

(59) 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

不動建設㈱ 正会員 原田 健二  
 東京電機大学 正会員 安田 進  
 不動建設㈱ 正会員 新川 直利

1. はじめに

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震 (M=7.2) により、大阪湾を囲む沿岸部の埋立地盤で液状化現象が多く認められ、特に神戸港内の大規模人工島であるポートアイランド及び六甲アイランドでの液状化現象は顕著であった。液状化により、両島のかなりの範囲で噴砂現象がみられ地盤沈下が発生したが、両島においては、幾種類かの地盤改良工法が施されており、改良域 (特に締固め工法により改良された範囲) と非改良域において明瞭な被害の相違がみられた。

本報告では、各種地盤改良工法 (液状化対策工法以外のものも含む) について、既往文献と資料による調査、及び現地における実測沈下量調査結果とデータ整理結果を基に液状化判定指針による解析を行い、両島における地盤改良効果についての考察を行った。

2. 両人工島における地盤改良工法

ポートアイランド、六甲アイランドでは、埋立土層下の沖積粘性土層の圧密沈下対策、埋立土層の支持力増加等を目的として各種地盤改良工法 (プレロード工法、サンドドレーン工法、振動締固め工法等) が施工されており、この改良域を平面的にみたのが、図-1, 2である。ポートアイランドでは、プレロード、サンドドレーン、ロッドコンパクション工法が用いられ、六甲アイランドでは、サンドドレーン工法とサンドコンパクションパイル工法が採用された。各工法の改良面積の比率を整理すると、表-1のようになり、六甲アイランドの方が、サンドドレーンによる改良面積比率が大きく、全体の改良面積比率も若干多いことがわかる。

3. 既往文献と資料による埋立地盤に関する調査<sup>3)~8)</sup>

ポートアイランドの埋立材料は、六甲山か

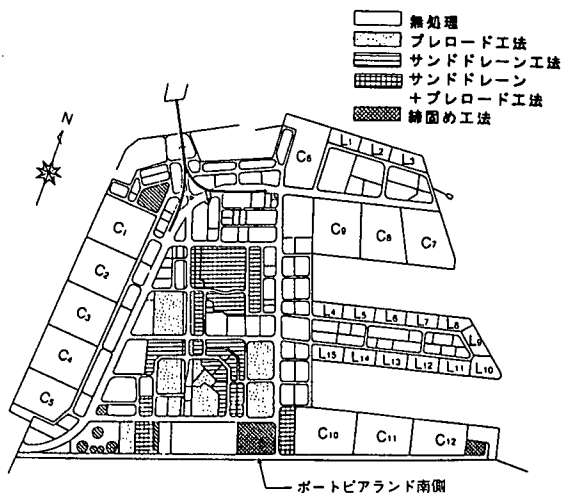


図-1 ポートアイランドの地盤改良域平面図<sup>1)</sup>に加筆

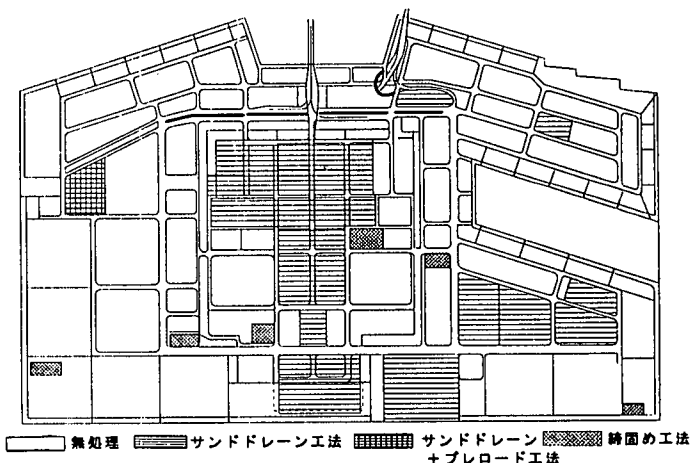


図-2 六甲アイランドの地盤改良域平面図<sup>2)</sup>に加筆

表-1 両島における地盤改良面積

ポートアイランドI期 (436ha)		六甲アイランド (580ha)	
地盤改良工法	面積 (ha)	地盤改良工法	面積 (ha)
プレロード工法	24 ( 5.5%)	サンドドレーン工法	105 (18.1%)
サンドドレーン工法	38 ( 8.7%)	締固め工法	6 ( 1.0%)
締固め工法	9 ( 2.1%)		
<合計>	71 (16.3%)	<合計>	121 (19.1%)

( ) は面積比率

らの搬入土（まさ土）で、一部、残土も用いられている。<sup>3)</sup> また、六甲アイランドの埋立材料の多くは六甲山地に分布する神戸層群の凝灰岩等であり、土質は粘土混じり砂礫を主体とし、転石も含んでいる。<sup>4)</sup> 幾場所かの既存のデータを整理して範囲で示したものが図-3で、両島での埋立材料地区の粒径加積曲線を比較すると、六甲アイランドのほうがやや細粒分が多いことがわかる。

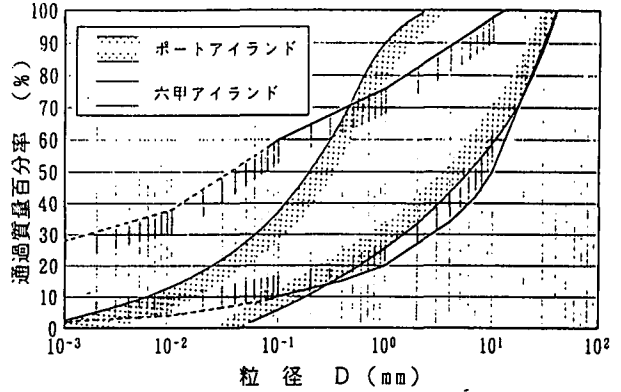


図-3 両島の埋立材料の粒度分布

各改良工法のN値の増加傾向をみるために、各工法の施工場所での事前と事後ボーリング結果を整理して、図-4のようにN値の分布を平均と標準偏差に表した。同図中のSDとは、サンドドレーン+プレロードの場合も含んでおり、締固めは、ロッドコンパクション工法とサンドコンパクションバイブル工法の結果を含んでいる。同図より、改良後N値は当然のことながらサンドドレーン工法より振動締固め工法のほうが大きくなっており、両島でのN値増加は、概してサンドドレーン工法で5程度、振動締固め工法で10以上ということができる。しかし、本来N値の増加を見込まないサンドドレーン工法で、N値の増加量が10程度

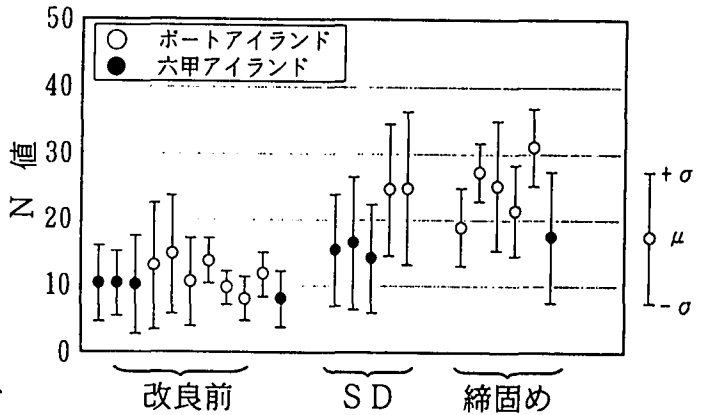


図-4 各工法によるN値の分布

になっているケースがある。これは、図-5に示しているようにサンドドレーンの杭長が長かったこと ( $L=30\text{m}$ 程度) と貫入途中に硬い層 ( $N>30$ ) があり、その層を打ち抜くために通常より貫入時間が長くなり、パイプロの振動により埋立層が締固まるという、副次的な効果があったものと考えられる。また、ポートアイランドと六甲アイランドのデータを比較すると、各地点でのデータ数が少ないため明言はできないが、ポートアイランドのほうがN値の増加量は大きくなる傾向が見られる。これは前述したように六甲アイランドのほうが細粒分含有率が大きかったことに起因するものと考えられる。

#### 4. 現地沈下量測定結果

地震発生後、ポートアイランド、六甲アイランドの各地盤改良区域と非改良域で沈下量の測定を行った。沈下の測定は、地震前の各地点での標高が明確でないため、杭基礎で施工されている主要な建家は沈下していないものと仮定して、その周辺部の相対沈下量で評価した。図-6に各工法で施工された場所の沈下量測定結果を示す。同図より非改良域では、平均で40~50cm程度の沈下がみられるのに対し、サンドドレーン改良域では平均で15~18cm、振動締固め改良域ではほぼ沈下なしという結果が

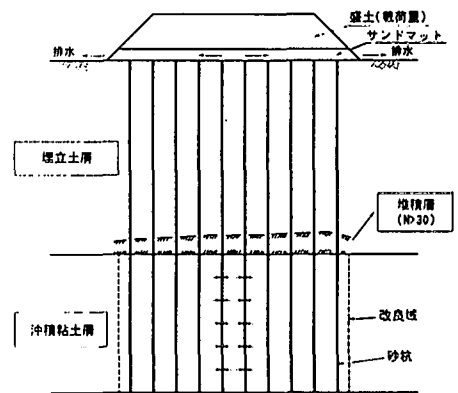


図-5 ポートアイランドでのサンドドレーン施工

得られ、振動締め改良による効果が確認された。

### 5. 各液状化判定指針による計算結果

ポートアイランドにおける振動締め改良工法（ロードコンパクション工法）施工場所、六甲アイランドにおけるサンドドレーン施工場所での事前及び事後ボーリング結果を用いて液状化判定を行った。計算に用いた判定指針は、道路橋示方書、建築基礎構造設計指針、原子力発電所耐震設計技術指針の3つの液状化安全率  $F_L$  法に分類される手法ある。粒度分布については、それぞれの場所でのデータが得

られなかったため、図-3の両島における粒度分布の範囲での平均と上限及び下限のものを用いた。（ポートアイランドの場合は細粒分が含有率5～30（%）、平均粒径6～0.2（mm）；六甲アイランドの場合は細粒分含有率10～50（%）、平均粒径10～0.04（mm））また、地表面最大加速度  $\alpha_{max}$  についても実際の加速度が明確ではないため、300、400、500、600 galとして幅をもたせた。この意味で、設計加速度については強震を想定したため、一部設計指針の適用限界を無視していることになる。

計算結果のうち、ポートアイランドの振動締め改良工法施工場所での平均の粒度分布を使った計算結果を各指針について図-7に示す。同図には、事前及び事後ボーリング結果と液状化安全率の分布図、液状化・非液状化層分布図を各設計加速度毎に示している。改良前の段階（事前ボーリング）では、どの判定指針を使っても300 gal以上で、全層液状化との計算結果となり、実際の沈下被害状況と一致している。一方、改良後（事後ボーリング）では、各設計基準による判定では、300 galを越えた段階で全面的あるいは部分的に液状化安全率が1を下回り、現地調査結果からの締め改良を施した現地においては、噴砂などの液状化現象や沈下は認められなかった現実とあわない結果となった。

六甲アイランドでのサンドドレーンで施工された場所の事前と事後ボーリング結果を使って、建築基礎構造設計指針で同様の計算をした。これらの無処理域と改良域（締め改良、サンドドレーン）の液状化・非液状化層分布図を基に、液状化層の液状化後の圧縮ひずみを3～5%として範囲で表し、図-6の現地調査に基づき実測沈下量を各工法毎に整理して比較したものが図-8である。すなわち、予測沈下量は液状化層にひずみをかけたものを合計しており、沈下量が大きいということは、液状化層厚が大きいということである。図からは、設計加速度が300 gal程度でも実測と予測沈下量が異なり、地表面最大加速度が大きくなるにつれて実測と予測沈下量の隔たりが大きくなっていく傾向がわかる。特に、締め改良域での予測沈下量は、実際の被害の状況とは大きく異なっており、これらの問題については、今後、検討する予定である。

### 6. まとめ

以上、今回の地震での大規模人工島の液状化について、既往文献と資料の調査、現地沈下量の測定及び液状化判定による計算結果から考察を行った結果、本報文は以下のようにまとめられる。

- ① 現地調査結果より、締め改良工法の液状化に対する有効性が実証された。
- ② 地盤改良工によるN値の増加は、明らかに液状化による沈下量の低減に反映される。
- ③ 各工法における沈下量の相違は、液状化層厚の違いと液状化程度の違いに起因するものと考えられる。

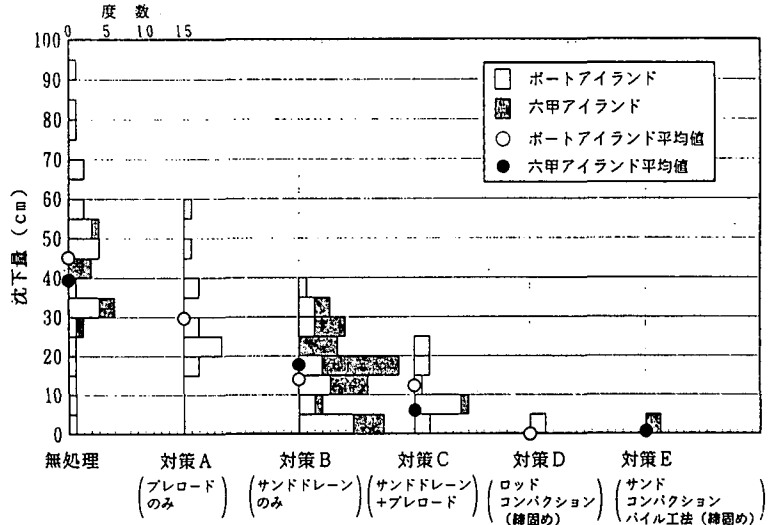
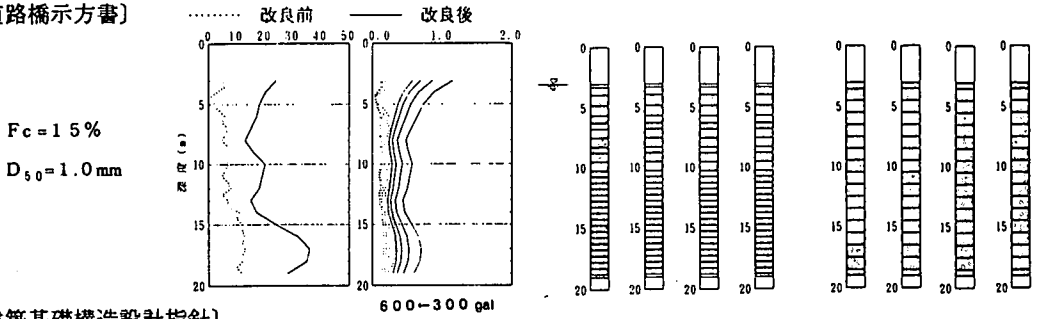
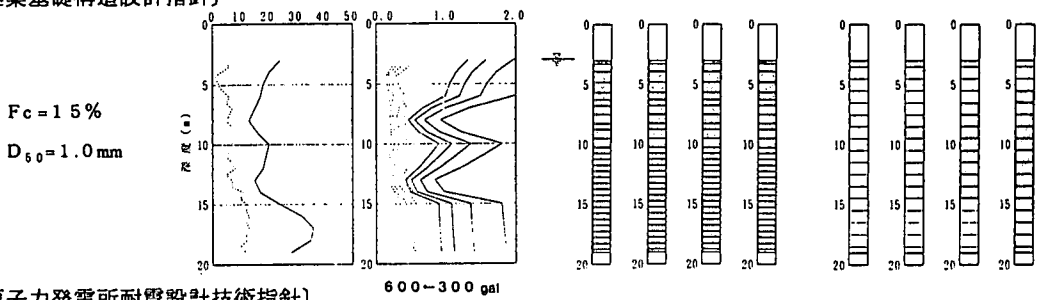


図-6 地盤改良工法と沈下量の関係（現地調査結果）

[道路橋示方書]



[建築基礎構造設計指針]



[原子力発電所耐震設計技術指針]

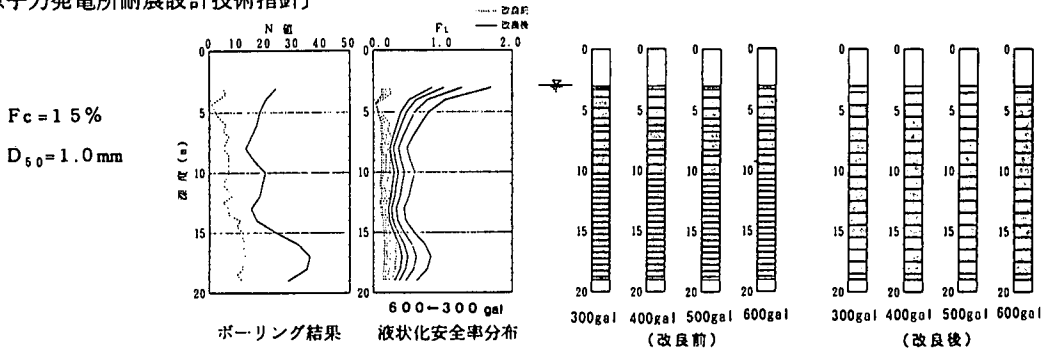


図-7 各液状化判定指針による計算結果例

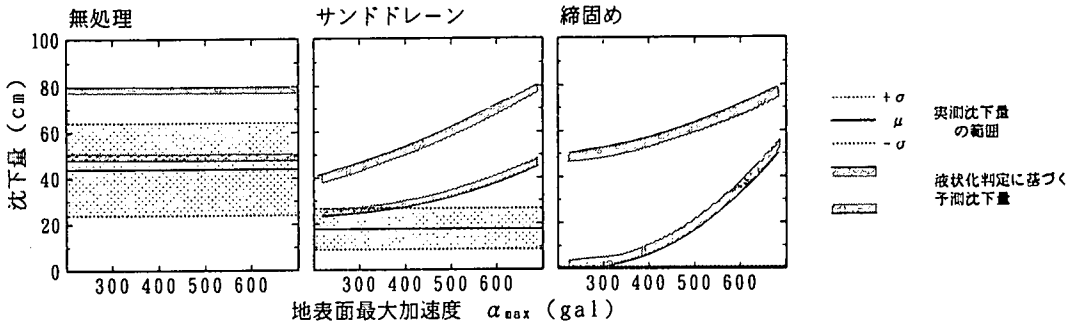


図-8 実測沈下量と液状化判定による予測沈下量

【参考文献】

- 1) 渡辺：神戸ポートアイランドの開発と基礎工, 基礎工, 1981.1.
- 2) 不動建設株式会社：平成7年(1995年)兵庫県南部地震調査速報集, 1995.3.
- 3) 谷林, 小堀：埋立地に建つ高層住宅団地における地盤改良と各種杭試験, 基礎工, 1981.1.
- 4) 久徳, 豊田, 瀬川, 角：神戸六甲アイランドにおける超高層建物の基礎設計, 基礎工, 1989.9.
- 5) 松本, 久保, 木村：下水道管の基礎工, 基礎工, 1992.5.
- 6) 梶天, 福井, 水畑, 小堀, 福住：神戸ポートアイランドにおける地盤改良工事に伴う振動試験報告, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 1981.6.
- 7) 中島, 福井, 谷本：新交通車両基地の基礎工, 基礎工, 1992.5.
- 8) 棚橋, 福井, 内田, 川村：埋立地盤における各種基礎形式を有する建物の沈下測定, 日本建築学会近畿支部研究報告集.