凍結融解現象を利用した圧密促進工法に関する実験

○伊藤譲[1]・片野田栄一[1]・嘉門雅史[2]・野村忠明[3]・伊豆田久雄[4]
[1]摂南大学・[2]京都大学防災研究所・[3]錦城護謨(株)・[4](株)精研

1.　はじめに

日本には軟弱地盤が広く分布し，狭い国土を有効利用するためにはこれらの地盤を何らかの手段で改良する必要がある。現在軟弱地盤の改良工法として鉛直ドレーン工法が一般的に用いられている。その中でもサンドドレーン工法（SD 工法）やプラスチックボードドレーン工法（PBD 工法）は代表的なものとして挙げられる。SD 工法は最近の環境問題から透水性の良い砂の入手が困難であることが問題とされている。そこで，近年では砂の替わりに帯状のプラスチックボードを排水材に利用する PBD 工法が利用される例が増加している。しかし，これら鉛直ドレーン工法はそれ自体では強度増加が期待できないためプレロード工法等を併用する必要がある。

本研究は PBD 工法におけるプレロード効果として土が凍結した時に発生する凍上現象に着目したものである。例えば，Chamberlain（1978）は図-1 に見られるように凍結融解した土の間隙比が減少するという報告を行っている。凍上性の土が凍結する時に，凍結面の背後でアイスレンズが成長する。アイスレンズへの補給水はその隣接する未凍土からであるが，透水係数の低い場合には連続的な補給が追いつかず，未凍土部分は脱水圧密される。そこで鉛直ドレーン工法に凍結融解現象を組み合わせた新圧密促進工法が考えられた。

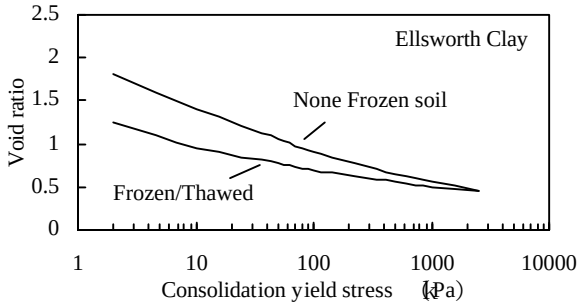
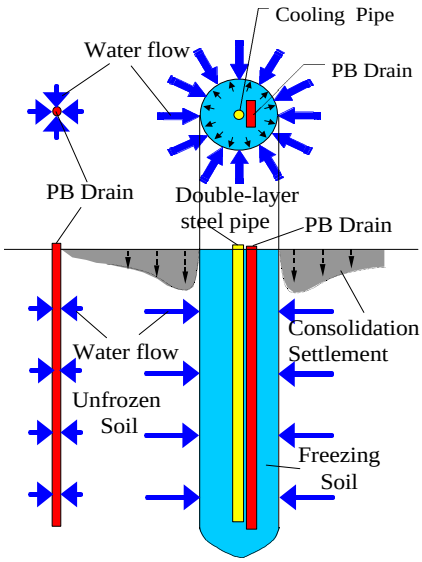


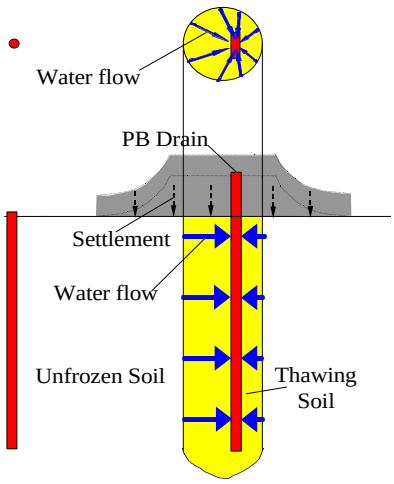
図-1　凍結融解土の性質[3)]

2.　新圧密促進工法

新圧密促進工法では例えば PBD 材 2 本に 1 本の割合で隣接させて凍結管を打設し，工事の前半では凍結管の周囲の地盤を限定した範囲で凍結させる（図-2（a））。この時シルト分以下の細粒分を含む土が凍結作用を受けると，凍結面でアイスレンズが成長する。そして，凍土前面の未凍土部分の水分は連続的に凍土内へ移動するが，水分の補給が追いつかず，未凍土部分では脱水圧密が生じる。それと同時に，凍土部分ではアイスレンズの成長による含水比の増加が生じる。工事の後半ではこの凍結管に温水を循環させ，凍土の解凍を行うとともに凍結管の回収を行う（図-2（b））。そして，アイスレンズの融解による水分は残された PBD により鉛直方向に排水される。



（a）凍土への水分移動



（b）凍土の融解による排水

図-2　新工法のイメージ

Experimental Study on a New Consolidation Method Using Freezing and Thawing Effect

Yuzuru Ito[1], Eiichi Katanoda[1], Masashi Kamon[2], Tadaaki Nomura[3], Hisao Izuta[4]
([1]Setsunan University, [2]Kyoto University, [3]Kinjo Rubber Co.Ltd., [4]Seiken Co.Ltd.,)

KEY WORDS：Frost heave, Freezing and thawing, Freezing soil, Consolidation, Vertical drain method

３．　研究目的

本研究では，まず，新圧密促進工法の効果について凍結時の冷却方法の違いについて検討を行った。そのため，様々な冷却条件で凍結融解させた供試体の含水比分布と圧密特性の変化を調べた。次に，新工法の効果を確認するため，モデル土槽実験を行った。

４．　一次元凍結融解実験

４．１　実験方法

試料土は藤の森粘土Ａで，自然乾燥させたものを 0.425㎜ふるいに通過させたものである。土質試験結果を表-1 に示す。その土質分類は CH（粘性土）であり，シルト分，粘土分を多く含む土である。 また，圧縮指数 Cc＝0.38，圧密係数 Cv＝84ｃ㎡/day，透水係数ｋ＝約 1×10^{-7}cm/s であり，一般の軟弱地盤と同じような性質である。この試料土を含水比 90%のスラリー状態から上載荷重 49.8ｋPa で予圧密し，φ100㎜×h80㎜に成形した供試体を用いた。

実験には図-3 に示す凍結融解実験装置を用いた。 装置の中央のセルに供試体を設置して，ウォームバス，コールドバスでそれぞれ設定温度に冷却した不凍液を上下部プレートに流すことによって，供試体を凍結融解させた。また，セルの側面には 1.5cm 間隔でφ0.7㎜の細孔があいており，熱電対を挿入し実験中の供試体の側面温度を測定した。吸排水された水分は全て電子天秤上のフラスコに集められその重量が測定される。

実験では上載荷重 49.8ｋPa で，初期温度 Tw より下部プレート温度 Tc のみを所定温度まで降下させ実験を行い，実験中の Tw，Tc，側面温度，変位，排水量を測定した。 融解は 24 時間行った。 凍結融解実験後，供試体の含水比分布を測定し，標準圧密試験用サンプルを図-4 のように凍土側と未凍土側より採取した。圧密試験では間隙比 e，圧密降伏応力 Pc，圧密係数 Cv，透水係数ｋ等を調べた。

４．２　実験条件

凍結融解実験は冷却方法，つまり冷却速度，冷却時間，冷却温度の影響による凍上量，圧密量，融解時の排水量，含水比分布の違いを検討するためにφ100㎜×h80㎜ の供試体を用いて行った。 実験条件は表-2 に示す。

シリーズ１では冷却速度の影響を調べた。そこで瞬間的に下部プレート温度 Tc を-5℃まで降下させ冷却するステップ式凍結（C1）から冷却速度を変化させ凍結させるランプ式凍結（C2～4）と比較した。C1 は下部プレートの冷却温度を瞬間的に降下させるステップ式凍結で 24 時間凍結を行った。

表-1　試料の物性値

ρ_s	g/cm^3	2.678
w_L	%	61.5
w_P	%	31.0
I_P	%	30.5
Clay	%	29.0
Silt	%	69.8
Sand	%	1.2
D_{max}	mm	0.425

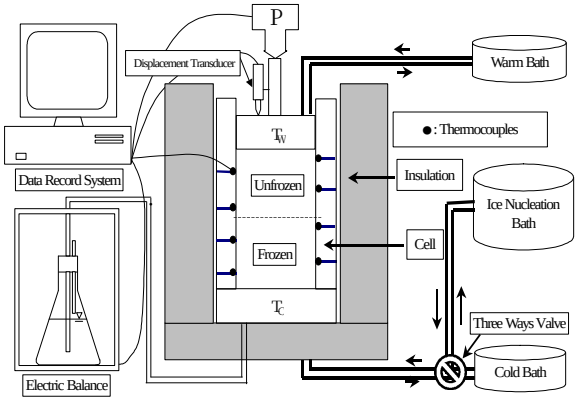


図-3　一次元凍結融解試験装置

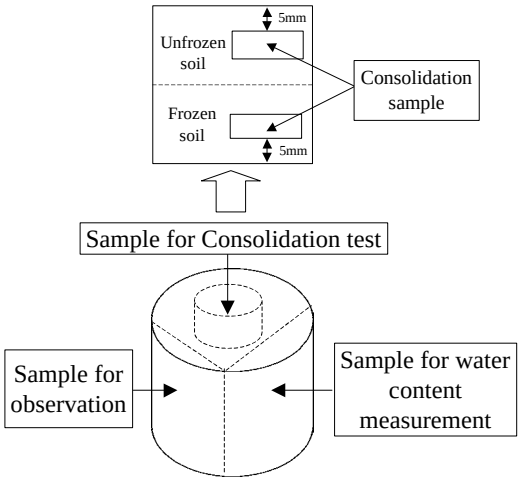


図-4　圧密試験用サンプル採取箇所

表-2　凍結融解実験条件

		Series1				Series2			
		C1	C2	C3	C4	C5	C7	C8	C11
Freezing method		Step	Ramp	Ramp	Ramp	Step	Step	Step	Step
Cooling rate	℃/hour	－	-0.1	-0.5	-0.3	－	－	－	－
Tw	℃	＋5	＋5	＋5	＋5	＋5	＋3	＋10	＋5
Tc	℃	－5	-0.2～-5	-0.2～-5	-0.2～-5	－5	－3	－10	－5
Freezing time	hour	24	72	34	40	72	120	36	36×2
Freezing index	℃・hour	120	240	145	160	360	360	360	360
Thawing time	hour	24	24	24	24	24	24	24	12×2

C2～4 は下部プレート温度を一定の割合で徐々に-5℃まで降下させる。その後，C1 と同じ温度境界条件で 24 時間保持するランプ式凍結を行った。C2 は下部プレート温度の降下速度を－0.1℃/h とした。C3 と C4 では降下速度を C2 の 3 倍，5 倍にした。

シリーズ 2 はステップ式凍結で行われ，冷却時間，冷却温度の影響を調べた。冷却時間による影響は C5，C1 により比較された。C5 は冷却温度を C1 と同じで，冷却時間は 72 時間とした。さらに，冷却温度による影響は C5～8 で比較された。これらの実験の条件は C5 と同じ積算寒度（＝Tc ×時間＝360℃・h）として，冷却温度を－10℃，－3℃に変化させたものである。C11 では C5 と比較して凍結融解の時間を半分にして 2 回繰り返し実施した。

４.３　実験結果

シリーズ 1 の結果を図-5～8 に示す。凍上量 h は，図-5 に示すとおり，冷却速度が大きいほど，その増加も早い傾向が見られた。最終凍上量についてはシリーズ 1 における凍上時間では凍上は継続中であり，特に冷却速度が－0.1℃/h（C2）では凍上量が小さく，実験終了時でも凍上が伸びている。これは C2 より速い冷却速度の実験と比べて，間隙水がゆっくりと冷却されることで過冷却状態になっているためとも考えられる。側面温度分布から計算した最終凍結面の位置（0℃高さ）は，図-6 に示すように最終的に 42～48㎜程度であった。

融解時の排水は排水量高さ h_w（＝排水量／供試体断面積）で定義した。h_w は図-7 に示すように冷却速度－0.1℃/h（C2）の時が一番大きく，続いて冷却速度－0.5℃/h，冷却速度－0.3℃/h となった。事前の予想では凍上量最大のステップ試験で h_w が最も大きく，凍上量最小の－0.1℃/h で最も小さいと予想されたが，結果は逆となった。この理由は，冷却速度が速い場合には，水分は凍土中で移動することなく，凍結するが，冷却速度が遅い場合は水分が移動しアイスレンズを形成して凍結するためと思われる。つまり，見かけの凍上量（凍結水量）が多くても水分移動することなく凍結した場合には，排水され難く，圧密促進されないということを意味する。図-8 に試験終了後の供試体の含水比分布を示す。凍土側については，冷却速度が比較的小さい実験では数多くのアイスレンズ形成の作用が強く働いたと見られ，その結果含水比が大幅に減少している。特に下部プレート面から 2～3㎝ 付近での含水比の低下は，この部分で数多くのアイスレンズが存在し，脱水圧密の作用が強いであろうことが予想させる。

このようにシリーズ 1 において，凍土側ではランプ式，未凍土側ではステップ式の冷却方法が脱水圧密効果が大きかった。

次に、凍結時間を長くしたり，冷却温度を低くすると凍上量が増加し，排水量（圧密量）も増加すると考えられた。そこで，シリーズ 2 では，まず Tw／Tc＝+5／－5℃の C1 のステップ試験を基準として凍結時間を長くした実験（C1 を基準）を行うことにした。さらに積算寒度一定で冷却温度と回数とを変化させた実験を行った。

シリーズ 2 の結果は図-9～12 に示す。凍上量 h は図-9 に見られるように，Tc＝－3℃（C7）では凍上量の

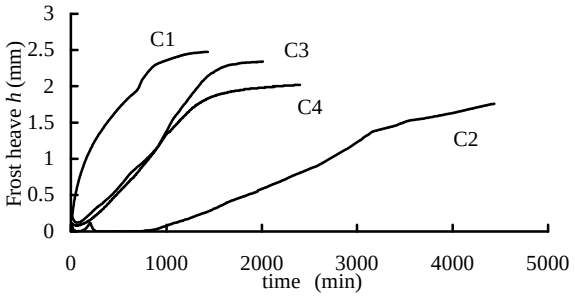


図-5　凍上量の比較（シリーズ 1）

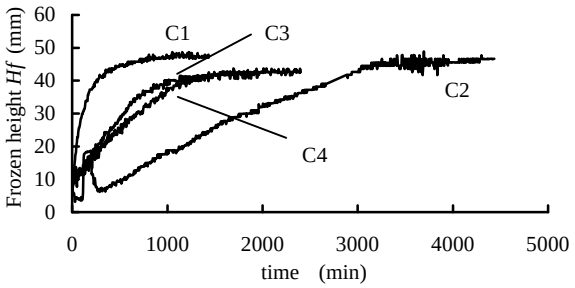


図-6　0℃高さの比較（シリーズ 1）

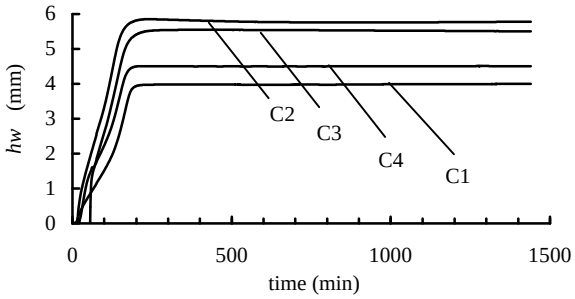


図-7　排水量高さの比較（シリーズ 1）

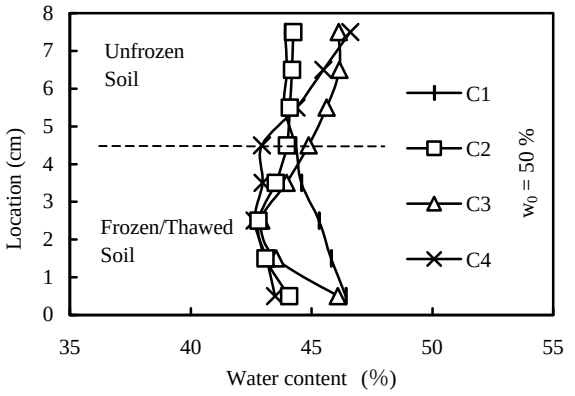


図-8　含水比の比較（シリーズ 1）

発現が遅く，またシリーズ１の C2 と同じように試験時間内には収束しなかった。また，繰り返し試験（C11）では１回目と２回目で同様の凍上量となった。全体的に最終凍上量は 2.6～2.9㎜の間であった。Tc＝－3℃の場合に凍上がゆっくり進行するのは冷却温度が他のケースに比べて高く，間隙水の凍結が遅れているためと思われる。また 0℃高さは図-10 に示すように，シリーズ１の C1 と同様であり，ほぼ 47～51㎜で落ち着いている。

排水量高さ h_w については，図-11 に示すように，シリーズ１と同様に凍上量との関係を見出すことはできない。しかし，シリーズ１の C1 とシリーズ２の C5 を比較すると，ステップ式においても凍結時間を長くすることによって融解時に多く排水されるようである。また，C5 と C11 を比較すると，凍結融解時間の合計が同じでも繰り返し凍結融解した方が排水量高さ h_w の合計が大きくなることがわかる。試験後の含水比分布を図-12 に示す。冷却面（排水方向）に近い凍土側では，排水面に近いにも係らず含水比の低下は比較的少ない。これに対して，凍土側でもアイスレンズのある付近，そして未凍土側にかけては大幅な含水比低下が生じている。この理由はステップ式試験では図-10 に示すように凍結面の進行が速く，凍土内でのアイスレンズの発生が少なかったためと思われる。しかし，逆に未凍土部分では長時間の脱水圧密作用を受けたためと考えられる。

シリーズ１とシリーズ２を比較する。凍上量 h（図-5,9）は凍結時間を一定にすれば冷却温度が低い方が大きく，冷却温度を一定にすれば凍結時間の長い方が大きい。また，C1，C5，C7，C8 と C11 の最終凍上量の値がほぼ一致していることは今回の冷却温度条件の範囲では最終的に凍結する水分量がほぼ等しいということである。図-13 は排水量高さ h_w に対して，凍結水量 H_{wf}＝凍上量／1.09 と比較した。この図より，凍結した水量の全てが排水されてはいないことが解かる。また，ランプ式（C2，C3，C4）が凍結水量に対して排水量が多い。なお，総排水量はステップ式においても冷却時間を長くすることで増加する。これらより，工事の初期の冷却方法は，ランプ式にし，その後一定温度のステップ式にするべきと考えられた。

図-14 にシリーズ１と２の含水比分布をまとめた。シリーズ１のまとめとして，ランプ式凍結ではステップ式と比較して凍土側の含水比の低下が激しいとされた（図-8 ）。ところがシリーズ 2 よりステップ式においても冷却温度が低く，長時間凍結させると凍土側の含水比が低下することが明らかになった（図-14 ）。全体的に未凍土側では凍土側より脱水効果が大きいようである。これは，凍土部分ではアイスレンズの融解水が十分に排水されなかったことも考えられる。

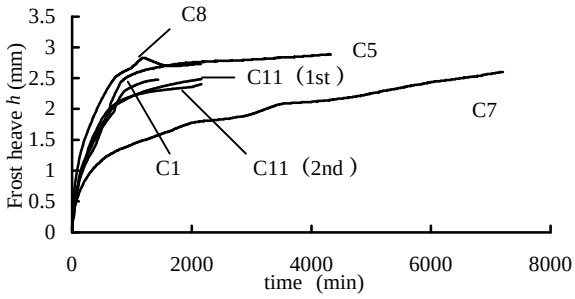


図-9　凍上量の比較（シリーズ 2）

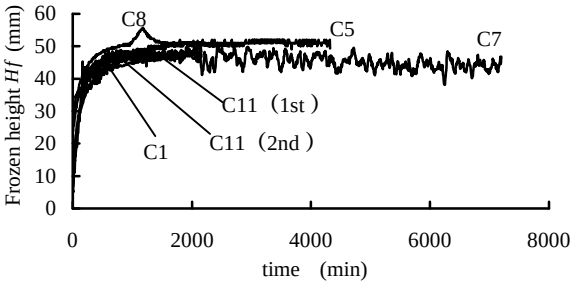


図-10　0℃高さの比較（シリーズ 2）

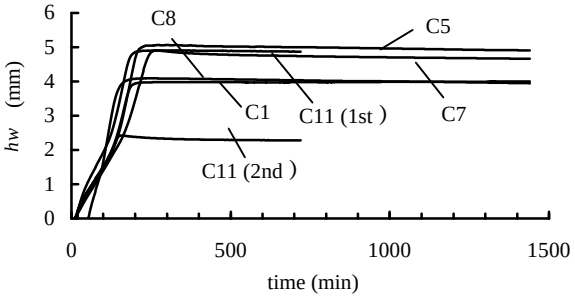


図-11　排水量高さの比較（シリーズ 2）

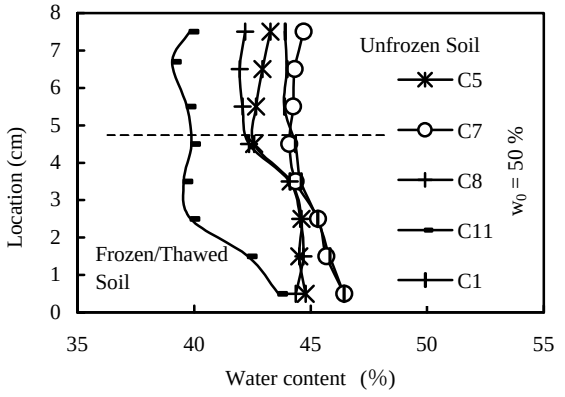


図-12　含水比の比較（シリーズ 2）

４.４　圧密試験結果

凍結融解過程後に凍土と未凍土の部分より標準圧密試料を採取して圧密試験を行った。その結果を図-15, 16 に示す。まず，図-15 より，凍結融解試験後の透水係数は一部を除いて，凍土と未凍土両方で，凍結融解を行わなかったものより 5～10 倍大きくなっていることが解かる。

次に，e－logP 曲線から三笠法により求めた圧密降伏応力を図-16 に示す。全体的に，圧密降伏応力の値はランプ試験では，凍土側の方が大きく，ステップ試験では，凍土側よりも未凍土側の方が大きいようである。ステップ試験において冷却温度と凍結時間の影響を比較すると，冷却温度が低い方が凍土，未凍土とも圧密降伏応力は増加した（C1，C5，C7 と C8）。凍結時間の圧密降伏応力への影響は余り見られない（C1 と C5）。また，「凍結なし」と比較すると，圧密降伏応力は 100～150ｋPa 程度の増加になっており，凍結融解による圧密促進効果が確認できる。これは上載盛土に換算すると 5～10m程度である。さらに繰り返し凍結融解（C11）することによりその効果はさらに増大し，200ｋPa までの増加となった。

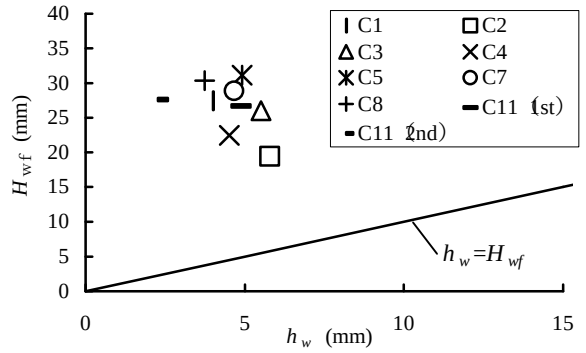


図-13　凍結水量と排水量高さの関係

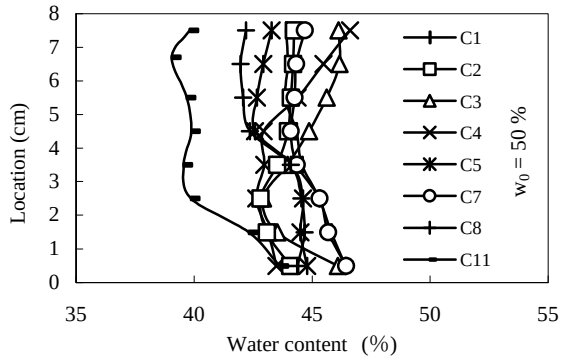
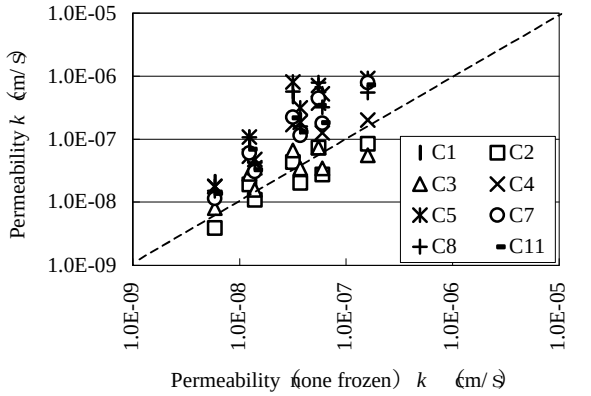
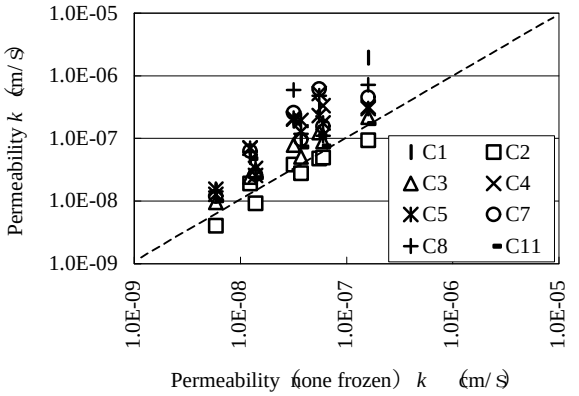


図-14　含水比の比較



（a）凍土



（b）未凍土

図-15　透水係数の変化

５．　土槽実験

一次元凍結融解実験により得られた結果を確認し，実施工の可能性を検討するため土槽実験を行った。ここでは，中心部よりの冷却温度－22～－24℃で凍結を行い，その後+40℃にて融解した実験（C3）について報告する。

５.１　実験方法

使用した試料は表-3 に示す藤の森粘土Ｂである。実験に用いた土槽実験装置は図-17 に示す内径 60㎝，高さ 90㎝ の大型土槽による凍結融解実験装置を用いた。実験条件は表-4 に示す。土槽実験では試料土を上載荷重 30kPa で予圧密し，圧密度 90%を確認後，中心部より凍結融解させた。実験では，土槽の中心の 2 重管式凍結パイプに所定温度のブラインを循環させ，中心から外側へ凍結させ，土圧，間隙水圧等を測定した。また供試体からの排水は中央 2 ヵ所，外側 4 ヵ所から許した。実験終了後は上部から試料を 4 断面（上部より約 5，26，47，68 ㎝）に分け，各断面における含水比を中心から外側に向かって測定した。

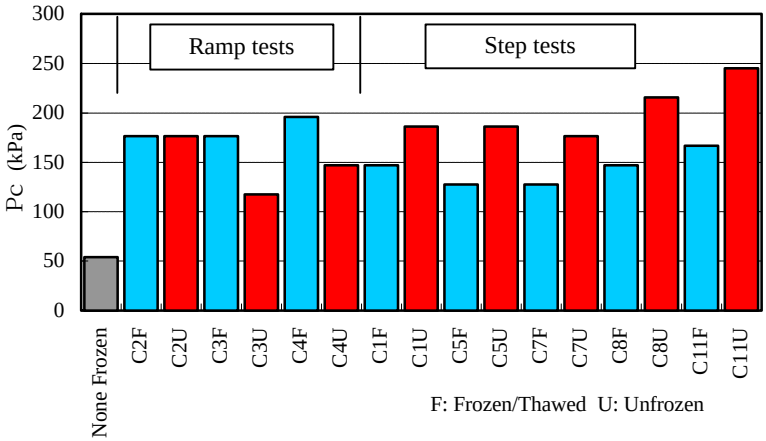


図-16　圧密降伏応力の変化

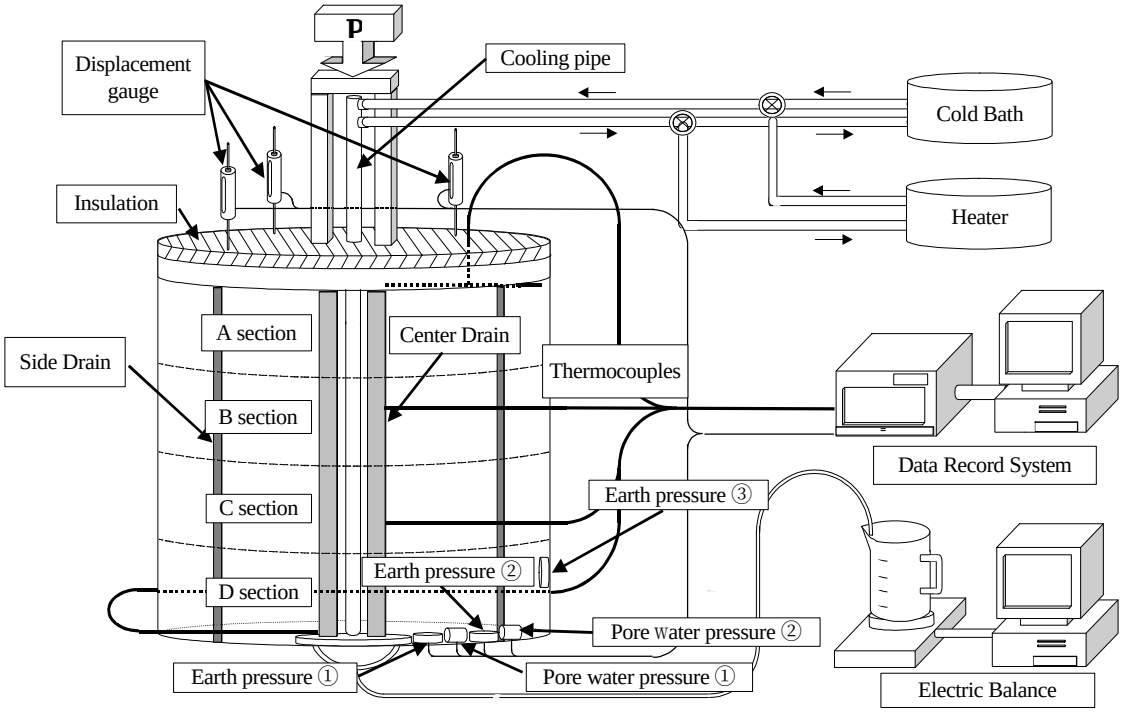


図-17　土槽実験装置

５．２　実験結果

実験結果を図-18～22 に示す。実験中の内部温度の変化を図-18 に示す。0°C位置は前章のステップ試験と同じように急速に進行し，最終的には中心部より約 14cm に達した。土圧の変化は図-19 に示すように，凍土側と側面の土圧が一定に増加しているに対して，未凍土側の土圧の変化はあまり見られない。図-20 に示す間隙水圧の変化は土圧ほどの増加は見られず，凍土，未凍土側での差も見られない。これは凍土域にある土圧計①は凍結の影響を受けたが，土圧計②は未凍土域にあるため，凍結による圧力を受けなかったためと考えられる。側面土圧の増加については，土槽の中心から外側に向かって凍結させているため凍土の成長が水平方向に進み，それに伴い水平方向の土圧も増加したと考えられる。融解時に土圧計②が凍結前に戻ったのに対して土圧計①（凍結側）と③（側面）は負の値を示している。これは凍土側で凍結時に成長したアイスレンズが融解して供試体全体が収縮したため部分的に負圧が生じたものと思われる。

表-3　試料の物性値

ρ_s	(g/cm^3)	2.754
w_L	(%)	51.5
w_P	(%)	28.8
Clay	(%)	28.0
Silt	(%)	71.0
Sand	(%)	1.0
D_{max}	(mm)	0.85

表-4　土槽実験条件

Initial water content	(%)	55.1
Freezing temperature	(℃)	-22～-24.5
Freezing time	(h)	287
Thawing temperature	(℃)	+40
Thawing time	(h)	68

土槽実験後の含水比分布を図-21 示す。凍結面（中心より約 14 ㎝）を境界として外側の未凍土部分において含水比の大幅な低下が見られる。これらは，凍結によって未凍土側が脱水圧密されたためと考えられる。

土槽実験後の圧密試験による圧密降伏応力を図-22 に示す。未凍土側では 180kPa 以上の圧密降伏応力の増加が見られた。なお，凍土側については融解水が抜けきらず泥濘化が起こっていたため圧密試料の採取が不可能であった。このことは実施工上でも起こり得るか，あるいは，実験では凍結時に載荷板により凍土の上部への膨張が妨げられたためであるのかは不明である。

次に，実験後の一軸圧縮強度を調べたところ平均 88kN/m^2 の値を得た。今回実験に使用した藤の森粘土 B は強度増加率 cu/p が塑性指数によると 0.2～0.25 と予想されたため，ほぼ妥当な値と考えられる。

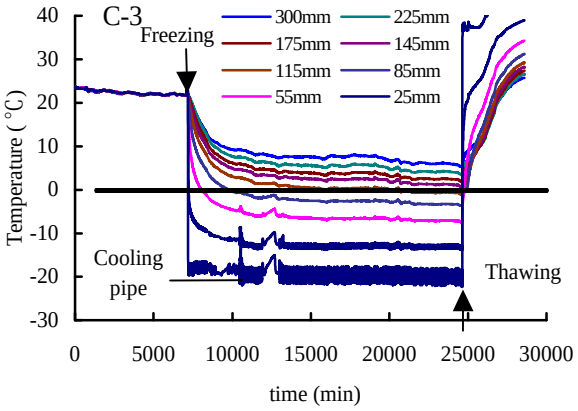


図-18　温度の変化

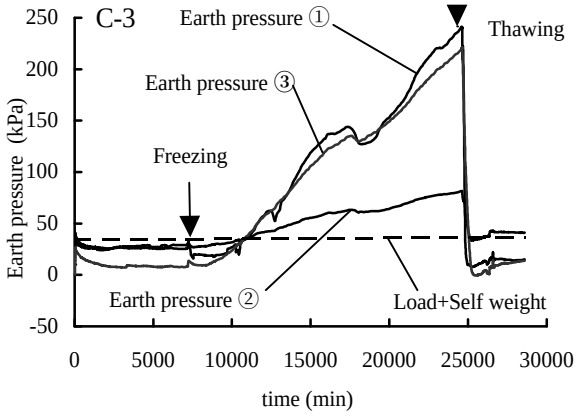


図-19　土圧の変化

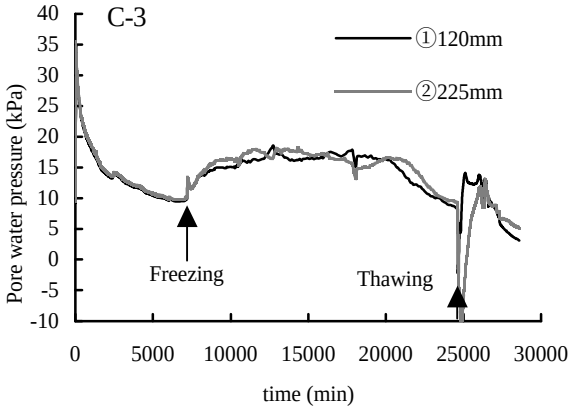


図-20　間隙水圧の変化

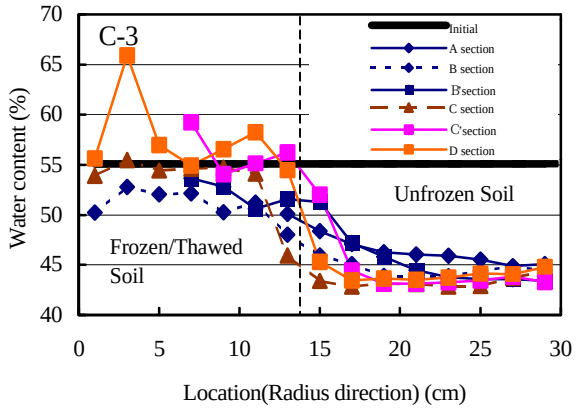


図-21　試験後の含水比

6.　まとめ

凍結融解現象を利用した新圧密促進工法の効果を一次元凍結融解試験と土槽実験により検討を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

1）凍土側は初期の冷却速度が遅い方（ランプ式）が，数多くのアイスレンズが発生するため，含水比の低下も大きく，圧密降伏応力の値も比較的大きくなる。

2）未凍土側はステップ式凍結が含水比の低下はより大きく，圧密降伏応力の値も大きくなる。

3）全体的に冷却温度は低く，凍結時間は長く，また繰り返し凍結融解させるほど脱水圧密効果がある。

4）今回の実験では圧密促進効果は圧密降伏応力で評価すると 100～200kPa であった。

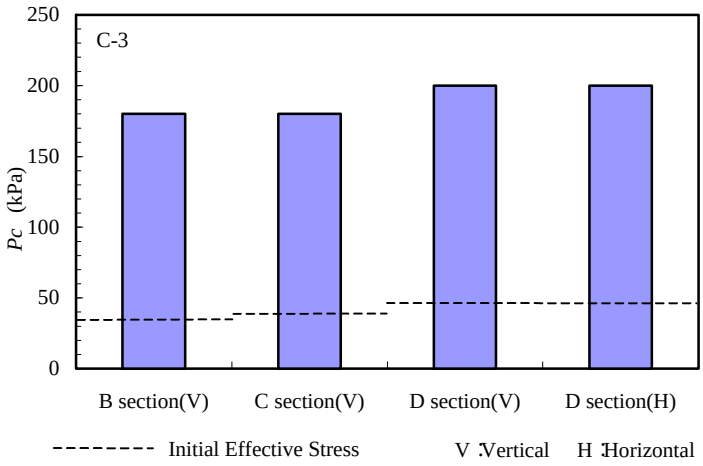


図-22　圧密降伏応力の変化（未凍土部分）

5）土槽実験では，全体の体積の約 8 割を占める未凍土部分では一次元凍結融解試験からも予想されたように，脱水圧密効果が確認された。

6）今後の課題として，①一次元凍結融解試験により，様々な土質について効果を確認すること，②土槽実験装置の問題点を克服し，実験データの充実をはかること，などを予定している。

参考文献

1）片野田　栄一・伊藤　譲・嘉門　雅史・野村　忠明（2000）：凍結融解現象を利用した新圧密促進工法，第 4 回地盤改良シンポジウム発表論文集，pp.175～182.

2）広瀬　剛・伊藤　譲・片野田　栄一（2000）：凍結融解土の圧密特性の変化について，土木学会第 55 回年次学術講演会，Ⅲ－B356.

3）Chamberlain, E.J.and.A. J. Gow（1978）：Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, Engineering Geology, Vol.13, pp.73～92.

4）Ito, Y., Kamon, M., Nomura, T., Izuta, H. and Katanoda, E.（2001）：A New Consolidation Method Using Freezing and Thawing Effect, International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement