

併設シールドトンネルの土圧に関する遠心力模型実験とFEM解析

杉江茂彦 高橋真一
鈴木和明

Centrifuge Model Test and Finite Element Analysis of Earth Pressure around Adjacent Shield Tunnels

Shigehiko Sugie Shinichi Takahashi
Kazuaki Suzuki

Abstract

The opportunities presented by constructing plural adjacent shield tunnels increase with the road infrastructure of urban areas being shifted underground. An evaluation of the loadings on the shield segments under various construction conditions is required; however, the characteristic of the earth pressure behavior as a result of the interaction between the ground and the shield segments is not clear. Therefore, in this study, the characteristics of the earth pressure and the member forces exerted on the segments were examined by using the centrifuge test model and an FEM model that simulate a case wherein two shield tunnels were adjacently constructed in a horizontal direction in parallelism on a perpendicular each other. As a result, it was confirmed that the earth pressure on the adjacent segments placed between the shield tunnels reduced remarkably, and this load reduction contributed to the reduction in the bend moment generated at the segments of both tunnels.

概要

都市圏の道路インフラが地下にシフトしていくのに伴い、複数のシールドトンネルの併設施工やこれを繋いで地下空間が構築されるケースが増えている。施工条件に応じたシールド覆工の荷重評価が求められるなか、地盤と覆工の相互挙動を伴う作用土圧の特性は必ずしも明確ではない。そこで本研究では、シールドトンネルが上下2段に近接して施工される場合を想定し、遠心力模型実験と有限要素法解析（FEM）を用いて覆工の作用土圧と発生部材力の特性を調べた。その結果、両空洞の隣接部側の作用土圧が大きく軽減されること、ならびにこの荷重軽減が両空洞の覆工の発生曲げモーメントの軽減に寄与することを確認した。

1. はじめに

シールドトンネルの覆工は、施工時にはジャッキ推力やテールシールドでのブラシによる荷重、ならびに裏込注入圧等の短期的な荷重を受ける。また施工後には土水圧を長期に受ける。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)}が報告されている。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い。特に複数のシールドが隣接して設けられる場合については、覆工の安全性と合理性を高めるために、さらにトンネル相互の干渉条件下における土圧の作用特性を把握しておく必要がある。

本研究では上下に隣接する二つのシールドトンネルを模擬した遠心力模型実験と有限要素法解析（FEM）を行ない、覆工の作用土圧と発生部材力の特性を検証した。また覆工断面力の慣用計算法²⁾での土圧の設定条件（Fig. 1参照）について、FEM解析の結果にもとづき考察した。本報ではこれらの検討結果を報告する。

2. 遠心力模型実験の概要

使用した土槽と模型地盤をPhoto 1に示す。土槽の寸法は幅800mm×高さ500mm×奥行き200mmであり、模型地盤の深さは400mmとした。前面の亚克力板を含む土槽と地

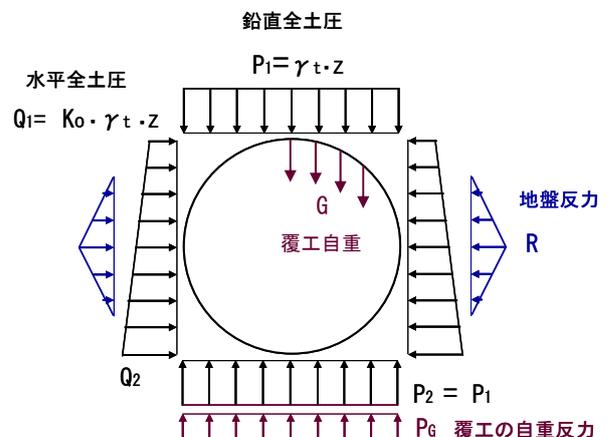


Fig. 1 覆工断面力の慣用計算法における荷重条件
Load Condition Used in Conventional Calculation Method

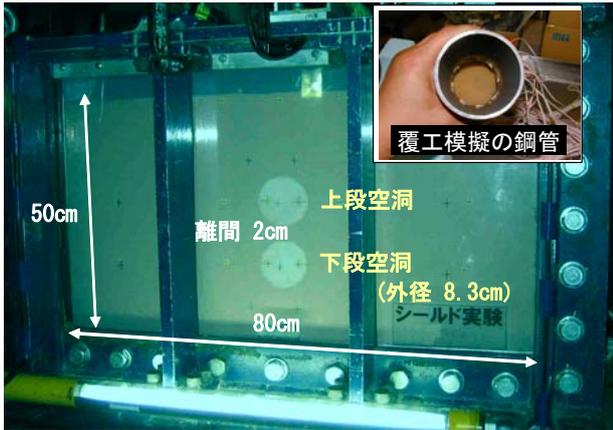


Photo 1 遠心力模型実験の土槽
Model ground in Centrifuge Model Test



Photo 2 土材料の供試体例
Example of Soil Specimen

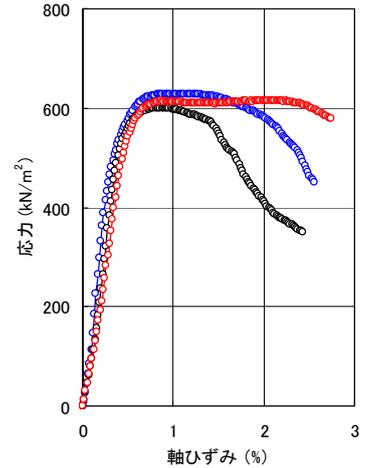


Fig. 2 1軸圧縮試験の結果
Unconfined Compression Test

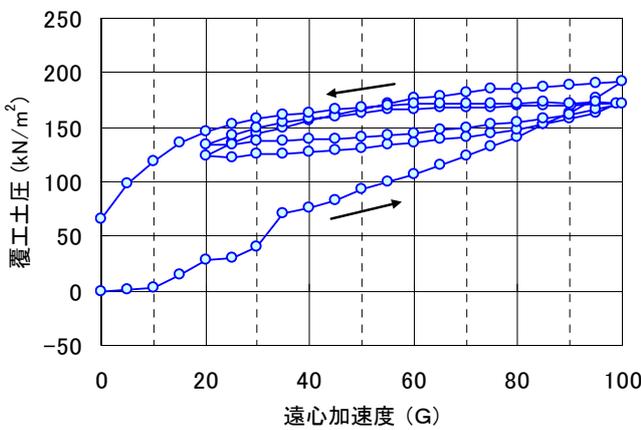


Fig. 3 覆工の作用土圧と遠心加速度の関係
(下段空洞の頂部での測定値)
Relationship Between Earth Pressure
on Segment and Centrifugal Acceleration

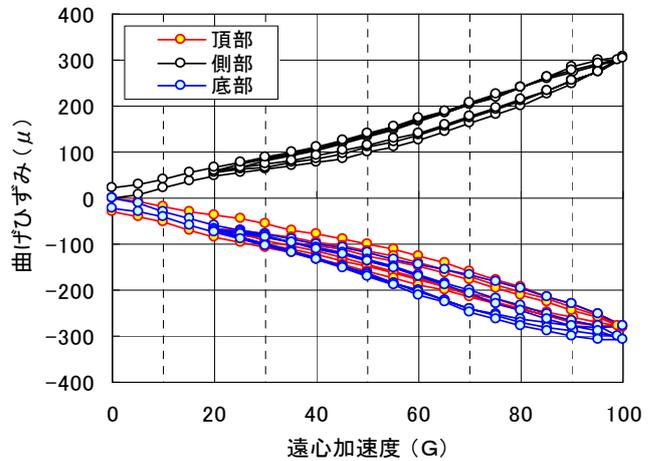


Fig. 4 覆工の曲げひずみと遠心加速度の関係
(下段空洞での測定値)
Relationships Between Bending Strain
on Segment and Centrifugal Acceleration

盤間には摩擦低減のためのテフロンシートを貼付した。
上下2段に設けた円形のシールド空洞は離間を20mmとし、覆工を外径83mm、板厚4.5mmの鋼管で模擬した。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上下空洞の上下端と側面に配置した小型の土圧計(最大容量1MPa)により測定した。覆工の発生部材力は、覆工の内外面にひずみゲージを貼付し、得られた円周方向のひずみより評価した。
模型地盤は固結度の高い粘土地盤を模擬するために、市販のカオリン粘土を液性限界の2倍の含水比で調整した後に、普通ポルトランドセメントを配合(260kg/m³)して作製した。遠心力実験では材令7日の平均強度 $q_u \approx 600\text{kN/m}^2$ 、初期接線剛性 $E_i \approx 130,000\text{kN/m}^2$ の地盤材料を用いた。一軸圧縮試験の供試体のサンプルをPhoto 2に、応力～ひずみ関係をFig. 2に示す。また次章のFEM解析で必要となる地盤材料のポアソン比を得るために供試体の

外周面にひずみゲージを貼付し、供試体の軸方向と円周方向のひずみを測定した。静止土圧係数は、得られたポアソン比を用いて弾性論から求めた。
遠心加速度は挙動検証を行う加速度100Gに到達するまでほぼ一定の速度で上昇させ、100Gに到達後には20Gまで除荷した。その後20Gから100Gまでの荷重サイクルを二回繰り返して終了した。
覆工の作用土圧の測定結果をFig. 3に示す。上段と下段の空洞に挟まれた位置の土圧を下段の覆工から測った結果である。載荷・徐荷による土圧の変化が感度良く得られており、土圧計の受圧状況は良好と判断できる。また加速度100Gでの土圧の値も各荷重サイクルで差が生じているものの概ね安定している。次章の解析値との相互検証では100Gで得られた土圧測定値の最大値を用いた。
覆工の曲げひずみの測定結果を下段空洞の場合を例にFig. 4に示す。先の土圧の測定値に比べて、加速度に対して線形的な挙動を示している。また覆工の頂・底部で

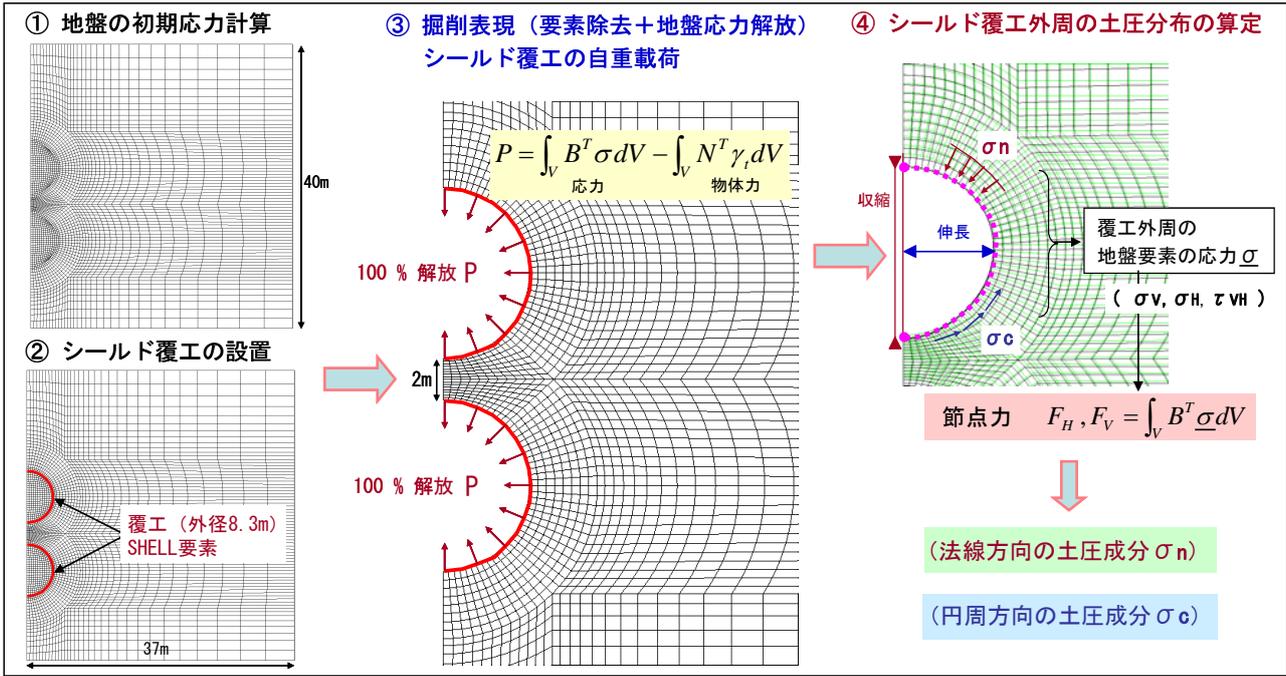


Fig. 5 有限要素法解析によるシールドトンネルの掘削の模擬と土圧算定の手順
Simulation of the shield tunnels excavation by using Finite Element Method Analysis and Process of Calculation for obtaining Earth Pressure

内側に引張り，側部で外側に引張りが生じており，弾性範囲で覆工が横長の楕円に変形する傾向が認められる。

3. FEM解析による覆工土圧の算定手順

遠心力模型実験の模擬に用いた有限要素法の解析メッシュと覆工の作用土圧の算定手順をFig. 5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，地盤は全応力解析で扱った。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Table 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GRASP3D⁴⁾を用いた。

4. シールド覆土の作用土圧

4.1 シールド覆工周辺の地盤応力

FEM解析で得られた空洞周辺の地盤応力をFig. 6に示す。併設空洞を設けたことによる地盤応力の初期状態からの変化分を鉛直・水平の各応力成分で示したものである。鉛直応力は上段・下段空洞ともに頂部・底部位置で

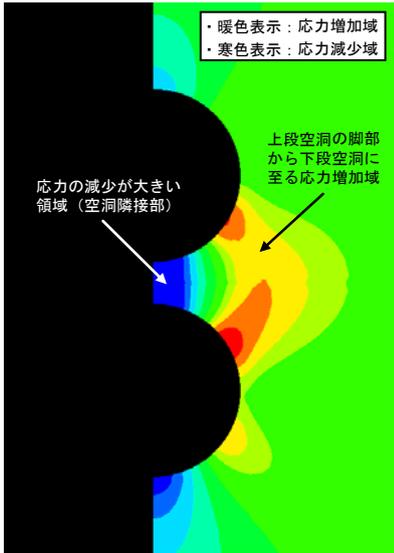
Table 1 地盤およびシールド覆工の材料定数値
Material Parameter Values of Model Ground and Shield Segment

(地盤：Drucker Prager 破壊基準)	
変形係数	1.3 × 10 ⁵ kN/m ²
ポアソン比	0.18
粘着力	300 kN/m ²
内部摩擦角	0 deg.
単位体積重量	17 kN/m ³
静止土圧係数	0.22
(覆工：鋼製)	
変形係数	2.1 × 10 ⁸ kN/m ²
ポアソン比	0.3
厚さ 45cm	

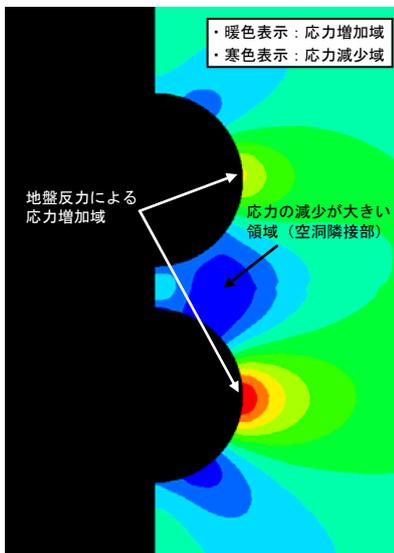
減少（寒色で表記）しており，特に両空洞に挟まれた領域では減少量が大きい。また上段空洞の脚部から下段空洞に向けて増加域（暖色で表記）が生じている。水平応力においても応力の減少は上・下段空洞の頂部・底部位置と両空洞に挟まれた領域で生じているが，両空洞の側部の位置では地盤応力が増加している。これはシールド覆工が横長の楕円状に変形することによる地盤反力の発生に伴うものである。

4.2 覆工に作用する法線方向の土圧成分

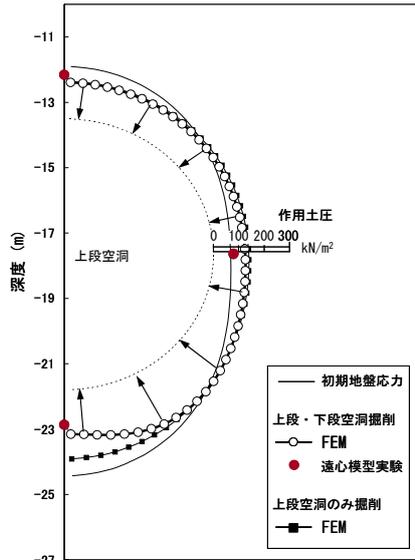
覆工の周面に設置された土圧計は覆工面の法線方向の土圧成分（以後，法線土圧と呼称）を受圧する。上段・下段の空洞位置における法線土圧の分布をFig. 7に示す。参考に上段（下段）位置のシールド空洞を単独で設けた場合のFEM計算値を併示する。また初期の地盤応力での値を実線で加えている。



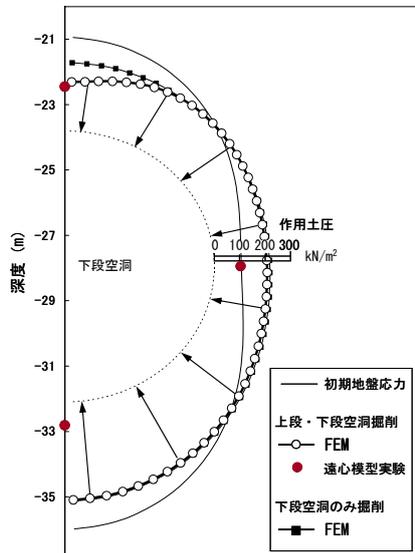
(a) 鉛直地盤応力



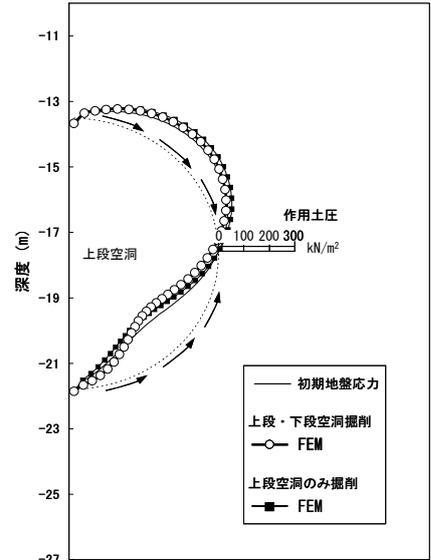
(b) 水平地盤応力



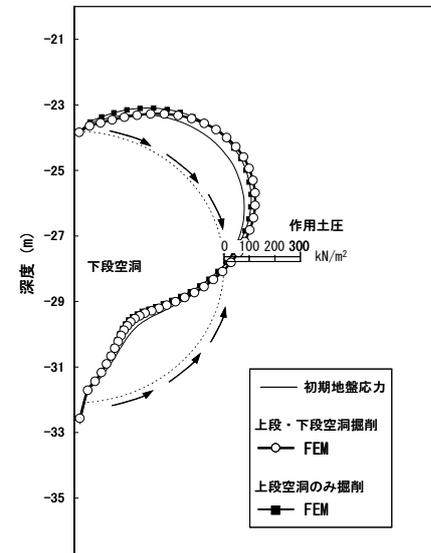
(a) 上段の空洞位置



(b) 下段の空洞位置



(a) 上段の空洞位置



(b) 下段の空洞位置

Fig. 6 トンネル周辺の地盤応力の変化
Changes of Ground Stresses Around
the Tunnels by FEM

Fig. 7 覆工土圧の法線方向成分
Normal Direction Ingredient
of Earth Pressure on Segment

Fig. 8 覆工土圧の円周方向成分
Circumference Direction Ingredient
of Earth Pressure on Segment

(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の値から減少している。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値が小さめである。特に覆工の底部では受圧不良の可能性が認められた。

4.3 覆工に作用する円周方向の土圧成分

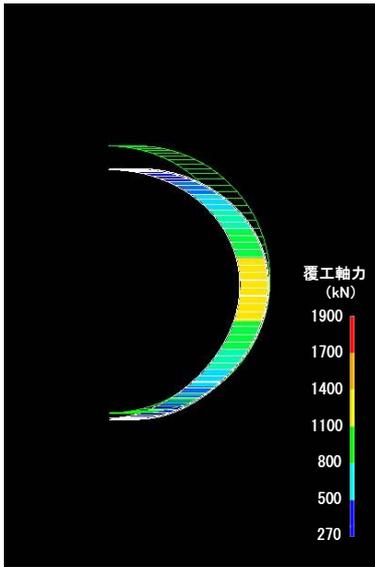
覆工面に接する円周方向の土圧成分（以後、円周土圧と呼称）を計測することは難しい。FEMによる円周土圧の

分布をFig. 8に示す。作用する向きは矢印で示す様に上半では下向き廻り、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。

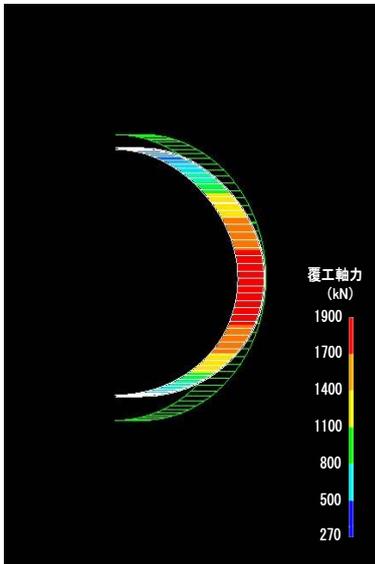
5. シールド覆工の部材力

5.1 覆工の変形と軸力分布

FEMによる覆工の変形と軸力分布をFig. 9に示す。変形量はモデルスケールに対して30倍に拡大して示している。上段・下段の覆工は土圧の支持により縦径が短くなっている。一方、横径の変化は小さいため、覆工全体は横長

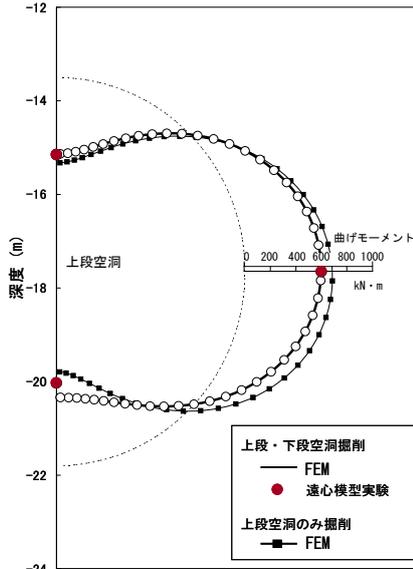


(a) 上段の空洞位置

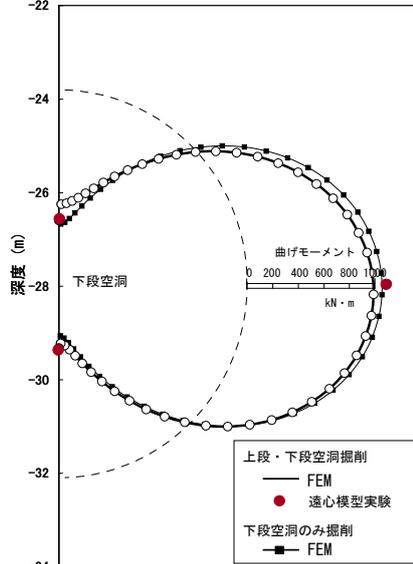


(b) 下段の空洞位置

Fig. 9 覆工の変形と軸力分布
Deformation and Axial Force
on Segment by FEM

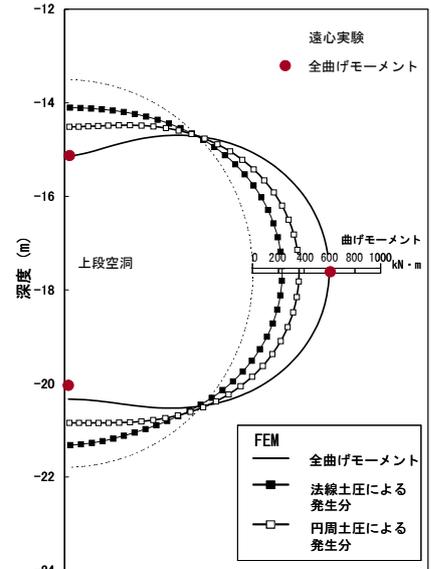


(a) 上段の空洞位置

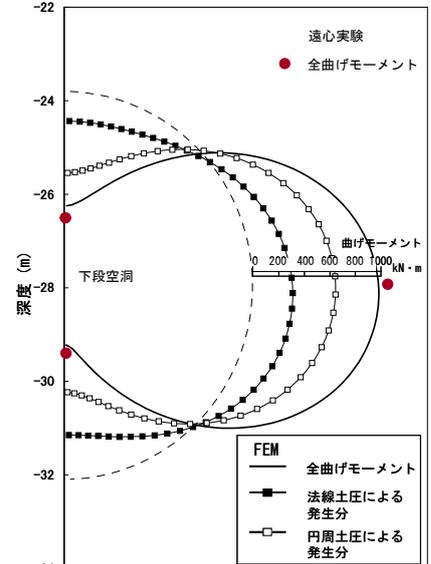


(b) 下段の空洞位置

Fig. 10 覆工の曲げモーメント
Bending Moment on Segment



(a) 上段の空洞位置



(b) 下段の空洞位置

Fig. 11 覆工の曲げモーメントへの
法線土圧・円周土圧の各成分の寄与
Contribution of the Normal/Circumference
Earth Pressure on Bending Moment

の楕円形状に変形している。

軸力は覆工の厚さ方向の平均値で示しており、覆工全域で圧縮側の値が得られている。横長の楕円形状に変形することにより、軸力は頂部・底部付近に比べて側部付近で大きな値となっている。

5.2 曲げモーメントの分布

上段・下段の空洞位置における覆工の曲げモーメントをFig. 10に示す。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つ

いてもFEMと実験は近い値となっている。

上段（下段）位置の空洞を単独で設けた場合のFEM計算値を同図に加えている。覆工全域において、先の上・下2段空洞を設けた場合の曲げモーメントは単空洞の場合に比べて小さい値となっている。これは4章で示した上・下段空洞の隣接部の覆工作用土圧が単空洞の場合に比べて軽減されたことによるものである。

5.3 法線土圧・円周土圧の各成分の寄与

Fig. 10のFEMによる曲げモーメントを、法線と円周の各土圧成分による発生値に分けてFig. 11に示す。実線は曲げモーメントの全体量である。各土圧成分はともに覆工を横長の楕円状に変形させる様に働くため、各成分の

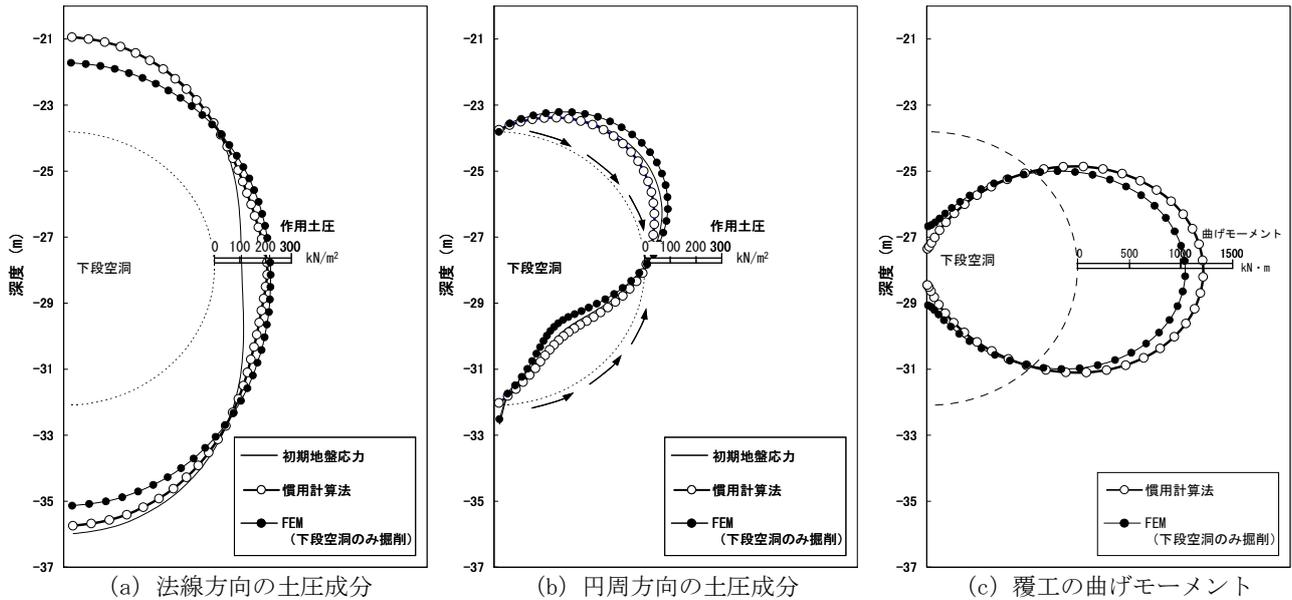


Fig. 12 慣用計算法による作用土圧・曲げモーメントとの比較
Comparison of Earth Pressure and Bending Moment Between FEM and Conventional Calculation Method in Design Work

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る結果となった。

6. 設計の慣用計算法との比較

覆工断面力の慣用計算法¹⁾ではFig. 1に示す荷重条件が用いられている。全土圧P, Q (あるいは全土圧を土圧と水圧に分離した各荷重), 水平方向の反力荷重Rならびに覆工の自重Gと自重反力PGを主荷重としている。これらの荷重を覆工(はり部材)に直接与えている。

慣用計算法での覆工の作用土圧と曲げモーメントをFEM(単独空洞)の計算値と比較してFig. 12に示す。

慣用計算法では覆工の頂部・底部付近の地盤応力が解放されることによる荷重低減は見込まれていない。この条件は実際の挙動とは異なっているが慣用計算法は簡便なためはりばねモデルと併せて設計実務で用いられている。この荷重変化を考慮できるFEMに比べて、法線方向の土圧成分は大きめ、円周方向の土圧成分は小さめの評価となっている。この荷重評価の違いが覆工の算定部材力に与える影響は大きく、慣用計算法ではFEMに比べて曲げモーメント、軸力とせん断力で20%程度大きめの値が得られた。

7. おわりに

シールドが互いに近接して施工される場合の覆工の作用土圧と発生部材力の特性を調べるために、上・下2段の円形空洞を模擬した遠心力模型実験とFEM解析を行った。ここで単一空洞の場合のFEM解析ならびに設計実務の慣用計算法との比較を加え以下の結果を得た。

1) 上・下2段の円形空洞を設置した遠心力模型実験とこ

れを模擬したFEM解析では、覆工の作用土圧と発生曲げモーメントが互いに良く整合した。

2) 覆工の作用土圧は法線方向の成分(法線土圧)と円周方向の成分(円周土圧)とに分けられる。上・下2段の併設の影響は特に法線土圧で明確に生じ、両空洞の隣接部側の法線土圧は単一空洞の場合に比べて大きく軽減された。これにより両空洞の覆工の発生曲げモーメントは単一空洞の場合に比べて覆工全域で低減した。

3) 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、曲げモーメント発生への寄与は円周土圧の方が大であった。

4) 慣用計算法では覆工の頂部・底部付近の地盤応力の解放による荷重軽減は見込まれていない。この分の荷重変化を考慮できるFEMに比べて、法線土圧の評価は大きめ、円周土圧の評価は小さめとなった。この荷重評価の違いが覆工部材力算定に与える影響は大きく、慣用計算法での曲げモーメントは20%程度大きめに算定された。

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)
- 2) 土木学会 トンネル工学委員会:トンネル標準示方書, シールド工法・同解説 (2006)
- 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, pp. 295~302, (2006)
- 4) 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)