

周辺地盤の変形抑制に着目した真空圧密の模型実験

Model Test of Vacuum Consolidation with Consideration of Controlling Displacements of Neighboring Ground

藤本 貴浩	Takahiro FUJIMOTO	(広島大学大学院工学研究科)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)
松永 康司	Koji MATSUNAGA	(前国土交通省中国地方整備局)
杉山 直也	Naoya SUGIYAMA	(IHI)
新舎 博	Hiroshi SHINSHA	(五洋建設(株))

真空圧密工法は軟弱粘性土地盤の低コストの改良工法として近年採用されるケースが増加している。しかし、真空圧密では連れ込み沈下や側方流動が生じてしまうため、改良区域に近接する構造物がある場合は、この工法を実施することは難しいという問題点がある。本研究では、真空圧密で改良する際の周辺地盤の変位対策工として、側方変位を観測制御しながら段階盛土を併用し、さらに粘土層を加水して練返すことにより遮断層を設置する方法を考案しそれらの効果を室内模型実験にて検討した。その結果、側方変位制御によって側方変位を、遮断層によって鉛直変位を軽減でき、周辺地盤の変形を抑制しながら真空圧密による改良を実施することが可能であることを示した。

キーワード：真空圧密，盛土，遮断層，変形

(IGC : B06, E02, M05)

1. はじめに

近年、圧密促進工法のひとつである真空圧密工法が注目されている。真空圧密工法はバーチカドレーン工法との併用工法として、1940年代にスウェーデンで考案され、我が国には1960年代前半に技術導入された。当時はいくつかの施工が行われたが¹⁾、気密性が保持できないなど技術的な課題が多く、一般的な地盤改良工法としては普及しなかった。しかし、1990年代になって、真空圧密工法に必要な材料の品質向上や施工方法のバリエーションの拡充などにより、低コストの地盤改良工法として各地で採用される機会が増えて²⁾いる。

真空圧密工法は、載荷用の盛土を使用しなくても有効な圧密圧力を加えることができるという長所があるが、一方で周囲の地盤を改良範囲の方向に引き寄せるため、周囲に連れ込み沈下や改良側への水平変位が発生するという問題があり^{3), 4)}、周辺に近接構造物がある場合には、影響を遮断するための補助工法が必要になる。また、圧密促進のための荷重として真空圧密に加えて段階盛土を併用した場合は、盛土の載荷によって地盤を改良域の外に押し出すとともにせん断変形によって周辺の地盤を盛り上げる効果があるので、真空圧密による影響(連れ込み沈下と改良側への水平変位)を緩和することが考えられる。

本研究では、真空圧密に段階盛土載荷を併用し新たに練返しによる遮断層を設置することによって、周辺地盤の変形を抑制しながら圧密による改良を行う方法の開発を目的として、模型実験による検討を行った。

なお、真空圧密工法には、バーチカドレーンを打設した改良域を気密シートで覆って真空を加える気密シート式と、バーチカドレーンの頭部にキャップを設置し、それぞれのドレーンのキャップを通して真空を加えるキャップ式がある。気密シート式では、段階盛土を併用し盛土を本土工として用いる場合にはシートの回収が難しく盛土の下にシートを残置することになるため、本実験ではキャップ式の真空圧密工法を対象として検討を行った。

表-1 実験に用いた粘土の物理特性

	広島港出島 粘土[実験 A]	羽田空港 粘土[実験 B]
液性限界 w_L (%)	103.5	113.2
塑性限界 w_P (%)	45.2	49.6
塑性指数 I_p (%)	58.4	63.6
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.64	2.66
圧密係数 c_v (cm^2/d)	68.7	122.2

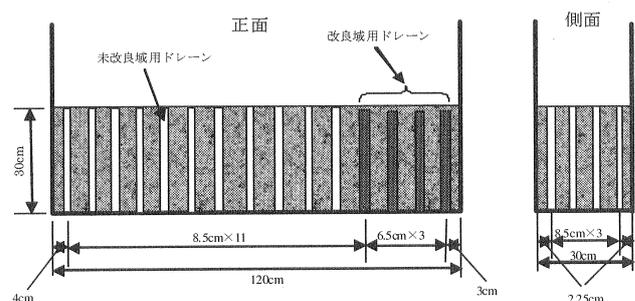


図-1 模型地盤におけるドレーン打設間隔

2.実験方法

2.1 模型地盤の作成と予備圧密過程の実験方法

模型地盤作成に用いた粘土は、広島港出島粘土(実験A)と羽田空港沖粘土(実験B)であり、表-1にその物理特性を示すが、いずれも高塑性の完新統粘土である。

実験に用いた土層は幅1200mm×奥行き300mmであり、前面が透明アクリル製で外から粘土層を観察できるようにになっている。また、圧密時の排水は底面の排水口から排水する。

地盤の作成あたっては、まず十分に練返して液性限界の1.5倍の含水比に調整した粘土を、気泡が入らないようにバイブレーターを用いながら高さ300mmまで入れた。実験前に予備圧密を行って粘土地盤を造成するため、粘土層内に圧密を促進するためのドレーン(不織布製)を図-1のような間隔で地盤内に挿入した。また、粘土層の上面と底面には排水層として不織布を敷設した。

次に予備圧密用の載荷板(自重による圧力は2.0kPa)を粘土層の上面に設置し、空圧シリンダーで載荷板を押すことによって、9.8、19.6、39.2 kPaの圧密圧力を段階的に載荷した。図-2にCASE A-4(実験ケースについては次項で説明。)の予備圧密過程の時間-沈下量関係の例を示す。土槽を正面から見て左側、中央、右側を測点1、2、3として載荷板の沈下量を計測したが、このケースでは最終的に3点の平均で91.5mm沈下した。圧密終了後の層厚は、実験ケースによって多少の違いは見られたが概ね200mm程度であった。また、予備圧密過程では図-3に示すように、土槽の右側面において底面から18、12、6cmの位置(図-3、図-4では上、中、下)に間隙水圧計を設置し間隙水圧の経時変化を測定した。ばらつきはあるが、圧密圧力を増加させるごとに過剰間隙水圧が発生し、時間とともに消散していく様子がわかる。測定値は載荷板を載せた時点としており、その値は載荷板の自重による過剰間隙水圧も含んでいる。

予備圧密が終了すると、改良後の強度と比較するために、ベンセン断試験によって非排水せん断強度を測定し、サンプリングを行って含水比を測定した。

2.2 盛土を併用した真空圧密改良過程の実験方法⁵⁾

予備圧密終了後載荷版を取り除いた後、改良過程に移る準備としてまず改良域のドレーン頭部のキャップを真空ポンプに接続した(CASE A-1は盛土載荷のみ)。次に、改良域用のドレーンに接続したパイプを連結させた中継器に気圧計を設置して真空圧を計測した。

漏気を防ぐためにキャップが隠れるようにスラリー状の粘土を2~3cm程敷きシール層を形成させ、その上から鉛玉を載せて地盤にクラックが入るのを防止した。また、クラックが発生した場合の漏気対策として表層に水を張った。

盛土載荷は改良域の上に硬質ゴム製の模型盛土を載せ、模型盛土を上から空圧シリンダーで載荷することによりを行った。図-4は真空圧密と盛土載荷を併用したときの正面から

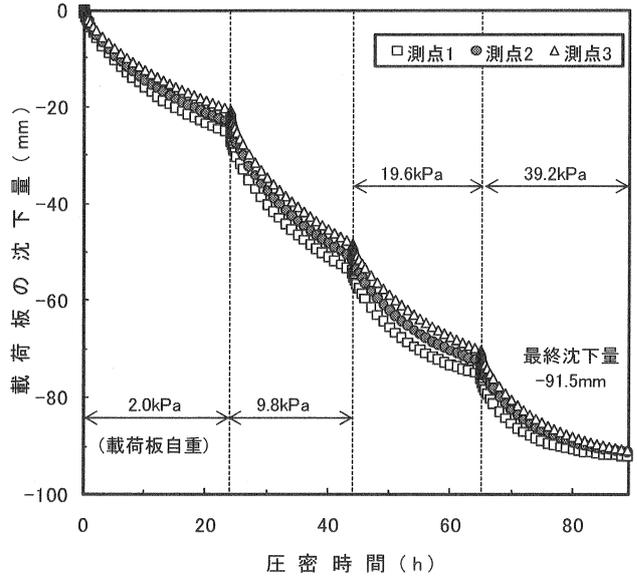


図-2 予備圧密過程の沈下量 [CASE A-4]

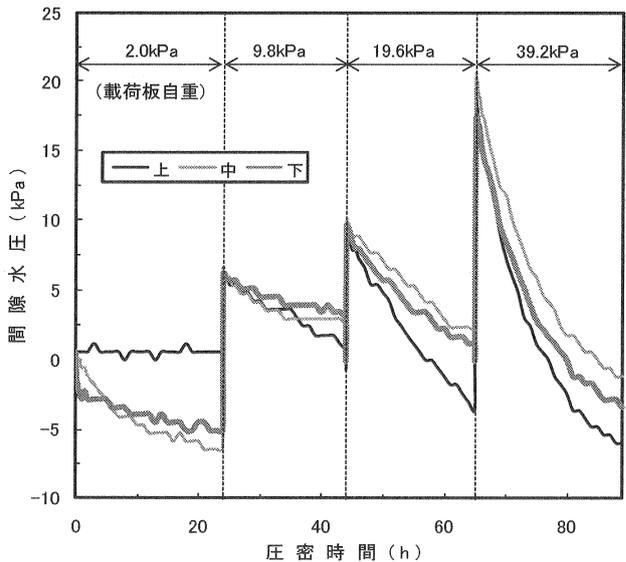


図-3 予備圧密過程の間隙水圧変化 [CASE A-4]

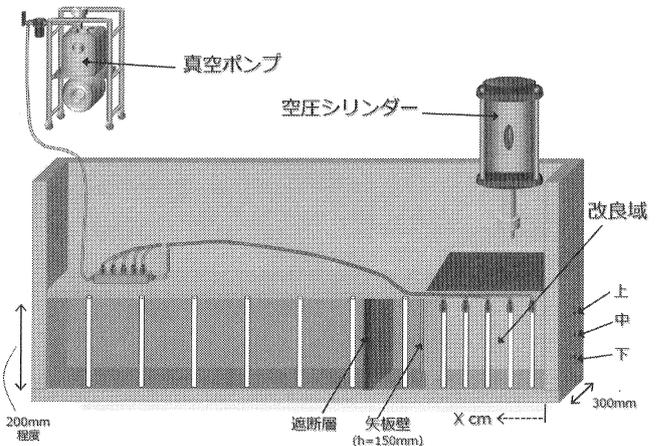


図-4 真空圧密と盛土の載荷

表-2 実験条件

		実験 A				実験 B		
		CASE A-1	CASE A-2	CASE A-3	CASE A-4	CASE B-1	CASE B-2	CASE B-3
圧密圧力	盛土圧力	147kPa	78.5kPa					
	真空圧力	なし	-60~-80kPa					
変位対策工	矢板工	なし		あり	なし			
	練返し遮断工	なし				あり (加水無し)		あり (加水)
	側方変位制御				あり			あり

の状況を模式的に示したものである。図-4において、盛土模型直下の部分が改良域に当たる。なお、右隅の土槽壁面からの距離を「改良域中央からの距離X」と呼ぶことにする。

2.3 実験条件

表-2 に実験 A および B における実験条件、計7ケースを示した。実験 A では、荷重条件の違いとして、真空圧との併用の有無、さらに周辺地盤の変位対策工として矢板壁の有無(設置位置は改良域と未改良域の境界部分)、側方変位制御の有無を設定した。改良は一次圧密の終了付近まで行った。また、実験 B では、実験 A の結果を踏まえ、変位対策工、改良時間などを変更し実施した。変位対策工として遮断層の有無、側方変位制御の有無を設定した。ここでそれぞれの意味をまとめると以下のようになる。

矢板壁：鋼製の剛な矢板を想定し、ステンレス製の模型矢板を設置。(模型実験では X=22.5cm 地点)

側方変位制御：真空圧密を先行させて側方変位を観測し、側方変位が規定の値を超過しないように制御しながら段階的に盛土荷重を行う操作のこと。

遮断層：改良域と未改良域を縁切りするために、改良域の外側(模型実験では X=35cm 地点)の地盤を所定の幅で練り返した層のこと。

なお、各ケースにおいて真空圧密による改良は圧密沈下が落ち着くまで実施した。圧密圧力については、盛土荷重と真空圧密を併用したとき、盛土圧力は 78.5k Paまで荷重させた。真空圧の荷重圧力としては、圧力損失等によって-60~-80 k Paという値を示していた。以下に、各ケースでの条件の違いを述べる。

[CASE A-1]：盛土荷重による地盤の挙動を調べるために、盛土圧力のみで改良を行った。盛土圧と真空圧を併用した他のケースでの真空圧を-68.7kPaと仮定し、盛土圧と合計した荷重圧力を147.2kPaと想定したことから、このケースでは盛土圧のみを5段階に分けて147.2kPaまで荷重させた。なお、このケースの改良時間は40時間であった。

[CASE A-2]：盛土荷重と真空圧密を同時に荷重させた。盛土圧力は49.1kPaで改良を開始し、8時間後に78.5k Paに上昇させた。改良時間は18時間であった。この条件が変形抑制をしていない実験Aにおける“無対策”で

の改良に当たる。

[CASE A-3]：圧密圧力の荷重条件はCASE A-2と同様で、未改良域との境界(X=22.5cm地点)に「矢板壁」を設置して改良を行った。ここで矢板壁は改良域と未改良域の水の移動を遮断するために用いた。そこで、改良域の沈下によって矢板の下端が土槽の底面に接触するのを防ぐために矢板の深さを150mmとし、約50mmの余裕を持たせた。この条件での改良時間は23時間であった

[CASE A-4]：「側方変位制御」をしながら改良した。真空圧を盛土圧に先行させて荷重させ、地盤が改良域側への側方変位が2mmを超えるごとに盛土圧を19.6k Paずつ追加(4段階)させて側方変位を制御した。盛土圧は最終的にはCASE A-2、A-3同様に78.5kPaまで荷重させた。改良時間は20時間であった。

[CASE B-1]：盛土荷重と真空圧密を同時に荷重させた。盛土圧力は 39.2k Paで改良を開始し、22 時間後に78.5k Paに上昇させた。改良時間は68時間であった。この条件が変形抑制をしていない実験 B における“無対策”での改良に当たる。

[CASE B-2]：圧密圧力の荷重条件はCASE B-1と同様で、改良域の外側(X=35cm地点)に「遮断層」を設置して改良を行った。このケースでは攪拌棒を用いて幅10mmにわたって下端まで練り返し、遮断層を設置した。なお、攪拌棒の回転は手動で行った。この条件では改良時間は88時間であった。

[CASE B-3]：側方変位制御をしながら改良した。真空圧を盛土圧に先行させて荷重させ、地盤が改良域側への側方変位が0.5mmを超えるごとに盛土圧を9.8k Paずつ追加(8段階)させた側方変位を制御した。また、CASE B-2と同様の位置(X=35cm地点)に遮断層を設置した。このケースではCASE B-2以上に遮断層の強度を低下させるために水を加えてさらに電動ドリルを用いて練り返しをして遮断層を造成した。そして、強度が回復しにくいように遮断層の幅を30mmと広くとった。なお、加水量は液性限界付近のように調整した。また、側方変位の測定はX=30cm地点において、地盤に挿入したアルミ板の変位をバネ変位計で計測して行った。改良時間は68時間を要した。

2.4 実験中の周辺地盤の変形計測と改良強度の測定

改良中の周辺地盤の変形量を把握するために側方変位と鉛直変位を計測した。側方変位の計測には、予備圧密が終了した模型地盤に、土槽正面の亚克力板に沿って、実験Aでは「うどん」を、実験Bでは「砂杭」を打ち、その挙動を時間ごとに撮影して変位量を測るという方法を行った。実験Aを行った際、真空圧密の影響で「うどん」が地盤中に引き込まれてしまい、土槽正面からの視認が難しいという問題があった。それを解決すべく、透水性に違いがあるが実験Bでは「砂」をターゲットにして側方変位を測定した。また、鉛直変位は、X=30, 40, 50, 80cm地点にバネ変位計を設置して計測を行った。

2.1で示した各条件での改良が終了した後、改良域から試料を採取して、一軸圧縮強度試験、含水比の測定を行い、改良前と比較して改良効果を確認した。

3. 実験結果

3.1 段階盛土を併用した真空圧密改良過程における沈下量、間隙水圧、真空圧の経時変化

段階盛土を併用して真空圧密改良を実施したときの盛土沈下量、間隙水圧、真空圧の経時変化をCASE A-4の場合を例にとって示す。

図-5は盛土載荷後の沈下量の時間的変化である。CASE A-4は側方変位制御を行ったケースで、真空圧を先行的に載荷させた後、盛土圧を4段階に分けて78.4kPaまで載荷した。側方変位量によって盛土圧を管理し改良開始から5時間で78.4kPaまで追加させた。盛土圧を増加させるごとに沈下量が大きく出ているのがわかる。改良を終了した20時間までに29.5mm程沈下した。図-6には間隙水圧の経時変化を示しており、改良開始とともに先行載荷させた真空圧密の効果で負圧が作用している。盛土圧の追加による過剰間隙水圧も観察できる。ただし、盛土圧を考慮すると上、中、下の順番で負圧が大きくなると考えられるが、図-6はそうはなっていない。また、図-7にドレーンに繋げたパイプを連結させた中継器で測定した真空圧の時間変化を示す。改良開始と同時に、約-80kPaまで負圧が作用している。真空圧のみを載荷させている場合、沈下の進行とともにシール層による遮断が不十分になり負圧が約-70kPaまで減少している。しかし、盛土圧力を段階的に載荷することによって遮断効果が回復し、負圧は-80kPaとなって改良終了までその圧力を維持している。

3.2 側方変位

(1) 実験Aにおける側方変位の挙動

図-8および図-9に実験AにおけるX=29cm地点の側方変位量を示す。改良域がX=22.5cm地点までであるため、X=29cm地点とは改良域から少し外側の地点である。また、測定時刻はそれぞれの条件での改良終了時である。なお、

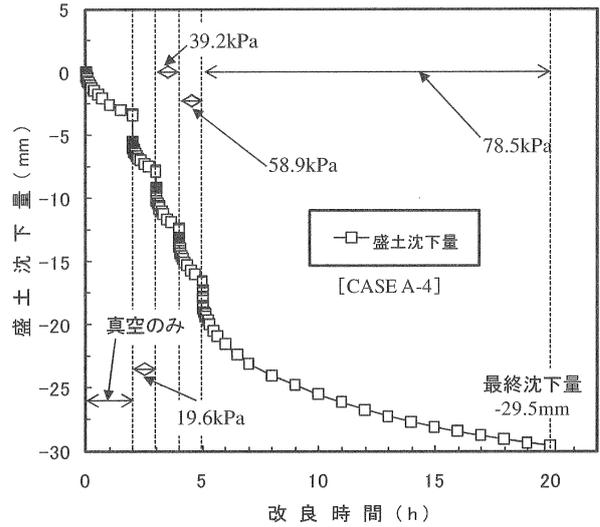


図-5 改良過程の盛土沈下量 [CASE A-4]

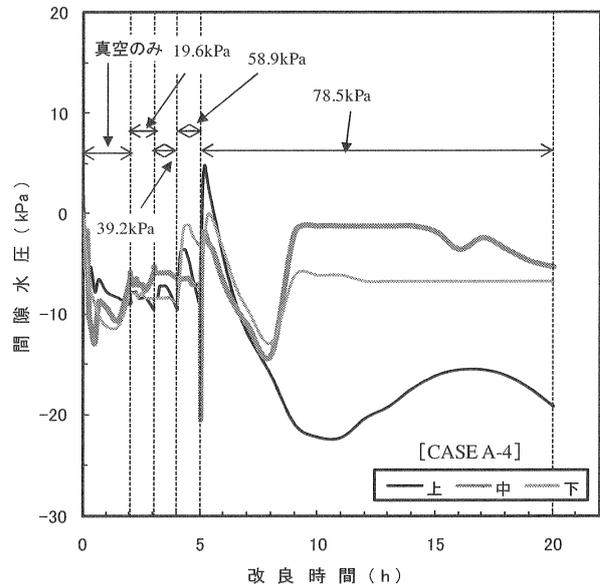


図-6 改良過程の間隙水圧変化 [CASE A-4]

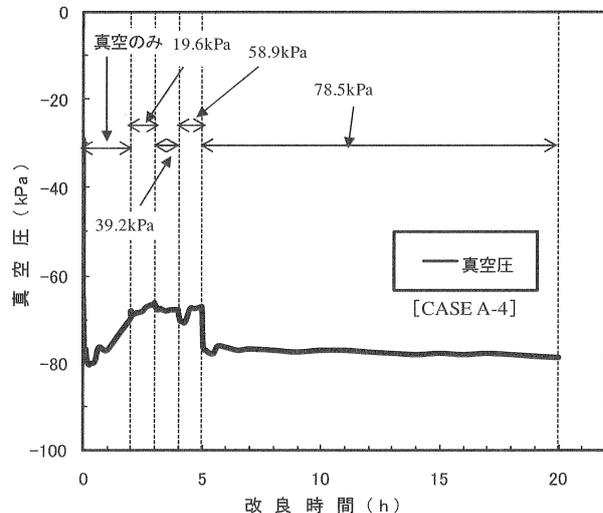


図-7 改良過程の真空圧変化 [CASE A-4]

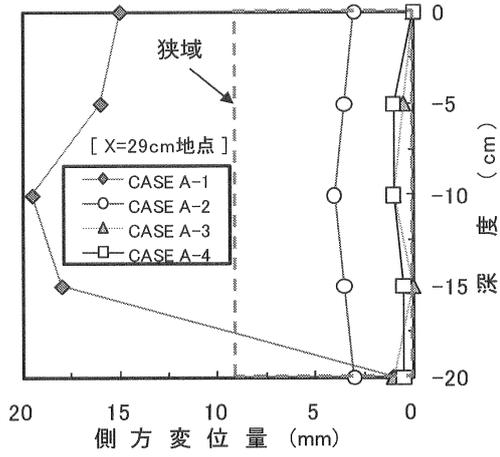


図-8 側方変位 (X=29cm 地点・広域) [実験 A]

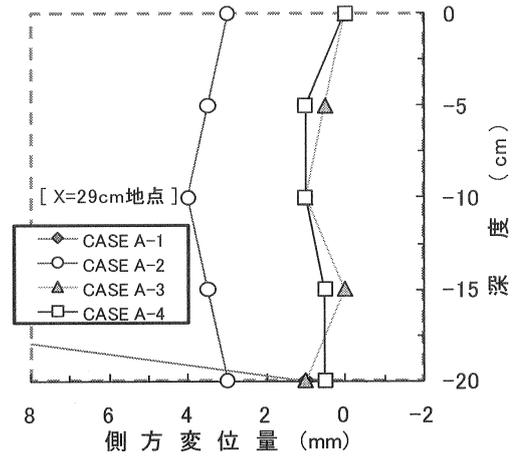


図-9 側方変位 (X=29cm 地点・狭域) [実験 A]

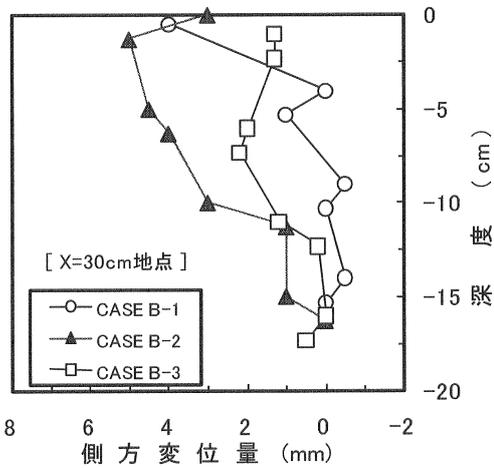


図-10 側方変位 (X=30cm 地点) [実験 B]

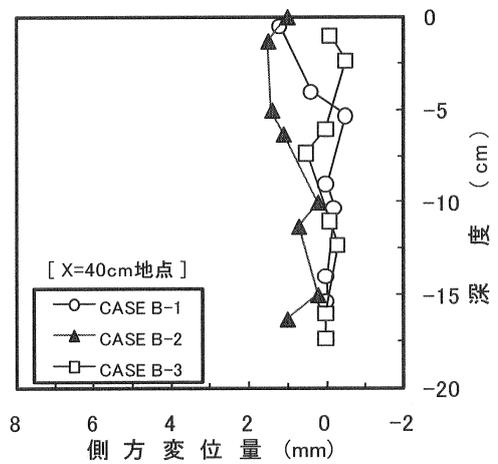


図-11 側方変位 (X=40cm 地点) [実験 B]

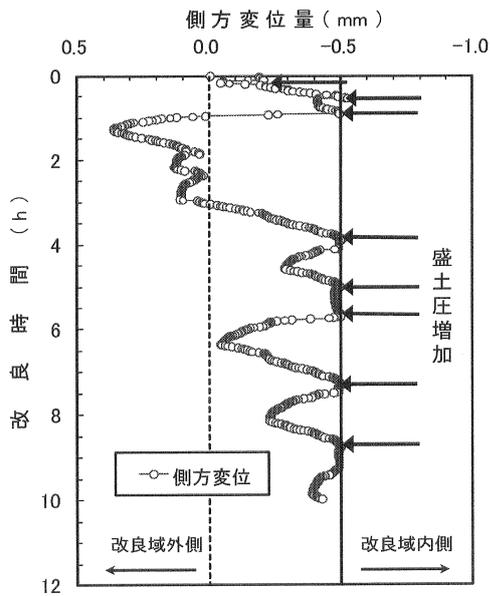


図-12 側方変位管理 [CASE B-3]

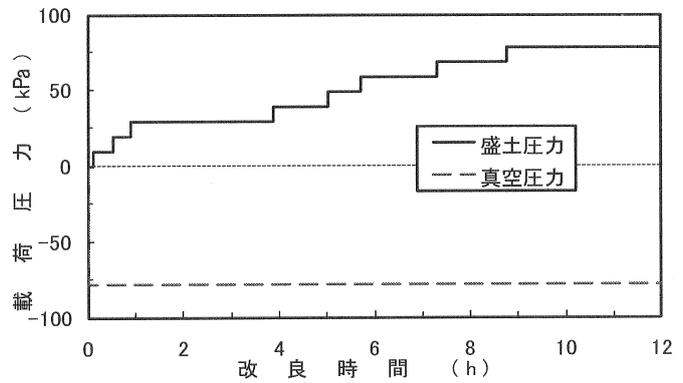


図-13 載荷圧力の制御 [CASE B-3]

図-9ではCASE A-2～A-4の比較のために狭小範囲までの側方変位を示した。

図-8をみると、盛土荷重による荷重のみを行ったCASE A-1において改良域外側に向けた側方変位が15～20mmと特に大きく発生していることがわかる。これに対して、真空圧密と併用したCASE A-2では改良域内側へ引き込む力によって改良区域外の変形を3～4mmと狭い範囲に抑えていることがわかる。このCASE A-2の条件に加えて変位対策工として矢板壁を設置したCASE A-3では、さらに変位が抑えられ、矢板工の変位抑制効果を確認できた。盛土荷重のコントロールによる側方変位制御をしたCASE A-4では、CASE A-3と同程度の変位に抑えることができおり、矢板工を行わずとも盛土の荷重制御によって側方変位を抑えられることがわかった。

(2) 実験Bにおける側方変位の挙動

図-10および図-11に実験BにおけるX=30cm地点、40cm地点の側方変位量を示す。CASE B-2、B-3における変位対策工の遮断層はX=35cm地点に設置しており、それを挟む地点としてX=30cm地点、40cm地点の側方変位を測定した。X=35cm地点の遮断層で改良域からの変形の影響を吸収すると、側方の拘束が弱まり、改良域からX=35cm地点まで地盤は移動しやすくなり、X=30cm地点での変位量は遮断層を設置しない無対策の場合よりもむしろ大きくなると考えられる。したがって、X=40cm地点での変位が抑えられていれば周辺地盤への変形の影響が抑制されていると判断できる。

図-10より、遮断層を設置したCASE B-2の水平変位が、無対策のCASE B-1に比べて改良区域外へ大きくなっている。これは繰り返しによって軟らかくなった遮断層を設置したことによって、改良域の地盤が周辺地盤側へ移動しやすくなったことが原因と考えられる。無対策のCASE B-1では地盤の上層部で大きく外側への移動が見られる。盛土荷重による外側への変位は真空圧密の効果で改良域内側へ引き込まれるが、表層部はシール層としており未改良層になっているため真空圧密の効果を得られない。したがって、表層部では変位の相殺ができていないと考えられる。

図-10より、側方変位制御をしたCASE B-3では、変位が

大きいところでも±5mm程度に抑えられており、特に表層ではCASE B-1(無対策)に比べて変形が抑制されている。CASE B-3の側方変位制御におけるX=30cm地点での地盤の水平変位量の改良開始から10時間までの経時変化を図-12に示す。図中の黒矢印は盛土圧を増加させたタイミングを表している。なお、計測間隔の関係で、一度目の増加のタイミングを確認した変位の値がプロットできていない。併せて、このときの荷重圧力の制御のようすを図-13に示す。図-12より、盛土圧に先行して真空圧密を行ったことによってX=30cm地点の地盤が改良域内側へ変位していき、矢印で示す盛土圧の増加によって改良域外側へ変位している。このように、加水繰り返しにより軟らかい遮断層を設け水平変位が発生しやすい状況になっても、側方変位を観察して盛土を制御することで荷重速度制御を行うことで側方変位の発生を抑制できるといえる。

3.2 周辺地盤の鉛直変位(連れ込み沈下)

(1) 実験Aにおける周辺地盤の鉛直変位

図-14に実験Aの改良後の鉛直変位量を点で示す。図に示したのは、盛土模型の沈下量とX=30, 40, 50cm地点の鉛直変位量である。盛土沈下量はX=7.5cm地点での盛土模型天端の沈下量を測定した。図に示す線は各測定点での変形量を結んだものを基本としているが、改良域においては盛土模型の沈下が水平であると仮定し、X=7.5cm地点での沈下量を盛土全体の沈下量として示した。

盛土荷重のみでの改良のCASE A-1では、他の真空圧密によるケースに比べてX=30, 50cm地点での変位が少なく、X=40cm地点では大きく盛り上がり見られる。この結果から、盛土荷重によって周辺の地盤が盛り上がりしてしまうことがわかる。また、真空圧密と盛土荷重を併用したケースでは、真空圧密の影響で周辺地盤に沈下が見られる。その中でも、矢板壁を設置していないCASE A-2とCASE A-4の変形形状が酷似していることがわかる。CASE A-3では、矢板壁の効果によって多少鉛直変位が抑えられているといえるが、少なからず周辺地盤が沈下しており、連れ込み沈下を防ぐことはできていない。ここで、矢板壁で改良域と周辺地盤の縁切りができていないのは、矢板壁とそれに接する粘性土地盤の間に働く摩擦が大きかったのではないかと考えてい

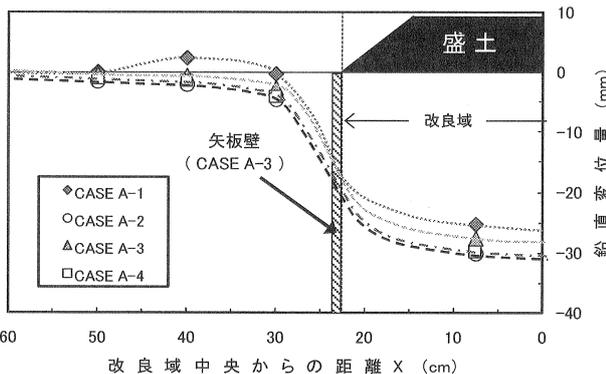


図-14 鉛直変位 [実験 A]

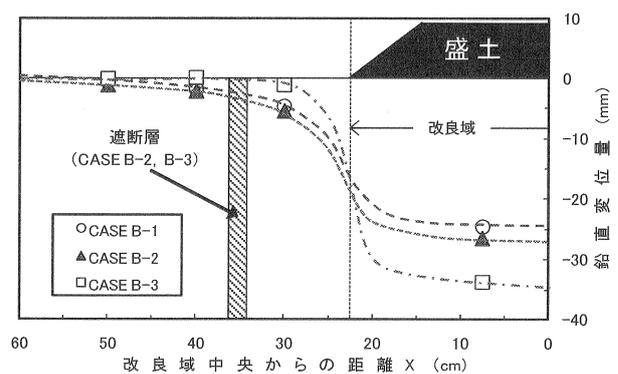


図-15 鉛直変位 [実験 B]

る。また、層厚が20cmに対して矢板壁の深さは15cmであり、水の動きを完全には遮断できておらず、連れ込み沈下を起こしてしまったのかもしれない。

(2) 実験 B における周辺地盤の鉛直変位

実験A同様、図-15に実験Bの改良域地盤および周辺地盤鉛直変位を示す。無対策のCASE B-1は真空圧密の働きによって周辺地盤の連れ込み沈下が見られる。CASE B-2では、周辺地盤との縁切りの目的で設置した遮断層があるにもかかわらず、変形形状はCASE B-1のときとほぼ一致している。したがって、CASE B-2での遮断層は鉛直変位軽減効果がなかったといえる。この原因として、CASE B-2では加水を行わず人力による繰り返しだけであったため、強度の低下が不十分であったと推定される。また、CASE B-2では、改良開始直後に盛土圧を載荷したが、これにより改良地盤が改良域外側に変位したため、遮断層が圧迫されて強度が早期に回復してしまい、縁切りの効果が解消してしまったことが推測される。

一方、加水して電動ドリルで十分に繰り返し、遮断層の強度を回復させないように「側方変位制御」も行った「CASE B-3」では、周辺地盤の連れ込み沈下が大幅に軽減されている。これから、繰り返し型の「遮断層」と盛土圧のコントロールによって水平変位量の管理をする「側方変位制御」が周辺地盤の鉛直変位量の軽減に効果があることがわかる。

なお、遮断層よりも盛土側のX=30cm地点において沈下が少ないが、これは連れ込み沈下と盛土による地盤の盛り上がりがほぼ相殺したためと考えられる。

(3) CASE B-3の遮断層の強度について

表-3 遮断層の含水比と強度 [CASE B-3]

計測条件	含水比 w [%]	非排水せん断強度 c_u [kPa]
設置前 (予備圧密後)	92.3	—
設置後 (改良前)	117.7	1.0
改良後	99.3	5.4
改良後の周辺地盤 ※	92.3	10.2

※ 30, 40, 60, 100cm地点の平均値

遮断層設置前と、設置直後、改良後の遮断層の含水比とせん断強度を表-3に示す。遮断層の含水比は、設置前は予備圧密によってw=92.3%まで低下したが、液性限界($w_L=113.2%$)程度まで加水して繰り返した結果、改良後も比較的高い含水比(w=99.3%)を維持できた。また、ベーンせん断試験によって測定した非排水せん断強度 c_u は、完全に繰り返した状態($c_u=1.0kPa$)からは強度の回復($c_u=5.4kPa$)がみられるものの、改良後も周辺地盤

($c_u=10.2kPa$)に比べて十分に小さく、地盤のせん断力による変形の伝達を遮断する効果は得られていると考えられる。

4. まとめ

真空圧密による地盤改良において、周辺地盤の変形挙動に着目した室内模型実験を行い、以下のようなことがわかった。

- 1) 対策工を必要としない場合、盛土載荷と真空圧密を併用した場合、盛土載荷のみの場合に比べて急速な盛土載荷が行えることから、改良時間を大幅に短縮することができる。
- 2) 盛土載荷と真空圧密を併用することによって、改良域近傍の隆起挙動は抑制できるが、改良区域の外側近傍に大きな連れ込み沈下が発生する。また、盛土載荷による側方へのはらみ出しが抑制され、真空圧密による改良域内側に引き込む効果がある。
- 3) 真空圧密を先行的に開始し、改良側への水平変位の発生を観察して、段階的に盛土を載荷することにより、遮断用の矢板壁を用いた場合と同等の周辺地盤の水平変位抑制効果を得ることができた。
- 4) 加水と繰り返しによって強度を低下させた遮断層を改良区域との境界部分に設置し、3)で述べた側方変位制御を併用することにより、周辺地盤の水平変位とともに連れ込みによる鉛直変位を抑えることが可能である。

参考文献

- 1) 小林正樹・土田 孝: 錦海湾における真空圧密工法の現地実験, 港湾技研資料 No.476, pp.3-4, 1984.
- 2) 新舎 博・米谷宏史・長津辰男: 真空圧密工法の変化・変遷について, 地盤工学会 土と基礎 vol.54, No.7, pp.16-19, 2006
- 3) 水野健太, 土田 孝, 新舎博: 真空圧密工法で改良された浚渫埋立地盤の変形とその解析, 地盤と建設, Vol.25, No.1, pp.75-84, 2007.
- 4) 水野健太, 土田孝, 新舎博: 真空圧密工法で改良された浚渫粘土埋立地盤の変形挙動とその解析, 地盤工学ジャーナルVol.3, No.1, pp.95-108, 2008.
- 5) 杉山直也・土田 孝・水野健太・大釜達夫: 盛土載荷と真空圧密を併用したときの改良地盤の挙動に関する実験, 第42回地盤工学研究発表会, pp.923-924, 2007.

(2008年8月日22受付)