成材料の特徴及び土地の使われ方と建物被害を詳述し、最後にまとめを行う。なお、ここで自然地盤とは、江戸時代以降の埋立境界線より内陸部の自然堆積地盤を略称し、埋立地(海岸、ため池、河道、...)の地盤を除いたものと定義する。

2. 噴砂痕の分布と地表変位及び地盤構造の概況

一般に、地盤の液状化発生の有無は噴砂痕、地表変位及び地盤構造によって判別される。対象地全域の自然地盤における各判別基準の概況を次に列記する。

(1) 噴砂痕の分布

図-1 は、土地条件図(1966 年及び 1983 年発行)及び国土庁防災局震災対策課ほか監修の文献¹⁾に基づいて 200 × 200m メッシュで図化した液状化危険度分布図に、今回の地震によって発生した噴砂痕をプロットしたものである。図示した噴砂痕は、航空写真の判読から個人レベルでの調査に至る観測データを網羅したものであるが、調査不足及び観測不能によるデータの欠如とスポット的な痕跡を 200m 方形で図化するという過小・過大評価の両面性を含んでいる。なお、内陸部における自然地盤の噴砂痕(○印)と埋立地盤(ため池、河道、...)の噴砂痕(●印)の区分には、土地条件図のみならず古地形図(1885 年発行)並びに神戸・阪神間地形分類図²⁾を併用した。

自然地盤の噴砂痕(○印)は、液状化危険度マップと良く対応しており、当然のことではあるが、盛土地、海岸沿いの砂堆・砂州から内陸部に入るに従って減少する傾向が認められる。扇状地、山麓堆積地に至っては、噴砂痕は数点散在するのみである。この結果より、散在地点での今後の調査が必要であるが、自然地盤

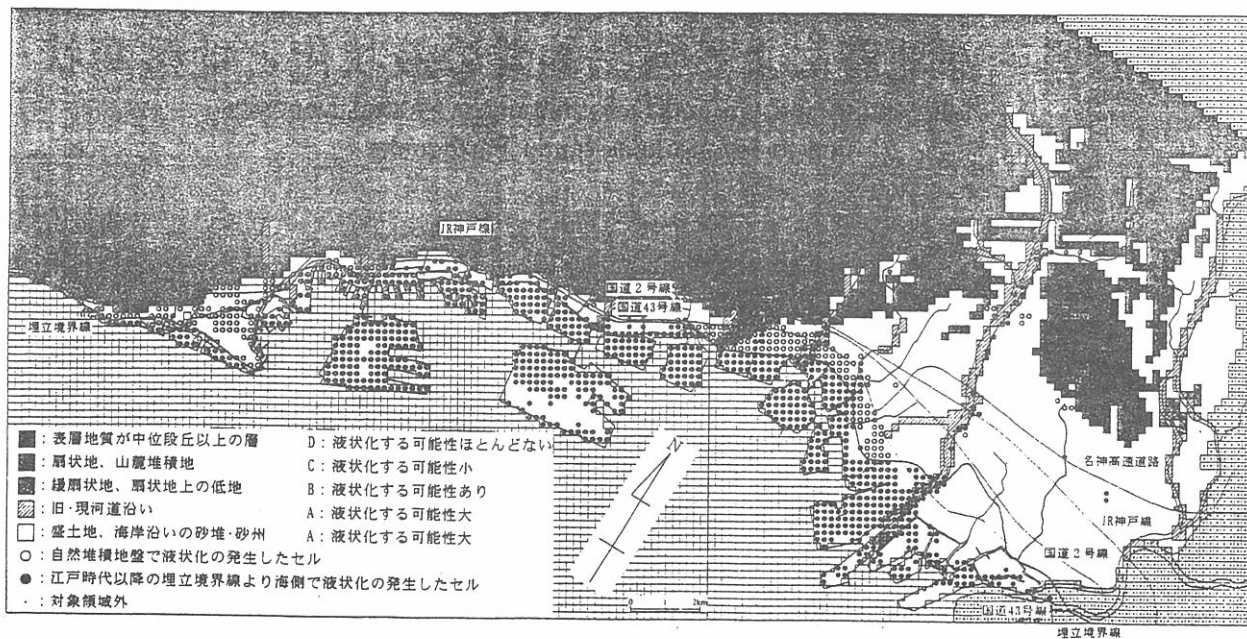


図-1 対象地全域における液状化危険度分布図と噴砂痕分布

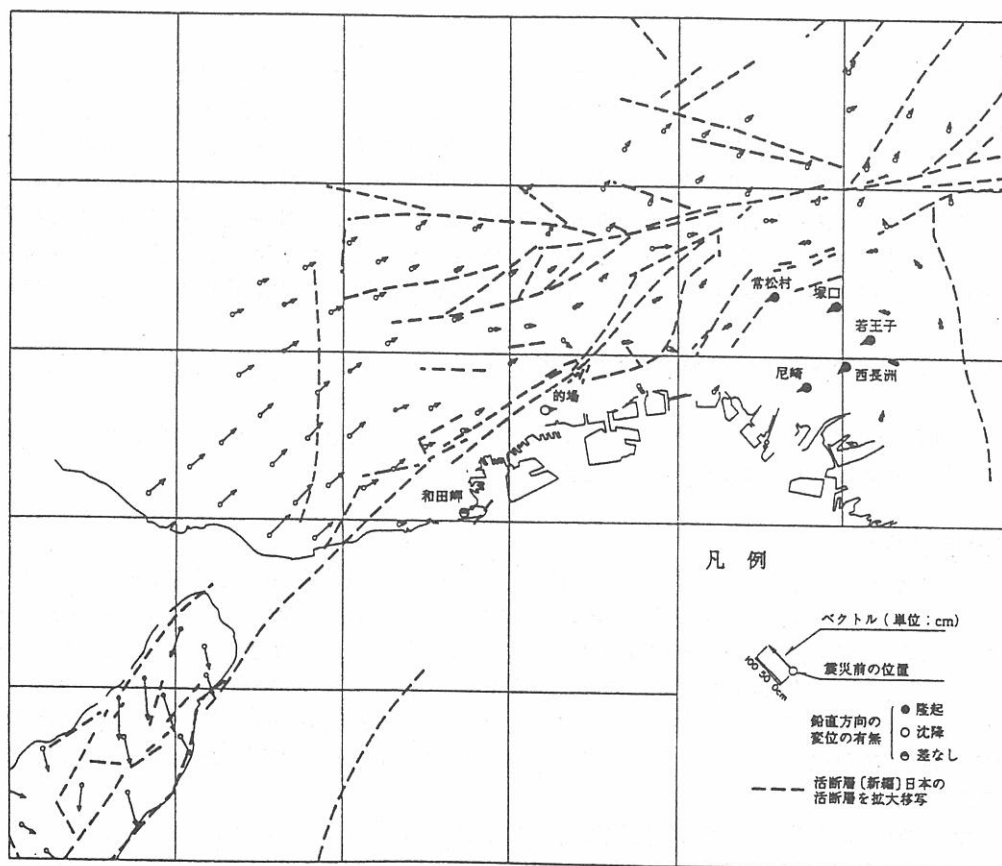


図-2 対象地全域における地表変位

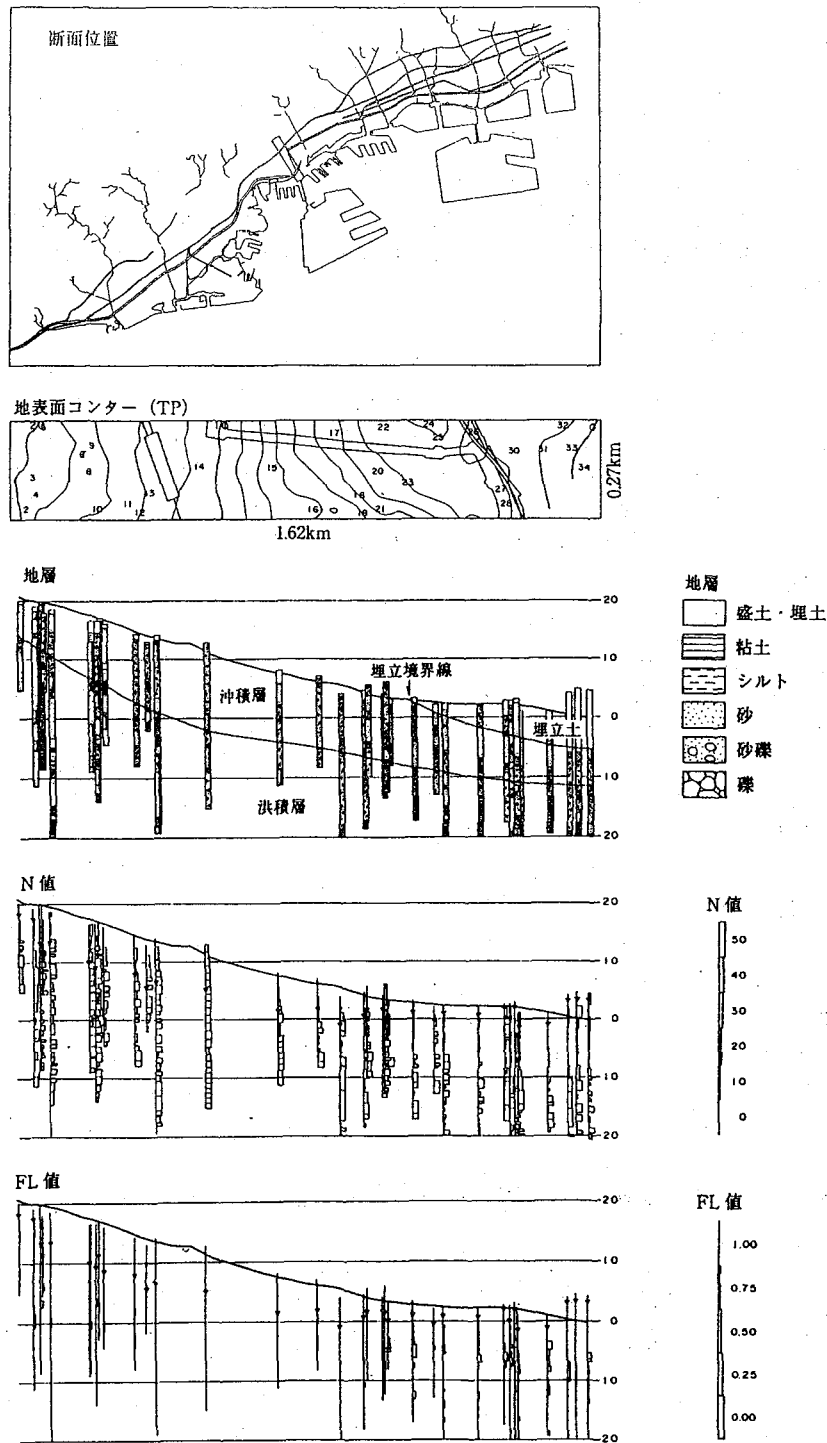


図-3 対象地全域における地盤構造 (ポートアイランド三宮間)³⁾

における液状化の発生は盛土地、海岸沿いの砂堆・砂州から緩扇状地、扇状地上の低地の範囲に限定されるといっても過言ではないものと思われる。なお、この限定された地盤での噴砂痕分布は、主として、神戸市西部の和田岬周辺と神戸市東部より西宮市東部にかけての海浜地域に集中していることが確認できる。

(2) 構造物被害と地表変位

埋立地盤の構造物被害(地下埋設物の浮上り、基礎杭の損傷、堤体の流動破壊、...)とは異なり、明らかに自然地盤の液状化に起因すると断定される大規模な構造物被害は現時点(1996年8月)に至るもほとんど確

認められていない。したがって、この基準を基に、自然地盤における液状化発生の有無を判別することはもとより、液状化発生地点を特定化することさえ困難だと思われる。

図-2 は地震発生前後に生じた対象地全域における水平・鉛直方向の地表変位を示したものである。この図は、国際航業(株)の社内技術資料であり、国土地理院の公表した震災後の成果と当社保管の震災前成果を比較することによって作成されたものである。図より、太字で示した自然地盤の水平・鉛直変位量はいずれも小さく、埋立地盤の両変位量と比較すれば一桁オーダーが小さいことが認められる。これは、自然地盤に液状化が発生しなかったか、発生したとしてもその発生による地盤変位は極めて軽微であったことを示唆している。したがって、構造物被害の場合と同様に、この判別基準によって自然地盤の液状化発生地点を特定化するのは困難だと思われる。

(3) 地盤構造

図-3 は、代表例として、ポートアイランドと三宮を結ぶ横断面における自然地盤（埋立地盤の一部を含む）の地盤構造を示したものである。この図は、(財)建設工学研究所の資料³⁾から抜粋したもので、地震発生の直前に作成されたものである。右側第2段までの図から、自然地盤は、洪積層の上に沖積層と表土層（山麓部での崖すいを含む）が堆積しており、堆積環境に応じて0～50以上のN値を持つ地層の互層より構成されていることがわかる。また、地下水位は内陸部に入るに従って深くなることも認められる（山麓部では若干浅くなる傾向がある）。これらの地盤特性に着目すれば、前小見出しの場合と同様に、この自然地盤における液状化発生の諸影響は極めて小さかったものと判断される。

同図の最下段に示した液状化の指標となる F_L 値は、岩崎ほかの方法⁴⁾に従って、N値、平均粒径 D_{50} と密度（道路橋示方書及び道路設計指針の推奨値を参考にして仮定）、地下水位及び深度と地表最大加速度（200galを仮定）より算定されている。算定の対象とされた土層はシルト質層、砂層土層及び砂礫層である。この F_L 値の分布図より、対象とした自然地盤においては、液状化が生じたと判定される（ $F_L < 1$ ）液状化層の存在は比較的少なく、その層厚も薄いことが確認される。また、液状化層の深度は深く（5m以上）、液状化層厚と非液状化層厚との関係⁵⁾から、その液状化による地盤変位はほとんど発生しなかったものと判断される。同資料³⁾において神戸市内の諸種の横断面を対象にした F_L 値の分布図が作成されているが、結果は若干異なるものの、同様の理由で液状化による自然地盤の変位は軽微であることが示唆されている。

詳細で高精度の同様な研究を継続するには、ボーリングデータの集積と追加、土質試験、地下水調査等に関する組織的な調査が必要だと思われる。また、 F_L の算定には、液状化層による免震効果、地震動特性の差異（直下型か海洋型か）、地震応答解析法の不備など解明されるべき諸種の問題⁶⁾が含まれていることも留意されるべきである。なお、資料³⁾において、上述の仮定のもとで算定した F_L 値をベースにして作成された液状化危険度マップ（ P_L 値⁷⁾による液状化危険度と地形情報のみによる液状化危険度をすりあわせたもの）は現地調査結果（噴砂痕）に比較的良く対応すると結論されていることを付記しておく。

3. 噴砂痕が集中する地域での地盤変状、地盤構造と構成材料及び建物被害の詳細

前節で述べたように、自然地盤の噴砂痕が集中している地域として、神戸市の和田岬周辺と神戸市東部より西宮市東部にかけての海浜地域（本項では代表地域として西宮市の海浜地域を選定）が抽出される。両地域における地盤変状の程度、地盤構造と構成材料の特徴及び土地利用と建物被害の程度を以下に列記する。

(1) 地盤変状の程度

a) 神戸市の和田岬周辺

この地域では、平成5年度～10年度の建設期間のもとで、神戸市地下鉄海岸線（新長田～三宮の区間）の布設が計画・施工されている。当地域の計画路線上で測定された地震発生前後の地表変位を図-4に示す。測定は国土地理院の各種基準点をベースにして実施されており、当然のことではあるが、最内陸部の測点での測定値は図-2に示した当測点付近での結果と良く対応している。図-4に示されるように、運河部と隆起部を除いた地点での鉛直変位量は8～95mmの範囲であり、北東方向で東海岸線に向かう水平変位は96～268mmの範囲である。なお、噴砂痕の観測された区域と観測されなかった区域での地表変位には明確な差異が認められず、液状化はこの地域全域にわたって発生したものと推察される。噴砂痕の観測されなかった区域は住宅密集区域に該当しており、噴砂痕が遮蔽されたものと思われる。

上記の地表変位量は、液状化が激しく発生したポートアイランド内陸部での変位量（鉛直変位：約500mm、水平変位：約1000mm）に比べれば、比較的小さい値となっている。同程度の地表変位は液状化に無関係な近隣地盤でも散見されており（図-2参照）、当地域の地盤変状が液状化発生にどの程度関与されたかを判別

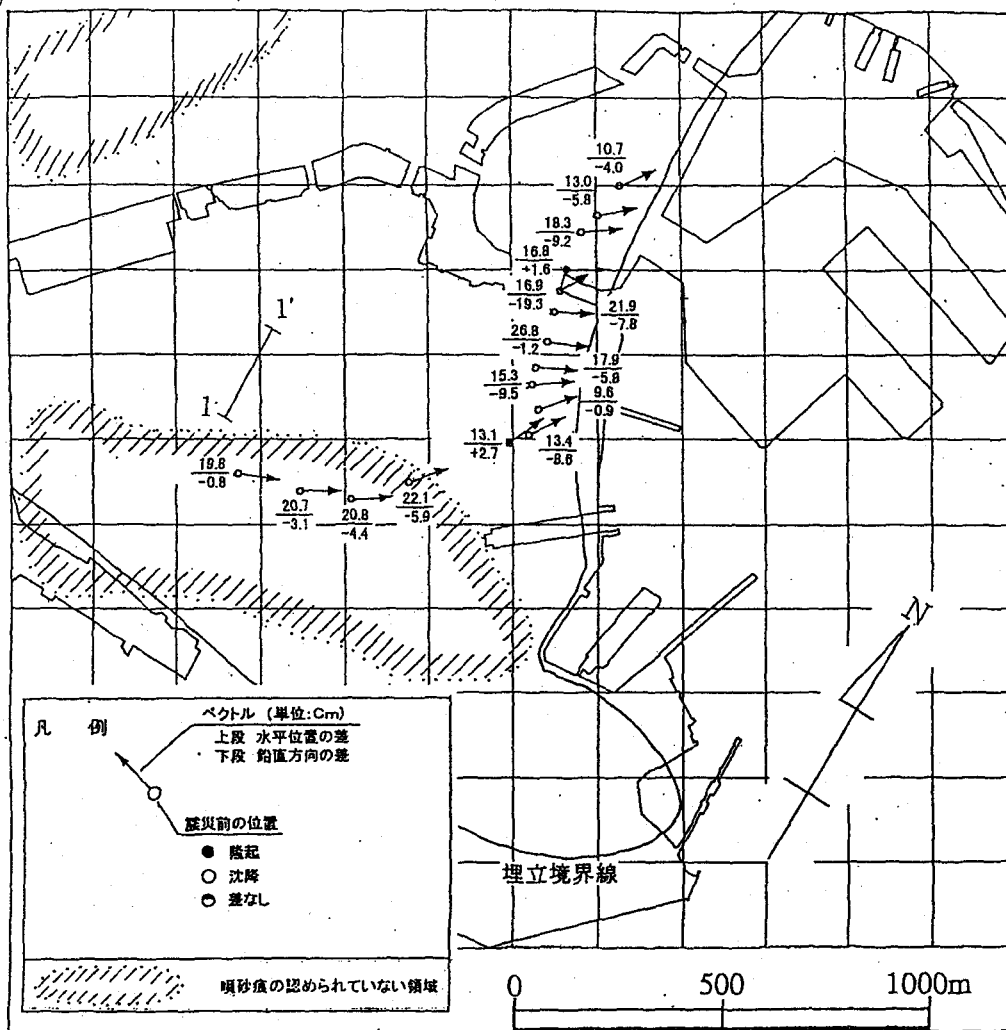


図-4 神戸市地下鉄海岸線の計画路線上での地表変位

するのは困難である。また、北東方向に移動する水平変位に関しても、同様な理由で、液状化層における側方流動に起因するものとは断定し難いようである。

b) 西宮市の海浜地域

この地域は自然地盤の噴砂痕が集中している神戸市東部より西宮市東部にかけての海浜地域を代表する地域として選定した。当地域では、西宮市防災対策課発注のもとに、神戸市の場合³⁾と同様な液状化危険度マップが作成されている³⁾。この作成と併行して高精度の水準測量が実施されており、得られた地表変位の測定結果を図-5 に示す(水平変位は確認されていない)。図に示されるように、当地域は、海岸線から内陸部に向かって、埋立境界線を上限とした埋立地盤、噴砂痕が多数観測された自然地盤及び噴砂痕がほとんど観測されなかった自然地盤の3区域に区分される。各区域の鉛直変位は、区分の順に、それぞれ 58 ~ 208mm、22 ~ 104mm、3 ~ 41mm の範囲である。

上記の測定結果より、着目している自然地盤での地盤変状が、埋立地盤及び噴砂痕が観測されなかった自然地盤での地盤変状と明確に区別されること、また、その変状の範囲は、震央から相当離れているにもかかわらず、和田岬周辺での測定値を幾分上廻っていること等が確認できる。これらは、明らかに、この自然地盤において液状化発生に起因する地盤変状が生じたことを示唆するものである。その量は、単に噴砂痕が観測されなかった自然地盤の地盤変状との差として算出すれば、鉛直方向の変位で 18 ~ 53mm の範囲だと推察される。なお、水平変位は地表・地中構造物に大きく支配されるので、液状化に関する影響を正確に把握するのは困難だと思われる。

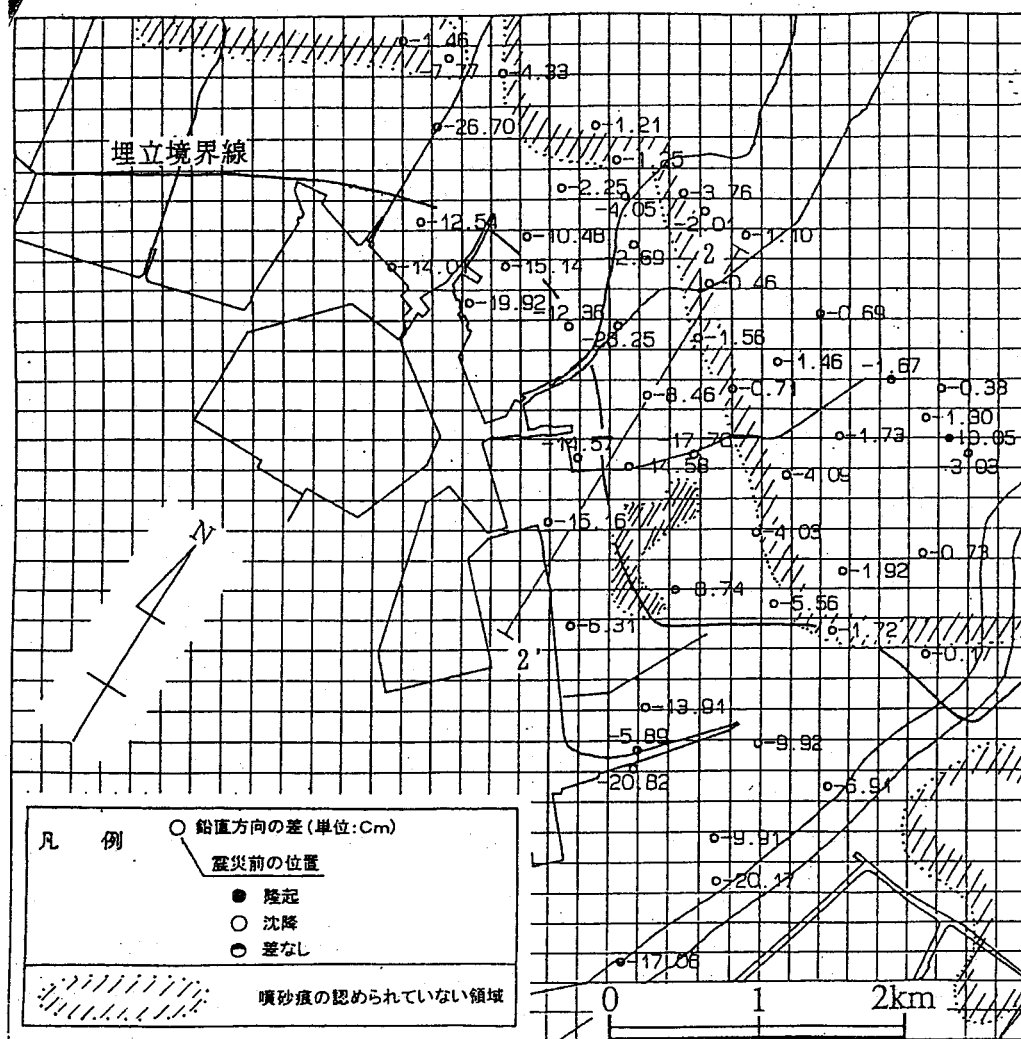


図-5 西宮市海浜地区での地表変位

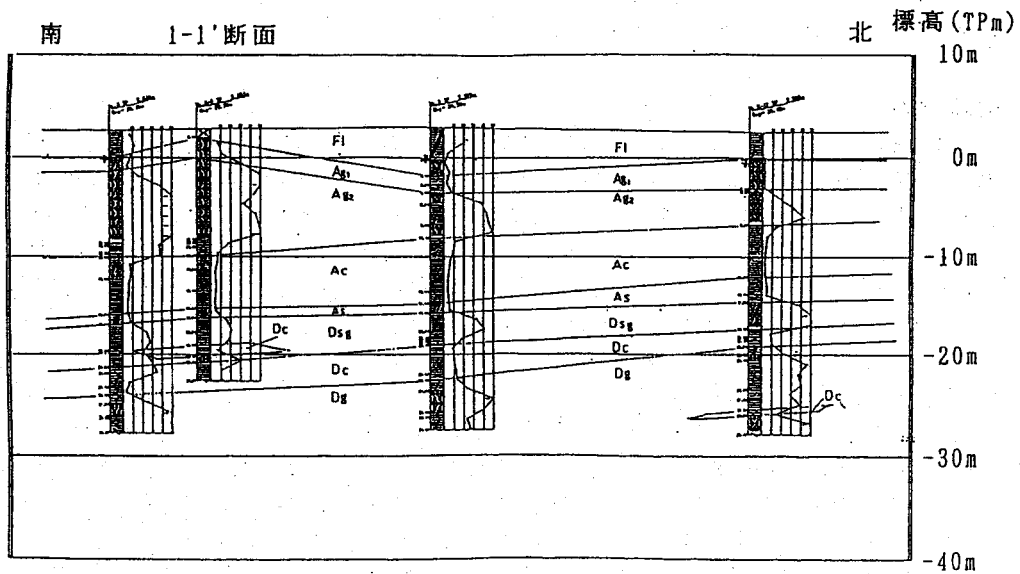


図-6 神戸市交通局御前車庫での地層断面図

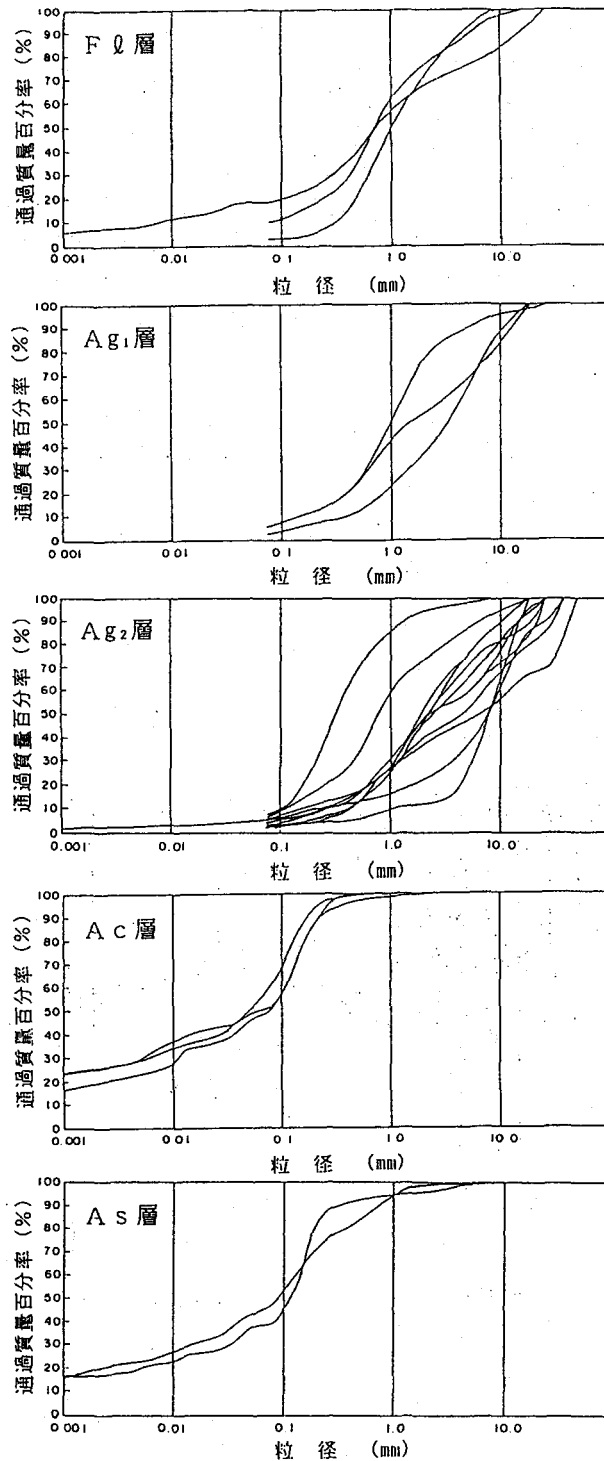


図-7 神戸市交通局御前車庫での地層別粒径加積曲線⁹⁾

(2) 地盤構造と構成材料の特性

a) 神戸市の和田岬周辺

図-6 に神戸市兵庫区の神戸市交通局御崎車庫における南北方向 (図-4 参照) の地層断面図⁹⁾ を示す。地形及び堆積過程から判断して、この地層断面は当地域を代表する断面だと思われる。噴砂痕に關与したと思われる地層においては、最上部に礫混じり砂よりなる埋土層 (F₁ 層) が 2 ~ 3m の厚さで分布し、その下部に沖積の礫混じり砂質土層もしくは砂礫層 (A_{g1}、A_{g2} 層) が分布している。このうち上部に分布する層厚 2 ~ 3m の A_{g1} 層は N 値が 10 以下と小さく極めて緩い状態である。最上部に分布する F₁ 層も N 値は総じて 10 以下であり、全体に緩い状態である。一方、A_{g2} 層は N 値が 30 ~ 50 以上と大きく、A_{g1} 層に比べると密に締

まった状態である。地下水位は GL-2 ~ 3m 付近にあり、全体に浅い状態である。図-7 は FI 層から As 層に至る各地層別の粒径加積曲線⁸⁾であるが、これによると D_{50} は FI 層で 0.7 ~ 1mm、Ag₁ 層で 1 ~ 3mm であり、粒度組成の点からいづれも液状化可能層の範囲に入っている。

以上の地盤構造及び構成材料の特徴に基づいて考察を加えれば、FI 層の下部及び Ag₁ 層は地下水位以下にあり、これらの層の液状化が観測された噴砂痕分布に大きく関与したと思われる。しかし、これらの液状化層の層厚が薄くしかも非液状化層（地下水位以浅）の層厚以下であったため⁵⁾、前述のように、顕著な地盤変状は生じなかったものと推察される。また、住宅密集地での噴砂痕の遮蔽も同様な理由によるものであろう。なお、Ag₂ 層の下部に分布する Ac 層（シルト質土層）と As 層（砂質土層）は極めて緩い状態であるが、40 % 以上の細粒分を含んでいるため、これらの層を対象にした液状化は発生し難かったと思われる。もし発生したとすれば、これらの層からの被圧間隙水の流れを考慮に入れねばならないであろう。

b) 西宮市の海浜地域

この地域における代表断面として、名神高速道路の西宮インターチェンジを交点とする南北方向（図-5 参照）の地層断面図⁸⁾を図-8 に示す。噴砂痕に關与したと思われる地層では、層厚 2m 弱の盛土層（山砂あるいは海砂層）の下部に沖積砂質土層（As 層）が 6 ~ 9m の厚さで分布している。埋立地の As 層は、層全体にわたって N 値が 10 以下と小さく、極めて緩い状態である。一方、後背地自然地盤の As 層では、数 m の上層部のみで N 値は 10 以下と小さく、中間～下層部にかけての N 値は 15 ~ 20 と大きくなっている。この傾向

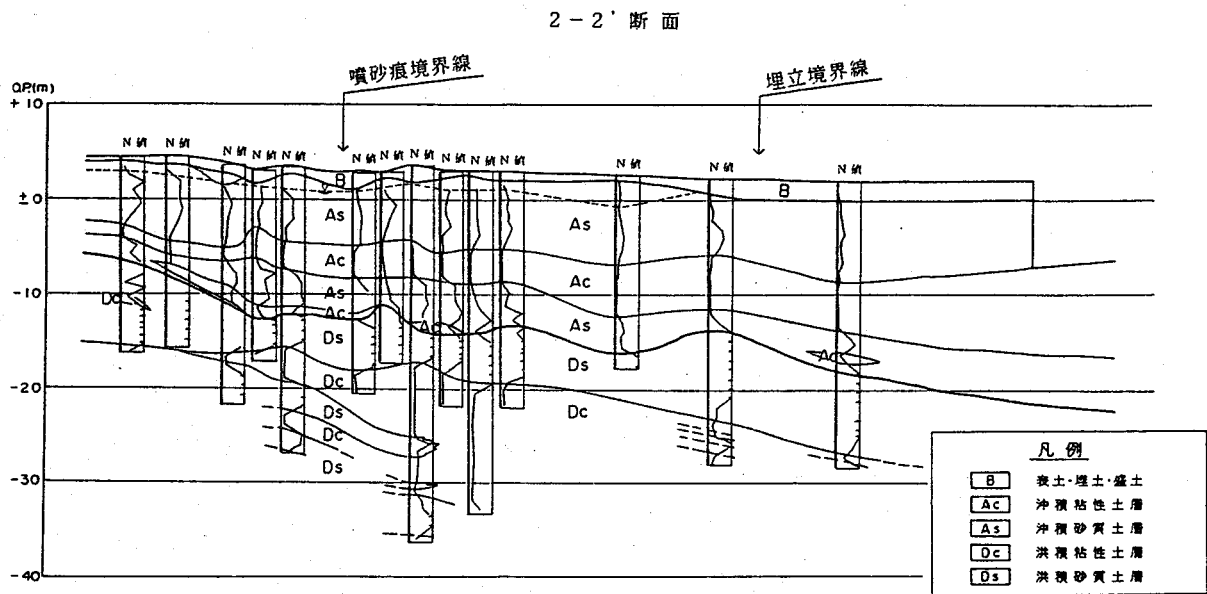


図-8 西宮市中央部での南北方向の地層断面図⁸⁾

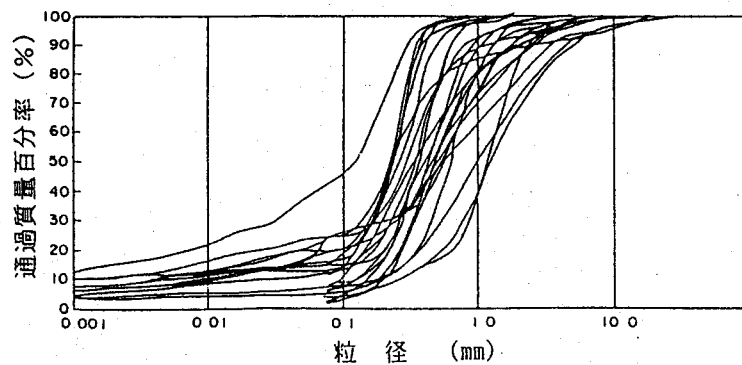


図-9 沖積砂質土層の粒径加積曲線⁸⁾

は内陸部に入るに従って顕著となり、N値が小さくなっている上層部の厚さは減少し、中間～下層部にかけてのN値は30以上にまで増加している。地下水位はGL-1～3mにあり、海浜地域であることとも関連して、全体に浅いところに存在している。図-9はAs層の粒径加積曲線¹⁰⁾であるが、これによるとD₅₀は概ね0.2～1mmの範囲にあり、粒度組成の点からも液状化可能層に入っている。

上述したAs層におけるN値の変動状況は前小見出しで述べた地盤変状の状況に良く対応している。略言すれば、As層でN値の小くなる上層部の厚さがこの地域での液状化発生の規模に関与するキーワードだと言える。なお、As層の下部に分布するAc層とAs層が液状化発生に関与したかどうかは、和田岬周辺の場合と同様に、その詳細は不明である。さらに付言すれば、山岳地が海岸線に近接する西部地域では、埋立地のAs層が15～20mと厚くなり、その層内でのN値も上層部から下層部へと増加する傾向が認められている。

(3) 土地利用と建物被害の程度

a) 神戸市の和田岬周辺

この地域は埋立地と運河部での工場地区に内陸部の低層住居地区が隣接している地域である。公園、グラウンド、学校等の公共施設も散在している。当地域の建物被害状況を図-10¹⁰⁾に示す。図によると、ごく一部に半壊のところがみられるが、大半は一部損壊か損傷無しである。周辺地域の被害と比べて被害は軽微であると言える。これは、前述したように、当地域での液状化発生の規模が小さかったことを実証するものと思われる。

b) 西宮市の海浜地域

この地域においては、埋立地では工場地区と高層・低層住居地区が混在しており、内陸部では商業地区と高層・低層住居が混在している。また、埋立島を除くすべての地区に公園、グラウンド、学校、寺社等が散在している。当地域の建物被害状況を図-11¹⁰⁾に示す。被害状況は、木造家屋で全壊及び半壊のところが散在するが、被害の軽微な一部損傷及び損傷無しの家屋が大半を占めている。鉄筋・鉄骨コンクリートの建物では、木造家屋のように全壊及び半壊のところは極めて少ない。当地域より北側のJR西宮駅から阪急西宮北口駅にかけての地域は気象庁発表の震度Ⅶの区域に入っており、これらの地域と比べると、当地域の建物被害の程度は極めて低いと判定される。これは、主として、液状化層の免震効果によるものと推察される。

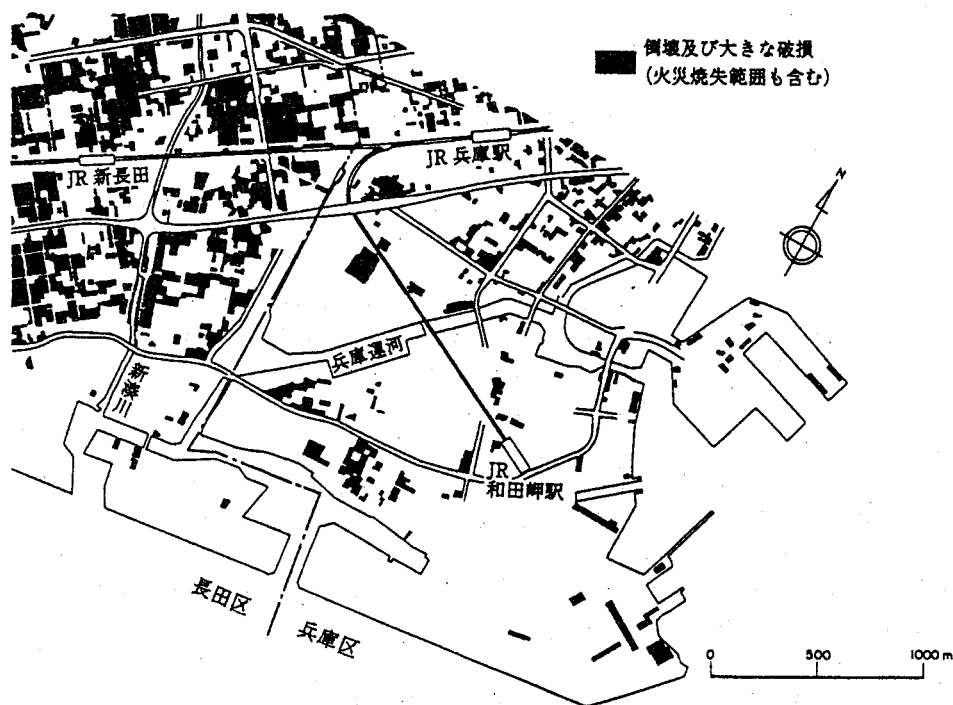


図-10 和田岬周辺での建物被害状況図¹⁰⁾

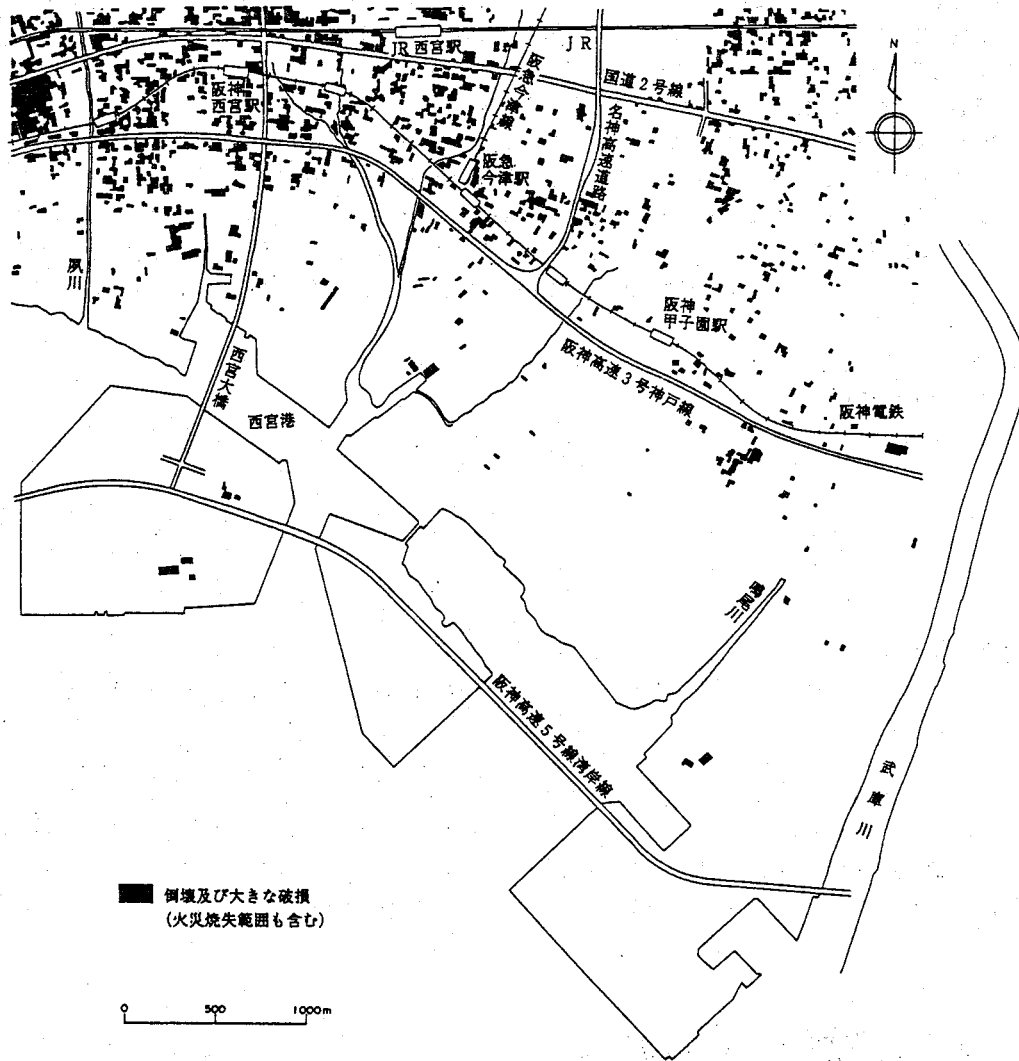


図-11 西宮市海浜地区での建物被害状況図¹⁰⁾

4. まとめ

対象地全域での自然地盤における噴砂痕の分布、地表変位及び地盤構造の概況は次のように要約される。

(1) 観測された噴砂痕分布によれば、自然地盤における液状化の発生は盛土地、海岸沿いの砂堆・砂州から緩扇状地、扇状地上の低地の範囲に限定され、この範囲での噴砂痕は、主として、神戸市西部の和田岬周辺と神戸市東部より西宮市東部にかけての海浜地域に集中している。

(2) 明らかに自然地盤の液状化に起因すると断定される大規模な構造物被害はほとんど確認されておらず、地震発生に起因する自然地盤の地盤変状も極めて軽微である。

(3) 代表例と考えられる自然地盤は複雑な地層の互層より構成されており、地下水位も比較的深く、その液状化発生による諸影響は極めて小さいものと判断される。

自然地盤での噴砂痕が集中している神戸市の和田岬周辺と西宮市の海浜地域における地盤変状、地盤構造と構成材料及び建物被害の詳細は次のようにまとめられる。

(1) 和田岬周辺での自然地盤における地盤変状は、液状化に無関係な近隣地盤の変状と大差はなく、液状化発

生に起因する地盤変状は極めて小さい。一方、西宮市海浜地域での噴砂痕が観測された自然地盤における地盤変状は、埋立地盤及び噴砂痕が観測されなかった自然地盤での地盤変状と明確に区別され、明らかに液状化発生に起因する地盤変状が認められる。

(2) 和田岬周辺においては、N値、地下水位及び構成材料の特徴から判断して、液状化は、主として、埋立土層の下部と層厚 2 ～ 3m の沖積砂礫層の上部で発生している。一方、西宮市海浜地域においては、同様な判断のもとで液状化発生の対象層は層厚 6 ～ 9m の沖積砂質土層となり、その上層部でN値の小さくなる層厚が液状化発生の規模を左右している。

(3) 和田岬周辺、西宮市海浜地域のいずれの地域においても、建物被害の程度は極めて軽微である。

謝 辞: 貴重な資料を提供して戴いた関係機関並びに関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土庁防災局震災対策課ほか監修, 液状化対策検討委員会編集: 液状化マップと対策工法, (株)ぎょうせい, pp.120, 1994.
- 2) 田中真吾: 神戸および阪神間の地形分類, 阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)(地盤工学会阪神大震災調査委員会) pp.56-61, 1996.
- 3) (財)建設工学研究所, (株)阪神コンサルタンツ: 下水道管路の地震時の影響についての基礎調査, pp.56, 1995.
- 4) 岩崎敏男ほか: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.641-647, 1978.
- 5) Ishihara, K: Stability of natural deposits during earthquakes, Proceedings, Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985.
- 6) 柴田徹, 岡二三生ほか: 液状化と地盤変状, 阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)(地盤工学会阪神大震災調査委員会), pp.171-228, 1996.
- 7) 岩崎敏男ほか: 地震時地盤液状化の程度の予測につい, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.
- 8) 西宮市防災対策課, 中央復建コンサルタンツ(株): 液状化現象等調査報告書, pp.98, 1996.
- 9) 神戸市交通局, 中央復建コンサルタンツ(株): 神戸市高速鉄道海岸線御崎公園車庫土質調査報告書, pp.196, 1993.
- 10) 国土地理院: 平成7年度兵庫県南部地震災害現況図, 1995.

筆者: 1) 西 勝、神戸大学都市安全研究センター、教授; 2) 吉田信之、神戸大学都市安全研究センター、助教授; 3) 奥村孝幸、神戸大学工学部建設学科、学生

