

多数アンカー式補強土壁の背面凍結と凍結土圧

鈴木輝之¹・宇野裕教²・澤田正剛³・安達謙二⁴

¹フェロー 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165)

²学生会員 工修 北見工業大学大学院 システム工学専攻

³北見工業大学講師 土木開発工学科

⁴岡三興業(株) (〒105-0013 東京都港区浜松町2丁目4-25)

各種の補強材を用いた新しい土構造物が多く開発され実用に供されているが、寒冷地における凍上対策を考慮した構造物はほとんど無く対策工法の検討が急がれている。本研究では多数アンカー式補強土壁を試験設置し、冬期間の背面盛土の凍結状況や壁面ブロックに加わる凍結土圧などの動態観測を4シーズンにわたって行った。実験の結果凍結面形成や凍結土圧などの特性について、いくつかの有用な知見が得られた。

Key Words : field test, frost heaving pressure, countermeasure against frost action, multi anchored retaining wall

1. まえがき

北海道のような寒冷地では地盤凍結・凍上による土木構造物の被害が多く発生する。最近の社会基盤整備の進歩は各種構造物の高度化と複雑化をもたらしているが、これに対応する凍上の研究と実務的な対策技術の進歩は十分な状況ではない。とくに各種の補強材などを用いた擁壁や斜面保護などの工法が多く開発され普及しているが、これら新工法での凍結・凍上対策はほとんど考慮されていないのが現状のようである。このような状況を反映して、近年基準どおりに設計された構造物が予期していなかった凍上被害を受けるケースが目立ち始めており、合理的な凍上対策の確立と普及は急務の課題である。

構造物に凍上被害をもたらす地盤凍上の発生機構は明確であるが、実際の構造物で凍上対策を行うとなると構造物の特性に応じた手法が必要であり単純ではない。実験・実測を通して冬期間の地盤凍結状況やそれによってもたらされる凍結土圧や変位の特性を正しくとらえることが先ず必要である。

木下ら¹⁾は、変位がゼロとなるように固定した物体に加わる力を凍上力と定義し、地表面に置かれた直径12cmの円盤に加わる凍上力が50kN程度にまで達し、さらにその大きさは円盤の直径に比例する

ことを示した。鈴木ら²⁾は地表面で固定された物体には、凍結面で発生した凍結膨張圧力が凍土層を介して集中するため非常に大きな凍上力が作用するが、その集中の範囲は物体の縁から50cm程度であることを示した。

室内実験で土の凍上圧（凍結面付近で発生する凍結膨張圧に近い）を測定する研究もいくつかある。木下³⁾は砂から粘土の広い範囲で凍上圧を測定して84～530kPaであったことを報告している。同様な実験はKujala⁴⁾によても行われ、4.2～1228kPaの広い範囲の値が示されている。両者に共通の結果として、砂では明らかに凍上圧が小さくなるがシルト及び粘土では粒度と凍上圧の間には明確な関連は認められないようである。

以上のように、凍上変位を完全に拘束したときの凍上力は非常に大きな値になる可能性を持つが、擁壁などの実構造物では、それ自体の変位や未凍土側への圧縮などによって凍結土圧は緩和されるはずである。

本研究は寒冷地に設置される多数アンカー式補強土壁の凍上対策手法を明らかにすることを目的としている。この工法は近年開発された補強土垂直壁工法の一種である⁵⁾。北見工業大学構内に幅12m、高さ3mの多数アンカー式補強土壁を試験設置し、

・番号：ロッド張力測定位置（計 26 カ所）
単位：mm

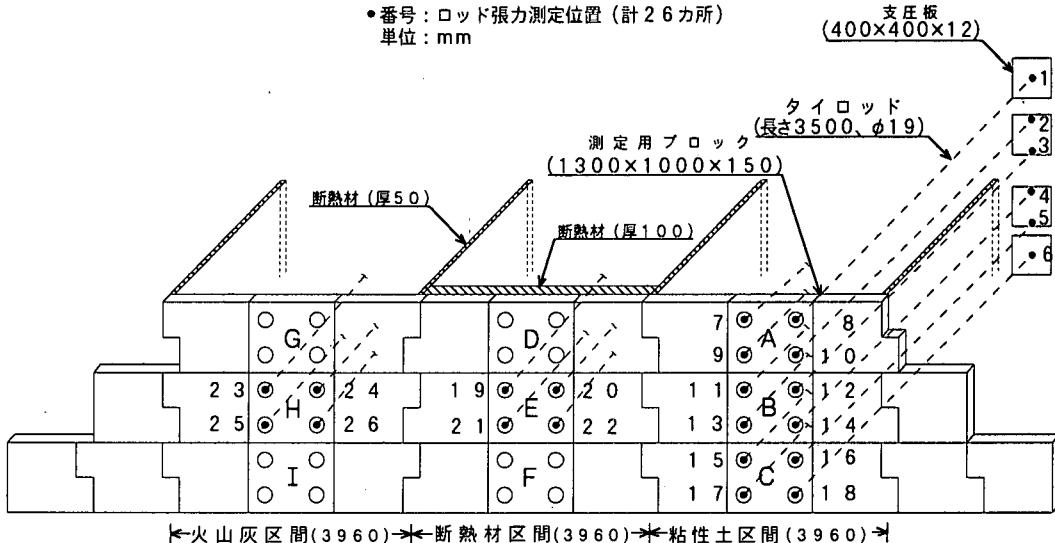


図-1 試験壁の概要

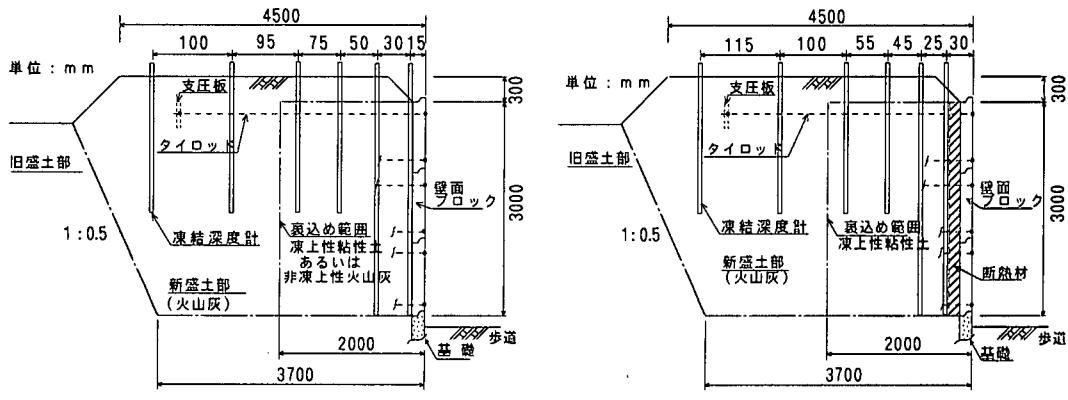


図-2 試験壁の断面

背面盛土の凍結状況、壁部材に発生する力や変形などの動態観測を4年間にわたって行った。本研究の概要と1シーズン目の結果の一部は既に報告している⁶⁾。本報告では、裏込め土の凍結状況と壁面ブロックに加わる凍結土圧を中心に4シーズンにわたる計測結果を示す。

本実験の結果以下のことが分かった。

1) 壁体表面から進行し、背面盛土中に形成される凍結面の形状が実測された。また、これらの凍結面に垂直方向に凍結膨張圧が発生し、壁面ブロックへの凍結土圧力をもたらすという考え方で実測凍結土圧の特性が説明された。

2) 壁面ブロックに加わる土圧は、凍結期には最大値40～50kPaまで増加するが、融解期には5～10kPaに戻る変化が繰り返された。

3) 非凍上性の裏込め土を用いたり、断熱材を用いた凍結土圧軽減工法の効果は顕著である。

2. 実験内容

試験壁の概要を図-1に、壁体断面を図-2に示す。試験壁は次の3つの区間に分けて、各々で背面処理の条件を変化させた。裏込めの施工は20cmの

表-1 試験壁に用いた土の性質

	粘性土	火山灰	旧盛土
土粒子の密度 (g/cm^3)	2.61	2.49	2.53
粒度試験	砂分 (%) シルト分 (%) 粘土分 (%)	58 25 17	75 22 3
締固め試験	$\omega_{\text{opt}} (\%)$ $\rho_{\text{dmax}} (\text{t}/\text{m}^3)$	28.0 1.40	29.3 1.21
凍上試験 [※]	凍上率 (%) 凍結様式	63.6 霜降状	4.6 コンクリート状
施工時含水比 (%)	41.5	18.5	26.0

*道道路土工排水工指針による

まき出し厚さで、小型のプレートコンパクターとランマーによって締固めた。施工時の含水比を表-1に示している。

1) 粘性土区間(図-2(a))

凍上性の粘性土で裏込めした区間で、これを凍上対策をしていない区間と見なしている。

2) 断熱材区間(図-2(b))

壁面ブロックの裏側に厚さ100mmの押出し発泡スチロールの断熱材を設置して壁面からの凍結侵入(熱流出)を防いでいる。これを断熱工法による凍上対策区間と見なしている。

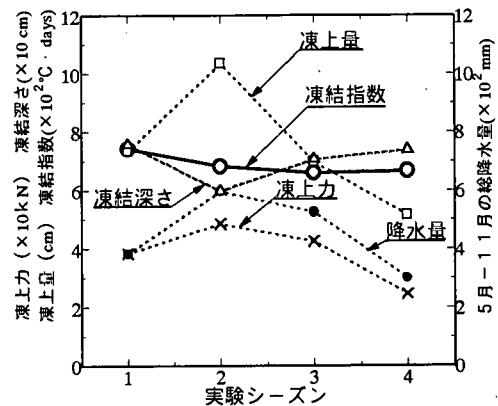
3) 火山灰区間(図-2(a))

非凍上性の火山灰で裏込めした区間で、これを置換工法による凍上対策区間と見なしている。

各区間にともに、3~4シーズン目では、背面土表面から30cmの深さに、厚さ50mmの透水性断熱材(詳細は図-6~7)を埋設した。

計測対象としたA~Iの9個の壁面ブロック(図-1)では、隣接するブロックとの連接は行わずに、4本のタイロッドによって独立に水平方向に支持されている。タイロッドの直径は19mm、SS4000の丸鋼で、保障引張り強さは113kNである。特別に製作した引張り荷重計(ストレインゲージ型)を用いて、番号の付いた●印で示す26カ所でタイロッド張力を測定した。荷重計のうちNo.1~6の6個は支圧板との接続部に、No.7~26の19個は壁面ブロックとの接続部に配置した。

背面盛土中の凍結面形状は、各区間に測定対象とした壁面ブロックの後方に配置された6本のメチレンブルー凍結深度計によって求めた(図-2)。温度計測は壁面ブロックの表面、裏面及び背面盛土中など計30点で、銅-コンスタンタン熱電対をセンサーとして行った。これらの温度はタイロッド張力とともに2時間間隔で自動計測した。この他に壁面ブロックの変位や背面盛土表面の凍上量などの壁体の変形を、1週間に2回の測量によって測定した。以上は本実験で行った総ての計測内容であるが、本報告中では、凍結深度計によって測定された背面土

図-3 実験期間の地盤凍上観測結果²⁾

中の凍結面形状と、壁面ブロックへの凍結土圧(タイロッド張力)に絞って検討している。

試験壁で用いた土の性質を表-1にまとめた。我が国には擁壁などの土構造物を対象とする土の凍上試験法の規定が現在のところ無いので、道路土工排水工指針⁷⁾で用いられている凍上試験によって使用土の凍上性を判定した。その結果、火山灰は非凍上性で、粘性土は明らかに凍上性と判定された。実験場所の地下水位は実測していないが付近の地盤調査結果から10m程度と推定され、さらに浸透水などによる水分供給も認められない。この水分条件からして、本試験壁は大きな凍上の発生する条件にはないと考えられた。この水分供給条件を変化させるために、4シーズン目には、壁面ブロックから1.5m後方の背面土中に、長さ2mの有孔塩ビ管を垂直に埋設し、未凍土部分に対して注水を行った。注水量は1週間に1回(各区間30リットル程度)とし、12月中旬から2月にかけて行った。

3. 実験期間の地盤凍結・凍上

計測は平成3年11月~平成7年4月の4度の冬シーズンを通して行った。図-3に実験場所での凍結指数を示す。また同図中には実験期間中の地盤凍上特性を示すために、実験場所から100m程離れた凍上観測フィールド²⁾で行った凍上量、凍結深さ、凍上力、及び降水量の測定結果も点線で併記している。この観測フィールドは、地表面から2mの深さ

までを表-1の粘性土と類似の土で置き換えた平坦地であり、ここでの気温（凍結指數）は本実験場所での値と同じである。

北見地方は北海道の中でも寒い地域に属するが、実験シーズンの凍結指數は700°C·days前後で、最近の暖冬傾向を反映している。ちなみに、北見市における近年の寒さの記録としては85~86年にかけての1119°C·daysがある。

凍結深さは各シーズンで70cm程度と大差ないが、2シーズン目で少し小さくなっているのは大きな凍上量に対応した潜熱発生の影響が現れたと考えられる。一方、凍上量はシーズンによる違いが大きく現れている。図-3の凍上量は同一地盤での測定結果であり、さらに各シーズンの凍結指數の違いも小さい。すなわち、4シーズンを通して土質条件と温度条件はほとんど変わらないことになる。しかし、水分供給条件は、地下水位だけでなく凍結期直前の地盤土の自然含水比によっても支配される。本観測フィールドの凍結期直前の自然含水比の計測は行っていないが、それを支配すると考えられる非凍結期（5月～11月）の総降水量を図-3に示している。この図によれば、凍結期（12月～3月）の凍上量が、非凍結期（5月～11月）の総降水量と良く対応していることが分かる。凍上発生は土質、温度、水分の3要素に支配されるが、自然地盤では水分供給条件の影響が卓越する場合が多い⁸⁾。次に、凍上力は凍上量と同じ傾向でシーズンによって大きく変化している。この凍上力は、反力フレームによって、地表面上に置かれた直径10cmの円盤の持ち上がりをゼロに押さえたときに、地盤の凍上発生とともにその円盤に加わる上向きの力を測定したものである¹¹⁾。したがってこの凍上力の大きさは凍上量と強い関係にある。

4. 結果及び考察

（1）背面盛土の凍結

凍結土圧は背面盛土中での凍結面形状に強く支配される。したがって壁面ブロックへの凍結土圧を解析するため、あるいは凍結土圧対策を取り入れた設計を行うためにも凍結面形状を把握することが先ず必要である。図-4～7にメチレンブルー凍結深度計の実測データから求めた凍結面の形状を示す。北見地方では3月中旬頃まで凍結面の進行が認められるが、実用的には3月1日で最大凍結深さを示すと

して大きな誤差は無い。

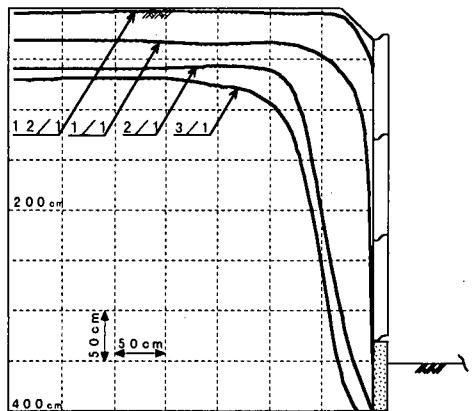
背面土中に形成される凍結面の形状は気温や壁体の表面形状の他に構成材料の熱物性値（熱伝導率、熱容量、発生潜熱）によっても強く影響される。各物性値とも、土の含水比や密度によって変化するので、一義的に表すことはできない。本実験壁で用いた土の熱物性値の測定は行っていないが、筆者の1人⁹⁾が過去に行った土の熱物性値の測定結果を参考に熱伝導率を推定すると、火山灰で0.65W·m⁻¹·K⁻¹程度、粘性土で0.85W·m⁻¹·K⁻¹程度であることが分かっている。また、コンクリートの熱伝導率は一般的に1.0W·m⁻¹·K⁻¹程度とされている。

凍結面は寒気に曝される面に平行に形成される。粘性土区間と火山灰区間では、壁面と常時除雪した背面盛土の表面が大気に開かれているので、その両面に平行に凍結面は形成される。しかし壁面側の凍結面は、壁面の上下両端に続く水平面の影響で、壁面と平行にならず少し傾く傾向が認められる。

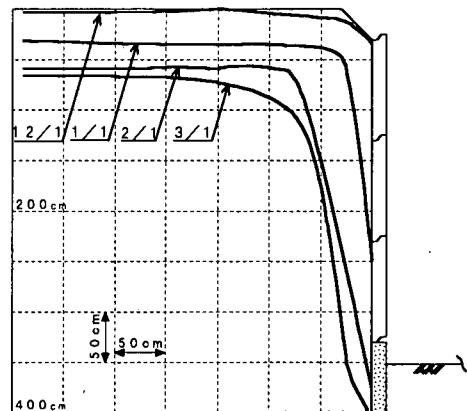
壁面ブロック背後に投入された厚さ100mmの押し出し発泡ポリスチレンの熱伝導率（カタログ値）は0.034W·m⁻¹·K⁻¹である。この断熱材は、過去の実測結果¹⁰⁾を参考にして、壁面からの凍結面浸入を確実に止めることができて、かつ一般的に市販されている厚さのものを選んだ。一方厚さ50mmの透水性断熱材の熱伝導率（カタログ値）は0.036W·m⁻¹·K⁻¹である。この断熱材の設置目的は、凍結深さを変化（減少）させることにあり、断熱材の厚さ5cmで埋設深さ30cmとしたときの効果は文献10)で確認されている。

断熱材の影響は非常に顕著で、壁面ブロック背後に投入された断熱材は、それに平行する凍結面の形成を止めていることが分かる（図-4～7（b））。3～4シーズン目では、厚さ50mmの透水性断熱材を設置した。この断熱材によって背面土表面からの凍結深さは20cm程小さくなっているが、凍結面は断熱材を通過して背面土中にまで達している（図-6～7）。凍結深さは背面土の熱物性によっても影響を受ける。図-4～7中で、火山灰区間の凍結面が粘性土区間よりも少し深くなっているのは土の熱物性の違いによると考えられる。

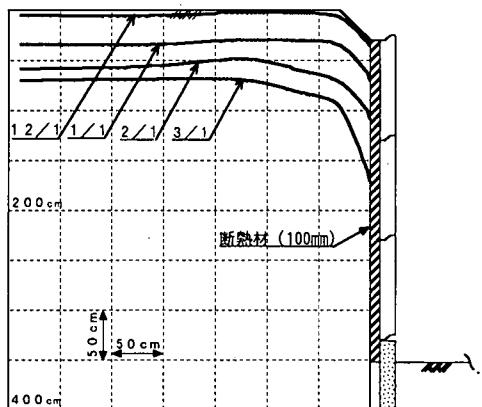
以上、壁体の表面形状及び壁体構成材料の熱物性を反映した、正しい凍結面が実測されたと考えられる。しかし以上の結果は1つのケーススタディであり結果の一般化が今後の課題である。



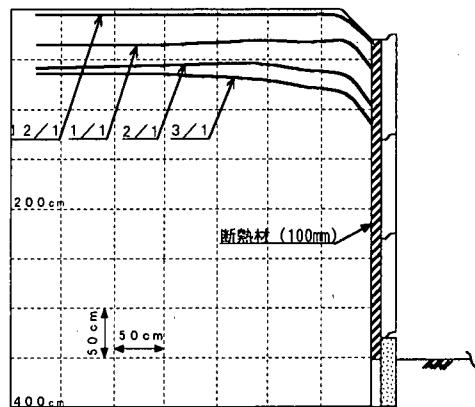
(a) 粘性土区間



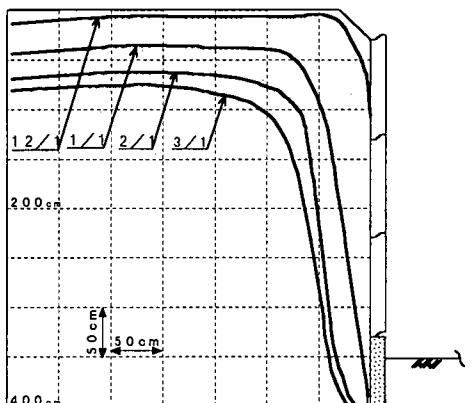
(a) 粘性土区間



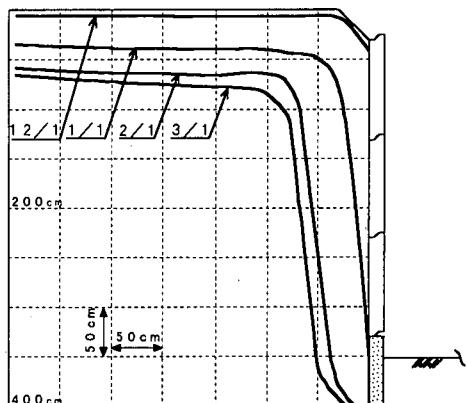
(b) 断熱材区間



(b) 断熱材区間



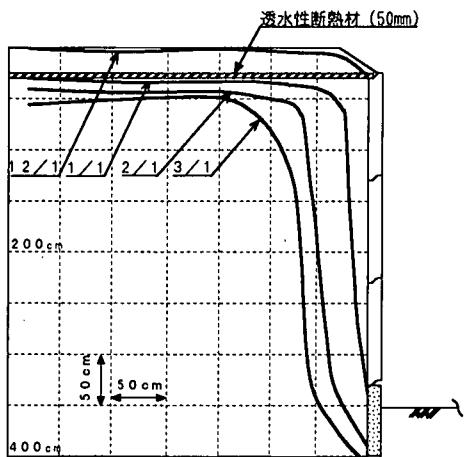
(c) 火山灰区間



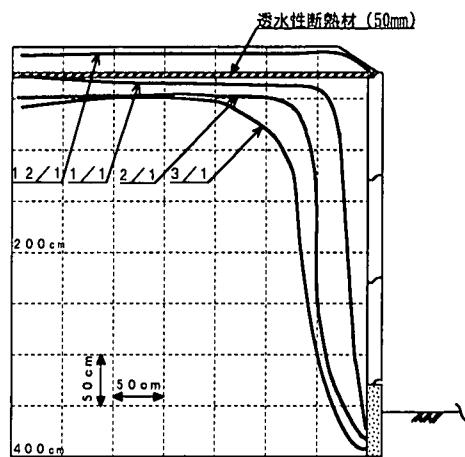
(c) 火山灰区間

図-4 1シーズン目の凍結面形状

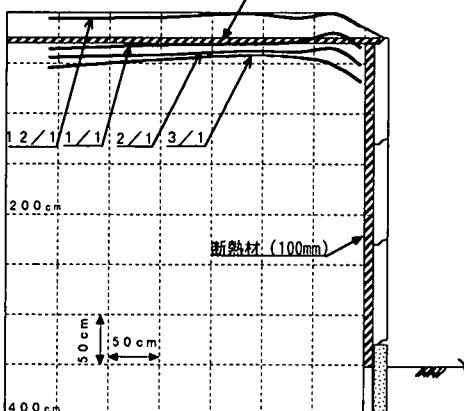
図-5 2シーズン目の凍結面形状



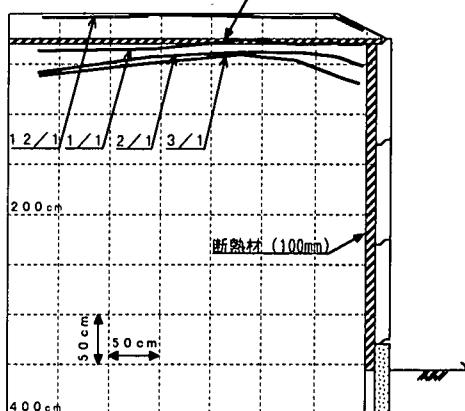
(a) 粘性土区間
透水性断熱材 (50mm)



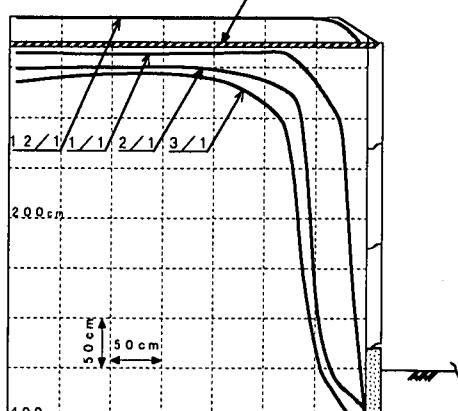
(a) 粘性土区間
透水性断熱材 (50mm)



(b) 断熱材区間
透水性断熱材 (50mm)

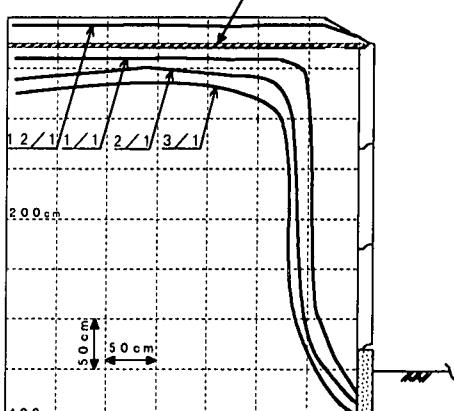


(b) 断熱材区間
透水性断熱材 (50mm)



(c) 火山灰区間

図-6 3シーズン目の凍結面形状



(c) 火山灰区間

図-7 4シーズン目の凍結面形状

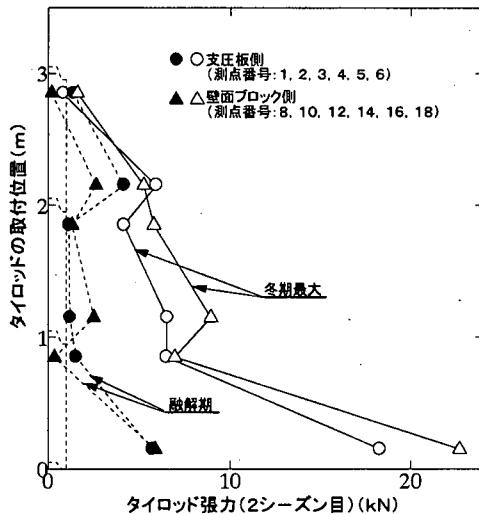


図-8 粘性土区間におけるタイロッド張力の分布と季節変化(1)

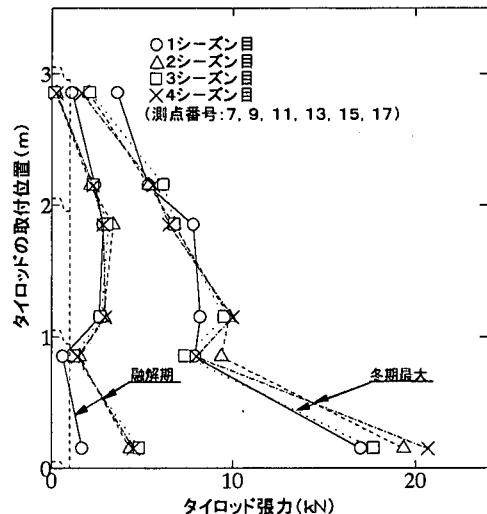


図-9 粘性土区間におけるタイロッド張力の分布と季節変化(2)

(2) タイロッドの張力

壁面ブロックに加わる凍結土圧は、タイロッドの張力として測定される。粘性土区間で実測されたタイロッド張力を図-8～9に示している。冬期間のタイロッド張力の増加は粘性土区間で認められ、火山灰区間と断熱材区間では非常に小さな値であり、ほとんど認められない場合もあった。

図-8～9から粘性土区間では下方のタイロッドほど冬期間の張力の増加が著しいことが分かる。タイロッド張力の測定値の最大は2シーズン目に測点No.18で現れた22.72kNである。前述のように本試験壁で用いたタイロッドの保証引っ張り強さは113kNである。したがって、実際に加わったタイロッド張力はシーズンを通して許容値以下であったことが分かる。

図-8では、同一タイロッドにおける壁面ブロック側と支圧板側の2つの張力を併記している。両張力は比較的良好い一致を示しており、壁面ブロック側の張力はほぼ同じ大きさで支圧板に伝達されている事が分かる。タイロッドと背面土との摩擦や凍着などが、タイロッドの張力伝達に影響する事が想定されたが、それらは小さいものであったと言える。

図-9は、粘性土区間における4シーズンのタイロッド張力を示す。この図から、粘性土区間のタイロッド張力は冬季に増加し、融解期に減少する変化を4シーズンに渡ってほぼ定期的に繰り返していたことが分かる。タイロッド張力の分布は、壁面ブロ

ックに加わる土圧の分布を反映する。壁面ブロックへの凍結土圧は、凍結面に垂直方向に発生する凍結膨張圧に起因する。したがって図-4～7の凍結面形状からして、壁面ブロックに伝達される凍結膨張圧の水平方向成分、すなわち凍結土圧は上段で小さく下段で大きくなる。また凍結膨張圧の大きさは未凍土側への圧縮性にも影響される。この場合、背面土中の下方程それより上にある土による変形拘束が大きくなるので、凍結膨張圧の発生が大きくなる。

(3) 壁面ブロックに作用する土圧

前述のように計測対象の壁面ブロックは4本のタイロッドで独立して水平方向に支持されているので、ここでは4本の張力を加え合わせた値をブロックに加わる全土圧力とし、それをブロックの面積(1.3 m²)で割った値を土圧としている。図-10～13は、タイロッド張力を計測した5個の壁面ブロック(図-1)における土圧の推移を示している。

凍結土圧が発生する粘性土区間では、継続的な地盤凍結が始まる12月上旬に土圧が増加し始め、2月頃に最大値を示し、3月下旬の地表面融解の開始とともに急速に減少し夏期の土圧に戻るという変化を繰り返す。またこれら土圧の冬期間の経時的な変動をもう少し詳細に見ると、各図の上段に示す気温変動に対応したものとなっていることが分かる。

凍結期に壁面ブロックに作用する土圧には、通常

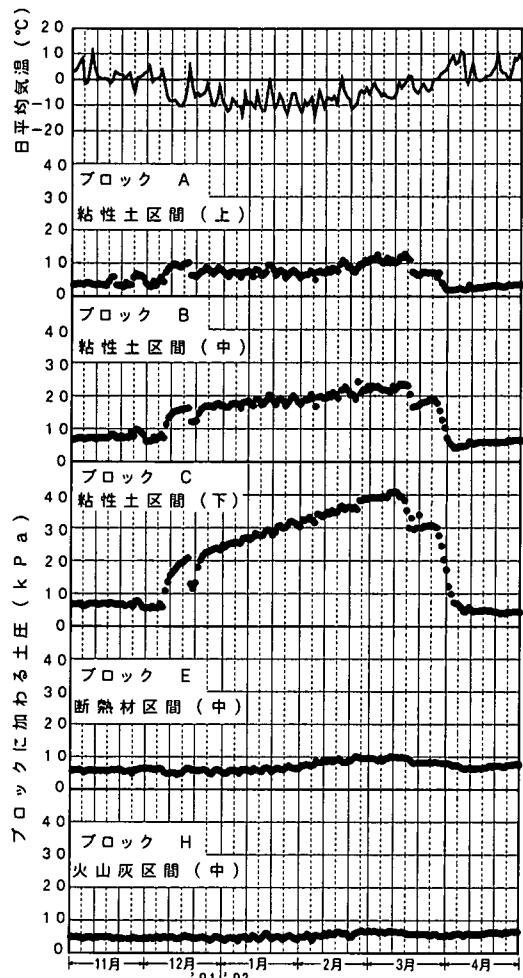


図-10 1シーズン目の土圧

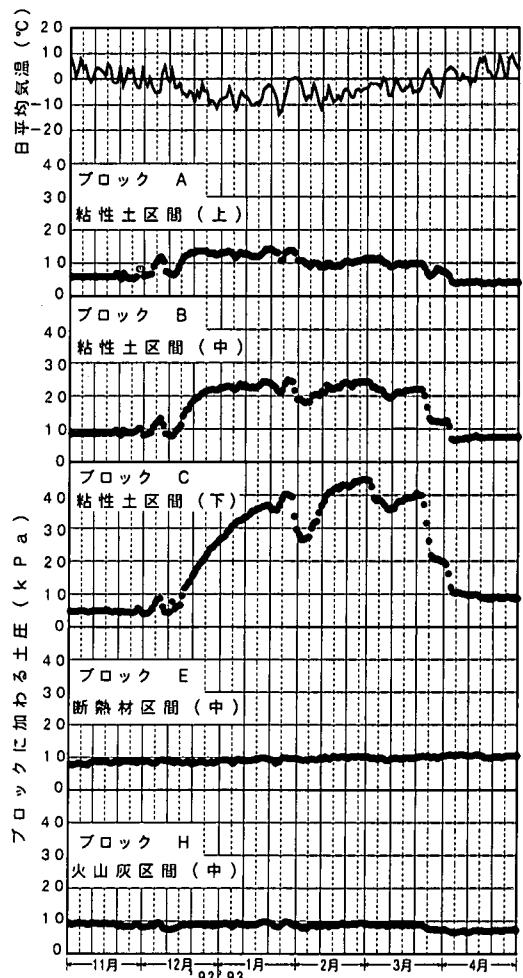


図-11 2シーズン目の土圧

の土圧理論で対象としている土圧成分と、背面土中の凍上発生に起因する凍結土圧成分の2つが含まれる。このとき凍結期における土圧増加分が凍結土圧に相当すると見なす方法もあると思われるが、このことを理論的に説明していくにはさらに議論の余地がある。

前述のように4シーズン目では、水分の供給条件を変える目的で、背面土の未凍土部に注水を行っている。この注水の効果を定量的に解析することは出来ない。しかし、図-3に示す観測フィールドでの地盤凍上力が最も小さかった4シーズン目に土圧の最大値が現れていることは、凍結土圧に対する注水の影響を示唆している。

凍上対策を施した断熱材区間（ブロックE）や火山灰区間（ブロックH）では背面盛土の凍結による土圧の増加はほとんど認められない。ただし、ブロックEでは3シーズン目に土圧増加が少し認められ

るが、これは背面土の凍結を断熱材によって防ぎ切れなかったためと思われる。以上の結果から、凍結土圧は一旦発生させてしまうと融解期の土圧に比べても非常に大きな値になるが、適切な対策によってほぼゼロに押さえ得ることが分かる。

凍結土圧の発生に対して、壁面ブロックの水平変位は1シーズン目で大きめに現れ、粘性土区間で5~9mm、断熱材区間と火山灰区間では3~5mm程度であった。また2シーズン目以降では高々1~2mm程度と非常に小さな値であった。壁面ブロックの水平変位の実測例として、1シーズン目の測定結果を図-14に示す。測定に用いた測量機器の据え付け時の誤差に起因すると見られる点のバラツキは認められるが、凍結期のブロックの変位は土圧の発生に対応して現れていることが分かる。一方、凍結期に土圧増加の小さかったブロックにおいて融解時（4月）に変位が発生する傾向も認められる。このプロ

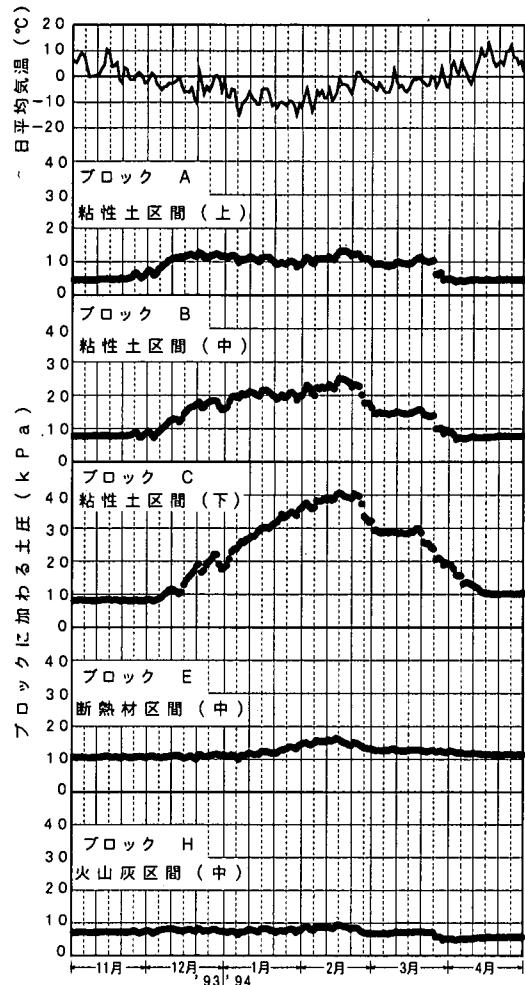


図-12 3シーズン目の土圧

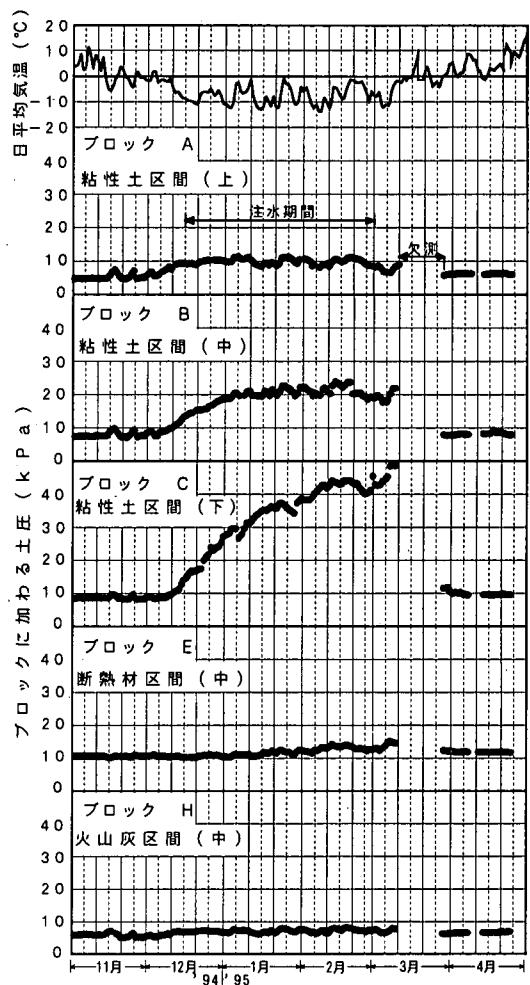


図-13 4シーズン目の土圧

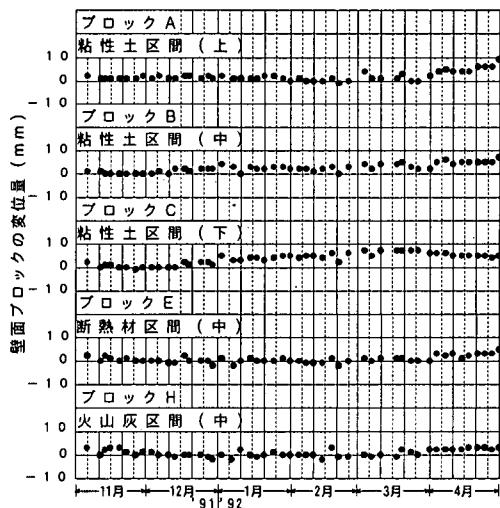


図-14 壁面ブロックの水平変位量（1シーズン目）

ック変位は、凍結時の水分移動によって背面土の含水比が部分的に高くなり、この部分の剪断抵抗が融解時に低下したことに起因していると思われる。

前述のように本試験壁は地下水や浸透水などの凍上発生に必要な水分の供給が少ない。さらに背面が盛土であるため未凍土側の圧縮によって凍結面で発生する凍結膨張圧の吸収が考えられるなど、必ずしも大きな凍結土圧が発生する設置条件を持っていない。したがってここで実測されたタイロッド張力が材料の保証強さ以下であったことをもって一般的な結論とすることは出来ない。表-1でも見られるように、地表面に置かれた直径がわずか10cmの円盤に50kNもの凍上力が加わり得るのである。

実構造物では、コンクリート製のり枠が凍上力によって破壊したり、切土のり面を保護するための大型ブロックのアースアンカーが切断されたりする被

害が現実に発生している¹¹⁾。今後、実構造物で発生している凍上力あるいは凍結時の土圧のデータを集積していくことが重要である。

5. まとめ

試験設置した多数アンカー式補強土壁の凍結期における動態観測を4シーズンにわたって行った。本報告中では裏込め土中の凍結面形状と、壁面ブロックへの土圧を中心に検討してきた。このうち土圧は定量的なデータが得られ、その特性もかなり明らかになった。しかしこれらの結果はあくまでも本実験の範囲のものである。凍結土圧を定量的に解析して構造物の外力として設計に取り込んでいくようするためには、実構造物での凍上力データの蓄積が必要である。

一方、実測された凍結面の形状は壁体の表面形状や壁体材料の熱物性を反映しており、さらに壁面ブロックに加わる土圧（タイロッド張力）の分布特性を良く説明している。この凍結面の形状をシミュレーションできる手法を確立し、この手法を一般的な条件下にも適用できるようにすることによって、本実験で効果が確認された置換工法や断熱工法による凍上対策の合理的な設計が可能になる。

参考文献

- 1) 木下誠一, 大野武敏, 小黒貢: 凍上力II, 低温科学, 物理編, 第24輯, pp.285-297, 1966.

(1999.2.17 受付)

- 2) 鈴木輝之, 朱 青, 澤田正剛: 自然地盤の凍上力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.523/III-32, pp.133-140, 1995.
- 3) 木下誠一: 凍上力実験, 低温科学, 第30輯, pp.285-201, 1973.
- 4) Kauko Kujala: Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils, ACTA University of Oulu 1991.
- 5) 福岡正巳, 今村芳徳, 工藤康二, 内藤智, 深堀東吾: 多数アンカー式鋼製擁壁に関する研究, 第15回土質工学研究発表会, pp.1525-1528, 1980.
- 6) 鈴木輝之, 澤田正剛, 上野邦行, 安達謙二: 多数アンカー式補強土壁の凍上対策に関する実物大模型実験, 土と基礎, 42-3, pp.51-56, 1994.
- 7) 日本道路協会: 道路土工排水工指針, pp.238-243, 1987
- 8) 横田聖哉, 三島信雄, 三浦清一: 地下水位を考慮した実用的な凍上量の設定法: 土木学会論文集, No.574/VII-36, pp.21-31, 1997.
- 9) S.Sawada, & T.Ohno: Laboratory studies on thermal conductivity of clay, silt and sand in frozen and unfrozen states, Proc.of 4th I.S.G.F, PP.53-58, 1985.
- 10) 劇朝鋼, 鈴木輝之, 澤田正剛: 砂利および透水性断熱材を用いる遮水層の凍上抑制効果, 土木学会論文集, No.487/III-26, pp.265-270, 1994.
- 11) 西田健一: グランドアンカーの凍上被害と対策検討について, 北海道土木技術研究会, 技術研究発表会報告集, pp.182-218, 1991.

FREEZING FRONT AND FROST HEAVING PRESSURE IN MULTI ANCHORED RETAINING WALL

Teruyuki SUZUKI, Hironori UNO, Seigo SAWADA and Kenji ADACHI

Various types of reinforced retaining walls have been recently developed and adopted. On these retaining walls, however, effects of frost heaving damage prevention measures have not yet been clarified. In this study, a full scale model of a multi-anchored retaining wall was installed in the field, and measurements were performed over four winter seasons. Following results were obtained; 1) measured freezing fronts were associated with measured freezing earth pressure on facing blocks; 2) earth pressure on facing block repeated seasonally between 40-50kpa in winter and 5-10kpa in melt season; and 3) the effectiveness of thermal insulation material and frost-nonsusceptible backfill against frost damage was evidently recognized.