

阪神・淡路
大震災
特集

兵庫県南部地震による液状化災害

嘉門 雅史*・三村 衛*

Liquefaction due to the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake

Masashi KAMON* and Mamoru MIMURA*

Abstract

The 1995 Hyogoken-nambu earthquake struck the Kansai area at 5:46 on January 17, 1995, causing catastrophic damage in Kobe and adjacent cities. In terms of geotechnical problems, liquefaction of loose sand deposits occurred mainly in reclaimed land. It is noted that non-liquefiable soils such as decomposed granite as well as cohesive soils with fine particles were ejected during this earthquake. Based on the field survey, ground improvement is proved to be effective as a countermeasure for liquefaction. It is pointed out that the simplified liquefaction assessment methods should be applied, under the consideration of their premises and limitations.

キーワード：液状化抵抗，液状化予測法，埋立地盤，ウォータフロント，地盤改良

Key Words : liquefaction resistance, liquefaction assessment, ground improvement, reclaimed land, waterfront

1. はじめに

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震（マグニチュード7.2）は、阪神地域、特に神戸市とその周辺地域に壊滅的な被害を与えた。地盤に関わる災害の中で最も目を惹いた

のは、広範囲に起こった液状化現象である。液状化は「緩く堆積した砂地盤が地震動による繰り返しせん断を受けると、その堆積構造が破壊され、粒子がより密な状態へ移行しようとする（体積が減少しようとする）。この時地盤の排水能力を上回る過剰間隙水圧が発生し、有効応力が減少、も

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討論は平成8年7月末日まで受け付ける。

しくは消失することによって土粒子は摩擦抵抗を失って水中を浮遊するような状態（液体状）になる。」という現象である。若松¹⁾は埋立地における液状化発生を歴史的視点から整理している。これによると、1855年の安政地震以来、液状化の被害が記録に残っており、大部分の地震で液状化現象が起こっていることがわかる。またその発生地点も全国にわたっていることも指摘されている。ところが、液状化現象が地盤工学の分野で研究対象として認識されたのは、1964年の新潟地震の際、建物、橋梁、護岸、埋設管、港湾施設など、ありとあらゆる構造物が液状化によって大きな被害を受けて以来のことであり、このことがその後の液状化研究の進展の端緒となった。

神戸港は水深が深く、短期間の埋め立てにあたって必要となる多量の土砂の確保が問題となったが、六甲山系の背山を土採り場として利用し、この跡地を有効に活用する、いわゆる臨海部と内陸部で同時に土地を生み出す開発手法によって埋め立て

が推進された。表1に1953年以降の神戸・阪神間の埋立事業の概要を示す²⁾。第1期事業は1953年から1970年にかけて行われた。この時期に埋め立てられたのは、外浜、駒ヶ林、刈藻島といった神戸市西部の地域、および住吉浜、御影浜、魚崎浜、深江浜などである。ポートアイランド、六甲アイランドという大規模な埋立地は第2期に属しており、1966年から埋立事業が開始され、現在はポートアイランド第2期工事が進行中である。第1期埋立が主として神戸港の港湾施設の拡充、下水・ごみ焼却場の建設といったいわゆる高度経済成長に伴う基盤整備に主眼を置いたものであったのに対し、第2期埋立は神戸港の拡充とともに情報・文化の交流拠点の建設という、より高度に成熟した目的を持って進められた。県東部の芦屋、西宮市においても南芦屋浜、西宮浜、甲子園浜といった埋立地が近年続けて造成され、阪神高速道路湾岸線がこれらを結ぶ動脈として大阪～神戸間を結んでいる。埋立材料の特徴は、地域性を反映

表1 神戸・阪神間の埋立事業の概要²⁾

	埋立地名	事業主体	期間	埋立材料	埋立材料採取地
第 一 期	外 浜	神戸市	1957～1967	六甲花崗岩	神戸市須磨区
	駒ヶ林南	〃	1957～1967	〃	〃
	刈藻島	〃	1963～1968	〃	〃
	速矢浜	〃	1960～1966	〃	〃
	灘浜東	〃	1953～1967	〃	神戸市灘区
	御影浜	〃	1960～1968	〃	〃
	住吉浜	〃	1960～1968	〃	〃
	魚崎浜	〃	1961～1968	〃	神戸市東灘区
	深江浜	〃	1964～1970	〃	神戸市須磨区
第 二 期	ポートアイランド	〃	1966～1980	六甲花崗岩	神戸市須磨区
	六甲アイランド	〃	1972～1990	六甲花崗岩、大阪層群	神戸市須磨区、西区
	ポートアイランド (第2期)	〃	1986～	神戸層群、大阪層群	神戸市西区
	摩耶埠頭	運輸省	1959～1967	六甲花崗岩、海砂	神戸市灘区、神戸港
	芦屋浜	兵庫県	1969～1975	海砂、領家花崗岩	淡路島、岡山県
	南芦屋浜	〃	1971～	領家花崗岩	淡路島
	西宮浜	〃	1971～1992	〃	〃
	甲子園浜	〃	1971～1994	〃	〃
	鳴尾浜	私企業	1967～1975	〃	〃

して花崗岩、まさ土が中心となっているが、比較的古い埋立地が六甲花崗岩で造成されているのに対し、新しい埋立地には六甲花崗岩だけでなく、大阪層群や神戸層群の土、淡路島の領家花崗岩なども用いられている。このように、神戸周辺の埋立地は主として六甲山系に多く見られる花崗岩、まさ土によって形成されている。従来、まさ土は液状化に対しては強い材料と言われてきた。ところが、今回の兵庫県南部地震によって、神戸・阪神間のまさ土による埋立地を含む広い範囲で液状化現象が確認されている。また非常に細かい成分も噴砂痕から発見されている。広範囲にわたって発生した液状化に起因して、大阪湾岸に展開している埋立地や盛上構造の河川堤防では液状化の発生と、それに伴う上木構造物の大規模な被害が発生し、社会的、経済的に大きな打撃を被った。また、岸壁の破壊は全体の90%に及び、神戸港は実質的にその機能が全く麻痺するに至った。これによる日本経済への悪影響もまた計り知れない。一方、内陸部においても地下水位の高い箇所や埋め戻された地区では大規模な噴砂が認められており、これに誘発された大規模な斜面崩壊が発生した箇所もある。地震多発国と自他ともに認める我が国においても、こうした都市近傍の埋立地や埋立人工島が直下型地震に襲われたのは初めてのことであり、過去の経験や知見を越えた現象が各地で起こり、地盤工学者に新たな問題を投げかけている。

本報告では、液状化現象について、その発生地点と地域的な特徴について概観した後、兵庫県南部地震による液状化の特徴的な挙動、液状化が構造物に及ぼした影響、液状化防止工の効果、液状化予測手法とその問題点について説明する。

2. 兵庫県南部地震における液状化の発生とその特徴

今回の兵庫県南部地震によって発生した液状化現象の特徴としては、以下のような点が指摘できよう。

[1] 震源から離れた遠方でも液状化が発生している。例えば震源から東へ約90kmの滋賀県草津市において液状化が確認されているし、南側では徳

島市川内町で、西側では加古川市においても液状化が発生している。このように、限定された領域ではなく、非常に広範囲にわたって液状化が発生したことがわかる。

[2] 従来の定義では液状化危険土にはいないような、粒径の粗い土から逆に細かい土までが噴砂痕から発見されている。大阪湾岸の埋立履歴と噴砂痕から採取した土の粒度分布を調べた結果をまとめたものが図1である。図中、日本港湾協会³⁾による液状化の危険性のある粒径の範囲を併せて示している。大部分のサンプルは従来指摘されている液状化危険領域には入っているが、いくつかの地点から採取した土は、非常に細かい粒径の上を含んでいることがわかる。また、まさ土は逆に粒径がかなり大きく、従来の基準に従えば液状化しないとされている土であることがわかる。

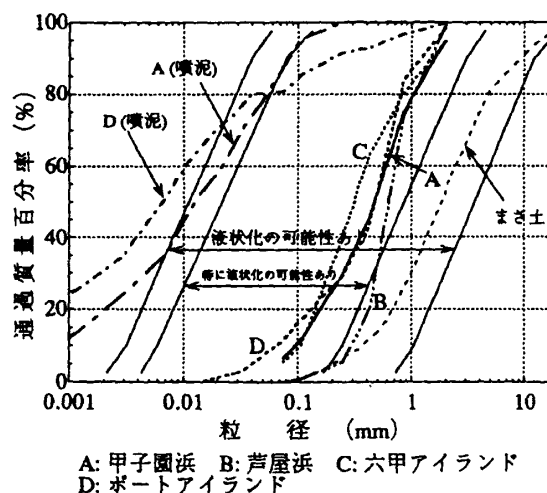


図1 兵庫県南部地震による噴砂の粒度特性

[3] 埋立地や人工島のようないわゆるウォーターフロントの緩い砂地盤で液状化が発生しやすいことは、地盤工学者の間では半ば常識として捉えられていたが、今回の地震では、内陸部においてもかなりの液状化が発生した。この場合のキーワードは、「高い地下水位」と「旧軟弱地盤の埋戻し」である。液状化は水のないところでは発生しないので、地下水位の高低が重要な要因になるという点は容易に理解できるが、第二のポイントである旧軟弱地盤については、通常、現在すでに全く異なっ

た構造物ができており、その地点が過去において池、水田ないしは河川のような水に深く関わった地域であったという痕跡はほとんどない場合が多い。したがって液状化の発生などということは最初から注意の外であったと考えられる。しかし、宝塚市、西宮市などの内陸部でも液状化とそれに伴う地割れの発生が各所で認められており、今後の対策についての警鐘となろう。

2.1 ポートアイランド

ポートアイランドは神戸市中心部の南側に埋め立てられた人工島で、昭和42年から55年にかけて造成された(第1期)。総面積は436ヘクタールで、大型船舶が接岸可能なコンテナバース、ホテル、国際会議場、アミューズメントパークといった公共施設をはじめ、個人向けの高層ビル型集合住宅も共存する最も洗練された近代都市となっている。その後さらに南側への展開を目指して、第2期工事が現在も進行中である⁴⁾。ポートアイランド(第1期)における液状化発生分布図⁵⁾を図2に示す。比較的重要な構造物、特に高層ビルが集中している島中央部はサンドドレーン、プレローディング、バイプロコンパクションといった各種地盤改良がなされている。図2からも明らかなように、こうしたエリアでは液状化現象がほとんど見られない。これに対して島の周辺部は、岸壁と物揚場、倉庫などに利用されていることが多く、コストのかかる地盤改良は施工されていない。こうした部分では広範囲にわたって液状化による

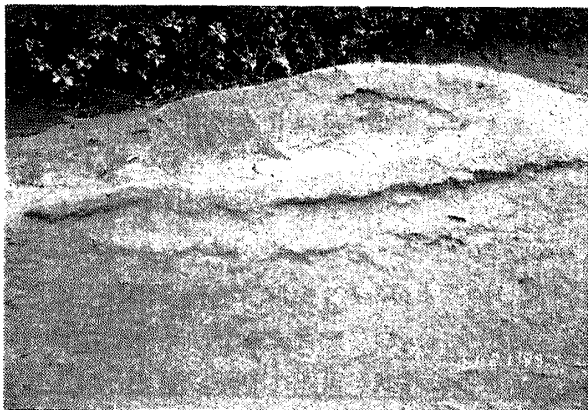


写真1 ポートアイランドにおける噴砂痕

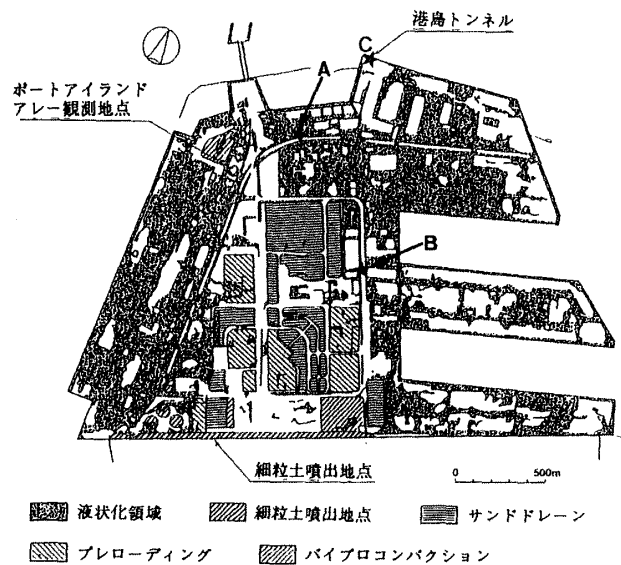


図2 ポートアイランド(第1期)における液状化発生分布と地盤改良実績 (Shibata et al.⁵⁾に加筆)

噴砂が確認されている。

写真1は図2上に示した地点Aにおける噴砂痕である。噴砂の形状は従来の地震によるものときほど変わらないが、中央部に非常に細かい粘上状の堆積物が認められる。図1からも明らかなように、ポートアイランドの噴砂痕からは非常に細かい上粒子が発見されている。こうした一連の調査結果から、この地点から吹き出した土が実際かなりの細粒分を含んでいることは明らかである。

ポートライナー中埠頭駅付近(図2における地点B)におけるピアの様子を写真2に示す。一見するとあたかも基礎が地盤から抜け上がっている



写真2 液状化に伴うポートアイランド基礎周辺地盤の沈下

ように見えるが、実はピアは杭で支持されており、地震以前の状態を保っている。逆に地盤全体が液状化に伴う体積圧縮によって大きく沈下したため、このような状況が現れたわけである。この地点における地盤の沈下量は、約60cmに達している。全島で平均すると沈下量は20cmと報告されている。

ポートアイランド(第2期)における液状化分布図⁵⁾を図3に示す。図中、白く残した箇所は埋立前、すなわち海上からサンドドレーンを打設した部分を、斜線をつけた箇所は埋立後に陸上からサンドドレーンを打設した部分を表している。同図から明らかなように、陸上打ちのサンドドレーン打設領域では液状化の発生が認められないのに対し、埋立前にサンドドレーンを打設したところでは、液状化の痕が多く確認されている。元々サンドドレーンは液状化対策工ではなく、軟弱粘上層の圧密促進のために行われるものであり、これによって液状化の有無を議論するのは本質的なことではない。しかしながら、調査・踏査の結果、陸上打ちサンドドレーン打設領域での液状化発生がほとんど認められないことが明らかになり、打設時に埋立地盤が締め固められたことによって副次的に液状化防止に寄与した可能性が否定できない。この点については、今後さらに研究する必要があり、ここでは事実の記載のみにとどめておく。

2.2 六甲アイランド

六甲アイランドはポートアイランドよりも後に造成された埋立地で、ポートアイランドの東に位置する東西約3.4km、南北約2.0km、面積580ヘクタールの矩形に近い形状の埋立地である⁴⁾。六甲アイランドにおける液状化の分布⁵⁾を図4に示す。ポートアイランドと同様、地盤改良が施されている箇所を併せて示している。サンドドレーンと一部バイブロコンパクションによる地盤改良が行われている。液状化の発生の程度はポートアイランドと比べてかなり小さく、護岸背面を中心とした島の周辺部に集中していることがわかる。またサンドドレーン打設地域で若干の液状化痕が見られる他は、地盤改良施工地域では深刻な液状化の発生は認められない。六甲アイランドにおいて

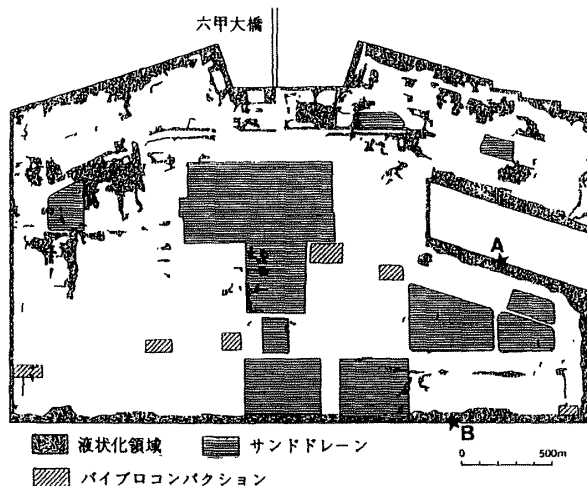


図4 六甲アイランドにおける液状化発生分布と地盤改良実績 (Shibata et al.⁵⁾に加筆)

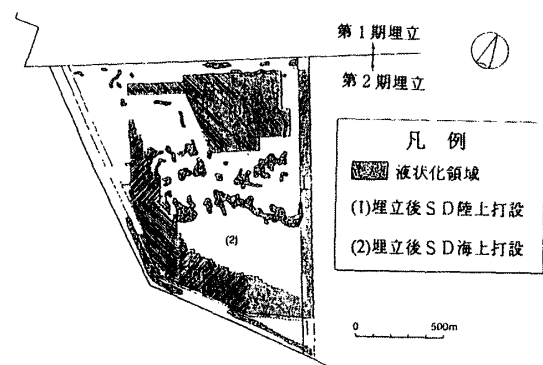


図3 ポートアイランド(第2期)における液状化発生分布と地盤改良実績 (Shibata et al.⁵⁾に加筆)

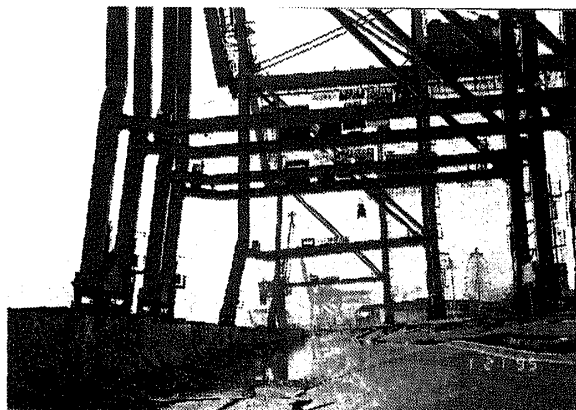


写真3 六甲アイランドの岸壁の被災

は、岸壁周辺における液状化が際だっている。写真3に岸壁の被災事例(図4における地点A)を示す。六甲アイランドに限らず、今回の地震で被災した岸壁に共通の変状パターンとして、護岸が前面(海側)に側方移動し、背面の埋立地に大きな亀裂と沈下が生じている。その結果、岸壁に備えられているクレーンが破壊され、コンテナの荷揚げが不可能となり、港湾機能が麻痺するという事態に陥った。神戸・阪神間の岸壁の代表的な構造と被災パターンを六甲アイランド・コンテナバース6(図4における地点B)を例にとって図5に示す。大阪湾に厚く堆積している軟弱な沖積粘土層は砂で置換され、その上に捨石マウンドを造ってコンクリート製のケーソンを設置し、根固め、裏込石を置いて背面を埋め立てる、いわゆる重力式の岸壁が建設されている。液状化の関与に限って議論すると、置換砂、捨石マウンド、背面埋立地における液状化の有無が岸壁の崩壊にどのように寄与するのかが問題となる。及川と輪湖⁶⁾は、ケーソンは捨石マウンド上を滑動したのではなく、置換砂および捨石マウンドを含む下部の地盤の変形によって生じたと結論づけている。岸壁被災箇所では、捨石へのケーソンのめりこみ現象が共通して見られるが、捨石部に部分的液状化(完全に液体状になるのではなく、いくばくかの水圧上昇によって有効応力が減少し、これに伴ってケーソンを支える強度が低下した)が発生したことも考えられる。嘉門ら⁷⁾の報告によれば、N値50以上の洪積砂礫層上に直置きされたケーソンが15m以上滑動したという事例も確認されている。

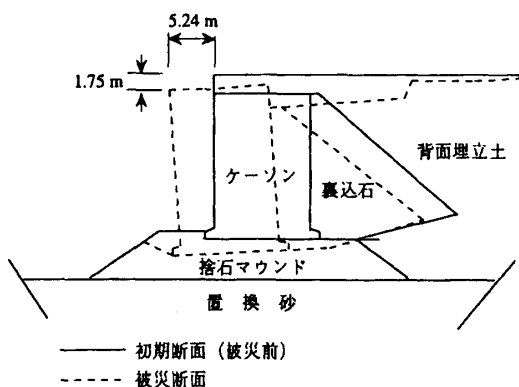


図5 重力式岸壁の被災パターン

この場合、下部地盤の液状化は当然生じていない。つまり、ケーソンは下部地盤の液状化を伴わずに地震力によって硬い地盤上を滑動したことになる。重力式構造物の滑動に対して、慣性力の効果が大きいことは言うまでもないが、これに液状化の影響がどのように付加されたのかについての合理的な説明は現在のところなされていない。この挙動の解明が今後の大きな課題として残されている。

2.3 阪神間の埋立地

阪神間の埋立地の造成は1950年代からスタートし、現在もいくつかの箇所では埋め立てが進行中である(表1参照)。

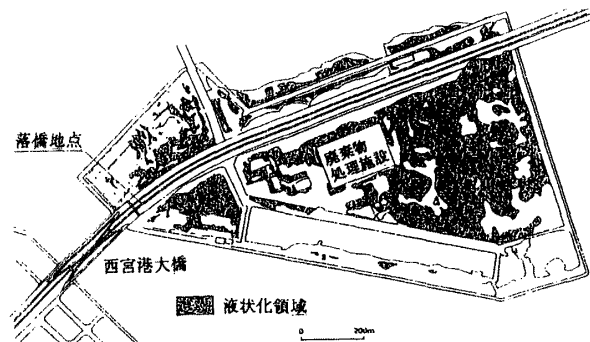


図6 甲子園浜における液状化発生分布 (Shibata et al.⁵⁾に加筆)

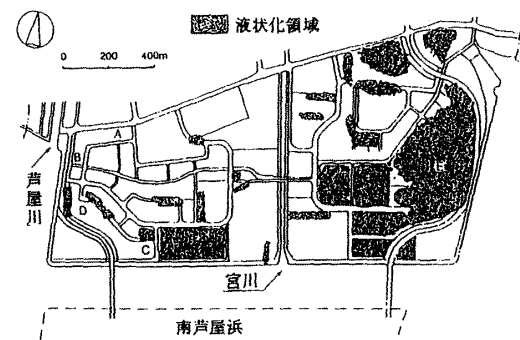
甲子園浜における液状化発生分布⁵⁾を図6に示す。甲子園浜では、埋立材料としてまさ上が用いられており、ここでも従来のまさ上は液状化しないという定説が覆される結果となっている。一方、同時に粘上状の細粒上も噴出しており、粗粒上から細粒上にわたる広範な粒径の上が液状化によって噴出したことがわかる。また液状化はほぼ全島的にわたって発生している。ここでは隣接する西宮浜をつなぐ阪神高層道路湾岸線の西宮港大橋が落橋するという事故が起こっている。写真4に落橋した西宮港大橋の橋脚部分を示す。この橋脚のすぐ海側には甲子園浜の護岸があるが、地震時の液状化によってかなり海側へ側方移動しており、これに連動して橋脚基礎にも影響が及んだものと考えられる。事実、写真4でも橋脚周辺の地盤に



写真4 西宮港大橋橋脚周辺の地盤変状



写真5 芦屋浜における液状化

図7 芦屋浜における液状化発生分布
(Shibata et al.⁵⁾に加筆)

裂が生じており、液状化に伴う砂地盤の流動によって橋脚基礎周辺地盤に異常が生じていることを示している。

芦屋浜における液状化発生分布⁵⁾を図7に示す。芦屋浜の埋め立ては1969年から1975年に行われ、領家花崗岩とともに粒度の比較的揃っ

た海砂が埋立柱として用いられているのが特徴である。沖積粘土層は3~5m程度でその上に約13~15mに及ぶ埋立柱が載っている。この地区における噴砂は写真5に示すようにこの海砂が中心となっており、激しい噴砂によってその上に立てられた民家が傾いてしまう被害が多発した。

3. 液状化対策工とその効果について

埋立柱地や人工島が地震に対して液状化を起こしやすいことは、ある程度わかっていたため、重要な地点では液状化対策が施されていた。したがって今回の地震は図らずも各工法の有効性を判定しうるデータを与えることとなった。本章では、液状化防止工とその効果について議論する。ポートアイランドと六甲アイランドにおける液状化発生地域の分布を示した図2~4でも明らかのように、地盤改良を実施した箇所では液状化の発生が見られないか、もしくは非常に軽微であることがわかる。コンパクション系のいわゆる締固め工法はもともと地盤の密度を増大させる目的で実施されるので、この結果はまさに目的に合致したものであるが、本来軟弱粘土層の圧密促進を目的として施工されるサンドドレーン打設地域でも液状化の発生が抑えられていることが注目される。特に図4のポートアイランド第2期埋立柱地では、埋め立て前の海上からのサンドドレーン打設地域で液状化発生が認められるのに対し、埋め立て後に陸上からサンドドレーンを打設した場合、液状化の発生が非常に少ないことを既に指摘した。サンドドレーンの排水効果のみが有効に作用するのであれば、こうした違いは説明できない。実施された種々の地盤改良工法の効果を地盤の沈下量で評価したもの⁸⁾が図8である。液状化の程度が低いと過剰間隙水圧の発生量が小さく、消散に伴う沈下量も小さくなる。これによると、無処理地盤では、40~50cmの沈下が平均的に生じている。これを両人工島の埋立柱層厚で基準化してひずみレベルを求めると、3~5%に相当し、室内試験の結果と比較して妥当な圧縮ひずみである。サンドコンパクション工法、ロッドコンパクション工法の効果は非常に大きく、沈下は全く発生していない。この

結果は、これらの工法で改良された地盤では液状化が発生していないことを表している。サンドドレーン工法、プレローディング工法という圧密促進工法によって改良された部分は、前述したように、本来の目的とは別のメカニズムによって埋立地盤がいくらか締固められることによって液状化の発生を抑えた可能性がある。例えば、プレローディングは、地盤を過圧密状態とすることによって上の強度を増加させ、液状化に対して地盤としての抵抗力を強く発揮される結果となった（永瀬ら⁹⁾参照）。また、サンドドレーンについては、打設時の振動による締固め効果があったとする考え方もあり、今後の検討課題であろう。

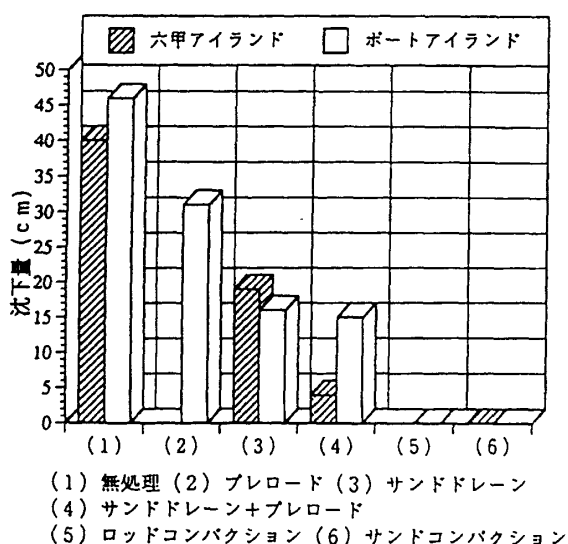


図8 地盤沈下量から評価した地盤改良の液状化防止効果⁹⁾

4. 液状化したまさ土と沖積砂の強度について

運輸省によって調べられた、地震前後のポートアイランドと六甲アイランドにおけるN値の深度方向分布¹⁰⁾を図9に示す。いずれもばらつきが大きく、際だった特徴を見いだしにくいものの、やや地震後のN値は増加している傾向がある。ポートアイランド港島地区(図2の地点C)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。現地地盤条件を図10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上層があ

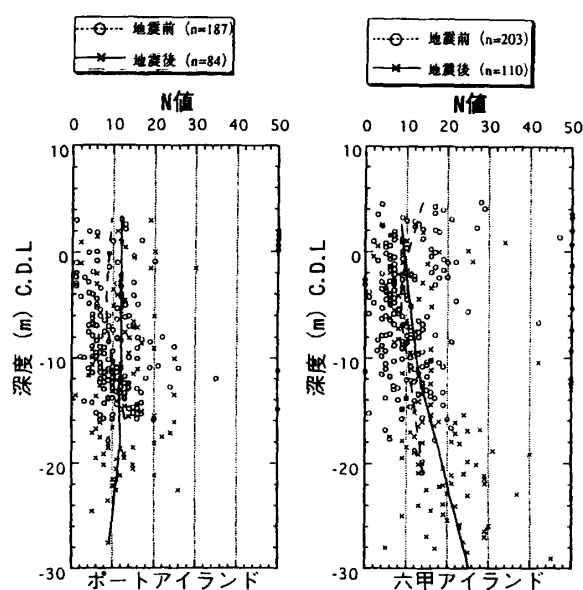


図9 地震前後におけるN値の変化¹⁰⁾

り、その下に玉石混じりの砂層を夾んで、沖積粘上層(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 0.5kgf/cm^2 で、深度23m付近の沖積砂層の試料に対しては 2.0kgf/cm^2 で圧密させた後(いずれも背圧 1.0kgf/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11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20回での液状化強度は約 0.21kgf/cm^2 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てしまった可能性が指摘できよう。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。

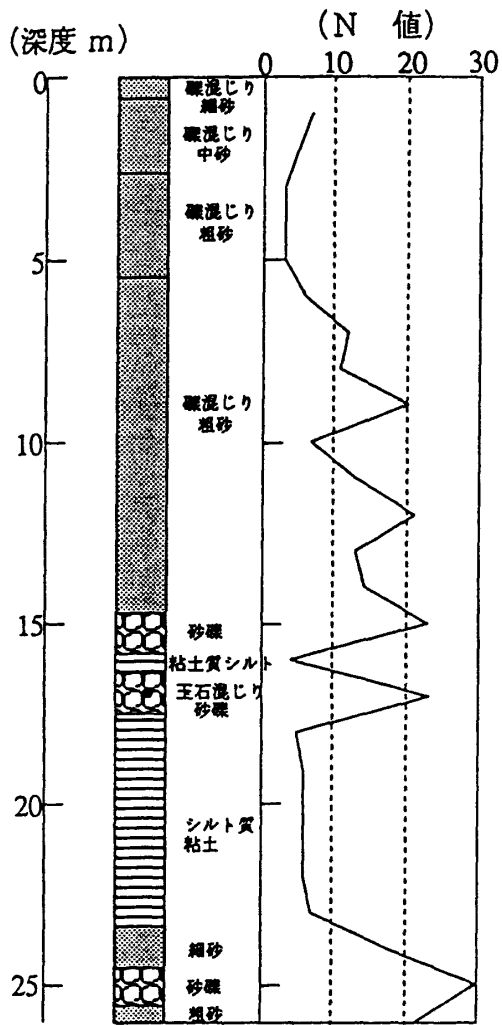


図10 港島地区の土質柱状図

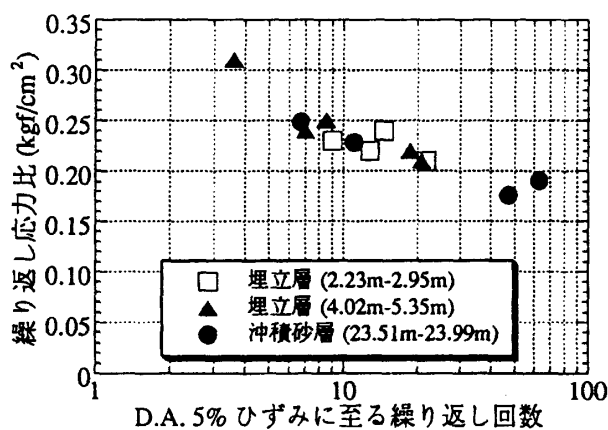


図11 港島地区から採取した砂の液状化強度曲線

5. 液状化予測手法とその問題点

液状化の発生の予測手法は、通常、概略判定法、簡易予測法、詳細予測法の3つに大別される。概略判定法は、微地形区分、過去の地震による液状化履歴調査等に基づいて、液状化の可能性についての目安を与えるものであるが、判定の精度はあまり期待できず、予備的な判定方法と考えられている。また数値解析に基づいて行われる詳細予測法は、土の構成式、数値解析法に対する高度な知識を必要とし、簡便性という点で一般的とはいえない。これに対して簡易予測法は、地盤の設計に際して実施される標準貫入試験結果や室内振動三軸試験結果を利用することができ、判定精度もかなりよいことから実務設計に広く取り入れられている。簡易予測法には限界N値法と F_L 値法がある。

限界N値法は、文字どおり測定されたN値が所定の限界N値より小さく、かつ地下水位以下にあって液状化しやすい粒度分布である場合に液状化の可能性があると判定する方法である。この方法は簡便である反面、地盤深度（拘束圧）と地震の強さに関する指標が含まれていない。このため、深度、細粒分含有率等をパラメータとした新基準の導入が行われ、現実に対応できるように改善されてきている。

これに対して F_L 値法は、ある深度における液状化強度比 R をN値や粒径からの推定、もしくは振動三軸試験によって得られる液状化強度から求め、その上に地震時に加わる繰返しせん断応力比（地震時せん断応力比） L を地表最大加速度等から推定し、両者の比をとって液状化に対する抵抗率 F_L ($F_L = R/L$)を求める。そして $F_L > 1$ であれば液状化の可能性が小さく、 $F_L \leq 1$ であれば液状化の可能性があると判定する方法である。井上・安田¹¹⁾は簡易予測法による液状化判定のフローを図12のように提案している。液状化予測の手順的には非常にスマートに判定されるはずであるが、実際の適用に際しては様々な問題点が残されている。現在用いられている各種設計指針における液状化の取り扱い方を表2¹²⁾に示す。 F_L 値法に注目すると、液状化強度 R は岩崎・龍岡の

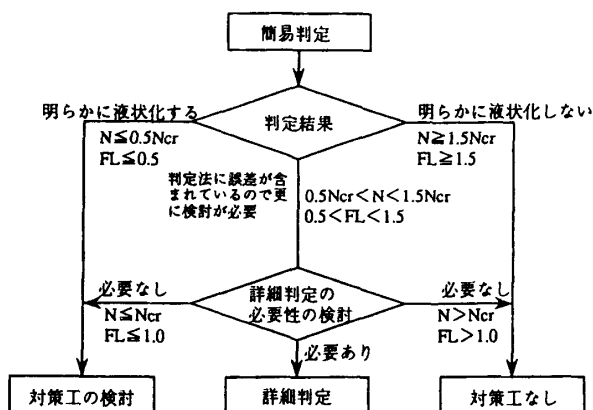


図12 液状化発生予測のフロー11)

方法¹³⁾、または時松・吉見の方法¹⁴⁾等に基づいており、基本的にはN値、鉛直有効応力、 D_r 、 D_{50} 等から計算するか、振動三軸試験結果を用いることになる。したがってRの決定方法によって同じ土に対して異なった液状化強度を与えることになり、この点には十分注意を払う必要がある。また判定に用いる水平震度は、地域別補正係数、地盤別補正係数、重要度別補正係数といった補正係数を積の形で内包しているため、同じ地震に対して幅をもって得られるだけでなく、想定地震動そのものの相違によって大きく異なることがわかる。このため、当然の帰結として地震時せん断応力比Lの値も相当の範囲にばらつくことになる。このように、液状化強度比R、地震時せん断応力比Lともにある地盤に対して一義的に決定されるものではない。したがって、R/Lとして規定される F_L 値もある地盤、ある地震に対して唯一通りに決定されるものではないという点には十分注意する必要がある。

F_L 値法によって液状化の可能性が考えられる場合や重要度の高い構造物を設計するような場合には詳細予測法による判定を行うことになる。詳細予測法では、液状化に伴う地盤の過剰間隙水圧上昇、塑性変形量、さらには地盤および地盤～構造物系の安定性を数値解析(地震応答解析)によって検討する。地震応答解析はさらに液状化に伴う水圧上昇とそれに伴う地盤の軟化現象を直接考慮するか否かによって全応力法と有効応力法に分類

される。詳細予測法を用いれば、地盤内の応力の情報がより細かく、正確に把握できるが、既に述べたように、実務設計を考えると必ずしも現実的な方法とはいえないのが現状である。

以上簡単に液状化予測法について概観したが、いずれの方法も一長一短があり、その適用にあたっては得られた結果に対する慎重な検討が必要である。

6. おわりに

兵庫県南部地震によって神戸・阪神間の広範な領域で液状化の発生が認められた。本報告では、今回の液状化の発生地域、特徴、地盤改良の効果について総括するとともに、液状化予測法が有する問題点について簡単に説明した。得られた知見をまとめると以下ようになる。

[1] 神戸・阪神間に展開されている埋立地、人工島において広範囲かつ大規模な液状化が発生した。噴砂痕の調査から、まさ上のような粗粒上からシルト粒径の細粒上にわたる広い範囲の粒径の上が確認された。また、噴砂の形態が表層部の地盤の強度によって変化することがわかった。すなわち、表層まで比較的軟弱な場合はクレーター型の噴砂が、内陸部や埋立地であっても表層が硬いクラストになっている場合には、地割れから砂が吹き上げる形の噴砂が発生する。

[2] 埋立地、人工島の液状化に起因する重力式岸壁の崩壊が多数発生した。置換砂、背面埋立上の液状化が岸壁の崩壊機構にどのように寄与したのかについての検討が必要である。

[3] 埋立地において地震前後に実施した標準貫入試験の結果から、地震前に比べて地震後のN値はいくぶん高くなっているが、そのレベルはさほど大きいものではない。また地震後にポートアイランド港島地区からサンプリングした試料を用いて振動三軸試験を実施した。上部埋立層(まさ上中心)、沖積砂層(自然堆積砂)ともに液状化強度は小さく、標準貫入試験結果と整合する結果となった。ただし、特に自然堆積砂については、サンプリングによる乱れの影響があり、原位置における砂の正しい強度を求めるための手法を考える必要があ

る。

[4] 地盤改良の耐液状化効果が顕著であることが実証された。ポートアイランド、六甲アイランドにおいて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といった密度増大化工法の有効性が明らかとなったほか、圧密促進のために施工される、サンドドレーンやプレローディングによって改良された地盤が液状化に対してもかなり抵抗することがわかった。これは、施工時の振動による締め固め効果、過圧密による強度増加が寄与した結果であると考えられる。

[5] 液状化予測を F_L 値法による簡易法を用いて行う場合、液状化抵抗比 R 、地震時せん断応力比 L ともに不確定要因を含んでおり、その適用にあたっては得られた結果に対する慎重な検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 若松加寿江：埋立地の液状化の歴史, 土と基礎, 第39巻, 1号, 1995, pp. 78-84.
- 2) Hamada, M., R. Isoyama and K. Wakamatsu: The 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe) Earthquake, Association for Development of Earthquake Prediction, 1995.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂版, 1989
- 4) 宮永清一・竹山征治：神戸の埋立の歴史, 土と基礎, 第39巻, 1号, 1995, pp. 42-46.
- 5) Shibata, T., F. Oka and Y. Ozawa: Characteristics of Ground Deformation due to Liquefaction, A Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, 1996 (in printing).
- 6) 及川研・輪湖建雄：阪神・淡路大震災による神戸港の被害と復興事業, 第12回港湾技術報告会, 1995.
- 7) Kamon, M., T. Wako, K. Isemura, K. Sawa, M. Mimura, K. Tateyama and S. Kobayashi: Geotechnical Disasters in the Waterfront, A Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, 1996 (in printing).
- 8) 石原研而・安田進・原田健二：土質特性と地盤の挙動, 土木学会誌, Vol. 80, No. 7, 1995, pp. 50-53.
- 9) 永瀬英生・宍道玲・辻野修一・木村耕三：過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度, 第30回地盤工学研究発表会講演概要集, Vol. 2, 1995, pp.845-846.
- 10) 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), 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.
- 11) 井上素行・安田進：液状化判定法の選択および適用性に関する研究, 第7回地震工学シンポジウム講演集, 1984, pp.667-671.
- 12) 液状化対策の調査・設計から施工まで, 土質工学会, 1995, pp.90-91.
- 13) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進：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, 1978, pp.641-648.
- 14) 時松孝次・吉見吉昭：Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol. 23, No.4, 1983, pp.56-74.

(原稿受理：平成7年12月22日)