

地中アーチにより補剛されたシールド トンネルの力学的挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Dynamic Behavior of Shield Tunnel
Reinforced with Arched Structures

池谷衛¹・川合佑一²・今中康貴³・小泉淳⁴

Mamoru Iketani, Yuichi Kawai, Yasutaka Imanaka and Atsushi Koizumi

¹学生会員 早稲田大学大学院 修士2年 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院 修士1年 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³正会員 ㈱大林組東京本社 首都高新宿 JV 工事事務所

⁴正会員 工博 早稲田大学教授 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

In greater Tokyo, there are plans to construct new belt highway and ring road to reduce terrible traffic congestion in the urban area. But it is difficult to construct them because there is so much infrastructure which was constructed over past years above ground and shallow underground. It is necessary of using the deep underground, and we must construct connecting sections of tunnel without cut and cover method. The highway needs long changing lanes, so new a construction method that stabilizes tunnel structure of connecting section without obstructive pillars is required. The objective of this research is to propose this new method, reinforcing shield tunnel with transverse arched structures and ground anchors without pillars in the connecting section, and analyze dynamics behavior of this compound structure.

Key words : *shield tunnel, beam-spring model, arched reinforcement, deep underground*

1. はじめに

都心部の慢性的な渋滞を緩和するため、外郭環状道路や首都高速道路環状線等の環状道路の整備が計画されている。しかし、計画区間が都心部ということで、地上や浅深度地下はすでに多くの建物や各種のインフラ構造物により占拠されている現状を考えると、これらの建設は大深度地下空間を利用することになり、非開削工法、とくにシールド工法の適用が不可欠となる。現在、長い併走区間が必要となる道路トンネルの分岐部や合流部において、支柱を用いずにトンネルの空間を構造的に安定な状態で確保する技術の開発が求められている。

本研究は、2本のシールドトンネルの外側の土中

にアーチ構造物を設け、両トンネルの中間の連結部を支柱によって支える代わりに、トンネル下部はグラウンドアンカーで固定し、トンネル上部はケーブルで吊ることにより、トンネル連結部の構造的な安定性を確保する技術¹⁾の提案を目的としている。

本研究では力学模型を用いた実験およびその解析を行ない、地中に設けたアーチでトンネルを吊るという特殊な構造をもつトンネルの力学特性の把握を目指すものである。結果として、地中アーチによるトンネル部の断面力の低減効果が確認でき、このような技術が実現可能であれば、有効な技術となりうることを、その解析に、「はり-ばねモデル計算法」を用いることができることなどを示した。

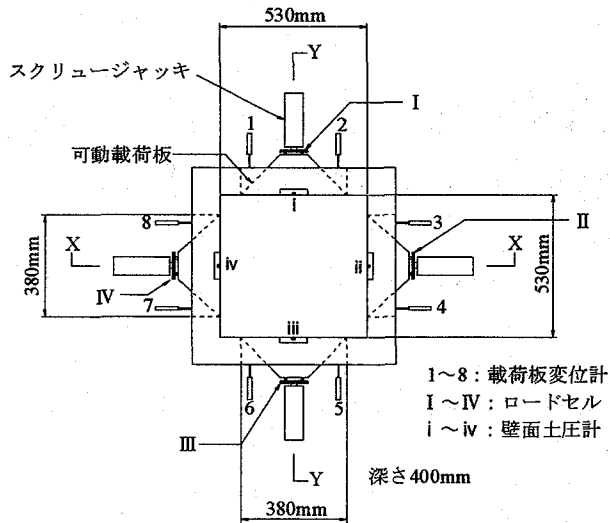


図-1 土槽の概要

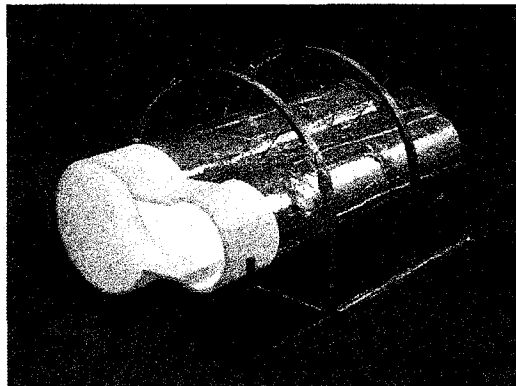


図-2 実験模型の外観図

2. 模型実験

(1) 概要

図-1 は本実験に用いた土槽を上から見た状況と各計測器の配置を示したものである。この土槽は、側面に設けられた載荷板をスクリージャッキによって制御することで水平方向、鉛直方向の二軸の載荷および除荷を行うことができるものである。この土槽はトンネル横断面内の力学的挙動を把握するための実験装置であり、重力の影響は考慮していない。また、土槽の外形は事前のFEM解析により載荷重による土中の応力伝播が端部の拘束によって影響を受けることがなく、無限地盤と同様の応力伝播を表現できるように設計されたものである²⁾。なお、供試体は図-1のX-Y平面上に、横断面がくるように設置される。

(2) 模型実験に用いた供試体³⁾

a) トンネル模型

トンネル模型供試体は、本実験で用いる土槽の大

表-1 トンネル模型の諸元

	トンネル模型	
	本線	ランプ
材質	高密度ポリエチレン	高密度ポリエチレン
外径 (mm)	141	91.5
内径 (mm)	133	83.5
1 リングの長さ (mm)	100	
厚さ (mm)	4	
断面積 (mm ²)	400	
断面二次モーメント (mm ⁴)	533	
弾性係数 (N/mm ²)	1567	
曲げ剛性 (N・mm ²)	8.35×10 ⁵	
軸剛性 (N)	6.27×10 ⁵	

表-2 アーチ模型の諸元

	アーチ模型		
	アーチ部	グラウンド部	基盤部
材質	SS400	SS400	SS400
断面積 (mm ²)	60	60	60
断面二次モーメント (mm ⁴)	1.80×10 ²	1.80×10 ²	1.80×10 ²
弾性係数 (N/mm ²)	2.10×10 ⁵	2.10×10 ⁵	2.10×10 ⁵
曲げ剛性 (N・mm ²)	3.78×10 ⁷	3.78×10 ⁷	3.78×10 ⁷
軸剛性 (N)	1.26×10 ⁷	1.26×10 ⁷	1.26×10 ⁷

表-3 吊材の諸元

材質	黄銅
直径 (mm)	1.4
断面積 (mm ²)	1.54×10 ⁻²
断面二次モーメント (mm ⁴)	1.89×10 ⁻¹
弾性係数 (N/mm ²)	9.60×10 ⁴
曲げ剛性 (N・mm ²)	2.08×10 ⁴
軸剛性 (N)	1.69×10 ³

きさと載荷条件とを考慮し、従来の研究⁴⁾で検討したモデルをもとに縮尺約 1/80 で作成した。また、予備解析の結果から、弾性範囲内で適度な変形を得られる供試体の材料として高密度ポリエチレンを用いている。トンネル模型は4リングからなり、セグメント継手やリング継手の剛性は評価せず、セグメントリングを剛性一様なリングにモデル化した。表-1はトンネル模型の諸元を、図-2は実験模型の外観を示したものである。

b) アーチ模型

本実験で使用した土槽に載荷できる最大土圧応力(=60kN/m²)においても、その影響はほとんど無視でき、アーチ自体も大きく変形しないような材質として鋼材 SS400 を使用した。アーチ部の半径は140mm、幅は10mmである。表-2はアーチ模型の諸元を示した表である。

c) 吊り材

吊り材には端部をねじ切り加工した黄銅を使用し、トンネル部とアーチ部との接続にはφ=3 mmの六角ナットを用い、両者を結合させている。表-3は吊

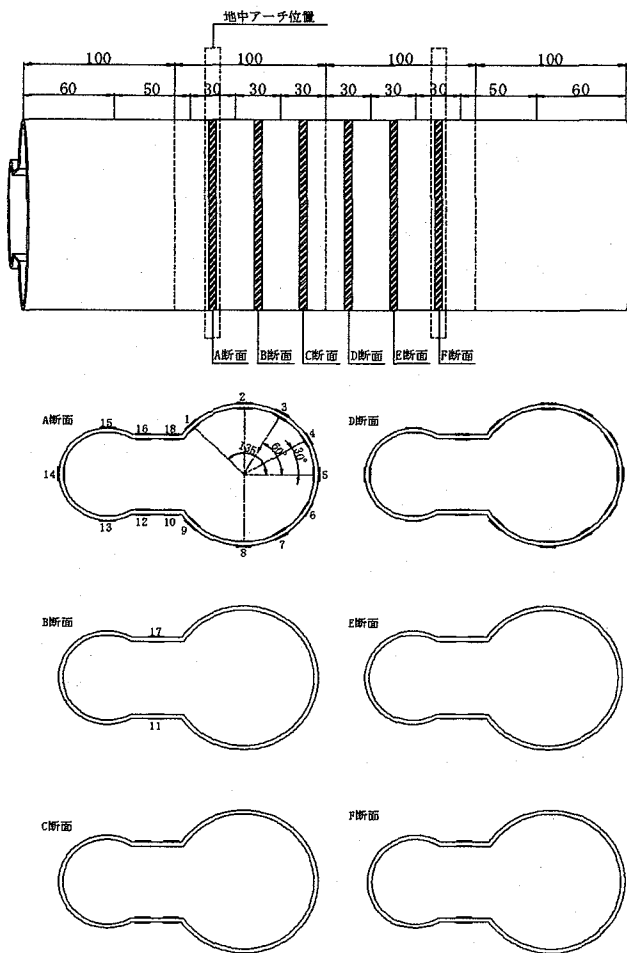


図-3 トンネル断面におけるひずみの計測位置

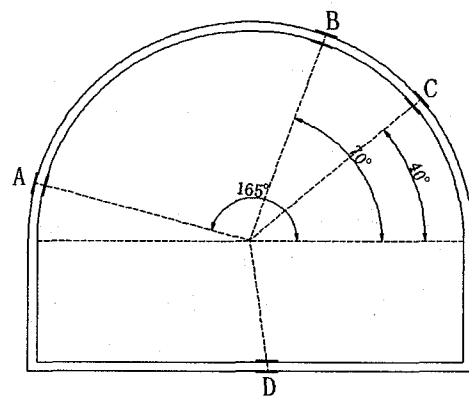


図-4 地中アーチ断面におけるひずみの計測位置

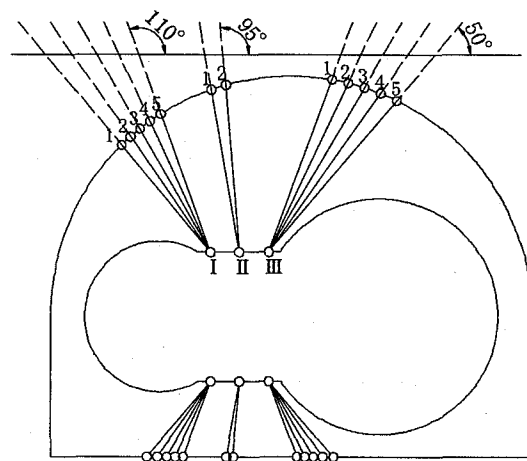


図-5 吊り位置検討図

部材の諸元を示したものである。

d) 接続部

吊り材とトンネル模型との接続部は、トンネル部のポリエチレンに径 2mm の穴を開け、その穴にねじ山をつけた吊り材を通し、最後にトンネル模型の外からナットをつけて抜けないようにしている。

(3) 計測位置

本実験は、実験模型を土槽の所定の位置に設置し、二軸応力を作用させてトンネル横断方向および縦断方向、地中アーチの横断方向のひずみを計測するものである。ひずみの計測位置を図-3、図-4 に示す。また接続部では、ひずみゲージの寸法上の制約から最大で二箇所しか計測できないため、図-3 に示すようにトンネル中央から等距離に位置する断面に千鳥に配置することで、三箇所のデータを得られるようにした。

効果的な吊り材の吊り位置および吊り角度の選定を行うために、予備的な解析を行った。その結果、

吊り位置の候補は図-5 に示すように定めた。

(4) 吊り位置および吊り角度の検討

a) 予備解析の概要

つぎに吊り位置の最適な組み合わせを選定するために、以下のステップで解析を行った。

Step 1: 地中アーチ部の吊り位置の組み合わせを任意に決める。(I-1, II-2, III-3 を選択した場合、1-2-3 と表示する)

Step 2: 解析結果から吊り材が応力を分担しており、トンネル部の断面力がもっとも効果的に低減できる組み合わせを選定する。

なお、地中アーチの吊り角度を左から順に以下のように名前をつける。それぞれ、 5° 刻みで角度をつけ、数字をふってある。

吊り位置①：ランプ側の接続部との連結部
I-1, I-2, I-3, I-4, I-5

吊り位置②：接続部の中央部

Ⅱ-1, Ⅱ-2

吊り位置③：本線側の接続部との連結部分

Ⅲ-1, Ⅲ-2, Ⅲ-3, Ⅲ-4, Ⅲ-5

本実験ではなるべく偏った断面力を発生さないように、上下方向で対称の吊り方とした。

b) 予備解析結果と吊り位置および吊り角度

予備解析結果から、Ⅲの吊り位置を固定してⅠ、Ⅱの吊り位置を変化させた場合に、吊り材に生ずる軸力にはほとんど変化がみられないことがわかった。

一方、Ⅲの吊り位置を変化させるとトンネル断面に発生する断面力が大きく影響を与えることが確認された。そこで、以下の点を考慮して最適な吊り位置を選定した。

①吊り材すべてが負担する軸力が大きくても、トンネル本線部側の吊り材に軸力が集中し、安定性が保てない可能性が考えられる。したがって、各吊り材の応力負担が均等になるような組み合わせを選定する。

②一般に、セグメントは軸力よりも曲げモーメントを対象として設計されている。このことからトンネル部に発生する曲げモーメントがより低減される組み合わせを選定する。

これらの検討の結果、図中に示す 3-2-3 を最適な吊り位置の組合せとして選定し、この組合せを本実験に用いることとした⁹⁾。

(5) 実験ケース

実験はトンネル模型のみの実験と地中アーチ模型により補剛されたトンネル模型の実験との2ケースを行った。

(6) 載荷方法

載荷は二軸の同時載荷で行った。これは、過去の実験研究⁶⁾から本実験で用いる土槽の条件下において、トンネル部の挙動をより明確に把握できる載荷方法であり、本研究に適していると判断したためである。トンネル模型に作用させる最終目標荷重は鉛直方向荷重、 $P_v = 15 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 、水平方向荷重、 $P_h = 7.5 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ とし、両方向の荷重比を $P_h/P_v = 0.5$ を保ちながら載荷した。また、載荷による地盤への応力伝播が十分に行われ、各種の計測機器が安定した値となるように、所定の載荷を終えてから、60秒後に計測を行っている。載荷板の変位速度は鉛直方向のスクリージャッキを 0.13mm/分 、水平方向のスクリージャッキを 0.26mm/分 とした。

最終載荷の値は予備解析から、トンネル模型が塑性変形を起こさず、一方、十分にその力学的挙動を

把握することができる計測値が得られる値として定めた。

3. 解析方法

(1) 解析の概要

解析には「はりばねモデル計算法」を用いた。これはトンネル覆工を円弧ばりまたは直線ばりなどのはり要素にモデル化し、セグメント継手を曲げモーメントに対する回転ばねで評価するとともに、リング継手をせん断ばねで評価して千鳥組による添接効果を表現するものである。継手部の剛性低下や千鳥組による力の伝達を種々のばねにモデル化することで、リングの組み方や継手位置などの影響を任意に考慮でき、セグメントリングの構造を詳細に表現できるという特長がある^{7) 8)}。

また、トンネルの変形に伴う地盤と覆工との相互作用は、Winkler の仮定にもとづく地盤ばねで評価している^{9) 10)}。慣用計算法と異なり、任意の位置で地盤反力の影響を構造系に組み込めるため、トンネルの挙動を的確に評価できる。本研究で使用した解析プログラム「MOLEMAN-10 Ring Version」¹¹⁾ は、この「はりばねモデル計算法」にもとづくものである。

(2) 解析条件

解析モデルは実験模型をできるだけ忠実に表現できるように考えた。本実験には剛性一様な模型を用いているため、セグメント継手の回転ばね定数およびリング継手のせん断ばね定数は、数値解析上無限大となる値を設定した。また、解析に用いた諸元は材料の力学特性試験から得られたものである。

表-4 模型地盤の特性値

地盤材料	豊浦標準砂
相対密度 (%)	84.4
地盤反力係数 $K_g \text{ (MN/m}^3\text{)}$	60.29
側方土圧係数 λ	0.338
ポアソン比 ν	0.253
変形係数 $E \text{ (MN/m}^3\text{)}$	13.12

(3) 地盤反力係数

地盤ばねを節点における集中ばねと考える場合には、節点間の分担幅を考慮して設定する必要がある。半径方向は引張を無視した弾塑性ばね、接線方向は弾性ばねとして、そのばね定数は半径方向の $1/3$ と

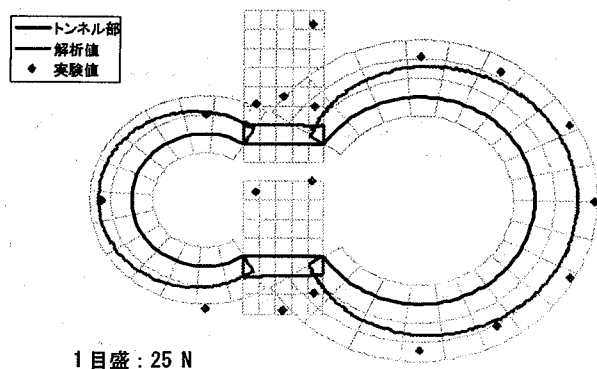


図-6 軸力比較図 (トンネルのみの実験)

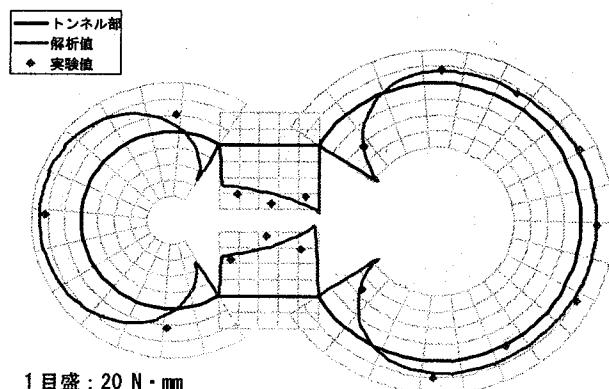


図-7 曲げモーメント比較図 (トンネルのみの実験)

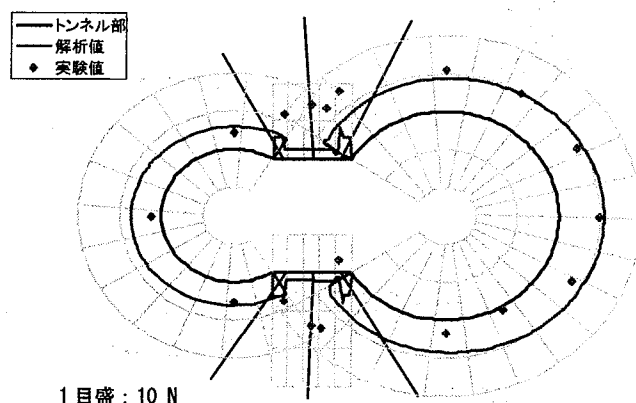


図-8 軸力比較図 (断面 A-F)

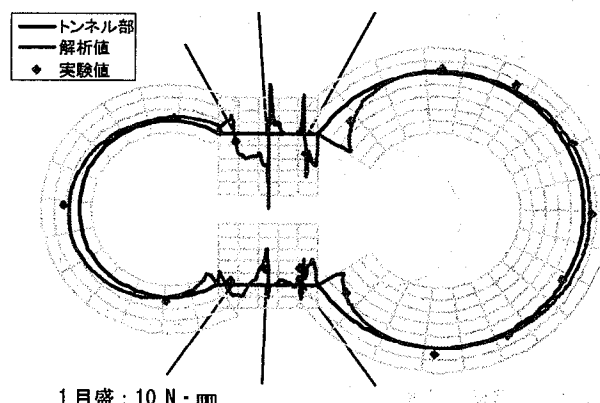


図-9 曲げモーメント比較図 (断面 A-F)

した。また、主働側の地盤ばね定数は受動側のばね定数の 1/2 とした²⁾。

地盤反力係数は試験により求めた値を用いた。表-4 は模型地盤の特性値を示した表である。

4. 実験結果と解析結果との比較および考察

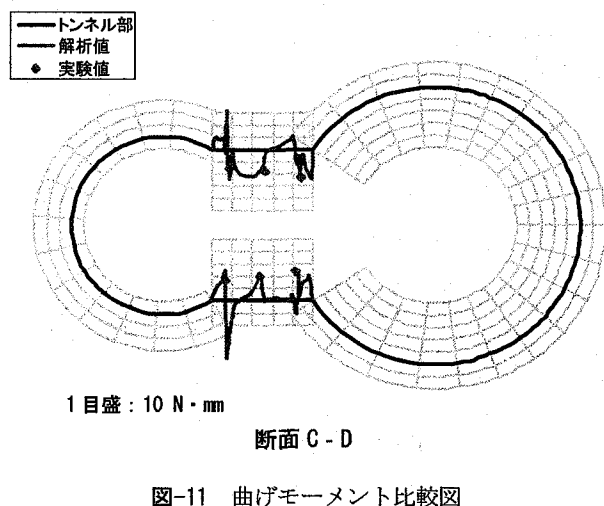
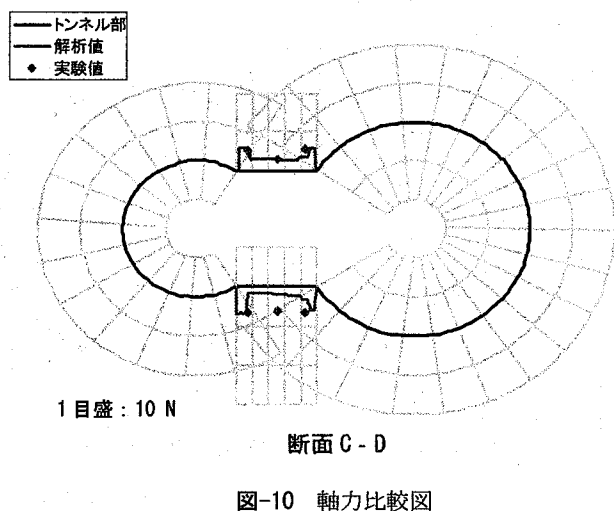
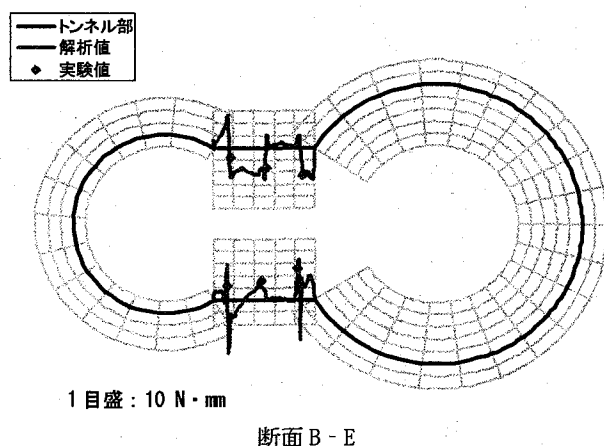
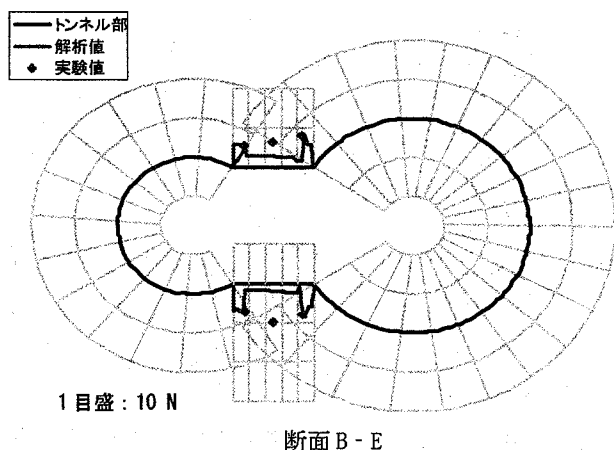
(1) トンネルのみの模型実験

実験結果と数値解析の結果とを比較する対象は、トンネル模型に発生する軸力および曲げモーメントである。また、数値解析には前述した「はり-ばねモデル計算法」のうち、全周地盤ばねモデルを用いている。

図-6 は軸力の実験値と解析値とを比較した図であり、図-7 は曲げモーメントの実験値と解析値とを比較した図である。なお、実験結果と解析結果の比較には、トンネル横断方向では A 断面の結果を、接続部では A 断面と F 断面の値を用いた。

軸力は、実験結果の方が解析結果よりも少し大きい値をとっているが、概ね全体的な挙動を表現できていると考えられる。また接続部に関しては、解析結果の方が実験結果よりも小さな値となっている。これは接続部に発生している軸ひずみが曲げひずみに比べて大きく、また、測定精度が曲げひずみほどに高くないためと考えられる。

一方、曲げモーメントに関しては、実験結果と解析結果とがほぼ一致しており、全体的な挙動を精度よく表現できている。また、本線部に比べランプ部の曲げモーメントが 2 倍近い値となっており、本線部と接続部との連結箇所においても著しく大きな値となっている。これは、本研究の対象であるトンネル断面が左右非対称の構造であり、測点 1 および測点 9 (図-3 参照) 付近では、ランプ部側から受ける側方土圧もあるため、本線部と接続部との連結箇所がトンネル中心方向へ変形するためであると考えられる。また、ランプ部は接続部の変形挙動の影響を大きく受けている。



本実験結果から本研究の対象であるトンネル断面の力学的挙動特性が確認できる。

(2) 地中アーチにより補剛されたトンネルの模型実験

実験結果と解析結果の比較には、トンネルのみの模型実験と同様に、軸力および曲げモーメントを用いる。実験結果は、トンネルのみのときと同様に、トンネル横断方向ではA断面の結果を、接続部ではA断面とF断面の値を用いた。なお、接続部においては断面Aおよび断面Fの実験結果を併せて図示している（以下断面A-F）。同様に、地中アーチ設置位置からトンネル軸方向に等距離にある測定断面Bと断面E（以下断面B-E）および断面Cと断面D（以下断面C-D）では実験結果をそれぞれ併せて図示している。また、地中アーチ部は土中にあることから、その変形方向の面には地盤反力が発生するものと考え、主働側の特性を考慮した地盤ばねを設定した。吊り材とトンネル部の接続をピン結合、吊り材と地

中アーチ部との接続は剛結合として表現した。図-8は断面A-Fにおける軸力の実験値と解析値とを比較した図を、図-9は曲げモーメントについて比較した図を示している。本線部およびランプ部の周方向について、軸力の実験結果と解析結果は概ね一致していると考えられる。接続部において、実験結果よりも解析結果が小さな値となっている。また、実験値、解析値とも、トンネルのみの実験のときよりも小さくなっている。前述したように、軸ひずみが大きく、また、アーチによって吊られていること、測定精度が曲げひずみほど高くないことにより誤差が生じているものと考えられる。しかし、全体の挙動は概ね一致しているものと思われる。

つぎに、断面A-Fの曲げモーメントについて、地中アーチ部との複合的な力学挙動を示すトンネル部であるが、トンネルの全断面にわたって、解析結果は実験結果を精度よく表現できていると考えられる。

吊り材による引張りの影響を受ける接続部に関して、解析結果における力学的な挙動は複雑である。

また、本実験結果では上部、下部ともに計測点が3箇所しかなく、曲げモーメントの実験結果の分布形状が必ずしも解析結果のような挙動をするとは説明しにくい、概ね実験結果は解析結果とほぼ一致している。吊り材による引張応力を大きく受けていると考えられるに示す測点17(図-3参照)では解析結果は実験結果を的確に表現できていると思われる。

(3) トンネル接続部に関する考察

図-10は断面B-Eおよび断面C-Dにおける実験結果と解析結果との軸力比較図を、図-11は曲げモーメント比較図をそれぞれ図示する。

軸力に関して、断面B-Eおよび断面C-Dともに、多少の誤差が生じているが、概ね解析結果は実験結果を表現できていると考えられる。これは、トンネルのみの実験結果のときと比べて断面力が小さいことや、アーチで直接吊られていないため、断面力が安定していることによるものと考えられる。

つぎに曲げモーメントに関して、実験結果では断面B-E、断面C-Dと地中アーチ設置位置から軸方向への距離が大きくなるとともに、曲げモーメントが増加する結果となっているが、解析結果においてもその実験結果の挙動を表現でき、解析モデルにおけるリング継手のばね定数を適切に定めることで、接続部における縦断方向への評価が可能であると考えられる。これより、地中アーチ構造による縦断方向へのトンネル補剛効果を評価する際に、「はりばねモデル計算法」を用いて地中アーチを設置する間隔などの検討において、実物のシールドトンネルに適用した場合には、設計上ある程度の有用性が見られるものと考えられる。

5. 地中アーチ構造によるトンネル断面力低減効果の検証

トンネルのみの模型実験結果と地中アーチにより補剛したトンネル模型の実験結果を比較し、地中アーチによるトンネル部の断面力低減効果を検討する。比較対象とする項目としては、トンネル部に発生する曲げモーメントである。これは実験結果から曲げひずみは軸ひずみに比べ測定精度が高く、またシールドトンネルの設計においても、軸力より曲げモーメントが重視されるためである。

図-12はトンネルのみの模型実験結果と地中アーチ模型実験結果の曲げモーメント比較図を示したものである。トンネル本線部において全体的に約31%、ランプ部において約51%低減されている。これは、

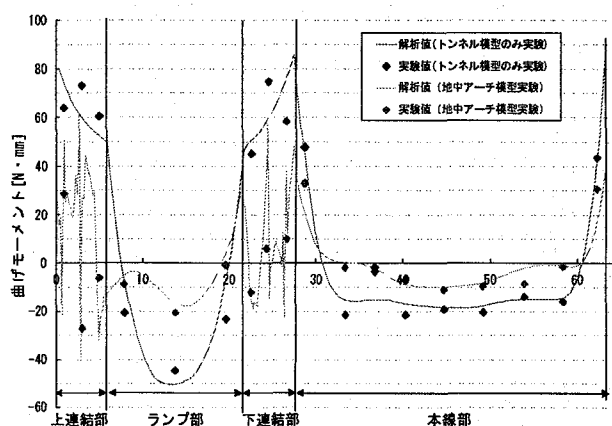


図-12 トンネル断面力の低減効果

地中アーチによって接続部の変位が少なくなったために、トンネル部分の変形も小さくなり、結果として、トンネル部分にかかる断面力が低減されたものと考えられる。これらの実験結果から、地中アーチは両トンネルの中央を支柱で支えることなしに、トンネルを安定的に支持できる構造であることが確認できる。

6. 結論

本研究は、模型実験とその解析から、地中アーチにより補剛されたシールドトンネルの力学的挙動を検証したものである。

本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 本線トンネルとランプトンネルとの接続部を地中アーチから吊り材で吊ることで、両トンネル部の断面力が低減されることが確認され、この構造が両トンネル間の支柱に代わる構造として有効であることが示された。
- (2) 地中アーチにより補剛されたシールドトンネルの力学的挙動は、「はりばねモデルによる計算法」でも精度よく表現でき、本構造のような複合構造物の設計にも、有効に使うことができると考えられる。
- (3) 接続部の挙動に関しては、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。

実際にこのような構造をどのようにして造るのかについてはまだ詳細に検討を行っていない。本研究で述べたアーチ構造よりもさらに有効な構造があるものと思われるが、トンネルを地中のアーチなどの異種構造物で吊ったり補剛したりするという考え方が、あながち無謀なものではないことがわかった。

今後は実際の施工の可能性や合理性を考え、より合理的な構造を検討してゆく予定である。

謝辞：本論文をまとめるにあたって、当時修士課程に在学していた所畑豪氏（現東京都建設局）ほか、本研究に関係された各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大林組：「地中アーチ工法（Shield Tunnel with Arched Reinforcement）」を開発，大林組 News Release, 2003
- 2) 木村定雄，小泉淳：地盤と覆工との相互作用評価に基づくシールド工事用セグメントの設計法について，土木学会論文集，No.624/Ⅲ-47，pp.123-134，1999.
- 3) 江守一郎，斉藤孝三，関本孝三：模型実験の理論と応用（第三版），技報堂出版，2000
- 4) 所畑豪：地中アーチにより補強・補剛されたトンネル構造に関する基礎的研究，トンネル工学報告集，15 巻，pp.403-410，2005
- 5) 池谷衛：地中アーチにより補強・補剛されたトンネル構造に関する模型実験，早稲田大学理工学部社会環境工学科卒業論文，pp.82-83，2005
- 6) 藤田逸郎，小泉淳：荷重履歴を受けるシールドトンネル横断方向の挙動に関する研究，土木学会論文集，No.750，Ⅲ-65，pp.27-38，2003
- 7) Einstein,H.H. : Simplified Analysis for Tunnel Supports, Proc.ASCE,GT4., pp.499-518, 1979.
- 8) Muir Wood,A.M. : The Circular Tunnel in Elastic Ground, GEOTECHNIQUE 25, LONDON, No.1, pp.115-127, 1975.3.
- 9) Ahrens,H. : Lindner,E,and Lux,K. : Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den "Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein(1980) ", DIE BAUTECHNIK , pp.260-273, 1982.8.
- 10) Ahrens,H. : Lindner,E,and Lux,K. : Zur Dimensionierung von Tunnelausbauten nach den "Empfehlungen zur berechnung von tunneln im lockergestein(1980) ", DIE BAUTECHNIK , pp.303-311, 1982.9.
- 11) 富士総合研究所：シールドトンネル構造解析プログラム MOLEMAN-10 Ring Version 操作マニュアル，2003