

第3章 液状化

1. 兵庫県南部地震にみる液状化現象とその後の工学的な取り組み

Liquefaction and Engineering Efforts after the Hyogo-ken Nanbu Earthquake

古田一郎, 山本明夫

Ichiro Furuta, Akio Yamamoto

Abstract

This paper is based on more than 100 reports and references collected on ground liquefaction that were reported after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. It classifies the earthquake from four aspects according to the characteristics of the earthquake for review purposes.

- a) Liquefaction ignited at extremely large acceleration and impactful earthquake motion;
- b) Liquefaction of well-graded decomposed granite soil, as classified with gravelly soil;
- c) Permanent deformation due to liquefaction as seen with the damages in the quay wall of the port and harbor facilities and river levee; and
- d) Soil improvement effects to suppress liquefaction.

The above review was made to clarify the situation of liquefaction based on the survey and study results collected up to this point.

Based on the above report, authors have reported surveys and studies on the "definition of liquefaction", "evaluation of liquefaction based on the situation of soil" and "seismic response analysis and permanent deformation analysis" to evaluate the liquefaction phenomena taking place after the Hyogo-Nanbu Earthquake. These topics were also suggested for future studies.

Further, outlines of major indices were revised after the earthquake, to suggest future measures in terms of seismic coefficient upon design and acceleration input to make judgment on liquefaction factors.

1 まえがき

1995年兵庫県南部地震（以下、兵庫県南部地震と略記する）で発生した多くの地盤災害の中で、大きくクローズアップされた現象の一つが、地盤の液状化現象である。ポートアイランドや六甲アイランドを埋め尽くした噴砂の状況、港湾施設の激甚な被害あるいは河川堤防の被害等々が、センセーショナルに紹介され、「地盤の液状化」という言葉が、地震による地盤災害の代名詞であるかのように報道を賑わせてきた。

地盤の液状化現象は、1964年新潟地震の際に本格的に注目され、これを契機として液状化現象の研究が精力的に進められた。1960年代から1970年代にかけての活発な研究が、液状化のメカニズムを解明するとともに、現行の各種耐震設計基準の礎を築いたといっても過言ではない。現在においても、新潟地震における昭和大橋の落橋

あるいは県営川岸町アパートの倒壊の状況が、液状化による被害の典型的な例として紹介されることが多い。

新潟地震以降も、数多くの地震で液状化による被害を経験し、止まることなく研究が進められてきた。これらの研究の一端を、ここで振り返ってみる。

1978年伊豆大島近海地震では、鉾津堆積場のかん止堤が決壊し、鉾津の液状化が新たに注目された。液状化現象が、主に緩い状態で堆積した「きれいな砂」で発生する現象として特徴づけられていたものが、鉾津のようなシルト質の土質材料でも起こることが、新たに確認されることとなった。

1983年日本海中部地震では、秋田港の港湾施設の被害、八郎潟干拓堤防の被害および能代市・秋田市の住宅被害に代表される、液状化に起因する大きな被害が発生した。この地震において、広域的な地表面の変位が詳細に測量され、地盤の側方流動現象が、定量的に確認された。こ

の地震を契機として、液状化現象の研究が破壊問題から変形問題へと急速に拡大したように思われる。報道を通じて、地盤の液状化という言葉が広く使われ始めたのも、この地震である。

1987年千葉県東方沖地震は、大都市圏、とりわけ臨海工業地帯を襲った被害地震として注目された。臨海埋立て地に液状化が発生し、埋立て地盤の液状化対策の必要性を強く訴えるとともに、対策工の効果を検証する一つの手掛かりとなった。また、重要施設に設置されつつあった強震計アレー観測網が捉えた被害地震として、解析的な検討も試みられた。

近年では、1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年北海道東方沖地震と、北海道で被害地震が立て続けに発生し、港湾、堤防、道路あるいは下水道施設等に液状化による被害が発生した。特に、釧路沖地震では、釧路港の強震記録から、サイクリック・モビリティの現象が実際に確認された。また、釧路地方では、港湾施設の耐震強化岸壁の有効性が試されることとなった。

このようにして、新潟地震から今日に至る約30年の間に発生した大きな地震から貴重な情報を得るとともに、多くの研究者によって液状化のメカニズムの実像が明らかにされ、技術的な軌道修正がなされてきた。

それでは、上述のような過去の経験と研究の成果に対して、兵庫県南部地震はどのような特徴を持っていたのであろうか。

地震発生直後には、直面した被害の甚大さと相まって、これまでになく現象が発生したかのような様々な情報が流れた。その中で、埋立て材料としてのまさ土の液状化

に加えて、「礫」の噴出（礫質土の液状化）、さらには、液状化が更新世の堆積層にまで及んだ可能性までもが指摘された。

図-1は、ポートアイランド第2期埋立て地の砂礫層（更新世）で観測された間隙水圧の貴重な記録である¹⁾。この記録は6時間ごとの計測であり、地震直後の短い時間間隔の間隙水圧記録ではないが、午前6時（地震発生時：午前5時46分）の時点で、G.L.-38.5mの深度での過剰間隙水圧比はおよそ0.5となっている。

今回の地震で浮き彫りにされた液状化現象は、大きく次のように特徴付けられる。

①「大加速度」かつ「衝撃的な地震動」によって引き起こされた液状化

ポートアイランドの強震計アレー観測データが、地盤内の過剰間隙水圧挙動を含めた貴重な記録として注目され、多くの研究者が観測記録の解析を試みている。特に、更新世の砂礫層における間隙水圧の上昇は、更新世堆積層の液状化を危惧させるものであった。

②礫質土に分類されるような粒度配合の良い「まさ土」の液状化

従来、液状化し難いとされていた埋立て材料が、広範囲にわたって液状化した。噴砂に混じって大きな「礫」が噴出しているのが確認された。

③岸壁等の港湾施設・河川堤防の被害に見られる「地盤の測方流動」

神戸港の壊滅的被害、淀川堤防の甚大な被害が、液状化の脅威を強く印象づけた。

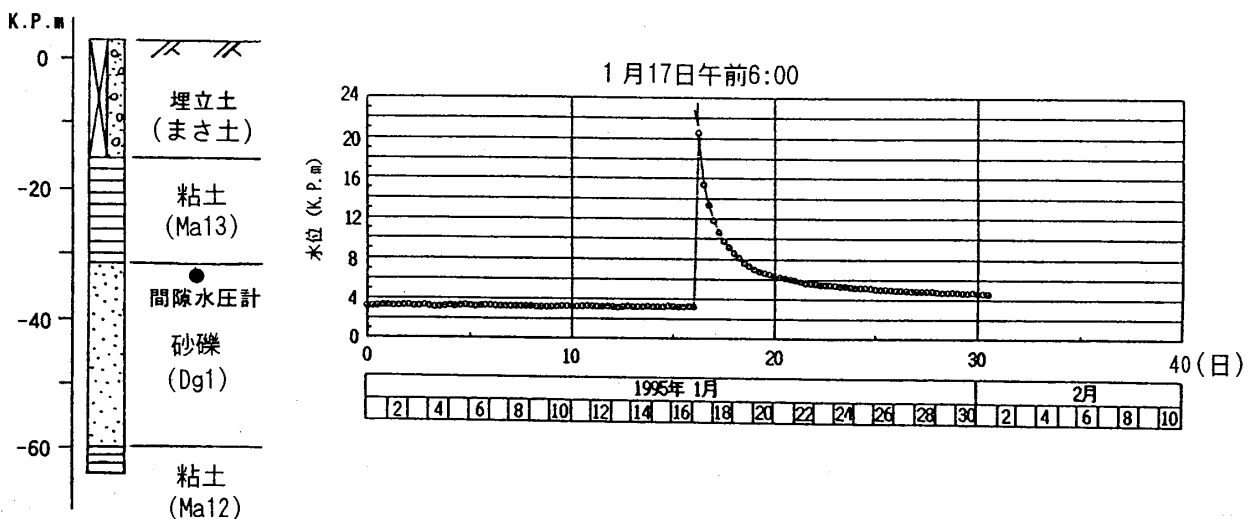


図-1 ポートアイランド第2期埋立て地の第一洪積砂礫層で観測された間隙水圧の記録¹⁾
 Fig.1 Pore water pressure recorded and observed in the first diluvial gravel layer of the land reclaimed for Kobe Port Island in the second phase¹⁾

④液状化に対する「地盤改良工の抑止効果」

神戸港臨海埋立て地の液状化が注目を集めたが、埋立て地の沈下対策として施工された地盤改良工が、液状化の発生に対する抑止効果を発揮した。

その後、液状化に関連する現象の調査が進む中で、多量の噴砂が埋立て地を覆い尽くしはしたが、発生した地盤沈下は予想を上回るほどではなく、流動的な崩壊は限定的であったことが報告されてきた。これに関連して、多量の噴砂が発生した地域の一角で行われた開削調査の例では、液状化したと推定される砂層の堆積構造が乱されていないこと、すなわち、流動的な現象が生じていないことも報告されている。また、新旧埋立て地での被害の違いから、埋立て材料の違いや年代的な効果も議論されている。一方、港湾施設の被害等の原因究明や、ポートアイランドの強震計アレー観測データに対する解析的検討が加えられてきた。液状化に関する従来の力学的原理に基づく検討によって、これらの現象の多くが解明されつつある。

このような調査・研究の成果から見ると、液状化については、これまでの知見を超えた現象ではなかったと言える。

兵庫県南部地震から3年が過ぎようとしている現在、多くの調査・研究の成果が蓄積されつつある。一方で、被害の生々しさが薄れるとともに、地震に対する取り組みが縮小されつつある。このような状況にあって、体系化されてきた液状化のメカニズムを、初心に返って見直していくためにも、客観的な事実に基づいて液状化の実像を記しておくことが、是非とも必要である。

このような観点から、本報告では、兵庫県南部地震で見られた液状化現象の実像を、これまでの調査・研究の成果を通して明確にすることを試みた。あわせて、液状化に対する技術的な取り組みに、本地震がどのような影響を及ぼしたかについて、耐震基準に関する改訂の動向に照らして整理した。

2 兵庫県南部地震で発生した液状化現象の実態

2・1 加速度記録と地盤の液状化

2・1・1 ポートアイランドの加速度記録

ポートアイランドの深度方向の強震計アレイ¹⁾の記録のうち、G.L.-83mの下部洪積砂礫層におけるNS方向の最大加速度は、方向を補正して524Galであった。まさ土の埋立て地盤がこのような直下地震による大加速度を受けたことはほとんどない。また、この記録のG.L.±0mの観測値では最大加速度が341Galに減衰しており、液状化によると考えられる地盤の非線形性が現れて

いる。

図-2に上記の強震計設置深度とPS検層の結果¹⁾を示した。また、図-3にポートアイランドの埋立て地盤の材料であるまさ土について、粒径加積曲線¹⁾を示した。ポートアイランドの埋立て材料は、神戸市の西部に位置する高倉山から採取された黒雲母花崗岩類で、全体として節理が発達し風化が進んでおり、図-3に示すように、かなり細粒化している。その最大粒径は150mm、細粒分含有率は10%となっている。

ポートアイランドの強震記録については、以下のように、全応力法および有効応力法を用いた地震応答解析により観測記録の再現が試みられている。國生ら^{2), 15)}は、観測記録からインバージョン解析した物性値に基づいてG.L.-83mの観測記録を入力して等価線形法(全応力法)による地震応答解析を行い、今回のような大加速度でも工学的には等価線形解析が適用できるとしている。

吉田ら^{8), 4)}は、G.L.-32mでの観測記録を用いて等価線形解析、非線形全応力解析、YUSAYUSAによる有効応力解析およびDESRAによる有効応力解析を行っている。これら一連の解析で、このような非線形な挙動の場合、等価線形解析の適用性は非常に低いと結論づけている。

Ansaryら⁷⁾は、Multi-Shearing ModelによりG.L.-83mの観測記録を入力して有効応力解析を行っており、埋土層(まさ土)下部(G.L.-15m付近)および洪積砂層(G.L.-30m付近)で過剰間隙水圧比($u/\sigma'v'$)が1.0となる結果となっている。

鄭ら⁹⁾は、DYNAFLOWを用い、構成則としてMulti-Yield-Surfaceに基づく塑性理論を使用し、G.L.-83mの観測記録を入力して有効応力解析を行い、観測記録を概ね再現できたとしている。

仙頭ら¹⁰⁾は、NANSSIを用い、構成則として西による弾・塑性構成式を使用して、G.L.-83mのEW成分観測波形で有効応力解析を行っている。その結果、各深度の観測記録を非常に良く再現しており、液状化は埋土層の下部で発生し、洪積砂層については、過剰間隙水比が0.2以下と比較的小さいことが示されている。

Cubrinovskiら¹¹⁾は、DIANA-Jを用い、構成則としてStress-Density Modelを使用してG.L.-32mおよびG.L.-83mの観測記録を入力して、有効応力解析を行っている。各深度の観測加速度の最大方向成分(NW-SE成分)の解析結果によると、それぞれの観測波形を非常に良く再現しており、埋土下部での過剰間隙水比($u/\sigma'v'$)は、1.0となり、洪積砂層では $u/\sigma'v'=0.6\sim 0.85$ となっている。

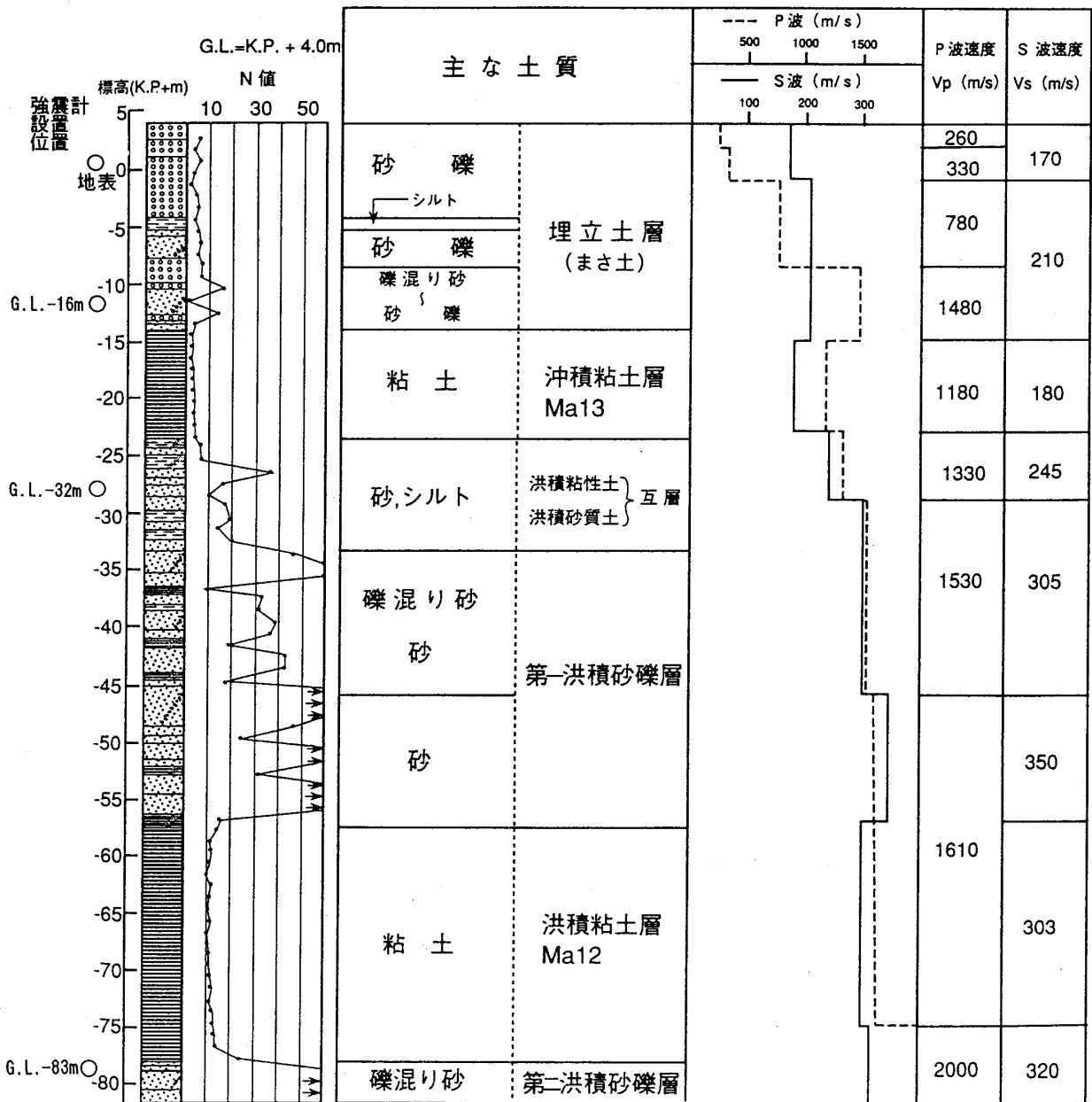
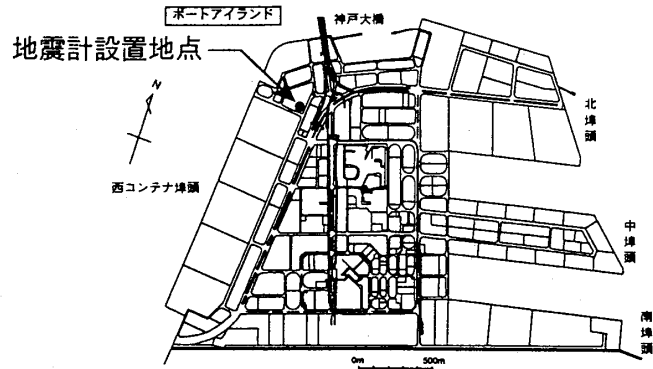


図-2 ポートアイランド強震計設置地点のPS検層総合柱状図¹⁾

Fig.2 PS logging stratigraphic column figure where the strong motion seismograph was set in Kobe Port Island¹⁾

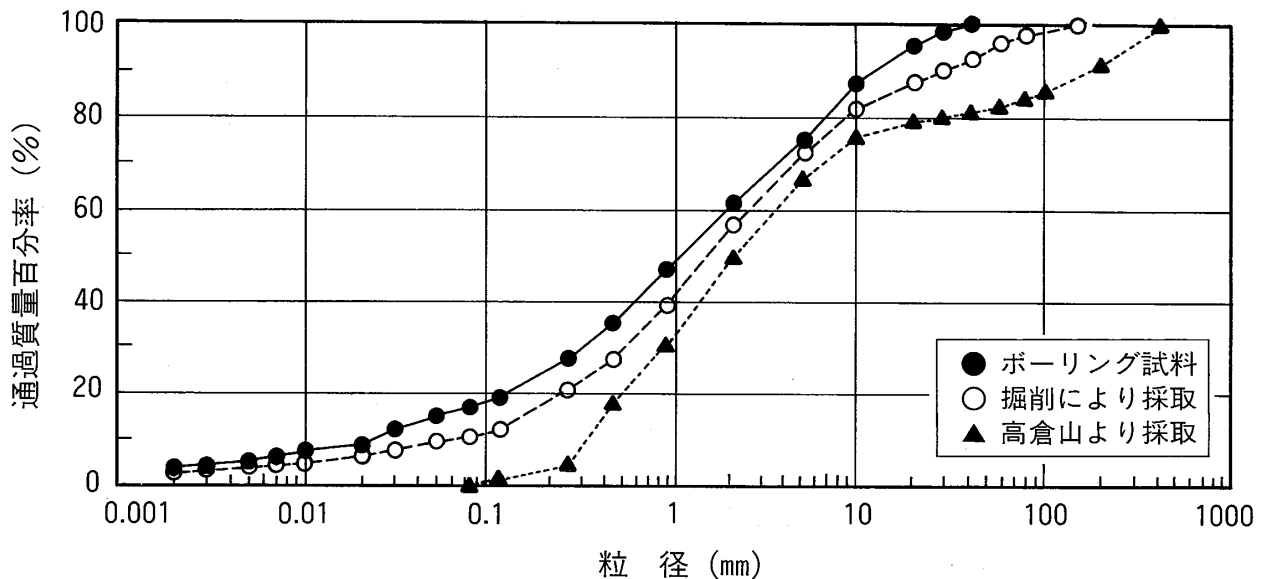


図-3 ポートアイランド埋立て地盤(まさ土)の粒径加積曲線¹⁾

Fig.3 Grain size distribution curve of decomposed granite soil reclaimed ground of Kobe Port Island¹⁾

森田, 井合¹⁴⁾は, 応力-歪関係に東畑・石原による任意方向のせん断断面の双曲線モデル, 過剰間隙水圧については, 塑性せん断仕事およびせん断応力の関数として与える構成則を用いたFLIPにより, G.L.-83mの観測記録を入力して解析を行っている。解析結果によると, 地表面における観測波形を良く再現しており, この解析で物性値を同定している。

このような強震観測結果および解析結果から, まさ土による埋土層で, 液状化が発生したことはほぼ確実であり, 液状化を初期剛性値の低下として捉えると, 大加速度による地盤の非線形性が現れることが確認されたとも言えるであろう。

2・1・2 加速度記録と地盤の液状化

強震時にみられる地盤特性の非線形性については, 翠川⁵⁾が1993年にとりまとめており, せん断ひずみレベルが 3×10^{-4} 前後を境として, 非線形性が現れるとしている。國生ら²⁾による等価線形法による計算結果では, NS成分の最大せん断ひずみは, $\gamma = 2.4 \times 10^{-2}$ となっており, 非線形性も予想通り現れている。

全応力法の等価線形解析についての評価は, 國生ら²⁾と, 吉田ら⁸⁾では正反対のものとなっているが, 國生らは等価線形解析を液状化を含めた非線形震動解析の簡易法と捉えているのに対し, 吉田らは液状化現象を中心に有効応力解析との比較において論じているためであると考えられる。実務レベルにおいては, 等価線形解析は, 現状ではまだ重要な地位を占めるものであり, 両者の議論をここでさらに検討したい。

まず, 國生ら, 吉田らと同じ, S波速度, 層厚および

単位体積重量を用い, 動的変形特性曲線は一般的なレファレンスカーブ^{17), 18), 19), 20)}を使用して, NS成分のG.L.-83m相当の基盤波を入力させて等価線形解析を行った。

図-4に解析結果の応答波形と対応する観測波形を示した。この図から等価線形解析について以下のことが特徴として挙げられる。

- ① 地表の最大加速度値の対応はほぼよいが, G.L.-16mおよびG.L.-32mについては観測波形の最大加速度の方が大きくなっている。これは, G.L.-32mについて洪積粘土層および第一洪積砂礫層の剛性を小さく評価したこと, G.L.-16mについては, 沖積粘土層の剛性をやや小さく評価した影響であると考えられる。
- ② 解析した地表波形では, 観測波形よりも位相が進んでいる。G.L.-32mで解析波形と観測波形で位相は合っていることから, 解析では埋立土層の剛性を過大評価している。
- ③ 解析した波形は, 全般的に高周波成分が少なくなっている。これはせん断ひずみが小さい範囲での減衰比(h)を大きくとりすぎている結果である。

國生ら²⁾は, 観測波形のインバージョン解析によるせん断剛性比のひずみ依存性と, 室内実験による結果の比較では, 両者がほぼ対応するとしているが, 上記の結果から考えると, 砂質土のみならず粘性土のレファレンスカーブを今後検討する必要があると考えられる。この粘性土については, 有効応力解析を用いたCubrinovskiら¹¹⁾によるように, 沖積粘土層直上のG.L.-16mの解析波形と観測波形の一致度が非常に良いことが注目される。

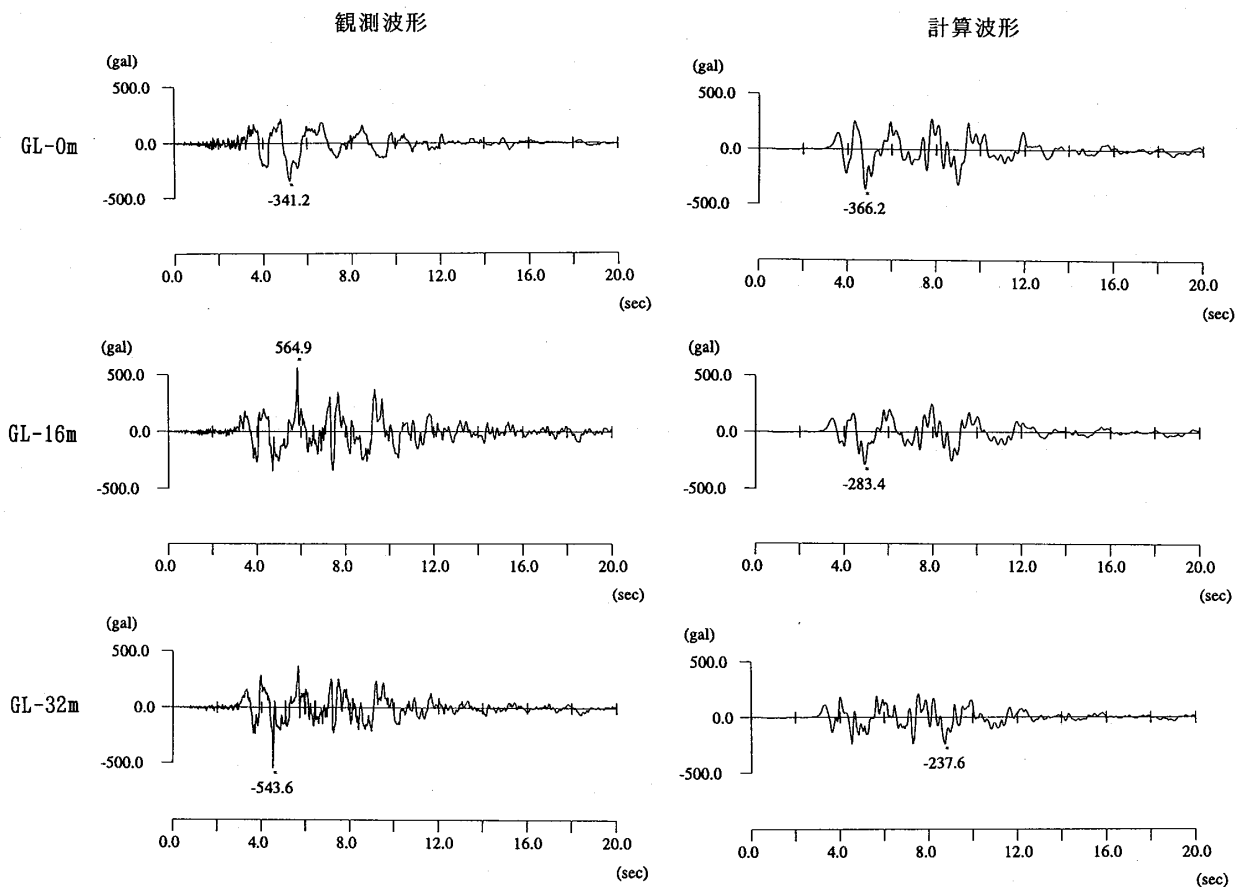


図-4 観測波形と等価線形法による地震応答解析の計算波形の比較

Fig.4 Comparison of the observation waves and the calculation waves of seismic response analysis using an equivalent linear analysis method

このようなことから実務的には全応力法の等価線形解析がまだ用いられると考えられるが、せん断ひずみが $\gamma = 1 \times 10^{-2}$ (1%) より大きな場合、等価線形解析の適用性には疑問があり、将来的には有効応力解析の適用が増える傾向にある。

等価線形解析および有効応力解析においても、地盤の S 波速度によるモデル化は必要であり、図-2 に示す PS 検層による S 波速度構造は最も基本的なものである。今回液状化したとされる埋立て土層は、まさ土で粒径が 100mm を越す礫も含まれており、試料採取が非常に難しい地盤である。また地震後に実施された PS 検層結果¹⁾ では、埋立て土層の S 波速度が地震前に実施された図-2 に示すものより小さくなっており、PS 検層の適用性に疑問が残る。このようなまさ土の埋立土層では、クロスホール(孔間)の S 波トモグラフィーなどの方法により、地盤の平均的な S 波速度を求めることが必要であると考える。

2・2 液状化した地盤の土性

2・2・1 まさ土の粒土組成

液状化した地盤の粒度分布について、Shibata²⁷⁾ は、まさ土、神戸層群および湾岸部の沖積砂層にわけて示している。これによるとまさ土は、礫分を多く含む粒度配合のよい土であり、神戸層群はまさ土と似ているが、細粒分をまさ土より多く含んでいる。湾岸部の沖積砂層は、従来提示されてきた液状化しやすい砂の粒度分布範囲に入っている。このようなことから考えると、今回の地震では、図-3 に示したように均等係数 (U_c) が 30 以上と大きく、平均粒径 (D_{50}) が 2 mm を越えるまさ土の土性が注目される。

2・2・2 まさ土の液状化強度

まさ土の液状化強度については、Shibata²⁷⁾、Ishihara²⁸⁾、善ら²⁵⁾ によってとりまとめられている。Ishihara²⁸⁾ は、強震波形から逆解析により繰り返し回数 1 回～2 回の液状化強度を求めている。また、とり

まとめられた液状化強度 (R_{l20}) は、ブロックサンプリングによる不攪乱試料 (直径7.5cm×高さ15cm) で、 $R_{l20} = 0.16$ (OCR = 1) ~ 0.28 (OCR = 3) である。さらに安田²⁶⁾によれば、地震前の1990年にトリプルチューブサンプリングで採取した試料に対し、 $R_{l20} = 0.18 \sim 0.28$ であることが示されている。

善ら²⁵⁾は、凍結サンプリングによる試料を用いて試験を行っている。その供試体の大きさは、直径30cm×高さ60cmで、液状化強度は $R_{l20} = 0.24 \sim 0.25$ となっている。これらの試験結果から、このまき土の液状化強度は、 $R_{l20} = 0.25$ 程度であると考えられるが、粒径が100mm以上の礫を含む不均一な材料であり、地点による液状化強度の分布のばらつきもかなりあると考えられる。

2・2・3 物性評価と今後の課題

液状化強度を推定する指標として、N値は重要なものであるが、埋立土の兵庫県南部地震後のN値の変化について神戸市開発局¹⁾、善ら²⁵⁾およびShibataら²⁷⁾が報告している。いずれのものも埋立て土の部分のN値が、地震後に $\Delta N = 2 \sim 3$ 回高くなっており、液状化の発生による高密度化の可能性が考えられる。

動的な土の物性として重要なものにS波速度 (V_s) がある。N値と同様にS波速度についても地震後の変化が調べられている。ポートアイランドについては、神戸市開発局¹⁾、Shibataら²⁷⁾および善ら²⁵⁾が報告しているが、埋立て部については、いずれも地震後S波速度が低下している。また六甲アイランドについては善ら²⁵⁾が報告しているが、ここでもS波速度は低下している。図-5にShibataら²⁷⁾が地震前後でS波速度を比較したものを示した。

以上のことをまとめると、埋立て地盤のN値は増加し、一方、S波速度は低下している。この原因は、明らかにされていないが、N値、S波速度とも埋立て地盤の不均一性に影響されていることが挙げられる。本来的には両者とも、同一地点、同一孔でないと比較は難しいという結論となる。

前節の等価線形解析のモデル化でも述べたが、このような埋立て地盤では、1地点のPS検層によるS波速度だけで単純化・モデル化するのはかなり難しい。今後不均一な地盤に対する調査法を、総合的に検討する必要がある。

2・3 液状化による地盤の永久変形

2・3・1 概要

地盤の液状化に起因する地盤変状の特徴の一つに、地盤あるいは構造物に大きな変形や移動を引き起こすこと

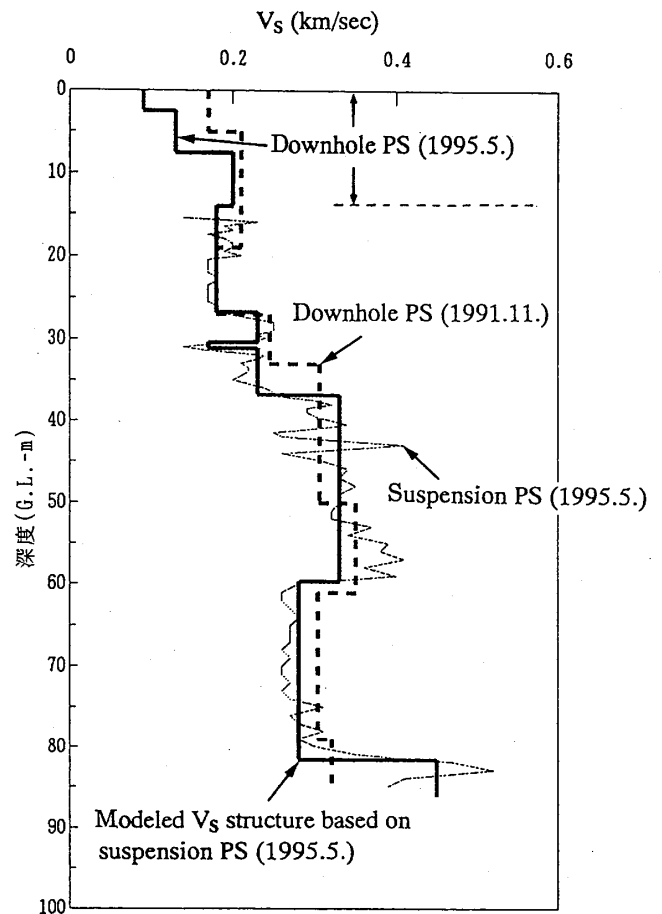


図-5 ポートアイランド強震観測地点における地震前後でのS波速度の比較²⁷⁾

Fig. 5 Comparison of the S wave velocity before and after the earthquake at the seismic observation point in the Kobe Port Island²⁷⁾

が挙げられる。地震による地盤変状を考える上で、地盤の「地震時応答」に加えて、「地震後に残留する回復不能な変形」が取り上げられてきた。後者を、地震時の「永久変形 (permanent deformation)」と呼んでいる。特に、これが地盤の液状化による場合には、地盤が流動的な崩壊に至ることがあり、今回の地震においても、この種の典型的な地盤変状も確認されている。

本章では、液状化による永久変形を単に永久変形と呼ぶことにする。

液状化現象が誘因となる地盤の流動的な変形については、古くから記録に留められてはいるものの、この現象に着目した本格的な研究の歴史は浅い。地盤工学会においても、「地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関する委員会」(以下では、「永久変形に関する委員会」と記す。)を1995年に発足させ、流動性破壊や永久変形のメカニズムと定量的な予測に関する研究に着手した段階である。

1) 液状化による地盤の永久変形の分類

「永久変形に関する委員会」は、「地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関するワークショップ(1996)³⁰⁾」を開催し、兵庫県南部地震以降の活動成果を報告している。

この資料を参照して、今回の地震で報告された永久変形の形態を分類すると、以下の通りである。

① 地盤の沈下(過剰間隙水圧の消散に伴う液状化層自体の体積圧縮現象)

: 湾岸部の埋立地

② 地盤の側方流動(静的なせん断力が作用する液状化地盤の、せん断抵抗の低下・喪失に伴う流動的な変形。濱田ら³¹⁾は、日本海中部地震および新潟地震の前後における空中写真の解析によって、地盤自体に側方流動があったことを明らかにし、側方流動の形態を以下のように考えた)

a) 液状化層上面が傾斜している場合

: 不明(これまでの地震では、微高地等の側方流動が確認されている)

b) 液状化層下面が傾斜している場合

: 不明(側方流動の原因にはなり難い)

c) 液状化層側方に解放面がある場合

: 港湾部の河川・海岸護岸周辺

③ 土構造物荷重による沈下・流動(土構造物材料を含む液状化層に対して盛土荷重が原因となって生じる基礎地盤の圧縮・流動)

: 河川堤防・堰堤・アースダム

この他に、斜面崩壊の原因を特殊な液状化とする報告もあるが、これらを含めて後に紹介する。

2) 調査・研究の概況

兵庫県南部地震以降、液状化に関連する数多くの調査・研究の成果が報告された。これらの報文の主旨とは異なるが、地盤の永久変形の視点から、「被害調査」、「実験的研究」および「解析的研究」に分類し、調査・研究の「対象」、「手法」および「永久変形に係るテーマ」を整理して、付表-1にまとめた。

液状化、とりわけ永久変形に言及した被害調査は、多くがポートアイランド、六甲アイランドおよび沿岸埋立地に集中しており、①(沈下)および②c)(側方流動)に分類される埋立地盤の被害の大きさを物語っている。「永久変形に関する委員会」は、永久変形に関連する構造物の被害を整理しているが³⁰⁾、これらの多くがこの地域に集中している。

内陸部では、③(土構造物)に分類される河川堤防の被害が大きく、一部にため池等の堰堤、アースダムの被

害が報告されている。

今回の地震においては、新潟地震や日本海中部地震で大きな側方流動をもたらした②b)に分類される微高地(自然堤防など)の緩傾斜地盤の側方流動は、これまでのところ報告されていない。

地盤の永久変形のメカニズムあるいは予測法の研究的な取り組みは、兵庫県南部地震を契機として飛躍的に増大している。振動台・遠心模型実験に基づく研究、大変形に対応した数値解析、とりわけ有効応力解析に基づく研究が、この種の研究の中心的な流れを形成している。

今回の地震に対しても、重力式護岸や河川堤防等の被害の原因究明に、実験的、解析的な手法が適用されており、被害の実態を表現することが可能であると報告されている。

また、材料としての土の力学挙動に関しても、液状化

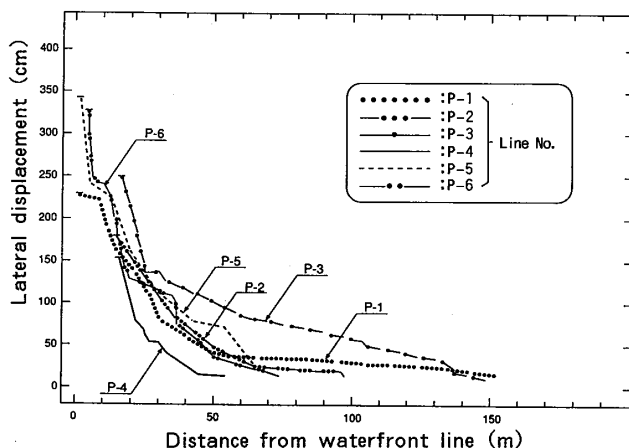


図-6 ポートアイランド護岸背面の側方変位分布³²⁾
Fig.6 Distribution of displacement behind quaywalls at Port Island³²⁾

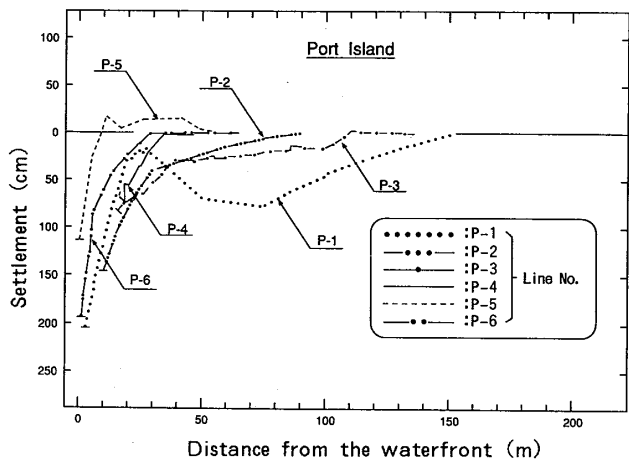


図-7 ポートアイランド護岸背面の地表面沈下³²⁾
Fig.7 Settlement of the ground surface behind quaywalls at Port Island³²⁾

後の挙動に着目したせん断特性や圧縮特性の研究が行われている。

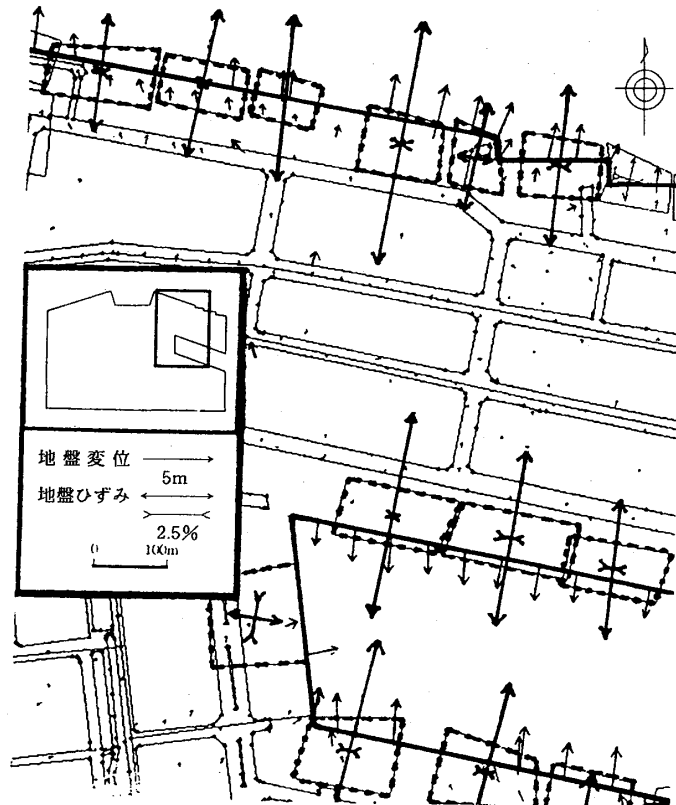
2・3・2 地震被害にみる地盤の永久変形の実態

1) 埋立て地の被害にみる永久変形

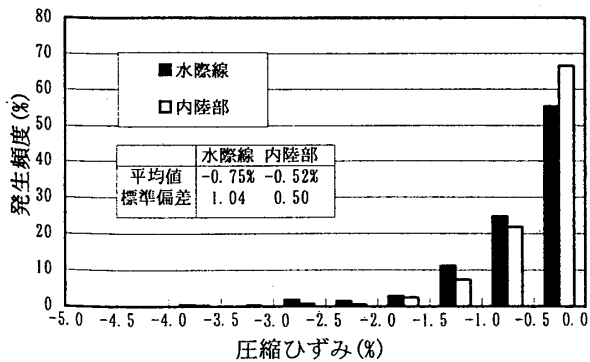
ポートアイランド、六甲アイランドおよび沿岸埋立て地に発生した地盤の永久変形は、神戸市、運輸省ならびに地盤工学会阪神大震災調査委員会デジタル写真測量に

よる被害調査部会の活動を中心にして、これまでになく克明な計測が行われた。

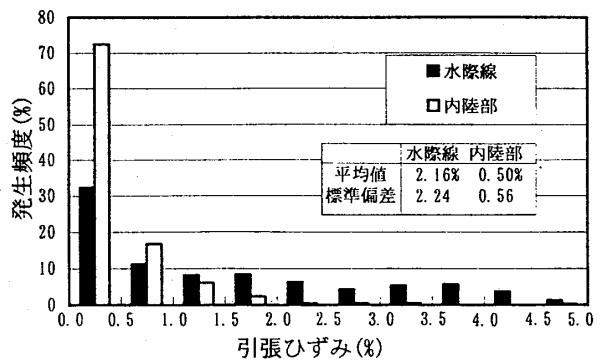
Ishiharaら⁶²⁾は、ポートアイランドおよび六甲アイランドにおいて水準測量およびクラックの測量を実施し、護岸の背面地盤の変位分布図を作成した(図-6および図-7)。これらの結果から、両埋立て地の沈下量は平均40cm~50cmであること、地盤の側方流動量は最大



(a) 六甲アイランド北岸の地盤ひずみの算定結果
(a) Calculated ground strain vectors at north coast of Rokko Island



(b) 圧縮ひずみの発生頻度
(b) Frequency distribution of compressive strain at ground surface



(c) 引張ひずみの発生頻度
(c) Frequency distribution of tensile strain at ground surface

図-8 地盤ひずみの頻度分布(内陸部と水際線の比較)⁵⁰⁾

Fig.8 Frequency distribution of strain at ground surface (comparison of inland and coastline)⁵⁰⁾

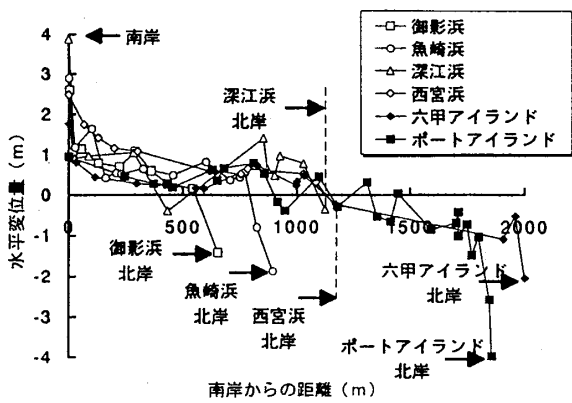
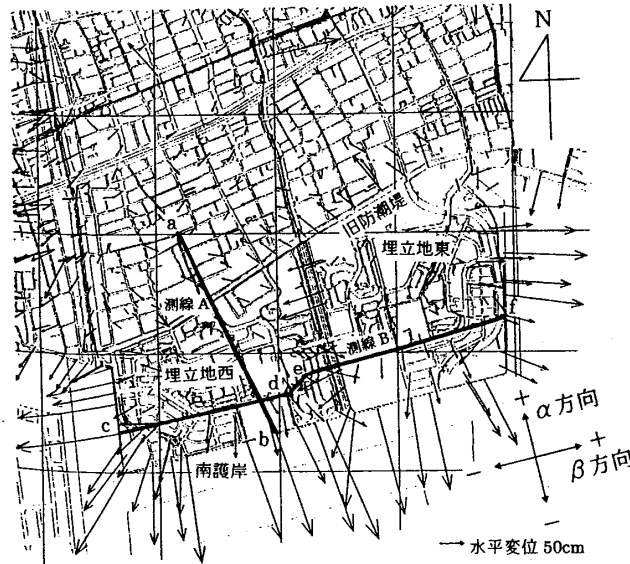


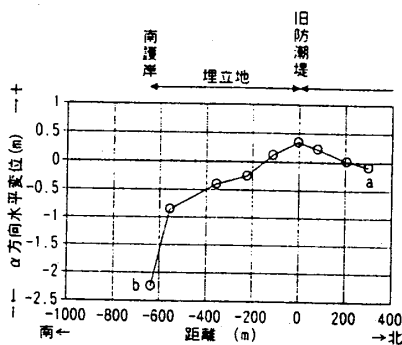
図-9 水平変位量と護岸からの距離の関係⁵⁶⁾
 Fig.9 Relationship between horizontal displacement and distance from quaywall⁵⁶⁾

3.5mで護岸から150mの内陸にまで及んでおり、流動量の分布は護岸からの距離の関数で表されることを報告している。また、液状化層厚から推定した体積ひずみ2%~4%は、室内試験から予測される数値に近いことも示している。

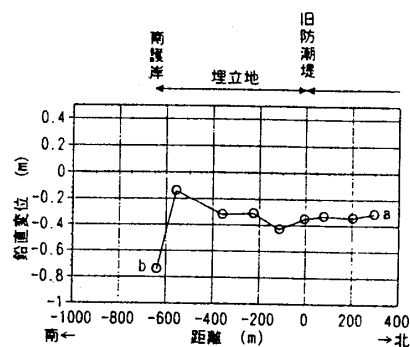
濱田ら^{56), 61)}は、神戸市とその近隣に対して詳細な空中写真の解析を実施し、側方流動量の計測を行った(図-8)。さらに、側方流動量の分布から、地表面のひずみ分布を試算した⁵⁸⁾(図-9)。これらの結果から、液状化による側方流動は、淀川河口から須磨海岸に至る埋立て地で広く確認され、埋立て材料、埋立ての時代等によって被害の程度に差があることを確認した。また、護岸近傍においては、最大10% (側方流動量約4m) を超える引張りひずみが試算されたことを報告している。



(a) 芦屋市南部埋立地における水平変位ベクトル
 (a) Horizontal displacement vectors at reclaimed land lies to southern part of Ashiya City



(b) 測線Aにおけるα方向の水平変位
 (b) α-directional components of horizontal displacement along the A-line



(c) 測線Aにおける鉛直変位
 (c) Vertical displacement along the A-line

図-10 芦屋市南部埋立地における水平変位⁶⁰⁾

Fig.10 Horizontal displacement at reclaimed island lies to southern part of Ashiya City⁶⁰⁾

西本ら⁴⁶⁾は、芦屋市南部の埋立地において、航空測量、GPS等を駆使した永久変位の計測を行った(図-10)。この結果から、側方流動は護岸で最大約2.5mで内陸側400mにまで及んでおり、内陸部の沈下は30cm程度であると報告している。

重力式岸壁の変状については、運輸省港湾技術研究所が現地調査⁶³⁾とともに振動台模型実験および数値解析を実施し、詳細な原因究明を行っている。数値解析に関しては、山崎ら⁹⁰⁾野津ら⁹²⁾が全応力法を、井合ら⁹¹⁾が有効応力法を適用し、現象の再現を試みている。

現地調査の結果から、重力式岸壁は海岸線に対してほぼ一様に変位し、変位量は置換砂の厚みと相関があることを指摘した。また、変状のあった岸壁は全体に前傾する形で海側に変位しているのに対し、耐震岸壁に関しては被害はほとんど生じていないことが報告されている。

振動台実験および数値解析の結果では、重力式岸壁の変状はケーソンの滑动によるものではなく、置換砂までを含めた全体的な変形であり、ケーソン直下の置換砂は剛性の低下は生じたものの、液状化には至っていない可能性が示されている。

これまでの短い期間の中ではあるが、埋立て地に発生した地盤災害の事実とメカニズムが、ある程度定量的に評価されつつある。特に、これまでにない被害と地震動の定量的な記録を利用した、精緻な解析が行われており、その成果が多数報告されつつある。

しかし、埋立て地の液状化による地盤変状が、埋立ての履歴や材料によって左右されていることなどを考えると、被害の究明と共に被害のなかったことの原因について、今後の研究を待たねばならないことが少なからず存在している。

2) 土構造物の被害にみる永久変形

土構造物の被害としては、主として河川堤防に永久変形を伴う変状や崩壊が確認された。河川堤防の被害は、兵庫県南部から大阪平野にかけて広域的に発生しているが、地盤の液状化に伴う被害は、低平地に集中している。堤防の被災の程度とその分布状況は、これまでの地震被害と同様に、旧河道、後背湿地、緩い沖積砂質土層の分布などの地形的要因および堤防の構造的要因に支配されていることが確認されている。

特に、淀川流域に大きな被害が確認されており、建設省を中心にした被害の原因究明と対策が進められている。

川井ら⁴⁸⁾は、淀川流域の特に変状の大きい西島地区について、開削調査を実施した結果を報告している。開削調査の結果は、基礎地盤の液状化の状況と堤体の変状形態を如実に表している。これらの結果は、本章2.で川

井らが克明に報告している。

淀川に発生した被害に関して、堤体の変状を解析的に再現することも試みられている。

石原ら⁸³⁾は、液状化による強度・剛性の劣化を事前に取り込んだ、全応力法による大変形動的解析を実施し、西島地区の被害状況に整合した結果を得ている。また、対策断面に対しても同手法を適用し、対策効果の判定にも有効な方法であると述べている。

川井ら(本章2.)は、簡便法および東畑が開発した最小エネルギー原理に基づく変形解析法を用いて、堤防の沈下状況の評価を試みた。東畑の方法によれば、変形量に差はあるものの、変形の形態をある程度説明できることを報告している。この変形量の差を克服するために、その後、表層部の非液状化層の取り扱いに改良が加えられている。

河川堤防以外の堰堤・アースダムについては、ニテコ池の中仕切堤の崩壊、井手ノ尻池の崩壊等が挙げられる。

Towhataら⁶⁴⁾は、ニテコ池の崩壊が液状化による可能性が高いことを報告している(図-11)。ただし、崩

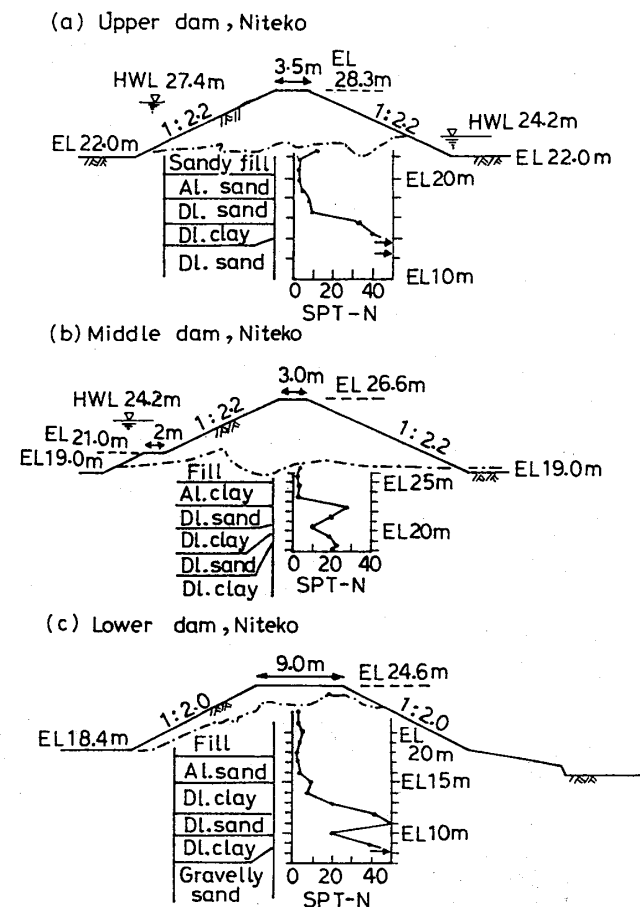


図-11 ニテコダムの被災断面(西宮市提供)⁶⁰⁾
 Fig.11 Cross section of dams at Niteko (courtesy of Nishinomiya Municipal Government)⁶⁰⁾

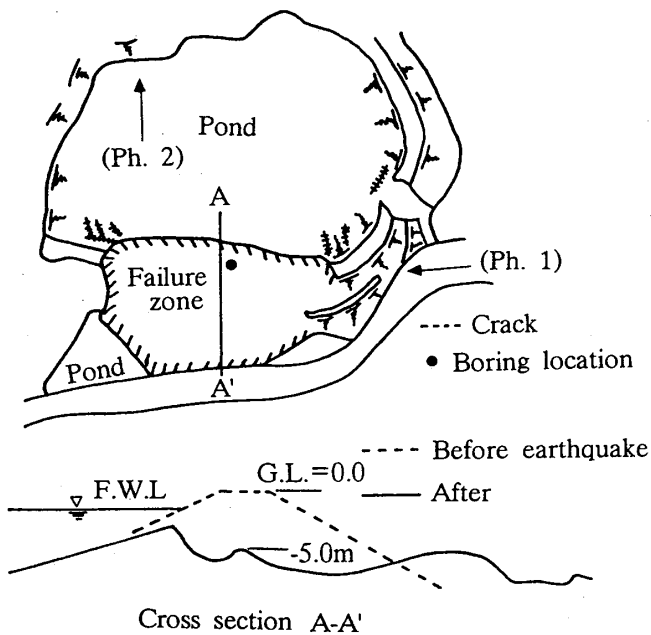


図-12 地震後の井手ノ尻ダムの概況³⁰⁾
 Fig. 12 General condition of the Idenosiri Dam after the earthquake³⁰⁾

壊が大規模になった誘因は、中仕切堤の上流側が湛水していたことに加え、排水管周りが「水みち」となって池水とともに土砂が流出したことを指摘している。

田頭ら³⁶⁾およびTani⁶⁸⁾は、ため池等の堰堤・アースダムの調査を実施し、噴砂の痕跡と地盤堤体の条件から、井手ノ尻池の崩壊の原因を液状化であると結論づけている(図-12)。この被害についても、ニテコ池と同様に貯水の存在が被害を大きくしたと思われる。

3) 斜面の被害にみる永久変形

斜面災害の多くは、液状化とは異なる現象として取り扱われるが、斜面崩壊が特殊な液状化に起因するとの報告がある。Sassaら⁷²⁾は、仁川と宝塚の斜面崩壊を検討

するために、高速の繰返しリングせん断試験(仁川)ならびに開削調査(宝塚)を実施した。その結果、粒子破碎に起因する「すべり面の液状化(sliding-surface liquefaction)」(図-13)が、移動距離の非常に長い斜面崩壊の引き金になったことを指摘している。このすべり面の液状化現象は、これまでの液状化現象とは本質的に異なるものであり、今後の更なる研究が待たれる。

2・4 液状化に対する地盤改良工の抑止効果

2・4・1 概要

1) 液状化対策工法の概要

近年、液状化の対策工法として様々な工法が考案され、実際に適用されつつある。地盤の液状化あるいは側方流動に対する対策工法は、その基本的な考え方によって、以下のように分類されている³⁰⁾。

① 地盤改良工法

締め固め・固結・置換・間隙水圧消散・水位低下工法等

② せん断変形抑止工法

地中壁等

③ 構造的対策

しかしながら、これらの対策工法の効果については、容易に実証できるものではなく、実際の効果を確認するには、地震を待たねばならない。

地震予知総合研究振興会の報告⁹³⁾によると、国内における対策工法の導入と主な地震における効果確認の状況を、表-1のように整理している。また、液状化対策工の考え方および1975年~1981年の国内における適用実績を、表-2のようにまとめている。

バイプロフローテーション工法、サンドコンパクション工法等の密度の増大を図る工法は、むしろ緩い砂層の支持力改善のために古くから行われてきた工法であり、

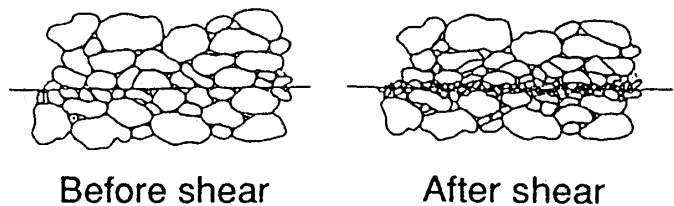
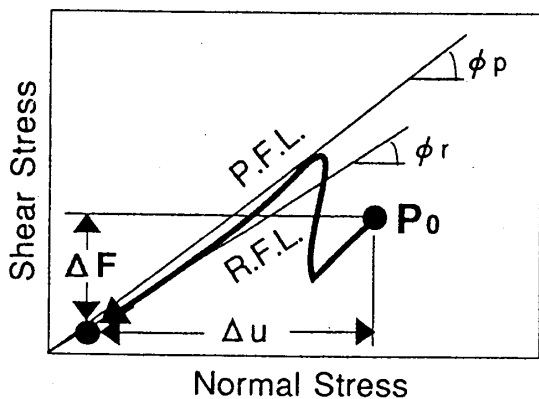


図-13 すべり面液状化の概念図⁷²⁾ (R.F.L.: 残留状態の破壊線, P.F.L.: ピーク時の破壊線)
 Fig. 13 Stress path and illustration of sliding-surface liquefaction⁷²⁾ (R.F.L.: Residual failure line, P.F.L.: Peak failure line)

表-1 日本での地盤改良工法の導入と過去の発地震における効果確認³⁰⁾

Table 1 Introduction of ground improvements in Japan and their effects for preventing liquefaction in previous earthquakes³⁰⁾

西暦	地震名	対策工法に関する記述
1995~ 1957~ 1964	新潟地震	バイプロフローテーション工法をわが国で採用開始 サンドコンパクションパイル工法をわが国で採用開始 バイプロフローテーション工法の地盤改良効果を確認 [オイルタンク、建築基礎] (渡辺)
1968	十勝沖地震	バイプロフローテーション工法の地盤改良効果を確認 [工場] (大崎)
1973~ 1974~ 1976 1977~ 1978	宮城県沖地震	振動棒工法及び動圧密工法をわが国で採用開始 深層混合処理工法をわが国で採用開始 グラベルドレーン工法を提案 (Seed & Booker) グラベルドレーン工法をわが国で採用開始
1982~ 1983 1989	日本海中部地震 (ロマプリエタ地震)	耐震グラベルコンパクション工法をわが国で採用開始 サンドコンパクションパイル工法の地盤改良効果を確認 サンドコンパクション、振動ローラ、グラベルドレーン の地盤改良効果を確認
1990~ 1993 1993 1994 1994 1995	釧路沖地震 北海道南西沖地震 北海道東方沖地震 三陸はるか沖地震 阪神・淡路大地震	プラスチック有孔ドレーン工法をわが国で採用開始 グラベルドレーン工法、固化処理工法の効果を確認 (弾力性のあるポリエチレン製ガス管の効果を確認) プラスチック有孔ドレーン工法の効果を確認 振動棒工法の効果を確認

表-2 砂地盤の液状化を防ぐ方法と採用実績³⁰⁾

Table 2 Methods of ground improvement against liquefaction and their achievements³⁰⁾

液状化を防止する方法	1975-1981年の採用実績の割合
①砂質地盤の密度を増大する	82%
②粘土やセメントなどが持つ粘着性を付与する	12%
③砂質地盤から水を抜く(地下水位を低下する)	4%
④地震時に上昇する水圧を急速に地盤外に解放する	2%
⑤地盤に加わる地震動を小さくする	0%

早い時期に液状化対策としても効果のあることが確認された。液状化対策を主眼とする工法として、グラベルドレーン工法に代表される種々の排水工法が、1970年代後半から導入され、一部にその効果が確認されている。

兵庫県南部地震においても、ポートアイランド、六甲アイランドおよび沿岸の埋立地において、地盤改良工の効果が報告されている。実際には、軟弱地盤対策として施工された地盤改良工が、副次的に埋立て土層を締め固めた結果、液状化に対する抑止効果が現れたものと考えられている。

2) 調査・研究の概況

兵庫県南部地震以降の、地盤の液状化対策に関する調査・研究報告を、「被害調査」、「実験」、「解析」および「設計」に分類し、調査・研究の「対象」、「手法」および「テーマ」を整理して、付表-2にまとめた。

地盤改良工法に関連する被害調査についても、沿岸埋立て地に集中して実施され、各種の地盤改良工が、液状化に伴う変状の抑制に効果を発揮したことが報告された。

調査報告に記載されている地盤改良工法は、プレローディング工法、サンドドレーン工法、ロッドコンパクション工法、サンドコンパクション工法(埋立地)、グラベルドレーン工法(河川堤防)、固結工法(河川、個別敷地内)および動圧密工法(個別敷地内)である。

これらの多くは、液状化対策を目的としていない軟弱地盤対策工であるにもかかわらず、結果的に液状化対策の効果を発揮したことが確認された。

特に、ポートアイランドおよび六甲アイランドについては、護岸の甚大な被害に対比されたために、地盤改良の効果が今までになく注目されることとなった。

液状化対策工法の効果とその評価法を確立するために、振動台・遠心模型実験あるいは現場実験に基づく実証的研究とともに、数値解析に基づく研究が行われている。

これらには、従来からの軟弱地盤改良工法の液状化対策への適用性を研究しているものもあるが、研究の動向としては、せん断変形抑止工法としての、固結工法による部分改良および矢板、ジオテキスタイル、さらには基礎杭による変形の抑止効果など、効率的な改良工法の開発が主流を占めている。この分野においても、有効応力解析の適用が進んでいる。

2・4・2 地震被害にみる対策効果の実態

ポートアイランドおよび六甲アイランドでは、軟弱層の圧密促進および埋立地盤の支持力増加を目的にした地盤改良が実施されている。両島の詳細は、塚本ら(本章4.)が報告している。

Yasudaら¹⁰⁾は、両島の地盤改良と液状化による地盤変状を詳細に調べ、地盤改良工法と地盤沈下の関係を示した(図-14)。その結果、ロッドコンパクションおよびサンドコンパクション工法で改良された地域では、液状化が発生しておらず、サンドドレーンおよびプレローディング工法については、液状化をある程度抑制していることを報告した。

淵田ら¹⁰⁾は、サンドコンパクション工法が実施されているポートアイランド、六甲アイランドのほか数地点を抽出し、彼らの開発した有効応力解析プログラムを用いて、改良効果の評価を試みた。その結果、液状化に対する改良効果を追認できることを報告した。

河川堤防の被害が甚大であった西島地区では、スーパー堤防整備事業に基づく地盤改良の試験工事が行われていた。この地点では、締め固め砕石ドレーン工法および深層混合が施工されている。柴田⁹⁾は、周辺の被害状況と噴砂等の痕跡のない改良地盤を対比することにより、これらの改良効果を確認した。

川井ら(本章2.)は、河川堤防の矢板の根入れ深度

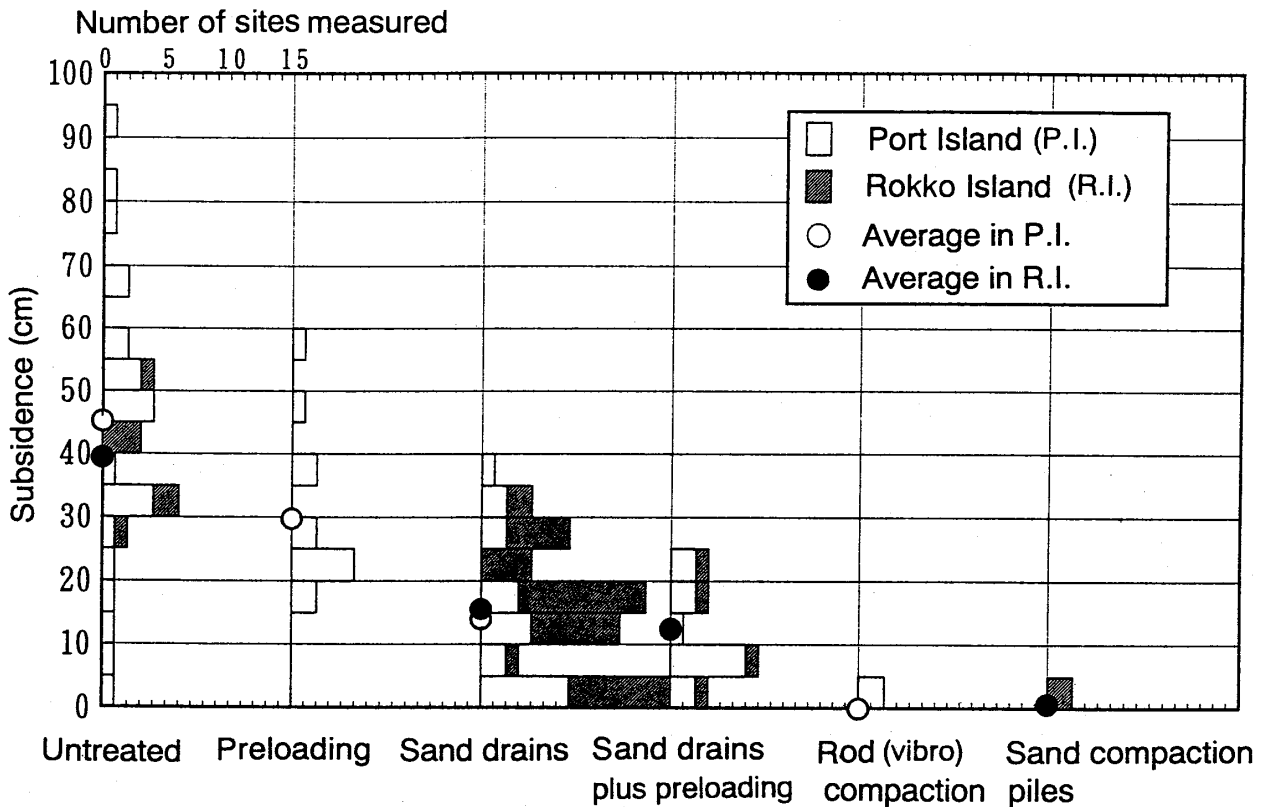


図-14 種々の地盤改良が実施された地区における地盤沈下の比較¹⁰⁾

Fig. 14 Comparison of ground subsidence treated with different methods of ground improvement¹⁰⁾

が液状化の深度を上回るほどに、被害が低減される傾向にあると考察している。この傾向は、矢板の変形抑止効果の現れとも思われる。

動圧密工法の改良効果を確認した例として、安田¹⁰⁴⁾は南大阪湾岸北部処理場の調査結果を報告している。この処理場も、埋立て地内に位置している。

固結工法の特殊な例として、鈴木ら¹⁰⁵⁾は中央突堤の埠頭にある高層建築物の施工例を紹介している。この建築物の基礎地盤は、液状化対策を目的とした地盤改良が実施されていた。ここでは、建築物の直下を深層混合処理によって格子状に改良する工法を採用し、杭基礎周辺の液状化と変形の抑止が図られている。その結果、周辺の埠頭は大きく変状を来したにもかかわらず、改良体を含めて、無傷の状態が確認されている。

兵庫県南部地震では、想像を超えた地震動が作用したにもかかわらず、地盤改良が液状化対策に効果を発揮したことに衆目が集まった。しかも、液状化対策としてみるならば、比較的粗な改良についても効果があった点が注目されている。

しかし、翻して考えるならば、改良の効果を如何に判定するか、果たして加速度が設計に対して有効な指標であるのか等々、新たな研究課題が突きつけられたとも言

える。

このような液状化の評価に関連して、埋立て土層で流動的な液状化現象が発生したのかを、実際に確認することを試みている例も見受けられる。

南荘ら¹¹⁰⁾は、噴砂が多量に噴出した南芦屋浜で、開削調査を実施した。その結果、液状化したと想定される埋立て土層の構造が、乱されない状態を保っていることを報告している。液状化現象の定義にも関連することであるが、噴砂の現象をもって流動的な崩壊が生じたことに、疑問を投げかけたものとして注目される。

これまでの研究成果から、明らかに液状化すること、あるいは明らかに液状化しない条件を、ある程度定量的に示すことが可能な段階とみることができるとは。しかし、地盤改良も行われておらず、液状化しても不思議ではない条件であっても、液状化していない埋立て地盤が存在する。このようなことをみても、液状化の有無を判断する条件には、不確かな面が残されている。液状化が発生するか否かの条件を、さらに研究することが望まれる。

3 液状化の評価に関するその後の取り組み

地震時に発生する地盤の液状化現象については、未だ未解明な部分があるものの、その力学的な発生メカニ

ズムに関しては、液状化の原理に関する共通の認識が定着し、土質力学の一つの体系が確立されているといっても良いであろう。

液状化の力学としての確立と、それに基づく液状化の定量的な評価方法は、新潟地震以降の被害地震で発生した現象によって検証されてきた。

これらの経験と力学的体系に基づいて、土木・建築物の各種耐震設計基準の中に、液状化に対する「設計上想定すべき地震動」、「検討の対象とすべき土層」および「液状化の解析方法」が定められている。

これに対して、兵庫県南部地震は以下の3つの大きな問題を提起した。

- 1) 考慮すべき地震動の大きさ
- 2) 液状化の対象となる土質
- 3) 液状化に伴う地盤・土構造物の変形

その結果、従来の液状化の評価方法に対して、想定する外力および対象とする土層を、機械的に拡大解釈することの妥当性の検討、さらには、液状化に伴う流動的な変形を評価する方法の検討が、求められることとなった。

本章では、兵庫県南部地震以降の技術的な取り組みの観点から、最近の動向を整理し、今後の課題を考えてみる。

3・1 液状化現象の考え方と物性評価の動向

3・1・1 液状化の定義と一般的な評価方法の現状

「液状化」という言葉が社会に広まる中で、「地盤が液化する」ことによって、「流動的な変形・崩壊」を引き起こすという一面だけが一人歩きし、衆目を集めるようになった。

これと同様の認識が、技術関係者にも広まっている。すなわち、耐震設計等に基づいて液状化すると判定された土は、すべてが液化して流動的な変形を生ずるものと理解されることが多々ある。このような状況を生みだしている原因の一つに、液状化の定義の曖昧さを挙げることができよう。

そこで、液状化の定義について、簡単に振り返ってみることにする。

地盤工学会発行の土質工学用語辞典によれば、「液状化」は以下のように定義されている。

「間隙水圧が上昇して有効応力が減少する結果、飽和砂質土がせん断強さを失うことを液状化という。完全な液状化は有効応力ゼロの状態と対応しており、そのとき、間隙水圧は全応力と等しくなるまで上昇している。」

この定義によれば、完全な液状化とは、土が固体的性質を失い液体としての性質を持つようになることを意味している。

地震時の液状化について、初めて実験的に確認したのは、最上ら¹¹⁾であろう。最上らは、振動時に砂の強度が著しく低下することを「液化」と呼び、これ以降、「liquefaction」という言葉が使われ始めた。

Seedら¹²⁾は、液状化のメカニズムを実験的に明らかにし、その後の一連の研究の中で、砂質土の液状化抵抗を定量的に表す方法を確立した。

すなわち、「液状化は、飽和した砂質土が非排水条件下で繰返しせん断を受けることによって発生する」ことを明らかにし、「砂質土の液状化抵抗（繰返しせん断抵抗）が、非排水繰返しせん断試験から求められる、液状化を発生させるに必要な繰返しせん断応力振幅で表すことができる」ことを提案した。

繰返しせん断試験を行う上での液状化の条件は、「有効応力がゼロ」になるか、「ひずみ振幅がある値に達する」ことと定められることが多い。

この結果、地盤の地震応答解析から推定した発生せん断応力と、上記の液状化抵抗の大小関係から、液状化に対する安全率が定量的に求められることになった。

Seedらの提案は、その後の多くの研究者に受け入れられ、現在に至っている。

国内の耐震設計基準でも、この考え方を踏襲しているが、液状化抵抗としては、非排水繰返し三軸試験に基づいて、軸ひずみ両振幅が5%を目安にしているのが一般的である。

ここで注意しなければならないのは、これまでの設計地震動に対しては、比較的緩い砂の液状化が問題となっていたという点である。緩い砂の場合には、液状化抵抗と定義した繰返しせん断抵抗が、発生応力を下回る状態を、完全な液状化とみなしても問題はなかった。

しかし、兵庫県南部地震のように非常に大きな地震動に対して、単に発生ひずみで液状化抵抗を定義した場合に、比較的締まった砂質土においても、計算上液状化する結果となる可能性がある。

地震動によって砂質土中の過剰間隙水圧が上昇した場合、固体から液体への性質の変化すなわち液状化が生じるのか、固体の性質を保持したままで塑性的なせん断破壊が生じるのか、現行の設計基準はこの点を評価するものではないことに留意する必要がある。

3・1・2 土の状態から見た液状化の評価

液状化の再定義の動きは、設計地震動の見直しに合わせて、地盤・土構造物の液状化対策に、保有耐力的な考え方を導入する必要性が高まってきたことの現れと見ることができる。ある程度の変形は許容しても、必要な機能を保持することを考える場合、液状化についても変形

性に着目した定義が求められる。

液状化という現象にかかわる砂質土の変形挙動は、土の物質としての性質あるいは土を取り巻く力学的な条件（例えば、力の釣合い条件や境界条件）によって異なることが、これまでに明らかにされている。

密な砂では、繰返しせん断とともに過剰間隙水圧が蓄積されるが、等方状態で有効応力がゼロになったとしても、せん断過程では変形とともにせん断抵抗が発揮され、緩い砂のような流動的な変形を生じない。

「液状化」の定義に対して、密な砂のこのような特徴を「サイクリックモビリティ（Cyclic Mobility）」あるいは「繰返しせん断変形」という言葉で表現している。

Seedらの一連の研究の過程で、De Albaら¹¹³⁾は、広範な密度の液状化抵抗を考える上で、繰返しせん断抵抗に加えて限界ひずみによる評価の考え方を提示した。限界ひずみとは、一定の条件下で繰返しせん断を受けた場合に、砂質土に発生する最大のひずみを意味している。緩い砂の場合、有効応力を失うとともに著しいひずみが発生する（流動的な変形）のに対して、密な砂では、有限のひずみに留まる（繰返しせん断による塑性化）ことから、液状化と繰返しせん断変形を定量的に評価することができる。

砂質土の初期構造に着目した研究においても、静的なせん断変形に流動性が現れること明らかにされている。

石原ら¹¹⁴⁾は、砂質土の初期構造の持つダイレイタンシー特性から、砂質土の静的な非排水せん断変形を「流動型」、「限定流動型」および「非流動型」の3種類に分類した。さらに、地震によって過剰間隙水圧が上昇した後の地盤の変形は、砂質土の初期構造に規定される固有の変形特性と、地盤内の応力バランス・境界条件に支配されることを指摘した。

一方、液状化後（繰返しせん断によって、有効応力を失った後、あるいは所定のひずみ振幅に達したのち）の変形特性の研究が、兵庫県南部地震以降に限ってみても、多数行われている（付表-1）。その結果、せん断初期に、せん断抵抗が極めて低く、流動的な変形を示す領域があることが確認されている。この事実は、非排水繰返しせん断試験で発生するひずみの大半が、せん断応力が極めて小さい部分に集中することと、相通じる現象と見ることができよう。せん断初期に現れる流動的な領域は、密度が低いほど著しく、密度が高くなるとせん断抵抗がわずかな変形で回復することが報告されている。

初期構造から規定される変形の流動性と、繰返しせん断後の変形の流動性の関係については、現状では明らか

にされていない。この点を統一的に解釈することが、地震後の破壊形態を予測する上で、重要な課題のように思われる。

地盤工学会においても、「永久変形に関する委員会」の活動を通して、液状化に関する用語の再定義ならびに液状化後の変形挙動の検討を進めている。

このような土の状態を反映した液状化の評価方法も、これまでも提案されてはいるが、国内の設計基準では取り入れられていないのが現状である。

3・1・3 地震応答解析と永久変形解析

地震応答解析は、地盤の地震時挙動の研究に必要な不可欠な解析手段として用いられているとともに、近年では、土木・建築構造物の耐震設計にも適用されている。

液状化の評価に限っても、砂質土の物性評価と合わせて、地盤の地震応答を解析することが必要である。

液状化の評価に関連する地震応答解析についても、兵庫県南部地震が大きな問題を提起した。地盤の地震応答解析は、地盤の非線形性のある程度加味した、等価線形モデルによって行われることが一般的であった。しかし、入力する地震動の大きさによっては、地盤内に発生するひずみが大きく、等価線形解析の適用範囲を超えてしまうことになる。

この問題は、古くから指摘されているところであり、非線形解析、弾塑性解析といったより複雑な解析手法が開発されてきた。さらに、繰返しせん断変形を説明できる構成モデルの研究が進み、動的な有効応力解析も可能な状態に至っている。

このような解析は、もっぱら研究的に行われるに過ぎなかったが、兵庫県南部地震が、有効応力解析の検証の場を与えた。これらの事例は、2・1節で紹介したとおりである。その中で、従来の解析方法の適用性も検討されてはいるが、それ以上に、有効応力解析の実務への導入が具体的に進み始めている。

この典型的な例が、運輸省港湾技術研究所による動的有効応力解析の公開であり、実務者を対象とした研究会も発足している。ここでの地震応答解析の果たす役割は、単に地震応答を求めるのではなく、むしろ、液状化に伴う地盤・構造物の変形問題を解析するところに主眼が置かれている。

地盤の液状化に伴う永久変形の予測に関する研究は、これまでも多くの研究者によって進められてきたが、兵庫県南部地震を契機として、一段と活発化した。この状況の一部は、2・3節で紹介したとおりである。

有効応力解析の果たす役割は、地盤の地震応答を求めるだけでなく、地震に伴って発生する永久変形を予測

することも、大きな目的の一つになっている。

永久変形解析に関しては、上述の有効応力解析のみならず、全応力解析や流体としての解析が試みられている。

3・1・4 今後の課題

液状化に関する取り組みは、今後も精緻な構成則に基づく研究や永久変形の研究が、主流を占めるものと考えられる。

より大きな地震動を想定した耐震設計が求められる中で、このような研究成果を耐震設計に反映させていくためには、以下の点を明確にしていくことが必要であろう。

<物質としての特性>

- ① 破壊の観点：液状化とサイクリックモビリティの区分
- ② 変形の観点：流動型、限定流動型および非流動型の変形性を示す材料の条件

<場としての条件>

- ③ 変形を誘発する条件（液状化対象層の荷重・境界条件等）
- ④ 構造物との相互作用（土圧・水圧・地盤反力等）

一方、現在の液状化に関する評価技術の礎となっている基礎的な知見の多くは、1960年代から1970年代にかけての精力的な研究の成果である。その後、実験技術の向上が飛躍的に進み、様々な実験が精度良く実施できる状況にある。また、液状化に関する記録も数多く集積されてきた。

そのような過程で、いくつかの問題も生じてきている。

いわゆる液状化抵抗一つをとっても、実験装置の改良と試験の基準化を経て、得られる実験結果に差が出てきていることも事実である。ポートアイランドの埋め立てに用いられたまさ土の液状化抵抗にしても、建設時のデータと現在のデータを直接対比できない違いが生まれているように見受けられる。

複雑な構成則に基づく解析が研究の主流となり、実務にも浸透し始めた今日にあって、液状化に関する土の基本的性質を、最新の技術に基づいて洗いなおすことも必要不可欠である。

3・2 設計指針・基準の動向

3・2・1 兵庫県南部地震の影響

設計指針・基準は、土木学会耐震基準等に関する提言集¹¹⁵⁾にも示されているように、過去の被害地震によって改訂されてきた。液状化についても1995年兵庫県南部地震が、各種設計指針・基準に対して与えた影響は大きい。地盤の液状化の判定等に関して、この影響を簡単にとりまとめると以下ようになる。

- ① まさ土を主体とする均等係数が大きく、平均粒径 (D_{50}) が2 mmを越える埋立地盤が液状化した。このため基準等において、液状化判定の対象となる土の範囲を変更する必要が生じた。
- ② 地表での最大加速度が、800Galを越えるような非常に大きな地震動が発生した。このため比較的締まった (N値の高い) 砂質土および礫質土の液状化強度を見直す必要が生じた。
- ③ 非常に大きな地震動が発生したため、液状化判定を行う際の地表面設計水平震度を変更する必要が生じた。
- ④ 今回の地震動は、直下地震で繰り返し回数の少ないものであった。このため地震動波形の液状化強度に対する影響を考慮する必要が生じた。
- ⑤ 地盤の液状化に伴う側方流動が発生した。これについて流動化に対する耐震設計法を規定する必要が生じた。

このような項目が、液状化に関する設計指針・基準への共通の課題となったと考える。

3・2・2 設計指針・基準の改訂の概要

ここでは、液状化判定法が各種の指針に引用されるという意味で代表的な指針として、道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹¹⁶⁾と、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹¹⁷⁾について、その改訂の概要を示す。

1) 道路橋示方書

道路橋示方書については、1996年12月に改訂された。改訂の全体の背景については、龍岡²⁹⁾に詳しいが、上記の①～⑤の項目全体にわたる改訂である。液状化判定法の主な改訂点を表-3¹¹⁸⁾に示した。具体的な改訂点については表-3によるが、上記①～⑤の項目について改訂の概要を述べる。

- ① 旧道路橋示方書¹¹⁹⁾では、液状化判定の対象となる土は、平均粒径 (D_{50}) が $0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 2\text{mm}$ の沖積砂質土とされていた。兵庫県南部地震のまさ土の場合、平均粒径が2 mmを越え、締め固められておらず、かつ D_{10} が0.1mm以下と小さいため、透水係数が小さく地震時に非排水に近い状態であったため液状化したと考えられる。このため今回の改訂では、平均粒径 (D_{50}) の上限を大きくすると共に、 D_{10} に上限値を設けて、むやみに礫地盤の液状化の検討をしないようにしている。
- ② 旧道路橋示方書¹¹⁹⁾では、液状化判定に用いる地表面標準設計水平震度 (K_h) を $K_h=0.15$ としており、今回のような非常に大きな地震動は想定していなかった。このため液状化強度については、標準貫

表-3 道路橋示方書における液状化判定法の主な改訂点¹¹⁸⁾

Table 3 Major revisions in liquefaction judgment methods of the Specifications for Highway Bridges¹¹⁸⁾

項目	旧版	改訂版
液状化の判定を行う必要がある土層	1) 沖積砂質土 2) 地下水位が現地盤面から10m以内、かつ深さが20m以内 3) $0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 2.0\text{mm}$	1) 原則として沖積砂質土 2) 地下水位が現地盤面から10m以内、かつ深さが20m以内 3) $F_c \leq 35\%$ 、あるいは $I_p \leq 15$ 4) $D_{50} \leq 10\text{mm}$ 、かつ、 $D_{10} \leq 1\text{mm}$
F_L	$F_L = \frac{R}{L}$	
動的せん断強度比 R	(沖積砂質土) $R = R_1 + R_2 + R_3$ $R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}}$ $R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02\text{mm} \leq D_{50} \leq 0.05\text{mm}) \\ 0.225 \log_{10} (0.35/D_{50}) & (0.05\text{mm} < D_{50} \leq 0.6\text{mm}) \\ -0.05 & (0.6\text{mm} < D_{50} \leq 2.0\text{mm}) \end{cases}$ $R_3 = \begin{cases} 0.0 & (0\% \leq FC \leq 40\%) \\ 0.004FC - 0.16 & (40\% < FC \leq 100\%) \end{cases}$	$R = c_w \cdot R_L$ $R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-2} \cdot (N_a - 14)^{1.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$ ここで、 <砂質土の場合> $N_a = c_1 \cdot N_1 + c_2$ $N_1 = 1.7 \cdot N / (\sigma'_v + 0.7)$ $c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases}$ $c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases}$ <礫質土の場合> $N_a = (1 - 0.36 \log_{10}(D_{50}/2)) N_1$
補正係数 c_w	($c_w = 1.0$)	タイプI地震動 $c_w = 1.0$ タイプII地震動 $c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$
地震時せん断応力比 L	$L = \gamma_d \cdot k_s \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v}$	
地表面設計水平震度	$k_s = c_z \cdot c_c \cdot c_i \cdot k_{s0}$ $k_{s0} = 0.15$ c_z : 地域別補正係数 c_c : 地盤別補正係数 $c_c = 0.8$ (I種地盤) 1.0 (II種地盤) 1.2 (III種地盤) c_i : 重要度別補正係数	$k_{nc} = c_z \cdot k_{nc0}$ タイプI地震動 $k_{nc0} = 0.30$ (I種地盤) 0.35 (II種地盤) 0.40 (III種地盤) タイプII地震動 $k_{nc0} = 0.80$ (I種地盤) 0.70 (II種地盤) 0.60 (III種地盤) c_z : 地域別補正係数

入試験のN値の平方根 (\sqrt{N}) に比例させており、大きなN値の場合、液状化強度を過小評価²⁹⁾していた。これについて龍岡²⁹⁾は、1981年に文献¹²⁰⁾で液状化強度~N値の修正提案を行っている。

今回の改訂では、凍結サンプリングにより現位置不攪乱料金を採取し、室内試験を行うことにより、N値の高い砂質土および礫質土の液状化強度を見直している。

- ③ 液状化判定に用いられる地表面標準設計水平震度は、 $K_h = 0.15$ から最大 $K_h = 0.80$ まで引き上げられている。この震度は、土木学会の提言¹¹⁵⁾によるレベル2地震動に相当する大きさである。
- ④ 波形の液状化強度に対する影響とは、密な砂について、振幅の大きな地震動の波数が少なければ、繰返しせん断応力に対して、非常に大きな抵抗力を示

すことを考慮²⁹⁾することである。今回の改訂では、累積損傷度法により検討が行われ、内陸型直下地震では、最大2倍の液状化強度の補正が加えられた。これに関連して、龍岡²⁹⁾によれば、密な砂に対しては、繰返し非排水三軸試験で、両振幅で10%程度の軸ひずみで液状化を定義しなければ過小評価であるとの意見がある。

- ⑤ 液状化による側方流動については、「そのメカニズムは、まだ未解明の部分が多いが、地震後、過剰間隙水圧が高まり、ある程度液状化が進んだ段階から流動化がはじまるといわれている。このような段階では、多くの場合、すでに地震動の主要動部分は終わっていると考えられる¹²¹⁾」ことから、今回の改訂では、流動化の影響と慣性力は同時に考慮しなくてよいと規定された。

2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説

港湾の施設の技術上の基準・同解説については、1996年に一部改訂があった。①～⑤の項目についてその概略を述べる。

- ① 液状化判定対象となる土については、現在の基準¹¹⁷⁾を一部修正する方向で検討中である。
- ② 液状化強度の推定においては、N値を用いた液状化判定において、液状化しない可能性が大きい「範囲Ⅲ」と、明らかに液状化しない「範囲Ⅳ」の境界の上限値が、等価N値20から25に引き上げられた。
- ③ 液状化判定に用いられる加速度については、現基準¹¹⁷⁾では、75年期待値に相当する基盤加速度として、100Gal～300Galを用いることになっている。この加速度値は、土木学会提言¹¹⁵⁾のレベル1に相当するものである。また今回の一部改訂では、耐震強化岸壁について、レベル2に相当する基盤加速度を導入している。
- ④ 等価N値と等価加速度による判定のため、波形による液状化強度の補正については、直接的には現れないため改訂の対象とはなっていない。
- ⑤ 液状化に伴う流動化については、現基準¹¹⁷⁾において、その対策を兼ねて地盤改良を積極的に行うむねの解説が示されており、今回は改訂されなかった。

3・2・3 今後の動向

液状化に関する設計指針・基準の今後の動向について、龍岡²⁹⁾も述べているように、「地盤関係の耐震工学では、個々の地盤の状態が千差万別である上に、地盤の状態を簡便でかつ正確に捉えるのは本質的に困難であり、加えて地震中と直後の地盤の液状化挙動を正確に捉えた記録そのものが少ないという基本的弱点を持っている。したがって、なるべく間違いの無いようにするには、設計指針には、基本的なことだけを書いておくしかなくなる。一方、十分細かく記述しないと使い物にならない。」という矛盾がでてくるという可能性は否定できない。これを克服するためには、液状化の挙動を正確に捉えるための地道な研究・観測を継続するしかないと考える。

また「地震動の強さ・波形の高精度な予測は非常に難しいという現実を考慮して、液状化強度を予測する工学的方法を進展させていかないと、バランスを失する²⁹⁾。」と述べているが、地震動の強さ・波形の予測については、現時点でもかなり精度のある解析ができると認識してよいのではないかとと思われる。

液状化判定で用いる設計震度については、大町¹²²⁾が述べている、「入力地震動は、震源断層や地盤構造など

自然要因をもとに物理的・客観的に設定し、重要度は構造物の保有すべき性能面で勘案するのが適当である。」という考え方を基本にしてよいのではないかと考える。上述した「道路橋示方書」と「港湾の施設の技術上の基準」においても、液状化判定に用いる設計震度を算出する方法は異なっており、レベル1およびレベル2地震動を含めて、各分野での考え方の統合が必要な時期に入ってきていると考える。

4 あとがき

兵庫県南部地震では、液状化が引き起こす被害の大きさを、多くの人々が改めて目の当たりにすることとなった。そして、地盤の液状化という一つの現象を見ても、大きな代償と引き替えに、様々な情報と教訓を与えてくれたことは、明白な事実である。本報文で取り上げた調査・研究以外にも、貴重な経験が数多く記録として残されている。これらの膨大な情報を、今後活かしていくための活動が、地震直後から精力的に行われてきた。

それに呼応して、各種の土木建築構造物の耐震設計基準が見直され、かつ土木学会の提言にみられるような想定地震の見直しも、性急なまでに迅速に進められてきた。

液状化の問題にしても、単なる破壊の問題として検討を加えるのではなく、保有耐力的な評価（変形性能の問題）の必要性が強く指摘されるとともに、特に被害の大きい港湾施設においては、積極的にこの種の検討が取り込まれている。

確かに、近代都市の直下で発生した大地震として、かつその被害の甚大さから、工学的な耐震性にかかる議論が沸いてしかるべき状況にあったのは当然のことである。より高度な技術を持って、これらの問題に取り組む姿勢が、ここに紹介した多くの論文からも読み取ることができる。有効応力解析の積極的な適用と、液状化に伴う変形解析の試みは、この種の研究の典型と言える。

これに対して、液状化の可能性を評価するシステムに関しては、兵庫県南部地震以降も、力学的な基本原理と体系の骨格は、合理性を保っていると思われるであろう。

しかし、液状化の力学的な基本原理を支える基礎的な知見に関しては、これを新たな目で確かめる動きは、残念ながらほとんど見られない。

新たな技術の開発・導入はもとよりであるが、新潟地震を契機として築き上げてきた液状化に関する研究の初心に戻り、一人歩きし始めた「液状化」という言葉に対して、破壊現象としての定義を明確にすること、液状化特性の基本を最新の技術で再確認することが求められて

いる。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 國生剛治・佐藤清隆・松本正毅 (1995) : 1995年兵庫県南部地震での地盤の非線形震動特性, 土と基礎, Vol.43, No.9, Ser.No.452, pp.39-43.
- 3) 吉田郁政・栗田哲史 (1995) : 兵庫県南部地震の観測記録を用いたポートアイランド表層地盤の動特性の逆解析, 土と基礎, Vol.43, No.9, Ser.No.452, pp.44-48.
- 4) 吉田 望 (1995) : 1995年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, Vol.43, No.9, Ser.No.452, pp.49-54.
- 5) 翠川三郎 (1995) : 強震時にみられる地盤特性の非線形, 地震, 第2輯, 第46巻, pp.207-216.
- 6) 風間基樹・柳澤栄司 (1995) : 神戸ポートアイランドの鉛直アレーデータを用いた兵庫県南部地震における地盤の応力-ひずみ関係の推定, 第23回地震工学研究発表会, 土木学会, pp.185-188.
- 7) Ansary, M. A., Yamazaki, F., Katayama, T. and Towhata, I. (1995) : Analysis of Ground Motions at a Liquefied site During the 1995 GREAT HANSIN EARTHQUAKE (1995) : 第23回地震工学研究発表会, pp.277-280.
- 8) 吉田 望・中村 晋・末富岩雄 (1995) : 1995年兵庫県南部地震における地盤の非線形とその予測, 第23回地盤震動シンポジウム, 建築学会, pp.39-52.
- 9) 鄭 京哲・大保直人 (1996) : 兵庫県南部地震におけるポートアイランド地盤応答の有効応力解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.169-174.
- 10) 仙頭紀明・鈴木猛康 (1996) : ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いた1次元有効応力解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.165-168.
- 11) Cubrinovski, M. and Ishihara, K. (1996) : Assessment of the KOBE PORT ISLAND Liquefaction through Analytical Simulation of the Vertical array Records, 阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, 土木学会, pp.157-164.
- 12) 曙 恩地・宮島昌克・北浦 勝・金本昌也 (1996) : 飽和砂の間隙水圧発生に及ぼす上下地震動の影響, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.145-150.
- 13) 一井康二・井合 進・森田年一 (1996) : 有効応力解析によるケーソン式岸壁の被害原因分析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.397-404.
- 14) 森田年一・井合 進 (1996) : 平成7年兵庫県南部地震による重力式岸壁の被災数値シミュレーション解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.405-412.
- 15) Sato, K., Kokusho, T., Matumoto, M. and Yamada, E. (1996) : Nonlinear Seismic Response and Soil Property during Strong Motion, SOILS AND FOUNDATIONS, SPECIAL ISSUE, pp.41-52.
- 16) Kazama, M. (1996) : Nonlinear Dynamic Behavior of the Ground Inferred from Strong Motion Array Records at KOBE PORT ISLAND During the 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE : Proceedings of the International Workshop on Site Response, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japan, pp.185-200.
- 17) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・吉田精一 (1987) : 共振法・振動三軸両試験による沖積粘性土の動的変形係数, 第13回土質工学会発表講演集, 土質工学会, pp.569-572.
- 18) 岩崎敏男・龍岡文夫・横田耕一郎 (1977) : 不攪乱粘性土についての室内実験結果, 第12回土質工学会発表講演集, 土質工学会, pp.433-436.
- 19) 岩崎敏男・龍岡文夫 (1977) : 砂のせん断変形係数と減衰の歪依存性について, 第12回土質工学会発表講演集, 土質工学会, pp.417-420.
- 20) 高木義和・龍岡文夫・吉田精一 (1977) : 中空ねじり試験における砂の剛性と減衰, 第32回年次学術講演会講演概要集第3部, 土木学会, pp.263-264.
- 21) 片上典久・斎藤邦夫・小川富美子・中村明彦 (1995) : 液状化で噴出した砂の物理特性 (兵庫県南部地震による災害), 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.67-68.
- 22) 鶴来雅人・有本弘孝・加藤 豊・赤澤隆士 (1995) : 平成7年兵庫県南部地震による大阪での液状化被

- 害, 第30回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.71-72.
- 23) 河井 正・國生剛治・田中幸久 (1995): 兵庫県南部地震によるポートアイランドでの液状化被害について, 第30回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.107-108.
- 24) 沼田淳紀・森伸一郎・三輪 滋 (1995): 神戸人工島で噴出したまさ土の振動台による液状化実験, 第23回地震工学研究発表会, 土木学会, pp.225-228.
- 25) 善 功企・山崎浩之・南兼一郎・中島由貴 (1995): 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察 (その4) 埋立地盤の特性, 港湾技研資料, No.813, Sept.1995, pp.147-166.
- 26) 平澤賢治・松原勝己・脇田和試・吉見憲一・大前延夫 (1996): 大型振動三軸試験装置を用いたレキ質マサ土の液状化試験, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.183-186.
- 27) Shibata, T., Oka, F. and Ozawa, Y. (1996): Characteristics of Ground Deformation due to Liquefaction, SOIL SAND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.65-79.
- 28) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, N. (1996): Soil Characteristics and Ground Damage, SOILS AND FOUNDATIONS, SPECIAL ISSUE, pp.109-118.
- 29) 龍岡文夫 (1995): 地盤の液状化判定に関して, 地震工学振興会ニュース, No.144, 震災予防協会, pp.9-10.
- 30) 地震時の地盤・土構造物の流動性および永久変形に関する研究委員会 (1996): 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するワークショップ, 地盤工学会.
- 31) 濱田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利 (1986): 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, 土木学会論文集, No.376, III-6, pp.211-220.
- 32) 福江正治・北原道広・迫田恵三・川上哲太朗・山崎正一・有田尚史 (1995): 海からみた阪神大震災, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.59-62.
- 33) 片山圭二・沼上 清・村田淳也・佐治 聡・川畑眞澄 (1995): 兵庫県南部地震による液状化が起因となった埋立地の建物被災状況について, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.65-66.
- 34) 鶴来雅人・有本弘孝・加藤 豊・赤澤隆士 (1995): 平成7年兵庫県南部地震による大阪での液状化災害, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.71-72.
- 35) 藤井照久・兵動正幸・若槻好孝・福田直三 (1995): 兵庫県南部地震によるケーソン式岸壁の被災形態に関する一考察, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.73-74.
- 36) 田頭秀和・増川 晋・浅野 勇・堀 俊和 (1995): 平成7年兵庫県南部地震による農業用のため池の被害, 第30回土質工学研究発表会発表講演集, 土質工学会, pp.109-110.
- 37) 森本 巖 (1995): 湾岸地区における液状化被害の特徴「地盤から見た「阪神大震災」」緊急報告会資料, 全国地質調査業協会連合会, pp.96-105.
- 38) 石原研而 (1995): 土質特性と地盤変状, 土質工学会・阪神大震災報告会—地震災害とその教訓—講演概要集, 土質工学会, pp.25-28.
- 39) 時松孝次 (1995): 建築基礎への影響, 土質工学会・阪神大震災報告会—地震災害とその教訓—講演概要集, 土質工学会, pp.31-38.
- 40) 楠田 隆・佐藤賢司・古野邦雄・酒井 豊・香村一夫・風岡 修・香川 淳・森崎正昭・高梨祐司・浅尾一巳・石渡康尊・楡井 久 (1995): 1995年兵庫県南部地震による液状化流動化被害, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 地質学会, pp.125-130.
- 41) 宮地良典・寒川 旭・木村克己・井村隆介 (1995): 阪神地域の液状化と地盤の側方移動, シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 地質学会, pp.131-136.
- 42) 濱田政則 (1995): —阪神・淡路大震災—地盤・構造物の被害と教訓, 公開講座「地盤に関する疑問に答える」Part3, 地盤工学会, pp.17-27.
- 43) Iwao Morimoto・Rolando P. Orense (1995): Liquefaction Induced Ground Failures during the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake., IAMG '95 Abstracts for Technical Programs No.6, pp.277-278.
- 44) 古関潤一: 地盤に関連した被害 (1996): 建築雑誌, [特集] 兵庫県南部地震の被害, pp.54-56.
- 45) 神谷 誠・濱田政則・秋岡義史 (1996): 1995年兵庫県南部地震による地盤変位とひずみ, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.255-256.

- 46) 西本浩司・岡本 厚・長谷川博幸・小林俊一(1996): 地震による地盤永久変位の精密写真計測とその考察, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.257-258.
- 47) 平岡呂晃・山田耕一郎・長谷川憲孝・田中泰雄(1996): ポートアイランド及び六甲アイランドの地盤変状について, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.365-366.
- 48) 川井正彦・小野寺功・前田 諭(1996): 兵庫県南部地震による河川堤防の被災について, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.369-370.
- 49) 西田一彦・八尾眞太郎・楠見晴重・西形達明・伊藤淳志・菅 将憲(1996): 市立西宮高校の震災被害調査(その1) -地盤特性-, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.373-374.
- 50) 前島 修・安田 進・磯山龍二・間々田弘紀(1996): 北海道南西沖地震における後志利別川の液状化地点の地盤調査, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1219-1220.
- 51) 堀越研一・大津宏康(1996): 兵庫県南部地震により被害を受けたPC杭の調査, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1227-1228.
- 52) 酒見卓也(1996): 屋外貯蔵タンクの液状化による沈下被害について, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1231-1232.
- 53) 野村博之・安田 進・石田真一・兼松正幸・寺内哲也(1996): 新潟地震による信濃川流域での液状化にともなう地盤の流動範囲, 第31回地盤工学研究発表会, 発表講演集, 地盤工学会, pp.1249-1250.
- 54) 堀田洋之・社本康広(1996): 六甲アイランドにおける地盤の水平変位測定例, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1251-1252.
- 55) 大岡 弘・時松孝次・社本康広(1996): 液状化に伴う側方流動を受けた建物基礎杭の残留変形モード, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1253-1254.
- 56) 渋谷武弘・濱田政則・若松加寿江・目堅智久・海老原夕香(1996): 1995年兵庫県南部地震による地盤の側方流動(その1) -側方流動の特性に関する検討-, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1257-1258.
- 57) 若松加寿江・濱田政則・渋谷武弘・目堅智久・海老原夕香(1996): 1995年兵庫県南部地震による地盤の側方流動(その2) -護岸と地盤の変位に関する検討-, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1259-1260.
- 58) 濱田政則・大町達夫(1996): 直下地震による表層地盤の変位量とひずみ量の検討, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.69-80.
- 59) 松永康男・及川 研・輪 湖建(1996): 阪神・淡路大震災による重力式港湾構造物の基礎地盤部の変形, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.383-390.
- 60) Shibata, T., Oka, F. and Ozawa, Y. (1996): Characteristics of Ground Deformation due to Liquefaction, SOILS AND FOUNDATION SPECIAL ISSUE, pp.65-79.
- 61) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K. (1996): Liquefaction-Induced Ground Displacement and Its Related Damage to Lifeline Facilities, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.81-97.
- 62) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. (1996): Soil Characteristics and Ground Damage SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.109-118.
- 63) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatimi, T. (1996): Performance of Caisson Type Quay Walls at Kobe Port, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.119-136.
- 64) Towhata, I., Ghalandarzadeh, A., Sundarraj, K.P. and Vargas-Mange, W. (1996): Dynamic Failures of Sub-soils Observed in Waterfront Areas, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.149-160.
- 65) Akamoto, H. and Miyake, M. (1996): Earthquake-Induced Settlement in Naruohama Reclaimed Land, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.161-167.
- 66) Sekiguchi, H., Kita, K., Hashimoto, K. and Katsui, H. (1996): Deformation of Composite Break waters due to Ground Shaking, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSUE, pp.169-177.
- 67) Matsuo, O. (1996): Damage to River Dikes,

- SOILS AND FOUNDATIONS, pp.235-240.
- 68) Tani, S. (1996) : Damage to Earth Dams, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSURE, pp.263-372.
- 69) 嘉門雅史・三村 衛・勝見 武 (1995) : 低平地における液状化災害と関連被害に関する研究, 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究, pp.229-236.
- 70) 社本康広・堀田洋之 (1995) : 地盤の被害, 1995年兵庫県南部地震調査報告書, 清水建設, pp.123-142.
- 71) 石原研而 (1995) : 液状化とそれに伴う地盤の変化, 基礎工, Vol.23, No.10, pp.28-29.
- 72) Sassa, K., Fukuoka, H., Scarascia-Mugnozza, G. and Evans, S. (1996) : EARTHQUAKE-INDUCED-LANDSLIDES: DISTRIBUTION, MOTION AND MECHANISMS, SOILS AND FOUNDATIONS SPECIAL ISSURE, pp.53-64.
- 73) 内田明彦・畑中宗憲 (1996) : ある埋立マサ土の液状化特性—神戸ポアイランド—, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.955-956.
- 74) 小林一人・濱田政則・小松宏至・三野栄作 (1996) : マサ土の側方流動に関する実験的研究, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.963-964.
- 75) 三藤正明・菅野高弘・稲富隆昌 (1996) : 兵庫県南部地震により被災したケーソン式岸壁の模型振動実験, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1203-1204.
- 76) 森田年一・菅野高弘・飯塚栄寿・三藤正明 (1996) : 平成7年兵庫県南部地震により被災した重力式岸壁の模型振動実験および検証解析, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1205-1206.
- 77) 佐藤正義・社本康広・後藤 茂・桂 豊・木全宏之 (1996) : ケーソン岸壁および杭基礎の液状化被害に関する遠心振動実験, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.391-396.
- 78) 平井芳雄・山下 満・丸岡正夫・菊一大輔 (1996) : 兵庫県南西部地震時のポートアイランドにおける液状化による地盤沈下について, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1025-1026.
- 79) 松永康男・及川 研・石原克治 (1996) : 阪神大震災によって被災した重力式岸壁の簡便な地震時変形解析, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1133-1134.
- 80) 山崎浩之・善 功企・佐渡篤史 (1996) : 地震時の岸壁変形の簡易な算定, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1137-1138.
- 81) 藤井俊二・M. Cubrinovski・林 理・嶋津伸一・時松孝次 (1996) : 液状化地盤に建つ杭基礎建物の応答解析—兵庫県南部地震における被害および無被害建物の解析—, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1139-1140.
- 82) 塩見忠彦・室本隆司・谷 茂 (1996) : 農業用フィルダムの動的有効応力解析による地震時挙動, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1263-1264.
- 83) 石原克治・角南 進・Moriwaki. Yoshi (1996) : 河川堤防の地震時変形解析, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1265-1266.
- 84) 長尾和之・川井 実・伊藤 譲・鄭 京哲 (1996) : 兵庫県南部地震における高速道路盛土の挙動に関する解析, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1269-1270.
- 85) 田口洋輔・八嶋 厚・岡二三生・杉戸真太・梅川誠・古川浩司 (1996) : 人工島全体を対象とした地盤の3次元液状化解析, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1289-1290.
- 86) 規矩大義・吉田 望・安田 進 (1996) : 液状化に起因した護岸背後地盤の側方流動, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, 地盤工学会, pp.1297-1298.
- 87) 宮田正史・野津 厚・菅野高弘・井合 進 (1996) : 港湾地域で得られた既往大地震記録の比較とケーソン式海岸の被災程度に関する一考察, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.53-60.
- 88) 東畑郁生・ブラサドクリシュナスンダラジ・アッパースガランダルザデ (1996) : 土構造物の大変形挙動から推定した土の残留強度の報告, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.131-136.
- 89) 佐々木康・古関潤一・塩路勝久・松井 清・近藤嘉宏・馬淵敏治 (1996) : 兵庫県南部地震による東灘下水処理場の被害, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.289-295.
- 90) 山崎浩之・善 功企・佐渡篤史・館下 徹 (1995) :

- 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その5）液状化の判定に関する検討，港湾技研資料 No.813, pp.167-205.
- 91) 井合 進・一井康二・森田年一（1995）：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その7）ケーソン式岸壁の有効応力解析，港湾技研資料 No.813, pp.253-279.
- 92) 野津 厚・上部達生・高野剛光（1995）：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その8）ケーソン式岸壁の地震時滑動に関する数値解析，港湾技研資料 No.813, pp.281-300.
- 93) 地震予知総合研究振興会（1995）：軟弱地盤の地震時挙動とライフライン施設の耐震性に関する研究，平成6年度調査・研究報告書。
- 94) 森本 巖（1995）：湾岸地区における液状化被害の特徴「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会資料，全国地質調査協会連合会，pp.96-105.
- 95) 柴田 徹（1995）：液状化対策の効果，土質工学会・阪神大震災報告会－地震災害とその教訓－講演概要集，土質工学会，pp.29-30.
- 96) 石原研而（1995）：地盤災害と液状化対策の有効性，第10回「大学と科学」公開シンポジウム 都市震災と防火システム，pp.11-12.
- 97) 原田健二・安田 進・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効果に関する考察，第23回地震工学研究発表会，土木学会，pp.229-232.
- 98) 濱田晃之・井上隆夫・大濱雅信・諏訪靖二・福田光治（1996）：兵庫県南部地震における南芦屋浜と西宮浜の液状化特性（その1），第31回地盤工学研究発表会発表講演集，地盤工学会，pp.559-560.
- 99) 諏訪靖二・井上隆夫・大濱雅信・福田光治・濱田晃之（1996）：兵庫県南部地震における南芦屋浜と西宮浜の液状化特性（その2），第31回地盤工学研究発表会発表講演集，地盤工学会，pp.561-562.
- 100) 坪井英夫・高橋嘉樹・原田健二・新川直利・石原研而・安田 進（1996）：兵庫県南部地震における液状化による被害と地盤改良工法の効果，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.217-220.
- 101) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N. (1996) : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, SOILS AND FOUNDATIONS, SPECIAL ISSUE, pp.99-107.
- 102) 藤山秀章（1995）：阪神・淡路大震災における河川の被害とその対応，地震工学振興会ニュース No.145, pp.4-6.
- 103) 鈴木吉夫・斎藤 聡・木村 玄・木林長仁・細見尚史（1995）：格子状地盤改良による液状化対策を施した建築基礎の調査報告，基礎工，Vol.23, No.10, pp.54-58.
- 104) 安田 進（1995）：阪神・淡路大震災における液状化対策工法の効果，基礎工，Vol.23, No.12, pp.28-31.
- 105) 山田岳峰・林 寛・深沢栄造・鄭 京哲（1996）：液状化対策工法としての筋交い固化工法の有効性の検証，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.449-452.
- 106) 福武毅芳（1996）：三次元解析によるポートアイランドの液状化と杭基礎挙動の検討，第31回地盤工学研究発表会発表講演集，地盤工学会，pp.1291-1292.
- 107) 瀧田邦彦・秋吉 卓・松本英敏・兵頭武士（1996）：阪神大震災における地盤液状化とSCP工法の対策効果について，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.209-216.
- 108) 岡下勝彦・渋谷光宣・清水保明・砂坂善雄・大澤一郎・仙波 克（1996）：護岸近傍に設置された水路横断ケーソン基礎の液状化対策工の耐震性照査，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.515-522.
- 109) 岡下勝彦・奥谷貞雄・小嶋省一・藤田 親・木全宏之・塩谷俊之・仲佐俊之・佐藤卓三・福武毅芳（1996）：液状化解析による長大橋ケーソン基礎の地震被害原因の推定と対策工の有効性検証，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.611-618.
- 110) 南荘 淳・久保田耕治・森田悠紀雄（1996）：阪神高速5号線埋土層のテストピット調査，第31回地盤工学研究発表会発表講演集，地盤工学会，pp.371-372.
- 111) Mogami, T. and Kubo, K. (1953) : The Behavior of Sand during Vibration, Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.152-155.
- 112) Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966) : Lique-

- facti on of Saturated Sand during Cyclic Loading, Proc. ASCE, Vol.91, SM6, pp. 105-134.
- 113) De Arba, P., H. B. Seed and C. K. Chan (1976) : Sand liquefaction in Large-Scale Simple Shear Tests, J. GED, ASCE, Vol. 102, No. GT9, pp.909-927.
- 114) 石原研而 (1993) : 地震時の液状化と流動破壊—第33回 Rankine Lecture より—, 土と基礎, Vol.41, No.8, pp.6-12.
- 115) 土木学会 (1996) : 土木学会耐震基準等に関する提言集, 土木学会, pp.42-44.
- 116) 日本道路協会 (1996) : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, pp.83-97.
- 117) 運輸省港湾局監修 日本港湾協会 (1989) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), 日本港湾協会.
- 118) 松尾 修 (1997) : 液状化の判定法と耐震設計, 基礎工, Vol.25, No.3, pp.34-39.
- 119) 日本道路協会 (1990) : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 日本道路協会, pp.37-45.
- 120) 龍岡文夫・足立紀尚 (1981) : 土木学会編新体系土木工学18土の力学 (Ⅲ) —圧密・せん断・動的解析—, 技報堂出版, pp.285-303.
- 121) 田村敬一・濱田 禎・東 拓生 (1997) : 流動化に対する耐震設計法, 基礎工, Vol.25, No.3, pp. 40-46.
- 122) 大町達夫 (1997) : レベル2地震動を考える, 電力土木, No.268, pp.3-11.

付表の出典

The source of appended table

機関等	出典	出典番号	年
学会等	土質工学会 第30回土質工学研究発表会平成7年度発表講演集	1	1995
	全地連* 「地盤から見た“阪神大震災”」緊急報告会資料	2	1995
	地盤工学会 土質工学会・阪神大震災報告会—地震災害とその教訓—講演概要集	3	1995
	日本地質学会 シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集	4	1995
	大学と科学** 第10回「大学と科学」公開シンポジウム 都市震災と防火システム	5	1995
	土木学会 第23回地震工学研究会 講演概要	6	1995
	地盤工学会 公開講座「地盤に関する疑問に答える」Part3	7	1995
	IAMG IAMG '95 Abstracts for Technical Programs	8	1995
	日本建築学会 建築雑誌 [特集] 兵庫県南部地震の被害	9	1995
	地盤工学会 第31回地盤工学研究発表会平成8年度発表講演集	10	1996
	土木学会 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集	11	1996
	地盤工学会 SOILS AND FOUNDATIONS. SPECIAL ISSURE	12	1996
公共機関	文部省*** 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究	13	1995
	震災予防協会 地震工学振興会ニュース	14	1995
	運輸省 港湾技研資料No.813 Sept. 1995 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察	15	1995
建設会社 清水建設 1995年兵庫県南部地震調査報告書	16	1995	
その他	基礎工 Vol. 23 No. 10 特集阪神・淡路大震災と基礎構造	17	1995

*: 全国地質調査協会連合会

**: 第10回「大学と科学」公開シンポジウム～組織委員会

***: 平成6年度文部省科研費(総合研究)

付表-1 液状化による地盤の永久変形に関する調査・研究

Appended Table 1 Research of permanent ground deformation due to liquefaction

分類	対象	筆頭著者名	手法	テーマ	出典	年	備考
被害	埋立護岸	福江	現地調査	護岸の被害	1	1995	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	埋立地	片山	現地調査	沈下	1	1995	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	河川	鶴菜	現地調査	堤防の被害	1	1995	淀川他
被害	埋立護岸	藤井	現地調査	被害形態分類	1	1995	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	ため池	田頭	現地調査	堰埋の被害	1	1995	震源周辺
被害	埋立地	森本	資料調査	液状化被害	2	1995	全般
被害	埋立地	石原	資料調査	側方流動	3	1995	ポートアイランド
被害	構造物	時松	資料調査	構造物への影響	3	1995	全般
被害	全般	楠田	現地調査	沈下・側方	4	1995	全般
被害	埋立地	宮地	現地調査	側方流動	4	1995	臨海地域
被害	全般	濱田	現地調査	沈下・側方	7	1995	全般
被害	埋立	Morimoto	現地調査	沈下・側方	8	1995	臨海地域
被害	全般	古関	現地調査	地盤災害	9	1995	全般
被害	埋立地	神谷	航空写真測量	地盤ひずみを算出	10	1996	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	埋立地	西本	航空写真測量	3次元変位	10	1996	芦屋市南部
被害	埋立地	平岡	水準測量	地表・層別沈下	10	1996	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	河川堤防	川井	開削	変状形態の観察	10	1996	淀川
被害	不整形地盤	西田	開削	地層観察	10	1996	市立西宮高校
被害	微高地	前島	航空写真	側方流動	10	1996	後志別川
被害	埋立地・杭	堀越	現地調査	PC杭の被害	10	1996	神戸市臨海地域
被害	タンク	酒見	現地調査	タンクの沈下	10	1996	神戸市臨海地域
被害	河川流域	野村	航空写真	側方流動	10	1996	信濃川
被害	埋立	堀田	現地調査	側方流動	10	1996	六甲アイランド
被害	杭	大岡	傾斜計	側方流動	10	1996	神戸市臨海
被害	埋立地	渋谷	航空写真・分析	側方流動	10	1996	神戸市臨海
被害	埋立地	若松	記録分析	側方流動	10	1996	神戸市臨海
被害	埋立地	濱田	航空写真	側方流動	11	1996	臨海地域
被害	重力式護岸	松永	現地調査	護岸の変状	11	1996	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	全般	Shibata	現地調査	液状化による地盤変状	12	1996	全般
被害	埋立	Hamada	航空写真	地盤変位	12	1996	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	埋立	Ishihara	現地調査	地盤変位	12	1996	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	重力式護岸	Inagaki	現地調査・模型	ケーソン変位	12	1996	神戸港
被害	全般	Towhata	現地調査	地盤破壊	12	1996	全般
被害	埋立	Akamoto	現地調査	沈下	12	1996	鳴尾浜
被害	防波堤	Sekiguchi	現地調査	沈下	12	1996	神戸港
被害	河川堤防	Matsuo	現地調査		12	1996	淀川
被害	アースダム	Tani	現地調査	堤体変状	12	1996	全般
被害	低平地	嘉門	現地調査	被害調査	13	1995	全般
被害	全般	社本	現地調査	地盤災害	16	1995	全般
被害	埋立地	石原	現地調査	地盤変位	17	1995	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	斜面	Sassa	現地調査・リンクせん断	斜面崩壊	12	1996	仁川・宝塚
実験	力学特性	内田	三軸試験	マサ土の体積圧縮特性	10	1996	ポートアイランド
実験	傾斜地盤	小林	振動台	マサ土の側方流動	10	1996	ポートアイランド
実験	重力式護岸	三藤	振動台	変形の再現	10	1996	ポートアイランド
実験・解析	重力式護岸	森田	振動台・数値解析	変形解析(有効応力)	10	1996	
実験	重力式護岸	佐藤	遠心模型	護岸の変状	11	1996	
解析	水平地盤	平井	実験式	地盤沈下の予測法	10	1996	ポートアイランド
解析	重力式岸壁	松永	数値解析	動的変形解析(動的・全応力)	10	1996	
解析	重力式岸壁	山崎	数値解析	変形解析(自重・全応力)	10	1996	
解析	建物	藤井	数値解析	動的有効応力解析	10	1996	
解析	フィルダム	塩見	数値解析	動的有効応力解析	10	1996	
解析	河川堤防	石原	数値解析	大変形・全応力解析	10	1996	淀川
解析	盛土	長尾	数値解析	動的有効応力解析	10	1996	第二神明
解析	埋立	田口	数値解析	三次元有効応力解析	10	1996	ポートアイランド
解析	埋立護岸	規矩	数値解析	全応力解析	10	1996	ポートアイランド
解析	重力式護岸	宮田	相関分析	側方流動の予測	11	1996	臨海地域
解析	埋立地	栗畑	逆解析	残留強度	11	1996	ポートアイランド
解析	埋立地	佐々木	現地・数値解析	杭基礎の被害	11	1996	東灘下水処理場
解析	重力式岸壁	山崎	数値解析	全応力自重解析	15	1995	神戸港
解析	重力式岸壁	井合	数値解析	動的有効応力解析	15	1995	六甲アイランド
解析	重力式岸壁	野津	数値解析	動的有効応力解析	15	1995	ポートアイランド

付表-2 液状化対策工法に関する調査・研究

Appended Table 2 Research of ground improvements against liquefaction

分類	対象	筆頭著者名	手法	テーマ	出典	年	備考
被害	埋立地	森本	資料調査	液状化被害	2	1995	全般
被害	埋立地	柴田	資料調査	改良効果	3	1995	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	地盤改良	石原	現地調査	改良効果	5	1995	全般
被害	地盤改良	原田	現地調査	改良効果	6	1995	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	埋立地	濱田	航空写真	バグドレイン・サンドドレインの効果	10	1996	南芦屋浜
被害	埋立地	藤訪	航空写真	サンドコンパクション・プレロード・振動締固めの効果	10	1996	西宮浜
被害	埋立地	坪井	現地調査		11	1996	ポートアイランド・六甲アイランド
被害	地盤改良	Yasuda	現地調査	改良効果	12	1996	ポートアイランド・六甲アイランド他
被害	河川堤防	藤山	対策工	復旧	14	1995	淀川
被害	地盤改良	鈴木	現地調査	効果確認	17	1995	神戸港
被害	地盤改良	安田	現地・資料調査	改良効果	17	1995	全般
実験・解析	地盤改良	山田	遠心模型・数値解析	改良効果(有効応力)	11	1996	
解析	杭+地盤改良	福武	数値解析	三次元有効応力解析	10	1996	ポートアイランド
解析	埋立地	瀬田	数値解析	サンドコンパクションの効果	11	1996	ポートアイランド
設計	地盤改良	岡下	数値解析	改良効果	11	1996	ポートアイランド
設計	地盤改良	岡下	数値解析	改良効果(有効応力)	11	1996	ポートアイランド