

# 海上空港の性能規定に基づく 締固め工法により改良された地盤の 支持力及び変形照査

復建調査設計株式会社 金子 智之

## 1. 背景

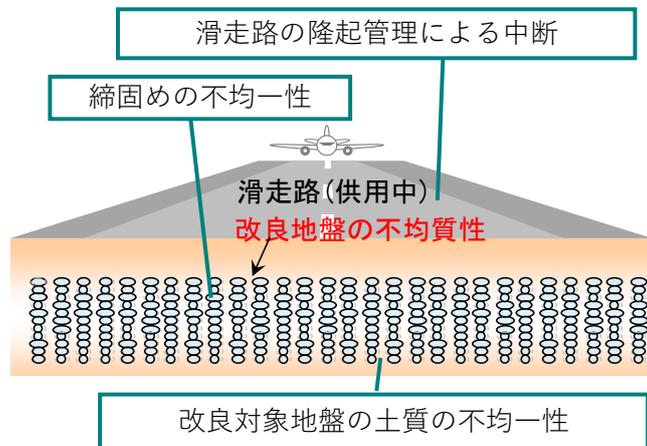
### (1)液状化対策を目的とした改良地盤の不均質性

- ✓ 港湾や空港施設の液状化対策において、設計通りの改良ができず、改良後地盤のせん断強度や液状化強度等に**大きなばらつきが生じる**事がある。

#### 想定される不均質性の原因

- ✓ 元々の**改良対象地盤の土質**の不均質性
- ✓ 密度増大工法に分類される締固め工法  
⇒ **締固め**の不均一性
- ✓ 供用中の滑走路直下の地盤改良  
⇒ **滑走路の隆起管理値**に達したことによる  
地盤改良の中断

#### 不均質な改良地盤のイメージ

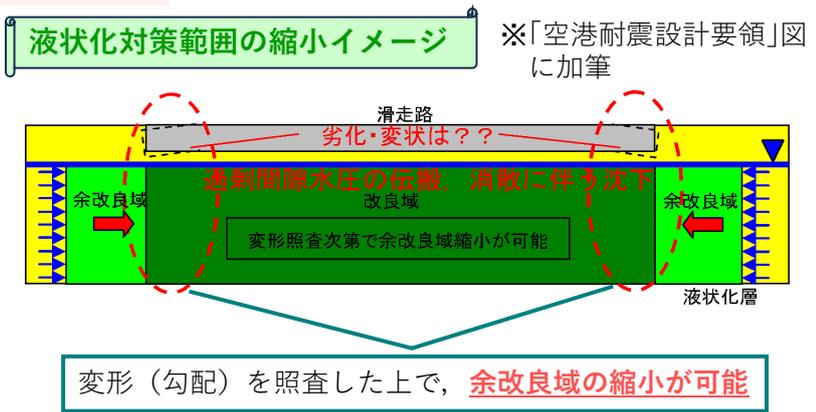


- ✓ 改良ブロックの中の一部の深度が液状化するような不均質な改良後地盤に対しては、**従来のチェックボーリング地点毎の改良後N値の確認のみでは評価が困難**。
- ✓ **改良ブロックの地盤全体としての性能評価手法の確立**が課題である。

# 1. 背景

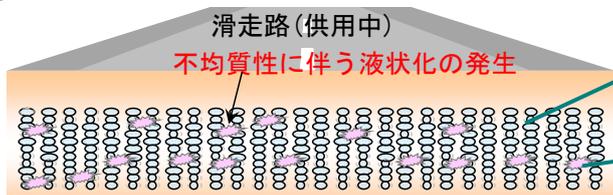
## (2) 従来の締固め工法による改良後地盤の品質評価

- ✓ 締固め工法の品質評価は、杭間の改良後N値に基づき、**地盤全体として液状化しないことを確認**する。
- ✓ 「空港耐震設計要領」では、余改良範囲を縮小する場合には、**滑走路の性能である変形(勾配)を照査**する必要がある旨が示されている。



## (3) 不均質な改良後地盤の品質評価

### 不均質な改良地盤のイメージ



設計通りに圧入されず、**不均質に改良された地盤**

**液状化する範囲**が散在

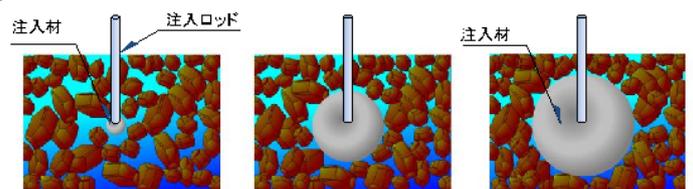
- ✓ 液状化範囲が残る不均質に改良された地盤でも **同様に性能評価が必要**
- ✓ 液状化範囲が散在するため、**新たな方法による性能評価**が必要

# 2. 不均質な改良地盤の性能評価手法

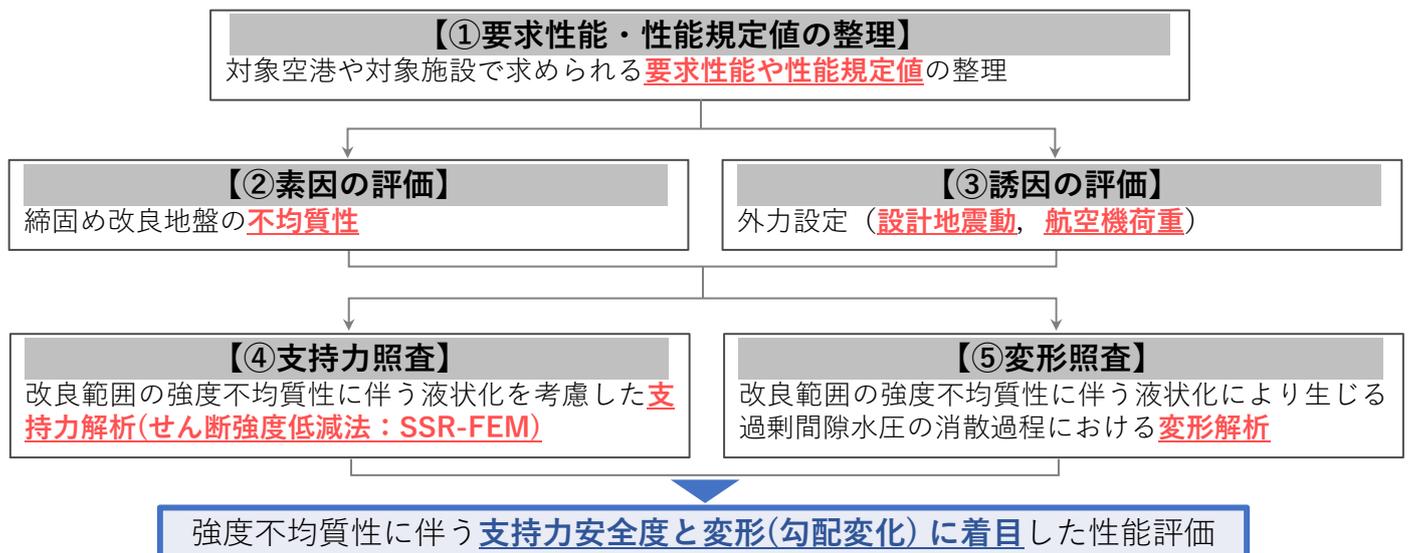
- ✓ 部分的に**液状化する範囲が残る不均質な改良地盤**に対する性能評価手法を提案。

A空港の**静的圧入締固め工法(CPG工法)**による改良地盤を対象に性能評価を実施

### 締固め工法のイメージ(CPG工法の例)



### 本研究で提案する性能評価の流れ



# 3. 空港に求められる要求性能と性能規定値

## (1) 空港に求められる要求性能

- ✓ 平成17年8月，国土交通省航空局に設置された「地震に強い空港のあり方検討委員会」では、**地震時に求められる空港の役割**が示されている。
- ✓ 「航空輸送上重要な空港(羽田、成田、関空、中部、新千歳、伊丹、福岡)」では，下記の機能等が求められている。

段階	求められる機能
発災後極めて早期の段階	・救急、救命活動等の拠点としての機能
発災後3日以内	・緊急物資、人員等輸送受け入れ機能 ・定期民間航空機の運航が可能となる機能

## (2) 性能規定値

- ✓ 大規模地震時における空港の性能規定値としては，**航空法に規定される勾配を確保**することや，航空機荷重に対して，**必要な地盤の支持力を確保する**ことが求められている。

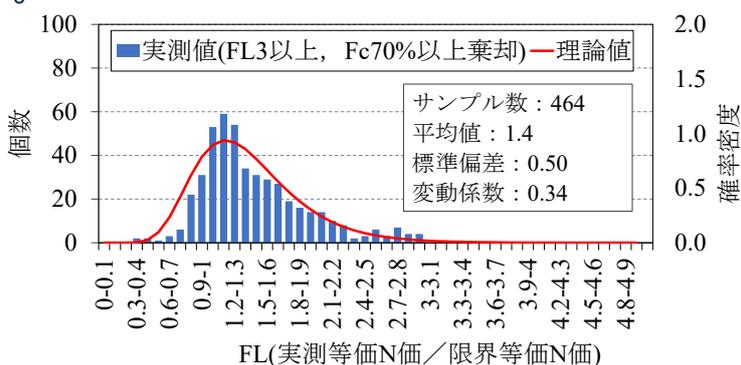
滑走路の長さ		800m未満	800m～1,200m	1,200m～1,800m	1,800m以上	対象航空機の翼幅	最大横断勾配
最大縦断勾配	滑走路末端から滑走路長の1/4以下の距離にある部分	2.0%	2.0%	1.5%	0.8%	15m未満	2.0%
	上記以外の部分	2.0%	2.0%	1.5%	1.25%	15m以上24m未満	2.0%
						24m以上36m未満	1.5%
						36m以上52m未満	1.5%
						52m以上65m未満	1.5%
						65m以上80m未満	1.5%

# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

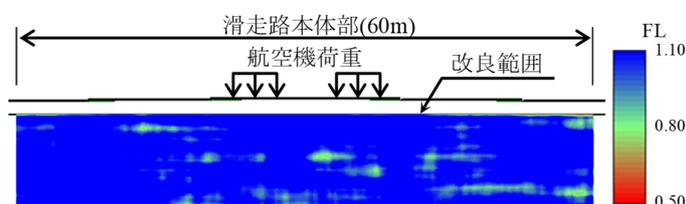
## 4.1 A空港の締固め改良地盤の不均質性評価結果

- ✓ A空港は，海上を埋め立てて造成された空港であり，L2地震動時の液状化に対して，**主に静的圧入締固め工法による対策**が急がれている。
- ✓ 改良地盤の不均質性を事後調査結果に基づく  $F_L$  の **ばらつきにより評価**した。
- ✓ 算出した  $F_L$  は，データサンプル数464個に対して，平均値は1.4，変動係数0.50となり，この分布は**対数正規分布に適合**した。
- ✓ この  $F_L$  分布の平均値  $\mu$ ，変動係数  $COV$ ，自己相関距離  $\theta$ ，及び正規乱数行列  $X$  から，**コレスキー分解を用いたmid-point法により100ケースの  $F_L$  分布を計算**した。

### 事後調査結果に基づく $F_L$ 分布



### $F_L$ 分布の100ケースの一例



この  $F_L$  分布を考慮したモンテカルロシミュレーションにより**支持力及び変形照査**を実施

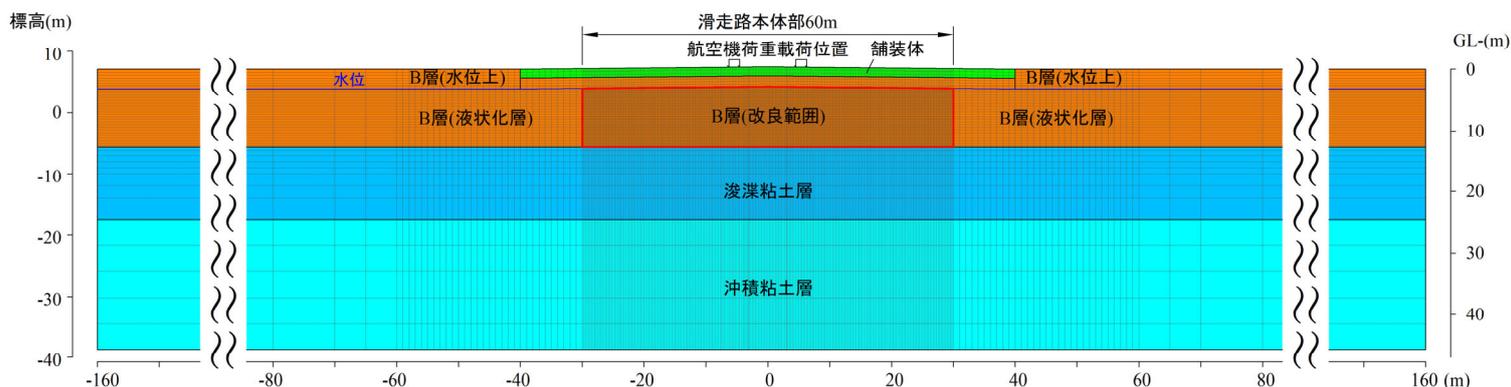
# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

## 4.2 (1)支持力解析方法及び解析条件

- ✓ 支持力解析のプログラムコードは、**FEMによるせん断強度低減法「SSR-FEM」**とした。
- ✓ 主に**埋立て土層であるB層が液状化対象層**であり、**改良層厚は9m程度**とした。
- ✓ 航空機荷重は、A空港において想定される**LA-1機材の中で最大となるB777-9**とした。
- ✓ **FLのばらつきを評価するため**、ランダム場理論により得られた各要素の $F_L$ に基づき、**下式①より過剰間隙水圧比を設定し、下式②より各要素のせん断強度を設定**した。

①  $\Delta u / \sigma_{v0}' = F_L^{-7}$       ②  $\tau_f = (\sigma_{v0}' - \Delta u) \cdot \tan \phi$

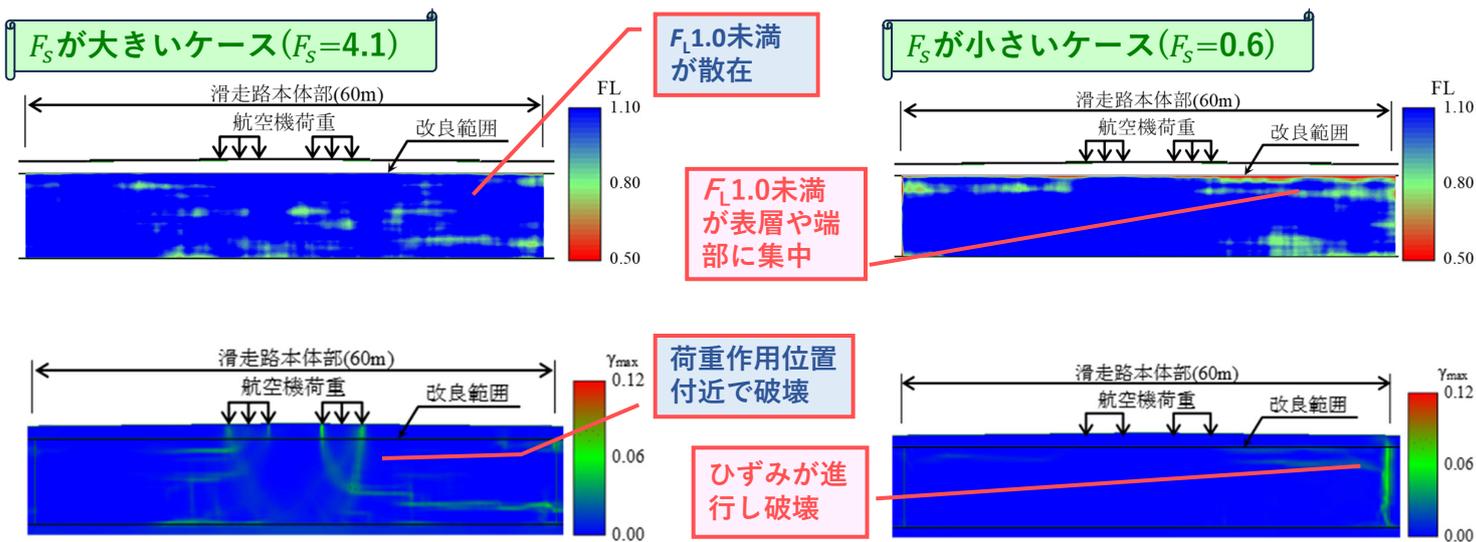
### 解析モデル及び解析メッシュ



# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

## 4.2 (2)支持力解析結果

- ✓ 100回のモンテカルロシミュレーションによる**全体安全率は平均2.9程度**となった。
- ✓  $F_L$ が1.0未満の要素が散在する場合や深い位置にあると、**安全率は比較的大きく**なり、荷重作用位置付近ですべり破壊する傾向が見られた。
- ✓  $F_L$ が1.0未満の要素が表層や改良範囲の端部に連続すると、**安全率が比較的小さく**なり、 $F_L$ が1.0未満の要素範囲に沿ってせん断ひずみが進行し、破壊に至る傾向が見られた。



# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

## 4.3 (1)変形解析方法及び解析条件

- ✓ 解析モデル及び航空機荷重は、**支持力解析と同様**に設定した。
- ✓ 改良範囲及び液状化層の構成式は、**過剰間隙水圧消散解析プログラム「FLIPDIS」の指数関数モデル**とした。

$$E = E_0(\sigma_{m0}'/\sigma_{ma}')^{1/2}/(\exp(aR - b) + 1.0)$$

- ✓ 上記Rは過剰間隙水圧比であり $F_L$ のばらつきを評価するため、**前述のランダム場理論により得られた各要素の $F_L$** に基づき、下式より求めた。

$$R = \Delta u/\sigma_{v0}' = F_L^{-7}$$

### 変形解析定数

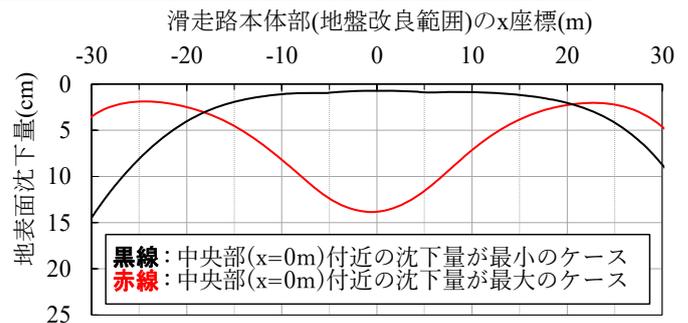
層名	単位体積重量		ポアソン比 $\nu$	弾性係数 $E_{50}$ (kN/m <sup>2</sup> )	せん断強度		弾性係数 $E_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	透水係数 $k$ (cm/s)	パラメータ	
	湿潤 $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	飽和 $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )			$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)			$a$	$b$
舗装体	20.7	20.7	0.35	-	-	-	502,700	1.0E-03	-	-
B層(地下水位上)	18.5	18.5	0.33	27,000	0.0	39.0	180,900	2.0E-04	-	-
B層(改良範囲)	18.5	18.5	0.33	55,000	0.0	41.0	287,300	2.0E-04	9	4
B層(液状化層)	18.5	18.5	0.33	2,700	0.0	5.0	180,900	2.0E-04	9	4
浚渫粘土層	16.5	16.5	0.33	8,000	100.0	0.0	127,700	1.0E-06	-	-
沖積粘土層	15.5	15.5	0.33	8,000	140.0	0.0	93,100	1.0E-06	-	-

# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

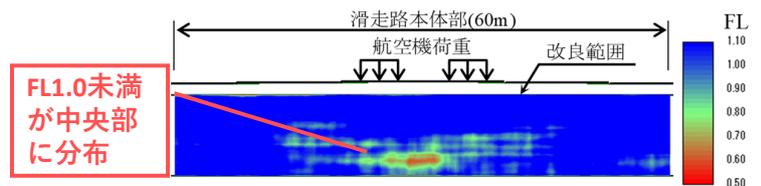
## 4.3 (2)変形解析結果

- ✓ 100回のモンテカルロシミュレーションから得られた、滑走路中央部(x=0m)付近における**地表面沈下量は0.7cm~14cm(平均4.9cm)程度**となった。
- ✓ 沈下量の大きくなる $F_L$ が1.0未満となる要素の分布状況により、**地表面沈下量の分布形状が大きく異なる傾向**となった。

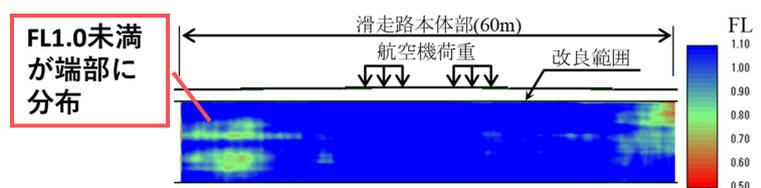
### 中央部沈下量が最大と最小ケースの比較



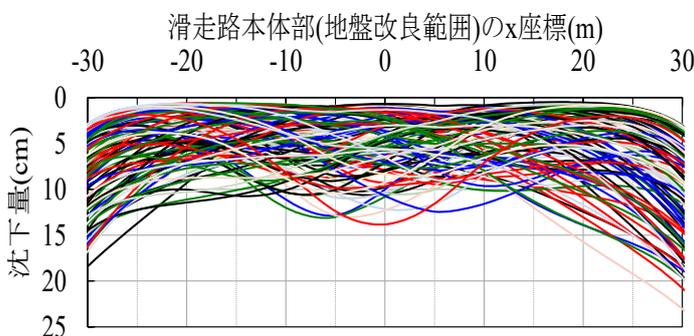
### 中央部沈下量が最大ケース(下図赤線)の $F_L$ 分布



### 中央部沈下量が最小ケース(左図黒線)の $F_L$ 分布



### 100ケースの地表面沈下量分布



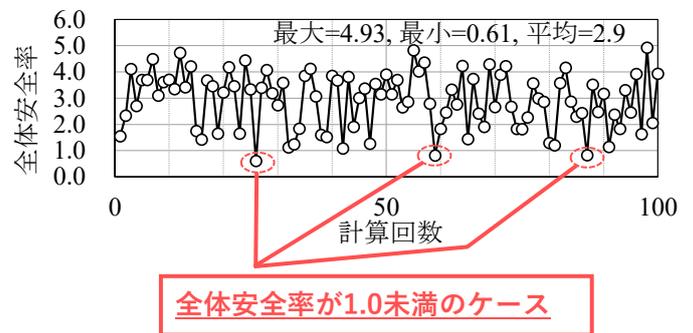
# 4. A空港の締固め改良地盤の性能評価

## 4.4 性能評価手法の提案

### 支持力照査

- ✓ 支持力解析の結果、全体安全率は平均2.9程度、全体安全率が1.0未満のケースは3ケースとなった。
- ✓ 即ちその割合は全体の3%となるため、例えば極限支持力を信頼性下限値95%とすると地盤全体として支持力性能を満足しているものと判断することができる。

### 100ケースの全体安全率



### 変形照査

- ✓ 地震前の滑走路形状に、地震後の沈下量を加えた形状を求め、その勾配と設計限界値を比較することで滑走路の性能を照査可能である。
- ✓ ただし、滑走路の勾配の分母となる区間距離には特に定められたものが無いため、施設管理者が施設毎に事前に決めておく必要がある。

# 5. まとめ

- ✓ A空港の改良後地盤における $F_L$ 分布を考慮したランダム場理論に基づく100ケースの地盤モデルに対して、支持力及び変形に対するモンテカルロシミュレーションを行った。
- ✓ その結果に基づく性能規定型の評価手法を示した。



- ✓ 今後、 $F_L$ 分布を変化させたケーススタディ等を追加し、対象の港湾や空港における性能規定に基づく支持力及び変形について、簡易に判断ができる手法を提案したい。
- ✓ また、最低限必要となる事後調査データやそのデータ数等についても提案していきたい。

**ご清聴ありがとうございました**