

確率・統計的アプローチに基づく 固化処理地盤の性能照査

九州大学大学院 笠間清伸

バラツキの原因

- ①固化材の混合の不均一性
- ②対象地盤の土質の不均質性
- ③サンプリング時の乱れ

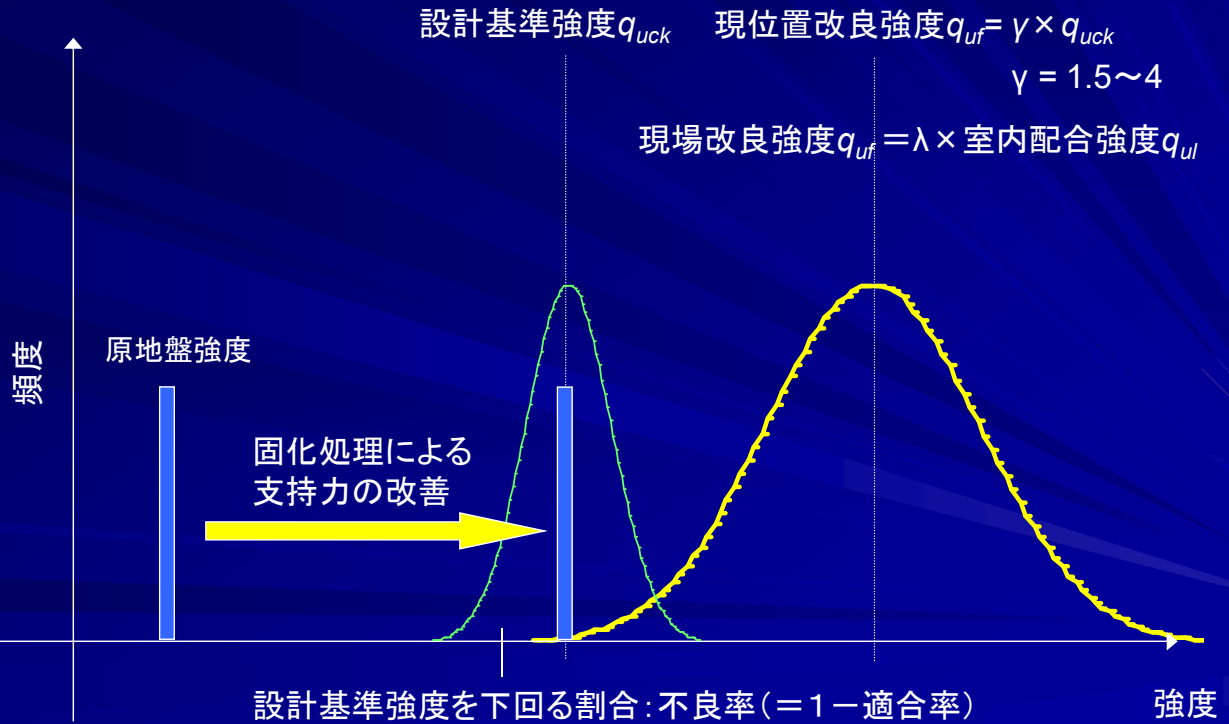


地盤がきちんと評価されているか？

多量の固化材

安全側の強度を採用する →コスト高

研究の背景



固化処理地盤の強度のバラツキ

4

第16回地盤改良シンポジウム(2024年10月): 軟弱地盤の地盤物性及び深層混合処理の施工状況が改良体の品質に与える影響に関する一考察(土木研究所G)
 過去10年間で実施された道路事業における軟弱地盤対策工事の実績データ

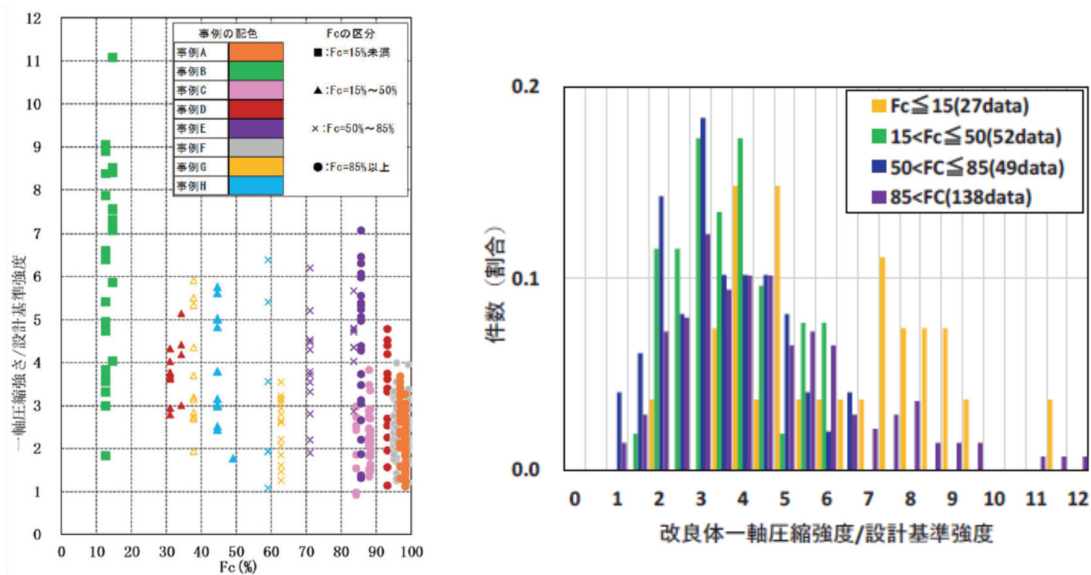


図-8 改良体強度比と原地盤の細粒分含有率

固化処理地盤の強度

平均値 変動係数

改良工法	Depth (m)	Cement Type	Amount Cement (kg/m ³)	Curing Period (day)	w (%)	Sample #	μ_{qu} (kPa)	COV_{qu}
深層混合処理 (海上)	-8.0~-19.0	NP	140	28	95~135	176	2140	0.358
	-9.0~-22.0	NP	150	28, 49	110~150	222	3920	0.353
	-12.5~-36.0	SP	14	28	55~110	182	3760	0.440
	-9.0~-39.0	NP	135	60	100~130	26	3370	0.331
	-1.0~-8.0	SP	150	28~52	90~100	29	3770	0.485
—	Cement milk	15	—	—	30	790	0.290	
深層混合処理 (陸上)	-2.0~-8.0	NP	74	28	110~140	54	230	0.480
	0.0~-7.0	—	150	28	—	47	2360	0.420
	0.0~-10.0	Special cement	250	28	100~200	493	3660	0.140
	0.0~-4.0	NP	—	—	—	36	2820	0.423
事前混合処理	—	SP	7.5%	91	6.5 ³⁾	32	661	0.470
	—	SP	3%	28	9.4 ³⁾	13	360	0.990
	—	SP	4%	28	11.8 ³⁾	25	120	0.750

コンクリート・鋼材などの人工材料のCOVは0.1
 自然堆積地盤の変動係数COVは、0.2~0.4
 固化処理地盤のばらつきの大きさはより大きい

自己相関距離

意味: 強度の水平・鉛直方向における相関性
 大→滑らかに変化 小→ばらつきが激しい

自然堆積地盤: 水平 $\theta_h=50-200m$, 鉛直 $\theta_v=2-4m$

Type of Ground	Reference Strength	COV	水平 θ_h (m)	鉛直 θ_v (m)	Reference
深層混合処理	一軸圧縮試験 q_u	0.21-0.36 (clay) 0.32-0.40 (sand)	-	0.4-4.0	Honjo (1982)
セメント混合 浚渫粘土	CPT	0.114-0.194	2.0	0.5	Tang et al., (2001)
管中混合処理 した浚渫粘土	CPT	-	-	0.22-0.74	Porbaha et al., (1999)
深層混合処理	一軸圧縮試験 q_u	0.34-0.74	12.0 (wet mix) <3.0 (dry mix)	-	Navin & Filz (2005)
Lime-Cement Columns	手動貫入試験	<0.6	$\theta_R < 0.15$ $\theta_O < 0.35$	-	Larsson et al., (2005)

固化処理地盤の水平方向の自己相関距離は、自然堆積地盤より
 ワンオーダー小さい→ランダム性が高い

固化処理地盤の特性値（自己相関距離など） 7

Effect of spatial variability on short- and long-term behavior of axially-loaded **cement-admixed marine clay column**, Pan et al., Computers and Geotechnics, Volume 94, 2018, Pages 150-168.

Table 4
Statistical characteristics of cement-admixed soils.. Source: Liu et al. [33]

自己相関係数

References	Test (Result)	Mean Value 平均値	COV 変動係数	Scale of fluctuation ^a (m)		Skewness	Kurtosis	Marginal Distribution
				Vertical	Horizontal			
Honjo [23]	Unconfined Compressive Test (UCS)	0.6–8.0 MPa	0.21–0.36(clay) 0.32–0.4(sandy soils)	0.8–8.0	–	–1.19 to 2.55	2.7–4.4	Normal
Babasaki et al. [5]	Unconfined Compressive Test (UCS)	–	0.22–0.27	–	–	–	–	–
Hedman and Kuokkanen [22]	Hand-operated penetrometer test (c_u)	–	–	0.38–1.12	0.07–0.33 ^c	–	–	–
Navin and Filz [37]	Unconfined Compressive Test (UCS)	1.0–4.7 MPa	0.34–0.79	–	Approximate 24.0	–	–	Lognormal
Larsson et al. [28], Larsson et al. [29] ^c	Hand-operated penetrometer test (c_u)	–	<0.60	–	Radial:<0.13 Orthogonal:<0.32 ^c	–	–	–
Larsson and Nilsson [30]	Cone penetration test (Tip resistance)	–	0.20–0.60	–	1.8–3.6	–	–	–
Chen et al. [9] (MFBC)	Unconfined Compressive Test (UCS)	2.0–2.7 MPa	0.29–0.46	–	–	0.48–1.34	–	–
(NCHS)	Unconfined Compressive Test (UCS)	3.2–4.5 MPa	0.29	–	–	–1.4 to 0.7	–	–
Al-Naqshabandy et al. [3]	Cone penetration test (Tip resistance)	–	0.22–0.67	0.2–0.7	2.0–3.0	–	–	–
Namikawa and Koseki [38]	Unconfined compressive test (UCS)	1.7 MPa	0.2–0.4	–	–	–	–	Normal
Bruce et al. [6]	Unconfined Compressive Test (UCS)	0.7–2.1 MPa	0.34–0.79	–	–	–	–	–
Chen et al. [10]	Binder concentration	29%	0.19	–	–	–	–	Normal
Liu et al. [34] ^b (MFBC)	Unconfined Compressive Test (UCS)	1.7 MPa	0.42	–	–	1.10	4.67	Beta-distribution
(Marina One)	Unconfined Compressive Test (UCS)	2.1 MPa	0.44	–	–	1.31	4.78	Beta-distribution

^a The concept "auto-correlation distance" used in some studies (e.g. [38]) is converted to "scale of fluctuation" [50].

^b Liu et al. [34] normalized the strength to 28-day equivalent strength to eliminate the effect of curing period.

^c SOF within the column cross-section.

固化処理地盤の特性値（自己相関距離など） 8

Effect of in situ water content variation on the spatial variation of strength of **deep cement-mixed clay**, Y. Liu, L. Q. He, Y. J. Jiang, M. M. Sun, E. J. Chen, and F.-H. Lee Géotechnique 2019 69:5, 391-405

自己相関係数

Table 1. Summary of scales of fluctuation

Parameter	Reference	Soil type or mixing method	Scale of fluctuation: m	
			Vertical	Horizontal
In situ water content 含水比	Diaz-Padilla (1974)	Soft organic silty clay	2.4–3.7	–
	Alonso & Krizek (1975)	Chicago drift soil	<0.7	–
		London clay	<2.5	–
		Mexico City clay	<1.6	–
	Western & Grayson (1998)	Soft silty loam	<5.0	–
		Tarrawarra catchment soil in south-eastern Australia	–	70–100 (wet winter period) 100–120 (dry summer period) 170 on average (for clay)
	Phoon & Kulhawy (1999)	Clay, loam	1.6–12.7	–
	Akbas & Kulhawy (2010)	Ankara clay	2.5–5.5	–
	Grote et al. (2010)	Sandy loam and clay loam	–	60–100
	Current study based on two projects	Singapore marine clay	6	100–200
Binder mass fraction 固化材	Current study based on centrifuge model tests	Kaolin clay	Between 1.0 and 3.33 m; (average: 2.18)	Radial direction: between 0.12 and 0.28D; (average: 0.17D) Circumferential direction: between 67 and 133°; (average: 89°)
Strength of cement- (or lime-) admixed soils 強度	Honjo (1982)	–	0.8–8.0	–
	Larsson et al. (2005)	Dry method (lime-cement columns)	–	Radial direction: <0.22D Circumferential direction: <0.32 m (angular SoF ~ 59°)
	Navin (2005)	Wet method	–	24.0–37.0
	Larsson & Nilsson (2009)	Dry method (lime-cement columns)	–	1.8–3.6
	Al-Naqshabandy et al. (2012)	Dry method (lime-cement columns)	0.2–0.7	2.0–3.0
	Bergman et al. (2013)	Dry method (lime-cement columns)	0.08–0.77	<3.5
Current study based on two projects	Wet method	–	3.3	25

Note: D = diameter of column, which is 2.4 m (prototype) in centrifuge model in this study.

©Kiyonobu Kasama, Andrew J. Whittle, Masaki Kitazume, Effect of spatial variability of block-type cement-treated ground on the bearing capacity of foundation under inclined load (傾斜荷重を受けるブロック式固化処理地盤の支持力特性に与えるばらつきの影響), Soils and Foundations, 59, 6, 2125-2143, 2019.

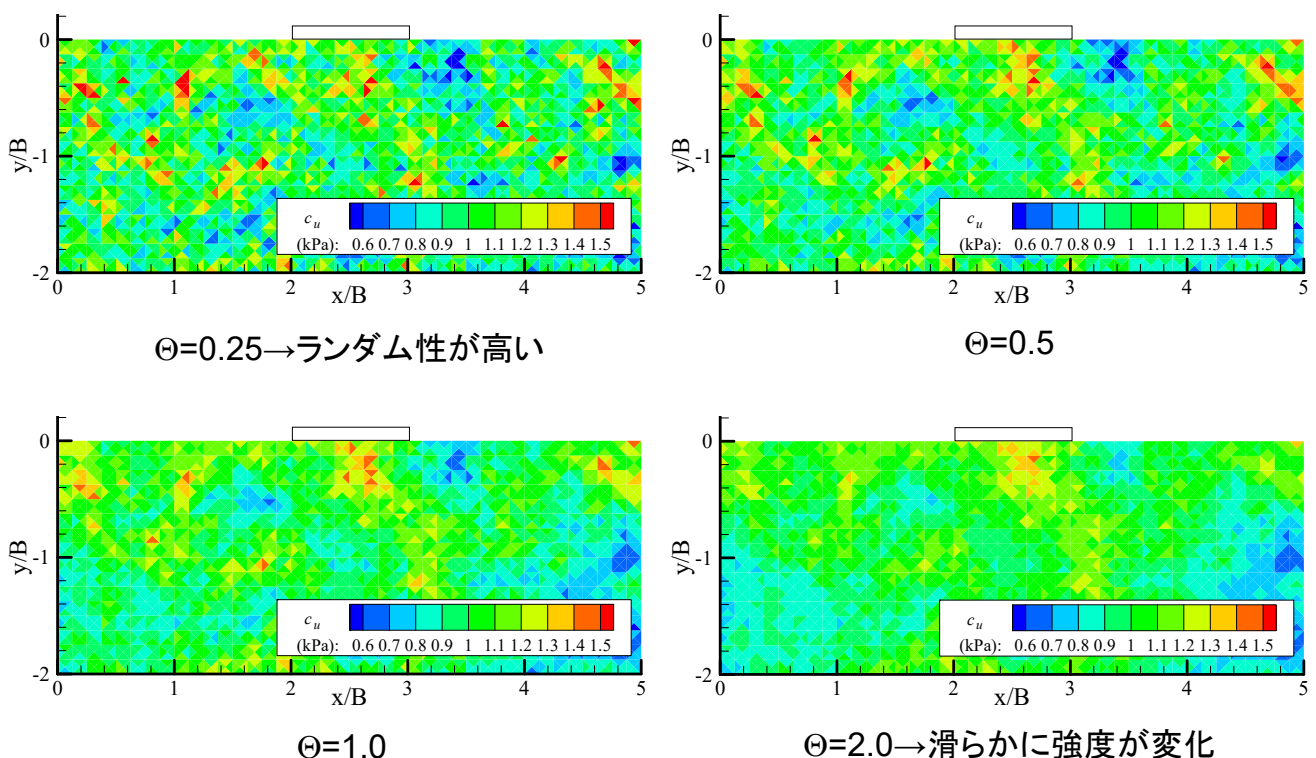
©笠間 清伸, 長山 達哉, 濱口 信彦, 杉村 佳寿, 藤井 照久, 金子 智之, 善 功企, 性能規定に基づく浸透固化処理地盤の支持力評価, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 78, No. 1, pp.45-59, March. 2022., https://doi.org/10.2208/jscejge.78.1_45, 2022.

笠間 清伸, 長山 達哉, 濱口 信彦, 杉村 佳寿, 藤井 照久, 金子 智之, 善 功企, 性能規定に基づく浸透固化処理地盤の地震後変形照査, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol. 78, No. 3, pp.235-250, Sep. 2022., https://doi.org/10.2208/jscejge.78.3_235, 2022.

笠間 清伸, 西田 啓介, 古川 全太郎, 秋本 哲平, 堤 彩人, 片山 遥平, 地盤定数の不均一性を考慮した浸透固化処理地盤の地震時変形解析, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 78, No. 2, pp.I_901-I_906, Oct. 2022., https://doi.org/10.2208/jscejoe.78.2_I_901, 2022.

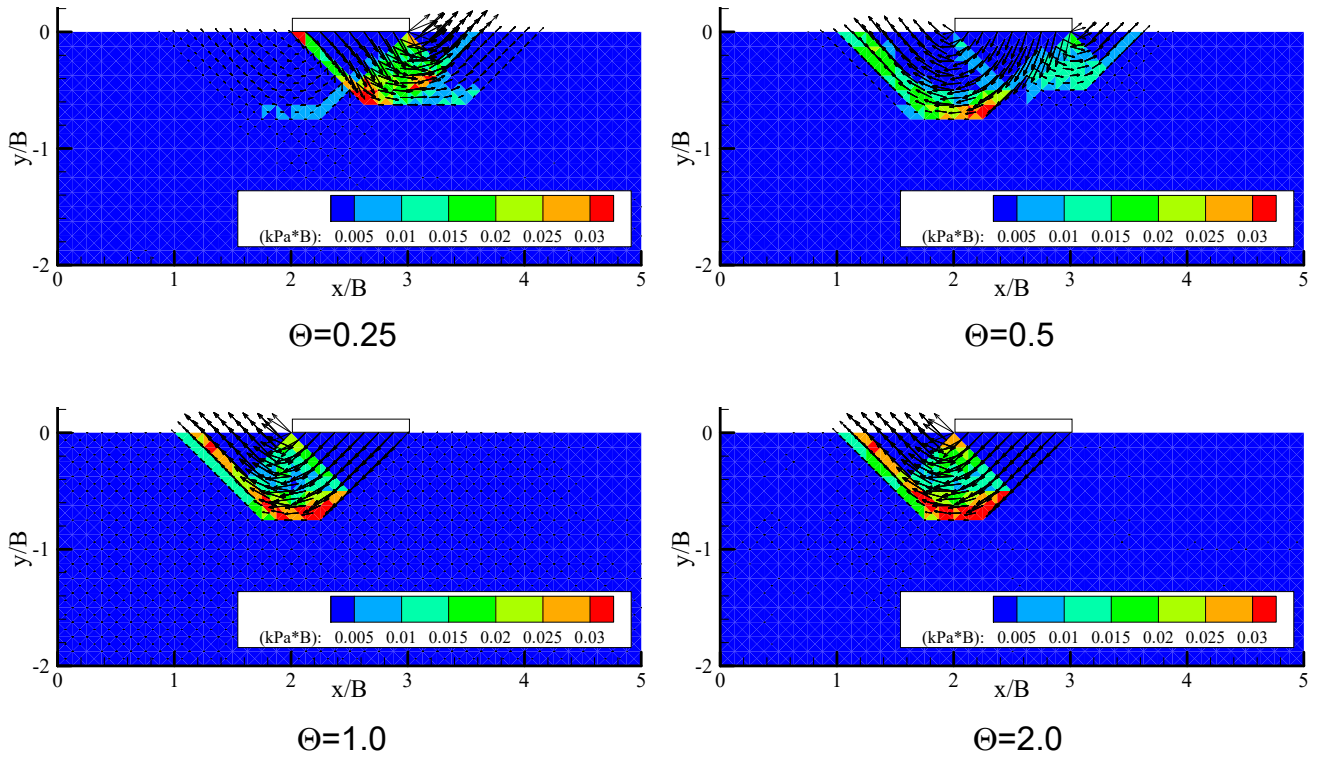
地盤のバラツキをパソコンで再現して解析

平均値と変動係数(変動幅)は同じで自己相関距離のみ異なる地盤



変位ベクトル図

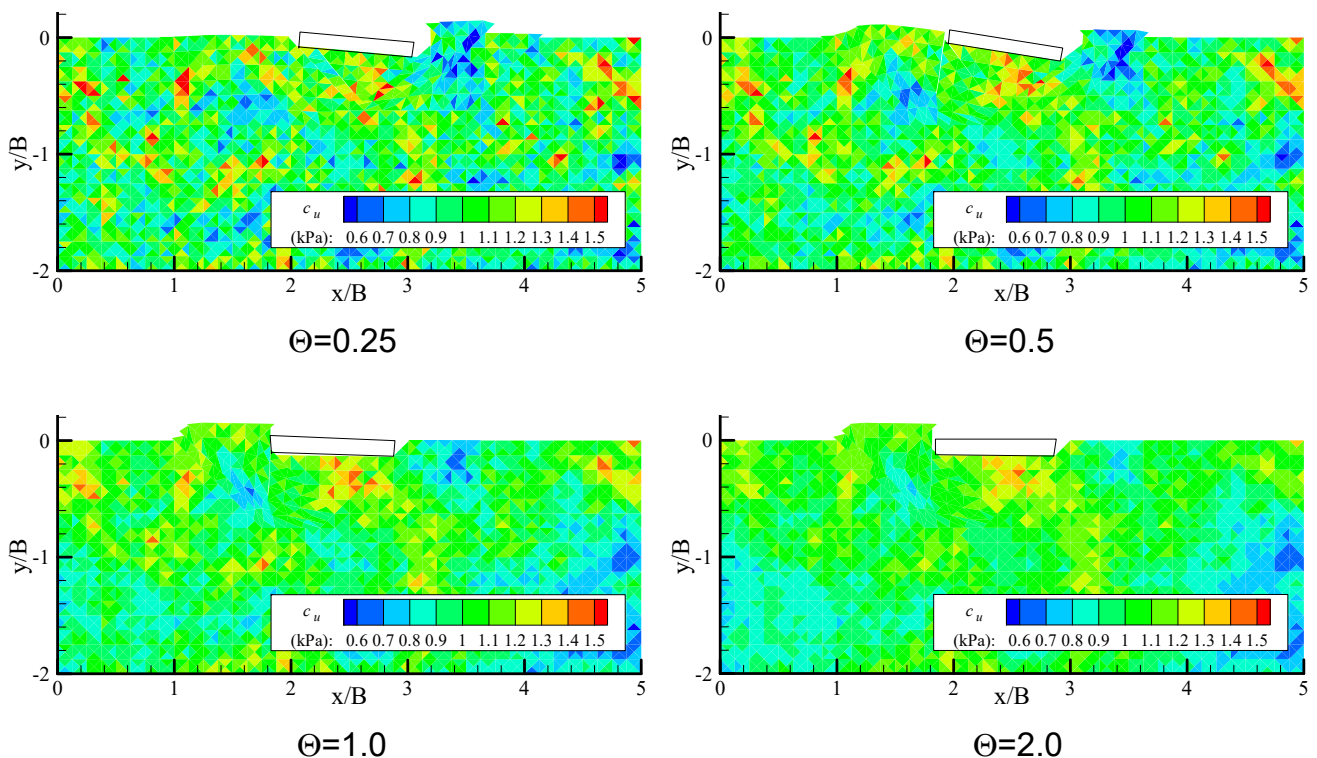
均一強度を仮定した際に理論的・解析的に得られる理想的な破壊モードは発現しない



弱部の存在・位置が重要となる

変形図

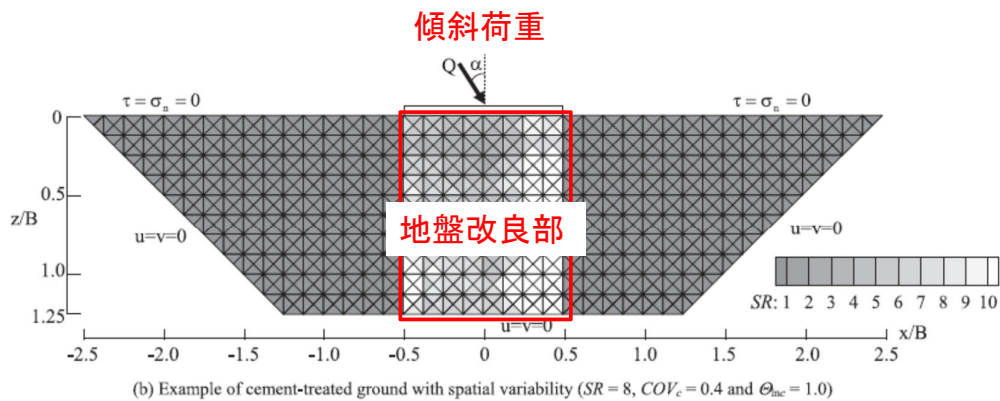
支持力および変形は、弱部の存在・強度のバラツキのパターンにより変わる



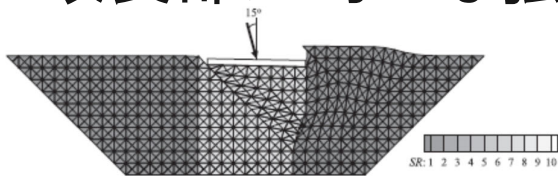
支持力および変形は、確率・統計的に評価する必要

ブロック式固化処理地盤の支持力特性 に与える地盤のばらつきの影響

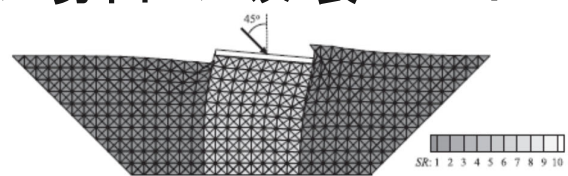
↓
基礎の直下がブロック状に
改良されている場合を想定



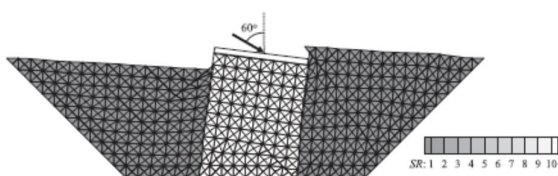
改良部が均一な強度の場合の破壊モード



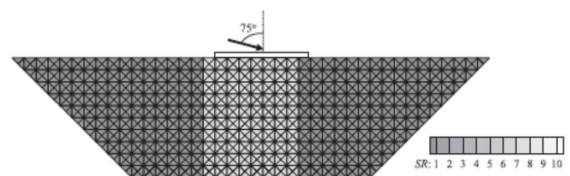
a) 片側破壊モード (載荷角 $\alpha = 15^\circ$)



b) 転倒破壊モード (載荷角 $\alpha = 30^\circ$)

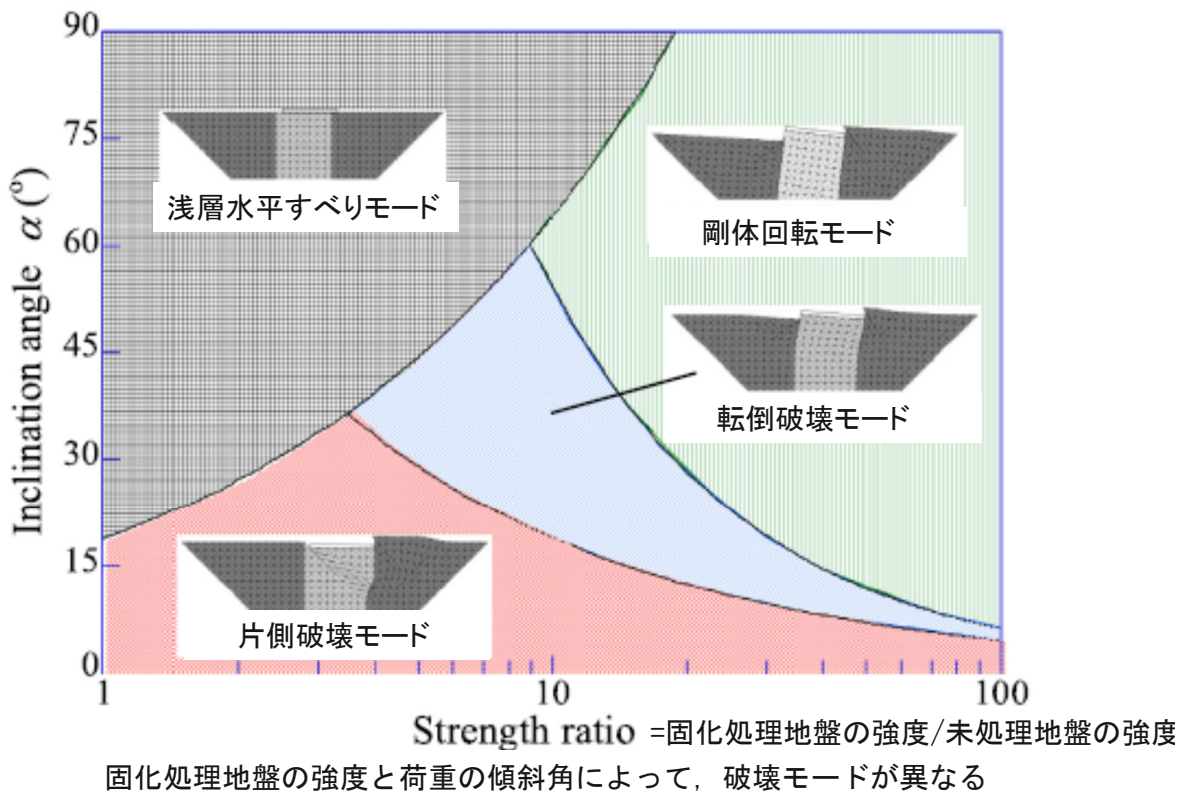


c) 剛体回転モード (載荷角 $\alpha = 60^\circ$)

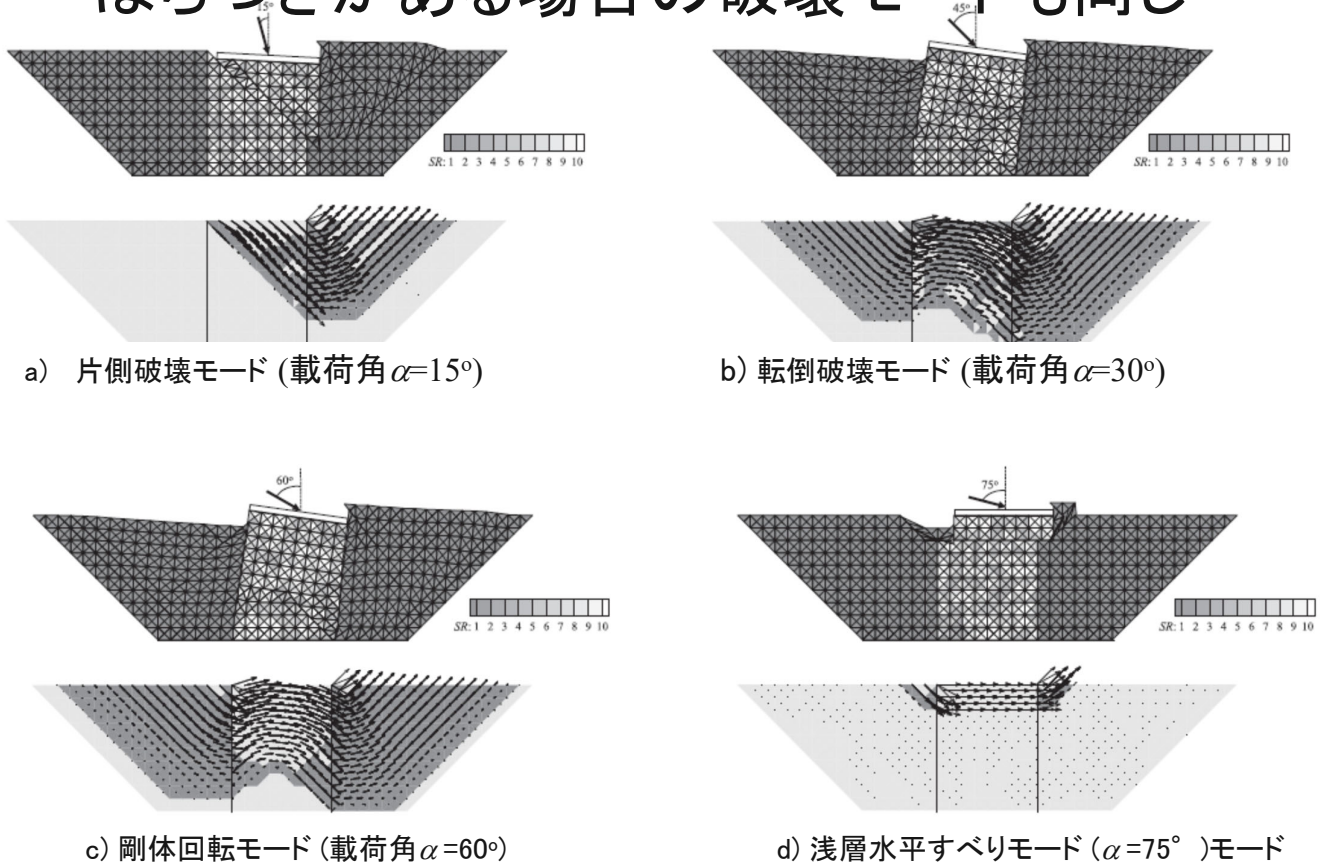


d) 浅層水平すべりモード ($\alpha = 75^\circ$) モード

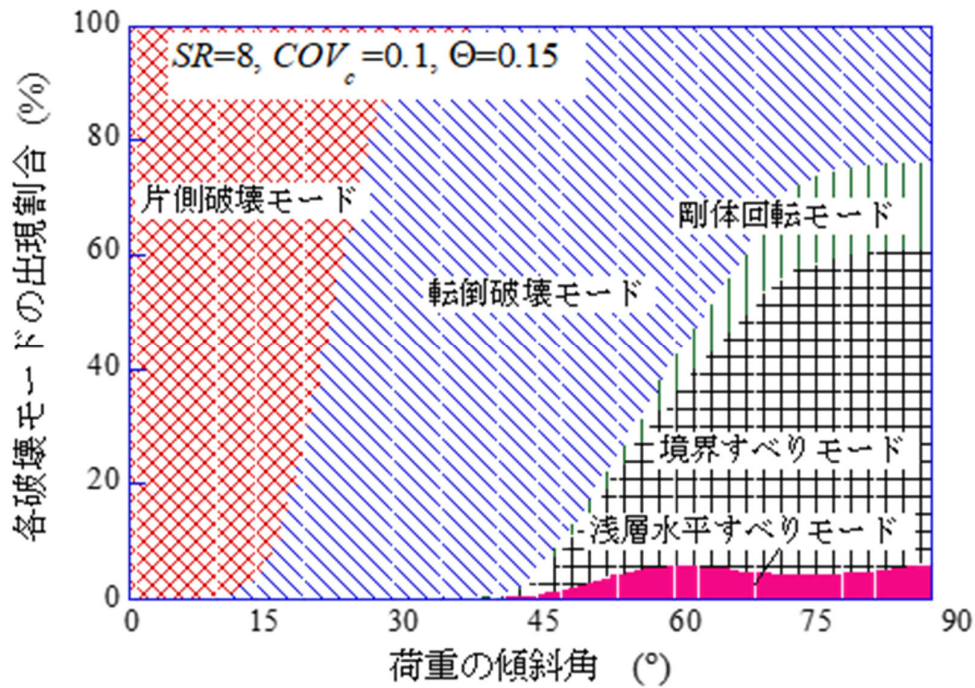
均一地盤の破壊モード



ばらつきがある場合の破壊モードも同じ

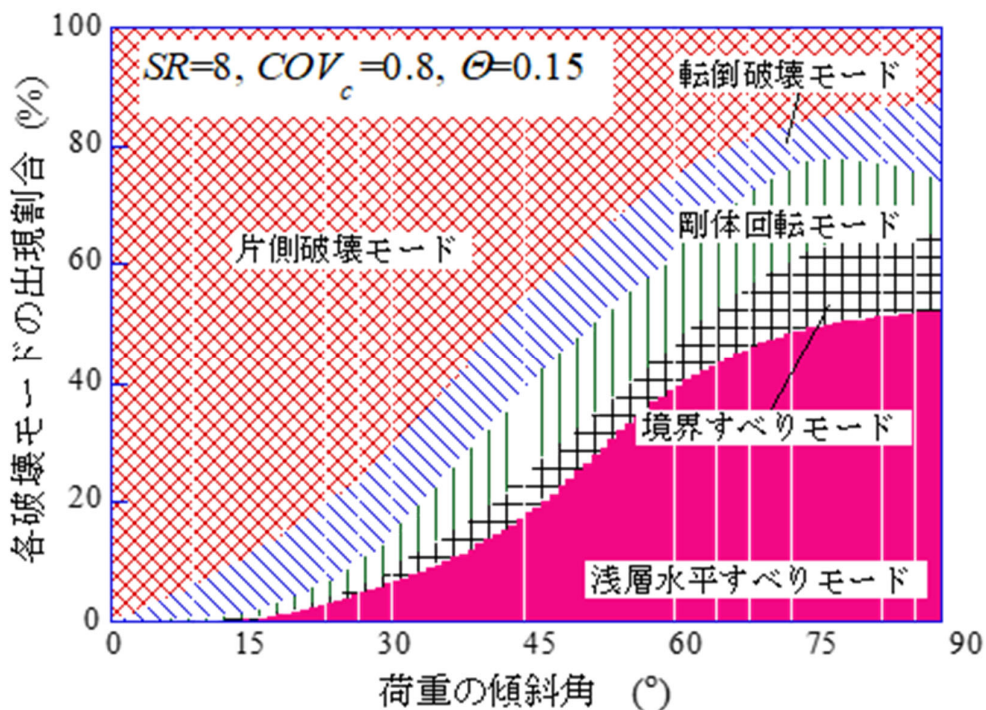


破壊モードの出現は、ばらつきの程度で決まる



ばらつきが小さいときは、転倒破壊モードが主たる破壊モード

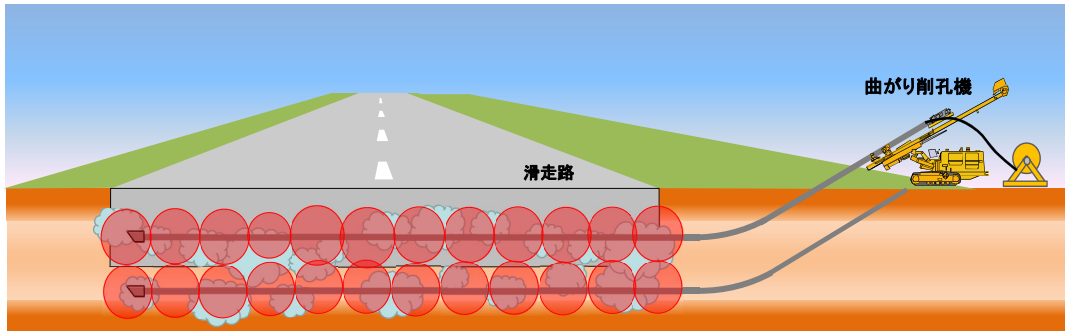
破壊モードの出現は、ばらつきの程度で決まる



ばらつきが大きくなると、片側破壊と浅層水平すべりが主たる破壊モード

性能規定に基づく浸透固化処理地盤の支持力特性

- ・浸透性の高い薬液を地盤に注入することにより、滑走路等構造物への影響を抑制して地盤改良することが可能な工法
- ・削孔は、直線部と曲線部を組み合わせることで施工することが可能で、滑走路等の構造物に影響無く施工できる工法



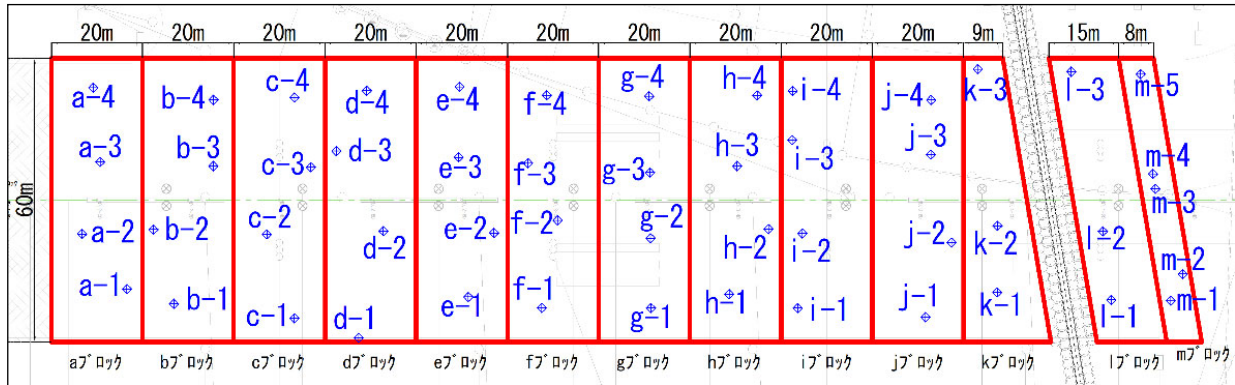
液状化対策として浸透固化処理工法が採用→浸透範囲や改良位置が不明瞭
 ↓
 さらに浸透固化処理工法で浸透範囲や改良位置を確認しながら改良
 ↓
 一次改良と二次改良が混在している地盤(強度が不均一な地盤)

想定シナリオと解析モデル

	(a)地震前	(b)地震中	(c)地震直後～数日経過後
シナリオ	<p>滑走路(供用中) 改良地盤の不均質性</p>	<p>滑走路(供用中⇒供用停止) 不均質性に伴う液状化の発生</p>	<p>滑走路(供用再開) 勾配確保・支持力確保を確認 透水性の低下に伴う過剰間隙水圧の残留</p>
解析モデル化方法	<ul style="list-style-type: none"> ・部分的に設計基準強度を満たさない箇所(下図, ■要素)をランダム場理論によりモデル化 ・一軸圧縮強さのばらつきの異なる地盤モデルを100ケース作成 ・滑走路範囲外の未改良地盤については、強度の不均質性を考慮しない <p>改良地盤の不均質性</p> <p>滑走路幅</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・地震力のばらつきは考慮しない ・L2地震動に対する一次元地震応答解析に基づき設計基準強度を設定 ・設計基準強度以上の要素(下図, □要素)は過剰間隙水圧比 0.0, 未満の要素(下図, ■要素)は 1.0 <p>□: 設計基準強度以上(過剰間隙水圧比 0.0) ■: 設計基準強度未満(過剰間隙水圧比 1.0)</p> <p>滑走路幅</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・地震直後より航空機荷重を考慮した水圧消散解析により滑走路の変形(勾配)を照査 ・航空機の走行に伴う衝撃も含む想定最大荷重を設定(荷重のばらつきは考慮しない) ・航空機載荷時の支持力評価については先行研究¹³⁾で確認済 <p>供用後を想定した変形(勾配)照査</p> <p>航空機荷重 供用後も過剰間隙水圧が残留</p> <p>滑走路幅</p>

事後調査の実施について

■ 事後調査の実施箇所



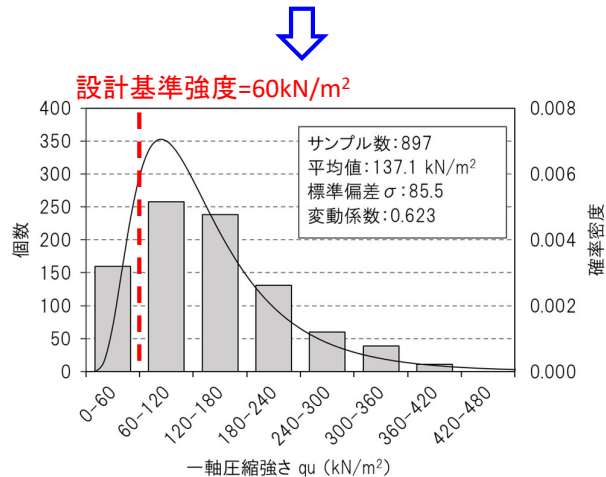
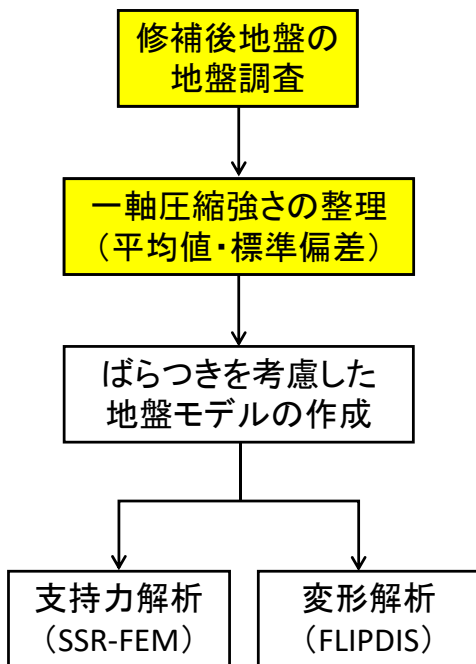
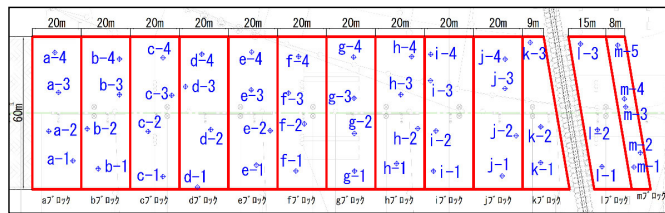
■ 事後調査による強度確認方法

通常は、乱れの少ない試料に対する一軸圧縮試験を実施

➡ 今回の調査では、より適切に強度確認が可能な原位置試験 (PDC試験) 等を活用

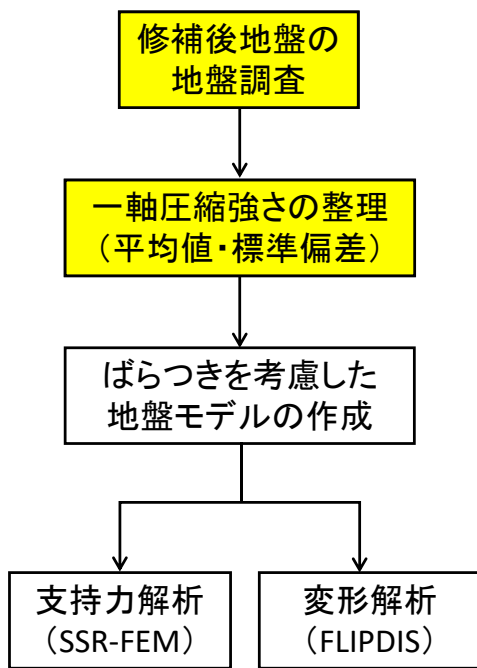
性能照査(一軸圧縮強さの整理)

約4地点/1ブロック(51地点)で調査



一軸圧縮強さを対数正規分布と仮定

各ブロックの適合率を計算



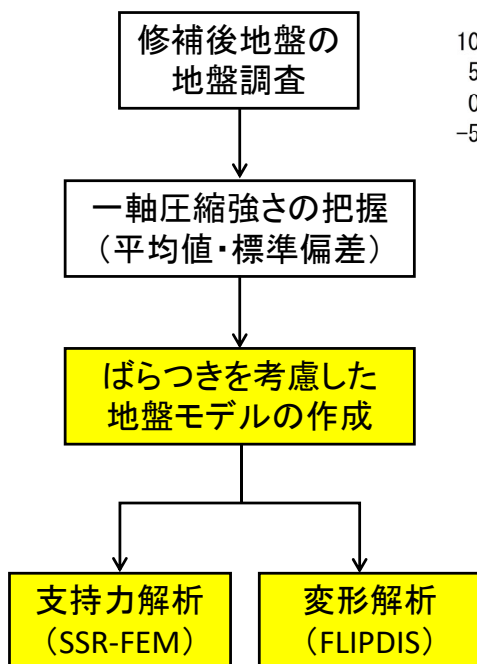
適合率: 設計基準強度=60kN/m²を上回る強度の割合
 不良率: 設計基準強度=60kN/m²を下回る強度の割合

表4 各ブロックにおける適合率

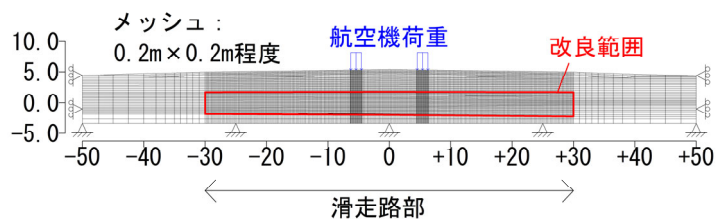
ブロック	調査地点数	一軸圧縮強さのデータ数	変動係数	適合率
a	4地点	86個	0.590	91%
b	4地点	82個	0.774	77%
c	4地点	83個	0.552	94%
d	4地点	81個	0.654	86%
e	4地点	65個	0.846	62%
f	4地点	68個	0.638	83%
g	4地点	68個	0.540	94%
h	4地点	74個	0.544	89%
i	4地点	78個	0.714	80%
j	4地点	73個	0.541	95%
k	3地点	58個	0.586	92%
l	3地点	52個	0.466	97%
m	3地点	48個	0.616	83%

各ブロックの適合率は、62%~95%
 →設計基準強度を下回る個所がある

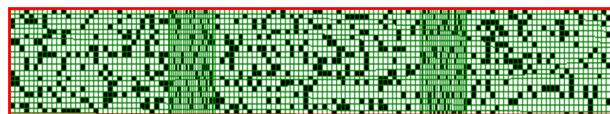
性能照査(地盤モデルの作成)



全13ブロックで地盤モデル(メッシュ)を作成



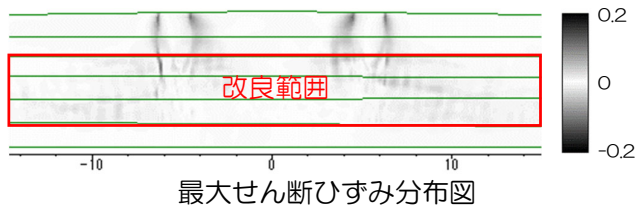
改良範囲の各メッシュ強度はquの平均値と変動係数から**確率・統計学的**に設定



□: 設計基準強度以上 ■: 設計基準強度未滿

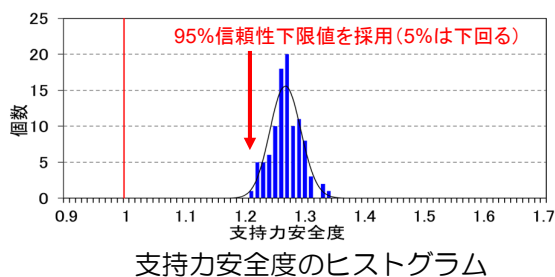
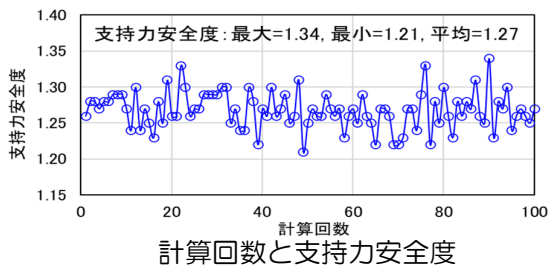
各ブロック100ケースで支持力・変形解析 (13BL×100ケース=1300パターン) を実施

性能照査(支持力解析結果)



支持力安全度
地盤の抵抗による支持力と航空機荷重との耐力作用比

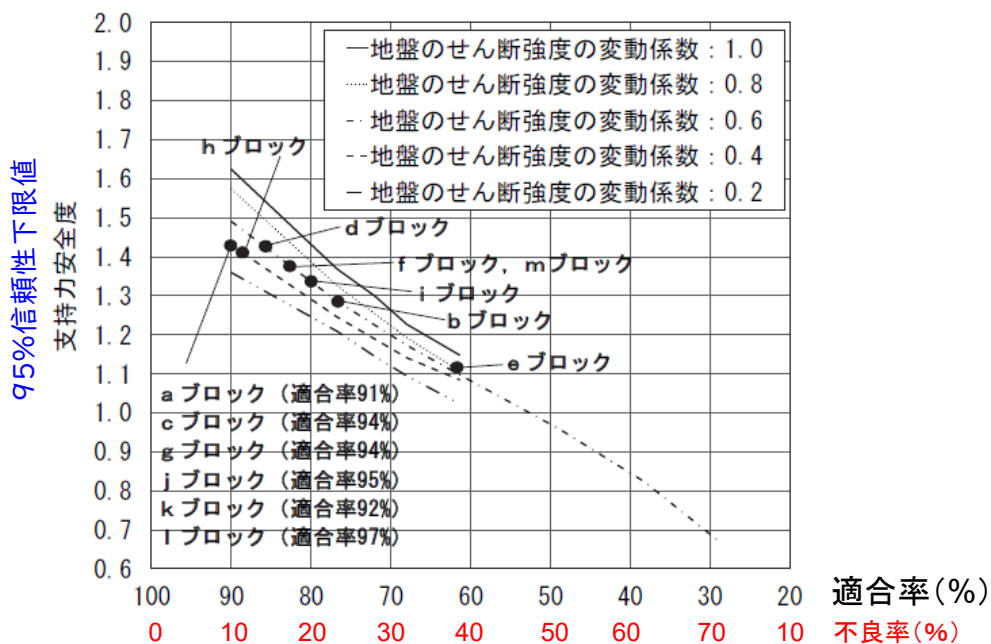
ブロック名	支持力安全度
a	1.60
b	1.34
c	1.53
d	1.40
e	1.21
f	1.52
g	1.71
h	1.55
i	1.42
j	1.65
k	1.63
l	1.64
m	1.49



全ブロック・全ケースにおいて支持力安全度>1.0を確認

支持力の性能照査

性能規定:信頼度95%で支持力が担保

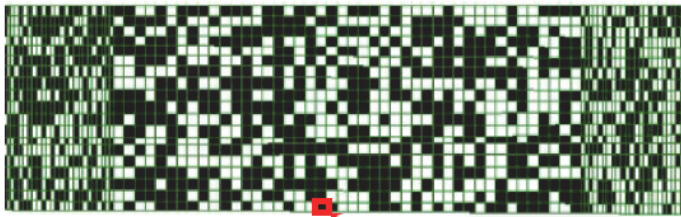


適合率が下がると支持力安全度は減少

全てのブロックで支持力安全度が1.0以上

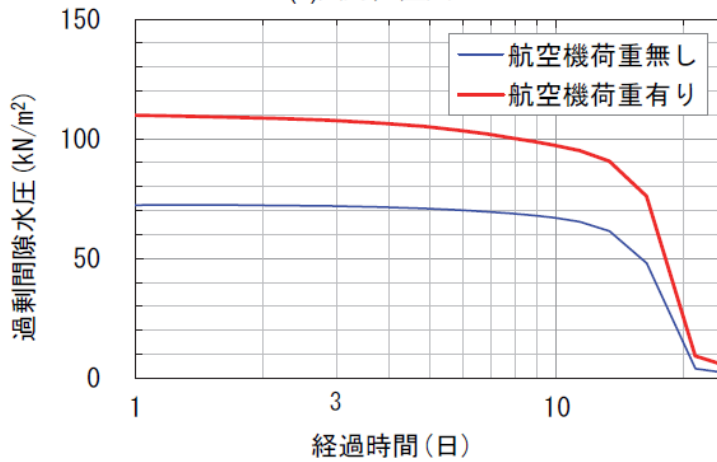
変形の性能照査

□ : 設計基準強度以上の要素 ■ : 設計基準強度未滿の要素



出力位置

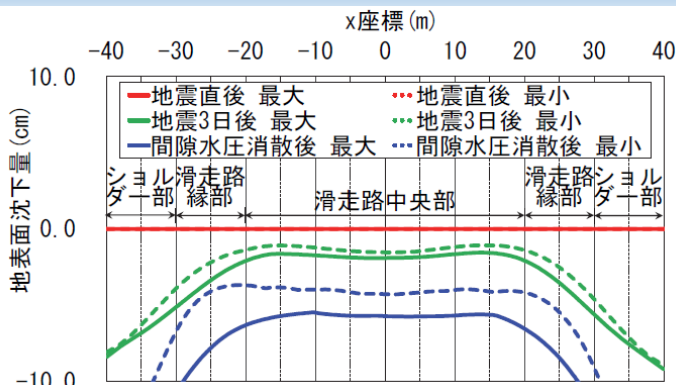
(a)出力位置図



(b)経時変化図

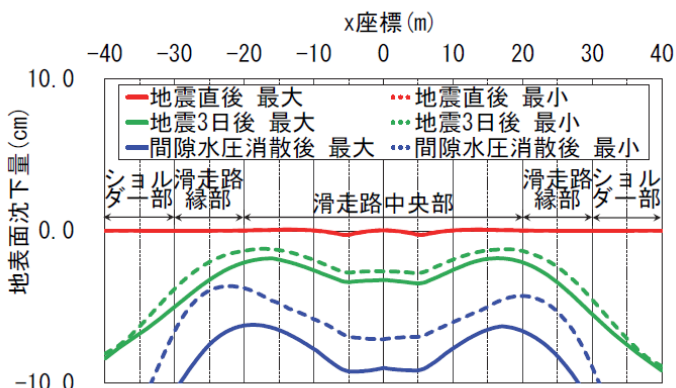
過剰間隙水圧が
10日程度継続
↓
水圧消散に伴う
滑走路の平坦性の
確認が必要

過剰間隙水圧の消散に伴う滑走路の平坦性



(a)航空機荷重を考慮しないケース

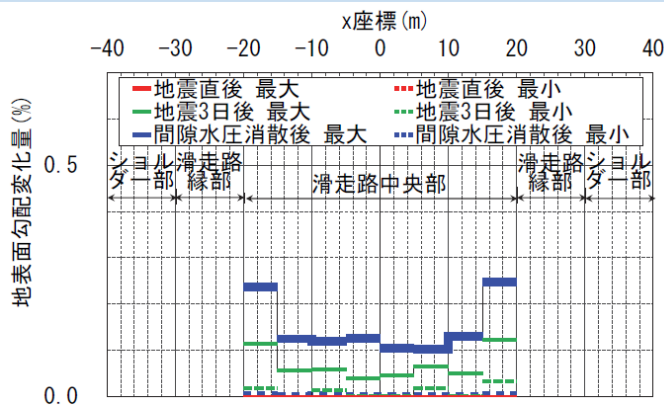
間隙水圧の消散とともに
沈下量が増加
↓
滑走路中央部の沈下は少ない



(b)航空機荷重を考慮するケース

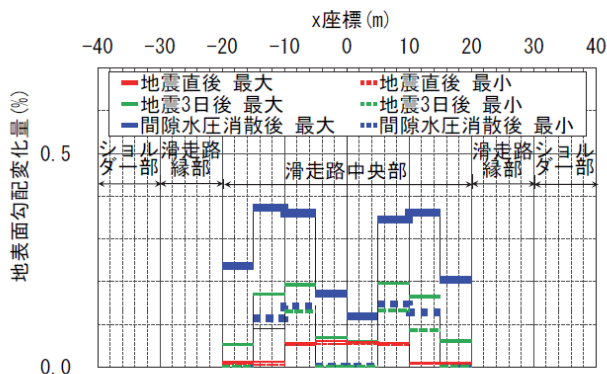
航空機荷重による中央部の
沈下が顕著
↓
航空機荷重を考慮した解析が
必要

過剰間隙水圧の消散に伴う滑走路の勾配変化量



(a)航空機荷重を考慮しないケース

航空機荷重を考慮しない場合には、縁部で最大値を示す

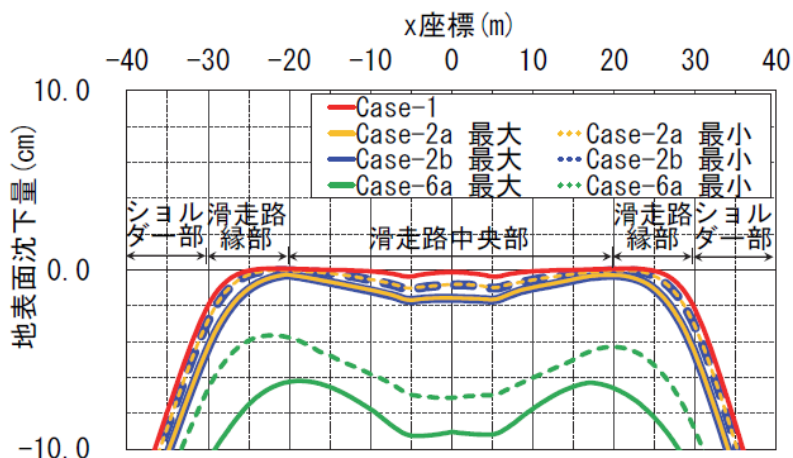


(b)航空機荷重を考慮するケース

航空機荷重を考慮すると勾配変化量は増加

滑走路の平坦性に与える適合率の影響

Case	適合率(%)	変動係数	平均強度 (kN/m ²)	
1	100.0	-	60.0	
2	a	76.7	0.2	58.9
	b	76.7	1.0	148.6
3	a	72.0	0.2	68.4
	b	72.0	1.0	140.0
4	a	68.0	0.2	49.0
	b	68.0	1.0	112.3
5	a	61.4	0.2	43.2
	b	61.4	1.0	95.1
6	a	48.9	0.2	34.0
	b	48.9	1.0	66.0

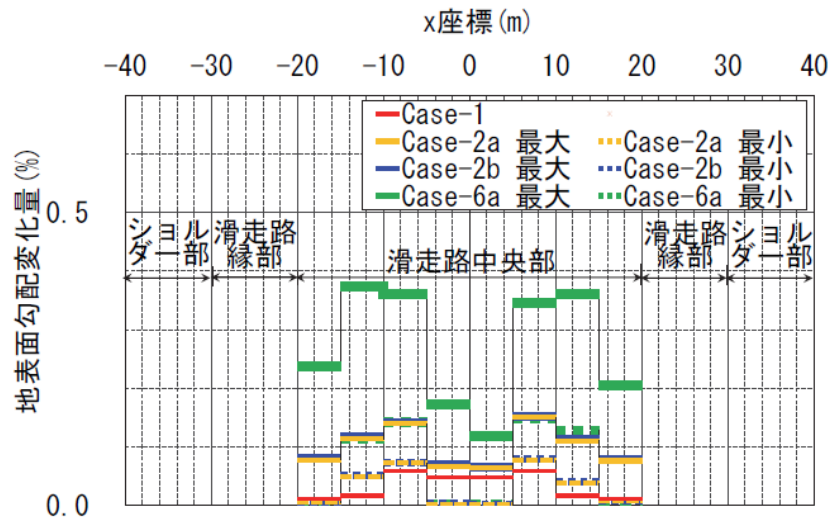


適合率100%の時は、ほとんど沈下しない
 適合率76.7%でも沈下量は2.0cm以下
 適合率48.9%では最大で9cm程度沈下する

↓
 適合率の大きさが地表面沈下量に大きく影響する

滑走路の勾配に与える適合率の影響

Case	適合率(%)	変動係数	平均強度 (kN/m ²)
1	100.0	-	60.0
2	76.7	0.2	58.9
3	72.0	1.0	148.6
4	68.0	0.2	68.4
5	61.4	1.0	140.0
6	48.9	0.2	49.0
	68.0	1.0	112.3
	61.4	0.2	43.2
	61.4	1.0	95.1
	48.9	0.2	34.0
	48.9	1.0	66.0

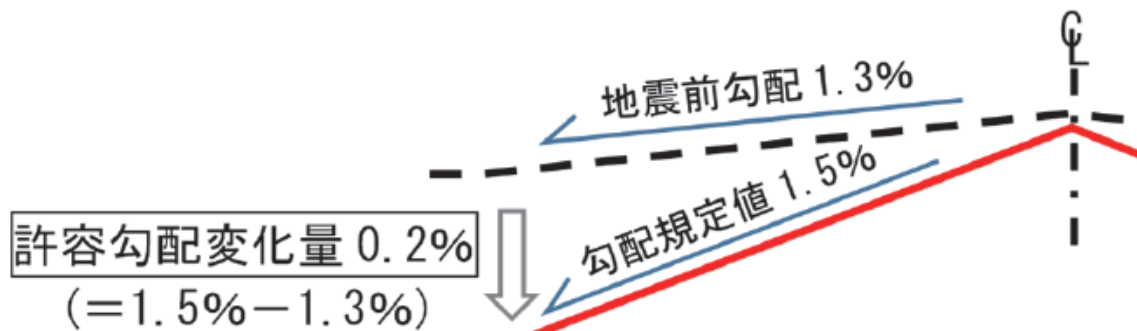


適合率76.7%~100%で、勾配変化量は0.2%以下

適合率48.9%では最大で0.4%

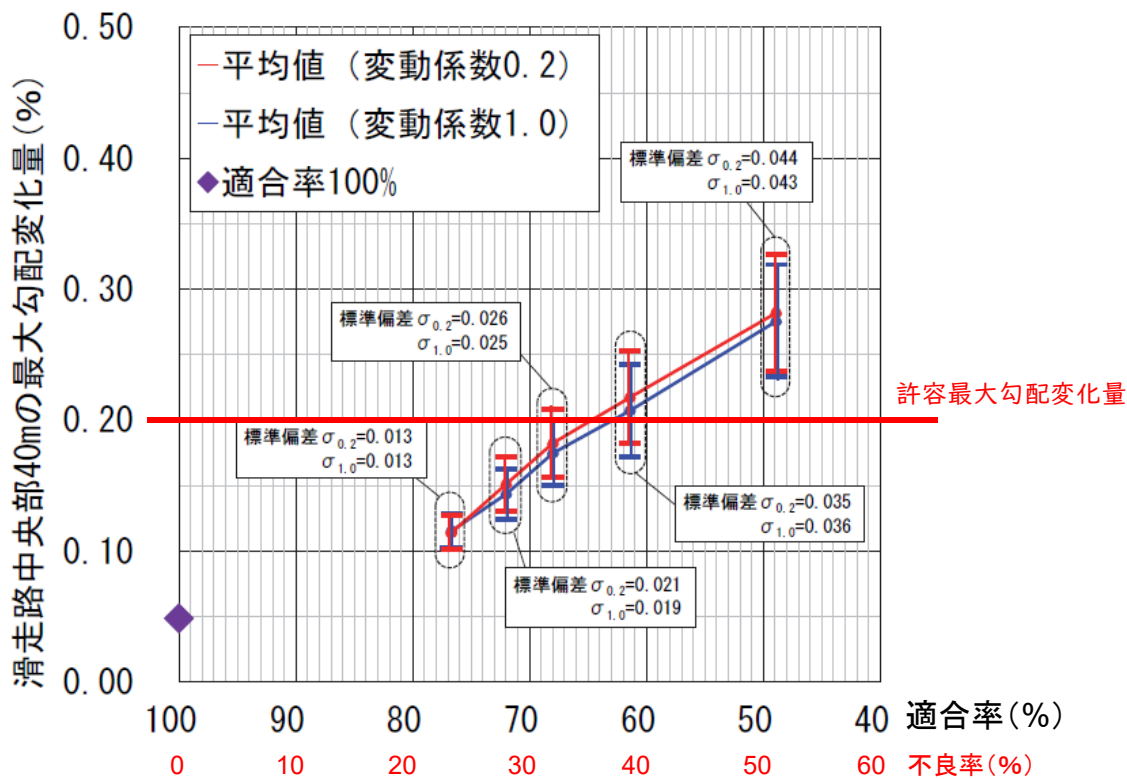
↓
適合率の大きさが滑走路の勾配に大きく影響する

滑走路の変形照査



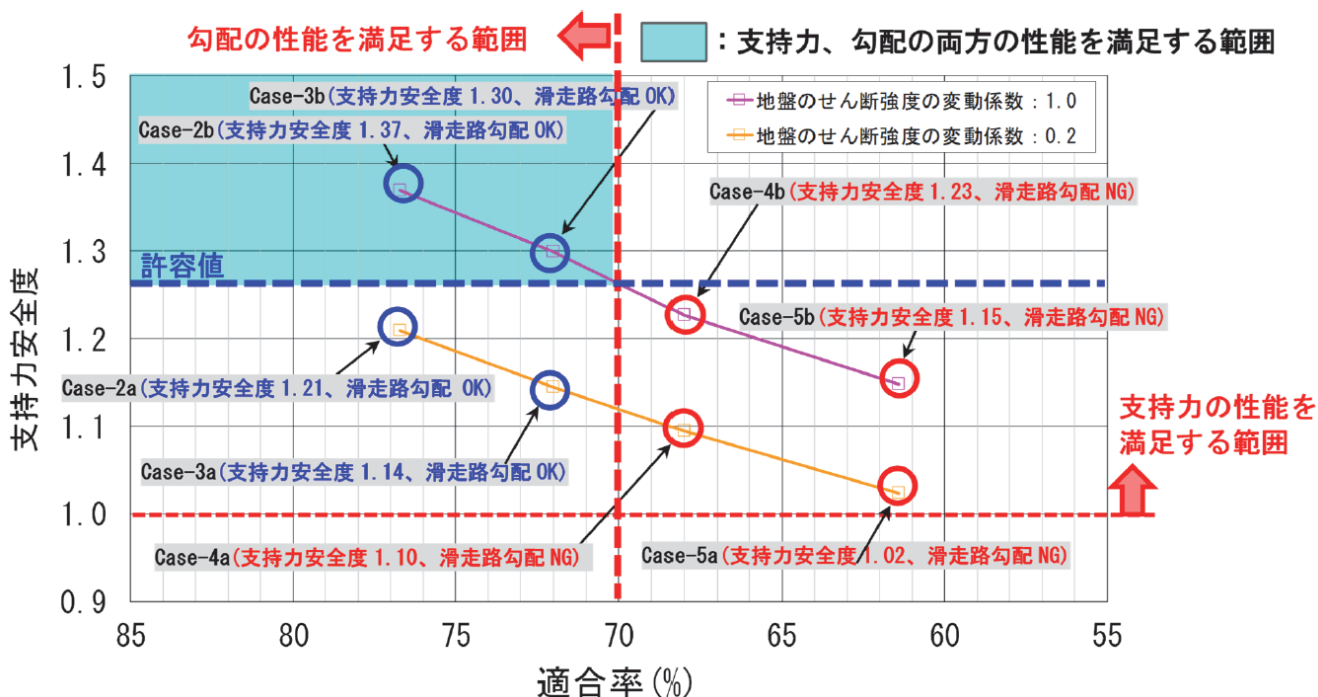
地震前の勾配1.3%
勾配規定値1.5%
許容できる勾配変化量は0.2%以下
↓
上記をもとに滑走路の平坦性を照査

滑走路中央部の最大勾配変化量



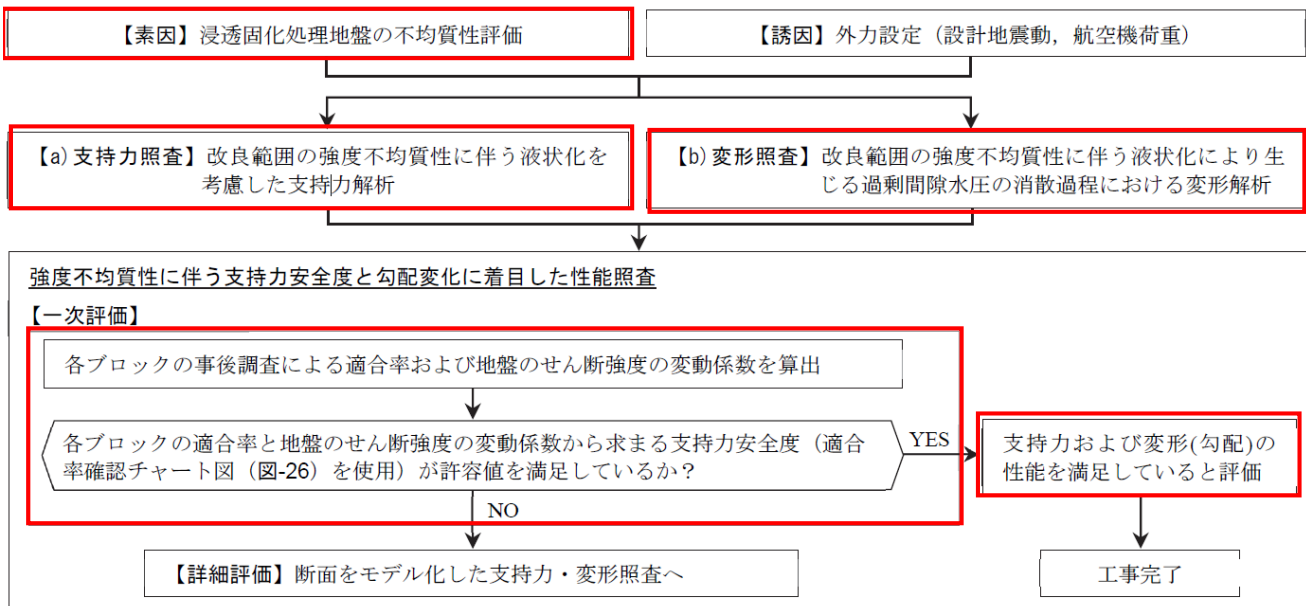
支持力と変形の両面からの性能照査

改良部の地震後の状態



支持力安全度 1.0以上で、勾配変化量 0.2% 以下となるのは、適合率 70% 以上

支持力安全度と勾配に着目した性能照査の流れ



固化処理地盤の一軸圧縮強さの適合率とばらつきを用いて、性能規定に基づいて滑走路の支持力・変形照査が可能となるチャート図を提案した。

地盤のばらつきと性能照査について

- 実施工した浸透固化処理地盤の一軸圧縮強さの変動係数は0.6程度であり、適合率は62%~95%の範囲をとった。浸透固化処理地盤の改良強度の自己相関距離は、鉛直方向で0.2~0.3m、水平方向で2m程度となり、非常にランダム性の高い地盤となる。
- 適合率の減少とともに支持力安全度は低下する。ただし、適合率がおおむね60%以上であれば、支持力安全度が1.0を満足する。
- 滑走路の変形・平坦性については、空間的なばらつきよりも適合率に大きく依存する。
- 浸透固化処理地盤の一軸圧縮強さの適合率とばらつきを用いて、性能規定に基づいて滑走路の支持力・変形照査が可能となるチャート図を提案した。

詳細な事後調査結果→性能調査

その他の改良工法への適用（金子様，片山様）

従来の調査を最新の統計学によって高度化

調査数を増やす→NG

少ない調査・試験結果+アルファ→最大限に活用する（小林様）

現状：事前調査→設計→施工→事後調査

将来：事前調査→性能規定に基づく設計→施工→事後調査

設計段階で性能照査を実施して，配合量・改良条件を決定（片山様）

配合設計・改良条件の最適化→強度割増係数の最適化

現状：たくさんのMCS→支持力や変形量の平均値や変動係数のみ評価

将来：不確定性のある将来予測を仮想世界で解析・分析

→現実世界に実用的な形でフィードバック
