

側圧係数が小土被りトンネルの 挙動に及ぼす影響

Behavior of the shallow depth tunnel excavated under different stress conditions

菅浩亮¹・林久資¹・長谷川昌弘²・吉岡尚也²

Kosuke Suga, Hisashi Hayashi, Masahiro Hasegawa and Hisaya Yoshioka

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

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

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

To clarify behavior of the shallow depth tunnel excavated under different stress conditions, the numerical analysis was carried out. For consideration, contour of displacement, the characteristic curve and etc. need to be examined. Obtained results are as follows: 1) ring-cut method is effective to control displacement of extrusion in tunnel face, 2) behavior of the tunnel excavated such as displacements of extrusion, subsidence, stress and cross deformation are depend on the coefficient of lateral pressure, 3) the characteristic curve is useful to understand effective of timbering and state of converged deformation.

Key Words : ring-cut method, shallow depth, coefficient of lateral pressure, numerical analysis

1. 序

これまでシールドトンネルで施工されていた都市部の軟弱地山でもNATMに補助工法を併用することにより施工が可能になっている。しかし、補助工法は資材を多用し、一部は廃棄するため環境負荷が懸念される。そこで、過去に技術者が開発したショートベンチカットに核を残して掘削する工法に着目した。この工法は、切羽面の地山を利用して核を残すため、切羽近傍の地山の安定性を確保でき、さらに環境への負荷低減を期待できる。また、切羽の安定を確保することが難しい地山条件でも比較的軽微な補助工法の併用でトンネルの安定性を確保できると考える。

菅ら¹⁾はトンネル切羽周辺地山の挙動は側圧係数に依存することを明らかにしている。一方、林ら²⁾はショートベンチカット工法に核を残した場合の適用限界を明らかにした。しかし、林ら²⁾が指摘している適用限界のような地山において側圧係数が変形量や応力に与える影響については、解明さ

れていない。そのため、このような地山条件下において側圧係数がショートベンチカット工法に核を残した場合の効果について検討する。

2. 解析概要

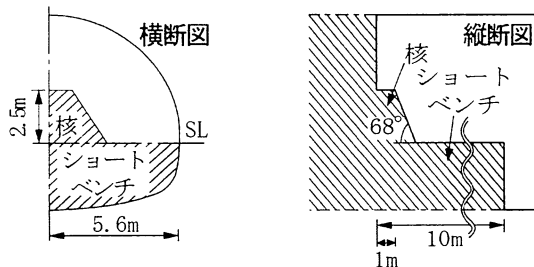
(1) 解析のための掘削工法

側圧係数 K_0 が違う小さい土被りでのショートベンチカット工法に核を残した場合の効果を解明するために三次元弾塑性解析を行なった。解析のための掘削工法を図-1 (a) ~ (d) に示す³⁾。全工法ともベンチ長 10m とした。(a) は横断方向に台形状、縦断方向に内部摩擦角を考慮した斜部を持つ核を奥行き 1m 有するショートベンチカット工法に核を残した場合である。(b) はリングカット工法と比較するための対策を行っていないショートベンチカット工法である。(c) は補助工法の効果を検討するために (a) の工法に長さ 12.5m の長尺鏡ボルトをラップ長 3.5m で 1 断面に 14 本打設した

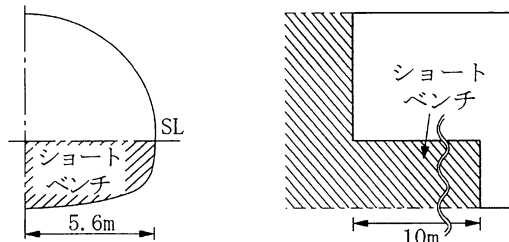
場合である。(d)も同様に(b)の工法に長尺鏡ボルト工法を併用したものである。

(2) 解析領域と境界条件

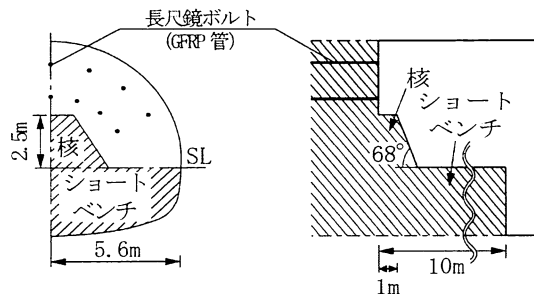
都市部では土被りが小さくなることが考えられる。ここでは、土被りを30mと設定した。解析領域は、インバートより下部領域は60m、横断領域は100m、奥行きは50mまで掘削されるものとし100mとした。境界条件は、地表面を自由境界とし、トンネル掘削方向の地山側面は横断方向、トンネル坑口と奥行き端部の地山面は縦断方向、そして底面は上下方向を拘束した。



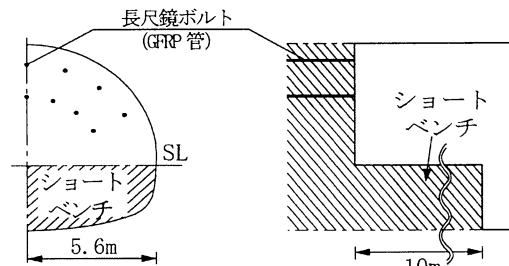
(a) ショートベンチカット工法 + 核残し



(b) ショートベンチカット工法



(c) ショートベンチカット工法 + 核残し + 長尺鏡ボルト



(d) ショートベンチカット工法 + 長尺鏡ボルト

図-1 解析のための掘削工法³⁾

(3) 入力定数の設定および力学モデル

数値解析に使用した入力定数を表-1に示す³⁾。地山については、弾性係数を $1.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ とし、ポアソン比は0.3とした³⁾。粘着力 c および内部摩擦角 ϕ は適用限界の 60 kN/m^2 と 15° に設定した²⁾。

計測事例に基づいて分析された側圧係数 K_0 の結果を図-2に示す⁴⁾。土被りが30mの場合では $K_0 = 0.35 \sim 0.78$ の範囲にあることがわかる。そこで、側圧係数がショートベンチカット工法に核を残した場合に与える影響を検討するため、 K_0 は0.35, 0.57, および0.78をパラメータとした。

支保部材の吹付けコンクリートの弾性係数 E は $3.4 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ とし⁵⁾、ポアソン比および吹付け厚はそれぞれ0.2, 0.2mと設定した⁶⁾。ロックボルトにはねじり棒剛(TD24)を用いるものとし、引張り強度などの機械的性質はトンネル標準示方書に基づいて設定した⁷⁾。定着材についてはHyettら⁸⁾の実験結果を参照し決定した。補助工法に用いる長尺鏡

表-1 入力定数³⁾

地山		単位体積重量 (kN/m ³)	18
		弾性係数 (kN/m ²)	1.0×10 ⁵
		ポアソン比	0.3
		粘着力 (kN/m ²)	60
		内部摩擦角 (°)	15°
		側圧係数	0.35, 0.57, 0.78
吹付けコンクリート		弾性係数 (kN/m ²)	3.4×10 ⁶
		ポアソン比	0.2
		吹付け厚 (m)	0.2
ロックボルト	ねじり棒剛 (TD24)	断面積 (m ²)	4.52×10 ⁻⁴
		弾性係数 (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
		穿孔径 (m)	1.32×10 ⁻¹
		長尺鏡ボルト	GFRP管
断面積 (m ²)	1.71×10 ³		
単位体積重量 (kN/m ³)	17.5		
定着材	せん断剛性 (kN/m ²)		8.19×10 ⁵
	付着強度 (kN/m)		76

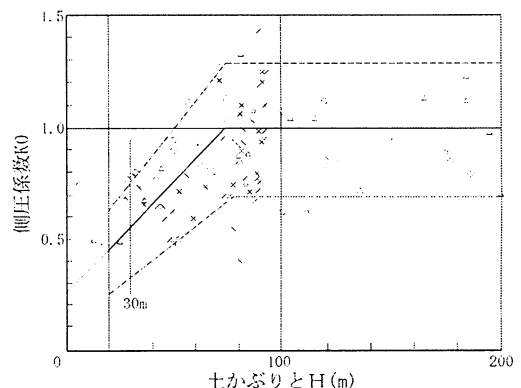


図-2 土被りと側圧係数の関係⁴⁾

ボルト(GFRP管)は大塚ら⁹⁾が行った原位置引抜き試験の結果を参考にした。

地山の力学モデルは弾完全塑性体とし、降伏の判定にはモール・クーロンの破壊規準を用いた。支保部材、補助部材に用いたロックボルト・長尺鏡ボルトはケーブル要素で、吹付けコンクリートはシェル要素でモデル化した。

(4) 解析手順

実現場で活用できるトンネル施工法を提案するためには現場での作業工程を考慮する必要がある。そこで、まずステップ1で自重解析を行い、ステップ2以降は実作業を考慮し1mずつ掘削した。その際、吹付けコンクリートは1間遅れで、ロックボルトはショートベンチカット工法で1間遅れ、ショートベンチカット工法に核を残した場合は、2間遅れで施工されるものとした。これは現場ではずり出し作業などで支保工の施工が若干遅れることや核があることにより施工が遅れることを考慮したためである。ただし、吹付けコンクリートとロックボルトは同時に施工されるものとした。そして上半を10m掘削した後は上半、下半およびインバートを同時進行させた。

3. 解析結果と考察

(1) 上半切羽の押出し変形量

図-3にショートベンチカット工法に核を残して掘削した場合の上半切羽押出し変形量のコンター図を側圧係数ごとに示す。右側がトンネルを正面から見た横断面図、左側はトンネルを側方から見た縦断面図で押出し変形量が70mm以上の部分を破線で示している。これは切羽押出し量が70mm以上になると切羽崩壊の危険があることを田中ら¹⁰⁾が現場での計測結果をもとに提唱しているからである。図-3より、側圧係数 K_0 が上昇するとともに押出し変形量も増加している。これは水平面内における応力が側圧係数に応じて増すために押出し変形量もそれに伴い増加したものと考える。

つぎに、図-4のショートベンチカット工法に着目するとこの場合も K_0 の上昇とともに押出し量も増加している。また、図-3と図-4を比較すると、押出し変形量は図-3のショートベンチカット工法に核を残した場合で掘削したほうが抑制されていることがわかる。特に、 $K_0=0.35$ の場合は70mm以上の押出し量は核の部分にしかみられず仮に崩壊

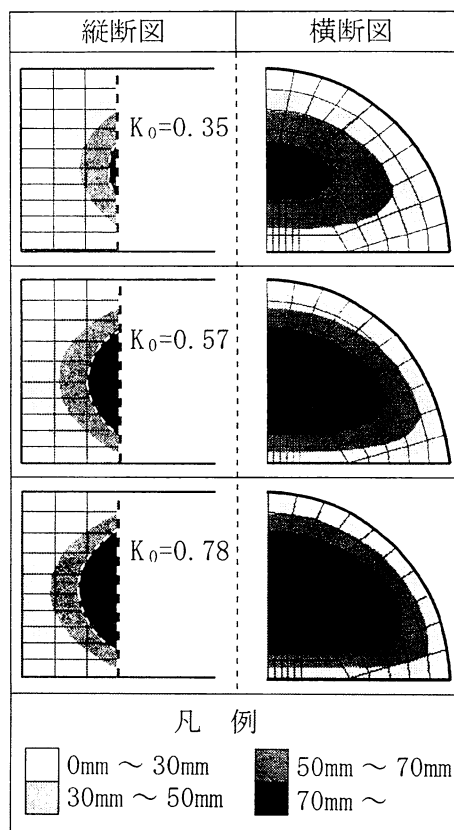


図-3 ショートベンチカット工法に核を残した場合の上半切羽の押出し変形量

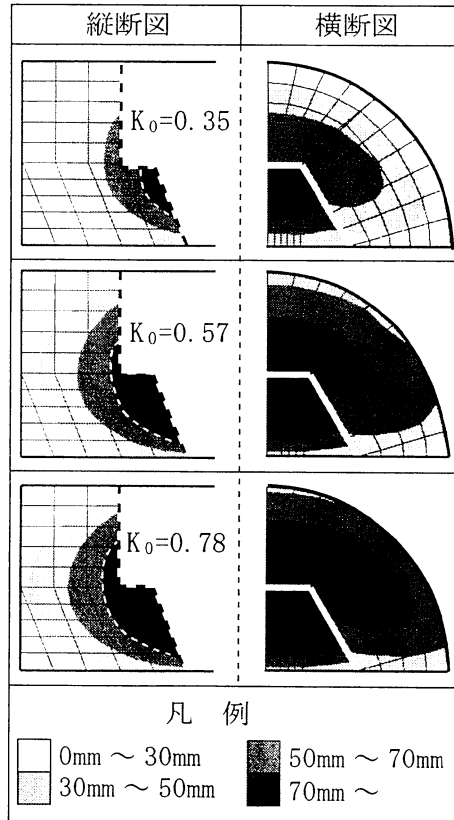
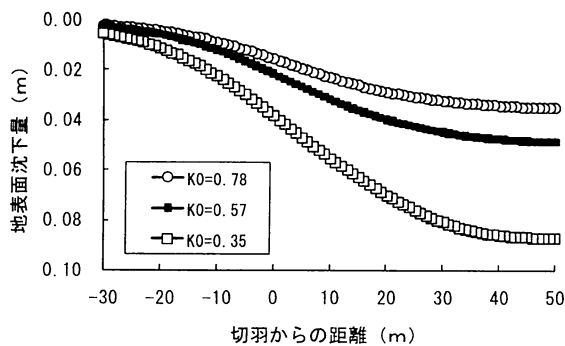
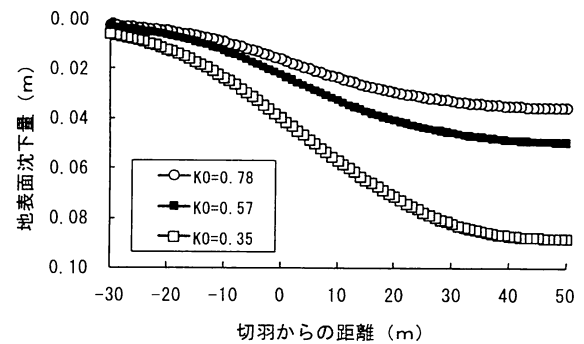


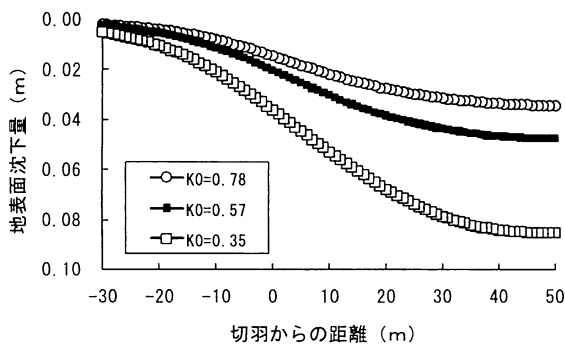
図-4 ショートベンチカット工法による上半切羽の押出し変形量



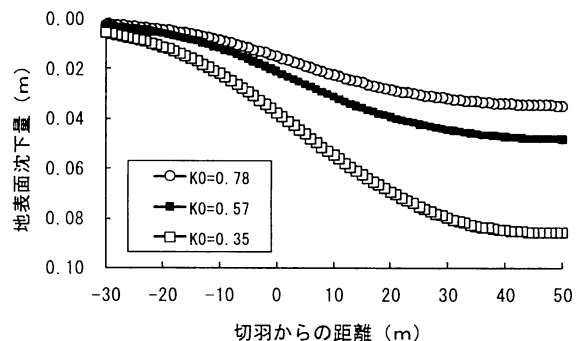
(a) ショートベンチカット工法+核残し



(b) ショートベンチカット工法



(c) ショートベンチカット工法+核残し
+長尺鏡ボルト工法



(d) ショートベンチカット工法
+長尺鏡ボルト工法

図-5(a)～(d) 地表面沈下量

しても核部分のみに限定されていることがわかる。これらのことからショートベンチカット工法に核を残した場合は、核部分の土塊が抗力を発揮するために、切羽の押出し変形を抑制しているものと考ええる。

(2) 地表面沈下量

図-1に示した掘削工法(a)～(d)によって掘削されたトンネルの地表面沈下量を図-5(a)～(d)に示す。全工法とも側圧係数が大きくなると共に地表面沈下量が小さくなるという結果が得られている。これは、水平面内の初期応力が上昇することによって沈下量が抑制された結果であると言える。また、掘削工法の違いによる沈下量の差異は見られないことから、地表面沈下量は側圧係数には依存するが掘削工法には影響されない結果になった。

(3) 側壁部と天端部の応力再配分

図-6(a)(b)～8(a)(b)にショートベンチカット工法に核を残した場合の側壁部と天端部における応力の再配分過程を示す。(a)が側壁部、(b)が天端部の応力の再配分過程を表している。これらの図は、坑口から20m地点のS.L.より1m上部に位置する掘削壁面の要素と天端部の掘削壁面の要素

における最大・最小主応力と切羽の位置との関係を示したものである。つまり、掘削が1m進むごとの応力の再配分過程が示されている。

まず、側壁部の応力再配分に着目すると側圧係数の上昇に伴い最大主応力の最大値が増加している。これは側圧係数に応じて初期の最小主応力が増加するためである。また、全てのケースにおいて切羽が到達する前に最大主応力と最小主応力の差が最大になって塑性化が始まっていることがわかる。具体的には、 $K_0=0.35$ と $K_0=0.57$ の場合は6m手前で、 $K_0=0.78$ の場合は4m手前で主応力差が最大となっており、側圧係数の違いにより塑性化の始まるタイミングがずれることがわかった。この結果は、側圧係数の違いにより切羽周辺地山応力の再配分過程が異なることを示唆している。

つぎに、天端部の応力再配分に着目すると、側壁部よりも少し早い時期から主応力差の最大値が表れている。すなわち、地山の塑性化が早くから進行することを意味している。このような結果は、現場でトンネル掘削時に切羽の安定に最も注意を払っていることとも合致している。このように塑性化が始まると、その後は最大・最小主応力ともに減少に転じ、今考えている切羽位置を通過した後最小値を示している。これは支保部材である

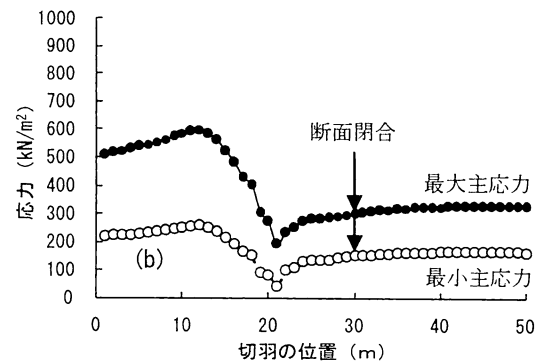
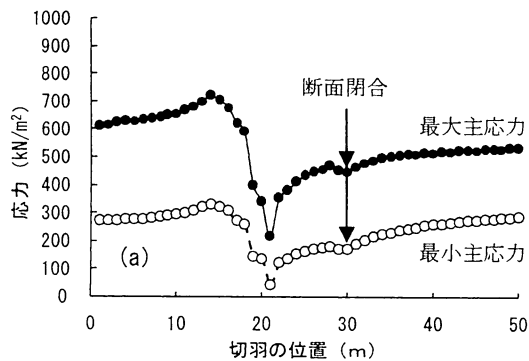


図-6 $K_0=0.35$ の時の応力再配分 (a) : 側壁 (b) : 天端

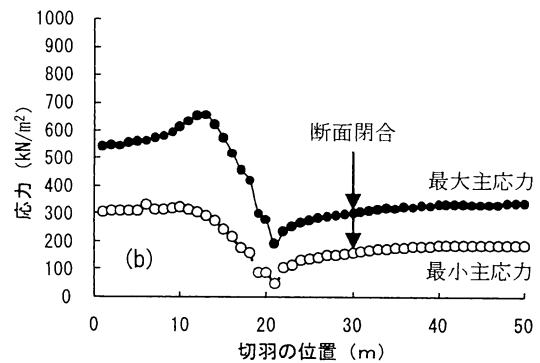
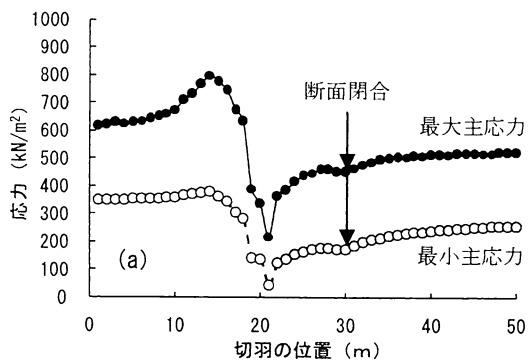


図-7 $K_0=0.57$ の時の応力再配分 (a) : 側壁 (b) : 天端

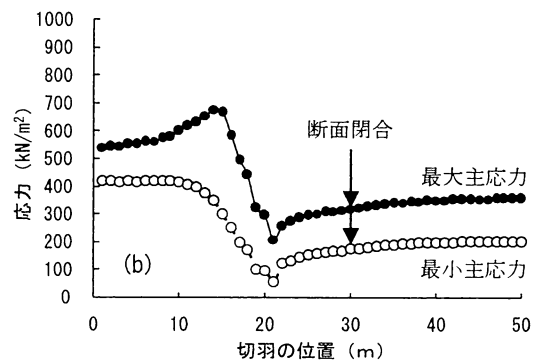
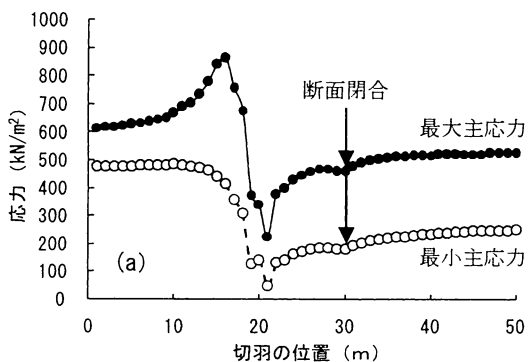


図-8 $K_0=0.78$ の時の応力再配分 (a) : 側壁 (b) : 天端

吹付けコンクリートが 1m 遅れで施工されているため、支保工が施工されるまでの間その作用効果が得られないためである。しかしながら、支保工が施工されればその作用効果で最大・最小主応力はともに増加し、トンネル断面が閉合された後(図中の矢印位置)は、最大・最小主応力は収束に向かうことがわかる。すなわち、支保の作用効果によってトンネルの釣合い状態が得られることを意味している。

(4) 断面変形率

トンネルをショートベンチカット工法に核を残して掘削した時の坑口から20m地点における断面

変形率と切羽の位置との関係を図-9に示す。断面変形率は、トンネル側壁間の変形量をトンネルの掘削幅で除し、それを百分率で表したものである。断面変形率はトンネル切羽が考えている断面を通過する少し手前から生じ始め、通過とともに急激に増大している。これは切羽自身の持つ拘束効果が掘削とともに解放されるためである。

その後はトンネル断面が閉合される30m地点までは変形量が増加し、それ以降はほぼ一定で推移している。これはトンネルの断面が閉合されたことにより支保工による内圧効果が表れてトンネル断面の変形が収束したものと推察される。また、図-1に示した他の掘削工法でトンネルを掘削し

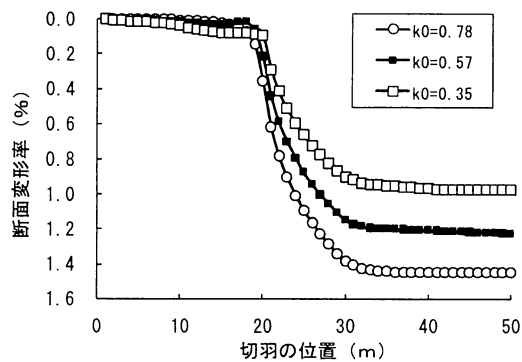


図-9 ショートベンチカット工法に核を残した場合の断面変形率

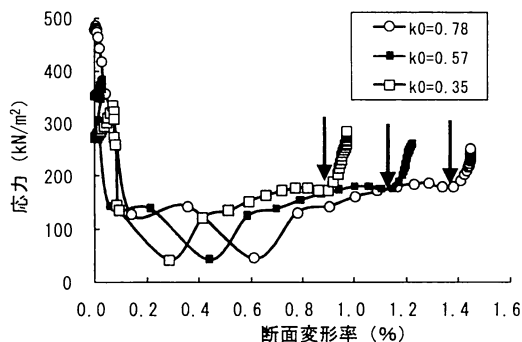


図-10 ショートベンチカット工法に核を残した場合の地山特性曲線

た場合の断面変形率は図-9に示したものと同様な結果が得られた。

(5) 地山特性曲線

ショートベンチカット工法に核を残して掘削した時の側壁部分の地山特性曲線を、図-10に示す。縦軸の応力は押し出し量に相当する最小主応力、横軸には断面変形率をとっている。初期値は側圧係数に応じて変わるが、掘削を開始すると断面変形率の増加に伴い応力は減少し、ほぼ50kN/m²まで低下している。しかしながら、支保工が設置されると支保内圧が発揮されるため、支保内圧が増加傾向を示す。その後はほぼ一定に推移し断面変形率のみ増加していく状態になるが、断面が閉合されると(図中の矢印位置)断面変形率の増加が収まり、トンネルの釣合いの得られる様子がわかる。

4. まとめ

林ら²⁾が指摘しているショートベンチカット工法に核を残した場合、適用限界のような小土被り地山で側圧係数が本工法の効果に与える影響につ

いて検討した。得られた結果を以下に要約する。

- 1) ショートベンチカット工法に核を残した場合はショートベンチカット工法に比べ押し出し変形量を抑制する効果のあることがわかった。
- 2) 地表面沈下量の掘削工法の違いによる差異は見られなかった。
- 3) 側圧係数が大きくなるとともに、切羽周辺地山の塑性化の開始が遅れることがわかった。
- 4) 側圧係数は切羽の押し出し変形量、応力、および断面変形率などのトンネル挙動に大きな影響を及ぼすことがわかった。
- 5) 地山特性曲線を描くことで支保工の作用効果や断面変形率の収束状況などを把握しやすくなることが判明した。

参考文献

- 1) 菅浩亮, 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 側圧係数の違いがショートベンチカット工法に核を残した場合におよぼす影響, 平成20年度全国大会第63回年次学術講演会 pp.653-654. 2008.
- 2) 林久資, 長谷川昌弘, 吉岡尚也: 環境にやさしいトンネルショートベンチカット工法に核を残した場合の適用限界, 平成20年度全国大会第63回年次学術講演会 pp.655-656. 2008.
- 3) 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38回岩盤力学に関するシンポジウム pp.595-600. 2008.
- 4) 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/VI-27, pp.1-13, 1995.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 土木学会トンネル工学委員会: トンネル標準示方書〔山岳工法〕・同解説, pp.84-86, 2006.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.