

港湾技研資料

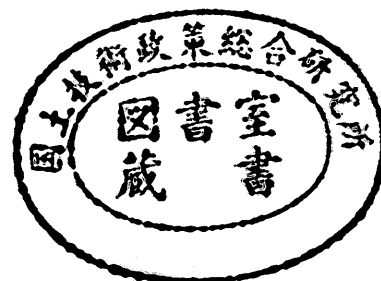
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 813 Sept. 1995

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

港湾施設被害検討委員会編

運輸省港湾技術研究所



序 文

稲富 隆昌*
稲垣 紘史**
輪湖 建雄***

平成7年1月17日午前5時46分に淡路島北部を震源とするマグニチュード7.2の地震が発生した。「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」と命名されたこの地震は、高度に発達した都市を襲った初めての活断層型直下地震である。神戸市、芦屋市などでは震度7の激震を記録した。この強震により、神戸市を中心に5,500名を越す犠牲者を出すとともに、港湾施設、高速道路、新幹線、ライフラインなどの土木施設、また住宅、ビルなどの建築構造物に未曾有の被害を出し、長期間にわたり都市機能を麻痺させた。同時に、神戸港のポートアイランド、六甲アイランドなどの埋立地では、埋立土の「まさ土」が液状化し、その噴泥が地表面を大規模に覆い、液状化現象を全国に再認識させた。

運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所では、水平加速度が502Gal、上下加速度が283Galの地震動を記録した。被害が集中した神戸港の岸壁の多くはケーソン式岸壁で、被害形態は岸壁の移動と傾斜およびその背後地盤の沈下であった。全国のコンテナ貨物量の約3割を取り扱う神戸港のコンテナ埠頭においても、岸壁が数m移動するなど同様な被害が発生したため、クレーンの脚に損傷が生じ、港湾荷役は完全にその機能を喪失した。一方、このような被災状況下において、耐震性を高めた耐震強化岸壁はほとんど損傷することなくその機能を保持した。この耐震性の保証は、神戸港のみならず、全国に展開する港湾施設の耐震性強化にきわめて重要な技術情報を与えた。

地震から7カ月を経過した現在、被災地港湾では地震に強い港湾を目指して復興が始まっている。同時にケーソン式岸壁の被害の原因究明の調査、研究も図-1に沿って鋭意進められている。本報

兵庫県南部地震に対する ケーソン式岸壁の被害考察 —— 地震動・液状化を中心に ——

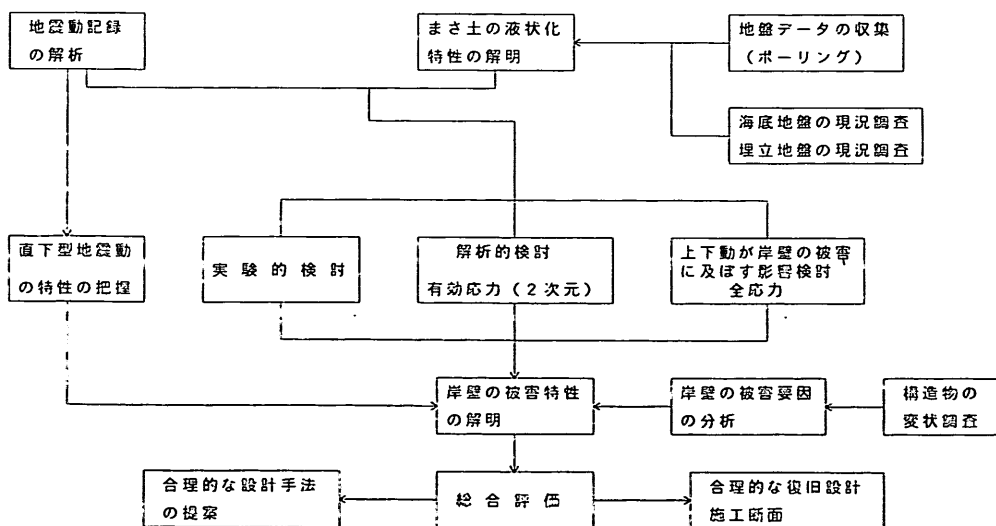


図-1 調査研究フロー

- * 構造部長
- ** 前 運輸省第三港湾建設局長
- *** 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部長

告は現在までに明らかになった研究成果等を速報的に紹介するものである。したがって、復興事業に伴って明らかになる現地情報の内容によっては成果の一部変更もあり、また、解析、実験的研究も継続して実施しているため、最終的な成果は後日に待つ必要がある。

報告では、港湾施設の被害状況および地震動の特性紹介から始まり、液状化を含む埋立地盤の特性、ケーソン式岸壁の変状の要因を明らかにし、また、実験的、解析的検討からケーソン式岸壁の変状を考察した。また、コンテナクレーンについても現地データを用いて被災の実態を明らかにした。

なお、本報告を取りまとめるに際して、運輸省港湾局、同第三港湾建設局、神戸市港湾局、同開発局、兵庫県土木部港湾課、神戸港埠頭公社等から多大なる支援をいただいた。ここに関係の方々に謝意を表す。

平成7年9月

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

目 次

序 文

- (その1) 強震記録宮田正史・佐藤幸博・井合 進..... 5
- (その2) 被災状況
- 岸壁、防波堤、海岸保全施設-外山進一・松永康男 51
 - 港湾荷役施設-藤本健幸 77
 - 臨港交通施設-横田 弘 95
- (その3) 神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析
.....上部達生・高野剛光・松永康男..... 127
- (その4) 埋立地盤の特性善 功企・山崎浩之・南 兼一郎・中島由貴..... 147
- (その5) 液状化の判定に関する検討山崎浩之・善 功企・佐渡篤史・館下 徹..... 167
- (その6) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験 ...菅野高弘・三藤正明・及川 研..... 207
- (その7) ケーソン式岸壁の有効応力解析井合 進・一井康二・森田年一..... 253
- (その8) ケーソン式岸壁の地震時滑動に関する数値解析
.....野津 厚・上部達生・高野剛光..... 281
- (その9) 神戸港ケーソン式岸壁の安定性に関する一考察
.....長尾 毅・小泉哲也・木阪恒彦・寺内 潔・細川浩二・門脇陽治・宇野健司..... 301
- (その10) コンテナクレーンの地震時挙動吉田由治..... 337

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

善 功企*
 山崎 浩之**
 南 兼一郎***
 中島 由貴****

要 旨

兵庫県南部地震の被災を契機に、礫分を多く含む粒度のよいまさ土により構成される埋立地盤の既往の土質データを収集し、地震後に行われた土質調査の結果とあわせて整理した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 標準貫入試験のさいに使用されるスプリットサンプラー(内径35mm)で得られた試料、凍結により得られた試料(直径300mm)、地盤の掘削による自然試料の3種類の採取法の異なる試料による粒径加積曲線を調べた結果、凍結試料と自然試料による粒径加積曲線はほぼ等しい結果が得られた。標準貫入試験による試料を用いた場合は、これらに比較して、通過質量百分率で約10%~20%前後上側へシフトした粒径加積曲線となった。

(2) まさ土による埋立地盤のN値は小さく、地盤面から-10m~-15mの浅いところでは平均して10前後の値である。また、地震前後の平均的なN値を比較した結果、ややN値は増加している傾向がみられたが、N値のばらつきを考慮するとその増加量は大きくない。

(3) まさ土による埋立地盤は大きな礫を含んでいるため、密度は普通のきれいな砂地盤に比較して大きい。凍結試料を用いた測定結果では、乾燥密度 $1.7\sim 2.1\text{g/cm}^3$ 、湿潤密度 $2.1\sim 2.4\text{g/cm}^3$ 程度であった。また、密度検層の結果得られた密度とN値にはあまり良い相関性はないが、密度が大きくなるとN値も大きくなる傾向がある。

(4) 地震後のPS検層の結果によると、まさ土による埋立地盤でも、横波速度とN値の間にはある相関性がある。また、剛性率についても同様である。一方、縦波速度はN値によらず一定であった。

(5) 微小ひずみレベルにおける剛性率 G_0 について、PS検層による原位置試験と凍結サンプルを用いた室内動的変形試験の結果を比較したところ両者は良く一致した。また、間隙比と平均有効主応力を用いて剛性率 G_0 を推定するHardinらの実験式は、今回のまさ土に対しては適用性があまり良くなかった。

(6) 実測された $G/G_0\sim \gamma$ 曲線は、港湾の基準による砂質土に対する標準曲線と精度良く一致した。一方、減衰比は全体的に実測値の方が小さく、 $h\sim \gamma$ 曲線は、標準曲線よりも下側にきた。

(7) 凍結サンプルを用いた繰り返し三軸試験による液状化強度と換算N値の関係は、吉見(1994)によって報告されている結果とほぼ一致した。また、試験個数は少ないが、液状化強度は、埋土部の方が置換部よりも大きい傾向にある。

キーワード：液状化，港湾，室内試験，原位置試験，土の性質

* 土質部 動土質研究室長
 ** 土質部 主任研究官
 *** 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所長
 **** 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所 技術開発課長

Mechanism of Damage to Port Facilities during 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

(Part 4) Physical Characteristics of Reclaimed Land

Kouki ZEN*

Hiroyuki YAMAZAKI**

Knicro MINAMI***

Yositaka NAKAJIMA****

Synopsis

After the 1995 Hyogoken Nannbu (Great Hanshin) earthquake, boiled sand composed of the so-called Masado (weathered granite) was observed widely on the ground surface at the coastal areas along the Osaka bay. Ground condition indicates that the liquefaction was caused by the earthquake at considerably large areas of reclaimed land. After the earthquake, field soil survey and laboratory test were performed to investigate the physical properties and the liquefaction characteristics of reclaimed lands in Kobe Port, such as Port Island and Rokko Island, which were mainly composed of Masado, and damaged during the earthquake. Soil data before the earthquake were also corrected for comparison with this investigation. The followings are the results of this study;

(1) The grain size distribution curves of frozen undisturbed samples are almost the same as those of block samples. However, the grain size distribution curves obtained from the SPT (Standard Penetration Test) samples shift the points nearly 10% to 20% upwards on the figure representing the relationship between the grain size and percentage finer by weight.

(2) The average SPT N-values of the reclaimed land with Masado are relatively small indicating nearly 10 blow counts at the shallower depths of -10m to -15m below the ground surface. Although the average SPT N-values tend to have slightly increased after the earthquake, the amount of increase is not considered to be large when the wide variations and scatters in the SPT N-values at different depths are taken into account.

(3) The density of reclaimed land with Masado is larger than that with usual clean sand with uniform grain size, because Masado is classified as well-graded soil. The relationship between the density and SPT N-values was found to be poor, but the density tends to increase as the SPT N-value increases.

(4) The comparison of shear wave velocity and shear modulus with the SPT N-values showed certain correlations. The velocity of dilation wave was found to be constant independent of the SPT N-values.

(5) The shear modulus, G_0 , at very small shear strain amplitudes measured with frozen samples using the cyclic triaxial tests is fairly consistent with that measured in the field using the PS logging.

(6) The G/G_0 versus γ curves measured with frozen samples showed very good agreement with those presented as standard curves for sandy soils in the "Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan". The measured damping ratios, however, became smaller as a whole and the h versus γ curves shifted downwards compared to the standard curves for sandy soils.

(7) The liquefaction resistance of reclaimed land behind the quaywalls tends to be slightly higher than that of replaced layers with Masado beneath the caissons. The relationship between the liquefaction resistance of the ground measured from frozen samples and the corrected SPT N-values is well represented by the curve proposed by Yoshimi (1994).

Key Words : Harbour, In-situ Test, Laboratory Test, Liquefaction, Physical Characteristics

* Chief of Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

** Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

*** Director, Kobe Investigation and Design office, The Third District Port Construction Bureau, Ministry of Transport

**** Chief, Research and Development Section, Kobe Investigation and Design office, The Third District Port Construction Bureau, Ministry of Transport

目 次

要 旨	.....	147
1. まえがき	.....	151
2. 調査概要	.....	151
3. 地層構成の概要	.....	151
4. 埋立地盤の特性	.....	154
4. 1 粒度分布	.....	154
4. 2 N値	.....	156
4. 3 地盤の密度	.....	159
4. 4 動的変形特性	.....	159
4. 5 液状化強度	.....	164
5. まとめ	.....	165
6. あとがき	.....	166
参考文献	.....	166

1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震は、港湾・都市機能の集中する臨海部の埋立地において甚大な被害をもたらした。特に、神戸港をはじめとする臨海部では広範囲にわたって噴砂が観察され、液状化現象と地盤災害の関連が注目されている。

ポートアイランドや六甲アイランドは、主として、特殊土とよばれるまさ土（風化花崗岩）や、神戸層群、大阪層群から採取された土砂で埋立てられている。今回の地震では、従来、きれいな砂に比較して液状化しにくいと考えられていたまさ土地盤において液状化が発生した。一般に、岩砕を含む土砂によって埋立てられた地盤は、土砂採取場所や施工時期・施工方法による特性の変動が大きく不均一であり、代表的な特性を一概に述べることはできない。まさ土による埋立地盤も例外ではなく、その特性についてはいくつかの報告がなされている^{1), 2)}ものの、良くわかっていないのが現状であり、被災原因の究明や復旧対策にあたっては、埋立地盤の特性を十分把握することが必要であると考えられる。

本文では、液状化被災原因等の解明に必要なまさ土による埋立地盤の特性を把握することを目的としているが、特に、①不均一な埋立地盤をマクロ的にみて、地盤の単純化・モデル化がどの程度可能か、②地震前後の地盤特性の相違があるかどうか、に重点をおいて調べている。本文で取り扱った調査項目は、粒度分布、N値、地盤の密度、動的変形特性、液状化強度など、液状化や耐震性の検討に不可欠な項目を中心としている。

2. 調査概要

調査の対象は神戸港の埋立地盤であるが、特に、ポートアイランドおよび六甲アイランドの地盤特性を中心に調べた。地震前のデータは、1998年（昭和53年）にポートアイランド（53-P-1）、六甲アイランド（53-P-1）で実

施された土質調査結果、および1983年に六甲アイランドの同一地点（58-P-1）で実施された土質調査結果を用いた。これらの調査地点を図-1に白丸で示している。また、島内部における既往の標準貫入試験結果等のデータも収集しあわせて整理した。地震後のデータは、図-1の①～⑨の地点で実施された土質調査に基づくものである。図-1の左上のA, B, Cは、それぞれ、岸壁前面の置換部、岸壁背後の置換部、埋土部を対象としたもので、例えば①、⑥地点の3つの黒丸の位置に対応している。

本文で取上げた試験項目は、粒度分析、標準貫入試験、密度検層、PS検層、大型繰返し三軸試験装置（供試体：直径300mm、高さ600mm）による動的変形試験および液状化試験結果などである。礫を多く含む地盤であることから、通常の方法では乱さない試料の採取がかなり困難と思われたので、地点①と⑥では凍結サンプリングが実施されている。

3. 地層構成の概要

これまでの研究により、大阪湾地域における地層構成はかなり明らかにされている。図-2は、大阪湾地域における地質断面を示したものである³⁾。神戸港を中心とした臨海部の地層構成は、人工的に造成された埋立地盤の下に、 M_{a13} とよばれる海成の沖積粘土層があり、その下部に第1洪積砂礫層 D_{g1} がある。以下、粘土層と洪積砂礫層が互層になって堆積している。ポートアイランドおよび六甲アイランドの岸壁のほとんどは、軟弱な M_{a13} 層を床堀りし、まさ土で置き換えて建設されている。液状化の検討で対象となるのは、この置換部と埋土部である。また、 D_{g1} 層は礫、砂、粘性土からなる複雑な層であるが、建物の杭基礎等の支持層として利用されている。

図-3および図-4は、それぞれ、地震前後の調査によるポートアイランド、六甲アイランドの埋立地盤の成層断面図を示している。

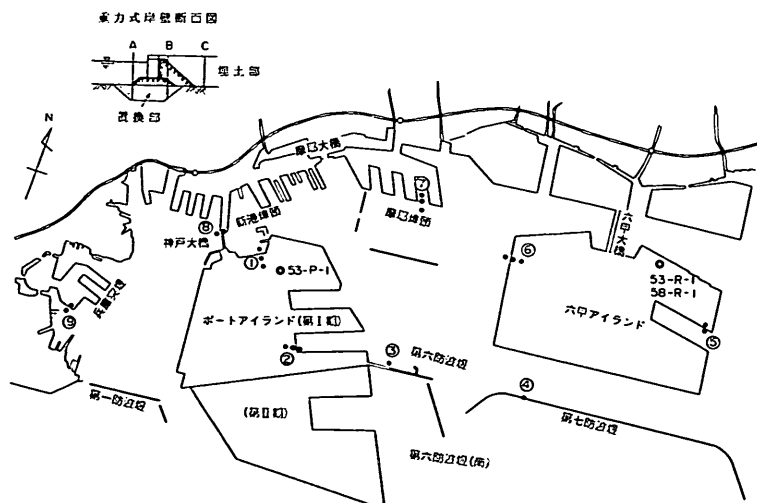


図-1 調査位置図

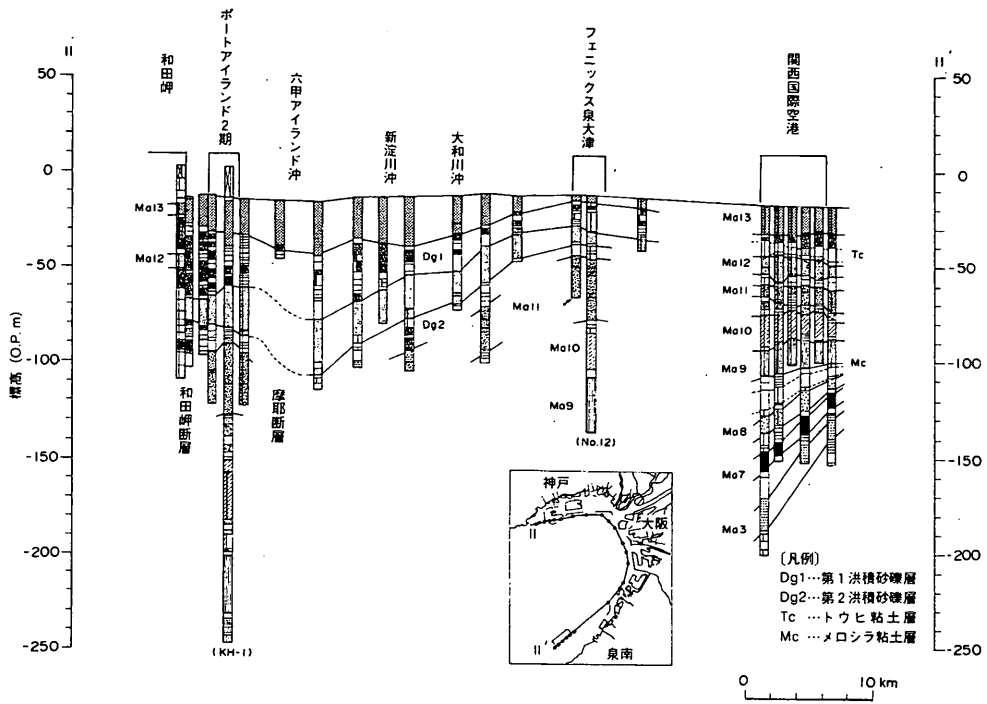


図-2 (a) 大阪湾岸沿いの地層断面図³⁾ (II-II': 海域部)

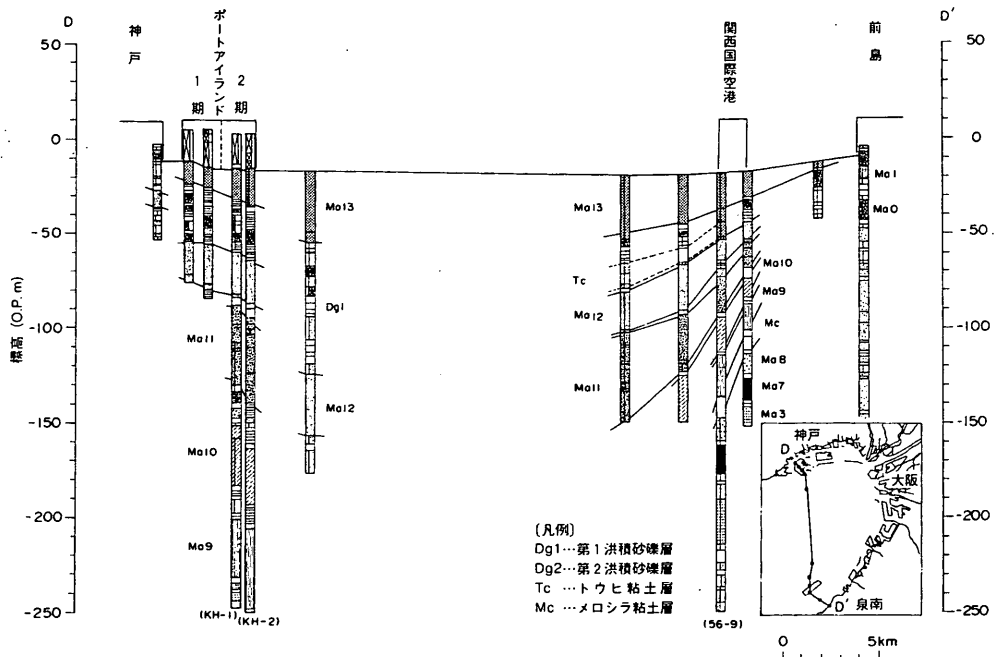
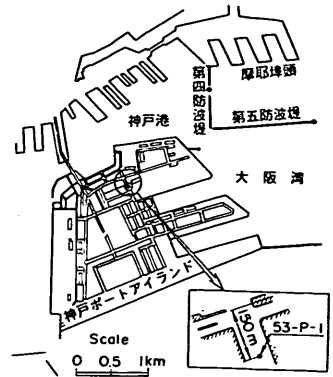
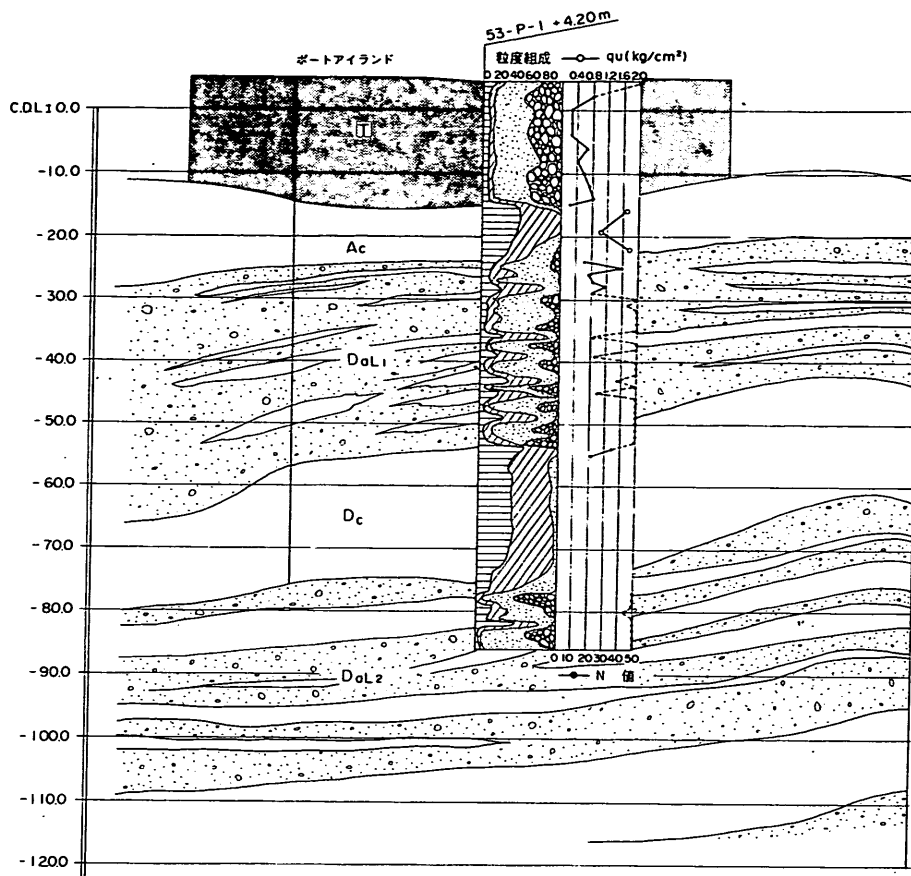
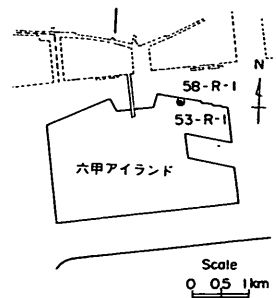
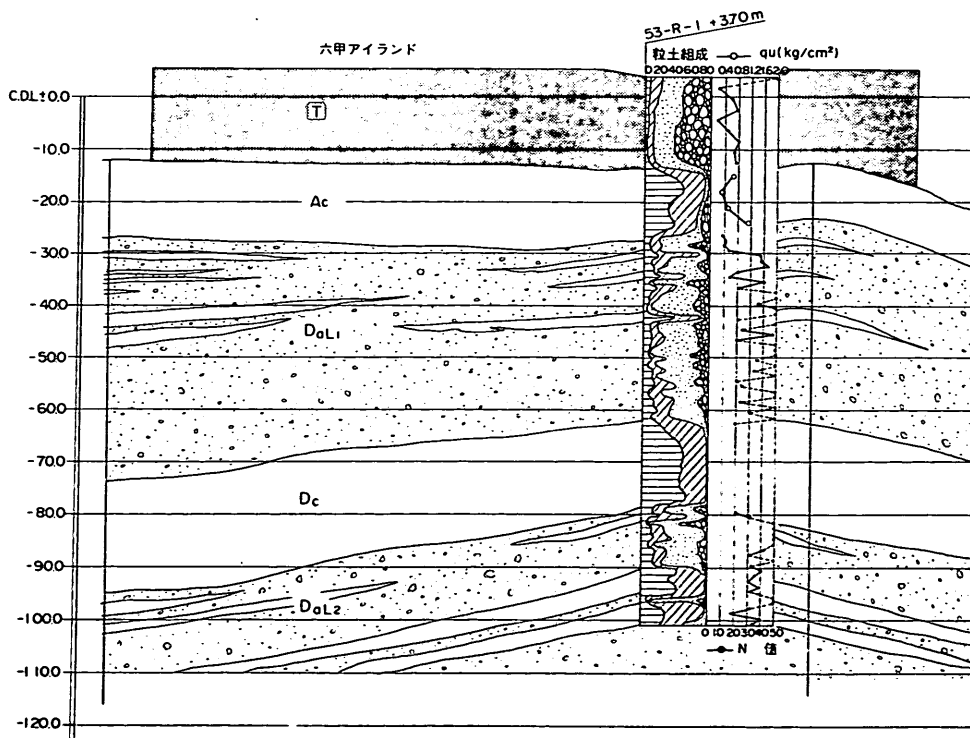


図-2 (b) 大阪湾北岸から南岸に至る地層断面図³⁾
(D-D': ポートアイランド~関西国際空港)



地質時代	地層名	記号
第四紀 完新(沖積)世	埋立土層	T
	粘土層	Ac
第四紀 更新(洪積)世	砂・泥互層	DaL1
	粘土層	Dc
	砂・泥互層	DaL2

図-3 (a) 成層断面図 (ポートアイランド : 1978年調査)



地質時代	地層名	記号
第四紀 完新(沖積)世	埋立土層	T
	粘土層	Ac
第四紀 更新(洪積)世	砂・泥互層	DaL1
	粘土層	Dc
	砂・泥互層	DaL2

図-3 (b) 成層断面図 (六甲アイランド : 1978年調査)

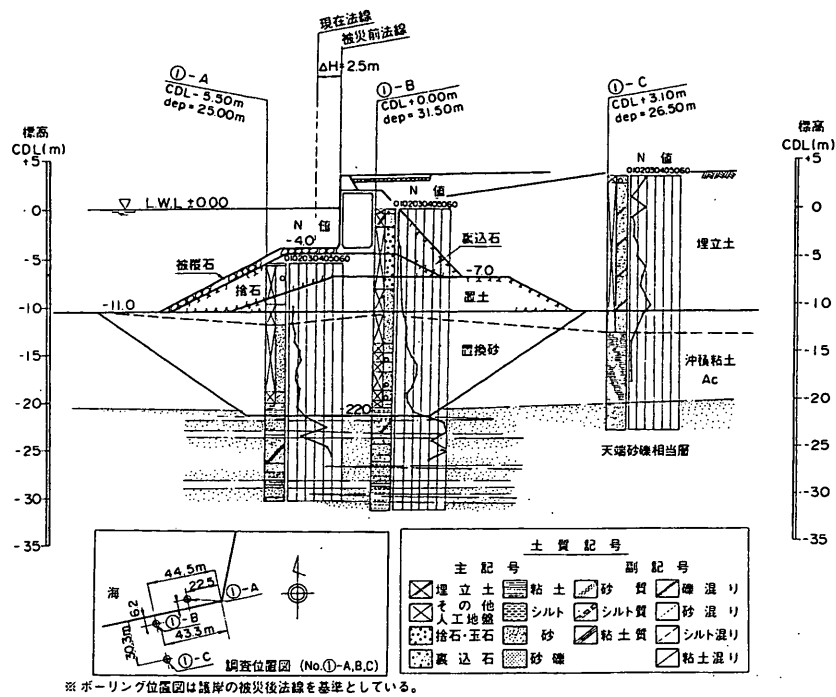


図-4 (a) 成層断面図 (ポートアイランド: 1995年調査)

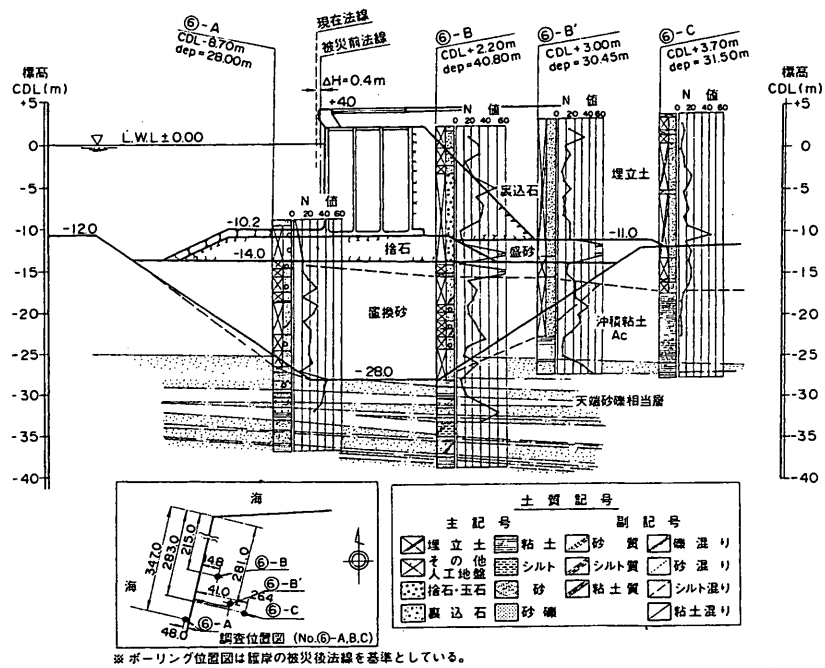


図-4 (b) 成層断面図 (六甲アイランド: 1995年調査)

4. 埋立地盤の調査結果および考察

4.1 粒度分布

(1) 噴砂

図-5に地震直後にポートアイランド、六甲アイランドで採取された噴砂の粒径加積曲線(細粒分除く)を示している。噴砂の粒径加積曲線は、試料の採取位置や採取方法によって分布が異なると思われるが、今回採取し

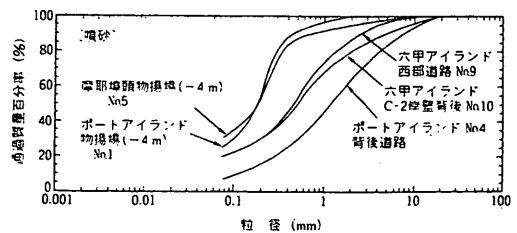


図-5 噴砂の粒径加積曲線

た噴砂は細流分を多く含むのが特徴である。また、地震後の現地踏査では粒径19mm以上の粗礫の噴出も確認されている。

(2) 地震前の粒径加積曲線

地震前に行われていたまき土の粒径加積曲線を図-6に示す。ただし、図-6には、標準貫入試験で得られた試料と自然の状態の試料の結果が混在している。しかし、これらを一括してみると、均等係数の大きな、粒度の良い土であるといえる。図-6には、液状化の可能性のある粒度範囲⁴⁾もあわせて破線で示しているが、破線をまたがった分布となっており、Aの範囲に属するのかBf、Bcに属するのかが判断が困難である。なお、試料の採取方法の違いが粒径加積曲線に与える影響については後で述べる。

(3) 地震後の粒径加積曲線

図-7は、地震後の粒径加積曲線を示している。これらの結果は、直径300mmの凍結試料によるものである。図-6とは試料の採取方法が異なるので直接的な比較はできないが、地震前後の粒径加積曲線には大きな違いはない。

(4) 試料採取方法による粒径加積曲線の比較

通常、砂質土の粒度分析は標準貫入試験により得られる試料を用いて行われる。実際に、既往のデータのほとんどが標準貫入試験により得られた試料をもとにしている。しかし、内径が35mmの標準貫入試験用サンプラーでは、岩砕を含む砂質土の採取には限界があり、実際の

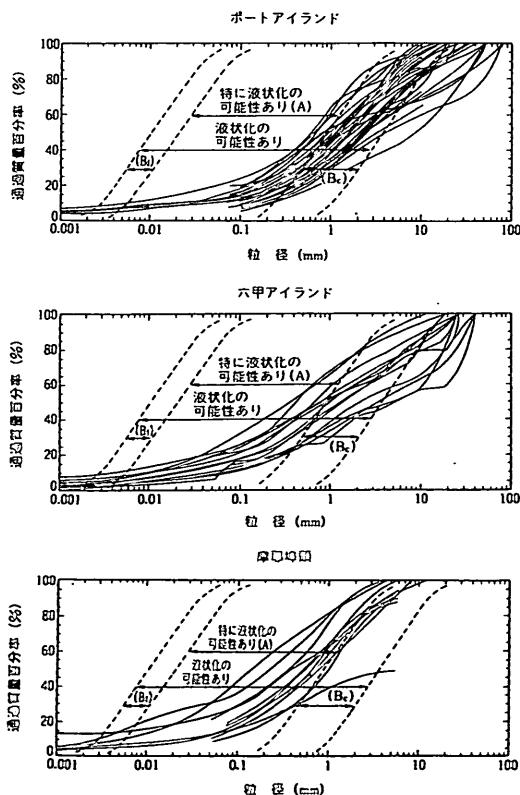


図-6 地震前の粒径加積曲線

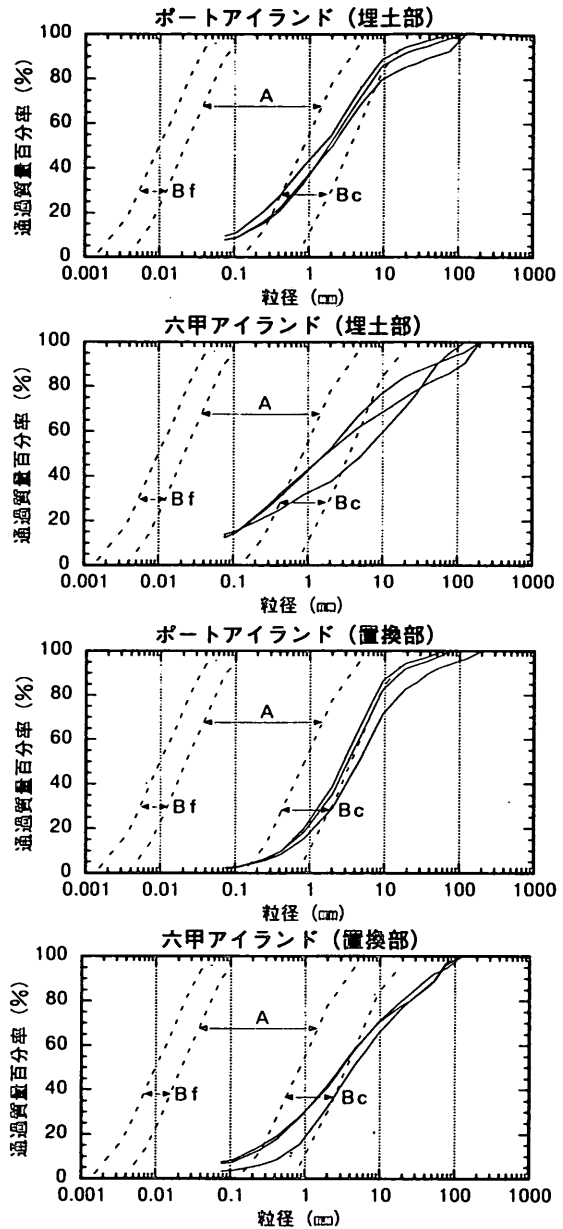


図-7 地震後の粒径加積曲線
(凍結サンプリングによる試料)

地盤の粒径加積曲線とは異なることが予想される。そこで、試料の採取方法の違いが粒径加積曲線に与える影響を調べてみた。図-8は、埋立地盤を掘削して採取した試料(ここでは、自然試料とよぶ)と凍結試料による粒径加積曲線を比較したものである。ポートアイランドの地盤では、埋立時に最大粒径が150mm~200mm以下に規程されており、ぐりずりを通したものが用いられている。両者の結果は予想以上に一致しており、凍結試料による粒径加積曲線は埋立地盤の粒径加積曲線を表すものとみなして良いようである。次に、図-9は、標準貫入試験による試料と凍結試料による試料から得られた粒径加積曲線を比較している。凍結試料の結果が地盤の粒径加積曲線を表しているとする、標準貫入試験の結果は、それらよりも通過質量百分率で約10%~20%前後

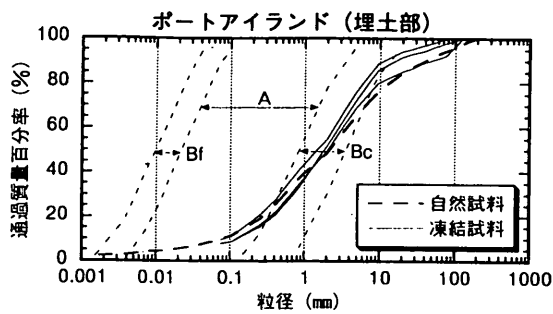


図-8 自然試料と凍結試料による粒径加積算曲線の比較

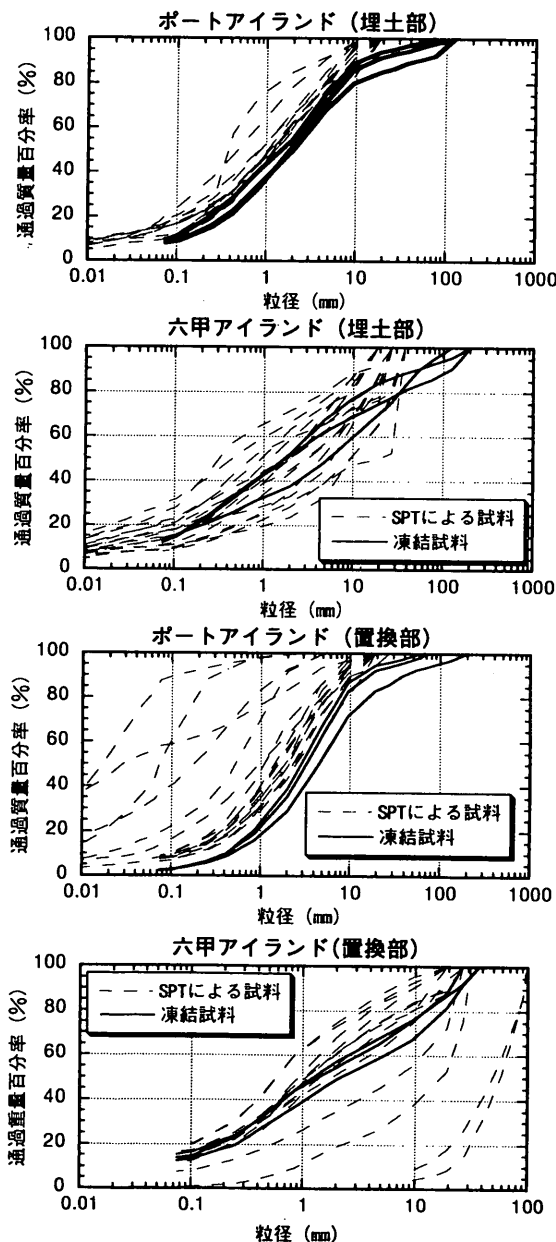


図-9 凍結試料と標準貫入試験の試料による粒径加積曲線の比較

上側に移動している。いくつかの曲線を除けば、凍結試料の結果は標準貫入試験試料の結果の下側の包絡線とほぼ同じとなっている。粒度やN値による簡易液状化判定では、粒度分布が考慮されるが、まさ土地盤の場合には上記の点に留意する必要がある。

4.2 N値

標準貫入試験は、岩盤、玉石および粗礫を多く含む土以外の比較的広い範囲の土に対して適用されるが、軟弱な粘土や粒径10mm以上の礫に対しては土性を判定するには精度が悪くなるとされている⁴⁾。粒径加積曲線からもわかるように、まさ土地盤はまさしく粗礫を多く含む土に相当するものであり、礫の存在によるN値の急変やばらつきは避けがたい。しかし、このような地盤を適切に評価するサウンディング方法が見当たらない現状では、実用的観点から標準貫入試験を用いざるをえないと考えられる。図-10は、ポートアイランドおよび六甲アイランドにおける地震後の地盤を対象に各ボーリング孔ごとのN値の深度分布を示している。工事中基準面(C. D. L)からの深度で表示しているため、同じ深度でも土被り圧の影響が異なっており、海底地盤表層部のN値は小さくなっている。六甲アイランドの例では、礫の存在によってN値が急変する点がかかなりみられるが、これらの点を除けば深度方向にある傾向がみられ、N値によって地盤の特性が把握できると思われる。

図-11は、N値を地盤面(G. L.)からの深度に対してプロットしたもので、この場合は、同一深度における土被り圧の影響は同じである。土質柱状図に記載されている観察記録から、まさ土と思われる層のみを対象としてプロットしている。建設残土や浚渫土等は除いている。また、深度の基準を地盤面にとっているため、既に撤去されているプレローディングのための載荷盛土自身のN値も含まれている。破線および実線は「局所重みつき最小二乗法」を用いて描いたものである。深度-10m~-15mあたりまでのN値は10前後とあまり大きくない。

地震前後のN値をみると、ポートアイランドでは地震後のN値が小さくなっており、一方、六甲アイランド、摩耶埠頭では、地震後のN値が大きくなっている。このように、ポートアイランドと六甲アイランド、摩耶埠頭では地震前後のN値の増減が逆になっている。地盤面を基準とした場合、地震によるN値の変化傾向はあまり明確ではない。

図-12は、図-11に示したデータの中から、工事中基準面(C. D. L.)との関係が記載されている土質柱状図のデータのみをプロットした例である。この例では、地震前のN値が地震後よりも大きい傾向にあるが、これは載荷盛土による土被り圧の影響が含まれているためと思われる。そこで、図-13は、土被り圧の影響のあると思われるデータを除外するため、工事中基準面から+4

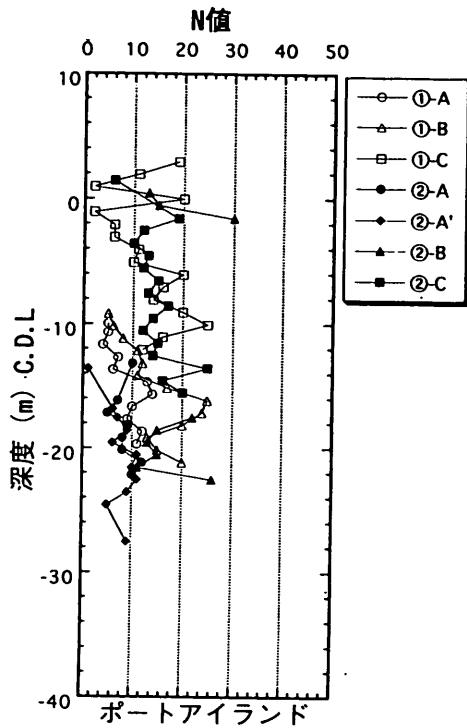


図-10 (a) 調査地点ごとのN値の深度分布
(地震後：ポートアイランド)

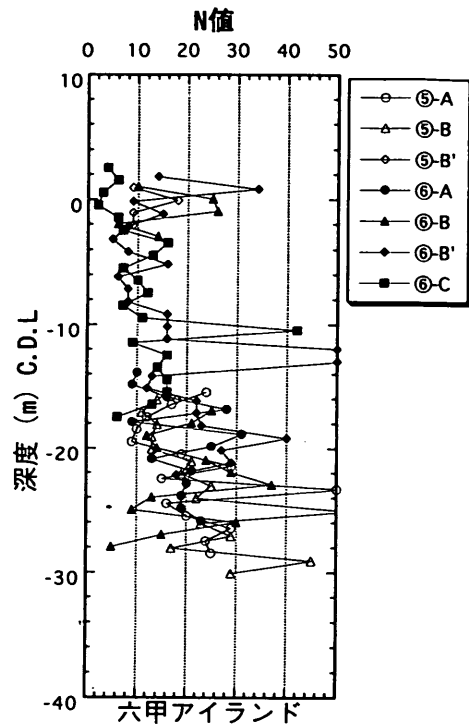


図-10 (b) 調査地点ごとのN値の深度分布
(地震後：六甲アイランド)

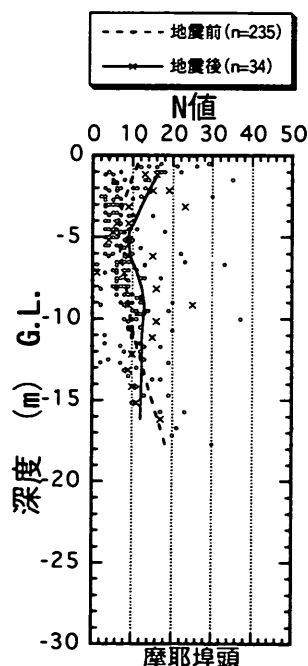
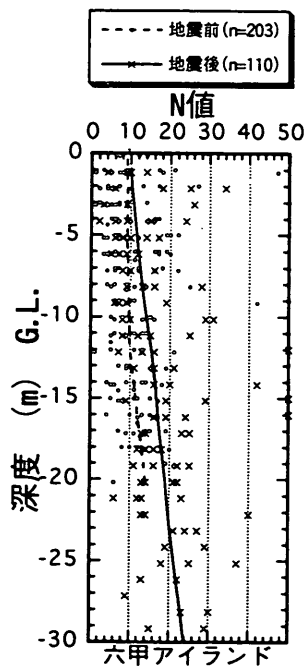
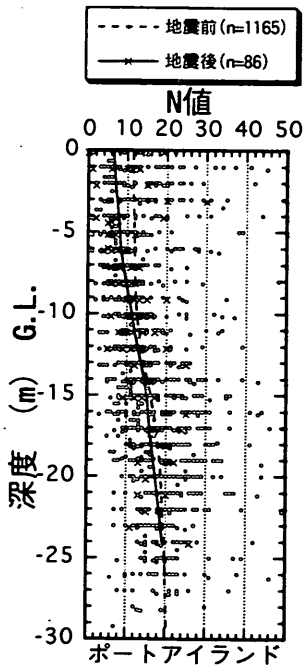


図-11 地表面 (G. L.) を基準としたN値の深度分布

m以上にもデータがあるもの (例えば、プレロディング中のN値と思われるもの) を除いてプロットしたものである。工事用基準面からのN値の分布を平均的にみると、地震後の方がやや大きくなっており、地盤の圧縮・沈下により高密度化 (Densification) された可能性がある。ただし、各点のばらつきを考慮すると、平均的なN値の増加量はそれほど大きくはないと考えられる。

図-14および図-15は、それぞれ、ポートアイランドおよび六甲アイランドのN値の比較を地震前後について行ったものである。図-14によると、地震前のまさ土地盤の平均的なN値は両島ではほぼ同じであり10前後となっている。一方、地震後のN値は、図-15に示すように、下層部でポートアイランドに比較して六甲アイランドのN値が大きくなっている。

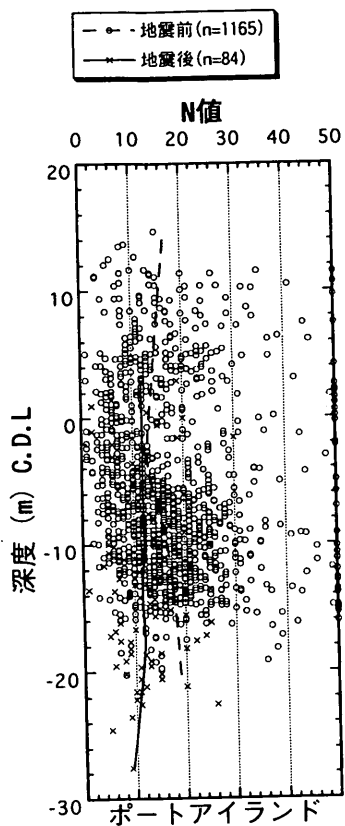


図-12 盛土を含む地盤のN値の深度分布 (ポートアイランド)

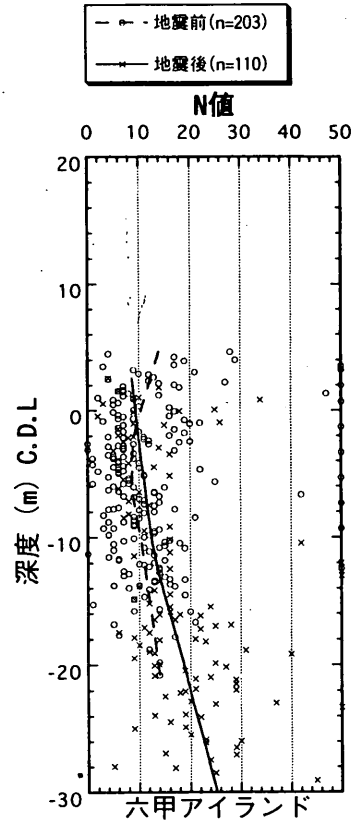
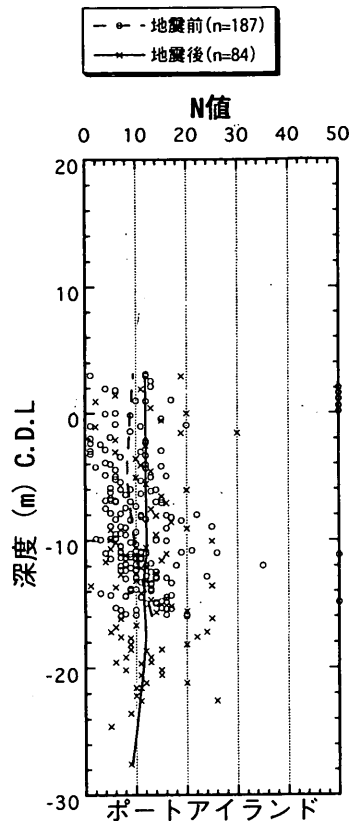


図-13 工事用基準面 (C. D. L.) を基準とした N値の深度分布

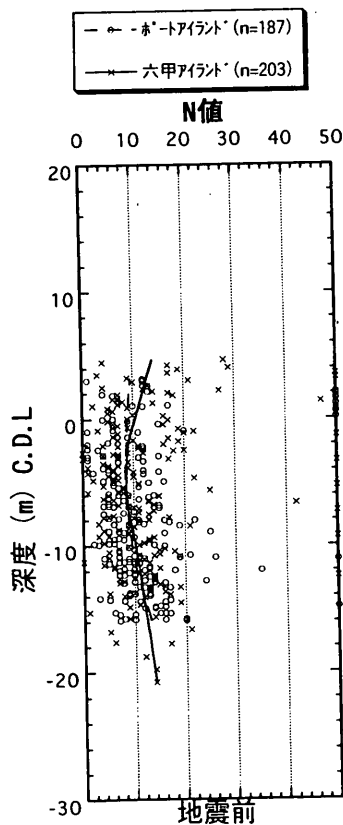


図-14 地震前のN値の比較 (ポートアイランドと六甲アイランド)

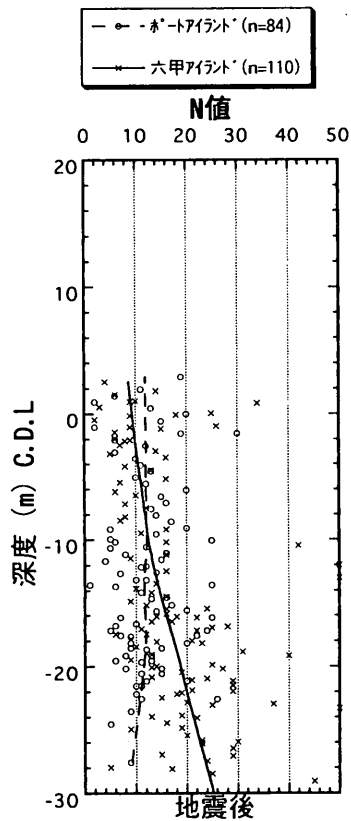


図-15 地震後のN値の比較 (ポートアイランドと六甲アイランド)

4.3 地盤の密度

図-16は、凍結試料により得られた12本の供試体から得られた埋立地盤の乾燥密度を示している。また、参考までに試料採取孔近傍の密度検層による密度もあわせて示している。凍結試料による結果では、岩砕を含むためか普通の砂地盤の密度に比較して大きくなっている。図-17は、密度検層の結果とN値（N値が50以上のところは貫入長が30cmになると想定したときの換算値）の関係を描いたものである。ばらつきが大きく良い相関性があるとはいえないが、N値が大きくなると密度も大きくなる傾向にあり、あえて直線で近似すると、

$$\rho(g/cm^3) = 1.64N^{0.034}$$

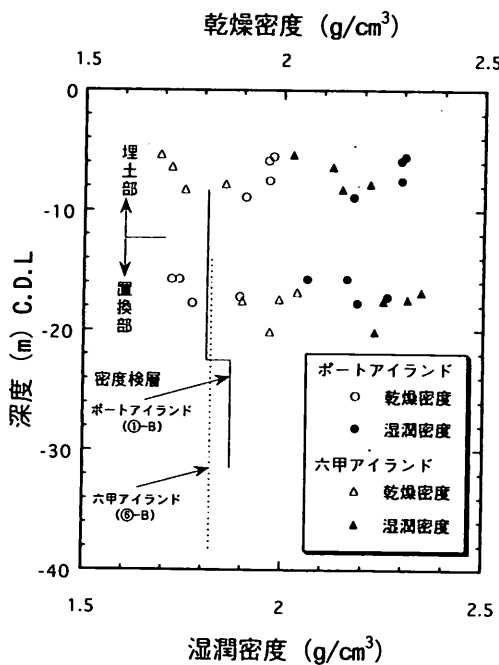


図-16 凍結サンプルおよび密度検層から求めた地盤の密度

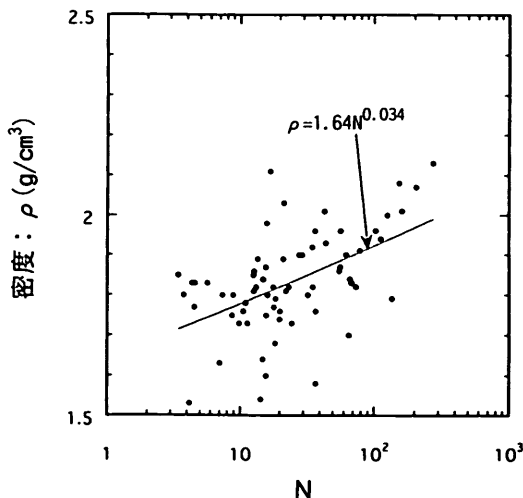


図-17 密度とN値の関係

という関係がある。

4.4 動的変形特性

(1) PS検層

図-18に地震後に行われたPS検層の結果得られたPS検層総合柱状図を示す。地震前のPS検層総合柱状図は、別途「(その5) 液状化に関する検討」のところで示されている。地震後の調査では、これらの地点で凍結サンプリングを行って、室内における動的変形試験が実施されている。図-19は、横波速度 V_s と縦波速度 V_p とN値の関係を描いたものである。最小二乗法により横波および縦波速度とN値の関係を求めると図中の実線のように、

$$V_s (m/s) = 134N^{0.194}$$

$$V_p (m/s) = 1750$$

となっている。なお、破線は既往の関係式⁵⁾を描いたものである。

図-20は、微小ひずみレベルにおける剛性率 G_0 とN値の関係を示している。この関係は、

$$G_0 (kgf/cm^2) = 144N^{0.680}$$

で表される。

図-21は、PS検層から求められる地震前後の剛性率の比較結果である。ただし、六甲アイランドのデータは、図-1に示したように、2地点の調査位置はやや離れている。図-21によると、地震前後の剛性率の関係はあまり明確ではなく、同一深度における剛性率の違いが、地震によるものか、地盤の場所的な不均一性によるものか、測定精度によるものかははっきりしない。

(2) 動的変形試験

図-22は、凍結サンプルを用いた動的変形試験から得られた $G \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線である。ここに、Gはあるひずみレベルに対応する剛性率、hは減衰比、 γ はせん断ひずみ振幅である。図-22から求められる最小ひずみレベルに対応する剛性率 G_0 (lab.) とPS検層で得られた剛性率 G_0 (in-situ) を比較したのが図-23である。図-23には既存のデータも示されている⁶⁾が、破線で囲った部分が今回の結果である。図-23によると、PS検層結果と凍結サンプルを用いた室内での動的変形試験の結果は良く一致している。

砂の剛性率 G_0 は、一般に間隙比 e と平均有効主応力 σ'_m の関数として次式で表される⁷⁾。

$$G_0 = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_m)^n$$

ここに、 $F(e)$ は間隙比の関数、 A , n は実験定数である。

角ばった粒径の砂の場合、 $F(e) = (2.973 - e)^2 / (1 + e)$ 、 $A = 330$ 、 $n = 0.5$ で与えられる。図-24は、凍結サンプルを用いて得られた剛性率 G_0 を $F(e)$ で除して平均有効主応力 σ'_m との関係調べたものである。試験個数が少ないので、一般に用いられているように $n = 0.5$ として A を求めると、 $A = 126$ となる。これは、上記の $A = 330$ の半分程度の値となっており、既往の実験定

数の適用性は低い。ただし、この点については、さらにデータの追加が必要と思われる。

図-25は、 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線および $h \sim \gamma$ 曲線について、港湾で用いられている標準曲線⁹⁾と実測した曲線を比較したものである。 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線については、標準曲線と実測した曲線は良く一致しており、まさ土地盤の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線としてかなりの精度で標準曲線を用

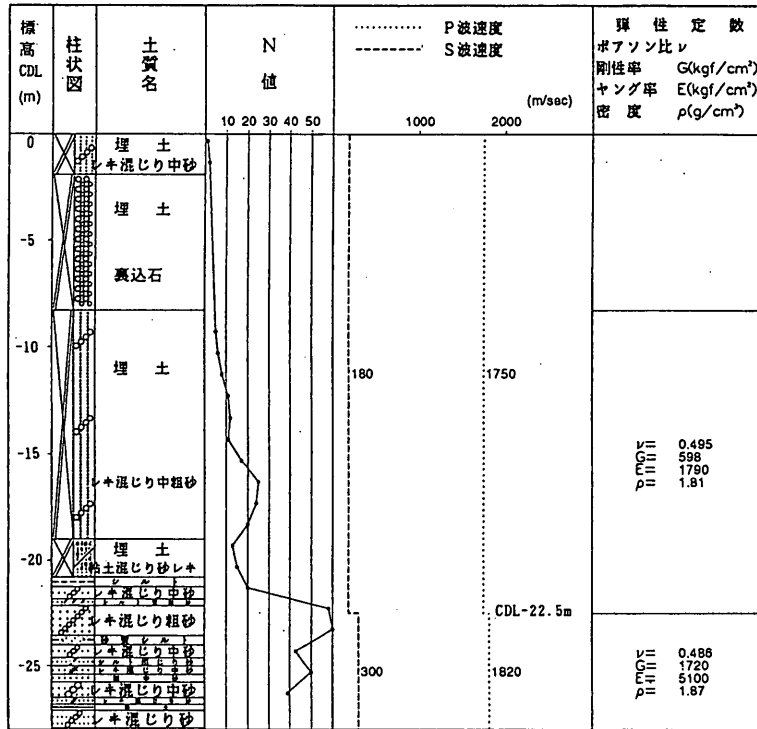


図-18 (a) PS検層総合柱状図 (ポートアイランド①-B地点)

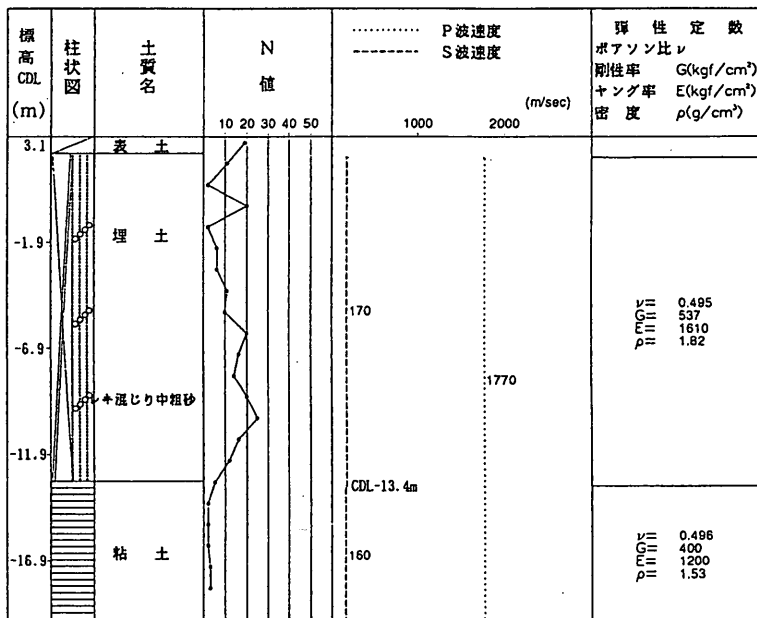


図-18 (b) PS検層総合柱状図 (ポートアイランド①-C地点)

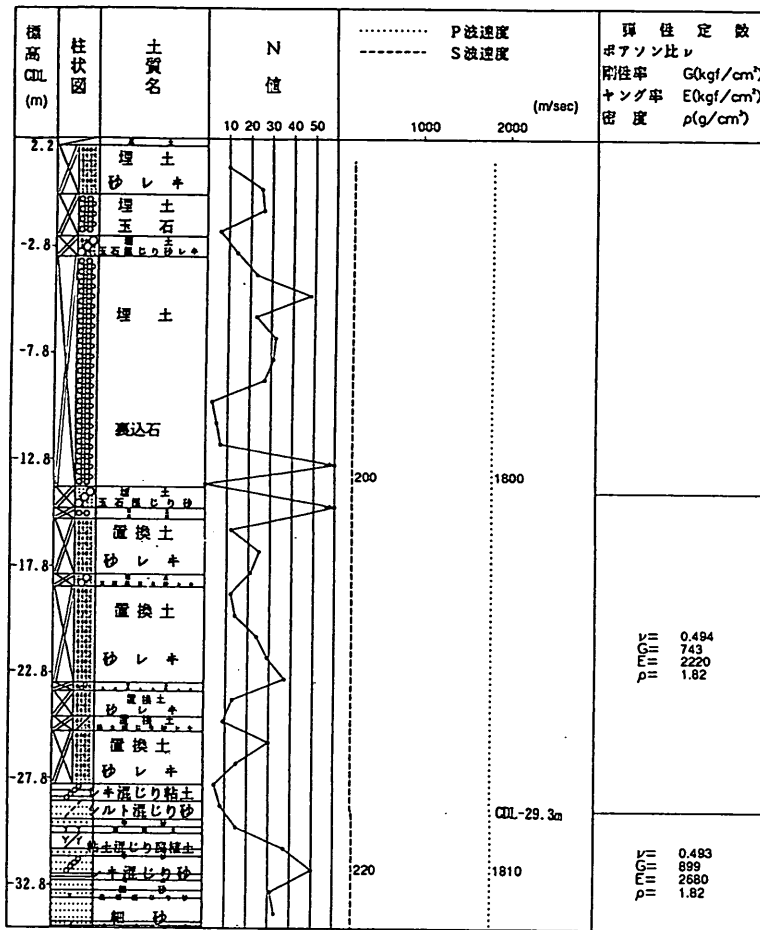


図-18 (d) PS検層総合柱状図 (六甲アイランド⑥-B地点)

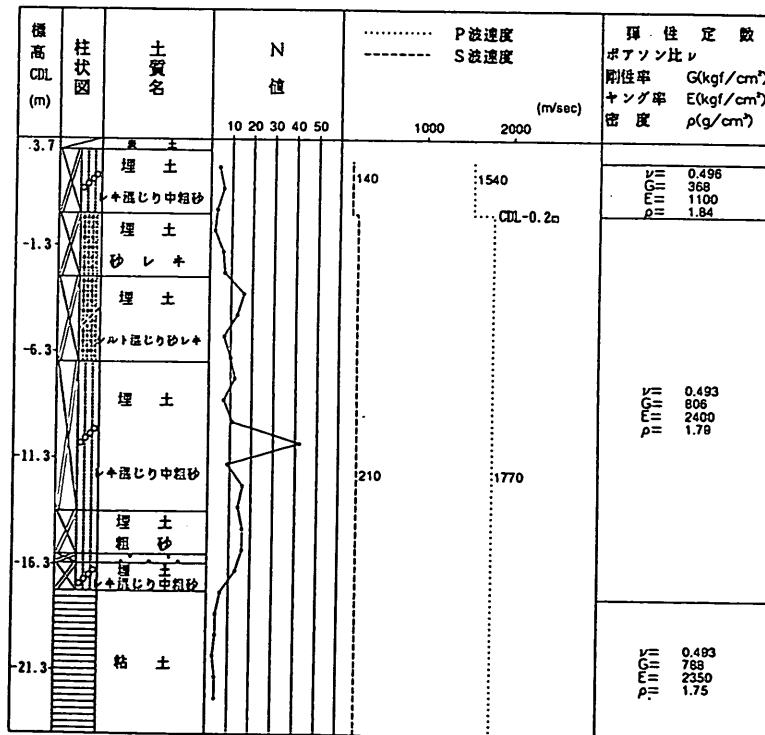


図-18 (d) PS検層総合柱状図 (六甲アイランド⑥-C地点)

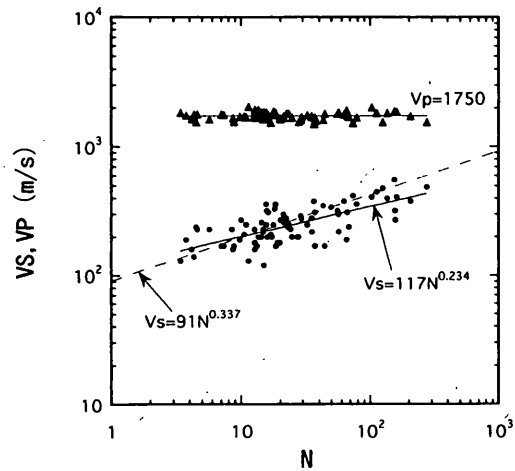


図-19 横波速度 V_s および縦波速度 V_p と N 値の関係

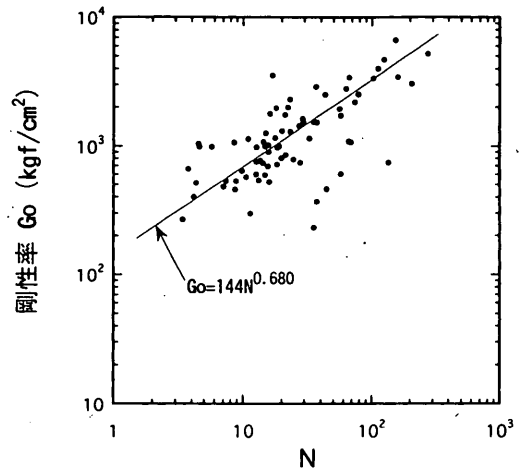


図-20 剛性率 G_o と N 値の関係

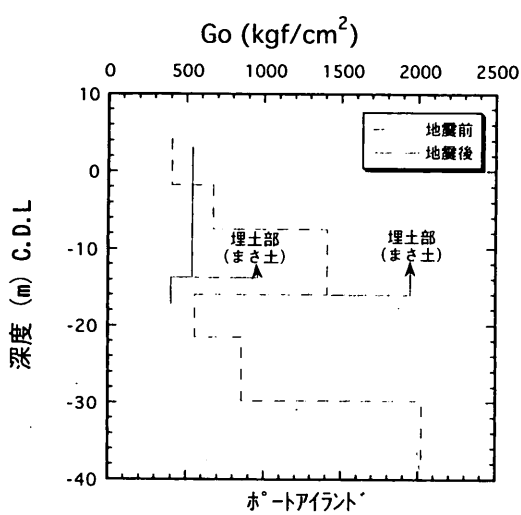


図-21 (a) 地震前後の剛性率の比較 (ポートアイランド)

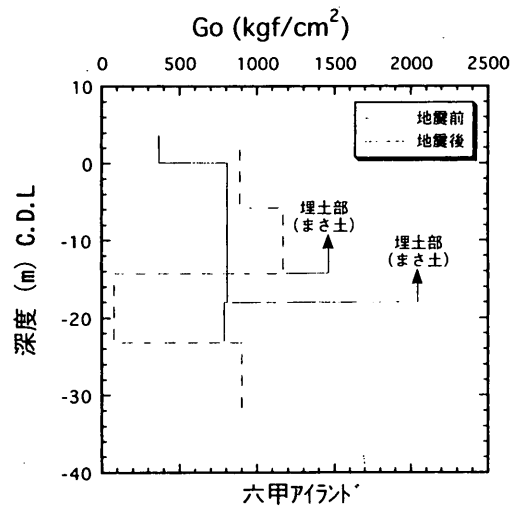


図-21 (b) 地震前後の剛性率の比較 (六甲アイランド)

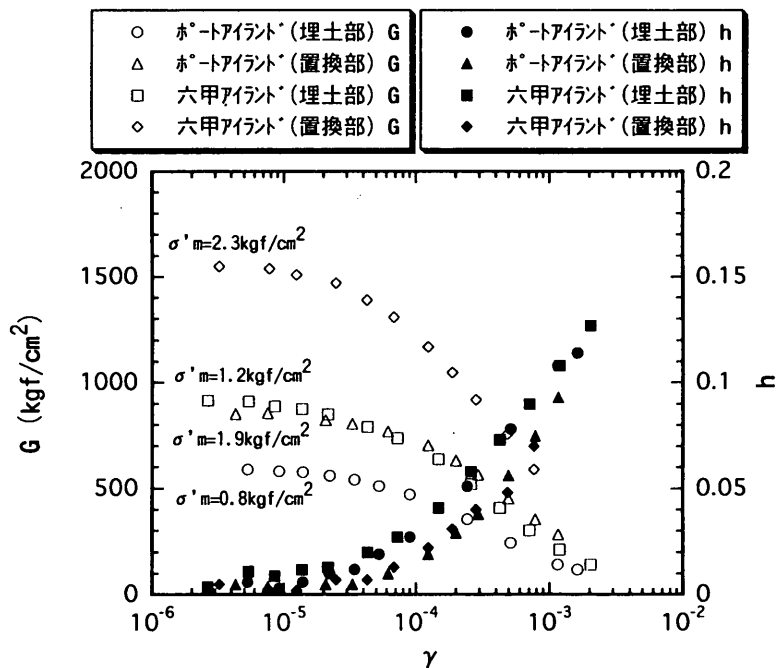


図-22 $G \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ 曲線 (凍結サンプル)

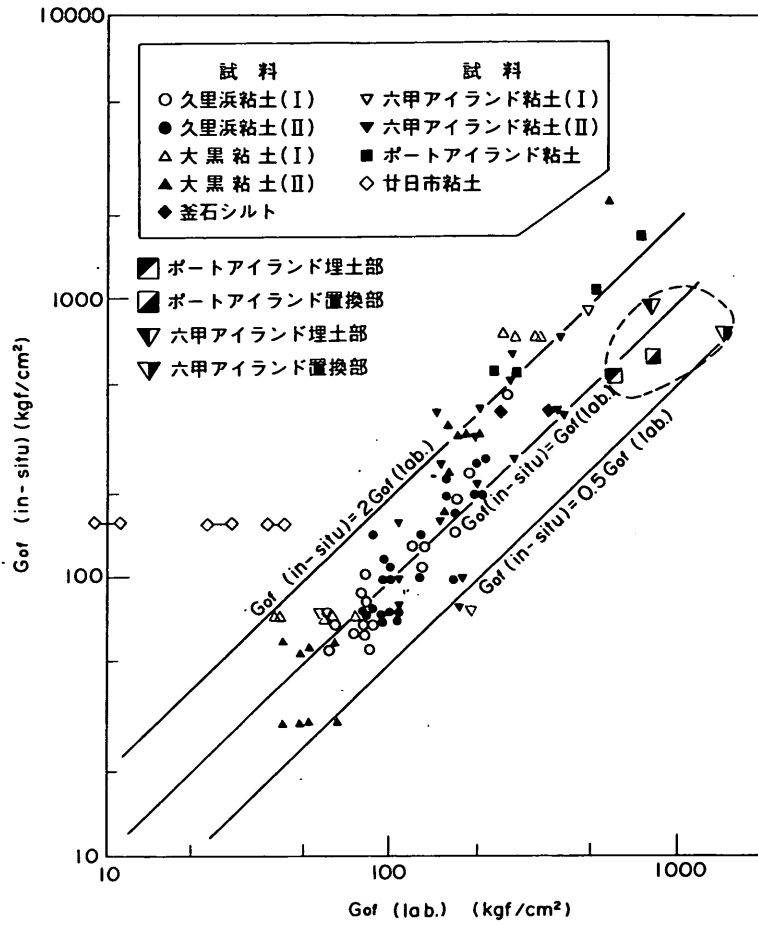


図-23 PS検層と動的変形試験から求めた剛性率 G_o の比較

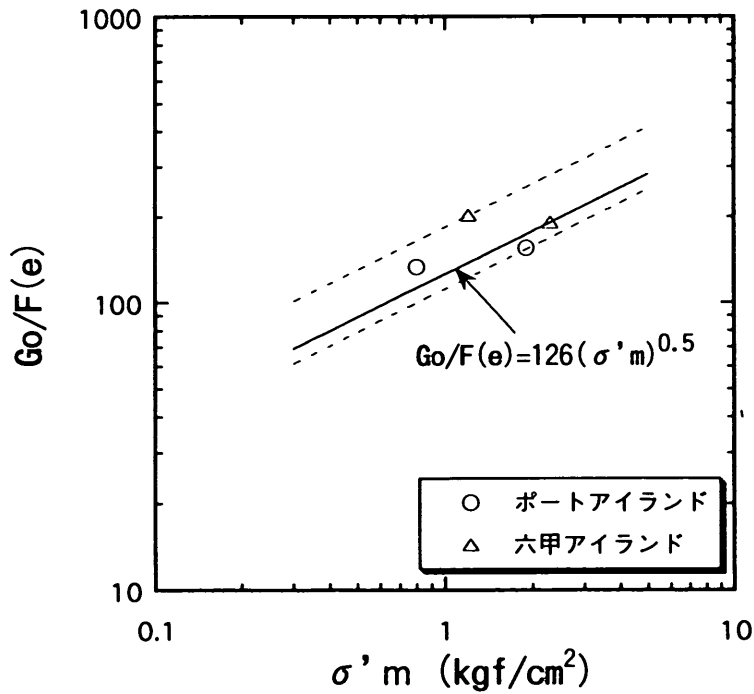


図-24 剛性率 G_o と有効拘束圧の関係

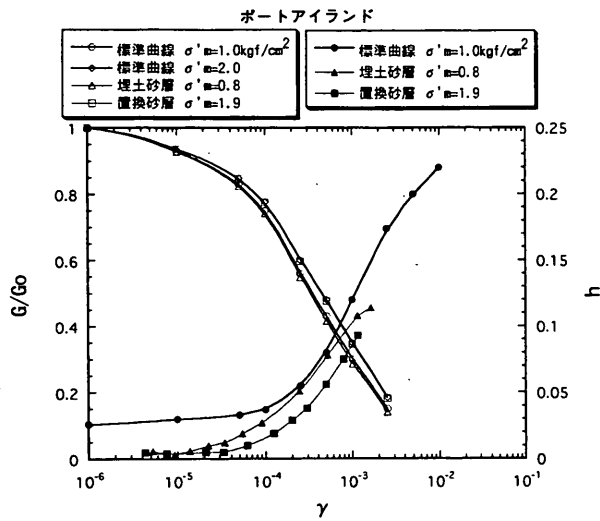


図-25 (a) $G/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ の標準曲線と実測曲線の比較 (ポートアイランド)

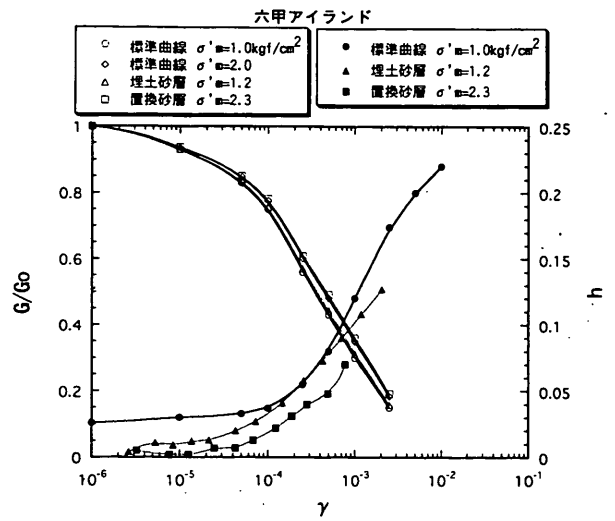


図-25 (b) $G/G_0 \sim \gamma$ および $h \sim \gamma$ の標準曲線と実測曲線の比較 (六甲アイランド)

いることができると考えられる。ただし、 $h \sim \gamma$ 曲線については、全体的に実測値の方が小さい。特に、せん断ひずみ振幅 γ が 10^{-4} 程度以下の微小ひずみレベルで実測値はかなり小さくなっている。

4.5 液状化強度

図-26は、凍結サンプルによる埋土部および置換部の繰り返しせん断応力比と繰り返し回数の関係を描いたもので、軸ひずみ両振幅が5%における結果のみを示している。この場合の供試体の寸法は、直径30cm、高さ60cmである。載荷波形は正弦波、振動数0.1Hzである。また、拘束圧は、試料採取地点の有効土被り圧 ($0.8\text{kgf/cm}^2 \sim 2.3\text{kgf/cm}^2$) 相当としている。図-27は、既往の結果⁸⁾⁻¹⁰⁾との比較を行ったものである。ただし、谷

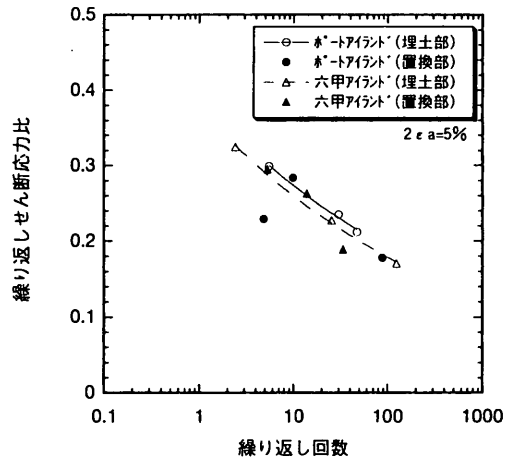


図-26 凍結試料による液状化強度と繰り返し回数の関係

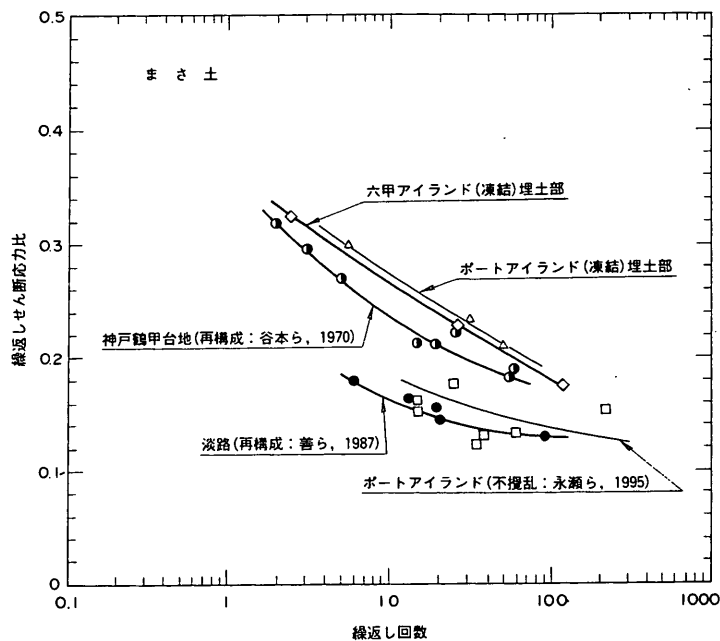


図-27 液状化強度の比較

本らのデータは、再構成供試体を用いた試験（拘束圧0.5 kgf/cm²、相対密度40%）の結果であり、初期液化化時点整理したものである。永瀬らの結果は、不攪乱試料を用いたものであるが試料の採取方法の詳細は明らかでない。供試体の寸法は、直径7.5cm、高さ15cmである。拘束圧は、0.5kgf/cm²および1.0kgf/cm²、相対密度は、それぞれ、41.6%および37.1%である。今回の凍結試料を用いた結果と永瀬らの結果を比較すると、前者の繰返しせん断強度はかなり大きい。また、谷本らの再構成砂の結果とはほぼ同じとなっている。

図-28は、吉見による換算N値と繰返しせん断応力比（繰返し波数が15波のとき）の関係¹¹⁾に、今回の結果と釧路港砂（凍結サンプル）の結果¹²⁾をあわせてプロットしたものである。なお、換算N値は実測したN値に土被り圧とロッド長の補正を行った値である。今回の結果は、吉見の示した関係とはほぼ良く一致している。また、試験個数は少ないが、液化化強度は置換部に比較して埋土部の強度が大きい傾向にある。

5. まとめ

いわゆる岩砕を含む粒度のよい材料から構成される埋立地盤の特性に関するデータは、軟弱粘土地盤のデータに比較して少ない。兵庫県南部地震の被災を契機にこのような埋立地盤のデータを収集するとともに、今回の調査の結果とあわせて整理した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 標準貫入試験のさいに使用されるスプリットサンプラー（内径35mm）で得られた試料、凍結により得られた試料（直径300mm）、地盤の掘削による自然試料の3種類の採取法の異なる試料による粒径加積曲線を調べた結果、凍結試料と自然試料による粒径加積曲線はほぼ等しい結果が得られた。標準貫入試験による試料を用いた場合は、これらに比較して、通過質量百分率で約10%~20%前後上側へシフトした粒径加積曲線となった。

(2) まさ土による埋立地盤のN値は小さく、地盤面から-10m~-15mの浅いところでは平均して10前後の値である。また、地震前後の平均的なN値を比較した結果、ややN値は増加している傾向がみられたが、N値のばらつきを考慮するとその増加量は大きくない。

(3) まさ土による埋立地盤は大きな礫を含んでいるため、密度は普通のきれいな砂地盤に比較して大きい。凍結試料を用いた測定結果では、乾燥密度1.7~2.1g/cm³、湿潤密度2.1~2.4g/cm³程度であった。また、密度検層の結果得られた密度とN値にはあまり良い相関性はないが、密度が大きくなるとN値も大きくなる傾向がある。

(4) 地震後のPS検層の結果によると、まさ土による埋立地盤でも、横波速度とN値の間にはある相関性がある。また、剛性率についても同様である。一方、縦波速度はN値によらず一定であった。

(5) 微小ひずみレベルにおける剛性率G₀について、PS検層による原位置試験と凍結サンプルを用いた室内動的変形試験の結果を比較したところ両者は良く一致し

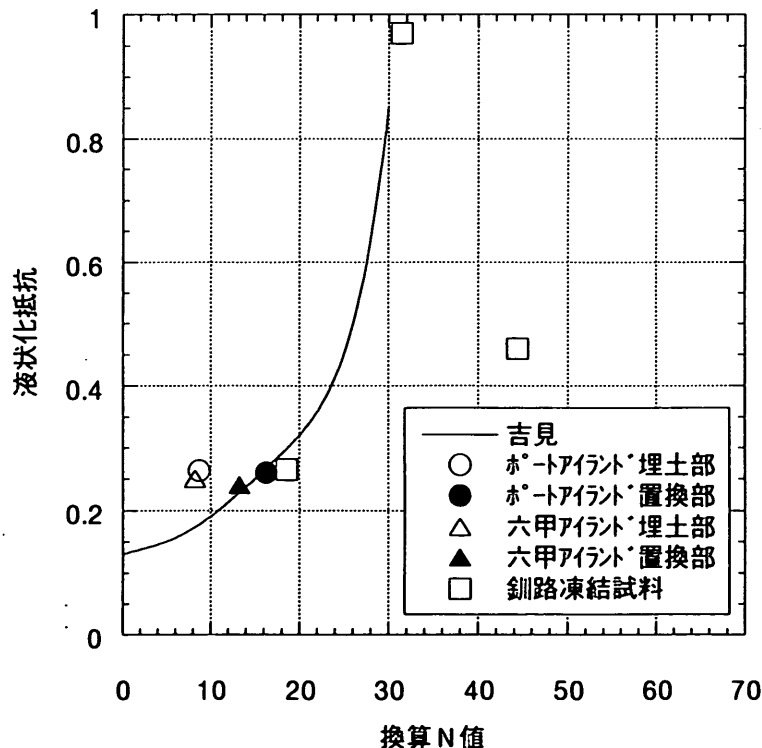


図-28 凍結試料による液化化強度と換算N値の関係

た。また、間隙比と平均有効主応力を用いて剛性率 G を推定するHardinらの実験式は、今回のまさ土に対しては適用性があまり良くなかった。

(6) 実測された $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線は、港湾の基準による砂質土に対する標準曲線と精度良く一致した。一方、減衰比は全体的に実測値の方が小さく、 $h \sim \gamma$ 曲線は、標準曲線よりも下側にきた。

(7) 凍結サンプルを用いた繰り返し三軸試験による液状化強度と換算 N 値の関係は、吉見によって報告されている結果とほぼ良く一致した。また、試験個数は少ないが、埋土部の方が置換部よりも大きい傾向にある。

6. あとがき

大きな礫を含む地盤は不均一性が高く、粒径加積曲線や N 値などの特性のばらつきが粘土地盤等に比較して格段に大きい。本文では、ポートアイランドおよび六甲アイランドを中心としたまさ土による埋土地盤の特性について、地震前後の特性だけではなく、このような不均一な特性も含めて調べる目的でデータの整理を行った。被災原因の究明や対策などの目的で地盤調査や試験を行う場合、不均一な地盤では対象となる施設ごとに行えるだけ多くの地盤調査が望まれるが、おのずと数量には限界がある。その意味でも本文の結果が参考になれば幸いである。なお、地震後の地盤調査は、第三港湾建設局神戸港工事事務所の発注により関西地質調査業協会が実施したものである。関係各位には深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 谷本喜一 (1995): 兵庫県南部地震の地盤災害, 阪神大震災調査報告—都市直下型地震と地盤工学的諸問題—, 第30回土質工学研究発表会特別セッション, pp. 1-24.
- 2) 石原研而, 安田 進, 原田健二 (1995): 土質特性と地盤の挙動, 土木学会誌, 1995年7月号, pp.50-53.
- 3) 土質工学会関西支部 (1995): 海底地盤—大阪湾を例として—, 土質工学会
- 4) 運輸省港湾局監修(1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会
- 5) 土質調査法改定委員会編 (1982): 土質調査法, 土質工学会, pp.122.
- 6) 善 功企, 山崎浩之, 梅原靖文 (1987): 地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 港研報告, Vol.26, No. 1, pp.41-113.
- 7) Hardin, B.O. and F.E. Richart Jr. (1963): Elastic wave velocities in granular soils, Proc. of ASCE, SMFE Div., Vol.89, No.SM1, pp.353-365.
- 8) 谷本喜一, 菅 好徳, 大浦 智 (1970): 真砂土の液状化発生条件について, 土木学会第25回年次学術講演会講演集, 第Ⅲ部門, pp.203-206.
- 9) 善 功企, 山崎浩之, 渡辺 篤, 芳沢秀明, 玉井章友 (1987): セメント混合した砂質土の埋立工法に関する研究—改良土の基本的特性と混合・埋立実験—, 港湾技研資料, No.579.
- 10) 永瀬英生, 穴道 玲, 辻野修一, 木村耕三 (1995): 過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.845-846.
- 11) 吉見吉昭 (1994): 砂の乱さない試料の液状化抵抗 $\sim N$ 値 \sim 相対密度関係, 土と基礎, Vol.42, No. 4, pp.63-67.
- 12) 善 功企, 山崎浩之, 館下 徹, 佐渡篤史 (1995): 凍結サンプルを用いた液状化予測のケーススタディ, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.985-986.

港湾技研資料 No.813

1995・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute. Nagasaki, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1995) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複製は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。