

格子状改良を施した空港基本施設における 地震時の変形照査手法

佐伯 嘉隆¹・大矢 陽介²・小濱 英司³・佐藤 成⁴

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） 航空部（〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5）
E-mail:yoshitaka.saeki@ss.pacific.co.jp

²正会員 （独）港湾空港技術研究所 耐震構造研究チーム（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail:ooya-y@pari.go.jp

³正会員 （独）港湾空港技術研究所 耐震構造研究チーム（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail:kohama-e83ab@pari.go.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ（株） 構造部（〒163-6018 東京都新宿区西新宿6-8-1 住友不動産
新宿オークタワー）
E-mail:shigeru.satou@tk.pacific.co.jp

空港施設の実物大の液状化実験を対象として、格子状改良を施した地盤上のアスファルト舗装における地震時の変形照査手法を検討した。地震時の対策効果と舗装表面の変状について地震応答解析及び圧密解析により検討を行い、無対策地盤、薬液注入及び格子状改良を施した地盤について比較した。格子状改良の結果は薬液注入と同等の対策効果が確認でき、格子状改良においても地震応答解析及び圧密解析を用いて耐震性能を評価することが可能と判断できた。また、格子内地盤の過剰間隙水圧の上昇を完全に抑制しなくても、一定の沈下抑制効果を得られることがわかった。

Key Words : *liquefaction countermeasure, grid-type improvement, numerical analysis, chemical grouting method, asphalt pavement, runway*

1. はじめに

空港基本施設において、既設の滑走路や誘導路を液状化対策する場合、供用中であることから時間的・空間的な制約がある。また、地盤条件や経済性による制約も加わるため、選択できる液状化対策工法は限定的である。密度増大工法の一つであるサンドコンパクションパイル工法は大型機を導入するため、時間的または空間的な制約から適用できない。他の密度増大工法であるコンパクショングラウチング工法は機材が大型ではないものの、周辺地盤への変位を伴うため、土被りが薄い場合や排水管などの地下構造物を有する場合は選択が難しい。恒久薬液注入による固化工法であれば周辺地盤の変位は伴わないものの、細粒分が多い地盤には所定の薬液を注入することが難しくなるため、選択が困難となる。細粒分が多い地盤においても選択可能な工法としては、浅層から中層あるいは深層の混合処理工法のうち、改良率を低減させて固化体を格子状に配置する格子状改良が挙げられるが、他工法に比べて経済性に劣る。早急な液状化対策

工事を進める上で、種々の条件に対応可能である格子状改良による液状化対策工法の開発が必要と考えられている。

一方、性能設計法への移行により地震発生後の残留変形に着目されるようになった。港湾・空港の分野において耐震性能を評価する方法として有効応力解析コードFLIP¹⁾が広く用いられている。ただし、一般的に非排水条件において用いられているFLIPのマルチスプリングモデルでは、地震時の土骨格からの間隙水の流出入を無視した非排水条件を仮定するため、地震動により発生した過剰間隙水圧の消散に伴う体積収縮を考慮することができない。広く平坦な形状を呈している空港の滑走路や誘導路では、空港土木施設耐震設計要領²⁾によると地震後の平坦性の照査が必要となるため、過剰間隙水圧の消散に伴う体積収縮も残留変形に加えて照査する必要がある。このような過剰間隙水圧消散後の地盤の残留変形を評価する方法はいくつかあり、一つは室内試験結果から得られたチャート³⁾より液状化層の体積収縮量を評価する方法。もう一つは、過剰間隙水圧の消散による地盤の変形

を土水連成解析（以後、圧密解析と称する）より求める方法である。後者の方法を用いた解析事例として、密度増大工法であるサンドコンパクションパイル工法やコンパクショングラウチング工法⁴⁵⁾⁶⁾、薬液注入工法⁶⁾⁷⁾があるが、本研究の対象とする格子状改良について解析事例はない。

そこで本研究では、格子状改良による液状化対策を施した地盤上のアスファルト舗装を対象として、地震応答解析と圧密解析を組み合わせた変形照査を実施した。また、他の液状化対策を施した地盤と比較することで、格子状改良の効果を検証した。

2. 格子状改良の数値解析手法の現状

格子状改良を対象とした数値解析の事例として文献8)9)がある。格子状改良は三次元形状であるが、これらの文献では二次元有効応力解析（解析コードFLIP）により検討がされた。図-1に示すように、改良体の奥行き方向の改良率を考慮するため、剛性を低減させた改良体の面内壁と、未改良地盤の要素を重ね合わせ、面内壁と面外壁を結合して、格子状改良の三次元形状を疑似的に二次元で表現するモデル化方法が採用されている。この方法により面外壁の曲げが考慮された形となっている。

境界条件として、自重解析時には液状化層が改良体によら下がることで液状化層の初期応力を過小評価しないように、改良体と地盤の境界及びその直上において重複する節点を設け、重複節点について鉛直方向は自由に変位でき、水平方向は変位が等しくなるよう接合設定を行う。動的解析時には、水平・鉛直方向ともに変位が等しくなるよう接合設定する場合⁸⁾や、改良体と地盤の滑りを表現するために水平方向のみ接合設定する場合⁹⁾がある。ただし、これらは実験結果を対象として格子内あるいは格子外の過剰間隙水圧に着目した検証が行われているものの、変形は考慮されていない。地震後の平坦性を照査するには前述のとおり地震後には圧密解析が必要であり、圧密解析時において適切な境界条件の設定が必要である。

本論文では格子状改良を施した地盤上のアスファルト舗装を対象とした変形照査において、初期自重解析、地震応答解析及び圧密解析における適切な境界条件の設定方法を検討した。

3. 解析条件

(1) 対象地盤

2007年10月に石狩湾新港において空港施設の実物大の

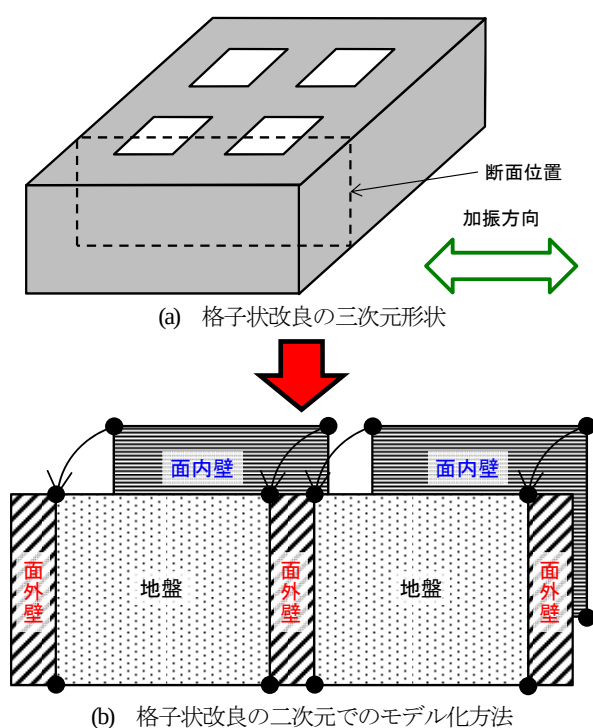


図-1 疑似三次元化手法

液状化実験⁹⁾が実施された。この実験では地盤中に装薬したエマルジョン系含水爆薬を用いて制御発破することにより地盤を液状化させている。このうち溶液型薬液注入工法の一つである浸透固化処理が施された地盤を本解析対象とした。この地盤は空港の滑走路を模擬したアスファルト舗装が施工されている。また、実験結果と検証した再現解析が実施されている。再現解析の詳細は文献7)を参照されたい。

対象地盤の平面図及び断面図を図-2に示す。深さ2.55m以浅が非液状化層、2.55m以深が液状化層であり、非液状化層と液状化層の境界に $\phi=1,000\text{mm}$ の管が埋設されている。改良厚はA改良は5.4m、B改良は3.6m、C改良は1.8mであり、埋設管以深の液状化地盤に対して対策が施されているため、浮き型改良のような形となっている。

(2) 解析手法

地震応答解析には二次元有効応力解析（解析コードはFLIP）を用い、砂層の液状化時の挙動を表現する構成モデルとしてマルチスプリングモデルを採用した。ただし前述のように非排水条件化におけるマルチスプリングモデルでは、地震により発生した過剰間隙水圧の消散に伴う体積収縮を評価することができない。そのため、過剰間隙水圧の消散に伴う体積収縮を評価するために地震応答解析の後に圧密解析を実施した。応力・浸透を連成したBiotの多次元圧密方程式を用いて解析することで、過剰間隙水圧の消散及びこれに伴う変形を予測するものである。なお、圧密解析には解析コードFLIPDIS¹⁰⁾を用いた。

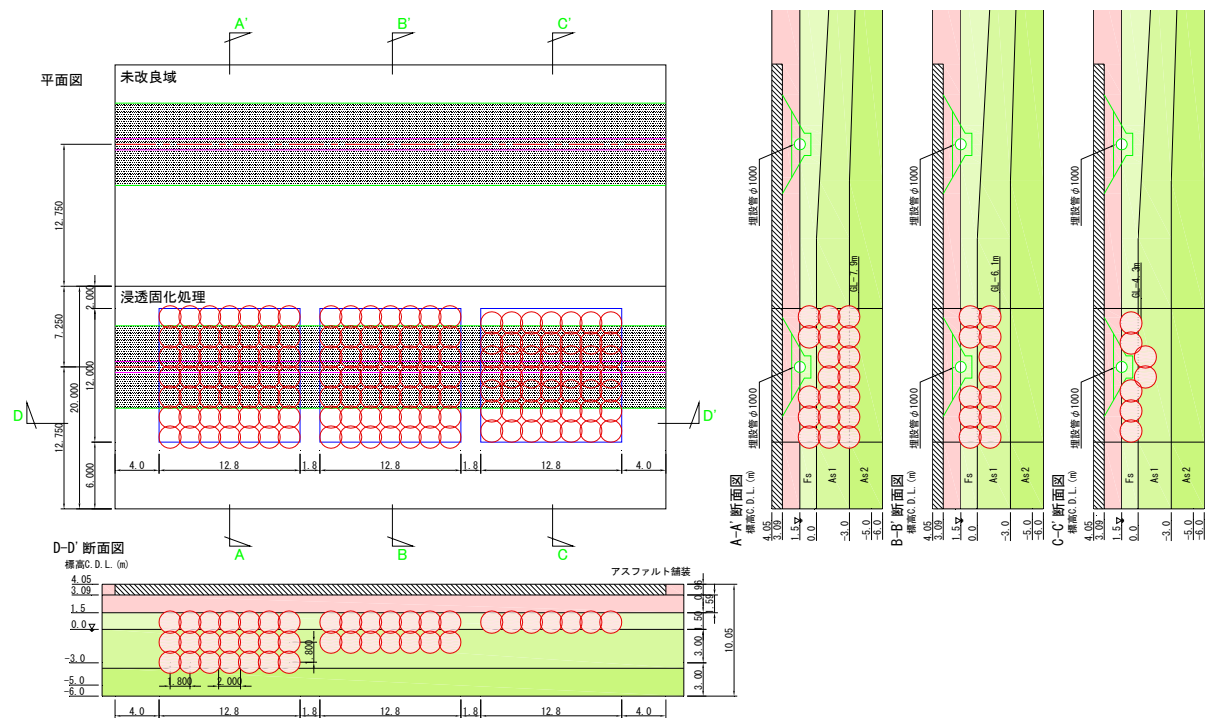


図-2 溶液型薬液注入工法（A～C改良）の概略施工平面図及び断面図

(3) 地盤条件

文献7)の薬液注入工法を施した地盤モデルを図-3に示す。As2の下面を工学的基盤としている。本研究では図-3に示す改良範囲と同じ範囲において、格子状改良を適用した場合の再現解析を実施した。解析モデルを図-4に示す。実験の再現性が確保された薬液注入工法と同じ範囲で格子状改良が行われた場合を想定した。改良体の壁

厚は実際に施工された仙台空港の格子状改良の事例¹¹⁾を参考に2mとした。B改良については中壁を設置し、標準的な格子間隔 ($L/H=0.8$) とした場合も検討した。Lは格子間隔であり、Hは改良層厚を示す。過剰間隙水圧の低減効果があるとされる間隔は $L/H=0.8$ （以後、標準間隔）以下¹²⁾である。各改良の詳細を表-1に示す。 α は面外方向の改良体に対する、面内方向の改良体の剛性低減率である⁹⁾。B改良の中壁なしのケースは、B改良の中壁あり

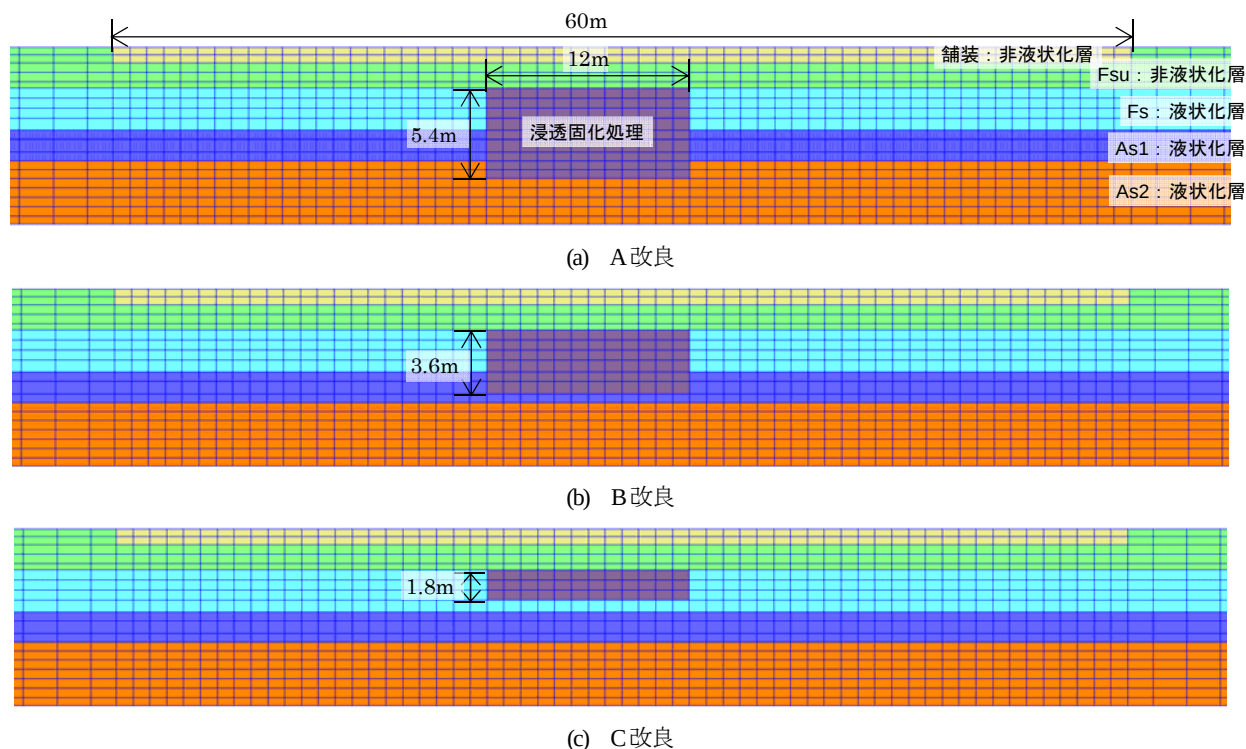


図-3 薬液注入の地盤モデル

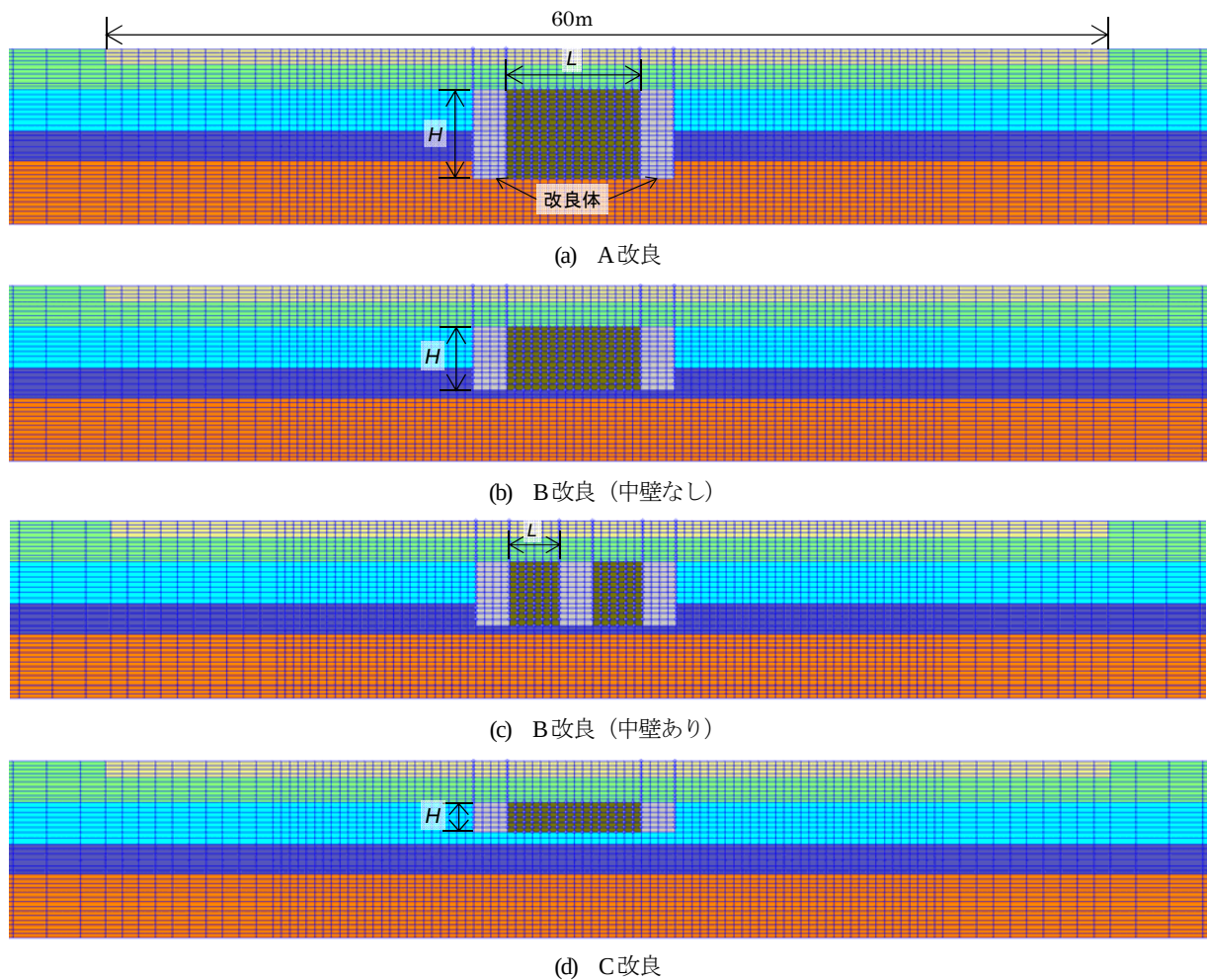


図-4 格子状改良の地盤モデル

表-1 各改良の詳細

	L	H	L/H	改良厚 $H(\text{m})$	剛性低減率 α
A改良	8	5.4	1.5	5.4	0.2
B改良 (中壁なし)	8	3.6	2.2	3.6	0.2
B改良 (中壁あり)	3	3.6	0.8		0.4
C改良	8	1.8	4.4	1.8	0.2

のケースに比べて、 L/H が2.7倍程度となっている。

過剰間隙水圧比の上昇程度を詳細に把握するため、改良部周辺のメッシュ間隔を薬液注入の地盤モデルのメッシュ間隔の1/2にした。解析に使用したパラメータを表-2に示す。解析パラメータは文献7)で用いたものと同じである。なお、地震応答解析では計算安定化のためにレーレー減衰剛性比例係数 β を採用し、地盤の1次固有周期(0.26秒)と減衰比を1%と仮定することで β の値を0.001とした。

(4) 境界条件

自重解析及び地震応答解析時の境界条件を図-5に示す。赤枠の改良体と地盤の境界及びその直上において多重節

点とした。自重解析時は水平方向のみを等変位拘束とし、地震応答解析時は水平・鉛直方向ともに等変位拘束とした。この方法は文献8)と同様である。圧密解析時の境界条件を図-6に示す。青枠のアスファルト舗装のみ水平・鉛直方向を等変位拘束とし、それより下部の赤枠は水平方向のみ等変位拘束とした。

アスファルト舗装には段差が生じずに変形し、それより下部は液状化層ができるだけ改良体にぶら下がらないように工夫してモデル化した。

(5) 入力加速度時刻歴

入力加速度時刻歴は文献7)と同様に圧密解析のための初期応力状態を求めることを目的に、周波数5Hz、加速度振幅100Gal、継続時間80秒間の正弦波を用いた。入力加速度時刻歴を図-7に示す。

4. 解析結果

(1) 最大過剰間隙水圧比

最大過剰間隙水圧比分布の比較を図-8～図-11に示す。

表-2 解析パラメータ

パラメータ		舗装	Fsu	Fs	As1	As2
動的変形特性	密度 ρ (g/cm ³)	2.1	1.7	1.8	1.8	1.8
	せん断波速度 V_s (m/s)	-	120	120	175	220
	基準拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	98	98	98	98	98
	せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	98,900	55,300	40,100	67,000	97,100
	体積弾性係数 K_{ma} (kN/m ²)	258,000	144,000	105,000	175,000	253,000
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	間隙率 n	0.41	0.53	0.53	0.53	0.53
	内部摩擦角 ϕ_f (deg)	40.0	38.0	37.8	39.0	40.2
	最大減衰定数 h_{max}	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	変相角 ϕ_p (deg)	-	-	28	28	28
液状化特性	w_1	-	-	2.0	1.8	6.5
	p_1	-	-	0.5	0.5	0.5
	p_2	-	-	1.100	0.963	0.900
	c_1	-	-	1.6	1.6	1.3
	S_1	-	-	0.005	0.005	0.005

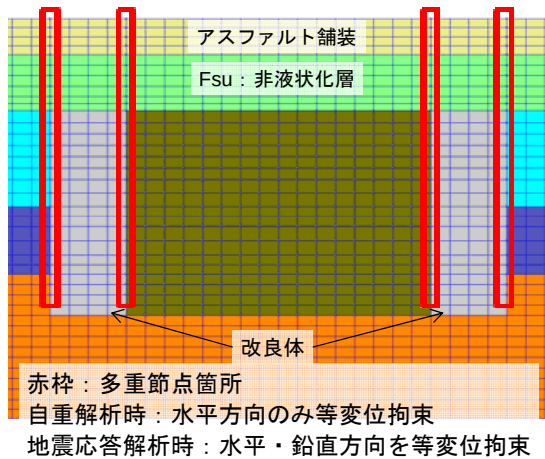


図-5 境界条件（自重解析，地震応答解析時）

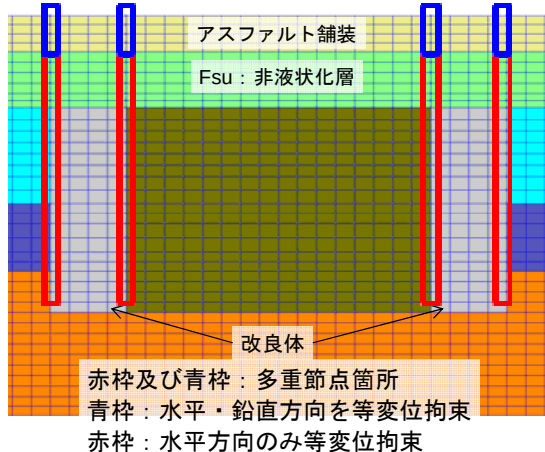
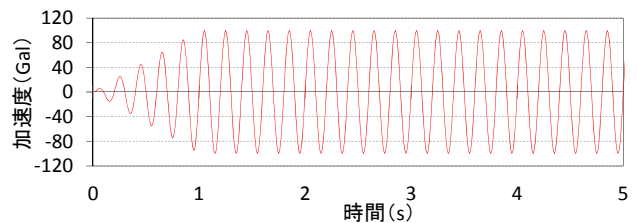


図-6 境界条件（圧密解析時）

過剰間隙水圧比は有効拘束圧を初期自重解析時の有効拘束圧で除した値を1から引いた値である。

無対策ではAs1の多くが0.5程度の上昇に留まっているものの、その他の地盤においては過剰間隙水圧は上昇し、地盤全体的では液状化していると思われる。次に格子内の過剰間隙水圧に着目する。A改良，B改良（中壁な



開始～5秒まで（全体は80秒）

図-7 解析に用いた入力加速度時刻歴

し），C改良においては中心部ではあまり上昇せず，中心部以外は上昇した結果となった。B改良（中壁あり）においては，格子内全域においてほとんど上昇しなかった。標準的な格子間隔では過剰間隙水圧はほとんど上昇せず，さらに広い格子間隔では過剰間隙水圧が上昇する既往の成果¹³⁾と同じ結果となった。格子外の過剰間隙水圧に着目すれば，A改良，B改良の改良体横地盤において，一部上昇しない箇所が見られた。薬液注入には同様の結果は見られない。改良体の剛性が周辺地盤に比べて大きい場合，格子外側においてもせん断変形抑制効果が現れた可能性が考えられる。なお，薬液注入，格子状改良とともにB改良，C改良下部の過剰間隙水圧の上昇が若干抑制された。

(2) 沈下量分布

無対策及びA～C改良の舗装範囲の沈下量分布を図-12に示す。黄緑の破線が改良範囲である。発破前の地表面は平坦であったため直線で示し，B改良については格子状改良の中壁がある場合とない場合の解析結果を併せて示した。

地震直後に着目した場合，A～C改良，薬液注入及び格子状改良の差はほとんどない。地震時の変形による沈下は小さいことがわかる。地表面が水平かつ水平成層地盤であり，地震応答解析が非排水条件下で行われている

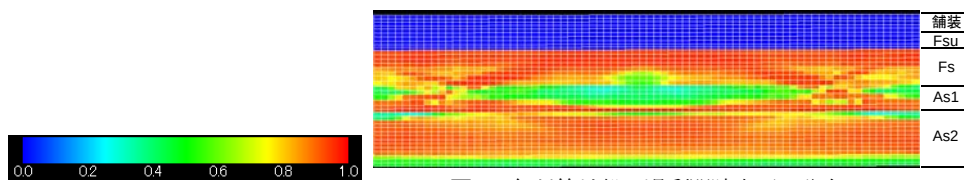


図-8 無対策地盤の過剰間隙水圧比分布

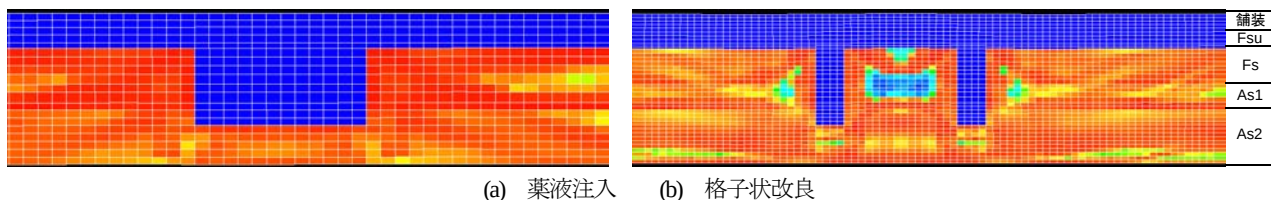


図-9 A改良の過剰間隙水圧比分布

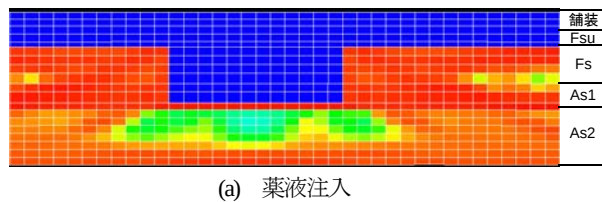


図-10 B改良の過剰間隙水圧比分布

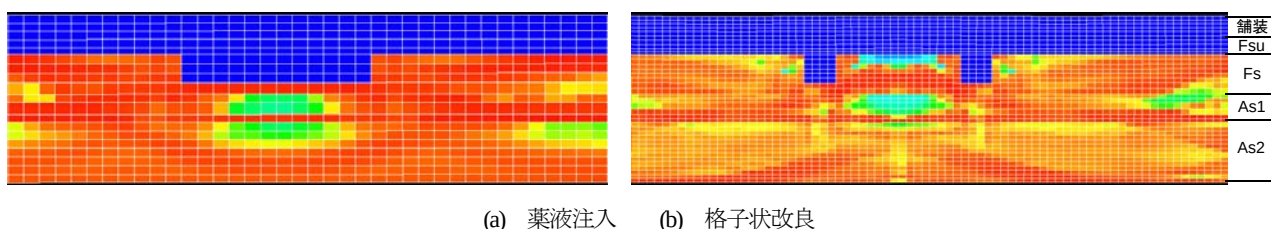


図-11 C改良の過剰間隙水圧比分布

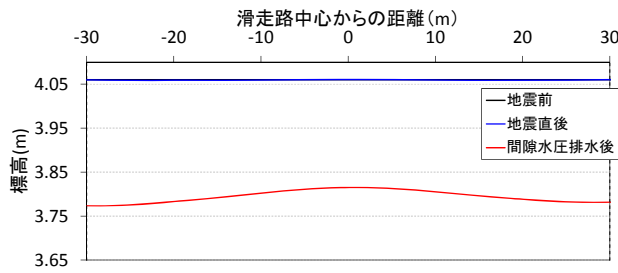
ため、地震時の残留沈下はほとんど発生しなかった。過剰間隙水圧消散後に着目すれば、滑走路中心において無対策の場合で25cm、A改良で10cm、B改良で15～20cm、C改良で30cm程度の沈下が見られた。A改良、B改良では沈下抑制効果が見られたが、C改良では沈下抑制効果が見られなかった。

工法ごとに比較すれば、A～C改良において薬液注入と格子状改良で大きな差はない。しかし、薬液注入よりも格子状改良（B改良の中壁ありは除く）のほうが若干沈下量が多い。これは格子内地盤の過剰間隙水圧消散によるものと判断できる。ただし、B改良の薬液注入と中壁ありの格子状改良を比較すると、両者とも改良体内の水圧は上昇しておらず、格子状改良のほうが沈下量が小さい結果となった。これは格子状改良脇の地盤において、一部の水圧が上昇していないことにより薬液注入よりも沈下が抑制された可能性がある。なお、舗装端部周辺においては、無対策では27cm程度であるのに対し、A

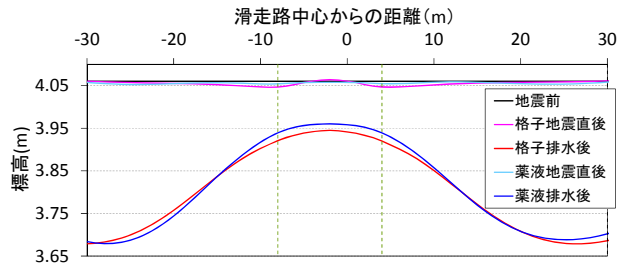
～C改良では35cm程度であり、地盤改良したほうが沈下が大きくなる傾向が見られた。これは格子状改良全体の剛性が周辺地盤よりも大きく、その剛性差により周辺地盤の過剰間隙水圧が上昇し、無対策より沈下した可能性がある。

格子状改良のB改良の中壁ありと中壁なしに着目すれば、L/Hの中壁ありに対する中壁なし（標準間隔に対する幅広間隔）は2.7倍程度であるものの、沈下量は20cm程度に対する16cm程度であるため、1.2倍程度の沈下に留まっている。

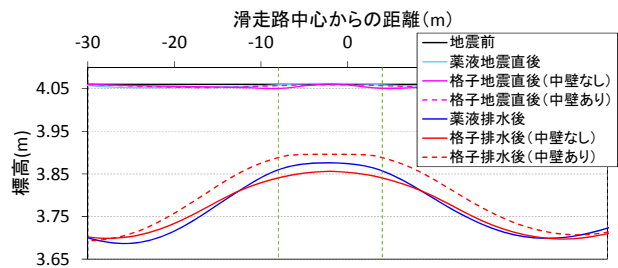
薬液注入と同じように過剰間隙水圧の発生を抑制する効果が格子状改良のB改良で達成でき、両者の沈下量も同程度となった。本論文で提案した境界条件の設定により、格子状改良による過剰間隙水圧の抑制、改良地盤直上のアスファルト舗装の変形抑制の効果を表現でき、これらの効果は薬液注入と同程度であることがわかった。



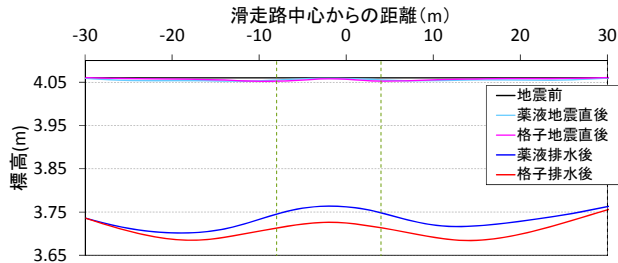
(a) 無対策



(b) A改良

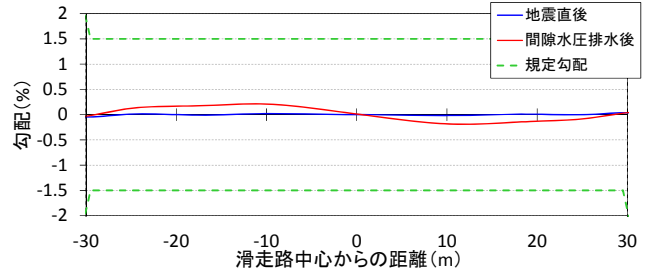


(c) B改良

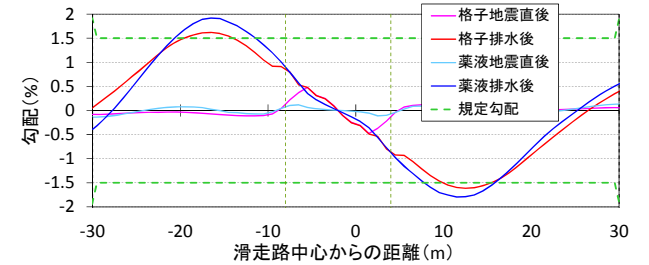


(d) C改良

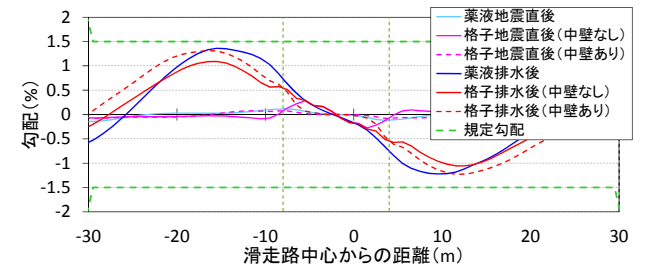
図-12 沈下量分布



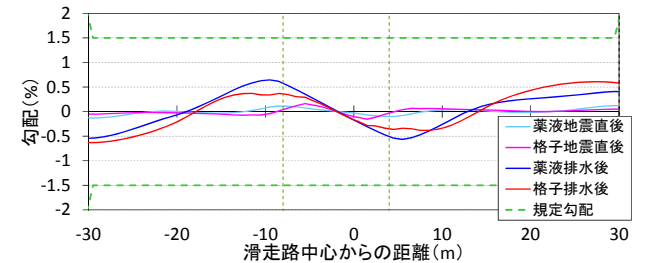
(a) 無対策



(b) A改良



(c) B改良



(d) C改良

図-13 勾配分布

(3) 勾配分布

無対策及びA～C改良の勾配分布を図-13に示す。緑の破線は滑走路横断勾配の規定値である1.5%²⁾を示す。

各改良の最大勾配に着目すると、A改良では薬液注入で1.8%程度、格子状改良で1.6%程度、B改良では薬液注入で1.4%程度、格子状改良で1.3%程度、C改良では薬液注入で0.7%程度、格子状改良で0.3%であった。規定勾配に着目すれば沈下量の低減効果が大きいA改良において、薬液注入及び格子状改良の両者で規定勾配以上となった。ただし、改良範囲内においては規定勾配を満足した。その他については規定勾配を満足した結果となった。結果として、沈下量を抑えるほど勾配が大きくなる傾向がみられた。

5. まとめ

本論文では、格子状改良を施した地盤上のアスファルト舗装の変形照査手法の検討を目的に、空港施設の実物大の液状化実験を対象とした、地震応答解析と圧密解析による薬液注入工法と格子状改良の対策効果を比較した。得られた知見を以下に示す。

- 格子状改良を施した地盤上のアスファルト舗装を対象とした地震応答解析及び圧密解析において、提案した境界条件により、液状化対策効果とアスファルト舗装の耐震性能を評価することができた。
- 標準的な格子間隔であれば、格子内の過剰間隙水圧を抑制することができ、改良範囲にもよるが、勾

配は規定値以内に収めることができ、薬液注入工法同様に耐震性能を満足する結果となった。

- 薬液注入工法、格子状改良とともに、改良範囲で沈下量を抑えることができて、改良両脇の無対策地盤において沈下量が大きくなることがわかった。検討断面では、改良体内外で最大1.8%程度の勾配差が生じた。
- 格子間隔を標準間隔よりも広くすることで格子内地盤の過剰間隙水圧の上昇を完全に抑制することができなくても、一定の沈下抑制効果を得られることがわかった。標準間隔よりも格子間隔を2.7倍と広くしても、沈下量は1.2倍程度に抑えられた。

謝辞：五洋建設株式会社 池野勝哉博士にはデータを提供いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. : Parameter identification for a cyclic mobility model, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.
- 2) 国土交通省航空局, 国土交通省国土技術政策総合研究所監修, 港湾空港総合技術センター：空港土木施設耐震設計要領及び設計例, 2013.
- 3) Ishihara, K., and Yoshimine, M. : Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soil and Foundation*, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 4) 浮田洋一, 志賀雅夫, 諸星一信, 所雅弘：滑走路及び誘導路における液状化対策範囲について, 沿岸技術研究センター論文集, No.7, pp.69-72, 2007.
- 5) 高橋英紀, 大橋照美, 遠藤敏雄, 藤井照久, 金子智之, 水野匠：静的圧入締固め工法の低改良率に向けた試験施工および解析的検証, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8 No.3, pp.451-461, 2013.
- 6) 菅野高弘, 中澤博志：液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究, *港湾空港技術研究所資料*, No.1195, 2009.
- 7) 菅野高弘, 中澤博志, 池野勝哉, 三藤正明：溶液型薬液注入工法を用いた滑走路地盤の液状化対策に関する研究, No.1206, 2010.
- 8) 吉田誠, 高橋英紀, 森川嘉之, 深田久, 中島秀晃, 河田雅也, 水谷征治, 住谷圭一：浮き型格子状固化処理工法への疑似三次元化解析手法の導入と水平成層地盤への工法適用性, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol.69 No.2, pp.I_958-I_963, 2013.
- 9) 佐伯嘉隆, 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘：空港舗装における格子状改良を対象とした模型振動実験の再現解析, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.
- 10) 森尾敏, 遠山雅茂：FLIPDIS (液状化解析プログラム FLIP の後処理プログラム), <http://www.ptmsg.net/product/flipdis/index.html>, 2014.9.4.
- 11) 四戸秀治：仙台空港耐震化 地盤改良工事について, 第9回空港技術報告会, 2008.
- 12) 建設省土木研究所：液状化対策工法設計・施工マニュアル (案), 共同研究報告書, 第186号, 478pp., 1999.
- 13) 大矢陽介, 小濱英司, 菅野高弘, 今井政之, 東中邦夫, 佐伯嘉隆：格子間隔が広い格子状改良直上のアスファルト舗装の変形に関する模型振動実験, *土木学会論文集 A1*, Vol.70 No.4, pp.227-241, 2014.

EVALUATION METHOD OF SEISMIC DEFORMATION FOR AIRPORT BASIC FACILITIES ON GRID-TYPE IMPROVED GROUND

Yoshitaka SAEKI, Yousuke OHYA, Eiji KOHAMA and Shigeru SATO

A deformation evaluation method for asphalt pavements on the ground improved by the grid-type improvement during and after earthquakes was examined. A liquefaction analysis was conducted to evaluate the effect of liquefaction countermeasure during the earthquake and a consolidation analysis was conducted to evaluate ground deformation caused by dissipation of excess porewater pressure after the earthquake. And the analysis results of the grid-type improved ground was compared with non-improved ground and the chemical grouting improved ground. As a results, deformation reducing effect of the grid-type improvement equivalent to the chemical grouting improvement was obtained. It was shown that the combination of the liquefaction analysis and consolidation analysis is useful to evaluate deformation of the ground improved by the grid-type improvement. Furthermore, it was recognized that the grid-type improvement with wide grid spacing has effect reducing subsidence.