

施工過程を考慮したシールドトンネルの 遠心模型実験

野本 寿¹・三戸憲二²・今村眞一郎¹・上野勝利³・日下部 治⁴

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

²正会員 西松建設株式会社 土木設計部 (〒105 東京都港区虎ノ門1-20-10)

³正会員 工修 宇都宮大学助手 工学部建設学科 (〒321 栃木県宇都宮市石井町2753)

⁴正会員 Ph. D. 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) (〒724 広島県東広島市鏡山1-4-1)

シールドトンネル覆工に作用する土圧は、トンネル諸元、地盤条件等が同一であっても、掘削面での載荷あるいは除荷の応力状態や裏込め注入等の個々の施工状態により大きく変化する。このため、模型実験で信頼し得る土圧挙動を検討するためには、施工過程をできるだけ忠実に模擬することが必要となる。本研究では、高度なメカトロニクスおよび制御技術を取り入れた遠心力場で駆動するシールド模型を開発することにより、初期地盤応力状態や掘削、シールド推進およびテールボイド発生時の施工過程を考慮した実験による覆工土圧等の計測を試みた。

Key Words : shield, earth pressure, centrifuge model test, settlement, construction process

1. 序論

シールドトンネル覆工に作用する土圧（以下、覆工土圧）は、覆工と地盤の相互作用の問題であり、施工過程の影響を大きく受けることになる。すなわち、切羽に作用する土圧・水圧と切羽保持圧、掘削土量と排土量、テールボイド量と裏込め注入量、裏込め注入圧と周辺土圧の相対的大小関係により、覆工土圧が主働状態から受働状態の範囲に変化する。また、当然ながら、覆工の剛性も土圧の値に大きく影響する。

覆工の設計¹⁾では、経験等に基づき覆工土圧の算定法を定めているが、前述のとおり実施工での覆工土圧は施工過程の違いにより変化するため、模型実験や実測などにより土圧を計測し、設計の妥当性を確認することが必要と考えられる。

ここで、模型実験による覆工土圧に関する既往の研究について概観してみる。村山らは、粘性土および砂質土を対象に覆工土圧に関する研究を行っている。粘性土に関する研究²⁾では、応力緩和による覆工土圧の式をレオロジー理論から導き、砂質土に関する研究³⁾では、アルミ棒の積層体を用いた重力場小型模型の降下床実験を行い、砂層の移動領域を降下床とともに沈下する直接領域、間接領域および静

止領域の3つに区別し、降下量と降下床に作用する荷重の関係を導きだしている。

小野ら⁴⁾は、乾燥砂等の粒状体を対象に、種々の直径をもつゴムチューブ(径11.0, 15.3, 17.3cm)、ビニールチューブ(径15.0~27.0cm)およびゴムボール(30.0, 36.0cm)を空気圧で膨らませて埋設し、この圧を徐々に低下させゴムチューブ等が変形を始めるときの空気圧を覆工土圧とし、理論計算から得られるアーチ作用による覆工土圧(=アーチの軸方向の圧力に主働土圧係数を乗じた圧力)と測定値がほぼ一致することを確認している。

一方、力学的相似則を考慮して、トンネル分野においても遠心模型実験が開始されている。しかし、現在までの研究は、地中埋設管の覆工土圧および地盤の安定に関する研究が主体であり、シールドトンネルの覆工土圧を直接目的としたものは少ない。

砂質土中の埋設管の覆工土圧に関する研究で、James⁵⁾らは、土槽幅や土槽壁面の粗さ等の境界条件が結果に大きな影響を与えることや、管頂に作用する土圧がゴムバックを用いて荷重を作用させる従来型の重力場実験と比べて40%程度大きな値となることを指摘している。

東田ら⁶⁾は、実物の1/30を想定した二次元模型(径9.0cm)により、開削工法で埋設された剛な管には

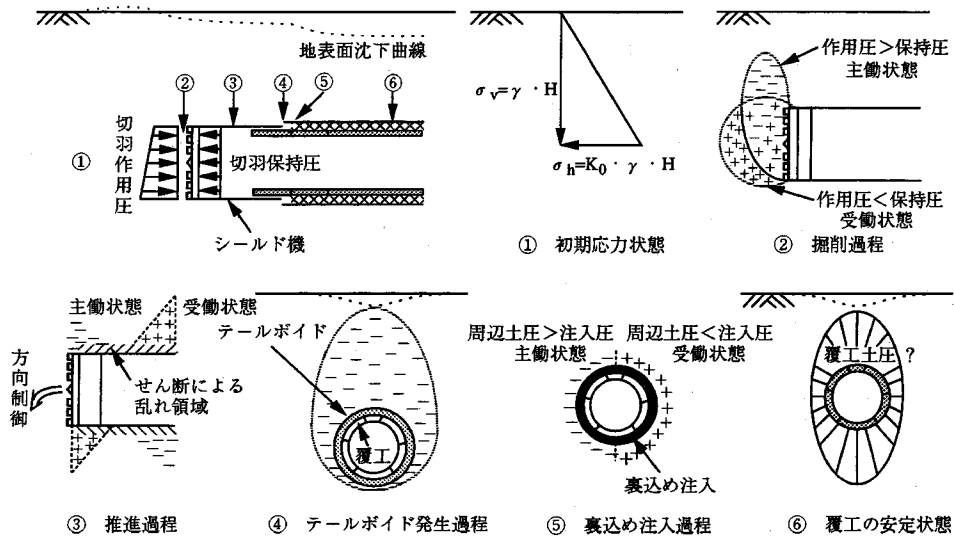


図-1 シールドトンネル・地盤内応力の変化概念図

矢板引抜き時に土圧の集中が発生することや埋設条件等の違いが覆工土圧に及ぼす影響について解明している。

Trottら⁷⁾は、柔な埋設管に関する実大実験（径100cmの鋼管）と遠心実験（縮尺1/15）との対比を行い、断面力の発生状況、最大耐荷力および破壊形状等が一致することを確認し、遠心実験の有効性を指摘している。

柔らかい粘性地盤におけるトンネルの掘削問題について、Mair⁸⁾は、素掘り状態の二次元模型および一部に覆工を設けた三次元模型を用い遠心実験を行い、土被り比および無覆工区間とトンネル径の比をパラメータに安定数(stability ratio)が3~9の間で変化することを得て、Bromsらによって示されている安定数6との違いを指摘している。また、the modeling of models として2種類の縮尺モデルによる実験を行い、遠心実験の有効性を示している。

テールボイド発生過程をシミュレートしようと試みた例として、真下ら⁹⁾は、あらかじめ設置したトンネル模型を覆ったカバーを引き抜くことでテールボイドの発生を模擬している。

このように、現状ではシールドトンネルの覆工土圧は模型実験の分野で十分な解明が進んでおらず、地盤の初期応力状態とシールドの施工過程を模擬した実験により、信頼し得る覆工土圧を把握することが課題となっている。

本研究は、このような課題を解決することを目的とし、掘削からテールボイド発生までの施工過程を模擬できるシールド遠心模型による土圧計測を行

い、施工過程等の条件が覆工土圧に及ぼす影響を把握することを試みたものである。

2. シールド施工過程とそのモデル化

(1)シールド施工過程と地盤内応力

砂質土地盤のシールド施工過程におけるトンネル周辺の地盤内応力の変化概念図を図-1に示す。

図中に示す①の状態は、シールド施工前の安定した地盤状態を示す。

②の状態は、シールド掘削過程を示し、切羽に作用する土圧・水圧と切羽保持圧および掘削土量と排土量の大小関係により、覆工土圧が主動状態から受働状態の範囲に変化する。一般に、解放型シールドでは除荷により主動状態に、密閉型シールドでは前述のバランス関係が比較的良好的に保持できることから静止状態付近で変化しているものと考えられる。

③の状態は、シールド推進過程を示し、シールド姿勢制御により主動状態域や受働状態域が発生したり、シールド推進により周辺にせん断による乱れ領域が発生する¹⁰⁾。

④の状態はテールボイド発生過程を示し、除荷により周辺が主動状態となる。

⑤の状態は裏込め注入過程を示し、テールボイド量と裏込め注入量および裏込め注入圧と周辺土圧の大小関係により主動状態から受働状態に変化する。裏込め注入技術の進歩した現在では、テールボイド発生と同時に裏込め注入を行う同時注入（半同時注入を含む）が一般に採用されているため④および⑤

の状態が同時に発生しているものと考えられる。

⑥の状態は様々な施工過程の影響を受け、最終的に覆工と地盤の相互作用が釣り合った状況を示す。

以上のように、シールドトンネルの覆工土圧は、施工過程の影響を反映したものとなる。

(2) シールド施工過程のモデル化

シールドトンネルの覆工土圧を遠心模型実験で評価する場合の課題には以下のものがある。

- ①地盤の初期応力状態の再現
- ②掘削から覆工安定までの施工過程の模擬
- ③テールボイド厚さ等現実に近い縮尺比の再現
- ④覆工重量等現実に近い応力レベルの再現
- ⑤トンネル外周の幾何条件および外力条件の再現

このため、後述する埋設管およびテールボイド実験から得られた知見と、図-2に示す実験システムの概念を基本に以下のモデル化を行うことにした。

- ①地盤の初期応力状態は、土槽内に覆工が存在しない状態で地盤作成を行うことで実現する。
- ②掘削および推進過程は、遠心場で駆動するシールド模型により初期応力状態にある地盤内を実際に掘進することで模擬する。
- ③テールボイド発生過程は、掘削および推進過程終了後、外管（以下、シールド管）を推進方向の逆方向に引き抜くことで模擬する。
- ④覆工部は、シールド管内側に設けた中管（以下、覆工管）で模擬することにし、この管に土圧計測器（以下、覆工土圧計）を設けておく。
- ⑤裏込め注入過程は、注入材の固化時間等、時間の相似性を解決する必要がある、次の課題とした。

3. 研究経緯

シールド施工過程のモデル化を遠心場で実現するには、高度なメカトロニクスと制御技術を必要とする。このため、表-1に示すように、シールド施工過程のモデル化技術を蓄積する目的から、施工過程とは逆のプロセスで実験を進めた。これらの実験のうち、宇都宮大学工学部所有の有効半径1.18mの遠心模型実験装置を使用して実施した埋設管実験、テールボイド実験およびシールド模型試作についての概要を述べる(表-2)。

(1) 埋設管実験(11)~(15)

先に述べたように、埋設管の覆工土圧は、覆工と地盤の相互作用の典型的な問題の一つであり、土圧の値およびその分布形状は管の剛性、表面粗さおよ

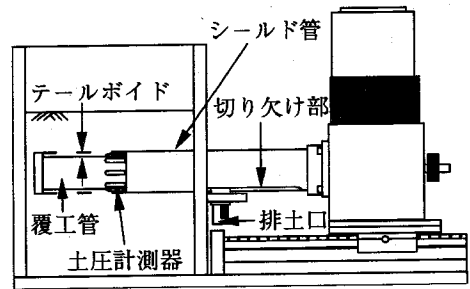


図-2 シールド模型実験概念図

び設置条件等によって変化する。このため、剛性や表面粗さの異なるトンネル模型を使用し、土被り比(C/D, C:土被り, D:シールド直径)をパラメータに乾燥豊浦砂中における覆工土圧および断面力の測定を行った。

しかし、埋設管実験では、覆工外周地盤の初期応力状態の再現や掘削・推進・テールボイド発生等の施工過程の模擬において、シールドトンネルの覆工土圧とは大きく異なると判断された。

(2) テールボイド実験(12)

シールドトンネルにおけるテールボイド発生過程を模擬し、覆工土圧の変化を把握する目的でテールボイド実験を行った。このモデルは、埋設管実験に用いた柔なアルミ製トンネル模型に厚さ0.2mmのゴム製バックを図-3のようにセットしたものである。実験方法は、所定のテールボイド($\delta=1.0, 2.0, 5.0\text{mm}$ の3ケース)になるようゴムバックの中を水で満たし100Gまで載荷を行い、その後、ソレノイドバルブを開きゴムバック中の水を放出し、地盤内に緩みを発生させその前後においてひずみの変化と地表面の沈下を計測するものである。

しかし、この実験ではテールボイド比($2\delta/D=2.4, 4.8, 11.2\%$)がプロトタイプの2~5%と比べて大きいケースがあること、水圧と周辺土圧の関係で均一なテールボイド厚を設定することが難しい等の欠点があった。また、埋設管実験と同様、地盤の初期応力状態の再現や掘削・推進の施工過程の模擬の問題についても解決できないままであった。

(3) シールド模型試作(16), (17)

埋設管およびテールボイド実験の課題を解決するため、図-2に示す実験システムの概念を基本にシールド模型(1号機)の試作を繰り返した。

この模型は図-4に示すとおり、シールド管、覆工管、排土管の3重管から構成される。この実験では

表-1 研究経緯

	第1ステップ 埋設管実験	第2ステップ テールボイド実験	第3ステップ シールド模型試作	第4ステップ シールド実験 (2号機)
実験期間	S.63.4~H.1.3	H.1.3~H.2.3	H.2.4~H.5.8	H.5.9~H.6.9
実験場所	宇都宮大学	宇都宮大学	宇都宮大学	中央大学
遠心加速度 (G)	10~100	10~100	25	25
管径 (mm)	80	80	50	100
管の剛性と材料	柔 (アクリル, アルミ, 真鍮)	柔 (アクリル)	柔 (アクリル)	剛 (ステンレス)
覆工土圧計測	歪みゲージ (柔) 2方向ロードセル (剛)	歪みゲージ	歪みゲージ	1方向ロードセル
地盤材料と作成法	気乾豊浦砂, 空中落下法	気乾豊浦砂, 空中落下法	気乾豊浦砂, 空中落下法	気乾豊浦砂, 空中落下法
施工過程の表現	?	?	○	○
掘削・推進	×	×	○	○
テールボイド	×	○	○	○
覆工安定	○	○	○	○
テールボイド比 (%) (プロトタイプ2~5%)	—	2.4~11.1	20.0	4.0

遠心模型実験装置の諸元上からくる下記の制約条件から、基本システムの開発に重点をおき覆工土圧の定量的な評価は2号機以後の課題とした。

①シールド管径が5.0cmと制限されたため、テールボイド比が20%と、テールボイド実験より更になくなったこと。

②3重管部模型を地盤作成の段階で土槽に80mm突出せざるを得ず、地盤の初期応力状態に影響を与えている可能性が高いこと。

③土槽寸法(200×200×290mm)が小さいため、境界条件が作用土圧に影響を与える可能性があること。

この実験では、土被り1D(=5.0cm)、25Gまでのシステムの稼働が確認されたが、より高い遠心場で実験を行うには駆動モーターの能力アップや排土管径の拡大等、より大型のシールド模型が必要となったことが明らかになった。

4. シールド模型システム

今回開発したシールド模型(2号機)について改良点、構造、計測および操作方法等を述べる。

なお、この実験では、中央大学理工学部の半径3.3mの遠心実験装置を使用した(表-2)。

(1)改良点

1号機から得られた知見をもとに2号機に加えた主な改良点を以下に示す(図-5)。

①シールド管を100mm、覆工管を96mmに拡大することにより、テールボイド比を4%に縮小した。

②土槽内への3重管部の突出を10mmに押さえ、初期地盤の応力状態の再現に努力した。

表-2 遠心模型実験装置

	宇都宮大学	中央大学
回転アーム半径 (m)	1.18	3.30
最大遠心加速度 (G)	120	150
最大搭載質量 (kg)	150	1000
許容最大容量 (ton・G)	15	100
最大搭載寸法 (mm)	280×950×290	800×1140×800
動力源	電動モーター	油圧モーター
スリップリング (極)	20	60

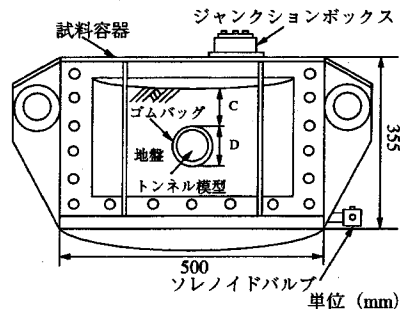


図-3 テールボイド実験図

③土槽寸法(240×700×700mm)を上げ、壁面摩擦などの境界条件が覆工土圧に影響を与えないよう配慮した。

④掘削土の排出口を3重管後端とすることでシールド管底部の切り欠き部を無くし、テールボイド厚を全周均一とした。

⑤覆工土圧計測用ロードセルを取付けた覆工管は、掘進時はシールド管で支持された構造、テールボイド発生時は徐々にこの支持が外され、テールボイド量相当あらゆる方向に拘束無く動く構造とすることで、覆工管と地盤の接触を自由にした。

⑥シールド推力および掘削トルク等の計測管理システムを設けることで、実験可能範囲の正確な把握を可能にした。

⑦2号機ではシールド施工過程を模擬した実験は勿論のこと、埋設管実験およびテールボイド実験も単独で行えるようにした。

(2)構造

構造は図-5に示すように、土槽部とシールド部に大別される。シールド部は更にシールドトンネル構造をモデル化した3重管部と駆動部に分けられる。

土槽部はジュラルミン製とし軽量化を図った。シールド縦断方向寸法は、土槽部、3重管および駆動部等の長さの合計に制約があるため、当システムでは240mmとなった。また、設計条件は、土被り厚4D、100Gの条件に耐え得る強度とした。

シールド管はD=100mm、t=2mmのステンレス管とした。覆工管は図-6に示すように、土圧計測用一方向ロードセル（以下、覆工土圧計）8個が取り付けられている。この覆工部をモデル化した $l=150$ mm部分の重量は17.2N(15.9kN/m²)であり、掘削土砂重量(15.3kN/m²)とはほぼ等しいものとなっている。

動力源は掘削用モーターと推進用モーターの2つが必要で、前者はトンネル軸線と平行な3重管支持架台上に、後者はトンネル軸と平行に支持架台下部に配置した(表-3)。なお、移動体となる掘削用モーターおよび3重管支持架台等の重量は、リニアモーションガイドがセットされているスライドレールに伝達するように計画し、推進時の摩擦抵抗を低減する工夫をした。

(3)計測

実験での計測工は図-7に示すように、覆工土圧、地表面変位、地中土圧および掘削管理の4項目とした。これらの計測工は、シールド模型の操作と同様シーケンサにより制御し、計測データはデータロガーに収録するよう設計した。

覆工土圧計測では比較的剛な覆工に作用する土圧を想定し一方向ロードセルによる測定を計画した。覆工土圧計の受圧面の寸法は10mm×42mm、レンジは4.9×10²kN/m²で、覆工に沿った曲率を有するとともに、外周の隙間に砂粒子の流入防止のためのシリコンゴムを充填した。また、シールド管引き抜き時に接触による偏荷重が作用することを避けるため、覆工管に3つの摺動用リング(MCナイロン製)を配置し、0.2mmのクリアランスを設けた(図-6)。

なお、計測は、シールド模型稼働時から実験終了

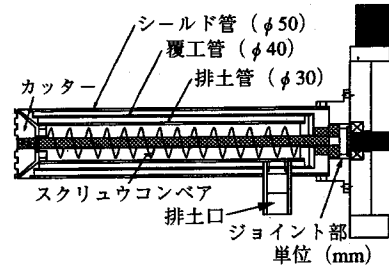


図-4 3重管構造図

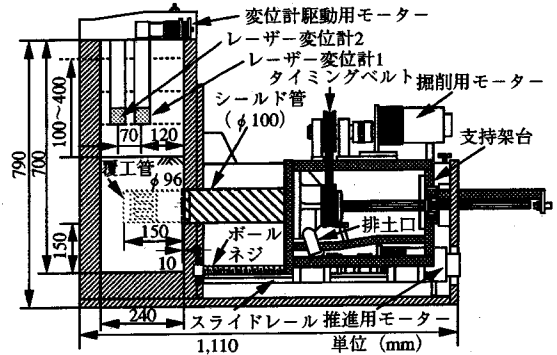


図-5 シールド模型(2号機)断面図

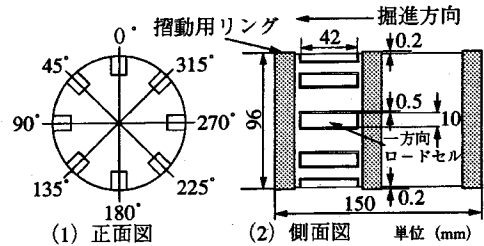


図-6 覆工管図

まで任意の間隔で行うことができる。

地表面変位計測では、2台のレーザー測距計(表-4)による測定を計画した。この測距計は、土槽上部のトンネル横断方向に設けたガイドレール上をモーター駆動により移動する。計測は、所定の遠心場における実験前後のトンネル横断方向の2断面移動測定および実験中のトンネル軸線上の2点定位置測定とした(図-5)。この計測では、横断方向の測点と計測間隔を任意に設定することができる。したがって、シールド施工に伴う横断方向地表面沈下形状およびシールド進行に伴う縦断方向の経時的な地表面沈下形状を計測することができる。

地中土圧計測の目的は、シールド施工過程での地中土圧の変化、すなわち、シールド推力の影響、テールボイド発生時の地中土圧の変化を把握すること

にある。なお、地中土圧計測用土圧計（以下、地中土圧計）はレンジ0.98,1.96,2.94MN/m²(各φ30mm)のものを用意した。

掘削管理計測の目的は、シールド模型の正常な運転を確保することであり、カッター回転数、推進速度、カッタートルク、推力等の掘削管理データを計測する。これらのデータから、掘削条件と模型能力の関係を把握し、実験可能な遠心場の限界を推定することができる。

(4)制御方法

シールド模型の起動は所定の遠心場に達した後、スリップリングを介し遠隔操作により行われる。その後一連のシールド施工過程の操作は、人為的なミスを排除し、実験の再現性を確保する目的でシーケンサにより自動的に制御される。なお、カッター回転数および推進速度の組み合わせは、掘削土量と排土量の関係で切羽の安定に直接関係するため、重力場実験および遠心予備実験により適切な数値を求め、シーケンサに設定する。

(5)土圧計検定

土圧計は一般に、土による検定線と水圧又は集中荷重による検定線の勾配が一致しないこと、また、土による検定では密度等の状態によって検定線が異なることが知られている(18), 19)。

このため、実験と同様な遠心場で検定を行うことが最良の方法となるため、実験に先立ち200×400×600mmの土槽で土質、相対密度、設置深さ等を合わせた状態で20Gをベースに100Gまで20G毎に載荷・除荷を繰り返して検定を行った。覆工土圧計および地中土圧計の代表的検定結果を図-8に示す。

この結果、覆工土圧計については今回の実験のように載荷・除荷の履歴が発生しないことを条件に、信頼し得る計測範囲として200kN/m²までの検定線を得ることができた。

一方、地中土圧計は、載荷・除荷の履歴を受けると予測されるため、土による検定線が直線性を保つ範囲で計測することが必要となる。検定の結果、0.98,1.96,2.94MN/m²レンジの土圧計は、容量の1/10以下の応力レベルであればヒステリシスが少ないことが確認されたため、この範囲を使用範囲とした。

5. 遠心模型実験

2号機で実施した埋設管、テールボイドおよびシールド実験(各3回)について、シールド実験の中

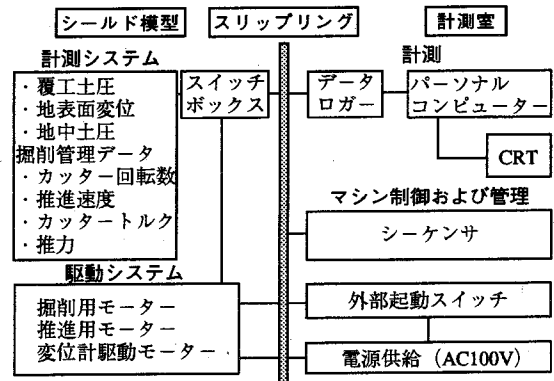


図-7 計測システム計画図

表-3 駆動用ACサーボモーター仕様

	掘削用	推進用
定格出力 (W)	120	180
定格回転数 (rpm)	3000	3000
定格トルク (N・m)	0.4	0.6
電圧 (V)	100	100
減速比	100, 200	100, 200
速度制御指令	直流電圧制御	直流電圧制御

表-4 レーザー測距計仕様

	変位計1, 2 共通
製作会社	(株) キーエンス
型式	LB-60
計測方式	レーザー測距
光源	半導体レーザー (波長780nm)
基準距離 (mm)	100
計測範囲 (mm)	基準距離±40
分解能 (mm)	0.01

心に各計測結果を述べる。実験条件は、遠心加速度25G、土被り1D、掘進および引き抜き速度15mm/min、掘削回転数11rpmであり、プロトタイプで直径2.5mのシールドに相当する。なお、地盤は、各実験とも気乾豊浦砂を用い、空中落下法でDr=70%程度(φ'MAX=42°)となるよう作成した。

(1)覆工土圧計測結果

覆工土圧計測結果を図-9に示す。計測値が200kN/m²を超えたものについては、土圧計検定で得られた検定線を用いて算出しているが、各実験での再現性は良いと判断できる。

埋設管実験の覆工土圧は、ほぼ左右対称な分布をしており、管頂(0°)および管底(180°)で応力が集中している。土被り圧で基準化した場合、管頂に作用する土圧の値は1.3~1.5の範囲に、管側面(90°, 270°)

では0.2~0.5の範囲に分布し、3. 研究経緯の埋設管実験結果を再確認するものとなっている。

テールボイド実験の覆工土圧は、ほぼ左右対称な分布をしているが、管下部では、埋設管実験と異なり135°, 225°の位置に応力が集中している。

この理由は、シールド管の引き抜き速度に比べ砂の変位速度が速いため、引き抜き完了前に、135°, 225°付近で覆工管を支持する形を取るためと考えられる。したがって、覆工管をフレキシブルな構造としているにも関わらず、管底での土圧がほとんど作用しない状態となっている。また、土被り圧で基準化した場合、管頂に作用する土圧の値は、2.1~2.2の範囲に、管側面では0.2~0.3の範囲に分布する。管頂での値が高くなった理由は、テールボイド発生による両サイドの地盤変位量の増大による管頂付近への応力集中が生じたことにある。

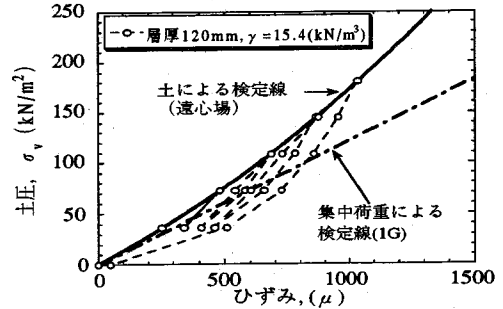
シールド実験の覆工土圧は、土被り圧で基準化した場合、管頂で1.2~1.6の範囲に、管側面で0.1~0.5の範囲に分布しており、上部半断面についてはテールボイド実験と近似した分布となっている。しかし、下部半断面については、左右対称な分布とならず、225°の位置での応力集中が目立つ結果となっている。この原因の解明は今後の課題であるが、後述する地中土圧計測結果で明らかになるように、今回の実験条件では、シールド推力の影響がトンネル周辺に及び受働域が発生しており、このことが原因の1つと考えられる。また、掘削機構のカッター回転方向(0°~180°で下向き, 180°~360°で上向き)の影響による左右断面での排土量の不均衡発生によるシールド蛇行や局所的な受働域の発生も原因として推定される。

以上、覆工土圧は、各実験でその分布形状が異なり、地盤の初期応力状態や施工過程の違いによる影響を受けていることが確認できた。

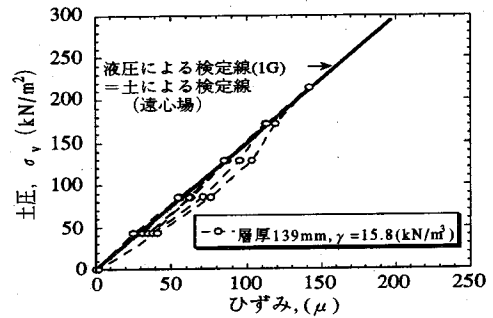
(2)地中土圧計測結果

シールド実験(3回目)での地中土圧計配置図および計測結果を図-10, 11に示す。なお、文章中の()の数値は、土圧計設置位置の鉛直土被り圧で基準化した値であり、図-11のK, K_p は応力比 σ_H/σ_v 、受働土圧係数($\phi'=42^\circ$)の値である。

図-11(a)を見ると、地中土圧計No.1は、シールド推進時のシールド前方の水平土圧の変化を見るために設置したものである。水平土圧は、初期状態で約32kN/m²(0.33)を示し、掘進開始と共に上昇を始め推進距離-0.5D付近で最大値約137kN/m²(1.44)となり、その後、徐々に下降し掘進完了時で約100kN/m²

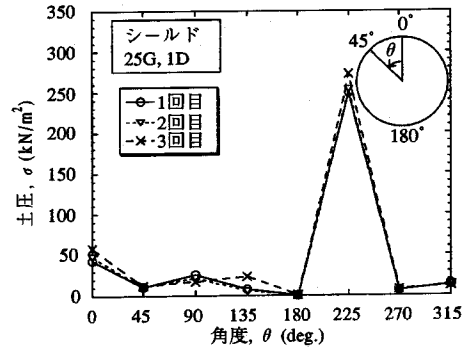


(a) 覆工土圧計 (180°)

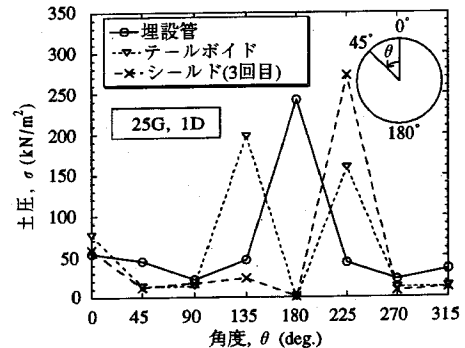


(b) 地中土圧計 (レンジ2.94MN/m²)

図-8 土圧計検定結果



(a) 実験の再現性



(b) 施工過程別の比較

図-9 覆工土圧計測結果

(1.05)となる。テールボイド発生過程に入ると、瞬時に $32.7\text{kN/m}^2(0.34)$ 程度低下するが、その後はほとんど変化せず約 $74.4\text{kN/m}^2(0.78)$ で安定する。

図-11(b)を見ると、地中土圧計No.2-1,2は、シールド側方の水平土圧の変化を見るため、シールドから1D(100mm)離して設置したものである。水平土圧は初期状態で約 $23.3\sim 25.3\text{kN/m}^2(0.41\sim 0.44)$ を示し、掘進開始と共に上昇を始め、計測点通過時に最大時約 $60.4\text{kN/m}^2(1.06)$ となり、その後、徐々に下降し、掘進完了時で約 $44.3\text{kN/m}^2(0.78)$ となる。テールボイド発生過程では掘進終了時の値を保ったまま一定値を示すが、初期状態と比べて約 $17.1\text{kN/m}^2(0.30)$ 程度高い残留応力が認められる。

図-11(c)を見ると、地中土圧計No.3-1,2は、シールド側部下方 60° 方向の鉛直方向土圧の変化を見るために設置したものである。鉛直土圧は、初期状態で $104\sim 116\text{kN/m}^2(0.87\sim 0.99)$ を示し、掘進過程ではNo.2同様な挙動となり、計測点通過時に最大値 $123\text{kN/m}^2(1.06)$ となる。テールボイド発生過程では掘進終了時と比べ $7.7\sim 7.8\text{kN/m}^2(0.08)$ 程度の低下を見せるものの、覆工安定時にはほぼ初期値に戻る。

以上の結果は、前方および水平方向に残留応力を発生させていることから、切羽保持力の影響が周辺地盤に及んでいることを示しているが、1D下方ではシールド通過の影響は残らない。この残留応力の程度は、実験条件によっても異なると考えられるため、パラメトリックな実験により確認する必要がある。

(3)地表面沈下計測結果

シールド実験(3回目)での土槽中央部における横断方向および定点地表面沈下計測結果を図-12, 13に示す。

図-12には、掘進終了後およびテールボイド発生過程終了後の地表面沈下曲線を示すとともに、シールド中央部沈下量をもとにPeck²⁰⁾によって示された沈下曲線を対比させている。計測結果はPeckの沈下曲線とはほぼ一致しており、当モデルの施工過程の模擬方法が適当であることを示している。

また、図-13は、土槽中央部において、定点観測した結果をシールド掘進およびテールボイド発生と併せて縦断方向地表面沈下図として示したものである。この結果は、過去に示されている地表面沈下に関する沈下モデル曲線²¹⁾とも良く一致している。

(4)掘削管理計測結果

シールド実験(3回目)でのカッタートルクおよび推

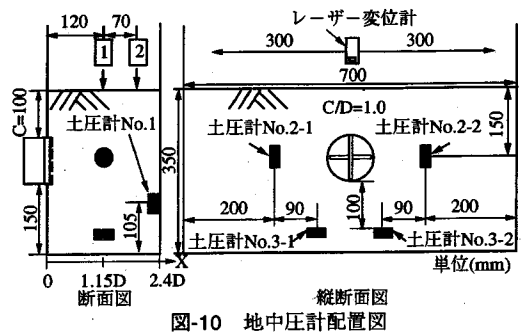


図-10 地中土圧計配置図

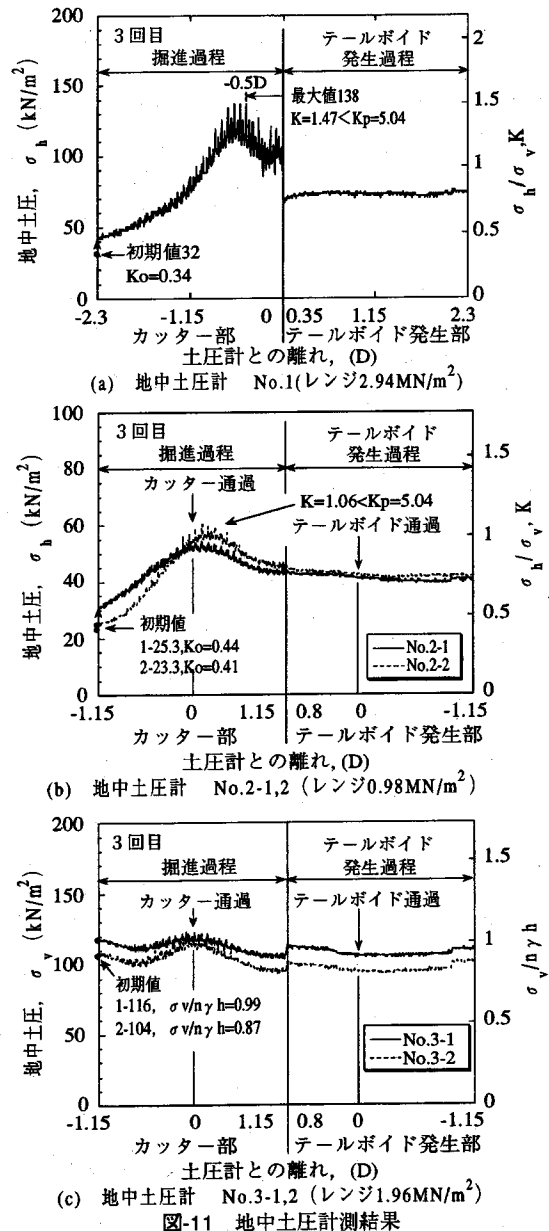


図-11 地中土圧計測結果

力計測結果図を図-14, 15に示す。これらの値は、負荷変動により変化する駆動用モーターの電流値から負荷トルクを算定し、モーターの出力軸でのカッタートルク、推力を計算したものである。

当シールド模型では、掘削モーターがカッター回転および排土用スクリーコンベア回転の駆動源となっており、理論上は排土管全長に掘削土が貯まった状態でトルクが最大値となり、その後は一定値で推移することになる。実測値を見ると、掘進開始後から11.0N・m程度の比較的大きな幅で変動しながら、徐々に上昇を続け、掘進終了時には設備能力の約70%の40.0N・mに達しており、掘削と排土の微妙なバランス関係を推察させるものとなっている。

推力に関しては、推進用モーターが切羽保持力とシールド管推進抵抗力を受け持っており理論上は推進距離の延長とともに推力が上昇することになる。実測値を見ると、0.5~1.0kNの変動を示すものの掘進過程で設備能力の約6.7%の3.0kN程度、テールボイド発生過程で1.0kN程度とほぼ一定の値となっている。したがって、管周辺摩擦による抵抗力が掘進過程とテールボイド発生過程で等しいと仮定すると、両過程の推力の差が切羽面での抵抗力、すなわち切羽保持力に相当するものと考えられる。

6. 結論

本研究で確認できた要点は以下の通りである。

- ①高度なメカトロニクスと制御技術を取り入れることにより、掘削、推進およびテールボイド発生過程を模擬できるシールド模型を開発することができた。また、シーケンサによる自動制御方法は、人為的な操作による変動を防止し、実験の再現性確保に有効であることが示された。
- ②シールドトンネルの覆工土圧は、上部半断面についてはテールボイド実験と近似した分布を示すが、下部半断面については左右対称とならず、地盤作成時における管周辺の初期地盤応力状態および施工過程の違いによる影響を受けていることが確認された。
- ③横断および縦断方向の地表面沈下形状は、Peckらによって示された沈下曲線や施工実績ともよく一致しており、乾燥砂を用いた実験で地表面の地盤変状を模擬できることが確認された。
- ④掘削トルクおよび推力の掘削管理データは、実験の可能範囲を判定するのに有効であり、今回の実験条件では掘削モーターが設備能力の約70%、推進モーターが約7%に達していることが確認された。

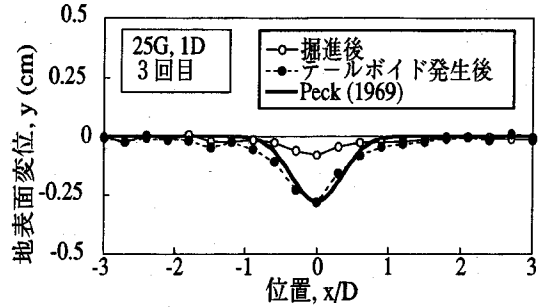


図-12 地表面計測結果 (横断方向)

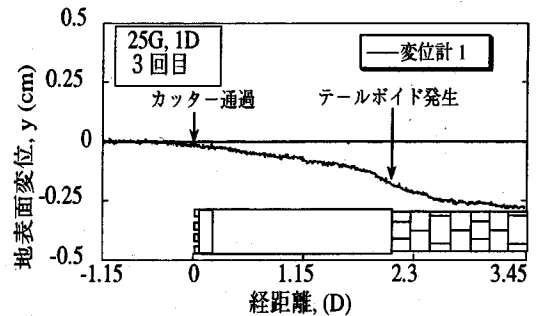


図-13 地表面計測結果 (中央部定点)

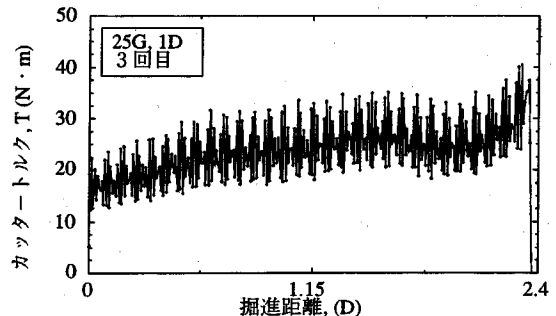


図-14 カッタートルク図

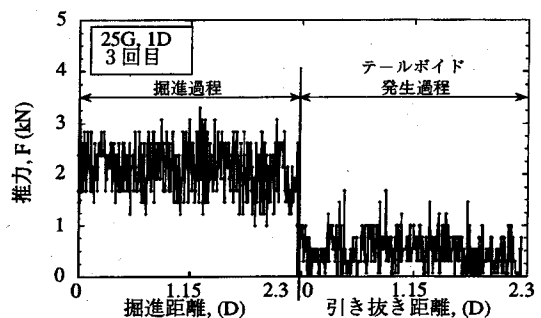


図-15 推力図

なお、今後は遠心加速度や土被り等の条件を変化させたパラメトリックな実験を行い、実験条件の違いによる覆土工圧の定量的な研究を進めていく。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重な御助言ならびに御指導を頂いた中央大学理工学部 藤井齊昭教授、群馬大学工学部 萩原敏行博士、西松建設株式会社 藤井利侑氏および模型設計に御協力頂いた伊藤均氏に対し心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 国際トンネル協会編、日本トンネル技術協会訳：各国トンネル構造設計モデルに関する調査報告 I, 1981.
- 2) 村山朔郎, 松岡 元：粘性土の応力緩和によるトンネル土圧, 土木学会論文集, 第168号, pp.37-43, 1969.
- 3) 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, 土木学会論文集, 第187号, pp.95-108, 1971.
- 4) 小野一良, 山田幹雄：乾燥砂中のトンネル周辺に生じるアーチ作用の研究, 土木学会論文集, 第339号, pp.137-146, 1983.
- 5) James, R.G. and Larsen, H.: Centrifugal Model Tests of Buried Rigid Pipes, *Proc. of 9th ICSMFE, Vol.1*, pp.567-570, 1977.
- 6) 東田 淳, 三笠正人：開削工法で埋設された剛性管に働く土圧-矢板引抜き時の土圧集中-, 土と基礎, Vol.32, No.12, pp.15-22, 1984.
- 7) Trott, J. J., Taylor, R.N. and Symons, I.F.: Tests to Validate Centrifuge Modelling of Flexible Pipes, *Proc. of Symposium on the Application of Modelling to Geotechnical Design*, pp. 226-254, 1984.
- 8) Mair, R. J.: Centrifugal Testing of Model Tunnels in Soft Clay, *Ph. D thesis*, Cambridge University, 1979.
- 9) 真下英人, 井手統一, 水谷敏則：粘性地盤におけるシールドトンネルの作用荷重に関する実験的研究, 土木学会第44回年次学術講演会, III, pp.108-109, 1989.
- 10) 森 麟, 赤木寛一, 小野昌俊：シールドトンネル掘削の際の応力解放に伴う圧密沈下の解析, 土木学会第34回年次学術講演会, III, pp. 525-526, 1989.
- 11) 萩原敏行, 日下部 治, 野本 寿, 三戸憲二：乾燥砂中の剛な埋設管に作用する土圧測定を試み, 土木学会第44回年次学術講演会, III, pp.936-937, 1989.
- 12) 仲松宇大, 野本 寿, 萩原敏行, 日下部 治：遠心模型実験による乾燥砂中の柔なトンネル模型の断面力の測定, 第25回土質工学研究発表会, pp.1735-1738, 1990.
- 13) 三戸憲二, 野本 寿, 萩原敏行, 日下部 治：遠心模型実験による乾燥砂中の剛なトンネル型に作用する土圧の測定, 第25回土質工学研究発表会, pp.1739-1742, 1990.
- 14) 中富俊彦, 萩原敏行, 野本 寿, 三戸憲二：乾燥砂中の剛なトンネル模型に作用する土圧の遠心模型実験-表面粗度及び土被り厚の影響-, 第26回土質工学研究発表会, pp.1793-1794, 1991.
- 15) Kusakabe, O., Hagiwara, T., Nomoto, T., Mito K. and Nakamatsu, U.: Experimental Evaluation of Earth Pressure and Lining Stresses of Tunnels in Sand, *Proceeding of International Congress on Tunnel and Underground Works, Today and Future*, pp.529-536, 1990.
- 16) 野本 寿, 日下部治, 萩原敏行, 三戸憲二：遠心模型用小型シールドマシンの試作, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.56-57, 1991.
- 17) Nomoto, T., Mito, K., Imamura, S., Ueno, K. and Kusakabe, O.: A Miniature Shield Tunneling Machine in a Centrifuge, *Proc. of the International Conference Centrifuge '94*, pp.699-704, 1994.
- 18) 市原松平：土圧計の検定と作動, 材料, 第22巻, 第2 38号, pp.608-613, 1973.
- 19) 松澤 弘, 森富雄, 田中義章：低圧小型土圧計に関する研究, 土質工学会論文報告集, Vol.2.2, No.2, pp.103~112, 1982.
- 20) Peck, R.B.: Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground, *State-of-the-Art Volume, 7th ICSMFE, Mexico city*, pp.225-290, 1969.
- 21) 山田孝治, 吉田 保, 間片博之, 橋本定雄：沖積地盤にけるシールド推進に伴う地盤変状とその解析について, 土木学会論文集, 第373号, pp.103-112, 1986.

(1994. 9. 30 受付)

CENTRIFUGE MODELING OF SHIELD TUNNEL CONSTRUCTION PROCESSES

Toshi NOMOTO, Kenji MITO, Shinichiro IMAMURA, Katsutoshi UENO
and Osamu KUSAKABE

Earth pressures acting on lining of a shield tunnel considerably vary with construction processes such as stress conditions around excavation face and grouting conditions. Precise simulation of the construction process is of essence to examine the pressure development around the lining in a model test. This paper describes the development of a miniature shield machine introduced by high mechatronics and control technology which can operate under high centrifugal accelerations, simulating the detailed construction processes of shield advancing and tail void formation. The initial set of data demonstrates the significant influence of the construction processes on the final stress distribution around the lining.