

遠心場における施工機械設計法 の検討とその妥当性

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)

土質基礎工学分野の遠心模型実験では、実施工挙動の解明に向けて、施工機械および施工過程をモデル化した模型装置が必要となる場合が多い。近年の機械加工や制御技術を含む高度なメカトロニクスの発達は、この種の模型装置の製作を可能にしつつあるが、これらの周辺技術はあくまでも重力場を基本としたものであり、遠心場における機械設計法の確立が課題となっている。本研究は、シールドトンネルの覆工土圧問題を対象に、施工機械および施工過程のモデル化を目的として開発した装置を用いた実験を行い、実験結果の再現性の確認や実施工データとの対比によるモデル化の妥当性を証明することによって、遠心場における施工機械の設計法を検証したものである。

Key Words :centrifuge model test, design method, modeling, construction process, construction machinery and equipment

1. はじめに

遠心実験は、1930年代土質基礎分野に初めて適用されたが¹⁾、応力レベルそのものが材料の自重によって支配される土の力学的特性を小型縮尺模型実験で表現できる方法として、積極的に採用されるようになってきている。当初は、土の自重が支配的な圧密問題²⁾や粘土斜面安定問題³⁾等比較的小型で静的な一次元又は二次元の実験が試みられた。その後、計測計器の開発が著しく進んだことや数値解析法の発展に伴い実験結果との対比が容易になったことなどから、杭基礎、擁壁、アンカー及び掘削問題等の広い分野で実験が行われるようになった。特に近年では、大型の載荷装置が開発され modeling of models の問題を取り扱うことが可能になるとともに、内容も液状化など地震時の挙動を取り入れた動的な実験⁴⁾、掘削ロボットを用いた山留め壁の主働崩壊実験⁵⁾、送泥シリンダー装置を組み込んだ泥水掘削壁の安定実験⁶⁾および杭の打設実験⁷⁾等、施工機械や施工過程をモデル化した二次元又は三次元の実験が行われるようになっている。

このような複雑な問題を取り扱うことが可能になった理由としては、土圧・水圧計等計測計器の発達、施工機械等のモデル化を可能にする機械加工精

度の向上、駆動用モーターの小型化および施工過程を操作するシーケンサー等の制御技術の発達を挙げることができる。更には、これらの技術革新が実験の可能領域を拡大することにもつながっている。

しかし、遠心実験で施工機械および施工過程のモデル化等の複雑な問題を取り扱うためには、載荷装置の容量等の制約内での実験の実現を可能にするとともに、遠心場におけるモーター等の駆動源や機械装置の設計法を明確にすることが重要である。

本研究は、シールドトンネルの覆工土圧問題を対象に遠心場における施工機械及び施工過程のモデル化についての機械設計法を提案するとともに、土圧、地盤変位およびモーター負荷等の計測結果を基に設計法の妥当性について検討したものである。

2. 施工機械を含む遠心実験とその問題点

構造物と地盤の相互作用のようにやや複雑な問題を取り扱う場合には、施工機械を組み込んだ模型装置が用いられることがあり、以下に述べる実験の各構成要素について検討が必要となる。

(1)地盤

模型実験では、地盤に関して以下の3点に注意を払う必要がある。

1つは、材料の選択である。地盤工学分野で着目する主な現象は、応力・ひずみ・時間特性であり、実地盤と模型地盤の挙動が相似しなければならない。このため、構成要素（例えば、砂粒子の大きさ）の縮尺は必ずしも必須ではなく、地盤の力学的相似性の成立を考慮して選択する必要がある。

次は、境界条件である。模型地盤は、載荷装置の制約から一定の土槽内に作成されるので、水平、鉛直方向に無限と考えられる実地盤と境界条件の違いが生じる。このため、目的とする計測値が、境界条件の影響を受けないことを確認する必要がある。

他の1つは、初期条件である。実地盤は、長い間様々な応力履歴を経て形成されたもので、模型地盤で初期隙比、有効応力状態およびボンド構造などを完全に一致させることは難しい。

このため、模型地盤は、材料および境界条件を含め実地盤を単純化・理想化したものであることを認識する必要がある。

(2)機械的因素

機械的因素として考慮しなければならない問題点は大きく2つある。

1つは、縮小に関連して発生する問題である。載荷装置には、各々搭載可能な寸法、質量および許容最大容量等が決められているため、当然のことながら、この制約内で模型装置を製作しなければならない。これは、模型の製作精度と装置構成要素の強度の問題につながる。すなわち、 $1/n$ の縮尺の模型を用い遠心実験を行う場合、理論的には製作精度をn倍に高める必要があること、またこの模型に重力のn倍の力を作用させることになり、部材によっては縮尺した寸法にもかかわらず重力場模型実験とは比較にならない大きな荷重が作用することなどである。したがって、許容応力度はもとより、たわみ等の変形についても十分なチェックが必要となる。

他の1つは、力の伝達に関するものである。施工機械を組み込んだ模型装置には、駆動源と伝達機構が存在することになり、遠心場においてはこの2つの装置の作動が問題となる。一般に、モーター等の駆動源は、重力場における作動を基本として設計製作されており、この種の機械を遠心場で使用する場合には、遠心場における性能およびベアリング破損の危険性などを確認しなければならない。また、伝達機構における摩擦抵抗は、駆動源の出力を決定す

る重要な要素となるため、極力摩擦抵抗を減らすための措置（例えば、スライドレールの採用）、仕上げ面の加工精度の向上および部材のたわみ量の制限といった点についての配慮が必要となる。

(3)施工過程のモデル化

掘削問題等を扱う場合には、地盤の挙動を正確に表現し得る範囲で、施工過程のモデル化を行わなければならない。これは、(1)地盤で述べたことと共に共通したことであるが、施工機械について縮尺を完全に一致させることや施工過程を忠実に再現することが模型製作上不可能なことを認識した上で、どの施工過程が地盤の挙動に対し支配的であるかを見極めたモデル化が必要であることを意味する。

更に、モデル化に当たっては、前述の機械的因素の問題点を考慮し施工過程を遂行するためのメカニズムを構成すること、これらのメカニズムを駆動させるための制御方法を確立することが必要となる。

(4)計算式の構築とその確認

施工機械を組み込んだ模型設計では、駆動源容量を決めるための計算式が必要となる。この計算式は、大きく分けて機械単独の摩擦損失による項と地盤との接触で生じるエネルギー損失による項で構成される。これらの各項は、重力場で明らかにされている実験式や経験式を外挿することが可能であるが、反面施工機械の縮尺に伴い発生する機構上のトラブル（土砂輸送機構での閉塞、砂粒子の破碎等）でのエネルギー損失を見込むことは不可能に近い。このため、この設計法に基づき製作された模型を遠心場で駆動させるためには、地盤材料が存在しない空地盤実験や負荷の軽い実地盤実験から実験を進めること、同時に駆動源の負荷を知るための計測システムを設け予測値と実際の出力を常に対比させることが必要となる。

3. 模型の設計

シールドトンネル遠心模型を対象に、施工機械を組み込んだ模型の設計フローを図-1に示す。以下、模型設計上のポイントについて述べる。

(1)目的および対象現象の分析

本装置は、シールドトンネル覆工に作用する土圧を計測することを目的としたものである。シールドトンネルの施工に伴う諸問題を整理したものを図-2

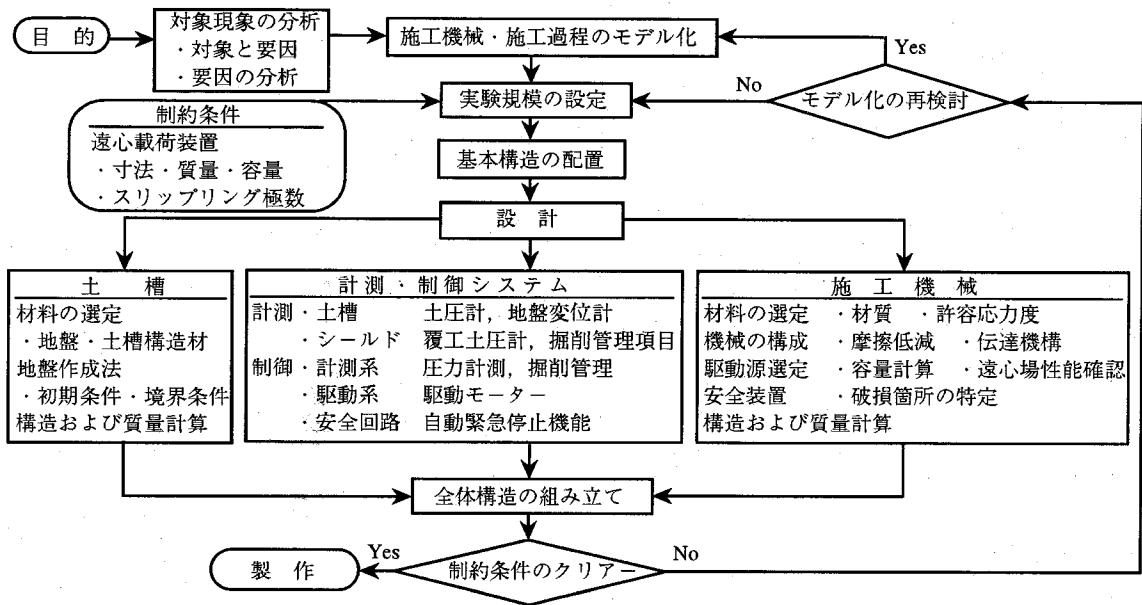


図-1 施工機械を含む模型の設計フロー

に示すが、この図から明らかなように覆工土圧は単に構造物と地盤の相互作用であるばかりでなく、施工過程の影響を受ける複雑な問題であることが判る。このため模型実験で土圧を計測する場合には、以下に述べるモデル化が必要となる。

(2)施工機械および施工過程のモデル化

本研究では、施工機械（シールド）と掘削からテールボイド発生までの施工過程を図-3に示す3重管構造の駆動模型を考案することで解決を図った。

3重管は、外管がシールド機、中管が覆工（セグメント）管、内管が排土機構を表現しており、中管には覆工土圧計が、内管内部には排土用スクリューが設置されている。

掘削過程はスクリューコンベア先端に設けたカッターで地盤を切削することで、推進過程はスクリューコンベアで後方へ排土を行なながら3重管全体を推進用モーターで前進させることで表現する。

実施工でのテールボイドは、シールド機の推進に伴いシールド後方の地盤中に覆工が露出することによって発生するが、模型でこの過程を忠実に表現することは難しい。例えば、シールド機と覆工を一体化し前進させることで表現するとすれば、覆工も地盤中を前進することになり周辺地山の乱れを必要以上に発生させ、対象現象と異った表現となる。このため、所定の掘削・推進過程が終了した後、外管を推進方

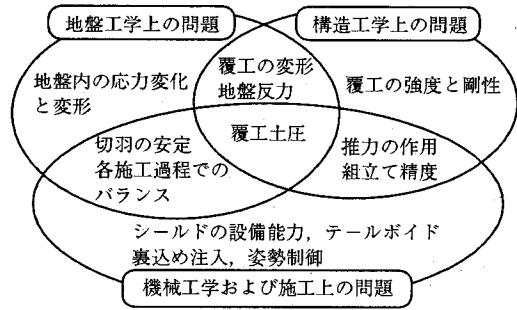


図-2 シールドトンネルの施工に伴う諸問題

向とは反対側へ引き抜き、覆工管を移動させることなくテールボイド発生過程を模擬することにした。このとき、推進方向の違いによるシールド周辺のせん断による乱れが実施工と異なることになるが、地盤材料に気乾豊浦砂を用いることで、その影響を少なくすることにした。この理由は、砂地盤での地盤内応力の変化は推進過程よりテールボイド発生過程の方が支配的であることによる。したがって、掘進時に3重管が一体となって駆動していたものが、テールボイド発生時には中管および内管を地盤中に残して、外管のみが後退することになる。

(3)構造

今回開発した模型は、中央大学所有の載荷装置（許容最大容量981kN）に搭載し実験を行った。

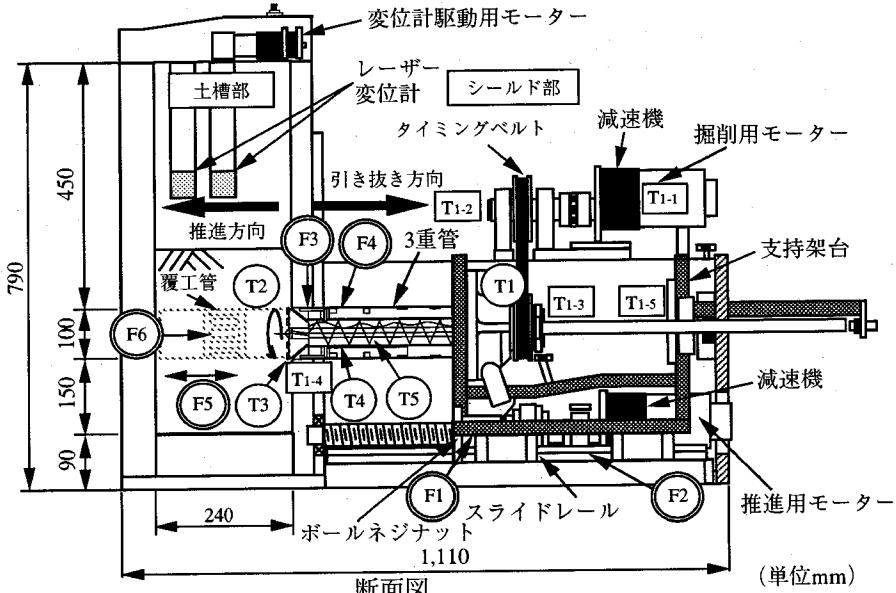


図-3 シールド模型の推力およびトルク発生箇所

構造は、図-3に示すとおり、土槽部とシールド部に大別される。シールド部は更に3重管部と駆動装置部に分けられる。駆動源としては、掘削用および推進用モーターの2つが装備されており、それぞれ支持架台の上部及び下部に配置されている。

(4)地盤

使用材料は、水理条件を除いた単純な地盤を考え、気乾豊浦砂を使用する。土槽寸法は、掘進方向×横断方向×鉛直方向で $240 \times 700 \times 700$ mmとし、横断方向でシールド側方に各々3D（D：シールド径）、鉛直方向でシールド下方に1.5Dを確保し、境界条件の影響が覆工土圧に及ばないようにした。また、地盤の初期条件に関しては、相対密度に大きな違いがないよう空中落下法による地盤作成方法を採用した。

(5)推進用モーターの容量計算

推進用モーターの負荷は、図-3に示す位置で発生し、表-1に示す予測式で表すことができる。

a)機械的な摩擦損失

機械構成要素間の接触で生じるF₁～F₄の損失は、模型の空地盤実験（3重管支持のための地盤は土槽内に存在する）で確認できる。

①F₁…推力伝達部にある予圧ナット部で生じる加速度に左右されない損失。経験的に予圧荷重（1,422.5N）の0.3倍から1.0倍の間で変動すると予測。

②F₂…スライドレール上を駆動装置本体（質量m₂×加速度a）が移動するとき生じる摩擦損失。

③F₃…土槽坑口部で生じる摩擦損失。坑口部に作用する3重管重量（m₃×a）と摩擦係数を乗じたもの。

④F₄…外管引き抜き時に外管と中管の間に設けた摺動リングで生じる摩擦損失。外管に作用する中管と内管の重量（m₄×a）と摩擦係数を乗じたもの。

この他、掘進時には、F₃、F₄（後述するF₅、F₆も含む）を反力をとした摺動抵抗力が、スライドレール上に生じるが、損失エネルギーとしては小さいため無視する。以上から、推進過程では、推進距離の増加に伴い駆動装置本体と土槽坑口部に分かれて作用する3重管重量が減少するため、予測線は減少勾配となる。また、テールボイド発生（引き抜き）過程ではF₄の摩擦損失が加わり推進過程より高い予測となるが、外管に作用する中管等の重量は過程の進行に伴い減少するため、予測線は推進過程同様減少勾配となる。したがって、空地盤実験での予測値は、F₁の変動を考慮し、図-4の予測線（最大、最小）で示される。

b)地盤との接触による摩擦損失

地盤と機械の接触で生じるF₅、F₆の損失⁸⁾は、実地盤実験で加わるものである。

⑤F₅…外管外周部と地盤の接触で生じる損失。外周部に作用する全土圧に摩擦係数を乗じたもので、地盤中の外管長さと土圧に比例する。予測に用いる土

表-1 推力・トルク計算式一覧表

種別	各 推 力 単位 (N)	種別	各 ト ル ク 単位 (N·m)
機 摩 械 擦 的 損 な 失	$F_{1\min}=426.7, F_{1\max}=1,422.5$ $F_2=\mu_2 \times m_2 \times a$ $F_3=\mu_3 \times m_3 \times a$ $F_4=\mu_4 \times m_4 \times a$	機 摩 械 擦 的 損 な 失	$T_{1\cdot1}=n_1 \times m_{1\cdot1} \times \mu_1 \times r_1 \times a$ $T_{1\cdot2}=n_2 \times r_2 \times \mu_1 \times (m_{1\cdot2} \times a + \frac{P}{n_2})$ $T_{1\cdot3}= n_3 \times r_3 \times \mu_1 (m_{1\cdot3} \times a - \frac{P}{n_3}) $ $T_{1\cdot4}=n_4 \times m_{1\cdot4} \times \mu_1 \times r_4 \times a$ $T_{1\cdot5}=n_5 \times m_{1\cdot5} \times \mu_1 \times r_5 \times a$
地 摩 盤 擦 と 損 の 失	$F_5=\mu_5 \times \pi \times D \times \ell \times p_e$ (但し、土被り2D未満の場合) $F_{6\min}=\frac{\pi}{4} \times D^2 \times p_e \times (1-\sin \phi')$ $F_{6\max}=\frac{\pi}{4} \times D^2 \times p_e$	地 摩 盤 擦 と 損 の 失	$T_{2\min}=\pi \times \frac{2}{3} R^3 \times \mu_5 \times p_e \times (1-\sin \phi') \times 2$ $T_{2\max}=\pi \times \frac{2}{3} R^3 \times \mu_5 \times p_e \times 2$ $T_3=\pi \times 2R^2 \times \mu_5 \times \ell_c \times p_e$ (但し、土被り2D未満の場合) $T_4=\frac{\ell_p}{2\pi} \times M \times \mu_5 \times a$ $T_5=\frac{3}{8} \times D_s \times M \times \mu_5 \times a$
総 推 力	空地盤 $F_{\text{空}\min}=F_{1\min}+F_2+F_3+F_4$ $F_{\text{空}\max}=F_{1\max}+F_2+F_3+F_4$ 実地盤 $F_{\text{実}\min}=F_{\text{空}\min}+F_5+F_{6\min}$ $F_{\text{実}\max}=F_{\text{空}\max}+F_5+F_{6\max}$	総 ト ル ク	空運転 $T_{\text{空}}=T_{1\cdot1}+T_{1\cdot2}+T_{1\cdot3}+T_{1\cdot4}+T_{1\cdot5}$ 実地盤 $T_{\text{実}\min}=T_1+T_{2\min}+T_3+T_4+T_5$ $T_{\text{実}\max}=T_1+T_{2\max}+T_3+T_4+T_5$

ここに、

 μ : 摩擦係数 ($\mu_1=0.01, \mu_2=0.003, \mu_3=0.200$
 $\mu_4=0.300, \mu_5=0.300$) m : 各機械要素の質量(kg) (但し, $m_2 \sim m_4$ は推進距離と施工過程により変化, $m_{1\cdot1}=0.28, m_{1\cdot2}=1.20, m_{1\cdot3}=3.78, m_{1\cdot4}=0.80, m_{1\cdot5}=2.00$) ℓ : 土槽中のシールド機推進距離(cm) D : シールド外径 (=10.00cm) p_e : シールド中心までの鉛直有効土圧 (kN/m²) ϕ' : 砂の内部摩擦角 (°) n : 軸受け部支持数 ($n_1=n_2=2, n_3=n_4=n_5=1$) r : 軸受け部半径(cm) ($r_1=0.85, r_2=1.6, r_3=3.5, r_4=3.3, r_5=2.85$) R : カッター半径 (=5.00cm) C : カッターフレーム幅 (=5.00cm) M : コンペア内の砂の質量 (=0.15kg) ℓ_p : スクリューコンペアピッチ (=3.45cm) D_s : スクリューコンペア直径 (=4.30cm) P : ベルト張力 (=588.6N) a : 加速度 (m/s²)

圧は、土被り2D未満の条件でシールド中心位置、土被り2D以上の条件で深さ2.5D(一定)の鉛直方向有効土圧とした。

② F_6 …切羽面に作用する推進抵抗。切羽作用水平土圧に断面積を乗じたもので、引き抜き時には考慮しない。土圧は、施工条件(主に掘削量と排土量のバランスで決まる)により大きく変化する。予測に用いる土圧は、シールド中心位置の鉛直方向有効土圧に、最小予測で $K=1-\sin \phi'$ (静止土圧係数)を最大予測で $K=1.0$ を乗じたものとした。以上から、 F_5 の予測線は推進過程で増加勾配に、引き抜き過程で減少勾配となり、 F_6 の予測線は推進過程で最大、最小予測があるものの一定の値であることが判る。したがって、実地盤実験での予測値は、 $F_1 \sim F_6$ を合計したものとなり、図-5の予測線(最大、最小)で示される。

(6) 掘削用モーターの容量計算

掘削用モーターの負荷は、図-3に示す位置で発生し、表-1に示す予測式で表すことができる。

a) 機械的な損失トルク

機械構成要素間の接触で生じる損失(T_1)は、模型の空地盤実験で確認できるもので、以下の主な損失トルクの合計である。基本式は、軸受け部に作用する重量×摩擦係数×軸受け部半径で表される。

① $T_{1\cdot1}$ …モーターベアリング部(2箇所)での損失

② $T_{1\cdot2}$ …ブリード部(2箇所)におけるベルト張力とブリード自重による損失

③ $T_{1\cdot3}$ …スライド支持部(1箇所)におけるベルト張力と自重による損失。ただし、ベルト張力がマイナスとして働くため、自重による項との差し引き(絶対値)となる。

④ $T_{1\cdot4}$ …カッタースタッフ支持部(1箇所)における損失

⑤ $T_{1\cdot5}$ …テールシャフト支持部(1箇所)における損失

この他、実地盤実験ではコンペア内の砂の重量($M \times a$)の一部がカッタースタッフに伝達し、機械的な損失トルクが生じるが、支持部に作用する重量($m_{1\cdot4} \times a$)に比べて十分小さいため、予測では無視することにした。したがって、空地盤実験での加

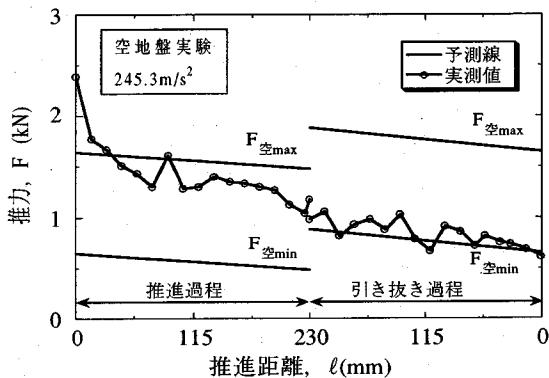


図-4 空地盤推進用モーター負荷

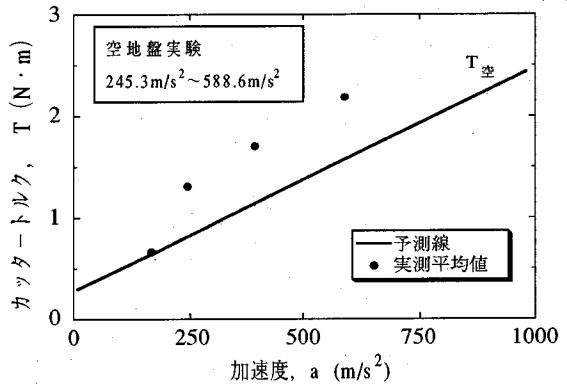


図-6 空地盤掘削用モーター負荷

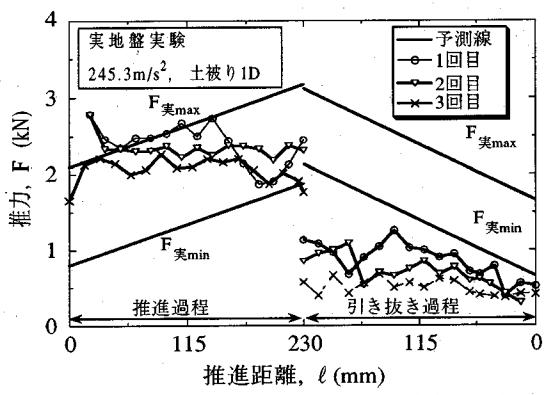


図-5 実地盤推進用モーター負荷

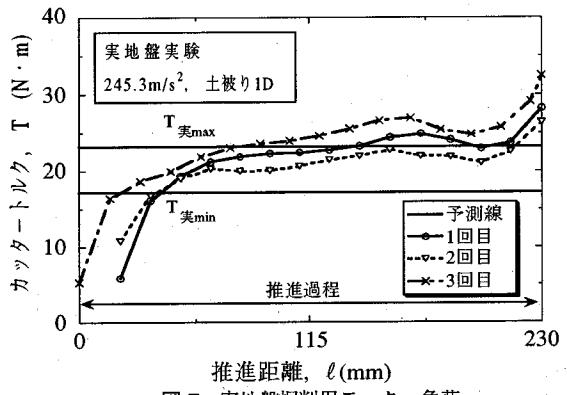


図-7 実地盤掘削用モーター負荷

速度レベルとカッタートルク予測値の関係は、加速度が支配的なものとなり、図-6の予測線で示される。

b)地盤との接触による損失トルク

地盤と機械の接触で生じる $T_2 \sim T_5$ の損失は、実地盤実験で加わるものである。

① T_2 …地盤とカッター面板との接触で生じる摩擦損失トルク。切羽作用水平土圧×面板面積× $2/3$ ・カッター半径×摩擦係数で表される。当模型では、切羽前面とチャンバー内面の2箇所で、この損失が生じると考え予測する。また、予測に用いる土圧は F_6 と同じとする。

② T_3 …地盤とカッター外周部との接触で生じる摩擦損失トルク。シールド中心位置鉛直方向有効土圧×外周長×外周幅×カッター幅×摩擦係数で表される。当模型では、外周幅は切羽前面からチャンバー内面最後端までの長さと考え予測する。また、予測に用いる土圧は、 F_5 と同じとする。

③ T_4 …掘削土の輸送で生じる摩擦損失トルク。コンベア内掘削土重量×摩擦係数×スクリューピッチに

表-2 25G負荷予測とモーター容量

モーター種別	推進用モーター	掘削用モーター
最大負荷予測値	3.18 kN	23.2 N·m
予想モーター出力	43.9 kN	38.8 N·m
モーター詳細仕様		
定格仕事率 (W)	180	120
定格回転数 (rpm)	3000	3000
定格トルク (N·m)	0.6	0.4
電圧 (V)	100	100
減速比	1/100	1/200
減速機効率	0.66	0.66
機械効率	0.90	0.75

比例する。なお、スクリューコンベア長は、シールド刃先から排出口までとした。

④ T_5 …掘削土とスクリュー羽根表面で生じる摩擦損失トルク⁹⁾。式は基本的に T_2 と同じである。

なお、 T_4 と T_5 の予測は、コンベア内に砂が入っているものと算出しているため、推進距離によらず一定となる。したがって、実地盤実験での予測値

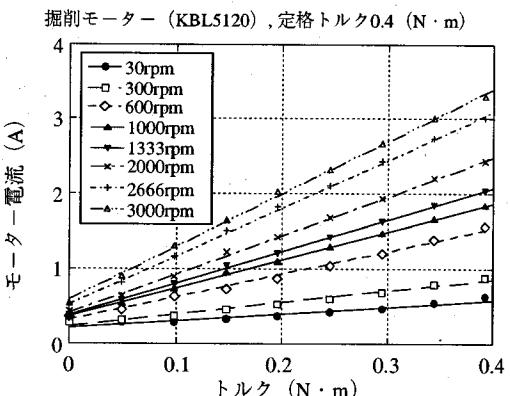


図-8 負荷トルクとモーター電流特性

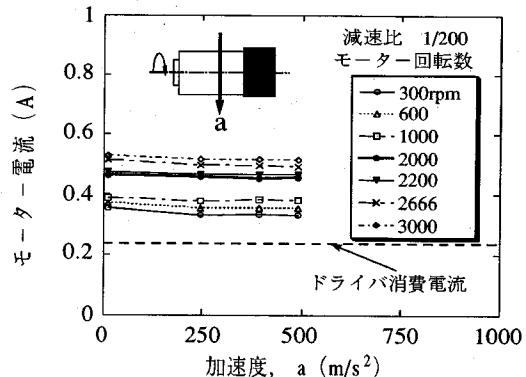


図-9 加速度と自重損失

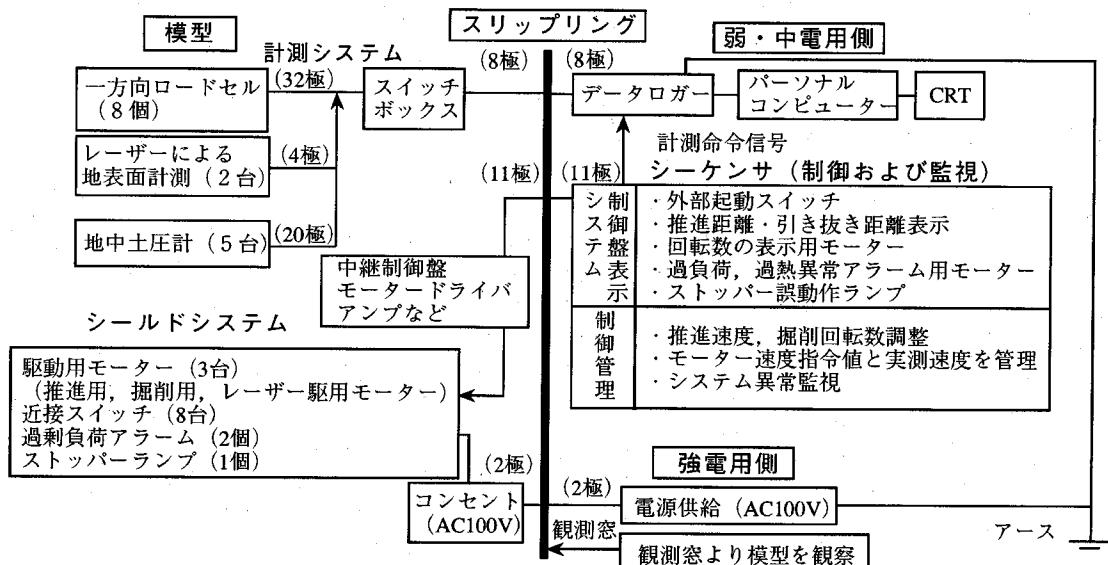


図-10 計測・制御システム計画図

は、 $T_1 \sim T_5$ を合計したものとなり、図-7の予測線（最大、最小）で示される。また、図-6と図-7の比較から、損失トルクは地盤と接触によるものが支配的なことが判る。

(7)モーターの選定と遠心場における性能

推進用および掘削用モーターの245.3m/s²レベルでの最大負荷予測から求めたモーター仕様を表-2に示す。この選定では推進用モーターの余裕が大きいものとなっているが、これは、当モーターが付け替え困難な位置での配置となっているため、更に高いGレベルの実験でもモーター交換の必要がないよう配慮したためである。

掘削用モーターを例に、重力場における性能特性

を図-8に、遠心場における無負荷時のモーター特性を図-9に示す。図-9の試験は、遠心加速度方向とモーター回転軸が直交する形で行ったものであるが、今回選定したモーターは、推進用モーターを含め、加速度490.6m/s²までの自重によるエネルギー損失は無視できる程度のものと判定できる。

(8)計測・制御システム

採用した計測・制御システムを図-10に示す。当計画では、実験の主目的である覆工土圧計測は勿論のこと、駆動源出力の管理、施工機械の制御および模型装置の破損防護のための安全対策にも十分な配慮を行った。

当システムの特長は以下のとおりである。

- ①覆工土圧計および埋設土圧計については、地盤材料、相対密度、設置深さ等を合せた状態で遠心場における地中検定を行い、土圧計の信頼し得る計測範囲と検定線を求めたこと。
- ②地表面沈下計測は、分解能の高いレーザー測距計を使用し、更にこの装置を専用の駆動用モータを設け移動可能とし、シールド横断方向の変位計測を可能としたこと。
- ③計測システムの構成では、スイッチボックスを遠心場に設けることにより、スリップリングの必要極数を省略したこと。
- ④施工機械の制御、計測データの収集および運転状況監視を全てシーケンサ制御とし、実験の再現性を高めるとともに人為的なミスを回避できるように設計したこと。
- ⑤シーケンサ制御を採用することで実験条件、計測条件等の変更を容易にしたこと。
- ⑥駆動モーターの過熱等の異常信号および管理限界オーバー信号を基準とした駆動源系自動緊急停止機能を制御回路に設けたこと。
- ⑦機械駆動部のオーバーラン等による破壊回避のための近接スイッチ信号を基準とした機械駆動系自動緊急停止機能を制御回路に設けたこと。
- ⑧上記の安全回路に加え、機械部での破損箇所を限定するための動力伝達部でのシェアピン設置等、ハード面からの安全対策も確立したこと。

4. 研究経緯

施工過程モデル化の技術を蓄積するために行った埋設管実験^{10)~14)}、テールボイド実験⁹⁾およびシールド模型試作実験^{15), 16)}について述べる。この一連の実験は、宇都宮大学所有の載荷装置（最大許容容量147kN）を使用した。

(1) 実験概要

埋設管に作用する土圧は、構造物と地盤の相互作用の典型的な問題の一つである。実験としては、機械的な装置を必要としない静的な二次元問題であるため、地盤作成方法、埋設管材質の選定および土圧計の選定といった基本的な技術を蓄積できた。

テールボイド実験では、ゴムバックを覆工管にセットし、この内を水で満たし、所定の遠心場になったときソレノイドバルブを開くことで、テールボイドの発生を表現する方法を採用した。

シールド模型試作実験は、Φ50mmのシールド機

表-3 実地盤実験条件

項目	実験条件
加速度	245.3m/s ²
地盤材料	気乾豊浦砂
地盤作成法	空中落下法
地盤相対密度	Dr=70%程度
シールド土被り	1D=100mm
カッター回転数	11rpm
掘進速度	15mm/min
引き抜き速度	15mm/min
実験回数	3回

用いたもので、実際に地盤内を掘削・推進する動的な三次元模型である。このシールド機は3重管で構成されており、図-3で示す施工過程のモデル化の原形となっている。この模型では、土被り50mm、加速度245.3m/s²の条件で実験を行うことができた。

(2) 設計上のポイント

機械要素の少ない埋設管およびテールボイド実験では、問題が少なかったが、模型試作実験に入ると載荷装置の寸法などの制限から生じる不都合が数多く発生した。一連の実験から得られた設計上のポイントは以下のとおりである。

- ①土槽寸法は、境界条件の影響を避けるためシールド径に比例した寸法を確保すること、地盤の初期条件を満足するためシールド等が土槽内に突出し地盤作成に影響するがないような配置とすること。
- ②乾燥砂を用いた実験では、排土機構での閉塞に伴うエネルギー損失が支配的となることがあるので、排土機構の単純化や排土に必要な最小限の寸法を確保する必要があること。
- ③使用材料は、装置軽量化のためのアルミ合金材の使用や、機械的摩擦損失を減少させるための機械加工精度の確保、たわみ量の制限およびスライドレールの適用等が有効なこと。
- ④駆動用モーター出力と設計式との対比を行うため、出力の計測システムが不可欠なこと。
- ⑤駆動用モーターは出力制御の範囲の広いサーボモータを選定し、かつ載荷装置には、制御と出力計測が可能なスリップリング極数を確保すること。
- ⑥シールドトンネル施工機械のモデル化では、プロトタイプに適合したテールボイド比を表現するため、トンネル径100mm程度が必要なこと。
- ⑦機械装置の破損を避けるためのフェールセーフ機構を設ける必要があること。

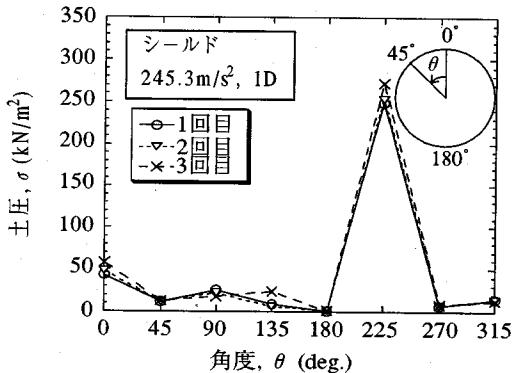


図-11 覆工土圧計測結果

⑧施工機械を搭載する遠心実験では、実験担当者、機械設計者、電装関係設計者および製作者でプロジェクトチームを編成することが有効であること。

5. 設計法の検討

シールドトンネル模型実験（表-3）結果をもとに、施工機械の設計法の検討を行う。なお、空地盤実験は $196.2\sim588.6\text{m/s}^2$ の加速度で行い、他の条件は表-3と同じとした。

(1) 推進用モーター

空地盤および実地盤実験でのモーター負荷測定結果を図-4、5に示す。

a) 空地盤での負荷

平均推力は、ほぼ最大および最小予測線の範囲内に入っている。予測では引き抜き過程の負荷を高く見積ったが、実測値は、掘進過程の方が高い。この原因として、引き抜き過程の外管と摺動リングの摩擦損失 F_4 が予測よりかなり低いこと、 $F_3\sim F_6$ を反力とした摺動抵抗があることなどが考えられる。

b) 実地盤での負荷

推進過程ではほぼ予測範囲内に入っているが、引き抜き過程では予測値よりかなり低く空地盤実験での負荷と同程度となっている。この結果は、空地盤での理由に加え、外管外周部と地盤の接触による損失 F_5 が予想外に低いこと、切羽前面の推進抵抗 F_6 が支配的であることを示している。

(2) 挖削用モーター

空地盤および実地盤でのモーター負荷測定結果を図-6、7に示す。

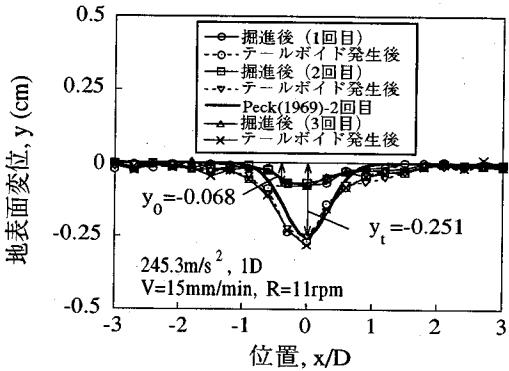


図-12 横断方向地表面計測結果

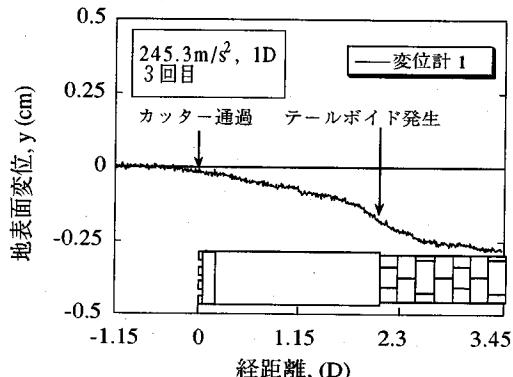


図-13 地表面計測結果（中央部定点）

a) 空地盤での負荷

平均トルクは、予測線よりもやや高めであるが、加速度増加による負荷傾向も良く捉えており予測がほぼ妥当であることを示している。

b) 実地盤での負荷

推進距離 $50\sim200\text{mm}$ 間ではほぼ予測範囲に入っているが、 $0\sim50\text{mm}$ 間では低めに、 $200\sim230\text{mm}$ では高めとなっている。この原因として、 $0\sim50\text{mm}$ ではコンペア内に掘削土が全長にわたって入っておらず F_4+F_5 の損失が少ないと、 $200\sim230\text{mm}$ ではシールド機が土槽壁面に接近するにつれてこの間の土圧がより受働側に変化し面板部での損失 T_2 が高くなることが考えられる。

以上の結果から、推進用および掘削用モーター負荷推定計算式の構築が、ほぼ妥当なものであると判断できる。

(3) 実験の再現性

覆工土圧及び横断方向地表面変位の計測結果を

図-11、12に示す。

覆工土圧は、上部半断面についてはほぼ左右対称の分布となっているが、下部半断面については、 225° の位置で応力集中が目立つ結果となっている。この原因として、シールド推力の影響がトンネル周辺に伝達し周辺地盤中に受働域を発生させていていること、掘削機構のカッター回転方向($0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ で下向き、 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ で上向き)の違いによる左右断面での排土量の不均衡発生による周辺地盤での局部的な受働域の発生があること等、施工過程の影響が表れたものと考えられる。しかし、地表変位計測結果と同様、3回の測定値はほぼ一定の数値を示しており、実験の再現性は確保されているものと判断でき、シーケンサー制御による自動運転が成功していることを証明している。

(4)施工経験との対比

実験3回目の土槽中央部における横断方向及び定点測定における地表面沈下計測結果を図-12、13に示す。

図-12は、テールボイド発生後の中央部沈下量(2回目)をもとにPeck¹⁷⁾によって示された沈下曲線を対比させたものであるが、3回の計測結果はこの沈下曲線と良く一致する。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。この沈下曲線は、過去の施工経験結果¹⁸⁾に対比させると、砂質地盤でのシールドカッター通過前の切羽前沈下、シールド通過時の沈下およびテールボイド発生時のテールボイド沈下等の現象を的確に模擬している。このことから、地表面の地盤変状の模擬に関しては、当模型の施工過程モデル化が適当であることを示している。

6.まとめ

遠心場における施工機械の設計法が実験結果から妥当であったことを証明できた。本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ①施工機械を組み込んだ模型実験に於いて、高度なメカトロニクスと制御技術を駆使することが、実験の再現性の確保及び複雑な施工過程の表現を可能にするために不可欠である。
- ②駆動源の容量計算式は、重力場における経験式を応用することが可能であるが、地盤との接触ロスについて十分な余裕を見込む必要がある。また、計算

値と駆動源負荷データの計算値の対比が可能な計測システムが不可欠である。

- ③施工過程のモデル化の妥当性を施工経験データと実験結果の対比により証明する必要がある。
- ④遠心場における施工機械を組み込んだ実験手法は、新工法の開発や新しい施工機械の開発に有効な手段となることを示唆している。

今回の報告は、空地盤で 588.6m/s^2 まで、実地盤で 245.3m/s^2 ・土被り 1D の条件における設計法の証明であり、今後は実地盤実験での土被り圧の増加、加速度の上昇等を取り入れた計測を行い、予測計算式の適用範囲を確認する所存である。

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、宇都宮大学工学部 横山幸満教授、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) 木村 孟, 日下部 治:遠心模型実験 2.序論, 土と基礎, Vol.28,No.11, pp.68-74, 1987.
- 2) 三笠正人, 高田直俊:遠心力装置による自重圧密実験(第3報), 第21回土木学会年次学術講演会概要集, III, pp.46/1-2, 1966.
- 3) 三笠正人, 高田直俊, 望月秋利:遠心力を利用した土構造物の模型実験, 土と基礎, Vol.28, No.5, pp.15-23, 1980.
- 4) 古賀泰之, 谷口巣一, 古関潤一, 森下 義:新しく導入した動的遠心模型実験装置, 土木技術資料, Vol.30, No.5, pp.50-54, 1988.
- 5) Kimura, T., Takemura, J., Hirooka, A., Suemasa, N. and Kouda, N.: Stability of Unsupported and Supported Vertical Cuts in Soft Clay, Proc. of 11th SEAGC, pp.61-70, 1993.
- 6) 東田 淳, 中村智康, 横口雄一, 名倉克博, 川崎宏二:砂地盤に築造される泥水掘削溝の三次元遠心模型実験(実験結果のまとめ), 第46回土木学会年次学術講演会概要集, III, pp.648-649, 1991.
- 7) Cyran, T.C., Mehle, J.S. and Goble, G. G.: Centrifuge Modeling of piles, Proc. of the International Conference Centrifuge '91, pp.377-384, 1991.
- 8) 社団法人 日本下水道管渠推進技術協会: 推進工法用設計積算要領—土圧式推進工法編—, 1991.
- 9) 本田早苗, 荒井實:荷役機械の設計(増補版), 産業図書(株), 1971.
- 10) 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の試み, 土木学会第44回年次学術講演会, III, pp.936-937, 1989.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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ーンの試作, 土木学会第46回年次学術講演会, p.56-57, 1991.
- 16) 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.
- 17) Peck, R.B.: Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground, *State-of-the-Art Volume, 7th ICSMFE*, Mexico city, pp.225-290, 1969.
- 18) 山田孝治, 吉田 保, 間片博之, 橋本定雄: 沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について, 土木学会論文報告集, 第373号, VI-5, pp.103-112, 1986.

(1995. 1. 31 受付)

DESIGN AND DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION EQUIPMENT IN A CENTRIFUGE

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

With the advent of modern control engineering and robotics, geotechnical centrifuge technology has reached a stage where sophisticated construction processes could be modeled in a centrifuge. Design and development of reduced construction equipment are necessary to simulate the construction processes. This paper deals with this challenge, describing problems associated with centrifuge modeling involving construction equipments, and experiences of the design and development of miniature shield machine. Validity of the design is examined and consistency of the model test results with field observation is presented.