

# 流動化処理土の力学挙動把握と盛土材としての有効性に関する数値解析的検討

名古屋大学 国際会員 山田英司, 中野正樹, 野田利弘, 浅岡顕

## 1 はじめに

本研究では 1980 年代から軟弱な地盤材料等を施工するために利用されてきた流動化処理工法<sup>1)</sup>に着目する。はじめに、現場発生土とその流動化処理土に対して各種力学試験を実施、土の骨格構造の働き（構造・過圧密・異方性）を記述する SYS カムクレイモデル<sup>2)</sup>により力学挙動を再現し、骨格構造の概念に基づく流動化処理工法の改良原理の解釈を試みた。

流動化処理工法の利用技術開発の一環として、壁面材、補強材を取り入れて拡幅盛土に流動化処理土が利用されている<sup>3),4)</sup>。そこで、本研究では次に、流動化処理土を用いた拡幅盛土工法の有効性を検討するため、施工事例を考慮した拡幅盛土の問題について土の構成式に SYS カムクレイモデル<sup>2)</sup>を搭載した水～土連成有限変形計算を実施した。

## 2 流動化処理土の力学特性

### 2.1 未処理土の物性

本研究では改良される材料に、実施工で利用する物に近い材料として名古屋市緑区桃山地区の地山の土を取り上げた。以下、図表・文中では未処理土（桃山）として示す。ここで各種物性試験から得られた未処理土（桃山）の物理特性を示す。土粒子密度は  $2.66\text{g/cm}^3$ 、液性限界 34.3%、塑性限界 24.3% であり、塑性指数は 10.0 であった。図-1 は未改良土（桃山）の粒経加積曲線を示す。図-1 から未改良土（桃山）は、礫分 26%、砂分 54%、シルト・粘土を含む細粒分は 20% と粒径幅が広いことが分かる。

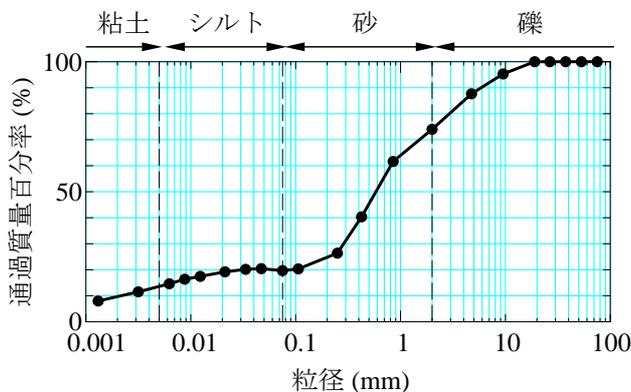


図-1 未処理土（桃山）粒経加積曲線

表-1 流動化処理土の配合設計

泥水密度	$\text{g/cm}^3$	1.6
発生土	$\text{kg/m}^3$	1091.85
水	$\text{kg/m}^3$	466.05
固化剤	$\text{kg/m}^3$	80.0
処理土密度	$\text{g/cm}^3$	1.638

### 2.2 流動化処理土の配合設計

本研究で作製した流動化処理土は、表-1 に示す配合設計に従って作製した。流動化処理土は、流動性を持ち、材料分離せず、要求される強度を満足するために、フロー値、ブリーディング（材料分離）率、一軸圧縮強度から、固化材や泥水の量を定める。本研究では 3 時間後のブリーディング率が 1% 以下で、28 日養生が一軸圧縮強度  $250 \sim 300\text{kN/m}^2$  で実施工でも十分に施工可能なものとして配合を決定している。未改良土（桃山）は、細粒分を多く含んだ土であったので、適量の水と固化材を加えることにより、要求する品質を有する改良土を作製することができた。また室内試験に用いた流動化処理土は全てモールド内で 28 日間養生したものを使用しており、以下、図表・文中では流動化処理土として示す。

### 2.3 流動化処理前後の力学挙動の違い

未処理土（桃山）と流動化処理土の標準圧密試験による圧縮曲線（比体積  $v \sim$  鉛直応力  $\sigma_v$  関係）を図-2 に示す。ここで未処理土（桃山）の供試体は水中落下法により作製した。図-2 から未処理土（桃山）の圧縮曲線はほぼ直線を示しており、構造も過圧密も有していない練返し正規圧密土とみなすことができる。一方、流動化処理土は未処理土（桃山）に対して非常に大きな比体積であるにもかかわらず、627.2kPa 以下の比較的小さい応力下では未処理土（桃山）よりもその圧縮性は小さく、除荷時の膨潤線とほぼ平行になっており、627.2kPa 以上の高応力下で大圧縮を起こしている。比体積が大きくなったのは、泥水を混合した影響が大きく、低応力下で圧縮性が小さいのは水和反応による固化である。材料としては未処理土（桃山）が改良することにより、比体積の大きな嵩張った材料となるが、ある一定の応力までは圧縮性は小さく、超過圧粘土に類似している。

図-3 は未処理土（桃山）と流動化処理土（28 日養生）の側圧一定非排水三軸せん断試験結果である。直径 5cm、高さ 10cm の円筒供試体を拘束圧 294kPa で等方圧密した後、側圧一定のまま、ひずみ速度 0.007mm/min で非排水単調載荷した。未処理土（桃山）に比べ流動化処理土は大きな比体積を有している（未処理土：1.74、流動化処理土：2.58）。しかし流動化処理土の初期の剛性も大きくなり、破壊時軸差応力も未処理土の 2 倍程度にまで上昇した。

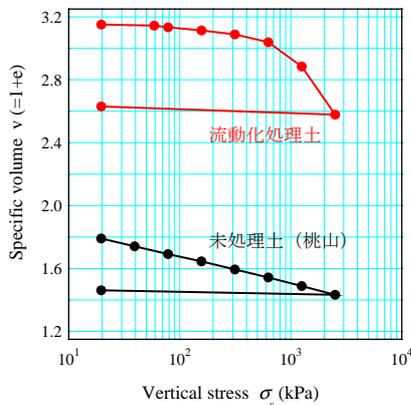


図-2 処理前後の圧縮特性の比較

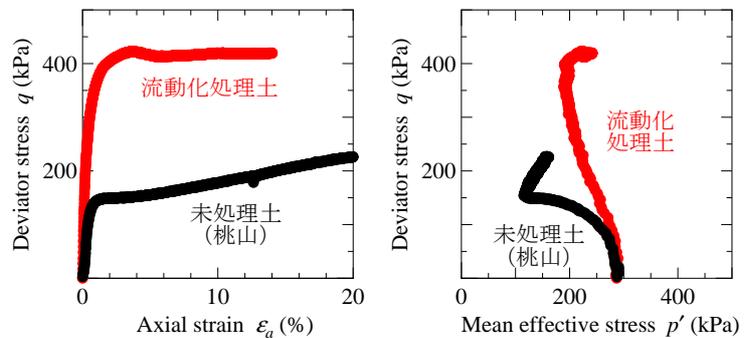


図-3 処理前後の非排水せん断特性の比較

また、せん断終了後の供試体の破壊形状を写真-1 に示す。流動化処理土は、比体積が大きいためか、それほど顕著に脆性的な破壊を示さず、過圧密粘土と同じような樽型のせん断形状を示した。有効応力パス ( $p' \sim q$  図) から、未処理土（桃山）は、中詰め砂に、流動化処理土は過圧密粘土に類似した挙動になっている。今回、流動化処理という改良によって砂的な材料が粘土的な材料に変化した。



写真-1 せん断終了時の破壊形状

### 3 SYS カムクレイモデルによる力学試験結果の再現

2.3 で示した流動化処理土の力学挙動を SYS カムクレイモデルの構成式応答により再現する。なお、今回は軸対称条件の一様変形場で構成式に変位を与えて得られる応答を調べた。流動化処理前後の非排水三軸圧縮試験の解析結果を実験結果と合わせて図-4 に示す。解析結果は実験結果を精度良く再現している。また、力学挙動を再現できるように決定した初期値、材料定数を表-2 に示す。弾塑性パラメータを比較すると、未処理土（桃山）は構造の解消速度のほうが過圧密の解消速度より速く、また、異方性の発達も遅い。構造劣化、過圧密解消ともに典型的な砂と粘土の間だが、幾分砂に近い挙動をしている。一方、流動化処理土は、限界状態定数  $M$  が未処理土のそれよりも大きな値となった (1.40→1.90) 以外は、同じ未処理土（桃山）とほぼ同じ定数であった。骨格構造

を表す定数から、非常に高位な構造を有し、超過圧密粘土であること、さらに構造劣化がしにくく、過圧密解消がしやすい材料であることがわかる。

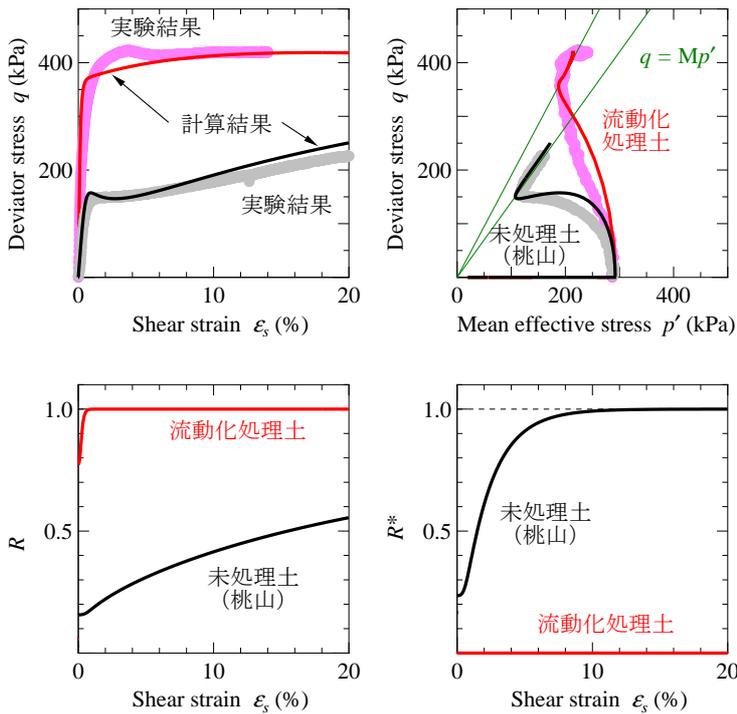


図-4 三軸試験結果の再現

表-2 決定した材料定数，初期値

	未処理土 (桃山)	流動化 処理土
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.08	0.08
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.02	0.005
限界状態定数 M	1.4	1.9
NCLの切片 N (at $p' = 98.1\text{kPa}$ )	1.85	1.85
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3
<発展則パラメータ>		
正規圧密土化指数 $m$	0.05	10.0
構造劣化指数 $a$	1.5	0.05
構造劣化指数 $b$	0.3	1.0
構造劣化指数 $c_s$	0.95	0.2
回転硬化指数 $b_r$	0.1	0.1
回転硬化限界定数 $m_b$	0.5	0.5
<初期値>		
比体積 $v_0$	1.87	2.58
有効応力 $p'_0$ (kPa)	19.6	19.6
過圧密比 $1/R_0$	35.6	17.7
構造の程度 $1/R_0^*$	6.0	55000

#### 4 流動化処理土の盛土材としての有効性

##### 4.1 計算条件

粘土地盤上にある既設盛土（高さ 4m，天端幅 10m，法面勾配 1:1.8）の拡幅を想定する。図-5 に計算に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す（半断面）。計算は 2 次元平面ひずみ条件下で行った。表-3 に粘土地盤，既設盛土，流動化処理土に用いた材料定数，初期値を示す。盛土はよく締まった状態を仮定し，ある厚さ分（有限要素の厚み分）の土を所定高さまで載荷速度 0.1m/day で盛り立てた<sup>5)</sup>。拡幅部分は，流動化処理土の施工過程を単純化して載荷速度 0.2m/day で盛り立てた。

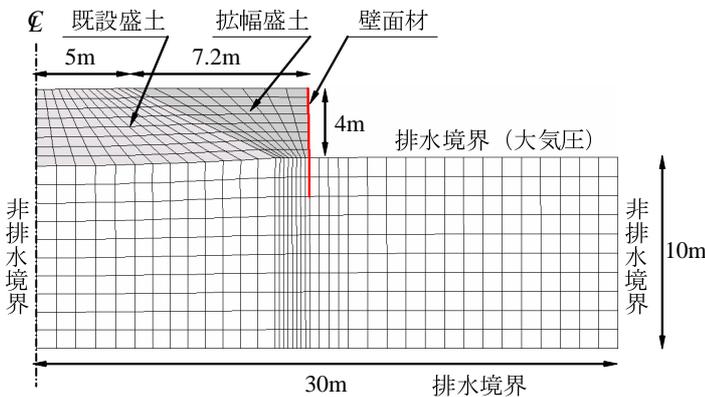


図-5 有限要素メッシュと境界条件

表-3 計算に用いた材料定数，初期値

	粘土 地盤	既設 盛土	流動化 処理土
<弾塑性パラメータ>			
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.15	0.08	0.08
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.03	0.02	0.005
限界状態定数 M	1.5	1.4	1.9
NCLの切片 N (at $p' = 98.1\text{kPa}$ )	2.08	1.85	1.85
ポアソン比 $\nu$	0.1	0.3	0.3
<発展則パラメータ>			
正規圧密土化指数 $m$	2.5	0.05	10.0
構造劣化指数 $a$	0.45	1.5	0.05
構造劣化指数 $b$	1.0	0.3	1.0
構造劣化指数 $c_s$	0.3	0.95	0.2
回転硬化指数 $b_r$	0.05	0.1	0.1
回転硬化限界定数 $m_b$	1.0	0.5	0.5
土粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.65	2.66	2.66
透水係数 $k$ (cm/s)	$10^{-7}$	$10^{-4}$	$10^{-7}$
<初期値>			
比体積 $v_0$	2.5	1.7	2.6
構造の程度 $1/R_0^*$	15.0	2.0	5000.0
応力比 $\eta_0$	0.545	0.231	0.231
異方性の程度 $\zeta_0$	0.545	0.231	0.231

なお、既設盛土築造後に十分時間が経過（約 13 年）し、圧密が終了した時点において盛土を拡幅することを想定する。

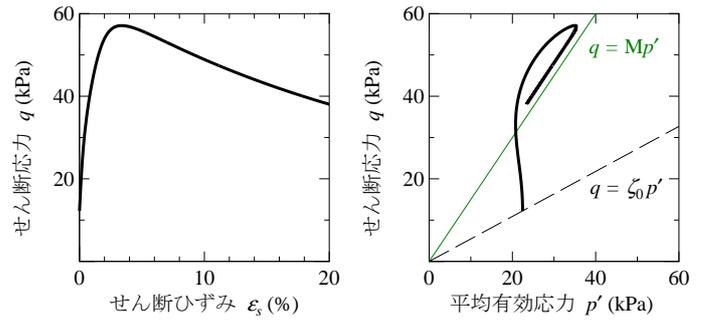
各層内で一定の間隙比・構造・異方性の初期値を仮定し（表-3 参照）、自重に応じて過圧密状態を決定した。図-6 は、設定した地盤、盛土からの状態の非排水せん断応答を SYS カムクレイモデルによって計算した結果である。

また、拡幅盛土部に用いる壁面材は地盤材料に比べて剛性が高く、十分に硬いため、変形・破壊しない剛な部材と仮定して制約条件によって表現する<sup>6)</sup>。

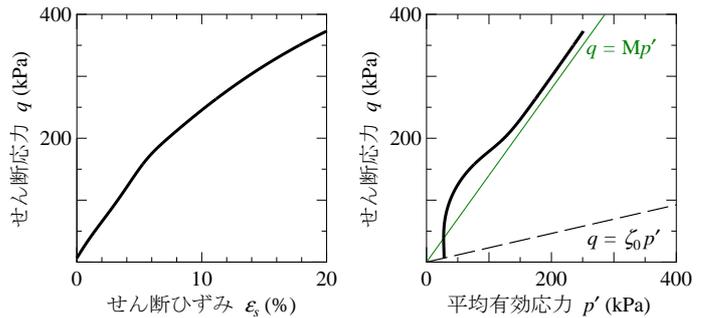
流動化処理土を用いた拡幅盛土工法では、壁面材、補強材を用いるが、本研究では、流動化処理土の有効性を検討するため、(1) Type 1：既設盛土と同じ材料を用いた場合、と (2) Type 2：補強材を用いる流動化処理土の場合、について、壁面材に作用する部材力（曲げモーメント）と盛土の変形について比較する。

#### 4.2 計算結果

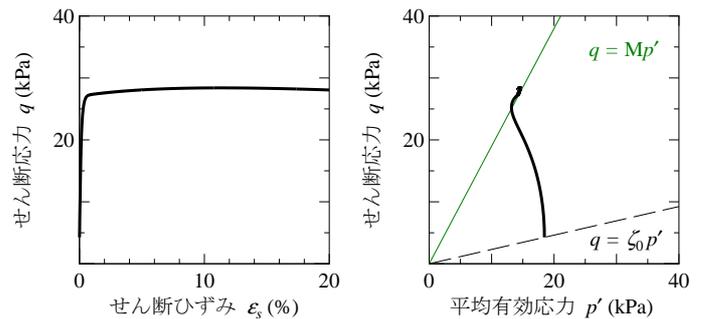
図-7 は、拡幅盛土完成後に十分時間が経って（約 2.7 年後）安定した状態における地盤・盛土内の平均有効応力分布を示す。どちらもほぼ同じような変形を示している。また、盛土下部の粘土地盤内における平均有効応力分布を比較すると、拡幅部分に流動化処理土を用いた場合（Type 2）、軽量化（本研究で用いた流動化処理土の単位体積重量は  $16.1\text{kN/m}^3$  で、既設盛土材料の単位体積重量  $19.4\text{kN/m}^3$  の約 80%）の効果によって基礎地盤の応力増分を低減していることが分かる。



(1) 粘土地盤

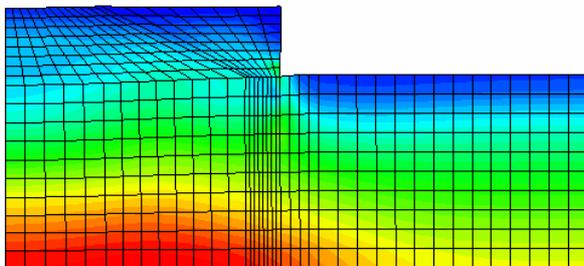


(2) 既設盛土

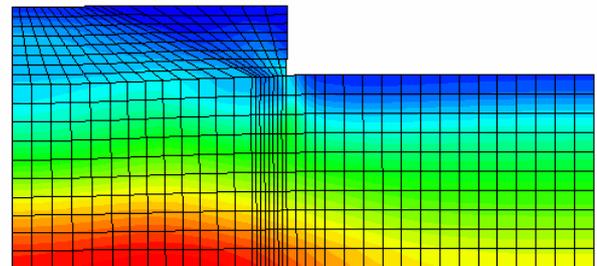


(3) 流動化処理土

図-6 想定した地盤材料の非排水せん断応答



(1) Type 1 (既設盛土と同じ材料を用いた場合)



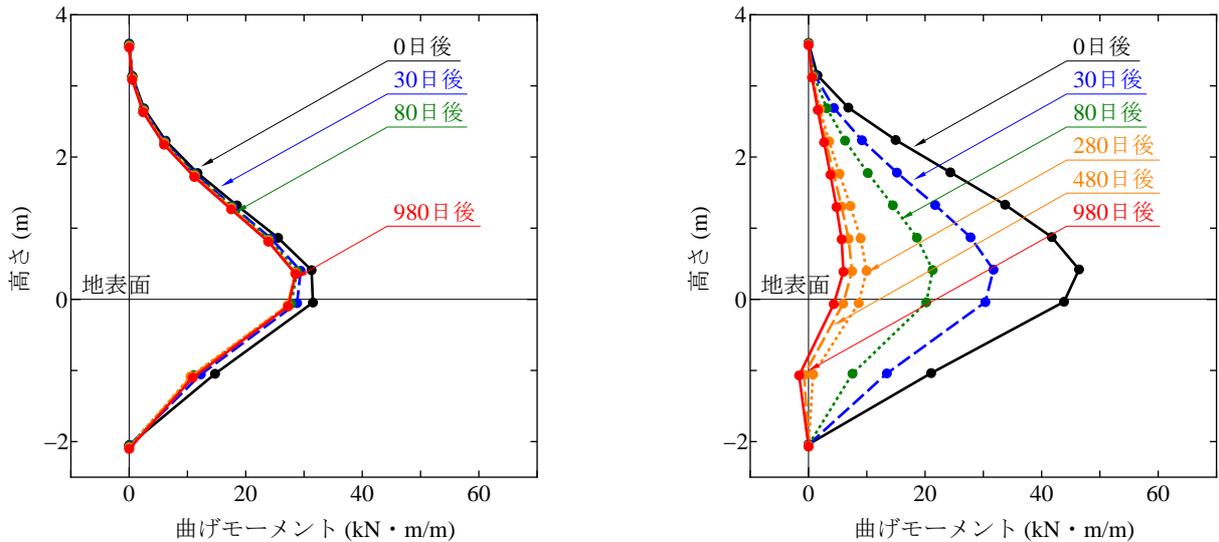
(2) Type 2 (流動化処理土を用いた場合)



図-7 拡幅後の盛土の変形形状

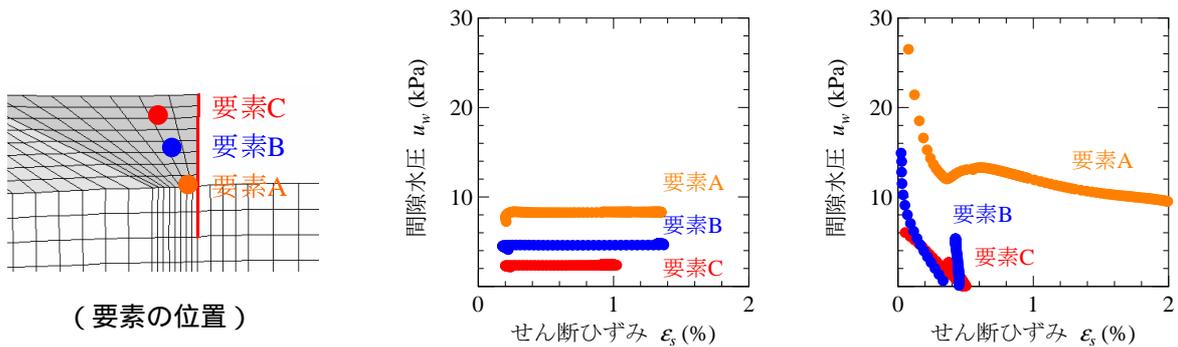
図-8 に壁面材に作用する曲げモーメントを示す。Type 1 では拡幅直後からほとんど曲げモーメントに変化はないが、Type 2 では拡幅直後に大きな曲げモーメントが発生しているが、時間の経過とともに低下し、最終的には Type 1 の 20% 程度に低減されている。図-9 は、拡幅盛土内の間隙水圧の変化を示す。Type 1 では透水係数が大きい ( $k = 10^{-4} \text{cm/s}$ ) ため、拡幅盛土内で水圧の変化がないが、流動化処理土を用いた Type 2 では透水係数が小さい ( $k = 10^{-7} \text{cm/s}$ ) ため、過剰間隙水圧が発生し、時間の経過とともに消散していることが分かる。本研究では、流動化処理土が固化する過程は記述していないが、自重圧密過程における過剰間隙水圧の消散に伴って部材力が低下している。

流動化処理土を用いて軽量化された効果だけでなく、流動化処理土は構造が高位なため、現場発生土に比べ自立する材料である。そのために壁面に作用する部材力が大幅に低減されていると考えられる。



(1) Type 1 (既設盛土と同じ材料を用いた場合)      (2) Type 2 (流動化処理土を用いた場合)

図-8 壁面材に作用する曲げモーメント



(1) Type 1      (2) Type 2

図-9 拡幅盛土内の間隙水圧の変化

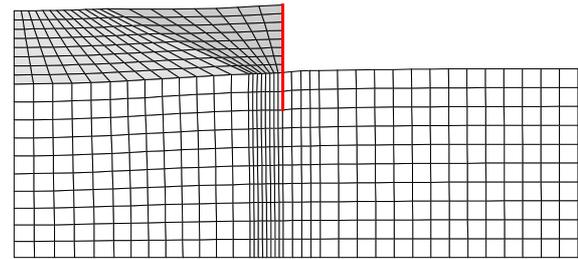
次に、流動化処理土の変形性能を調べるため、盛土上部に荷重速度  $20 \text{kPa/day}$  で 2 日間荷重した (合計  $40 \text{kPa}$ ) 際の変形形状を図-10 に示す。盛土部に荷重が作用しない場合、Type 1 と Type 2 はほとんど同じ変形を示し、流動化処理土を用いた Type 2 では壁面材に作用する部材力を低減する効果を発揮したが、上載荷重が作用すると、Type 2 は Type 1 よりも変形が大きくなってしまふ。そこで、流動化処理土内に補強材を配置する (Type 3) ことによって、変形は抑制されることが分かる。

## 5 おわりに

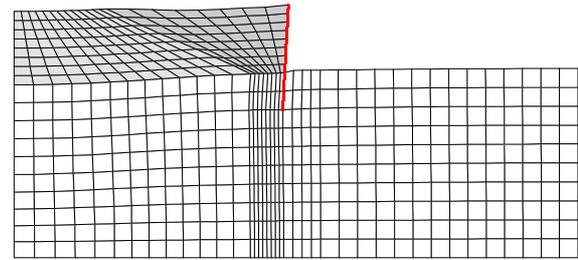
各種室内試験結果に対し、骨格構造概念を導入したSYSカムクレイモデルにより再現することにより、以下の結論を得た。1) 流動化処理土は通常の粘土と比べて高い比体積を有するものの、圧縮性は小さくなり、200kPa以上の一軸圧縮強度を持つ。2) 流動化処理工法によって、改良土の力学挙動は超過圧密土の挙動に類似する。3) 流動化処理工法によって、構造が高位化し、過圧密比も増え、同時に構造劣化も過圧密解消もしにくくなるため、強度が上昇する。流動化処理土作製に伴い供試体の初期密度に多少ばらつきがあり、拘束圧の異なる三軸試験結果の初期値にばらつきが見られた。しかし、上記3)と同じ結論であったことを付記しておく。

流動化処理土は、高位な構造を有するが劣化が非常に鈍感で、超過圧密土に対応するため、現場発生土に比べ自立する材料であり、現場発生土に比べて軽量化される。そのために、拡幅盛土の壁面頂部における水平変位と壁面材等の部材に発生する部材力が減少し、流動化処理土を盛土材として用いる効果を数値解析的に確認できた。

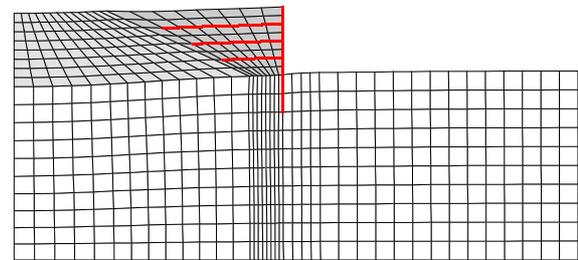
また、本研究を進めるにあたり、徳倉建設(株)の三ツ井氏、和泉氏に試料、流動化処理工法の情報を提供頂いた。ここに感謝の意を表す。



(1) Type 1



(2) Type 2



(3) Type 3

図-10 荷重載荷(40kPa)時の変形形状

## 参考文献

- 1) 久野五郎編著(1997): 土の流動化処理工法 建設発生土・泥土の再利用技術, 技報堂出版.
- 2) Asaoka et al.(2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57.
- 3) 三ツ井達也他(2005): 流動化処理土による拡幅盛土工法(その1 流動化処理土の適用性), 第40回地盤工学研究発表会概要集, pp.1135-1136.
- 4) 和泉彰彦他(2005): 流動化処理土による拡幅盛土工法(その2 施工事例), 第40回地盤工学研究発表会概要集, pp.1137-1138.
- 5) 竹内秀克他(2006): 飽和粘土地盤の圧密変形に及ぼす幾何学的非線形性の効果, 応用力学論文集, Vol.9, pp.539-550.
- 6) Asaoka et al.(1998): Displacement/Traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.4, pp.173-181.