

## 滑走路地盤の合理的な液状化対策とその確率的評価法

## Stochastic Method for Evaluating the Effect of Partial and Rational Soil Improvement for Liquefiable Runway Ground

池野勝哉\*, 吉田 誠\*, 熊谷隆宏\*\*, 菅野高弘\*\*\*, 中澤博志\*\*\*

Katsuya Ikeno, Makoto Yoshida, Takahiro Kumagai, Takahiro Sugano, Hiroshi Nakazawa

\* 工修, 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

\*\* Ph.D., 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

\*\*\* 工博, 独立行政法人港湾空港技術研究所, 地盤構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

The predicted damages of existing airports after earthquake have been investigated recognizing their important roles at the time of disaster. In the improvement of the ground to strengthen its deformation resistance, rational improvement area should be determined on the basis of the performance-based specification instead of conventional descriptive specification leading to the whole improvement of liquefiable area. In this study, a stochastic method is proposed for evaluating the effect of partial and rational soil improvement for liquefiable ground. The validity of the proposed method is verified by conducting an experiment in the use of underwater shaking table. In addition, a case study is numerically conducted for a model airport.

*Key Words: runway ground, partial improvement, stochastic method for evaluation*

キーワード: 滑走路地盤, 部分改良, 確率的評価法

## 1. はじめに

2004年新潟県中越地震において,新潟空港は臨時便の運行や自衛隊による緊急物資・人員輸送など,災害復旧の拠点として大きな役割を果たした.災害時に脆弱な線のインフラである道路や鉄道の代替手段として,拠点間を直接結ぶことのできる空路への期待は大きく,防災強化を含めた空港の耐震化が必要不可欠である.しかし,現状の空港用地における液状化調査によれば,約4割の空港が大規模地震動に対して液状化の可能性が示唆されており<sup>1)</sup>,限られた予算の中で合理的な液状化対策が求められている.

空港舗装施設における地震の被災形態として,液状化に起因する舗装面の不同沈下・ひび割れ・陥没,地震の慣性力による舗装体の破損などが挙げられる.液状化対策に着目した場合,従来,仕様規定に基づく耐震設計によって対象地盤の液状化判定を行い,液状化層全てに地盤改良等の液状化対策が実施されてきた<sup>2)</sup>.しかし,レベル2地震動のような偶発作用に対して,広域な滑走路地盤を全層改良により完全に液状化を防ぐことは,経済

的な負担が大きく,必ずしも合理的な対策とは言えない.致命的な被災をできるだけ軽減し,比較的簡単な補修によって,要求性能が確保されるような性能規定型の液状化対策が望ましいと考えられる.

液状化による不同沈下は地盤の不整形性に加え,物性値の不均質性,改良効果の不均一性などの空間的なばらつきに起因して発生する.そのため,不同沈下予測には,沈下量の期待値,標準偏差を評価できる確率統計的な手法を取り入れる必要がある.土田・小野<sup>3)</sup>は,圧密変形による不同沈下が舗装構造に与える影響の評価手法を提案した.この手法は,地盤物性の空間的なばらつきと相関性,および沈下をもたらす3次元的な相互作用を考慮し,モンテカルロ法による数値計算で不同沈下を確率統計的に評価している.宮田ら<sup>4)</sup>は,この手法を液状化による地盤の不同沈下問題へと拡張し,Ishihara and Yoshimine<sup>5)</sup>の研究成果を取り入れて,液状化の程度と排水を伴う体積ひずみの関係から不同沈下の評価を試みている.

本研究では,滑走路地盤の液状化対策を目的とした地盤改良方法として,液状化の可能性が高い領域を全て改

良するのではなく、不同沈下の発生を抑制することを念頭に、液状化対象層の上層部を部分的に改良する方法を提案する。すなわち、液状化後の地盤沈下が、対象領域全体で一様となるように、液状化の可能性が高い対象層を平面的にほぼ一定厚残す範囲で部分改良するものである。部分改良による対策効果を評価するためには、地震後の舗装変形状を評価した上で、滑走路の供用性（例えば、平坦性）を定量的かつ確率統計的に評価することが求められる。そこで、宮田ら<sup>4)</sup>の液状化による不同沈下予測手法を拡張し、地盤改良効果の不均一性を考慮した対策効果の評価、および滑走路の供用性を含めた確率的評価法を提案する。また、1G場の模型振動台実験から本評価法の不同沈下解析における検証を行うとともに、モデル空港滑走路を用いたケーススタディによる合理的な液状化対策範囲の検討方法について示す。

## 2. 滑走路地盤の合理的な液状化対策

### (1) 既設滑走路に適用可能な液状化対策工法

現在、既設滑走路で用いられている液状化対策として、溶液型薬液注入工法<sup>6)</sup>と静的圧入締固め工法<sup>7)</sup>が挙げられる(図-1)。前者は、飽和した緩い砂地盤の間隙に水と同程度の粘性を持つ薬液を浸透注入することで、砂地盤の間隙水を薬液に置換するとともに、薬液のゲル化によって粘着力を付加し、液状化強度の増加を図る固化工法である。一方、後者は、緩い砂地盤中に低流動性のモルタルを静的圧入することで、砂地盤を締固め、液状化強度を増加させる密度増大工法である。両工法とも、大掛かりな施工機械を必要とせず、舗装面に改良ピッチ毎の注入孔(直径100mm程度)を設けることで施工できるため、施工時間や施工エリアなどの厳しい制約条件下で適用可能な液状化対策である。本研究では、改良域が過剰間隙水圧の伝播による損傷を受けず、改良域のモデル化が一体的に取り扱える簡便さから、前者の工法を対象に評価法を提案する。

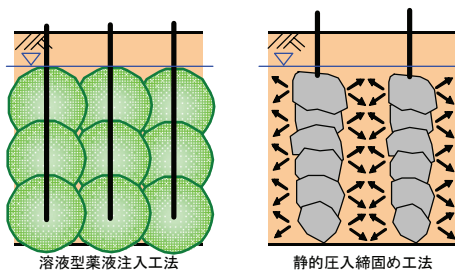


図-1 既設滑走路で用いられている液状化対策工法<sup>6)7)</sup>

### (2) 上層部分改良による合理的な液状化対策

滑走路は常時から偏荷重が作用する港湾構造物とは異なり、水平成層地盤上の施設である。そのため、側方流動の問題を除いては、液状化後の残留変形に鉛直変位が支配的であると考えられる。従来、港湾空港関係の耐

震設計では、液状化対象層全てに対策がなされてきた<sup>2)</sup>。しかし、滑走路の要求性能である平坦性(表-1参照)に着目すれば、必ずしも液状化層の全てを改良する必要はないと考えられる。すなわち、液状化によるひずみポテンシャルをほぼ均一に残した改良で、液状化による有意な沈下と滑走路に有害な不同沈下を同時に低減することが可能である。図-2に合理的な液状化対策の概念を示す。

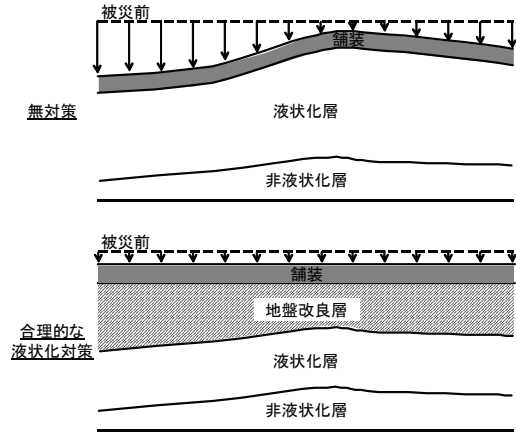


図-2 合理的な液状化対策の概念図

## 3. 確率的評価法の概要

本評価法による滑走路の供用性評価フローを図-3に示す。本評価法は、以下の4つのサブモデルから構成されており、地盤物性の空間的なばらつきを正規分布による確率モデルで評価し、モンテカルロ法による複数の試行計算から確率統計的な解として、滑走路の供用性を定量的に評価するものである。

- ① 地震応答解析による液状化抵抗率( $F_L$ 値)の評価
- ② 液状化による地盤面の不同沈下解析
- ③ 舗装体のFEM弾性解析
- ④ 滑走路の供用性評価

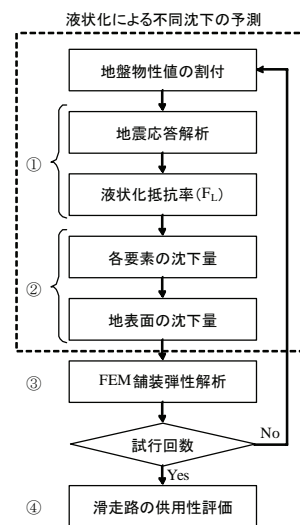


図-3 確率的評価手法のフロー

(1) 地震応答解析による液状化抵抗率 (F<sub>L</sub> 値) の評価

地盤の液状化抵抗率には、地震動レベルと地盤の液状化強度が関係し、液状化により発生する沈下量は、地盤の液状化抵抗率に応じた体積ひずみと液状化層厚が関係する。宮田ら<sup>4)</sup>は、港湾の液状化予測・判定法<sup>2)</sup>を用いて、液状化抵抗率 (F<sub>L</sub> 値) を式(1)のように仮定した。

$$F_L = \frac{N_{65}}{N^*} \quad (1)$$

ここで、N<sub>65</sub>：等価 N 値 (有効上載圧力が 65kN/m<sup>2</sup> の場合の N 値に換算したもの)、N\*：限界 N 値 (液状化の発生限界 N 値)

限界 N 値は、地震応答解析により求まる最大せん断応力から式(2)により等価加速度を求め、図-4 に示す等価 N 値と等価加速度による液状化予測・判定チャートから、領域 II と III の境界線上に液状化の発生限界が存在すると仮定して求めている。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \times \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} g \quad (2)$$

ここで、α<sub>eq</sub>：等価加速度、τ<sub>max</sub>：最大せん断応力、σ'<sub>v</sub>：鉛直有効上載圧、g：重力加速度

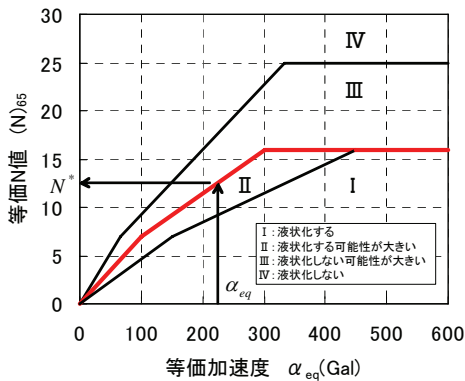


図-4 等価加速度と等価 N 値による液状化予測<sup>2)</sup>

(2) 液状化による地盤の不同沈下解析

前項で評価した各地盤要素毎の液状化抵抗率から、Ishihara and Yoshimine<sup>5)</sup>の室内試験結果 (図-5) を利用して、過剰間隙水圧消散後の液状化要素の体積ひずみを算定する。各地盤要素の沈下量は、液状化要素の体積ひずみと要素厚さから式(3)で求められる。

$$S^* = \epsilon_v \times \Delta H \quad (3)$$

ここで、S\*：要素の沈下量、ε<sub>v</sub>：要素の体積ひずみ、ΔH：要素厚さ

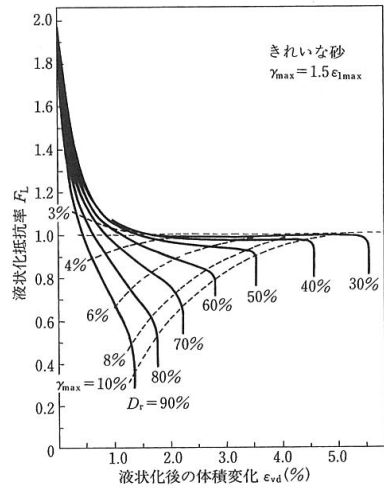


図-5 液状化抵抗率と体積ひずみの関係<sup>5)</sup>

任意深度における着目要素の沈下量を用いて、地表面の不同沈下を評価する場合、要素間の 3 次元的な沈下の相互作用を考慮する必要がある。これらを厳密に評価するためには FEM 等の数値解析を用いる方法が考えられるが、滑走路地盤のように広域な範囲を解析対象とした場合、非常に多くの計算メモリや計算時間を要するなどの問題がある。そこで、土田・小野<sup>3)</sup>に倣い、沈下の影響係数を導入する。影響係数は、深度 D で幅 B の着目要素の沈下量と、直上地表面の沈下量の割合として、式(4)のように定義される (図-6)。

$$I_{jk}^i = \frac{S_{jk}^i}{S_{jk}^*} \quad (4)$$

ここで、I<sub>jk</sub><sup>i</sup>：影響係数、S<sub>jk</sub><sup>\*</sup>：着目要素の沈下量、S<sub>jk</sub><sup>i</sup>：i 点の地表面沈下量

影響係数が既知であれば、式(5)のように、着目要素の沈下量に影響係数を乗じて、i 点の地表面沈下量を求めることができるので、あらかじめ FEM 弾性解析により D/B と影響係数 I<sub>jk</sub><sup>i</sup> の関係を求めておけばよい。

$$S^i = \sum_j \sum_k I_{jk}^i S_{jk}^* \quad (5)$$

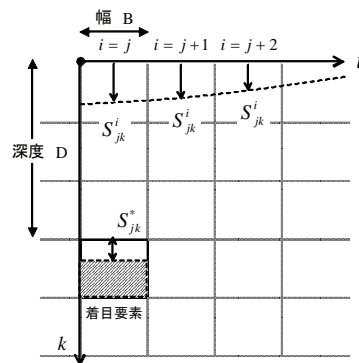


図-6 沈下に関する影響係数の定義

### (3) 改良土のひずみ特性

溶液型薬液注入工法を用いた対策効果として、地盤変形量を予測する場合、改良土のひずみ特性が必要である。大島ら<sup>8)</sup>は、改良土のひずみ制御型非排水繰返し三軸試験を実施し、繰返しせん断後の再圧密試験によって、有効応力が回復するまでの残留体積ひずみを求めている。

大島ら<sup>8)</sup>において、非排水繰返し三軸試験は相対密度60%の相馬砂 (Fc=0%) と調整砂 (Fc=10%) の2種類が用いられ、周波数0.1Hz、繰返し回数100回の正弦波で実施された。軸ひずみ振幅は、レベル1 (以後L1) 地震相当の0.2%、レベル2 (以後L2) 地震相当の0.5%の2種類である。改良土の薬液濃度は2~6%、未改良土の薬液濃度0%を含めて6種類の薬液濃度と最終的な残留体積ひずみ関係が整理されている。図-7はFc=10%における結果を示しているが、改良土の薬液濃度と体積ひずみ関係に線形性が認められること、軸ひずみの違い(L1, L2)が未改良土(薬液濃度0%)で顕著であることが分かる。これは、地震動レベル(試験では軸ひずみ)が大きいくほど、未改良に比べて改良土の変形に対する改良効果が大きく、低濃度でも十分な改良効果を有していることを意味している。

本評価法では、図-7のうちL2地震相当の薬液濃度と残留体積ひずみの関係を、図中のような関係式で定義した。図中の関係式には相対密度の影響が考慮されていないが、実工事<sup>9)</sup>で適用される薬液濃度が5%以上であり、改良土の体積ひずみが概ね0.5%以下と、液状化対象層に比べて不同沈下への影響が軽微であることから、この関係式で改良土の沈下量を算定することにした。

モンテカルロ法を用いた本評価法では、薬液濃度の平均値および標準偏差を用いて、図-7中の関係式から体積ひずみを正規分布による確率モデルとしている。

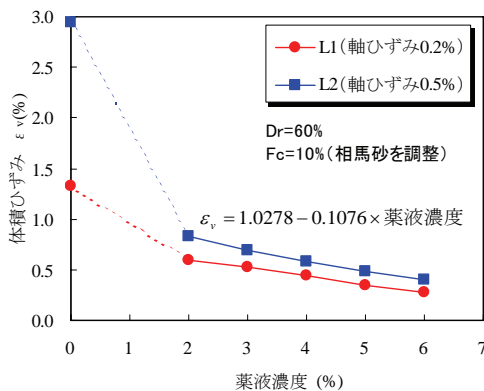


図-7 薬液濃度と残留体積ひずみ<sup>8)</sup>

### (4) 舗装体のFEM弾性解析

地盤の不同沈下が上部の舗装体に与える影響を、舗装体を線形弾性体と仮定したFEM解析によって評価する。その際、不同沈下解析から求められた沈下量分布を地盤要素上端に強制変位として直接作用させ、舗装体要素に発生するひずみや節点変位を計算する。したがって、舗

装体の剛性や引張り方向における限界ひずみを設定すれば、地盤の不同沈下による舗装のクラック、起伏などを評価することも可能である。

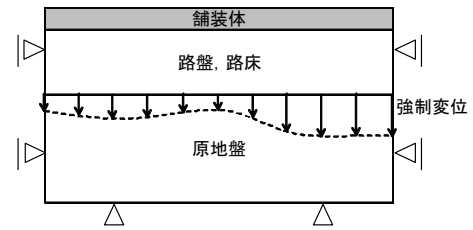


図-8 FEM解析モデル

### (5) 滑走路の供用性評価

液状化対策の効果を評価するためには、滑走路の供用性を考慮した指標が必要不可欠である。被災時における滑走路の供用性判断指標として、滑走路の平坦性、舗装体の健全性、地盤の支持力などが考えられる<sup>10)</sup>。液状化被害を受けた滑走路地盤は、地盤の不整形性や地盤物性の空間的なばらつきにより不同沈下が生じ、舗装面にクラックや起伏などを発生させる。また、透水性の低い地盤では、液状化によって低下した地盤支持力の回復が遅れるため、滑走路の供用開始時期に影響を及ぼす可能性がある。したがって、上記全てを考慮した指標によって、滑走路の供用性を定量的に評価するのが望ましいと考えられるが、そのような統一的な指標は確立されていない。そこで、本評価法では地震時における滑走路の供用性判断指標の一つとして、空港土木施設の設置基準・同解説<sup>9)</sup>に準じた勾配による規定を用いる。規定されている滑走路の最大勾配を表-1に示す。また、一般に空港舗装においては、雨水の排水が速やかに行われるよう1.0%程度の勾配 $\alpha_{min}$ で設計するのが望ましいとされている<sup>9)</sup>。本評価法により算出される沈下勾配は、計画勾配 $\alpha_{ini}$ からの変化分 $\Delta\alpha$ に相当するので、滑走路の縦断方向および横断方向の供用条件は、式(6)、式(7)となる。なお、後述する5章のケーススタディでは雨水の排水性について、縦断方向を0.5%、横断方向を1.0%としている。

表-1 滑走路の最大勾配 $\alpha_{max}$ <sup>9)</sup>

滑走路長	最大縦断勾配		最大横断勾配
	(1) 滑走路長の末端から滑走路の長さの4分の1以下の距離にある部分	(2) (1)に掲げる部分以外の部分	
1500m以上	0.8%	1.0%	1.5%
900m以上1,500m未満	1.0%	1.0%	1.5%
900m未満	1.5%	1.5%	2.0%

#### 縦断方向

$$\alpha_{max} > \Delta\alpha + \alpha_{ini} \quad (6)$$

#### 横断方向

$$\alpha_{max} > \Delta\alpha + \alpha_{ini}, \quad \alpha_{min} < \alpha_{ini} - \Delta\alpha \quad (7)$$

#### 4. 模型振動台実験

##### (1) 実験概要

本章では、模型実験を実施し、滑走路地盤の溶液型薬液注入工法を用いた上層部分改良効果の確認と、本評価法の不同沈下解析における検証を行う。実験は、高さ1.5m、長さ4.0m、幅2.5mの鉄製剛土槽を用い、中央部に隔壁を設けることで、異なる2断面を同時に加振した。地盤中には、加速度計および水圧計を、地表面にはレーザー変位計とターゲットを所定の位置に設置し、サンプリング周波数512Hz、時間30~60secでデジタル収録し、実験前後に地表面ターゲットの沈下量を計測した。計測器の設置位置を含む実験模型の断面図および平面図を図-9に示す。なお、本実験では、地盤を土粒子と間隙水の2相系飽和材料と仮定した支配方程式から導かれる井合の相似則<sup>11)</sup>を採用する。現地スケールで9~15m程度の液状化対象層を想定し、長さの縮尺比を15とした。各パラメータの相似則および縮尺比を表-2に示す。

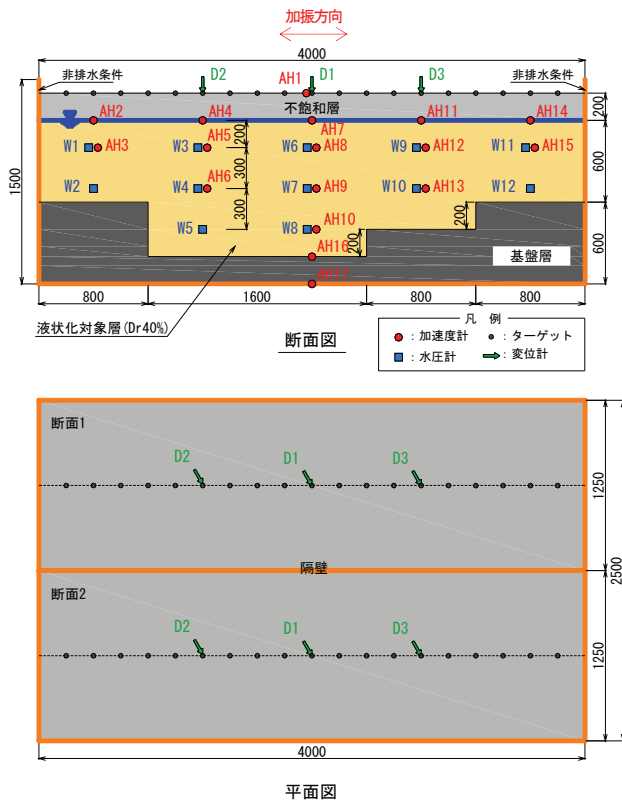


図-9 実験模型の断面図・平面図 (単位: mm)

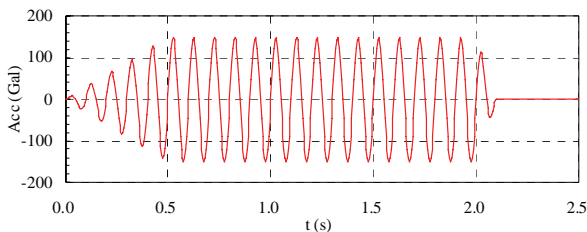


図-10 入力加振波 (150Gal, 10Hz, 20波)

表-2 実験の相似則と縮尺比<sup>11)</sup>

パラメータ	相似則	縮尺比
長さ	$\lambda$	15
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	7.62
応力	$\lambda$	15
間隙水圧	$\lambda$	15
変位	$\lambda^{1.5}$	58.09
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	3.87
加速度	$\lambda$	1
透水係数	$\lambda^{0.75}$	7.62

模型地盤は、相馬硅砂5号 ( $D_{50}=0.38\text{mm}$ ) を用いて水中落下法により相対密度40%の液状化対象層を作製し、気中部分には不飽和によるサクシオンが比較的小さい単粒度碎石6号(粒径5~13mm)を使用した。基盤層は、相馬硅砂5号に重量比3%の超早強セメントを混合することで固結作製し、不同沈下を発生させるために層厚を変化させた。なお、本実験では通常の水道水を使用している。

溶液型薬液注入工法による改良体は、あらかじめ所定位置に設置した注入チューブから、地盤作製後に薬液を定量ポンプで浸透注入することで作製した。改良体の注入間隔Lは、球体である改良体の体積と同体積となる立方体を仮定し、改良率aと注入径Dから幾何学的に算定される<sup>9)</sup>。改良体の強度は、実工事における実績が $q_u=100\sim 150\text{kN/m}^2$ であることから<sup>9)</sup>、相似則により $q_u=10\text{kN/m}^2$ 程度に設定するのが望ましい。しかし、実験後に改良体のサンプリングおよび一軸圧縮試験を実施することや、改良体の取扱い易さを考慮し、 $q_u=30\text{kN/m}^2$ 程度の強度に設定した。薬液濃度 ( $\text{SiO}_2$ ) はあらかじめ実施した配合試験により、モールド内で作製された改良土が $q_u=30\text{kN/m}^2$ になるよう約4.0%に決定した。なお、改良体に接する土槽側面には、改良体の粘着力による沈下抑制効果を排除するため、テフロンスプレーを塗布したシートを施している。入力加振波は、最大加速度150Gal、振動数10Hz、波数20波の正弦波とした。入力加振波形を図-10に示す。また、模型振動台実験の全景と改良体の出来形例を写真-1に示す。



写真-1 模型振動台実験の全景 (左)  
改良体の出来形例 Case4 (右)

## (2) 実験ケース

実験ケースは、均質な液状化対象層に対して、未改良の Case1, 比較的、液状化対象層を一定厚残存するため、改良率 100% ( $a=1.0$ ) で液状化対象層の約 4 割 ( $H_f/H_L=0.4$ ) を上層部分改良した Case2, 中央部の液状化対象層の約 2 割 ( $H_f/H_L=0.2$ ) を表層部分改良した Case3, Case2 の改良率を 70% ( $a=0.7$ ) に低減した Case4 の計 4 ケースである。また、加振実験は 2 断面同時に行い、1 回目に Case1 と Case2, 2 回目に Case3 と Case4 を同時に実施している。なお、改良率 ( $a$ ) とは、設計による改良範囲に対する純改良体積の割合を体積百分率で表したもので、改良範囲の土が全面的に改良される 100% に対して、隣り合う球体の改良土が互いに接し合い、未改良部位が残された状態を 70% と定義している。

実験ケースを図-11 に示す。

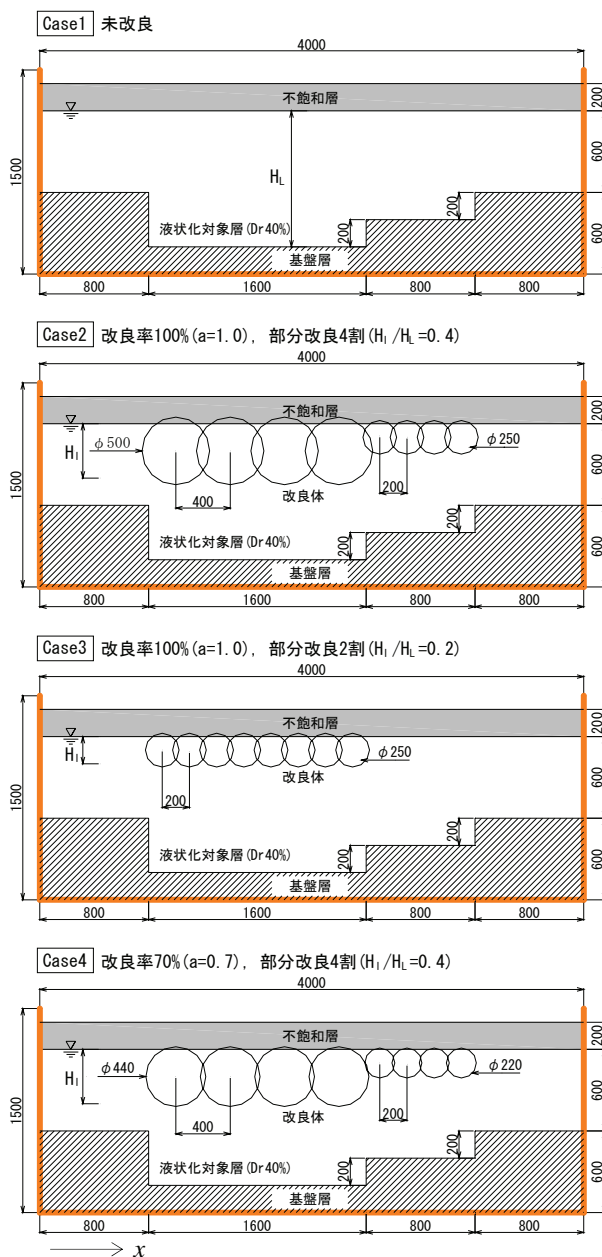


図-11 実験ケース (単位: mm)

## (3) 実験結果

実験前後のターゲット変位から算出した地表面の沈下分布を図-12, 沈下量の出現頻度を図-13 に示す。

未改良の Case1 は、液状化対象層の厚い中央部で最大 2cm 沈下し、端部との不同沈下は約 1cm 生じており、平均沈下量  $\mu=1.41$  および標準偏差  $\sigma=0.28$  は各ケースの中で最も大きい。一方、部分改良ケースは Case3 を除いて、沈下分布は概ね平坦であり、平均沈下量および標準偏差は Case1 の半分程度に抑えられている。Case3 は沈下分布および出現頻度からも未改良の Case1 と類似しており、改良効果が小さい。

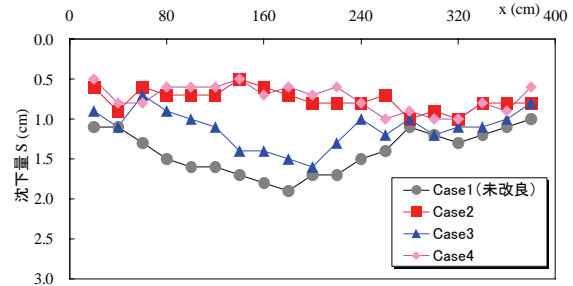


図-12 地表面の沈下分布

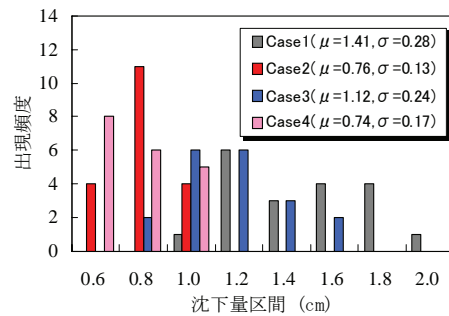


図-13 地表面沈下の出現頻度

部分改良の効果は、適度に全体の沈下量が抑えられ、沈下分布の標準偏差あるいは不同沈下が小さくなることで評価される。そこで、部分改良率 ( $H_f/H_L$ ) と、 $x=80 \sim 320$ cm 区間の各測点における部分改良ケースの沈下量  $S$  を未改良ケース Case1 の沈下量  $S_1$  で除した沈下率 ( $S/S_1$ ) との関係を図-14 に示す。また、 $(\sigma_1 \mu_1)/(\sigma \mu)$  を沈下および不同沈下を抑制する改良効果として定義し表-3 に示す。なお、添え字の 1 は Case1 を表しており、図-14 の破線は、液状化による沈下量が液状化層厚と線形関係があると仮定したものであり、破線よりも下側にプロットされれば沈下抑制効果があると言える。

図表より、未改良の Case1 に対する改良効果は Case2 : 3.85, Case4 : 3.19 であり、ともに図-14 の破線下側にプロットされていることから部分改良による効果が認められる。Case2 と Case4 を比較すると、改良率の違いによる改良効果に有意な差異はなく、70% 程度の改良率で十分な改良効果が期待できる。なお、Case3 は改良効果の最も低い 1.48 であり、図-14 の破線上側に

もプロットされている. 以上より, 本実験ケースの Case2 や Case4 のように, 下層の液状化対象層を平面的に一定厚残す部分改良が高い改良効果を示すことが分かる.

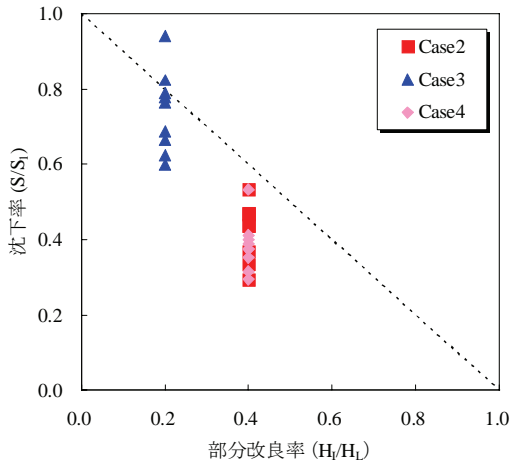


図-14 部分改良率と沈下率の関係

表-3 各ケースの改良効果

項目	Case1	Case2	Case3	Case4
改良率	a	-	1.0	1.0
部分改良	$H_i/H_L$	-	0.4	0.2
平均沈下	$\mu$	1.41	0.76	1.12
標準偏差	$\sigma$	0.28	0.13	0.24
改良効果	$(\sigma_1 \cdot \mu_1)/(\sigma \cdot \mu)$	1.00	3.85	1.48

次に各ケースの代表点(土槽中央部)における地表面の沈下量, 過剰間隙水圧比, 加速度の時刻歴を図-15 (Case1, Case2) および図-16 (Case3, Case4) に示す. ここで, 土槽底版に設置されている加速度計 AH17 は, 加振実験を 2 断面同時に行っているため, Case1 と Case2, Case3 と Case4 で共通のものである.

未改良の Case1 は, 加振直後に過剰間隙水圧比の上昇を伴いながら地表面沈下 (D1) が生じ, 加振中に概ね過剰間隙水圧比 (W6, W7, W8) が 1.0 の液状化状態に達した. 地表面沈下 (D1) は, 加振中に最終沈下量の約 2 割が生じているが, 大部分は加振終了後の過剰間隙水圧の消散に伴う圧密によるものである. 加速度応答 (AH8, AH9, AH10) は, それぞれ  $t=4.5s, 4.7s, 5.3s$  付近から減衰し始め, 液状化による地盤剛性の低下が浅い層から深い層へと進行していることが分かる.

一方, 部分改良ケースの Case2 および Case4 は, 改良層における加速度応答 (AH8) が  $t=4.9s$  付近で減衰するが, 過剰間隙水圧比 (W6) の最大値が 0.4 以下であることから, 液状化には至っておらず, 剛性が低下した液状化層からの伝達によるものと考えられる. 液状化対象層は, 加振中に過剰間隙水圧比 (W7, W8) が 1.0 の液状化状態に達し, 加振終了後, ゆっくりと下降する傾向を示す. 地表面沈下 (D1) は, 加振中, 最終沈下量の約 1 割が生じているものの, 未改良の Case1 と同様に過剰間

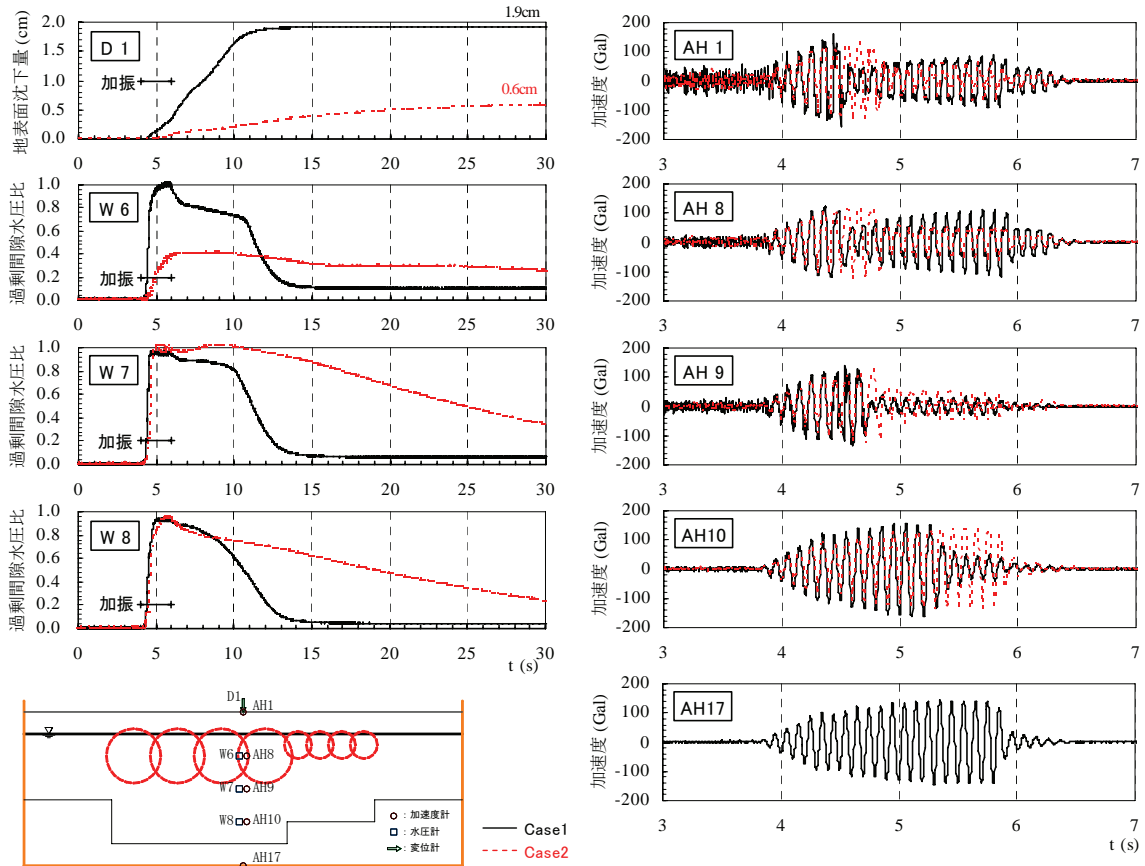


図-15 代表点の時刻歴 (Case1, Case2)

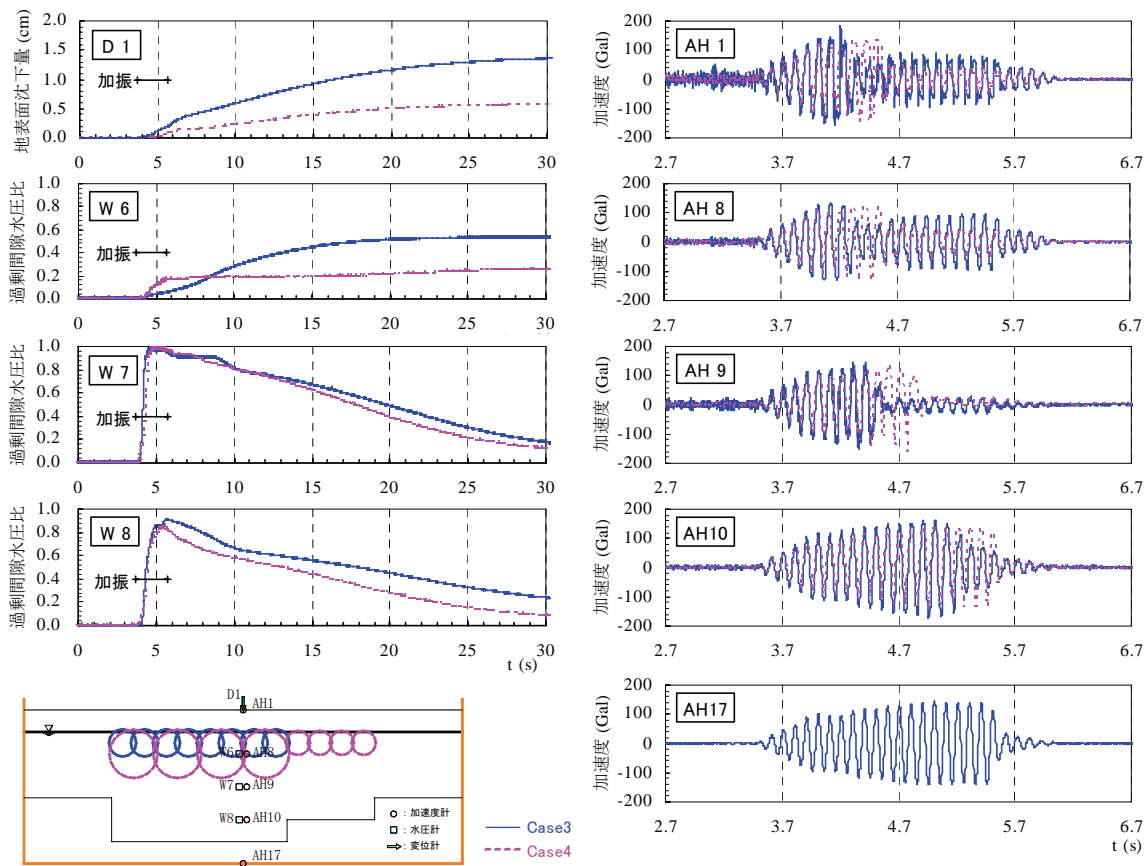


図-16 代表点の時刻歴 (Case3, Case4)

隙水圧の消散に伴う沈下が支配的である。

部分改良したケースは、透水性の低い改良層が液状化対象層の上部にあるため、過剰間隙水圧の消散および沈下の収束が遅れる。そのため、図中の  $t=30\text{sec}$  では過剰間隙水圧の消散が途中であるが、 $t=60\text{sec}$  でほぼ消散していたことを追記しておく。また、改良率 70% の Case4 は、改良率 100% の Case2 よりも、未改良部位が残されている分、改良層の透水性が高いと考えられるため、過剰間隙水圧比の下降が比較的早い。Case3 は改良層の厚さが薄いため、改良層の過剰間隙水圧比 (W6) は 0.5 程度まで上昇し、他の改良ケースと比較して大きな地表沈下 (D1) を示している。

部分改良ケースでは、下部の液状化対象層が液状化した場合、過剰間隙水圧比の高い状態が比較的長時間継続されるため、地盤支持力の観点から、実滑走路の適用においては滑走路の供用開始時期に悪影響を及ぼさない様、非常時の浸透流解析を実施し、過剰間隙水圧比の経時変化を把握しておく必要があると考えられる。

なお、土槽中央部における地表面変位計 (D1) の最終沈下量は、未改良の Case1 に対して、Case2 および Case4 が 3 割、Case3 が 7 割程度に抑えられていた。

#### (4) 評価モデルの検証

代表的な実験結果 (Case1, Case2) を用いて、本評価法の不同沈下解析における検証を行う。解析には、実験模型と同様な長さ  $4.0\text{m}$  ( $\Delta x=0.1\text{m}$ )  $\times$  幅  $1.3\text{m}$  ( $\Delta y=0.1\text{m}$ )  $\times$  高さ  $1.4\text{m}$  ( $\Delta z=0.2\text{m}$ ) の 3 次元格子モデルを用い、長さ方向  $x$  に  $80\text{cm}$  毎の 5 つの領域を定義した。なお、幅方向  $y$  には均質な地盤物性を持つものと仮定した。Case2 の解析メッシュを図-17 に示す。

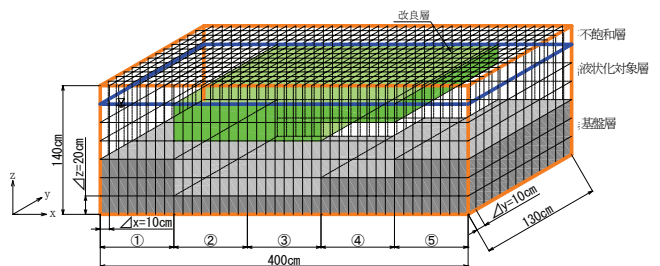


図-17 解析メッシュ (Case2)

地震応答解析には、等価線形法として実務で広く用いられている SHAKE を採用した。等価線形法は、地盤のせん断剛性と減衰定数のひずみに対する非線形関係を



等価な線形関係とする方法で、一般的な動的変形試験から得られた値をそのまま利用できる利点がある。しかし、非線形性の強い液状化時の応答を過大評価すること、小ひずみ領域で減衰を過大評価し、高周波数領域で応答を過小評価することなどの問題点<sup>12)</sup>も指摘されている。したがって、地震応答解析に等価線形法を用いる場合、液状化抵抗率( $F_L$  値)を過小評価する手法であると言える。

地震応答解析に必要な地盤の動的変形特性( $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ )は、拘束圧依存型の標準的な特性値を用いた<sup>2)</sup>。なお、改良層の動的変形特性は、未改良層と同様の傾向を示すとされている<sup>9)</sup>ため、同様の関係を用いることができる。せん断波速度( $V_s$ )は、3回のパルス波実験から求めた平均値を領域毎に設定した。解析に用いた基本条件を表-4に、地盤条件を表-5に、動的変形特性を図-18に示す。なお、表-4の水平相関距離は、空間的な物性値の相関性を定義するための関数式に用いられ、モンテカルロ法による地盤物性値の割付時に必要なパラメータである<sup>34)</sup>。

表-4 基本条件

基本条件			
地震応答解析 (SHAKE)	繰返し回数	n	8 回
	有効ひずみ換算	$\alpha$	1.0 -
	初期減衰比	$D_{mi}$	0.05 -
	各層の初期せん断剛性	$G_0$	$\rho V_s^2$ -
不同沈下解析	水平格子間隔	$\Delta x, \Delta y$	0.1 m
	鉛直格子間隔	$\Delta z$	0.2 m
	水平相関距離	$X_r, Y_r$	0.1 m
	試行回数	N	25 回

地盤条件の中で、液状化による沈下に影響を与えるパラメータは、N 値の平均値と標準偏差、層厚の変動係数である。N 値の平均値は、相対密度と土槽中央の有効上載圧から Meyerhof の式で求め、N 値の標準偏差および層厚の変動係数は、模型地盤の作製時における管理実績を参考に設定した。なお、改良層は薬液濃度が約 4.0% であることから図-7 中の関係式より、L2 相当の平均体積ひずみは 0.6% となる。また、薬液濃度の標準偏差は、現場における一軸圧縮強度の変動係数を参考<sup>6)</sup>に決定した。

表-5 地盤条件

地盤条件	単位体積重量		N 値, 薬液濃度 <sup>(注)</sup>		層厚 変動係数 $c_v$
	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$\gamma'$ ( $kN/m^3$ )	平均 $\mu_N$	標準偏差 $\sigma_N$	
不飽和層	14.3	-	30	1	0.01
液状化対象層	18.4	8.4	3	1	0.01
改良層	18.4	8.4	4%	2%	0.01
基盤層	20.0	10.0	30	1	0.01

(注)改良層は薬液濃度

解析結果として、未改良の Case1 における代表点(AH17, AH9, AH7)の加速度応答を実験結果と比較して図-19に示す。実験では地盤の液状化により剛性が低下し、加速度応答が減衰する傾向を示しているが、等価線形法による解析では、液状化のような強い非線形性を考慮できないため、後半の加速度応答を3倍程度過大に評価していることが分かる。

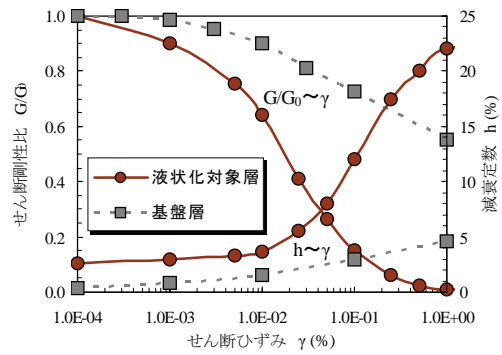


図-18 解析に用いた  $G/G_0 \sim \gamma \sim h$  曲線

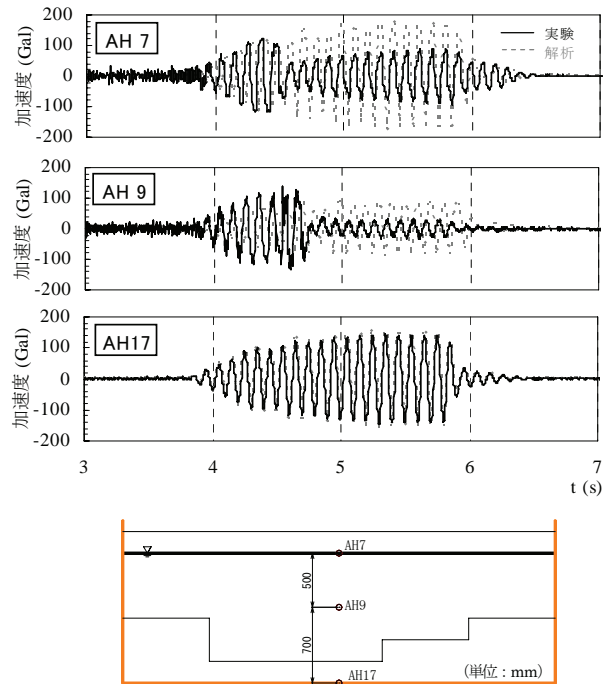


図-19 加速度応答の実験値と解析値

次に、地表面沈下分布の期待値を図-20に示す。図中には、Case1 および Case2 の実験結果を併記している。解析結果は実験値より2倍強の大きな沈下量を算定しているが、不同沈下を示す沈下形状については概ね対応がよい。沈下量を過大に評価した理由として、等価線形法による地震応答解析が、先に示した特徴により、加速度応答を過大に評価したこと、本評価法が地盤の液状化による強い非線形性を考慮した逐次非線形解析ではないこと、などが考えられる。

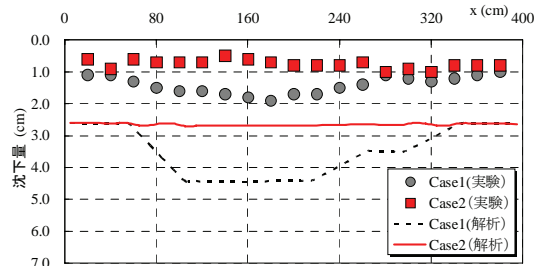


図-20 地表面沈下分布の期待値

## 5. 確率的評価法を用いた合理的な液状化対策の検討例

### (1) 検討対象

本章では、既往文献<sup>13)</sup>を参考にしたモデル空港滑走路 2,500m×45m を対象に、本評価法を用いた合理的な液状化対策範囲の検討方法について示す。液状化対策には、溶液型薬液注入工法を適用し、薬液濃度の平均値を3%、標準偏差を1.5%とした。また、薬液濃度の標準偏差は、4章と同様に、現場における改良土の一軸圧縮強度の変動係数を参考<sup>6)</sup>に決定した。図-21 にモデル空港滑走路の断面図と N 値分布を示す。

### (2) 解析メッシュと条件設定

解析は、水平方向に 2700m ( $\Delta x=20m$ ) × 135m ( $\Delta y=15m$ )、鉛直方向に 32m ( $\Delta z=2m$ ) の 3 次元格子モデルを用いた。ここでは、図-21 に示した液状化層に対して、 $F_L$  値が限りなく小さくなる完全液状化条件で不同沈下解析を行うこととし、地震応答解析は省略する。解析の基本条件を表-6 に、地盤条件を表-7 に示す。ここで、水平相関距離および N 値の標準偏差、層厚の変動係数は、対象地盤の詳細な土質調査により求めるべき値であるが、土田・小野<sup>3)</sup>に倣い、表中に示すような値で検討を行った。なお、表-7 中の平均 N 値とは図-21 中の N 値分布を指している。モンテカルロ法による試行回数は、予備解析により、計算結果が安定する 100 回とした。

次に、舗装体の FEM 弾性解析における断面諸元を図-22 に示す。舗装面の縦断方向における計画勾配  $\alpha_{ini}$  は 0.5%、横断勾配は 1% とした。また、アスファルト舗装の弾性係数は、温度の関数であることが知られているが、ここでは、舗装設計便覧<sup>14)</sup>を参考に設定した。

表-6 基本条件

基本条件			
不同沈下解析	水平格子間隔	$\Delta x, \Delta y$	20, 15 m
	鉛直格子間隔	$\Delta z$	2 m
	水平相関距離	$X_r, Y_r$	50 m
	試行回数	N	100 回

表-7 地盤条件

地盤条件	単位体積重量		N 値, 薬液濃度 <sup>(注)</sup>		層厚 変動係数 $c_v$
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	平均 $\mu_N$	標準偏差 $\sigma_N$	
不飽和層	18.0	-	-	5	0.1
液状化対象層	20.0	10	-	5	0.1
改良層	20.0	10	3%	1.5%	0.1
基盤層	20.0	10	-	5	0.1

(注)改良層は薬液濃度

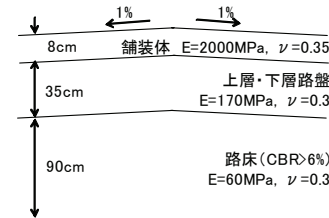


図-22 滑走路舗装の横断面諸元

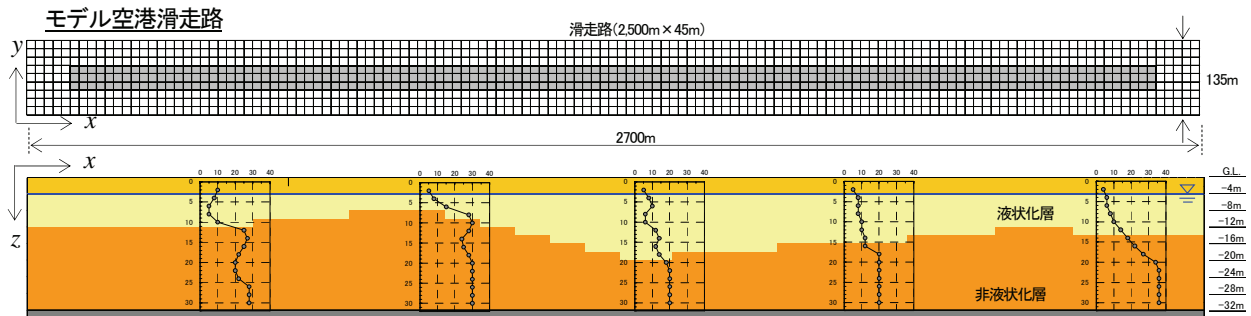


図-21 モデル空港滑走路の断面図と N 値分布

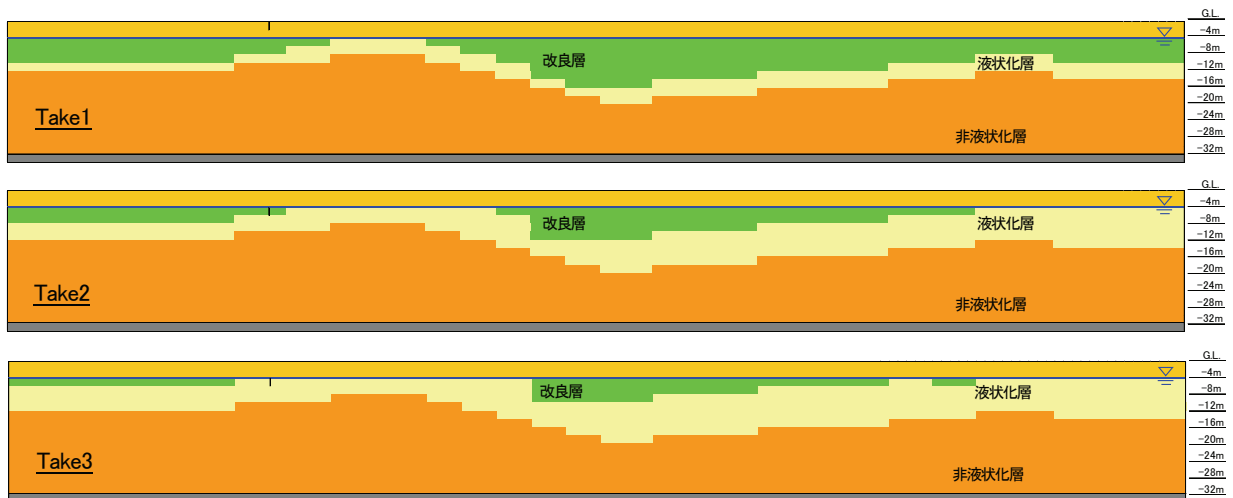


図-23 検討ケース

### (3) 検討ケースと解析結果

検討は未改良ケース，上層の部分改良層厚を変化させた3ケースの計4ケースで行った．図-23に検討した改良ケースを示す．

各ケースの舗装面沈下分布（期待値）を図-24に示す．未改良ケースでは，最大で80cm程度の沈下が生じており，特に $x=1,200\text{m}$ から $x=1,400\text{m}$ にかけて60cm程度の大きな不同沈下が生じている．一方，上層部分改良によるケースでは，Take3からTake1にかけて不同沈下が改善され，Take1では上記と同じ区間で10cm程度の不同沈下に抑えられていることが分かる．

舗装面メッシュ間の縦断方向における部分勾配（ $\Delta\alpha_{95} + \alpha_{ini}$ ）コンターを図-25に示す．ここで， $\Delta\alpha_{95}$ は，モンテカルロ法により複数回計算された舗装面の隣り合うメッシュ間の部分勾配 $\Delta\alpha$ を正規分布と仮定し，非超過確率95%として評価したものである（図-26）．

通常，舗装勾配の施工管理は5mピッチで行われている<sup>10)</sup>ため，これと同様に部分勾配を整理する必要があるが，ここでは便宜上，不同沈下解析を行った水平方向の格子間隔（ $\Delta x=20\text{m}$ ， $\Delta y=15\text{m}$ ）で整理した．したがって，部分勾配（ $\Delta\alpha_{95} + \alpha_{ini}$ ）が表-1に示した縦断方向の部分最大勾配 $\alpha_{max}$ 以下であることが，滑走路の供用条件である．未改良ケースでは部分勾配の大きなエリアが存在するのに対して，改良ケースのTake3からTake1にかけて，部分勾配が小さくなるのが分かる．

未改良およびTake1の部分勾配（ $\Delta\alpha_{95} + \alpha_{ini}$ ）の出現頻度分布を図-27に示し，各ケースの滑走路における縦断方向の最大勾配 $\alpha_{max}$ 以下の割合を「要補修率」と定義した推移を図-28に示す．未改良ケースの要補修率19%が，改良ケースのTake3で9%，Take2で5%，Take1で0%と減少しており，本評価法を用いることにより部分改良の効果が定量的に評価できる．

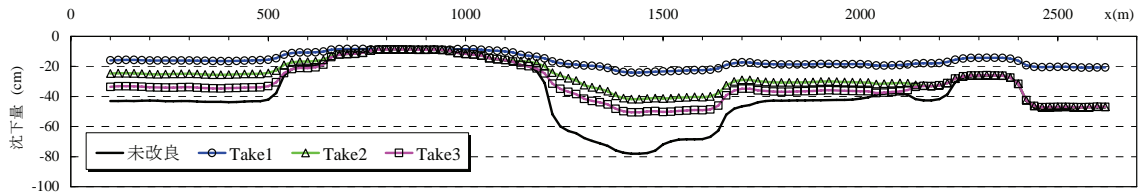


図-24 各ケースの舗装面沈下分布（期待値）

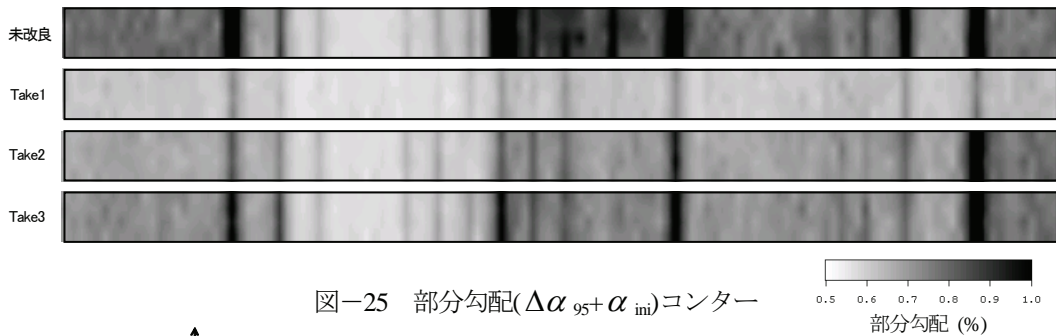


図-25 部分勾配（ $\Delta\alpha_{95} + \alpha_{ini}$ ）コンター

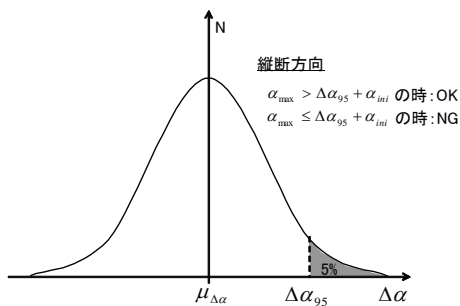


図-26  $\Delta\alpha$  分布と  $\Delta\alpha_{95}$  の関係

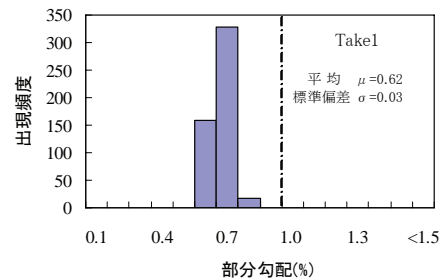
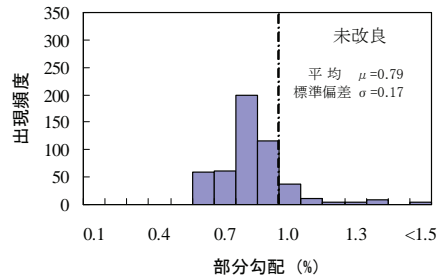


図-27 部分勾配（ $\Delta\alpha_{95} + \alpha_{ini}$ ）の出現頻度

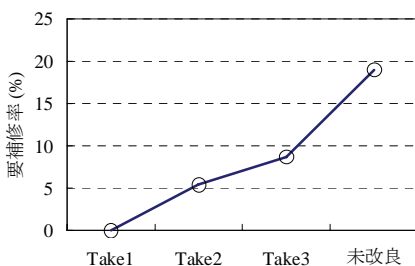


図-28 各ケースにおける要補修率の推移

## 6. おわりに

本稿では、滑走路地盤の液状化対策として、滑走路面の不同沈下抑制を主目的に、液状化対象層の上層部分改良を提案した。その際、液状化被害を受けた滑走路の供用性を定量的に評価するため、地盤物性と改良効果のばらつきを正規分布とした確率モデルから、モンテカルロ法を用いた複数計算による不同沈下を評価し、舗装体のFEM解析から滑走路の供用性に対する改良効果を確率統計的に求める手法を提案した。また、実験結果を用いて不同沈下解析における適用性について検証し、モデル空港滑走路を用いたケーススタディによって、上層部分改良による合理的な液状化対策の検討例を示した。以下に得られた結論および今後の課題を述べる。

### (1) 結論

- ・ 模型振動台実験では、液状化対策として溶液型薬液注入工法を適用し、液状化対象層を平面的に一定厚残す上層部分改良が、地表面の沈下および不同沈下の抑制に有効であることを確認した。また、本実験条件下では、改良率70%程度でも改良率100%と同等な改良効果を有していることが分かった。
- ・ 本評価法による実験結果との検証では、液状化抵抗率を算定するための地震応答解析に等価線形法を用い、沈下形状の対応が概ねよいことが分かった。絶対的な沈下量については、本評価法が実験結果に比べて過大に評価する傾向があった。
- ・ 本評価法を用いたケーススタディでは、モンテカルロ法による確率統計的な手法によって舗装面の勾配分布を算出した。また、滑走路の供用性指標として舗装面勾配による規定を取り入れ、規定勾配を逸脱する割合を要補修率と定義することで改良効果を定量的に評価した。その結果、改良範囲に応じた要補修率の変化や、重点的な改良が必要なエリアを把握できた。

### (2) 今後の課題

- ・ 沈下量に対する精度を高めるためには、相対密度を考慮した改良層の薬液濃度と体積ひずみの関係を明らかにするとともに、地盤の液状化による強い非線形性を考慮できる地震応答解析を適用する必要がある。
- ・ 滑走路の供用性指標として、勾配による規定のみならず、舗装面クラックの有無や地盤支持力の回復に

ついて過剰間隙水圧比の経時変化を予測するなど、統一的な指標について検討の余地がある。

- ・ 滑走路直下の更なる合理的な液状化対策に向けて、対象空港の重要性から被災後の補修可能日数等を考慮し、許容できる要補修率を設定するなどのライフサイクルコストの検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省航空局：平成18年度地震に強い空港のあり方検討委員会報告，平成19年。
- 2) (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），平成9年。
- 3) 土田 孝，小野憲司：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用，港湾技術研究所報告，第27巻，第4号，pp.127-143，1988。
- 4) 宮田正史，井合 進，一井康二：液状化による不同沈下の予測手法の開発，港湾技術研究所資料，No.908，1998。
- 5) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992。
- 6) (財)沿岸開発技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル（改訂版），平成20年。
- 7) (財)沿岸開発技術研究センター：液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル，平成19年。
- 8) 大島貴充，風間基樹，仙頭紀明，河村健輔，林 健太郎：溶液型薬液改良砂の液状化抵抗および繰返しせん断後の変形特性の評価，土木学会論文集（印刷中）。
- 9) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設の設計基準・同解説，平成20年。
- 10) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設耐震設計要領及び設計例，平成20年。
- 11) 井合 進：1g場での地盤-構造物-流体系の模型振動実験の相似則，港湾技術研究所報告，第27巻，第3号，pp.3-24，1988。
- 12) 吉見吉昭，福武毅芳：地盤液状化の物理と評価・対策技術，2005。
- 13) 運輸省第一港湾建設局：平成2年度新潟空港液状化対策工法調査報告書，平成2年。
- 14) (社)日本道路協会：舗装設計便覧，pp.113-118，平成18年2月。

(2008年9月18日受付)