

改良範囲ごとに異なる施工仕様を適用した 深層混合処理地盤の地震時変形解析

目次

1. 背景
2. 解析条件
3. 解析結果・考察

2025年2月27日（木）
改良地盤における確率・統計的評価法の導入に関する研究会

五洋建設株式会社 技術研究所 片山遥平

1. 背景

固化処理地盤の空間的ばらつきについて

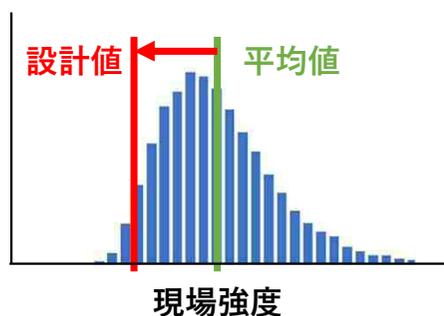
固化処理地盤は原地盤の不均質性・施工の不均一性により、土質定数に大きな空間的ばらつきを有する

→ばらつきを考慮する代わりに現場平均強度を大きく低減

$$q_{uck} = \frac{\text{設計基準強度の特性値}}{1-0.33=0.67} \times \frac{\text{現場平均強度}}{q_{uf}}$$

→セメント添加量増大

⇒材料費 & CO₂排出量増大

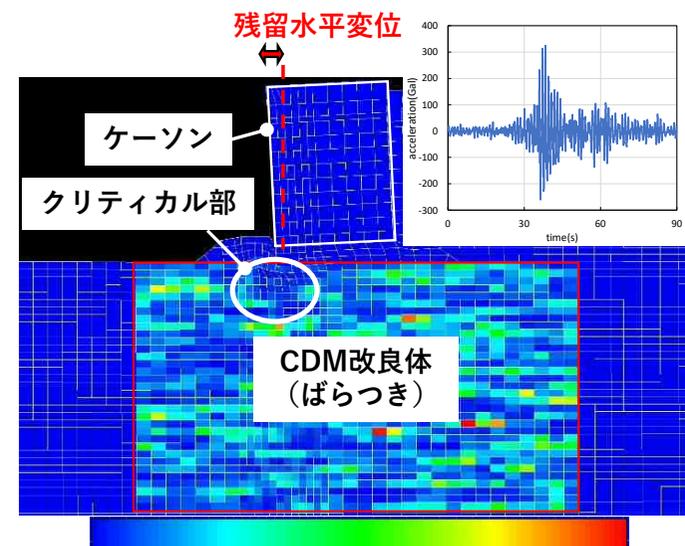
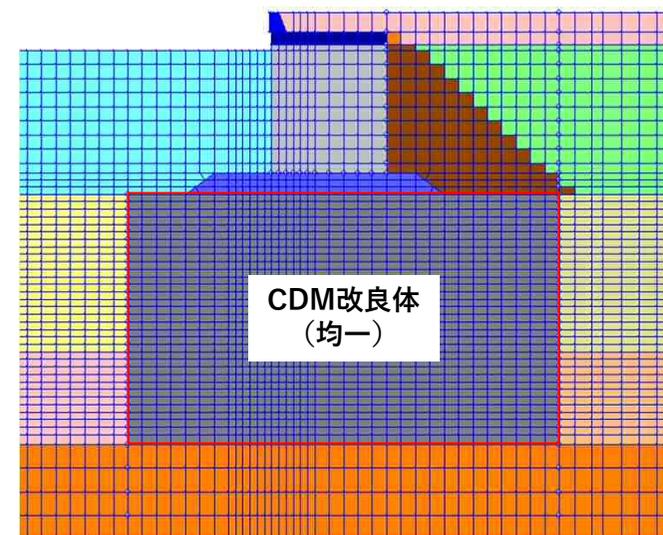


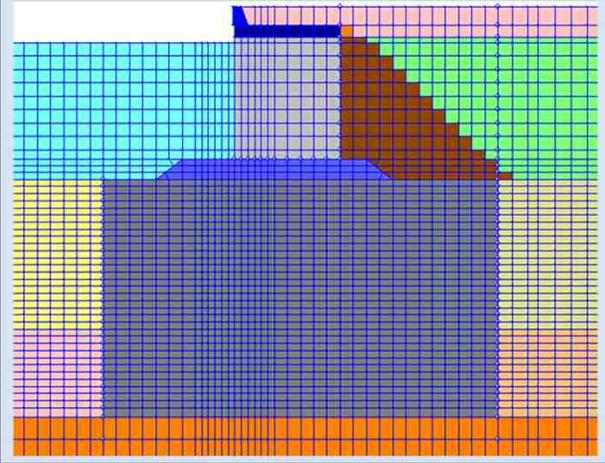
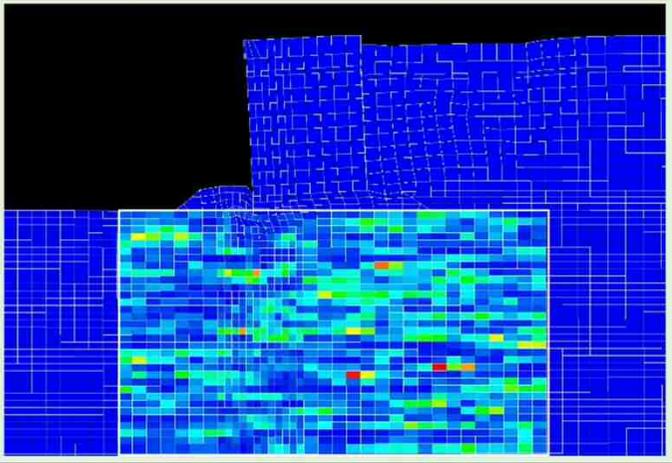
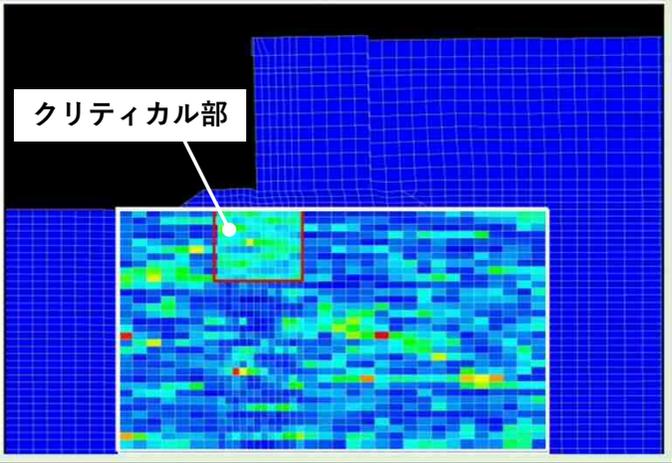
強度の空間的ばらつきを直接的に考慮した動的解析について

事前混合処理地盤や浸透固化処理地盤で検討を実施してきた本手法ではばらつきを考慮できるので、現場平均強度の低減が不要

→さらに、構造物の要求性能に大きく影響する範囲に高品質な施工仕様（高強度・ばらつき小）を適用

⇒経済的な設計を実現可能と考え検討を実施した



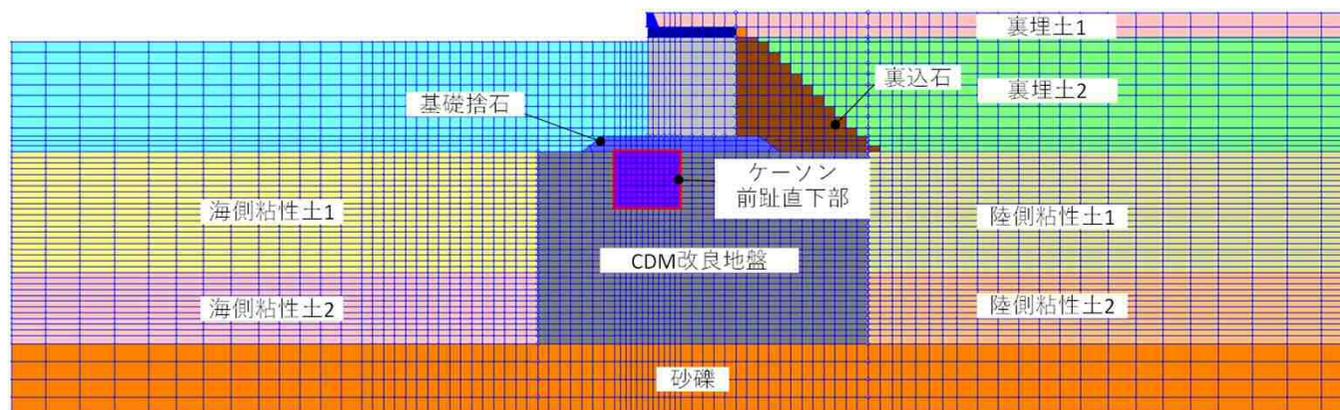
| 解析手法 | 従来法（空間的ばらつきを考慮しない） | 提案法（空間的ばらつきを直接的に考慮） | 提案法（範囲ごとに異なる施工仕様を適用） |
|-------|---|--|---|
| イメージ図 |  |  |  |
| メリット | 解析が（比較的）容易 | 現場平均強度を低減する必要がない ⇒材料費 & CO ₂ 排出量低減 | メリハリのある設計が可能になり、 より経済的な設計を実現できる |
| デメリット | 現場平均強度を大きく低減した値を使用 ⇒材料費 & CO ₂ 排出量増大 | モンテカルロ・シミュレーションが必須 ⇒解析コストが非常に大きい | 要求性能への 影響が大きい範囲を特定する必要がある |

2. 解析条件

FLIP解析について

FLIP断面

- ・ マニュアル※の解析事例の断面を一部変更したものを使用

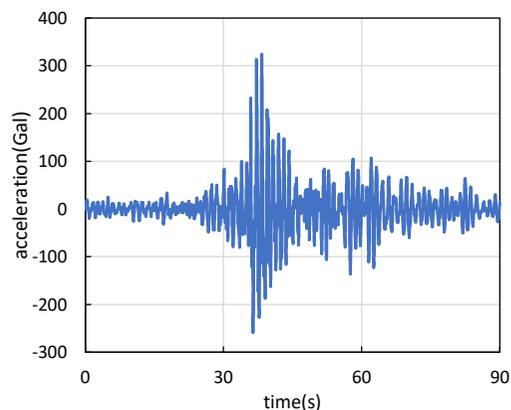


地震動データ

- ・ 同上

地盤パラメータ

- ・ 同上



| 土層区分 | ρ | ν | σ'_{ma} | G_{ma} | K_{ma} | c | ϕ'_f | n | h_{max} |
|---------|------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------|------|-----------|
| | t/m ³ | - | kN/m ² | kN/m ² | kN/m ² | kN/m ² | ° | - | - |
| 海側粘性土1 | 1.48 | 0.33 | 28.2 | 8,714 | 22,725 | 25.63 | 30.0 | 0.55 | 0.20 |
| 海側粘性土2 | 1.73 | 0.33 | 82.7 | 18,700 | 48,767 | 55.00 | 30.0 | 0.55 | 0.20 |
| 陸側粘性土1 | 1.48 | 0.33 | 193.3 | 32,868 | 85,714 | 96.67 | 30.0 | 0.55 | 0.20 |
| 陸側粘性土2 | 1.73 | 0.33 | 247.8 | 42,123 | 109,845 | 123.89 | 30.0 | 0.55 | 0.20 |
| 裏埋土1 | 1.84 | 0.33 | 98.0 | 62,345 | 162,586 | 0.00 | 39.0 | 0.45 | 0.24 |
| 裏埋土2 | 2.04 | 0.33 | 98.0 | 62,345 | 162,586 | 0.00 | 39.0 | 0.45 | 0.24 |
| 砂礫 | 2.04 | 0.33 | 98.0 | 175,100 | 456,500 | 0.00 | 43.4 | 0.45 | 0.24 |
| 裏込石 | 2.04 | 0.33 | 98.0 | 180,000 | 469,412 | 20.00 | 35.0 | 0.45 | 0.24 |
| 基礎捨石 | 2.04 | 0.33 | 98.0 | 180,000 | 469,412 | 20.00 | 35.0 | 0.45 | 0.24 |
| CDM改良地盤 | 1.48 | 0.33 | 0.0 | 式(1) | 式(2) | 式(3) | 0.0 | 0.45 | 0.24 |

| 土層区分 | 液状化特性値算定に用いる定数 | | | 液状化特性値 | | | | | |
|------|----------------|-------------------|-------|----------|-------|-------|----------|----------|-------|
| | N_{65} | σ'_v | F_c | ϕ_p | s_1 | w_1 | ρ_1 | ρ_2 | c_1 |
| | - | kN/m ² | % | ° | - | - | - | - | - |
| 裏埋土2 | 6 | 65 | 14 | 28 | 0.005 | 5.436 | 0.500 | 0.980 | 2.249 |

※港湾・空港における深層混合処理工法技術マニュアル（改訂版），2018.12.

改良体の一軸圧縮強さ q_u をばらつかせる

→ 基準初期せん断弾性係数 G_{ma} , 基準初期体積弾性係数 K_{ma} , 粘着力 c をばらつかせる

$$G_{ma} = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{500q_u}{2(1+0.33)} = 1 q_u \quad \text{式(1)}$$

$$K_{ma} = \frac{2}{3} \frac{1+\nu}{1-2\nu} q_u = 0.1 q_u \quad \text{式(2)}$$

$$c = \frac{1}{2} q_u \quad \text{式(3)}$$

※どの程度の範囲の地盤を確率的に同一であるとみなしうるかの目安となる距離

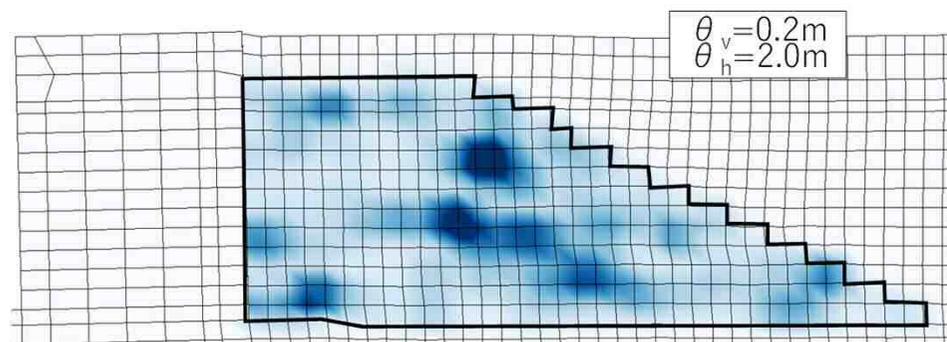
土田他：数値シミュレーションによる不同沈下の予測とその空港舗装設計への適用，港湾技術研究所報告，Vol.27，No.4，1988.

空間的ばらつきの生成には改良体平均強度，変動係数および自己相関距離※が必要

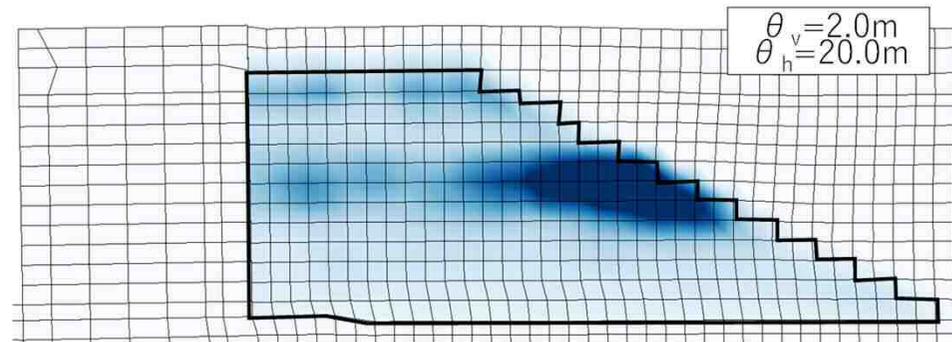
→ 平均強度 : 500, 1,000, 1,790, 2,238, 3,340 kN/m² の5水準

変動係数 : 0.33 (高品質), 0.80 (低品質) の2水準

自己相関距離 : 鉛直 0.4 m, 水平 3.0 m の固定値



自己相関距離が小さいとき



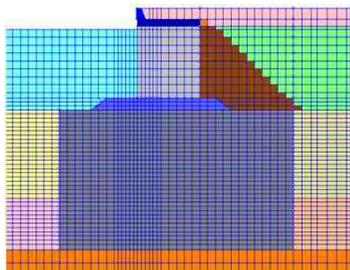
自己相関距離が大きいとき

2. 解析条件

解析ケース

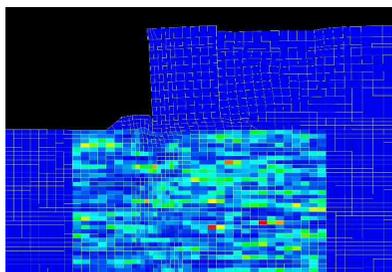
従来法（空間的ばらつきを考慮しない）

- ・ シリーズ0：5ケース



提案法（空間的ばらつきを直接的に考慮）

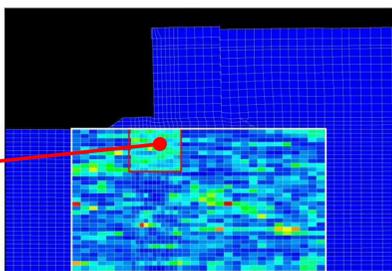
- ・ シリーズ1：10ケース



提案法（範囲ごとに異なる施工仕様を適用）

- ・ シリーズ2：25ケース

ケーソン前趾直下



シリーズ2

シリーズ0

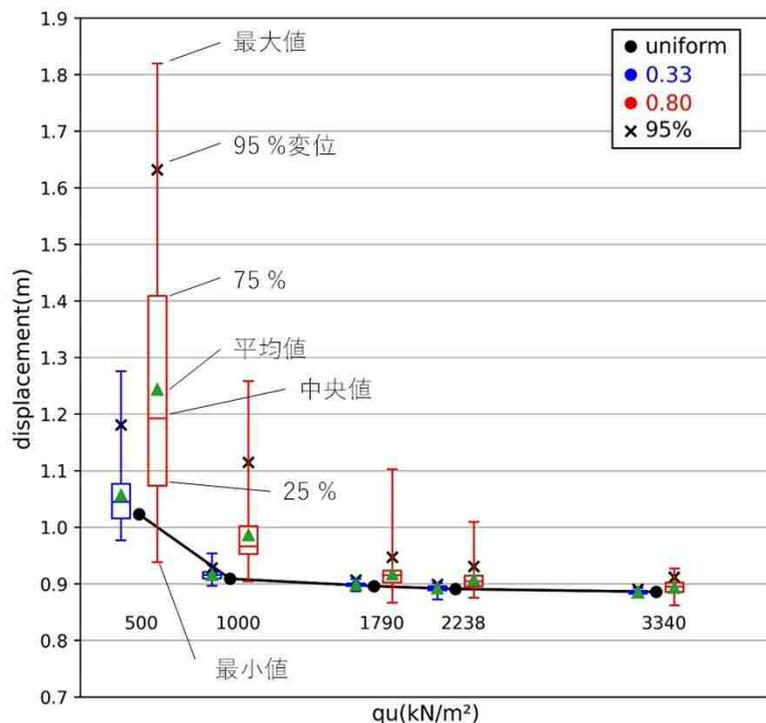
| ケース | 強度 |
|-----|-------------------|
| | kN/m ² |
| 0_1 | 500 |
| 0_2 | 1,000 |
| 0_3 | 1,790 |
| 0_4 | 2,238 |
| 0_5 | 3,340 |

シリーズ1

| ケース | 平均強度 | 変動係数 |
|------|-------------------|------|
| | kN/m ² | - |
| 1_1 | 500 | 0.33 |
| 1_2 | 500 | 0.80 |
| 1_3 | 1,000 | 0.33 |
| 1_4 | 1,000 | 0.80 |
| 1_5 | 1,790 | 0.33 |
| 1_6 | 1,790 | 0.80 |
| 1_7 | 2,238 | 0.33 |
| 1_8 | 2,238 | 0.80 |
| 1_9 | 3,340 | 0.33 |
| 1_10 | 3,340 | 0.80 |

※各ケース100断面ずつ解析を実施

| ケース | ケーソン前趾直下 | | その他 | |
|------|-------------------|------|-------------------|------|
| | 平均強度 | 変動係数 | 平均強度 | 変動係数 |
| | kN/m ² | - | kN/m ² | - |
| 2_1 | 500 | 0.33 | 500 | 0.80 |
| 2_2 | 500 | 0.80 | 500 | 0.33 |
| 2_3 | 500 | 0.33 | 1,000 | 0.33 |
| 2_4 | 500 | 0.33 | 1,790 | 0.33 |
| 2_5 | 500 | 0.33 | 2,238 | 0.33 |
| 2_6 | 500 | 0.33 | 3,340 | 0.33 |
| 2_7 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.33 |
| 2_8 | 1,000 | 0.80 | 500 | 0.80 |
| 2_9 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.80 |
| 2_10 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.80 |
| 2_11 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.33 |
| 2_12 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.80 |
| 2_13 | 1,790 | 0.80 | 500 | 0.80 |
| 2_14 | 1,790 | 0.80 | 1,000 | 0.80 |
| 2_15 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.33 |
| 2_16 | 2,238 | 0.33 | 500 | 0.80 |
| 2_17 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.80 |
| 2_18 | 2,238 | 0.80 | 500 | 0.80 |
| 2_19 | 2,238 | 0.80 | 1,000 | 0.80 |
| 2_20 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.33 |
| 2_21 | 3,340 | 0.33 | 500 | 0.80 |
| 2_22 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.80 |
| 2_23 | 3,340 | 0.80 | 500 | 0.80 |
| 2_24 | 3,340 | 0.80 | 1,000 | 0.80 |
| 2_25 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.33 |



※95 %変位：100断面のうち6番目に大きい変位

提案法の解析結果を基準としたとき、提案法と従来法の解析結果が等しくなるときの強度低減率=適切な値

→20~33%の間にあるという結果になった

⇒現行の基準では強度低減率33%なので、これをもう少し小さくできる可能性が示された

| 平均強度 | | 強度低減率 | 残留水平変位 | | |
|-------------------|-------------------|-------|------------------------|----|-------|
| 提案法 | 従来法 | | 提案法 変動係数0.33, 95%変位 | 大小 | 従来法 |
| kN/m ² | kN/m ² | % | m | - | m |
| 3,340 | 500 | 85.0 | 0.891 | < | 1.023 |
| 2,238 | 500 | 77.7 | 0.899 | < | 1.023 |
| 1,790 | 500 | 72.1 | 0.907 | < | 1.023 |
| 3,340 | 1,000 | 70.1 | 0.891 | < | 0.909 |
| 2,238 | 1,000 | 55.3 | 0.899 | < | 0.909 |
| 1,000 | 500 | 50.0 | 0.928 | < | 1.023 |
| 3,340 | 1,790 | 46.4 | 0.891 | < | 0.896 |
| 1,790 | 1,000 | 44.1 | 0.907 | < | 0.909 |
| 3,340 | 2,238 | 33.0 | 0.891 | < | 0.891 |
| 2,238 | 1,790 | 20.0 | 0.899 | > | 0.896 |
| 3,340 | 3,340 | 0.0 | 0.891 | > | 0.886 |
| 2,238 | 2,238 | 0.0 | 0.899 | > | 0.891 |
| 1,790 | 1,790 | 0.0 | 0.907 | > | 0.896 |
| 1,000 | 1,000 | 0.0 | 0.928 | > | 0.909 |

現行の低減率

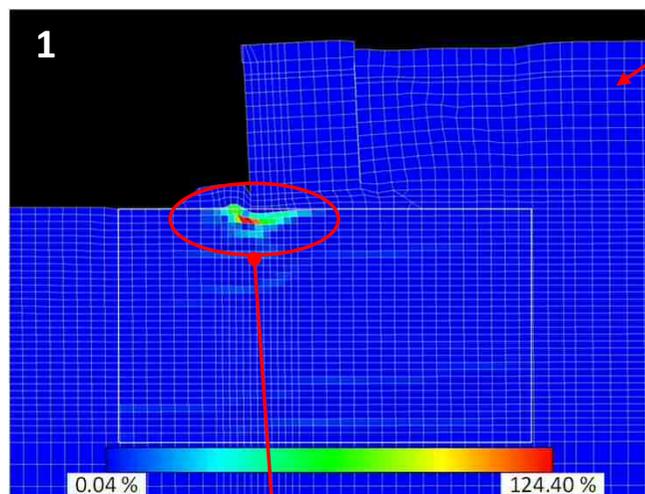
3. 解析結果・考察

100断面を変位が大きい順に並び変え

→ケーソン前趾直下周辺に弱部が集中している
断面で変位が大きくなる傾向

⇒この範囲をクリティカル部と設定

せん断ひずみの分布図

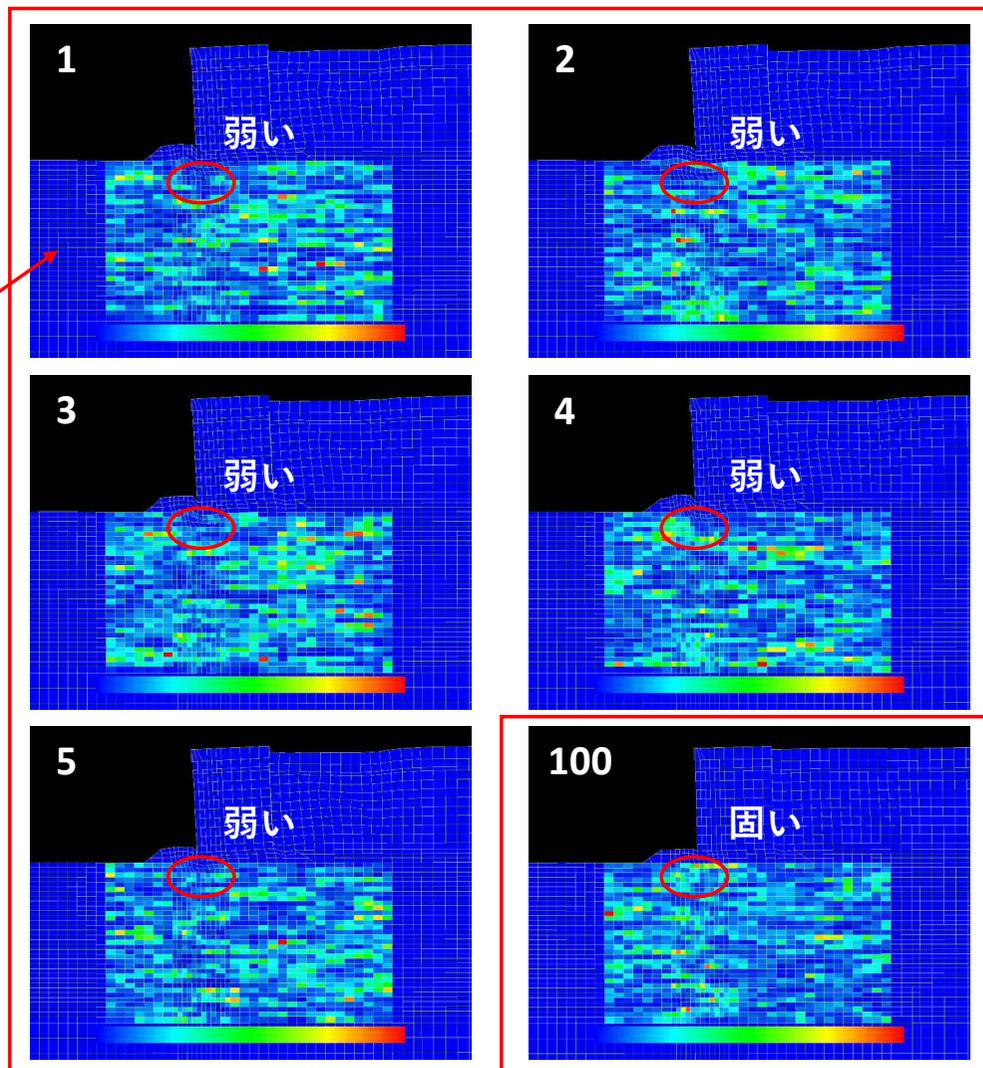


非常に大きいせん断ひずみが発生
→改良体要素が破壊されている

同一断面

粘着力の分布図

平均強度：500 kN/m²
変動係数：0.80



3. 解析結果・考察

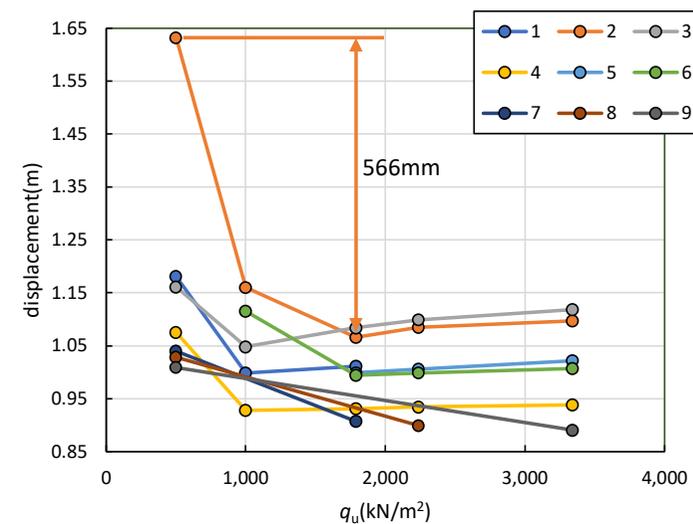
構造物の要求性能に大きく影響する項目の特定 9

4つの項目の影響について整理

- ・クリティカル部の平均強度
- ・クリティカル部の変動係数
- ・その他の平均強度
- ・その他の変動係数

クリティカル部の平均強度以外の条件が同じグループ

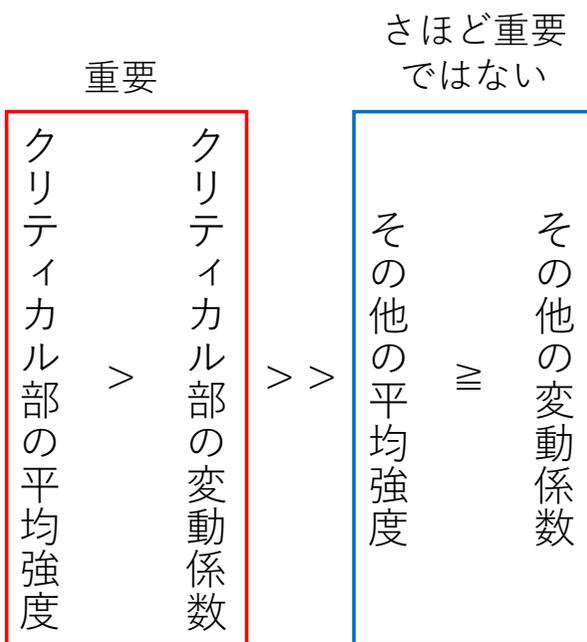
| グループ | ケース | クリティカル部 | | その他 | | 95%変位 m |
|------|------|---------------------------|-----------|---------------------------|-----------|------------|
| | | 平均強度 kN/m ² | 変動係数 - | 平均強度 kN/m ² | 変動係数 - | |
| 1 | 1_1 | 500 | 0.33 | 500 | 0.33 | 1.181 |
| | 2_7 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.33 | 0.999 |
| | 2_11 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.33 | 1.011 |
| 2 | 1_2 | 500 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.632 |
| | 2_8 | 1,000 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.160 |
| | 2_13 | 1,790 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.066 |
| | 2_18 | 2,238 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.085 |
| | 2_23 | 3,340 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.097 |
| 3 | 2_1 | 500 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.161 |
| | 2_9 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.048 |
| | 2_10 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.084 |
| | 2_16 | 2,238 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.099 |
| | 2_21 | 3,340 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.118 |
| 4 | 2_3 | 500 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 1.075 |
| | 1_3 | 1,000 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.928 |
| | 2_15 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.931 |
| | 2_20 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.934 |
| | 2_25 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.938 |
| 5 | 2_12 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 0.999 |
| | 2_17 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 1.006 |
| | 2_22 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 1.022 |
| 6 | 1_4 | 1,000 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 1.115 |
| | 2_14 | 1,790 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.994 |
| | 2_19 | 2,238 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.999 |
| | 2_24 | 3,340 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 1.007 |
| 7 | 2_4 | 500 | 0.33 | 1,790 | 0.33 | 1.040 |
| | 1_5 | 1,790 | 0.33 | 1,790 | 0.33 | 0.907 |
| 8 | 2_5 | 500 | 0.33 | 2,238 | 0.33 | 1.028 |
| | 1_7 | 2,238 | 0.33 | 2,238 | 0.33 | 0.899 |
| 9 | 2_6 | 500 | 0.33 | 3,340 | 0.33 | 1.009 |
| | 1_9 | 3,340 | 0.33 | 3,340 | 0.33 | 0.891 |



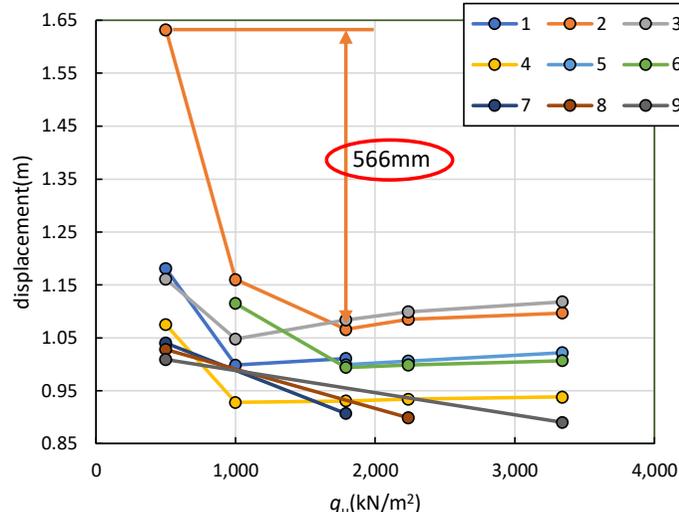
3. 解析結果・考察

構造物の要求性能に大きく影響する項目の特定 10

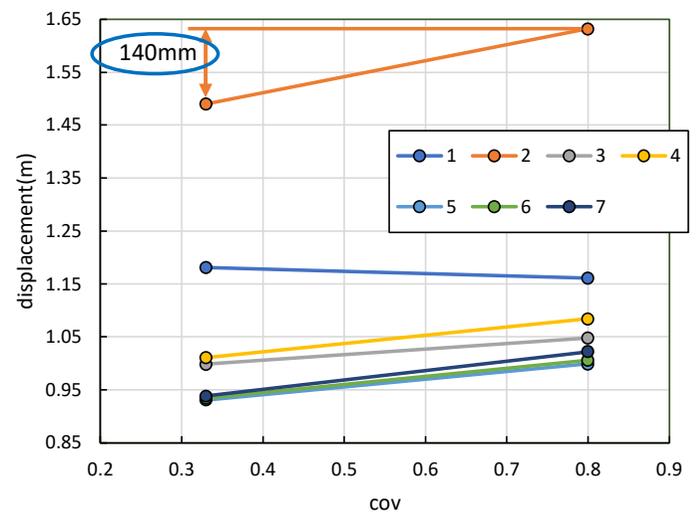
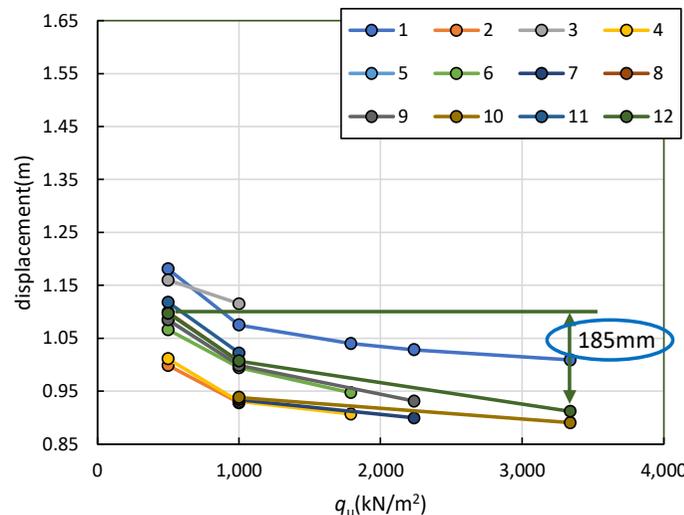
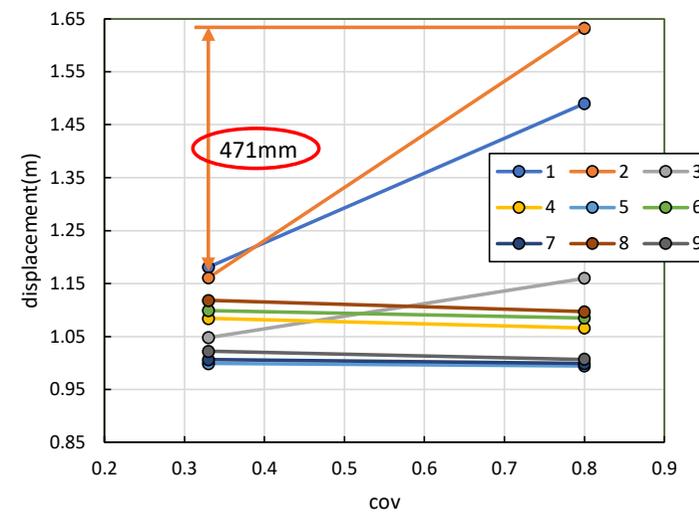
4つの項目の影響について整理



クリティカル部の平均強度



クリティカル部の変動係数



その他の平均強度

その他の変動係数

経済性と安全性の検討

- 95 %変位の許容値を 1 m以下とした場合を考える
- 35ケースのうちこれを満足するのは14ケース
- 経済性と安全性の両面から最適なケースを選定する

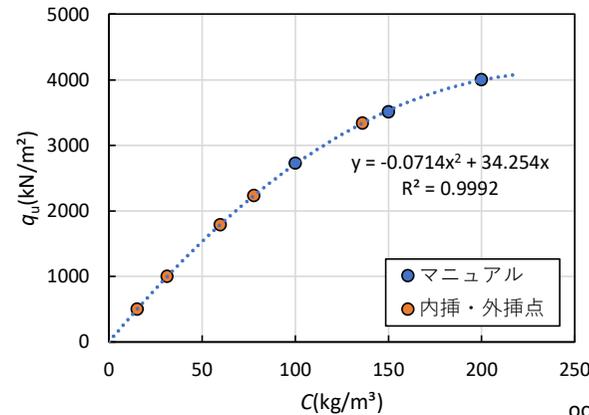
OK ↑

| ケース | クリティカル部 | | その他 | | 95%変位 m |
|------|-------------------|------|-------------------|------|--------------|
| | 平均強度 | 変動係数 | 平均強度 | 変動係数 | |
| | kN/m ² | - | kN/m ² | - | |
| 1_9 | 3,340 | 0.33 | 3,340 | 0.33 | 0.891 |
| 1_7 | 2,238 | 0.33 | 2,238 | 0.33 | 0.899 |
| 1_5 | 1,790 | 0.33 | 1,790 | 0.33 | 0.907 |
| 1_10 | 3,340 | 0.80 | 3,340 | 0.80 | 0.912 |
| 1_3 | 1,000 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.928 |
| 2_15 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.931 |
| 1_8 | 2,238 | 0.80 | 2,238 | 0.80 | 0.931 |
| 2_20 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.934 |
| 2_25 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.938 |
| 1_6 | 1,790 | 0.80 | 1,790 | 0.80 | 0.947 |
| 2_14 | 1,790 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.994 |
| 2_7 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.33 | 0.999 |
| 2_19 | 2,238 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.999 |
| 2_12 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 0.999 |
| 2_17 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 1.006 |
| 2_24 | 3,340 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 1.007 |

| | | | | | |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 2_6 | 500 | 0.33 | 3,340 | 0.33 | 1.009 |
| 2_11 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.33 | 1.011 |
| 2_22 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 1.022 |
| 2_5 | 500 | 0.33 | 2,238 | 0.33 | 1.028 |
| 2_4 | 500 | 0.33 | 1,790 | 0.33 | 1.040 |
| 2_9 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.048 |
| 2_13 | 1,790 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.066 |
| 2_3 | 500 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 1.075 |
| 2_10 | 1,790 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.084 |
| 2_18 | 2,238 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.085 |
| 2_23 | 3,340 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.097 |
| 2_16 | 2,238 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.099 |
| 1_4 | 1,000 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 1.115 |
| 2_21 | 3,340 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.118 |
| 2_8 | 1,000 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.160 |
| 2_1 | 500 | 0.33 | 500 | 0.80 | 1.161 |
| 1_1 | 500 | 0.33 | 500 | 0.33 | 1.181 |
| 2_2 | 500 | 0.80 | 500 | 0.33 | 1.490 |
| 1_2 | 500 | 0.80 | 500 | 0.80 | 1.632 |

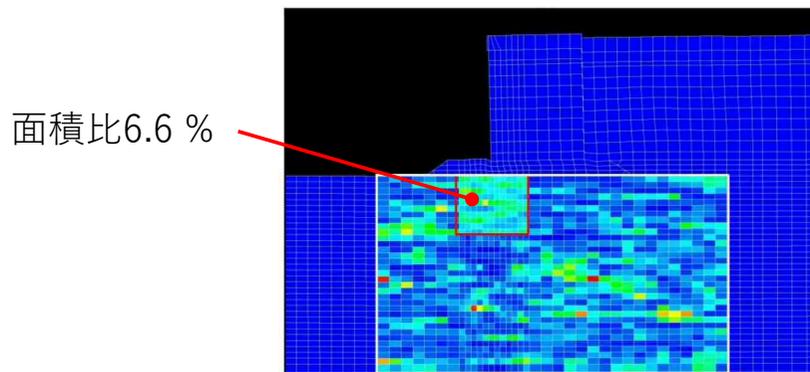
経済性の検討

- 改良地盤の平均強度とセメント添加量を紐づけて考える
→マニュアルに記載のデータから関係式を作成
- 改良地盤の変動係数と施工時間を紐づけて考える
→変動係数0.80の場合は、変動係数0.33に比べて羽切回数を少なくでき、施工時間が2/3になると仮定した
- 赤字の3ケースが経済性に優れる結果となった



https://www.penta-ocean.co.jp/business/project/pj_story/029.html

| ケース | クリティカル部 | | その他 | | 95%変位 m | 低減率 | |
|------|-------------------|------|-------------------|------|------------|-------|-------|
| | 平均強度 | 変動係数 | 平均強度 | 変動係数 | | C | t |
| | kN/m ² | - | kN/m ² | - | | % | % |
| 1_9 | 3,340 | 0.33 | 3,340 | 0.33 | 0.891 | 100.0 | 100.0 |
| 1_7 | 2,238 | 0.33 | 2,238 | 0.33 | 0.899 | 57.2 | 100.0 |
| 1_5 | 1,790 | 0.33 | 1,790 | 0.33 | 0.907 | 43.8 | 100.0 |
| 1_10 | 3,340 | 0.80 | 3,340 | 0.80 | 0.912 | 100.0 | 66.7 |
| 1_3 | 1,000 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.928 | 22.9 | 100.0 |
| 2_15 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.931 | 24.3 | 100.0 |
| 1_8 | 2,238 | 0.80 | 2,238 | 0.80 | 0.931 | 57.2 | 66.7 |
| 2_20 | 2,238 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.934 | 25.2 | 100.0 |
| 2_25 | 3,340 | 0.33 | 1,000 | 0.33 | 0.938 | 28.0 | 100.0 |
| 1_6 | 1,790 | 0.80 | 1,790 | 0.80 | 0.947 | 43.8 | 66.7 |
| 2_14 | 1,790 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.994 | 24.3 | 66.7 |
| 2_7 | 1,000 | 0.33 | 500 | 0.33 | 0.999 | 11.9 | 100.0 |
| 2_19 | 2,238 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 0.999 | 25.2 | 66.7 |
| 2_12 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 0.999 | 24.3 | 68.9 |



安全性の検討

- 地震後の残存耐力を考慮するため、改良体の破壊の有無を確認した

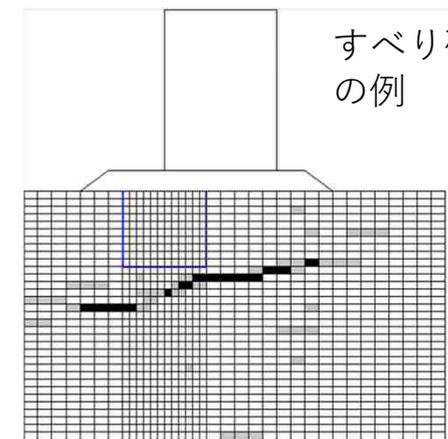
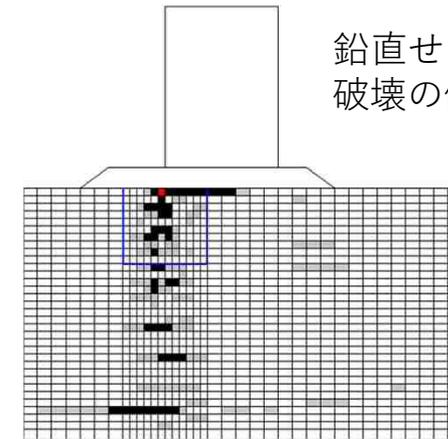
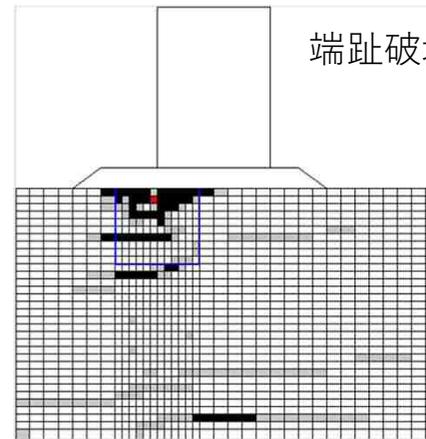
→破壊モードを確認（定性的な評価）

※正式な用語ではない

$\frac{q_u}{2}$ max: 破壊 ; 赤色

$\frac{q_u}{2} \times 0$ max: 準破壊※ ; 黒色

$\frac{q_u}{2} \times 0 \quad 0$ max: 弱破壊※ ; 灰色



| ケース | クリティカル部 | | その他 | | 破壊モード | | | |
|------|-------------------|------|-------------------|------|-------|-------|-----|------|
| | 平均強度 | 変動係数 | 平均強度 | 変動係数 | 端趾 | 鉛直せん断 | すべり | なし |
| | kN/m ² | - | kN/m ² | - | % | % | % | % |
| 2_12 | 1,790 | 0.33 | 1,000 | 0.80 | 0 | 0 | 1 | 99 |
| 2_14 | 1,790 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 38 | 0 | 1 | 61 |
| 2_19 | 2,238 | 0.80 | 1,000 | 0.80 | 22 | 0 | 2 | 77 |
| | | | 割合 | | 19.9 | 0.0 | 1.3 | 78.7 |

⇒ ケース2_12が最も安全と判断 クリティカル部：高品質
 その他：低品質 ⇒ P.10の思想と一致