

ポートアイランド・六甲アイランドの液状化特性と埋立土・沖積粘土の工学的性質

岐阜大学大学院 学生会員 竹内 法道・古田竜一

岐阜大学 正会員 重松宏明・八嶋 厚・古本吉倫・杉戸真太・張 鋒

理化学研究所 正会員 渦岡 良介 佐多技建株式会社 森田伸一

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震において、神戸市ポートアイランド（以下PI）と同市六甲アイランド（以下RI）の液状化被災状況に違いがみられた。図1は、地震直後の航空写真判読によるPI第I期埋立地における噴砂跡の分布である。地盤改良された中央部を除くほぼ全域において噴砂が分布しており、大規模な液状化が生じたことがわかる。一方、図2にRIの噴砂分布を示すが、明らかにPIに比べ液状化の被害が少ないことがわかる。なお図中には、両人工島の地震計設置位置が示されている。

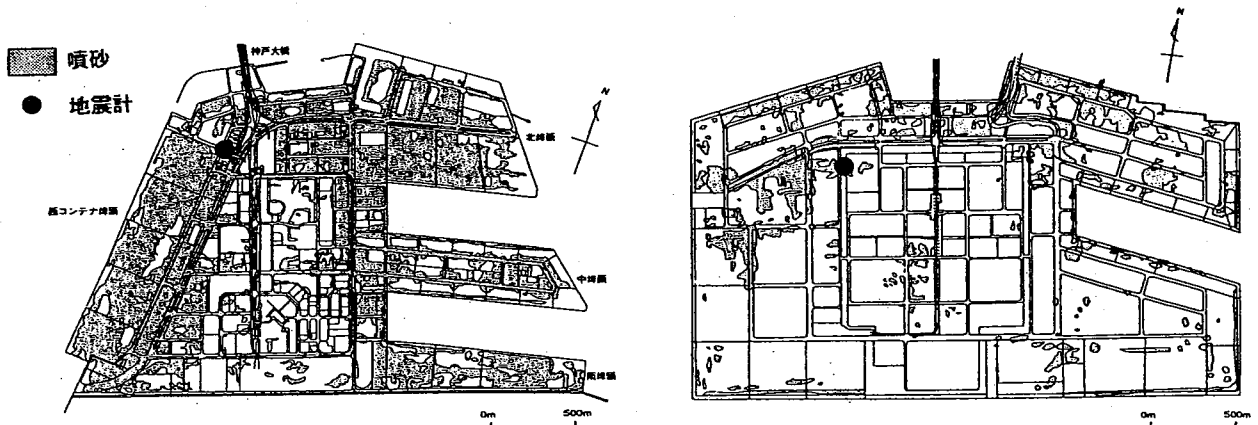


図1 ポートアイランド(PI)埋立地の噴砂状況
(図1,2とも文献1)に加筆)

図2 六甲アイランド(RI)埋立地の噴砂状況

両人工島における液状化程度の差異については、埋立材料の液状化強度の違い、距離減衰による入力地震動の大きさの違いなどに基づいて原因究明を図ろうとしている研究もみられるが、筆者らは特に埋立層直下の沖積粘土層の工学的性質の違いに注目して研究を行ってきた。その一部は、兵庫県南部地震本震前後の地震計設置位置における長期的観測波形のデータ解析、物理試験（SEM観察、X線回折）、有効応力解析としてすでに発表している^{2),3)}。一連の研究の一部として、両人工島の地震計設置地点において、1999年末にサンプリング、標準貫入試験およびPS検層を実施した。本論文では、それらの結果を紹介するとともに、過去に実施された検層結果と比較することによって、沖積粘土層の圧密過程について特に詳しく検討した。そして、これら総合的分析に基づいて、筆者らが実施した有効応力解析結果の妥当性について言及する。

2. 従来の研究と本研究の関係

PIの主要埋立材のまさ土およびRIの主要埋立材の泥岩・砂岩ずり（神戸層群もしくは大阪層群）の液状化強度については、締固め程度および拘束圧によってバラツキはあるものの、RIの埋立材の方が大きいことがわかっている^{4),5),6)}。著者らは、埋立材の力学特性の違いのほか、埋立層下部に位置する沖積粘土層の地震動増幅特性に注目した。RIの埋立材の液状化強度をPIのそれと同程度であると仮定して、有効応力解析（LIQCA⁷⁾）を実施した。PIにおいては、最下端の地震計設置深度G.L.-83mを工学的基盤面と仮定して、本震時に得られた南北成分の地震波を入力地震動として解析した。RIにおいては、本震時の波形が得られていないので、やはりPIのG.L.-83mの地震波の南北成分を入力地震動としてG.L.-93.5mの

Liquefaction in Port Island and Rokko Island related to engineering properties on reclaimed ground and Alluvial clay. ; Norimichi Takeuchi, Ryuichi Furuta, Hiroaki Shigematsu, Atsushi Yashima, Yoshinori Furumoto, Masata Sugito and Feng Zhang (Gifu University), Shin-ichi Morita (Satagiken Ltd.) and Ryoosuke Uzuoka (RIKEN)

深度に入力した。

この解析で特に注目したのは、埋立層直下の沖積粘土層の剛性である。P Iにおいては、地震計設置位置において震災直後の1995年5月にP S検層が実施されている。その結果、沖積粘土層のS波速度は180 m/secと求まっている。一方、R I地震計設置位置においては同時期のP S検層結果がないため、地震よりかなり以前の1987年1月のP S検層により求められた110 m/secのS波速度を用いている。これらのS波速度から求まるせん断剛性を用いて沖積粘土層をモデル化し、前述した入力加速度のもとで有効応力に基づいた液状化解析を実施している³⁾。解析結果について、特に過剰間隙水圧比の時間的变化を図3、図4に示す。過剰間隙水圧比ゼロは初期状態を表し、過剰間隙水圧比1は完全液状化状態を示す。両図からわかるように、両人工島とも埋立層において過剰間隙水圧が徐々に上昇している様子が理解できる。P Iにおいては地下水位以深の埋立層は完全液状化に至っているが、R Iにおいては過剰間隙水圧の上昇はみられるものの、完全液状化には至っていないことがわかる。

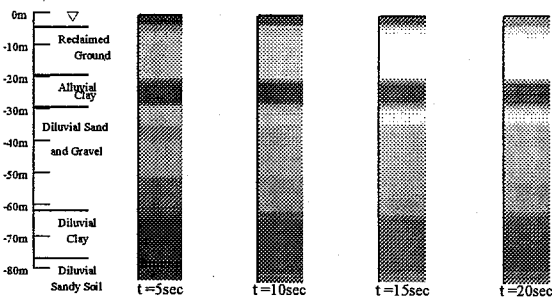


図3 ポートアイランド (P I) の過剰間隙水圧比時刻歴

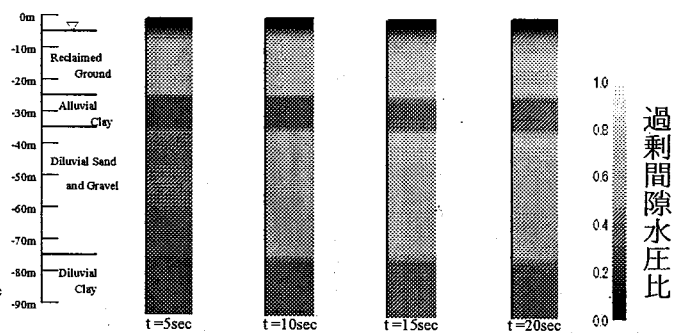


図4 六甲アイランド (R I) の過剰間隙水圧比時刻歴

以上の結果から、たとえ両人工島埋立材の液状化強度が同じでも、また入力地震動の大きさが同じでも、下部沖積粘土層の剛性が小さいR Iにおいては、沖積粘土層内で地震動の減衰が起こり、上部の埋立層の液状化程度がP Iに比べて小さくなることがわかる。しかしながら、両人工島沖積粘土層のS波速度による剛性評価が同時期のデータに基づいているわけではないので、有効応力解析の直接的な比較にはさらなる検討が必要である。

そこで本研究においては、両人工島地震計設置において1999年末にボーリング調査、P S検層を実施した。ボーリングにより得られた試料を用いて、各種物理試験 (SEM観察、X線回折を含む)、標準圧密試験を実施したので、それらの試験から得られた知見と先の数値解析結果を比較しながら、両人工島の液状化の差異について検討する。

3. 埋立土と沖積粘土

埋立土は、両人工島の地震計設置位置において標準貫入試験の際、貫入試験用サンプラーにより採取した。一方、沖積粘土は、ロータリー式二重管サンプラーを用いて採取した。両地点の土質柱状図を図5および図6に示す。図からわかるように、P Iの埋立層厚は約18m、R Iの埋立層厚は約21mであり、沖積粘土層は両人工島とも約10m程度であることがわかる。両図には試料採取深度を矢印位置で示した。

埋立土および沖積粘土の鉱物組成を把握するために、水ひ試料およびふるい (0.075mm)通過試料を用いたX線回折分析を行った。また粒子形状を把握するために、ふるい (0.075mm)通過試料をSEM観察した。

図7に示した埋立土のX線回折分析結果を比べると、P Iの細粒分にはイライトの強度がR Iに比べて強いことが分かる。一方、カオリナイトの強度はR Iの細粒分がP Iに比べて強いことがわかる。図には示していないが、P Iの埋立土はまさ土で、R Iの埋立土はまさ土と神戸層群の泥岩ずりが混在していることが

確認されている。図8に示した沖積粘土のX線回折分析結果を比べると、石英・長石の強度が強くていことがわかる。両試料ともよく似たX線回折分析結果となっており、このことから両人工島下部の沖積粘土層の構成粘土鉱物はほぼ同じものと判断できる。X線回折分析を実施した深度の埋立土と沖積粘土について、SEM観察を実施した結果を写真1、2に示す。これらの写真より埋立土および沖積粘土の細粒分の形状が理解できる。

表1に両人工島の沖積粘土の物理特性を示す。構成する粘土鉱物はほぼ同様であるが、コンシステンシー特性に違いがみられるのが興味深い。RIの沖積粘土の方が、液性限界、塑性指数が高いことがわかる。

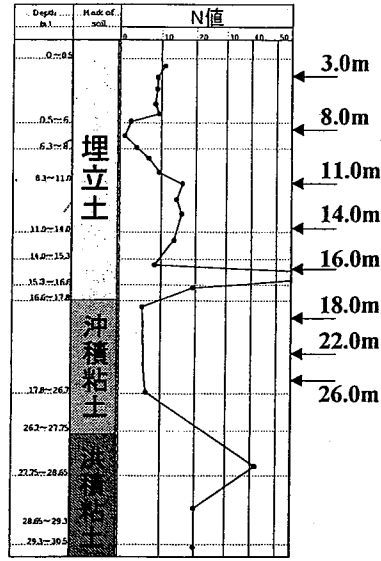


図5 PIの土質柱状図

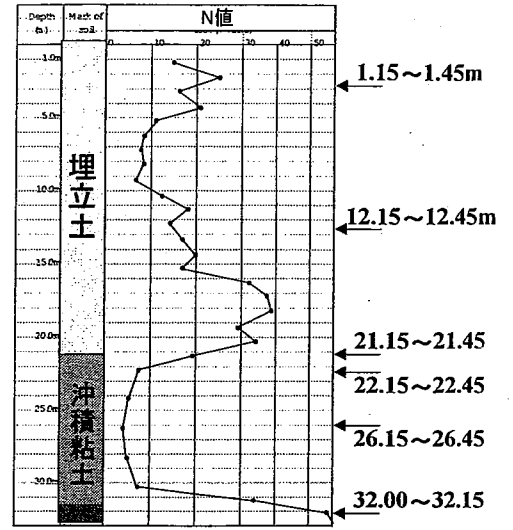


図6 RIの土質柱状図

表.1 沖積粘土の物理特性

	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _P (%)	塑性指数 I _p (%)	比重 G _s
ポートアイランド (GL.-25.00~ -25.80m)	93.9	30.5	63.4	2.601
六甲アイランド (GL.-29.00~ -29.85m)	111.9	33.5	78.4	2.624

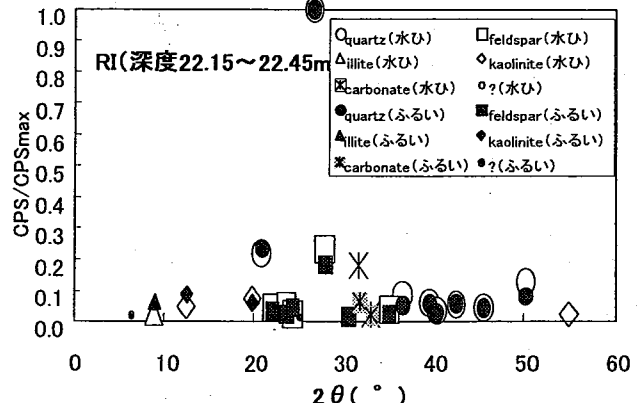
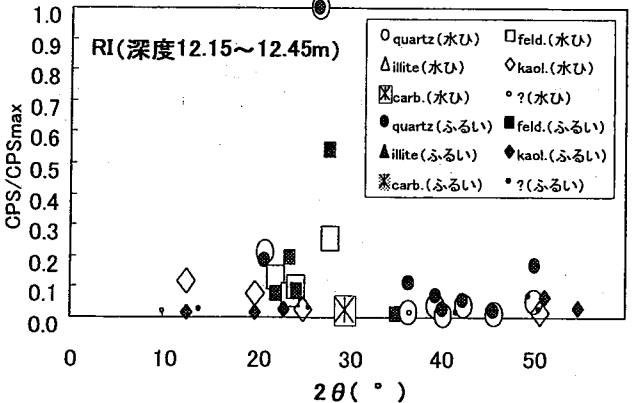
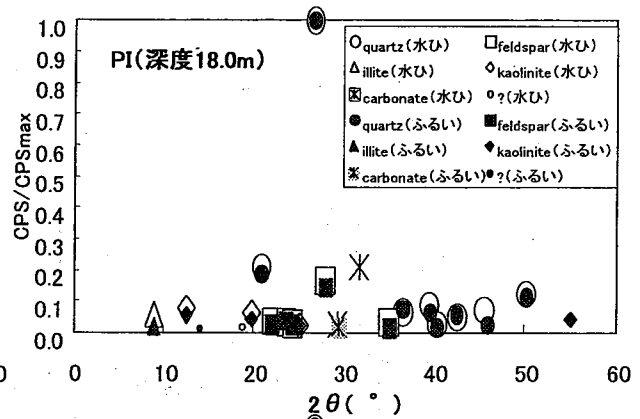
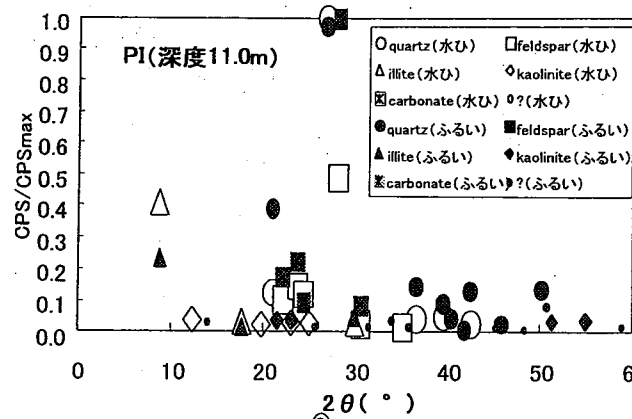
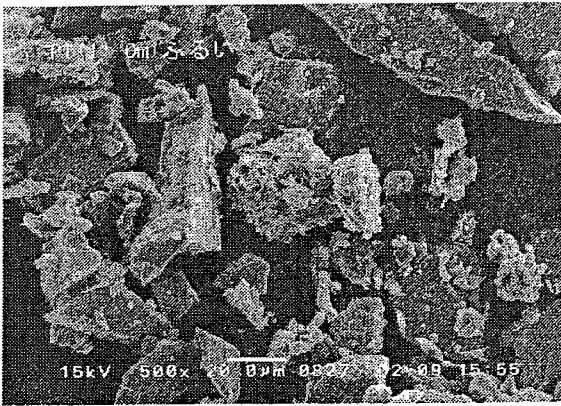
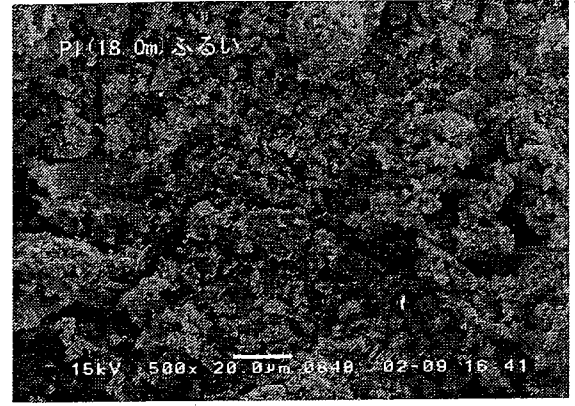


図7 埋立土細粒分のX線回折分析結果

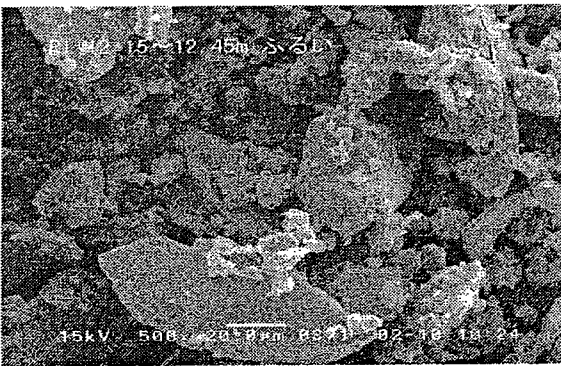
図8 沖積粘土ののX線回折分析結果



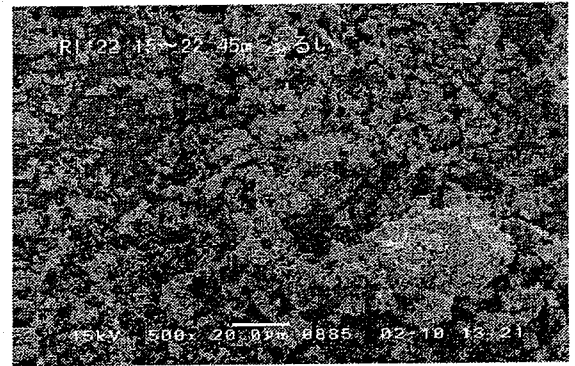
PI.GL-11.0m(×500)



PI.GL-18.0m(×500)



RI.GL-12.15~12.45m(×500)



RI.GL-22.15~22.45m(×500)

写真1 埋立土細粒分のSEM観察

写真2 沖積粘土のSEM観察

4. PS検層結果

図3、4に示した液状化解析結果は、前述したようにPI沖積粘土層については、1995年5月に実施されたPS検層結果から求まるS波速度180 m/sec、RIについては1987年1月のPS検層結果から求まるS波速度110 m/secに基づいている。兵庫県南部地震時の沖積粘土層の剛性が正確にわからないので、S波速度の経時変化を把握する目的で、1999年11月にPS検層を実施した。

図9、10に両人工島のP波およびS波速度分布を示す。

PIについては、兵庫県南部地震発生以前(1991/8)¹⁾、地震発生直後(1995/5)¹⁾、現在(1999/11)の分布を示し、RIについては、地震発生以前(1987/6)¹⁾と現在(1999/11)のS波速度分布を示す。図中の矢印は沖積

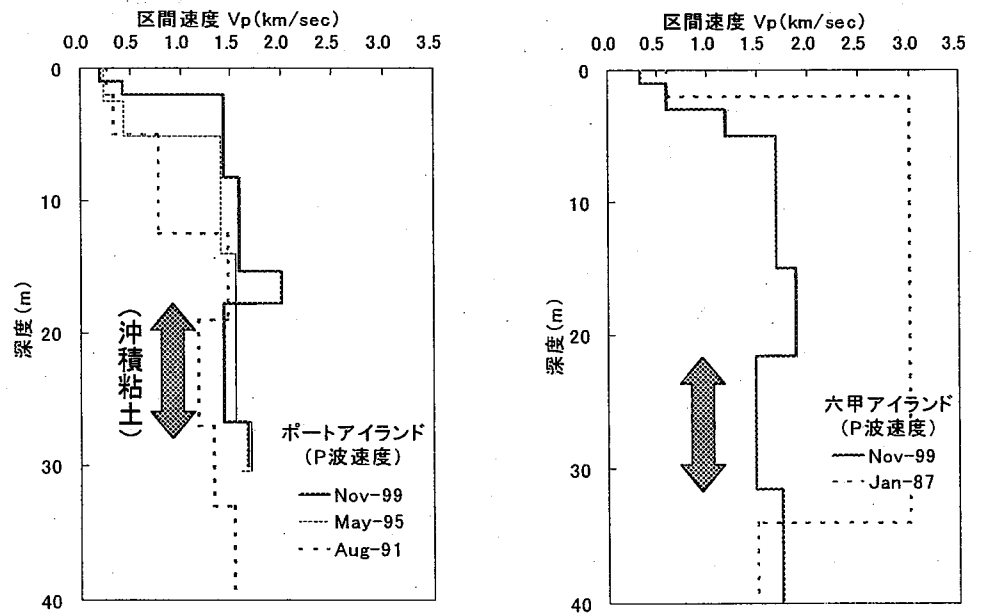


図.9 両人工島のP波速度分布

粘土層を示す。図9のP波速度をみると、両人工島とも地下水位以深で1.5~1.7 km/secの値が求められており、飽和した土の典型的な値を示す。R Iの1987年1月の値は信頼性に欠けるものと思われる。

S波速度については、P I沖積粘土層の速度に変化はなく、1991年の時点でP Iの沖積粘土層の圧密がほぼ終了していたことが想像できる。一方、

R I沖積粘土層のS波速度をみると、1987年の110 m/secから1999年の180 m/secへと増加していることがわかる。これより、R Iにおいては沖積粘土層の圧密が現在進行中の可能性がある。R Iの沖積粘土層はP Iのそれよりも深く位置していることから、本来であればR IのS波速度の方が大きくなることも考えられる。1999年11月の時点において180 m/secといった同じ速度が両人工島沖積粘土層で得られていることから、R Iの沖積粘土層の圧密がいまだ終了していないことが想像される。図4に示したR Iの数値解析では、兵庫県南部地震時の沖積粘土層S波速度として110 m/secという値が用いられたが、当時のS波速度は、そこまで低い値ではないものの、現在の180 m/secよりかなり低い値であったことが容易に想像される。この考察の妥当性については次節でも述べる。

また、埋立層上部では現在のS波速度に比べ、地震以前の速度のほうが大きくなっており、逆に埋立層下部では、現在のS波速度が地震以前の速度に比べ大きくなっている。埋立層に液状化を生じさせるような大きな地震動によって、このようなS波速度構造の変化がみられたのは興味深い。

5. 沖積粘土の力学特性

P IおよびR Iの沖積粘土試料について各深度ごとの圧密降伏応力を求めた。図11、12に圧密降伏応力と有効土かぶり圧の深度分布を示した。有効土かぶり圧を計算するために用いた埋立土の湿潤密度は、P Iでは2.10 g/cm³、R Iでは2.09 g/cm³である¹⁾。沖積粘土層については、密度試験より求めた値を用いた。P Iでは、有効土かぶり圧よりも圧密降伏応力が若干大きめの値を示していることがわかる。この傾向は、通常の沖積粘土においてみられるものと同様で、沖積粘土層の圧密が終了していることが理解できる。一方、R Iでは、圧密降伏応力が有効土かぶり圧より若干小さめの値で分布している。特に粘土層中央部に位置する粘土ほどこの傾向が強い。P S検層結果によるS波速度の経時変化のところでも述べたように、P Iの沖積粘土層は兵庫県南部地震時には圧密が終了していたと考えられるが、R Iの沖積粘土層は圧密進行状態であったことがわかる。

圧密試験から求まる粘土の圧縮指数(C_c)の値は、両人工島の粘土とも大差なく、ほぼ0.8程度の値となっている。この値は、報告されている神戸付近の沖積粘土のC_c⁸⁾と比べると、同等もしくは若干小さめの値となっている。

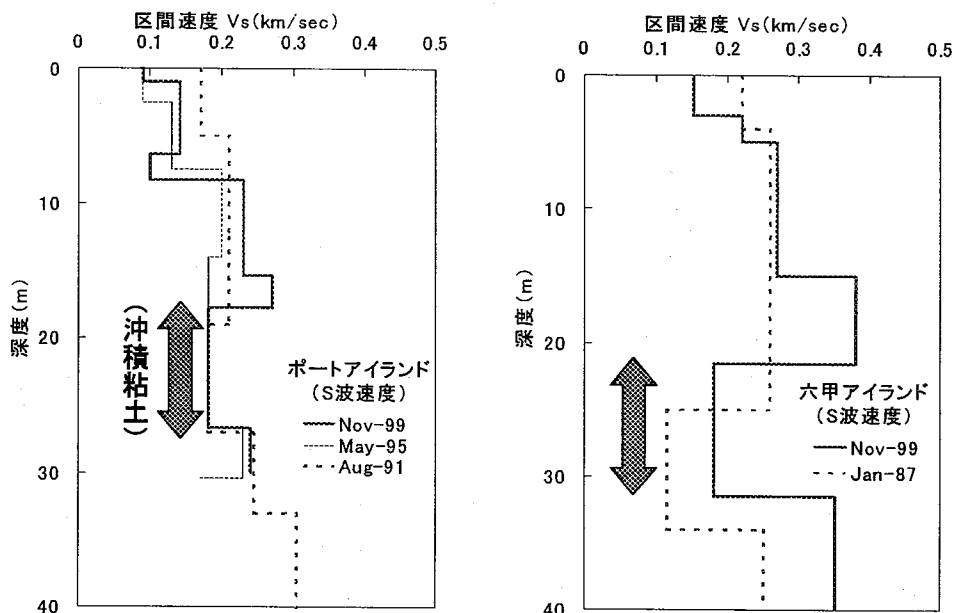


図.10 両人工島のS波速度分布

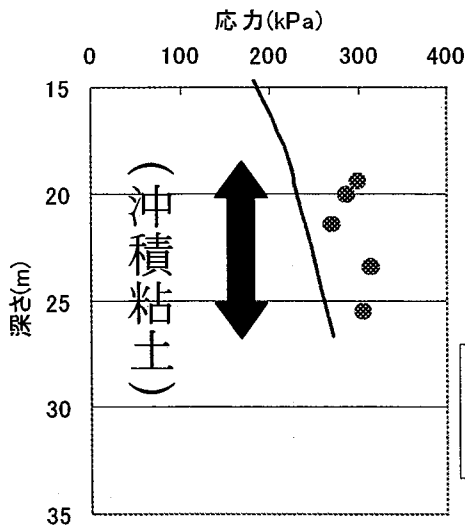


図1.1 ポートアイランド (PI) 沖積粘土の有効土かぶり圧と圧密降伏応力との関係

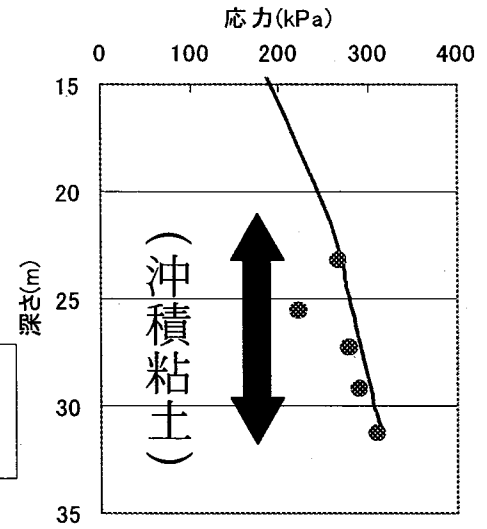


図1.2 六甲アイランド (RI) 沖積粘土の有効土かぶり圧と圧密降伏応力との関係

6. おわりに

PS検層および圧密試験を通じて、RIの沖積粘土層が兵庫県南部地震当時、圧密進行中であったことがわかった。このことから、当時の沖積粘土層の剛性は、現状の剛性(180 m/sec から求まるせん断剛性)に比べてかなり小さかったと思われる。したがって、図3、4に示した両人工島の液状化解析結果について、沖積粘土層の地震動増幅特性に関する考察はさほどの外れではなかったことがわかる。また、各機関の試験結果およびここで示したX線回折結果、SEM観察を通して、RIの埋立材の方がPIのまさ土よりも液状化強度が大きいことがわかり、これも液状化程度の差異に寄与していることがわかる。

両人工島においては、埋立以前および埋立直後に、沖積粘土を対象に種々の力学試験およびPS検層等が実施されている。また、地震直後からそれ以降にかけて、沖積粘土層より下部の砂礫層等において間隙水圧が観測されている。それらの経時変化のデータ解析に併せて、現在、採取された沖積粘土を用いた各種三軸試験を実施中である。それらの解析・試験結果がまとまり次第、さらに詳しく検討していきたい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 岡二三生・杉戸真太・八嶋 厚・古本吉倫・山田耕一郎：液状化した埋立地盤における地震動増幅特性とその経年変化、液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp.539-544, 1999.
- 3) Oka,F., Sugito,M., Yashima,A., Furumoto,Y. and Yamada,K. : Time dependent ground motion amplification at reclaimed land after the 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake, Proc. 12WCEE, CD-ROM No.2046, 2000.
- 4) 望月美登志・福島伸二：埋立て地盤材料の液状化特性におよぼす拘束圧の影響、第 32 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.693-694, 1997.
- 5) 山田耕一郎・長谷川憲孝・平岡呂晃・田中康雄・後藤政昭：ポートアイランド並びに六甲アイランドの埋め立て材料の液状化強度と締固め程度の関係について、第 32 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.699-700, 1997.
- 6) 太田秀樹・荻野芳章・後藤政昭：六甲アイランド並びにポートアイランドにおける埋土層の地盤状況と動的強度の比較、第 32 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.701-702, 1997.
- 7) Oka,F., Yashima,A., Shibata,T., Kato,M. and Uzuoka,R. : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 8) (社)土質工学会関西支部：海底地盤、p.149,1995.