

シールド覆工の土圧に関する 遠心力模型実験と数値解析による検証

Centrifuge Model Test and Numerical Analysis
of Earth Pressure around Shield Segments

杉江茂彦¹・高橋真一²

Shigehiko Sugie and Shinichi Takahashi

¹正会員 工博 株式会社 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:sugie.shigehiko@obayashi.co.jp

²正会員 工博 株式会社 大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

The behaviours of earth pressure which acts on the peripheral surface outside a shield segment, it has not been always clear. Therefore centrifuge model test and finite element analyses that simulated a circular cavity supported with a steel shield segment were performed and examined the distribution of earth pressure and the inner force of segment. Here, it was tried to observe in detail that the occurred earth pressure was divided into two ingredients of normal and circumference direction to segment peripheral surface. This report contains summary of the executed centrifugal model test and finite element analyses and inspected results.

Key Words : shield segment, earth pressure, finite element method, centrifuge model test

1. はじめに

シールドの覆工は、施工時にはジャッキ推力やテールシールドでのブラシ荷重ならびに裏込注入圧等の短期的な荷重を受ける。また施工が完了して安定期に至ると土水圧を長期にわたり受ける。

施工時の作用荷重については現場での計測事例にもとづく研究成果(例えば1), 2)が報告されている。また施工後の土水圧、地盤反力については、現場計測や実験・解析に基づく研究成果(例えば3), 4)がいくつか報告されている。しかしながら覆工の作用荷重については未だ不明確な点が多く、覆工の設計の安全性と合理性を高めていくためには、さらに種々の視点から荷重の性状を把握していく必要があるものと考えられる。

本研究ではシールド覆工で支持された円形断面空洞を模擬した遠心模型実験と有限要素解析(FEM)を行った。得られた作用土圧を覆工外周面の法線方向の成分と円周方向の成分とに分けて捉え、各土圧成分の分布形状ならびに覆工の変形・部材力への寄与を調べたので報告する。

2. 遠心力模型実験の方法

使用した模型地盤を写真-1に、上下2段に設けた円形のシールド空洞の設置深さを図-1に示す。地盤は固結度の大きな粘土地盤を想定しソイルセメントを用いた。使用土の一軸圧縮試験による応力～ひずみ関係を図-1に示す。円周方向のひずみも測定しポアソン比を得た。実験時の地盤の平均強度は材令7日で $q_u \approx 600 \text{ kN/m}^2$ であった。

土槽のサイズは幅80cm×高さ50cm×奥行き20cmであり、前面のアクリル板を含む土槽と地盤間には摩擦低減のためのテフロンシートを貼付した。

模型地盤の深さは400mmとした。シールド覆工の模型は外径83mm、板厚さ4.5mmの鋼管を使用した。覆工内部への地盤材料や水の浸入を防止するために、鋼管の両端部にはグリースを塗布したゴムシートを配置した。

覆工への作用土圧は小型土圧計(最大容量1MPa)で、円周方向のひずみは、覆工の内・外面に貼付したひずみゲージで計測した。

遠心加速度はほぼ一定速度で上昇させ、挙動検

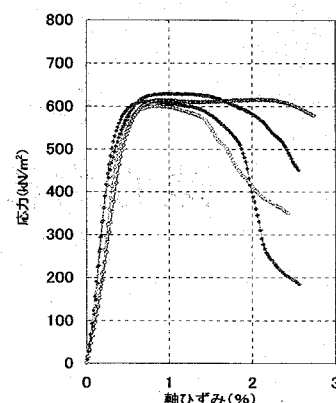
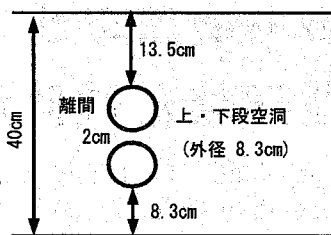
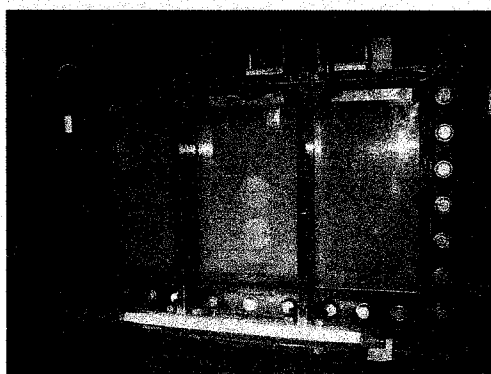


写真-1 遠心力模型実験の土槽

図-1 空洞モデルの設置深さ

図-2 使用土の一軸圧縮試験結果

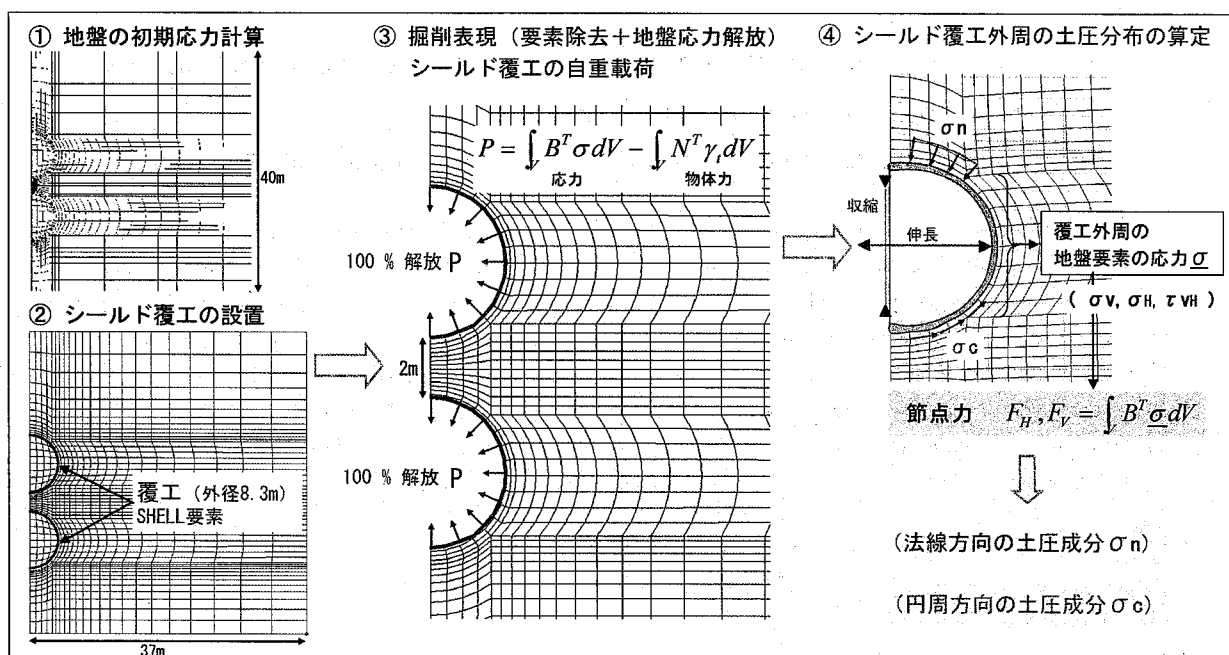


図-3 有限要素法による掘削解析と土圧算定の手順

表-1 地盤およびシールド覆工の解析用物性値

(地盤: Drucker-Prager破壞規準)

変形係数	130000 kN/m ²
ポアソン比	0.18
粘着力	300 kN/m ²
単位体積重量	17.1 kN/m ³
静土圧係数	0.22

(覆工：鋼製)

変形係数	$2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$
ポアソン比	0.3

厚さ:45cm

証を行う加速度100Gに到達させた後に20Gまで除荷し、このサイクルを二回繰り返して終了した。

3 FEMによるシールド掘削解析の概要

FEM解析の計算手順を図-3に示す。2.の遠心力模型実験での100G 載荷時の地盤応力を対象とした。実験では覆工で支持された空洞に遠心加速度を漸増させたが、本解析では空洞の位置の地盤要素を削除して、地盤応力と物体力を解放させることで掘削時の応力変化を模擬した。

ここで、地盤は土水一体で扱った。覆工への作用土圧は、覆工の面と法線をなす方向の土圧成分と円周方向の土圧成分に分けて分布をもとめた。

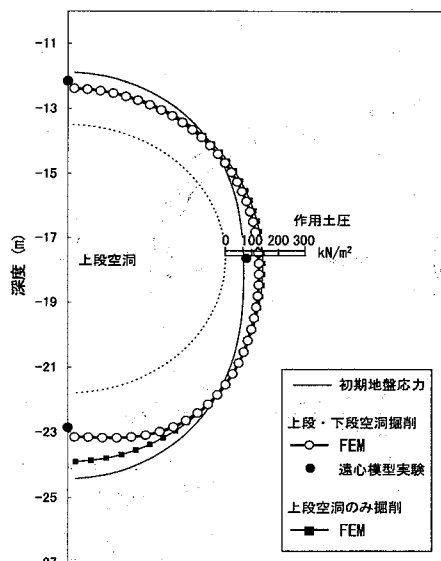
地盤および覆工（シェル要素で模擬）の材料定数値を表-1に示す。地盤の定数値は一軸圧縮試験の結果に基づいた。覆工部は実験では4.5mm厚さの

鋼管パイプを用いたため、100G場の解析モデルではシェル要素に厚さ45cmと鋼材の剛性を与えて模擬した。解析コードにはGRASP3D^{5), 6)}を用いた。

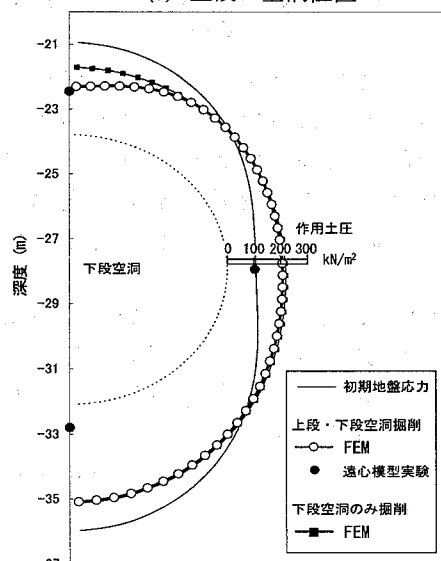
4. シールド覆工の土圧

(1) 法線方向の土圧成分

覆工の外周に設置された土圧計は覆工面と法線



(a) 上段の空洞位置

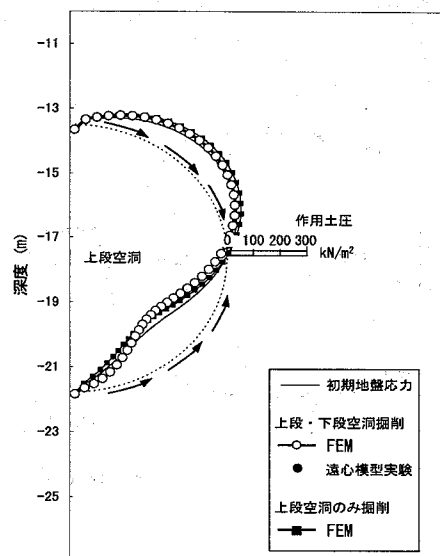


(b) 下段の空洞位置

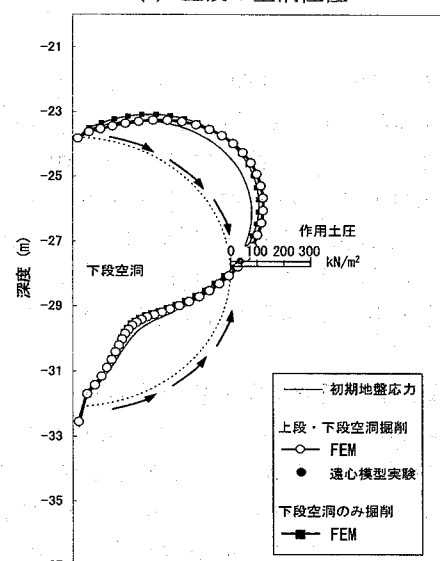
図-4 覆工の作用土圧（法線方向の成分）

方向の土圧成分（以後、法線土圧と呼称）を受圧する。上段・下段の空洞位置における法線土圧の分布を図-4に示す。FEMによる計算値を○で、実験値を●で示す。参考に上段（下段）位置のシールド空洞を単独で設けた場合のFEM計算値を■で示す。また初期地盤応力（空洞が設けられていない地盤の応力）を実線で加えている。

(a)の上段空洞をみると、FEMでは覆工の断面が円から楕円状に変形することに伴い、覆工の頂部と底部では土圧が初期地盤応力から減少している。側部では土圧が初期よりも増しており、空洞側に押し返す反力の発生が示されている。また、下段の空洞と隣接する底部では土圧の減少が大きい。各位置の実験値においてもこれらの傾向が認められる。(b)の下段空洞においても同様の傾向であるが実験での値が小さめである。特に覆工底部では受圧不良の可能性が認められた。



(a) 上段の空洞位置



(b) 下段の空洞位置

図-5 覆工の作用土圧（円周方向の成分）

(2) 円周方向の土圧成分

覆工面に接する円周方向の土圧成分（以後、円周土圧と呼称）を計測することは難しい。FEMによる円周土圧の分布を図-5に示す。作用する向きは矢印で示す様に、上半では下向き周り、下半では上向き廻りであり、先の法線土圧と同様に覆工を横長の楕円状に変形させる様に働いている。円周土圧については上段と下段の空洞の隣接による影響は法線土圧の場合に比べて小さい。

5. シールド覆工の部材力

(1) 曲げモーメントの分布

上段の空洞位置における覆工の曲げモーメントを図-6に示す。FEMの計算値を○で示す。覆工の内周面と外周面に設けたひずみゲージによる実

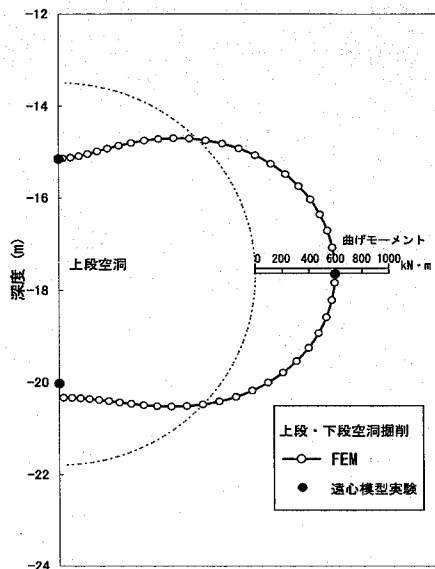


図-6 覆工の曲げモーメント

験値 (100G 荷重時) を●で示す。FEM・実験ともに覆工の側部付近では内側で圧縮 (外側で引張)、頂部と底部の付近では覆工の内側面で引張 (外側で圧縮) となる曲げモーメントが生じており、覆工の円形状から横長の楕円状への変形に応じた分布を示している。曲げモーメントの発生量においても FEM と実験は近い値となっている。

(2) 法線土圧・円周土圧の各成分の寄与

図-6 の曲げモーメントの FEM 計算値を、法線土圧と円周土圧の各成分による発生値に分けて図-7 に示す。実線は曲げモーメントの全体量である。その内、法線土圧の寄与分を■で、円周土圧によるものを□でプロットしている。別途の計算で覆工 (SHELL 要素) に法線・円周の各土圧成分の荷重 (図-4 (a), 図-5) を荷重して得られたものである。各土圧成分ともにセグメントを横長の楕円状に変形させる様に働くため、各土圧成分による曲げモーメントの分布形状は同様である。発生量は円周土圧によるものが法線土圧のものを上回っているが両者の寄与は同程度となっている。

6. おわりに

シールド覆工にかかる土圧を検証するため、覆工で支持された上下2段の円形空洞を模擬した遠心力模型実験と有限要素法解析を行った。得られた作用土圧については、覆工面と法線方向の成分と円周方向の成分に分けて、各成分の土圧分布と覆工部材の曲げモーメント発生への寄与を調べた。得られた知見は以下である。

1) 上下2段に空洞を設けることによる覆工の作用

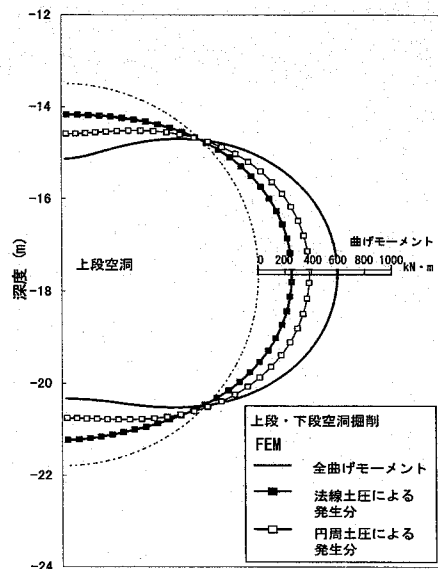


図-7 法線土圧・円周土圧の各成分による曲げモーメント

土圧への影響は法線土圧で明確に生じ、両空洞ともに互いの隣接部付近において、単独に空洞を設けた場合に比べて作用土圧が小さく得られた。一方、円周土圧では空洞を上下に隣接して設けることによる影響は軽微であった。

2) 法線土圧と円周土圧はともにシールド覆工を円形状から横長の楕円状に変形させる様に働き、曲げモーメントの発生量への寄与は両土圧成分で同等であった。

今後、土圧・水圧を分離した荷重条件についても検証していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会 技術小委員会 シールドトンネル施工時荷重検討部会シールドトンネルの施工時荷重に関する研究中間報告会資料, 2005. 6. 1
- 2) 土木学会 トンネル工学委員会: シールドトンネルの施工時荷重, トンネルライブラリー第17号, 2005. 6. 10
- 3) 真下・左近・石村・岡田: 良質地盤におけるセグメント設計に用いる地盤反力係数に関する一考察, トンネル工学報告集, 第16巻, 土木学会, pp. 295~302, 2006
- 4) 有泉・金子・塩治・山崎・日下部: 軟弱粘性土地盤の圧密に伴うシールドトンネルの長期荷重に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 799/III-72, pp. 89~108, 2005
- 5) Ohta, H., Iizuka, A., Omote, Y., Sugie, S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elastoviscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol. 2, pp. 1191~1196, 1991
- 6) 杉江: 3次元地盤/地下水連成解析プログラム「GRASP3D」の解析理論と粘土の力学挙動解析への応用, 大林組技術研究所報, No. 51, pp. 15~22, 1995