

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

不動建設(株) 坪井 英夫* 不動建設(株) 高橋 嘉樹*
不動建設(株) 原田 健二* 不動建設(株) 新川 直利*
東京理科大学 石原 研而** 東京電機大学 安田 進***

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震により、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、構造物、橋脚、岸壁等の被害の一因となった。特に神戸港内の2つの巨大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り、両島のかなりの範囲で噴砂や地盤沈下が発生した。両島では、幾種類かの地盤改良工が施工されていたが、現地における被害状況の調査によると、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、両島の液状化による被害状況を示すとともに、既往文献等による両島の地盤状況の調査及び現地における地震後の沈下量測定結果に基づき、両島の地盤改良効果に関する検討を行った。その結果、締固め工法の液状化に対する有効性が確認されるとともに、地盤のN値と沈下量の相関性が認められることが明らかとなった。

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多くの液状化現象が認められた。その中でも神戸港内の2つの巨大人工島である、ポートアイランドおよび六甲アイランドでの液状化現象（噴砂、地盤沈下）は顕著であった。両島では幾種類かの地盤改良工法が施工されており、地震後の被災調査によると改良域（特に締固め工法により改良された範囲）と非改良域では明瞭な被害の相違がみられた¹⁾。

本報告は、既往の文献調査、地震後の沈下量測定結果等から、両島における各種地盤改良工法（液状化対策以外のものも含む）の液状化に対する効果について考察したものである。

2. 埋立地盤の概要

ポートアイランドの埋立てには、須磨の丘陵地から採取されたマサ土（風化花崗岩）が用いられ、
キーワード：液状化、地盤改良、地盤沈下

* 不動建設(株)ゾオ・インゾニアリング事業本部

06-201-9211

** 東京理科大学理工学部 0471-24-1501

*** 東京電機大学理工学部 0492-96-2911

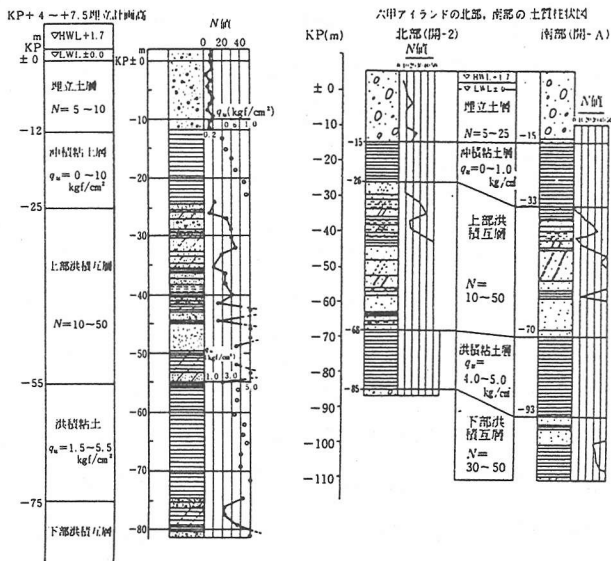
部に建設残土、鉱さい^{1)、2)}も用いられている。一方、六甲アイランドではマサ土、神戸層群、大阪層群、からなる土砂で埋立てられているが、そのほとんどが神戸層群の砂岩、泥岩、凝灰岩を破碎した土砂からなり、一部に浚渫土を含んでいる¹⁾。図-2に両島の代表的な土質柱状図^{2)、3)}を、図-3に粒径加積曲線⁵⁾を示す。両地区ともかなりの礫分を含んでおり、六甲アイランドのほうがやや細粒分含有率が多いことがわかる。また、N値は礫の影響を除けば、概して10程度、埋立層厚は20m程度である。

3. 両島における地盤改良工法

ポートアイランド及び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を目的としてプレロード工法、サンドドレーン（以下SDと称す）工法が、埋立土層の支持力増強、液状化対策として振動締固め工法が施工されている。振動締固め工法については、ポートアイランドではロッドコンパクション（以下RCと称す）工法、六甲アイランドではサンドコンパクションパイル（以下SCPと称す）工法が施工されている。両島で工法が異なるのは、地盤の粒度構成が異なるためで、細粒分が少ないポートアイランドでは振動による締固め効果を期待す



図-1 液状化発生地点⁶⁾



(a) ポートアイランド (b) 六甲アイランド

図-2 ポートアイランド、六甲アイランドの代表的な土質柱状図^{3), 4)}

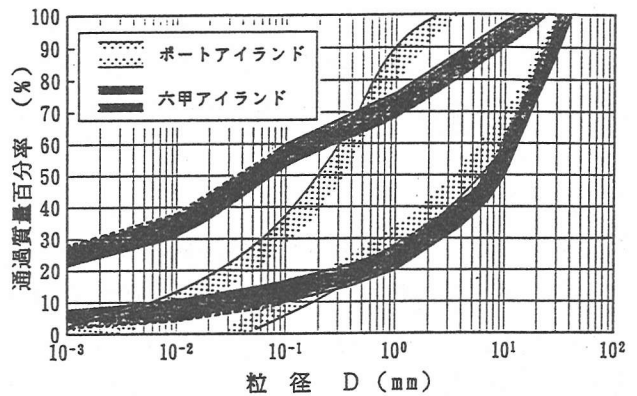
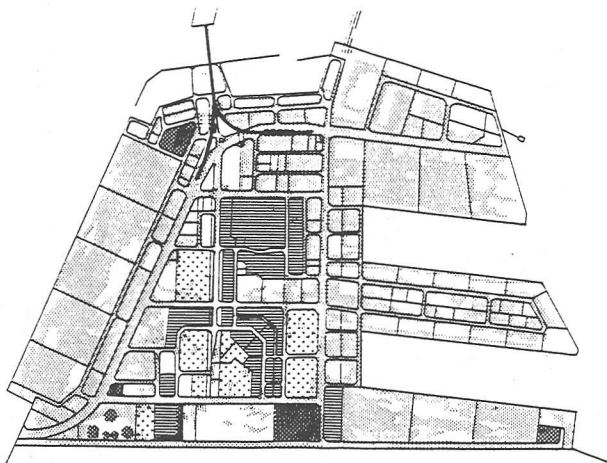


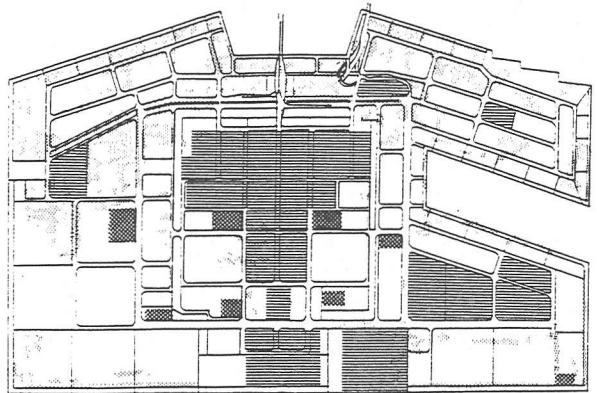
図-3 粒径加積曲線⁵⁾

凡例

- 噴砂・噴水発生箇所
- 無処理
- プレート工法
- サンドドレーン工法
- 振動締固め工法



(a) ポートアイランド



(b) 六甲アイランド

図-4 両島の地盤改良平面及び噴砂発生範囲⁷⁾

るRC工法が、細粒分の多い六甲アイランドでは振動及び圧入により締固めるSCP工法が用いられている。図-4に両島の地盤改良平面図⁷⁾を示す。同図には現地調査及び航空写真に基づく噴砂発生状況も示している。これより、プレロード工法が施工されている区域を除けば、地盤改良工法が施工されている区域ではほとんど噴砂、噴水等は生じていないといえる。また、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、六甲アイランドのほうがSDによる改良面積が大きく、全体の改良面積比率も若干多いことがわかる。

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%)		
SD工法	38 (8.7%)	SD工法	105 (18.1%)
RC工法	9 (2.1%)	SCP工法	6 (1.0%)
〈合計〉	71 (16.3%)	〈合計〉	121 (19.1%)

4. 相対沈下量測定結果

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域と非改良域で沈下量の測定を行った。沈下量の測定は、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として評価した。図-5に各地盤改良工法毎の相対沈下量の測定結果を示す。同図より非改良域では平均で40~50cm程度の相対沈下がみられるのに対し、SD改良域では平均で15~18cm、振動締固め改良域ではほぼ相対沈下なしという結果が得られ、振動締固め改良による液状化抑止効果が確認された。

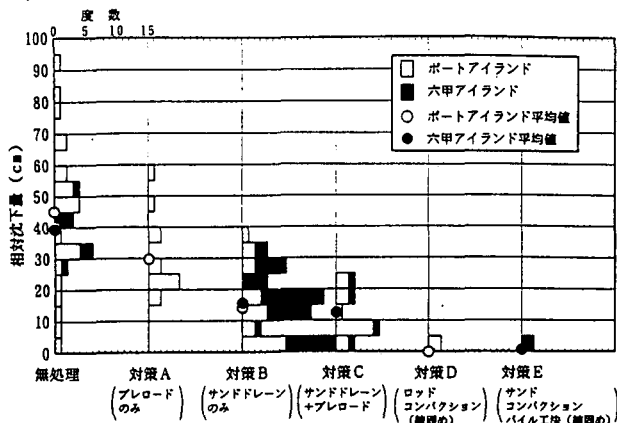


図-5 改良工法と沈下量の関係

5. N値の増加と沈下量の関係

表-2にポートアイランド、六甲アイランドで施工された各種地盤改良工法の置換率、改良前後のN値、N値の増加量(ΔN)を示す^{2), 8), 9), 10)}。SDによる増加N値は3.7~11.5と明らかに締固め効果が認められる。特にポートアイランドで10程度の増加N値がみられる箇所についてはドレン長が30~45mと長く、埋立土層中に礫が混入しており、一部鉋さいも堆積していたことから、ケーシングの貫入に多くの時間を要し、バイブルの振動により埋立層が締固まる¹¹⁾という副次的な効果があったものと考えられる。いずれにしても、SDの置換率 $a_s = 2 \sim 5\%$ 程度の圧入効果も締固めに寄与しており、非改良域と比較して、SD改良域が液状化程度が小さかった(噴砂、沈下等)ことに影響していると考えられる。図-6に置換率と増加N値の関係を示す。同図より、ポートアイランドではばらつきが大きいものの、全体としては置換率の増加とともにN値は増加する傾向にある。

表-2 各種地盤改良工法の改良効果

埋立地	工法	現場名	置換率 (%)	事前		事後		増加N値
				平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
ポートアイランド	SD	A	4.9	13.1	9.5	24.6	9.9	11.3
		B	2.5	13.7	6.7	23.3	12.7	9.6
		C	2.5	24.3	8.4	28.7	8.8	4.4
		D	1.9	21.0	7.0	26.4	8.4	5.4
		E	2.5	14.8	8.8	24.8	11.4	10.0
		F	3.4	14.8	8.1	18.5	9.5	3.7
		G	4.1	10.2	7.6	17.3	8.6	7.1
		H	2.6	7.9	5.5	11.9	7.7	4.0
	RC	I	4.2	16.5	6.3	23.6	7.2	7.1
		J	4.8	12.7	5.5	24.5	7.6	11.8
		K	8.7	13.1	9.5	21.0	8.5	7.9
		L	5.7	13.7	3.4	27.3	4.4	13.6
六甲アイランド	SD	M	4.2	8.0	3.3	21.4	6.8	13.4
		N	1.6	10.4	5.6	15.4	8.4	5.0
		O	3.1	10.4	4.8	16.6	9.9	6.2
	SCP	P	1.6	10.1	7.3	14.2	8.3	4.1
		Q	8.6	8.1	4.1	19.4	12.1	11.3
		R	4.3	8.1	4.1	15.8	9.8	7.7

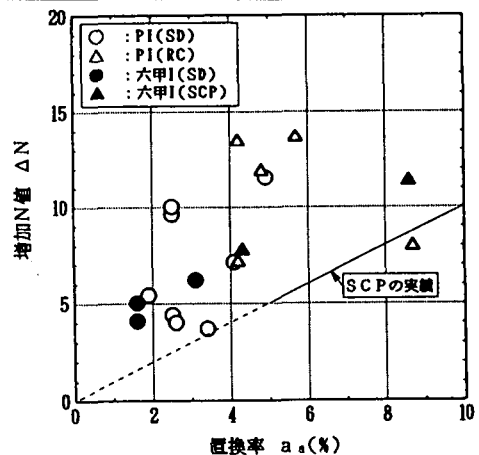


図-6 増加N値と改良率の関係

図-7には前述の相対沈下量測定結果に示した測定箇所の近傍に土質調査結果がある事例について、平均N値と相対沈下量の関係を示したものである。同図から平均N値の増加とともに相対沈下量は減少

していることがわかり、平均N値と相対沈下量には明らかに相関性が認められる。

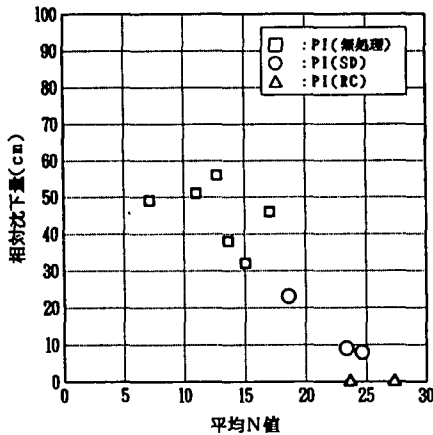


図-7 平均N値と相対沈下量の関係

6. まとめ

兵庫県南部地震における液状化の被害と地盤改良工法の効果について、ポートアイランド及び六甲アイランドでの既往文献調査、実測沈下量測定結果等から考察した結果、以下のようにまとめられる。

- ①地震後の沈下量測定結果より、ロッドコンパクション工法、サンドコンパクションパイル工法の液状化に対する有効性が確認された。
- ②サンドドレーン改良域では、振動による締め固め効果、圧入効果により埋立土のN値が増加し、液状化程度が低減された。
- ③地盤の平均N値と相対沈下量には明らかに相関性が認められた。

【参考文献】

- 1)谷本喜一：兵庫県南部地震の地盤災害，第30回土質工学研究発表会特別セッション，pp. 1~24, 1995年7月。
- 2)谷林和好・小堀隆治：埋立地に建つ高層団地における各種杭試験，基礎工，Vol. 9, No. 1, p. 100~110, 1981年1月。
- 3)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, pp. 83~91, 1981年1月。
- 4)松本良博・久保一・木村隆一郎：下水道管の基礎工，基礎工，Vol. 20, No. 5, pp. 65~72, 1992年5月。
- 5)石原研而・安田進・原田健二・新川直利：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関係，土木学会第50回年次学術講演会，pp. 1520~1521, 1995年9月。
- 6)安田進・小林利雄・野村博之・西川修：兵庫県南部地震による液状化地点での判定法の適用性，土木学会第50回年次学術講演会，pp. 528~529, 1995年9月。
- 7)Tanimoto, Kiishi : Keynote lecture " Damages to Reclaimed Lands and Performance of Improved Ground during South Hyogo Earthquake " , International Geotechnical Meeting, Kansai Branch of the Japanese Geotechnical Society, Nov. 17, 1995.
- 8)荒天義久・福住實・水畑耕治・小堀隆治：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結果報告，日本建築学会近畿支部研究報告集，1987年6月。
- 9)中島信・福井實・谷本喜一：新交通車両基地の基礎工，基礎工，Vol. 20, No. 5, pp. 73~79, 1992年5月。
- 10)棚橋秀光・内田直樹・福井實・川村政美：埋立地盤における各種杭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，pp. 229~232, 1987年6月。
- 11)池谷幹夫：サンドドレーン工法による地盤改良の施工例，下水道協会誌，Vol. 17, No. 190, pp. 30~39, 1980年3月。

Damage by Liquefaction and Effect of Soil Improvement Methods on the Hyogoken-Nanbu Earthquake

Hideo Tsuboi, Yoshiki Takahasi, Kenji Harada, Noatoshi Shinkawa, Kenji Ishihara, Susumu Yasuda

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake caused significant liquefaction on reclaimed land along the Osaka Bay. Liquefaction phenomena such as sand boil and ground subsidence were extensively observed on the two major artificial islands, Port Island and Rokko Island, located in Kobe Port area. Different kinds of soil improvement methods were applied on the two islands during the construction and the degree of damage due to liquefaction was significantly different between unimproved sites and improved sites, especially at the sites improved by compaction methods.

This paper compares the effectiveness of the soil improvement methods applied to the two islands based on the literature, the SPT data review and in-situ investigation of ground subsidence after the earthquake.