

豊浜トンネル岩盤斜面崩壊に関する材料試験と応力解析

Material Tests and Stress Analysis on Rock Slope Collapse at Toyohama Tunnel

北海道大学工学部資源開発工学科岩石力学講座

藤井 義明

Rock Mechanics Laboratory, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Yoshiaki FUJII

Abstract

Material tests were carried out on the specimens sampled from the fracture plane at the accident site. Based on the results, 2-D stress analysis was carried out on the rock slope. Two collapse mechanisms were assumed and their possibilities were investigated. It was shown, assuming that the fracture plane was a plane of weakness, that increase in pore pressure due to freezing of the rock surface and freezing of water in the open crack could be included in the factors of the rock slope collapse, though the number of the specimen was not enough and the model geometry was not so precise.

Key words : Toyohama tunnel, Slope collapse, Material test, Stress analysis

キーワード：豊浜トンネル，斜面崩壊，材料試験，応力解析

1. はじめに

標記災害に関する機構解明の一助となすため、現地より採取した岩石供試体の材料試験ならびに試験結果に基づいた応力解析を行った。供試体数は十分でなく、また、応力解析に用いたモデルは正確な測量結果に基づいたものではないことをあらかじめ断っておく。

2. 材料試験

1996年2月23日に、災害後残存していた巻立上から振動ドリルによって乾式ボーリングを行い試料を採取した。採取位置は破断面の古平町側端部に位置する。岩盤表面は乾いているように見えたが実は凍結していた。すなわち、コアリング初期では粉状の繰粉が生じたが、ビットが熱を持つにつれ繰粉は湿り気を帯び、粘土状になった。このため、コアリング中には数10回ビットの出し入れをして繰り粉を排除する必要があった。コアリング終了後は、直径88mm、長さ約90mmの6本の試料を速やかにビニール袋に保存した。

供試体の乾燥かさ比重は1.75、自然状態のかさ比重は2.00、自然含水比（自然状態にて含有されている水の重量を乾燥重量で除した値）は14%であった。同供試体を若干整形した後測定した乾燥かさ比重は1.75、真空脱気して含水させた後測定した含水飽和状態のかさ比重は1.97であり有効空隙率は22%と評価された。以上より、自然状態の含水飽和度は100%と評価された。

圧裂引張試験では、直径50mm、厚さ約25mmの円盤型供試体を用いた。岩盤の自然状態における含水飽和度が100%と評価されたことを参考にして供試体は終始水道水中に保存し、ウェスで拭った後素早く試験に供した。スレーキングによる破壊はなかった。載荷には Instron 5586型材料試験機を用い載荷速度は0.3mm/min、データのサンプリングは1Hzとした。得られた応力-変位線図の例を Fig. 1 に、試験結果を Table 1 に示す。礫の割合は試験結果に影響を与えていない。圧裂引張強度の平均値は0.39 MPa となった。

単軸圧縮試験では、直径30mm、長さ約60mmの円柱型供試体を用いた。軸ひずみは Instron 社製伸び計（定格±1mm）、周ひずみは同社製チェーン式周方向伸び計（定格±5mm）を用いて測定した。得られた応力-ひずみ線図の例を Fig. 2 に、試験結果を Table 2 に示す。礫の寸法に比べ供試体が十分大きくないために、礫の割合は試験結果に大きな影響を与えている（礫の割合が多いほどP波速度、単軸圧縮強度が大きい）。P波速度と単軸圧縮強度との間には正の相関関係が認められた（Fig. 3）。

封圧を0.4~2.0 MPaに設定した三軸圧縮試験ではリリーフバルブ型の封圧制御装置と Hoek 型の圧力ベッセルを用いた。伸び計は用いず軸ひずみはクロスヘッドの変位から評価した。礫の割合は約半分で破壊様式はたる型であった。得られた応力-ひずみ線図の例を Fig. 4 に、試験結果を Table 3 に示す。P波速度を目安に試験結果から以下のような2つのグループを抽出した。

- (1) グループ1 (P波速度1.5km/s前後) : thu 3, tht 1, tht 3
- (2) グループ2 (P波速度2.5km/s前後) : thu 1, tht 2, tht 4

各グループ毎に封圧による明らかな強度増加がみられ（Fig. 5），Coulomb の破壊規準にあてはめたところ、Table 4 のような強度定数が評価された。

破壊韌性値試験では、試料の数量・寸法が十分でないために、標準的な試験方法ではないが、

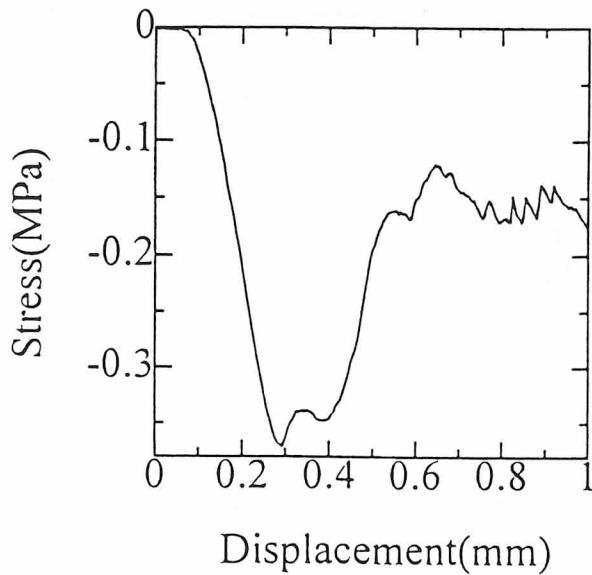


Fig. 1 Stress-displacement curve in Brazilian test. The stress is evaluated by using an analytical solution.

Table 1 Result of Brazilian test

Specimen	Indirect tensile strength (MPa)	Breccia
thb1	0.43	Less than half
thb2	0.37	More than half
thb3	0.36	Few

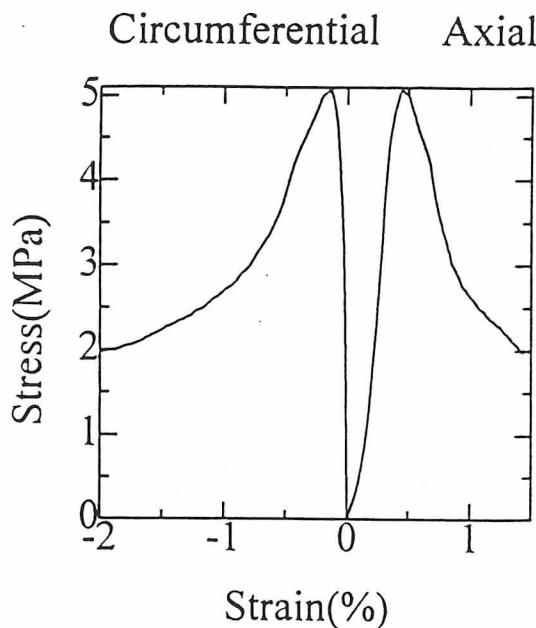


Fig. 2 Stress-strain curves for thu1 under uniaxial compression.

Table 2 Result of uniaxial test. V_P : P-wave velocity in km/sec, UCS: uniaxial compressive strength in MPa, E : Young's modulus in GPa, ν : Poisson's ratio

Specimen	V_P	UCS	E	ν	Breccia/Fracture mode
thu3	1.34	1.7	0.9	0.32	Few/Not clear
thu2	1.90	4.4	2.0	0.13	Half/Not clear
thu1	2.52	5.2	1.9	0.22	Half/Grain boundary
thu4	3.14	13.3	-	-	All/Wedge type

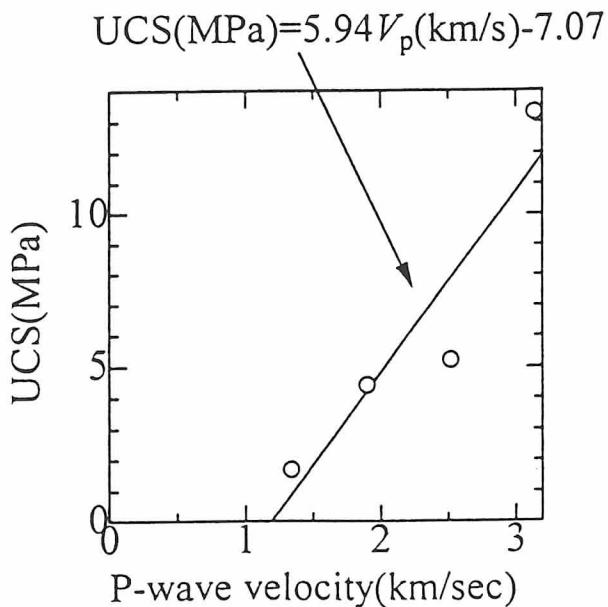


Fig. 3 P-wave velocity *v.s.* uniaxial compressive strength.

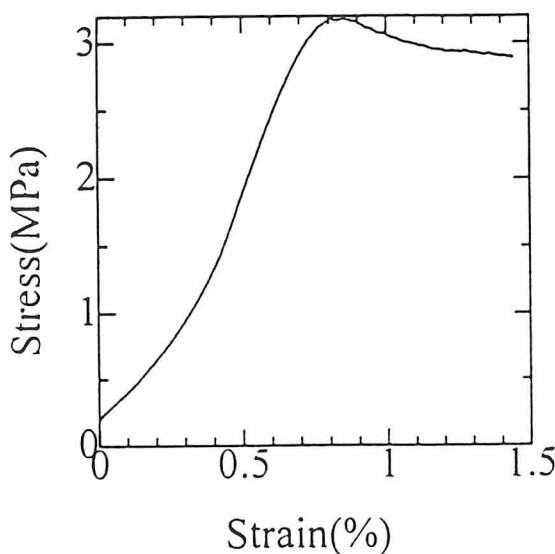


Fig. 4 Stress-strain curve for tht3 under confining pressure of 0.4 MPa.

Table 3 Result of triaxial test. V_P : P-wave velocity in km/sec, σ_3 : confining pressure in MPa, σ_1 : peak strength in MPa.

Specimen	V_P	σ_3	σ_1	Post failure behavior
tbt3	1.56	0.4	3.3	Strain softening
tbt1	1.51	0.5	4.0	Strain softening
tbt2	2.40	1.0	7.9	Strain hardening
tbt4	2.68	2.0	15.4	Strain hardening

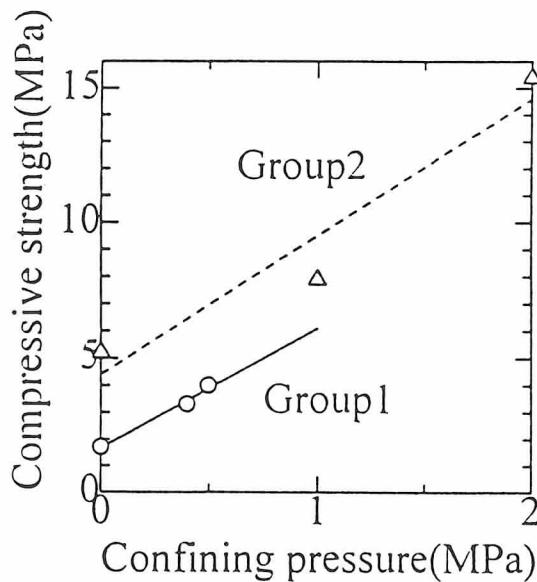


Fig. 5 Confining pressure *vs.* peak strength.

Table 4 Strength constants based on the results of the triaxial tests. UCS : uniaxial compressive strength, C : cohesion in MPa, ϕ : angle of internal friction in degree.

Group	UCS	C	ϕ degree.
1	1.7	0.40	39.2
2	4.4	0.97	42.2

半円盤型供試体を用いた方法 [Chong, K. P. and Kuruppu, M. D. (1984)] を採用した。直径 88mm, 厚さ 22~26mm の円盤型供試体を切断し半円盤型にした後、ダイヤモンドカッターで長さ 11~16mm, 幅約 2mm のノッチを作製し, Fig. 6 のように 3 点曲げ試験と似たような治具を用いて載荷した。

得られた荷重-変位線図の例を Fig. 7 に示す。破壊靱性値 K_{IC} ($\text{Pa}^* \text{m}^{0.5}$) の評価には以下の式を用いた。

$$K_{IC} = A^* F_{max}/b \quad (1)$$

$$A = 0.293 + 198l \quad (2)$$

ここで, F_{max} (N) は最大荷重, b は供試体の厚さ (m), l はノッチ長 (m) である。係数 A ($\text{m}^{-0.5}$) の値はノッチの幅が無視できるほど小さいと仮定して変位くい違い法 [Crouch, S. L. and Fairhurst, C. (1973)] により評価した。

クラック先端が黒色の角礫中にあったものとそうでないものとでは破壊靱性値に大きな違いがみられ、前者の平均値は $0.115 \text{ MPa}^* \text{m}^{0.5}$, 後者では $0.045 \text{ MPa}^* \text{m}^{0.5}$ となった (Table 5)。

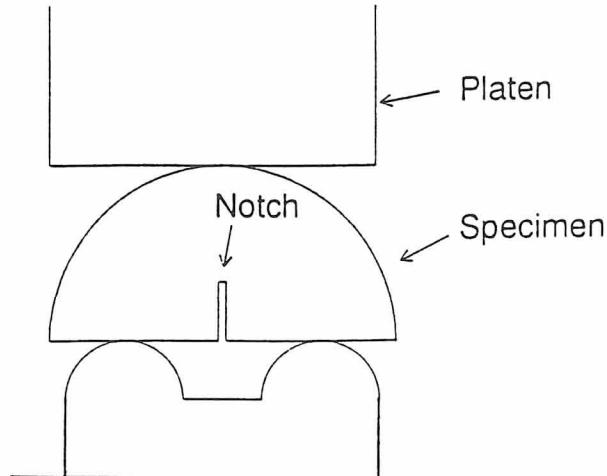


Fig. 6 Schematic figure of the fracture toughness test using semi-circular specimen.

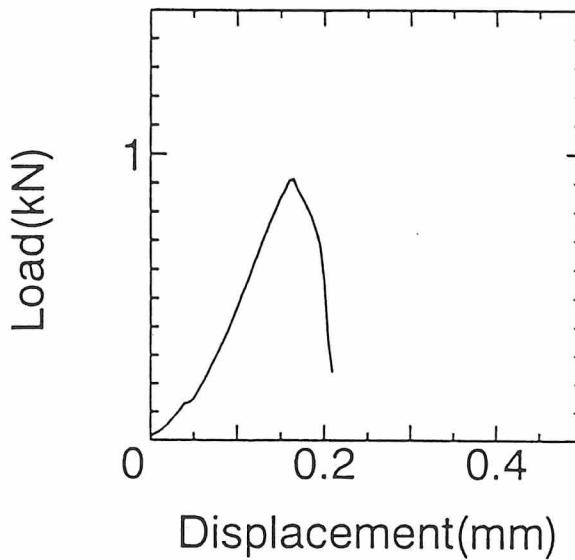


Fig. 7 Load-displacement curve for thhd1 in the fracture toughness test.

Table 5 Result of fracture toughness test. ‘ma’, ‘br’ and ‘bl’ denote that the crack tip was in the matrix, in the brown breccia and in the black breccia, respectively.

Specimen	Tip	K_{IC} (MPa*m ^{0.5})
thhd1	bl/bl	0.122
thhd2	bl/ma	0.128
thhd3	br/br	0.055
thhd4	bl/bl	0.159
thhd5	bl/ma	0.049
thhd6	br/br	0.050
thhd7	ma/ma	0.043
thhd8	br/ma	0.033

3. 応力解析

解析に用いた2次元モデルをFig. 8に示す。初期地圧として供試体の自然含水状態における単位体積重量 20 kN/m^3 によるかぶり圧とポアソン比0.22から水平方向変位拘束の仮定の下で評価される側圧係数0.28に対応する水平地圧を負荷する。この後、モデルの右と下の境界で垂直変位を拘束しつつ、自由境界の境界条件を満たすように掘削を行った。岩塊最上部には長さ0.707m、開口量5cmの開口クラックの存在を仮定した（初期開口量は結果にほとんど影響しない）。

応力解析は以下の7ケースについて行った。

- (1) ケース1：初期クラックなし
- (2) ケース2：初期クラック有り
- (3) ケース3：初期クラック内に一様に0.1 MPaの内圧が突然作用する場合
- (4) ケース4：内圧が0.2 MPaの場合
- (5) ケース5：内圧が0.3 MPaの場合
- (6) ケース6：内圧が0.5 MPaの場合
- (7) ケース7：内圧が1.0 MPaの場合

解析に用いた諸物性値をTable 6に示す。これらは材料試験において評価された値を単純に平均したものである。また、ケース4～7では初期き裂が成長するが、これについてはSihの最大引張応力説に基づいて有無と方向を評価した。

ケース1、2におけるモデル内部の応力分布をFigs. 9～11に示す。両ケースに大きな違いはみられない。ほとんどの部分で0.3～1 MPa程度の圧縮の最大主応力と0.0～−0.2 MPa程度の引張の最小主応力が作用している。しかしながらトンネル右肩部岩盤では局所的に大きな引張・せん断応力が作用している。したがって、A'付近に鉛直方向のクラックが生じていた可能性があるといえる。ただし、これについては、ほとんど成長しないと評価された。

ケース3では初期き裂は成長しなかったが、ケース4～7では内圧により初期き裂が成長する（Fig. 12）。き裂の成長の様子は内圧の大きさによって異なるが、内圧が小さい場合にはき裂は自由面側に向って成長する傾向がある。ただし、ここで示したき裂の成長挙動は内圧が「突然」作用した場合であり、内圧が徐々に作用すれば内圧が0.2 MPaに達した時点でケース4のような崩落が起り、これ以上内圧は増加しないことに注意されたい。

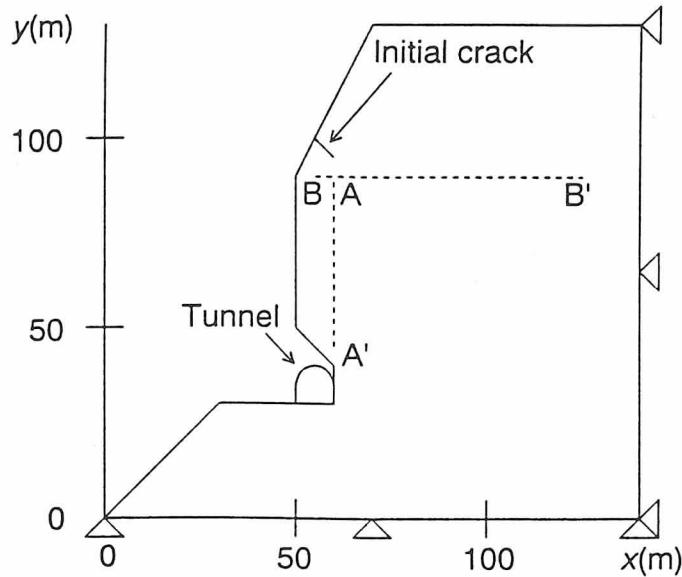


Fig. 8 Model used in stress analysis.

Table 6 Parameters used in the numerical stress analysis.

Young's modulus	1.6GPa
Poisson's ratio	0.22
Fracture toughness	0.080MPa*m ^{1/2}
Angle of friction between crack surfaces	40.7°

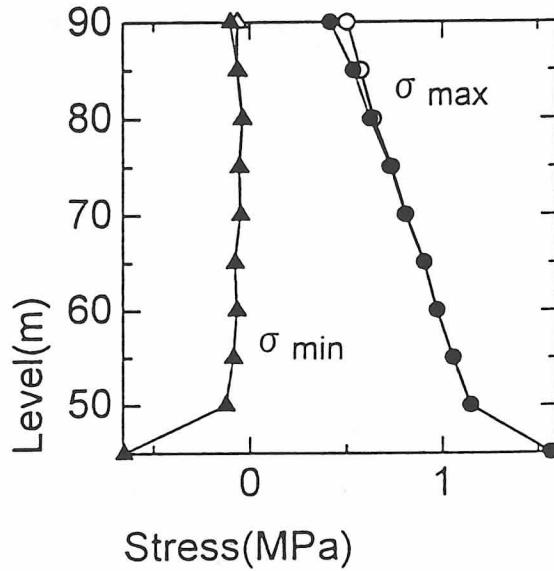


Fig. 9 The maximum and minimum principal stresses on the line A-A'. Open and solid symbols denote the cases 1 and 2, respectively.

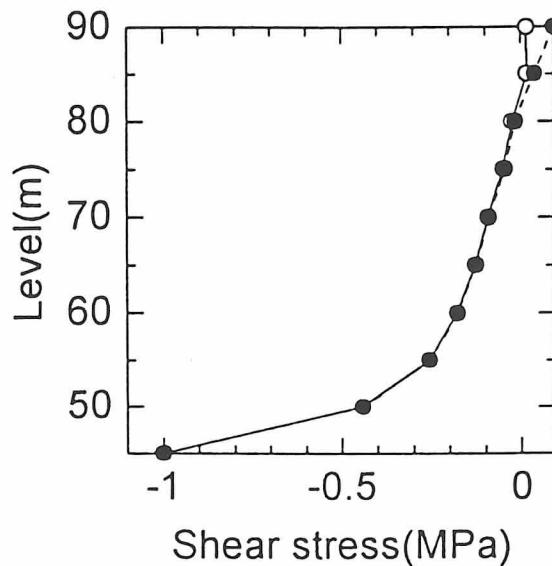


Fig. 10 Shear stress τ_{xy} on the line A-A'. Open and solid symbols denote the cases 1 and 2, respectively.

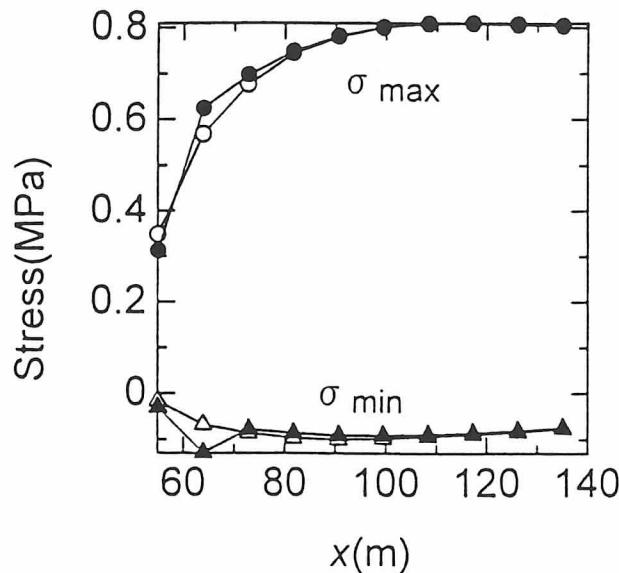


Fig. 11 The maximum and minimum principal stresses on the line B-B'. Open and solid symbols denote the cases 1 and 2, respectively.

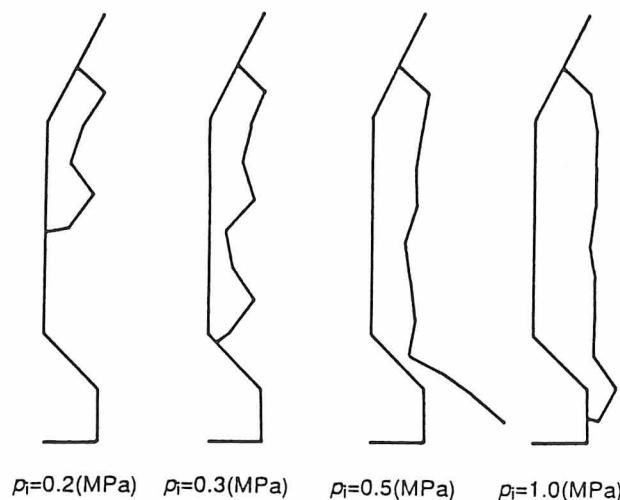


Fig. 12 Prediction on crack growth for the cases 4 to 7.

4. 崩落の要因とその可能性

まず、岩盤表面の凍結により水路が遮断され、破断面付近で間隙水圧が上昇すると仮定する。圧裂引張試験によれば当該岩石の平均的な圧裂引張強度は0.39 MPaである。応力解析の結果破断面には0～0.2 MPa程度の引張応力が作用していると評価されたので、0.2～0.4 MPa（水頭にして20～40m）程度の間隙水圧が発生すれば引張破壊が生じ得ると考えられる。破断面が弱面であったと仮定すれば破断面に認められる2つの水路から生じたき裂が弱面に沿って成長することは可能と考えられる。

次に、初期クラック内に雪が融解して生じた水が入り込み、夜間から早朝にかけての冷え込みにより凍結したと仮定する。このとき凍結が徐々に生じれば、破断面はすぐに自由面に向かうので大岩塊を一気に崩落させることは難しいと予想される。一方、破断面が弱面であったと仮定すれば、氷の凍上圧は1 MPa程度であるので、凍結がクラックの一部で徐々に生じたとしても、き裂が弱面に沿って成長することは可能と考えられる。

すなわち、破断面が弱面であったという仮定の下で、上記2つの機構は崩落の要因に含まれ得る。ただし、以上の考察は材料試験の結果をそのまま用いた不正確な2次元モデルに基づいたものであり、より正確には寸法効果を考慮した物性値、ならびに、正確な測量や風化程度の調査に基づいた3次元モデルを用いる必要があろう。

5. ま と め

岩盤斜面崩落の機構解明の一助となすために現地より採取した岩石試料について材料試験を行い、この結果を参考にして災害斜面の応力解析を行った。また、いくつかの機構を仮定してそれらが単独に作用した場合の崩落の可能性について検討した。実際には崩落はいくつかの機構が同時に作用して生じたものと思われるが、破断面が弱面であったという仮定の下で、岩盤表面の凍結による間隙水圧の上昇、ならびに、斜面上端部の開口クラックに入り込んだ水の凍結が崩落の要因に含まれ得ることを示した。

参考文献

- Chong, K. P. and Kuruppu, M. D. (1984) : New Specimen for Fracture Toughness Determination for Rock and Other Materials, Int. J. Fracture, Vol. 26, R59 - R62.
- Crouch, S. L. and Fairhurst, C. (1973) : The Mechanics of Coal Mine Bumps and the Interaction between Coal Pillars, Mine Roof and Floor, U. S. B. M. Contract Report, H0101778.