

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

Development of excavation robot for centrifugal model tests
and application of it to a tunnel with pipe roof supports

久武勝保¹・大野司郎²・佐野真介³・木村正樹⁴・鳥居 敏⁴

Masayasu Hisatake, Shiro Ohno, Shinsuku Sano, Masaki Kimura, Satoshi Torii

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

⁴正会員 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

E-mail: kimura-masaki@oyonet.oyo.co.jp

In order to make clear the quantitative effects of pipe roof supports on the decrease of the ground settlements caused by tunnel excavations, centrifugal model tests have been conducted. An excavation robot is newly developed and is applied to the model tests. The robot is three-dimensionally controlled by programs and can excavate the tunnel face in arbitrary shape. Effects of the difference between the excavation methods such as the full-face-excavation and the ring-cut-excavation on the ground displacements are discussed.

Key Words :three dimensions, excavation methods, settlement, pipe roof supports, robot,
ring cut excavation

1. はじめに

山岳トンネル工法は断面形状を容易に変更できると共にシールド工法に比べて経済的である等から、軟質で土かぶりの浅い都市部にも現在適用されつつある。本工法の施工では、周辺環境に有害な影響を与えないためや切羽周辺地盤の安定化のために、先受け工法を補助工法として採用する場合がある。軟質地盤における先受け工法採用時の地盤挙動については、数値解析^{1),2)}、重力場^{3), 4)}や遠心場⁵⁾での模型実験、及び現場計測^{1), 6) ~9)}による研究が行われている。しかし、挙動が3次元現象である点、及び地盤の非線形力学特性や施工手順の影響を受ける点などから、地盤変位を定量的に予測するのは容易でない現状にある。

先受け工法の効果を明らかにしようとする研究の

うち、遠心載荷模型実験は上記の3次元現象や非線形力学特性を考慮できる点などから、沈下量を定量的に予測する非常に有効な手段であると考えられる。しかし、実トンネルの切羽掘削過程を遠心模型実験で忠実に再現するという点については、これまで十分な技術開発がなされていない状況にある。すなわち、切羽掘削過程を表現する最も有効な方法は実際の掘削機械を模擬した模型掘削ロボットを開発し、これを実施工に対応させて適用することであるが、従来このような開発・適用は行われていない。したがって、掘削工法の違いによる先受け工法の沈下抑制効果の差異などについて、十分な知見は得られていない。

本研究は遠心模型実験に使用できる切羽掘削ロボットを開発することにより、先受け工法の一つであるパイプルーフ工法採否の各場合における砂質地盤

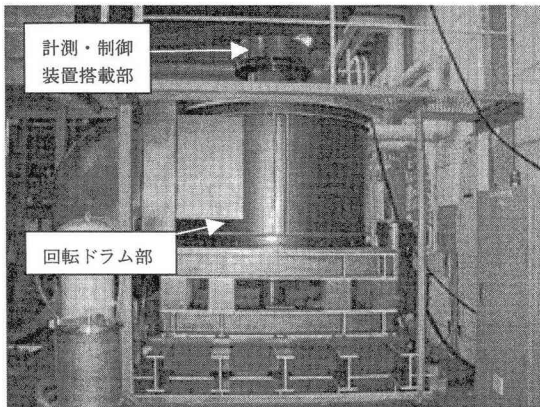


写真-1 ドラム型遠心装置全景

の変位特性について、掘削工法を変化させることによって定量的に明らかにすることを目的とする。ロボットはロードヘッダを模擬して作成されており、その動きはプログラムにより 3 次元的に自動制御される。したがって、リングカット工法や全断面掘削工法など種々の掘削工法の違いが地盤挙動にどのように影響するかを明らかにすることが可能である。

2. 実験システム

(1) ドラム型遠心载荷装置

実験に用いたドラム型遠心载荷装置を写真-1 に、またそのスペックを表-1 に示す。本装置は、中央部の回転ドラム部およびそれと連動する上部の計測・制御装置搭載部から構成されており、データ収集および内部機器の制御は外部のパソコンで無線通信により行うシステムとなっている。「ドラム型」の大きな特長は、形状特性により回転時の安定性が引き出されるとともに、ドラムの円周を巧みに利用することで多様な補助具を搭載できる利点が挙げられる。特に本研究のような複雑な実験システムであっても数多くの配線や補助具、計測器などをコンパクトに配置することができ、比較的 안전한実験システムを構築できる。

(2) 掘削ロボット

土槽内の模型地盤にトンネル施工を行う掘削ロボットの全景を写真-2 に示す。掘削ロボットは x, y, z の可動軸、掘削用回転シャフト (写真-3)、排砂システム (図-1) から構成されており、コンピュータの遠隔操作によってマニュアル運転およびプログラミング自動運転が可能である。したがって、掘削ロボットは任意の位置を三次元的に掘削することがで

表-1 温度管理式ドラム型遠心载荷装置

回転ドラム:	内径 $\phi 1200\text{mm}$ 高さ 400mm
最大回転数:	850rpm
最大加速度:	480G
最大積载荷重:	5000N (100g 時)
スリップリング:	AC100V 12 極
ロータリージョイント:	2 系統 (液圧, 空気圧の流入・排出)
操作装置:	2.4GHz 帯無線による遠隔操作
画像計測:	30 万画素 CMOS/CCD カメラ
内部照明:	光ファイバー照明システム

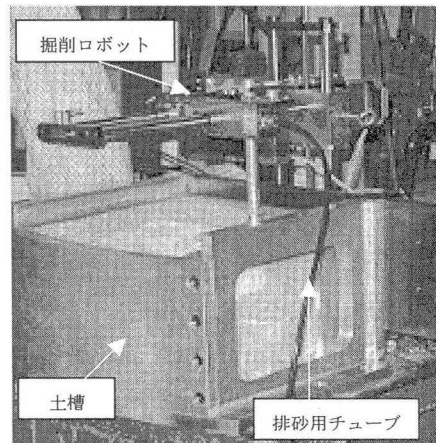


写真-2 掘削ロボットと土槽

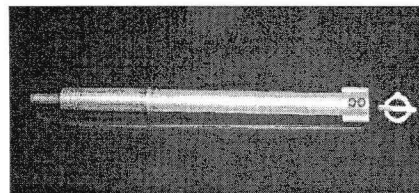


写真-3 掘削ビット 全景 (左) 先端部 (右)

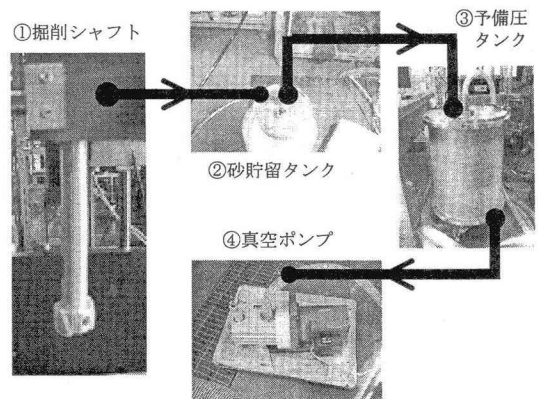


図-1 排砂システム

きる。掘削用シャフトは、写真-3に見られるように先端の掘削ビットが回転しながら地盤を掘削する。掘削ビットの外径は 18mm で、シャフトが中空になっており図-1 のような真空ポンプによる排砂システムと連結させることによって掘削土が排出される。

(3) 地盤の変位計測システム

本研究の実験システムでは、地盤の変位を計測するために、土粒子の移動を追跡する画像計測を行った。すなわち、トンネル軸を通る地盤縦断面内において、トンネルが掘削される地盤の上部粒子（図-5 参照）の動きを、硬質ガラスに装着したカメラにより測定する。写真-4 が画像計測するためのカメラを土槽内に設置した概況である。本カメラは 30 万画素 (640×480 pixel) の CMOS イメージセンサーであり、150 倍程度まで拡大可能である。写真-5 に示すような土粒子の観測結果を逐次画像データとして記録することにより、土粒子の平均的な移動距離を微小変位～崩壊に至る大変位まで緻密に追跡することが可能である。

(4) ドラム内の主要装置の設置状況

写真-6 は、(1)～(3)で述べてきたシステムおよびカウンターバランスをドラム内に設置した状況である。ここで、映像記録機器とチャンネルスイッチャーは、地盤の変位観測およびロボットの掘削状況観測を含めた計 7 個のカメラの映像を収録するための機器である。遠心載荷装置が稼働している際には、電波映像でその概況が把握できるものの、画像計測にはノイズの影響が大きいため、ドラム内部に映像記録機器を搭載している。

3. 実験条件

(1) 幾何条件

トンネルは水平な地表面下に掘削され、またトンネル軸を通る鉛直面で幾何学的に対称であるという条件を仮定している。したがって、半断面の地盤・トンネルについて実験を行った。写真-7に作成された模型地盤の概況を示す。また図-2に支保工の幾何寸法を示す。支保工は地盤や先受け工から受ける鉛直力を地盤になめらかに伝達する必要があることから、その下端は拡幅している。

写真-8に支保工とそれに取り付けられた先受け工を示す。先受け工は本対称実験では60°の範囲に7本打設されている。支保工の対称面に取り付けられている鉛直部材は支保工をトンネル横断面内に正確に設置するための補助部材であり、その下端は

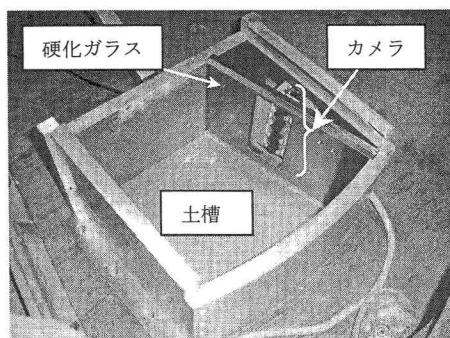


写真-4 地盤の変位計測カメラの設置状況

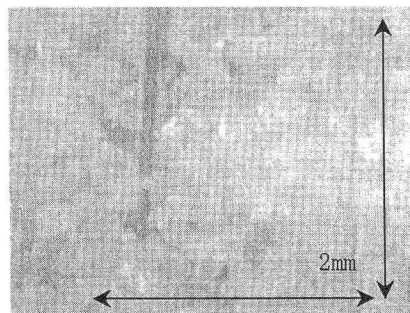


写真-5 変位計測カメラによる観測例

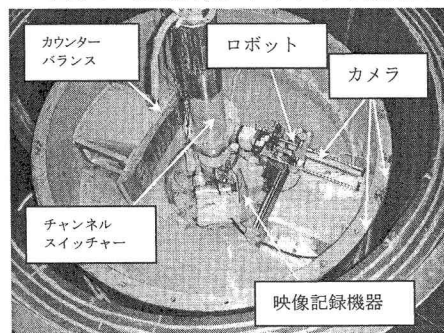


写真-6 ドラム内の主要装置の設置状況



(a) トンネル坑口部 (b) 地盤の締め固め状況 (c) 模型地盤
写真-7 模型地盤の概況

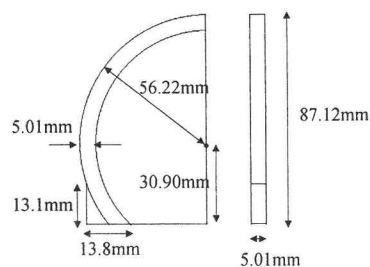


図-2 支保工の幾何寸法

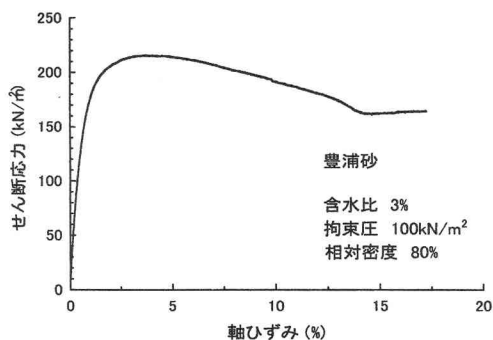


図-3 地盤材料の三軸圧縮試験結果

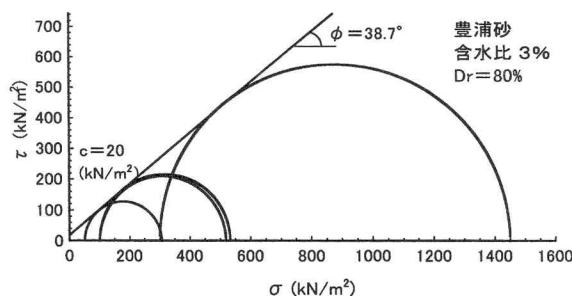


図-4 地盤材料の強度特性

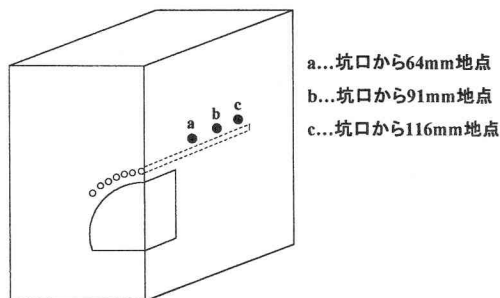


図-5 対称面における変位測定位置

実験中に地盤に接触しない長さになっている。先受け工の寸法は、直径6.25mm、全長125mm、また先受け工間の隙間は1.3mmである。地盤については深さ240mm、幅260mm、トンネル奥行き方向150mm、トンネルの土被りは125mmである。

(2) 地盤条件

使用地盤材料は豊浦砂（TK-159）であり、これを含水比 3.0%のもとで締め固め、相対密度 80%の供試地盤を作成する。地盤の三軸圧縮試験結果の一例を図-3 に、3 軸圧縮試験から求められた強度特性を図-4 に示す。粘着力と内部摩擦角はそれぞれ 20kPa、38.7° である。

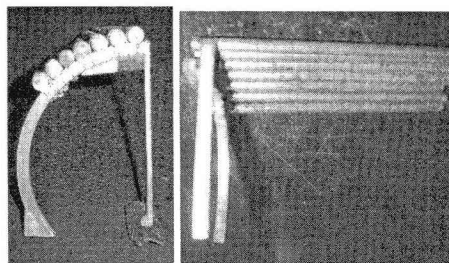


写真-8 支保工と先受け工

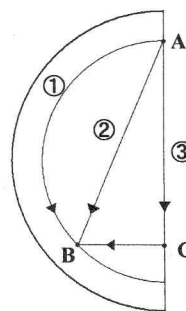


図-6 地盤の掘削順序

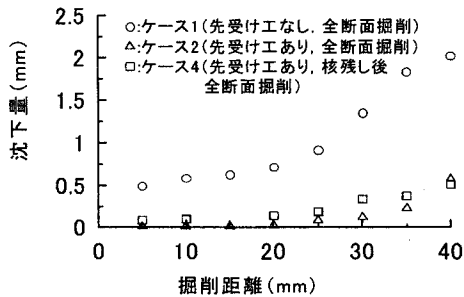
(3) 実験手順

実験手順としては、先受け工を支保工に取り付けそれを土槽内に設置した後に突き固めにより地盤を作成し、それを遠心実験装置内に設置する。次に、35g の遠心加速度のもとでロボットによりトンネルの自動掘削を行う。相似則からすれば高さ約 3m のトンネルに相当する。掘削中に図-5 に示す以下の a, b, c の 3 点において沈下量とトンネル軸方向水平変位量を測定する。すなわち、トンネル対称面の先受け工上端部から 7mm 上部で、坑口からトンネル奥行き 64mm (a 点), 91mm (b 点), 116mm (c 点) に位置する 3 点である。

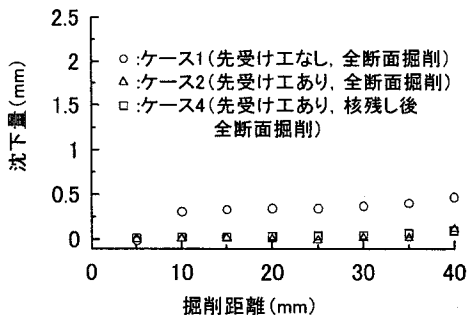
(4) 実験の種類

本実験の種類としては、先受け工のある場合とない場合、および全断面掘削の場合と核を残す場合（リングカット工法）を想定して、以下のような 4 ケースの実験を行った。

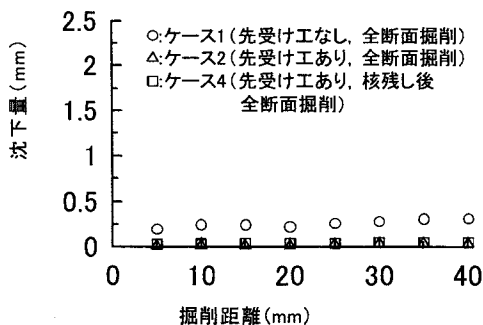
【ケース 1】先受け工がない場合について、坑口から全断面を掘削しながら切羽を前進させる。その際の掘削順序を図-6 に示す。すなわち、①では掘削機を A に移動させこの位置を奥行き 5mm 掘削した後、奥行き深さを一定にして B 方向に円弧状に掘削する。次に掘削機を手前に引



(a) 計測点 a (坑口から 64mm) での沈下量



(b) 計測点 b (坑口から 91mm) での沈下量



(c) 計測点 c (坑口から 116mm) での沈下量

図-7 先受け工の有無と掘削手順の違いによる沈下量の変化

いて地盤から一旦離しこれを再度 A の位置に移動させる。次に、②では、A 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。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①から③の掘削パターンを 8 回繰り返す、結局奥行き 5mm/回×8 回=40mm の地盤をトンネル形状に沿って掘削する。以上の掘削を以後、全断面掘削と称する。

【ケース 2】先受け工がある場合について、ケース 1 と同様の全断面掘削を行う。

【ケース 3】先受け工がある場合について、①の掘削を奥行き 5mm 刻みで 8 回行い、奥行き合計 40mm の掘削をリング状に行う。これは以後、核残し掘削と称する。

【ケース 4】先受け工がある場合について、ケース 3 の①の奥行き 40mm 掘削の後、②の掘削を①と同様に掘削奥行き 5mm 刻みで 8 回、奥行き合計 40mm 行う。その後、③の掘削を同様に掘削奥行き 5mm 刻みで 8 回、奥行き合計 40mm 行う。したがって、最終的にトンネル空洞が奥行き 40mm にわたって形成される。本ケースの掘削最終状態はケース 2 の全断面掘削時の掘削最終状態と同一であるが、両者は掘削手順が異なる。本ケースの掘削を以後、核残し後全断面掘削と称する。

4. 実験結果と考察

(1) 先受け工の有無と掘削手順の違いによる地盤変位

図-7(a) は先受け工の有無と掘削手順を変化させた場合における計測点 a の沈下量を示している。ケース 1 とケース 2 はいずれも全断面掘削されているので、両者の沈下量の差は先受け工の有無の差のみによって生じたといえる。この結果から先受け工の存在によって沈下量が 1/4 程度に抑えられる事が理解でき、先受け工の沈下抑制効果を定量的に確認することができる。また掘削距離が進むにしたがって、すなわち切羽が変位計測点に近づくにしたがって、両者の沈下量が非線形的に増加しているのがわかる。次に、ケース 2 とケース 4 の結果は、先受け工がある場合において、最終掘削状態は同一であるが、掘削手順のみが異なる場合の沈下量である。ここに、ケース 4 の掘削距離は以下の通りである。すなわち、図-6 の①と②を既に 40mm 掘削後、③を掘削している際の切羽の掘削距離である。掘削距離が 40mm に達するまでは、ケース 4 の沈下量はケース 2 の場合よりも多いが、これはケース 4 の方がケース 2 の方よりも既掘削量が多いことに起因している。掘削距離 40mm の最終状態においては、ケース 2 とケース 4 の沈下量にほとんど差の無いことが認められる。すなわち、本実験条件下での最終地盤変位は掘削手順に大きく影響されていない。このようになった理由としては、先受け工の存在により地盤の発生ひずみが小さくなり、地盤の非線形挙動が卓越しなかったためと思われる。

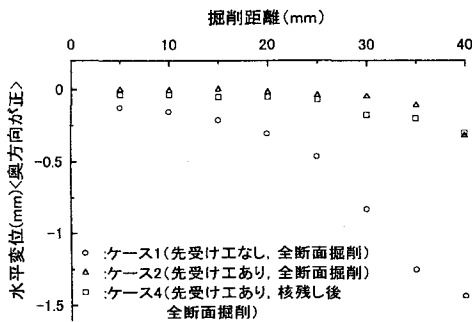
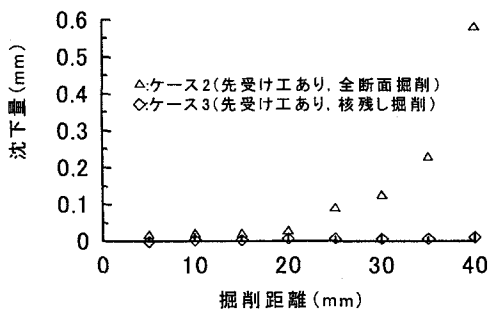
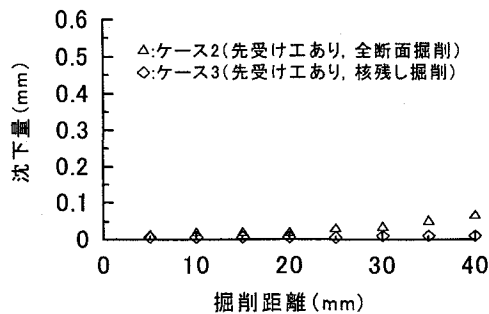


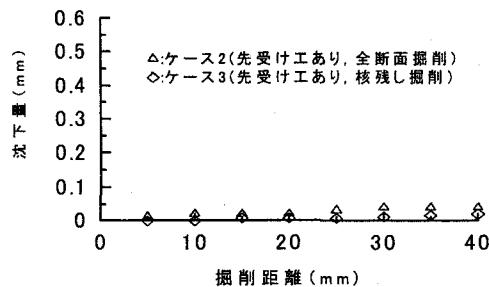
図-8 先受け工の有無と掘削手順の違いによるトンネル奥行き水平変位の変化



(a) 計測点 a (坑口から 64mm) での沈下量



(b) 計測点 b (坑口から 91mm) での沈下量



(c) 計測点 c (坑口から 116mm) での沈下量

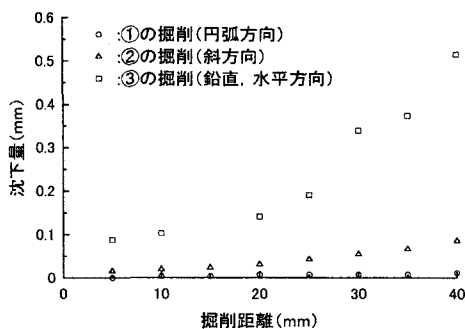
図-9 掘削工法の違いによる地盤沈下の変化

図-7(b)と(c)は計測点bとcにおける沈下量について、図-7(a)と同様の結果を示している。当然のことながら沈下量の絶対値は切羽と変位計測点との距離が離れている場合ほど小さい。またケース1とケース2の沈下傾向は図-7(a)の場合と類似している。ケース2とケース4における沈下量の差はほとんど無いといえる。

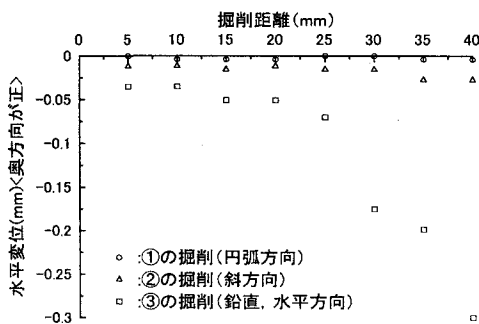
図-8は計測点aにおけるトンネル奥行き水平変位(奥方向を正)と掘削距離の関係を示している。掘削距離が増加するに従って計測点はトンネル側に引き寄せられる傾向を示しているが、水平変位の絶対量は図-7(a)の沈下量と比べて少ない。掘削距離40mmにおけるケース1とケース2の水平変位の比率は図-7(a)での沈下の比率と大きく異なっていない。すなわち、先受け工の存在により水平変位量も沈下量と同程度に抑制されることがわかる。掘削手順の異なるケース2とケース4の水平変位と掘削距離の関係については図-7(a)の傾向と同様である。また、最終掘削状態での水平変位量も掘削手順の影響を受けないことがわかる。

(2) 全断面掘削と核残し掘削における地盤変位の比較

図-9は先受け工がある場合について、掘削工法の違いが地盤沈下にどの程度影響するかを示したものである。図-9(a)はケース2(全断面掘削)とケース3(核残し掘削)の場合における計測点aの沈下量を示している。両者を比較すると、核残し掘削の場合は全断面掘削の場合に比較して極めて少ない沈下量しか発生していない。核残し掘削 R と全断面掘削 F におけるトンネル軸方向の掘削面積 f の比率 $f_R/f_F = 0.59$ に比べ両者の沈下 S の比率 $S_R/S_F = 0.02$ の方が非常に小さい。沈下量が少なくなった理由としては、切羽がリング状に掘削されるので、トンネル軸方向の掘削面積が全断面掘削時に比べて小さいこと、発生ひずみが小さく地盤の非線形挙動が卓越しなかったこと、および砂質地盤のような ϕ 材料特有のアーチアクションがトンネル縦断面方向を含む切羽周辺に形成されたこと、によるとと思われる。従来、トンネル周辺に形成されるアーチアクションについて研究¹⁰⁾されているが、核を残した場合とそれを取り除いた場合でアーチの形成に差の出る現象については明らかにされていない。このメカニズムの解明については今後の課題といえる。このようなリング状に切羽を掘削した後、残っている核を取り除くと(核残し後全断面掘削)、沈下量は図-7(a)に示すように、全断面掘削時のそれとほぼ同程度発生するので核の取り除きにより上記のアーチ効果は減少するも



(a) 沈下特性



(b) トンネル奥行き水平変位

図-10 掘削の進捗による変位増加特性(ケース4)

のと思われる。

図-9(b)と(c)は計測点bとcにおける沈下量について、図-9(a)と同様の結果を示している。図-9(a)と類似の傾向が見られるが、計測点が切羽から離れているほどケース2とケース3の沈下量は近づく傾向にある。

(3) 掘削の進捗による地盤変位の増加傾向

図-10は先受け工があるケース4の場合について、掘削の進捗にしたがって計測点aの地盤変位がどの程度増加するかを調べたものである。図-10(a)は掘削距離と地盤沈下の関係である。①の掘削、すなわち核が残っているリング状掘削の時点では極めて少ない沈下量が計測されているが、掘削領域が拡大した②の掘削においても相当大きな沈下抑制効果が認められる。その後③の掘削、すなわち核となる地盤が全く存在しない全断面が掘削された状況下での沈下量は②の掘削終了時に比べて数倍多い。このことから、小さな核の存在でも沈下抑制に相当効果のあることがわかる。図-10(b)は掘削距離とトンネル奥行き水平変位の関係であるが、図-10(a)とほぼ同様の傾向がうかがえる。

以上の結果からすると、砂質系地盤においては地盤をリング状に掘削し、核となる地盤を残した状態で支保工の建て込みや吹付け工を施工し、その後の核掘削時に発生するトンネル壁面変位を上記の支保で抑制する施工法は、先受け工施工時において大きな変位抑制効果を発揮するものと思われる。すなわち、従来切羽の安定を目的に採用されがちな核残し工法は変位抑制にも相当の効果が認められるといえる。今後は粘土系のc材料と砂質系のφ材料で核残し工法の変位抑制効果がどの程度異なるかについて定量的に究明する必要が認められる。

5. 結論

本研究で得られた成果の要点は以下のとおりである。

- 1) トンネルの施工手順を考慮できるロードヘッダを模擬したプログラム自動制御式トンネル模型掘削装置一式を開発した。
- 2) 本実験条件では、先受け工があればそれがない場合に比べて変位が 1/4 程度に抑制されることが認められた。
- 3) 最終掘削状態が同一であれば、地盤の沈下および水平変位の値は掘削手順に影響されないことを確認した。
- 4) 先受け工の存在する場合において、核残し掘削による地盤変位量は全断面掘削時に比べて非常に少ないことが認められた。
- 5) 掘削の進捗に伴う変位増加特性を調べた結果、小さな核の存在でも沈下抑制に相当効果のあることが判明した。

謝辞：本実験に協力された近畿大学理工学部・社会環境工学科 柳田俊一君、木村貴志君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 北川 隆, 佐原圭介, 後藤光理, 小西真治, 奥津一俊：低土被り・土砂トンネルにおける軽量鋼矢板付き鋼管先受け工の切羽安定効果の研究, トンネル工学論文集, 第 14 巻, pp. 61-70, 2004.
- 2) 久武勝保, 大野司郎, 木村正樹, 鳥居 敏, 伊賀上英伸：動的解析によるトンネル切羽の安定性評価, トンネル工学研究論文・報告集, 第 13 巻, pp. 501-506, 2003.
- 3) 足立紀尚, 木村 亮, 荒巻 智, 林 憲裕：ト

ンネル掘削による長尺先受け工法の補助効果に関する模型実験, 第 28 回土質工学研究発表会, pp. 2309-2312, 1993.

- 4) 小西真治, 大石敬司, 新井 泰, 吉川和行: 先受け工の施工範囲角度に関する三次元模型実験, 第 35 回土質工学研究発表会, pp. 2075-2076, 2000.
- 5) Kitamoto, Y., Date, Y., Yamamoto, T. and Hibiya, K.: Development of MGF method based on the evaluation of forepiling supporting mechanism, Proc. Int. Symp. Modern tunneling science and technology, pp. 183-188, 2001.
- 6) 佐々木良作, 高山 努, 塚田昌基, 木村正樹, 鳥居 敏: 鉄道直下の大断面トンネル施工時の計測管理, トンネル工学研究論文・報告集, 第 10 巻, pp. 131-136, 2000.
- 7) Volkmann, G: A contribution to the effect and behavior of pipe roof supports, Proc. EUROCK 2004, pp. 161-166, 2004.
- 8) 山本拓治, 北本幸義, 伊達健介, 岡本道孝: 中尺鋼管による先受け工法の適用結果, トンネル工学研究論文・報告集, 第 9 巻, pp. 167-172, 1999.
- 9) 渡辺浩平, 粕尾明弘, 森 直樹, 伊原広明, 安藤 拓, 山本和義: 蟹沢トンネル長尺先受け工区間の支保部材力, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp. 2075-2076, 2000.
- 10) 村山朔郎, 松岡 元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 187 号, pp. 95-108, 1971.