

# 連続繊維補強土の品質管理に関する研究

北見工業大学工学部 ○ 正会員 堀 智仁  
北見工業大学工学部 正会員 山下 聡  
日特建設 正会員 山田 浩  
日特建設 正会員 三上 登  
北見工業大学工学部 正会員 鈴木 輝之

## 1. はじめに

従来ののり面安定化対策工法は、モルタル吹付工やのり砕工、積みブロック工等、目的に応じてコンクリート構造物が多く用いられてきた。しかし、それらのコンクリートを多用した対策工は、景観上周辺の自然と調和しないため、国立公園や国定公園など、景勝地での施工には不向きである。それに対して、連続繊維補強土のような繊維を用いた土木構造物によるのり面には、植生が全面に生育し、周辺環境との調和が図れ、生態系にも優しい緑化のり面となる。繊維の混合目的は、土質材料に一定量の繊維を均等に混合することで、繊維と土質材料との摩擦や拘束力によって、擬似的な粘着力を付与し、せん断強度や降伏ひずみを増大させることにある。

連続繊維補強土工法は、施工の際に砂と繊維の割合を砂 1.0m<sup>3</sup>あたり繊維 3.3kgとして<sup>1)</sup>、吹き付ける量を管理している。しかし、施工者や施工箇所によって砂と繊維の割合にばらつきがあると考えられる。したがって、造成された連続繊維補強土のせん断強度、繊維の混入率、繊維の配向性の確認など、現場で実施可能な品質管理手法の確立が必要である。しかしながら、連続繊維補強土は砂と繊維が複雑に絡み合っているため、通常のサンプリング方法では繊維を切ることができず、試料を採取することは困難である。そこで本研究では、施工現場で容易に試料を採取するために、ドライアイスを用いて採取箇所を凍結させて試料を採取することを試みた。また、採取した試料に対して三軸試験を行い、連続繊維補強土の利点を検証し、繊維の混入が試験結果に与える影響を調べた。

## 2. 連続繊維補強土工の概要

連続繊維補強土工の施工概念図を図-1 に示している<sup>2)</sup>。連続繊維補強土の施工に使用する機械は、砂を供給するシステムと連続繊維を供給するシステムで構成されており、連続繊維は、繊維の供給装置（スレッドフィーダー）に格納された糸巻から、高圧水を利用して噴射ノズル（エジェクター）から噴射される。また、砂は高圧空気によって繊維の噴射先まで搬送し、繊維と直接噴射・混合される。繊維の混合量は、一般に砂の乾燥重量に対して 3.3kg/m<sup>3</sup>が標準である。施工中はこの混合量が供給管理装置によって定期的にチェックされ、品質の確認を行っている。

## 3. 試験概要

細粒分の少ない砂や礫質土を採取する方法として凍結サンプリング法がある。凍結サンプリング法は、原位置で地盤を凍結し、その状態で試料を採取するものである。地盤を凍結させる冷媒として、液体窒素を直接用いる方法、冷凍機で塩化カルシウムを冷却して用いる方法などがある。しかしながら、いずれも設備が大がかりで準備に時間がかかることや、費用が高いという問題がある。さらに、連続繊維補強土工は主として急傾斜の斜面に施工されるため、従来の方法では現実的に不可能であると考えられる。

本研究では、簡易的に地表面を凍結させる方法として、ドライアイスを用いた地盤の凍結方法を採用した。地盤の凍結実験は北見工業大学内においてドライアイスによる凍結の効果を検証した後、2005年10月と11月に弟子屈町の河川沿いの自然斜面に設けた試験ヤードで、地盤の凍結実験および試料のサンプリングを行った。また、2006年10月に、同様の試験を支笏湖畔に面した自然斜面でも行っている。

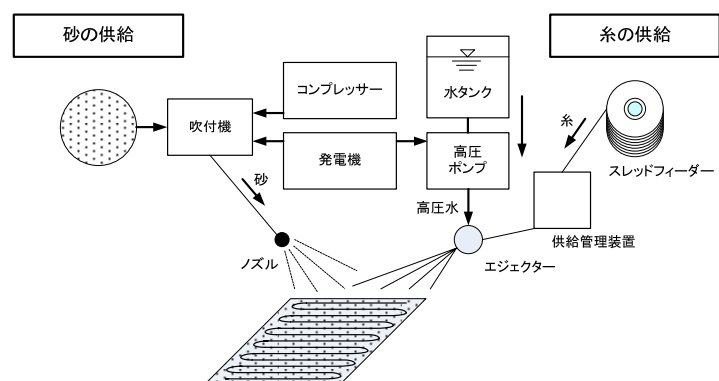


図-1 施工概念図

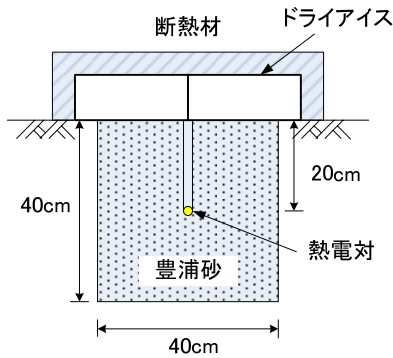


図-2 地盤凍結実験1 断面図

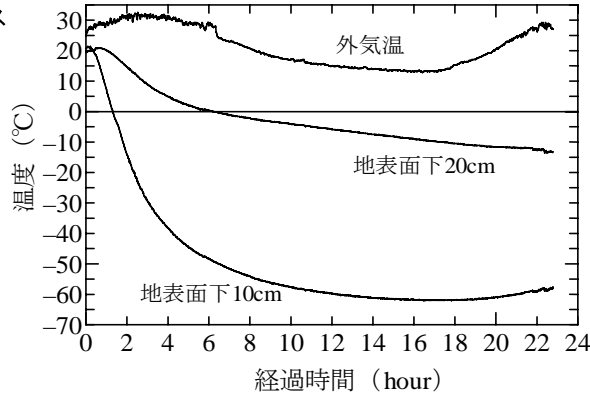


図-3 温度の経時変化

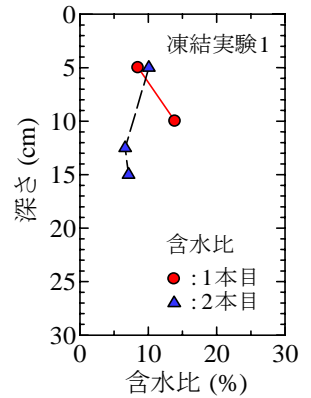


図-4 試料の含水比

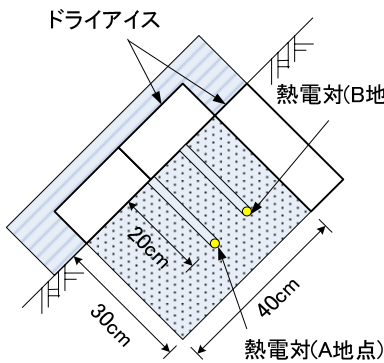


図-5 地盤凍結実験2 断面図

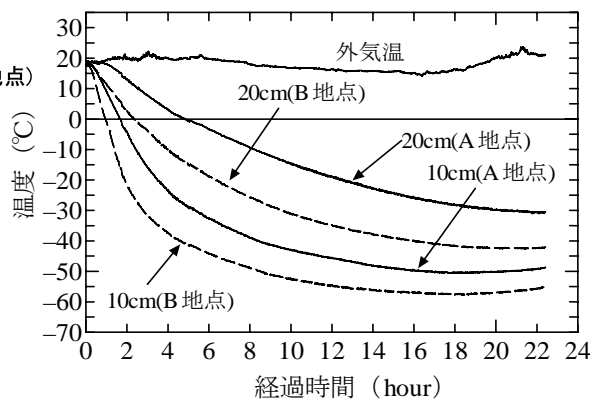


図-6 温度の経時変化

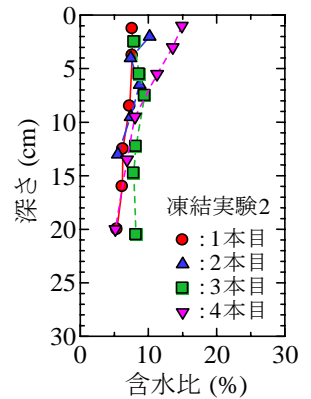


図-7 試料の含水比

試料のサンプリングは排気量50ccの2サイクルエンジンを備えたロータリー式のサンプラーによって行った。サンプリングした試料は室内で圧密排水三軸圧縮試験 (CD 試験) を行い、試験後、繊維の混入量を調べた。

#### 4. 地盤凍結実験および試料のサンプリング

##### 4.1 北見工業大学学内での凍結実験

ドライアイスによる地盤の凍結の効果を検証するために、2005年7月中旬に北見工業大学内の実験フィールドで地盤凍結実験を行った。試験の概略図を図-2に示す。地盤凍結実験1では、現場の土を豊浦砂 (縦40cm×横40cm×深さ40cm) で置換して、水を十分含ませた後に、ドライアイス (25cm×25cm×10cm, 4枚) を設置した。外気を遮断するために、ドライアイスの上に断熱材の蓋をかぶせて、さらにその上をシートで覆い、直射日光が当たらないようにした。外気温と地中温度 (地表面下10cm, 20cm) は熱電対によって測定した。なお、ドライアイスは午前11時に設置し、試料のサンプリングは翌日の午前10時から行った。図-3は、地表面下10cmおよび20cm、外気温の経時変化を示したものである。図より、地表面下20cmの地点が0℃になったのは、試験開始から6時間15分後であった。この日の最高気温は32.6℃であるため、夏場でも十分に地盤を凍結することが可能であることがわかった。次に、サンプラーによって試料の採取を行った結果、試料は1, 2分で採取することができた。しかし、亀裂が多く、綺麗な試料を採取することはできなかった。この原因として、水分の移動による、含水比の低下が考えられる。図-4は採取した試料の含水比を測定した結果である。図より、深くなるに従い含水比が低くなっている。また、図-3の温度のグラフから、地表面下10cmと20cmの温度差は約50℃であることがわかる。このことから、凍結面が停滞して温度勾配が急になり、水分が移動したことによって地盤が凍上し、含水比が低くなったと考えられる。以上のことから、



写真-1 サンプリングした試料 (1本目)

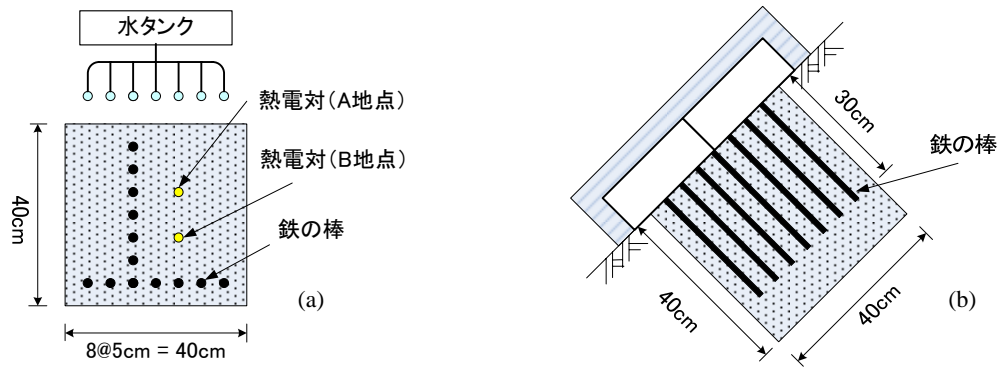


図-8 地盤凍結実験3 (a)平面図 (b)断面図

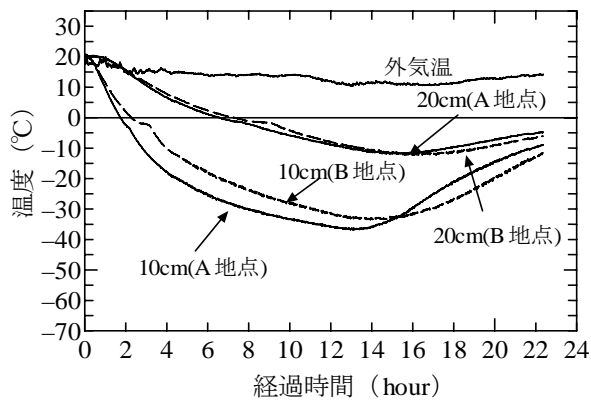


図-9 温度の経時変化

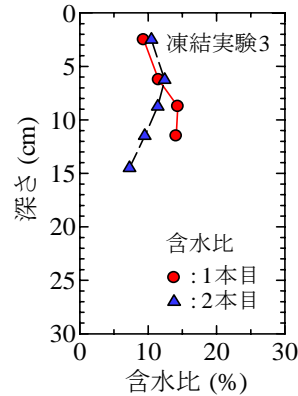


図-10 試料の含水比

ドライアイスを用いて、地盤を凍結させることが可能であることが明らかになった。しかしながら、地表面が凍上現象によってやや膨張していたため、効率的に地盤を凍結させる工夫が必要であることがわかった。

凍結実験1の結果をふまえて、凍結実験2では、スムーズに地盤を凍結させるためにドライアイス(20cm×20cm×10cm, 4枚 20cm×25cm×10cm, 2枚)を2方向に設置して、2方向から凍結させる試験を行った。さらに、連続繊維補強土は主に急斜面に施工されるため、実際の現場を想定して、図-5に示すような傾斜角約45°の斜面において、前回と同様に豊浦砂で置換して地盤凍結実験を行った。温度の測定は、図に示すように、中心の温度(A地点)と、その点とドライアイスの中間(B地点)の地中温度を測定した。図-6は地中温度の結果を示したものである。図より、A地点の地表面下20cmは、試験開始後4時間50分で0°Cになっており、凍結実験1に比べると約1時間30分早く凍結している。このことから、2方向からドライアイスで地盤を凍結させる方法は有効であることがわかる。また、地表面下10cmと20cmの温度の結果を比較すると、図-3に示した、前回の結果に比べ温度の差は少なく、凍上現象による地盤の膨張はなかったため、スムーズに地盤が凍結したと考えられる。しかしながら、サンプラーで試料を採取した結果、写真-1のように供試体は複数に折れたり、崩れたりしていた。図-7は、採取した4本の試料の含水比を示したものである。図より、前回の試験と同様に、深くなるに従い含水比が低くなっていることがわかる。以上のことから、ドライアイスを2方向に設置する方法は有効であることが確認できた。しかし、ドライアイスを設置する際に現場を大きく乱すことから、さらなる工夫が必要であると考えられる。また、ドライアイスを設置する際に、水分を十分に供給する必要があることがわかった。

現場を乱さずに効率的に地盤を凍結させる方法として、地盤凍結実験3では、熱伝導率の良い鋼鉄の棒(直径9mm, 長さ30cm)を図-8のように5cm間隔で設置した。また、継続的に水分を供給するために、貯水タンクから一定の流量で水を流して凍結実験試験を行った。図-9に示す温度変化の図から、試験開始後6時間30分後に地表面下20cmが0°Cになっている。以前に行った試験とはセンサーの位置が違うことや、水を供給して凍結実験を行っているため、一概に比較することはできないが、水が供給されているにもかかわらず、地盤凍結実験1とほぼ同じ時間で地表面下20cmの温度が0°Cになっているため、鉄の棒を設置する方法は有効であると言える。次に、試料のサンプリングを行い、含水比を求めた結果を図-10に示している。ここで、1本目のサンプリングは斜面の上側で行い、2本目は斜面の下側で行っている。図より、斜面の上側から採取した1本目の含水比は深くなるに従い含水比が高く、水の供給の効果がみられる。それに対して、斜面の下側で採取した2本目の試料はやや含水比が低いものの、前回に比べると含水比が高くなっており、水の供給の効果が得られていると言える。

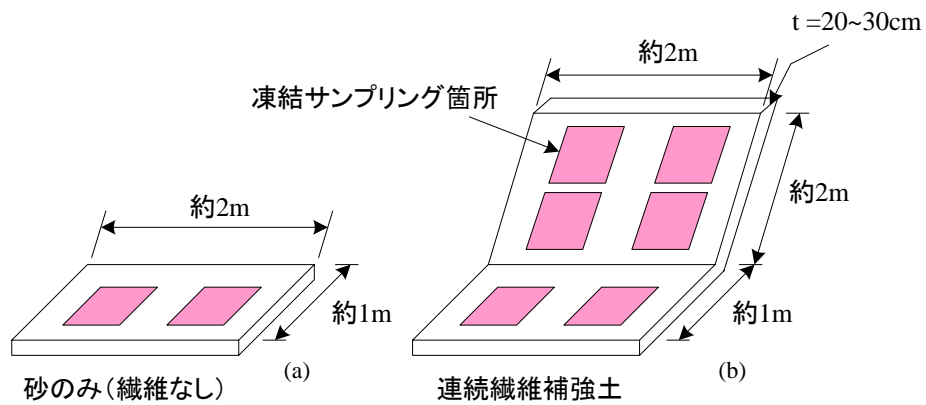


図-11 凍結サンプリング試験ヤード概要図 (a)砂のみ(繊維なし) (b)連続繊維補強土

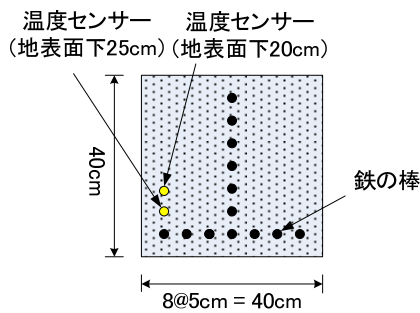


図-12 弟子屈での地盤凍結実験

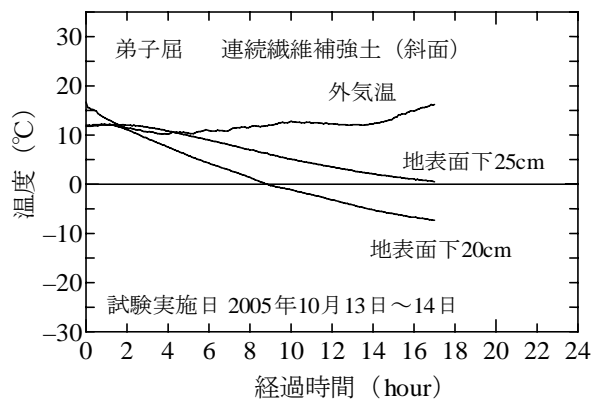


図-13 地中温度の経時変化

以上のことから、現場で地盤を凍結させる場合には水を十分に供給する必要があることと、熱伝導率の良い鉄の棒を設置して、少なくとも7時間以上放置することによって、地盤を凍結させることが可能であることがわかった。

#### 4.2 弟子屈町での凍結実験

北見工業大学内で行った地盤凍結実験から、ドライアイスの有効性が確認できたため、弟子屈町内の河川沿いの自然斜面に設けた試験ヤードにおいて、地盤凍結実験と試料のサンプリングを行った。現場の概略図を図-11に示している。弟子屈の実験では、実務で行うことを想定し、ドライアイス(20cm×20cm×10cm, 4枚)を夕方設置して、翌朝、試料のサンプリングを行った。

試験ヤードは、図-11(a)に示した砂のみを吹き付けた繊維の混入していない区間と、図-11(b)に示す連続繊維補強土(平面および斜面)の2区間である。凍結実験の概要を図-12に示した。学内での実験と同様に熱伝導率の良い鉄の棒を設置し、温度の測定については、温度センサーで測定し、データロガーでデータを記録した。地中の温度は地表面下20cmと25cmの温度を測定している。

図-13は地中温度の経時変化を示したものである。図より、地表面下20cmは8時間50分で0°Cになっている。実際の連続繊維補強土の厚さは20~30cmであるため、ドライアイスによる地盤の凍結は可能であることがわかる。次に、サンプラーによる試料の採取は、学内での実験では2~3分で試料を採取することができたが、弟子屈でのサンプリングは1本採取するのに約30分時間を要した。全部で3本の試料を採取したが、全て作業時間が長時間にわたったため、試料は摩擦熱で痩せ細り、乱れの少ない試料をサンプリングすることはできなかった。この原因として、現場の砂質土の粒径は粗く、ボーリングビットが摩耗し、サンプリングが困難であったことが挙げられる。試料の粒度分布を図-14に

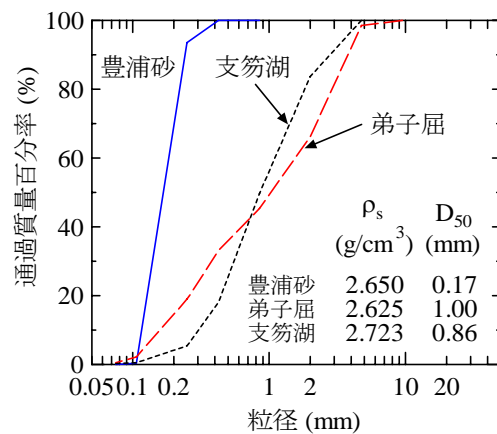


図-14 試料の粒度分布

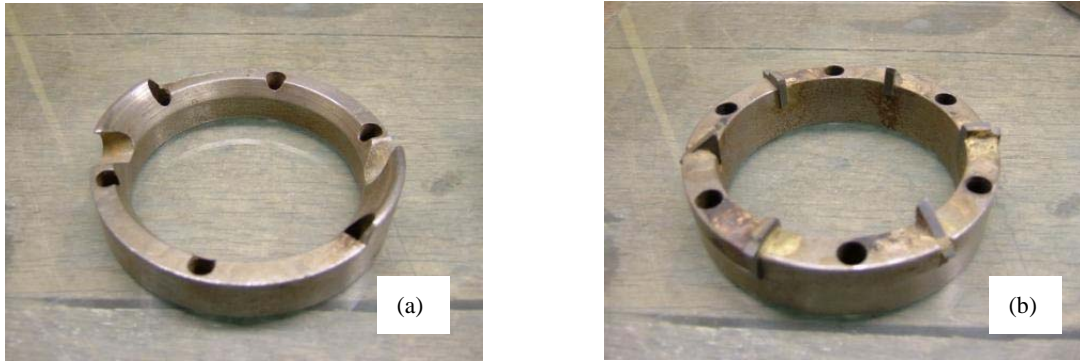


写真-2 ボーリングビットの改良 (a)改良前 (b)改良後

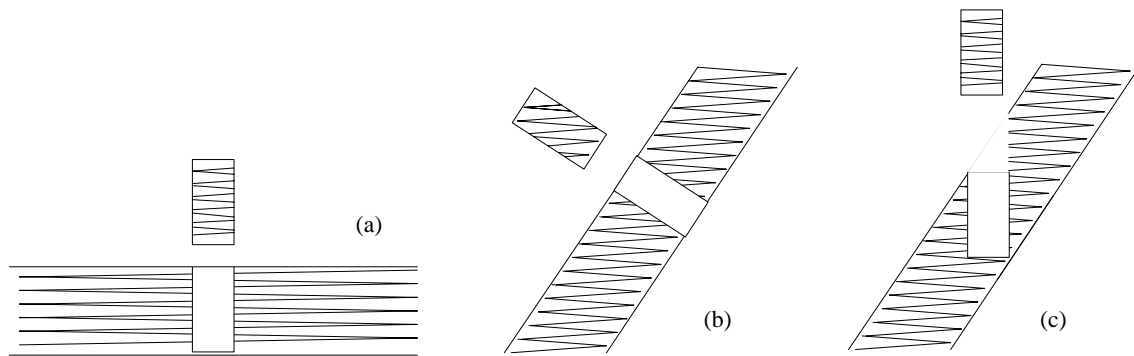


図-15 試料の採取方法 (a)平面 (b)斜面 A (c)斜面 B

示した。図のように弟子屈試料は粒径が大きく、平均粒径は 1mm であり、2mm 以上の礫が約 40% 含まれていることがわかる。以上の結果をふまえて、サンプラーのボーリングのビットを改良した。

これまでのビットの刃先は写真-2(a)に示す形状をしており、それを写真-2(b)のように改良した。刃先が摩耗しないよう超合金に換えて、再度、弟子屈の試験ヤードで凍結サンプリングを行った。この際、数多くのサンプルを採取するために、凍結を促進するための鋼鉄の棒を使用しなかった。

新しいビットで試料を採取した結果、前回使用した写真-2(a)のビットでは 1 本の試料を採取するのに約 30 分を要したが、改良したビットでは 5 分から 6 分で採取することが可能となり、刃先の摩耗はなかった。しかし、繊維が多く入っている部分で折れたサンプルがいくつかあった。

以上のことから、ビットの改良によって、作業時間が大幅に短縮され、折れたサンプルはいくつかあったが、室内試験に必要な試料を採取することが可能となった。また、凍結促進のために設置した鋼鉄の棒を設置しなくても、ドライアイスのみで十分地盤を凍結させることが可能であることがわかった。

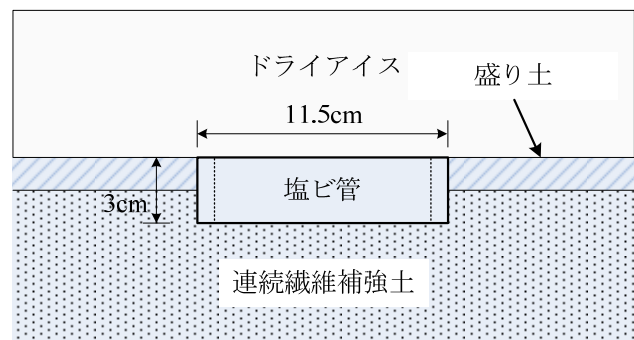


図-16 塩ビ管の設置

### 4.3 支笏湖畔での凍結実験

支笏湖畔の自然斜面に作製した弟子屈と同じ形状をした試験ヤードで地盤凍結実験および試料のサンプリングを行った。支笏湖の現場では、繊維の配向性が試験結果に及ぼす影響を調べるために、斜面に対して垂直に採取する方法（斜面 A）と、鉛直方向に採取する方法（斜面 B）で試料のサンプリングを行った。図-15 に試料の採取方法を示した。

支笏湖の凍結実験では、地盤を凍結する際に、ボーリング時の機械のぶれを防ぐ目的で塩ビ管をあらかじめ設置している。概要図を図-16 に示した。塩ビ管は外径 11.5cm、長さ 3cm である。図のように塩ビ管を設置した後、盛り土をして、水を十分含ませた後に、ドライアイス (25cm×25cm×7cm、4 枚) を設置している。

図-17 は地表面下 20cm の地中温度の経時変化を示したものである。図より、平面は 7 時間 40 分、斜面 A は 11 時間 15 分、斜面 B は 6 時間 50 分で凍結しており、2 面からドライアイスで凍結させた、斜面 B が一番早く凍結している。

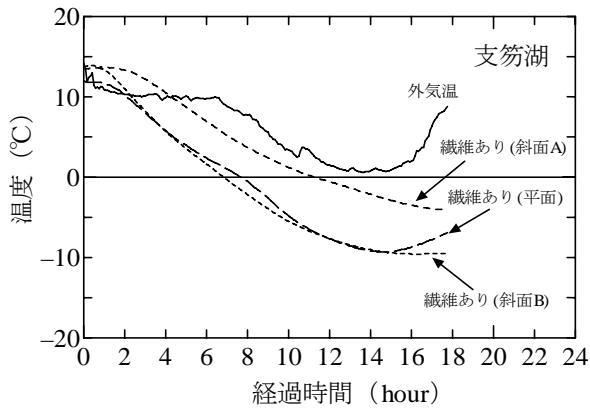


図-17 地表面下 20cm の温度の経時変化



写真-3 塩ビ管の設置とサンプリングの様子

また、斜面 A が凍結するのに 11 時間以上かかった理由として、塩ビ管の周りに盛り土をしているため、ドライアイスと地表面が密着しておらず、凍結に時間がかかったと考えられる。写真-3 は、塩ビ管の設置とサンプリングの様子を示したものである。

支笏湖でのサンプリングは、ボーリングビットの改良の効果で、試料のサンプリングにかかる時間は 5 分から 10 分程度で行うことができた。しかしながら、掘削時のサンプラーの機械のぶれや、機械自体のトルクが小さいため、試料によっては、サンプリングに時間がかかり、摩擦熱で痩せ細っているものや、ブレによる供試体の亀裂等、綺麗なサンプリング試料を採取することは困難であった。今後の課題として、ボーリング機械の固定、トルクの改善、ボーリングビットのさらなる改良が必要である。

## 5. 三軸試験結果

### 5.1 せん断強度の検証

図-18 および図-19 は、排水条件で行った三軸圧縮試験の結果を示したものである。図中には、繊維のない区間から採取した試料の結果と、繊維の混入している区間の平面から採取した試料および斜面に対して垂直に採取した試料（斜面 A）の結果を示している。図より、繊維の有無により結果は異なり、弟子屈試料の有効拘束圧 98kPa を除く全ての結果で、繊維が入っている試料の強度が高いことがわかる。また、繊維の入っている供試体の強度を比較すると、斜面に対して垂直に採取した試料に比べ、平面から採取した試料の強度が高いため、繊維の配向性が試験結果に影響を及ぼしていることが考えられる。

図-20 は、繊維の混入量を示したものである。図中の基準値 0.2% というのは、砂と繊維の割合を砂 1.0m<sup>3</sup>あたり繊維 3.3kg としたときの値である。算出方法は以下の通りである。

$$\text{基準値 (\%)} = \frac{\text{繊維 } 3.3 \times 10^3 \text{ (g)}}{\text{砂 } 1.0 \times 10^6 \text{ (cm}^3\text{)}} \div \text{供試体の平均乾燥密度 } \rho_{dave} \text{ (g/cm}^3\text{)} \times 100 \quad \dots (1)$$

上式によって求めた弟子屈試料と支笏湖試料の基準値はそれぞれ、0.188% と 0.190% であるため、両試料の基準値を 0.2% としている。弟子屈試料と支笏湖試料の結果を比較すると、弟子屈試料は基準値よりも繊維の混入量が少ないのに対して、支笏湖試料ではそのほとんどが基準値よりも混入量が多いことがわかる。弟子屈試料の結果を示した図では、サンプリング中に折れてしまい、三軸試験をすることができない小さな供試体の繊維混入量（×印）も示している。これをみると三軸試験に使用した供試体よりも繊維の混入率が高いことがわかる。これは、弟子屈供試体は繊維がやや不均質であったため、繊維の多く混入しているところで供試体は折れてしまい、三軸供試体の繊維の混入率は低く、それに対して、小さい試料では繊維の混入量が多くなったと考えられる。しかしながら、繊維の混入率が低い供試体であっても、十分に繊維の効果が現れていると言える。

### 5.2 降伏ひずみの検証

連続繊維補強土の長所の一つに、降伏ひずみの増大がある。図-21 はそれを検証したものである。図-21(a)に示した弟子屈試料の結果では、49kPa と 196kPa は繊維の混入している試料の降伏ひずみは大きい。また、図-21(b)に示した支笏湖試料の結果についても、49kPa では繊維の混入している試料の降伏ひずみは大きい。両試料とも低い拘束圧では、繊維の影響によって降伏ひずみが大きくなっていることがわかる。実地盤では拘束圧が低いため、繊維の効果によって、降伏ひずみは増大すると考えられる。

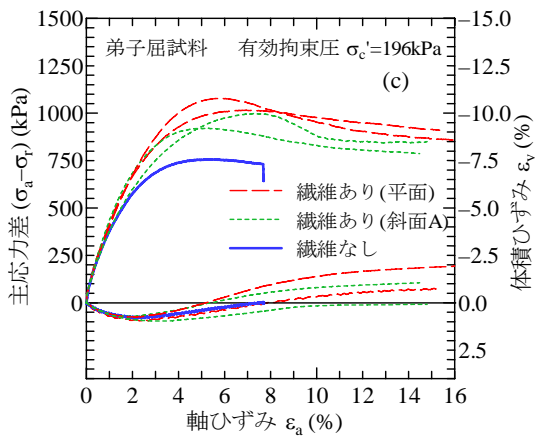
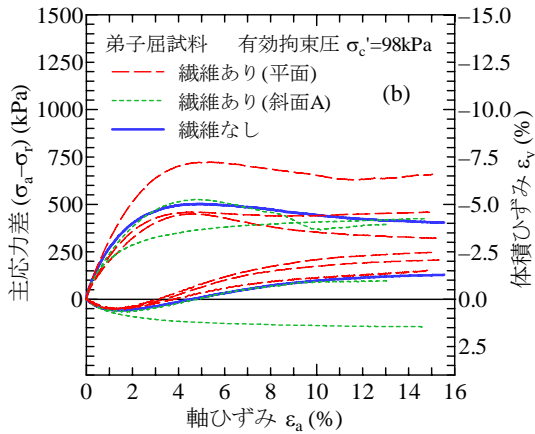
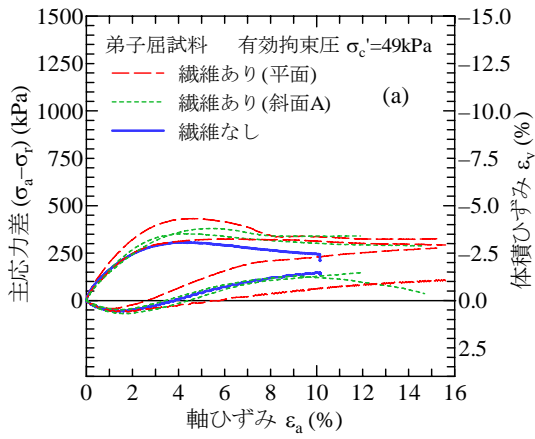


図-18 弟子屈試料の応力-ひずみ図  
(a)49kPa (b)98kPa (c)196kPa

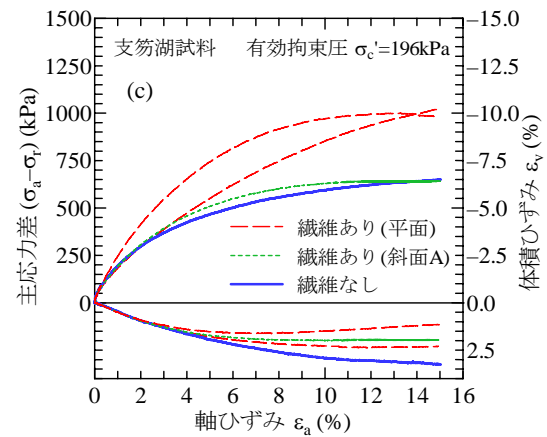
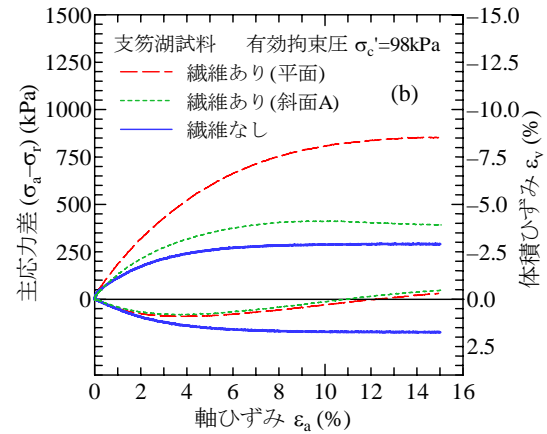
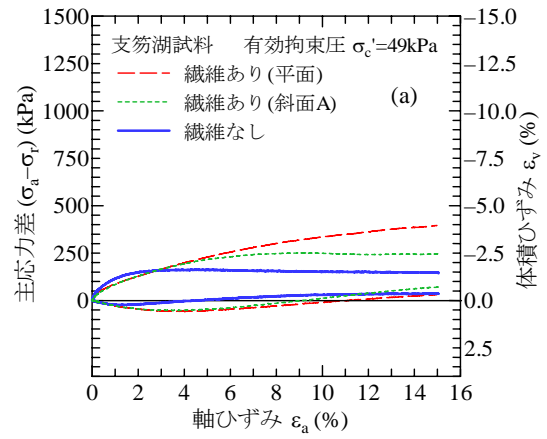


図-19 支笏湖試料の応力-ひずみ図  
(a)49kPa (b)98kPa (c)196kPa

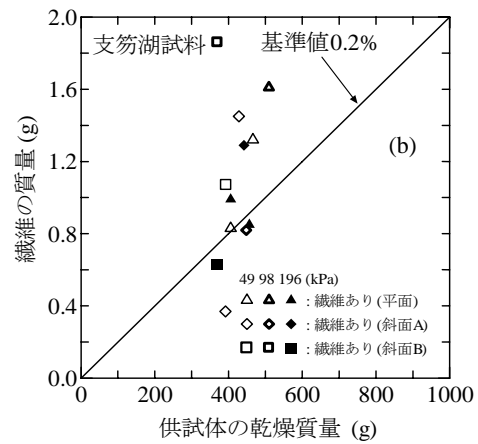
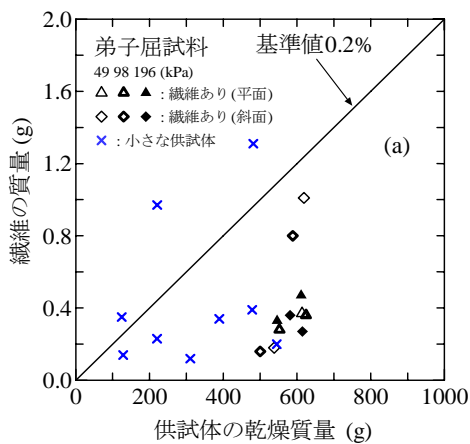


図-20 繊維の混入量 (a)弟子屈 (b)支笏湖

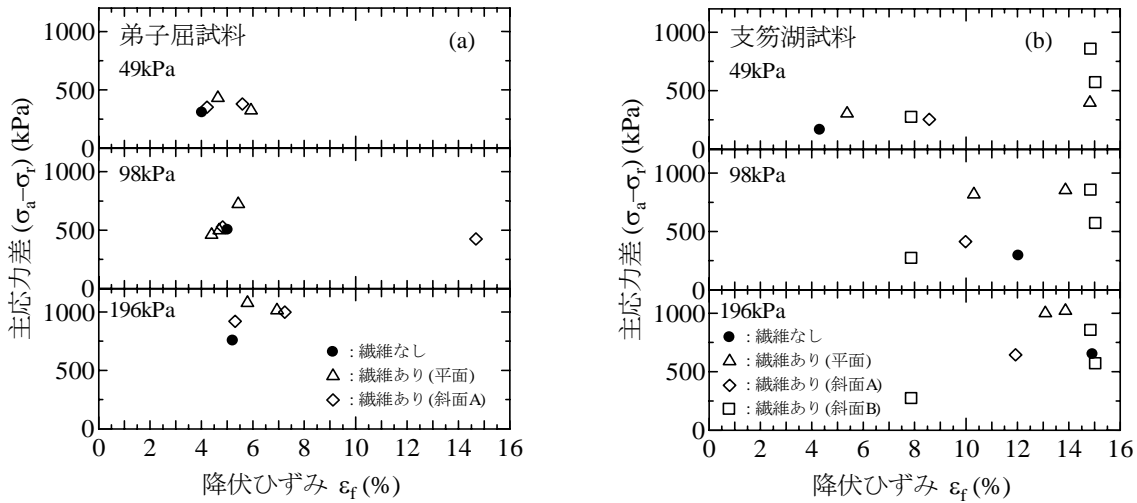


図-21 主応力差と降伏ひずみの関係 (a)弟子屈 (b)支笏湖

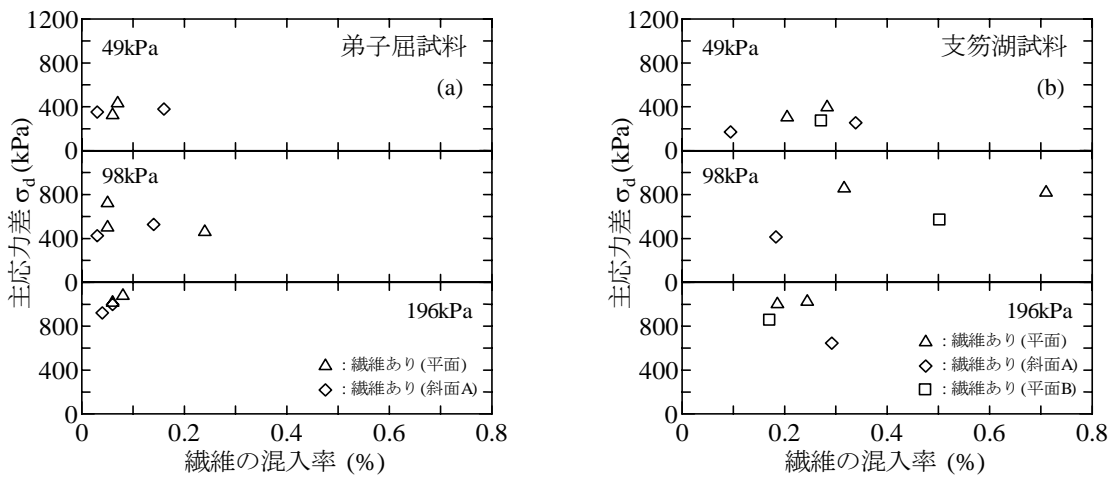


図-22 繊維の混入率と主応力差の関係 (a)弟子屈 (b)支笏湖

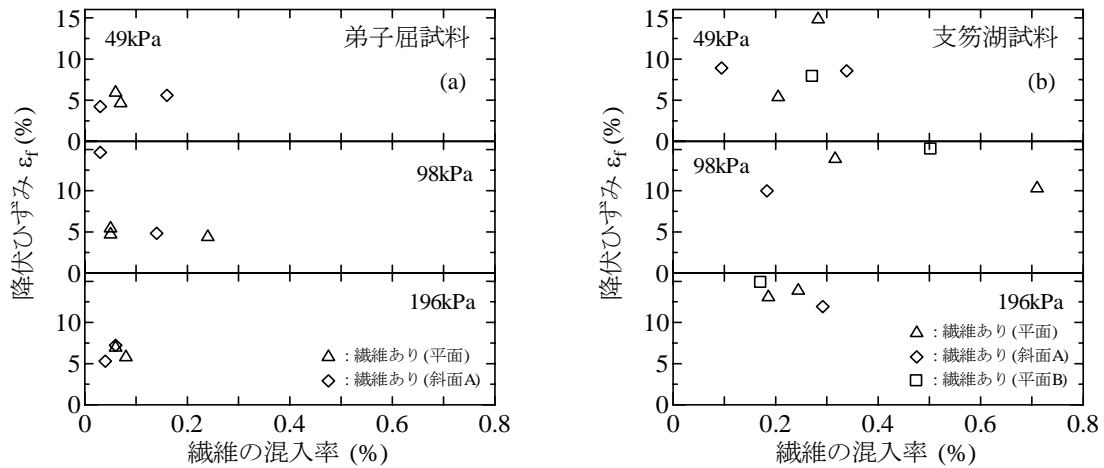


図-23 繊維の混入率と降伏ひずみの関係 (a)弟子屈 (b)支笏湖

### 5.3 繊維混入率が試験結果に及ぼす影響

繊維の混入率が主応力差と降伏ひずみに与える影響を調べたものを、図-22 および図-23 にそれぞれ示した。繊維の混入率と主応力差との関係を示した図-22 では、各応力で比較すると、多少ばらつきはあるものの、両試料とも混入率の増加に伴い、主応力差も大きくなっている。一方、繊維の混入率と降伏ひずみの関係を示した図-23 では、先程と同様に試験結果にばらつきはあるが、繊維の混入率と降伏ひずみには相関関係があることがわかる。以上のことから、繊維の混入率が大きい場合、せん断強度と降伏ひずみが大きくなることが明らかになった。



### 5.4 擬似粘着力付与の検証

連続繊維補強土には擬似粘着力の付与の効果がある。本稿では、地盤工学会の土質試験の方法と解説に掲載されている、圧縮強さと圧縮応力から粘着力を求めた<sup>3)</sup>。この方法は、縦軸に圧縮強さ、横軸に圧密応力をプロットし、最小二乗法によって直線近似する。その直線の勾配 $m_0$ と縦軸切片 $f_0$ を求めて、次式で $\phi_d$ および $c_d$ を求めるものである。求めた $\phi_d$ および $c_d$ を表-1 および表-2 に示した。

$$\phi_d = \sin^{-1}(m_0 / (2 + m_0)) \quad \dots (2)$$

$$c_d = f_0 / \sqrt{1 + m_0} \quad \dots (3)$$

弟子屈試料の結果では、繊維の混入して

いる試料の内部摩擦角は大きい。しかし、粘着力については繊維のない方が大きな値となっている。これは、弟子屈試料は繊維の混入率が低いためであると考えられる。それに対して、支笏湖試料の結果では、繊維の有無による内部摩擦角に大きな差はないものの、粘着力は繊維の影響によって大きくなっていることがわかる。このことから、繊維の混入量が施工基準を満たしている場合、擬似的な粘着力が付与されることがわかった。

### 5.5 繊維の配向性が試験結果に及ぼす影響

繊維の配向性が試験結果に与える影響を調べるために、斜面に対して垂直に採取した試料（斜面 A）と鉛直方向に採取した試料（試料 B）の結果を比較したものを図-24 に示した。図より、有効拘束圧 49kPa では、試験結果に差は見られない。しかし、有効拘束圧 98kPa と 196kPa では、斜面 A に比べ斜面 B のせん断強度が大きい。すなわち、繊維が斜め方向に入っているものに比べ、水平に繊維が入っている方がせん断強度が大きい結果であった。これは、せん断が進行する際に繊維の方向とほぼ平行にせん断帯が形成され、それによって繊維の効果が小さくなり、結果的に強度が小さくなったことが考えられる。写真-4 は、斜面 A の三軸試験後の供試体を半分に分割したものである。写真を見てわかるとおり、繊維が斜めに入っていることがわかる。

表-1 弟子屈試料の $\phi_d$ と $c_d$

弟子屈試料	$m_0$	$f_0$	$\phi_d (^\circ)$	$c_d$ (kPa)
繊維なし	2.9918	179.69	36.82	44.97
繊維あり(平面)	4.6208	129.80	44.26	27.37
繊維あり(斜面A)	4.1618	124.62	42.49	27.43

表-2 支笏湖試料の $\phi_d$ と $c_d$

支笏湖試料	$m_0$	$f_0$	$\phi_d (^\circ)$	$c_d$ (kPa)
繊維なし	3.3564	-14.22	38.80	-3.41
繊維あり(平面)	4.1113	262.80	42.28	58.12
繊維あり(斜面A)	3.2326	32.70	38.15	7.95
繊維あり(斜面B)	3.8188	127.74	41.02	29.10

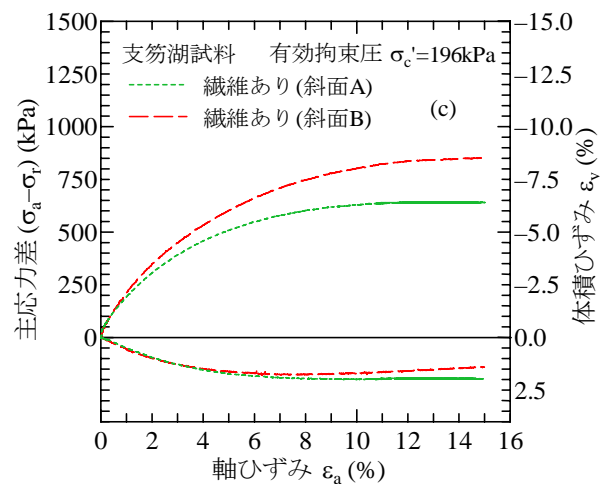
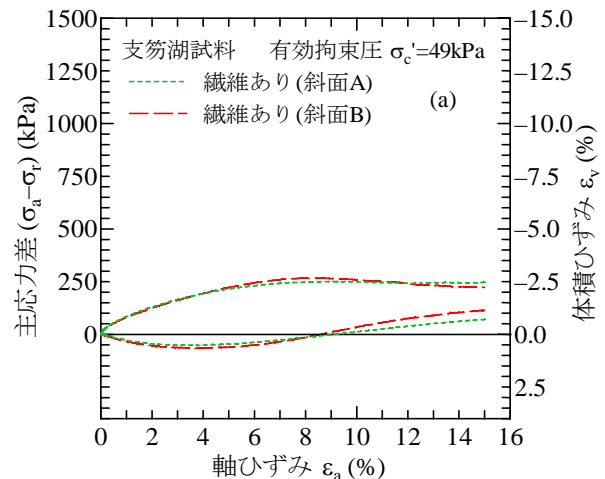
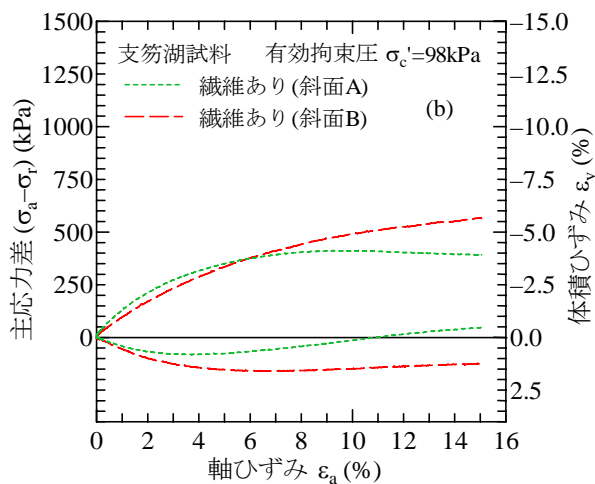


図-24 繊維の配向性が試験結果に与える影響  
(a)49kPa (b)98kPa (c)196kPa

以上のことから、繊維の配向性が試験結果に影響を及ぼすことが明らかになった。

## 6. 結論

- (1) 北見工業大学学内および現場で行った試験結果より、ドライアイスを用いて地盤を凍結させる方法は有効であることがわかった。また、地盤が凍結するためには12時間放置する必要がある。
- (2) ロータリー式のサンプラーによって試料を採取した結果、作業時間の遅延や機械のぶれによって、試料の痩せ細りや亀裂が生じた。これは、ハンドボーリングの機械を固定していないことや、トルクが小さいこと、ボーリングビットの改良が必要であるという問題がある。今後、乱れの少ないサンプリングをするためには、これらの課題の検討が必要である。
- (3) 室内での三軸試験の結果から、繊維の混入により、せん断強度および降伏ひずみの増大、擬似粘着力の付与の効果を確認することができた。また、繊維の配向性が試験結果に及ぼすことが明らかになった。
- (4) ドライアイスを用いて地盤を凍結させることで、試料を採取することが可能になり、三軸試験や繊維の混入量および配向性の確認をすることができる。以上のことから、ドライアイスを用いた連続繊維補強土の品質管理手法の確立は可能であると考えられる。



写真-4 斜面 A の繊維の方向性

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、佐藤伸一君（北見工業大学4年）の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) ジオファイバー協会.: ジオファイバー工法 設計・施工の手引き（第5版）, 2004.
- 2) ジオファイバー研究会：ジオファイバー工法 一連続繊維補強土を用いた複合補強土工法一
- 3) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），pp.490, 2000.