

地山の時間依存性を考慮したトンネル変状解析手法の 適用性に関する検討

STUDY ON THE APPLICABILITY OF A TUNNEL DEFORMATION ANALYSIS METHOD ACCOUNTING FOR THE TIME-DEPENDENCY OF ROCK MASS

熊坂博夫*・朝倉俊弘**・小島芳之***・松長剛****

Hiroo KUMASAKA, Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA and Takeshi MATSUNAGA

A strength reduction model of rock mass after construction was used to analyze a case of deformation of tunnel lining caused by long-term deformation of the rock mass surrounding the tunnel and by an increase in convergence in order to study the applicability of this analysis method.

The study revealed that even in a case where the analysis is performed with restrictions on information about physical properties etc., it can obtain results that conform with the state of actual deformation by using an analysis model that uses the correlation with various physical properties of existing soft rock and conforms with the contact conditions between the rock mass and the lining and with the deformation behavior of the lining. The results of the analysis have also clearly shown that the presence or absence of voids behind the lining has a great impact on the deformation behavior of the lining, the quantity of convergence, and the stress distribution within the lining concrete.

Key Words: deformed tunnel, numerical analysis, long-term deformation of the rock mass

1. はじめに

わが国においては、道路と鉄道等のトンネルの総数が10,000か所以上、総延長距離は4,000kmを超える状況となってきた。この中には現在も供用中の戦前に建設された古いトンネルも多い。このため、長期に渡って供用されているトンネルに対する維持・管理は重要な課題となっている。

トンネルの維持・管理は二つに大別される。一つ目は、人工構造物である覆工の材料劣化や漏水等によって生じる変状に対する補修である。二つ目は、このトンネル周辺の地山からの建設後の地圧の増大により覆工にひび割れ、盤ぶくれ、内空断面の縮小などの変状に対して、覆工耐力向上やトンネル周辺地山の安定化を図る補強である。本論文は後者を対象としている。

補強を必要とするような変状が生じる原因には、地質的な要因で長期的に変形を生じる場合や天端の覆工背面の空隙による影響など、様々な要因が複雑に関連していると考えられている。従来の解析に基づく検討としては、変状状況から塑性圧と呼ばれる構造物に作用する荷重を推定し、骨組構造解析や有限要素法を用いて覆工の残存耐力と補強による耐力増加を求めて対策工を検討することが行なわれている。^{1), 2)}

* 正会員 清水建設(株) 技術研究所 地下技術グループ

** 正会員 京都大学大学院 工学研究科

*** 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

**** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 交通技術本部 トンネル部

この塑性圧は、トンネル周辺地山の長期的な変形によってトンネル内空方向へゆっくりと変位が増大しようとする際に、その変形に抵抗する覆工との相互作用として捉えることができる。したがって、覆工に作用する荷重の変動予測や地山を補強することにより荷重の軽減を図る対策を考える際には地山の経時的な変形挙動を評価することが必要となる。

地山の経時的な変形挙動を取り扱うためにクリープモデルによる様々な研究がなされているが、実際の補強対策においてトンネル周辺地山の経時的な挙動を考慮して検討を行なっている事例は少ない。また、各種の解析方法の適用性についても十分に検討がなされていない。この理由には、一般に、当初設計においても地質情報等が限定され、また、古いトンネルの建設中・後の地質情報等もほとんど残っていないことが挙げられる。一方で解析を実施するには初期条件設定や地山のモデル（構成則モデル）に用いる入力物性値などに必要な情報が更に多くなり、当初設計段階よりも設定がより困難となることも要因の一つと考えられる。

本論文では、実際に長期に渡って変形を生じている六十里越トンネルを対象として、トンネル周辺地山の時間依存性を取り扱う一つの方法である地山劣化モデルによる解析を試み、その適用性と課題を把握することを目的としている。また、この解析を実施するに当り、物性の設定方法について軟岩の物性に関する既往の研究成果を利用することにより前述の地質情報の制約を回避できることを示す。これらより、これまでの骨組構造解析では取り扱うことができなかった経過時間による変状挙動を評価できることを示す。

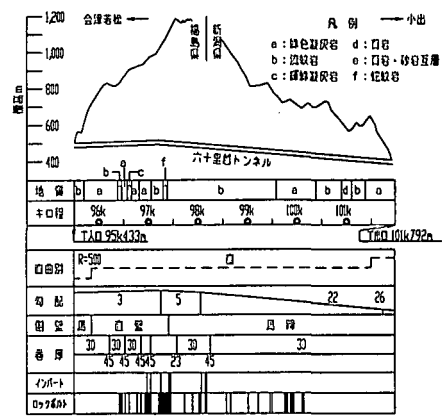


図-1 トンネルの縦断面図^{1), 2)}



図-2 代表的な変状状況の模式図^{1), 2)}

2. 検討対象トンネルの概要

本論文では、地山の長期的な強度低下に伴う地山の変形が十分に期待できる土被りの大きなトンネルで、かつ、比較的長期の観測が行なわれているトンネルとして、六十里越トンネルを検討対象とすることとした。

六十里越トンネル^{3), 4), 5)}は福島県会津若松と新潟県小出を結ぶJR只見線にあり、昭和46年に建設された単線トンネルである。

記録によれば、施工は全断面掘削で比較的順調にすすめられたが、地質そのものは破碎部分も多く必ずしも良好ではなかった。この地質は新第三紀中新世の緑色凝灰岩と同時期に貫入した流紋岩が主体であり、一部蛇紋岩と頁岩がみられた。変状の著しい区間は緑色凝灰岩層と流紋岩層であった。また、変状区間は300mを超える土被りであり、最大土被りは680mとなる。トンネルの縦断面図を図-1に示す。

トンネルの変状は建設直後から発生し、盤ぶくれや

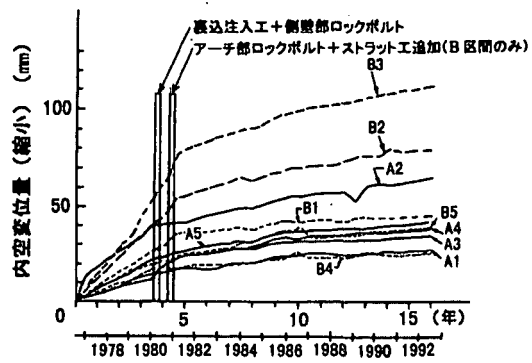


図-3 水平内空変位の経時変化^{1), 2)}

側壁の押し出しなどが観測されている。変状状況の模式図を図-2に示す。変状の原因としては、覆工の耐力以上の大きな塑性圧が作用したこと側壁が曲率を持たないことやインバートがなかったことなどが指摘されている。このため、変状が大きな区間では裏込注入、ロックボルト打設、ストラットなどを組み合わせた補強対策が実施されている。水平内空変位の経時変化の計測結果を図-3に示す。（なお、その位置については図-5参照）

3. 解析方法と解析条件の設定について

(1) 経時変化を考慮した地山のモデル化について

地山のモデル化としては、Mohr-Coulombの降伏条件を用いた強度劣化モデル^(6)・7)を用いることとした。この地山のモデルでは、ピーク強度から残留強度まで時間とともに低下することにより、トンネル周辺地山の支持力も $\sigma_{l,peak}$ から $\sigma_{l,res}$ に平均主応力を一定として強度を低下することより応力再配分が生じることで、トンネルの経時的な変形挙動を表現する手法である。

本論文では、この様な手法を取り扱える有限差分コードFLAC⁽⁸⁾を用いて解析を行った。

(2) 物性の設定方法について

強度劣化モデルでは、Mohr-Coulombの降伏条件のピーク強度と残留強度の定数が必要になる。しかし、一般に、長期間変状を生じているような古いトンネルの建設時の情報はほとんど残されていない場合が多く、地山の物性値が限定される場合が多い。解析の際には、ボーリング等を実施し地山の物性を直接取得することが望ましいが、前述したような事情によりデータの取得が制限される場合も多い。このような制約条件に対する解決策として、アイダン⁽⁹⁾・⁽¹⁰⁾や蔣⁽¹¹⁾が多くの室内試験データを用いた軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値との相関関係を利用して、地山モデルの諸物性値を推定する方法を用いた。

六十里越トンネルの骨組構造解析に用いられた条件^(1)・2)とアイダン、蔣らの相関式により推定された物性値および本検討の解析に用いる物性値を表-1に示す。

一軸圧縮強度と単位体積重量および弾性係数は骨組構造解析で用いられている物性値を採用した。ダイレイタンシー角については、降伏後の変形（体積増加）が過度とならないようにするためピーク強度の内部摩

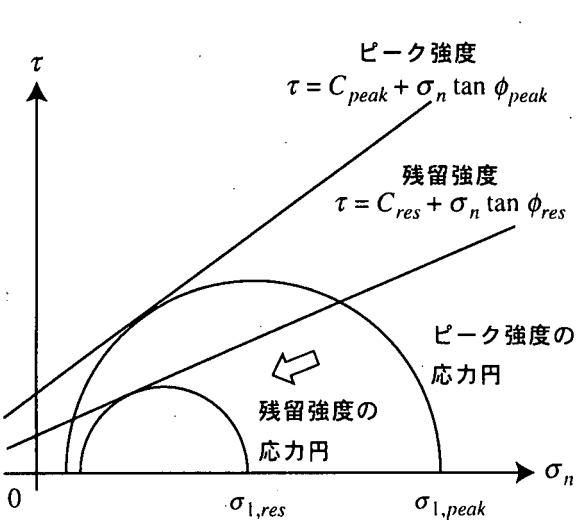


図-4 Mohrの応力円による強度劣化モデルの説明

表-1 解析に用いる地山物性値の設定

物性	単位	文献 ^(1)・2)	アイダン ^(9)・10)	蔣 ⁽¹¹⁾	本論文
一軸圧縮強度	MPa	4.5	-	-	4.5
単位体積重量	kN/m ³	19.0	20.0	-	19.0
弾性係数、変形係数	MPa	500	657	450	500
ポアソン比	-	-	0.35	0.2~0.4	0.35
ピークの内部摩擦角	°	-	29.1	38.1	30.0
ピークのせん断強度	MPa	-	1.32	1.10	1.30
ダイレイタンシー角	°	-	20.9	23.3	15.0
残留の一軸圧縮強度	MPa	-	1.17	2.17	1.50
残留強度の内部摩擦角	°	-	34.3	38.1	30.0
残留のせん断強度	MPa	-	0.309	0.527	0.433
ピーク内部摩擦角による 残留のせん断強度	MPa	-	0.344	0.527	0.433
残留の ダイレイタンシー角	°	-	9.55	11.3	10.0

表-2 解析に用いる覆工コンクリート物性値

物性値	単位	設定値
弾性係数	GPa	21
ポアソン比	-	0.2
設計基準強度	MPa	18
内部摩擦角	°	30
引張強度	MPa	2

擦角の1/2とした。残留状態のCres、 ϕ_{res} から求まる一軸圧縮強度、せん断強度はアイダンらと蔦らの相関値の1/2とし、内部摩擦角はピーク強度と同じであるとした。また、解析に用いた覆工コンクリート物性値を表-2に示す。

(3) 解析モデルと境界条件について

本検討ではトンネル周辺地山が長期的に劣化し、覆工に塑性圧として作用し、等方的にトンネル内部に押し出す現象を解析的に表現することに着目している。このため、偏圧が作用して変位が生じる場合は対象としないことより、解析モデルは対称条件を考慮して右半断面についてモデル化し、要素を作成した。トンネル断面と補強対策の諸元を図-5に、解析領域と境界条件および要素分割状況を図-6 (a) に示す。また、覆工コンクリートのモデル化と境界条件について図-6 (b) に示す。

(4) 解析手順

解析は以下の手順で行なった。

- ①初期地圧解析：鉛直応力は自重を考慮し、水平方向応力は側圧係数を1とした。境界条件としては図-5に示すように、上方、右側方境界から初期地圧相当の分布荷重を与えて各要素の初期応力を設定した。
- ②掘削解析：施工は在来工法による全断面掘削により行なわれたことより、100%応力解放の解析実施。
- ③建設後のトンネル変形解析：前ステップまでの変位をリセットし、覆工コンクリート部分の要素を挿入する。強度劣化として、地山全体のせん断強度をピーク強度から残留強度までを5%のきざみ（ここでは、低減率と呼ぶこととする）で低減させて計算を実施。

4. 解析結果および考察

(1) 地山物性値の検討（覆工なしの解析）

前節で設定した解析に用いる地山の物性値により、地山の内空変位の解析結果が計測された内空変位を十分表現できるかどうかを把握するため、覆工なしの場合について強度低下を考慮した解析を実施した。内空変位とせん断強度の低減率の関係を図-7のcase-Aに示す。図-3より計測で得られている経時的な内空変位

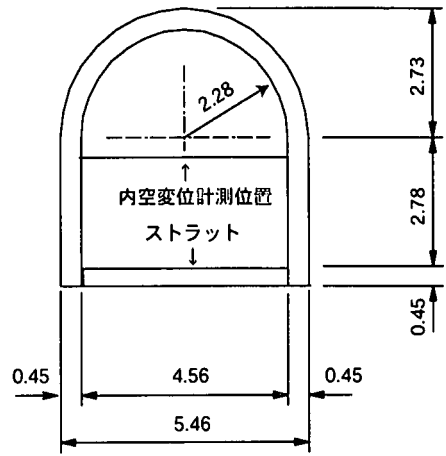


図-5 トンネルの諸元（単位m）

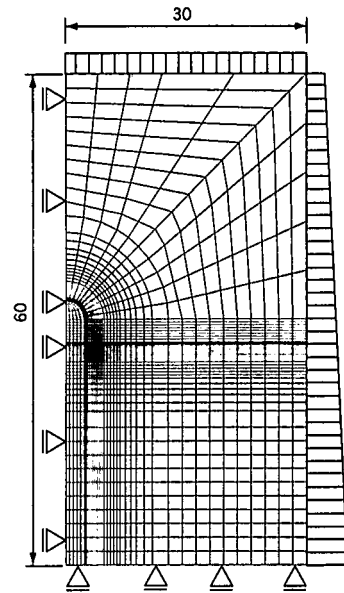


図-6 (a) 解析領域の寸法と境界条件（単位：m）

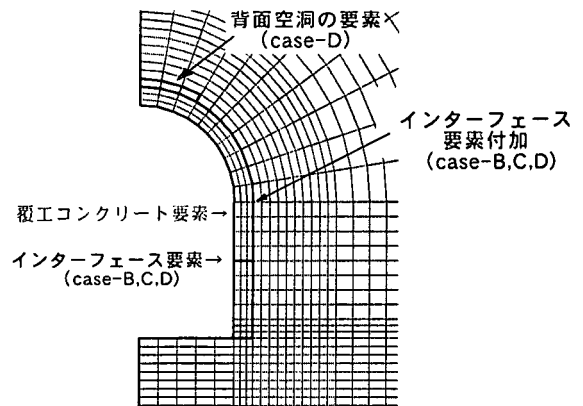


図-6 (b) 覆工コンクリートのモデルと境界条件

の増加は極端に大きな場合を除いて、20～40mm程度生じている。これと同様に、本論文の物性値を用いたトンネル周辺地山劣化に伴う変形増分はほぼ40mmとなった。このため、今回設定した物性値を用いて地山や覆工の経時的な挙動を解析することができると考えた。

(2) 覆工の効果の検討

(覆工を弾性体でモデル化した解析)

覆工を有する場合の基本的な変形特性を把握するために、覆工を表-2に示す物性値をもつ弾性体のコンクリートと仮定して解析を行なった。

残留強度に達したときの内空変位とせん断強度の低減率の関係を図-7のcase-Bの曲線に示す。内空変位量は最大で4.3cmと覆工無のcase-Aの場合に比べて1/10となった。

トンネル近傍の変形図と覆工の変形図を図-8、図-9に示す。図より、長期の地山の変形は実際の変状現象と同様に大きな盤ぶくれが生じる。また、覆工の変形は側壁の脚部が水平方向に大きく変形している。

覆工の最大圧縮応力分布図を図-10に示す。図より圧縮強度(18MPa)を超える部分が上半アーチの内側に生じ、側壁中央部内側に圧縮応力がほとんど生じない部分があることがわかる。上半アーチ部と側壁部の応力状態を比較すると、側壁部の圧縮応力が小さいことがわかる。これは、覆工と地山が変形後も密着しているため覆工コンクリート内の応力が地山側に流れている影響と考えられる。

(3) トンネルの変状状況を考慮した解析

六十里越トンネルの変状状況と前述の解析結果を踏まえ、以下の点を考慮して解析を行なった。

①背面空洞の考慮

変状調査^{3), 4), 5)}より、天端付近の覆工の背面には空洞が存在する。このため、骨組構造解析^{1), 2)}と同様の条件として上半部天端から円中心を半径として左右に30°の範囲で一要素分を空洞として考慮する。(図-6(b)参照)

②覆工コンクリートと地山との接触状況

施工は在来工法で行なわれたため、覆工と地山は一体ではなく、Coulomb則によるすべりを考慮した。また、覆工は片持ち梁のような変形となるた

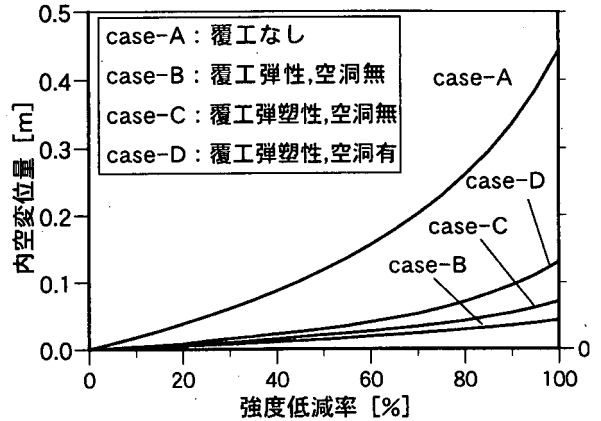


図-7 内空変位とせん断強度の低減率の関係

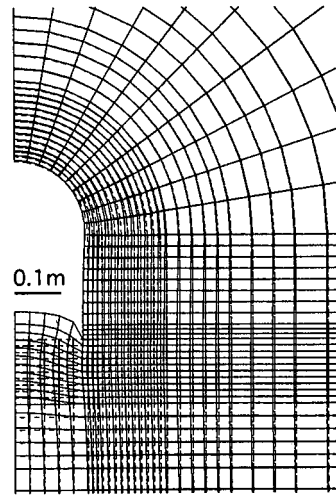


図-8 トンネル近傍の変形図 (case-B)

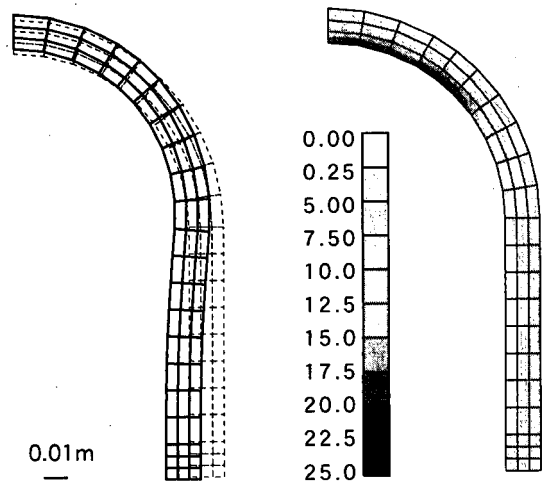


図-9 覆工の変形図 (case-B)

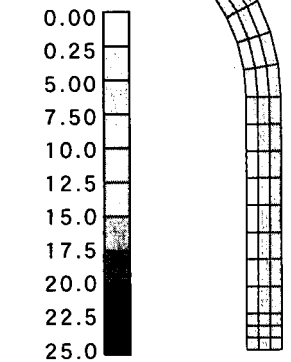


図-10 覆工の最大主応力分布図 (圧縮: MPa)

め、覆工と地山との間が分離できるようにインターフェース要素⁹⁾を用いてモデル化した。

③覆工コンクリートのモデル化

覆工を弾性体とした解析結果より、覆工コンクリートには圧縮強度以上の応力が発生するため、表-2で設定した物性でMohr-Coulomb則による非線形な材料としてモデル化を行なった。また、側壁中央部の内側には引張強度を越える応力が発生することが考えられるため、クラックが開口することを考慮して、側壁中央部には覆工コンクリートの引張強度を持つインターフェース要素を用いてモデル化した。

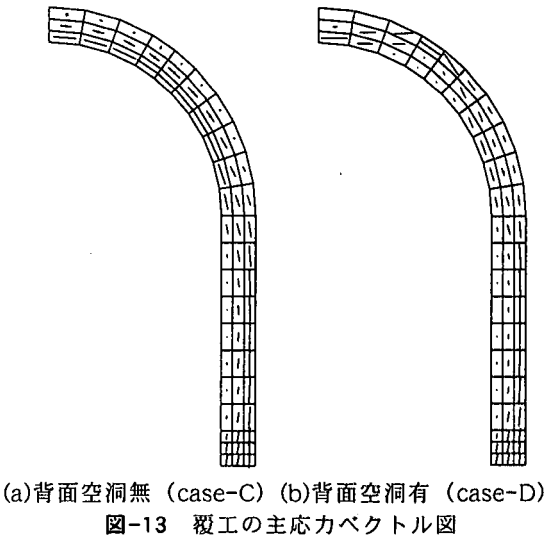
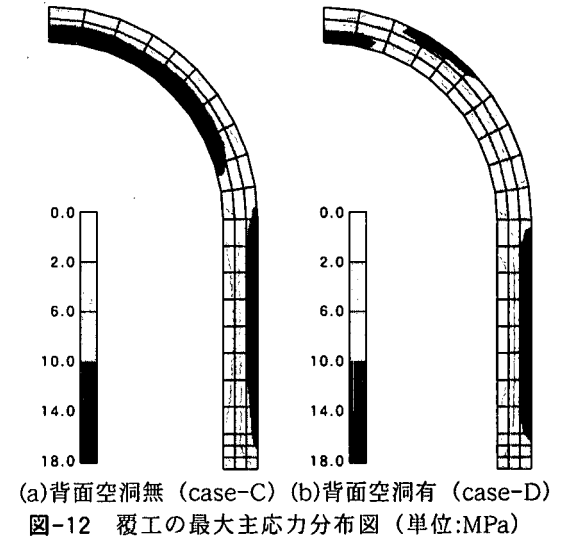
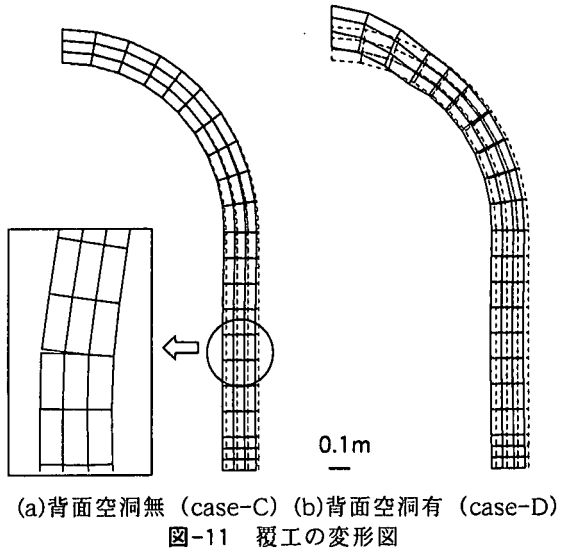
背面空洞の有無により覆工の変形や応力状態に顕著な差を生じたので以下に示す。

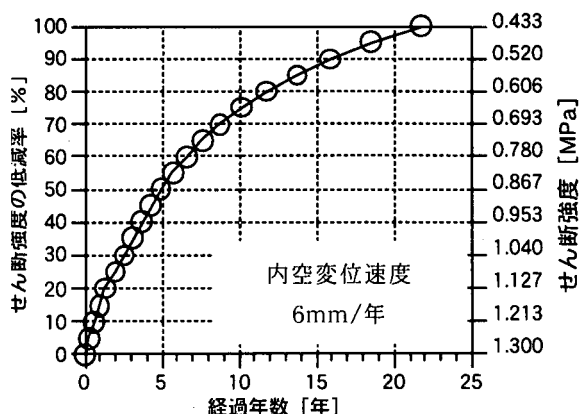
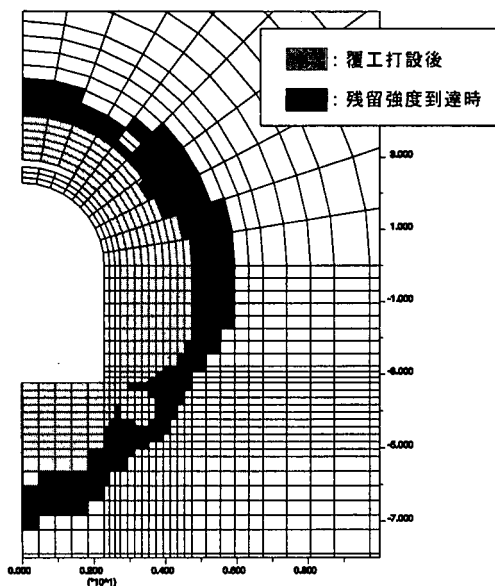
解析結果から背面空洞がない場合(case-C)と背面空洞がある場合(case-D)の内空変位と強度の低減率の関係を図-7のcase-CとDの曲線に示す。この内空変位の増加は空洞の大きさ等の影響を受けると考えられるが今回の条件では、図より内空変位は背面空洞有は無に比べ約1.8倍大きくなることがわかる。

背面空洞の有無による覆工の変形の差を図-11に示す。図に示されるように、覆工背面に空洞が無い場合には前節のcase-Bと同様に上半アーチの右肩部を支点とした片持ち梁の様な変形を生じるが、背面空洞があるcase-Dでは、空洞部の覆工に大きな変形が発生している。ただし、両解析ケースとも側壁中央部の内側では引張応力によるクラックの開口が生じている。

この覆工の変形の相違による影響は、覆工内の応力分布に表れる。覆工の最大主応力(圧縮応力)分布図を図-12に示す。また、このときのベクトル図を図-13に示す。図-12と図-13に示されるように、覆工コンクリートの圧縮応力は、背面空洞が無い場合は上半アーチでは内側部分に発生し、スプリングライン近傍で側壁外側に流れている。一方、背面空洞を有する場合、圧縮応力の発生位置は天端で内側に発生し、肩部では外側に移行しスプリングライン上部では再度内側に移り、側壁部分では外側に移行している。すなわち、背面空洞がある場合、部分の地山の反力ないため覆工内の応力の流れが大きく変動していることがわかる。

強度劣化によるトンネル周辺地山の降伏領域拡大状況を図-14に示す。図より、上半、側壁および底盤部で降伏領域が約1m程度拡大した。降伏領域の拡大が押さえられた理由としては、内部摩擦角をピークと残留





強度で同じとしたため、側壁から地山内部に向かって急激に拘束圧 (σ_3) が大きくなる影響で降伏領域が広がらないことが考えられる。

六十里越トンネルに隣接したトンネルで実施されたボーリング調査⁴⁾では、トンネル近傍の地山は粘土化していることが報告されている。本検討では、水などによる地山の劣化による影響は考慮しておらず、これらを解析に反映するには、内部摩擦角の変化も考慮する必要がある。

これまでの解析結果はせん断強度の低減率との関係として示された。これを時間との関係に変換する必要がある。本検討では、補強対策前の平均的な内空変位速度が図-3より6mm/年であることから、図-7のcase-Dで示されるせん断強度低減率と内空変位量の関係から経過年数を求めた。経過年数とせん断強度の低減率の関係を図-15に示す。図に示されるように、今回の解析では変形が22年程度発生することやせん断強度の低減率は一定ではなく、建設初期に大きくその後収束してくることがわかる。なお、低減幅を全体の10%および5%とした場合と比較すると、地山への影響は変形量が若干5%とした場合が大きくなる程度である。一方、覆工コンクリートの応力状態は非常に敏感に変動していた。これは、覆工コンクリートの境界条件として地山との接触面での分離や滑りを考慮したことや非線形性を考慮したことによると考えられる。

5. まとめ

実際のトンネル計測事例を対象にして、建設後のトンネル周辺地山の強度低下を考慮したモデルを用いることにより、地山の長期的な変形挙動に基づいて内空変位の増大と覆工の変状挙動を解析することが可能であることを示した。加えて、本解析では地質情報等が制限される場合でも、既往の軟岩における各種の物性の相関を用い、かつ、覆工と地山との接触条件や覆工の変形挙動を考慮することにより、実際の挙動を表現することができることを示した。この手法の利点は、地質情報に制約を受けるトンネルの場合においても、基本的には地山の一軸圧縮強度が推定でき、ある期間の内空変位（変位速度）が得られれば解析的な評価が可能となる点である。

また、今回の解析結果では、覆工背面の空洞の有無は覆工の変形挙動や内空変位量および覆工コンクリート内の応力分布に大きな影響を及ぼすことを示した。

なお、実際には対策工が実施されており、対策工の解析や本解析と骨組解析との比較については別報¹²⁾により検討がなされており、別途報告の予定である。

本検討は土木学会岩盤力学委員会トンネル変状研究小委員会活動の一環として実施した。ここに、多くの知見を与えていただいた委員の方々に感謝の意を表します。また、計測データの使用をご快諾頂きましたJR東日本構造技術センターの関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小島芳之, 朝倉俊弘, 野城一栄, 三谷浩二, 松長剛: トンネル対策工の骨組解析によるシミュレーション, トンネル工学研究論文・報告集, 第7巻, pp.39-46, 1997.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.213-227, 1998.
- 3) 吉川恵也, 北川修三, 川上義輝, 馬場富雄: トンネルの変状傾向(2), 鉄道技術研究報告, No.1293, pp.24-31, 1985.
- 4) 野澤伸一郎, 伊藤忠八, 竹内定行: 既設トンネルの膨圧を克服 只見線六十里越・田子倉トンネル, トンネルと地下, 第23巻, 第10号, pp.17-22, 1992.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.145-149, 1998.
- 6) 野宮正好, 西真幸, 下田利男: 在来トンネルへの影響を抑えて掘る(東北新幹線・鳥越トンネル), トンネルと地下, 第30巻, 第9号, pp.7-18, 1999.
- 7) 亀村勝美, 小島芳之, 朝倉俊弘, 名越次郎: 既設トンネルに接近したトンネルの情報化施工管理, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.246-250, 2001.
- 8) ITASCA Consulting Group, Inc.: FLAC ver. 4.0 User's Guide, 2000.
- 9) アイダン オメール, 赤木知之, 伊東孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について, 土木学会論文集, No.448/III, pp.73-82, 1992.
- 10) 赤木知之, アイダン オメール, 伊東孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネル壁面変位の予測と支保の設計, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.719-724, 1994.
- 11) 蔣宇静, 江崎哲郎, 横田康行, 禿英和: 地山特性曲線に影響を及ぼす要因の定量的分析, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.767-772, 1994.
- 12) 松長剛, 朝倉俊弘, 小島芳之, 熊坂博夫: 地山の時間依存性を考慮した変状対策工の解析手法に関する検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム, 2002 (投稿中).