

遠心力模型実験による遮断壁の効果検証

釧路開発建設部 道路設計管理官付
釧路開発建設部 道路設計管理官付
日本工営株式会社

○横井 純来
小田 晃司
山口 淩平

一般国道44号尾幌糸魚沢道路における本線と交差する町道では、押え盛土の載荷による引き込み沈下が懸念されている。その対策として遮断壁（深層混合処理工法）の施工を予定しているが、盛土施工に伴う沈下や側方変位の予測は一般的に難しい。本稿では、遮断壁の効果確認を目的として、1/60サイズの模型を用いて遠心力模型実験を実施した結果を報告するものである。模型作製では、盛土は混合砂（江戸崎砂：カオリン=8:2）を使用して密度調整を行った。基礎地盤（粘性土層）はカオリンを使用し、調査結果より得られた地盤定数と整合するように60G場で自重圧密実験を実施してせん断強度を調整した。改良体はカオリンとセメントの混合材料を使用し、配合試験を実施して地盤改良の改良率に応じたせん断強度となるよう調整した。遠心力模型実験では3時間遠心加速度60Gを維持させて、実物換算で約1年間の圧密沈下による影響を確認した。その結果、遠心力模型実験において町道に発生する沈下は30cm程度であることから、押え盛土による町道への影響も限定的であると考えられた。また画像解析結果から、押え盛土の圧密沈下による側方変位（水平変位）が改良体により抑制されていることが実験的に確認された。

キーワード：押え盛土、地盤改良、遠心力模型実験、引き込み沈下、側方変位

1. 背景・目的

一般国道44号尾幌糸魚沢道路における本線と交差する町道では、押え盛土の載荷による引き込み沈下が懸念されており、その対策として遮断壁（深層混合処理工法）の施工を予定している。盛土施工に伴う沈下や側方変位の予測はFEM解析等で行われることが多いが、変位を高精度で予測することは一般的に難しく、実務では1次元圧密計算や簡便法による検討が用いられることが多い。遠心力模型実験は、このような予測が難しい問題に対する有効な検討手段のひとつとして近年注目されている。本稿では、遮断壁の効果確認を目的として、1/60サイズの模型を用いて遠心力模型実験を実施し、遮断壁の効果検証を行った。



図-1 遠心力実験装置

YOKOI Kisara, ODA Koji, YAMAGUCHI Kohei

2. 遠心力模型実験の概要

図-1に使用する遠心力模型実験装置を示す。遠心力模型実験は、縮小模型地盤に遠心力加速度を付与することにより、実際の応力状態を再現できるため、実際の地盤の破壊・変形挙動を再現することが可能である。

遠心力模型と実物の相似則は式(1)、式(2)の通りである。今回実施する60G場における相似則による実物換算例を図-2に示す。

$$\text{時間に対する相似則} : tp = n^2 \times tm \quad (1)$$

$$\text{寸法に関する相似則} : lp = n \times lm \quad (2)$$

ここで、 tp は実物換算時間、 tm は実験の時間、 lp は実物換算寸法、 lm は模型寸法、 n は遠心力加速度である。

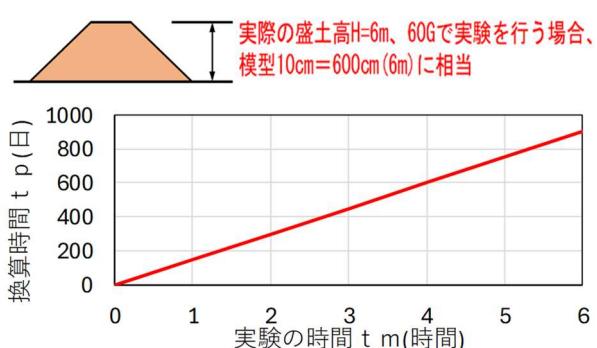


図-2 相似則による実物換算例 (60G場)

3. 実験条件

(1) 対象位置・断面

対象位置および断面を図-3、図-4に示す。A-A断面とB-B断面と比較してB-B断面の方が基礎地盤の粘性土層が厚いため検討断面とした。

(2) 実験モデル

図-5に1/60の実験モデル図を示す。遠心力模型実験では押え盛土や町道部分の変位を計測するために変位計7点、粘性土地盤に圧密時に発生する過剰間隙水圧を計測するために間隙水圧計10点を設置した。模型作製においては、作製技術の限界や手順、計測において様々な制約があるため、図-4の実物モデルを必ずしも忠実に再現するのではなく、目的に応じて形状をモデル化にする必要があり、以下に示す方針で模型を作製した。

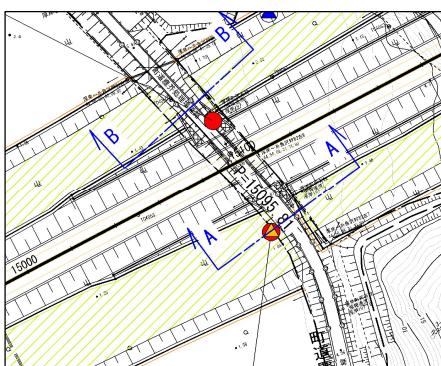


図-3 対象位置

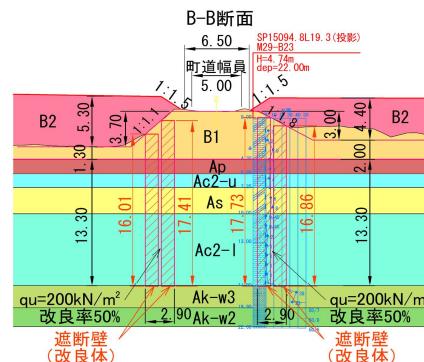


図-4 対象断面

地層名	記号	設計N値	単位体積重量 γ (kN/m³)	粘着力 C (kN/m²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
町道盛土	B1	2	19.3	20.0	0
押え盛土	B2	2	19.3	20.0	0
泥炭層	Ap	5	12.4	50.0	0
粘性土層2 上部	Ac2-u	3	17.9	30.0	0
砂質土層	As	5	17.0	0	25
粘性土層2 下部	Ac2-I	1	17.5	24.8	0
厚岸層 強風化部	Ak-w3	28	19.0	122.0	20
厚岸層 弱風化部	Ak-w2	169	20.0	362.7	21

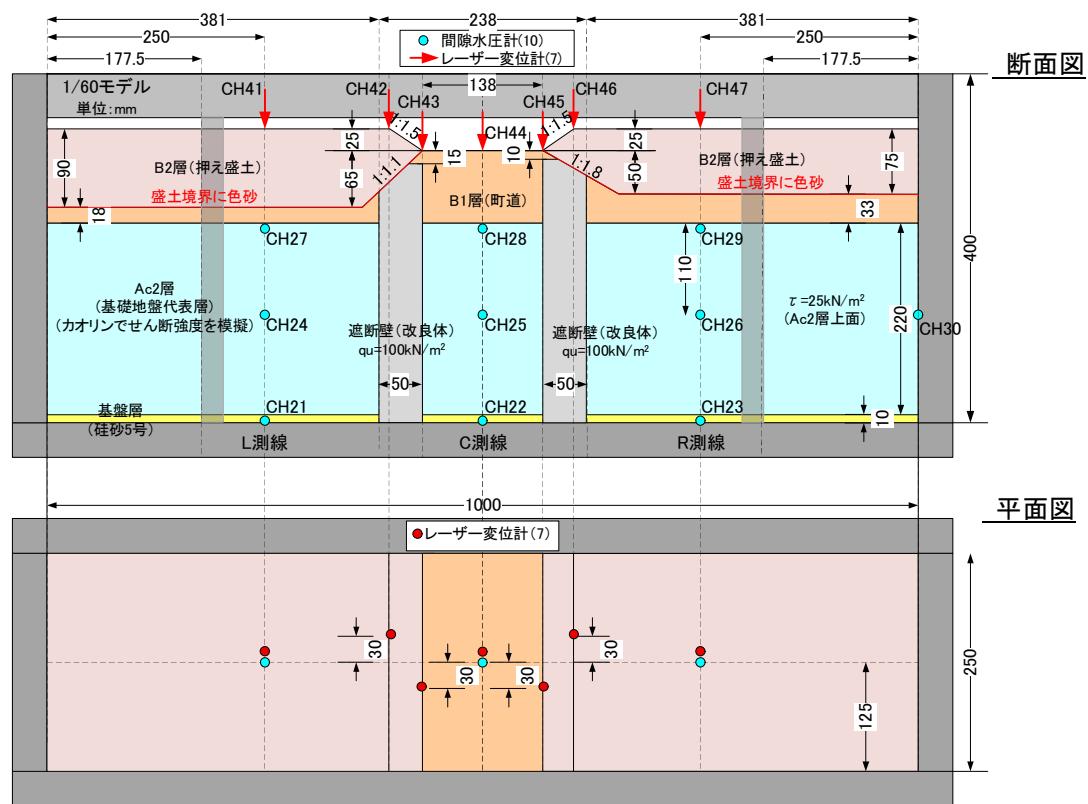


図-5 実験モデル図 (1/60 スケール)

(3) 材料条件

a) 使用材料

表-1に実験に使用した材料を示す。材料は、現地調査が困難であったため、実験で一般的に使用される山砂やカオリン等を使用した。改良体のためのカオリンとセメントを混合した配合試験は、実験に先だって実施した。図-6に粒径加積曲線をそれぞれ示す。本検討では盛土の密度が $\gamma_t=19.3 \text{ kN/m}^3$ であり、江戸崎砂単独では所定の密度を確保できないため、カオリンとの混合砂（所定の密度を確保できる、江戸崎砂：カオリン=8:2を使用）を採用した。図-4に示すに示す横断図のAc2-1層のせん断強度は全層の中で最小で粘着力 $c=24.8 \approx 25 \text{ kN/m}^2$ を粘性土地盤上面のせん断強度として設定した。盛土の密度は土質調査の結果を参考に 19 kN/m^3 に設定した。改良体の強度は $q_u=100 \text{ kN/m}^2$ （材齡5日）を目標として配合試験を実施した。図-7に示す配合試験より、設定したセメント添加量6%で 127.0 kN/m^2 と目標強度を超える結果となったが、これ以上、添加率を小さくすると、形崩れしやすく、品

表-1 使用材料

対象層	使用材料
盛土 (B1層、B2層)	混合砂 (江戸崎砂：カオリン=8:2)
基礎地盤 (Ac2-1層で代表)	カオリン ASP-400P
基盤 (排水層)	珪砂5号
改良体	カオリン+早強（ポルトランド）セメント

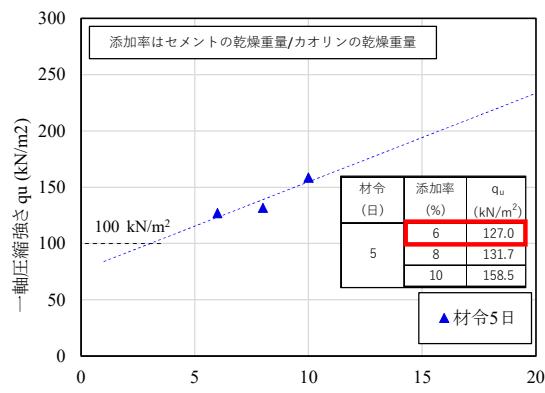


図-7 配合試験結果 (目標強度 100 kN/m^2 の場合)

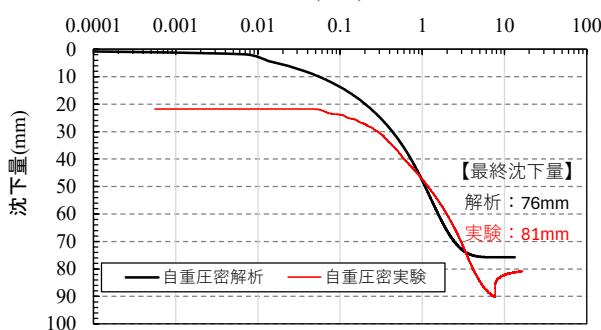


図-9 地表面沈下量の時刻歴の比較

YOKOI Kisara, ODA Koji, YAMAGUCHI Kohei

質が不安定になることから、セメント添加率は6%に設定した。なお、後述する模型作製・改良体打設において、実験日当日、改良体（カオリン+セメント）の強度確認のため、改良体打設と合わせて別途モールドに入れて養生させた供試体の一軸圧縮試験を実施した結果、一軸圧縮強度は平均で $q_u=115 \text{ kN/m}^2$ となり、目標強度 100 kN/m^2 を超えていることを確認した。したがって、作製した改良体は妥当であると評価できる。

b) 粘性土地盤のせん断強度の評価

遠心力模型実験に用いる粘性土地盤は、目標となる地盤厚さ22cm（実換算13.2m）において、粘性土地盤表面の目標強度（ $c=25 \text{ kN/m}^2$ ）と同程度になるように作製する必要がある。粘性土地盤は、予め準備したスラリー粘性土試料を用い、60G場で自重圧密実験を実施することで作製した。粘性土地盤の強度分布は図-8に示す方法で検討して決定した。図-9に地表面沈下量の時刻歴の比較を、図-10に粘性土地盤のせん断強度と模型地盤厚さの関係

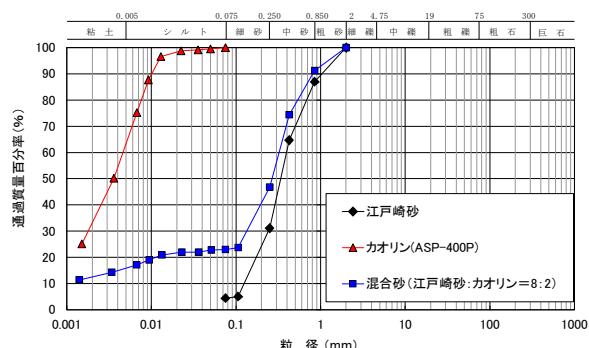


図-6 粒径加積曲線

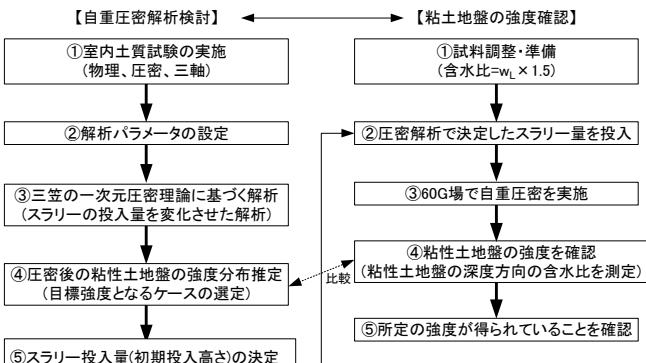


図-8 粘性土地盤の強度分布の検討方法¹⁾

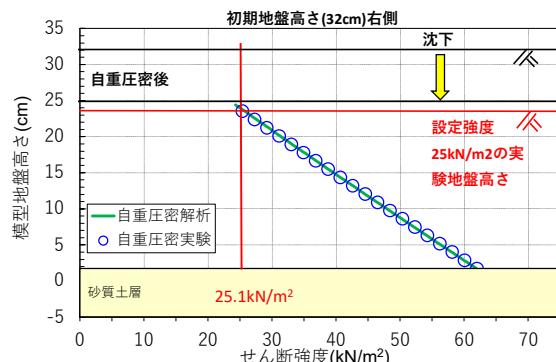


図-10 粘性土層のせん断強度の設定

を示す。自重圧密実験の結果から解析から得られた推定沈下量(76mm)と実験結果沈下量(81mm)は図-9に示すように5mm異なるものの、地盤の強度は目標とほぼ一致する結果となった。

(4) 実験準備

a) 試料調整

使用する江戸崎砂、カオリンの試料調整を行った。江戸崎砂は最適含水比 $w_{opt}=11.3\%$ となるように調整した。カオリンは土槽への投入時に気泡の除去を容易にするために、試料の液性限界 w_L の1.5倍の含水比となるように調整した。

b) 粘性土地盤の作製

自重圧密解析から決定した粘性土投入高さとなるように液性限界の1.5倍の含水比に調整したスラリーを投入し、自重圧密実験を行うことで遠心力模型実験に使用する粘性土地盤を作製した。図-11 (a) に粘性土地盤の作製状況を示す。また、作製の手順を以下に示す。

- ① 使用材料、初期含水比を設定する。本業務では、カオリン(ASP-400P)を用いて初期含水比は、液性限界 w_L の1.5倍の76.7%とした。
- ② 自重圧密後に所定の粘性土高さ22cmになるように、

自重圧密解析より決定した初期粘性土高さ32cm分のスラリー粘性土の試料を土槽に投入した。

- ③ 圧密を促進させるため、自重圧密解析より決定した重錘の重量(上載荷重62.05 kN/m²)をスラリー粘性土上に載荷し、自重圧密実験を実施した。
- ④ 自重圧密後、深度方向1cmごとに含水比を測定した。そして、測定した含水比から得られる水中単位体積重量 γ' と当該粘性土の強度定数よりせん断強度を算出し、自重圧密解析によるせん断強度との比較を行った。((3) b) を参照)

c) 盛土の作製

遠心力模型実験に使用する盛土を作製した。実験では、混合砂(江戸崎砂:カオリン=8:2)の密度が $\gamma_t=19$ kN/m³となるように、最大乾燥密度 $\rho_{dry}=1.950\text{g/cm}^3$ の締固め度 $D_c=88\%$ の条件で盛土を作製した。盛土の作製手順を以下に示す。

- ① 盛土を作製するための型枠を組み立てた。
- ② 山砂を締固め度($D_c=88\%$ 相当: $\gamma_t=19$ kN/m³)になるように締め固めた。
- ③ 締固め完了後、所定位置に標点を設置し、凍結させた。

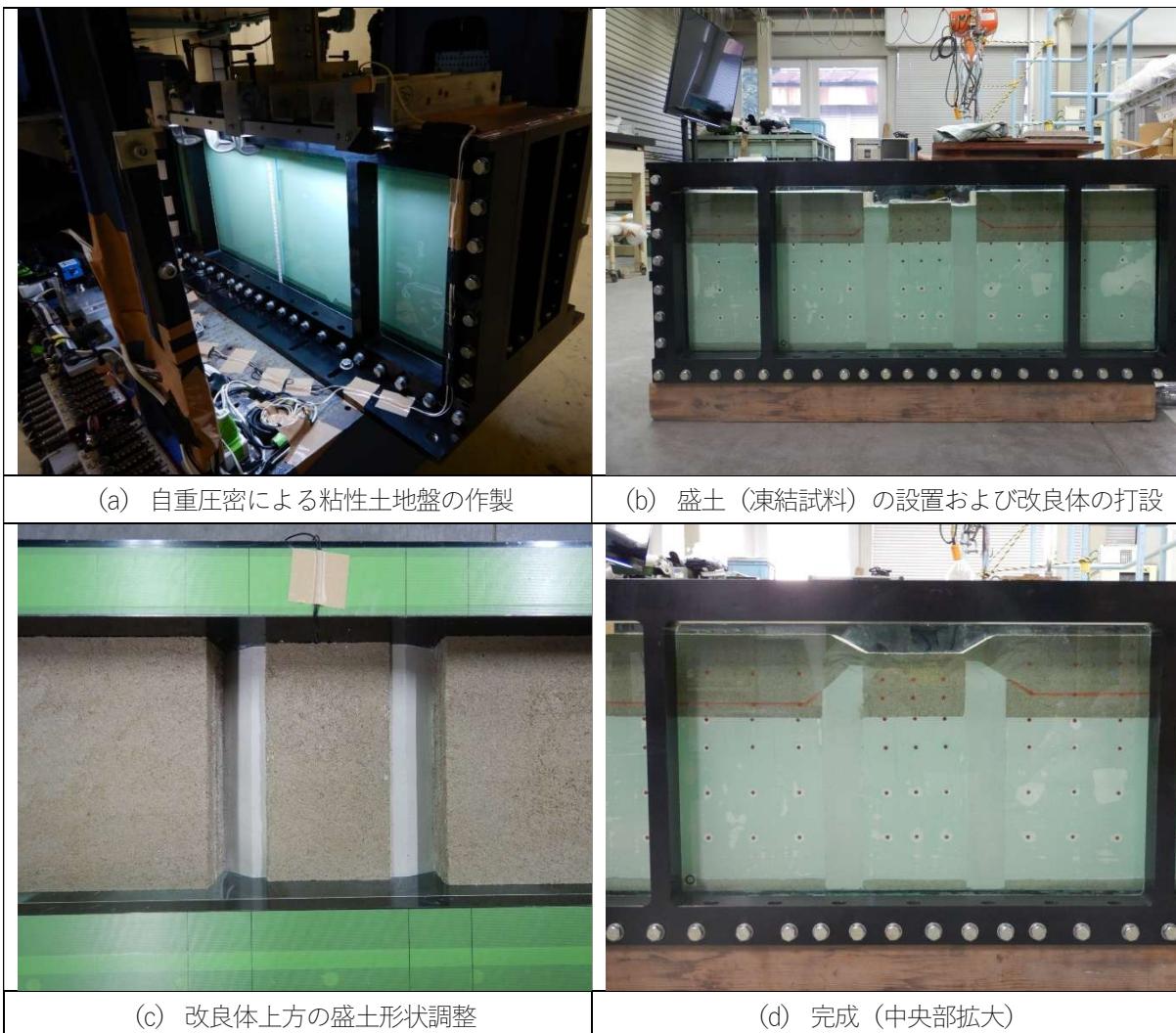


図-11 模型作製・改良体打設

4. 遠心力模型実験結果

(1) 実験手順

実験中の計測は、遠心加速度上昇から下降まで一連で実施し、盛立て86日(60G到達時)後は、実物換算時間で384日間遠心加速度60Gを維持させて、圧密沈下による影響を確認した。また、画像解析のために1分おきに模型正面(ガラス面)の画像を撮影した。画像解析は、撮影した画像から1分毎の変位をピクセル単位で算出し、実寸大に換算する。画像解析結果は、これらの値をもとに変形やひずみ分布を算出し、色分けコンター図等により可視化する技術である。実験後に整理する代表的な項目は「鉛直変位の時系列データ」、「画像解析による水平変位」である。

(2) 盛土の鉛直変位の時刻歴と考察

図-12に盛土天端の鉛直変位(沈下量)の時刻歴を示す。評価にあたっては、遠心加速度下降による鉛直変位のリバウンド量は対象外とした。押え盛土の天端沈下量は、左側CH41で-84.0cm、右側CH47で-83.4cmとなり、両側で概ね同程度の沈下量(平均-83.7cm)が得られた。

一方、町道盛土の天端沈下量は、左端CH43で-30cm、中央CH44で-36.5cm、右端CH45で-27.7cmと平均で-31.4cmとなり、押え盛土よりも平均で-52.3cm(-83.7cm+31.4cm)沈下量が小さいことが確認された。これは、主に盛土高の違い(押え盛土の盛土高が町道の盛土高より高い)ことが要因と考えられるが、改良体により押え盛土側の圧密沈下に伴う側方変位の影響が小さいことも要因と推察される。改良体直上にある左側CH42と右側CH46の天端沈下量は、それぞれ-62.5cm、-23.5cmと大きく差異が生じる結果となったが、左側CH42は右側CH46よりも押え盛土が厚いことや、改良体先端の左側の勾配は1:1と右側の勾配1:1.8よりも急な勾配であることから、粘性土地盤の圧密沈下に伴う押え盛土の変形量が大きくなつたものと考えられる。図-12に各段階における盛土天端沈下量の一覧表を示す。3時間経過後の沈下量は前述した通りであるが、60G到達時点では3時間経過後の沈下量の約1/4~1/2が発生していたことが分かった。実際の現場では、町道盛土直下の粘性土地盤は過去に圧密していることから、過圧密状態になっているものと推察され、

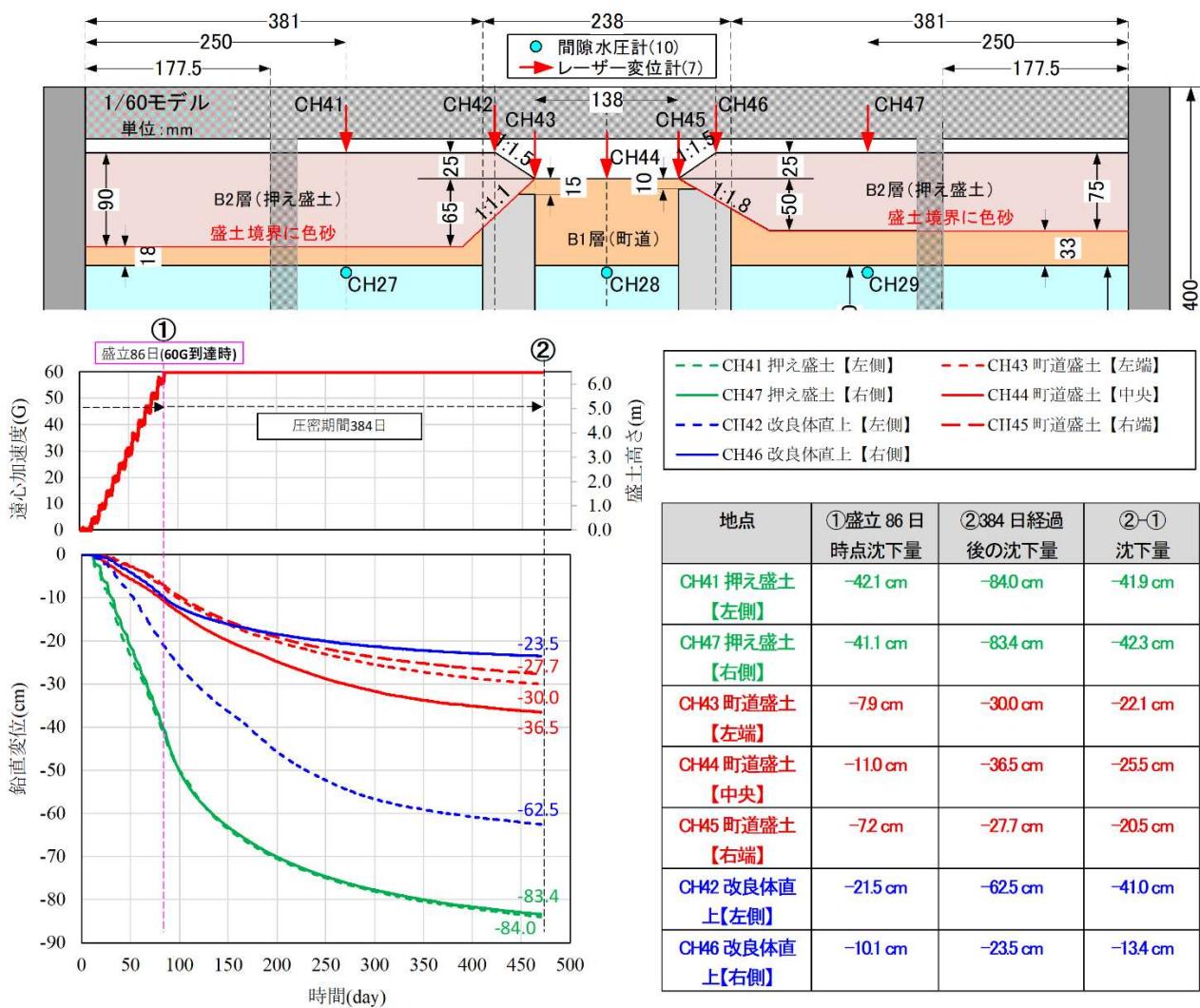
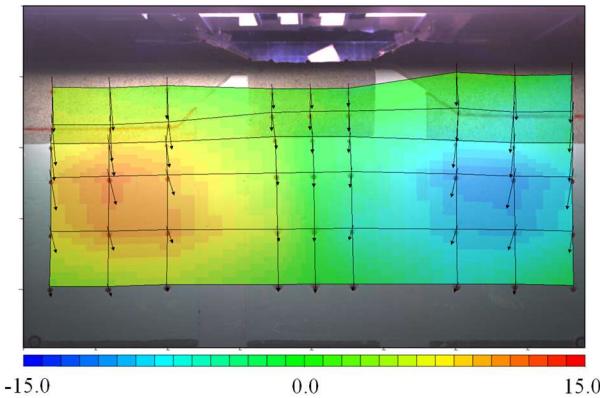


図-12 盛土天端の鉛直変位(実物換算値)



※単位はcm、変位ベクトルは合成変位

図-13 画像解析結果

押え盛土造成による町道盛土の沈下量は、本実験結果で確認された沈下量より小さくなるものと考えられる。

(4) 画像解析による水平変位の評価

画像解析において、遠心加速開始から60G到達後3時間経過した後まで写真データをもとに解析した。水平変位コンター図より、押え盛土直下の粘性土地盤では最大約10cm程度の水平変位が発生していること確認される。図-13、図-14に示すように一番大きく発生している位置は町道より外側の粘性土中央部である。押え盛土直下の粘性土は、左側・右側いずれも改良体側へ変位している。一方、町道盛土直下の粘性土地盤は、ほとんど変位していない。合成変位のコンター図を確認すると、変位が押え盛土側で60cm程度となっており、町道盛土側の30cm程度の倍の変位が発生していることが確認された。町道盛土

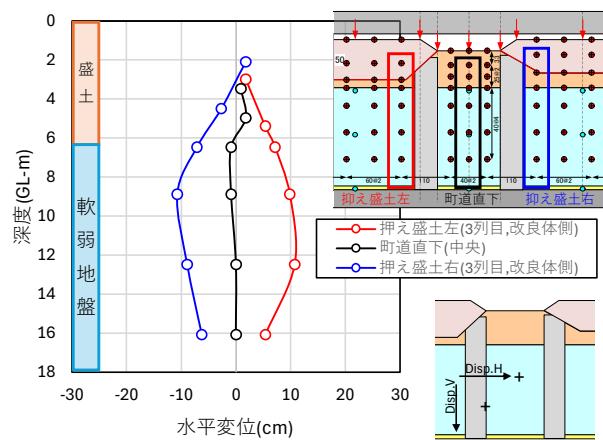


図-14 画像解析による水平変位の深度分布図

側の30cm程度の変位は、町道盛土の載荷による圧密沈下の影響によるものであり、このオーダーはレーザー変位計の図-12の盛土天端の鉛直変位の時刻歴結果とも整合している。

5. 結論

遠心力模型実験において町道天端に発生する沈下量は30cm程度であり、町道法尻より外側の押え盛土直下より沈下が抑制された。また押え盛土の圧密沈下による側方変位（水平変位）が改良体により抑制されていることが実験的に確認された。したがって、町道盛土のり面直下に改良体を造成することで押え盛土の影響がない程度まで抑制出来ると評価できる。

参考文献

- 1) 日下他：心力模型実験に用いる軟弱粘性土地盤の作製方法、地盤工学会誌, 70 (12), p. 47-50, 2022