



確率・統計論に基づく針貫入抵抗を用いた 固化改良地盤の強度評価・性能評価に関する研究

技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室 小林真貴子



本発表の流れ

はじめに

- 本研究が目指す地盤改良工について
- 本研究の方針

針貫入試験による強度評価

- 原位置多点針貫入試験装置の開発
- 現場適用事例の紹介

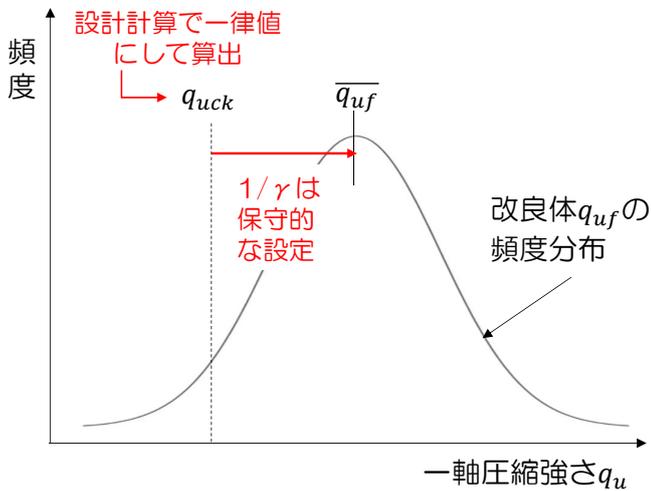
ばらつきを考慮した性能評価

- 解析条件・結果
- 性能評価指標の検討

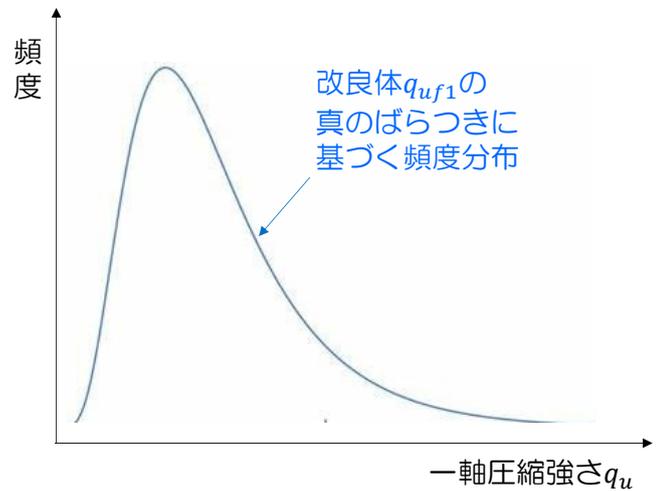
はじめに

本研究が目指す地盤改良工：設計・施工の合理化

＜現行の設計における課題＞
真のばらつきを反映できていない
保守的な設計



＜本研究の方針＞
真のばらつきに基づく設計

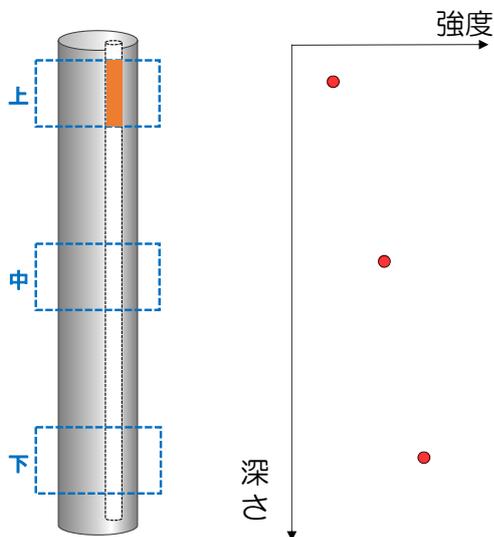


➡ 空間的強度のばらつきを考慮した性能評価を設計に導入

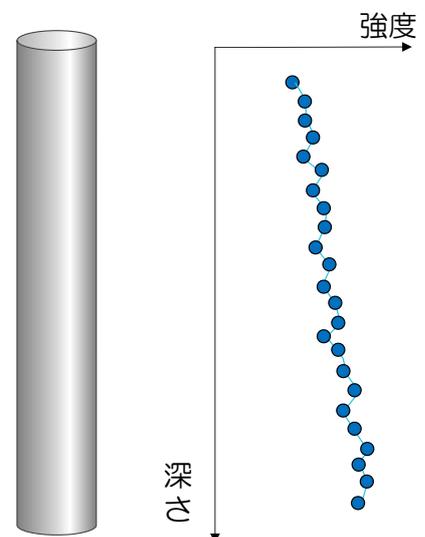
はじめに

本研究が目指す地盤改良工：安全性・信頼性の高い品質管理

＜現行の品質管理における課題＞
部分的な強度把握



＜本研究の方針＞
多点データに基づく詳細な強度把握



➡ 詳細な強度評価を品質管理に導入

はじめに

現行の品質評価：一軸圧縮試験



- 試料を採取してから測定まで時間や手間がかかる
- 採取可能な試験体数は限定的



多数の一軸圧縮試験を実施するのは多大な労力・コストを要し、現実的ではない

はじめに

本研究の方針

一軸圧縮強さと相関があり、詳細な強度把握に適した「**針貫入試験**」を活用

本研究における課題

本研究が目指す地盤改良工の実現に向けては、以下の課題があげられる

針貫入試験による強度評価

空間的強度のばらつき評価の省力化

性能評価

ばらつきを考慮した性能評価の有効性検証

➡ 本発表では、各課題に対する取組みおよび成果をご紹介します

本発表の流れ

はじめに

- 本研究が目指す地盤改良工について
- 本研究の方針

針貫入試験による強度評価

- 原位置挿入型針貫入試験装置の開発
- 現場適用事例の紹介

ばらつきを考慮した性能評価

- 解析条件・結果
- 性能評価指標の検討

針貫入試験の概要

【参照】地盤工学会：「地盤調査の方法と解説」， pp.426-432

第10章 針貫入試験

10.1 まえがき

主として軟岩の強度推定のために、トンネル掘削断面や切羽において針貫入試験が実施されている。この方法は、破壊程度が軽微であることから、現場における調査試験だけでなく、岩片試料に対して室内でも実施されている。

一方、本試験に関しては統一的な基準が存在せず、様々な

利用がなされている。このような状況から、その実態を調査し、基準を設けるべく平成20年7月に「地盤の貫入式硬度計試験方法改正」のWGが発足した。この中で、針貫入試験方法の基準を新規に制定した。

10.2 地盤工学会基準「針貫入試験方法」

地盤工学会基準
針貫入試験方法
Method for needle penetration test

JGS
3431 - 2012

1 適用範囲

この基準は、土・岩に針を貫入し、その貫入長さおよび貫入荷重を測定して、その関係から針貫入勾配を求める方法を対象とする。針の貫入が可能な固化処理土を含む土及び軟岩を主たる対象とする。

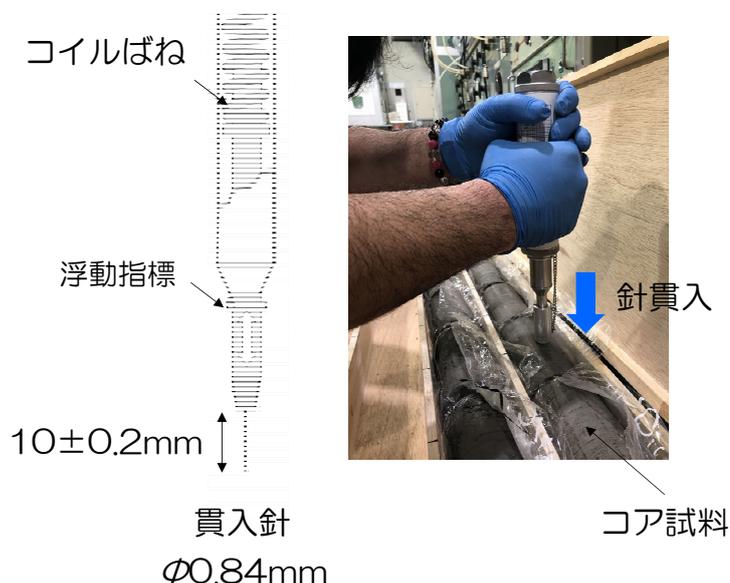
2 引用規格・基準

次に掲げる規格は、この基準に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、西暦年を付記してあるものは、記載の年の版を適用し、その後の改正版（追補を含む。）は適用しない。西暦年の付記がない引用規格は、その最新版（追補を含む。）を適用する。

JIS S 3008 手鋸針

針貫入試験の概要

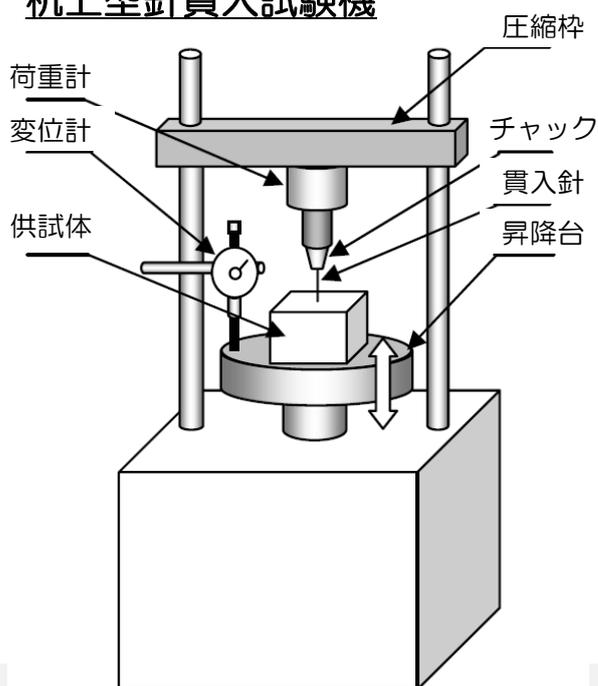
携行型針貫入試験機



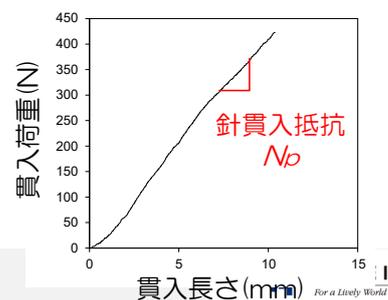
- 貫入針：JIS S 3008「もめん針2号，大くけ針（φ0.84又は0.89mm，長さ54.5±1.4mm）」及びこれと同等のもの。
- 貫入長さと貫入力の読み取り：針の貫入長さが10mmに到達するか，貫入荷重が試験機の最大に到達したところで，貫入長さ L と貫入荷重 P を読み取る。
- 針貫入抵抗 $N_b = \text{貫入荷重 } P / \text{貫入長さ } L$

針貫入試験の概要

机上型針貫入試験機



- 貫入針：携行型と同じ。
- 変位計：鉛直変位量を少なくともmm単位で測定。
- 荷重計：ロードセル等で貫入荷重を測定。
- 貫入速度：20±5mm/min
- 針貫入抵抗 $N_b = \text{貫入荷重 } P / \text{貫入長さ } L$



開発経緯および方針

現行の針貫入試験方法



携行型装置

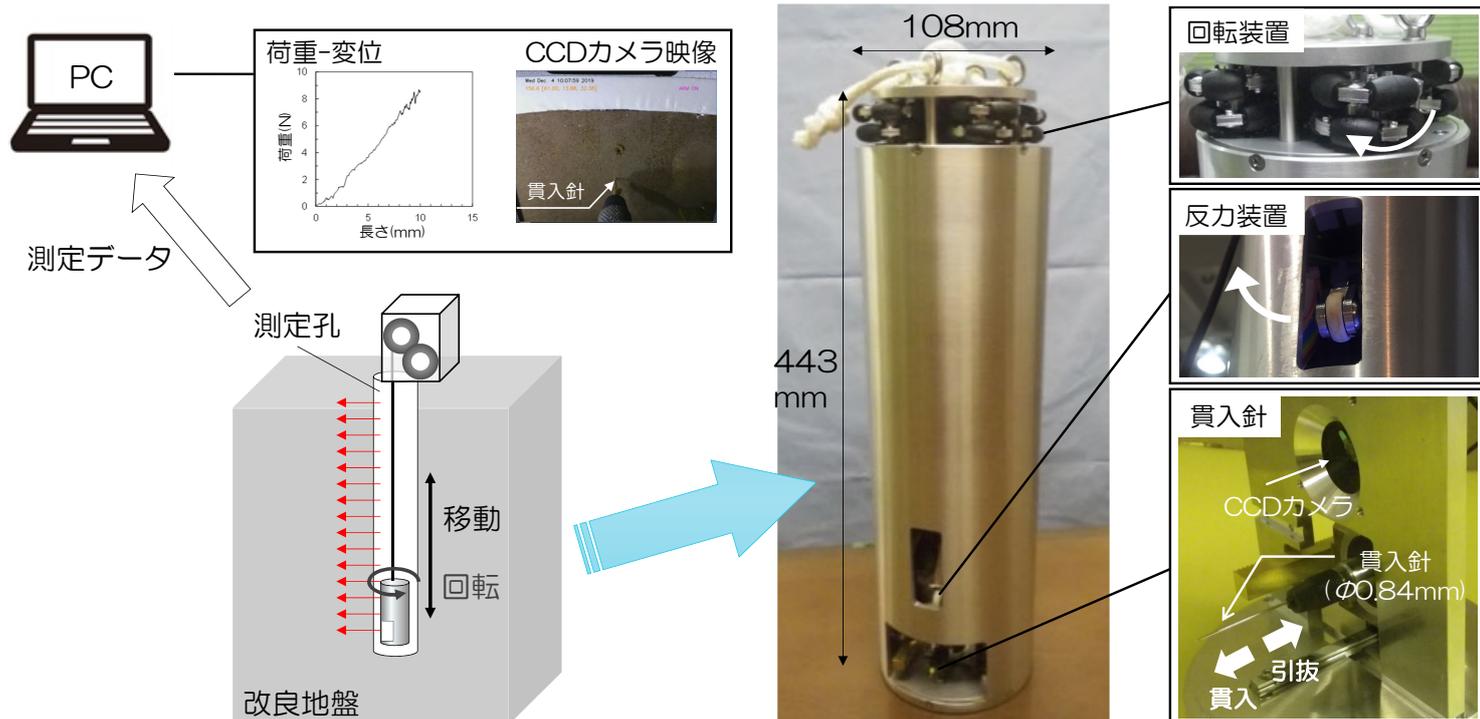


机上型装置

原位置で地盤強度を手間をかけず、精度良く、詳細に把握

地盤に設けた孔内で、多点データを自動で取得する
「原位置挿入型」方式を考案

原位置挿入型針貫入試験装置



原位置針貫入試験装置「T-GeoPenester®」

原位置挿入型針貫入試験装置

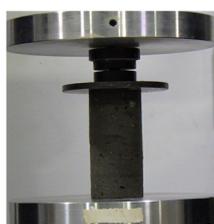
動画

現場適用

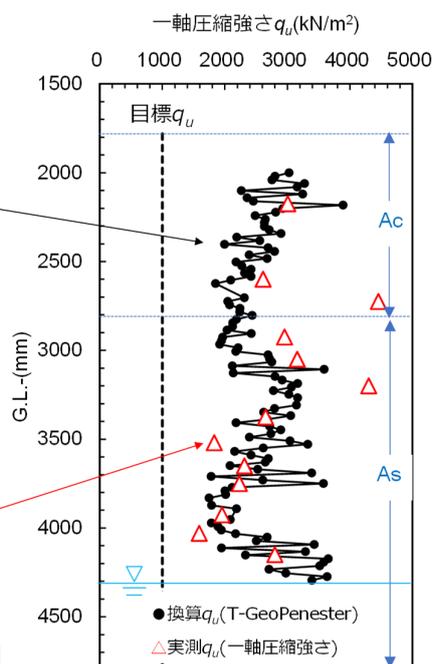
高圧噴射攪拌改良工法



T-GeoPenester



一軸圧縮試験



- いずれの深度も換算 q_u は目標強度以上。
- 材齢の違いはあるものの、換算 q_u と実測 q_u の分布傾向は概ね一致。

測定結果の妥当性を確認し、
効率的な多点測定を実現

現場適用

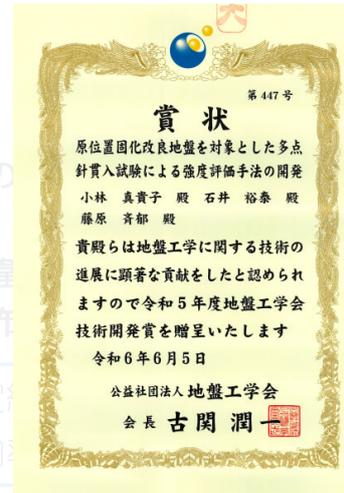
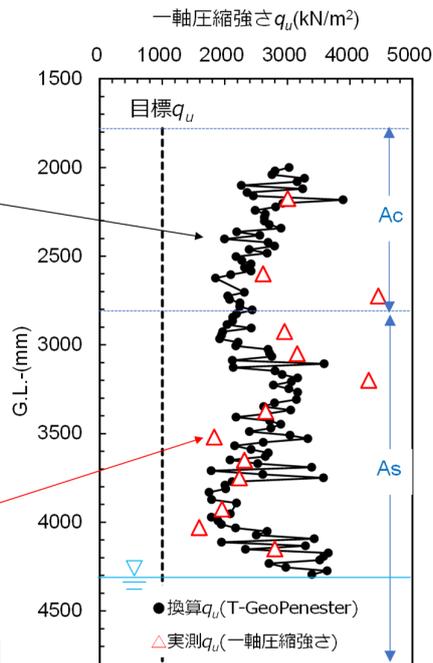
高圧噴射攪拌改良工法



T-GeoPenester



一軸圧縮試験



- いずれの
- 材齢の違
- q_u の分布
- 測定
- 効果

原位置挿入型針貫入試験および強度推定方法について、令和5年度地盤工学会技術開発賞を受賞

本発表の流れ

はじめに

- 本研究が目指す地盤改良工について
- 本研究の方針

針貫入試験による強度評価

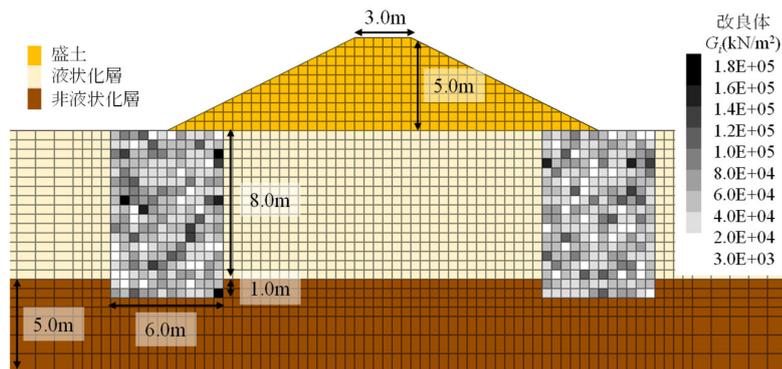
- 原位置挿入型針貫入試験装置の開発
- 現場適用事例の紹介

ばらつきを考慮した性能評価

- 解析条件・結果
- 性能評価指標の検討

解析条件

- 2次元静的残留変形解析手法を用いて盛土法尻直下地盤の液状化対策工をモデル化
- 自由地盤幅は盛土底面幅の約5倍設け、側面境界は鉛直ローラー、底面境界は完全固定
- 液状化層の液状化強度比 $R_L=0.25$
- 地下水位G.L.±0.0m
- 地表面における水平震度 $k_{hg}=0.40$
- 液状化層の構成則は、初期自重解析ではMCモデル，流動変形解析ではALIDモデル，水圧消散解析では線形弾性モデル
- 盛土はMCモデル
- 非液状化層は線形弾性モデル



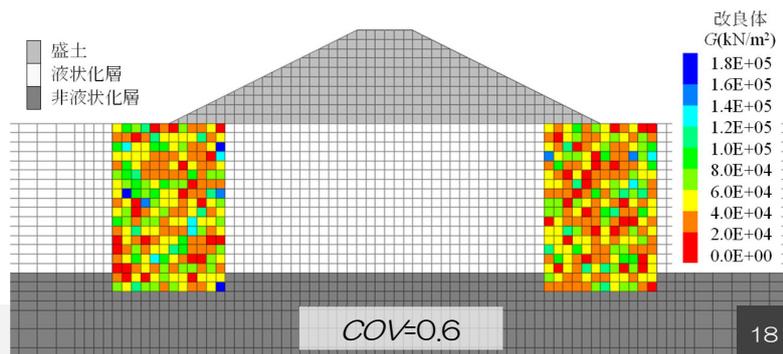
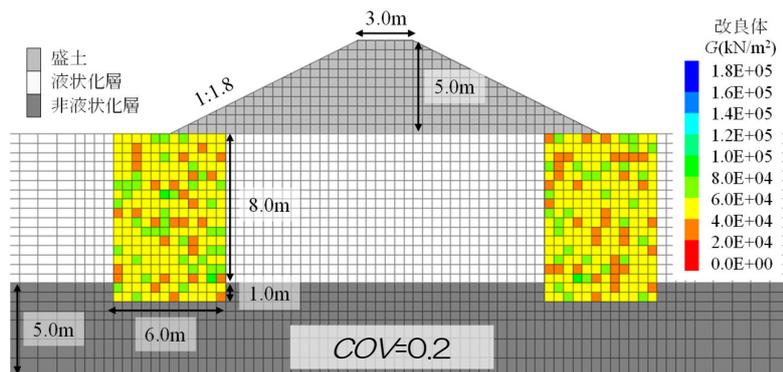
解析モデル

地盤構成および物性値

モデル	湿潤密度 ρ_i (g/cm ³)	相対密度 D_r (%)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (度)	ポアソン比 ν	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	せん断剛性 G_i (kN/m ²)
盛土	2.0	95	5	43	0.333	1.0×10^5	2.4×10^4
液状化層	1.4	70	0	38	0.333	5.0×10^4	1.4×10^4
非液状化層	1.6	-	-	-	0.333	1.1×10^5	3.3×10^4

解析条件

- 固結工法によるブロック状改良体（改良率100%）を想定
- 幅6.0m，長さ9.0m（根入れ1.0m）の改良体を両法尻直下に配置
- 固化改良体の平均一軸圧縮強さ q_u を500，750，1,000，1,250，1,500，1,750，2,000 (kN/m²) の7水準設定
- 変動係数COVを0.2，0.4，0.6の3水準設定
- 対数平均値と対数変動係数を有する正規分布に従う乱数を生じさせることで一軸圧縮強さ q_u を計算
- 自己相関距離は鉛直・水平とも0.2mとして各要素の q_u を算出



解析条件

- 固化改良体の構成則はMCモデル
- 各要素の物性値は下式にて変換

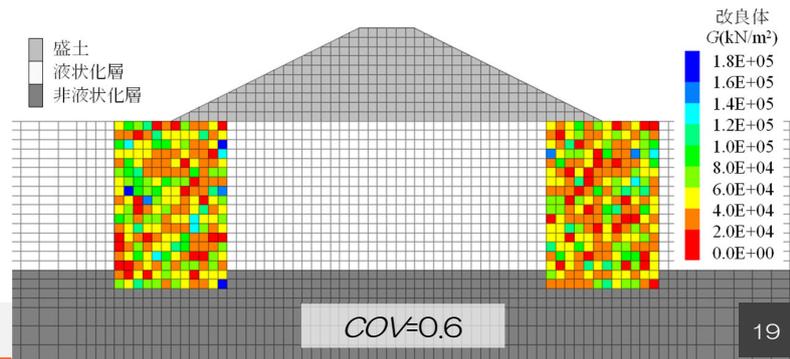
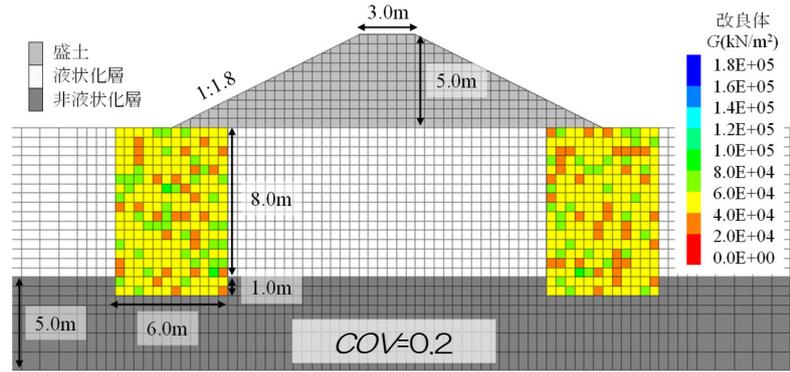
$$\text{粘着力 } c = q_u / 2$$

$$\text{引張力 } t = q_u / 10$$

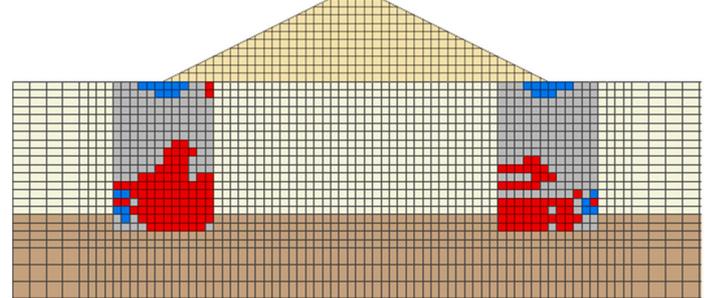
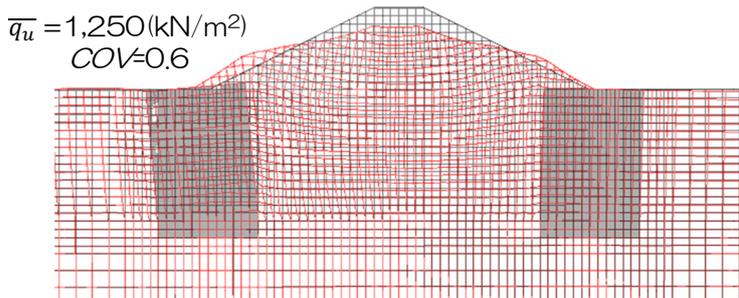
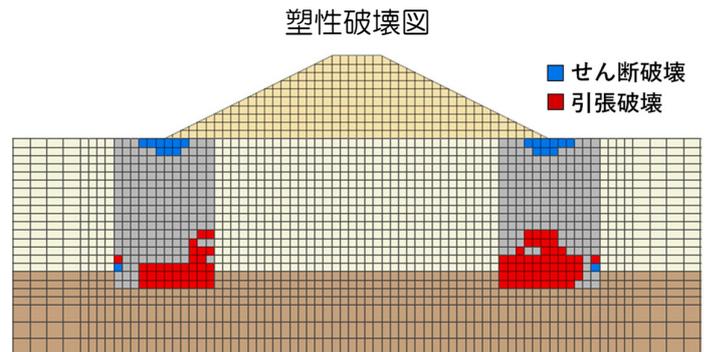
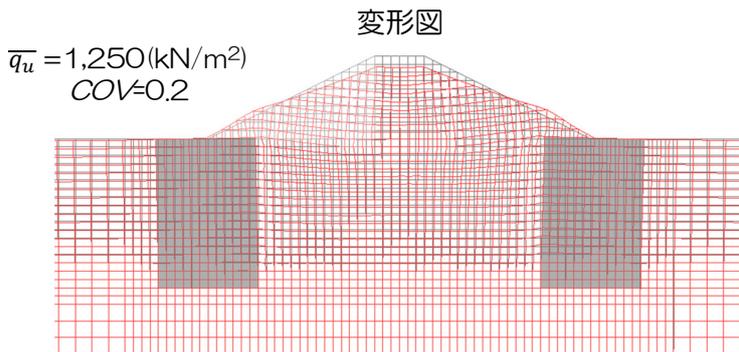
$$\text{せん断剛性 } G_i = 108.95 \times q_u + 85.388 / 2(1 + \nu)$$

なお、 $\rho_t = 1.90(\text{g/cm}^3)$, $\nu = 0.35$

- 各平均強度 \bar{q}_u および変動係数 COV の条件に対してそれぞれ20パターン、合計420ケースの変形解析を実施
- また、各 \bar{q}_u において $COV=0.0$ のパターンも別途変形解析を実施

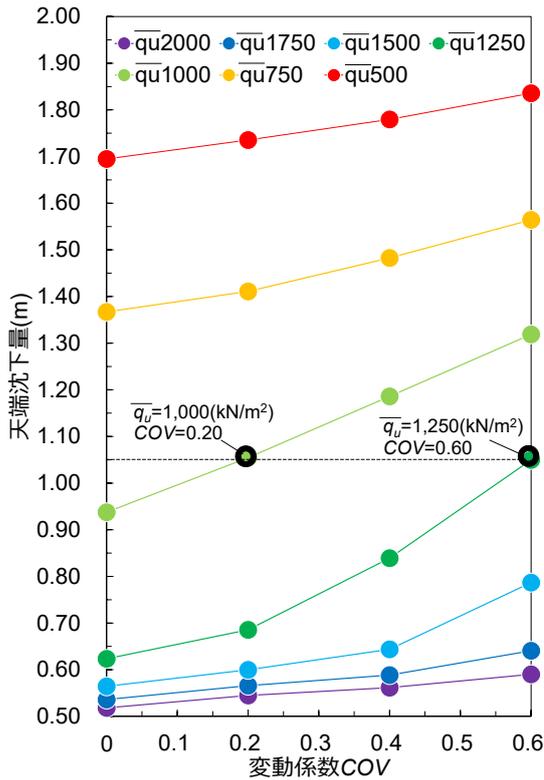


解析結果



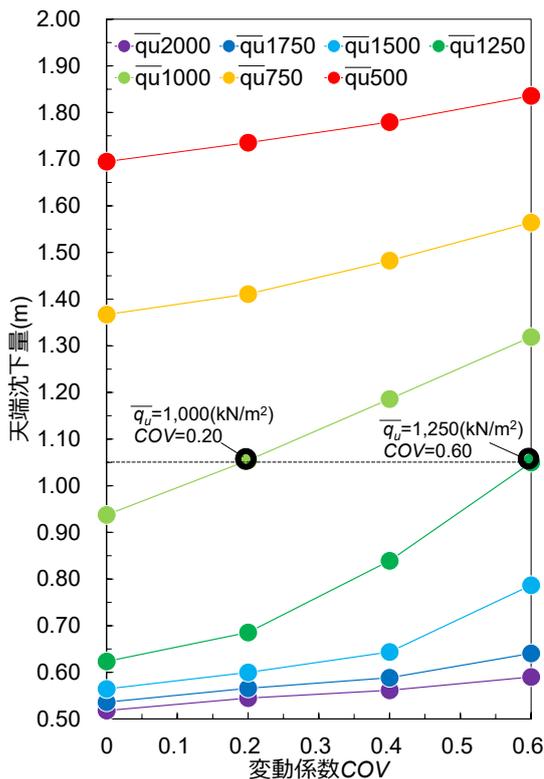
改良体強度の COV が大きいほど引張破壊の発生が下部から上部に広がっており、これに伴って側方流動に対する抵抗力が低減したことが液状化地盤の水平変位や盛土沈下量の増大につながった

解析結果

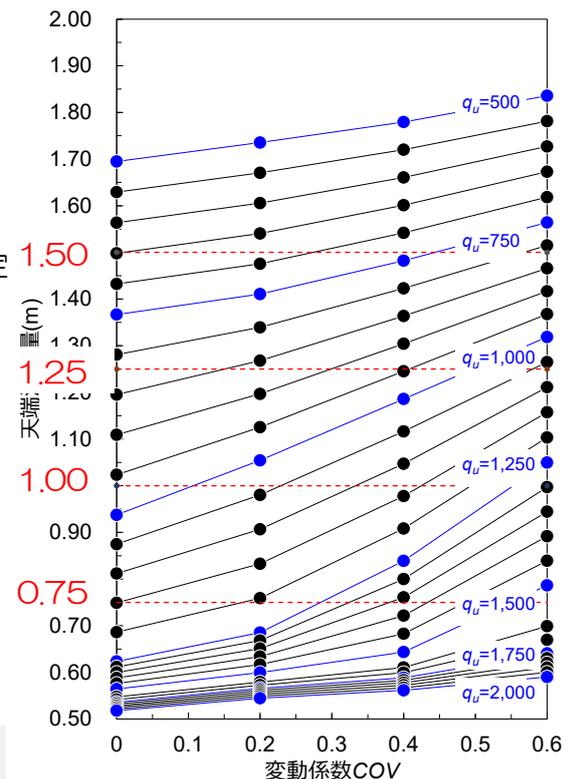
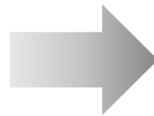


- いずれも変動係数COVの増加とともに天端沈下量も増加
- その増加率は $\bar{q}_u=1,000\sim 1,500$ (kN/m²) が顕著
- 例えば $\bar{q}_u=1,000$ (kN/m²) のCOV=0.2と $\bar{q}_u=1,250$ (kN/m²) のCOV=0.60では沈下量が同程度

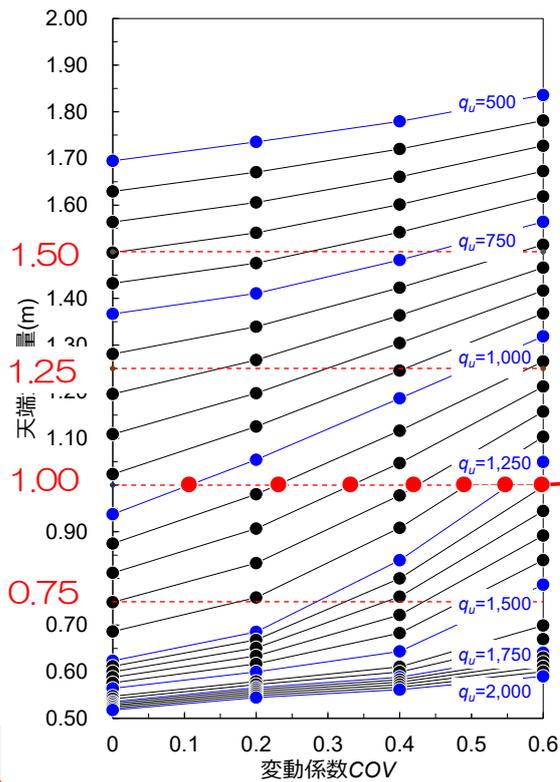
性能評価指標の検討



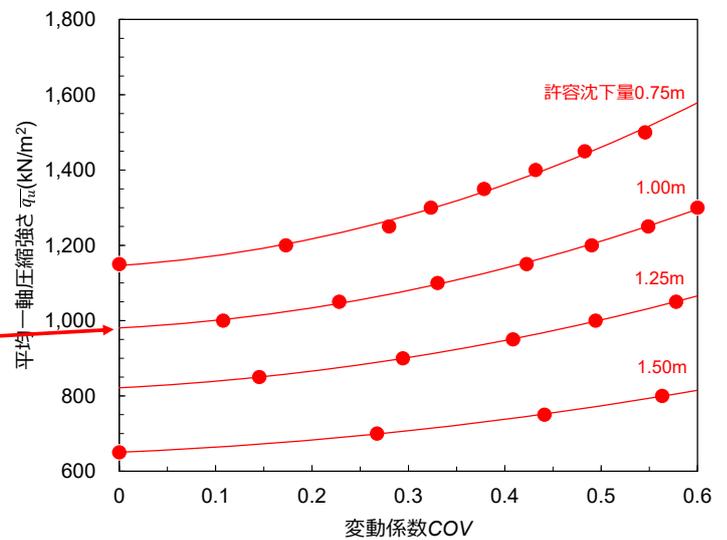
- ① 許容沈下量として0.75 ~ 1.50mの4水準を選定
- ② 各 \bar{q}_u 間を線形補間



性能評価指標の検討



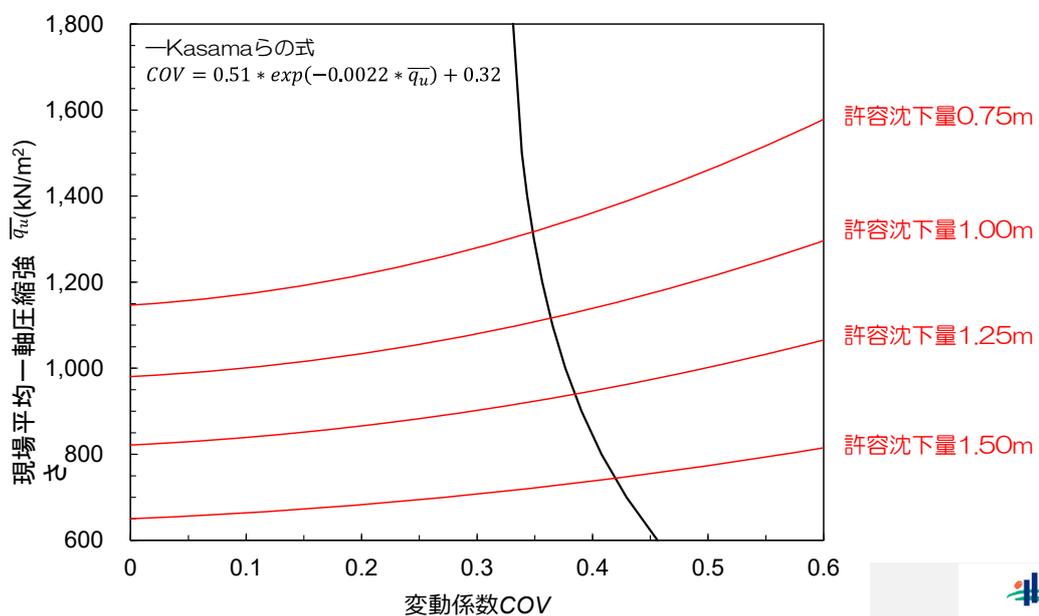
③ 許容沈下量0.75~1.50mに相当する変動係数 COV と平均一軸圧縮強さ \bar{q}_u を抽出



許容沈下量に応じた COV と \bar{q}_u の性能評価指標

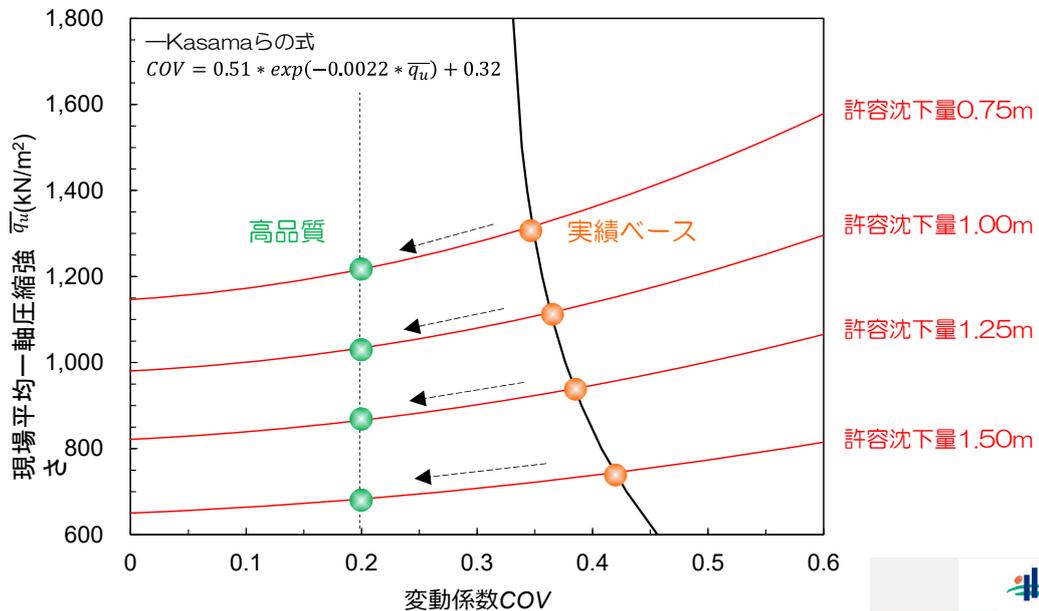
性能評価指標の検討

- 実績に基づく COV と \bar{q}_u の関係（Kasamaらの式）と比較



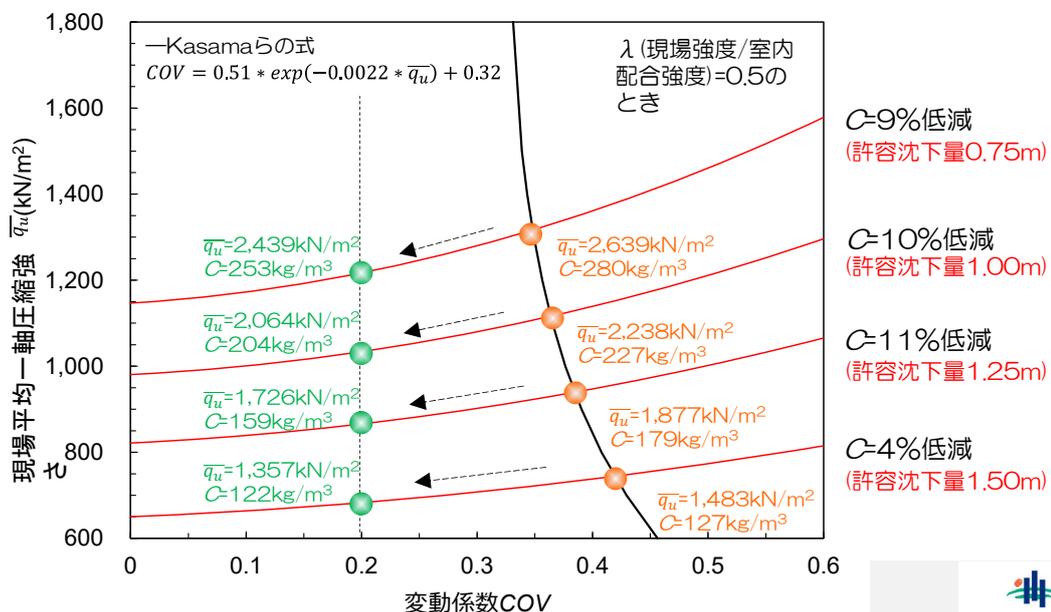
性能評価指標の検討

- 実績に基づくCOVと \bar{q}_u の関係（Kasamaらの式）と比較
- 攪拌効率や施工性の改善等で高品質な改良体を造成すれば、



性能評価指標の検討

- 実績に基づくCOVと \bar{q}_u の関係（Kasamaらの式）と比較
- 攪拌効率や施工性の改善等で高品質な改良体を造成すれば、最大11%固化材量を低減できる可能性がある
 ⇒現場コストを踏まえた最適仕様の選定、固化材の製造過程を含めた環境負荷低減等につなげられる有効性が示された



まとめ

- 社会的重要性の高い地盤改良工において、現行の設計および品質管理に課題を見出し、それらの解決に向けて固化改良地盤の強度評価の高精度化・性能評価の有効性実証を目指した。
- 詳細な強度把握に適した「針貫入試験」に着眼した。
- 強度評価の高精度化に向けて、原位置挿入型針貫入試験装置「T-GeoPenester®」を開発した。現場適用を通して、本装置による効率的な測定・強度評価の有用性を確認した。
- 性能評価の有効性実証に向けて、固化改良体の物性値にばらつきを与えた変形解析を行い、解析結果に基づく性能評価指標の有効性を確認した。



ご清聴ありがとうございました

地図に残る仕事®

