

[地震動・地盤]

兵庫県南部地震で被災した埋立地の地盤特性と液状化

鳥井原 誠 伊藤 浩二

概要

兵庫県南部地震は、ポートアイランド・六甲アイランドをはじめとする埋立地の港湾施設、建築物、道路、橋梁など数多くの構造物に多大な被害を及ぼした。このような被害の原因究明に当たっては埋立地の地盤特性をできるだけ詳細に把握しておく必要がある。特に今回は過去に例を見ないほど広い範囲で泥水や砂が噴出しており、埋立地盤における液状化現象が改めてクローズアップされている。

本報文はこのような背景を踏まえて阪神地域の埋立の歴史を紹介するとともに、液状化を含む地盤特性と地盤被害との関連性についてまとめたものである。特にポートアイランド、六甲アイランドでは地震後に詳細な被害調査や地盤調査が行われているのでそれらも合わせて示している。また、ポートアイランドでは地表面～GL-83mの範囲で鉛直アレー加速度記録が得られているため、当社が開発した有効応力解析プログラムEFECTで観測結果の検証を行っている。

1. はじめに

Fig. 1は京阪神地域の概略地質図を示したものである¹⁾。我が国の大都市の多くは沖積層を中心に発達してきたものであり、しかも近年は埋立によって海へ向って拡大を続けてきている。この点は神戸、大阪も例外ではなく、特に神戸はポートアイランド、六甲アイランドという巨大な人工島都市を開発してきている。

このような埋立地では地震による被害が発生しやすいと従来から指摘されてきているが、今回の兵庫県南部地震でも、埋立地の液状化現象に起因する地盤の被害が多数みられている。

この報文は、阪神地域の埋立の歴史を紹介するとともに、液状化を含む地盤特性と地盤被害との関連性についてまとめたものである。また、今回の地震ではポートアイランドにおいて地表面～GL-83mに4台の地震計を設置した鉛直アレー加速度記録が得られているため、液状化による土中間隙水圧の発生を考慮することのできる有効応力解析法によって観測結果の検証を行っている。

2. 埋立地の変遷

Fig. 2は大阪湾における埋立地の変遷を示したものである²⁾。明治以降、ほとんどの海岸線で埋立が行われていることが明らかである。この中で兵庫港～神戸港にかけては第2次世界大戦以前のものが多いが、その他の地域や人工島はほとんど戦後に施工されたものである。

埋立柱材としては大阪～神戸間の沿岸部とポートアイランド、六甲アイランド北部はマサ土主体であり、これら二つの人工島南部は神戸層群主体である。ちなみに大阪湾東部は浚渫土が主体である^{1)~4)}。

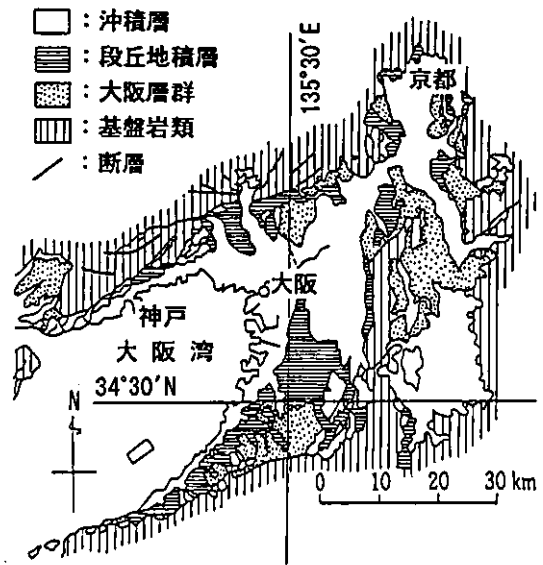


Fig.1 京阪神地域の第四紀層の分布¹⁾
Distribution of Quaternary Deposit in Kei-Hanshin Area

Fig. 3, 4はポートアイランド、六甲アイランドの詳細な埋立履歴である⁷⁾。図中の数字は昭和あるいは平成年を表わしている。ポートアイランドは昭和41年(1966年)に工事着手した後、昭和56年(1981年)に436haの人工島が完成し、引き続き第2期工事として、昭和61年(1986年)から平成8年(1996年)までの予定で390haの造成が現在進められている。六甲アイランドは昭和47年(1972年)に工事着手した後、平成2年(1990年)に580haの造成が完了している。水深はポートアイランドが平均12m、

六甲アイランドが平均 14m である。

これらの人工島の埋立事業に用いた埋立柱材は、神戸市北西の丘陵地である須磨ニュータウン開発地から搬出された土砂が大部分であり、土取り場から須磨棧橋までベルトコンベアで陸送され、そこからはバarge船で海上運搬されている。

埋立柱材の種類としては、ポートアイランドと六甲アイランドの北部では風化花崗岩(マサ土)が使用されているが、六甲アイランドの大部分とポートアイランドの2期工事では神戸層群(砂岩, 泥岩, 凝灰岩)が主体で一部大阪層群が使用されている。

埋立工法としては、海面下-2mまでは底開き式バarge船を用いた海上埋立であり、その後はアンローダーやシフトブルコンベアなどを用いた陸上埋立である。これらは両人工島とも基本的には同一である。

底開きバargeによる埋立は、海底の軟弱な沖積粘土層を乱したり側方流動を起こさせないように、層厚3~4mに分けて順次行われている。その後の陸上埋立に当たっては「バケットホイール式アンローダー+シフトブルコンベアシステム」が使用されている。バケットホイール式アンローダーは直径10.6mのホイールに容量1.8m³のバケットが10個取付けられたもので、1分間に2回転の速度で回転させながらバargeから土砂を揚土する機構になっている。アンローダーで揚土された後、シフトブルコンベア、走行トリッパー、走行スタッカー、クローラコンベア、スプレッダーによって埋立てられている^{5), 6)}。

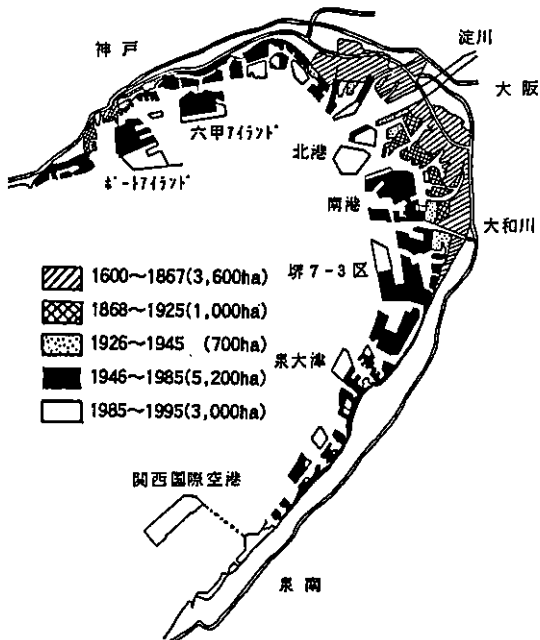


Fig. 2 大阪湾の埋立履歴²⁾
History of Reclamation of Osaka Bay

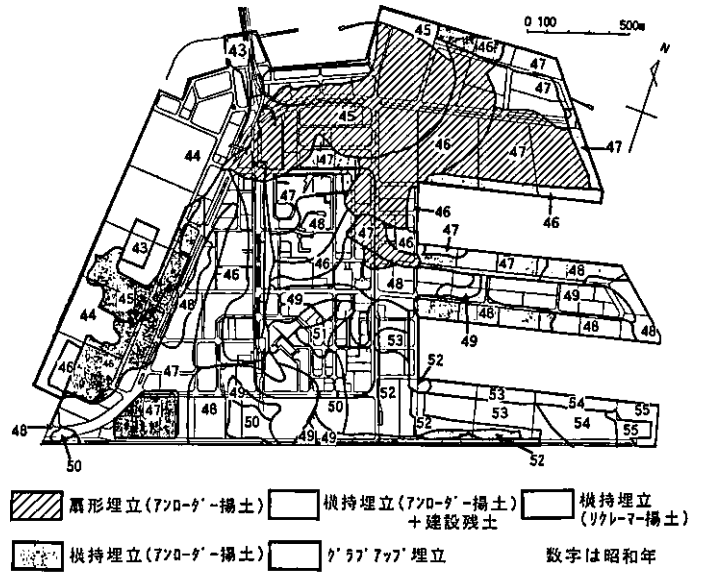


Fig. 3 ポートアイランドの埋立履歴⁷⁾
History of Reclamation on Port Island

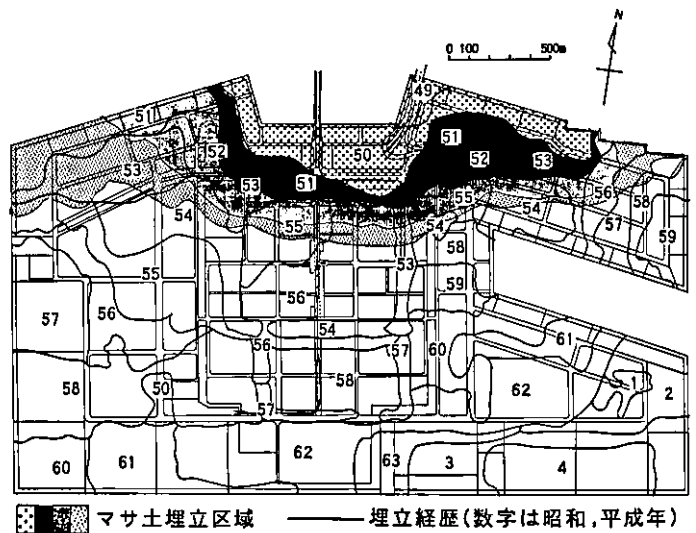


Fig. 4 六甲アイランドの埋立履歴⁷⁾
History of Reclamation on Rokko Island

3.2 土質特性

ポートアイランドの標準的土質柱状図をFig. 7に示す⁹⁾。沖積粘土層以深の土質特性は六甲アイランドもほぼ同様であるといわれている。ただし、厳密にみると沖積粘土層の粒度分布では六甲アイランドの細粒分含有率が他の地区に比べて多いといわれており、液性限界 W_L もポートアイランドが90~110%に対して六甲アイランドは110~125%とやや高くなっている⁷⁾。

ポートアイランドと六甲アイランドの埋立土の粒度分布をFig. 8に示す^{9), 10)}。図中に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」で示されている液状化の可能性がある土の粒度分布も合わせて示している。平均粒径 D_{50} は0.04~10mmと非常に幅広く分布しているが、全体的には相当大きく、2mm以上のレキ分も最大20%と多く含まれている。また、0.074mm以下の細粒分もかなり多く含まれており、従来からいわれている液状化しやすい砂の粒度分布とはやや趣きを異にしている。特に、六甲アイランドの埋立土は神戸層群の泥岩、凝灰岩が破碎されたものであるため細粒分も10~50%と多く含まれている。

これらの粒度分布からみると、両島の埋立土は粒度配合も良く、締固まりやすくて強度も発現しやすい、といったように埋立土としては比較的良好な部類に入ると考えてもよい^{5), 11)}。

両人工島では、埋立によって地震前の段階で既に3~4mの沈下が生じていたが、その原因の多くはFig. 7に示した沖積粘土層 (Ma13) と洪積粘土層 (Ma12) の圧密沈下である。Ma13層の沈下は施工期間中に大部分終了し1次圧密は完了していたと思われるが、それより深部のMa12層の沈下は施工終了後も長期に渡って継続していたといわれている⁷⁾。

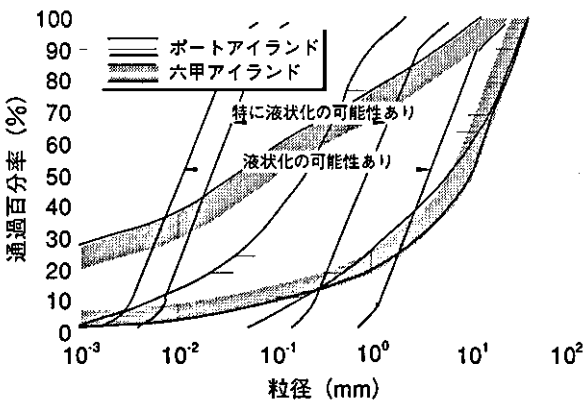


Fig. 8 ポートアイランドと六甲アイランドの埋立土の粒度分布^{9), 10)}
Grain Size Distribution Curve for Fill Soils at Port and Rokko Island

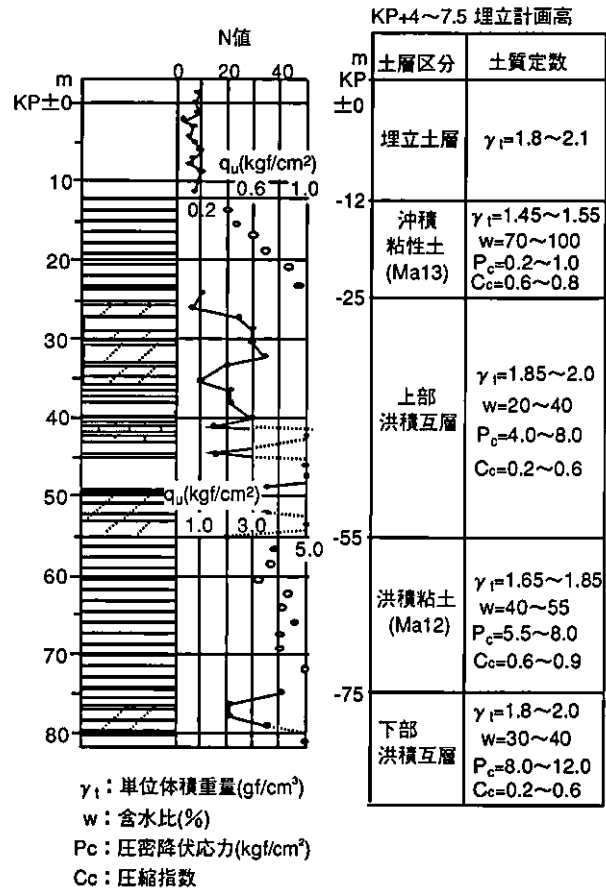


Fig. 7 ポートアイランド標準土層図⁹⁾に追加
Typical Soil Profile on Port Island

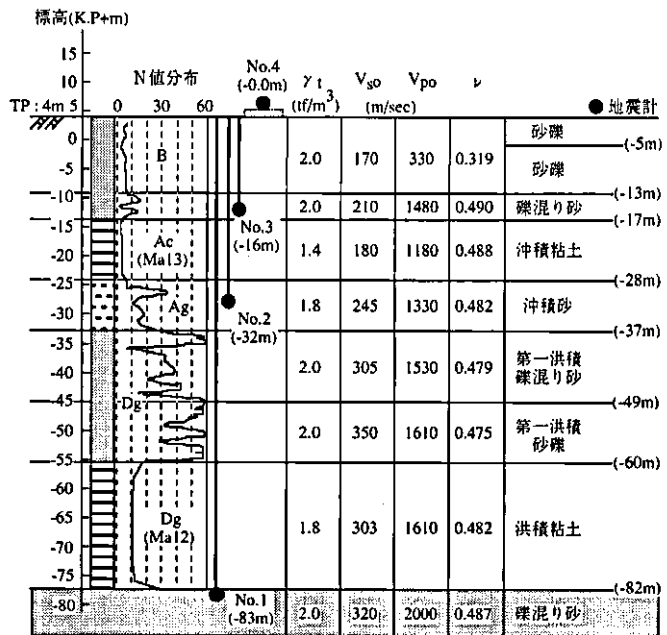


Fig. 9 地震計設置地点の地盤特性^{7), 12)}
The Character of Ground at the Point of Seismeter

3.3 地盤の動的性質

ポートアイランドでは神戸市によって鉛直アレー観測が行われており、今回の兵庫県南部地震でも地表面～GL-83.0m間で4深度の加速度波形が得られている。その地点の土層構成と土質特性および加速度計設置状況をFig. 9に示す^{7), 12)}。

基本的な土層構成はFig. 7と同様であるが、他の地区と比較して埋立層のN値がやや低くなっている。これは、他地区の埋立層では巨レキの混入が多いのに対して、この地点では巨レキが少なく全体的に砂レキ～レキ混じり砂の様相を呈しているからである。

今回の地震で神戸港の港湾施設の大半が被災し、港湾機能がほとんど壊滅状態に陥ったことを踏まえて、運輸省では埋立地盤のうち特にマサ土に着目した詳細な地盤調査、試験を行っている¹³⁾。調査項目は粒度、N値、地盤の密度、動的変形特性、液状化強度など地盤の耐震性検討に不可欠なものとなっている。特に、埋立地盤にはレキが多く含まれているため通常のサンプリング手法では乱さない試料の採取が難しいことに配慮して、凍結サンプリング法を採用し、室内土質試験としても直径300mm、高さ600mmの供試体を用いた大型繰返し3軸試験を実施している。

Fig. 10に液状化試験結果を示す^{13)~16)}。同図には豊浦標準砂の調整試料による地盤工学会の一致試験結果¹⁴⁾とレキ¹⁵⁾および洪積砂レキ¹⁶⁾の試験結果も合わせて示している。今回採取したマサ土の液状化強度は豊浦標準砂に比べれば大きな値となっているが、一般的にみればそれほど大きな値であるとはいえない。

Fig. 11に動的変形試験結果としての $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を示す¹³⁾。同図には、従来から港湾の基準で用いられてきた砂質土の標準曲線も併せて示している。 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線はおおむね一致しているが、 $h \sim \gamma$ 曲線は実測値の方が小さくなっている。

4. 地盤被害と土質特性との関連性

4.1 液状化による噴砂

地震直後の航空写真判読に基づいて作成したポートアイランドと六甲アイランドの噴砂分布をFig. 12, 13に示す⁷⁾。これらの図には、事前に行われていた各種地盤改良工の範囲も参考のために示している。

ポートアイランドは、中央部では噴砂が少ないが周辺部ではほぼ全面的に噴砂に覆われている。中央部の噴砂が少ない部分と事前に地盤改良工を実施した範囲は比較的良い対応を示しており、地盤改良が液状化に対して一定の効果を与えていると考えることができる。ただし、改良工法の中でもサンドドレーンやプレローディングは液状化対策としてではなく粘土層の圧密対策として実施されたものであるにもかかわらず、それらの工法が液状化に対してなぜ効果を発揮したか、といったことについては今後調査していく必要がある。また、中央部は噴砂は少ないものの液状化による地盤沈下は発生しているので

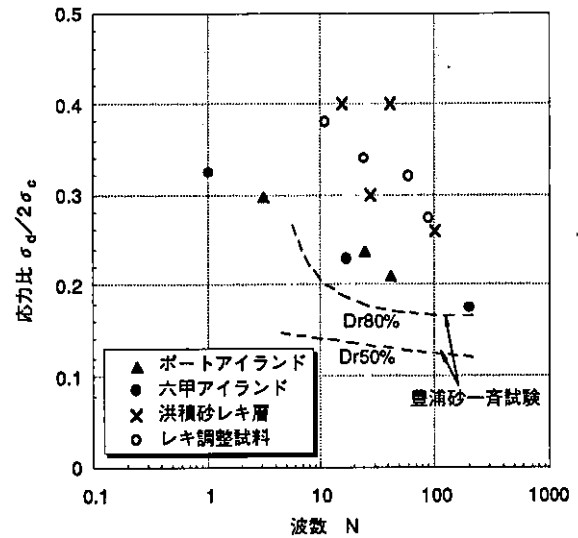


Fig. 10 液状化試験結果^{13)~16)}
Results of Liquefaction Tests

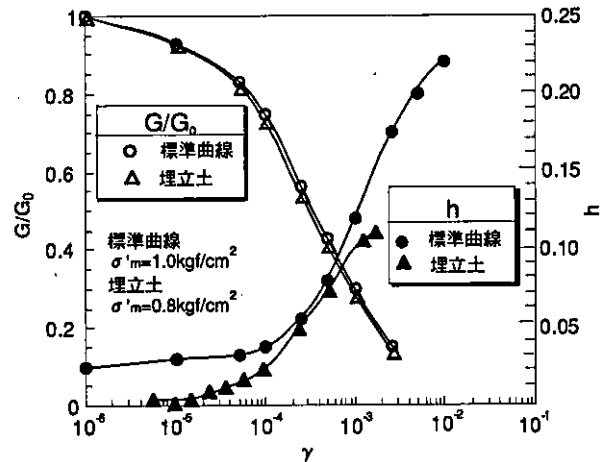


Fig. 11 埋立土の動的変形特性¹³⁾
Dynamic Transformation Character of Reclaimed Soil

あるから、噴砂の分布のみで液状化発生の有無を判断することはできない。同様に、大きく前方に変位したケーソン岸壁の背後に噴砂が見られないからといって、背後地盤が液状化しなかったことを表わしているわけではない。

六甲アイランドの噴砂はポートアイランドに比べて少なく、しかも、その分布は北側に集中している。これはFig. 4に示したマサ土の埋立区域とよく一致している。前述のように、噴砂がないからといって液状化しなかったと断定することはできないが、Fig. 8に示した粒度分布の差が液状化の程度に大きな差を及ぼしたということでは

4.2 地盤沈下と水平変位

地盤被害としては、地震力による埋立層の圧縮沈下に起因する地盤沈下と、岸壁や護岸の前面への移動を伴っ

て発生する地盤沈下および水平変位の二つに分類することができる。前者は液状化時に上昇した土中の過剰間隙水圧が消散していく過程で土中水が排水されて地盤沈下が生じる現象であり、基本的には鉛直沈下である。後者は岸壁や護岸とともに液状化した背後地盤が全体的に側方流動するものであり、いわばすべり破壊現象に近いものである。

前者の地盤沈下量としては、地震前の平成6年(1994年)12月末と地震後の平成7年(1995年)1月末に神戸市が実施した道路の水準測量のデータが公表されている⁷⁾。その結果によれば、ポートアイランド中央部の都市機能用地の平均沈下量は約30cm、六甲アイランドの都市機能用地の平均沈下量は約10cmとなっている。両者の沈下量の差は、前述したような埋立土の物性の違いが大きな要因であったと思われる。また、地盤沈下量には地盤改良の有無や工種も影響しているといわれているが、その点については後述する。

岸壁背後地盤の地盤沈下と水平変位の測定例としてFig. 14, 15が報告されている¹⁷⁾。これらの図から、岸壁部の沈下が1.0~2.0m、水平変位が2.0~3.5mの場合には、その背後地盤にも100~150mに渡って沈下や水平変位が生じていることが明らかである。

4.3 地盤改良工の効果

Fig. 16はポートアイランド、六甲アイランドで行われた地震後の沈下量測定結果を各地盤改良工法別に示したものである¹⁸⁾。ここでいう沈下量とは、杭基礎で施工されている主要な建屋は沈下していないと仮定して、その周辺部の沈下を求めた相対沈下量を表わしている。そのため、沖積粘土層の残留沈下その他の誤差が若干含まれている。この図より、無処理区域では40~50cmの相対沈下が見られるのに対し、サンドドレーン区域では15~18cm、ロッドコンパクション、サンドコンパクション区域ではほぼ0cmという結果が得られており、地盤改良工が液状

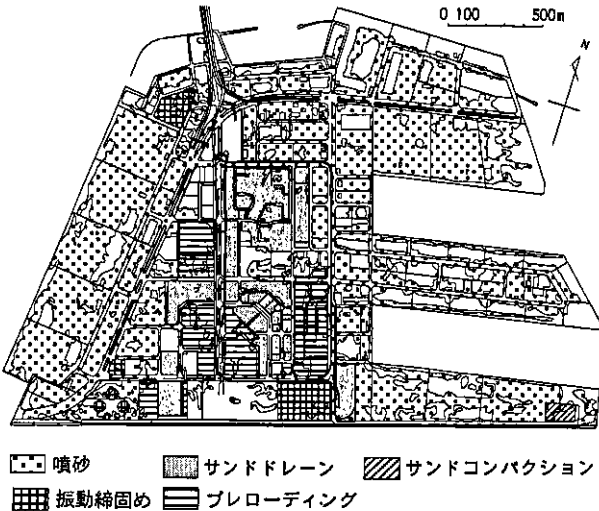


Fig. 12 ポートアイランドの噴砂分布と地盤改良範囲⁷⁾
Distribution of Sand Boils on Port Island and Areas Where Soil Improvement Techniques Were Used

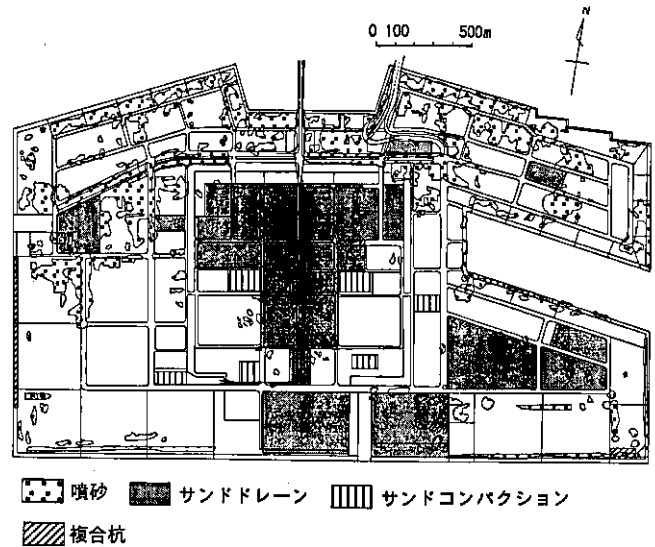


Fig. 13 六甲アイランドの噴砂分布と地盤改良範囲⁷⁾
Distribution of Sand Boils on Rokko Island and Areas Where Soil Improvement Techniques were Used

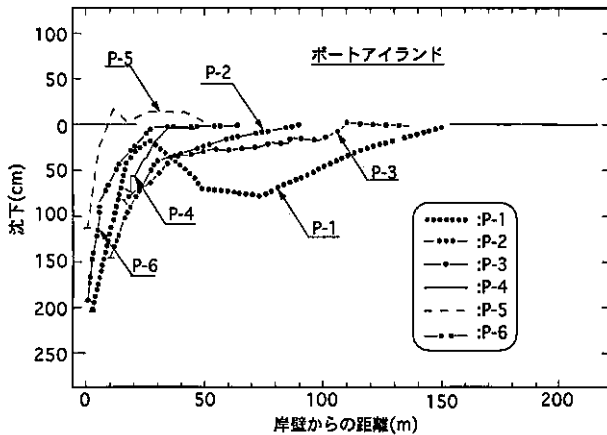


Fig. 14 岸壁背後地盤の沈下¹⁷⁾
Settlement of the Ground Surface Behind the Quaywall

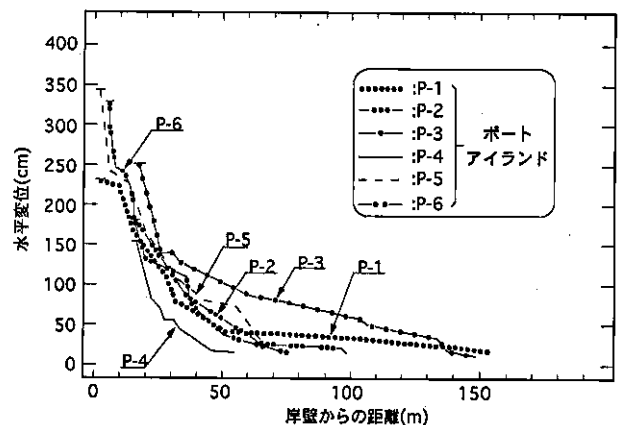


Fig. 15 岸壁背後地盤の水平変位¹⁷⁾
Normalized Distribution of Lateral Displacement Behind the Quaywall

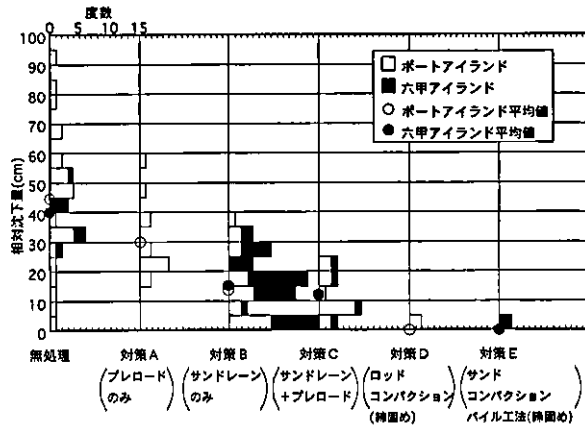


Fig. 16 地震時沈下量と地盤改良工法¹⁸⁾
Comparison of Ground Subsidence in Zones Treated with Different Method

化による地盤沈下を抑制することを明確に示している。これらの工法の中で、純然たる液状化対策工法はロードコンパクション、サンドコンパクションのみであるが、粘性土の圧密促進のために実施した他の工法も地震時の沈下抑制にかなり効果を示していることは興味深い事実である。

5. 埋立人工島の有効応力解析

本章では、ポートアイランドの地震観測記録に対して、地震等の変動荷重による液状化を含む地盤の非線形挙動が評価可能な有効応力解析プログラムEFECT¹⁹⁾を用いたシミュレーション解析を行い、加速度応答波形および応答倍率の比較から本解析法の適用性を検討する。

5.1 鉛直アレー観測と記録の特徴

ポートアイランドの鉛直アレー観測は神戸市により実施されており、兵庫県南部地震の地震観測記録は、関西地震観測研究協議会を通じて公表されている。加速度計の設置状況と地盤特性をFig. 9に示す^{7), 12)}。

3成分加速度計(NS, EW, UD)は、地表、GL-16m, GL-32m, GL-83mの4地点に設置されており、すべての加速度計で記録が得られている。

GL-83mの水平2成分(NS, EW)の観測記録を用いて推定した、RMS値(平均パワー)が最大となる主軸方向(N34W)へ合成した各深度の加速度波形をFig. 19に示す。ここで、Fig. 19の波形作成にあたっては、加速度計の設置されている地盤が比較的良好な地盤であることから、地中の波形にみられたパルス状の鋭いピークは目視等により除去している。

地震動の加速度振幅は、GL-83mから地表へと深度が浅くなっても大きな増幅は生じておらず、特に地表の波形では、GL-83mの波形と比較して高振動数成分が少なく、地盤の非線形化、液状化の影響を強く受けていると推察される。

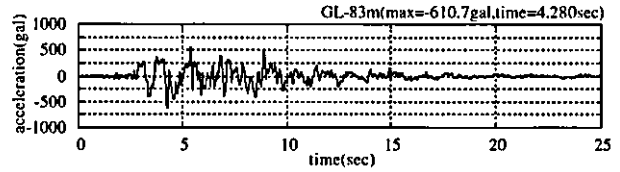


Fig. 17 工学的基盤入射波形(2E)
Time History of Incident Wave on Base Outcroppings in Engineering Sense (2E)

5.2 工学的基盤入射波

有効応力解析で用いる工学的基盤(GL-83m, $V_s=320\text{m/sec}$ の下部洪積互層を仮定)における入射波(2E)は、以下の手法で設定した²⁰⁾。

最初に、1次元重複反射理論のアルゴリズムにより、Fig. 19の合成波を用いた地表/GL-16m, 地表/GL-32m, 地表/GL-83mの周波数伝達関数を満たす地盤の等価せん断剛性と等価減衰定数を同定した。

次に、同定した等価せん断剛性と等価減衰定数を初期値として、GL-83mの合成波を用いた等価線形化法による1次元重複反射理論の非線形応答解析を行い、その結果抽出された工学的基盤の入射波形(2E)をFig. 17に示す。

最大加速度は610galであり、20m程度の小山の頂上にある神戸海洋気象台の洪積地盤地表面での最大加速度観測値が800gal程度、神戸大の最大加速度観測値が300gal程度であることを考慮するとおおむね妥当な値と考えられる。

5.3 EFECTの概要

EFECTは、骨格と間隙水の連成効果を評価した飽和多孔質体のBiotの多次元圧密式を基礎式とし、液状化に至る過剰間隙水圧、残留変形等を予測する有効応力解析プログラムである。EFECTでは、松岡が提案した構成モデル²¹⁾を応用した繰返し載荷に適用可能な地盤構成モデルを導入しており、単調ならびに繰返し載荷の応力変動において、せん断、主応力回転、異方圧密、等方圧密の塑性変形が評価される。

5.4 解析条件

解析モデルをFig. 18に示す。GL-13m, GL-17m, GL-28m, GL-37m, GL-60m, GL-82mを埋立土上部層、埋立土下部層、沖積粘土層、沖積砂礫層、上部洪積互層、洪積粘土層、下部洪積互層のそれぞれの境界、地下水位をGL-2.3mと仮定し²²⁾、GL-83mの工学的基盤で粘性要素を介してFig. 17の入射波を用いた1次元有効応力解析を行った。

埋立土上部層、埋立土下部層、沖積粘土層は二相の非線形材料、沖積砂礫層と洪積層は二相の線形材料でモデル化した。ここで埋立土上部層、埋立土下部層の構成モデルのパラメータは、同じ埋立土(まさ土)の不攪乱試料を用

いた要素試験²³⁾による液状化強度比 R_{20} (それぞれ0.21, 0.28) から設定し、沖積粘土層のパラメータは、過剰間隙水圧が発生しにくい条件から設定した。

埋立土層の構成モデルのパラメータをTable 1に示す。ここで、Fig. 18の埋立土上部層、埋立土下部層の各要素

の硬化パラメータ k_s は、要素試験で得られた液状化強度特性が実地盤の液状化解析で適切に反映されるように、Table 1の要素試験における初期平均有効応力 σ'_0 と推定した k_s 、 $K_0=0.5$ を仮定した実地盤における σ'_0 を用いて新たに設定した¹⁹⁾。

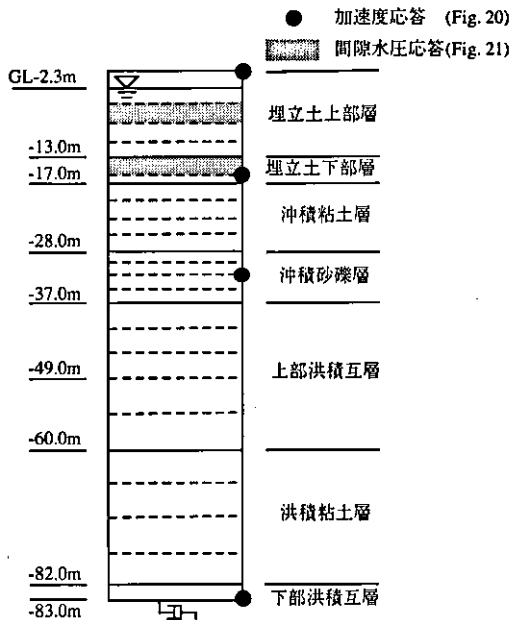


Fig. 18 解析モデル Analytical Model

Table 1 構成モデルのパラメータ (埋立土上部, 下部層) Model Parameters (Reclaimed Upper and Lower Sandy Gravel)

モデルパラメータ		埋立土上部層	埋立土下部層
硬化パラメータ	k_s	0.06%	0.04%
ダイレイタンスパラメータ	λ	1.2	1.2
	μ	0.2	0.2
内部摩擦角	ϕ_f	40.5°	42.8°
圧縮指数	$c_c/1+e_0$	0.0083	0.0083
膨張指数	$c_s/1+e_0$	0.0058	0.0058
非共軸パラメータ	δ	30°	30°
骨格弾性係数	E	111.9MPa ($\sigma'_0=78.4\text{kPa}$)	207.3MPa ($\sigma'_0=147\text{kPa}$)
骨格弾性係数のべき係数	m	0.5	0.5
骨格ポアソン比	ν	0.33	0.33

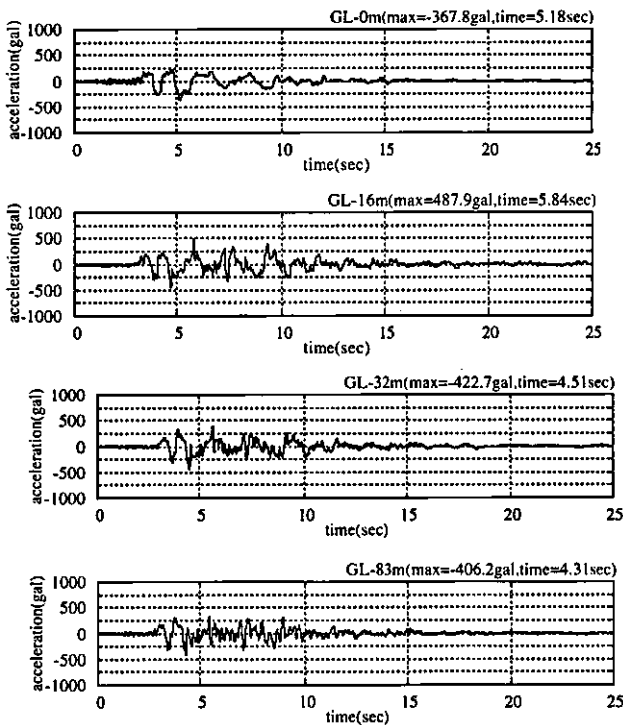


Fig. 19 加速度応答波形 (観測) Time History of Acceleration (Observation)

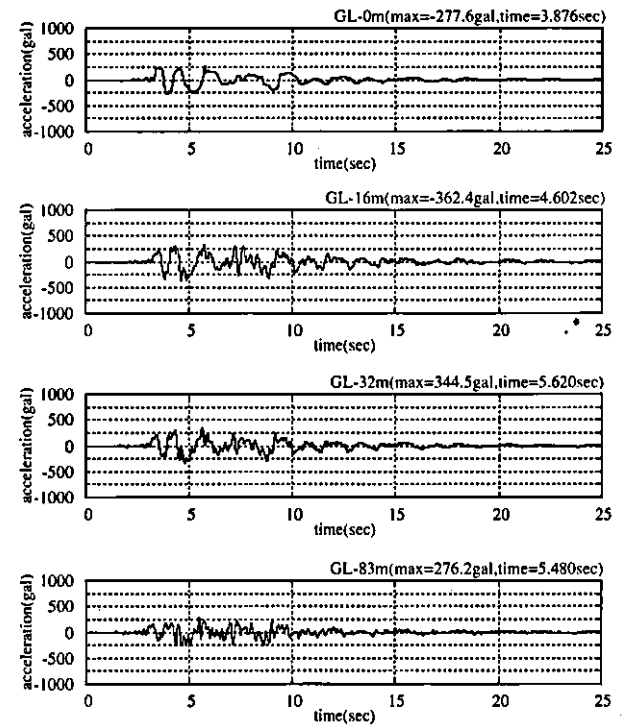


Fig. 20 加速度応答波形 (解析) Time History of Acceleration (Calculation)

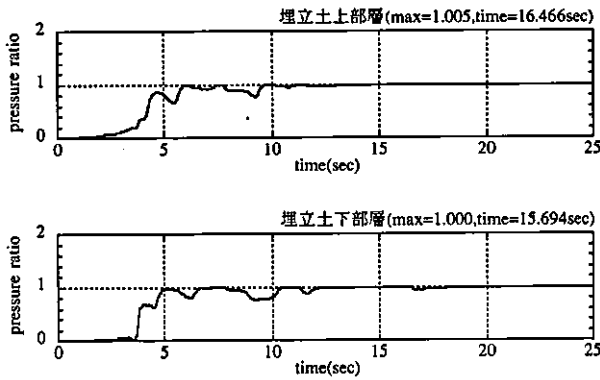


Fig. 21 過剰間隙水圧比応答波形 (解析)
Time History of Excess Pore-Water Pressure Ratio (Calculation)

5.5 解析結果

地表、GL - 16 m、GL - 32 m、GL - 83 mの加速度応答の経時変化を Fig. 20 に、埋立土上部層、埋立土下部層の過剰間隙水圧比応答の経時変化を Fig. 21 に示す。

解析における加速度応答波形は、観測波形と比較して地中での高振動数成分は少ないが、地表での長周期化、振幅の低下等の傾向はおおむね対応している。

GL - 83 mの最大加速度で正規化した最大加速度比の深度分布、最大過剰間隙水圧の深度分布を Fig. 22 に示す。

最大加速度は、工学的基盤から沖積粘土層まで増幅し、埋立土下部層と沖積粘土層との境界から急激に低下する観測波の傾向とおおむね対応している。

埋立土層の過剰間隙水圧は、Fig. 21、22 に示すように、5~6秒で初期有効土被り圧 σ'_{v0} まで上昇しており、埋立土層のほぼ全深度で液状化が生じたと推察される。

6. まとめ

兵庫県南部地震では、これまで埋立柱としては比較的良好であると思われてきたマサ土や神戸層群の砂岩・泥岩・凝灰岩の岩ズリを用いた埋立地でも大きな被害が発生した。特に液状化に起因すると思われる地盤被害が過去に例をみないほどの規模で広範囲に発生しており、多数の構造物に損傷を与えている。

このような被害の原因究明に当たっては、地盤の特性をできるだけ詳細に把握しておく必要がある。本報文はこのような観点に立って、過去の資料や震災後に報告された資料、あるいは当社独自の調査・解析結果を基に阪神地域埋立地の地盤特性と液状化現象についてまとめたものである。以下にその内容を要約する。

- 1) 京阪神地域の第4紀層の分布と大阪湾の埋立地の変遷についてまとめた。
- 2) ポートアイランド、六甲アイランドの埋立工法の概要と埋立履歴および地層断面などについて紹介した。
- 3) ポートアイランド、六甲アイランドの土質特性、液状化試験結果についてまとめた。震災後の大型繰返し3

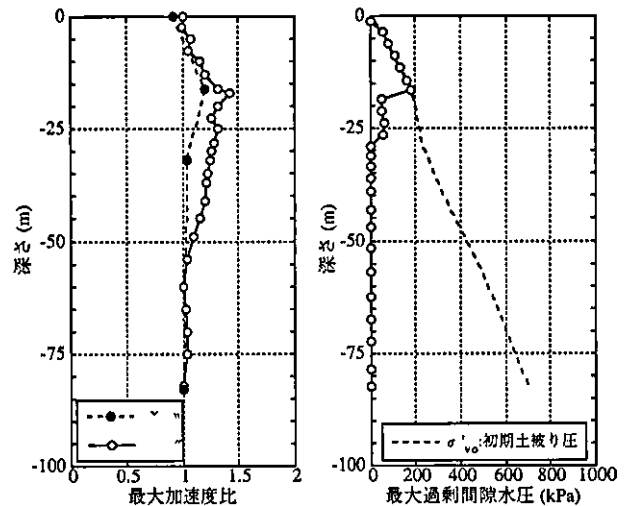


Fig. 22 最大加速度、過剰間隙水圧の深度分布 (解析)
Distribution of Maximum Acceleration Ratio and Excess Pore-Water Pressure (Calculation)

軸試験結果 ($\phi 300 \times h600\text{mm}$) によれば液状化強度は中位である。

4) 液状化による噴砂の分布は埋立土がマサ土であった範囲と比較的によく一致している。

5) 地盤改良工を実施した範囲は噴砂も少なく地震時の地盤沈下量も小さくなっている。これは地盤改良が液状化に対しても一定の効果を与えていることを示している。

6) 沈下や水平移動した岸壁部の背後地盤は100~150mに渡って影響を受けている。

7) ポートアイランドの鉛直アレー地震観測記録の有効応力解析を行った結果、加速度応答波形、最大加速度の深度分布とも観測結果とおおむね良い対応を示しており、本解析手法の妥当性が確認された。

7. あとがき

震災後約1年半を経過した現在、被災地の復旧・復興計画は急ピッチで進められているが、これと並行して地震動そのものや被害発生に至ったメカニズムについての研究も精力的になされ、さまざまな提言や研究報告が行われている。また、関係諸機関による設計基準などの見直し作業も鋭意進められている。

これらの作業を通じて、今後とも耐震性向上と合理性を合わせ持った街づくりをめざすことが同時代に生きている我々土木・建築技術者の責務でもある。

参考文献

- 1) (社)土質工学会関西支部：関西地盤，(1992)
- 2) (社)土質工学会関西支部：新編関西地盤図，(1987)
- 3) (社)土質工学会関西支部：海底地盤—大阪湾を例と

- して一, (1995)
- 4) 日本応用地質学会：兵庫県南部地震 — 地質・地盤と災害一, (1995)
 - 5) 渡辺嘉道：神戸ポートアイランドの開発と基礎工, 基礎工, Vol.9, No.1, p.83~91, (1981)
 - 6) 金沢 寛, 野上行久, 信川恒夫：六甲アイランドの地盤特性と地盤改良工事, 基礎工, Vol.20, No.5, p.9~18, (1992)
 - 7) 神戸市開発局：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), (1995)
 - 8) 末廣国基：神戸港における洪積粘土(Ma12)の地質学的及び土質工学的特性に関する基礎的研究, 神戸大学自然科学研究科博士論文, p.31~32, (1988)
 - 9) Yasuda,S.,Ishihara,K.,Harada,K.,Shinkawa, N. : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Special Issue of Soil and Foundation,Japanese Geotechnical Society, p.99~107, (1996)
 - 10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, p.204~209, (1989)
 - 11) 石原研而, 安田 進, 原田健二：阪神・淡路大震災特集—第4回— 土質特性と地盤の挙動, 土木学会誌, Vol.80, No.8, p.50~53, (1995)
 - 12) 神戸市開発局：(株)シマダ技術コンサルタント：ポートアイランド土質調査及び地震計設置業務, (1991)
 - 13) (財)沿岸開発技術センター：地震対策に関する港湾技術セミナー, p.29~43, (1995)
 - 14) Doi,S.,Tatsuoka,F.,Miura.S.,Yoshimi, Y.,Yasuda,S.,Makihara,Y. : Cyclic Undrained Triaxial Strength of a Sand by a Cooperative Test Program,Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.26, No.3, p.117~128, (1986)
 - 15) 浜野正光, 大井高志, 鳥井原 誠, 平間邦興：砂～レキの液状化強度特性に関する研究,大林組技術研究所報, No.51, p.27~32, (1995)
 - 16) Tanaka,Y.,Kudo, K.,Yoshida,Y.,Kokusho,T : Undrained cyclic strength of gravelly soil and its evaluation by penetration resistance and shere modulus,Soil and Foundations, Vol.32, No.4, p.128~142, (1992)
 - 17) Isihara,K.,Yasuda,S.,Nagase,H. : Soil Characteristics and Ground Damage,Special Issue of Soil and Foundations, Japanese Geotechnical Society, p.109~118, (1996)
 - 18) 阪神・淡路大震災調査報告書：(社)地盤工学会, p.171~228, (1996)
 - 19) 伊藤浩二：動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1) —基礎理論と地盤構成モデル—, 大林組技術研究所報, No.51, p.7~14, (1995)
 - 20) 江尻譲嗣, 後藤洋三：ポートアイランド鉛直アレー地震観測記録を用いた基盤入射波分離の試み, 土木学会第50回講演概要集, p.1136~1137, (1995)
 - 21) Matsuoka,H. and Sakakibara, K. : A constitutive model for sands and clays evaluating principal stress rotation, Soils and Foundations,Vol. 27, No. 4, p.73~88, (1987)
 - 22) 神戸市ポートアイランド建設史編集委員会：ポートアイランド海上都市建設の十五年, (1981)
 - 23) 関電興業株式会社：関西電力株式会社東灘発電所地質調査工事データ集, (1995)