

# 積雪寒冷地における岩盤路床の 長期安定性の評価

伊東 佳彦<sup>1\*</sup>・阿南 修司<sup>1</sup>・日下部 祐基<sup>1</sup>・坂本 多朗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34）

<sup>2</sup>北海道開発局帯広開発建設部帯広道路事務所

\*E-mail:yos-ito@ceri.go.jp

積雪寒冷地における岩盤路床の長期安定性の評価方法を構築することを目的に、凍結融解試験を繰り返した後の岩石の工学特性を調査した。対象岩石は北海道各地の堆積岩類、火山岩類、および火山砕屑岩類である。凍結融解凍上試験の最多繰り返しサイクル数は300サイクルで、数年間凍結融解作用を受けた実路床での計測結果をもとに長期安定性の境界値を150サイクルに設定した。各試料の崩壊サイクルと工学特性を対比し、新しい評価基準を次のように設定した。1. 飽和密度：2.2t/m<sup>3</sup>以上、2. 吸水率：6.0%以下、3. P波速度：3.0km/s以上、4. 一軸圧縮強さ：15MN/m<sup>2</sup>以上。これらを全て満足する岩石が積雪寒冷地における岩盤路床として長期安定性を有していると評価される。

**Key Words** : rock mass degradation, frost heave, freezing and thawing

## 1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地において岩盤を路床として利用する場合、対象岩盤の凍上および支持力に対する長期安定性を評価・判定する必要がある。しかし、基準化された精度の高い判定方法がないため、個々の現場で凍上試験を行って評価するか、安全側の施工となる路盤材での置換を行ってきた。この場合、特に後者では掘削する必要がない岩盤を掘削することとなり、道路建設費増嵩の一因となっていた。

当研究チームでは、岩盤の路床としての長期安定性の簡易判定法確立に向けた検討<sup>1,2)</sup>を行ってきた。その結果、北海道東部の第三紀堆積岩類を対象とした判定法

(以下、既存法)を提案<sup>3)</sup>し、北海道開発局の道路設計要領の参考資料として採用された<sup>4)</sup>。今回、検討岩種を増やすとともに原位置での長期計測の結果を加えて既存法を見直し、新しい評価法を構築したので報告する。

## 2. 従来の評価法

積雪寒冷地における岩盤路床の安定性を評価するための提案は過去にも行われている。表-1に既往の評価法を示す。星野<sup>5)</sup>は凍上性判定の目安として、1) 新第三紀中～上部の軟質かつ細粒な泥質岩および凝灰岩、2) 強制乾燥状態の比重が2.0以下で、かつ吸水量20%以上の軟

表-1 既往の評価法

	星野(1973)	北川・川上 (1986)	磯田ほか(1996)	小野ほか(2005)	日下部ほか(2003) (既存法)
飽和密度(t/m <sup>3</sup> )		2.00	2.10	1.90	2.1
吸水率(%)	20.00(軟質な泥岩, 細粒な凝灰岩)	25.00	15.00		15.0
P波速度(km/s)			2.00	2.70	2.0
一軸圧縮強さ(MN/m <sup>2</sup> )		5.00	50~100	5.00	15.0
乾燥密度(t/m <sup>3</sup> )	2.0(同上)	1.5			
シルト以下含有量(%)		20.0			
有効間隙率(%)				40.0	

質な泥質岩および細粒な凝灰岩、3)凍上しがたい岩石であっても、これが長年の風化作用によって破碎された場合、という3点を挙げた。しかし、凍結融解繰り返しによる岩石の劣化を考慮していない。北川・川上<sup>6)</sup>はトンネル背面地山の凍上性という観点から、北海道～東北地方に分布するトンネルを中心に19箇所を検討を行い基準となる工学特性を設定している。しかし、凍結融解繰り返しによる岩石の劣化については検討していない。磯田ほか<sup>7)</sup>は、凍結融解を300サイクル繰り返した後の耐久性から指標を構築したが、一軸圧縮強さの境界値に50～100MN/m<sup>2</sup>と幅があり、施工の経済性より安全性により配慮した設定値を採用したといえる。小野ほか<sup>8)</sup>は疑似岩石試料を対象に評価値を設定したが、凍結融解繰り返しによる岩石の劣化を考慮していない。日下部ほか<sup>9)</sup>による既存法は、凍結融解繰り返しは300サイクルであるが、対象岩種が北海道東部の第三紀堆積岩類に限定されている。

以上のように既存の評価法は、1回の凍上試験による評価にとどまったり、岩種が限定されているなどの課題を有しており、長期安定性の評価法としては精度向上の余地がある。また、既存の凍結融解試験による評価では試料を水平方向に拘束しておらず、試料に亀裂が発生し崩れた時点で、その岩石は路床として不適と評価される。しかし、実際の岩盤路床は水平方向は拘束状態にあり、仮に岩石に亀裂が発生し細片化しても、凍上が発生しなければ（置換のための砂利と同様）路床として十分機能を果たしている。すなわち凍結融解試験による路床の評価は安全側すぎる（厳しい評価）と言える。なお、唯一凍結融解凍上試験を実施している日下部ほか<sup>9)</sup>では、岩種が限定されている。

### 3. 試料

実験に用いた試料は、極力岩種を増やすことと実験結果を実現場で活用するという観点から、主として北海道内の道路建設工事箇所から採取した。試料の岩種と個数は堆積岩類13（礫岩2、砂岩8、泥岩3）、火山岩類4（安山岩4）、火山碎屑岩類4（火山礫凝灰岩1、凝灰質砂岩1、流紋岩質凝灰岩1、水冷破碎岩1）の計21試料である。試料採取箇所は、釧路町、赤井川村、乙部町、鹿部町、芦別市、厚真町、岩内町、喜茂別町である。

試料は、原則として1つの岩種に対し15供試体を作成した。このうち10供試体は凍結融解試験および岩石の工学特性を計測するための試験（比重吸水試験、超音波伝播試験および一軸圧縮試験）を行い、残り5供試体は凍結融解凍上試験を行った。前者の供試体は、一般的な岩石の一軸圧縮試験等に使用するサイズである直径50mm、

長さ100mmの中実円筒試料用に調製した。後者の供試体は、凍上試験に使用するサイズである直径80mm、高さ50mmの中実円筒状に調製した。

## 4. 試験方法

### (1) 凍結融解試験および工学特性計測試験

実施した岩石試験は飽和密度、吸水率、P波速度、および一軸圧縮強さを求めるための比重吸水試験、超音波伝播試験、および一軸圧縮試験であり、それぞれ地盤工学会、地盤工学会、およびJISM0302に準拠した。これらの試験は現地や実験室で一般的かつ経済的に実施でき、得られる指標は既往研究でも検討されている基本的なものである。このため、岩盤路床の長期安定性の評価を行うための指標として有効と考え採用した。

現地から採取した試料は、まず初期状態における飽和密度、吸水率、P波速度、および一軸圧縮強さを測定した。次に繰り返し凍結融解試験を実施した。同試験の温度条件は、供試体の中心温度（制御用コンクリートダミー供試体の中心温度）が摂氏-18～+5度となるように設定し、一日8サイクルとした。一定サイクル毎に表面乾燥状態の供試体重量、およびP波・S波の伝播時間を透過法によって測定し、同時に供試体の表面観察（亀裂の観察および写真撮影）を実施した。凍結融解試験は最大300サイクルまで行い、凍結融解過程での強度低下を把握するため任意サイクルで一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強さの測定サイクルは、砂岩など比較的状态の良い岩石の場合は最初の測定を8サイクル後（1日後）とし、泥岩や軟質な岩石では初期サイクル時に慎重を期すため1サイクルで測定し、供試体の状態を観察しながら徐々に測定間隔を広げた。

### (2) 凍結融解凍上試験

凍結融解凍上試験<sup>1)</sup>は、凍結融解試験と凍上試験を結合させたもので、岩石を水平方向に拘束状態のまま凍結融解によって劣化させた後に凍上試験を行い、凍上量を把握する試験である。図-1に同試験の概要を示す。供試体をセル中で拘束しながら試験に供するため、凍結融解試験で崩壊した供試体の凍上率を把握することが可能である。従来の凍結融解試験や凍上試験のプロセスと比較して、より実際の岩盤路床で起きている現象を再現している。両試験の結合に当たっては供試体のサイズを統一している。凍上試験を行う凍結融解サイクルは、前段で行う凍結融解試験の結果から決定した。温度条件は、上記凍結融解は前述の凍結融解試験と同条件で行い、凍上試験方法は日本道路協会<sup>9)</sup>に準拠した。

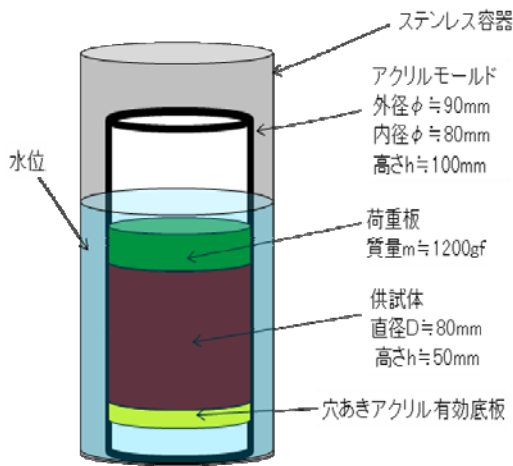


図-1 凍結融解凍上試験の概要

$$\text{凍上率 (\%)} = \frac{H_f - H_0}{H_0} \times 100$$

ここに、 $H_f$ は供試体の凍結後の高さ、 $H_0$ は供試体の初めの高さである。

表-2 中の崩壊サイクルは同様に、数種の任意サイクル凍結融解後の一軸圧縮強さが測定できた限界サイクルを示している。厳密には供試体はこの崩壊サイクル後に崩れているが、正確な崩壊サイクルが求められなかったため一軸圧縮試験の最終実施サイクルを示している。なお、崩壊サイクルの欄に 300 とある場合、実際には岩石の崩壊は生じなかったことを表している（最大崩壊サイクルが 300 サイクルのため）。

## 5. 試験結果

試験結果を表-2 に示す。既存法で凍上性の指標としている吸水率は、最大値 33.0%で最小値 1.6%と比較的広範囲の値を示している。支持力低下の指標としている一軸圧縮強さは、最大値 98.0MN/m<sup>2</sup>で最小値 0.8 MN/m<sup>2</sup>でおよそ 2 桁の範囲に分散している。表-1 の試料 No.1 ~6 は既存法の検討で用いたデータ、試料 No.7~21（太文字）は今回の新たに計測したデータである。

表-2 中の凍結融解後最大凍上率は、凍結融解凍上試験により数種の任意サイクル凍結融解後に行った凍上試験で得られた凍上率の最大値を示している。ここで凍上率とは、次の式で示される物質の凍上しやすさの指標である。

## 6. 考察

### (1) 最大凍上率と崩壊サイクルによる評価

長期的な凍上性と支持力低下を考慮した岩盤路床の長期安定性の判定基準として、最大凍上率と崩壊サイクルを採用した。凍上性の判定基準は、日本道路両会<sup>9)</sup>に準拠して凍上率 20%以下を採用した。また、長期的な安定性の評価基準として、崩壊サイクルが 150 サイクル以上を合格とした。そして、両方の条件を満足するものを岩盤路床として長期安定性を有すると評価した。図-2 に両者の関係を示す。崩壊サイクルの基準を 150 サイクル以上とした根拠は、図中の 200 サイクル前後を示す試料の 1 つ（表-1、試料 No.2）について現地で試験舗装を行

表-2 岩石試験結果表

No.	試料名	岩種	採取地	吸水率 (%)	飽和密度 (t/m <sup>3</sup> )	P波速度 (km/s)	一軸圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	凍結融解後最大凍上率 (%)	崩壊サイクル(c)	備考
1	春採層 礫岩	堆積岩	釧路町	3.14	2.55	4.19	19.4	0.4	300	既存法構築対象データ
2	春採層 砂岩 1	"	"	5.62	2.45	3.43	31.1	3.2	186	
3	春採層 砂岩 2	"	"	5.08	2.40	3.60	35.1	1.2	300	
4	雄別層 砂岩	"	"	10.42	2.32	1.26	6.7	6.2	106	
5	雄別層 泥岩 1	"	"	6.46	2.41	2.14	7.7	38.9	11	
6	雄別層 泥岩 2	"	"	6.46	2.41	2.38	3.3	4.9	7	
7	天寧層 礫岩	堆積岩	釧路町	1.60	2.62	4.53	98.0	0.0	300	新判定法構築追加データ
8	天寧層 炭質泥岩	"	"	7.67	2.21	2.42	6.7	1.2	32	
9	春日層 火山礫凝灰岩	火砕岩	赤井川村	14.31	2.10	2.43	9.3	59.4	54	
10	春日層 風化安山岩	火山岩	"	4.77	2.47	3.86	32.8	1.2	200	
11	春日層 安山岩	"	"	2.25	2.60	4.71	60.0	0.0	300	
12	粗粒砂岩	堆積岩	乙部町	24.63	1.99	2.66	8.1	23.1	13	
13	細粒砂岩	"	"	33.00	1.86	2.31	9.4	68.2	6	
14	流紋岩質凝灰岩	火砕岩	鹿部町	14.43	2.08	2.70	12.9	35.5	37	
15	凝灰質砂岩	"	"	27.09	1.95	1.22	0.8	2.0	6	
16	蝦夷層群 砂岩	堆積岩	芦別市	2.11	2.58	4.26	58.5	5.3	300	
17	川端層 砂岩 1	"	厚真町	6.22	2.41	2.80	11.0	1.6	40	
18	川端層 砂岩 2	"	"	7.07	2.41	2.71	26.1	9.1	40	
19	美笛層 風化安山岩 1	火山岩	岩内町	5.17	2.48	4.52	20.8	5.0	300	
20	美笛層 風化安山岩 2	"	"	13.08	2.22	3.01	5.4	14.3	20	
21	水冷破砕岩	火砕岩	喜茂別町	3.49	2.25	4.32	61.8	0.8	300	

\* 試料 No.1~6 は、日下部ほか<sup>3)</sup>（既存法の検討）で用いたデータである。

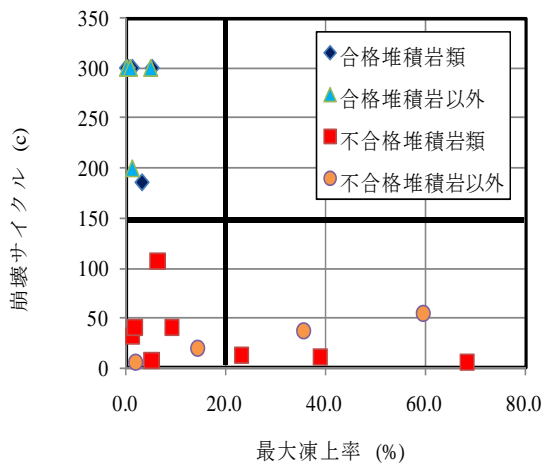


図-2 最大凍上率と崩壊サイクルの関係

ってモニタリングを実施した結果、室内試験では凍結融解の初期に急激な強度低下が認められたが、2002～2006年の約4年間の計測（63回の凍結融解を経験）では、強度低下が認められず路面変状も発生しなかったことから合格と判定されたこと<sup>10)</sup>による（その後、2008年までの約6年間で77回の凍結融解を経験しているが、依然強度低下や路面変状は認められていない<sup>11)</sup>）。このことは、室内における今回の一連の試験は、実際の現場における凍結融解現象に比較して依然厳しい条件であり、それに伴う岩石の劣化も、より急激であることを示している。

同図から分かるように、最大凍上率が20%以下でも崩壊サイクルが150サイクル以下の試料があり、同指標だけでは路床としての適格性が評価できない。いっぽう、崩壊サイクルが150サイクル以上を示す試料では、すべて最大凍上率が20%以下を満足している。

## (2) 簡便な評価法の構築

前項で示したように、合否判定指標として繰り返し凍結融解の崩壊サイクル（150サイクル以上）を用いると、もう1つの指標である最大凍上率20%以下も満足することが判明した。しかし、崩壊サイクルを測定するのは時間と経費を要する。そこで崩壊サイクルと各物性値と対比することで、経済的かつ簡便に路床としての長期安定性を評価する方法を検討した。

図-3～6に崩壊サイクルと飽和密度、吸水率、P波速度、および一軸圧縮強さの関係を示す。各図中の黒実線は評価のための判定値である。

P波速度、吸水率については、それぞれ3.0km/s、60%を境に試料が合格と不合格に明瞭に区分される。いっぽう、飽和密度と一軸圧縮強さから合格と不合格とを単純には区分できない。そのため、これらの指標については岩盤を極力活用するという観点から、合格岩盤の最低値

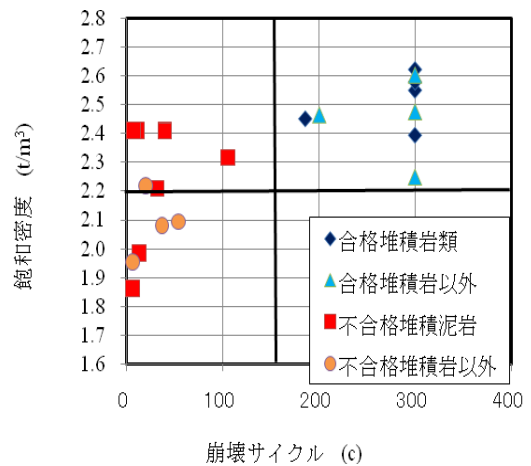


図-3 崩壊サイクルと飽和密度の関係

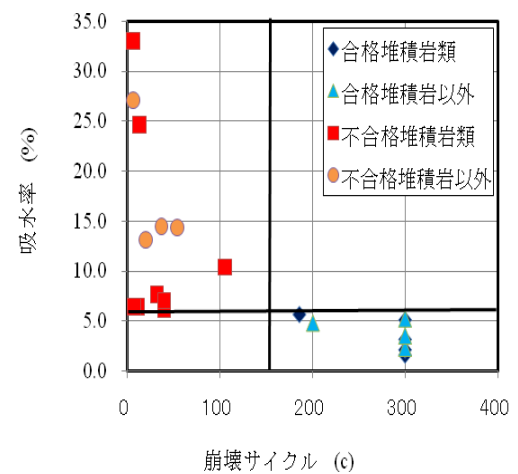


図-4 崩壊サイクルと吸水率の関係

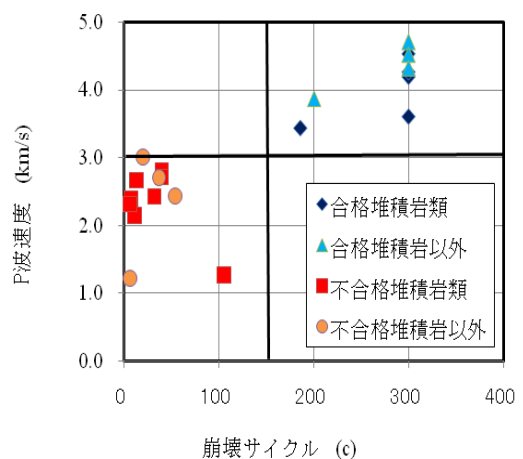


図-5 崩壊サイクルとP波速度の関係

（飽和密度  $2.2\text{t/m}^3$ 、一軸圧縮強さ  $15\text{MN/m}^2$ ）を判定値として採用した。判定基準としてP波速度と吸水率のみを採用することも考えられるが、判定精度を確保する（例えば、一軸圧縮強さは低いが、たまたまP波速度や吸水率の判定値を満たす場合などを排除する）という観点か

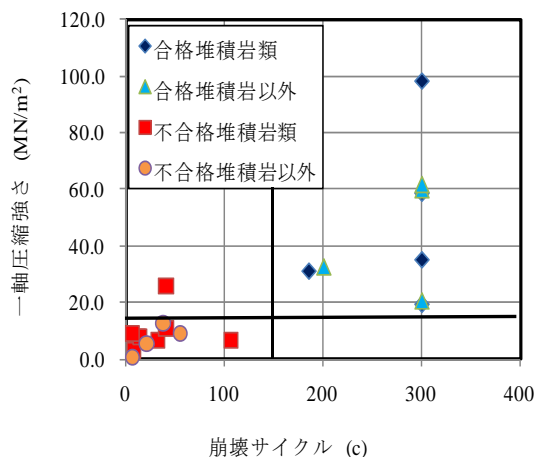


図-6 崩壊サイクルと一軸圧縮強さの関係

ら、4つの指標による判定法を構築することとした。なお、各図では礫岩、砂岩、泥岩の堆積岩類とそれ以外の岩種を分けて示しているが、両者の間に顕著な差は認められなかった。

### (3) 岩盤路床の長期安定性評価基準

以上の検討結果から、積雪寒冷地における岩盤路床の長期安定性の評価基準を下記の通り設定した。

- 1) 飽和密度： $\rho_s \geq 2.2 \text{ t/m}^3$
- 2) 吸水率： $ab \leq 6.0 \%$
- 3) P波速度： $V_p \geq 3.0 \text{ km/s}$
- 4) 一軸圧縮強さ： $qu \geq 15 \text{ MN/m}^2$

これらの基準値と日下部ほか<sup>3)</sup>による基準値とを比較すると、飽和密度は  $2.1 \text{ t/m}^3$  から  $2.2 \text{ t/m}^3$  へと、P波速度は  $2 \text{ km/s}$  から  $3 \text{ km/s}$  へと、吸水率は  $15\%$  から  $6.0\%$  へと、条件が厳しくなっている。いっぽう一軸圧縮強さの境界値  $15 \text{ MN/m}^2$  は変わらず、これは概ね軟岩と硬岩の境界値である。

以上のことから、施工現場においてはまず軟岩 ( $15 \text{ MN/m}^2$  以下) か硬岩かを判別することにより積雪寒冷地における岩盤路床の長期安定性を概略評価し、飽和密度、吸水率、P波速度を測定することにより評価を検証していくのが妥当であると考えられる。

## 7. 結論

凍結融解試験を繰り返した後の岩石の工学特性を測定し、積雪寒冷地における岩石の路床としての長期安定性の評価方法を検討した。試料は北海道各地から採取した堆積岩類、火山岩類、および火山砕屑岩類である。長期安定性評価のための凍結融解繰り返しサイクルとして、現地モニタリングとの比較結果から 150 サイクルを採用

した。このサイクルを基準とした、積雪寒冷地における岩石の路床としての長期安定性の新しい評価基準は以下の通りである。

- 1) 飽和密度： $2.2 \text{ t/m}^3$  以上
- 2) 吸水率： $6.0\%$  以下
- 3) P波速度： $3.0 \text{ km/s}$  以上
- 4) 一軸圧縮強さ： $15 \text{ MN/m}^2$  以上

これらを全て満足する岩石が、積雪寒冷地における岩盤路床として長期安定性を有していると評価される。

謝辞：本報告をまとめるに当たり北海学園大学工学部 (博士) 小野丘教授には、貴重な御助言をいただいた。また、国土交通省北海道開発局の関係各位には、岩盤路床の合否判定と現地モニタリングデータ、および関係資料などの提供をしていただいた。ここに深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 岡崎健治, 伊東佳彦, 日下部祐基, 高橋克也: 凍上性岩盤の判定法に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集第 59 号, pp. 538~541, 2003.
- 2) 田本修一, 伊東佳彦, 日下部祐基, 岡崎健治, 蛭沢敦: 岩盤路床の凍上性判定法の検討, 日本応用地質学会北海道支部研究発表会, pp. 9~12, 2003.
- 3) 日下部祐基, 伊東佳彦, 坂本多朗, 瀬川博忠: 岩盤路床の凍上性判定法に関する現場実証実験と劣化機構について, 北海道開発土木研究所月報, No. 633, pp. 31~40, 2006.
- 4) 国土交通省 北海道開発局: 道路設計要領 第 1 集 道路, p. 参 29, 2008.
- 5) 星野寔: 岩石の凍上について, 北海道開発局土木試験所報告, No. 60, pp. 45~50, 1973.
- 6) 北川修三, 川上義輝: 凍上試験による地山の凍上性の判定, 応用地質, 27 巻 2 号, pp. 11~20, 1986.
- 7) 磯田卓也, 鈴木哲也, 疋田貞良: 路床の凍上性と上載荷重の影響, 開発土木研究所月報, No. 515, pp. 2~9, 1996.
- 8) 小野丘, 阿部裕介, 小笠原将人: 疑似岩石試料の凍上性と物理特性, 地盤工学会北海道支部, 技術報告集第 45 号, pp. 71~74, 2005.
- 9) 日本道路協会: 道路土工—排水工指針, pp. 238~243, 1995.
- 10) 坂本多朗, 伊東佳彦, 日下部祐基: 岩盤路床の凍上性判定法に関する研究について, 第 51 回北海道開発局技術研究発表会, 発表概要集道路, コ-10, 2008.
- 11) 川村浩二, 坂本多朗, 細井順一: 岩盤路床の現地実証実験経過報告について, 第 52 回北海道開発局技術研究発表会, 発表概要集道路, コ-19, 2009.

## A STUDY ON EVALUATION METHOD OF ROCK FOR LONG TERM STABILITY AS SUBGRADE IN SNOWY COLD REGION

Yoshihiko ITO, Shuji ANAN, Yuki KUSAKABE and Taro SAKAMOTO

The property of various rock after the repetition of freezing and thawing was examined to establish the evaluation method of rock for long term stability as subgrade in snowy cold region.

By comparing destruction cycles of each rock with in-situ measurement result for rock property, the new judgment criteria is as follows: 1. Saturated density is  $2.2\text{t/m}^3$  or more, 2. Water absorption ratio is 6.0% or less, 3. P-wave velocity is  $3.0\text{km/s}$  or more, and 4. Unconfined compression strength is  $15\text{MN/m}^2$  or more.