

ベンチカット工法に核を残して掘削した 押出し性地山でのトンネル挙動

BEHAVIOUR OF TUNNEL EXCAVATED BY THE RING CUT METHOD IN SQUEEZING ROCK

林久資¹・長谷川昌弘²・吉岡尚也²・青木一男³・菅浩亮¹
Hisashi HAYASHI, Masahiro HASEGAWA, Hisaya YOSHIOKA,
Kazuo AOKI and Kosuke SUGA

¹学生会員 大阪工業大学大学院 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail: hayashi@civil.oit.ac.jp

²正会員 博(工) 大阪工業大学工学部 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

³正会員 工博 大阪工業大学工学部 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5-16-1)

In order to understand the behavior of the tunnel excavated by ring cut method in squeezing rock, numerical analysis was carried out. Obtained results are summarized as follows: 1) extrusion deformation in the tunnel face can be controlled when excavated by leaving core in bench cut method, 2) the time of tunnel closure is important for controlling deformation rate, 3) in order to understand how the support pressure operates, it is useful to start with characteristic curve which shows the response of the rock mass surrounding an advancing tunnel.

Key Words : NATM, squeezing rock, Ring-cut method, Numerical analysis

1. はじめに

我が国では、新第三紀層の泥岩や凝灰岩などにトンネルを掘削した場合、トンネル断面が徐々に押出される現象に遭遇することがまれではない。このような地山は「押出し性地山」と呼ばれ、押出し性の現象が顕著な地山では強大な地圧による支保工の変状が発生することもある。最悪の場合は、縫い返しなどで断面の再構築を余儀なくされることがある。

押出し性地山の目安となる指標については、岩の一軸圧縮強さが地山の初期応力比、すなわち地山強度比が2倍より小さければトンネル周辺地山がせん断破壊を起こすことが指摘されている¹⁾。

そのような押出し性地山にトンネルを掘削する場合、トンネルの安定性を確保するために、補助工法の併用やトンネル断面の早期閉合などを行うことが好ましいと言われている。しかしながら、補助工法の多用は補助部材の生産、廃棄に伴う環境負荷も多大であり、省資源や環境負荷の低減が重要視されている現在においては環境にやさしいエコトンネル施

工法の確立が急務であると考えられる。そこで、地山の支持力を利用して切羽の安定性を確保するショートベンチカット工法に核を残した工法に着目した。

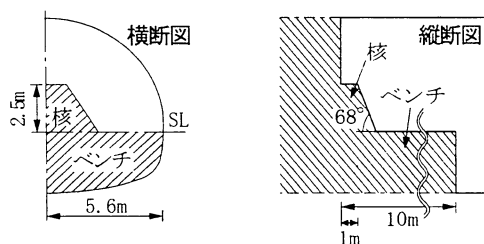
林ら²⁾は、地山の一軸圧縮強さと土かぶり圧から算出できる地山強度比が1.0の押出し性地山の場合、ショートベンチカット工法に核を残した場合とショートベンチカット工法に長尺鏡ボルトを併用した場合を比較すると、切羽の押出し量が同程度抑制されることを示している。

ここでは、断面を早期閉合した場合や地山強度比が低下した場合のトンネルの挙動把握のために三次元数値解析を行った。そして、トンネルの力学的な安定性評価は、切羽押出し量、断面変形率、応力再配分過程、地山特性曲線を通じて行った。

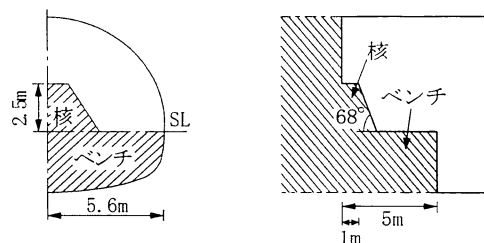
2. 解析概要

(1) 地山強度比

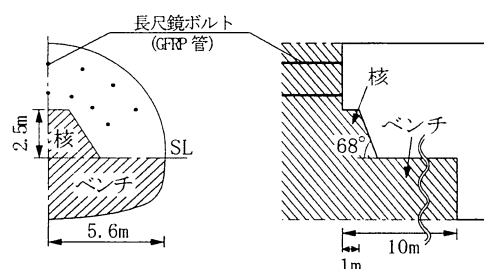
我が国のトンネル施工において押出し性の現象が



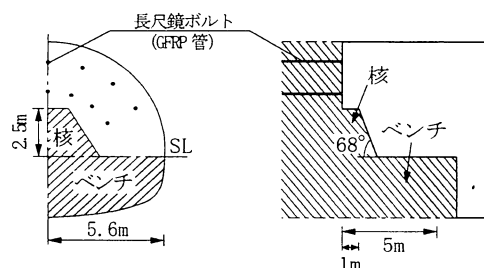
(a) ベンチカット + 核残し (ベンチ長 10m)



(b) ベンチカット + 核残し (ベンチ長 5m)



(c) ベンチカット + 核残し +
長尺鏡ボルト (ベンチ長 10m)



(d) ベンチカット + 核残し +
長尺鏡ボルト (ベンチ長 5m)

図-1 掘削工法

発生する地山は、地山強度比が1.6～2.0が境界値であり2.0以上では押し出し性の現象が発生しないこと、またトンネルの壁面ひずみは1%～12%の範囲にあることをAydanら³⁾は指摘している。そこで、ここでは林ら²⁾の解析で用いた地山強度比1.0と、さらに押し出し性の現象が顕著に表れると考えられる地山強度比0.75と0.5について解析を行った。

(2) 掘削工法

ショートベンチカット工法に核を残した場合の安定性評価および断面の早期閉合における効果の解明を行うための工法を図-1に示す。図のように上半切羽面に核を設けたものを基本とし、図-1(a)は下半部分にベンチ長10mのベンチを設けたベンチカット工

法に核を残した場合である。図-1(b)は下半部分のベンチ長を5mとしたもの、図-1(c)は上半鏡面前方に長さ12.5mのグラスファイバー管(GFRP管)による長尺鏡ボルトを1断面14本(ラップ長3.5m)打設しながら掘削する場合である。図-1(d)は上半部分を図-1(c)と同様とし、下半部分のベンチ長を5mとしたものである。

(3) トンネル支保工および補助工法

トンネル支保工を考えるには、掘削に伴う変形量を予測しておくが便利である。ここではHoekら⁴⁾が提案した方法で予測を試みた。岩盤の一軸圧縮強さ σ_{cm} とインタクトロックの一軸圧縮強さ σ_{ci} の比 σ_{cm}/σ_{ci} とGSI(Geological Strength Index)との関係⁴⁾によれば、悪い地山ではGSIが50以下となり、 σ_{cm}/σ_{ci} は0.3以下になることがわかる。これは、地山強度比1.0の地山を想定すると、岩盤の一軸圧縮強さはインタクトロックの一軸圧縮強さの3割程度になることを意味している。したがって、地山強度比が0.75と0.5の場合は、岩盤の一軸圧縮強さとインタクトロックの一軸圧縮強さの関係はそれぞれ2.3割、1.5割程度になることを意味している。また、これらの地山を無支保で掘削を行った場合、トンネル内空変位をトンネル径で除したものの百分率で表される断面変形率は5%～10%程度であることをHoekら⁴⁾は示している。さらに、このような著しい押し出し性の現象が発生する場合には、切羽周辺地山の安定性に影響を及ぼすため剛な支保パターンの採用や切羽の安定対策が必要であると言及している。

そこで、ここでの支保部材は吹付け厚さ25cmの吹付けコンクリート、長さ6mのロックボルトを1断面18本、鋼製支保工については、H200を1m間隔で設定することとした。また、切羽が不安定な場合には切羽安定対策として上半切羽面前方に長尺鏡ボルトを1断面14本(ラップ長3.5m)併用した。ちなみに地山強度比1.0の場合、吹付けコンクリートとロックボルトのみで支保が可能とされており⁴⁾、文献2)のような支保工を用いた。

(4) 解析領域と境界条件

仲野¹⁾によると側圧係数 K_0 が1.0の場合、岩の一軸圧縮強さが地山の初期応力の2倍より小さければ押し出し性の現象を有するとしている。また、三浦⁵⁾によると、土かぶり厚さが70m以上になると側圧係数の平均値は1.0になっている。したがって、土かぶり厚さは100mとした。その他の解析領域は、インバートより下部の領域は60m、横断方向の領域は100m、ト

ンネル掘進方向の領域は100mに設定した⁶⁾。

境界条件は、トンネル掘削方向の地山側面についてはトンネル横断方向を、トンネル坑口と奥行き端部の地山面は縦断方向を、底面は上下方向を拘束し、地表面は自由境界とした。

(5) 解析手順

解析は、まず地山の自重解析を行った。鉛直方向の初期応力は、地山の単位体積重量と土かぶり厚さより、水平方向の初期応力は鉛直方向の初期応力と側圧係数の関係より算出した。

つぎに、実施工の掘削手順を考慮し、上半を1mずつ掘削した。支保部材としての吹付けコンクリート・ロックボルト・鋼製支保工は、切羽面より1m手前まで施工されることとした。ただし、核部分がある場合は、ロックボルトの施工はさらに1m遅れで設置することとした。下半部分は上半部分が5mないし10m掘削された後、上半部分と併進し掘削を行った。下半の支保工については、切羽より1m手前まで施工されるものとした。

(6) 力学モデルおよび入力定数

トンネルが掘削される地山の力学モデルは、弾完全塑性体とし、降伏判定にはモールクーロンの降伏基準を用いた。支保工、補助部材については、ロックボルトと長尺鏡ボルトは引張力と圧縮力は伝達できるが、曲げモーメントは伝達しないケーブル要素、吹付けコンクリートはシェル要素、鋼製支保工はビーム要素でモデル化した。

つぎに、解析に用いた入力定数を表-1に示す。まず地山については以下のように設定した。単位体積重量は、Aydan³⁾による地山の一軸圧縮強さと単位体積重量の関係より、変形係数は、Deere⁷⁾が変形係数Dと一軸圧縮強 σ_c には $D=200\sigma_c\sim 500\sigma_c$ の関係があることを指摘している。そのため、ここでは一軸圧縮強さを200倍した値を用いた。この値はAydan³⁾が示している一軸圧縮強さと変形係数の関係とも対応している。ポアソン比、内部摩擦角に関しても一軸圧縮強さとの関係より設定した³⁾。粘着力は、Bieniawski⁸⁾がRMR法(Rock Mass Rating System)で示している内部摩擦角に対応する粘着力の値を用いた。

支保部材の吹付けコンクリートの変形係数は、土屋⁹⁾が実測値と解析値の対比を行って提案された値を、ロックボルトはねじり棒鋼(TD24)を、鋼製支保工はH200(SS400)を用い、その機械的性質はトンネル標準示方書¹⁰⁾を参照した。定着材のせん断剛性などはHyett¹¹⁾らの実験結果に基づいて決めた。補助工法

表-1 入力定数

地山強度比		1.0	0.75	0.5
地山	単位体積重量(kN/m ³)	20		
	変形係数(kN/m ²)	4×10^5	3×10^5	2×10^5
	ポアソン比	0.3	0.43	0.45
	粘着力(kN/m ²)	150	140	130
	内部摩擦角	20°	19°	17°
	側圧係数	1.0		
吹付け コンク リート	変形係数(kN/m ²)	3.4×10^6		
	ポアソン比	0.2		
	吹付け厚(m)	0.2	0.25	
鋼製 支保工 (H200)	断面積(m ²)	—	6.53×10^{-3}	
	断面二次モーメント(m ⁴)	—	4.72×10^{-5}	
	弾性係数(kN/m ²)	—	2.1×10^5	
	ポアソン比	—	0.3	
ロック ボルト	ねじり 棒鋼	断面積(m ²)	4.52×10^{-4}	
		ヤング率(kN/m ²)	2.1×10^8	
		引張り強度(kN)	179.3	
	定着材	せん断剛性(kN/m ²)	1.1×10^4	
		粘着強さ(kN/m)	230	
		摩擦角(°)	30	
長尺 鏡ボ ルト	GFRP管	穿孔径(m)	1.32×10^{-1}	
		単位体積重量(kN/m ³)	17.5	
		弾性係数(kN/m ²)	2×10^7	
	定着材	断面積(m)	1.71×10^3	
		せん断剛性(kN/m ²)	8.19×10^5	
		付着強度(kN/m)	76	

としての長尺鏡ボルトはGFRP管(φ76mm)を使用した。定着材のせん断剛性などは、大塚ら¹²⁾が原位置引き抜き試験を実施して得た結果を引用した。

3. 解析結果および考察

(1) 切羽の押出し変形量

図-1に示した工法で50mトンネルを掘削した場合の切羽周辺地山の押出しコンターを図-2に示す。これは、トンネル軸方向のみの変位を縦断方向から見たものである。また、図-2(a)については、文献2)の解析結果から引用した。実測値より切羽押出し量が70mmを超える部分が広がると、切羽崩壊の恐れがあると田中ら¹³⁾は指摘している。

図-2(a)(b)(c)の地山強度比1.0、ベンチ長10mに着目すると、ショートベンチカット工法で掘削を行った場合は、押出し量70mm以上の部分が上半切羽前方1.3m程度まで広がっている。一方、ショートベンチカット工法に核を残して掘削した場合には、押出し量が70mmを超える部分が、切羽前方0.6m程度まで抑

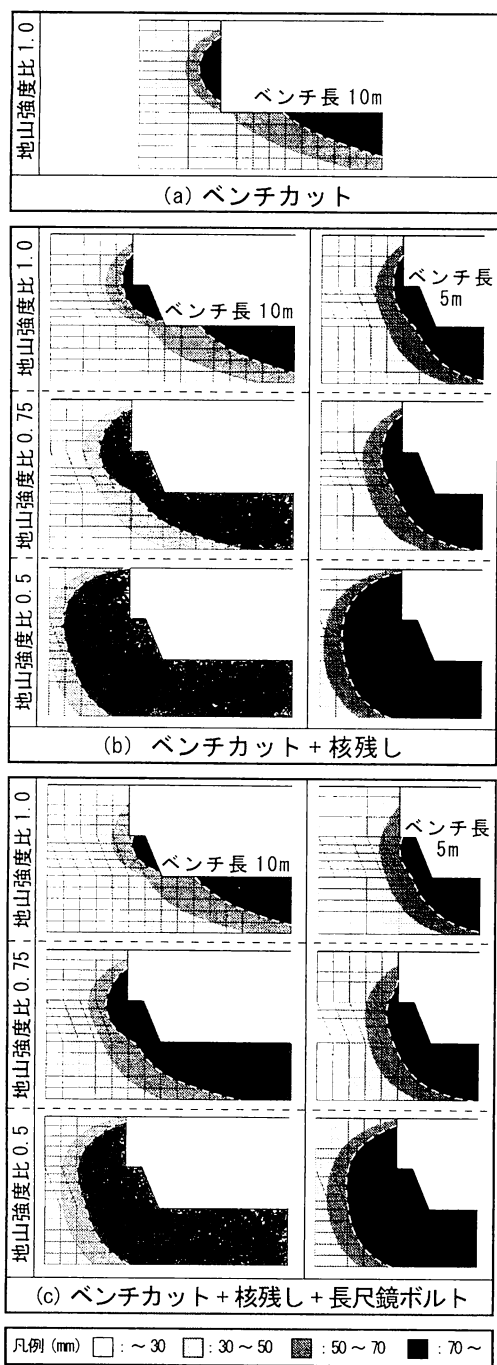


図-2(a) ~ (c) 押し出し変形量のコンター

制されている。これは核を残すことで切羽面の抵抗が増大し押し出し量が抑制されたものと考えられる。さらに核と長尺鏡ボルトを併用したものは、70mm以上の押し出し量は核部分のみとなっており、核部分を残すことによる効果に加え、長尺鏡ボルトにおける切羽安定効果が付加されたものと考えられる。

つぎに、図-2(b) (c)の地山強度比0.75に着目する。ベンチ長10mのショートベンチカット工法に核を残して施工した場合、上半切羽前方2m程度まで70mm以上の押し出し量が発生しているのに対し、核を残した工法に補助部材である長尺鏡ボルトを併用すると、その範囲が切羽前方

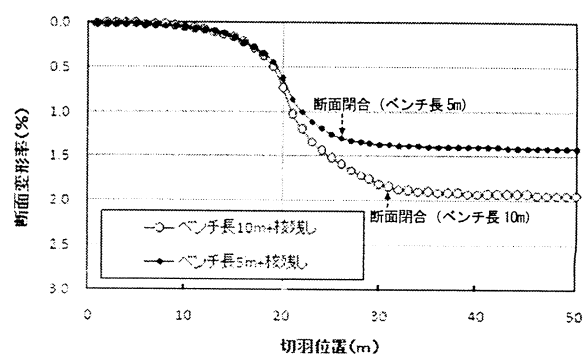


図-3 地山強度比0.75の断面変形率

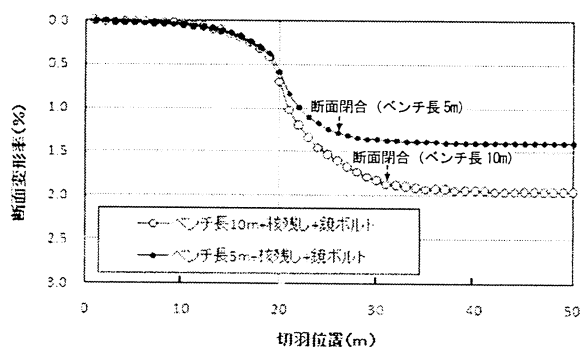


図-4 鏡ボルトを併用した地山強度比0.75の断面変形率

1.5m程度まで抑制されていることがわかる。一方、ベンチ長を5mにした場合にも長尺鏡ボルトを併用すると押し出し量が抑制されている。このことは、切羽崩壊の恐れのある地山において補助工法を併用する場合でも、核を残すことにより長尺鏡ボルトの使用量を少なくできることを示唆されている。

図-2(b) (c)に示した地山強度比0.5の場合、ベンチ長さに依らず切羽の押し出し量が70mmを超える範囲が急激に増大することがわかる。このような地山条件下では、切羽で大きな崩壊が予測されるため、大規模な補助工法の適用が必要であると考えられる。

(2) 断面変形率

Aydan³⁾によれば押し出し性地山でのトンネル施工は、断面変形率が1%~12%になるとされており、トンネルの安定性評価には断面の変形率にも注意する必要がある。ここでは、地山強度比が0.75, 0.5の場合において、図-1の工法でトンネルを掘削した場合の断面変形率を図-3~図-6に示す。これらの図は坑口より20m地点における切羽進行に伴う断面変形率を示したものである。横軸の切羽位置が0m地点はトンネルが未掘削状態、20m地点は上半切羽が到達した状態である。

地山強度比が、0.75の地山に核を残して掘削した図-3に着目すると、ベンチ長10mで掘削を行った場

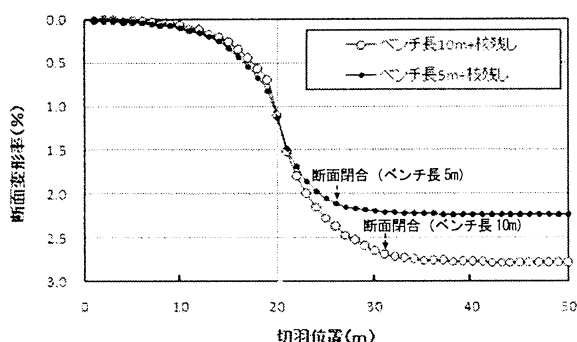


図-5 地山強度比0.5の断面変形率

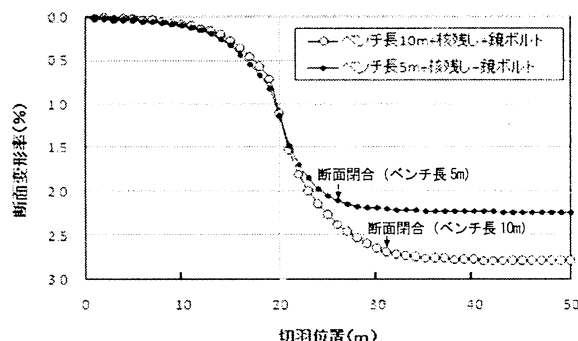


図-6 鏡ボルトを併用した地山強度比0.5の断面変形率

合には収束時の断面変形率が1.9%程度発生している。一方、ベンチ長が5mになると断面変形率が1.4%まで抑制されていることがわかる。このことは、断面変形率を低減させるためには、断面を早期に閉合することが有効であることを裏付ける結果である。

図-4は、長尺鏡ボルトの併用をした場合の断面変形率である。ベンチ長が10m、5mの場合とも図-3とほぼ同様の断面変形率となっている。そのため、長尺鏡ボルトの併用は、断面変形率を抑制することには寄与しないものと考えられる。

図-5、図-6に地山強度比が0.5の場合の断面変形率を示す。これらの図に示されているように、地山強度比が低下すると、押し出し性の現象が顕著に表れて断面変形率が増加することがわかる。また、この程度地山強度比が低下した場合でも、断面変形率を少しでも抑制するためには、トンネル断面を早期閉合することが有効であることがわかる。

(3) 側壁部における応力再配分

図-7、図-8は、地山強度比が0.75の時の坑口より20mから21m地点における側壁部のS.L.より約1m上部における掘削壁面要素の応力再配分過程を示したものである。ベンチ長10mのショートベンチカット工法に核を残して掘削した図-7では、切羽位置が17mの時点で最大主応力と最小主応力の差が最大になっている。

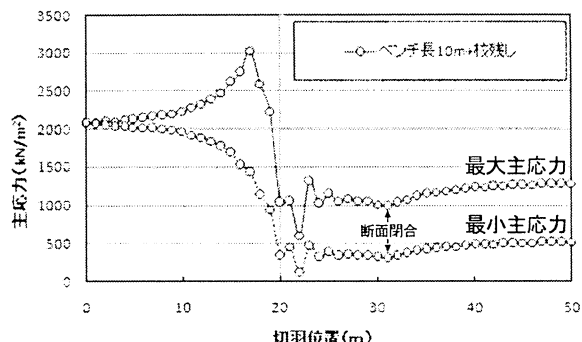


図-7 地山強度比0.75の応力再配分

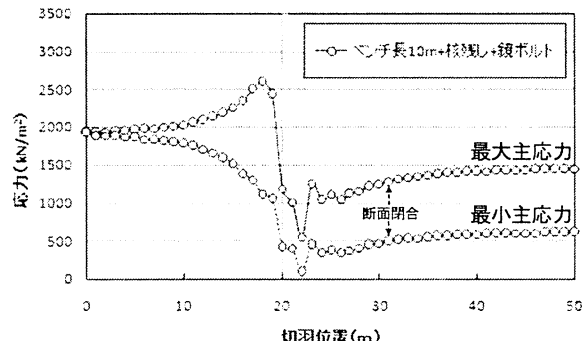


図-8 鏡ボルトを併用した地山強度比0.75の応力再配分

つまり切羽が到達する3m手前から塑性化が始まっていることがわかる。また、切羽位置が22m、つまり切羽が通過直後に最小主応力が、 0 kN/m^2 に近付いている。この最小主応力は、掘削直後に側壁部分に及ぼす押し出し応力に相当しているが、本解析では切羽通過直後は一時的に無支保状態になるためである。その後切羽が進行して支保工が設置されると、最小主応力が増加に転じることがわかる。このような現象は、図-8の長尺鏡ボルトを併用した場合にも見られる。

一方、長尺鏡ボルトを併用した図-8では、切羽位置18mで塑性域が発生しており、長尺鏡ボルトを併用することによって、切羽前方地山における塑性化の進展が遅れていることがわかる。これは、長尺鏡ボルトを併用することによって切羽面や切羽前方地山の抵抗力が増大し、切羽到達前の塑性化を遅らせたものと考えられる。図-7、図-8において、切羽がさらに進行し切羽位置が40m付近に達すると、主応力差はほぼ一定で推移する。これは、トンネル断面が閉合されることによってトンネル周辺地山との力学的釣合いが得られたことを意味している。図-3、図-4に示した断面変形率の収束状態とも調和している。

(4) 地山特性曲線

図-10は、地山強度比0.75の場合でショートベンチ

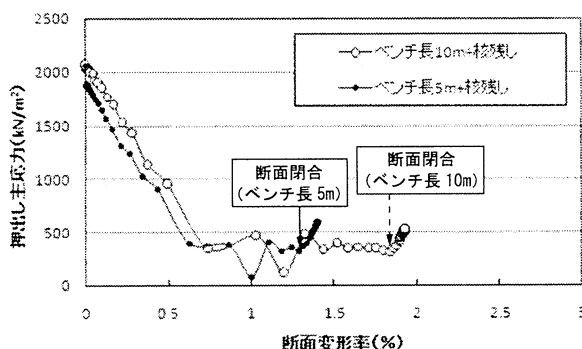


図-10 地山特性曲線

カット工法に核を残して施工した時の、坑口より20m地点における押し出し圧と断面変形率の関係を示す地山特性曲線である。

まず、ベンチ長10mの場合に着目する。初期応力状態すなわち断面変形率が0%の状態から掘削を行うと、押し出し応力が一時的に 0 kN/m^2 に近い状態になる。これは、切羽が通過し無支保状態になるためである。その後、支保が設置されると押し出し圧の反力として作用する支保工の内圧効果が増大し、断面変形率だけが增加する。そしてトンネル断面が閉合されるとともに支保内圧が急激に増大する。このような急激な変化点が表れると、断面変形率の伸びが減少し、トンネルの釣合いが得られていく様子がわかる。

つぎに、ベンチ長が5mの場合にも押し出し応力が一時的に 0 kN/m^2 に近い状態になるが、支保工が設置されると内圧効果が表れ、トンネルの釣合いが得られる。このように、トンネル断面を早期に閉合すると断面変形率が制限されることが明確に読み取ることができる。

4. まとめ

押し出し性地山におけるトンネル周辺挙動を把握するためにFLAC3Dを用いた三次元数値解析を行った結果、以下のようなことがわかった。

- 1) ベンチカット工法に核を残した工法は、切羽の押し出し量を抑制する効果がある。
- 2) 断面変形率を抑制するためには、トンネル断面を早期に閉合することが有効である。
- 3) 特性曲線は、支保工に作用する押し出し応力や収束状態を判断するうえで有用である。

参考文献

- 1) 仲野良紀：膨張性地山の実態，トンネルと地下，Vol.6 No.10，pp.15-25，1975.
- 2) 林久資，長谷川昌弘，吉岡尚也，菅浩亮：押し出し性地山でのリングカット工法の適用性について，第12回岩の力学国内シンポジウム，pp.595-600，2008.
- 3) アイダンオメール，赤木知之，伊東孝，川本眺万：スキューズ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-19，pp.73-82，1992.
- 4) Evert, H. and Paul, M.: Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunneling International*, pp. 1-21, 2000.
- 5) 三浦克：大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題，土木学会論文集，No.516/VII-27，pp.1-13，1995.
- 6) 林久資，長谷川昌弘，吉岡尚也：数値解析結果に基づくトンネルリングカット工法の作用効果，地盤工学研究発表会，pp.1483-1484，2007.
- 7) Deere, D. V: Geological considerations, *Rock Mechanics in Engineering Practice*, 1968.
- 8) Bieniawski, Z. T.: *Rock mechanics design in mining and tunneling*, BALKEMA, pp.97-136，1984.
- 9) 土屋敬：トンネル設計のための支保と地山物性に関する研究，土木学会論文集，No.364/III-4，pp.31-40，1985.
- 10) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.17-40，1997.
- 11) Hyett, A. J., Bawden, W. F. and Reichert, R. D. :The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomechanics Abstract*, Vol. 29, No.5, pp.503-524, 1992.
- 12) 大塚勇，青木智之，小川哲司，足達康軌，田中崇生：各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.73-78，2004.
- 13) 田中一雄，川上純，池田宏，恰土一美：切羽変位計測による切羽崩壊予測の一試み，トンネルと地下，Vol.27，No.6，pp.55-60，1996.