

# 難風化酸性硫酸塩土壌の中和緑化技術に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：資源保全チーム

研究担当者：横濱充宏、松田俊之、中谷壮範  
酒井美樹、山本弘樹、田中稔

## 【要旨】

酸性硫酸塩土壌は、パイライト (FeS<sub>2</sub>)、硫化鉄 (FeS) など容易に酸化して硫酸に変化する物質ならびに硫酸を含有し、これらが原因となって強酸性 (pH3.5 以下) を呈する土壌である。大規模な切土工事を行った場合、地中深くに埋没していた酸性硫酸塩土壌が露出する恐れがある。このような切土法面を緑化した場合、植物が酸による被害を受けることになる。したがって、酸性硫酸塩土壌が露出した切土法面に植物を定着させる場合、酸による害から植物を保護する対策が必要である。資源保全チームは、1997 年に酸性硫酸塩土壌が露出した切土法面の低コスト緑化工法として、中和緑化工法を開発した。その後、中和緑化工法の施工実績がある天塩町、遠別町および北斗市の全施工地点において、施工後長期間が経過した切土法面で植物の繁茂状況の調査を行ったところ、一部の施工区域では、ラス金網の腐食破断による植生基材吹付層の剥落が発見された。剥落の原因は、植物根が伸長できるような亀裂が ASS 層表層に発達せず、ラス金網の腐食破断前に植物根が植生基材吹付層を ASS 層に固定できなかったためであった。

本研究では、堅硬で亀裂の発達が困難な難風化酸性硫酸塩土壌の露出した切土法面に適応した中和緑化工法を開発するため、①、②および③の項目を実施して以下の成果を得た。

### ① 難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準の確立

難風化酸性硫酸塩土壌と易風化酸性硫酸塩土壌の判断基準には、道路土工で用いられている硬岩 (硬岩、中硬岩) と軟岩 (軟岩 I、軟岩 II) の分類基準が適用可能であることを明らかにして、難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準を確立した。

### ② 難風化酸性硫酸塩土壌に対する中和緑化工法の確立

難風化酸性硫酸塩土壌の露出した切土法面においても、植生基材吹付層が剥落せず、植生を成立させる条件を明らかにした。施工対象の酸性硫酸塩土壌の亀裂の発達度合いに応じて、植生基材吹付層の厚さを 4cm～10cm とし、施工地の最大積雪深に応じた植生ネットあるいは落石防止ネットの選定基準を確立した。

### ③ 酸性硫酸塩土壌に対する新たな中和緑化工法適用基準の提案

上述の①②の成果を用いて、従来型の中和緑化工法および本研究で開発した改良型中和緑化工法の選定フローを提案した。

キーワード：酸性硫酸塩土壌、中和緑化工法、道路土工、硬岩、植生ネット、落石防止ネット、最大積雪深

## 1. はじめに

酸性硫酸塩土壌 (以下、ASS) は、パイライト (FeS<sub>2</sub>)、硫化鉄 (FeS) など容易に酸化して硫酸に変化する物質 (以下、易酸化性硫黄) ならびに硫酸を含有し、これらが原因となって強酸性 (pH3.5 以下) を呈する土壌である<sup>1)</sup>。北海道の ASS は、大部分が現世、洪積世および第三紀の海成堆積物層の泥岩、頁岩あるいは粘土から見出されている。また、安山岩が熱水変質作用により粘土化した変質安山岩や火山砕屑物に由来する火山性の ASS も発見されている<sup>2)</sup>。

大規模な切土工事を行った場合、地中深くに埋没し

ていた ASS が露出する恐れがある。このような切土法面を緑化した場合、植物が酸による被害を受けることになる。したがって、ASS が露出した切土法面に植物を定着させる場合、酸による害から植物を保護する対策が必要である。資源保全チーム (旧北海道開発局開発土木研究所土壌保全研究室) は、1997 年に ASS が露出した切土法面の低コスト緑化工法として、中和緑化工法を開発した<sup>3)</sup>。この工法は、植生基材吹付工法の一つであり、厚さ 5cm の植生基材吹付層と切土基盤との間に、炭酸カルシウム、粘着剤、バーク堆肥および客土材を混和した厚さ 1.3cm の炭カル吹付層を挟み

せるものである。

資源保全チームは、中和緑化工法の施工実績がある天塩町、遠別町および北斗市の全施工地点において、施工後長期間が経過した切土法面で植物の繁茂状況の調査を行った。その結果、一部の施工区域では、ラス金網の腐食破断による植生基材吹付層の剥落が発見された。剥落の原因は、植物根が伸長できるような亀裂がASS層表層に発達せず、ラス金網の腐食破断前に植物根が植生基材吹付層をASS層に固定できなかつたためであった<sup>4)</sup>。

そこで、本研究では、このように堅硬で亀裂の発達が困難な難風化ASSの露出した切土法面においても植生基材吹付層が剥落しない中和緑化工法を開発するため、下記の項目を実施した。

- ①難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準の確立
- ②難風化酸性硫酸塩土壌に対する中和緑化工法の確立
- ③酸性硫酸塩土壌に対する新たな中和緑化工法適用基準の提案

本報告書はこれらの実施項目の成果について報告するものである。

## 2. 難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準の確立

### 2.1 目的

ASSが露出した切土法面に対して、適切な緑化施工を行うためには、露出したASSが難風化ASSであるか易風化ASSであるかを判断する必要がある。そこで、北海道各地のASSについて性状の調査を行い、難風化ASSと易風化ASSの判断基準を確立する。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 調査地の概要

ASSの性状調査を行うため、18市町村(図-1)の31地点82カ所を選定した。これらの調査地点の地質は、北海道立地下資源調査書発行の5万分の1地質図幅によると表-1の通りである。

このうち、天塩町、遠別町、苫前町、北斗市および木古内町の調査地点では、1992年から2008年にかけて、中和緑化工法で、切土法面に露出したASSに対する緑化施工がなされている。この5地点のうち、天塩町(写真-1)および北斗市(写真-2)の施工地点では、植物が正常に繁茂している。一方、遠別町(写真-3)、苫前町(写真-4)および木古内町(写真-5)の施工地点では、植生基材吹付層の剥落が認められる。

#### 2.2.2 調査内容

海成堆積層のASSに中和緑化工法で施工した切土法面における植生基材吹付層剥落の原因は、ASS層にお



図-1 調査地点

表-1 調査地点の概要

調査地点	地質年代		層名	岩種	状態	植生基盤の状態	調査力所数
	紀	世					
天塩町	新第三紀	中新世	遠別層	泥岩ASS	中和緑化工法法面	剥離なし	3
遠別町	新第三紀	中新世	東野層	頁岩ASS	中和緑化工法法面	剥離あり	6
遠別町	新第三紀	中新世	遠別層	泥岩ASS	中和緑化工法法面	剥離なし	7
遠別町	第四紀	更新世	沼川層	粘土	通常緑化工法法面	剥離なし	1
苫前町	新第三紀	中新世	遠別層	泥岩ASS	中和緑化工法法面	剥離あり	2
苫前町	新第三紀	中新世	古丹別層	泥岩	通常緑化工法法面	剥離なし	3
浜頓別町	第四紀	更新世	ホニチタナイ層	粘土	通常緑化工法法面	剥離なし	3
音威子府村	白堊紀	-	西知良志内層	頁岩	通常緑化工法法面	剥離なし	4
西興部村	先第三紀	-	上興部層	粘板岩	通常緑化工法法面	剥離なし	4
北斗市	新第三紀	中新世	伊田川層	頁岩ASS	中和緑化工法法面	剥離なし	1
木古内町	新第三紀	中新世	木古内層	頁岩ASS	中和緑化工法法面	剥離あり	1
新ひだか町	新第三紀	中新世	西川層	泥岩	通常緑化工法法面	剥離なし	1
稚内市	新第三紀	中新世	稚内層	頁岩ASS	露頭	1	1
稚内市	新第三紀	中新世	稚内層	頁岩	露頭	1	4
豊富町	新第三紀	中新世	稚内層	頁岩	露頭	1	9
豊富町	新第三紀	中新世	稚内層	泥岩	露頭	1	1
豊富町	第四紀	更新世	更別層	粘土ASS	露頭	1	1
遠別町	新第三紀	中新世	古丹別層	頁岩ASS	露頭	1	1
浜頓別町	ジュラ紀	-	豊稔別層	粘板岩	露頭	3	3
浜頓別町	新第三紀	中新世	17層川層	頁岩	露頭	1	1
西興部村	先第三紀	-	フェニソ層	粘板岩	露頭	1	6
美深町	新第三紀	中新世	上雄武層	頁岩	露頭	1	1
札幌市	新第三紀	中新世	豊潤層	安野山岩ASS	露頭	1	1
小樽市	新第三紀	中新世	祝津安野山岩層	安野山岩ASS	露頭	1	1
蘭越町	新第三紀	中新世	賀老山安野山岩層	安野山岩ASS	露頭	1	1
島牧村	先第三紀	-	砂質粘板岩層	粘板岩ASS	露頭	1	1
八雲町	新第三紀	中新世	八雲層	頁岩	露頭	1	1
北斗市	新第三紀	中新世	伊田川層	頁岩ASS	露頭	1	1
新ひだか町	先白堊紀	-	イドンナ層	粘板岩	露頭	5	5
新ひだか町	新第三紀	中新世	西川層	泥岩	露頭	1	1
えりも町	先白堊紀	-	白鳥層群	頁岩	露頭	1	82

いて亀裂が発達せず、植物根がASS層へ伸長できなかったことにあった<sup>4)</sup>。岩石には、スレーキングと呼ばれる乾湿の繰り返しの形態を変化させる性質がある<sup>5)</sup>。岩石の形態変化は、亀裂が少数発達する程度から岩石が泥状に完全崩壊するまで多岐にわたる<sup>6)</sup>。岩石は、膨潤性粘土含量が大きいほどスレーキングしやすい<sup>5)</sup>。よって、スレーキングし難いASSほど、亀裂が発達し難いと予想される。

また、植物根の伸長は土壌の硬さの影響を受ける<sup>7)</sup>。よって、堅密なASSほど、植物根が伸長し難いと予想される。

泥岩は、海底などに堆積した非固結の泥層あるいはシルト層が地殻変動によって陸化し、上部の堆積物によって圧力を受け、年数の経過とともに固結したものである。頁岩および粘板岩は、泥岩が更なる高温・高圧条件のもとに置かれて、鉱物が層理面に平行に配列



写真-1 天塩町の中和緑化工法施工地点



写真-2 北斗市の中和緑化工法施工地点



写真-3 遠別町の中和緑化工法施工地点



写真-4 苫前町の中和緑化工法施工地点



写真-5 木古内町の中和緑化工法施工地点

してへき開面が発達したもので、粘土や泥岩に比べて固結度が高い<sup>8)</sup>。

これらを考慮の上、2019年度は難風化 ASS の判断基準として有力と考えられる地質区分、硬度およびスレーキング特性を7市町で調査した。その結果、頁岩では植生基材吹付層の剥離が認められ、硬度が大きく、それ以外の地質区分では、植生基材吹付層の剥離が認

められず、硬度が小さかった。このことから、難風化 ASS の判断基準として、地質区分あるいは硬度が利用可能であることが示唆された<sup>9)</sup>。

そこで、ASS が過去に発見されている、あるいは、発見される可能性のある地質区分の法面緑化工法施工法面あるいは露頭を選択し、亀裂の発達程度や風化の状況を確認した。また、その切土法面基盤の硬度を地盤工学会基準岩盤のシュミット式ハンマー試験方法 JGS3411-2012 によって測定した。

## 2.3 結果および考察

### 2.3.1 植生基盤剥落と硬度との関係

中和緑化工法が施工された ASS 切土法面の植生基材吹付層の剥落の有無と切土法面基盤のシュミット式ハンマー反発度の関係を図-2 に示す。

植生基材吹付層の剥落が確認された切土法面基盤の

シュミット式ハンマー反発度は、剥落が認められなかった場合に比べ、t検定の結果、危険率1%水準で有意に大きかった。このことから、難風化ASSと易風化ASSは、切土法面基盤のシュミット式ハンマー反発度の値によって区別可能と判断された。

道路土工においては、岩質の硬さ、風化程度、亀裂発達の度合い、弾性波速度等によって硬岩（硬岩、中硬岩）と軟岩（軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ）を区分しており、硬岩と軟岩で施工方法や法面勾配を変更している<sup>10,11)</sup>。また、シュミット式ハンマー反発度による岩の分類法も提案されている<sup>12)</sup>。このシュミット式ハンマー反発度による岩の分類区分を図-2に示したが、厚層基材吹付層の剥落が認められた切土法面基盤は硬岩に、剥落が認められない切土法面基盤は軟岩に区分された。このことから、難風化ASSは硬岩に、易風化ASSは軟岩に区分されることが分かった。

### 2.3.2 地質区分と硬度との関係

各調査カ所の地質区分とシュミット式ハンマーの反発度との関係を図-3に示す。各地質区分のうち、シュミット式ハンマー反発度の値が泥岩では軟岩Ⅰから中

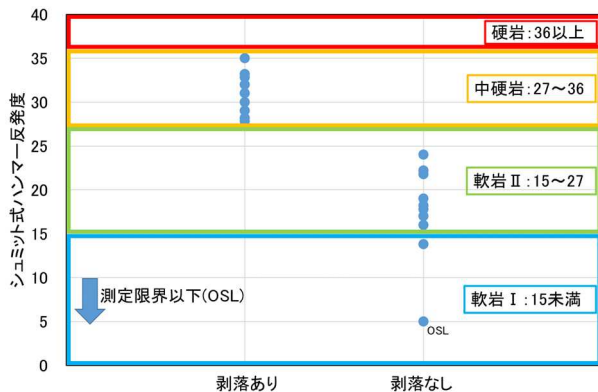


図-2 従来の中和緑化工法を施工したASS基盤の硬度

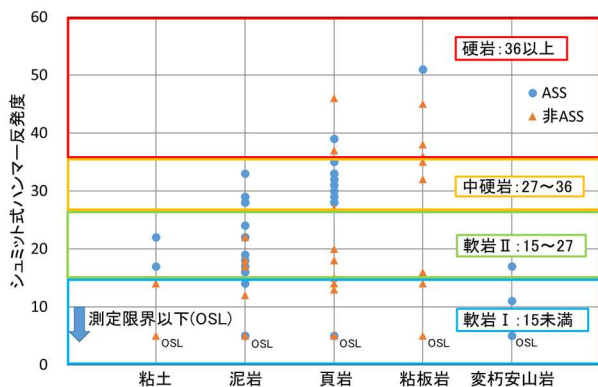


図-3 各地質区分の硬度

硬岩に、頁岩および粘板岩では軟岩Ⅰから硬岩に及んでおり、これらの地質区分の場合、地質区分によって難風化ASSと易風化ASSを区分できないことが分かった。

### 2.3.3 難風化ASSの判断基準

以上の結果から、難風化ASSと易風化ASSの判断基準として、道路土工で用いられている硬岩（硬岩、中硬岩）と軟岩（軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ）の分類基準を用いればよいことが明らかとなった。

### 2.4 小括

難風化ASSと既往の中和緑化工法の施工対象となる易風化ASSの判断基準の確立を目指して、北海道各地のASSが出現した、あるいは、出現可能性のある地質区分において、性状の調査を行った。

その結果、難風化ASSと易風化ASSの判断基準には、道路土工で用いられている硬岩（硬岩、中硬岩）と軟岩（軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ）の分類基準を適用可能であることが分かった。

## 3. 難風化酸性硫酸塩土壌に対する中和緑化工法の確立

### 3.1 目的

堅硬で亀裂の発達が困難な難風化ASSの露出した切土法面に適応した緑化工法の開発を目的として試験施工を行い、難風化ASSの露出した切土法面においても、植生基材吹付層が剥落せず、植生を成立させる条件を明らかにする。

### 3.2 試験施工の概要

#### 3.2.1 対象法面

試験施工は、遠別町の難風化ASSの切土法面を対象とした（写真-6）。この法面は、2003年度に中和緑化工法が施工された。この工法は、植生基材吹付工法の一つであり、厚さ5cmの植生基材吹付層とASSが露出した切土法面の間に、炭酸カルシウム、粘着剤、パーク堆肥および客土材を混和した厚さ1.3cmの炭カル吹

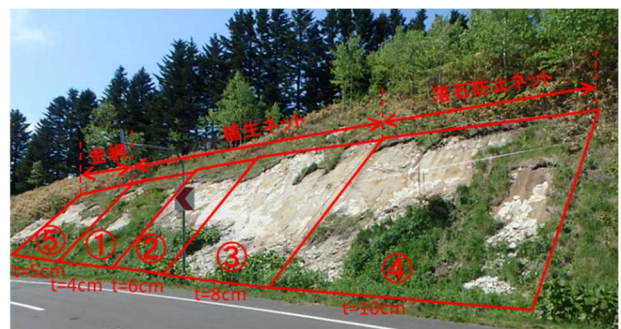


写真-6 試験施工の対象法面

付層を挟在させるものである（図-4）。その後、2018年の追跡調査により、本研究において、試験施工を行ったこの法面で植生基材吹付層の剥落が確認されている<sup>4)</sup>。

この地点の地質は、既往の調査結果によると新第三紀東野層下部泥岩層で、岩種は頁岩である<sup>5)</sup>。

### 3.2.2 植生基材吹付層の厚さの設定

難風化 ASS は、堅硬で亀裂の発達が困難であるため、根系が伸長し難い。このため、植物は難風化 ASS 層から水分を吸収できず、植生基材吹付層のみから水分を吸収しなければならない。そこで、植物の生育に必要な水分を供給できる植生基材吹付層の厚さを把握するため、厚さが 4cm、6cm、8cm、10cm の試験区を設定した。なお、道路土工一切土工・斜面安定工指針では、植生基材吹付層の厚さの最大値は 10cm である<sup>13)</sup>。

対照区は、従来の中和緑化工法と同じ厚さの 5cm に設定した。

### 3.2.3 剥落防止資材の選定

従来の中和緑化工法は、緑化基礎工として菱形金網（亜鉛メッキ φ2(#14)50mm×50mm、引張強度 1,700(N)、単価 300 円/㎡）を併用していた。これは、植生基材吹付層の剥落を防止する補助材（以下、剥落防止資材）であり、根系が発達して地山に活着すれば、その必要性は低くなる<sup>14)</sup>。しかし、難風化 ASS の切土法面では、根系が地山に活着できず、菱形金網が硫酸に侵されて腐食破断し、植生基材吹付層の剥落が確認されている。このため、改良型中和緑化工法では、従来の菱形金網の代替として耐腐食性の剥落防止資材を選定することとした。

剥落防止資材は、植生基材吹付層の重量から剥落防止資材にかかる引張り力を計算した上で、安全率 1.5 を乗じ、その値 a と剥落防止資材の引張り試験結果の数値 b を比較し、 $a < b$  となるものを選定した。その結

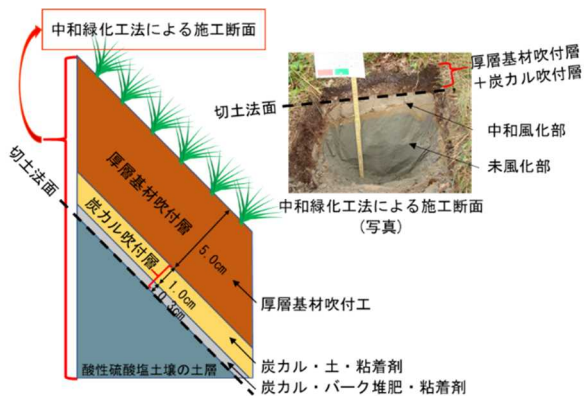


図-4 従来の中和緑化工法の施工断面模式図

果、厚さが 4cm、6cm、8cm の試験区では植生ネット（規格 P20S、ポリエチレン製、引張強度 710(N)、単価 240 円/㎡）、厚さが 10cm の試験区では落石防止ネット（規格 P44L、ポリエチレン製、引張強度 1,780(N)、単価 440 円/㎡）とした。

対照区は、従来の中和緑化工法と同じ菱形金網を選定した。

### 3.2.4 試験施工の実施

試験区と対照区の概要を表-2 に、施工断面標準図を図-5 に示す。法面勾配は 1:1 である。

緑化目標の群落は草地型で、吹付種子は、トールフェスク、クリーピングレッドフェスク、ケンタッキーブルーグラスの 3 種を混合した。植生基材吹付層の体積あたりの種子使用量は、全ての区で同じとした。

試験施工は 2020 年 4 月に着手し、9 月に完了した。植生基材吹付完了後の状況を写真-7 に示す。

表-2 試験区と対照区の概要

名称	厚層基材吹付層の厚さ	緑化基礎工(剥落防止資材)	備考
試験区①	t=4cm	植生ネット	改良型中和緑化工法
試験区②	t=6cm	植生ネット	改良型中和緑化工法
試験区③	t=8cm	植生ネット	改良型中和緑化工法
試験区④	t=10cm	落石防止ネット	改良型中和緑化工法
対照区⑤	t=5cm	菱形金網	従来型中和緑化工法

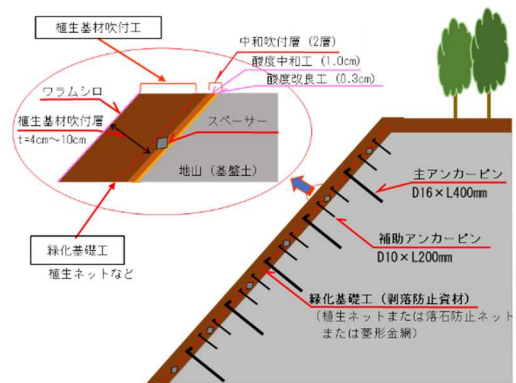


図-5 改良型中和緑化工法 施工断面標準図

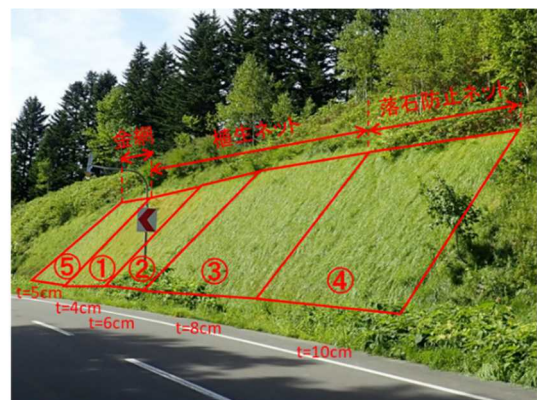


写真-7 植生基材吹付完了後の状況(2020年8月31)

### 3.2.5 試験用アンカーピンおよび剥落防止材の施工後経年劣化の確認

中和緑化工法の施工に用いられるアンカーピンおよび剥落防止材の経年劣化状況を確認するため、緑化工法施工のために必要なアンカーピンおよび剥落防止材の他に、4cm、6cm、8cm、10cm および対照区の一部領域に、試料採取のための試験用アンカーピン（D10×L200mm、D14×L200mm、D16×L400mm、D19×L400mm）および試験用剥落防止材（植生ネット（P20S）、落石防止ネット（P44L）および菱形金網（亜鉛メッキ φ2（#14）50mm×50mm））を施工した。

## 3.3 試験施工後のモニタリング調査

### 3.3.1 着目点

試験施工後のモニタリング調査は、次の3点に着目した。

1 点目は、剥落防止資材が破断せずに植生基材吹付層が剥落せず維持されているかという点である。通常の方法面緑化工法および従来の中和緑化工法の場合、剥落防止資材として菱形金網が使用されている。通常の方法面緑化工法および従来の中和緑化工法の場合、植物根は速やかに地山の亀裂内に伸長して植生基盤が地山に活着する。このため、菱形金網は、植生基盤が植物根が地山の亀裂内に十分伸長するまで強度を保てば良い。しかし、難風化 ASS での中和緑化工法の場合、地山の亀裂の発達とその亀裂への速やかな植物根の伸長は期待できない。よって、難風化 ASS に対する中和緑化工法に用いられる植生ネットおよび落石防止ネットには、ある程度長期間の強度の保持が求められる。それゆえ、積雪がある北海道では、冬期間に積雪荷重が加わることによる剥落防止材の破断が生じないかどうかの確認が必要となる。このことから、積雪荷重および剥落防止材の破断による植生基材吹付層の剥離の有無を確認することとした。

2 点目は、植生基材吹付層が植物に必要な保水力を有し、植生を成立させているかという点である。そのため、植生基材吹付層の土壤水分と植物の生育状況を把握し、植生状況を確認することとした。

3 点目は、施工に用いたアンカーピンおよび剥落防止材の経年劣化の懸念である。そこで、これらの経年劣化の有無を確認するため、アンカーピンおよび剥落防止材の強度試験を行うこととした。

### 3.3.2 方法

#### 3.3.2.1 気象

気象状況は植物の生育状況に影響を与えるため、2020年（試験施工年）と2021年（試験施工後1年目）

の5月から10月の降水量および気温をアメダス遠別地点の観測データにより把握した。

#### 3.3.2.2 積雪荷重と引張力

積雪荷重を考慮した剥落防止資材にかかる引張力  $a'$  を計算するために、積雪密度と積雪深を測定し、それらの積により積雪荷重  $W_s$  を算出した。積雪密度と積雪深は、2020年12月23日、2021年1月25日、2月25日、2022年1月27日、2月24日に積雪が平均的な地点において5~8反復で測定した。積雪密度は、スノーサンプラーで採取した積雪試料の重量を計量し、体積で除して算出した。積雪深は、スノーサンプラーで積雪試料を採取する際に測定した。

摩擦力を考慮しない引張力  $a'$  は、アンカーピン1地点にかかる最大の単位面積すなわち補助アンカーピンで囲まれた単位面積  $A$ （図-6）の厚層基材吹付層の重量  $W_k$  と積雪荷重  $W_s$  から計算した。

$$a' = ((W_k + W_s) \times g) / \sqrt{2}$$

$g$  : 重力加速度

また、融雪後の剥落防止資材と植生基材吹付層の状態の確認は、2021年4月26日および2022年3月22日に目視で行った。

#### 3.3.2.3 土壤水分

植生基材吹付層が保持する水分量を把握するため、植物の生育期間中に植生基材吹付層の体積含水率を測定した。体積含水率は、各区の中心付近の高さ1.2mの1地点において、植生基材吹付層の最深部に土壤水分センサー（SM150T、日本環境計測（株））を設置し、10分間隔で2021年5月24日から11月8日まで測定した。なお、試験区①（ $t=4\text{cm}$ ）の7月11日から11月8日、試験区②（ $t=6\text{cm}$ ）の7月8日から8月3日、試験区③（ $t=8\text{cm}$ ）の6月29日から7月28日、対照区⑤（ $t=5\text{cm}$ ）の6月29日から7月28日は、機器の不具合およびケーブル切断のためデータが得られていない。

体積含水率は、2021年4月26日に採取した土壤試

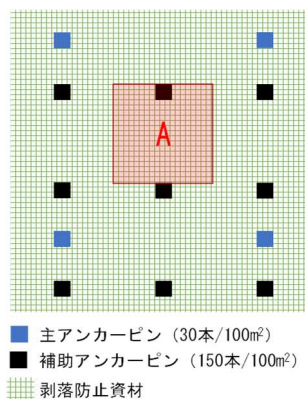


図-6 崩落防止資材にかかる単位面積荷重領域

料により作成したpF-体積含水率曲線を用いてpFに変換した。pFは土壌水分状況を表す単位であり、値が低いと湿潤で、高いと乾燥を示す。pF0から1.8は重力水で、十分な水分があるが、重力によって失われるため、一般的にはあまり植物に利用されない。pF1.8から4.2は有効水で、毛管水として土壌に吸着されている水分量で、植物に利用される。pF3.8は初期しおれ点で、日中一時的に植物がしおれる程度の水分量である。pF4.2は永久しおれ点で、植物が枯死する状態の水分量<sup>15)</sup>である。

### 3.3.2.4 植物の刈り取り調査

植物の生育状況を各区分で比較するため、出穂期の2021年6月29日に刈り取り調査を実施した。試料は1.2mの高さの法面に50cm×50cmの方形枠を置いて、各区分において8反復で地上部の植物を対象に採取した。生草重は現地で計量した。乾物重は、試料を持ち帰り、105℃で2日間乾燥させ計量した。乾物率は、乾物重を生草重で除して算出した。

### 3.3.2.5 植生状況

植生の繁茂状況を確認するため、2021年5月から10月まで月1回程度、目視調査を行った。

道路土工一切土工・斜面安定工指針では、緑化目標の群落が草地型の場合、施工後月平均気温15℃以上で最低3カ月経過後に成績判定を行う目安として、法面から10m離れると、法面全体が「緑」に見え植生率が70%~80%以上であれば「可」、生育基盤が流亡して植物の成立の見込みがなく植生率が50%以下であれば「不可」とされている<sup>13)</sup>。これに基づき、試験施工後1年が経過した10月5日に成績判定を目視で行った。

### 3.3.2.6 土壌化学性

道路土工切土工・斜面安定工指針では、法面土壌のpHが4.0未満の場合、植生基材吹付層を含めて厚さ20cmの範囲の土壌の酸性矯正目標pHを5.0としている<sup>13)</sup>。このため、中和緑化工法においても、地山の深さ15cmまでの酸性矯正目標をpH5.0としている<sup>3)</sup>。そこで、施工1年後の2021年10月6日に植生基盤および地山の深さ15cmまでの土壌を採取して土壌pHをガラス電極法(土:液比=1:2.5)により測定し、これらの土壌の酸性矯正状況を調査した。

酸性硫酸塩土壌では、しばしば、水道法第4条に基づいて厚生労働省令第101号水質基準に関する省令で定められた水質基準を超えるヒ素の溶出が報告されている<sup>16)</sup>。そこで、水質基準を超えるヒ素の溶出の有無を調査するため、土壌pHを測定後の懸濁液をろ過し、このろ液について、ヒ素濃度をJIS K0102 61.4に定

める方法により調査した。

### 3.3.2.7 アンカーピンおよび剥落防止材の強度の経年変化

試験用に施工したアンカーピン(D10×L200mm、D14×L200mm、D16×L400mm、D19×L400mm)の各サイズ各1本を施工直後の2020年9月17日に試験区④より採取した。また、試験施工1年経過後の2021年10月6日には、試験区①~⑤から、同様に各サイズ各1本採取した。試験用剥落防止材(植生ネット(P20S)、落石防止ネット(P44L)および菱形金網(亜鉛メッキφ2(#14)50mm×50mm)は、施工直後および施工1年後に、強度試験に必要なサイズを、植生ネットは試験区①~③から、落石防止ネットは試験区④から、菱形金網は試験区⑤から、それぞれ1枚切り取って採取した。

採取した試料について、アンカーピンは、鉄筋コンクリート用棒鋼、鋼材引張・曲げ試験(JIS G 3112:2010、JIS Z 2241:2011)を行った。植生ネットおよび落石防止ネットは、定速伸長形引張試験器による引張試験を行った。植生ネットは、つかみ間隔10cm、引張速度10cm/分、試験片幅7.3cm、温度20℃、湿度65%、測定回数3回の試験条件で、落石防止ネットは、つかみ間隔20cm、引張速度20cm/分、試験片1節2脚、温度20℃、湿度65%、測定回数1回の試験条件で試験を行った。菱形金網は菱形金網交点引張強度試験に基づき、測定回数3回で試験を行った。

## 3.4 結果と考察

### 3.4.1 気象

表-3に降水量を示す。2020年は、9月と10月の合計が288.5mmで平年値の111%であった。2021年は、5月から10月の合計が461.5mmで平年値の70%で、干ばつであった。特に、6月が21.0mmで平年値の32%、7月が6.0mmで平年値の5%、8月が69.0mmで平年値の48%と少なかった。

表-4に気温を示す。2020年は、9月と10月の平均

表-3 降水量

項目 月	降水量 (mm)		
	2020年	2021年	平年値
5月	81.0	89.5	68.9
6月	124.5	21.0	65.0
7月	67.0	6.0	123.0
8月	182.0	69.0	142.5
9月	102.0	85.5	126.0
10月	186.5	190.5	134.9
9~10月合計	288.5		260.9
5~10月合計		461.5	660.3

※ 平年値はアメダス遠別地点の1991年~2020年の平年値

表-4 気温

項目 月	平均気温 (°C)								
	2020年			2021年			平年値		
	日平均	日最高	日最低	日平均	日最高	日最低	日平均	日最高	日最低
5月	10.9	15.0	6.5	10.9	15.0	6.8	10.4	15.2	5.5
6月	15.6	19.7	12.3	15.8	20.6	11.5	14.8	19.5	10.5
7月	19.4	24.3	15.2	22.7	27.5	18.8	18.9	23.5	15.0
8月	20.4	24.6	16.3	20.7	25.6	16.6	20.0	24.6	15.9
9月	18.4	23.0	14.2	16.1	22.5	10.7	16.3	21.5	11.3
10月	10.9	15.6	6.7	10.4	15.2	5.4	10.2	14.9	5.4
9~10月平均	14.7	19.3	10.5				13.3	18.2	8.4
5~10月平均				16.1	21.1	11.6	15.1	19.9	10.6

※ 平年値はアメダス遠別地点の1991年～2020年の平年値

の日平均、日最高、日最低とも平年値より約1°C～2°C高かった。2021年は、5月から10月の平均の日平均、日最高、日最低とも平年値より約1°C高かった。特に、7月の日平均、日最高、日最低とも平年値より約4°C高かった。

### 3.4.2 積雪荷重と引張力

写真-8に積雪状況、表-5に積雪量調査結果を示す。最も積雪量が多かったのは2022年2月24日で、積雪深が124cm、積雪密度が0.28g/cm<sup>3</sup>であった。

積雪荷重を考慮した剥落防止資材にかかる摩擦力を考慮しない引張力 a' を表-6に示す。剥落防止資材の引張強度の数値 b と比較すると、落石防止ネットの a' は b を下回るが、植生ネットの a' は2021年2月25日、2022年1月27日および同年2月24日の試験区① (t=4cm)、試験区② (t=6cm)、試験区③ (t=8cm) で b を上回った。

融雪後に現地を確認した結果、試験区③ (t=8cm)、試験区④ (t=10cm) の一部で植生基材吹付層の剥落が確認されたが、剥落防止資材は破断しておらず、根系は剥落防止資材の下に伸長していた (写真-9)。この植生基材吹付層の剥落は、積雪層が植物の地上部を巻き込んで凍結し、その後滑落したために生じたものであり、夏から秋にかけての植生の刈り取り作業で防止可能である。植生ネットは、2021年と2022年の両年ともに、引張力 a' が引張強度 b を上回る時期があったが、植生ネットは破断していなかった。これは、摩擦力を考慮しない引張力 a' が引張強度 b を上回る積雪条件が一時的であったこと、基盤土と植生基材吹付層との摩擦力により、実際の引っ張力が摩擦力を考慮しない引張力 a' より小さかったこと、法尻に厚く堆積した雪が斜面に積もった雪の滑落を抑制したことなどが要因として考えられる。

### 3.4.3 土壌水分

図-7、図-8に植生基材吹付層の土壌水分を示す。pF-体積含水率曲線から読み取り可能な pF は4.2が上



写真-8 積雪状況 (2021年2月25日)

表-5 積雪量調査結果

調査日	積雪深 (cm)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
2020年12月23日	27	0.20
2021年1月25日	31	0.16
2021年2月25日	101	0.26
2022年1月27日	108	0.28
2022年2月24日	124	0.28

表-6 崩落防止資材にかかる引張力

項目	調査日	植生ネット			落石防止ネット
		試験区① t=4cm	試験区② t=6cm	試験区③ t=8cm	試験区④ t=10cm
引張力 a' (N)	2020年12月23日	360	460	550	640
	2021年1月25日	350	440	540	630
	2021年2月25日	1,050	1,140	1,230	1,320
	2022年1月27日	1,200	1,310	1,420	1,530
	2022年2月24日	1,380	1,510	1,630	1,750
引張強度 b (N)		710			1,780

※：引張強度はメーカー試験値



写真-9 根系の状況 (2021年4月26日)

限であるため、これを超える値は表示していない。

図-7は、5月25日から6月27日の土壌水分である。試験区④ (t=10cm) は、6月17日まで pF が1.8より低く湿潤であった。6月18日から pF が上昇し、6月23日には4.2に達し、乾燥した。その他の区は、6月上旬まで降雨があると pF が1.8程度を示し湿潤になるが、降雨がないと pF が上昇し、6月中旬から下旬にかけてそれぞれ4.2に達し、乾燥した。6月の降雨は21.0mmで平年値の32%と少なかったこと、植物が生長し



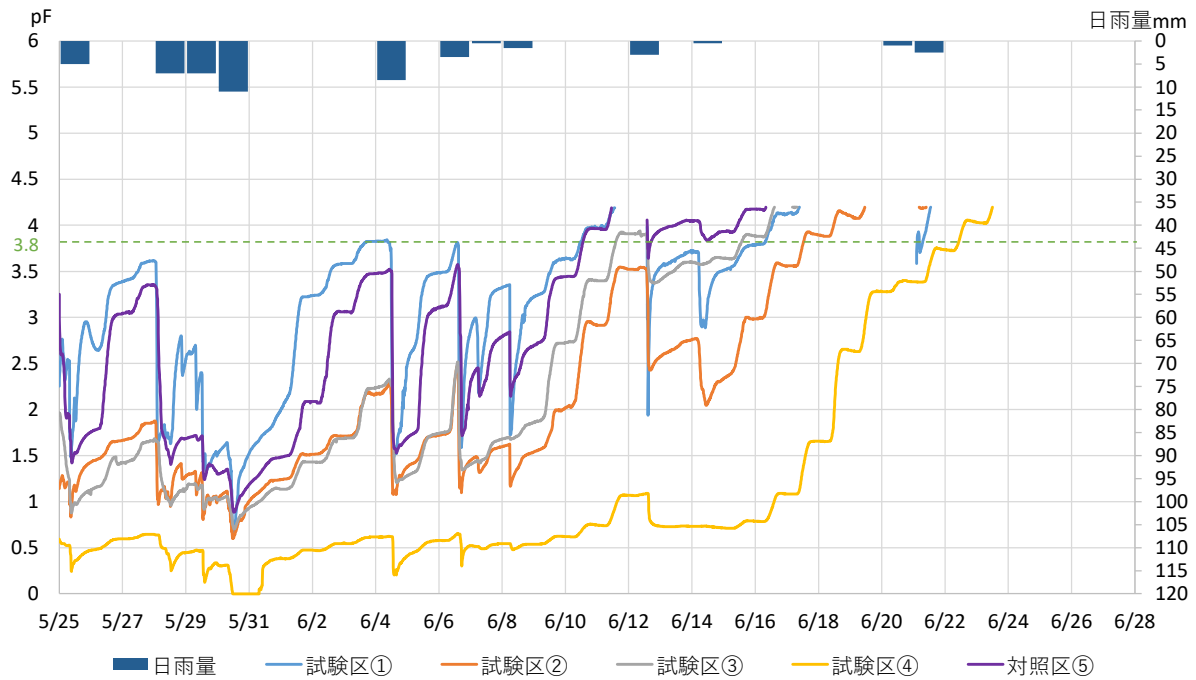


図-7 土壌水分状況 (pF、日雨量、2021年5月25日~6月27日)

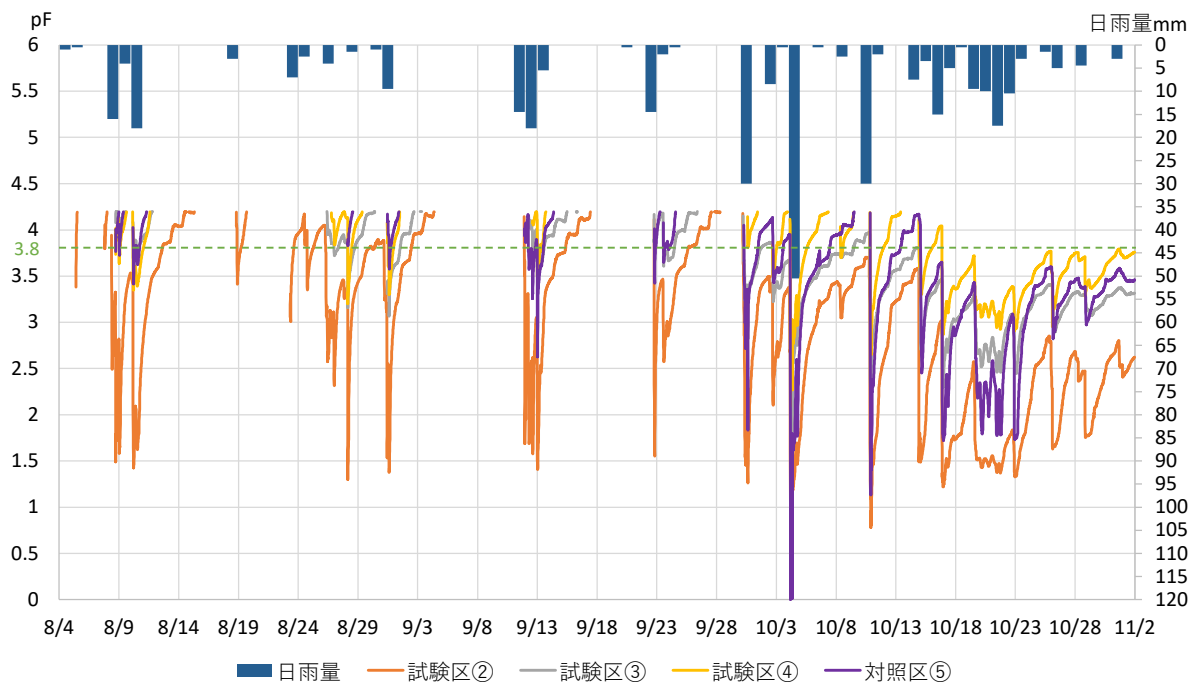


図-8 土壌水分状況 (pF、日雨量、2021年8月4日~11月1日)

蒸散が多くなったことによって、6月中旬から下旬にかけて全ての区で土壌水分が不足した。pFが3.8(初期しおれ点)以上になった日数は、試験区①(t=4cm)と対照区⑤(t=5cm)が18日で、他の区が6~15日であった。これは、植生基材吹付層が薄く、保持できる水分が少ないことが要因と考えられる。

図-8は、8月4日から11月1日の土壌水分である。なお、この期間の試験区①(t=4cm)のデータは得られていないため、全ての区とは試験区①(t=4cm)以外の

区をいう。8月4日から9月下旬の全ての区のpFは、降雨がないと4.2を示し、降雨があると一時的に低くなることを繰り返した。10月上旬以降の全ての区のpFは、概ね1.8から4.2の間の値を示した。8月上旬から9月下旬の植生基材吹付層は、干ばつの影響で降雨時以外の土壌水分が不足していたが、10月上旬以降は、降雨の影響で植物に有効な水分量が保持されていた。

#### 3.4.4 重量と乾物率

生草重、乾物重および乾物率を表-7に示す。

表-7 生草重、乾物重および乾物率

項目	対照区⑤ t=5cm	試験区① t=4cm	試験区② t=6cm	試験区③ t=8cm	試験区④ t=10cm
種子散布量比率	1.25	1	1.5	2.0	2.5
生草重 (g)	92 (74)	75 (75)	86 (57)	148 (74)	205 (82)
乾物重 (g)	33 (26)	26 (26)	25 (17)	35 (18)	48 (19)
乾物率 (%)	36.2	34.6	28.7	23.2	23.4

※ 括弧内の数値=括弧左の数値÷種子散布量比率

生草重と乾物重は、植生基材吹付層の厚い区が重い傾向にある。これは、植生基材吹付層の種子散布量を単位体積あたりで決めているためである。そこで、生草重と乾物重について、試験区① (t=4cm) の種子散布量を1とした比率で除した値で比較した。その結果、乾物重は、試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) が他の区よりも重かった。乾物率は、植生基材吹付層の薄い区が高い傾向にあった。これは、3.3.3で述べたように、試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) の植生基材吹付層は、乾燥する期間が他の区より長かったためと考えられる。乾物率からも、試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) の植生基材吹付層の水分不足が示唆される。

### 3.4.5 植生状況

植生状況を写真-10、11、12、13に示す。

5月24日の調査では、全ての区の法面下部以外で植物の生長が順調であることが確認された。法面下部は、法面上部と比べると融雪が遅いため、植物の生長が遅れたと考えられる。

6月29日の調査では、試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) の一部の地上部の植物が枯れていることが確認された。3.3.3で述べたように、6月中旬から下旬にかけて全ての区の植生基材吹付層が乾燥したが、特に試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) は乾燥する期間が長かったため、この2区の地上部の植物が先に枯れたと考えられる。

8月3日の調査では、試験区③ (t=8cm) と試験区④ (t=10cm) の法面下部以外で地上部の植物が大部分で枯死していた。枯死した植物をかき分けると、緑色の植物が散見された。地上部の植物が大部分で枯死した理由は、干ばつによる土壌水分の不足による夏枯れ<sup>17)</sup>が考えられる。試験区③ (t=8cm) と試験区④ (t=10cm) の法面下部の植生基材吹付層は、法面の水分が重力で集まり、植物に有効な水分量が保持されていたことが推察される。なお、植生基材吹付層の土壌水分を各区の中心付近の高さ1.2mの1地点で測定したため、植物が枯死しなかった部分の土壌水分は把握

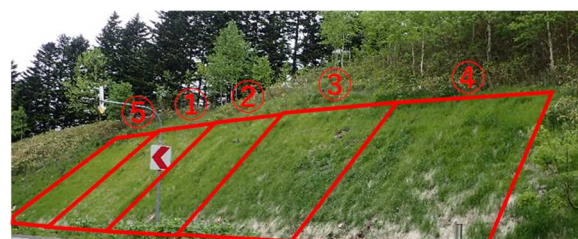


写真-10 植生状況 (2021年5月24日)

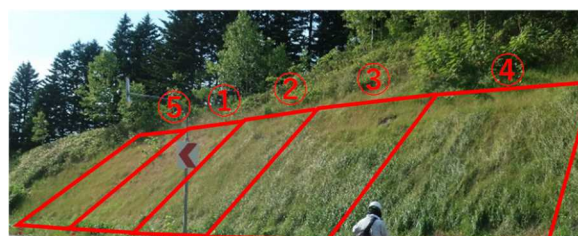


写真-11 植生状況 (2021年6月29日)

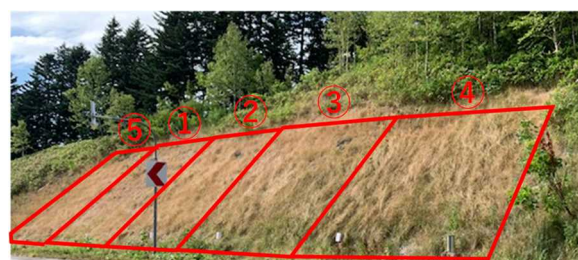


写真-12 植生状況 (2021年8月3日)

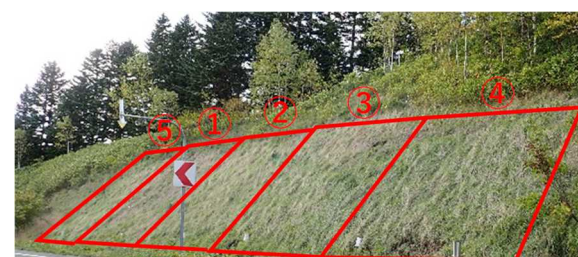


写真-13 植生状況 (2021年10月5日)

できていない。

10月5日の調査では、全ての区で植生が回復していることが確認された。これは、地上部の植物は夏枯れしていたが、地下部の植物は枯れておらず、3.4.3で述べたように、10月上旬以降は植生基材吹付層が植物に有効な水分量を保持していたため、地上部の植物が再生されたと考えられる。

道路土工一切土工・斜面安定工指針の成績判定の目安に基づき、10月5日に目視で成績判定を行った。法面から10m離れると、法面は夏枯れの黄色が混ざっているが全体としては「緑」に見えた。法面の植被率は、融雪後に剥落していた試験区③ (t=8cm) と試験区④ (t=10cm) の一部以外は植被されており、ほぼ100%であった。そのため、試験施工後1年が経過した時点の評価は、全ての区で「可」である。

### 3.4.6 土壌化学性

表-8 に施工 1 年後の各試験区における植生基盤および ASS 層の土壌 pH を示す。道路土工切土・斜面安定工指針では、土壌酸度の改善措置を要する土壌 pH を 4.0 未満、改良目標を 5.0 以上としている<sup>13)</sup>。また、中和緑化工法では、ASS 層の改良深を 15cm としている<sup>3)</sup>。ASS 層において、一部改良目標 pH に達していない領域が認められるが、いずれの試験区においても、改良領域内の土壌 pH の平均値が 4.0 を下回る極強酸性領域は認められず、ASS の酸化に伴う強酸性化は抑制されている。

表-9 に施工 1 年後の各試験区における植生基盤および ASS 層の水抽出性ヒ素含量を示す。ヒ素の水質基準における上限値は 0.01mg/L であるが、全ての試験区の全ての領域でこれを大きく下回っていた。ヒ素は土壌の強酸性化に伴って可溶化してくる<sup>16)</sup>が、中和緑化工法における酸度改良処理により、ASS の強酸性化が抑制されているため、ヒ素の溶出は水質基準を大きく下回る程度に抑制されている。

### 3.4.7 アンカーピンおよび剥落防止材の強度の経年変化

アンカーピンの引張試験および曲げ試験の結果を表-10 に、各種剥落防止材の引張試験の結果を表-11 に示す。各種アンカーピン、各種剥落防止材ともに、施工直後および施工 1 年後の測定値に大差はなく、施工 1 年後においては経年的な強度低下は生じていなかった。

## 3.5 難風化 ASS に適応した改良型中和緑化工法

### 3.5.1 植生基材吹付層の厚さ

試験施工後 1 年間のモニタリング調査から、以下のことが考えられた。

表-8 施工 1 年後の土壌 pH

調査領域		試験区① t-4cm	試験区② t-6cm	試験区③ t-8cm	試験区④ t-10cm	対照区⑤ t-5cm
植生基盤		7.7	7.6	7.3	7.2	7.4
地山 領域	改良 0-5cm	6.0	4.7	5.1	4.9	4.5
	5-10cm	4.8	4.3	5.1	5.1	4.3
	10-15cm	5.0	5.0	5.5	5.3	3.9
	改良領域平均	5.3	4.7	5.2	5.1	4.2

※ 赤字は改良目標 (pH5.0 未満) であることを示す

表-9 施工 1 年後の土壌中の水抽出性ヒ素含量

調査領域	試験区① t-4cm	試験区② t-6cm	試験区③ t-8cm	試験区④ t-10cm	対照区⑤ t-5cm
植生基盤	0.003	0.004	0.005	0.004	0.002
0-5cm	0.001	0.001	0.001	<0.001	<0.001
5-10cm	<0.001	0.001	0.001	<0.001	0.002
10-15cm	0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.002

表-10 アンカーピンの強度の経年変化

供試材料	測定項目	施工直後 (N=1)	施工 1 年後 (N=5)	基準値
9mm アンカーピン	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	360	350	295 以上
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	530	510	440~600
	伸び (%)	19.4	17.5	16 以上
13mm アンカーピン	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	350	340	295 以上
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	500	470	440~600
	伸び (%)	26.5	17.1	16 以上
16mm アンカーピン	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	360	350	295 以上
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	540	520	440~600
	伸び (%)	23.9	21.9	16 以上
19mm アンカーピン	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	370	380	345~440
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	560	560	490 以上
	伸び (%)	23.7	23.1	18 以上

表-11 剥落防止材の強度の経年変化

供試材料	測定項目	施工直後	施工 1 年後
植生ネット (N=3)	引張強度 (N)	600	580
	伸び (%)	43.9	46.0
落石防止ネット (N=1)	引張強度 (N)	1,720	1,650
	伸び (%)	20.4	21.7
ラス金網 (N=1、反復数 3)	引張強度 (N)	1,670	1,670

1) 試験区① (t=4cm) と対照区⑤ (t=5cm) は植生基材吹付層が薄く、保持できる水分が少ないことから、他の区よりも植生基材吹付層の水分が不足しやすく、地上部の植物の固形分が多かった。

2) 降雨が少ない期間は、全ての区で降雨時以外に植生基材吹付層の水分が不足しており、地上部の植物は大部分で夏枯れしたが、降雨が多くなると植物に有効な水分量が保持されて植生は回復した。

3) 試験施工後 1 年が経過した時点で法面全体は「緑」に見え、法面全体が植被されていた。

これらのことから、植生基材吹付層の厚さは 4cm、6cm、8cm、10cm とも生育基盤として機能していた。

先に論じた、①難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準の確立において、改良型中和緑化工法の施工対象は、道路土工の基準において硬岩 (硬岩、中硬岩) に区分される地質区分と設定した。硬岩 (硬岩、中硬岩) の場合、硬度は 30mm 以上となる。道路土工において、硬度 30mm 以上の地質区分の場合、亀裂が全く認められない場合は厚さ 6~10cm の、亀裂同士の間隔が 10cm 以上の亀裂が認められる場合は厚さ 4~6cm の植生基材吹付層によって植生基盤を形成することとなっている。

よって、本研究における試験結果から、難風化 ASS に対する改良型中和緑化工法の植生基材吹付層の厚さは、亀裂が全く認められない場合は厚さ 6~10cm、少なくとも亀裂が認められる場合は厚さ 4~6cm と設定する。

### 3.5.2 剥落防止資材の選定

試験施工後 2 年間のモニタリング調査では、剥落防止資材の破断による植生基材吹付層の剥落は確認されなかったことから、植生ネット、落石防止ネットとも緑化基礎工の剥落防止資材として機能していた。

調査期間中に観測された最大積雪深は 2022 年 2 月 24 日の 124cm であったが、この時、植生ネットの破断は発生していなかった。このことは、植生ネットは、引張強度が落石防止ネットに劣るが、最大積雪深が 125cm 未満の地域においては、植生ネットを剥落防止材に使用した中和緑化工法の適用が可能であることを示している。

### 3.6 小括

堅硬で亀裂の発達が困難な難風化 ASS の露出した切土法面に適応した緑化工法の開発を目的として試験施工を行い、難風化 ASS の露出した切土法面においても、植生基材吹付層が剥落せず、植生を成立させる条件を明らかにした。施工対象の切土地山の亀裂の発達度合いに応じて、植生基材吹付層の厚さを 4cm~10cm とし、施工地の最大積雪深に応じて、剥落防止材として植生ネットあるいは落石防止ネットを選定可能であることが分かった。

## 4. 酸性硫酸塩土壌に対する新たな中和緑化工法適用基準の提案

前述の達成目標①および②の研究成果から、従来の中和緑化工法と今回開発した改良型中和緑化工法の適用基準を以下のようにまとめることができる。

### 4.1 従来の中和緑化工法と改良型中和緑化工法の選定基準

道路土工の基準<sup>10,11)</sup>において、硬岩(硬岩、中硬岩)に区分される ASS の場合、本研究で開発した改良型中和緑化工法を選択し、それ以外の場合は従来の中和緑化工法を選択する。

### 4.2 従来の中和緑化工法における植生基材吹付層厚の選定

道路土工の切土工・斜面安定工指針においては、地山の土壌硬度、土質、風化程度によって植生基材吹付層厚を決定している<sup>13)</sup>。この基準に基づき、ASS の土壌硬度が 23mm 未満で土質が粘質の場合、23mm 以上 27mm 未満で土質が砂質の場合、土壌硬度が 27mm 以上 30mm 未満で亀裂間隔が 10cm 未満の場合は、植生基材吹付層厚を 3cm とする。土壌硬度が 23mm 以上 27mm 未満で土質が粘質の場合、土壌硬度 27mm 以上 30mm 未満で亀裂間隔が 10cm 以上の場合、土壌硬度 30mm 以上で亀裂間隔が 10cm 未満の場合は、植生基材吹付層厚を 3~5cm とする。土壌硬度 30mm 以上で亀裂間隔が 10cm 以上の場合、植生基材吹付層厚を 4~6cm とする。

### 4.3 改良型中和緑化工法における植生基材吹付層厚の選定

道路土工において硬岩(硬岩、中硬岩)に区分される ASS は、道路土工の切土工・斜面安定工指針においては、土壌硬度 30mm 以上の亀裂なし、あるいは、亀裂間隔 10cm 以上に区分されており、前者では植生基材吹付層厚 4~6cm、後者では 6~10cm を確保するとされている<sup>10,11,13)</sup>。本研究における試験施工は、亀裂間隔 10cm 以上の中硬岩であり、植生基材吹付層厚 4cm 以上で良好な植生が維持された。

よって、硬岩(硬岩、中硬岩)の ASS に改良型中和緑化工法を施工する場合、亀裂がある場合は 4~6cm、亀裂がない場合は 6~10cm の植生基材吹付層厚を確保する。

### 4.4 改良中和緑化工法における剥落防止材の選定

本研究の試験施工現場における最大積雪深は 124cm であったが、この積雪深においても、剥落防止材として使用した植生ネットの破断は発生しなかった。田島および前川は、ポリエチレン製の落石防止ネットの促進劣化試験を行い、経年劣化を考慮に入れた当該ネットの安全率を 1.5 と設定している<sup>18)</sup>。今回の調査によって、植生ネットが積雪荷重によって破断しないことが確認された最大積雪深は 124cm であり、これを安全率 1.5 で除するとおよそ 80cm となる。よって、発生し得る最大積雪深が 80cm 未満の地域においては、剥落防止材として植生ネットを選択することが可能である。ただし、植生ネットでは、植生基材吹付層厚 8cm での破断がないことを確認しているが、それ以上の層厚では、破断の有無の確認が出来ていない。よって、植生ネットを剥落防止材として使用する場合は、地山に亀裂が認められない場合であっても、植生基材吹付層厚を 6~8cm とする。

図-9、10 に北海道の各気象観測所において、観測開始以来に観測された最大積雪深を示す。最大積雪深が 80cm (図中の赤線) 未満で、植生ネット使用の余地がある観測所は太平洋側の少雪地帯にごく少数存在するのみである。

### 4.5 中和緑化工法の選定フロー

以上のことを勘案して、従来型および改良型中和緑化工法の選定フローを図-11 のように提案する。

## 5. まとめ

本研究では、堅硬で亀裂の発達が困難な難風化 ASS の露出した切土法面に適応した中和緑化工法の開発するため、①、②および③の項目を実施し、以下の成果を得た。

① 難風化酸性硫酸塩土壌の判断基準の確立

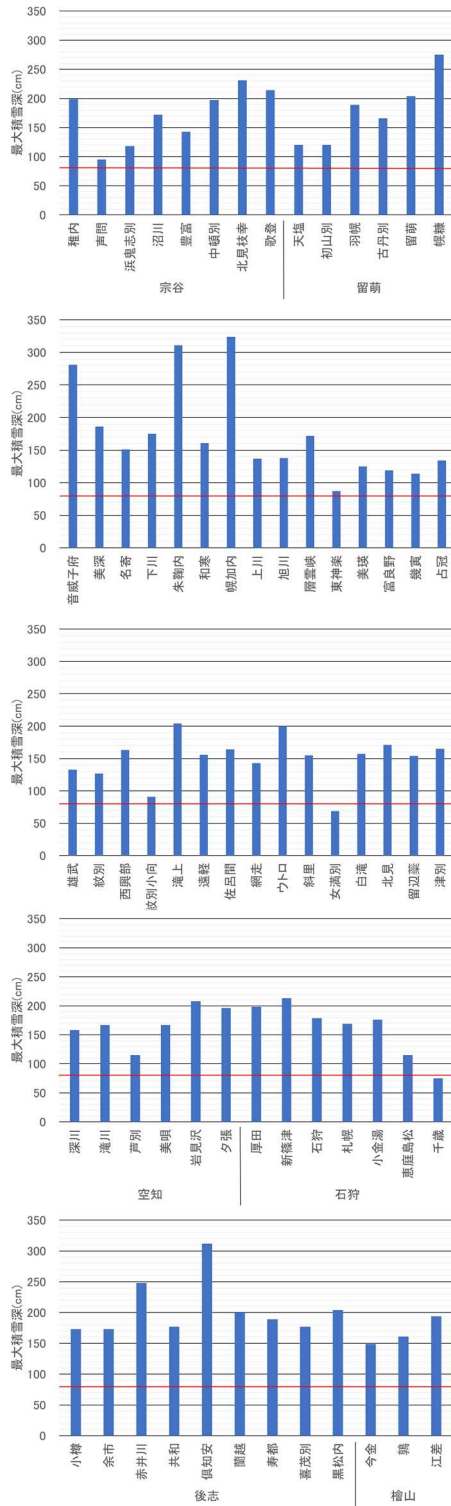


図-9 太平洋岸以外の地方の観測所での最大積雪深

難風化 ASS と易風化 ASS の判別基準には、道路土工で用いられている硬岩（硬岩、中硬岩）と軟岩（軟岩Ⅰ、軟岩Ⅱ）の分類基準を適用可能であることを明らかにして、難風化 ASS の判断基準を確立した。

② 難風化酸性硫酸塩土壌に対する中和緑化工法の確立

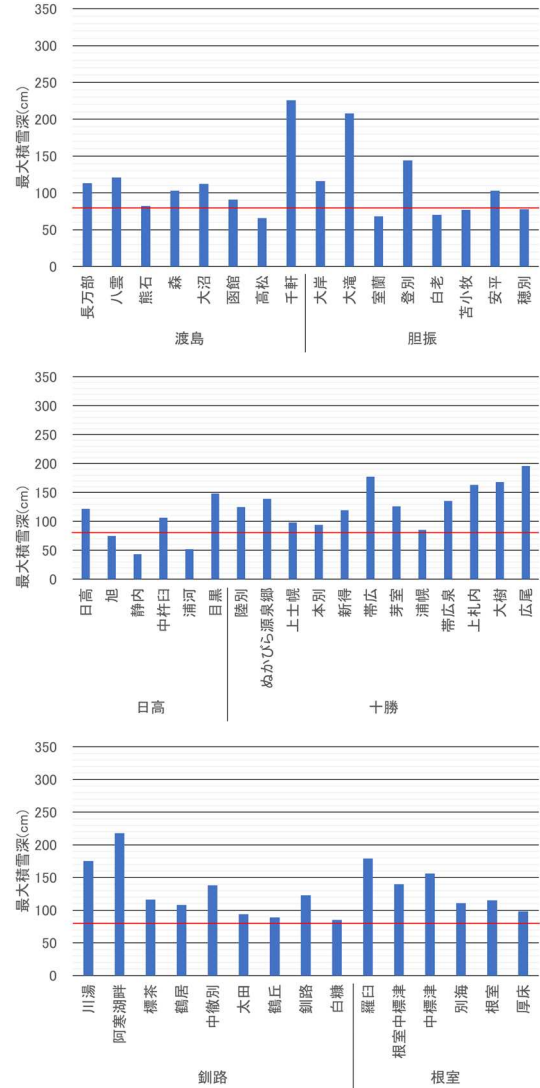


図-10 太平洋岸の地方の観測所での最大積雪深

難風化 ASS の露出した切土法面においても、植生基材吹付層が剥落せず、植生を成立させる条件を明らかにした。施工対象の ASS の亀裂の発達度合いに応じて、植生基材吹付層の厚さを 4cm~10cm とし、施工地の最大積雪深に応じた植生ネットあるいは落石防止ネットの選定基準を確立した。

③ 酸性硫酸塩土壌に対する新たな中和緑化工法適用準の提案

上述の①②の成果を用いて、従来型の中和緑化工法および本研究で開発した改良型中和緑化工法の選定フローを提案した。

謝辞：研究を進めるにあたり、試験施工を行う道路法面をご提供いただいた道路管理者ならびに試験施工でご協力いただいた施工業者の関係各位に、ここに記して謝意を表す。

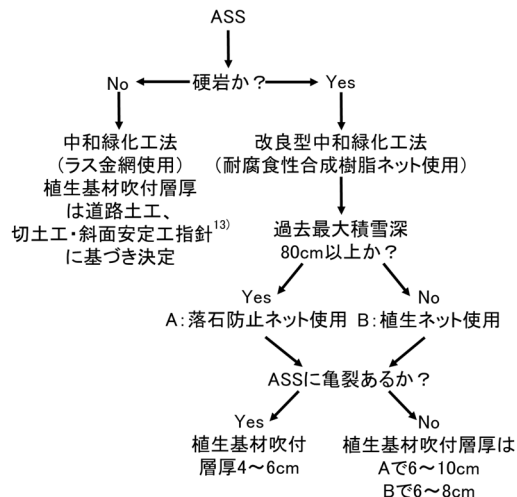


図-11 従来型および改良型中和緑化工法の選定フロー

## 参考文献

- 1) Ritsema, C. J., van Mensvoort, M. E. F., Dent, D. L., Tan, Y., van den Bosch, H. and van Wijk, A. L. M.: Acid Sulfate Soils, Handbook of Soil Science, pp. G-121-154, CRC Press, 2000.
- 2) 石渡輝夫・沖田良隆・斉藤万之助: 北海道における各種酸性硫酸塩土壌の区分、分布および性状、日本土壤肥料学雑誌、第63巻、第1号、pp. 86-90、1992.
- 3) 横濱充宏・斉藤惣一・石渡輝夫: 酸性硫酸塩土壌の露出した切土法面における植生工法、日本土壤肥料学雑誌、第68巻、第6号、pp. 703-707、1997.
- 4) 山本弘樹・横濱充宏: 中和緑化工法施工法面の長期経過後の追跡調査報告、寒地土木研究所月報、第790号、pp. 60-65、2019.
- 5) 中田英二・小野雅弘・市原義久・飯島幸夫: 地下水水質と堆積岩の急速スレーキング特性の関係、資源地質、第56巻、第2号、pp. 133-144、2006.
- 6) 社団法人地盤工学会: 岩石のスレーキング試験、地盤材料試験の方法と解説、p. 286、2009.
- 7) 土壌物理研究会: 土壌の物理性と植物生育、養賢堂、pp. 11-13、1979.
- 8) 石田哲也・中谷利勝・石井邦之・平野正則・片山 勝・細川博明・長畑昌弘・幸田 勝・西山章彦・蝦名健二: 北海道で出現した酸性硫酸塩土壌の位置(緯度・経度)および参考文献の紹介、寒地土木研究所月報、第695号、pp. 39-47、2011.
- 9) 横濱充宏・山本弘樹・田中 稔: 難風化酸性硫酸塩土壌の判別法確立に向けた検討、寒地土木研究所月報、第805号、pp. 43-47、2020.
- 10) 平島碩人・佐々木康・奥園誠之・瀬在 武: 道路実務全書、道路土工(I)一般土工、山海堂、pp. 49, 175, 240、1984.
- 11) 財団法人道路保全技術センター: 道路設計要領設計編、II. 設計のための基本事項、pp. 2, 6、1996.
- 12) 応用地質特別号「岩盤分類」編集委員会: 国内各機関の岩盤分類、応用地質特別号「岩盤分類」、pp. 145, 151、1984.
- 13) 日本道路協会編集: 道路土工 切土工・斜面安定工指針(平成21年度版)、pp. 202-275、2009.
- 14) 日本法面緑化技術協会編: のり面緑化技術-厚層基材吹付工-, p. 82、2005.
- 15) 日本緑化工学会: 環境緑化の辞典、pp. 108-109、2005.
- 16) Itabashi, T., Li, J., Hashimoto, Y., Ueshima, M., Sakana kura, H., Yasutaka, T., Imoto, Y., and Hosomi, M.: Speciation and Fractionation of Soil Arsenic from Natural and Anthropogenic Sources: Chemical Extraction, Scanning Electron Microscopy, and Micro-XRF/XAFS Investigation, Environ. Sci. Technol., 53, pp. 14186-14193, 2019.
- 17) 松中照夫、三枝俊哉: 草地学の基礎、p. 43、2016.
- 18) 田島与典・前川幸次: ポリエチレンネットの耐候性および落石防止対策への適用事例、平成19年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集、pp. 469-470、2008.

# RESEARCH ON NEUTRALIZATION AND REVEGETATION TECHNIQUES FOR ACID SULFATE SOILS THAT ARE DIFFICULT TO WEATHERIZE

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Rural Resources Conservation Research Team

Author: YOKOHAMA Mitsuhiro

MATSUDA Toshiyuki

NAKATANI Takenori

SAKAI Miki

YAMAMOTO Hiroki

TANAKA Minoru

**Abstract:** In order to develop a neutralization and revegetation method adapted to cut slopes exposed on difficult-to-weather acid sulfate soils, which are hard and difficult to develop cracks, this study conducted items ①, ② and ③ and obtained the following results.

① Establishment of criteria for difficult-to-weather acid sulfate soils

We established the criteria for difficult-to-weather acid sulfate soils by clarifying that the classification criteria for hard rock (hard rock, medium-hard rock) and soft rock (soft rock I, soft rock II) used in road earthworks are applicable to the criteria for difficult-to-weather acid sulfate soils and easy-to-weather acid sulfate soils.

② Establishment of a neutralization and revegetation method for difficult-to-weather acid sulfate soils

We clarified the conditions under which vegetation can be established on cut slope surfaces exposed to difficult-to-weather acid sulfate soils without the sprayed vegetation substrate layer falling off. The thickness of the sprayed vegetation layer was set from 4 cm to 10 cm according to the degree of crack development in the acid sulfate soil, and the selection criteria of vegetation nets or rockfall prevention nets were established according to the maximum snow depth at the construction site.

③ Proposal of new criteria for application of the neutralization and revegetation method to acid sulfate soils

Using the results of ① and ② above, we proposed a selection flow for the conventional neutralization and revegetation method and the improved neutralization and revegetation method developed in this study.

**Keywords:** Acid sulfate soil, Neutralization and revegetation method, Road earthwork, Hard rock, Vegetation net, Rockfall prevention net, Maximum snow depth