

トンネルリングカット工法による 切羽前方地盤の沈下抑制効果

久武勝保¹・大野司郎²・片山達章³・大前幸寛⁴・鈴木啓介⁵

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 近畿大学講師 総合社会学部環境系専攻 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

³工修 大成・熊谷・間共同企業体胆沢ダム材料採取事務所(〒023-0403 奥州市胆沢区若柳字愛宕 488-1)

⁴工修 丸善石油化学(株) (〒104-8502 東京都中央区八丁堀二丁目 25 番 10 号)

⁵学生会員 近畿大学大学院総合理工学研究科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

本研究は遠心模型実験と三次元弾塑性有限要素法解析により、トンネルリングカット工法による切羽前方地盤の沈下抑制効果を明らかにすることを目的としている。模型トンネルは遠心力载荷状態下においてロボットにより掘削されており、切羽進行に伴う地盤沈下量が画像解析手法により求められている。力学特性の異なる二種類の未固結地盤において、全断面掘削工法とリングカット工法による沈下量が測定された。これより強度が小さい地盤でのリングカット工法による沈下量は全断面掘削工法による沈下量の約 30%となり、また強度が大きい地盤では約 60%となった。またこの原因が三次元弾完全塑性有限要素法解析結果により考察されている。

Key Words: settlement, centrifugal model tests, ring-cut excavation method, 3D FEM, elasto-plastic

1. はじめに

近年、NATM 工法はシールド工法に比べて経済的であることから、地質特性の必ずしも良くない未固結地盤にも採用される状況である。しかし、切羽の安定性確保や周辺環境への影響軽減のために補助工法を採用すれば、これにより経済的な本工法の長所が發揮できない状況が生じてくる場合がある¹⁾。リングカット工法は、核を残す施工手順が必要となるものの、付加的補助部材を必要とせず、切羽の安定性向上、および周辺環境への影響を軽減することを目的とした経済的な工法である。

リングカット工法を採用する場合の切羽前方地盤の変位発生特性の解明については、三次元数値解析^{2),3)}やロボットを用いた遠心模型実験^{4)~7)}が行われている。リングカット工法は軟質な地盤で採用される場合が多く、その際の地盤の強度や応力~ひずみ関係の拘束圧依存性といった力学特性は沈下結果に強く影響すると思われる。遠心模型実験はこの様な実際の力学特性を考慮できるので、沈下の発生メカニズムを詳細に把握できる点で優れている。

切羽前方に塑性領域が発生しない場合^{4),5)}やパイプ

ルーフ工を適用した場合^{6),7)}のリングカット工法による沈下抑制効果については、遠心模型実験により明らかにされている。一方、リングカット工法の沈下抑制効果に及ぼす強度や変形特性の影響は大きいと考えられるが、しかしこれらの点については実験的に明らかにされていない状況にある。

そこで本研究では強度および変形特性の異なる 2 種類の未固結地盤について、ロボットによりトンネルを掘削する遠心模型実験を行う。そしてリングカット工法と全断面掘削工法による沈下量を比較すると共に、実験に対する三次元弾完全塑性有限要素法解析を行い、リングカット工法による切羽前方地盤の沈下抑制効果について検討する。

2. 遠心模型実験

(1) 実験システム

本研究で用いた遠心力载荷装置、プログラム制御三次元掘削ロボットおよび、地盤変位計測装置は文献^{6),7)}と同一のものである。

(2) 実験条件

実験地盤は砂質系地盤を想定して作成した。地盤は硅砂5号に粘着力を持たせるため、カオリン、セメント、水を混ぜ合わせ、突き固めにより作成した。配合比を表-1に示す。また本研究では所定の強度を有する2種類の地盤を作成するために、養生期間を2日(ケース1)、および4日(ケース2)として実験を行った。それぞれのケースでの応力-ひずみ関係を図-1、図-2に示す。図-1、図-2から各ケースともに応力~ひずみ曲線が拘束圧依存性、および非線形性を示している事が理解できる。また地盤強度特性を図-3、図-4に示す。図-3、図-4から求められた各ケースの粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、および地盤密度を表-2にまとめて示す。

(3) 実験手順

土槽内に突き固めにより地盤を作成し、所定の養生後に遠心装置内に設置する。各ケースともに遠心加速度36G(G:重力加速度)を作用させた条件下でロボットによりトンネル掘削を行い、掘削中の地盤沈下量を画像解析手法によって計測する^{4), 6)}。

本実験はトンネル中心軸を通る鉛直縦断面に対する幾何学的対称性を考慮し、半断面のトンネル地盤について行った。各ケースの地盤観測位置は異なっており、ケース1を図-5に、ケース2を図-6に示す。計測点は上記

表-1 地盤配合比

配合	質量 (g)	配合比 (%)
硅砂5号	19000	91.4
カオリン	1000	4.8
セメント	187.5	0.9
水	600	2.9

表-2 地盤の強度特性と密度

種類	ケース1	ケース2
養生期間	2日	4日
地盤密度 (g/cm^3)	1.63	1.63
粘着力 c (kPa)	16	25
内部摩擦角 ϕ	36.7°	38.6°

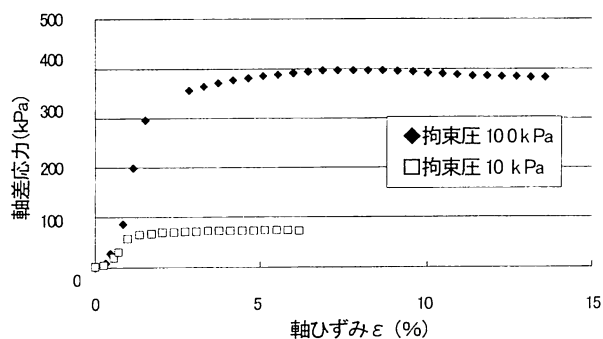


図-1 ケース1の軸差応力-軸ひずみ関係

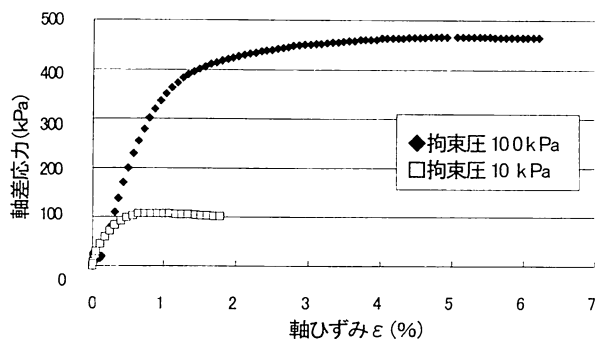


図-2 ケース2の軸差応力-軸ひずみ関係

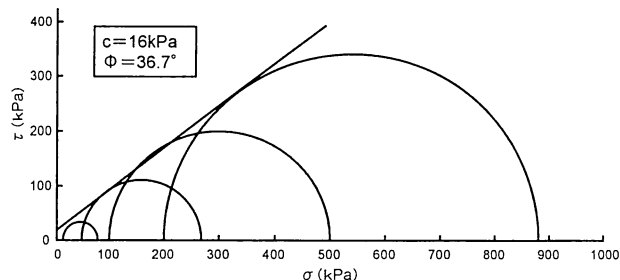


図-3 ケース1の地盤の強度特性

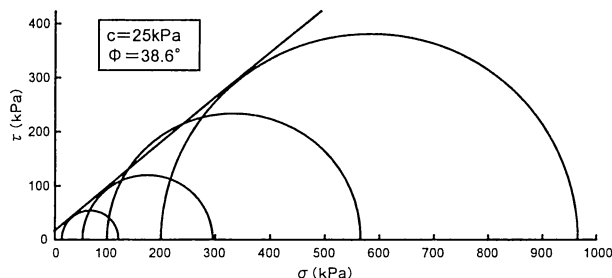


図-4 ケース2の地盤の強度特性

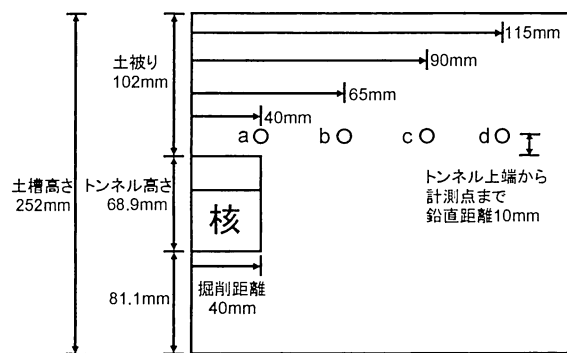


図-5 ケース1の土槽内各計測点配置図

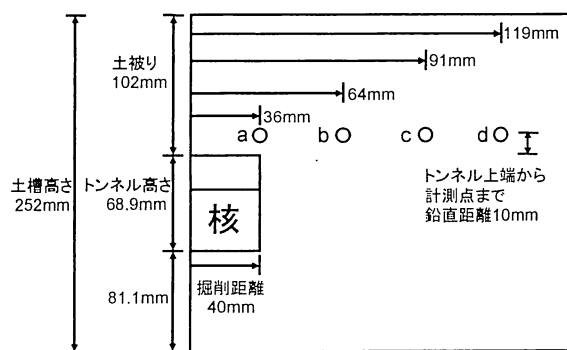


図-6 ケース2の土槽内各計測点配置図

鉛直縦断面において、トンネル天端から 10mm 上部にトンネル軸に平行に配置しており、坑口側から a, b, c, d の 4 点である。

(4) 掘削方法

本研究ではリングカット工法の沈下抑制効果を調べるために、全断面掘削工法とリングカット工法の 2 種類の掘削工法を採用している。

a) 全断面掘削

図-7 に示す①, ②, ③の順序で坑口側から奥行き方向に各 5mm の掘削を行い、これを 8 回繰り返すことにより、奥行き合計 40mm の全断面掘削を行う。掘削後の幾何関係を図-8 (a)に示す。

b) リングカット掘削

図-7 に示す①の部分(円弧部分)を坑口側から 5mm の掘削を行い、これを 8 回繰り返して奥行き合計 40mm のリングカット掘削を行う。リング掘削終了後に残った部分を本研究では核として扱う。なお、リング掘削面積は全断面掘削面積の約 55%であり、したがって残存する核の面積比は約 45%である。掘削後の幾何関係を図-8 (b)に示す。

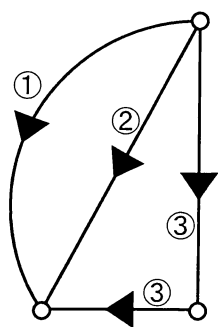


図-7 掘削手順説明図

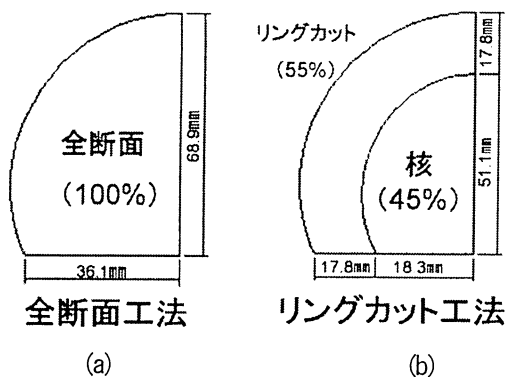


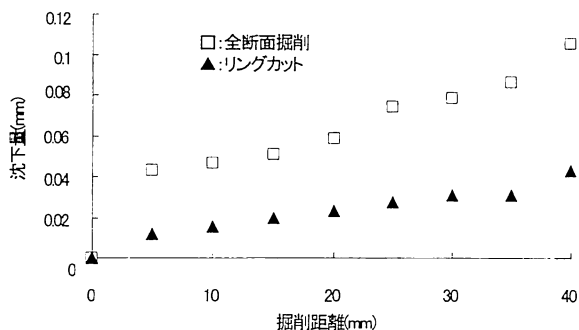
図-8 全断面掘削工法とリングカット工法の掘削領域

3. 実験結果と考察

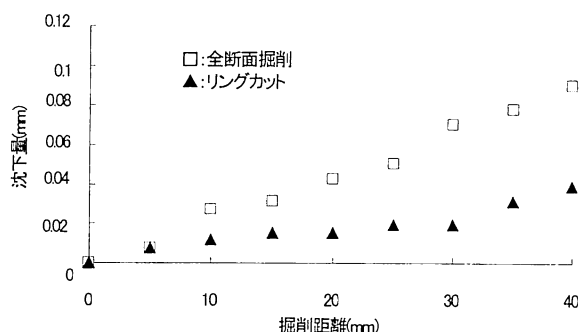
(1) 掘削方法の違いによる沈下特性の違い

a) ケース 1 の場合

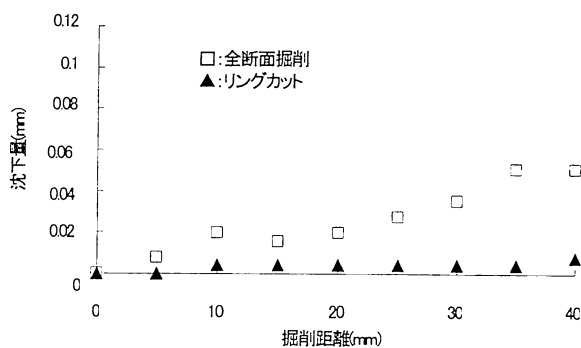
図-9 はケース 1 の地盤において、全断面掘削工法とリングカット工法でそれぞれ掘削した際の切羽進行に



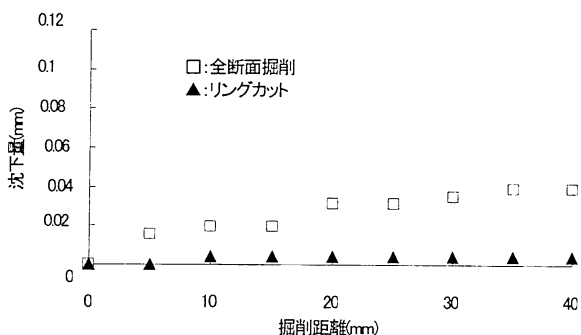
(a) 計測点 a (坑口より 40mm 地点)



(b) 計測点 b (坑口より 65mm 地点)



(c) 計測点 c (坑口より 90mm 地点)



(d) 計測点 d (坑口より 115mm 地点)

図-9 ケース 1 の各掘削段階に伴う沈下特性

伴う沈下量を示している。図-9(a)は掘削距離に伴う図-5のa点の沈下推移を示している。リングカット時の最終沈下量は全断面掘削時の約40%となっている。これより、核の存在によって大きな沈下抑制効果が発揮されていることが理解できる。

図-9(b)は掘削距離に伴う図-5のb点の沈下推移を示している。リングカット時の最終沈下量は全断面掘削時の約43%となっている。またリングカット工法での最終沈下量は全断面掘削距離20mmでの沈下量にほぼ対応している。

図-9(c)は掘削距離に伴う図-5のc点の沈下推移を示しており、リングカット時の最終沈下量は全断面掘削時の約15%と非常に少ない。

図-9(d)は掘削距離に伴う図-5のd点の沈下推移を示している。リングカット時の最終沈下量は全断面掘削時の10%と非常に少ない。

上記の図-9(c), (d)で示したように、切羽から地盤奥行き方向にトンネル高さ以上離れた位置において、リングカットによる沈下量は全断面掘削による沈下量に比べて非常に少ないことが理解できる。

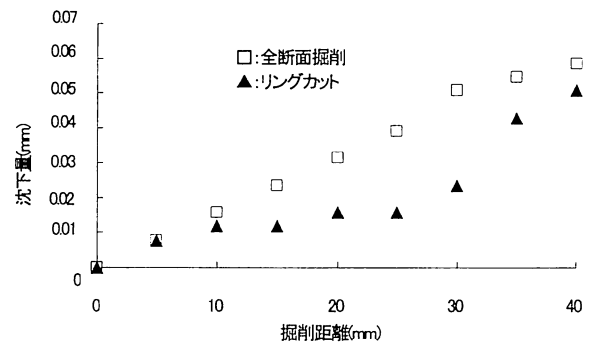
b) ケース 2 の場合

図-10はケース2の地盤において、全断面掘削とリングカットをそれぞれ行った際の切羽進行に伴う沈下量を示している。

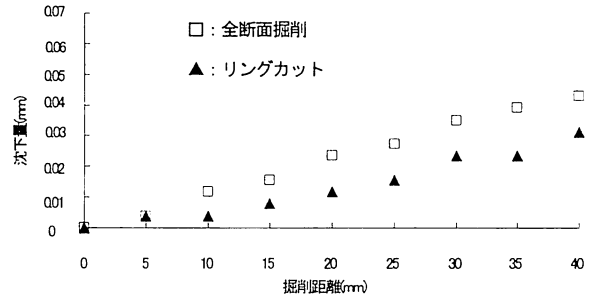
図-10(a)は図-6のa点の沈下推移を示している。図-6のa点は坑口から36mm地点に存在するため、最長掘削距離40mmの時点では切羽は計測点aを越えて存在している。注目すべき点は切羽が計測点を越えて進行する際に、リングカット掘削での沈下量は全断面掘削での沈下量にかなり近い値を示している。計測点が切羽よりも前方に位置している場合は核による沈下抑制効果が見られるが、切羽よりも手前では核の沈下抑制効果が期待できないことが理解できる。次に、切羽がa点直下にほぼ達する掘削距離での沈下量について全断面掘削とリングカットの比較を行えば、リングカットでの沈下量は全断面掘削時の約79%となっている。すなわち、地盤強度の大きいケース2の場合におけるリングカットの沈下抑制効果は、地盤強度の小さいケース1の場合の約40%に比べて半分程度であり、抑制効果が大きく低下しているのが理解できる。

図-10(b)は掘削距離に伴う図-6のb点の沈下推移を示している。リングカット時の最終沈下量は全断面掘削時の約73%となり、強度の小さい図-9(b)の場合の43%に比べてリングカットの沈下抑制効果は低下しているといえる。

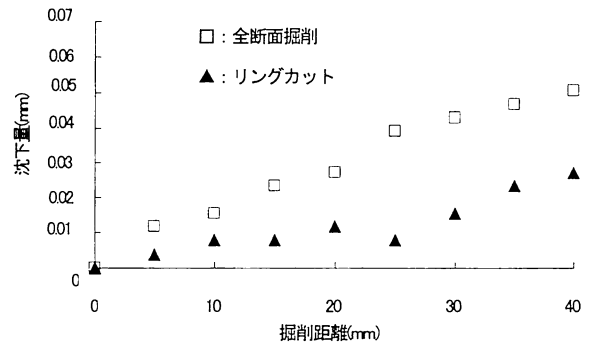
図-10(c)は掘削距離に伴う図-6のc点の沈下推移を示している。リングカットでの最終沈下量は全断面掘削時



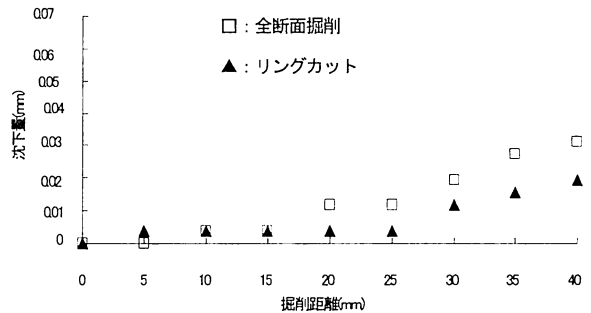
(a) 計測点 a (坑口より 36mm 地点)



(b) 計測点 b (坑口より 64mm 地点)



(c) 計測点 c (坑口より 91mm 地点)



(d) 計測点 d (坑口より 119mm 地点)

図-10 ケース 2 の各掘削段階に伴う沈下特性

の約54%となっている。

図-10(d)は掘削距離に伴う図-6のd点の沈下推移を示している。リングカットでの最終沈下量は全断面掘削時の約63%となっている。

(2) リングカット工法の沈下抑制効果率

前述の3. (1) でリングカットでの最終沈下量が全断面掘削での最終沈下量の何%であるか示した。ここで、リングカットによる沈下抑制効果を示す方法として、式(1)による効果率（ E ）を算出し、これを図-11 に示す。

$$E = \frac{U_f - U_r}{U_f} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 U_f ：全断面掘削での最終沈下量

U_r ：リングカットでの最終沈下量

図-11 を見ると、リングカット工法の沈下抑制効果率は強度の大きいケース2の地盤の方よりも強度の小さいケース1の地盤の方で全般的に大きい。また、沈下抑制効果率は切羽から前方奥で大きくなっていることがわかる。

(3) 切羽進行に伴う沈下の推移

以上の計測点 a～d の沈下量を用いることにより、切羽が計測点 d まで進行した場合の d 点の沈下量を算出することが出来る^{5),6)}。これより沈下の傾向とリングカット工法の沈下抑制効果を以下では明らかにする。

図-12、図-13 は切羽と計測点 d の間の距離（横軸）と計測点 d での沈下量（縦軸）の関係を示している。ただし、横軸はトンネルの高さで、また縦軸は全断面掘削工法での最大沈下量でそれぞれ無次元化している。

図-12（ケース1）を見るとリングカット時の最大沈下量は全断面掘削時の約 30%と非常に少ない。また、切羽から計測点までの距離がトンネル高さの約 0.8 倍になるまでほとんど沈下が発生していない。

図-13（ケース2）ではリングカット時の最大沈下量は全断面掘削時の約 60%となっている。このことから、地盤の力学条件の違いでリングカット工法の沈下抑制効果が大きく異なることが理解できる。

4. 三次元弾完全塑性有限要素法解析による考察

模型実験で使った地盤の強度特性は図-3、4 で示すようにモール・クーロンの破壊基準を満たしている。そこで、この基準を用いた三次元弾完全塑性有限要素法解析を行い、考察を加えることとする。

実験時の遠心加速度を重力場に換算した解析モデルを図-14 に、三軸圧縮試験結果を参考にして決定した解析入力値を表-3 に示す。なお弾性係数の値はトンネル掘削前のトンネル中心点での水平拘束圧を考慮し、この拘束圧下の三軸圧縮試験から求められた応力-ひずみ曲線の変形係数を採用した。両ケースについて全断面とリングカットによる掘削解析をそれぞれ行い、各ケースの

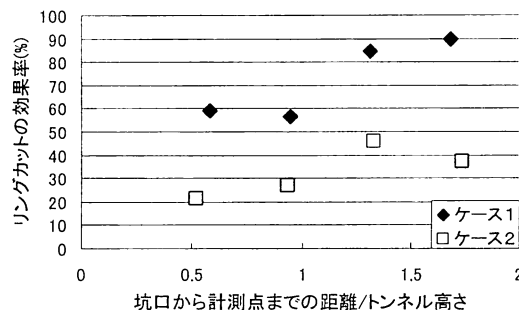


図-11 リングカットの沈下抑制効果率

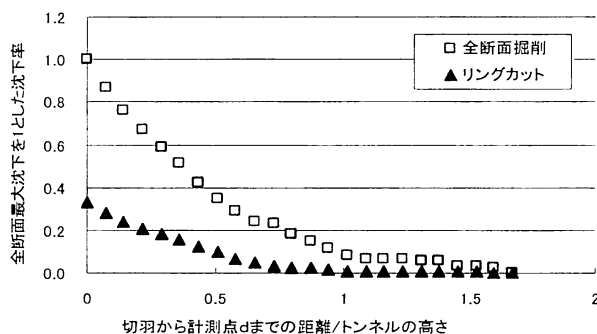


図-12 沈下率の推移（ケース1の場合）

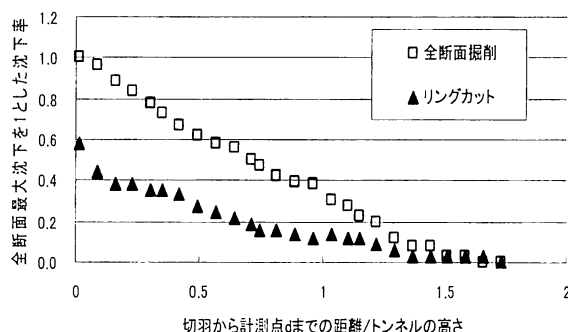


図-13 沈下率の推移（ケース2の場合）

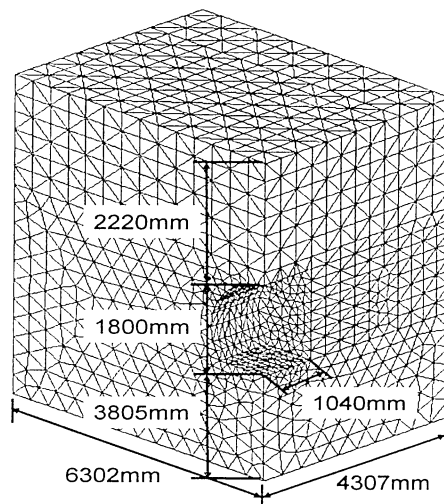
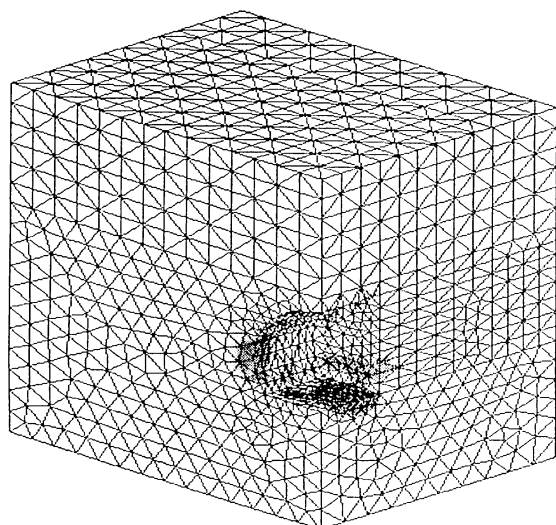


図-14 解析地盤モデル

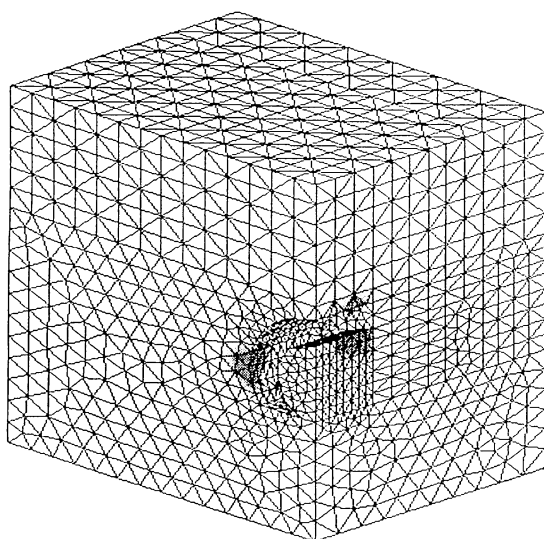
表-3 解析で用いた入力物性値

パラメータ	入力値		単位
	ケース 1	ケース 2	
弾性係数	10.5	33	MPa
ポアソン比	0.3	0.3	-
単位体積重量	16	16	kN/m ³
粘着力c	16	25	kPa
内部摩擦角φ	36.7	38.6	Degree



■ : 塑性部分

a) 全断面工法

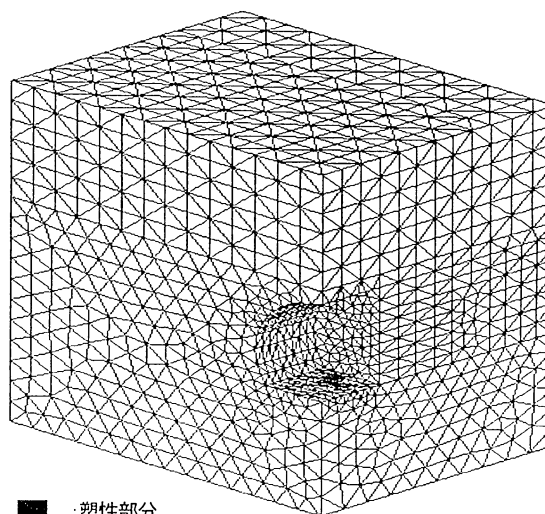


■ : 塑性部分

b) リングカット工法

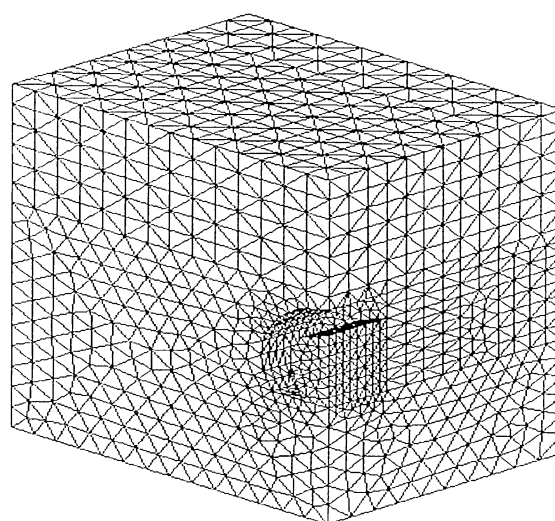
図-15 ケース 1 の塑性領域図

塑性領域の広がりについて検討する。図-15、図-16に各ケースの最終段階での塑性領域を示す。



■ : 塑性部分

a) 全断面工法



■ : 塑性部分

b) リングカット工法

図-16 ケース 2 の塑性領域図

図-15 はケース 1 の地盤条件での解析結果であるが、これを見ると全断面掘削では塑性領域が切羽下部に広く発生し、また切羽上部にもわずかであるが発生している。一方、リングカットでは核の上部や側壁などの切羽手前に塑性領域の発生が見られるものの、切羽前方はわずかに塑性化する程度であった。このことからケース 1 の地盤条件の場合、リングカットでは核によって切羽前方地盤の塑性領域の発生が抑えられて切羽が安定化し、その結果切羽前方地盤の沈下が十分抑制されたものと考えられる。

図-16 はケース 2 の地盤条件での解析結果であるが、これを見ると全断面掘削では切羽手前のトンネル下部に塑性領域が少し発生しているが切羽においては塑性領域

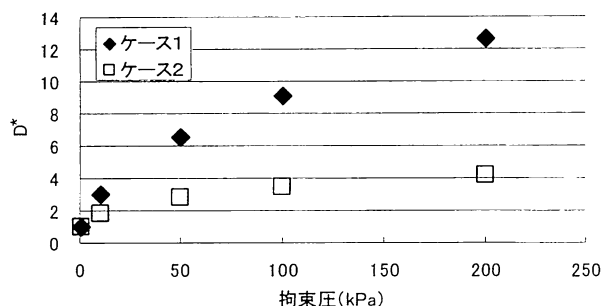


図-17 各拘束圧下における無次元変形係数 D^*
(使用地盤の三軸圧縮試験の結果)

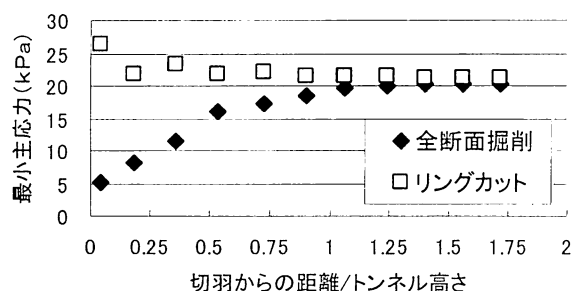


図-18 切羽中心点を通るトンネル進行方向線上の最小主応力
の変化 (3D-FEM 解析結果)

の発生は見られなかった。また、リングカットでは塑性領域は核の一部にわずかに発生する以外は発生していなかった。このことからケース2の地盤条件の場合では、全断面掘削においても切羽に塑性領域が発生しておらず、塑性領域の発生を抑制するリングカット工法の効果を期待するのが難しい地盤であったと考えられる。

使用地盤に対する軸差応力 - 軸ひずみの実験結果から、各拘束圧における無次元変形係数 D^* の値を求めて図-17に示す。ここに D^* はある拘束圧での変形係数の値を拘束圧1kPa時の変形係数の値で除した値である。したがって、図-17は各ケースの変形係数の拘束圧依存性を示したものであり、ケース1のほうがケース2よりも拘束圧依存性の強い地盤といえる。

一方、図-18は全断面掘削工法とリングカット工法の最終掘削時点において、切羽中心点を通るトンネル進行方向線上の最小主応力の値をケース1の地盤について解析により求めたものである。全断面掘削工法の場合では、最小主応力の値は切羽に近い位置ほど低下している。すなわち、地盤の拘束圧が低下していると考えられる。一方、リングカット工法の場合では、最小主応力の値の低下は見られない。このことからリングカット工法では地盤に十分な拘束圧を与えていることが認められる。

拘束圧の低下と共に地盤の変形係数の値が低下するという図-17の結果、および切羽の接近により切羽前方地盤の最小主応力の値が変化するという図-18の結果を考

慮すれば、全断面掘削工法では切羽前方地盤の拘束圧が低下して変形係数の低下が起き、これにより沈下の発生が増したものと考えられる。一方、リングカット工法では核の存在によって地盤に十分な拘束圧を与えており、これにより地盤の変形係数の低下が起きにくい状況となり、全断面掘削工法に比べて沈下の発生が抑制されたものと考えられる。

変形係数の拘束圧依存性の程度については、トンネル施工前の地質調査で知ることが出来るので、この値はリングカット工法の沈下抑制効果を検討する際の有用な指標になると考えることが出来る。

一方、本使用地盤は図-3、図-4で示すように、モール・クーロンの破壊基準に従っている。したがって、全断面掘削工法では、切羽の接近により切羽前方地盤の最大主応力の値は増加し、最小主応力の値は減少して地盤は降伏しやすい状況になるが、リングカット工法では核の存在により最小主応力の低下が抑制される(図-18参照)ので切羽前方地盤は降伏しにくい状況になることが理解できる。

5. 結論

本研究で得られた成果は以下の通りである。

1. 力学特性の異なる2種類の未固結地盤に対して遠心模型実験を行い、リングカット工法および全断面掘削工法をそれぞれ採用した際の切羽進行に伴う地盤沈下特性を明らかにした。
2. 切羽前方計測点直下に切羽が到達した際の沈下量について、全断面掘削工法とリングカット工法の間で比較した。地盤強度の小さい場合には、リングカット工法による最大沈下量は全断面掘削工法による最大沈下量の約30%となり、リングカット工法の沈下抑制効果が非常に大きい事が明らかになった。一方、地盤強度の大きい場合には上記の値は約60%となり、地盤強度の小さい場合に比べて効果が小さいことがわかった。
3. 遠心模型地盤に対応する三次元弾完全塑性有限要素法解析を行い、切羽周辺の塑性領域の広さを各掘削工法で比較した。また、その結果と模型実験による沈下特性を比較することにより、以下の結論が得られた。
 - (1) リングカット工法では残存する核の存在により、切羽前方地盤の最小主応力の低下が妨げられる。これにより地盤は降伏しにくい状況となる。また、地盤の変形係数の低下が起きにくい状況となり、このことが核の沈下抑制効果として認められた。
 - (2) 変形係数の拘束圧依存性の高い地盤ほど、核の沈下抑制効果が大きいことが認められる。すなわち、リングカット工法の沈下抑制効果は地盤の変形係

- 数の拘束圧依存性の程度により異なることになる.
- (3)全断面掘削工法で切羽前方地盤に塑性領域が生じる場合でも、リングカット工法の採用により塑性領域の広さが縮小する、あるいは発生しない場合が考えられる. このような場合にはリングカット工法の沈下抑制効果は十分期待できる.
4. リングカット工法は切羽を安定させるだけでなく、沈下抑制にも大きな効果を発揮出来る場合があることが認められた.

参考文献

- 1) 亀岡美友：山岳トンネルの調査，設計施工と施工結果，2010 トンネル技術研究発表会，pp. 1-5，2010.
- 2) 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.
- 3) 林 久資，長谷川昌弘，吉岡尚也：地山の強度定数がリングカット工法に及ぼす影響，トンネル工学報告集，第 17 巻，pp. 1-6，2007.
- 4) Hisatake, M., Ohno, S., Katayama, T., Ohmae, Y., and Sano, S.: Effects of the ring-cut excavation method on the restraint of displacements ahead of a tunnel face, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 547-554, 2009.
- 5) 久武勝保，大野司郎，片山達章，大前幸寛：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，トンネル工学論文集，第 16 巻，pp. 1-8，2007.
- 6) Hisatake, M., and Ohno, S. : Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 120-127, 2008.
- 7) 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.

EFFECTS OF THE RING-CUT EXCAVATION METHOD ON THE RESTRAINT OF THE GROUND SETTLEMENTS AHEAD OF A TUNNEL FACE

Masayasu HISATAKE, Shiro OHNO, Tatsuaki KATAYAMA,
Yukihiro OHMAE and Keisuke SUZUKI

Centrifugal model tests and three-dimensional elasto-plastic finite element analyses are conducted to clarify the effects of the ring-cut excavation method on the restraint of the ground settlements ahead of a tunnel face. Model tunnels are excavated under a centrifugal loading state by a robot, which is controlled by computer programs. The settlements measured in the ground ahead of the face are compared between two methods as the full-face excavation method and the ring-cut excavation method. The quantitative effects of the ring-cut excavation method are made clear by comparing the settlements between the two grounds with different strength. Three dimensional elasto-plastic finite element analysis is performed for the experiments, and a settlement-decreasing-effect of the core, which is produced by the ring-cut excavation method, is examined.