

神戸港六甲アイランド地区荷さばき地の地盤改良工法の選定について

元水 佑介*・池内 章夫**・清水 建一朗***

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

**前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 日本港湾コンサルタント (株) 西日本事業本部 技術一部 設計二課 課長

神戸港六甲アイランド地区 RC-7 荷さばき地の液状化対策において、既設構造物及び周辺住民への振動・騒音に配慮した最適な地盤改良工法の検討を行った。格子状のセメント固化による地盤改良を比較検討し、経済性や現地特性に見合ったエポコラム工法が安定性を照査した上で優位と判定された。

キーワード：地盤改良，液状化対策，FLIP，フューラット工法

1. はじめに

大型化するコンテナ船に対応し、国際海上コンテナ貨物輸送のコストを低減するため、六甲アイランド地区において国際海上コンテナターミナルの増深改良が進められている。現在、RC-6、7岸壁は、液状化対策としてSCP工法が採用され工事が進んでいる。RC-7の荷さばき地においては、既存構造物及び周辺住民への振動・騒音に配慮した最適な地盤改良工法を選定することが望まれており、SCP工法以外の工法で、経済性や施工性にも配慮した工法の検討を行った。

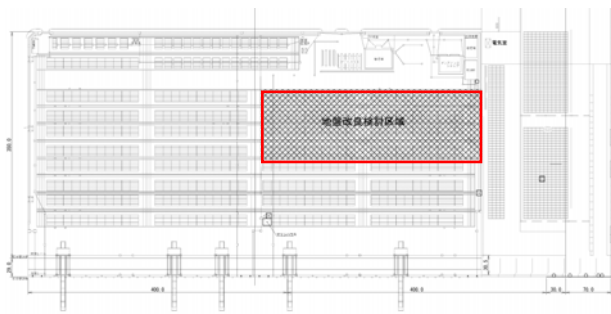


図-1 施工対象範囲

2. 設計条件の設定

2.1 要求性能

対象施設である荷さばき地は、国際コンテナ戦略港湾における高規格コンテナバースを担う施設であり、重要度が高いことから、地震後、速やか（短期間の後）にコンテナ貨物の荷役を可能とする性能が求められる。

そのため、荷さばき地の要求性能は以下のように設定した。

レベル2地震動作用後、速やか（短期間の後）にコン

テナ貨物の荷役を行うことができるように、コンテナ蔵置エリアの平坦性を確保する。ただし、沈下は許容する。

2.2 性能規定

対象施設は、前面の岸壁で荷上げされたコンテナ等を蔵置するエリアであり、コンテナは、岸壁からトランスファークレーン及びトレラシャーシなどの荷役機械によって運ばれる。

性能規定値は、これらの荷役機械の通行を確保する観点から、鉛直変位量および傾斜（荷役機械の走行可能勾配）を設定した。

○鉛直変位量：10cm 以内

○海陸レール段差（傾斜）：3～5% (RTG タイヤ間 22m × 3～5%=66～110cm)

2.3 対象地震動

対象地区の地震動は表-1 に示す通りである。既往の検討結果から、東南海・南海地震波および南海トラフ巨大地震波より、兵庫県南部地震再来波の方が変位が大きくなる傾向にあるため、兵庫県南部地震再来波を対象に検討する。ただし最終断面については東南海・南海地震波および南海トラフ巨大地震波についても検討を行う。

表-1 レベル1，レベル2時振動

項目	地震動	PSI 値
地震動	L1 ・神戸港③ (MAX114.73gal)	—
	L2 ・兵庫県南部地震再来波 ・東南海・南海地震波 ・南海トラフ巨大地震波	108.74 cm/s ^{1/2} 48.73 cm/s ^{1/2} 52.18 cm/s ^{1/2}

3. 液状化対策工の抽出

現況地盤における液状化判定結果および FLIP 解析結

果より、埋立土層 (Bg 層) で液状化が生じる可能性が示されており、性能規定を満足しない結果となったため、液状化対策を実施する必要があった。

液状化対策工法の抽出にあたっては、既設構造物および周辺住民への振動・騒音に配慮した工法とすることが前提条件となり、SCP 工法を除く 2 案を選定することとした。

一次選定の結果、振動・騒音に配慮した工法として、以下の 4 工法を抽出した。

- ・静的圧入締固め工法 (CPG 工法)
- ・高圧噴射攪拌工法
- ・機械攪拌工法
- ・薬液注入工法

抽出した 4 工法について、二次選定を行う。なお、機械攪拌工法については、先行掘削の有無によって 2 案を抽出することとした (CDM 工法, エポコラム工法)。

二次選定の結果、機械攪拌工法として、比較的経済性が高く先行掘削を必要としない“エポコラム工法”、経済性には劣るが施工性が高く、周辺への影響が少ない”高圧噴射攪拌工法”を選定した。

4. 安定性照査

前節において選定した“エポコラム工法”および“高圧噴射攪拌工法”について、静的・動的解析による安定性の照査を行った。なお、深層混合処理工法の改良パターンとして格子状改良がある。格子状改良は、格子間隔を広くとることができる場合、低コストでの施工が可能で、バースを利用しながら、または工事によるバースの占有面積を抑えながら施工が可能になるといった利点を有している。本検討では、エポコラム工法および高圧噴射攪拌工法ともに格子状改良とした液状化対策を想定している。

検討フローを図-2 に示す。

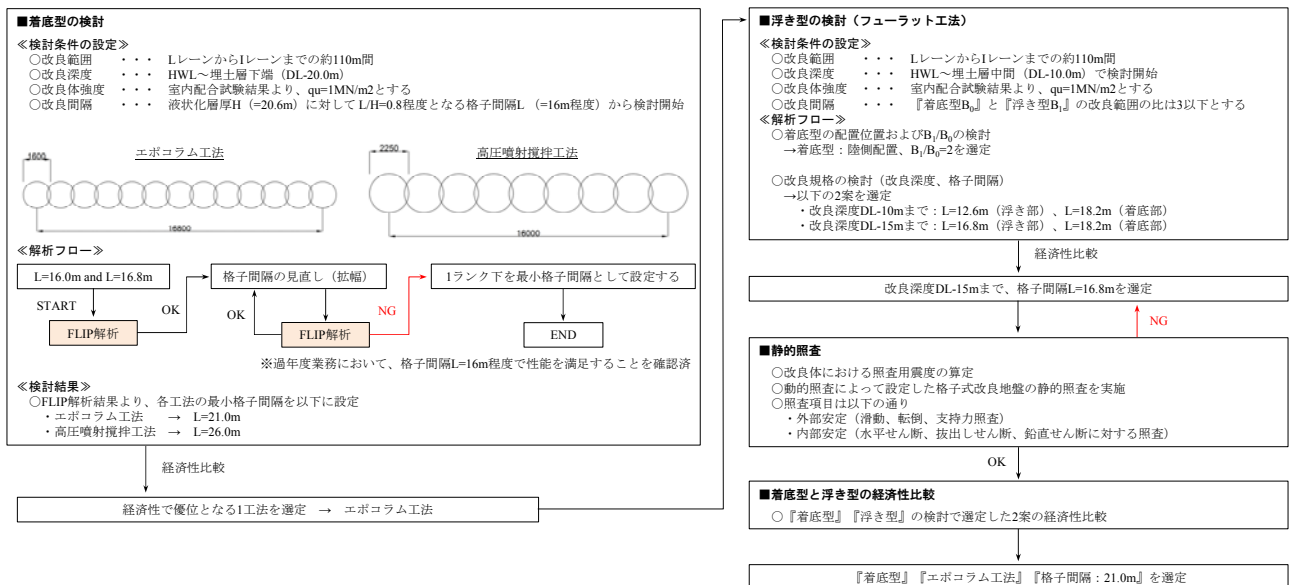


図-2 安定性照査の検討フロー

4.1 動的解析 (FLIP 解析)

(1) 着底型の検討

格子状改良範囲のモデル化は、既往文献を参考に、面外抵抗要素の間に格子内の液状化地盤を設定し、その液状化地盤の後ろに面内抵抗を貼り合わせ、3次元の格子形状を擬似的にモデル化した。図-3に格子状改良工法のモデル化のイメージを示す。

(2) 格子間隔

既往の実験結果から、(格子間隔) / (改良深さ) の値が 0.8 程度までの範囲において、格子壁内の未処理土の過剰間隙水圧の低減効果が確認されている。(L=16.0m 程度であれば性能規定を満足する)。

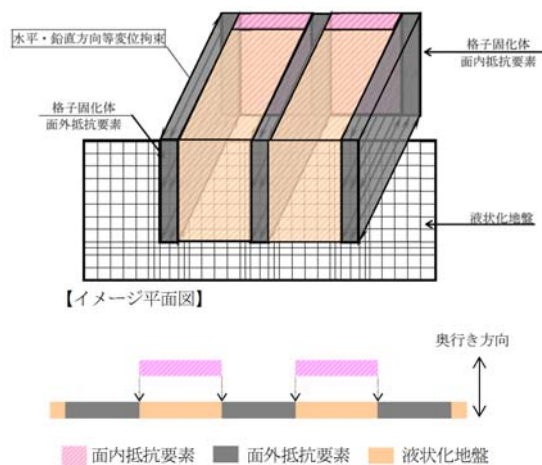


図-3 格子状改良工法のモデル化

本検討では、L=16.0m 程度から検討を行い、工法毎に性能規定を満足する最小格子間隔を選定する。

(3) 解析結果

解析結果を表-2 に示す。エポコラム工法は、格子間隔 L=22.4m で性能規定値を超える結果となったため、格子間隔 L=21.0m を最小改良ケースとして設定する。高圧噴射攪拌工法は、格子間隔 L=28.0m で性能規定値を超える結果となったため、格子間隔 L=26.0m を最小改良ケースとして設定する。

エポコラム工法と高圧噴射攪拌工法の概算工費を比較した場合、エポコラム工法が経済性で優位となるため、着底型の工法としてエポコラム工法（格子間隔 L=21.0m）を選定した。

表-2 解析結果一覧

(上：エポコラム工法，下：高圧噴射攪拌工法)

ケース	レーン別最大沈下量						排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)	判定	備考
	M	L	K	J	I	最大				
L=16.8m	3.6	4.6	4.1	3.6	3.2	4.6	0.0	4.6	OK	
L=19.6m	4.0	5.4	4.7	4.2	3.3	5.4	3.8	9.2	OK	
L=21.0m	3.8	5.2	5.2	4.6	3.2	5.2	3.8	9.0	OK	最小改良ケース
L=22.4m	4.7	6.7	5.4	4.2	2.8	6.7	3.8	10.5	NG	

ケース	レーン別最大沈下量						排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)	判定	備考
	M	L	K	J	I	最大				
L=16.0m	3.1	3.6	3.0	2.6	2.4	3.6	0.0	3.6	OK	
L=20.0m	3.3	4.1	3.9	3.5	2.9	4.1	0.0	4.1	OK	
L=24.0m	4.0	5.3	4.4	3.8	2.6	5.3	0.0	5.3	OK	
L=26.0m	3.8	5.3	4.9	4.2	2.9	5.3	3.8	9.1	OK	最小改良ケース
L=28.0m	4.7	6.5	5.3	4.4	3.0	6.4	3.8	10.2	NG	

4.2 浮き型（フューラット工法）の検討

浮き型の検討ケースとしては、着底型で優位となったエポコラム工法を対象として検討する。

浮き型格子式改良地盤のモデル化、格子間隔は着底型と同じとする。

浮き型改良体のみでは改良体下部過剰間隙水圧比の抑制効果が小さいことが数値解析により確認されているため、浮き型に隣接して着底型改良を設置することを原則としている。なお、浮き型改良体と着底型改良体は剛結しない。

着底型格子壁体幅 B0 と浮き型格子壁体幅 B1 の比については、参考文献より、 $B1/B0 \leq 3$ とすることで過剰間隙水圧比を 0.5 程度に抑えられることが確認されている (L1 地震動)。¹⁾ B0, B1 のイメージ図を図-4 に示す。

エポコラム工法による浮き型（フューラット工法）の格子式改良地盤の検討の流れは、以下の通りである。

- ①着底部の配置位置の検討（海側，両側，陸側）
- ②B1/B0 の検討 (B1/B0= 1, 2, 3)
- ③改良深度の検討（浮き部）(DL-10m, -15m)

着底部を海側配置とした場合、B1/B0= 1 としたケースにおいても浮き部下端の過剰間隙水圧の上昇が抑制

できない結果となったため、液状化対策工法としての効果が小さく、海側配置は非選定とする。

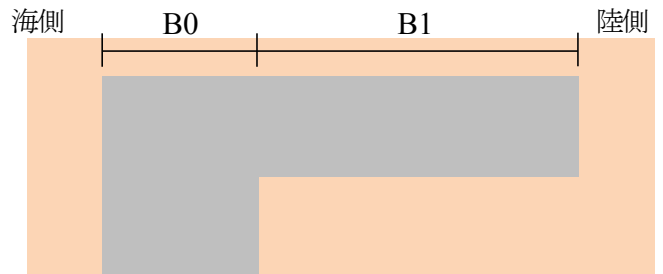
着底部を両側配置とした場合、液状化対策工法としての効果が最も高い結果となったが、着底部の改良体本数が多くなり、経済性で劣ることが想定されるため非選定とする。

着底部を陸側配置とした場合、B1/B0= 1 としたケースは、着底型の改良体本数が多くなり、経済性で劣ることが想定されるため非選定とする。B1/B0=2 としたケースは、改良体本数、改良効果から最も最適な配置案となる。B1/B0= 3 としたケースは、B1/B0= 2 と着底部の改良体本数がほぼ同じであり、B1/B0= 2 のほうが過剰間隙水圧上昇の抑制効果が高いため非選定とする。

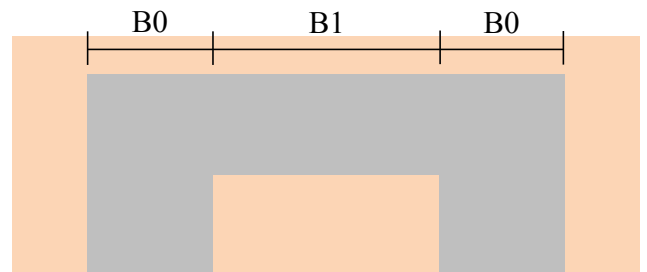
以上より、改良体本数、改良効果から最も最適な配置案となるのは、『陸側配置』『B1/B0= 2』であると考え

る。『陸側配置』『B1/B0= 2』を基準に、改良深度 2 ケース (DL-10m, -15m) について、性能規定を満足する改良率（浮き部の格子間隔）を検討する。

FLIP 解析を行った結果、DL-10m までは、格子間隔 L=12.6m を最小改良ケースとし、DL-15m までは、格子間隔 L=16.8m を最小改良ケースとして設定する。その 2 ケースの経済性比較を行った結果、浮き型格子式改良地盤の最小改良ケースは、『陸側配置』『B1/B0= 2』『改良深度 15m』『格子間隔 L=16.8m (浮き部), L=18.2m (着底部)』とする。



着底型を片側に配置したケース



着底型を両側に配置したケース

図-4 B0, B1 のイメージ図

4.3 静的解析

これまでの検討において、着底型と浮き型（フューラット工法）格子式改良地盤の 2 案の最小改良ケースを検討した。なお、改良工法については、経済性で優

位となるエポコラム工法とする。

- ・着底型：L=21.0m
- ・浮き型：B1/B0=2, 改良深度 15m, 格子間隔L=16.8m (浮き部), L=18.2m (着底部)

選定した上記2案について、レベル1地震動に関する変動状態を対象として改良体の外部安定および内部安定照査を実施するとともに、レベル2地震動についてFLIP解析を実施した。

5. 液状化対策工の選定

埋立土層の液状化対策工法として、性能規定を満足する格子式改良地盤の着底型、浮き型について検討を行った。各対策工法の検討結果を表-3に示す。

比較検討の結果より、経済性で最も優れるエポコ

ラム工法による着底型の格子式改良地盤を液状化対策工法として優位と判定した。

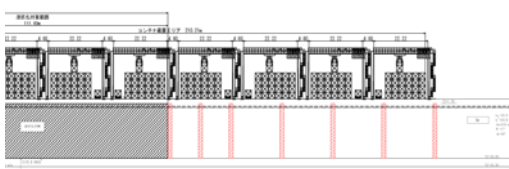
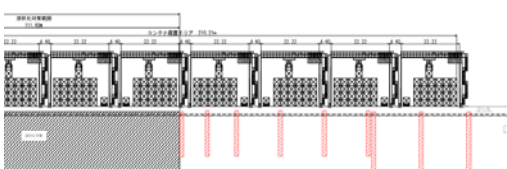
謝辞

本稿は、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾事務所事務所発注の神戸港六甲アイランド地区地盤改良検討業務の成果をまとめたものである。検討にあたっては、関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人 港湾空港技術研究所他, 浮き型格子式液状化対策工法 (フューラット工法) 技術マニュアル (案), 平成26年10月

表-3 検討結果

改良型式	着底型 (エポコラム工法)		浮き型 (改良深度 DL-15m)																																																																														
検討断面																																																																																	
工法概要	<ul style="list-style-type: none"> ・エポコラム工法による格子式改良地盤 ・埋立土層下端 (DL-20m) まで改良 ・格子間隔 L=21.0m 		<ul style="list-style-type: none"> ・エポコラム工法による格子式改良地盤 ・改良深度 DL-15m まで ・B1/B0=2 ・格子間隔 L=16.8m (浮き部)、L=18.2m (着底部) 																																																																														
検討結果	動的解析		動的解析																																																																														
	<p>○沈下量の評価</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">レーン別最大沈下量 (cm)</th> <th rowspan="2">排水沈下量 (cm)</th> <th rowspan="2">総沈下量 (cm)</th> </tr> <tr> <th>M</th> <th>L</th> <th>K</th> <th>J</th> <th>I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.8</td> <td>5.2</td> <td>5.2</td> <td>4.6</td> <td>3.2</td> <td>3.8</td> <td>9.0</td> </tr> </tbody> </table>		レーン別最大沈下量 (cm)					排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)	M	L	K	J	I	3.8	5.2	5.2	4.6	3.2	3.8	9.0	<p>○沈下量の評価</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">レーン別最大沈下量 (cm)</th> <th rowspan="2">排水沈下量 (cm)</th> <th rowspan="2">総沈下量 (cm)</th> </tr> <tr> <th>M</th> <th>L</th> <th>K</th> <th>J</th> <th>I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.5</td> <td>5.4</td> <td>5.2</td> <td>4.8</td> <td>3.3</td> <td>3.8</td> <td>9.2</td> </tr> </tbody> </table>		レーン別最大沈下量 (cm)					排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)	M	L	K	J	I	4.5	5.4	5.2	4.8	3.3	3.8	9.2																																							
レーン別最大沈下量 (cm)					排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)																																																																											
M	L	K	J	I																																																																													
3.8	5.2	5.2	4.6	3.2	3.8	9.0																																																																											
レーン別最大沈下量 (cm)					排水沈下量 (cm)	総沈下量 (cm)																																																																											
M	L	K	J	I																																																																													
4.5	5.4	5.2	4.8	3.3	3.8	9.2																																																																											
		静的解析		静的解析																																																																													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>検討状態</th> <th colspan="3">レベル1地震動による変動状態</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">外部安定</td> <td>滑動</td> <td>28,336</td> <td>≥ 6,348</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>転倒</td> <td>1,795,277</td> <td>≥ 59,762</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">支持力</td> <td>595</td> <td>≥ 226</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>595</td> <td>≥ 226</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">内部安定</td> <td>端子圧</td> <td>800</td> <td>≥ 97</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>水平せん断</td> <td>400</td> <td>≥ 5</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>拔出しせん断</td> <td>400</td> <td>≥ 0</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>鉛直せん断</td> <td>400</td> <td>≥ 0</td> <td>OK</td> </tr> </tbody> </table>		検討状態	レベル1地震動による変動状態				外部安定	滑動	28,336	≥ 6,348	OK	転倒	1,795,277	≥ 59,762	OK	支持力	595	≥ 226	OK	595	≥ 226	OK	内部安定	端子圧	800	≥ 97	OK	水平せん断	400	≥ 5	OK	拔出しせん断	400	≥ 0	OK	鉛直せん断	400	≥ 0	OK	<table border="1"> <thead> <tr> <th>検討状態</th> <th colspan="3">レベル1地震動による変動状態</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">外部安定</td> <td>滑動</td> <td>18,154</td> <td>≥ 3,787</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>転倒</td> <td>644,841</td> <td>≥ 27,833</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">支持力</td> <td>823</td> <td>≥ 177</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>823</td> <td>≥ 177</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">内部安定</td> <td>端子圧</td> <td>800</td> <td>≥ 73</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>水平せん断</td> <td>400</td> <td>≥ 1</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>拔出しせん断</td> <td>400</td> <td>≥ 0</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>鉛直せん断</td> <td>400</td> <td>≥ 0</td> <td>OK</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">※浮き部の検討結果</p>		検討状態	レベル1地震動による変動状態				外部安定	滑動	18,154	≥ 3,787	OK	転倒	644,841	≥ 27,833	OK	支持力	823	≥ 177	OK	823	≥ 177	OK	内部安定	端子圧	800	≥ 73	OK	水平せん断	400	≥ 1	OK	拔出しせん断	400	≥ 0	OK	鉛直せん断	400	≥ 0	OK
検討状態	レベル1地震動による変動状態																																																																																
外部安定	滑動	28,336	≥ 6,348	OK																																																																													
	転倒	1,795,277	≥ 59,762	OK																																																																													
	支持力	595	≥ 226	OK																																																																													
595		≥ 226	OK																																																																														
内部安定	端子圧	800	≥ 97	OK																																																																													
	水平せん断	400	≥ 5	OK																																																																													
	拔出しせん断	400	≥ 0	OK																																																																													
	鉛直せん断	400	≥ 0	OK																																																																													
検討状態	レベル1地震動による変動状態																																																																																
外部安定	滑動	18,154	≥ 3,787	OK																																																																													
	転倒	644,841	≥ 27,833	OK																																																																													
	支持力	823	≥ 177	OK																																																																													
823		≥ 177	OK																																																																														
内部安定	端子圧	800	≥ 73	OK																																																																													
	水平せん断	400	≥ 1	OK																																																																													
	拔出しせん断	400	≥ 0	OK																																																																													
	鉛直せん断	400	≥ 0	OK																																																																													
概算工事費 (割合)	改良体本数：3,046本 1.00		改良体本数：3,790本 (うち着底部 1,278本、浮き部 2,512本) 1.15																																																																														
総合評価	◎		○																																																																														