

強度低下を考慮した NATMトンネルの変形挙動分析例

Fundamental Investigation for a Collapse Mechanism of a Shallow NATM Tunnel
Considering Reduction of Strength Parameters

芥川真一¹・西田愛²・高野晃佑³
Shinichi Akutagawa, Megumi Nishida and Kosuke Takano

¹正会員 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

³学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

This paper tries to identify deformational mechanism of a shallow NATM tunnel which experiences large deformation during construction. A numerical simulation method employed here incorporates reduction of not only cohesion but also friction angle due to various reasons encountered during construction. It has been found that environmental factors such as state of underground water or construction sequences could influence deformational mechanism of a shallow tunnel.

Key Words : NATM tunnel, underground water, weakening of ground material,
identification of strength parameters

1. 概要

土被りの浅いNATMトンネルでは、地上の構造物や地下の埋設物へ与える影響を最小限に抑えるために、施工時には周辺地山や地表面の変位には細心の注意を払う必要があるが、いくつかの悪条件が重なった場合、変形が異常に大きくなり、トンネルの安定性が損なわれることがある。本報では、ひずみ軟化手法を用いて地下水の影響、地山材料の強度低下などを考慮し、トンネルの不安定化現象について検討した結果について述べる。

2. 研究目的と背景

対象とするトンネルは、なだらかな丘陵地帯に位置し、平均土被りは8mである。トンネル上部の田畑が陥没し、土砂がトンネル内を埋めた。その原因として、周辺が軟弱地盤であったこと、また、地下水脈が複雑で、地下水位が地表面近くまで上昇し、それによる水圧が作用していたこと、イン

パート（トンネルの底盤部分）のコンクリートが施工中であったことが挙げられた。本研究では、それらの諸要因を考慮し、トンネルの不安定化現象について考察することを目的とする。

3. 使用解析ツール

今回用いたひずみ軟化挙動を表現できる解析ツール¹⁾は、図-1のように、せん断ひずみの増加に伴い、地山のせん断に対する変形係数（異方性パラメータ）と摩擦側における強度定数を同時に低下させる解析手法で、特に土被りの浅いNATMトンネルの変形挙動を再現するのに効果的である。せん断ひずみの増加に伴って強度を低下させることにより、応力の再配分を行い、荷重が作用していない場合においても変形挙動をモデル化できるようになっている（図-2参照）。また、この解析ツールを用いると、すべり面が地表面まで卓越するような変位データも再現することができる。

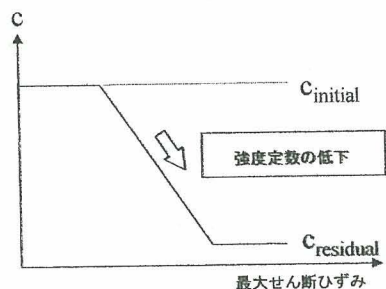


図-1 せん断ひずみと材料強度低下の関係

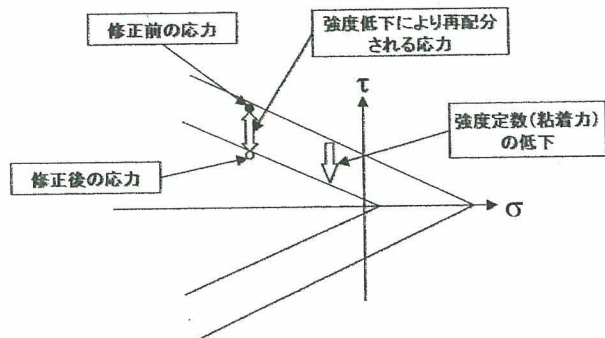


図-2 強度低下と応力状態の操作

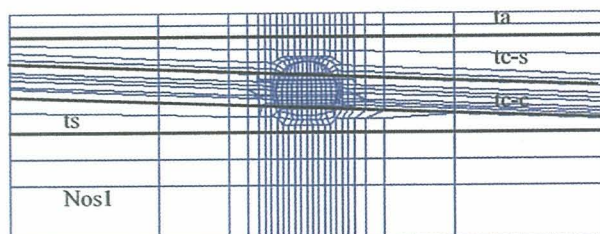


図-3 地層構造と有限要素メッシュ

4. 解析パターンの設定

諸要因を参考にして表-1に示すように解析パターンを設定した。地下水位変動に関して材料強度が低下すると考える地層は、トンネル周辺の粘土層のみとする場合と、天端以上の砂層にまで及ぶ場合を想定した。次に、インバートについての問題は、他の条件は同じで、インバート部を掘削する、もしくは、掘削後コンクリート

打設を行い、リング構造を形成するケースの、ふたつを考えて分析する。有限要素メッシュ、及び材料物性値を、それぞれ図-2, 表-2に示す。変位境界は鉛直境界および底盤をそれぞれローラー支持とした。ここで、tc-c層（粘性土層）、tc-s層（砂層）、ta層（軽石混じり火山灰層）、などである。

表-1 解析ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
軟化する地層	粘土層のみ	粘土層のみ	粘土層と砂層	粘土層と砂層	粘土層と砂層	粘土層と砂層
低下するパラメータ	残留値のみ	残留値と初期値	残留値のみ	残留値と初期値	残留値のみ	残留値のみ
インバート掘削	する	する	する	する	しない	する
インバート閉合	しない	しない	しない	しない	しない	する
崩落挙動を示したか	×	×	○	○	×	×

表-2 解析に用いた基本物性値

	単位体積重量 γ (g/cm ³)	変形係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
ta	1.54	5.0	0.286	34.1	9.6
tc-s	1.49	22.9	0.286	18.7	37.48
tc-c	1.57	8.2	0.286	8.1	37.09
ts	1.72	28.5	0.286	3.4	34.24
Nos1	1.97	80.0	0.286	48.0	34.2

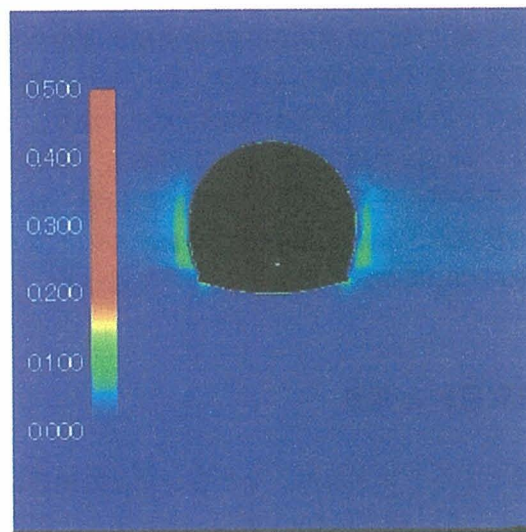
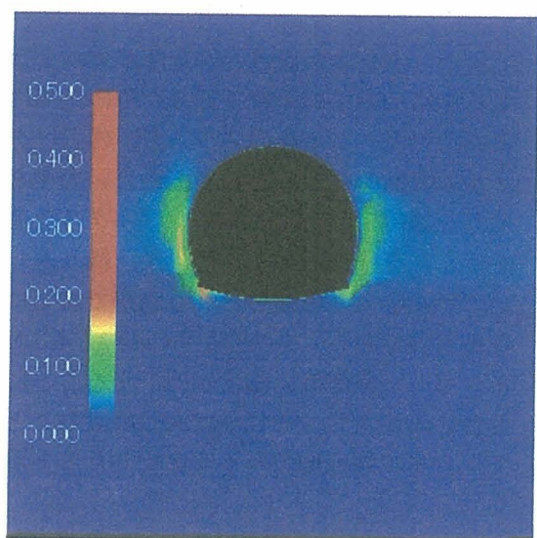
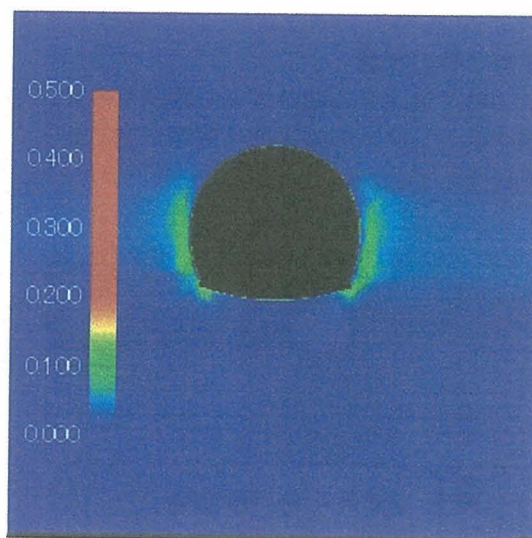


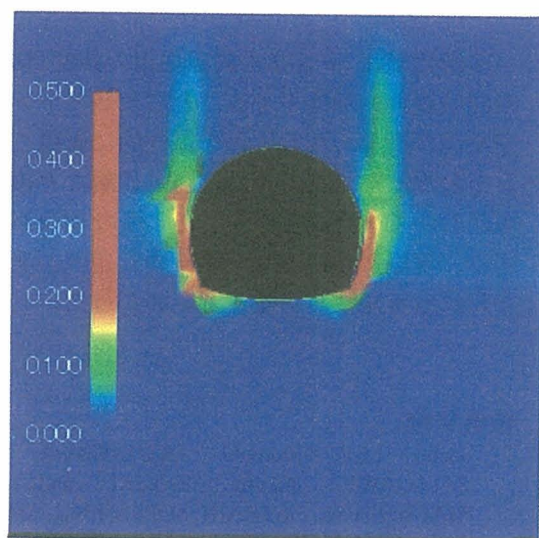
図-4 下半終了時の最大せん断ひずみ



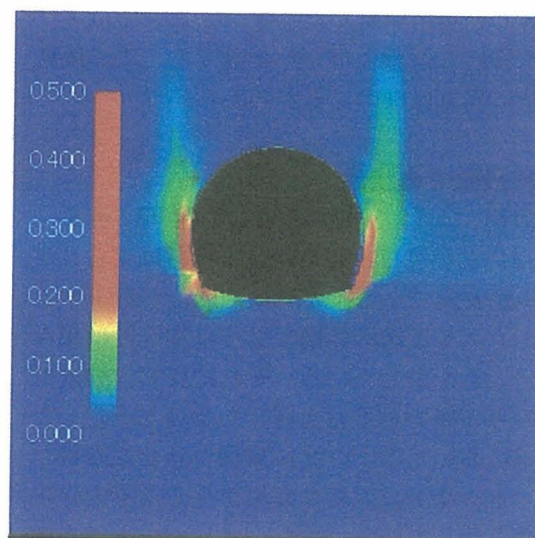
Case 1



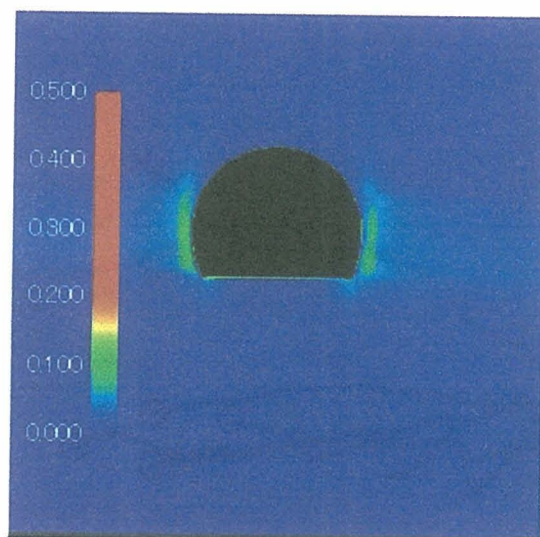
Case 2



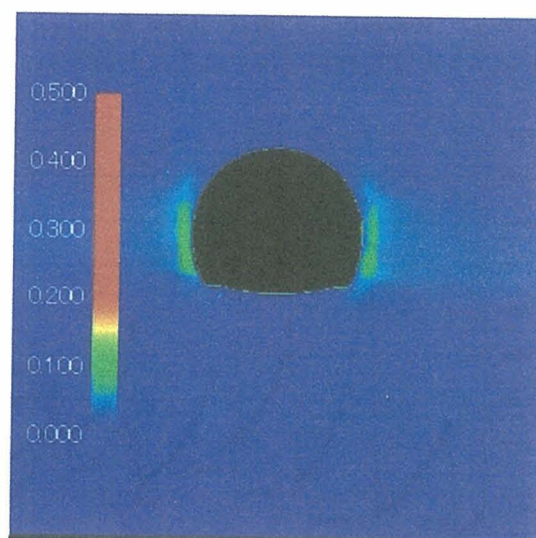
Case 3



Case 4



Case 5



Case 6

図-6 最終段階における最大せん断ひずみ

5. 解析結果

(1) 下半終了時の状態

下半終了時の最大せん断ひずみを図-4に示す。この段階ではトンネルの安定性に問題が生じるような状態は生じていないことがわかる。

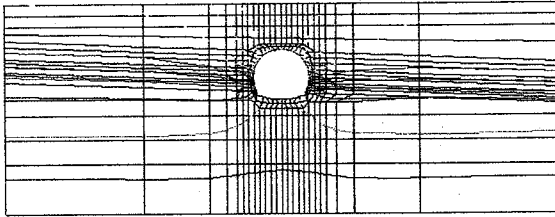


図-5 下半終了時の等変位線

また、図-5に示した等変位線（変位ベクトルの大きさが等しい場所を結んだライン、ここではスケールには特にこだわらない）を見ても、この段階では、特に異常はないことがわかる。

(2) 最終段階での状態

最終段階におけるひずみ分布を図-6に示す。Case 1と2においては、せん断帯の発達は見られず、トンネルが安定である。これは、強度が低下する領域がトンネル近傍の砂層だけでは安定性は損なわれないことを表している。それに反し、強度低下がその上の層である粘土層にも及ぶと仮定したCase 3, 4においてはトンネル肩部からせん断帯が発生し、トンネルに大きな変形が生じる不安定化の可能性を示している。また、インバート部を掘削しない場合（Case 5）、あるいはインバート掘削後にコンクリートを打設した場合（Case 6）においてはトンネルの安定性が保持されることがわか

る。

次に、トンネル周辺の安定性がどのように推移するかについての比較を行う。そのために、外力と内力の差ベクトルのノルムを、外力ベクトルのノルムで除したものとして不釣り合い力率を定義しそれを図-7に示す。このインデックスは荷重増分を与えた直後に増加し、その後、繰り返すステップごとに応力が再配分される過程で次第に小さくなるものである。この図からCase 3と4においてはインバート掘削後に強度が低下することにより不釣り合い力が生じ、それが増大し続けることによってトンネル周辺地山が不安定化したことがわかる。

6. まとめ

本研究では、トンネル周辺地山の強度（粘着力、内部摩擦角）が低下することによってトンネルの安定性が損なわれることを定性的に表現できることがわかった。また、粘土層、砂層など複数の領域において強度低下が生じるような現象が起こる場合、現場におけるトンネルの安定性が著しく損なわれる可能性があることがわかった。

参考文献

- 1) Jaeho LEE, Shinichi AKUTAGAWA, Takashi KITAGAWA, Atsumi ISOGAI and Takeshi MATSUNAGA : STRAIN SOFTENING ANALYSIS FOR IDENTIFICATION AND PREDICTION OF DEFORMATIONAL BEHAVIOR OF A SHALLOW NATM TUNNEL, Journal of Tunnel Engineering, 2005.

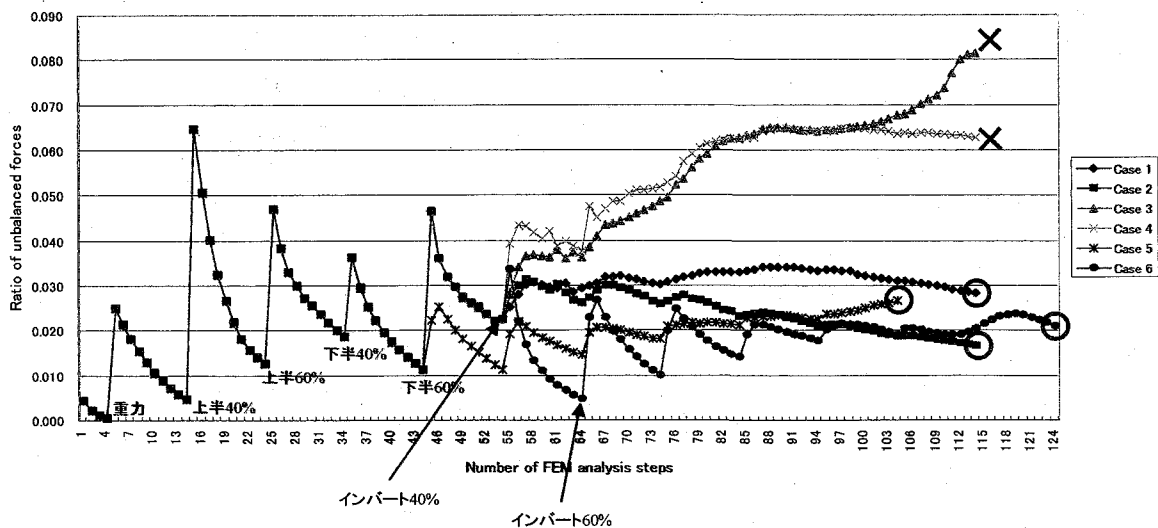


図-7 不釣り合い力の推移