

国内と海外におけるシールドセグメント覆工設計構造解析法に関する研究

早稲田大学 学生会員 ○片山 智裕
 早稲田大学 正会員 岩波 基
 熊谷組 正会員 山口 哲司

1. 概要

わが国では主として軟弱地盤にシールドトンネルを構築してきたのに対して、ヨーロッパでは山岳トンネルの特殊工法としてシールド工法が発展してきたため、設計や施工の考え方に大きな隔りがある。したがって、わが国のシールドトンネルを海外展開するためには、その違いと背景を理解することが重要となる。また、国際貢献の観点から、国際標準化の推進に取り組んでいく必要があり、わが国規格のデファクトスタンダード化を進めていくことが重要となる。以上の現状を踏まえ、世界を俯瞰したシールドトンネルの設計や施工の思想の体系化を図りたい。

本研究では、設計用構造解析法に、わが国で用いられている慣用計算法¹⁾とはりーばねモデル計算法²⁾に加え、英国で多用されている Muir Wood の方法³⁾を用いて、設定した各地盤を対象とした覆工の試設計を行った。本報告は、その計算結果をもとに、浅深度部の軟弱地盤や大深度部の硬質地盤における覆工設計の考え方を検討したものである。

2. 研究方法と結果

覆工の試設計は、図1に示す浅深度部の沖積粘性土地盤(N値=1, 5)および大深度部の洪積砂質土地盤(N値=50)を対象として行った。覆工は一次覆工のみを構造部材と考え、コンクリート平板型セグメントとした。なお、計算に用いた地盤およびセグメントの諸元は表1に示すとおりである。また、今回の試設計で用いた計算法は、図2に示す3種類である。なお、Muir Woodの方法のみ、概要とその特徴を示す。

Muir Woodの方法は、英国で多用されている方法である。半無限二次元弾性地盤中に剛性一様リングが存在するとして連続体モデルを用いた弾性理論解に基づく近似解により、覆工に生じる断面力を算定する方法である。基本的に鉛直土圧は全土被り圧を、水平土圧は鉛直土圧に静止土圧係数 K_0' を乗じたものを、覆工を包含する地盤に作用させて覆工に生じる断面力を求める。この方法では、覆工の曲げ剛性および軸剛性を考慮して覆工の変形に伴う地盤と覆工の相互作用を評価する。

今回の試設計では、大深度部の洪積砂質土地盤(N値=50)が対象のとき、慣用計算法およびはりーばねモデル計算法では鉛直土圧に緩み土圧を用いて断面力を算定した。また、浅深度部の沖積粘性土地盤(N値=1)が対象のとき、慣用計算法およびはりーばねモデル計算法では土水を一体として取扱った。なお、断面力の算定に用いた荷重を表2に示す。

表3~表5は、各対象地盤における計算結果および、それに基づいた許容応力度設計法による断面耐力照査結果をまとめたものである。また、各対象地盤における曲げモーメント図および軸力図をまとめ、図3および図4に示す。なお、コンクリートの許容応力度を 18N/mm^2 、鉄筋の許容応力度を 200N/mm^2 とした。まず、図3より、土被りHが10mのとき、曲げモーメント分布は縦潰れの挙動を示す。これは、小土被り

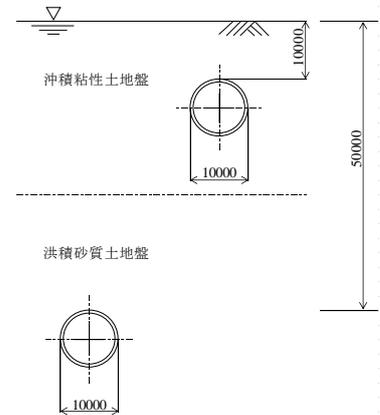
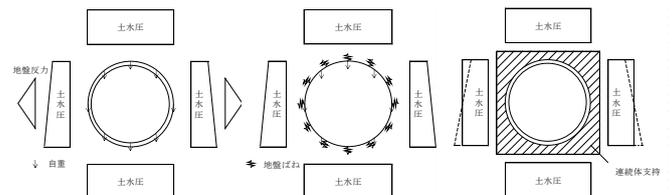


図1 試設計の対象地盤

表1 地盤およびセグメントの諸元

| 地盤の諸元 | | | |
|---|--------------------|------|-------|
| 土被り H (m) | 10 | 10 | 50 |
| N 値 | 1 | 5 | 50 |
| 側方土圧係数 λ | 0.8 | 0.5 | 0.35 |
| 静止土圧係数 K_0' | 0.75 | 0.65 | 0.50 |
| 地盤反力係数 k (kN/m^3) | 10 | 7000 | 50000 |
| ポアソン比 ν | 0.30 | 0.30 | 0.25 |
| 湿潤密度 γ_t (kN/m^3) | 16 | 16 | 19 |
| セグメントの諸元 | | | |
| 外径 D (m) | 10 | | |
| セグメント分割数 n | 8 | | |
| 幅 b (m) | 1.5 | | |
| 厚さ h (m) | 0.45 | | |
| ヤング率 E (kN/m^2) | 3.90×10^7 | | |
| 回転ばね定数 ($\text{kN} \cdot \text{m/rad}$) | 1.85×10^5 | | |



(1) 慣用計算法 (2) はりーばねモデル計算法 (3) Muir Woodの方法

図2 各種設計法で用いられる荷重-構造系

表 2 計算に用いた荷重値 (kN/m)

| 断面力算定法 | 試設計の対象地盤 | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 沖積粘性土地盤 (N 値=1) | | | | | 沖積粘性土地盤 (N 値=5) | | | | | 洪積砂質土地盤 (N 値=50) | | | | |
| | P ₁ | q ₁ | q ₂ | P _g | q _r | P ₁ | q ₁ | q ₂ | P _g | q _r | P ₁ | q ₁ | q ₂ | P _g | q _r |
| 慣用計算法 | 240.0 | 196.3 | 379.7 | 55.1 | - | 240.0 | 199.4 | 385.6 | 55.1 | 2.7 | 885.0 | 801.7 | 990.1 | 55.1 | 28.1 |
| はりばねモデル計算法 | 240.0 | 196.3 | 379.7 | 55.1 | - | 240.0 | 199.4 | 385.6 | 55.1 | - | 885.0 | 801.7 | 990.1 | 55.1 | - |
| Muir Wood の方法 | 240.0 | 326.3 | | - | - | 240.0 | 312.8 | | - | - | 1425.0 | 1196.3 | | - | - |

P₁: 鉛直荷重 q₁: 頂部水平荷重 q₂: 底部水平荷重 P_g: 自重反力 q_r: 水平直径点の地盤反力

表 3 最大断面力および断面照査結果 (N 値=1)

| 断面力算定法 | 最大正曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | | 最大負曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | |
|---------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|
| | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} |
| 慣用計算法 | 253 | 150.1 | 1295.4 | 4.2 | 5.6 | -53.7 | 180 | -187.4 | 1553.1 | 5.2 | 9.4 | -66.1 |
| はりばねモデル計算法 | 264 | 428.4 | 465.1 | 11.4 | 326.9 | -101.0 | 174 | -486.6 | 2414.8 | 13.1 | 129.2 | -151.5 |
| Muir Wood の方法 | 270 | 508.5 | 1202.2 | 13.7 | 293.1 | -136.5 | 180 | -508.5 | 1627.3 | 13.8 | 236.2 | -145 |

M_d: 最大曲げモーメント N: その位置の軸力 σ_c: コンクリートの曲げ応力度 σ_s: 引張鉄筋の曲げ応力度 σ_{s'}: 圧縮鉄筋の曲げ応力度

表 4 最大断面力および断面照査結果 (N 値=5)

| 断面力算定法 | 最大正曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | | 最大負曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | |
|---------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|
| | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} |
| 慣用計算法 | 255 | 170.9 | 1291.6 | 4.7 | 14.1 | -58.5 | 180 | -212.4 | 1575.9 | 5.8 | 19.0 | -72.4 |
| はりばねモデル計算法 | 174 | 143.4 | 1400.1 | 4.2 | 0.0 | -53.9 | 174 | -153.0 | 1888.3 | 4.9 | -9.2 | -64.8 |
| Muir Wood の方法 | 270 | 349.7 | 1206.3 | 9.5 | 151.4 | -101.2 | 180 | -349.7 | 1549.0 | 9.4 | 111.7 | -106.4 |

表 5 最大断面力および断面照査結果 (N 値=50)

| 断面力算定法 | 最大正曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | | 最大負曲げモーメント | | | 発生応力度 (N/mm ²) | | |
|---------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|------------|-----------------------|--------|----------------------------|----------------|-----------------|
| | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} | 位置 (deg.) | M _d (kN/m) | N (kN) | σ _c | σ _s | σ _{s'} |
| 慣用計算法 | 0 | 160.1 | 4097.3 | 7.9 | -51.1 | -109.3 | 250 | -127.8 | 4332.5 | 7.7 | -61.6 | -108.1 |
| はりばねモデル計算法 | 180 | 124.5 | 4111.1 | 7.4 | -57.8 | -103.1 | 304 | -127.5 | 4350.3 | 7.7 | -62.0 | -108.3 |
| Muir Wood の方法 | 180 | 334.0 | 5866.3 | 13.0 | -54.1 | -175.6 | 270 | -334.0 | 6834.7 | 14.3 | -73.1 | -194.5 |

の条件では鉛直土圧より側方土圧が大きくなることによる。また、表 3 より、N 値=1 における最大曲げモーメントの値は、はりばねモデルと Muir Wood の方法で近い値となり、断面耐力の照査では引張鉄筋が許容応力度を上回る値を示した。この条件が今回の試計算の中でセグメントの曲げ耐荷力が最も必要となった。次に、表 5 より、N 値=50 における発生断面力は、Muir Wood の方法で非常に大きな値となった。本来、Muir Wood の方法は自立性の高い地盤の支持効果を期待した計算法であり、地盤のリング効果による緩み土圧の再現に伴う断面力の低減が見込めるが、今回の試設計では想定に反する結果となった。このことから、Muir Wood の方法については、海外設計事例を調査し、計算方法の見直しをすることが必要であると考えている。

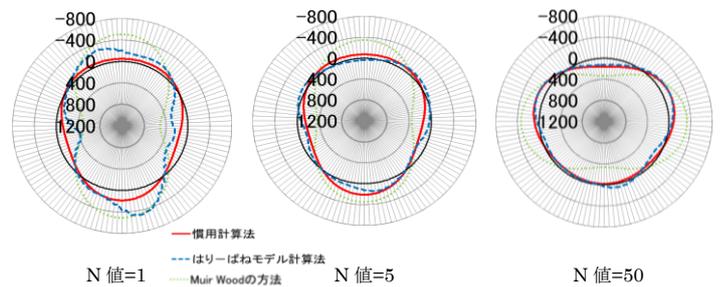


図 3 各対象地盤における曲げモーメント図 (kN・m)

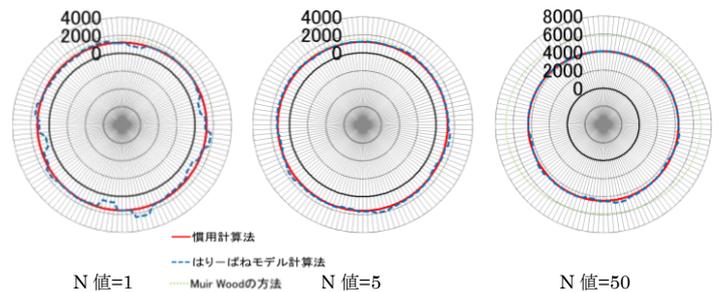


図 4 各対象地盤における軸力図 (kN)

3. 結論

- ・浅深度部の超軟弱地盤では、はりばねモデルと Muir Wood の方法で曲げ耐荷力が必要な結果で一致した。
- ・大深度部の硬質地盤では、Muir Wood の方法について再調査する必要がある。

【参考文献】

- 1) 土木学会: セグメントの設計 (改訂版), トンネルライブラリー23号, 2010.2
- 2) Muir Wood, A.M.: The Circular Tunnel in Elastic Ground, Geotechnique25, No.1, 1975

キーワード シールド工法

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 西早稲田キャンパス 51 号館 1608 室 TEL03-5286-3402