

平成31年度 建築基準整備促進事業報告会

地震時における高強度改良地盤の応力評価法の合理化に関する検討

令和2年4月27日

一般社団法人建築性能基準推進協会

1.せん断強度の評価法（課題と目的）

- 地盤改良の設計は「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針（日本建築センター）¹⁾」（以下、指針と称す）に基づくことが多いが、指針で対象としている改良体の圧縮強度は3MN/m²程度

⇒ **より高強度な改良体の物性評価手法について、その適用性の確認が必要**

- 昨年度の検討では、圧縮強度が2～20MN/m²程度の室内配合供試体を用いて試験を行い、引張強度 s_t の評価法やせん断強度 τ_{s0} の強度依存性などに関する知見を得ることが出来た。一方で、せん断強度 τ ($\tau = \tau_{s0} + \sigma_n \cdot \tan \phi$) の算出に用いられる ϕ については明確な結論を出すまでには至らなかった。

⇒ **高強度改良体の ϕ について追加検討が必要**

今年度の実施内容

一面せん断試験により高強度改良体におけるせん断強度の評価法を実験的に検討

1.せん断強度の評価法（供試体作製）

- 昨年度の配合条件を参考にして、圧縮強度が1.5～13MN/m²となる5ケースの配合改良体を作製（図1, 図2）
- 配合材料も昨年度に倣い、固化材：ジオセツト200（太平洋セメント）、砂：山砂、粘土：木節粘土を使用（図3）
- 材齢28日の改良体を用いて、弾性波速度測定、一軸圧縮試験および一面せん断試験を実施

配合 ケース	固化材 添加量 (kg/m ³)	質量比 (%)			
		砂	粘土	固化材	水
S0	80	64.8	7.2	3.8	24.1
S2	200	59.3	6.6	8.8	25.3
S3	300	55.4	6.2	12.3	26.1
S4	400	52.0	5.8	15.4	26.8
S5	600	46.3	5.2	20.6	28.0

図1 配合条件

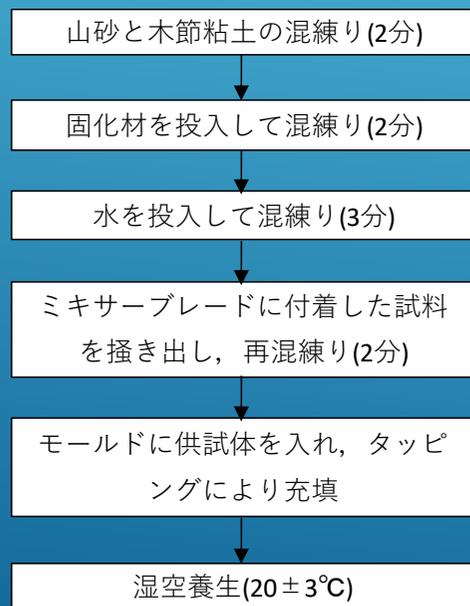


図2 供試体の作製フロー

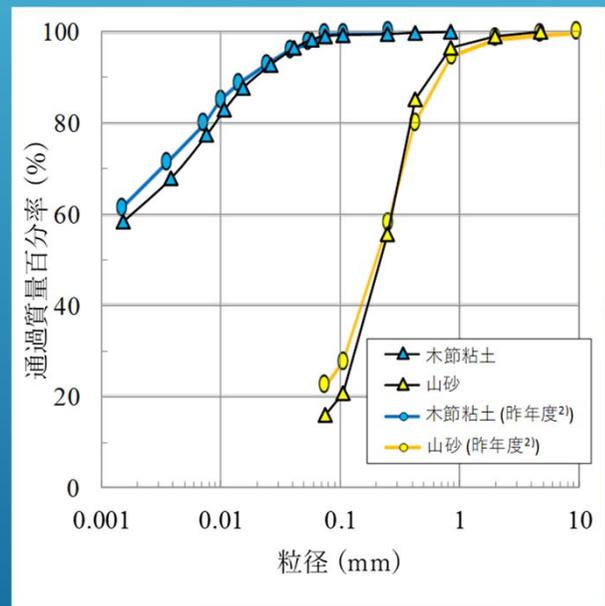


図3 材料の粒度

1.せん断強度の評価法（圧縮強度と変形係数）

- 圧縮試験の E_{50} と圧縮強度 q_u の相関性は直線的で、 $E_{50} = 274 q_u$ の関係（図4）
- 弾性波速度から求めた E_0 と q_u の関係は、強度レベルに応じて変化（図5）
- E_{50} と弾性波速度測定 E_0 の比（ E_{50}/E_0 ）は、圧縮強度の増大とともに大きくなる

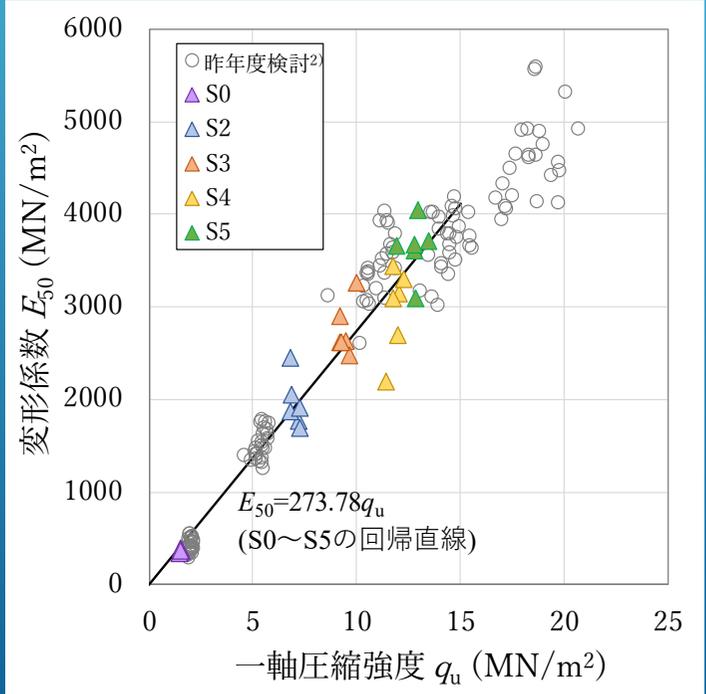


図4 q_u と E_{50} の関係

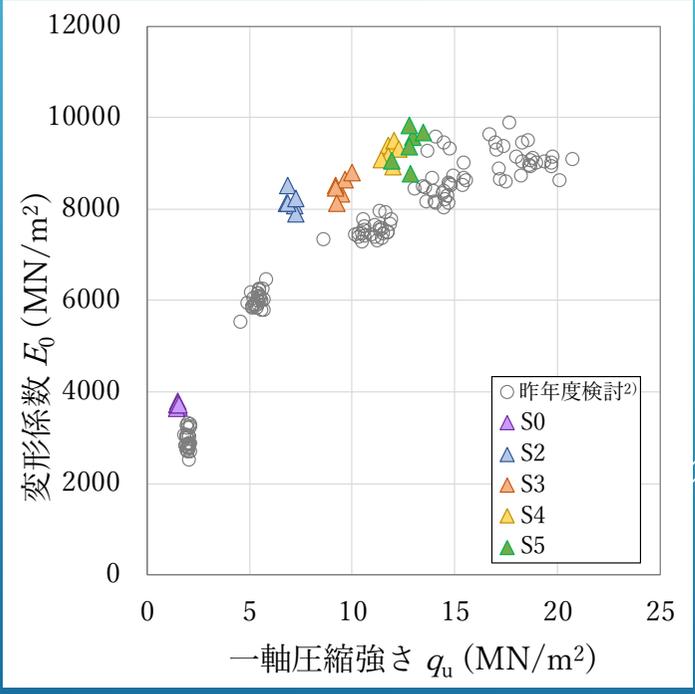


図5 q_u と E_0 の関係

1.せん断強度の評価法（一面せん断試験）

- 1配合ケースあたり8供試体の一面せん断を行い、 ϕ を算出
- ϕ_{cu} は $25.7 \sim 33.2^\circ$ 、 ϕ_{cu}' は $30.1 \sim 34.0^\circ$ で、 $q_u = 3 \text{ MN/m}^2$ 程度の各土質の ϕ （ $26.4 \sim 31.5^\circ$ ）に近い（図6）。昨年度の検討結果と ϕ_{cu} をもとに作成した強度線（ $F_{\tau} = F_{\tau s0} + \sigma_n \cdot \tan \phi$ ）は、強度レベルに応じて $F_{\tau s0}$ は大きくなるが ϕ は同程度（図7）
- $q_u = 13 \text{ MN/m}^2$ 程度までであれば、低強度改良体と同様の手法で ϕ を評価可能と考えられる

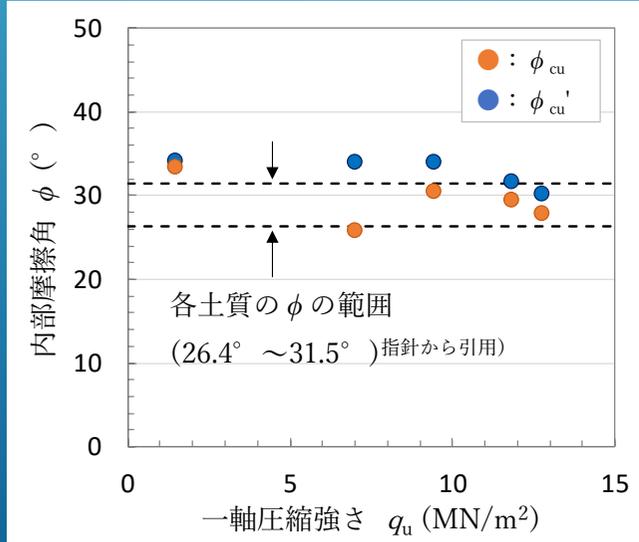


図6 圧縮強度と ϕ の関係

* ϕ_{cu} ; 初期上載圧とピークせん断強度の関係
 * ϕ_{cu}' ; ピーク時の上載圧とせん断強度の関係

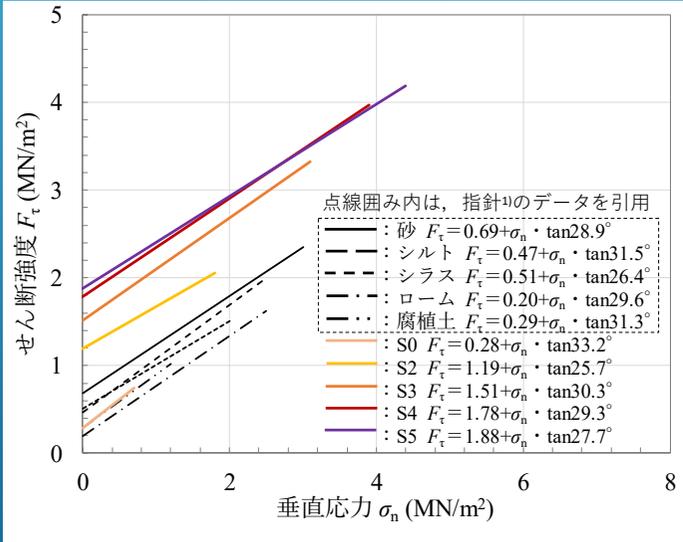
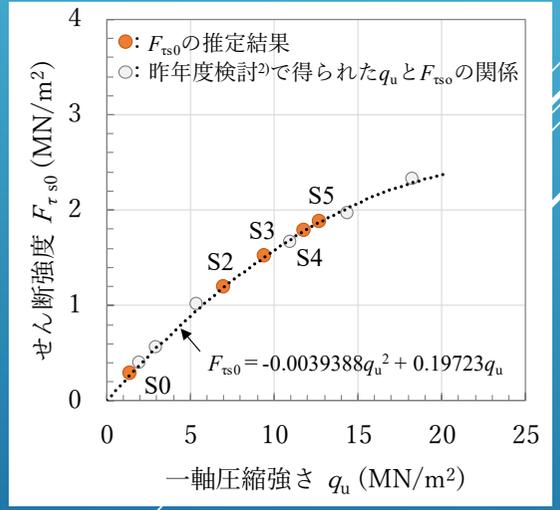


図7 本検討で得られた強度線と低強度改良体の強度線の比較



参考図
 圧縮強度 q_u とせん断強度 $F_{\tau s0}$ の関係
 (昨年度の検討結果)

2 : 原位置に打設した高強度改良体の水平抵抗評価

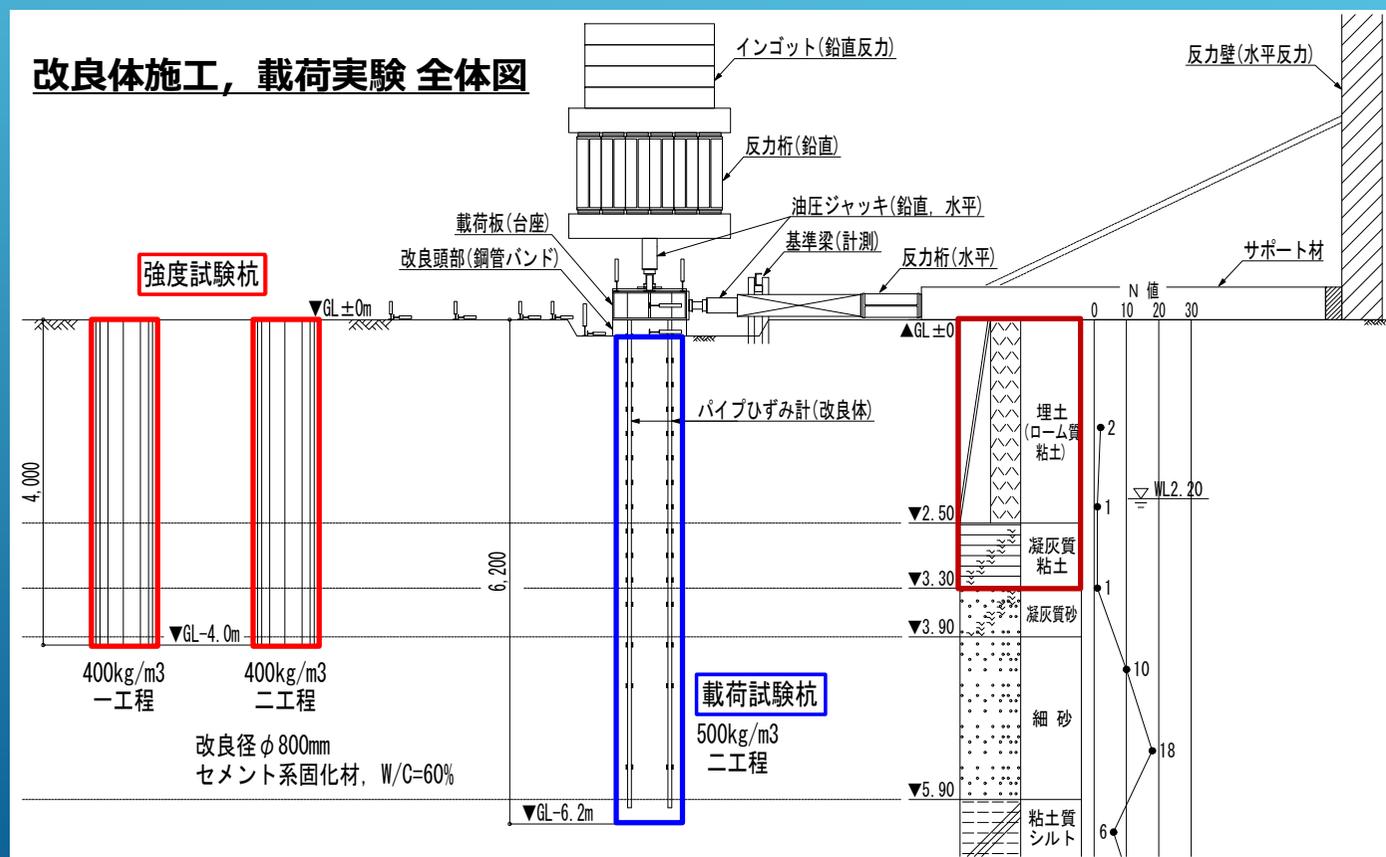
◆粘性土を対象とした高強度改良体 ($q_u=3\sim 5\text{MN/m}^2$) における改良強度特性の把握と水平抵抗特性を確認

スラリー系機械式深層混合処理工法による柱状地盤改良の現場施工試験

①掘削注入攪拌方式の違いによる改良強度特性

q_{uf} , F_{cf} , E_{50} , S_t

②水平載荷実験（鉛直＋水平同時載荷）による改良体の破壊形態及び水平耐力の評価検討
終局状態，曲げ，せん断



2 : 原位置に打設した高強度改良体の水平抵抗評価

柱状地盤改良の現場施工試験

① 掘削注入攪拌方式の違いによる改良強度特性



改良施工状況



一工程施工



二工程施工



一軸圧縮強度



割裂引張強度

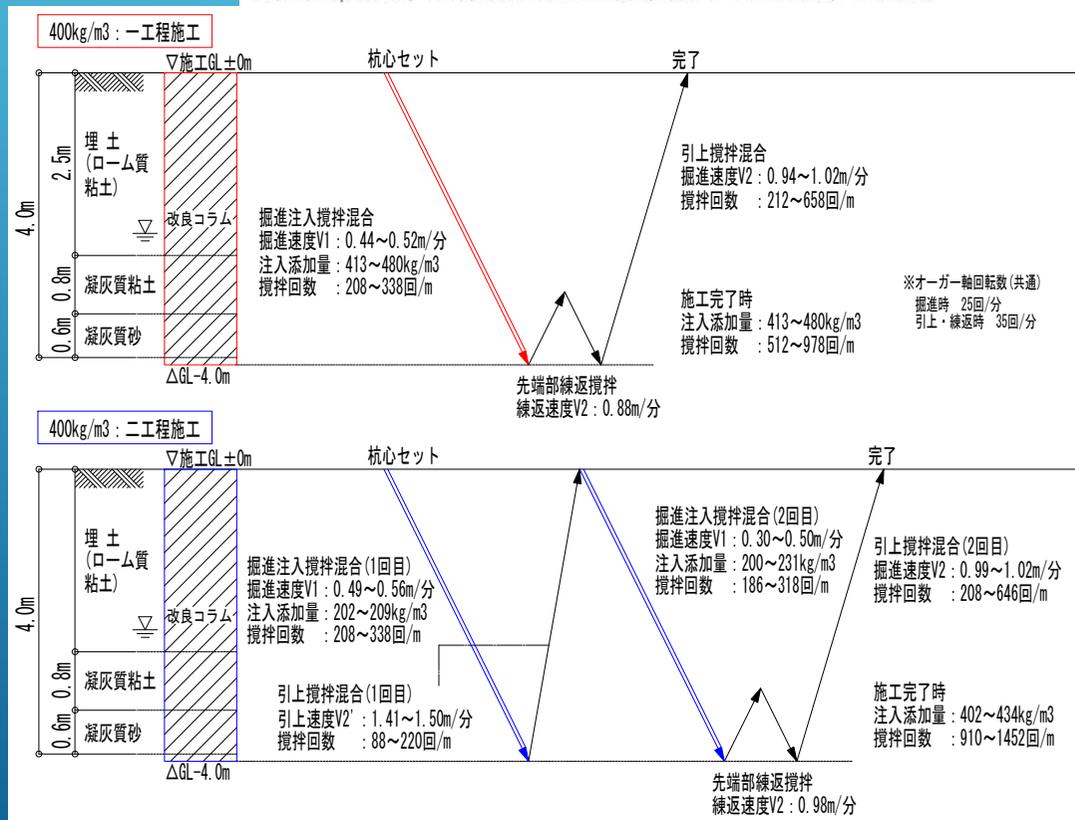
令和元年年度 建築基盤整備事業
(調整費) S28 現場施工試験
一軸圧縮強度試験 (0.28)
割裂強度試験 (0.28)
径 J7 CASE2-1 No. 9, 12

令和元年年度 建築基盤整備事業
(調整費) S28 現場施工試験
割裂強度試験 (0.28)
径 J7 CASE2-1 No. 4, 10, 17

ボーリングコア

試験杭改良長	注入添加量 (kg/m ³)	施工方法	施工速度(m/分)		特記事項 (試験目的)
			掘進時 v1	引上時 v2	
CASE-1 Lc=4.0m	400	一工程 注入攪拌	0.5	1.0	【強度試験杭】 施工方法の違いによる改良強度特性 (quf, E ₅₀ , Vf, St) の把握
CASE-2 Lc=4.0m	400 (200+200)	二工程 注入攪拌	0.5	1.0(1.5)	
CASE-3 Lc=6.2m	500 (250+250)				【荷重試験杭】 高強度改良体 qu=3~5MN/m ²
オーガー軸回転数(回/分)			25	35	攪拌混合回数 450 回/m 以上

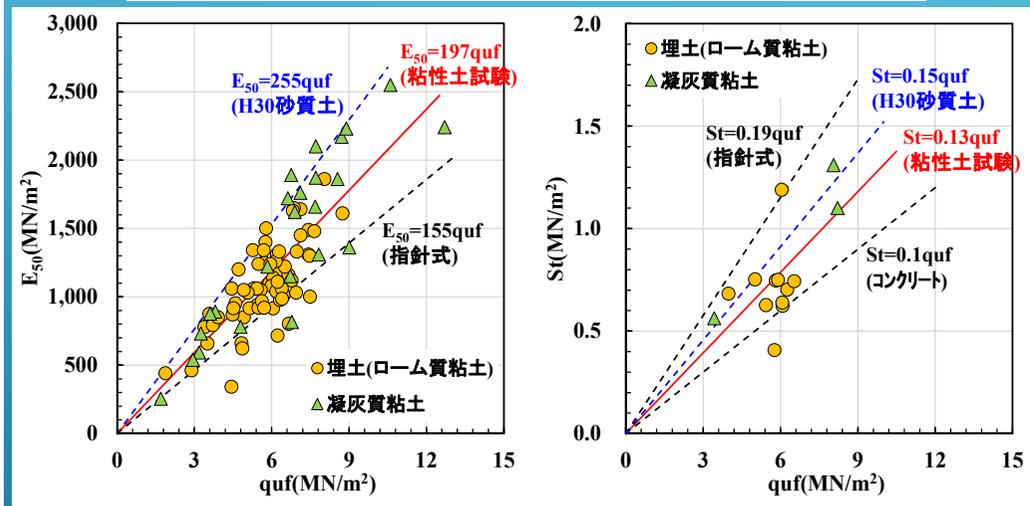
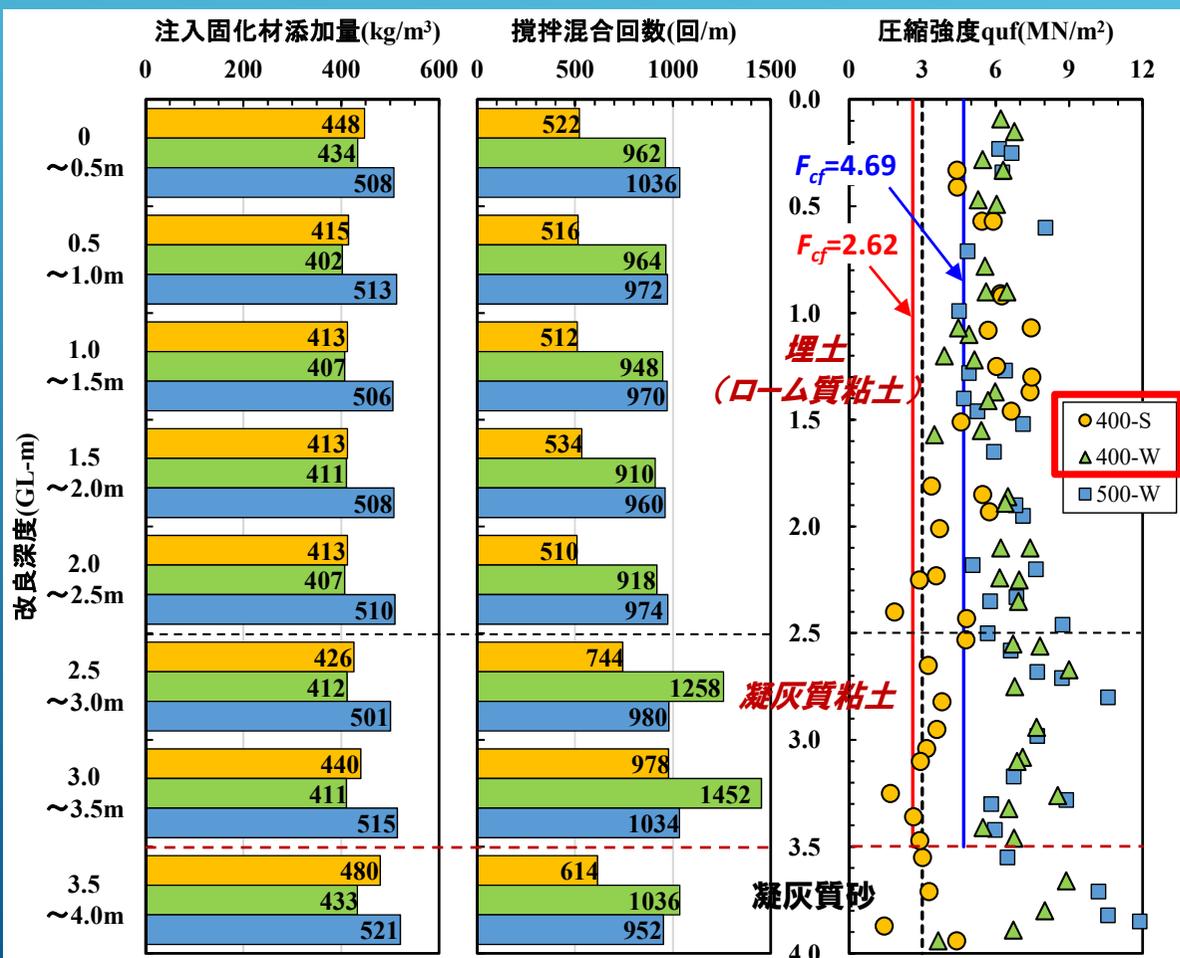
※改良径φ800mm, 配合仕様: セメント系固化材タブロック 2000, W/C=60%



2 : 原位置に打設した高強度改良体の水平抵抗評価

柱状地盤改良の現場施工試験

① 掘削注入攪拌方式の違いによる改良強度特性

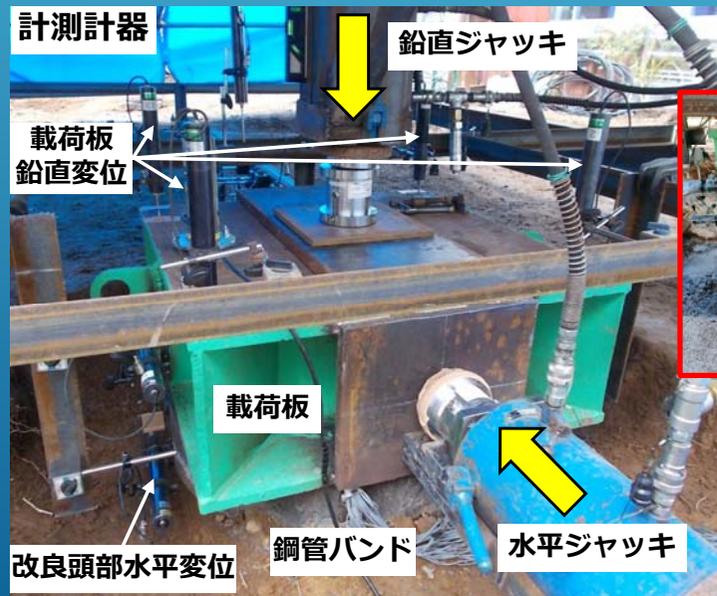
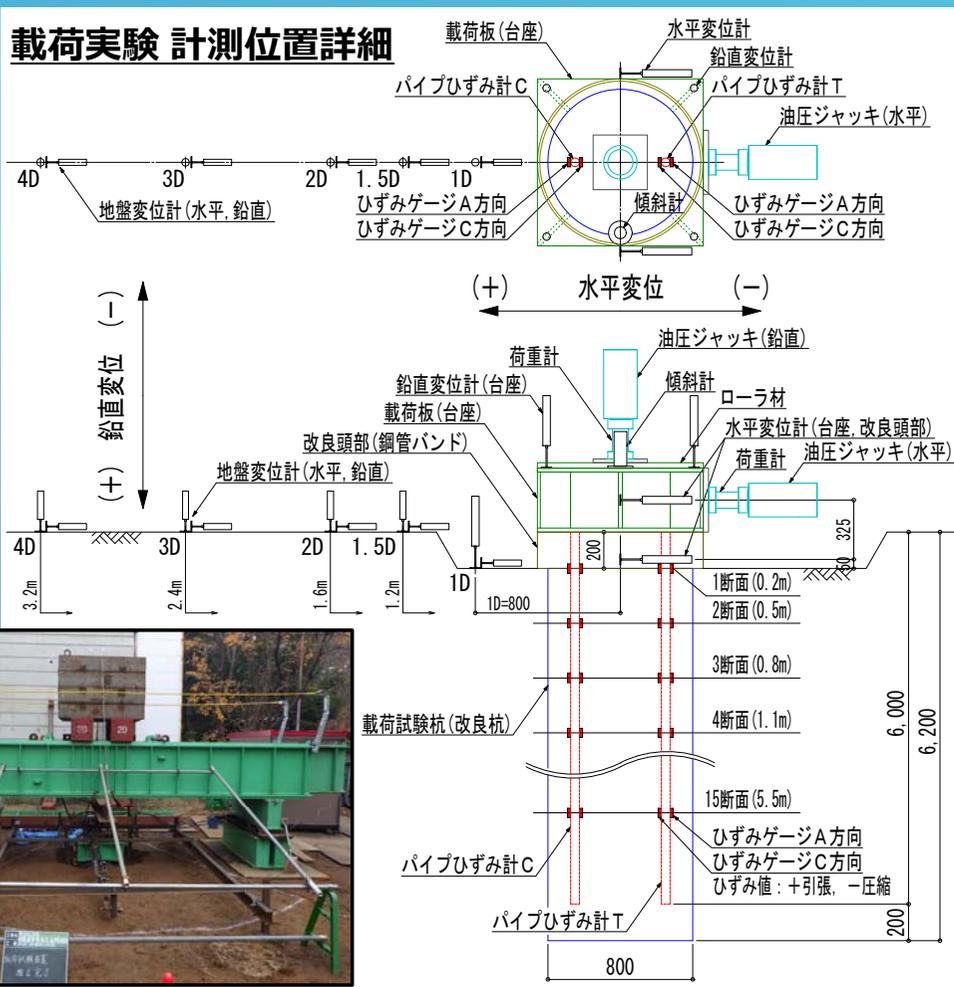


- ◆ 粘性土高強度改良 ($qu=3\text{MN/m}^2$ 以上) の品質性能確保として, 反復注入攪拌混合による二工程注入施工の優位性を確認
- ◆ $E_{50}=197q_{uf}$ (指針式155q_{uf})
 $S_t=0.13q_{uf}$ (指針式0.19q_{uf}) 強度相関式

2 : 原位置に打設した高強度改良体の水平抵抗評価

柱状地盤改良の現場施工試験

② 水平載荷実験による改良体の破壊形態及び水平耐力の評価検討



改良頭部接合

- ・ 頭部回転自由の条件
- ・ 改良体頭部に荷重を直接伝達



2：原位置に打設した高強度改良体の水平抵抗評価

② 水平載荷実験による改良体の破壊形態及び水平耐力の評価検討

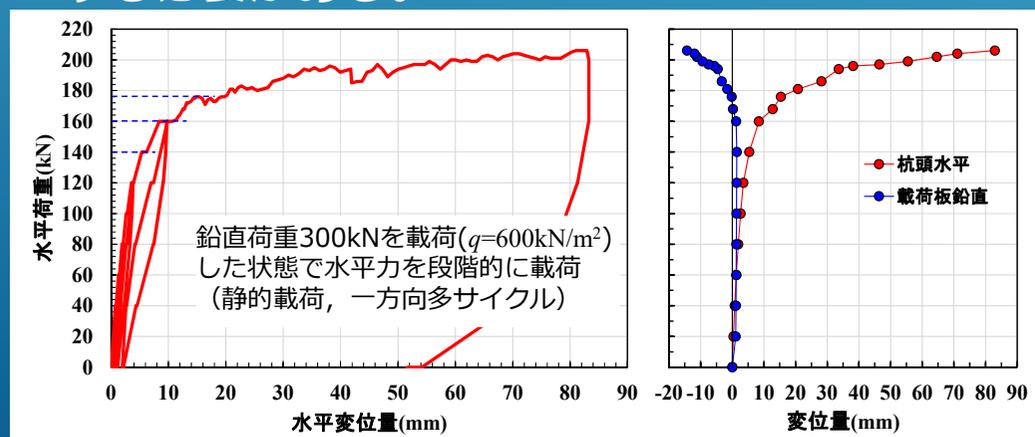
- ◆ 改良体のせん断耐力の評価方法について検討していく必要がある。

せん断破壊に至った時点（水平荷重160kN）

改良体最大せん断応力度 $\tau_{max}=427\text{kN/m}^2$

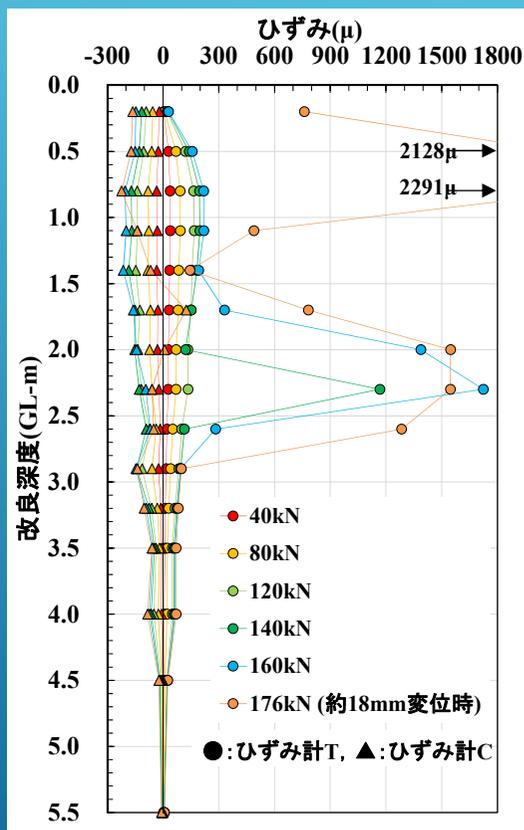
設計指針によるせん断耐力 $f_{\tau}=800\text{kN/m}^2$

- ◆ 改良体のせん断破壊が発生した後も、改良体の水平抵抗と支持力が喪失しなかったため、改良体の終局状態を評価する際には、改良体の損傷状態に加えて周辺地盤の抵抗力を考慮する必要がある。



【水平荷重と水平変位，鉛直変位の関係】

- ◆ 曲げによる引張ひずみの急激な増大が発生後、頭部付近でせん断破壊が生じた。



【改良体ひずみ分布】



【改良体掘り起し状況】

3 : 水平載荷実験の3D-FEMによるシミュレーション解析

◆シミュレーション解析による解析方法の妥当性の検討

解析モデルの設定

①解析モデル全体

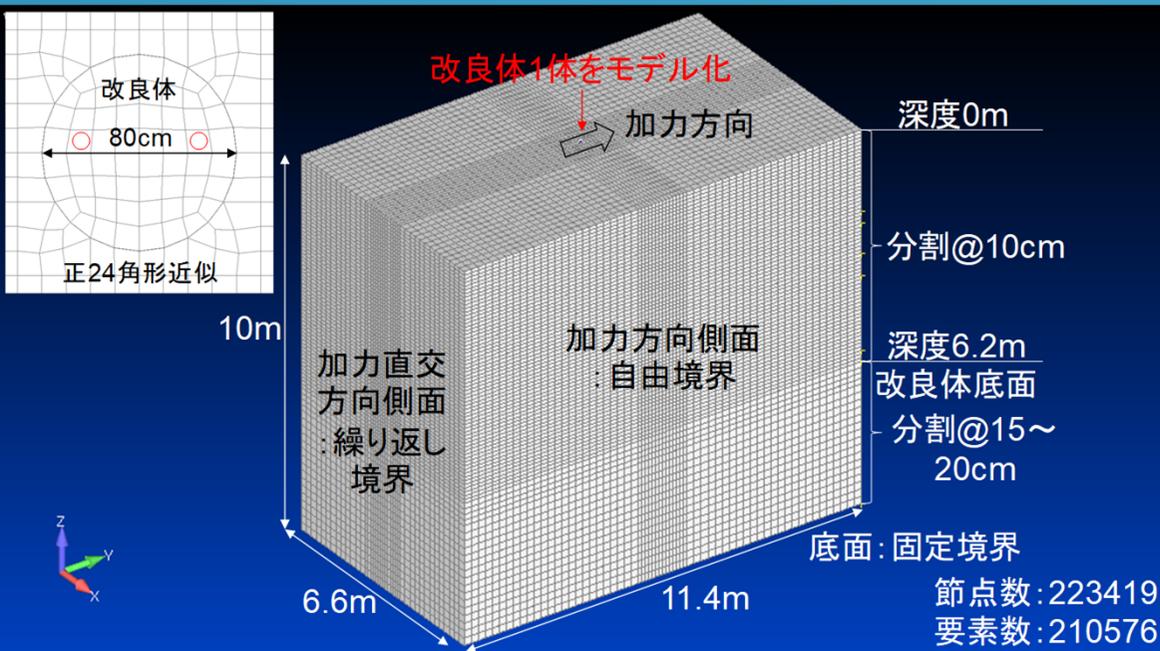
- 改良体、原地盤ともに六面体ソリッド要素でモデル化
- 領域中央に改良体1体をモデル化

②地盤のS波速度

- 改良体はボーリングコアによる計測値
- 原地盤は敷地内の別の位置のPS検層結果 (原位置でのレイリー波探査を別途実施したが、PS検層結果との差異が解析結果に与える影響は小さかったため、PS検層結果で設定)

③非線形特性

- 改良体は線形。原地盤は既往の動的変形試験結果を元にHDモデルで設定



土質	深度 (m)	改良体			原地盤			
		ρ (t/m ³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ (t/m ³)	Vs(m/s)	Vp(m/s)	$\gamma_{0.5}$ (%)
ローム質粘土	2.5	1.694	1100	2240	1.3	110(*)	170	0.1
凝灰質粘土	3.3	1.808	1340	2560	1.3	110(100)	170	0.1
凝灰質砂	3.9	1.864	1380	2630	1.3	200(260)	1430	0.1
細砂	5.9	1.908	1430	2720	1.3	200(260)	1430	0.1
粘土質シルト	-	1.908	1430	2720	1.5	160(260)	1430	0.3

原地盤のVsの括弧内はレイリー波探査による値。*は深度0.7mまで80、それ以深は100

3 : 水平載荷実験の3D-FEMによるシミュレーション解析

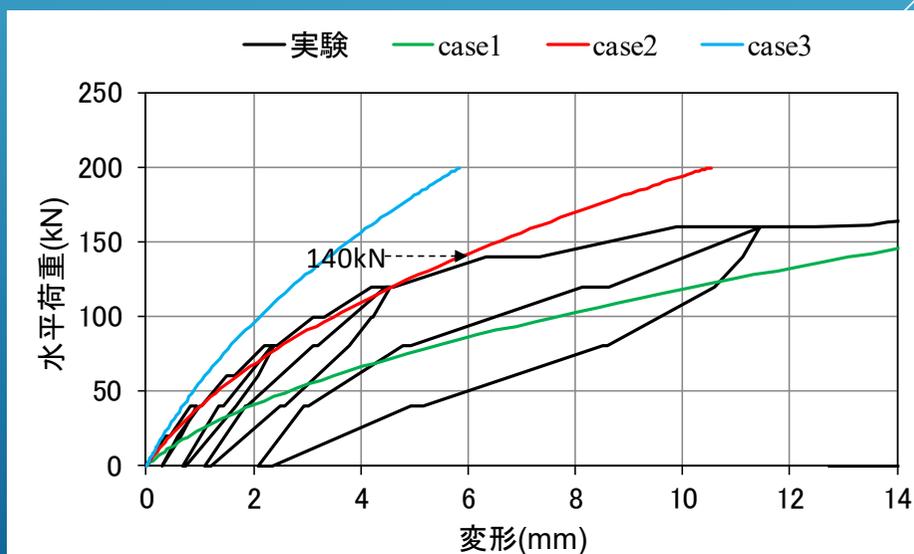
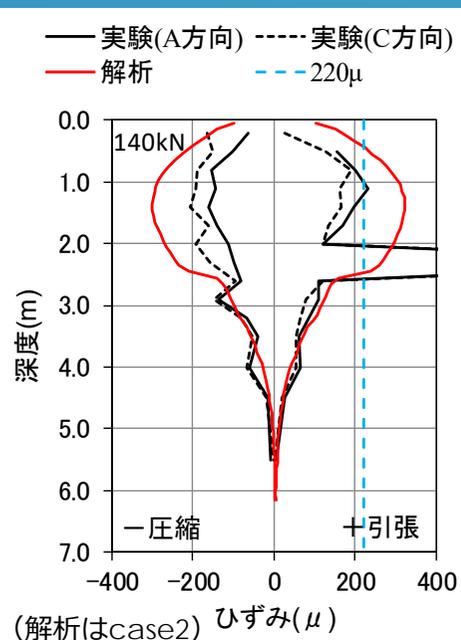
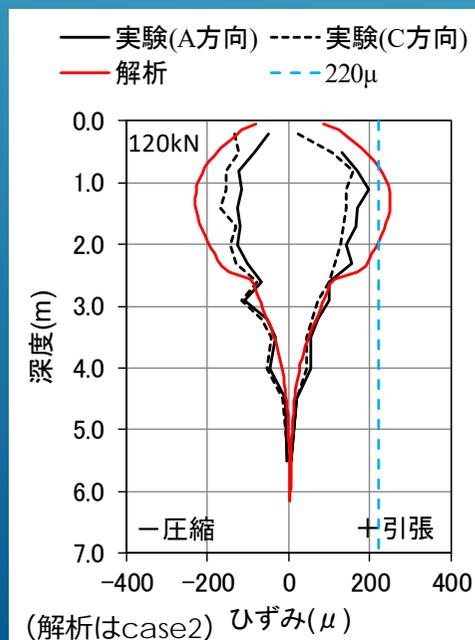
解析対象とする荷重レベル

実験での改良体の引張ひずみより

- ・ 荷重140kNまでは、深度2.3m以外は引張強度 $0.2q_{uf}$ (q_{uf} : 一軸圧縮強度) でのひずみ220 μ 以下
- ・ 全体としては概ね引張破壊前の140kNまでを解析対象

解析結果：改良体の荷重-変形関係

- ・ 原地盤のS波速度の影響検討
ローム質粘土と凝灰質粘土について
case1 : PS検層結果による設定値
case2 : case1の1.5倍
case3 : case1の2.0倍
- ・ case2の場合、解析対象とした140kNまでは実験と概ね対応。ひずみも同様。

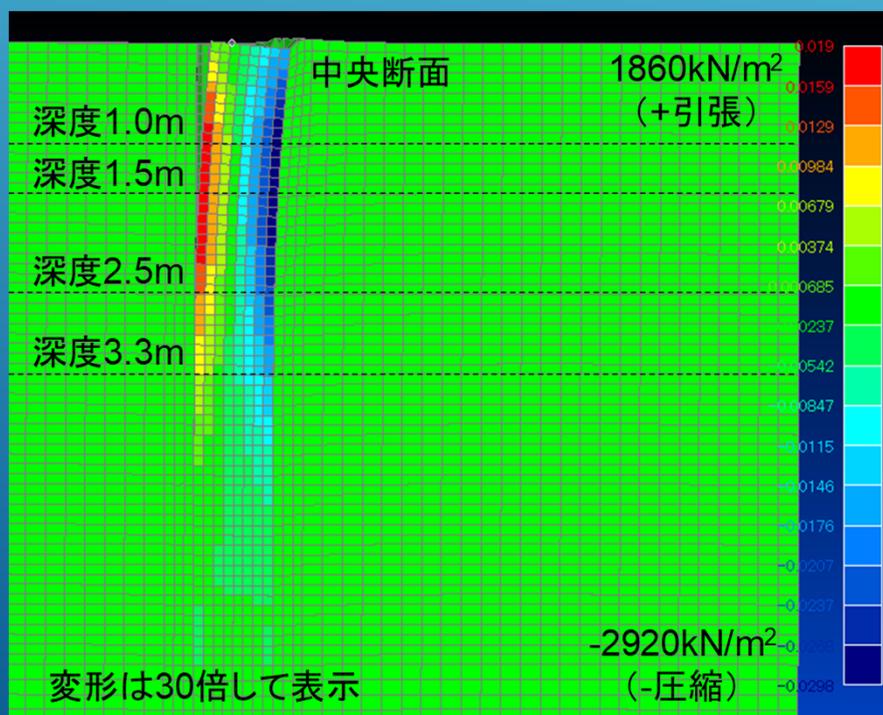


3 : 水平載荷実験の3D-FEMによるシミュレーション解析

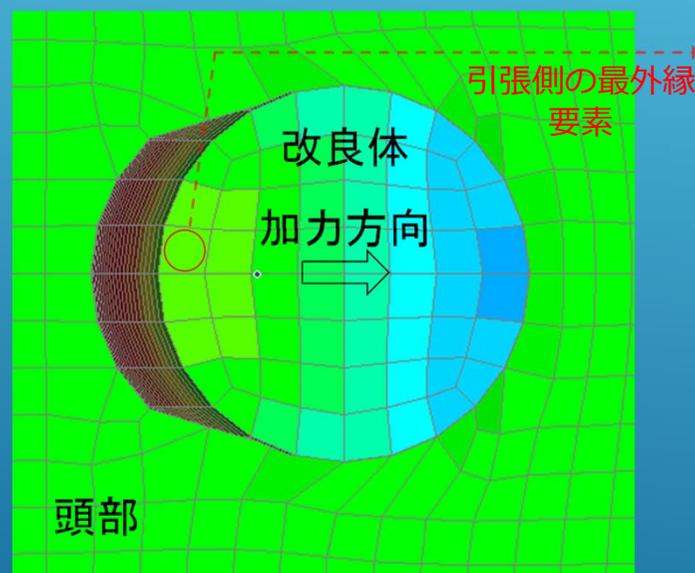
解析結果：改良体の鉛直応力度 (case2)

・引張側の最外縁の要素の深さ方向分布

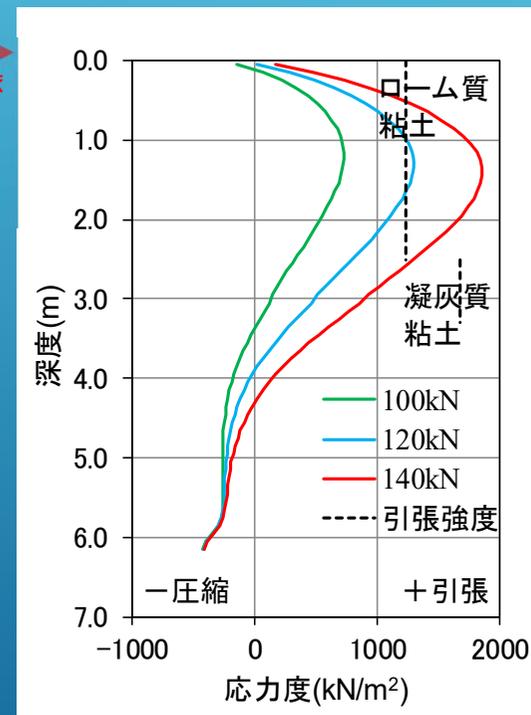
- ・ 140kN時には、実験では一部で引張破壊が生じたことから、引張強度と同程度かそれ以上の応力度であったと推測
- ・ 解析でも引張強度と同様の関係であることから、解析での応力度は実験と概ね対応



鉛直応力度カウンター (case2, 140kN)



頭部拡大



深さ方向分布 (case2)

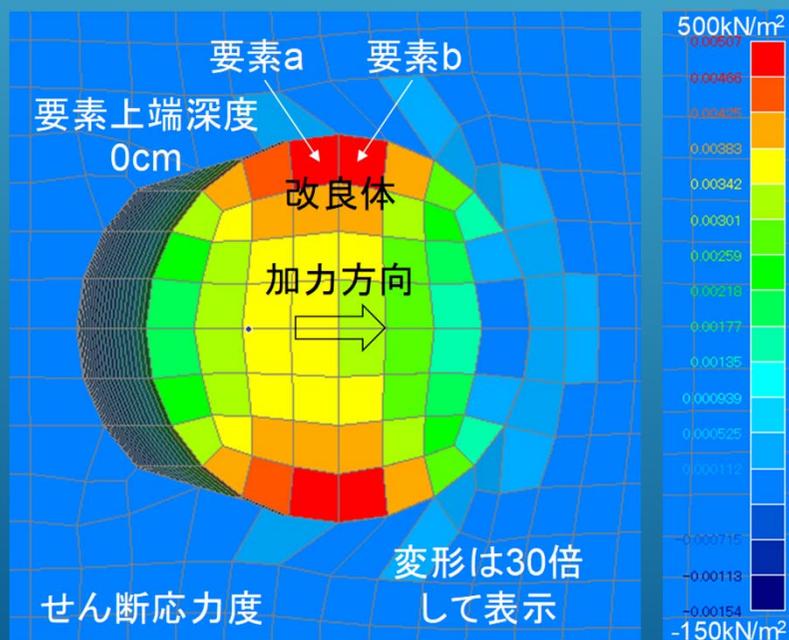
3 : 水平載荷実験の3D-FEMによるシミュレーション解析

解析結果：改良体のせん断応力度 (case2)

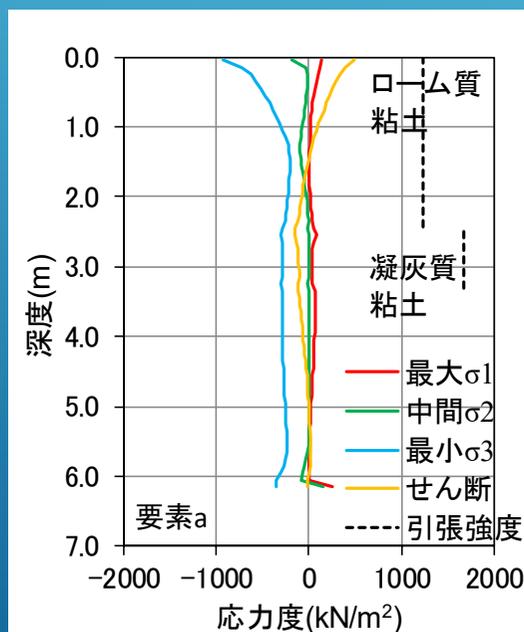
- せん断応力度が大きい要素a,bの主応力

- ・ 実験：168kN時にせん断破壊発生と推測。これより、140kNでもせん断破壊に近い応力状態であったと推測

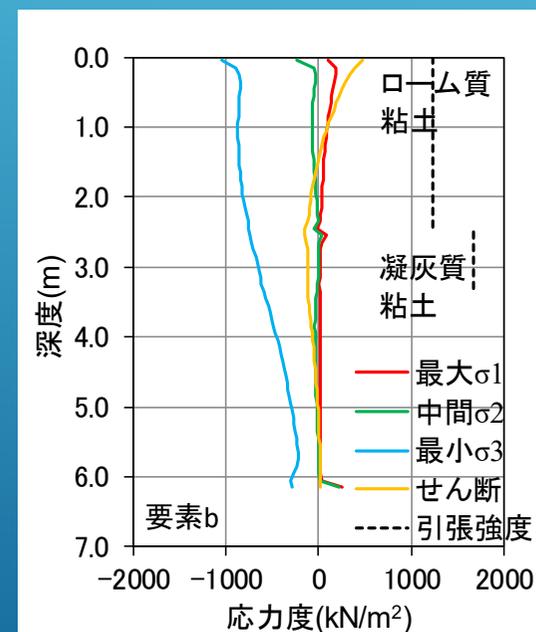
- ・ 解析：140kNでも引張側の最大主応力は引張強度の1/6程度
⇒ 解析でのせん断応力度は実験よりも過小評価の可能性あり



せん断応力度コンター (case2,140kN)



主応力の深さ方向分布 (case2,140kN)



3 : 水平載荷実験の3D-FEMによるシミュレーション解析

まとめ

- ・改良体の水平載荷実験の3次元FEMによるシミュレーション解析を行った。
- ・原地盤のローム質粘土、凝灰質粘土のS波速度をPS検層結果の1.5倍とすることで、解析は実験と概ね対応した。ただし、その要因は不明であり、課題として残る。
- ・解析での改良体の引張応力度は、実験と概ね対応する結果となった。
- ・解析での改良体のせん断応力度は、実験よりも過小評価の可能性があり、これについては今後の課題である。