トンネルのクリープ破壊モデル実験の数値シミュレーション

学生会員 陳 英芝

国際会員 張 鋒

1. はじめに

日本の特有な地質条件により、破砕帯のような地質条件の悪い地山にトンネルの建設が余儀なくされるケ ースが多い。そのため、強度の低い地山に建設されたトンネルの長期安定性の定量的な評価手法が必要と考 えられる。しかし、現状では老朽化に伴うトンネルの長期安定性を評価する有効な手法が確立されておらず、 補修工事後も変状が進行する事例が多く、進行性破壊に起因するトンネル破損メカニズムの解明が急務とな っている。本研究では、新たに弾粘塑性構成式を提案し、人工軟岩を用いた室内要素試験の要素シミュレー ションを行うと共に、トンネルのクリープ破壊模型実験の有限要素解析を行い、実験結果に基づいた解析手 法の適応性を検証すると同時にトンネル周辺地山の経年劣化による進行性破壊のメカニズムを検討する。

2.構造 密度効果を考慮した軟岩の弾粘塑性構成式の提案

張ら¹⁾は *tij*と下負荷面の概念を組み込み、軟岩の物理的挙動を簡潔に表現できる構成式を提案した。しかし、体積ひずみ - 軸ひずみの関係など一部の挙動において実際の軟岩と大きく異なることが確認されている。そこで本研究では、張ら¹⁾が提案した構成式に密度効果と構造喪失の概念を導入し、負荷基準Aを式(1),(2)のように組み込むことにより、的確に軟岩の力学挙動を表現することを試みる。

$$\Lambda = \left[\frac{\partial f_{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + \frac{h(t)}{C_p}\right] \left/ \left[\frac{\partial f_{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial t_{kl}} + \frac{h^p}{C_p}\right]$$
(1)

$$h(t) = \left(\dot{\varepsilon}_{0}/\dot{\varepsilon}\right)^{1/3} \left(1 + t/t_{1}\right)^{-\alpha} \qquad C_{p} = \left[\lambda - \kappa\right] / \left[1 + e_{0}\right] \qquad h^{p} = \frac{\partial f_{\sigma}}{\partial t_{ii}} - \left[m_{R} \frac{\ln R}{R} + m_{R^{*}} R^{*} (1 - R^{*})\right] / t_{N}$$
(2)

 E_{ijkl} :弾性係数, $\dot{\epsilon}_0$:基準ひずみ速度($\dot{\epsilon}_0 = 10^{-4}$ (1/sec)), $\dot{\epsilon}$:ひずみ速度,t:経過時間, t_1 :単位時間($t_1 = 1.0$ min)である。これ以外のパラメータの説明は表-5に示す。

3. 提案するモデルの検証

3.1 三軸圧縮・クリープ試験²⁾の概要

三軸圧縮試験の試料として再現性の良い人工軟岩を使用した。この人工軟岩は珪藻土を石膏で固化させて 作製した一軸圧縮強さが 2.0MPa 程度の材料(表-1、表-2)であり、三軸圧縮試験および三軸クリープ試験の 結果から軟岩の力学特性(ひずみ軟化・クリープ・ダイレタンシー)を模擬できることが確認されている。

Numerical simulation of model test on tunnel creep failure

Hirotomo NAKANO, Sheng ZHANG, Youngji JIN, Feng ZHANG

Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

表-1 人工軟岩の配合(重量比)

石膏(A 級)	珪藻土	水	遅延剤
1	0.3	1	石膏の 0.4%

※遅延剤はクエン酸3ナトリウム

表-3 三軸圧縮試験載荷条件

ひずみ速度	拘 束 圧			
0.01 %/min.	0.1MPa、0.3MPa、 1.0MPa で宝施			
0.1 %/min.				
1 %/min.	1.0mra C 关旭			

表-2 人工軟岩の物理特性

湿潤密度	見かけの	一軸圧縮強さ	
(g/cm ³)	含水比 (%)	(MPa)	
1.45~1.51	67.9~73.5	1.7~1.9	

表-4 三軸クリープ試験載荷条件

					-
拘束圧	載	荷	重	備	考
0.1MPa	2	一方書	至中	-	
0.3MPa	レーク 強度		模型争	尾験の	
	v	/ 00 /		拘束圧	を考慮

排水三軸圧縮試験(CD)は拘束圧一定のひずみ制御方式で実施されており、その載荷条件が表-3に示す とりである。なお、ひずみ速度の影響を調べるために、最大の差が100倍ある3パターンのひずみ速度を用 いて載荷を行って、人工軟岩の力学特性を調べた。CD条件で行った三軸クリープ試験の載荷条件を表-4に 示す。既存の実験装置において強度試験に近いひずみ速度で載荷するため、載荷パターンは等分割段階載荷 (10分割)で行った。

3.2 実験値と理論値の比較

三軸圧縮試験および三軸クリープ試験を基に決定し た材料パラメータを表-5 に示す。図-1 に室内要素試験と 要素シミュレーションの解析結果を示す。破線は実験値、 実線は理論値を示している。

ひずみ速度を一定(0.1%/min.)にして拘束応力を変化 させた三軸圧縮試験の結果を図-1(1)、(2)に示す。応力-ひずみ関係からピークおよび残留強度は概ね表現できて いるが、載荷初期の段階において応力増分が実験値に比 べて小さい。一方、体積ひずみ - ひずみ関係において体 積ひずみが定量的に表現できていないことが分かる。特 に、拘束圧が大きい 1.0MPa の解析結果について、体積 が十分に圧縮されていない。その原因として提案構成式 では過圧密比の影響を過大評価していることが考えられ、 今後解決して行く必要があると考えられる。しかし、全 体としては体積ひずみの圧縮または膨張する傾向を捉え ていて、解析が実験値を概ね再現している。

拘束応力を一定(0.1MPa)の下、ひずみ速度を変化さ せた三軸圧縮試験の結果を図-1(3)、(4)に示す。ひずみ速

表-5 パラメーター覧

名 称	値
ポアソン比レ	0.15
参考間隙比 N	1.05
	10.90 (0.1MPa)
限界主応力比 R _f (MPa)	6.90 (0.3MPa)
	3.69 (1.0MPa)
圧縮指標 λ	0.084
膨張指標 <i>K</i>	0.0051
パラメータβ	1.5
過圧密解消パラメータ m _R	0.4
構造喪失パラメータ m _{R*}	2.10
	0.042 (0.1MPa)
初期過圧密比 R ₀	0.025 (0.3MPa)
	0.035 (1.0MPa)
初期構造 R ₀ *	0.25
二次圧密係数 α	0.65

度一定の解析結果とは異なり、応力 - ひずみ関係および体積ひずみ - 軸ひずみ関係においてひずみ速度の影響がほとんど表現できていない。そこで拘束圧を 0.3MPa にして、同様の解析を行ったところ、ひずみ速度 による違いが現れることを確認したことから、ひずみ速度の影響をより適切に評価できるように構成式をさらに改良する必要があると考えられる。

拘束圧 0.1MPa の下で三軸クリープ試験を行った結果について、軸ひずみ - 経過時間関係と軸ひずみ速度 - 経過時間関係を図-1(5)、(6)に示す。クリープ試験の載荷応力を拘束圧 0.1MPa と 0.3MPa の三軸圧縮試験

結果から得られたピーク強度の 80%の値に設定した。図-1(5)の軸ひずみの時刻歴から、解析の結果が実験の 結果をよく再現していることがわかる。特に拘束圧 0.1MPa の場合、解析値は実験値とほぼ一致している。 また、拘束圧 0.1MPa の解析結果が実験値に比べてクリープ破壊が少し早くなっている点を除けば、軸ひず み速度 - 経過時間関係も概ね表現できている。さらに、拘束圧 0.3MPa の場合に、軸ひずみ速度が一度は上 昇するがその後低下していくことが見られ、構造喪失が一時的に卓越したことによるものと考えられる。

以上により、新たに提案した構成式は数少ないパラメータを用いて、ひずみ硬化・軟化、せん断圧縮・膨 張、クリープ特性、ひずみ速度依存性などの軟岩の力学特性を統一的に説明できることを確認した。試験の 条件によっては実験値と多少異なる部分もあり、更なる構成式の改善が求められるものの、全体的な傾向は 捉えていることから本研究で提案した構成式は人口軟岩の挙動を概ね表現できるといえる。



図-1 人工軟岩を用いた要素試験による構成式の検証

4. トンネル模型実験への適用

4.1 トンネル模型実験³⁾⁴⁾の概要

トンネルの模型実験装置を図-2 に示す。これは載荷による破壊実験とクリープ実験の両方が行えるよう に開発された装置である。本体内に設置された試験体に上部から油圧ジャッキ、両側面からフラットジャッ キでそれぞれ載荷板を通して載荷する 2 方向応力制御方式である。その載荷過程を表-6 に示す⁵⁾。また、破 壊実験の載荷パターンを図-3 に、クリープ実験の載荷パターンを図-4 に示す。まず、破壊実験では等方拘束 圧を 0.3MPa まで加圧した後、破壊試験では軸方向に 1.8MPa まで加圧し破壊させる。一方で、クリープ試験 では破壊試験と同様に等方拘束圧を 0.3MPa まで加圧した後、軸方向に 1.1MPa まで加圧しその後荷重を保持 する。

	第1段階	第2段階	第3段階
破壊実験	0.3MPa まで載荷	1.8MPa まで載荷	なし
クリープ実験		1,1MPa まで載荷	荷重保持

表-6 トンネル模型実験の載荷過程(載荷速度 0.025MPa/min)





4.2 有限要素解析

有限要素解析に用いた解析メッシュを図-5に示 す。図-2に示した模型実験と同スケール、同条件の 2次元のメッシュを作成した。境界条件は底面中央 の1点のみ水平方向に固定し、その他の底面の節点 については鉛直方向に固定とした。また、初期の拘 束圧を 0.1MPa としたため、表-5 に示す拘束圧 0.1MPaの材料パラメータを用いて解析を行った。実 験に用いた地盤材料は室内要素試験で用いた人工軟 岩と同様である。

解析から得られた鉛直方向応力分布を図-6 に示 す。0.3MPa 載荷までは鉛直応力がほぼ均一であるが、 破壊実験の 1.8MPa 載荷終了時の鉛直応力を見ると トンネルの天端、インバート付近の応力がそれほど 変化していないが、トンネルのスプリングラインを 中心に大きな応力が集中している。これは実験の結



果、鉛直載荷によりスプリングライン付近の側壁に応力集中が発生し破壊した結果、ひび割れが生じている ことに対応している。また、左右の応力は対称であるのに対して、上下方向は若干下部のほうが尾を引いて 対称ではないが、これは境界条件の影響であると考えられる。また、クリープ過程においては応力の変化が ほとんど見られなかったため、ひずみ軟化による応力の再配分が顕著でないことを示唆している。

図-7 にせん断ひずみの分布を示す。破壊実験において天端、インバートに着目するとひずみの発達が 抑制されており、クリープ実験でも同様の挙動を示している。一方で、トンネル肩部において破壊実験では 上・下対称にせん断ひずみが大きく発生しているが、クリープ実験では載荷直後のせん断ひずみ量が小さく 時間の経過に伴い左右対称の形で進展していく。実験でも同様な傾向が見られ、解析が実験をよく再現して いると考えられる。また、クリープ実験の解析の結果より、載荷維持開始後から終了までのトンネル周面の 近傍におけるせん断ひずみの増加率が最大 36%にも達し、局所的な破壊に至っていることを確認した。



次に、破壊実験におけるトンネル端面変位について検討する。 天端、スプリングライン (S.L.)、インバートの位置を図-8 に示す。 図-9 にトンネル端面変位の時刻歴を示す。正の値はトンネルの内側 に収縮、負の値はトンネル外側に膨張することを意味する。また、 破線は実験値、実線は解析値を示している。図-9 に示すように、天



端とインバートの変位は定性的に再現しているが、スプリングラインに発生する変位量は実験値に比べて過 大評価されている。これは垂直荷重が卓越している場合の横方向変位が地盤材料のポアソン比に依存してい るため、ポアソン比を適切に考慮すれば解決できるものと考えられる。

クリープ実験におけるトンネル端面の変位の経時変化の実験と解析結果を図-10に示す。正の値はトンネルの内側に収縮、負の値はトンネル外側に膨張することを意味する。また、破線は実験値、実線は解析値を示している。破壊実験と同様に、解析結果はクリープ試験の実験結果を再現している。特に、スプリングラインの解析結果について、破壊実験に比べると再現性が高い。一方、天端とスプリングラインの変位の経時変化について解析値は実験値より小さく、クリープ開始後の変位がほぼ線形的に増加している。





最後に、クリープ実験におけるトンネル周辺に発生する周方向ひずみについて詳細に検討する。検討の対 象は対称性があることから図-11 に示す代表的な 15 点について実験と解析の結果を比較する。実験値はそれ ぞれの地点に設置してあるひずみゲージから計測されたものであり、解析値も計測と同じ位置にある節点か ら得られたものであり、天端、スプリングライン、インバートおよびトンネル上下肩部に半径方向に分布し ている。実験値と解析値を比較したひずみの時刻歴を図-12~図-14 に示す。破線は実験値、実線は解析値を 示している。天端およびインバート方向のひずみについては、実験ではトンネル端面からの距離に関わらず ひずみがあまり発生していない。解析でもクリープ開始後のひずみ増分が端面から 40mm の結果を除くとひ ずみの発生量が少なく、天端とインバートの差は小さい。スプリングライン方向の実験値(3・8・13:青色 の破線)に関しては、クリープ中に急激にひずみが減少しているが、これは破壊によりスプリングライン付 近に大きなせん断面が生じ、局所的な弾性除荷が起こっており、その結果ひずみが減少したものと考えられ る。図-15にせん断面の発生と局所的な弾性除荷の模式図を示す。時間の経過と共に3・8・13の順でトンネ ルからの距離が遠くなるほどひずみの減少量が少なくなることから、弾性除荷領域がトンネル端面から始ま ったと考えられる。また、実験ではひずみのピークがスプリングラインからインバートへ、より深いところ に移っていくことから応力の再配分が発生していると考えられるが、解析では弾性除荷が発生する事なく塑 性ひずみが単調増加する載荷状態にあり、実際に発生した不連続の変位を説明できないことを示唆している。 ただし、概ねの傾向を説明できていることは言えよう。



5 結論

本研究では、地山の時間経過に伴う変形特性や強度劣化・低位化を考慮できる構成式を導入した数値解析 手法により、再現性の良い人工軟岩を用いたトンネルのクリープ破壊モデル実験の有限要素解析を行い、提 案する構成式に基づいた解析手法の信頼性を検討した。以下に、その結果をまとめる。

1. 提案した構成式のパフォーマンスについて

新たに提案した構成式は数少ないパラメータを用いて、ひずみ硬化・軟化、せん断圧縮・膨張、クリープ 特性、ひずみ速度依存性などの軟岩の力学特性を統一的に説明できることを確認した。たたし、試験の条件 によっては実験値と多少異なる結果もみられ、更なる構成式の改善が求められるものの、全体的な傾向は捉 えていることから本研究で提案した構成式は人口軟岩の挙動を概ね表現できるといえる。

2. 境界値問題の有限要素解析結果について

トンネルのクリープ破壊モデル実験の有限要素解析は応力分布やひずみ分布について実験に近い結果を 得ることができた。特に、応力およびひずみが集中する地点が実験と同様にトンネル上下肩部にあることを 正確に再現していることから、トンネルが局所的な破壊に至る場所を予測することが可能であると考えられ る。ただし、実験に比べると数値解析では応力の再配分が顕著でないことが分かり、局所的な不連続破壊が 解析では起こらないことが原因と考えられる。

また、実験結果と同様に、破壊実験およびクリープ実験のシミュレーションにおいて、いずれもひずみが トンネル上下肩部に集中的に発生している。また、クリープ実験のシミュレーションにおいては、トンネル 壁面のせん断ひずみが時間とともに増加していき、局所的な破壊に至ることが分かった。ただし、スプリン グラインのひずみのピーク値が時間とともにトンネル周面から半径方向に沿って奥へ移行していく現象は表 現できなかった。連続体力学の限界を示唆している。 3. 今後の課題について

今回提案した構成式は軟岩の挙動を統一的に説明し、この構成式に基づいた有限要素解析の結果、モデ ル実験で見られる応力分布やひずみ分布を表現できることを確認した。しかし、せん断ひずみの大きさやク リープ挙動時のひずみ増加の度合いの誤差などの課題を抱えており、今後は提案した構成式を改善し、さら なる精度向上を目指す必要があると考えられる。

参考文献

1) Feng Zhang, Atsushi Yashima, Teruo Nakai, Guan Lin Ye and Hla Aung : An Elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on tij concept and subloading yield surface, Soils and Foundations vol.45 No.1, 65-73, 2005.

2)田坂嘉章,東均,大森剛志,関根裕治,張鋒:トンネルの長期変形挙動に関するモデル実験及び解析評価手法の研究 - その2:ひずみ軟化型弾粘塑性構成モデルの拡張と三軸試験への適用 - ,第42回地盤工学研究発表会, 1545-1546, 2007.

3) 黒瀬浩公,田坂嘉章,関根裕治,八代義信,亀谷裕志,張鋒:トンネルの長期変形挙動に関するモデル実験及び 解析評価手法の研究 - その1:軟岩のクリープを考慮したトンネル模型実験-,第42回地盤工学研究発表 会,1543-1544,2007.

4) 大森剛志,黒瀬浩公,田坂嘉章,関根裕治,張鋒:トンネルの長期変形挙動に関するモデル実験及び解析評価手 法の研究 - その3:ひずみ軟化型弾粘塑性構成モデルによるトンネル模型実験の解析 -,第42回地盤工学研 究発表会,1547-1548,2007.

5) Y. Sekine, F. Zhang, Y. Tasaka, H. Kurose and T. Ohmori, Model tests and numerical analysis on the evaluation of long-term stability of existing tunnel, Proceedings of 17th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Egypt (In printing), 2009.