

トンネル核残し工法の 変位抑止・切羽安定効果の遠心模型実験

Effects of the ring-cut excavation method on ground displacements
and stability of a tunnel face

久武勝保¹・大野司郎²・片山達章³・大前幸寛³

Masayasu Hisatake, Shiro Ohno, Tatsuaki Katayama and Yukihiro Ohmae

¹正会員 工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

E-mail: hisatake@civileng.kindai.ac.jp

²正会員 工修 近畿大学助教 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

E-mail: ohno@civileng.kindai.ac.jp

³近畿大学大学院総合理工学研究科博士前期課程学生 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

Centrifugal model tests and three-dimensional elasto-plastic finite element analyses are conducted in order to clarify the effects of the ring-cut excavation method on the displacements of the ground and the stability of a tunnel face. In the experiments, the ground is excavated by an excavation robot, which is controlled by computer programs. The displacements and the stability of the tunnel face are compared between such two methods as the full-face excavation method and the ring-cut excavation method, and quantitative effects of the ring-cut excavation method are made clear.

Key Words: *settlements, stability, tunnel face, elasto-plastic analysis, robot*

1. はじめに

近年、軟質で土かぶりの浅い都市部でのトンネル施工に山岳トンネル工法が採用されている^{1)~3)}。これは、この工法が断面形状を任意に変更できる点やシールド工法に比べて経済的である点が主とした理由である。しかし、都市トンネルを山岳工法で施工する場合には、周辺環境への影響軽減および切羽安定化のために、様々な補助工法を用いる場合が少なくなく^{1)~3)}、これが山岳工法の経済性を低下させる一因となっている。山岳工法で適用される核残し工法は掘削手順の工夫により切羽を安定させる工法であり、付加的な支保部材を必要としないことから、非常に経済的・合理的な工法といえる。本工法の沈下抑止や切羽安定化に関する力学効果が定量的に明らかになれば、都市部山岳トンネル工法の経済的な設

計・施工に有効であるのは論をまたない。

核残し工法の効果については三次元有限要素法を用いた解析⁴⁾は行われている。しかし、都市部地盤の応力-ひずみ関係は、強い拘束圧依存性や非線形性を示す場合が少なくなく、このような地盤の力学特性を考慮して核残し工法の効果を実証した解析は行われていない。一方、上記のような地盤を対象にした実験的研究として、核残し工法にパイプルーフ工を併用した遠心載荷模型実験⁵⁾が挙げられる。これによれば、核残し工法採用時の切羽前方地盤の沈下抑止効果は、全断面掘削工法採用時に比べて極めて大きいことが明らかになっている。しかし、補助工法を採用しない核そのものの沈下抑止効果、切羽安定化効果については、明らかになっていない現状にある。

そこで、本研究では上記の効果を明らかにするために、

遠心载荷模型実験を行い、核残し工法の有効性について検討した。従来、遠心力場でのトンネル変位は、あらかじめ重力場で模型地盤にトンネルを掘削した後、これを遠心力場にかけて計測していた。しかし、非線形性を示す地盤では遠心力作用下において、トンネルを掘削しながら変位を計測する必要がある。そこで、本実験ではプログラム制御による三次元任意形状掘削ロボットによりこれを実現している。また、模型実験に対応する三次元弾塑性有限要素解析も同時に行い、実験と解析の結果を比較することにより、実験時の地盤の力学状況などについて考察を加えた。

2. 実験条件

(1) 実験システム

本実験で採用した遠心力载荷模型装置、プログラム作動掘削ロボット、および画像計測による地盤変位観測システムについては、文献⁹⁾に示されているものと同様である。

(2) 地盤条件

実験は砂質土地盤を想定して行った。すなわち、硅砂5号にカオリンとセメントを混ぜ合わせて、突き固めにより地盤を作成した。配合比を表-1に示す。実験地盤の三軸圧縮試験を行い、これより得られた応力-ひずみ関係、および強度特性を図-1、図-2にそれぞれ示す。図-1より応力-ひずみ関係は強い拘束圧依存性、非線形性を示すことがわかる。図-2より粘着力 C と内部摩擦角 ϕ はそれぞれ $C=30\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=42.5^\circ$ と求められた。

(3) 実験手順

土槽内に突き固めにより地盤を作成し、4日養生後に遠心装置内に設置した。次に、遠心加速度 $36G$ (G :重力加速度)の下で地盤を安定させた後、ロボットによりトンネルの自動掘削を行い、掘削中の地盤変位を画像解析手法によって計測する。本実験はトンネル軸を通る鉛直面に対する幾何学的対称性を考慮して、半断面の地盤・トンネルについて実験を行った。図-3に示す様に、以下のa, b, c, dの4点において掘削中の地盤の沈下量とトンネル軸方向水平変位を測定する。すなわち、トンネル対称面のトンネル天端より10mm上部のトンネル軸方向線上において、坑口からトンネル奥行き36mm(a点)、64mm(b点)、91mm(c点)、119mm(d点)に位置する4点である。

表-1 実験地盤の配合比

配合	質量 (g)	配合比 (%)
硅砂5号	19000	91.40
カオリン	1000	4.80
セメント	187.5	0.90
水	600	2.90

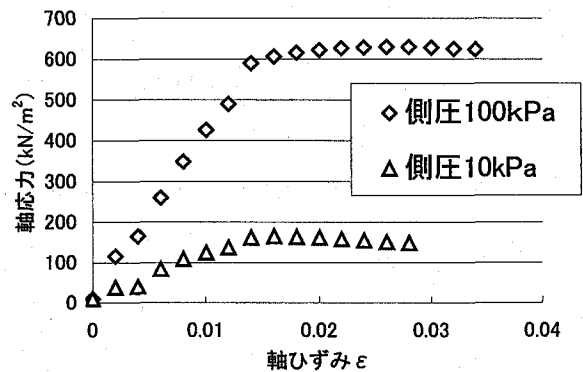


図-1 軸応力～軸ひずみ関係

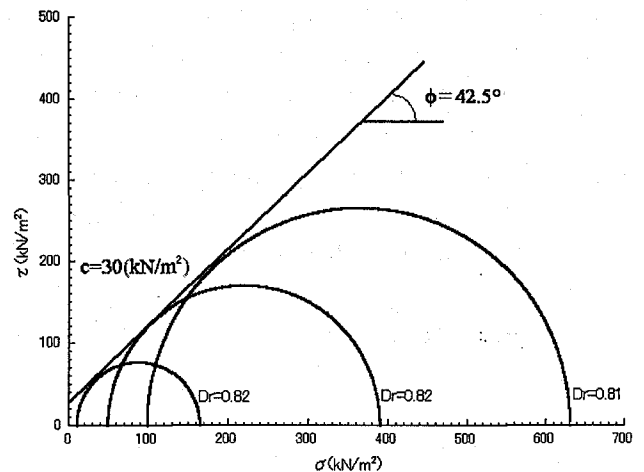


図-2 使用地盤の強度特性 (D_r : 相対密度)

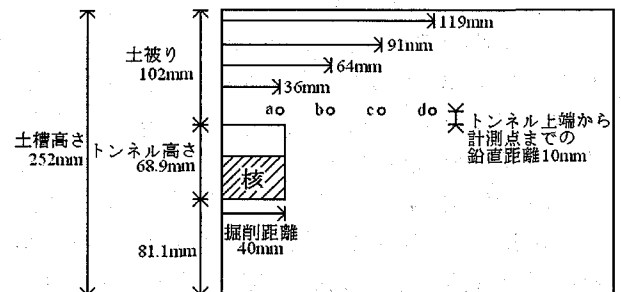


図-3 土槽内各計測点 (a～d) 位置図

(4) 実験の種類

本実験では核残し工法の有効性について調べるために、同一力学特性を有する二つの地盤を準備し、全断面掘削と核残し掘削の2種類の実験を行った。

ケース1：全断面掘削

全断面掘削は坑口から全断面を掘削しながら切羽を前進させる。その際の掘削順序を図-4(a)に示す。すなわち、手順①では掘削機をA点に移動させこの位置を奥行き5mm掘削した後、奥行き深さを一定にした状態でB点方向に向かって円弧状に掘削する。

次に、掘削機を坑口側に引き地盤から一旦離し再度A点の位置に戻した後、A点からB点まで掘削奥行き5mmを一定にして手順②の様に直線掘削する。

手順③では同じくA点からC点まで、またC点からB点まで掘削奥行き5mmを一定にして直線的に掘削する。以上の手順①～③までの掘削パターンを8回繰返し、最終的に奥行き5(mm/回)×8(回)=40mmの地盤を下端が水平なトンネル形状に掘削する。

ケース2：核残し掘削

上記で説明した手順①の掘削を奥行き5mm刻みで8回行う。すなわち、奥行き合計40mmの掘削をリング状に行い、トンネル中央部に核を残す。核残し工法におけるリング掘削面積は全断面掘削面積の約55%であり、核の面積比は約45%である。

トンネルは高さ68.9mm、底面の幅(トンネル半断面幅)36.1mm、核は高さ51.1mm、底面の幅(半断面幅)18.3mmである(図-4(b)参照)。

(5) 変位の重ね合わせによる表現手法

本実験では各計測点4点の変位をそれぞれ求めた後、切羽掘削距離に対応させてそれらを足し合わせ、切羽の接近に伴う一計測点の累積変位量として算出する手法を用いた。すなわち一問掘削(=5mm)ごとに発生する変位を4点の各計測点で求めておき、切羽が8掘削×5mm/掘削=40mm進んだ状況下で、各計測点での変位を累積している。また図-5の様に各測点の変位量を変位増分として足し合わせ総変位量を求めている。ここに図-5の横軸L1は坑口から測点aまでの距離、またL2~L4は隣り合う計測点(図-3のa~d)間の距離である。これにより40mmの掘削にも拘らず119mmまで掘削した場合の切羽接近に伴う累積変位量を求めることが可能である。

上記の重ね合わせ手法の概念を検証するために、本模型実験とは異なる一般的な地盤に対して掘削過程を考慮した三次元弾塑性有限要素解析を行った。すなわち、図-6のように切羽進行方向に1m間隔に16の計測点(a~p)を設置しておく。まず、掘削過程を考慮して坑口から1m間隔で切羽を掘削し、切羽がa点に達した時のa点の沈下量を求めておく。

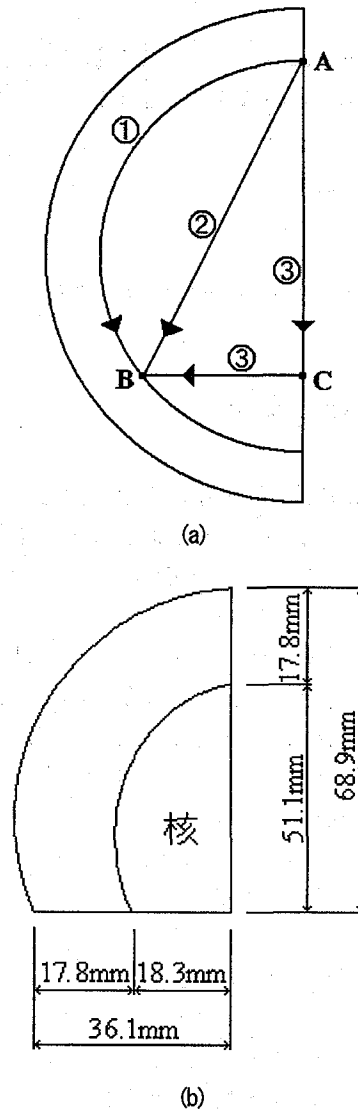


図-4 ロボットによる掘削の手順(a)と形状(b)

次に、上記解析の最終掘削であるa点の坑口側1mのみを掘削した場合について、a点からp点の増分沈下量を求めておき、その結果を切羽進行に対応させて足し合わせてa点の累積沈下量を図-5のようにして求めた。この累積沈下量の結果は上記の掘削過程を考慮して求めたa点の沈下量と一致したことから、上記重ね合わせ手法の妥当性が確認できた。

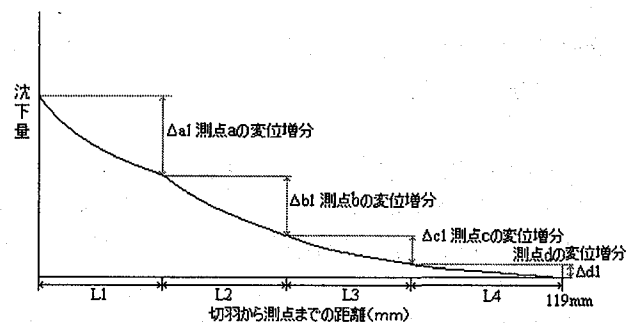


図-5 重ね合わせによる沈下量の算定手法

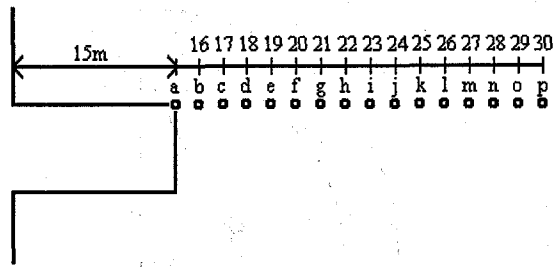


図-6 重ね合わせ手法の検証用解析モデル

3. 実験結果と考察

(1) 掘削工法の違いによる沈下量の変化

図-7 は切羽掘削に伴う各計測点の沈下特性について、全断面掘削（ケース 1）と核残し掘削（ケース 2）の結果を比較して示している。

図-7(a) は切羽の接近・通過に伴う計測点 a の沈下量を両掘削で比較したものである。計測点 a は坑口から 36mm 地点に存在しているが、掘削は坑口から 40mm まで行われているので、計測点 a を通り越して掘削が行われている。図-7(a) の結果からすると、核の沈下抑止効果が大きい掘削距離は 25mm から 35mm であり、切羽が計測点直下を通過すると、それまでの核の沈下抑止効果率が低下している。したがって、切羽すぐ手前に吹き付けなどの支保を直ちに施すことの重要性が指摘される。

図-7(b), (c), (d) は計測点 b, c, d における沈下量について、図-7(a) と同様の結果を示したものである。図-7(b) より 40mm 掘削した際の核残し掘削時の b 点の最大沈下量は全断面掘削時のそれに比べて約 8 割程度に抑えられていることが分かる。掘削距離 30mm の時に核残し掘削の最大沈下抑止効果が現れており、この時の沈下量は全断面掘削時の沈下量の半分以下に抑えられている点は興味深い。

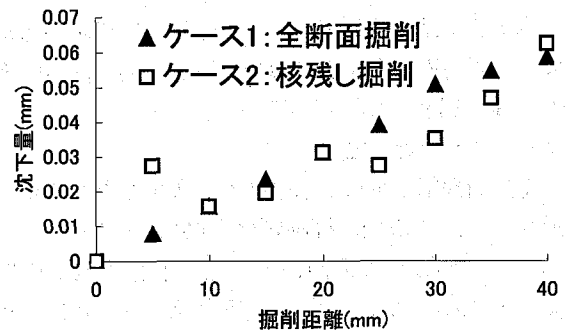
図-7(c) より 40mm 掘削した際の核残し掘削時の c 点の最大沈下量は全断面掘削時のそれに比べて約 7 割程度に抑えられている。この際、全断面掘削と比較した核残し掘削の最大沈下抑止率は計測点 b の場合よりも大である。

図-7(d) では核残し掘削の効果は確認できるものの余り顕著でないことが分かる。

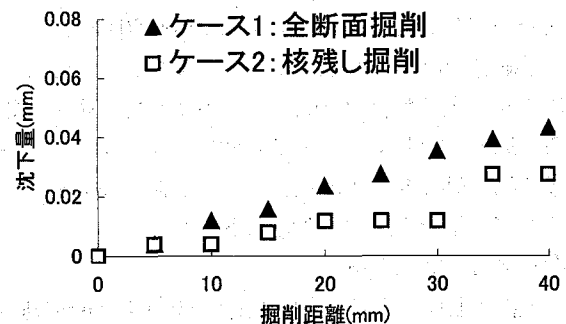
(2) 掘削工法の違いによるトンネル軸方向変位量の変化

図-8 は切羽掘削に伴う各計測点のトンネル軸方向変位特性について、全断面掘削（ケース 1）と核残し掘削（ケース 2）の結果を比較して示している。

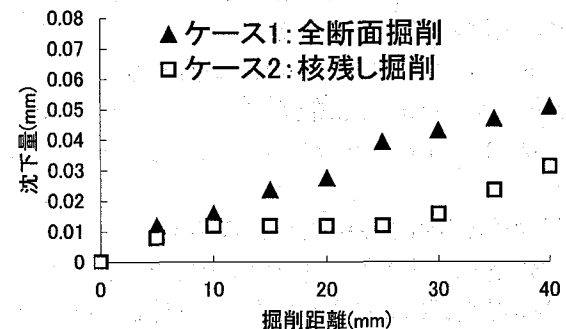
図-8(a) の結果からすると、計測点 a に切羽が接近した場合、a 点のトンネル軸方向変位を抑止する核の効果は見られないことが分かる。



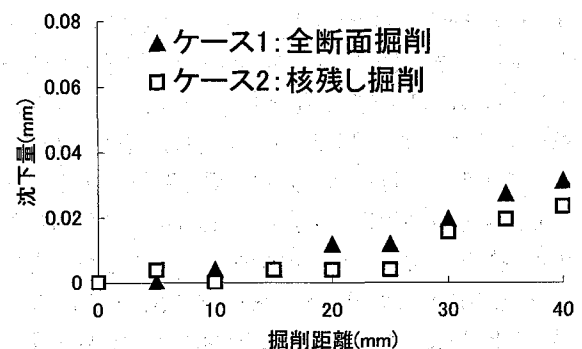
(a) 計測点 a（坑口から 36mm）での沈下量



(b) 計測点 b（坑口から 64mm）での沈下量

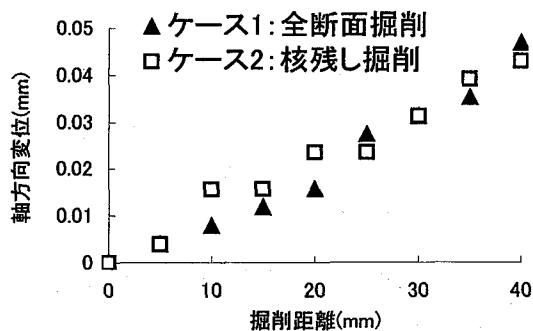


(c) 計測点 c（坑口から 91mm）での沈下量

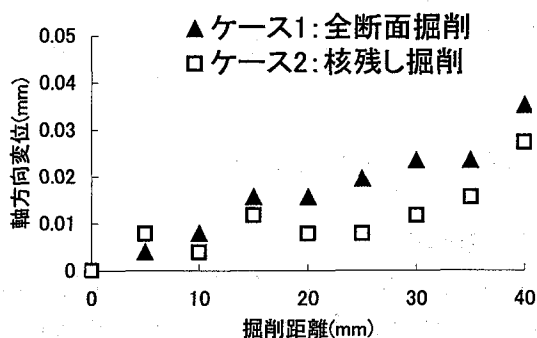


(d) 計測点 d（坑口から 119mm）での沈下量

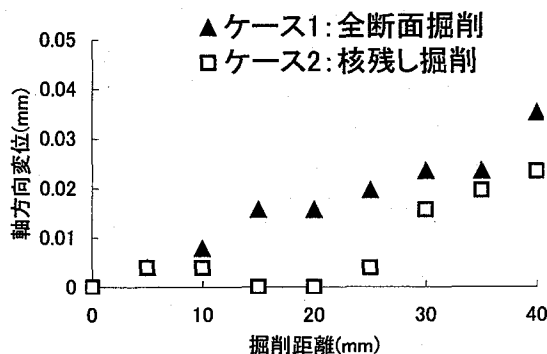
図-7 掘削工法の違いによる沈下量の変化



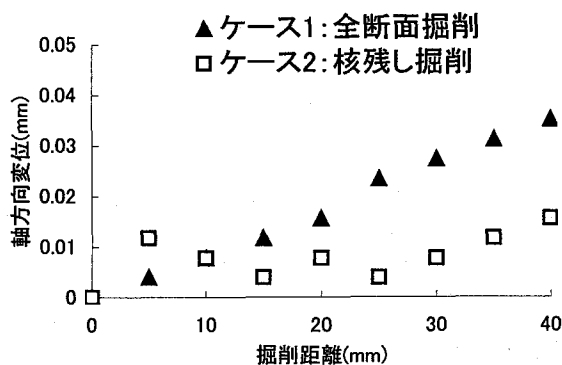
(a) 計測点 a (坑口から 36mm) での変位量



(b) 計測点 b (坑口から 64mm) での変位量



(c) 計測点 c (坑口から 91mm) での変位量



(d) 計測点 d (坑口から 119mm) での変位量

図-8 掘削工法の違いによる軸方向変位量の変化
(トンネル坑口方向変位を正としている)

しかし、図-8 (c) に示すように、計測点 c おいて、掘削距離が 15mm から 25mm の際には核の変位抑止効果が非常に高いことが理解できる。

計測点 d においては、核残し掘削の変位抑止率が相当大きいことが、図-8 (d) の結果から分かる。すなわち、図-7 では計測点と掘削地点の距離が離れると核の沈下抑止効果は小さくなっていたが、トンネル軸方向変位では計測点が切羽より遠方にあっても変位抑止効果が期待できることを示している。これより核の変位抑止効果に方向性のあることが認められる。

(3) 変位発生率の推移

図-9 は切羽の接近に伴う地盤沈下の推移について求めたものである。なお、全ての沈下量は全断面掘削時の切羽直上最大沈下量で無次元化して表している。

図-9 より核残し掘削によって発生する最大沈下量は全断面掘削時に比べて約 80% に抑えられていることが分る。すなわち、先受け工法などの補助工を施工しない場合でも、核を残存させることにより地盤の沈下抑止効果が得られることが分かる。

図-10 は切羽接近に伴うトンネル軸方向変位について、図-9 と同様に無次元変位として示したものである。軸方向に対しても図-9 の沈下の場合と類似の変位抑止効果が認められ、また核残し掘削によって発生する最大変位量は全断面掘削時に比べて約 80% に抑えられていることが分る。

(4) 遠心加速度上昇による切羽の崩壊実験

地盤を掘削した後に、遠心加速度を上昇させることによって切羽を崩壊させる実験を行った。全断面掘削と核残し掘削において、崩壊時遠心加速度の値を比較し、切羽崩壊を抑止する核の効果を明らかにするのが本実験の目的である。なお、側壁に支保部材のない状態で遠心加速度を上昇させると、切羽崩壊前に側壁が崩壊する場合が考えられるので、支保部材を予め挿入した地盤を新たに二つ作成して実験を行った。支保部材はアルミにより作成されており、それを写真-1 に示す。まず、36G の遠心加速度の下でロボットにより地盤にトンネルを奥行き 40mm 掘削後、遠心加速度を上昇させて地盤崩壊時の遠心加速度の値を読み取った。地盤崩壊時の遠心加速度の値を表-2 に示す。なお、全断面掘削では切羽崩壊時の加速度が求められているが、核残し掘削では核の崩壊時加速度が求められており切羽はまだ崩壊していない状態であった。核残し実験での核の崩壊図を図-11 に示す。以上の崩壊時加速度の比較から、核残し掘削の方が全断面掘削に比べ、1.25 倍以上の切羽安定効果が見込めることが確認できた。

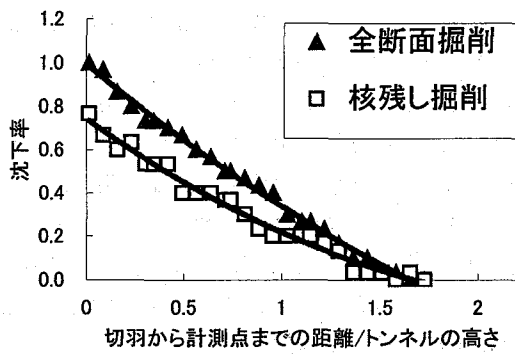


図-9 掘削工法の違いによる沈下率の推移
(全断面掘削時の最大沈下量で無次元化している)

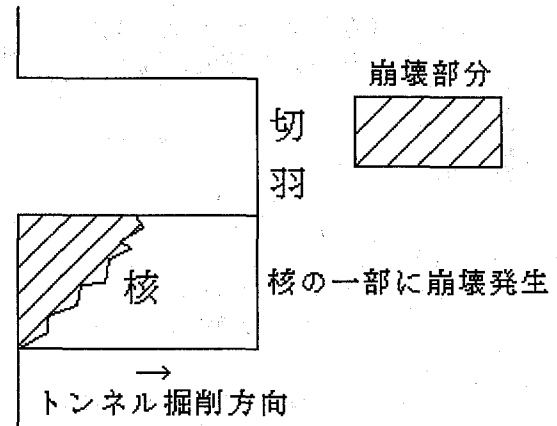


図-11 核残し実験での核の崩壊状況

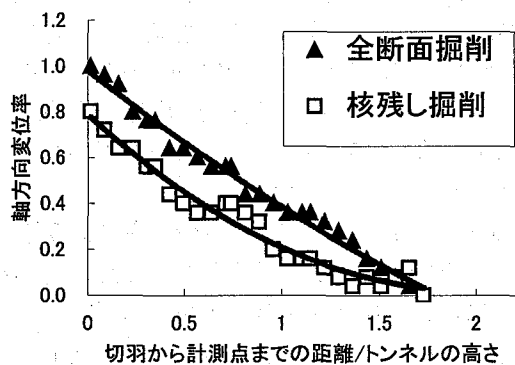


図-10 掘削工法の違いによる軸方向変位率の推移
(全断面掘削時の最大変位量で無次元化している)

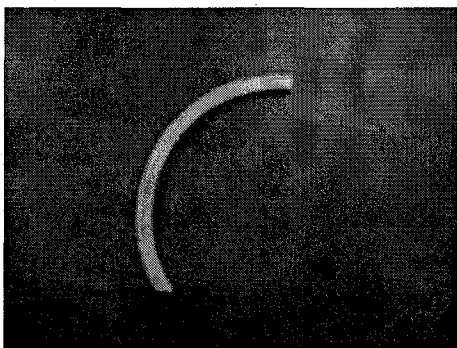


写真-1 トンネル支保部材

表-2 切羽崩壊時の加速度の違い

掘削方法	崩壊時加速度 (単位: G)	崩壊状況
全断面掘削	100	切羽部分から崩壊
核残し掘削	125	核の崩壊のみで切羽は保持

4. 模型実験に対する解析

(1) 解析条件

上記の全断面掘削、および核残し掘削の変位計測実験に対応する解析を、三次元弾塑性有限要素法 (Soil Plus) によって行い、両掘削手法による沈下量を算出し比較した。遠心力载荷状態の実験に対応させる解析であるので、実験地盤に作用させた遠心加速度を相似律に対応させることにより、地盤の幾何寸法を設定し、重力加速度作用下でトンネルを掘削している。すなわち、模型実験を遠心加速度 nG の作用下で行った場合、この実験を重力場 (1G) での解析に対応させるには、模型実験の幾何寸法を n 倍すればよいので、本解析地盤の寸法はそうにして決定した。ただし、地盤の位置により n の値は異なるのでトンネル中心位置の n に対応させてトンネルの高さ、奥行き寸法などを表現している。

解析地盤モデルを図-12 に示す。地盤の強度特性は Mohr-Coulomb の降伏基準に従う完全弾塑性体と仮定し、図-2 で求めた模型地盤の C 、 ϕ 値を用いた。地盤の弾性係数はトンネル掘削予定地盤の平均主応力を考慮し、

表-3 入力物性値

	名称	入力値	単位
地盤	弾性係数	31	MPa
	ポアソン比	0.3	-
	単位体積重量	16.1	kN/m ³
	粘着力	30	kPa
	内部摩擦角	42.5	°

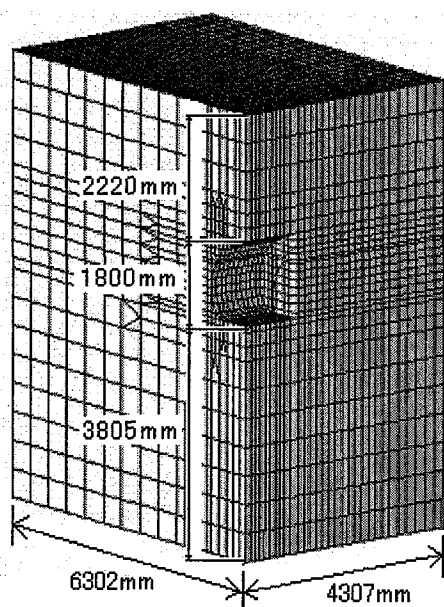


図-12 解析地盤モデル

これと同一拘束圧を作用させた三軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線の变形係数を採用した。解析入力物性値を表-3に示す。

なお、図-12において、地表面を除く各側面、底面はスライダを配し、面に垂直方向変位のみを拘束した。全断面掘削、核残し掘削のいずれにおいても、掘削領域は実験に対応させて行い、また実験時の一問掘削に対応させた逐次掘削を行った。

(2) 解析結果と考察

図-13は、切羽が計測点に接近する際の沈下量について、全断面掘削時の最大沈下量で無次元化して表現した沈下率である。切羽が計測点直下に到達した際の核残し工法による沈下率は全断面掘削時の約75%であり、図-9の実験結果から得られる約80%の値とかなり良く合っているといえる。しかし、切羽と計測点の間の距離が減少する際の沈下増加傾向は解析と実験の結果で相当異なるといえる。すなわち、解析では計測点に切羽が到達する直前に沈下が急増しているが、実験結果ではこのような傾向はみられない。

解析結果によると、全断面掘削の際には側壁下端にごくわずかの塑性領域が発生しているが、切羽前方には発生していなかった。また、全断面掘削の実験の場合、変位計測を行った際の遠心加速度の値は切羽崩壊実験時のその値の約1/3である。以上の解析と実験の結果を考えれば、変位計測実験での切羽前方地盤は降伏状態に達していない条件下の実験であると考えられる。

解析での弾性係数の値は拘束圧に依存せず一定値を与えているが、実験地盤の三軸圧縮試験で得られる応力-ひずみ曲線は図-1に示すように拘束圧に依存して大き

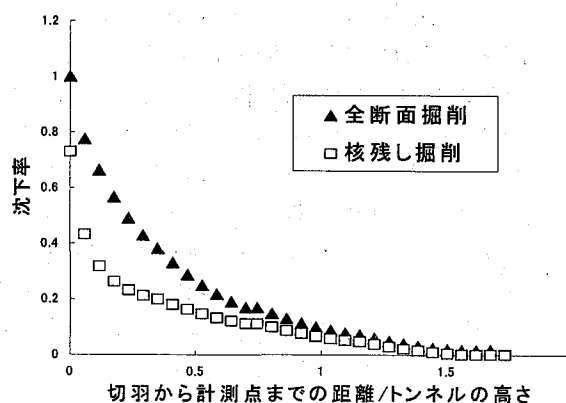


図-13 掘削工法の違いによる解析沈下率の推移
(全断面掘削時の最大沈下量で無次元化している)

く変化している。このことから、模型実験においては拘束圧と発生ひずみに対応して応力-ひずみ曲線の接線係数の値は地盤の位置により大きく変化する事になる。このような実験状況を解析で明らかにするためには、図-1に示す応力-ひずみ関係を十分表現して解析する必要があると認められる。

5. 結 論

本研究は三次元任意形状掘削ロボットを用いて遠心力載荷状態下の地盤に全断面掘削、および核残し掘削を行い、掘削中の地盤計測変位から、核残し工法の変位抑止効果がある程度明らかにすることが出来た。また、核の存在が切羽安定にどの程度有効であるかについての実験も行った。さらに、掘削に伴う地盤沈下を三次元弾塑性有限要素法によって求め、この結果と実験結果を比較して種々考察を加えた。得られた結論を列挙すれば以下の通りである。

1. 切羽前方地盤に4点の変位計測点を設け、遠心力作用場において、全断面掘削と核残し掘削に伴う各点の変位発生特性を明らかにした。また、核の変位抑止効果に方向性のあることが認められた。
2. トンネル掘削距離が短い場合でも、切羽前方に複数の変位計測点を設けておけば、掘削に伴うこれらの変位増分の重ね合わせにより、切羽の接近に伴う累積変位量を求める手法を提案し、その妥当性を三次元弾塑性有限要素解析の結果により確認した。
3. 核残し掘削を行った場合の切羽直上位置での累積沈下量、およびトンネル軸方向累積変位量は共に、全断面掘削時のそれらの約80%となり、核の存在により約20%程度の地盤変位抑止効果が認められた。
4. 遠心加速度上昇による切羽の崩壊実験を行ったところ、核残し掘削は全断面掘削に比べ、1.25倍以上

の切羽安定効果のあることが認められた。

5. 核残し掘削および全断面掘削の実験に対応する三次元弾塑性有限要素解析を行ったところ、核残し工法での切羽直上地盤の累積沈下量は全断面掘削工法でのその約 75%となり、実験結果（約 80%）に比較的対応した結果が得られた。しかし、切羽接近に伴う沈下発生の変位は実験と解析で相当の違いが確認された。このことから、実際の地盤の応力-ひずみ特性を考慮した解析を行う必要性を指摘した。

参考文献

- 1)岡部幸彦, 近藤達敏: トンネル掘削時におけるインクリノメータによる地山変位挙動計測と切羽近傍の地山物性値の推定, 応用地質年報, No. 8, pp. 25-41, 1987.
- 2)Sasaki, R., Takayama, T., Tsukada, M., Kimura, M., Torii, S., Nakagaki, H.:Excavation monitoring of a large cross section tunnel underpassing an existing railway, Proc. Modern Tunneling Science and Technology, pp. 253-258, 2001.
- 3) 野村耕司, 鈴木教義, 中山裕昭: 都市 NATM による大断面双設トンネル, トンネルと地下, pp. 305-313, 1999.
- 4)西崎昌士, 羽馬 徹, 岡部 正: 3次元数値解析による切羽安定対策工の効果に関する考察: トンネル工学研究論文・報告集, 第11巻, pp. 111-116, 2001.
- 5)久武勝保, 大野司郎, 佐野真介, 木村正樹, 鳥居敏: トンネル遠心模型実験における掘削ロボットの開発とその先受け工法への適用, トンネル工学論文集, 第15巻, pp. 23~30, 2005.