

滑走路及び誘導路における液状化対策範囲について

浮田洋一*・志賀正夫**・諸星一信***・所雅弘****

* 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 所長

**** 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 設計室 係長

東京国際空港の滑走路及び誘導路の締固め工法による液状化対策の検討において、地震時の変形照査手法として用いた FEM 解析 (FLIP, FLIPDIS) 手法の適用性及び改良範囲について検討した。

キーワード: FEM 解析 (FLIP, FLIPDIS), 過剰間隙水圧比

1. はじめに

近年、地震等による災害が各地で頻発しており、各空港において、空港の地震対策が求められている。東京国際空港においても、耐震整備計画 (案) に基づいて滑走路及び誘導路等に対し、締固め工法であるコンパクショングラウチング工法やサンドコンパクションパイル工法等により、液状化対策が順次実施されている。

本稿は、上述の締固め工法による改良範囲を建設費縮減の観点から縮小することが可能であるかどうかを検討するための変形照査手法の適用性を検討した結果及び改良範囲の設計法について報告するものである。

2. 現行の改良範囲の設計法について

これまでの東京国際空港の滑走路や誘導路等における液状化対策 (締固め工法) では、如何なる地盤、構造物、地震動に対しても、改良地盤と非改良地盤の境界面に対し 30° をなす平面で囲まれる範囲を余改良範囲とし、改良範囲を設定してきた (図-1 参照)。これは、既往文献¹⁾における下記の考えに基づいたものである。

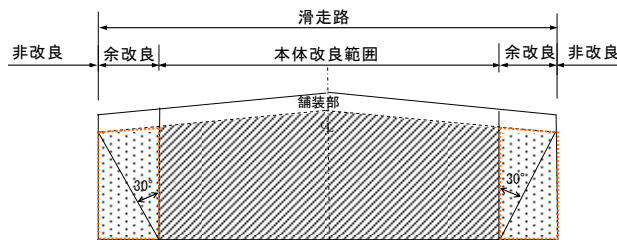


図-1 現行設計模式図

- ・既往の振動台実験²⁾によれば、改良地盤と非改良地盤の境界面に対し 30° をなす平面で囲まれる範囲では、過剰間隙水圧比が 0.5 以上となる。
- ・過剰間隙水圧比が 0.5 以上の範囲では、地盤のひずみが大きく、設計において過剰間隙水圧の影響を考慮する必要がある。

3. 照査項目の設定

対象構造物は滑走路及び誘導路とし、過去の地震による滑走路及び誘導路の被災事例より舗装体の破壊形態を以下のとおり想定した (図-2 参照)。

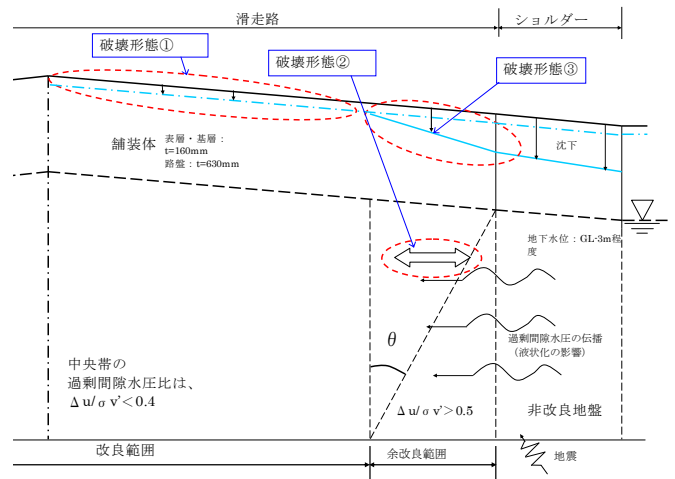


図-2 想定される舗装体の破壊形態図

- 破壊形態①: 地震中 (非排水状態) 及び地震後の過剰間隙水圧消散に伴う沈下。
- 破壊形態②: 隣接する非改良地盤からの過剰間隙水圧伝播による軟化及び振動性状の影響により締固め端部の安定性の低下。
- 破壊形態③: 隣接する非改良地盤から伝播した過剰間隙水圧の消散に伴う沈下及び隣接する非改良地盤の沈下に伴う引き込み沈下。

上述した破壊形態に基づき、照査項目は、空港土木施設の耐震設計指針 (案)³⁾ から、舗装表面の沈下量及び勾配に着目することとした。

4. 非改良地盤における改良効果

東京国際空港では、締固め工法による試験施工の結果より、非改良地盤における改良部との隣接部 (以下地盤

改良隣接域)に地盤変位が確認されている。これより、地盤改良隣接域にも改良効果が及んでいる可能性が考えられ、同効果の有無を確認するための土質調査及び検討を行った。

既往の改良地盤に対する土質調査より、等価N値や土圧係数(以下K値)等を整理した結果、地盤の細粒分含有率が低くなるに従い、地盤改良隣接域で改良効果が比較的良く生じている傾向が見られた。

5. 解析手法の検証

地震時の動的解析は、有効応力解析プログラム FLIP (Finite element analysis program for Liquefaction Process)、地震後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下や変形などの解析には応力・浸透を連成したBiotの多次元圧密方程式を組み込んだ有限要素法を用いた解析プログラム FLIPDISを使用した。

加振に伴う締固め領域や緩詰め領域の境界付近の現象把握及び変形照査手法の検証を目的とした土槽実験のシミュレーションを行い、解析値と実験値の比較により解析手法の適用性を検証した。

解析は、主に以下の3点に着目してシミュレーションを実施した。

- ①地震時及び地震後における過剰間隙水圧比。
- ②地震後の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量。
- ③緩衝領域(図-3参照)の有無における実験結果。

5.1 土層実験の概要

実験に用いた土槽は鋼製土槽で、2つの異なる模型地盤を同時に加振した。模型地盤は、締固め領域と緩詰め領域を設けたケース1と、4章で述べたように地盤改良隣接域に改良効果が及んだ場合として緩衝領域を設けたケース2(図-3参照)の2ケースとした。なお、入力波は正弦波(周波数3Hz、波数20波)とし、最大加速度50gal、100gal、200gal、300galを段階的に与えた。

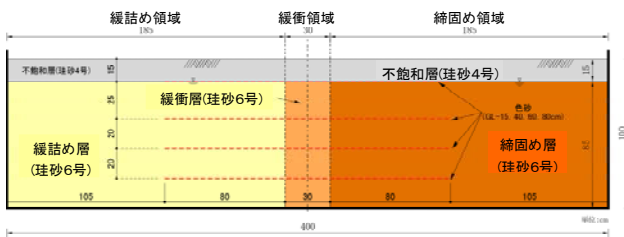


図-3 土槽実験模型地盤図(ケース2, 緩衝領域有り)

5.2 FLIPによる解析結果

解析ケースとして、入力地震動は正弦波(周期3Hz、波数20波、最大加速度振幅300Gal)とし、土槽実験で作成した土槽モデルの土質特性に基づき解析モデル及び解析定数を設定した(図-4, 5参照)。

○ケース1(緩衝領域無し) P~: 過剰間隙水圧測点 寸法単位: mm : 水位

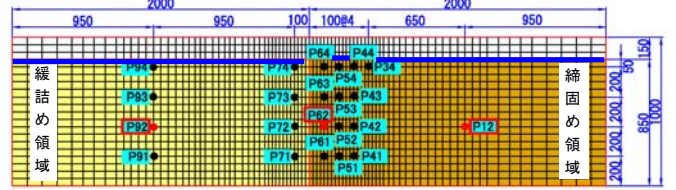


図-4 解析モデル図(ケース1, 緩衝領域無し)

○ケース2(緩衝領域有り) P~: 過剰間隙水圧測点 寸法単位: mm : 水位

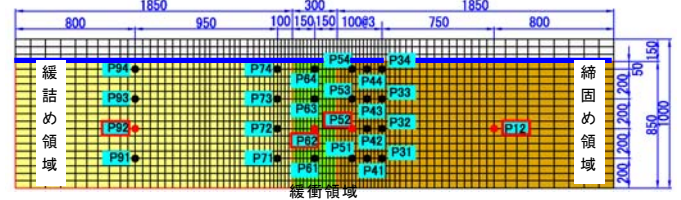


図-5 解析モデル図(ケース2, 緩衝領域有り)

入力地震動による応答加速度は、実験値と解析値で概ね同様の結果を得た。

図-6に加振完了時の過剰間隙水圧比の断面分布図を示す。解析値は、緩詰め領域と緩衝領域の実験値は0.8~1.0程度であり、また、締固め領域の実験値は0.5~0.9程度で実験値と同様な傾向にある。

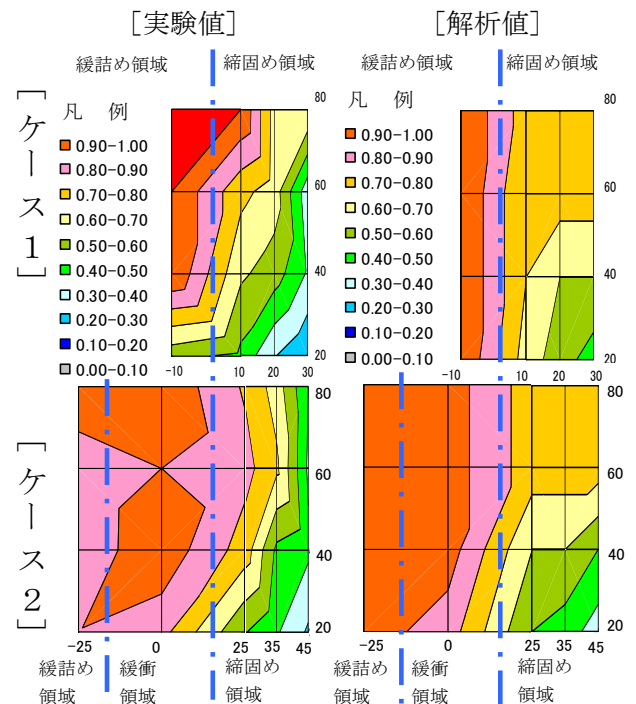


図-6 過剰間隙水圧比の断面分布図(加振完了時)

図-7に過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。締固め領域の一部でサイクリックモビリティに伴う水圧の回復量が異なるが、境界部付近及び緩詰め領域の解析結果は実験値と定量的に同様な結果が得られた。

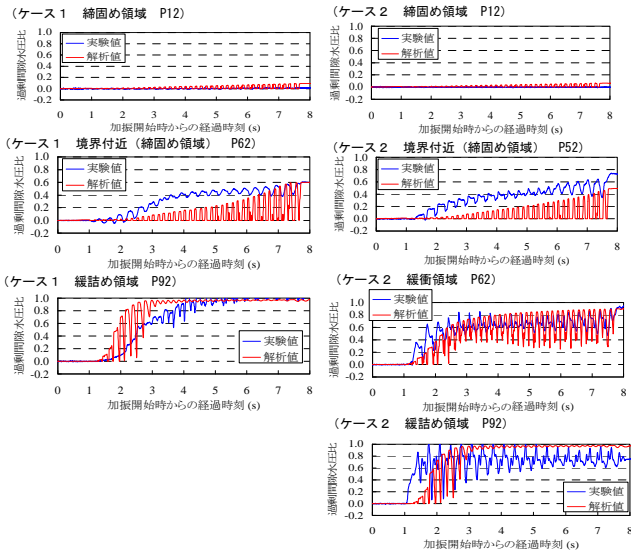


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴図 (加振中)

5.3 FLIPDISによる解析結果

図-8に加振後の過剰間隙水圧比の経時変化を示す。各領域とも実験値と概ね良い対応を示した。また、図-9に加振後の沈下量の解析結果を示す。実験結果には幾分のバラツキがあるものの、締固め領域及び緩詰め領域の沈下量の絶対値や境界付近の不同沈下について、解析値は実験値を良く再現している。

以上より、同解析手法は締固め工法の改良域境界部付近の検討に対して有用であることが明らかとなった。

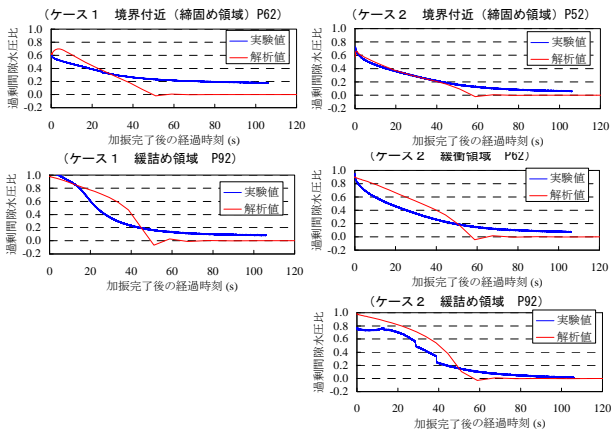


図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴 (加振完了時)

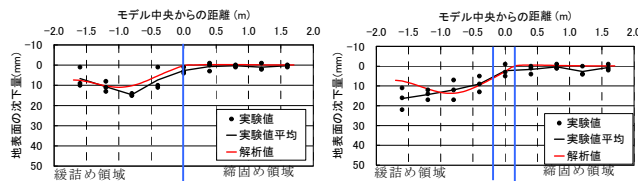


図-9 地表面沈下量の水平分布図 (加振完了時)

6. 実地盤におけるFEM解析について

上記の解析手法により、東京国際空港の既往の改良地盤における地震時の過剰間隙水圧の発生状況、地震後の

過剰間隙水圧の伝播、消散及びそれに伴う変形量の検討を行った。なお入力地震波形は、八戸波のレベル2地震動とした。解析モデル及び解析結果について以下に示す。

6.1 解析モデル及び解析定数

解析モデル及び解析定数は、土質調査結果に基づき図-10、表-1のとおり設定した。

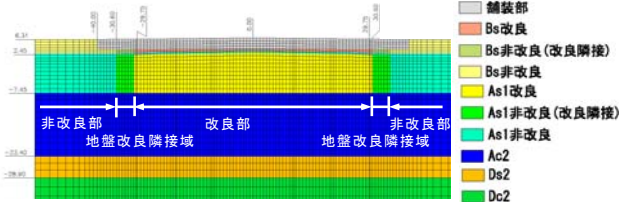


図-10 解析モデル図

表-1 解析定数一覧表

等値N値	舗装部		Bs			As1			Ac2	Ds2	Dc2	
	改良部	非改良部 (地盤改良隣接域)	改良部	非改良部	非改良部	改良部	非改良部	非改良部				
	23~36	10	23	12	5~18	3~12	2~13	0~3	2~5(19)	1~3(23)		
せん断波速度	Vs	m/sec	150	170	165	155	185	165	155	140	280	210
初期せん断剛性	G ₀	kN/m ²	38,730	53,310	53,310	44,550	62,200	53,250	46,490	31,950	133,500	71,470
標準中実効排水係数	c _v		15.0	44.0	44.0	40.5	97.8	112.4	89.5	163.4	220.0	252.3
Gの拘束圧依存係数	m _v		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
初期体積弾性係数	K ₀	kN/m ²	103,048	141,841	141,841	118,533	165,494	141,681	123,695	85,035	355,201	190,159
Kの拘束圧依存係数	m _k		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ポアソン比	ν		0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
飽和度	S ₀		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角	φ _i	度	40.0	40.0	40.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0
最大減衰定数	h _{max}		0.24	0.24	0.24	0.24	0.20	0.22	0.24	0.20	0.24	0.20
密度	ρ	tN/m ³	20.0	18.0	18.0	18.0	19.6	19.5	19.0	18.0	19.0	18.0
間隙率	n		0.41	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.46	0.44	0.45	0.44
地盤水の体積弾性係数	K _w	kN/m ²	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06	2,24E+06
実積角	δ _s	度	-	-	-	28	28	28	-	-	-	-
液状化特性	SI		-	-	-	0.005	0.005	0.005	-	-	-	-
	WI		-	-	-	18.12	7.793	4.5	-	-	-	-
	PI		-	-	-	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-
	PI2		-	-	-	0.884	0.889	0.9	-	-	-	-
	CI		-	-	-	5.181	3.874	1.8	-	-	-	-
細粒分含有率	FC	%	-	-	-	41	41	41	-	-	-	-
等値N値	N ₆₀		-	-	-	11.5	7.5	8.7	-	-	-	-
等値N値 (細粒分補正値)	N ₆₀ /β		-	-	-	29.3	19.8	18.4	-	-	-	-
N値	N		-	-	-	15.3	10.1	8.4	-	-	-	-
有効土壌圧	σ _v	kN/m ²	-	-	-	121.8	121.0	115.6	-	-	-	-
透水係数	k	cm/s	-	-	-	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	-	-	-	-

レーラー減衰パラメータβ: 0.004

6.2 解析結果

1) 初期応力解析

初期応力解析では、改良部及び地盤改良隣接域のK値が調査結果と概ね同様となるように改良体に水平分布荷重を与えることで、初期応力状態を解析上で再現し、地盤改良隣接域の改良効果の有無を考慮することとした (図-11 参照)。

解析の結果、改良部のK値は改良後の調査結果 0.6~1.0 程度に対し、解析結果 0.6~0.9 程度となった。また、地盤改良隣接域のK値は改良後の調査結果 0.5~0.6 程度に対し、解析結果 0.5~0.6 程度となり、初期応力状態は良好に再現できている (図-12 参照)。

以上より、改良部及び地盤改良隣接域の改良効果を考慮した上で以下の解析を行った。

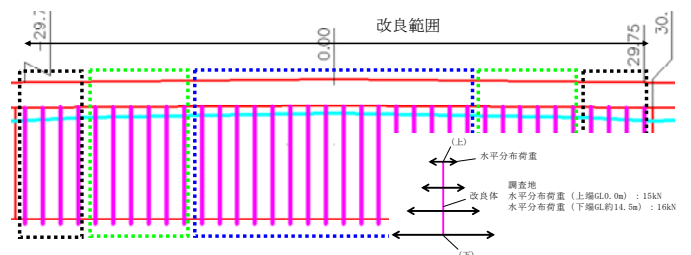


図-11 K値設定方法の概念図

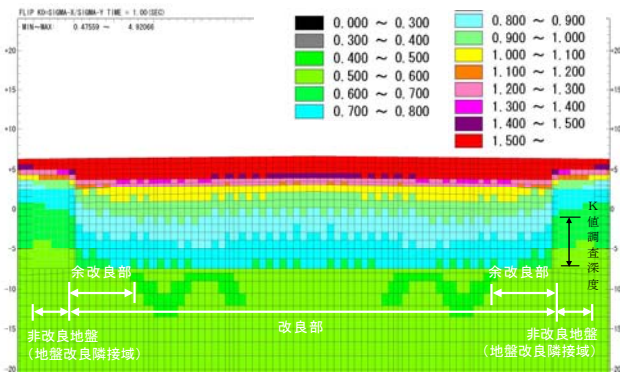


図-12 K値断面分布図 (加振前)

2) 地震時及び地震後の解析結果

FLIP 及び FLIPDIS による解析結果を以下に示す (図-13, 14, 15, 16 参照).

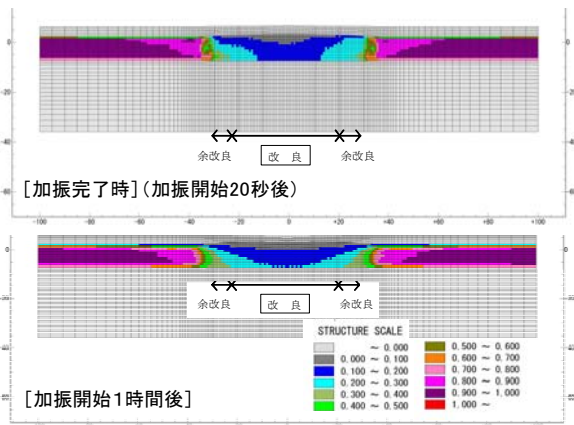


図-13 過剰間隙水圧比の分布図

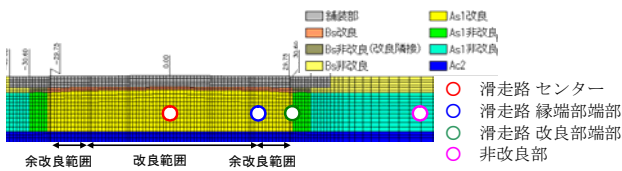


図-14 過剰間隙水圧比の経時変化図

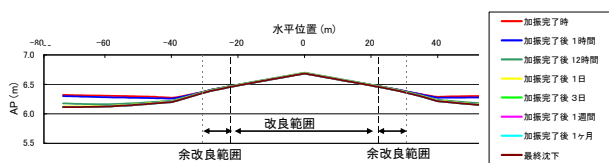


図-15 地表面沈下量の分布図

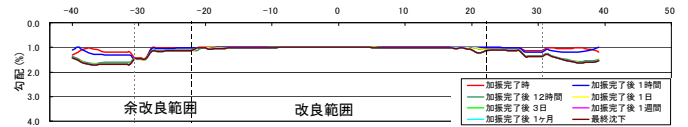


図-16 地表面勾配の水平分布図

これより、以下の傾向が見られた。

- 地震終了後の過剰間隙水圧比は、改良域内で 0.1~0.3 程度である。
- 改良端部での過剰間隙水圧比は 0.5 程度である。
- 時間とともに改良域内に非改良域からの過剰間隙水圧比の伝播が見られるものの、大きな水圧の上昇はない (水圧比で 0.1 程度)。
- 改良域内の過剰間隙水圧の消散は、地震終了後 12 時間を経過してから始まり、3 日後にほぼ完全に消散する。
- 地震終了直後の沈下はほとんど発生しない。沈下は、過剰間隙水圧の消散と共に発生し、非改良域で約 20cm 程度発生し、改良域内では 2cm 程度である。
- 改良域内の舗装勾配変化は、0.2%程度である。

3) まとめ

現行の耐震設計指針(案)の滑走路の許容変形量 (地表面勾配: 1.5%, 地表面沈下量 (シロダ) : 15cm) と上記の解析結果を対比すると軽微な変形量であった。このことから、現行設計の余改良範囲 30° を縮小しても滑走路及び誘導路の耐震性能を確保できる可能性があると考えられる。しかしながら、過剰間隙水圧に対する地盤支持力等の未解決事項もあり、今後とも調査を継続していく必要が考えられる。

7. おわりに

本稿は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所発注による「平成 18 年度東京国際空港液状化対策効果検討調査」での検討の一部を取りまとめたものである。

検討に際し、東京国際空港液状化対策効果検討調査検討会 (座長: 善 功 企 九州大学大学院工学研究院教授) の各メンバー及び関係各位から貴重なご意見、ご指導頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (財) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), pp. 230-231, 平成 9 年
- 2) 井合進・小泉勝彦・倉田栄一: 液状化対策としての地盤の締め固め範囲に関する基礎的検討, 港湾技術研究所, 港湾技術資料, No. 590, pp. 1-66, 1987.
- 3) 運輸省航空局: 空港土木施設の耐震設計指針 (案), 平成 12 年 3 月