

4-4 試験盛土の挙動

4-4-1 観測機器の配置

図 4-1 1 に、動態観測機器の設置概要について第 1 工区を例に示す。盛土中央部には、地表面沈下板の他、深層型沈下計や間隙水圧計を改良深度以上に設置している。地表面沈下板は盛土中央部の他、のり肩、のり尻、改良範囲端部にも設置した。工事範囲周辺の影響も把握するため、間隙水圧計、地中傾斜計、地下水位計を改良範囲の外側に設置し、改良範囲端部から離隔 100 m までの範囲には地表面変位観測杭を、図 4-3 の水路に隣接した溝畔に設置した。

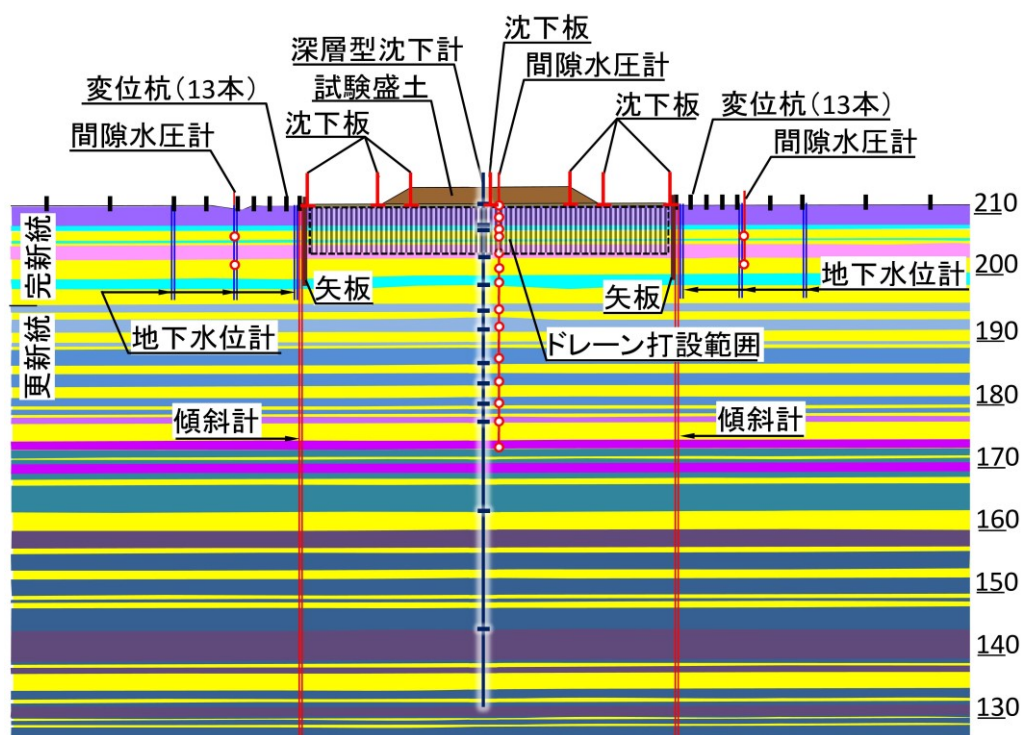


図 4-1 1 動態観測機器の配置 (Area1 の例)

4-4-2 盛土高と表面沈下量

図 4-1 2 に、負圧载荷開始日を原点とした盛土高と負圧および地表面沈下量の経時変化を示す (本稿では、特に断りがない限り、経時変化を軸にした図の原点はすべて負圧载荷開始日である)。盛土高は原地盤面からの高さ、地表面沈下量は敷砂の上に設置した沈下板の測定値である。また、負圧はシート式真空圧密工法を採用した Area1 と Area3 は気密シートの下面、キャップ式真空圧密工法を採用した Area2 は鉛直ドレーンの先端で測定したものである。

負圧と盛土高の関係を見ると、Area1 と Area3 は負圧载荷開始後 1~2 日で目標負圧 (気密シート下面で -70 kN/m^2) に達しているが、Area2 は目標負圧に到達するまで、1 ヶ月以上要している。なお、Area1 と Area3 では盛土施工開始前に負圧载荷期間を約 4 週間設けている

が、Area2 では負圧が安定しなかったため、負圧载荷開始から2週間後に目標負圧の到達を待たずに盛土の施工を開始している。これは、盛土の荷重により負圧シール層となる高有機質土層を圧密することで透水係数を低下させ、気密性を確保して負圧を安定させようとしたものであるが、その結果負圧载荷開始から35日後に目標負圧（鉛直ドレーン下端で-60 kN/m²）に達した。このときの盛土厚は約2.5 mで盛土高は約2 mになっていた。なお、Area2における、改良前後の高有機質土層の透水性の変化については、4-4-5で述べる。

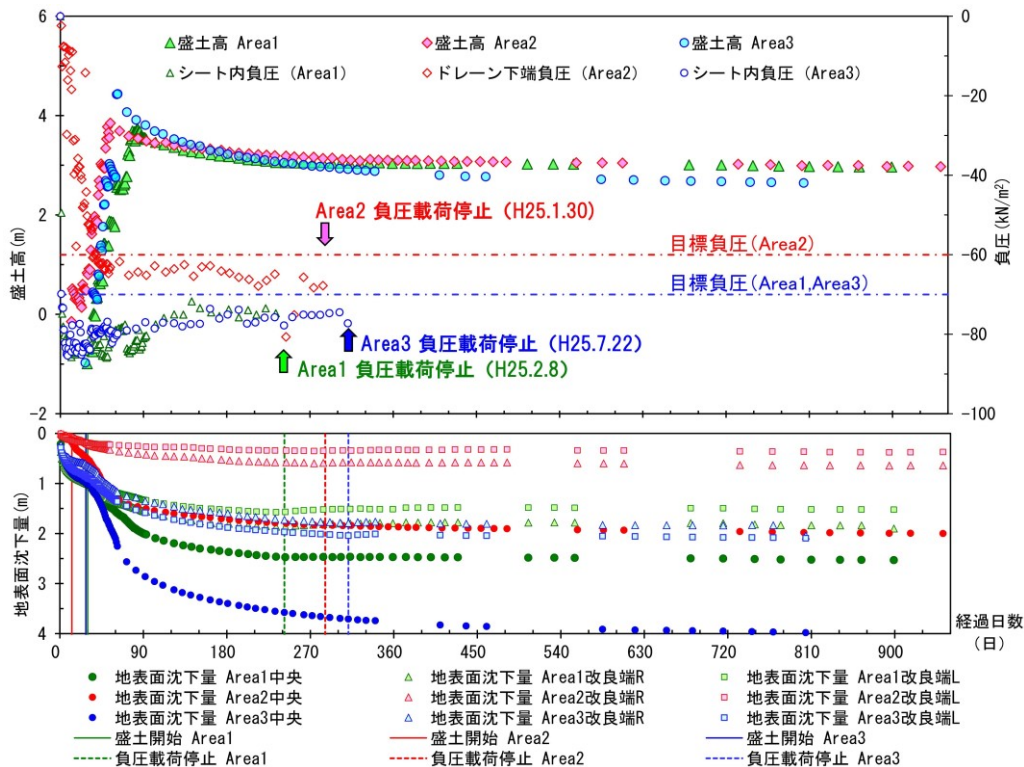


図 4-1-2 盛土高・負圧・地表面沈下量の経時変化

盛土中央部の地表面沈下量はArea3, Area1, Area2の順に大きい。Area3とArea1は盛土開始前の負圧载荷段階ではほとんど同じ挙動を示しているが、盛土開始に伴いArea3の沈下量が大きくなっている。図4-4に示すとおり、両者は改良対象層の厚さが異なる(Area1; Apt約3.2m, Apc約2.8m, Area3; Apt約4.9m, Apc約3.1m)うえ、盛土速度に違いがあるために沈下量に差が生じたものと考える。盛土速度は、Area1とArea2で約0.1 m/日であったのに対し、Area3では約0.2 m/日となった。Area1とArea2は、真空圧密工法を採用した場合の標準的な盛土速度(0.15 m/day)を目標とした結果で、Area3は、高速道路本体工事への適用を視野に盛土の施工速度向上の可能性を探った結果である。図4-1-3に、Area3における盛土の安定管理図の一例を示す^[16]。図4-1-3は、盛土の施工開始時点基準として、盛土中央部の地表面沈下量と改良範囲端部の水平変位量の関係を整理したものである。Area3では側方変位が生じ始めており、これ以上の盛土速度の向上は危険を伴う可能性が高いものと判断した。

また、図 4-1 2 で改良範囲端部の地表面沈下量を見ると、Area1 と Area3 はほぼ同等な沈下量であるが、Area2 は他に比べて沈下量が極端に少ない。改良範囲端部は用地境界部であるため、盛土の施工がない（図 4-3、図 4-4）。このため、キャップ式真空圧密工法を採用した Area2 の場合、改良範囲端部の負圧シール層の気密性が不十分であったものと考ええる。（図中「改良端 R」とあるのは東側、「改良端 L」とあるのは西側を指す。）

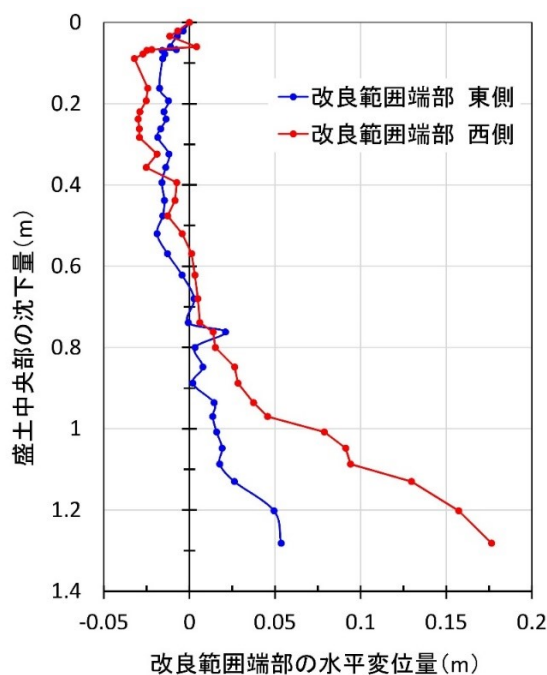


図 4-1 3 安定管理図 (Area3)

盛土中央部について、負圧载荷停止時の沈下板の挙動を見ると、Area1 で 10 mm、Area2 で 7 mm のリバウンドが生じたが、Area3 では確認できなかった。Area2 は負圧载荷停止から 3 日後、Area1 は約 3 週間後に再び沈下し始めた。Area1 では、負圧载荷停止から約 2 ヶ月後に周囲の矢板を引き抜いたが、その際のリバウンド量は 7 mm であった。

負圧载荷開始から停止までの期間は、Area1 が約 8 ヶ月、Area2 で約 9.5 ヶ月、Area3 は約 10 ヶ月であった。矢板は、負圧载荷期間の短縮効果に寄与する可能性がある。

表 4-3 に、負圧载荷停止時の沈下量に併せ、すべての工区で負圧载荷を停止した日から約 1 年後の沈下速度を示した。負圧载荷停止後の沈下速度は、何れの工区でも目標とした残留沈下量（0.2 m/10 年 程度）に比べて大きく、Area1 と Area2 が同程度で、Area3 が最も大きかった。なお、負圧载荷の停止は各工法の技術資料^[11]、^[12]を基に判断したが、負圧载荷開始から停止までの負圧载荷期間は Area1 が最も短く約 8 ヶ月で、Area2 は 9.5 ヶ月、最も長い Area3 は 10 ヶ月以上の载荷期間が必要であった（表 4-2）。

表 4-3 負圧載荷停止後の沈下速度

Area	負圧載荷停止時		負圧載荷停止後				
	停止日	沈下量 (m)	測定日	沈下量 (m)	測定日	沈下量 (m)	沈下 速度 (mm/日)
1	2013. 2. 8	2.476		2.520		2.524	0.12
2	2013. 1.30	1.834	2014. 7.28	1.985	2014. 8.30	1.989	0.12
3	2013. 7.22	3.713		3.943		3.950	0.21

4-4-3 深度別の沈下量

図 4-1 4は、深層型沈下計の測定結果を整理したものである。図の縦軸は、沈下計を設置した深度で、横軸は各沈下計の変位量で下方の変位（沈下）を正とした。深層型沈下計は、測定期間中に機器異常となる場合が多いため、各工区とも試験盛土の中央から起点側(南側)と終点側（北側）に3.5m ずつの離隔を取って、2セットを同深度で設置してある。データの整理にあたっては、出力データを見比べたうえで表 4-4 のとおり機器を選別することとした。また、南北の機器が正常に稼働しているようであれば、平均値を用いるものとした。

表 4-4 深層型沈下計の選別

Area1			
深度 (m)	採用計器		備 考
	北側	南側	
0	A1-N-H1	A1-S-H1	
3.4	A1-N-L1	A1-S-L1	
4	A1-N-H2	A1-S-H2	
8.6	A1-N-L2	A1-S-L2	
13	A1-N-H3	A1-S-H3	
17	A1-N-L3	A1-S-L3	
20.2		A1-S-H4	N側は後半で欠測
25.4	A1-N-L4	A1-S-L4	
28.8		A1-S-H5	N側は上下と不整合
32	A1-N-L5	A1-S-L5	
34.7		A1-S-H6	N側は隆起
48.9	A1-N-L6		S側は隆起
67.8			両側とも隆起傾向

Area2			
深度 (m)	採用計器		備 考
	北側	南側	
0	A2-N-H1	A2-S-H1	
3.5			両側とも隆起傾向
4.3	A2-N-H2	A2-S-H2	
8.7			両側とも隆起傾向
13.1		A2-S-H3	N側は機能停止
19.1	A2-N-L3		S側は上下と不整合
23		A2-S-H4	N側は上下と不整合
24.7	A2-N-L4		S側は上下と不整合
29.1		A2-S-H5	N側は上下と不整合
31.3	A2-N-L5		S側は隆起
36	A2-N-H6	A2-S-H6	
47.9			両側とも隆起傾向
65.2			両側とも隆起傾向

Area3			
深度 (m)	採用計器		備 考
	北側	南側	
0	A3-N-H1	A3-S-H1	
3.8		A3-S-L1	N側は途中で機能停止
5.1	A3-N-H2		S側は途中から異常値
8.7		A3-S-L2	N側は異常値
14		A3-S-H3	N側は途中から異常値
20	A3-N-L3	A3-S-L3	
22.9			両側とも途中から隆起
25	A3-N-L4		S側は途中から鈍化
27.2			両側とも途中から隆起
31	A3-N-L5	A3-S-L5	
36.4			両側とも途中から欠測
38.95	A3-N-M1	A3-S-M1	
40.65	A3-N-M2	A3-S-M2	
42.2	A3-N-M3	A3-S-M3	
51.5			両側とも隆起傾向
64			両側とも隆起傾向

図 4-1 4には、鉛直ドレーンの打設深度（Area1 については併せて矢板打設深度）を併記してある。どの工区も鉛直ドレーンの打設深度までの沈下挙動が特に顕著であるが、この結果は「高有機質土層（Apt）と有機質粘性土層（Apc）の沈下量が卓越する」とした試験盛土計画当初の想定と整合している。その一方で、Area2 に比べて Area1 では矢板打設深度までの沈下挙動が明確で、Area3 ではさらに下方に沈下が及んでいる。Area1 の沈下傾向は深度 20m 付近までであるのに対し、Area3 では深度 30m 付近までの変位を顕著に記録しており、他工区と傾向が異なる。これは、先に述べた Area1 と Area3 の地表面沈下量の差異にも影響している。図 3-3 で見たとおり、STA.21+80 付近から終点側で土層の構成比率が大きく変化し、砂層の割合が急激に減少して粘性土の割合が増加している。Area3 は STA21+80 より終点側に位置しているため、Area1 より粘性土の構成比率が高く、全体沈下量に影響した可能性がある。

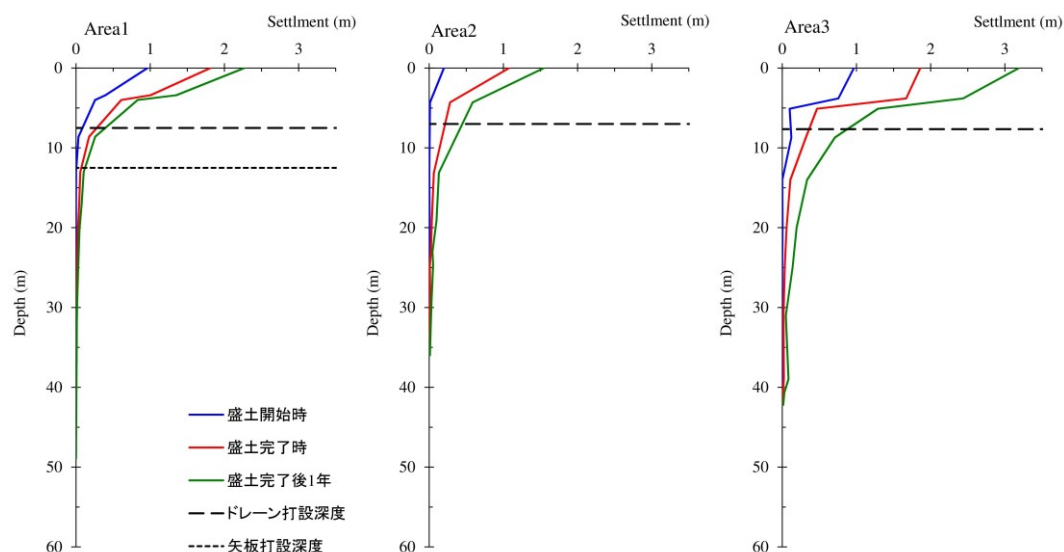


図 4-1-4 深度方向の沈下量とその変化

4-4-4 過剰間隙水圧

図 4-1 5 に、負圧载荷開始時点の間隙水圧を基準とした過剰間隙水圧について、盛土完了から約 1 年間分の経時変化を示した。図は、負圧载荷と盛土の施工の影響が顕著に生じた土層を対象にしたもので、沈下による影響は補正してある。

いずれの工区も、改良対象層とした高有機質土層 (Apt) と有機質粘性土層 (Apc) で、負圧载荷開始直後に過剰間隙水圧が減少しているが、Area2 では減少幅が小さい。各工区とも、盛土の施工を開始すると過剰間隙水圧が上昇するが、上昇幅は各工区で異なり Area3 が最も大きい。盛土の施工に伴い過剰間隙水圧が上昇する傾向は、Area1 では深度 12.4 m の粘性土層 (Ac)、Area2 では深度 18.4 m の粘性土層 (Dc1) までであったのに対し、Area3 では深度 26.4 m の粘性土層 (Dc2) に顕著に生じている。上昇した間隙水圧は、Area1 と Area3 では負圧载荷停止時点で静水圧付近まで消散しているが、Area2 では十分に消散しきらずに、盛土による上昇分の半分程度の水圧が残留している可能性がある。Area2 のキャップ式真空圧密工法では、目標負圧に達する前に盛土の施工を開始し、負圧シール層を圧密することで気密性を高めようとしたが、その結果、過剰間隙水圧が十分に低下する前に盛土の施工を開始することになった。このため、盛土の施工速度がほぼ等しい Area1 と比べると、盛土による過剰間隙水圧が 2 倍に近い値となっており、過剰間隙水圧の残留が生じやすい状況になったものと考えられる。

また、Area3 で見ると、深度 7.4 m の有機質粘性土層 (Apc) で負圧载荷に伴う間隙水圧の低下が記録されており、中間砂層以深に負圧が作用していることが分かる。なお、深層型沈下計の変位を記録した Area3 の深度 30 m 付近より下方の土層については間隙水圧に大きな変動はなかった。

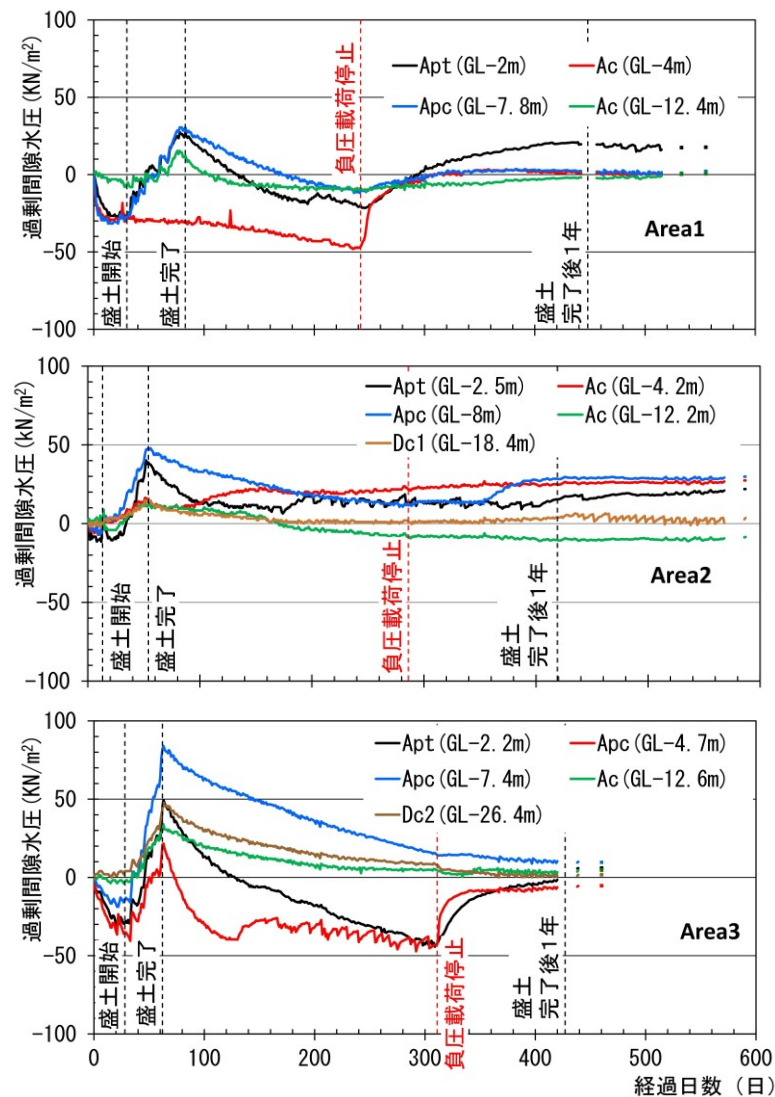


図 4-15 過剰間隙水圧の経時変化

4-4-5 周辺への影響

図 4-16 に、改良範囲端部からの離隔と周辺地盤(地表面付近)の変状の関係について、盛土完了から1年後の時点で整理した。Area3 で盛土の施工中に水平変位が一時的に押し出し傾向となったものの、最終的には何れの工区でも鉛直変位、水平変位とも改良範囲側に周辺地盤(水田)を引き込む傾向となった。試験盛土計画時に水田の鉛直変位量の目標値を「±5 cm 以内」に設定したが、何れの工区もこれを満足していない。その結果、耕作に支障をきたす状況となり、客土をして水田を補修する必要が生じた。図 4-17 (a), (b) に試験盛土周辺の水田の状況、(c) に水田の補修状況を示す。第2章でも述べたとおり、水田には不用意に重機を持ち込むことができない。このため、事業用地内からクレーンを使用して客土材を搬入するという大掛かりな補修が一部で必要となった。

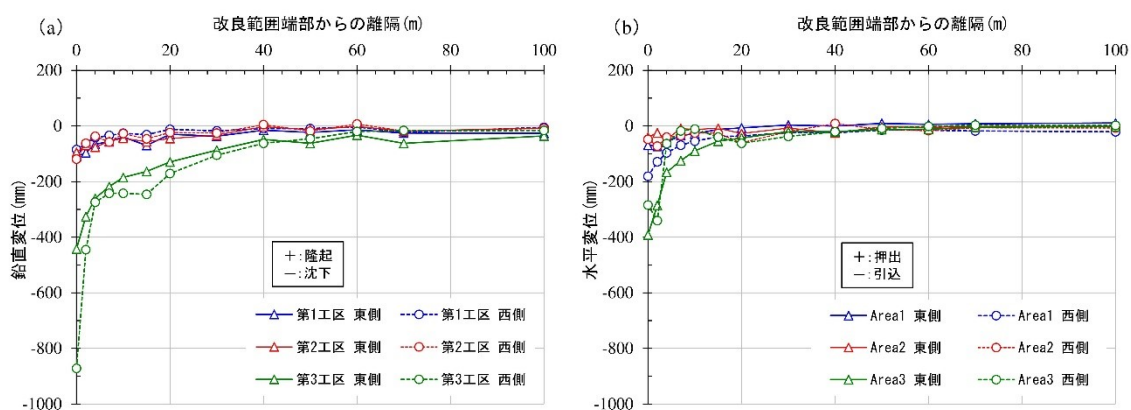


図 4-16 盛土完了1年後の周辺変位 (a) 鉛直方向, (b) 水平方向



図 4-17 周囲の水田の状況 (a), (b) と客土による補修状況 (c)

図 4-18 に、水田に客土をして補修した範囲を示す。Area3 の周辺が最も変位が大きく範囲も広がった。図 4-16 (a) を見ると、改良範囲端部付近で試験盛土西側の変位が東側の倍に達しているが、実際に水田の補修が必要となった範囲は東側の方が広く、隣接する農道についても嵩上げが必要な状況 (図 4-17 (a), (b)) となった。Area2 の東終点側の補修箇所は Area3 の影響が及んだ可能性が高い。Area1 の施工が水田に影響した範囲は限定的であった。なお、客土による水田補修は、2013 年の春 (田植え前) と秋 (稲刈り後) の 2 回実施する必要があった。また、Area1 に打設した矢板は、2013 年 4 月に撤去した (表 4-2) が、矢板撤去に伴う周辺地盤の変位はほとんど発生せず、水田への影響はなかった。

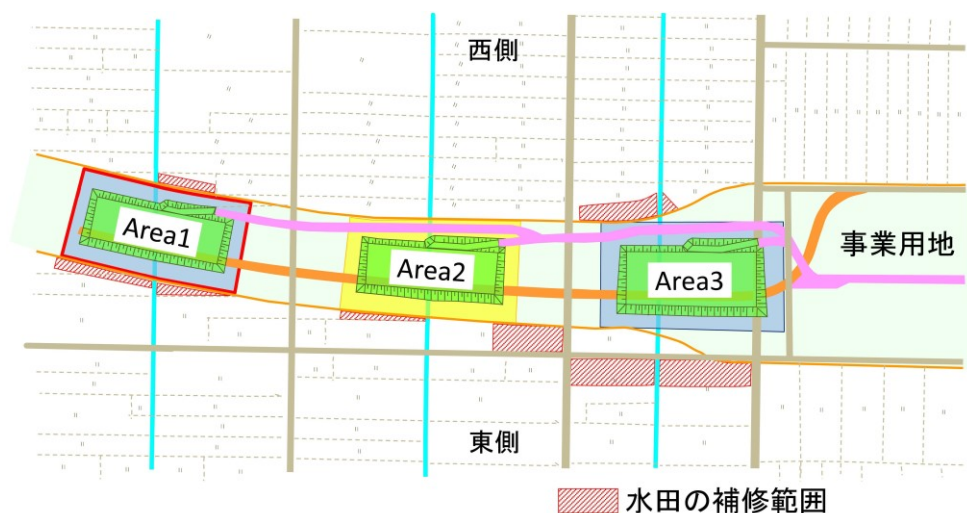


図 4-18 周囲の水田の補修範囲

図 4-19 に、改良範囲の横断方向端部に設置した地中変位計の計測結果を整理した。盛土の位置と変位計の挙動の関係をイメージしやすくするため、左右の図の横軸の正負の向きを反転させてある。いずれの工区も、盛土施工中は大きな挙動がなかったが、盛土完了から1年間で、Area2 の両側と Area3 の東側で引き込み側の挙動が顕著に生じている。深度方向には、Area2 と Area3 の東側で 30 m 程度、Area2 の西側は 20 m 程度の範囲で引き込み側の傾向が生じている。Area2 の西側は、深度 20m から 60 m 付近までは逆に押し出し側の傾向も生じている。Area1 の両側と Area3 の西側は他より挙動が小さいが、Area1 は盛土完了1年後のデータを見ると、両側とも深度 70～80 m まで押し出し傾向が生じている。

図 4-20 に、改良対象範囲の両外側に砂層 (As) を対象に設置した間隙水圧計の測定結果を、過剰間隙水圧として整理して示す。Area1 と Area2 では、施工期間中から負圧载荷停止後にかけて目立った動きがない。一方で、Area3 は特に西側の深度 9.5 m の測定値が負圧载荷開始時と停止時に大きく反応している。東側では深度 5.6 m の測定値にも試験盛土の施工の影響が出ているが、深度 9.5 m の間隙水圧計は大きな反応を示していない。

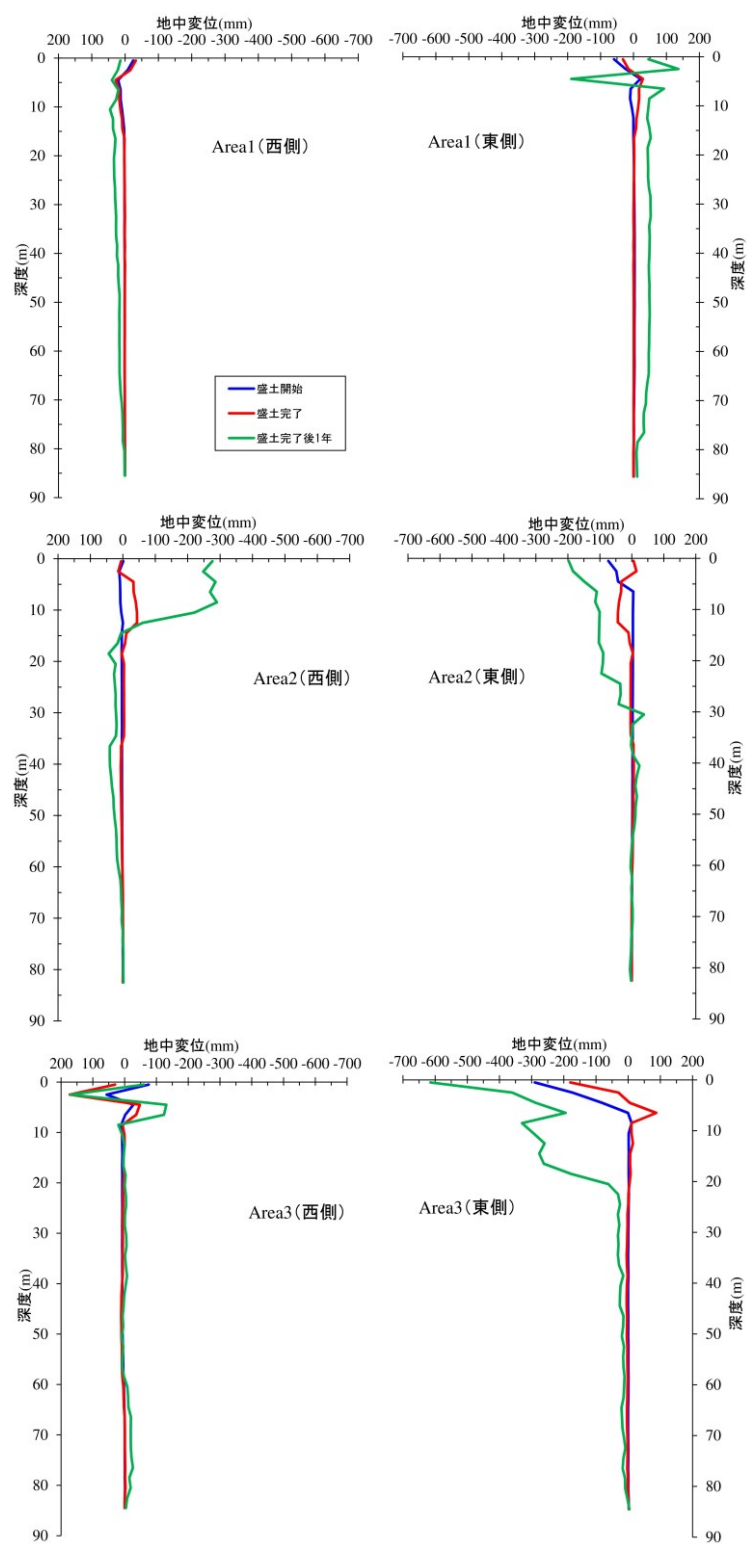


図 4-19 改良範囲端部の地中変位計の挙動（上から Area1, Area2, Area3, 右図 東側, 左図 西側）

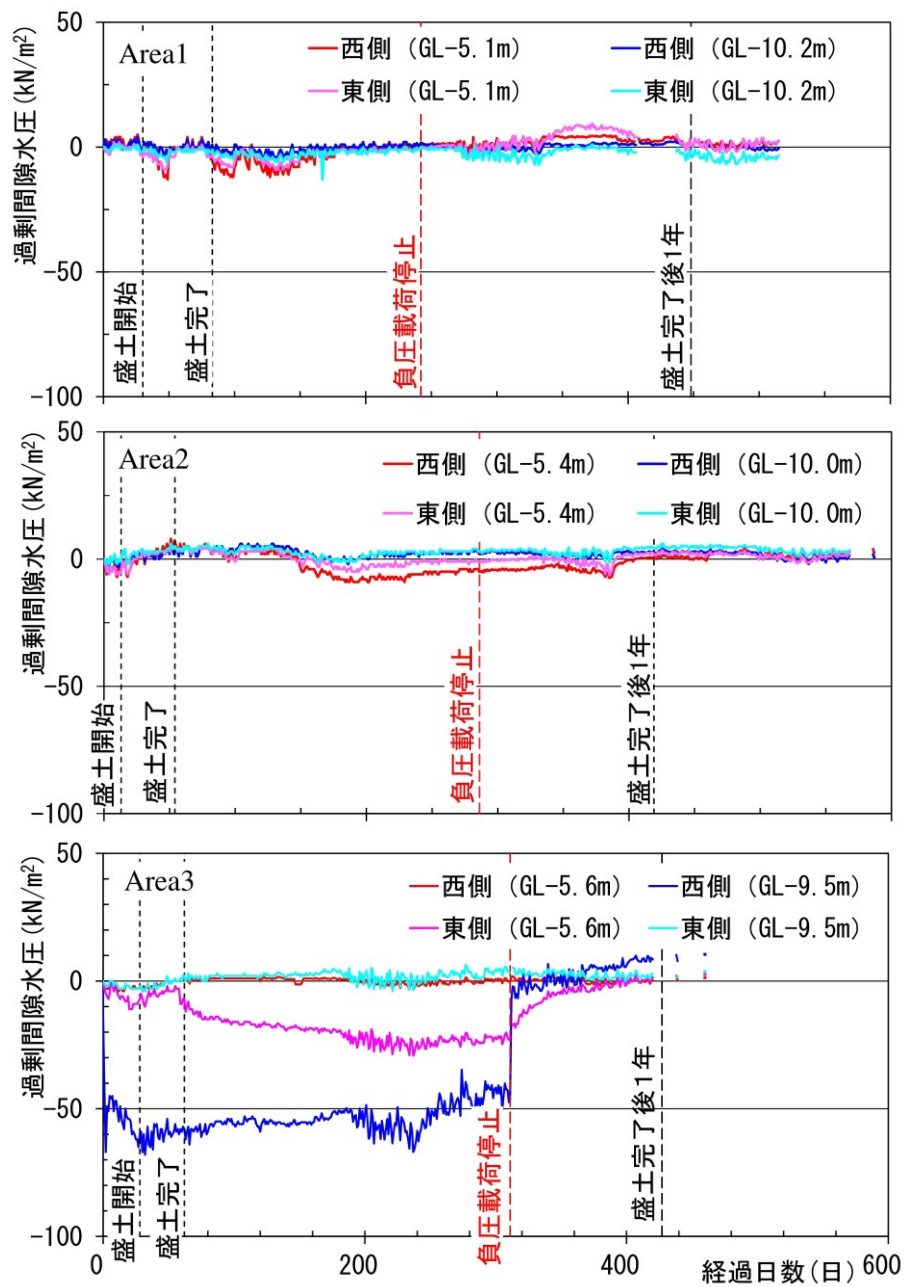


図 4-20 改良対象範囲外側の砂層の過剰間隙水圧 (上から Area1, Area2, Area3)

次に、図 4-2 1 は、負圧载荷装置稼働中の排水量を計測した結果と沈下量の関係を整理したものである。図 4-2 1 (b) を見ると、Area3 の排水量が最も多く、Area2 が最も少ない。図 4-2 1 (c) には、各工区の排水量を改良面積で除した結果（破線）と地表面沈下量（実線）の比較を示している。Area1 と Area3 では地盤の沈下量相当以上の排水量を記録しており、周辺の地盤か深部からの流入があったものとする。周辺の地盤の変状の大きかった Area3 と限定的な影響に終わった Area1 を比較しても大きな差が生じていないため、矢板による遮水効果は確認できなかったことになるが、その一方で、改良範囲外での過剰間隙水圧の変化も発生しなかった（図 4-2 0）。

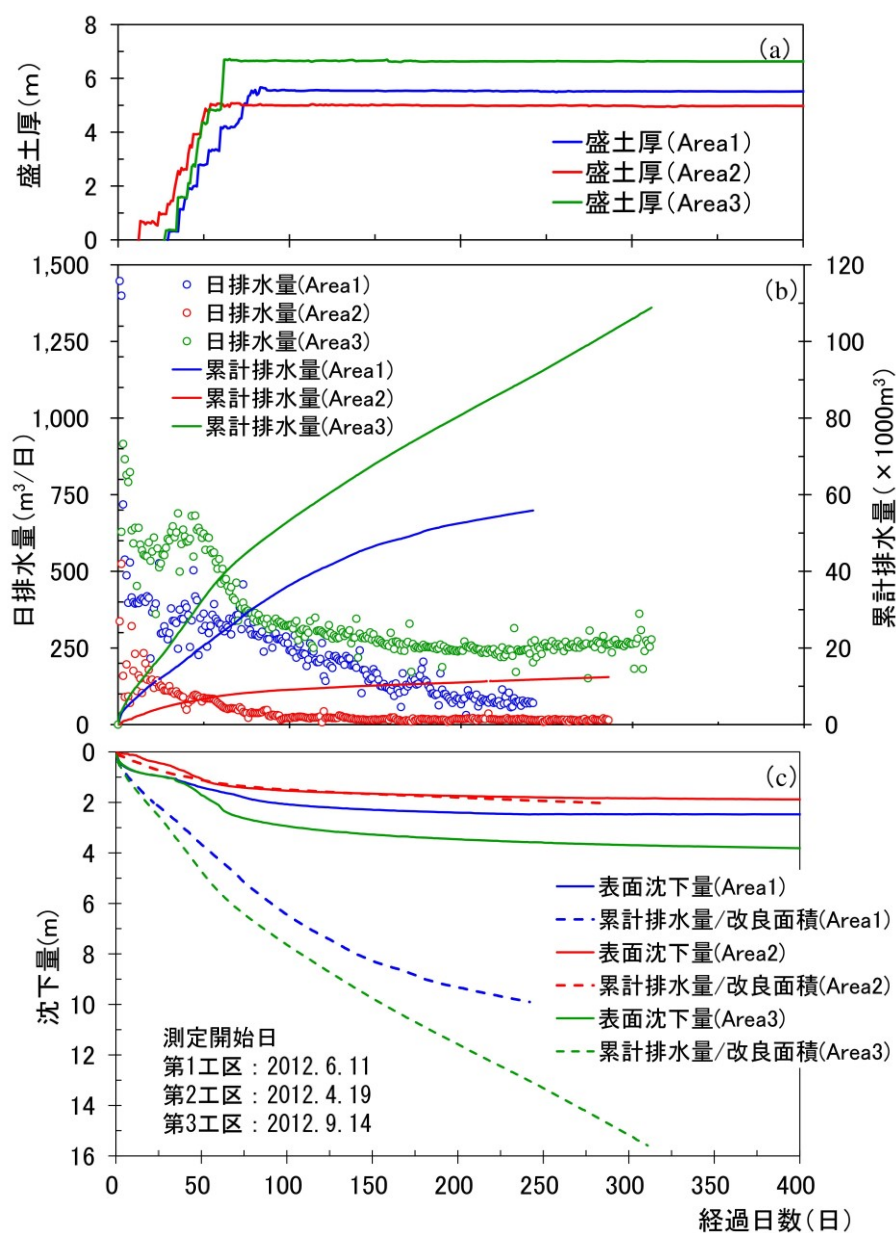


図 4-2 1 負圧载荷中の排水量と沈下量の関係

図 4-2 2 は、Area1 の改良範囲端部付近における盛土施工開始前の負圧載荷時の状況である。矢板が改良範囲側に引き込まれてその背面に大きな隙間が生じており、周辺の地盤の引き込みを低減している。改良範囲外周に打設した矢板が周辺の地盤と改良範囲内の地盤とを分離したため、改良範囲内の地盤の挙動が周囲に伝わりにくくなり、その結果、周辺地盤の変状を抑制する効果が生じたものと考ええる。



図 4-2 2 負圧載荷時の改良範囲端部付近の状況 (Area1)

4-4-6 盛土施工速度

図 4-2 3 に各エリアの盛土の施工速度に着目した図を示す。左図が盛土高、右図が盛土厚について、経時変化を整理した。4-4-2 で述べたとおり、Area1 と Area2 は真空圧密工法を採用した場合の標準的な盛土施工速度 (0.15 m/day) を目標として施工しているのに対し、Area3 は高速道路の本体盛土の施工を視野に施工速度向上を目指したものである。その結果、盛土厚換算で 0.19 m/day の施工速度となっているが、図 4-1 3 に見るとおり、これ以上の盛土速度は危険を伴うものと考ええる。

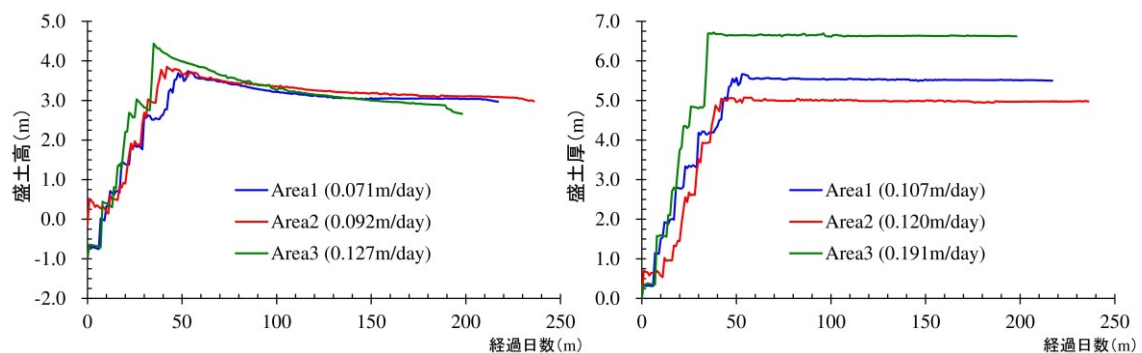


図 4-2 3 盛土の施工速度

4-5 改良効果の確認

試験盛土の施工完了後、改良効果を確認するためボーリング調査を行った。図 4-2 4 に改良前後（試験盛土施工前後）の自然含水比、湿潤密度、間隙比、一軸圧縮強さの比較を示す。動態観測機器との干渉を避けるため、改良前後のボーリング調査位置は約 10 m の離隔があるが、土粒子の密度、粒度分布、コンシステンシー、強熱減量等を比較したうえ、概ね同一層からの試料採取ができたものと判断した。試験盛土施工前に比べて、湿潤密度、一軸圧縮強さは増加傾向にあり、自然含水比と間隙比は低下傾向にある。

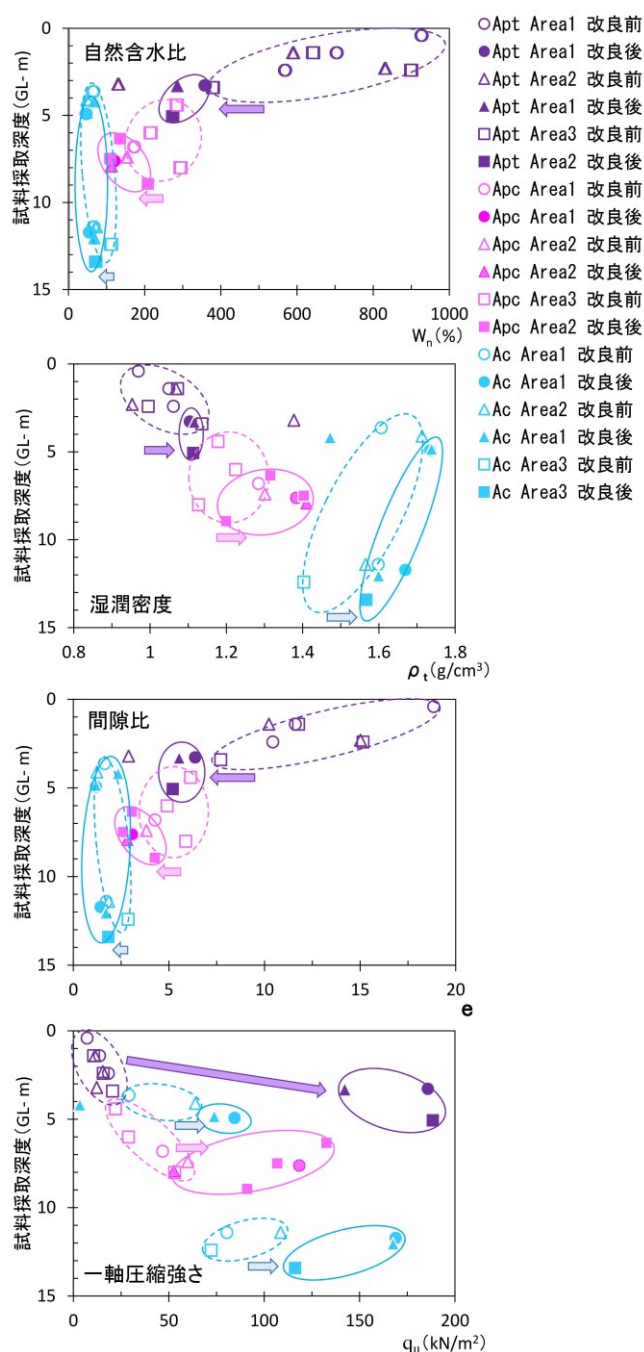


図 4-2 4 改良前後の土質試験結果の比較

図 4-2 5に、図 4-2 と対比するため、改良前後の間隙比 (e)、圧縮指数 (C_c)、体積圧縮係数 (m_v) を比較した。特に有機質土 (Apt, Apc) において顕著な改良効果を示していることが分かる。

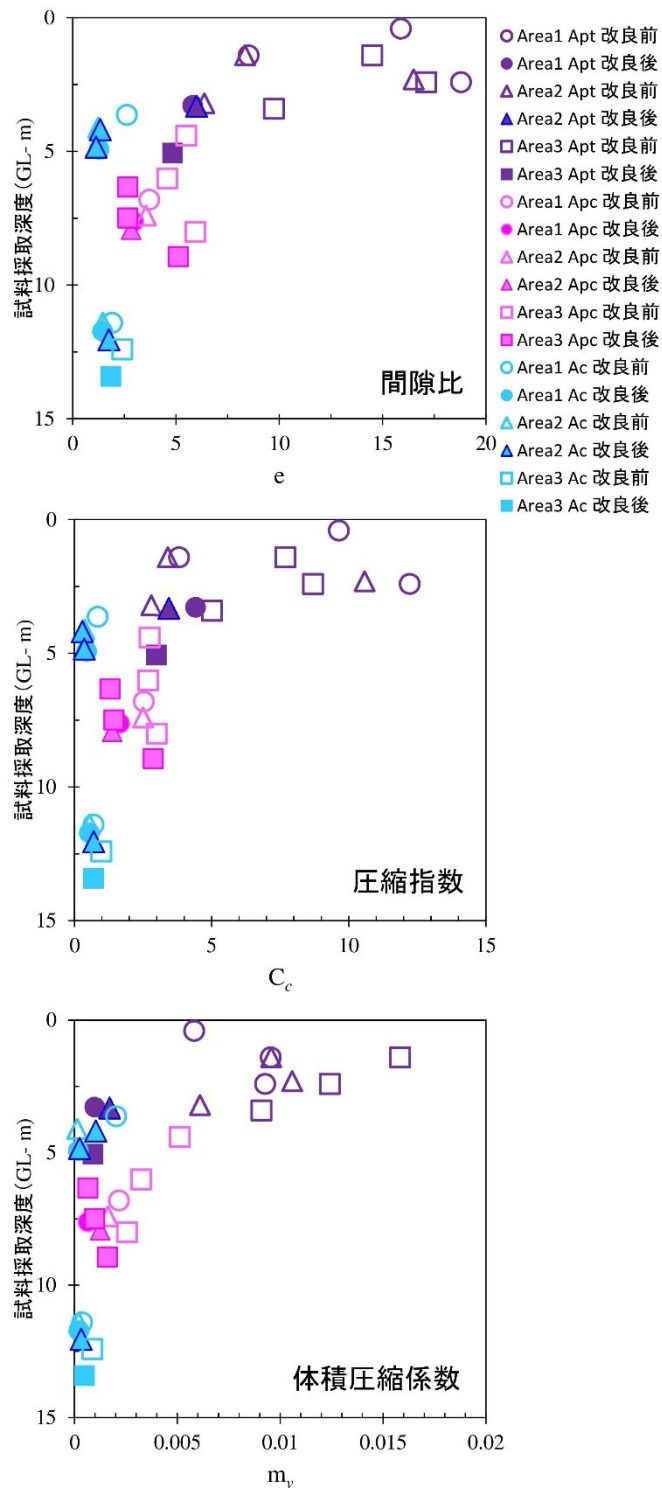


図 4-2 5 改良前後の間隙比，圧縮指数，体積圧縮係数の比較

さらに、図 4-26 に、改良前後の高有機質土（Apt）の圧縮曲線の比較を示した。圧縮曲線の形状の変化で見ると、各工区とも、高有機質土（泥炭）に対しての高い改良効果を示す結果であった。

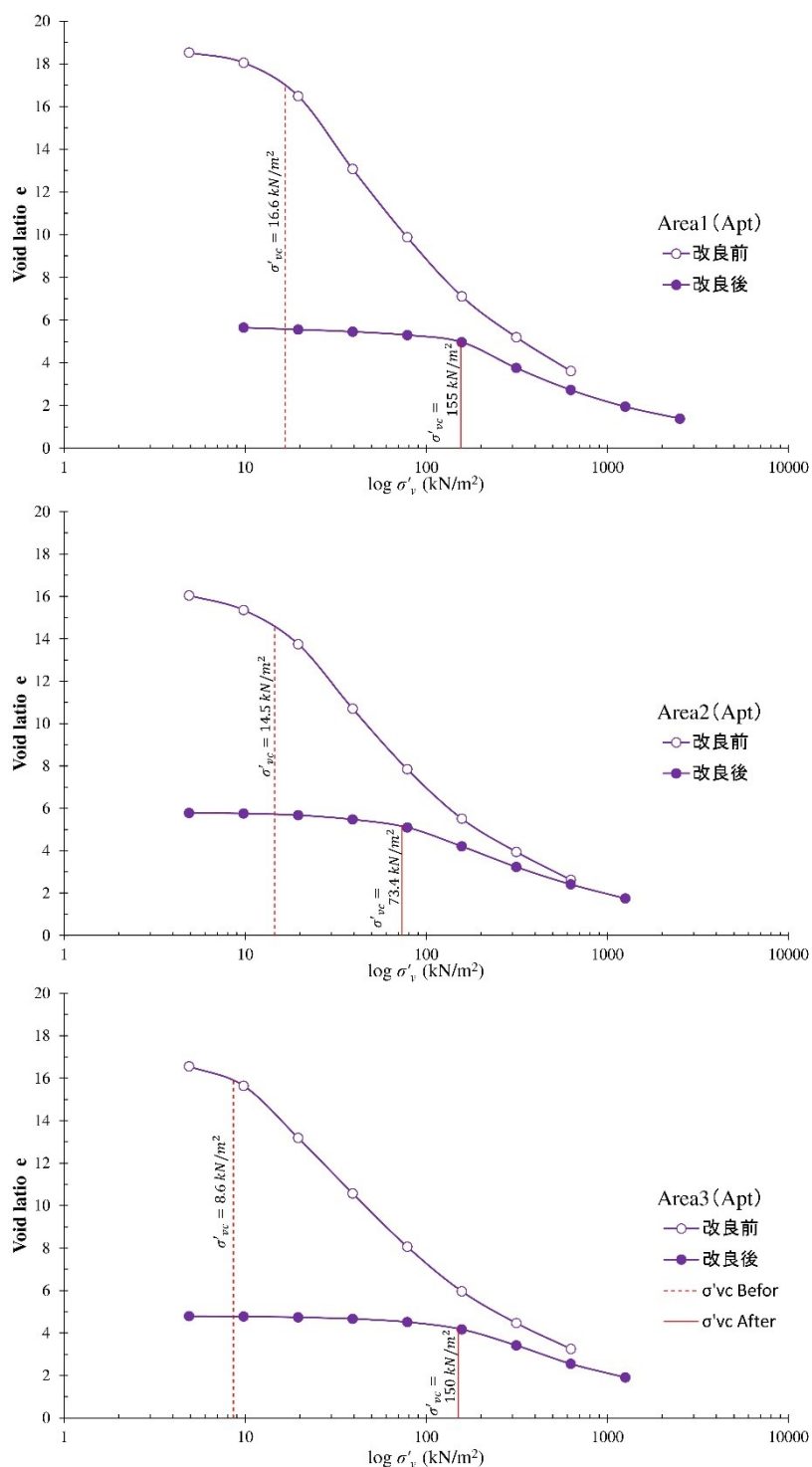


図 4-26 改良前後の圧縮曲線の比較（Apt）

図 4-2 7 に、圧密降伏応力の深度分布と有効土被り圧の比較を示す。有効土被り圧は改良前後それぞれのボーリング調査で測定した土層厚と湿潤密度で求めたもので、負圧は改良後の有効土被り圧に目標負圧を深度によらず一律に加えている。第 1 工区では、矢板の打設深度付近まで圧密降伏応力の上昇が顕著で、改良効果が高い。第 3 工区も十分に上昇している。一方、第 2 工区については、盛土荷重に相当する有効土被り圧の上昇分程度しか圧密降伏応力が上昇していない。なお、粘性土層 (Ac) については、改良前の圧密降伏応力が比較的高く測定されているため、改良後に圧密降伏応力が低下しているように見えるが、これは試料のばらつきの影響で生じた結果であると考えられる。

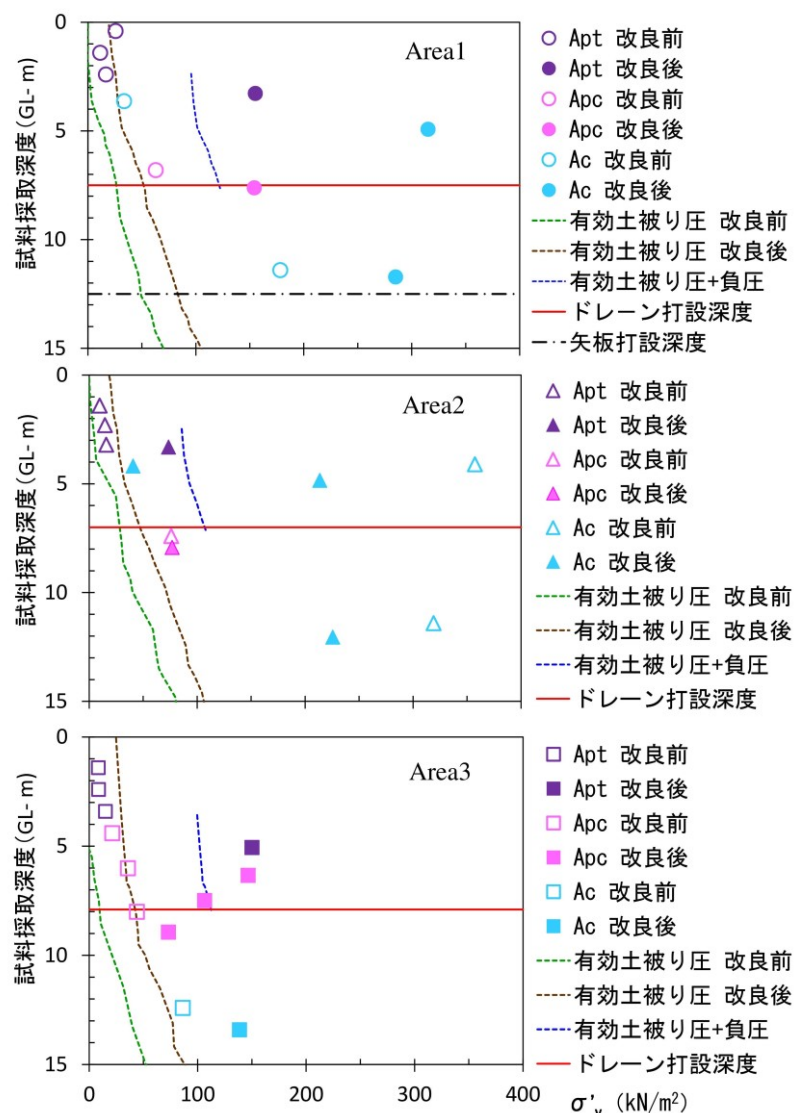


図 4-2 7 改良前後の圧密降伏応力の比較 (上から Area1, Area2, Area3)

表 4-5 は、Area2（キャップ式真空圧密工法）における Apt 層についての透水試験の結果を示したものである。負圧シール層の気密性は、本来は盛土の施工開始前に満たすべき条件であるものとするが、負圧シール層として要求される透水係数に対して、試験盛土施工完了後の Apt 層の透水係数は依然として目標値に達していなかった可能性がある。今回用いた盛土材料は良質とはいえない状況であったが、試みに Creager による方法^[17]で盛土材料の透水係数を概算すると、 5×10^{-8} m/s 程度（20% 粒径が 0.0081 mm）になる。Area2 の盛土材料の最適含水比は 21%であったが、実際の施工時の含水比は 26～32%と最適含水比を上回っていた。また空気間隙率についても管理基準値を 13%以下としたが、盛土の品質管理試験の結果は平均 8.4%で、空気間隙率が低めに仕上がっており、盛土体は透水性が低かったものとする。盛土の施工開始後に負圧が安定したことや改良端部での沈下量が他工区と比較して極端に少ないこと等も考え合わせると、Area2 の場合は盛土体自体が負圧シール層として機能した可能性が高い。図 4-12 で、Area2 の改良端部の地表面沈下量が他工区と比べて極端に小さいことを示したが、改良端部には盛土を施工していないため、気密性が不十分で負圧が十分に作用しなかったものと考えている。

なお、図 4-26 から、Apt 層の透水係数の低下の程度は何れの工区でも概ね同程度であったものとする。

表 4-5 改良前後の現場透水試験の結果（Apt）

	試験地点 (第2工区)	実施日	深 度 (m)	試験方法 JGS1314	透水係数 (m/s)
施 工 前	試験盛土中央	2011.6.27	GL-2.45	非定常法 汲み上げ法	7.09×10^{-6}
	試験盛土中央より 起点側に25m	2011.7.7	GL-1.25	非定常法 汲み上げ法	8.07×10^{-6}
	試験盛土中央より 終点側に25m	2011.7.1	GL-2.25	非定常法 汲み上げ法	6.52×10^{-6}
施 工 後	試験盛土中央より 起点側に10m	2013.7.5	GL-3.52※	非定常法 汲み上げ法	1.90×10^{-5}
				非定常法 投入法	1.46×10^{-6}
目 標 値					1×10^{-6}

※: GLは盛土施工前の標高