

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

劉 朝鋼*・鈴木輝之**・沢田正剛***

砂利あるいは透水性断熱材からなる遮水層を含む凍上性地盤を造成し、冬期間における凍上量、凍結深度、土中温度、凍上力及び地盤内の水分移動について観測した。得られた主な結果は次の通りである。(1) 透水性断熱材または砂利を用いる地盤では、遮水層を設けない地盤に比較して、凍上量がそれぞれ3分の1または2分の1程度まで小さくなる。(2) 透水性断熱材の層および砂利層の毛管上昇に対する遮水効果は明確に認められる。(3) 遮水層の材料として、透水性断熱材は総合的に優れている。

Key Words : field test, frost heave, protection methods against frost actions, permeable thermal insulating materials, capillary rise

1. ま え が き

寒冷地における道路とそれに付帯する構造物、例えばボックスカルバートや用排水路が受ける凍上被害は極めて多いことが指摘されている^{1),2)}。最近、寒冷地域の活性化が叫ばれ社会基盤の整備が進むとともに、技術的には構造物が複雑化、高度化することによって、地盤の凍上対策はますます重要になってきている。現在のところ、凍上対策工法は、予想される最大凍結深度以内の凍上性土を難凍上性材料で置き換える置換工法が主流である。しかし、良質の置換材料が得にくくなっていることや施工環境が厳しくなっていることなどから、置換工法以外の凍上対策工法の確立が要求されている。このような状況に対応するため、最近では、凍上に大きく寄与する地下水の毛管上昇を遮る遮水工法や、寒気の進入を防ぐ断熱工法などが実用化を目指して活発に研究されている。

初期の遮水工法では、ビニール膜やアスファルトなど不透水材料を遮水層に用いた結果、遮水層が不透水層となって上部に水が溜まり、かえって凍上を助長してしまうことがある³⁾。これに対して、砂利やジオテキスタイルなどを用いる新しい遮水工法が提案されている^{4),5)}。この工法は、大きな連続空隙を持つ層を設け、雨水など上方からの浸透水は通過させるが下方からの毛管水の上昇を遮断して凍上を抑制しようとするものである。

本研究は、毛管上昇水だけを遮断する層（以後遮水層と呼ぶ）を含む地盤を造成し、冬期間に発生する凍上量、凍結深度および凍上力を実測し、遮水層の凍上抑制効果を確認したものである。遮水層の材料として、砂利と透

水性断熱材を用いた。実験の結果、遮水層を設けない地盤（均一地盤と呼ぶ）に比べ、遮水層を有する地盤（遮水工法地盤と呼ぶ）では、発生する凍上量が小さく抑えられることがわかった。さらに、凍結地盤のボーリング調査により、地盤下部からの水分の毛管上昇が遮水層によって完全に断たれたことが確認できた。また、透水性断熱材を遮水層に用いた場合、凍結線の進入は遮水層のところで止められた。これに対し、砂利を遮水層の材料に用いた場合、最大凍結深度は均一地盤とほぼ同じであり、凍結線が遮水層を越えてからも凍上の発生が認められた。これらの結果から、大きな連続空隙を持つ遮水層の凍上抑制効果が確認されるとともに、透水性断熱材では、毛管水の上昇を遮断することに加えて寒気の地盤内への進入を防ぐことによってより大きな凍上抑制効果のあることが明らかになった。

2. 実験内容

(1) 実験土槽

実験には2基の屋外凍上実験土槽を用いたが、その概要および断面寸法を図-1(a), (b)に示す。2基の土槽は凍上力測定用の反力フレームが一方にしかない以外は同じ仕様である。各々の土槽は中心に隔離壁を設けて2分した。片側には凍上性の土（風化火山灰）を詰めて、均一地盤を造成した。もう一方の側には同じ土を詰めたが、その中に透水性断熱材あるいは砂利の層を入れて遮水層を有する地盤を造成した。このような遮水層では、凍上の要因の1つである地盤下部からの毛管水の上昇は遮断し、上方からの浸透水は自由に通過させることができる。さらに、透水性断熱材の場合、寒気の地盤内への進入を防ぐこともできる。

透水性断熱材を入れた地盤を断熱材遮水地盤、砂利を入れた地盤を砂利遮水地盤と呼ぶ。両方とも遮水層は地表面下30 cmのところにあるが、断熱材の厚さは5 cm、

* 正会員 工博 北見工業大学助教授 土木開発工学科
(〒090 北海道北見市公園町 165 番地)

** 正会員 工博 北見工業大学教授 土木開発工学科

*** 正会員 北見工業大学講師 土木開発工学科

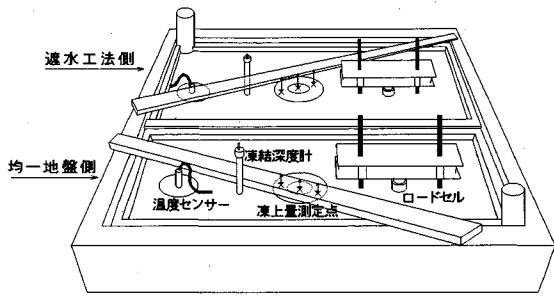


図-1 (a) 土槽設置略図

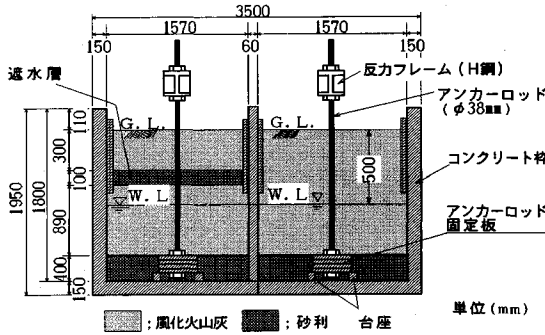


図-1 (b) 土槽断面図

砂利の厚さは10 cmである。図-1 (b) に示しているのは砂利を入れた地盤のケースである。なお、凍上力を測定したのは砂利遮水地盤とそれに対応する均一地盤である。

表-1 に土槽に詰めた風化火山灰の性質を示し、図-2 に風化火山灰および遮水層に用いた砂利の粒経加積曲線を示す。室内凍上試験の結果によると、この風化火山灰は凍上性のかなり強い土であることが分かる。未風化の火山灰は非凍上性土であり、寒冷地における道路の凍上抑制層の置換材料としてよく用いられるが、風化した火山灰の凍上性は大きいことに注意する必要がある。

砂利遮水層に用いた砂利は道路用の6号砕石で、フルイ分け試験によれば、平均粒径は約12 mmであった。

実験に用いた透水性を持つ断熱材は、発泡ポリスチレンの薄片を蒸気加熱によって融着させブロックに形成したものである。このため、大きな連続空孔が残り、極めて透水性がよく、更に通常の発泡ポリスチレンと同程度の断熱性を持つ。その諸性能を表-2 にまとめている。

地下水位は両土層とも凍結前の地表面下50 cmの位置に設定した。土槽は地下水位調整槽とパイプで連絡しており、土槽内の土の凍上によって水が吸い上げられても、地下水位が常に一定に保たれるようになっている。ここで、地下水位を比較的浅いところに設定したのは、地盤の凍上発生量が主に凍結の初期段階に集中しているといわれ⁶⁾、地下水位が浅ければ、より顕著な凍上現象

表-1 土槽に詰めた風化火山灰の性質

粒度試験	比重	2.56
	砂分	40.2%
	シルト分	38.0%
縮固の	粘土分	21.8%
	最適含水比	31.0%
透水試験等	最大乾燥密度	1.36t/m ³
	現場乾燥密度	1.15t/m ³
	飽和含水比	47.9%
凍上試験	透水係数	4.1×10 ⁻⁵
	凍上率	109.4%
	凍上様式	霜柱状凍結

*道路土工様水指針による

表-2 透水性断熱材の性能諸元

項目	単位	値
密度	kg/m ³	26
空隙率	%	30
曲げ強度JIS-A-9511	MPa	0.11
10%歪圧縮強度	MPa	0.13
透水係数JIS-A-1218	cm/sec	0.65
熱伝導率	W/(m·K)	0.0357

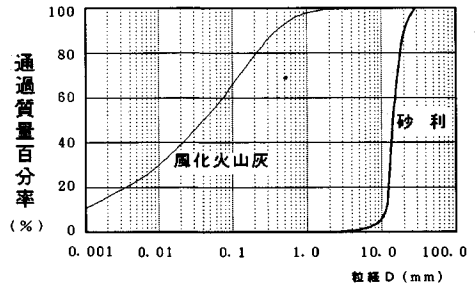


図-2 火山灰及び砂利の粒経加積曲線

を観察できると考えたためである。

(2) 測定内容

測定内容は、1日1回の凍上量と凍結深度、1時間ごとの気温、土中温度および凍上力である。凍上量は土槽天端に渡したビーム(図-1 (a))に基準点をとって、地表面の隆起量をノギスを用いて測定した。また、凍結深度は外管の下端部が固定されて地盤の凍上によって動かされないメチレンブルー凍結深度計を用いて、凍結前の地表面に対する凍結面の深さを測定した。凍上力は地表面に置いた直径10 cmの鉄製円板の持ち上がり力を反力フレーム(図-1 (b))によって拘束したときに、その円盤に加わる力を測定したものである。この測定は、反力フレームと円盤との間に設置したロードセルによって行った。温度の測定は銅-コンスタンタン熱電対によって行い、凍上力とともに自動記録した。

遮水層の凍上抑制効果を凍結後の地盤の含水比変化およびアイスレンズの発生状況で確認するため、地盤凍結がほぼ最大深度に達した時期(3月23日)に、地盤のボーリング調査を行った。遮水工法側および均一地盤側それぞれ1か所で凍結面以下までボーリングを行い、直径7

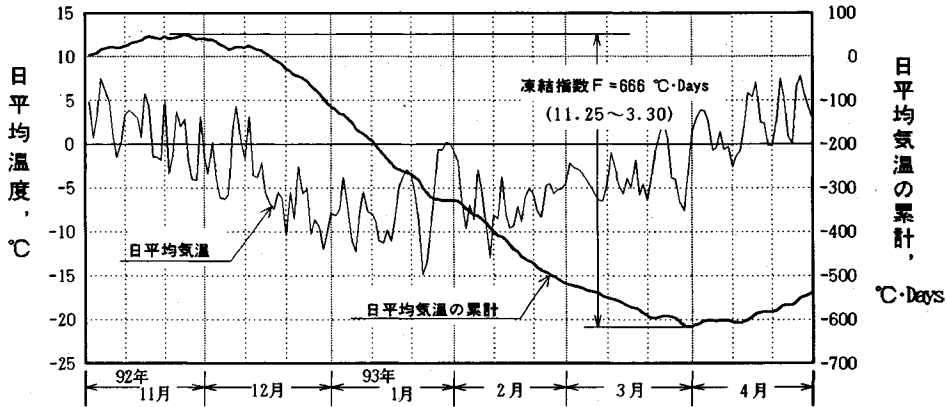


図-3 日平均気温の経時変化とその累計

cmのコアサンプルを採取して、深さ方向の含水比分布を調べた。

実験土槽内の除雪は常時行った。地表面に雪が積もると、積雪の断熱効果により地盤の凍上がかなり緩和されることは衆知の通りである。しかし、地盤の凍上に及ぼす積雪の影響を評価することは本研究の対象としていない。本研究では、凍上被害にとって最も厳しい条件である積雪ゼロの条件を採用した。また、土槽周辺の建物の影響によって日射の不均一性が見られたので、土槽のまわりに高さ約4mの木板囲いを設置し、土槽内の地盤表面は常時日射のない状態とした。

3. 結果と考察

(1) 実験地点の気象条件

図-3は実験地点で測定された平成4年11月～平成5年4月までの日平均気温の経時変化と、その累計を示す。図からわかるように、12月中旬から1月中旬にかけて気温が順調に下がり、長期天気予報の通りの厳冬になる気配を見せていた。しかし、1月中旬から、気温の乱高下が繰り返され、時には日平均気温がプラスになる日もあった。このため、地盤凍結の気象条件は平年と比べかなり異なり、特に凍上力の測定値は大きく影響を受けた。ここで、シーズン中の日平均気温の累計曲線の最大値と最小値の差を凍結指数と定義し、図-3から求めた本シーズンの凍結指数は666°C・日であった。過去の観測結果によれば、北見地方での凍結指数は800～1000°C・日程度である⁷⁾。それに比較して本シーズンは暖冬であったと言える。

(2) 地表面凍上量の推移

図-4は遮水工法地盤（断熱材遮水および砂利遮水）と均一地盤における地表面の凍上量および凍結深度の推移をそれぞれ比較して示したものである。12月15日までの時点で、遮水工法地盤と均一地盤はほぼ同じような凍上過程を経て、地表面が約5cm隆起した。この場合、

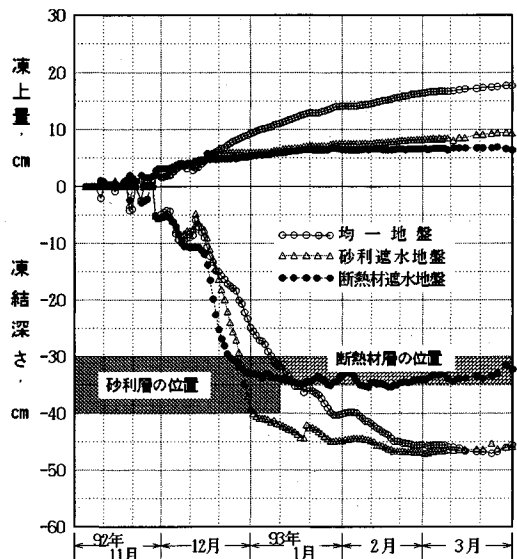
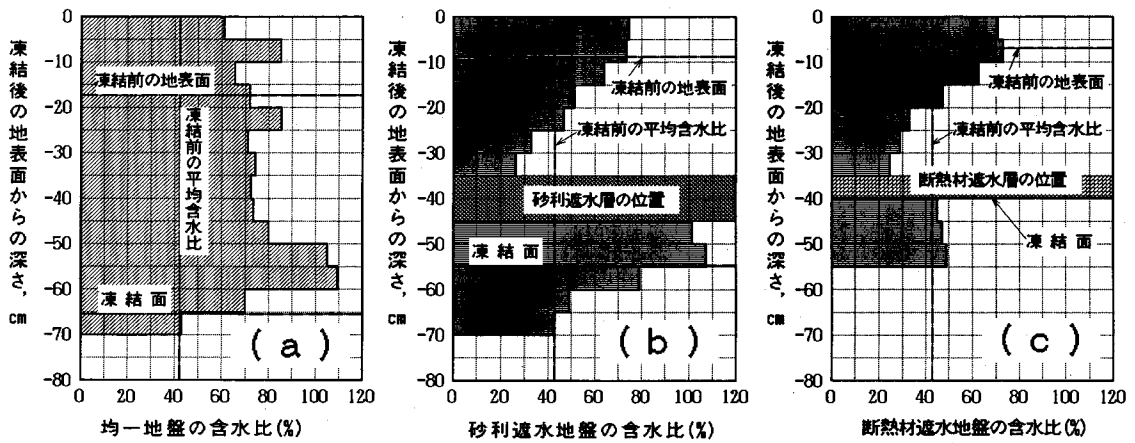


図-4 凍結深度と地表面凍上量の推移

地盤の凍上に要する水分は地盤上層部の初期含有水分だけで賄われたために遮水層の有無が凍上量に関係なかったと考えられる。そのあとは、毛管水の上昇を遮断した遮水工法地盤とそれをしていない均一地盤とで差が現れ始め、均一地盤では、凍上量の増加が緩やかとは言え、3月末まで一貫して続き、地表面の隆起が17cmを越えている。これに対して、遮水工法地盤では12月中旬以後の凍上量の増加はわずかしくなく、3月末までに地表面の隆起は断熱材遮水地盤で均一地盤の3分の1弱の約6cm、一方、砂利遮水地盤では、均一地盤の2分の1強の約9cmとなっている。同じ遮水工法でも、断熱材を用いる方が発生する凍上量は小さく、より凍上抑制効果が大きいことがわかる。

(3) 凍結深度の推移

同じ図-4より凍結深度の推移を見ると、定常的な差が現れているのは、12月中旬（凍結深度にして約15cm）



図—5 地盤凍結後の含水比分布 (3月23日測定)

以後となっている。断熱材遮水地盤では凍結がもっとも速く進んだが、凍結線が断熱材の中に入ると、それ以上の前進はほとんど見られない。次に凍結の進行が速いのは砂利遮水地盤であったが、その速度は砂利層の中でさらに増している。しかし、凍結線が砂利層を抜けた時点で、進入速度は小さくなり、最大凍結深度は結局均一地盤とほぼ同じ値になった。一方、均一地盤の凍結線は2月中旬まで、おおよそ一定の速さで進み、3月下旬に凍結前の地表面下約46cmの最大凍結深度に到達した。

遮水工法地盤の凍結速度が一時的に速かったのは、遮水層により地盤下部の水分補給が断たれ、凍結する水分が少なく、水の凍結に伴って発生する潜熱が少なかったこと、さらに断熱材遮水地盤では遮水層の断熱効果により地盤下部からの熱が遮水層上部の地盤へ伝わりにくくなったことのためと考えられる。このことは、遮水工法地盤では、凍結速度が速かった時期に凍上がほとんど発生していないことから窺うことができる。

(4) 地盤凍結後の含水比分布

遮水層の毛管水遮断効果を凍結後の地盤の含水比変化およびアイスレンズの発生状況によって確認するため、地盤の凍結線がほぼ最大凍結深度に達した時期(3月23日)にボーリング調査を行った。採取したサンプルを縦に割って、アイスレンズの発生状況を観察したところ、均一地盤内では多くのアイスレンズの存在が確認された。一方、遮水工法地盤の遮水層よりすぐ上では大きなアイスレンズはほとんど見当たらなかったが、砂利遮水層の下部では均一地盤と変わらないほど多くのアイスレンズが見られた。

更に、採取したサンプルを5cmごとに輪切りにして各深さにおける平均含水比の測定を行った。ボーリング時点の含水比の深さ方向の分布を図—5に示す。均一地盤の場合、凍結の過程で下部からの毛管水補給が間断なく続いたため、凍結層全体にわたって凍結後の含水比が

凍結前の値より著しく増加している。一方の遮水工法地盤で遮水層より上の層を見ると、含水比の分布は地表面に近いところで高くなるが、遮水層に近いところでは凍結前より含水比が低下している。その結果、遮水層より上の層全体では、凍結前に比べ含水比の平均値はそれほど変化していない。厳密には、凍結後の平均含水比が多少大きくなって見えるように見えるが、それは地表面の雪解け水などが浸透した結果であり、均一地盤の場合と比べ、この程度の変化は無視してもよいと思う。遮水層より上の含水比の平均値があまり変化しない理由は、遮水層が毛管水の補給を断つたため、地盤の凍結に伴う水分移動が遮水層より上の範囲内だけで行われ、いわゆる閉式凍上となったことが考えられる。このように、遮水層の遮水効果は十分にあったことが確認できる。

砂利と断熱材の遮水工法地盤の含水比分布を比較すると、遮水層より上の地盤ではほぼ同じ結果を示すが、遮水層より下では状況は大きく異なる。断熱材遮水の場合、遮水層より下では凍結現象が見られず、含水比も凍結前と変わらない。しかし、砂利遮水層の下では地盤はかなり凍結しており、しかも地下水位に近いため、アイスレンズは著しく発達し、含水比が大きな値を示す。この影響は、前述の両遮水工法地盤の凍上量の差としても現れている。砂利遮水層には凍結進入を止める効果はないのであるから、実用上ではその設置位置の検討が重要な課題となる。

(5) 透水性断熱材の断熱効果

図—6に透水性断熱材の上下表面の温度変化を示す。同図に日平均気温の推移も再掲している。図からわかるように、断熱材の上部の温度変化はおおよそ気温の変化に追随している。特に断熱材上部の地盤が完全に凍った12月下旬以後、凍結地盤においては気温変化の影響をいっそう敏感に受けるようになってきている。これは凍結地盤の熱伝導率が未凍結地盤に比較して大きくなるためと

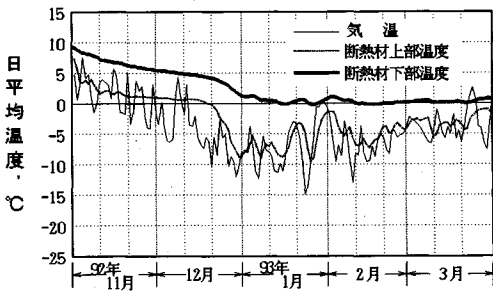


図-6 透水性断熱材上下の温度経時変化

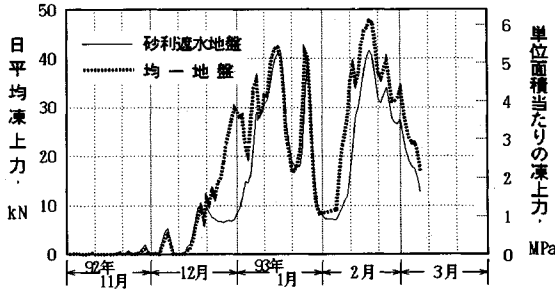


図-7 日平均凍上力の経時変化

思われる⁸⁾。一方、断熱材下面の温度は小さき変化が見られず、1月上旬まで気温の低下に伴って徐々に下がる傾向を示しているが、0°C付近まで来ると、そのまま3月末まで0°C付近で停滞している。断熱材下面の温度が気温の低下によらず0°C以下にならないことは、断熱材下部の地盤がシーズン中に一度も凍らなかつたことを意味している。一般に、砂利を用いた遮水工法や置換工法では、凍結深度が未処理地盤より大きくなり得るという、凍上対策工法として望ましくない面がある。これに対して、本実験で用いた透水性断熱材は毛管水の上昇を遮断するだけでなく、最大凍結深度をも小さくするので、凍上対策の上で2重の効果が期待できる。

(6) 凍上力

地盤が凍結する時の表面隆起は凍上であるが、この地表面の隆起を拘束したときそこで発生する力を凍上力という。今回凍上力を測定したのは砂利遮水地盤とそれに対応する均一地盤である。

図-7は遮水工法地盤と均一地盤において、地表面に置かれた直径10cmの円盤に加わった凍上力の推移を示す。凍上力は気温の変動に敏感に反応して小刻みに変動している。ここで注目されるのは、12月下旬の短い期間、均一地盤と遮水工法地盤の凍上力が大きく異なることである。均一地盤の凍上力は急速に増大しているにもかかわらず、遮水工法地盤の凍上力は少し低下している。図-4によれば、この時期はちょうど凍結線が砂利遮水層を通過している途中であることが分かる。同じ時期に遮水工法地盤の凍上もほとんど進行していないこと

が同図からわかる。すなわち、凍結線が遮水層内にある間は、凍上が起こらず、凍上力も新たに発生しないことが言える。この場合における凍上力の多少の低下は凍土のクリープ現象によると考えられる。その後、凍結線が遮水層を通過してからは、凍上力は再び均一地盤とほぼ同じ値をとるようになっていく。これは、凍結線が遮水層を通過してしまえば遮水層の影響は無くなり、遮水工法地盤も均一地盤もほぼ同じ条件になるためと思われる。

以上のように、凍上力の発生に対する砂利遮水層の効果は、凍結線が遮水層の中にあるときだけ現れることがわかる。前述のように、凍上量に対する砂利遮水層の効果はかなり認められることとは対照的になっている。一般に、凍上力は地盤の拘束条件や凍土層のクリープ特性など複雑多岐な因子の影響を受けさらに、凍上量とは単純な対応関係を持たない。実務設計で凍上量と凍上力のどちらが必要になるかは構造物の性格によるが、地盤の凍上発生特性を評価する指標として凍上量がより基本的といえよう。

4. まとめ

屋外凍上実験土槽を用いて、砂利および透水性断熱材層からなる遮水層の凍上抑制効果を調べた。冬期間の凍上量、凍結深度、凍上力及び地盤内の水分移動の観測を行い、以下のような結果が得られた。

(1) 透水性断熱材または砂利を用いる遮水工法は、地盤の凍上量をそれぞれ3分の1または2分の1まで抑える効果があった。同じ遮水工法でも、断熱材を用いる方が発生する凍上量は少ないことがわかった。

(2) 断熱材遮水地盤では一時的に凍結が速く進んだが、最終的に凍結線は遮水層を越えなかつた。砂利を用いる遮水地盤では凍結が遮水層を通過して下の層にまで進入し、そこで凍上発生が認められた。

(3) 透水性断熱材の層および砂利層の毛管上昇に対する遮水効果とそれによる凍上抑制効果は明確に認められた。

(4) 断熱材上面の温度は外気温の影響を敏感に受けるが、下面の温度は外気温に対応した小刻みな変動が認められず、さらに0°C付近で停滞した。透水性断熱材の断熱効果が大きいことが確認された。

(5) 地盤の凍上変位が拘束されると、非常に大きな凍上力が発生することがわかった。しかし、凍上力に対する砂利遮水層の効果が現れたのは凍結線が砂利層の中にあるときだけであった。

本研究は文部省科学研究費(一般研究(c)04650429研究代表者鈴木輝之)の援助を受けました。また、透水性断熱材層の性能および使用方法について、玉井産業(株)

の伊藤太郎氏に多くの御教示を願った。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 凍害委員会報告：凍害とその対策の現状，凍害対策と寒さの利用に関するシンポジウム論文集，土質工学会，pp.1～9，1992.
- 2) 鈴木輝之・山田利之：小型 U-トラフの凍上被害に関する屋外実験，土木学会論文集，No. 418/Ⅲ-13，pp.163～171，1990.
- 3) 土質工学会編：「土の凍結—その制御と応用—」，pp.116～117，土質工学会，1982.
- 4) 土谷富士夫・辻 修・三嶋信雄・横田聖哉：ジオテキスタイルの毛管遮断効果による凍上抑制，農業土木学会誌，第 60 巻第 12 号，pp.1123～1126，1992.
- 5) 劉 朝綱・鈴木輝之・沢田正剛：砂利遮水層の凍上抑制効果，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集，第 3 部，pp.1120～1121，1992.
- 6) 鈴木輝之・沢田正剛・尾中孝美：地盤の凍上特性に関する屋外実験，土木学会論文集，No.430/Ⅲ-15，pp.107～114，1991.
- 7) 沢田正剛：人工永久凍土の造成，日本雪氷学会誌，雪氷，50 巻 1 号，pp.9～15，1988.
- 8) Sawada, S, et al. : Experimental study on thermal conductivity close to freezing front in the ground, 3rd International Symposium on Cold Regions Heat Transfer, pp.323～329, 1991.

(1993.5.12 受付)

FIELD TESTS ON PROTECTION METHODS AGAINST FROST ACTIONS USING GRAVEL AND PERMEABLE THERMAL INSULATING MATERIAL

Chaogang LIU, Teruyuki SUZUKI and Seigo SAWADA

Effects of some protection methods against frost actions were experimentally studied. A filter layer of gravel or permeable thermal insulating material was set in the field test basins which were filled with frost susceptible soil. The filter layer used in this study can prevent capillary rise and permit seepage water downward. The amount of frost heave, frost heaving force, depth of freezing front and water transfer were measured during winter.

The main results of these experiments were as follows :

- 1) The amount of frost heave at the ground which has a filter layer of gravel or permeable thermal insulating material was about one-half or one-third of that at the untreated ground.
- 2) Both gravel layer and thermal insulating layer could cut off capillary rise completely.
- 3) When permeable thermal insulating material was used, the freezing front would be stopped in the filter layer.