

Ⅲ-542

東京都心部の大深度地下における多目的トンネルに関する調査研究（その2）

— シールドトンネル覆工の合理的な設計法に関する一考察 —

早稲田大学 学生員 野本 雅昭

佐藤工業(株) 正会員 木村 定雄

西松建設(株) 正会員 小林 正典

早稲田大学 正会員 小泉 淳

1. はじめに

東京都市部の大深度地盤は、中浅深度地盤と比較して相当に自立性の高い地盤であると考えられる¹⁾。すなわち、中浅深度地盤は沖積層および上部洪積層がその主体であるが、深度が大きくなるにつれて下部洪積層、さらには固結度の高い粘性土層いわゆる土丹層がその主体をなす。このような地盤中にシールドトンネルを構築する場合、その覆工設計には周辺地盤の特徴を有効に活用することが望まれる。一方、わが国におけるシールド工法は、経済の高度成長時代を背景に大都市部の中浅深度地下におけるインフラ整備のためのトンネル構築法として急速に発展した。現行の覆工の設計法はこれらの状況を勘案して軟弱地盤を主な対象とし、設計の簡便性やトンネルの安全性を特に重視したものになっていると考えられる。このため、大深度の自立性が高い地盤中にトンネルを構築する場合には、現行の設計法をそのまま適用すること是不経済であり、周辺地盤の特性を適切に評価して、より合理的かつ経済的な覆工設計を行うことが求められる。本報告は以上のことを踏まえ、大深度地盤中にシールドトンネルを構築する場合の合理的な覆工の設計法を確立することを目的として、諸外国において用いられている各種設計法等による覆工の試算を行い、それらの結果を比較検討したものである。

2. 覆工の試算の対象地盤と覆工構造

覆工の試算は、図1に示す港南地区をその対象の地盤とした。港南地区は比較的浅い深度から固結粘性土層が出現する地域である。トンネル覆工は外径を10mとし、セグメントはコンクリート平板形を想定してその厚さは現状の実績から外径の4.5%とした。表1は試算の条件を示したものである。

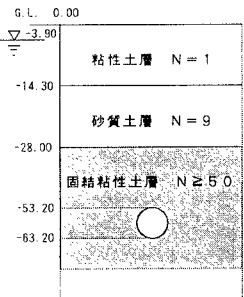


図1 対象地盤

表1 計算の条件

固結粘性土層の諸元	
変形係数 E (tf/m ²)	3.0×10^4
側方土圧係数 λ	0.4
ポアソン比 ν	0.3
覆工構造の諸元	
外径 D (m)	10
幅 b (m)	1.5
厚さ h (m)	0.45
セグメント率 E (tf/m ²)	3.5×10^4
回転ばね定数 (1m/rad)	1.0×10^4
90°間せん断ばね定数 (t/m)	1.0×10^{11}

3. 各種設計法の概要

覆工設計における断面力算定の計算法は種々あるが、代表的な計算法として図2に示す6種類とした。慣用計算法はわが国で最も多用されている現行の計算法である。はり一ばねモデルによる計算法は、地盤ばねの取扱い方の異なる部分地盤ばねモデルと全周地盤ばねモデルの2種類とした。前者は現行の計算モデルである。後者は新しく提案されている計算モデル¹⁾であり、覆工変形と周辺地盤の相互作用を覆工の全周にわたって配した地盤ばねにより評価したモデルである。

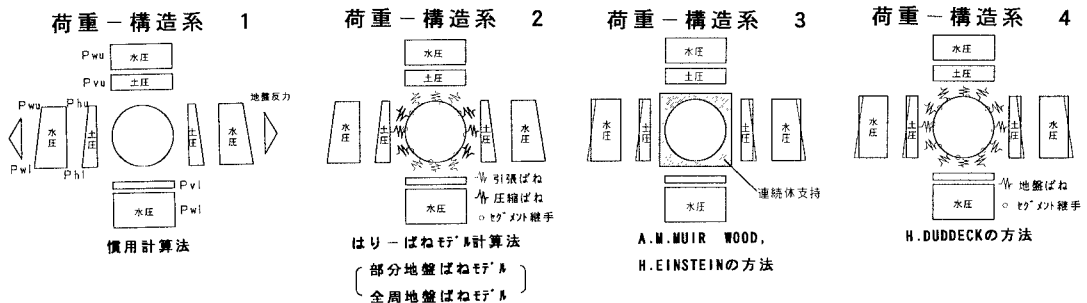


図2 各種設計法で用いられている荷重-構造系

なお、今回の計算では両者ともに接線方向の地盤ばねは考慮しないものとした。A. M. MUIR WOODおよびH. EINSTEINの方法^{2), 3)}は、イギリスにおいて多用されている計算法であり、半無限二次元弾性地盤中に剛性一様円環が存在する場合の解析解による方法である。両者の計算方法の違いはすべて明確にしていけないが、MUIR WOODの方法によると覆工の曲げ剛性の影響のみ考慮し、EINSTEINの方法では軸剛性の影響をも考慮しているようである。また、これらの解は地盤と覆工との境界においてトンネルの接線方向のせん断力が完全に伝達される場合(no-slip)とされない場合(full-slip)とが得られている。H. DUDDECKの方法⁴⁾は、ドイツにおいて採用されている計算法である。覆工に直接作用する荷重は、側方土圧係数 λ や地盤のポアソン比 ν を一定($\lambda=0.5$, $\nu=1/3$)としてEINSTEINの方法と同じ考え方で算定している。また覆工に生じる断面力の算定は、覆工を剛性一様円環またはセグメント継手の剛性低下を考慮したリング等にモデル化し、覆工変形と周辺地盤との相互作用を地盤ばね(半径方向の圧縮と引張のばね定数は同じ値、接線方向の地盤ばねは考慮しない)により評価して行っている。今回の計算ではそれらの覆工モデルのうち、セグメント継手を回転ばねにモデル化(はり一ばねモデルと同じ方法)する方法を採用し、さらに千鳥組み効果によるリング間の力の伝達もはり一ばねモデルと同様に考慮した。荷重は土水分離を基本として、ゆるみ土圧(換算ゆるみ高さ $2D$, D :トンネル外径とした)の場合と全土被り土圧の場合の2種類とした。表2は各種計算法に用いた荷重値を示したものである。なお、欧州諸国において荷重の算定は、no-slipの場合(覆工に生じる軸力が大きく計算される方法)を一般的に採用しているようである。

表2 計算に用いた荷重値

解 析 方 法	荷 重 条 件											
	ゆるみ土圧+水圧 (tf/m)						全土被り土圧+水圧 (tf/m)					
	P_{vu}	P_{vi}	P_{hu}	P_{hi}	P_{wu}	P_{wi}	P_{vu}	P_{vi}	P_{hu}	P_{hi}	P_{wu}	P_{wi}
慣用計算法	24.30	9.30	9.72	14.58	73.95	88.95	70.49	55.49	28.20	33.06	73.95	88.95
全周地盤ばね β 計算法	24.30	9.30	9.72	14.58	73.95	88.95	70.49	55.49	28.20	33.06	73.95	88.95
部分地盤ばね β 計算法	24.30	9.30	9.72	14.58	73.95	88.95	70.49	55.49	28.20	33.06	73.95	88.95
A. M. MUIR WOODの方法	24.30	9.30	12.15	—	—	—	31.45	70.49	55.49	30.63	—	—
H. EINSTEINの方法	24.30	9.30	12.15	73.95	88.95	81.45	70.49	55.49	30.63	73.95	88.95	81.45
H. DUDDECKの方法	24.30	9.30	12.15	73.95	88.95	81.45	70.49	55.49	30.63	73.95	88.95	81.45

(注) P_{vu} : 低側動土圧 P_{vi} : 低側静土圧 P_{hu} : 上側動土圧 P_{hi} : 上側静土圧 P_{wu} : 環周水圧 P_{wi} : 環周水圧 $P_{\beta u}$: 側方土圧
 $P_{\beta i}$: 側方土圧中心位置における水圧

表3 計算の結果(最大値)

解 析 方 法	荷重・構造系の種類	地盤と覆工の境界条件(接線方向)	地盤ばね定数 (tf/m)	荷 重 条 件					
				ゆるみ土圧+水圧			全土被り土圧+水圧		
				曲げモーメント (tf-m)	軸力 (tf)	変位量 (cm)	曲げモーメント (tf-m)	軸力 (tf)	変位量 (cm)
慣用計算法	1	—	3000	21.71	473.58	—	94.87	690.95	—
			5000	19.11	475.19	—	76.81	691.74	—
全周地盤ばね β 計算法	2	—	圧縮ばね:5000 引張ばね:3000	11.39	452.09	0.19	36.78	647.24	0.58
部分地盤ばね β 計算法	2	—	圧縮ばね:5000 引張ばね:0	30.30	483.26	0.56	83.81	725.58	1.22
A. M. MUIR WOODの方法	3	no-slip	—	6.42	491.05	0.12	21.07	696.17	0.40
		full-slip	—	7.66	469.16	0.14	25.15	624.34	0.47
H. EINSTEINの方法	3	no-slip	—	2.54	459.61	0.13	17.66	663.74	0.43
		full-slip	—	3.01	451.46	0.14	20.97	607.01	0.49
H. DUDDECKの方法	4	no-slip	6000	2.56	431.11	0.12	17.56	612.75	0.37
		full-slip	3000	6.34	464.24	0.17	40.04	634.74	0.69

4. 試算結果とその考察

計算結果のうち、覆工に生じる曲げモーメント、軸力および変位量の最大値を示したのが表3である。今回の試算では、土圧に比して水圧が相当に卓越しており、鉛直荷重と水平荷重の差は大きくない。このことから、特に欧州諸国の計算法によると曲げモーメントが相当に小さくなる傾向にある。軸力は慣用計算法の結果がno-slipの場合とfull-slipの場合の結果のほぼ中間的な値となっている。一方、全体的にみて、全周地盤ばねモデルによる方法の計算結果は、曲げモーメントおよび軸力ともに慣用計算法と欧州諸国の方法の計算結果のほぼ中間に位置している。以上から、その自立性が高い大深度地盤中では、トンネルの周辺地盤の力学特性を評価して覆工の断面力算定を行えば、覆工には軸力が主体的に生じるものと考えられる。

5. おわりに

ここで報告した内容は、早稲田大学理工学総合研究センターにおける民間6社との共同プロジェクト『大深度地下インフラに関する調査研究』の研究成果の一部である。また、はり一ばねモデルの計算結果は解析コード「MOLEMAN2」によるものである。

【参考文献】

- 1) 木村, 五十嵐, 小泉: トンネル覆工に作用する土圧と覆工変形の相互作用に関する模型実験, トンネル工学研究発表会, vol. 4, p. p. 47~54, 1994. 11.
- 2) A. M. MUIR WOOD: The circular tunnel in elastic ground, Geotechnique 25, No. 1, p. p. 115~127, 1975
- 3) H. EINSTEIN: Simplified analysis for tunnel supports, Proc. ASCE, GT4., 1979.
- 4) H. DUDDECK: Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein, DIE BAUTECHNIK, 1980. 10.