

氷点下における支笏溶結凝灰岩の力学的挙動

西松建設(株)(元 北海道大学) 正会員 ○三井善孝
 北海道大学 正会員 児玉淳一、菅原隆之、正会員 福田大祐、正会員 藤井義明
 (株)ダイヤコンサルタント(元 北海道大学) 原 翔平

1. はじめに

北海道などの寒冷地の岩盤斜面では寒冷地特有の破壊が進行しており、その防止策や発生メカニズムの解明が必要とされている。筆者らは、これまでに、寒冷地における岩盤斜面の長期安定性評価の基礎的研究として、乾燥と含水飽和の両状態における支笏溶結凝灰岩を対象に一軸圧縮クリープ試験および一軸圧縮定ひずみ速度試験を実施し、氷点下における岩石の強度・変形性の時間依存性や、両試験における時間依存性の密接な関係を明らかにした¹⁾。本研究では、氷点下における岩石の破壊プロセスと強度・変形性の载荷速度依存性を理解するために、岩石供試体を粘弾性体と仮定し、二次元有限要素法により、一軸圧縮定ひずみ速度試験のシミュレーションを行った。

2. 構成方程式と変数

時間に依存した変形や破壊挙動を表現するため、コンプライアンス可変型構成方程式²⁾を用いた。この構成方程式では、破壊の進行に伴う劣化を(1)式のように、コンプライアンスの増加で表現している。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n+1} \right)^{n-m+1} (\lambda^*)^m (\sigma^*)^n \quad (1)$$

ここで、 λ^* は初期値 λ_0 で正規化したコンプライアンスであり、 λ_0 はヤング率の逆数となる。 σ^* は破壊限接近度であり、応力状態が破壊条件にどれだけ近いかを示す値である。破壊条件として、クーロンの破壊基準を用い、引張応力に対してはテンションカットオフを採用した。 n は時間依存性の程度を示す値であり、この値が小さいほど、強度の载荷速度依存性は大きくなる。 m は延性の程度を示す値であり、 m/n の値が小さいほど延性的となる。 t_0 は $10^{-5}/s$ の軸ひずみ速度の下で一軸圧縮試験を実施した際に、ピーク応力に達するまでの時間である。

3. 解析モデル、物性値、解析条件

図-1に示す有限要素モデルを作成し、強度の不均質性を表現するため、Weibull分布を用いて、要素の一軸圧縮強度にばらつきを与えた。乾燥状態の供試体では、Weibullの不均一性係数を5とし、平均値が15MPaとなるように一軸圧縮強度を設定した。一方、含水飽和状態の供試体については、支笏溶結凝灰岩の空隙率が約35%であることから、乾燥状態の供試体のモデル中で強度が下位35%の要素に空隙が含まれており、それらが間隙氷に置換されると仮定した。そして、該当する要素の平均値が25MPaとなるように、Weibullの不均質性係数を10とし、一軸圧縮強度を設定しなおした。その他の物性値は、表-1のように設定した。軸ひずみ速度は $10^{-7} \sim 10^{-3}/s$ の範囲の3通りとし、解析モデル上面の節点に対して、一定の速度下で強制変位を与えた。また、下面の節点の鉛直方向変位と、下面中央の節点の水平方向変位を拘束した。そして、(1)式に従って反復計算を行い、コンプライアンスの変化を算定し、応力-軸ひずみ線図を描いた。なお、計算の安定化を図るために(1)式中の λ^* の上限値は3.0とし、上限値に達した要素を破壊要素とみなした。

キーワード 凍結した岩石、有限要素法、時間依存性

連絡先 〒105-0004 東京都港区新橋6丁目17番21号 西松建設(株)技術研究所 土木技術グループ TEL 03-3502-0279

表-1 物性値

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Internal friction angle (°)	Mean uniaxial compressive strength (MPa)	Uniaxial tensile strength (MPa)	n_0	m
Rock	3	0.10	30	15	1.5	20	20
Pore ice	3	0.38	50	25	1.5	3	1

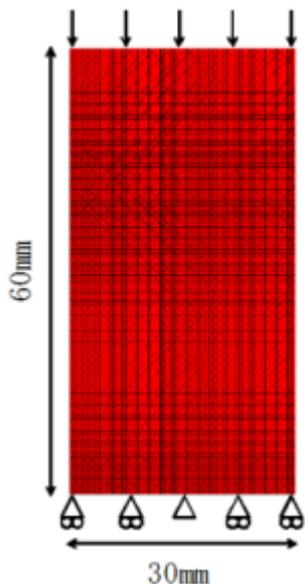
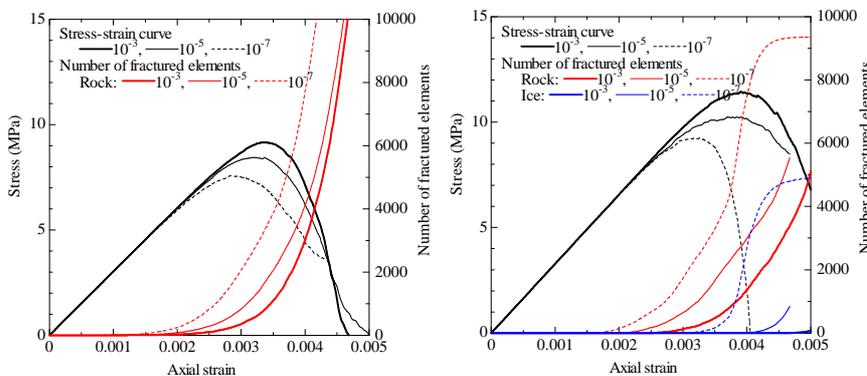


図-1 解析モデル

(要素数 14,400、節点数 29,161)



(a) 乾燥状態

(b) 含水飽和状態

図-2 応力-ひずみ線図と破壊要素数の推移

4. 解析結果と考察

得られた応力-ひずみ線図と、破壊要素数の推移を図-2 に示す。応力-ひずみ線図は、载荷初期には線形的であるが、次第に非線形的となり、ピーク応力を示した後、ひずみ軟化を示す。また、軸ひずみ速度が小さいほど、非線形性が現れ始める応力やピーク応力は減少する。同一の軸ひずみ速度において、含水飽和状態のピーク応力は、乾燥状態の値よりも大きい。これらの特徴は、筆者らがこれまでに行った一軸圧縮定ひずみ速度試験の結果¹⁾と定性的に一致している。破壊要素は、ピーク応力以前から現れ始め、応力の増加に伴い指数関数的に増加する。また、軸ひずみ速度が小さいほど、同じ軸ひずみ値における破壊要素の数は多くなる。ただし、含水飽和状態では、間隙氷よりも岩石部分の破壊が先に生じる傾向があり、間隙氷はピーク応力以前にはほとんど破壊しない。

破壊要素数やピーク応力の载荷速度依存性に関しては、(1)式により次のように解釈できる。(1)式に従うと、劣化の速度は時間積分に依存し、時間が長くなるほど、劣化の度合いは大きくなる。すなわち、载荷速度が小さくなると、同一応力に達する時間は長くなり、それまでの劣化の度合いも大きくなる。そのため、载荷速度の減少に伴い、破壊要素数は増加し、ピーク応力は減少したと考えられる。また、含水飽和状態においては、岩石部分の破壊が先行し、間隙氷が主に荷重を支持するため、含水飽和供試体の挙動は間隙氷の挙動の影響を受けた²⁾と考えられる。

5. まとめ

本研究では、二次元有限要素法により、氷点下における岩石供試体を対象とした一軸圧縮定ひずみ速度試験のシミュレーションを行い、氷点下における岩石の破壊プロセスや強度・変形性の载荷速度依存性に関する考察を行った。今後は、試験後の供試体の観察や不連続面を考慮したモデルの使用などにより、さらなる検討を行うことが課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 三井善孝、児玉淳一、原翔平、菅原隆之、福田大祐、藤井義明 (2013)、凍結した支笏溶結凝灰岩の力学的挙動の時間依存性、Journal of MMIJ、Vol. 129、No. 7、pp. 433-439
- 2) 大久保誠介、金豊年 (1993)、非線形粘弾性モデルによる円形行動周辺岩盤挙動のシミュレーション、資源と素材、Vol. 109、No. 3、pp. 865-869