

全周地盤ばねモデルを用いたセグメント設計の合理化に関する研究

A consideration of the rational design method for the shield tunnel lining

木村 定雄*, 渡邊 誠司**, 小泉 淳***

Sadao KIMURA, Seiji WATANABE, Atsushi KOIZUMI

When shield tunnel is constructed in the deep underground which is a stiff and reliable ground comparatively it is uneconomical to apply the usual design method of tunnel lining as it is.

The lateral loading model tests are carried out to rationalize the design method for the shield tunnel lining. Two types of analyses are used to evaluate the ground reaction at invert. One analysis treat it as uniform load and the other treat it by ground spring.

From the analyses, result of the tests are in the middle of these analyses.

Keywords : shield tunnel, deep underground, design of tunnel lining, ground reaction

1. はじめに

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して、主に沖積平野上に広がる大都市部の中浅深度地盤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。現行の覆工設計では、これらの状況を勘案して軟弱な地盤を主な対象とし、設計法の簡便性やトンネルの安全性を特に重視した荷重や覆工の構造モデルを用いている。これがいわゆる慣用計算法である。慣用計算法によると、トンネル上方や周辺に位置する地盤をすべて荷重評価の対象として考え、テルツァーギ (Terzaghi) の緩み土圧 (地山安定の極限平衡論) などの土圧理論に基づいて覆工に作用する土圧を求めている。またセグメントリングのモデル化は、それを剛性が様な円環とみなし、個々のセグメント継手やリング継手の取り扱いを簡便化している。

一方、わが国で用いられている断面力計算法の一つに“はり-ばねモデルによる計算法”がある。これはセグメント継手やリング継手の構造を現実に近い形で評価したものであり、さらに地盤をウィンクラー (Winkler) の仮定に従う弾性ばね (受動的な地盤ばね) でモデル化 (部分地盤ばねモデル) してセグメントリングの変形に伴う抵抗土圧を評価したものである。この計算法は軟弱な粘性土地盤からよく締まった砂質地盤まで、大口径のトンネルを中心に現在までにある程度の実績を有し覆工の設計法として有用なものと考えられる。

しかしながら、最近のトンネル施工の計測結果によると、自立性の高い地盤ではセグメントに作用する土圧は設計時に想定した土圧より相当に小さいという例も報告されており、土被りや適用する地盤に応じたより合理的なセグメントの設計法の確立が望まれている。そこで、筆者らはある程度の土被りを有し (2D程度以上, D:セ

* 正会員 工修 佐藤工業(株) 技術本部 土木技術部

** 学生員 早稲田大学大学院 理工学研究科

*** 正会員 工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科

グメントリング外径)自立性の高い地盤においては、トンネルがその内空側に変位し地盤が主働側となるセグメントの変形部位についても主働的地盤ばね(引張ばね)を配して地盤と覆工との相互作用を考慮した全周地盤ばねモデルを用いたセグメントリングの断面力算定法に関する基礎的研究を行ってきている²⁾。

これまでの研究においては覆工の底部に作用する地盤反力(以下底部地盤反力と呼ぶ)は現行の断面力算定法とほぼ同様に頂部鉛直土圧、水圧に対する反力として等分布荷重にモデル化してきた。しかしながら地盤ばねで評価される土圧はトンネル覆工の変形に従属して定まる荷重であるとする底部地盤反力を地盤ばねを用いて評価する方法も考えられる。本報告はトンネル模型を用いた実験およびその解析を行い、全周地盤ばねモデルにおける底部地盤反力の評価方法について考察したものである。

2. 底部地盤反力の考え方

わが国のシールドトンネル覆工の断面力算定法には慣用計算法、修正慣用計算法およびはりばねモデルによる計算法などがある。これらの断面力算定法で用いる荷重のうち、トンネル底部に作用させる荷重はトンネル頂部に作用する荷重(土圧、水圧等)とトンネル覆工の自重に対する等分布反力として評価されてきた(図1 a)参照)。

一方、この底部地盤反力の評価方法には、それがトンネル覆工の剛体的移動や断面変形に伴う地盤反力として考え、地盤をばねでモデル化して取り扱う方法もある。図2 b)はトンネル周辺の地盤を覆工の極座標系に関する地盤ばねでモデル化して底部地盤反力を評価したものである(以下、これを地盤ばね反力の方法と呼ぶ)。

今回、これら両者の評価方法の中間的な考え方としてトンネル覆工の剛体移動によって生じる地盤反力とトンネル覆工の変形によって生じる地盤反力とを分け、前者に注目して、これを等分布する荷重に評価することを考えた(以下、これを等分布剛体反力の方法と呼ぶ)。この方法は図2 a)に示すように、

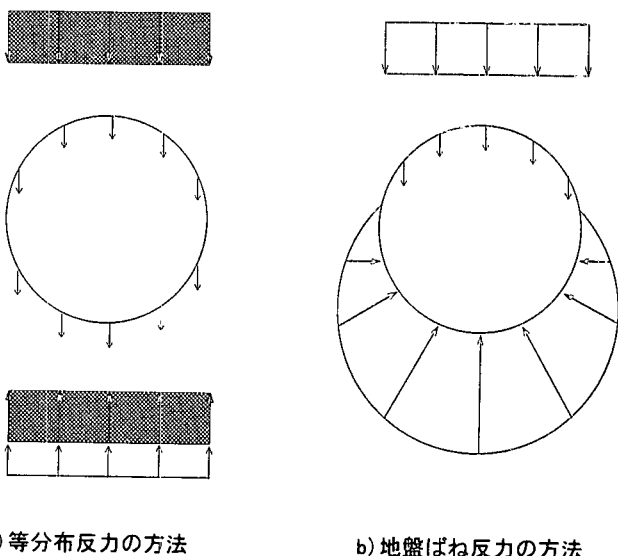


図1 地盤反力の分布

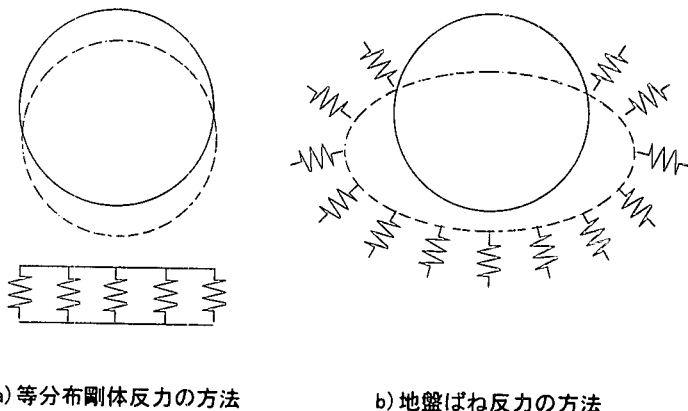


図2 地盤ばねによる地盤反力のモデル化

トンネル周辺の地盤を全体座標系の鉛直方向に関する地盤ばねにモデル化してトンネル覆工の剛体変位に伴う地盤反力を評価するものである。

3. 模型実験およびその解析

3. 1 実験概要

実験に用いた土槽、載荷装置および計測機器の概要を図3に示す。トンネル横断面内の挙動を把握するために、トンネル縦断方向の影響を排除し、それらの挙動が平面ひずみ状態となるように考え、模型地盤とトンネル模型のモデル化を行った。模型地盤は豊浦標準砂を用いて高さ60cmから撒き出して作成した。実験に用いた各種物性値を表1に示す。地盤の物性値はトンネル模型を埋設しない砂地盤のみの載荷実験を行った従来の研究²⁾と同様の方法により求めた。トンネル覆工の模型としては土圧により横断面内に変形が生じないものとして銅管を、また変形が生じるものとしてアクリル管を用いた。

載荷は地盤が弾性的挙動を示す範囲で可動載荷板を一方向（A u方向）から押し込むことにより行った。実験に用いた各種物性値については表1に示す。

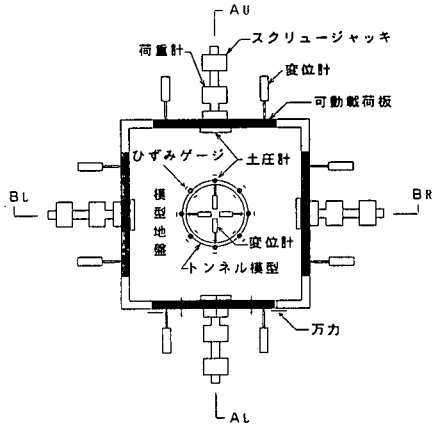


図3 実験装置および計測項目の概要

3. 2 解析手法

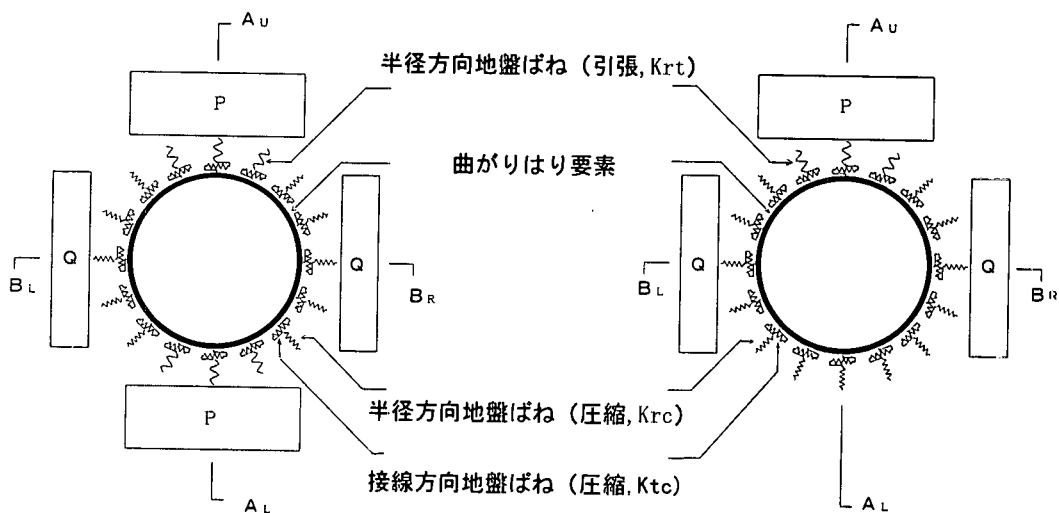
解析は実験におけるトンネル模型（アクリル管）の挙動をシミュレーションしたものである。図4は解析に用いた荷重－構造モデルであり、底部地盤反力を、a)等分布荷重として評価する方法（等分布反力の方法）とb)極座標系の地盤ばねで評価する方法（地盤ばね反力の方法）とにより評価したものである。なお解析に用いた模型地盤やトンネル模型の物性値は表1に示すとおりであり、これらの値は実験から求めている。また、荷重条件は表2に示したとおりである。

表1 実験条件

地盤			
主働側ばね定数Krt		2. 71 kgf/cm ³	
受働側ばね定数Krc		5. 17 kgf/cm ³	
変形係数 E		75. 3 kgf/cm ³	
ポアソン比 ν		0. 25	
トンネル模型の諸元（アクリル管）			
外径	20cm	厚さ	0. 3cm
幅	40cm	ポアソン比	0. 36
ヤング率		3. 27×10 ⁴ kgf/cm ²	

表2 荷重条件

荷重	
P	11.5 kgf/cm
Q	0.617 kgf/cm



a) 等分布反力の方法

b) 地盤ばね反力の方法

図4 荷重-構造系モデル

3. 3 実験結果と解析結果との比較

等分布反力の方法および地盤ばね反力の方法によるそれぞれの解析（なお、この解析では接線方向の地盤ばねは考慮していない）結果と実験結果を図5に示す。

図5の曲げモーメント図を見ると実験値は等分布反力の方法と地盤ばね反力の方法の中間的な値となることがわかる。また軸力についても曲げモーメントとほぼ同様の傾向を示している。これらのことから底部地盤反力は等分布荷重すなわちアクリル管を剛体とみなした時のその移動にともなう地盤反力（全体座標系の A_U - A_L 方向の地盤ばねで評価するものと等価）の影響のみではなく覆工の横断面内の変形（極座標系の半径方向の地盤ばねで評価するものと等価）の影響も受けるものと考えられる。

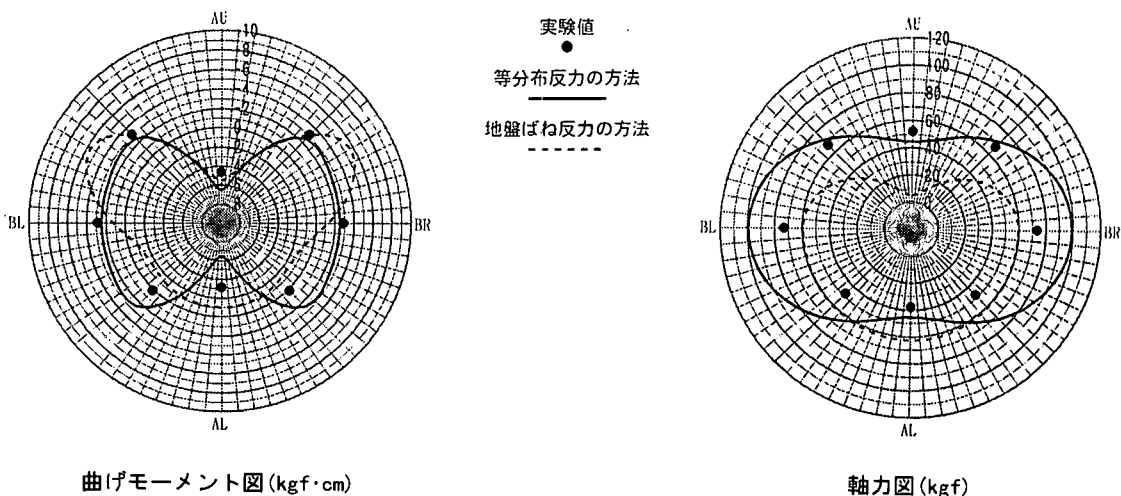


図5 実験結果および解析結果

4. 底部地盤反力の評価方法に関する考察

前述のとおり実験値は等分布反力の方法と地盤ばね反力の方法との中間的な値となることから、トンネル底部の等分布荷重の大きさが頂部と等しい場合から0になるまでを5等分してそれをパラメーターとした断面力の感度解析を行った。また、覆工が剛体的な移動を起こす場合には、覆工と地盤との間の摩擦による接線方向の力の伝達がなされる可能性が考えられるため、接線方向の地盤ばねを考慮した場合の解析も行った。接線方向の地盤ばね (K_{tc}) のばね定数はこれを適切に評価することが困難であることから、半径方向の地盤ばね (K_{rc}) のそれと同じものを用いる場合とその1/3の値を用いる場合の2種類について検討した。表3は感度解析に用いた荷重および接線方向の地盤ばね定数を示したものである。

感度解析結果のうち、曲げモーメント（正曲げ、負曲げ）、軸力、変位の最大値を図6～図9に示す。

図6より正曲げは頂部と底部の等分布荷重の大きさが等しい現行の断面力算定法は安全側の値を与えることがわかる。等分布荷重の割合が0に近づくにつれて接線方向の地盤ばねを考慮しない場合は正の曲げモーメントの最大値は小さくなるが、その差は最大で約15%である。また、図7より負の曲げモーメントは、底部等分布荷重が0の時は正の曲げモーメントより絶対値が大きくなる場合があることがわかる。

表3 感度解析条件

接線方向の地盤ばね定数			
Ktc=Krc		5.17 kgf/cm ³	
Ktc=Krc/3		1.72 kgf/cm ³	
荷重 kgf/cm			
PL/P u	Pu	PL	Q
1	11.5	11.5	0.617
0.8	11.5	9.17	0.617
0.6	11.5	6.88	0.617
0.4	11.5	4.58	0.617
0.2	11.5	2.29	0.617
0	11.5	0	0.617

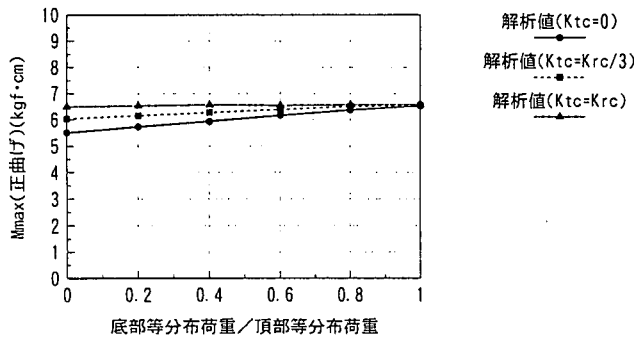


図6 感度解析(正の曲げモーメント)

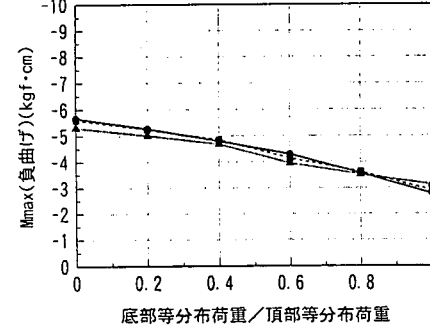


図7 感度解析(負の曲げモーメント)

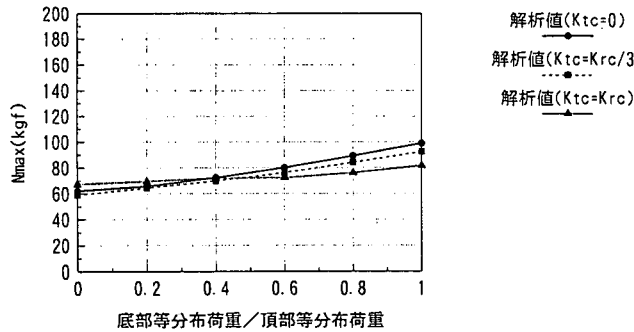


図8 感度解析(軸力)

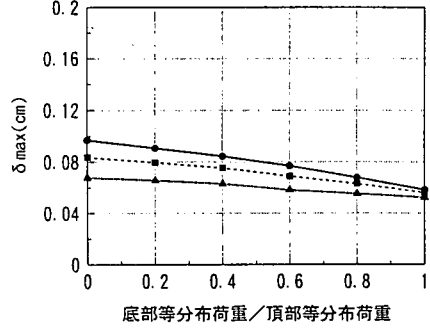


図9 感度解析(変位)

図8より軸力は接線方向の地盤ばねを考慮する場合の方がそれを考慮しない場合よりも底部の等分布荷重の大きさによる差が生じにくい、考慮しない場合でも最大値の差は約35%であることがわかる。

今回実施した実験およびその解析から全周地盤ばねモデルにおける底部地盤反力は等分布反力による方法と地盤ばね反力による方法の中間的な方法により評価することが望ましいと考えられる。

5. おわりに

本研究により得られた知見を挙げると以下のとおりである。

- (1)全周地盤ばねモデルにおける底部地盤反力は模型実験およびその解析結果から等分布反力による方法と地盤ばね反力による方法の中間的な方法により評価することが望ましいと考えられる。
- (2)覆工が剛体的移動を起こす場合には、覆工と地盤との間で摩擦による接線方向の力の伝達が行われ、覆工に生じる軸力に影響を与える。
- (3)等分布反力の方法を用いると正の曲げモーメントが大きく得られる。

今回の模型実験では、トンネル覆工が受ける地山からの荷重を土槽の載荷板を押し込むことによりモデル化した。これは、覆工の変形や移動に伴う土圧をどのように評価するかという観点からすると合理的な方法であると考えられるが、実際のシールドトンネルは、重力の影響を受ける地山中に構築されること、またその施工時に裏込め注入等の各種の不確定要因の影響を受けることなどから、ここで得られた知見を覆工の設計に直接反映するのには無理がある。

今後、得られた知見をもとに実際のトンネルにおける計測データとの検証を行い、自立性の高い地盤中の合理的な覆工設計の考え方を追求していく予定である。

【参考文献】

- 1) たとえば新堀, 清水: 施工10年後のセグメント応力測定結果, トンネル工学研究発表会 論文・報告集, 第2巻, p. p. 79~82, 1992. 10.
- 2) たとえば木村, 野本, 渡邊, 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-相互作用を評価する地盤ばねについて-, トンネル工学研究 論文・報告集, 第5巻, p. p. 71~78, 1995. 11.
- 3) たとえば木村, 野本, 小泉: 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, トンネル工学研究 論文・報告集, 第5巻, p. p. 373~378, 1995. 11