

多円型シールド工法を活用した駅部トンネルの覆工構造解析

THE STRUCTURAL ANALYSIS OF TUNNELED STATION WITH MULTI-CIRCULAR FACE SHIELD

堤多喜男*・松本吉雄**・小浦場博***・粥川幸司****

Takio TSUTSUMI, Yoshio MATSUMOTO, Hiroshi KOURABA, Koji KAYUKAWA

In recent years, the application of multi-circular face shield method to a tunneled station is studied in case of construction of underground railways. It is expected that the form of tunnel lining is complicated. Therefore, it is necessary to investigate the method of analysis in case of the design of tunnel lining.

In this paper, we introduce an example of tunneled station with multi-circular face shield, and describe the structural analysis using FEM and an elementary experiment.

Keyword: shield tunnel, multi-circular face shield, FEM, segment, box-girder

1. はじめに

地下鉄道建設においては、一般には駅部では開削工法、駅間ではシールド工法が採用されているが、近年の都市の過密化あるいは地下空間の有効利用という観点から、駅部においてもシールド工法が採用されはじめています。従来のシールド工法による駅部トンネルは、併設の円形シールドトンネルを施工した後に縫地、パイプルーフ、かんざし桁およびルーフシールド等によるトンネル間の切り広げ工法を併用して建設されている。最近では多円型シールド工法の実用化が進んできたことから、駅部トンネルへの適用に関する研究も盛んに行われている。

多円型シールド工法の覆工構造設計では従来の円形シールドの場合と同様に、トンネル横断面方向および軸方向の2方向に関する2次元的な設計が主体となっている。しかし、今後の断面形状の多様化や覆工構造の複雑化が予想される多円型シールド工法においては、より合理的なトンネル構造、設計方法の検討が必要であり、これに伴うトンネル覆工構造の合理的な解析方法の検討が必要であると考えられる。

本研究では、2連の多円型シールドトンネル覆工構造に対して、従来の設計法と併せて複雑な構造形式をより効果的に評価する設計、解析手法について検討を進めている。ここでは、駅部トンネルへの適用を目的とした多円型シールドトンネルの覆工構造を紹介するとともに、覆工構造に関する設計、解析手法についての研究経過を報告する。

2. 駅部の多円型シールドトンネル覆工構造

駅部トンネルの断面形状や覆工構造の選定においては、列車とホームの空間を確保することはもとより、その施工性についても考慮する必要がある。ここでは、多円型シールド工法を用いた駅部トンネルとして、図-1に示すような覆工構造形式を考案する。

-
- * 正会員 東京都地下鉄建設(株)工事部工事第1課
 - ** 正会員 (財)鉄道総合技術研究所トンネル研究室
 - *** 正会員 ハザマ東京支店地下鉄六本木青山出張所設計課
 - **** 正会員 ハザマ技術研究所研究第1部第1研究室

本覆工構造においては、トンネル横断面的には2つの円形トンネルを横に接する状態で構築している。これと同時に、側部円形トンネルの接合部分の上下に特殊な形状をしたセグメント（以下中央部セグメントと称す）を配置し、このセグメント間に上下方向の荷重を伝達する柱を組み込む構造となっている。したがって柱のないリングが存在することになるが、これに対しては中央部セグメントを図-2に示すような形状にすることにより対処する。

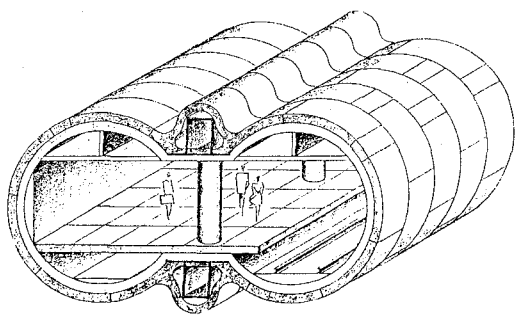


図-1 多円型シールドトンネル覆工構造概要

中央部セグメント本体はトンネル内空側の水平部と地山側の円弧状部を形成しており、この中空部に箱桁状の部材を組み込んで一体化した特殊な構造となっている。トンネルの掘削についてはこの断面を一括で掘削するものとするが、掘進に伴うセグメントリングの組み立ては本設の柱または仮設の柱を用いて行う。セグメントリング間の連結を行うに際

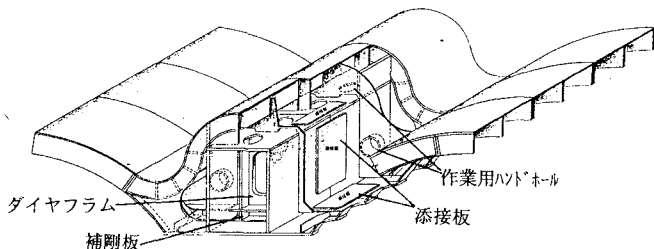


図-2 中央部セグメント詳細図

して、中央部セグメント内の箱桁状部材も同時に連結しトンネル軸方向の梁部材を構築する。梁部材の連結後に仮設の柱を撤去して一次覆工を完了する。

このように本覆工構造では、トンネル掘進と同時に覆工の組み立てを行い、最後に仮設の柱を撤去するという合理的な施工方法をとることができる。また構造的に不要な部分の少ない断面となっており、トンネル軸方向に形成された梁構造によって、荷重の伝達をスムーズに行うことができるものと考えられる。

ここで、中央部セグメントについては次の4つの重要な機能を担うことになる。

- ①中央部セグメント自体に作用する鉛直荷重に抵抗する。
- ②側部円形トンネル部分からのトンネル周方向の荷重を水平方向でつり合わせる。
- ③トンネル軸方向に関する梁作用を受け持つ。
- ④上記3点の荷重を柱に伝達する。

以上4点の機能のうち、特に③トンネル軸方向に関する梁機能に関しては作用力も大きく構造的に重要なポイントになると予想される。これについては、後述する箱桁部性能試験および解析によってその性能の確認を行っている。

本覆工構造形式を用いることによって、例えば左右の円形トンネル部分を鉄道軌道部とし中間のスペースをプラットホームとする、あるいは円形トンネルの一方を鉄道軌道部とし他方の円形トンネル部をプラットホームとして利用する、などのような駅部トンネルへの利用が可能になると考えられる(図-1は後者についてイメージしている)。

3. 覆工構造における解析手法

3.1 多円型シールドトンネルにおける3次元解析の意義と目的

円形シールドトンネルではトンネル軸方向にその断面が一樣であり、その覆工構造設計は主にトンネル横断面方向に関して行われている。設計には、慣用計算法あるいははり-ばねモデルによる解析法が用いられている。これらはいずれも、基本的にはトンネル横断面方向に関する2次元解析手法である。本覆工構造

に関する設計においても、基本的にはトンネル横断面方向、軸方向の2方向について検討を進めている。

ところで本覆工構造では、トンネル横断面中央を柱で支持されたリングと、柱がなく中央部セグメントで構築されたトンネル軸方向の梁によって支持されたリングが混在しており、トンネル軸方向にその断面形状が変化することになる。すなわち、覆工構造をマクロ的に見れば3次元的な構造になっていると考えられる。そこで本覆工構造に関しては、3次元的な構造の挙動を評価することを目的として、その解析方法の一つに3次元FEMを導入することを検討している。

先ずここでは、3次元FEM解析を導入するに際してその適用可能性を検討することを目的として、簡単なモデルを用いた慣用計算法とはりばねモデルとの比較を行うこととした。

3.2 覆工構造FEM解析

図-3に3次元FEM解析に用いたモデルを示す。モデルは4m間隔に本設の柱が設置された軸方向8mの区間の覆工構造を対象としている。要素タイプについては、覆工構造を全体として捉えた場合、特に側部セグメントなどについては周長に対するセグメント桁高が小さいことから、8節点厚肉シェルを用いることとした。また、柱についてはビーム要素を用いることとした。各セグメントリング間およびセグメントピース間の継手構造の取り扱いについては、今回の解析の目的が慣用計算法およびはりばねモデルとの比較にあることから、継手部における剛性低下は考慮せず一様剛性を有する連続体であると仮定している。

図-4に解析で用いた荷重条件を示す。荷重条件については現行のトンネル標準方書²⁾に則り、鉛直荷重、側方荷重などを算出している。なお図中に示す上部シールド2次巻自重とは、本断面を有するシールドトンネルが本トンネルの直上に近接施工されることを考慮したものである。

図-5に覆工構造を支持する地盤を模擬した境界条件について示す。解析では地盤の反力を期待して、側部シールド部の肩45°より下方に地盤反力係数 $k=5000(\text{tf}/\text{m}^3)$ の地盤ばねを設けている。トンネル軸方向に関する境界条件については、シェル要素の自由度(各軸に関する変位および回転)を用いて、トンネル切断面に対する対称条件(トンネル軸方向変位および切断面外回転を固定)を導入している。解析に用いた材料

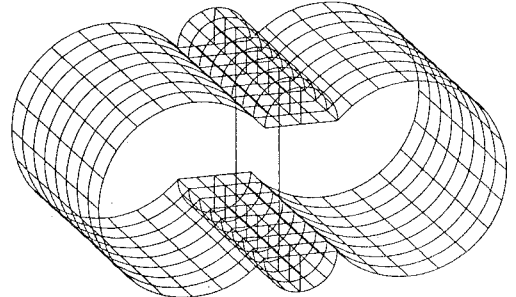


図-3 3次元FEM解析モデル

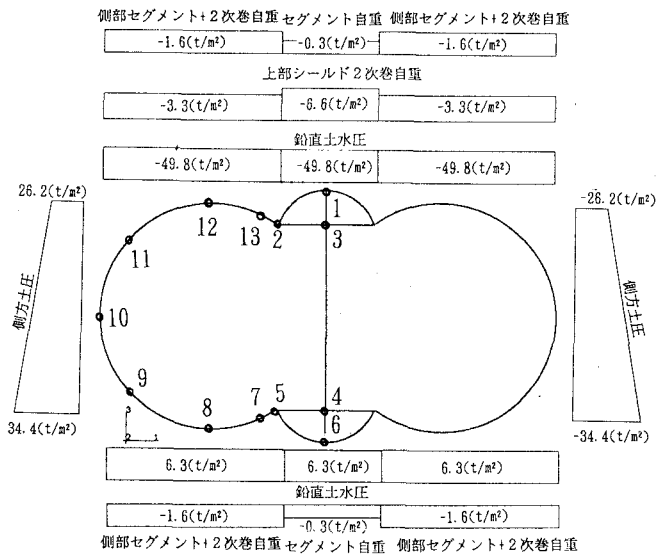
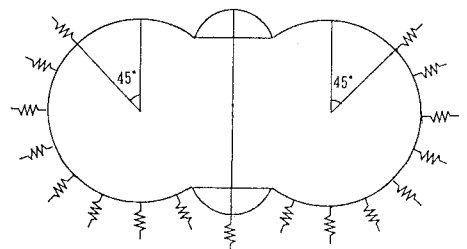


図-4 荷重条件(トンネル完成時)および解析結果出力点



(地盤反力係数 $k=5,000\text{tf}/\text{m}^3$)

図-5 地盤ばね条件

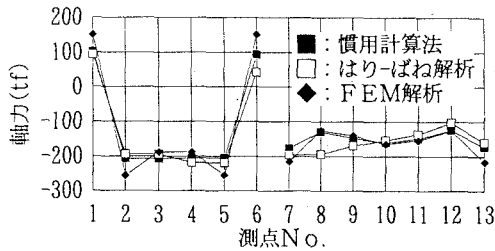
物性値を表-1に示す。慣用計算法については本設柱のある断面でモデル化している。またはりばねモデルにおけるピース間回転ばね定数 k_θ 、リング間せん断ばね定数 k_s は仮想的にそれぞれ $0.0(\text{tf}\cdot\text{m}/\text{rad})$ 、 $1.0\times 10^{10}(\text{tf}/\text{m})$ を用いている。

表-1 材料物性値

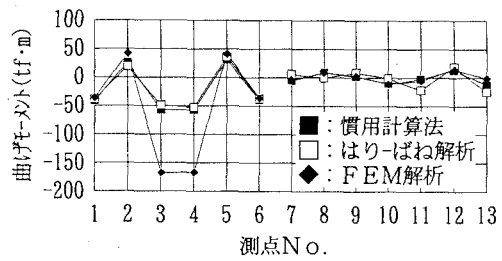
	弾性係数 (tf/m^2)	ポアソン比	板厚 (m)
中央部平板部	2.80×10^6	0.30	0.449
中央部外周部	1.40×10^6		0.503
中央部補強リブ	2.10×10^7		0.060
側部セグメント	1.74×10^6		0.362
柱	2.56×10^6		0.601(半径)

3.3 解析結果

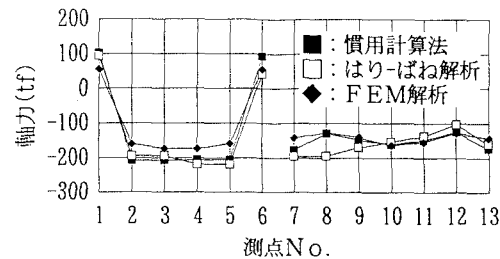
図-6に代表的な測点におけるトンネル横断面方向の軸力、曲げモーメントの解析結果を示す。ここで(a)および(b)は柱のある横断面、(c)および(d)は柱と柱の中間に位置する横断面での軸力、曲げモーメントである。これによれば(b)測点3、4でFEMが大きな値を示めている。これは、FEMでは柱とセグメントの接合部が柱の一点でセグメントを支持しているために、局所的な応力集中が発生しているものと考えられる。しかし、それ以外の測点については各解析法ともほぼ同等な値を示している。また中央部セグメントでの発生断面力(測点1~6)は、側部での発生断面力(測点7~13)よりも大きくなっている。



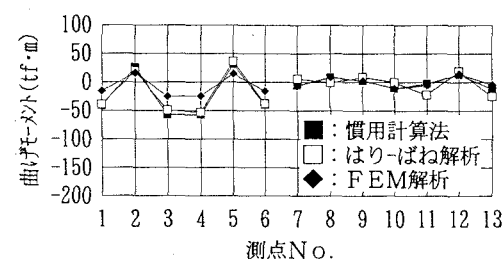
(a) 柱のある断面でのトンネル横断面方向軸力(正:引張)



(b) 柱のある断面でのトンネル横断面方向曲げモーメント

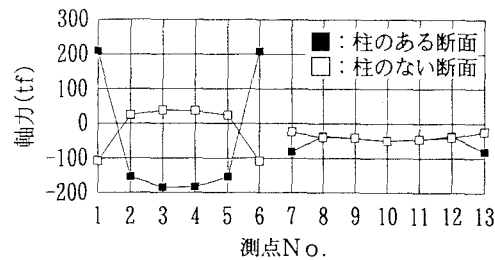


(c) 柱のない断面でのトンネル横断面方向軸力(正:引張)

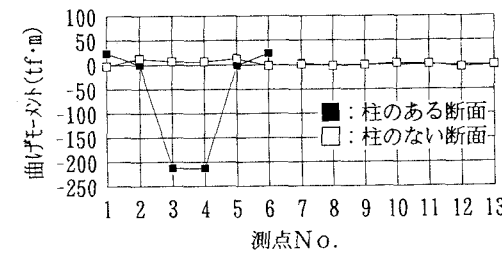


(d) 柱のない断面でのトンネル横断面方向曲げモーメント

図-6 トンネル横断面方向解析結果比較



(a) 柱のある断面でのトンネル横断面方向軸力(正:引張)



(b) 柱のある断面でのトンネル横断面方向曲げモーメント

図-7 トンネル軸方向解析結果

図-7には、柱のある断面と柱のない断面で発生しているトンネル軸方向の軸力、曲げモーメントを代表的な測点について示している。これによれば側部セグメントでの発生断面力(測点7~13)は、柱の有無による変化は小さいが、中央部セグメントでの発生断面力(測点1~6)は大きく異なったものとなっている。また値的にもトンネル横断方向に発生している断面力と同程度の値を示している。

以上のことから、本覆工構造ではトンネル横断方向のみならずトンネル軸方向にも断面力が発生することが予想される。またその結果も信頼性の高いものであると推定され、本覆工構造における構造的な検討には3次元FEMが有効であると思われる。さらに解析の結果から、本覆工構造形式では特に中央部セグメントの構造が重要となることが言えると思われる。

4. 箱桁部性能確認試験とFEM解析

4.1 箱桁部性能確認試験およびFEM解析の目的

中央部セグメントは、外圧支持機能、側部セグメントからの伝達荷重の支持機能、およびトンネル軸方向の梁機能を併せ持った極めて重要な構造部材である。これらの機能の内、トンネル軸方向の梁(箱桁梁)は、現場にてセグメントに組み込まれた箱桁部材を1ピース毎に摩擦接合によって連結して構築される。摩擦接合は橋梁などで多くの実績を持つ接合方式であるが、この場合接合部分の占める割合は橋梁構造全体から見れば小さいものとなっている。しかし、本覆工構造での箱桁梁は1m毎に分断されたものを連結するため、接合部分の占める割合の大きい構造となっている。このため、このような多く接合部分を有する梁が曲げなどの大きな作用力を受けた場合の挙動を試験や解析などによって確認する必要がある。そこで今回は、実物大の試験体を用いた載荷試験を行うこととした。

また、この梁は実際のトンネル内では連続梁構造となっているが、載荷試験では試験設備の関係から単純曲げ試験となり、連続梁での挙動については試験結果を踏まえて解析的に検討する必要があるものとする。ここでは、載荷試験と併せて解析手法の検証を目的としたFEM解析を行うこととした。

4.2 箱桁部性能試験

図-8に試験体の概要図を示す。試験体は、中央部セグメントに組み込まれた箱桁部材5ブロック分(5m)を取り出し、各箱桁ブロック毎にウェブ、フランジを二面摩擦接合にて連結し組み立てている(a)。また各箱桁

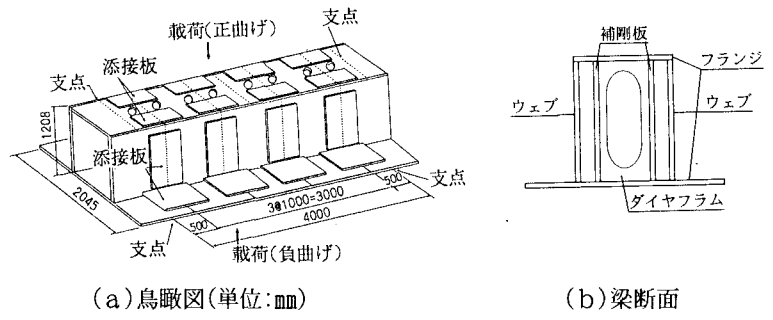


図-8 箱桁梁試験体概要

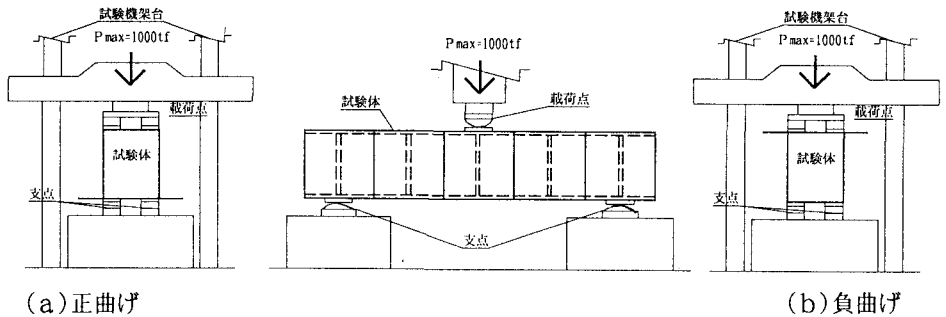


図-9 載荷試験概要

ブロック内にはその中心に梁の軸に直角な方向にダイヤフラムを設置し、このダイヤフラムの座屈防止のために補剛板を設置している(b)。なお、使用部材の材質はSM520およびSM490Yとなっている。

試験は図-9に示すように、本覆工構造で柱の間隔が4mであることから、両端部の箱桁ブロック中心(ダイヤフラム位置)を支承とした4mスパンの単純曲げとしている。箱桁梁の挙動は正曲げおよび負曲げの2種類が想定されるが、試験ではその両者について载荷を行った。载荷は50tfピッチにて試験機能力最大の1000tfまで行った。また100tfピッチでの除荷も行い、試験体の残留変形の有無についても確認することとした。

試験中は、载荷荷重、変位(梁のたわみ)、各部材ひずみ、ブロック間継手の遊間部変位の4項目について測定を行った。試験結果については4.4に示す。

4.3 箱桁梁FEM解析

図-10にFEM解析で用いた解析モデルを示す。試験体が梁の軸方向および梁の幅方向について対称であることを考慮して、解析では試験体の1/4をモデル化している。したがって、モデル上の対称面ではこれを満足する境界条件を導入する必要がある。これを表-2にまとめて示す。各ブロック間の継手部分では、試験体で2mmの遊間部を有しているためモデルにおいてもこれを考慮している。また添接板のある部分では、図-11(a)に示すように母材が2mmの遊間を有して添接板によって連結されているのに対し、解析では(b)に示すように母材と添接板は完全に一体化しているものと仮定して、母材および2枚の添接板の板厚を用いることとした。図-12には解析で用いた荷重条件を示している。解析では同一モデルを用いるため、正曲げ、負曲げに対しては荷重条件および支持条件の変更によって対処している。解析で与え

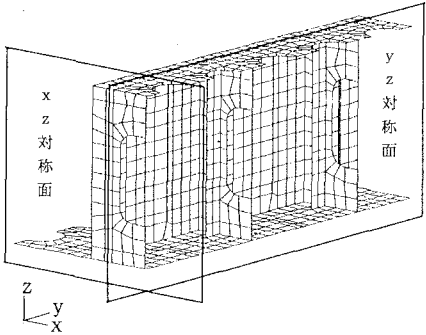
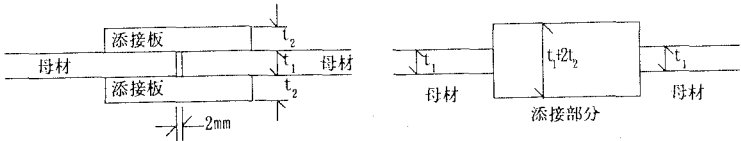


図-10 箱桁梁3次元FEMモデルおよび対称面

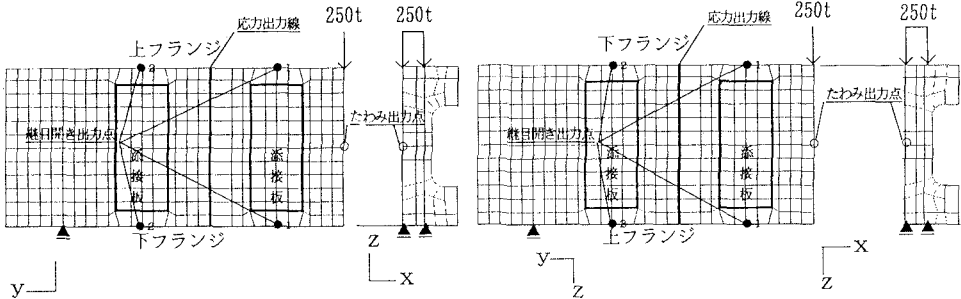
表-2 対称面上の境界条件

	x方向変位 u_x	y方向変位 u_y	z方向変位 u_z	x軸回り回転 ϕ_x	y軸回り回転 ϕ_y	z軸回り回転 ϕ_z
① y z 対称面上の節点	固定	自由	自由	自由	固定	固定
② x z 対称面上の節点	自由	固定	自由	固定	自由	固定
①および②共通の節点	固定	固定	自由	固定	固定	固定



(a)試験体 (b)解析モデル

図-11 継手部のモデル化



(a)正曲げ (b)負曲げ

▲:支点(载荷方向(z方向)変位のみ固定)

図-12 荷重、支点条件および試験、解析結果出力点

た荷重値は、試験での最大荷重1000tfに対して、1/4モデルであるため250tfとしている。表-3に解析に用いた材料物性値を示す。また、実験、解析と併せて箱桁のフランジ幅を考慮した簡易計算を行い、試験値およびFEM解析値との比較を行った。

4.4 試験結果および解析結果

表-4、図-13～14に試験結果および解析結果を示す。

図-13では梁中央での荷重～たわみ曲線を示している。各箱桁ブロックは継手位置において添接板による摩擦接合で連結されているが、試験中は継手部でのボルトの導入軸力不足による母材と添接板のすべり現象は見られなかった。これは荷重増加に対してたわみがほぼ直線的に増加していることから説明される。なお、荷重を0tfに戻した時の残留変形はほとんど認められなかった。

表-4より、正曲げにおいて梁中央でのたわみ量は、試験で2.53mm、FEMで2.70mmとなり、負曲げにおいてはそれぞれ2.13mm、2.71mmと同程度の結果が得られた。

図-14では梁の載荷点から梁軸方向に1mの地点でのウェブ(母材)の応力分布を示している。ウェブの中段では試験値は三角形状態の応力分布性状を表しているが、端部では若干小さな応力値となっている。これは添接板高さがウェブの高さよりも小さく、母材の端部での主応力方向が梁軸方向から若干ずれているためであると思われる。FEM解析値はウェブ応力分布および継手遊間量についても試験値とよく一致している。

ところで、今回の試験体は支間長(L=4.0m)に対して桁高(H=1.2m)が大きく(L/H=3.3)、梁のせん断変形の影響が大きい構造になっている

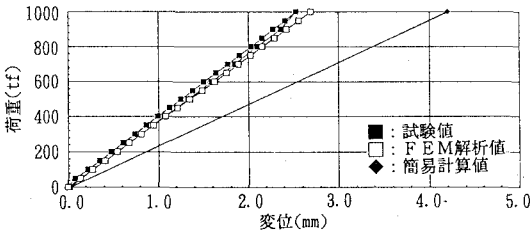
表-3 材料物性値

		板厚 (mm)	弾性係数 (tf/㎡)	ポアソン比
上フランジ	母材	34	2.1×10 ⁵	0.30
	添接部	82		
ウェブ	母材	36		
	添接部	104		
下フランジ	母材	34		
	添接部	82		
ダイヤフラム		50		
補剛板		38		

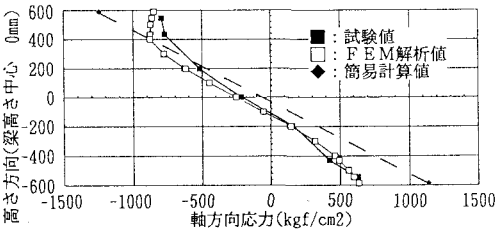
表-4 試験および解析結果

			正曲げ載荷			負曲げ載荷		
			試験値	FEM	簡易計算	試験値	FEM	簡易計算
梁中央部のたわみ量			2.53	2.70	4.20	2.13	2.71	4.20
継手遊間量	上FL	1	-0.30	-0.21	—	0.31	0.23	—
		2	-0.07	-0.07	—	0.08	0.08	—
	下FL	1	0.13	0.13	—	-0.11	-0.12	—
		2	0.06	0.04	—	-0.05	-0.04	—
ウェブ軸方向応力	上FL側	kgf/cm ²	-795	-860	-1,242	818	890	1,242
	下FL側		629	600	1,139	-564	-573	-1,139

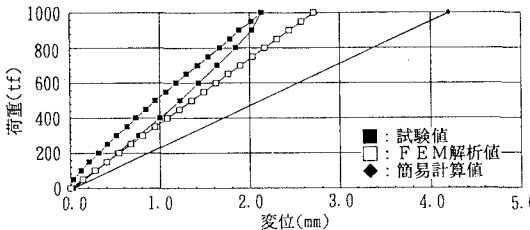
*)継手遊間量では+値:継目の開き ー値:継目の縮みを表わす。



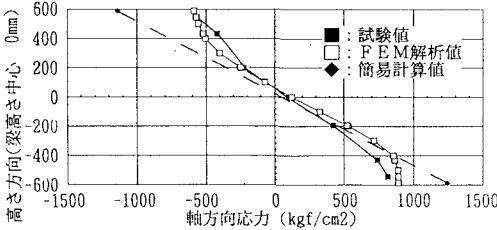
(a) 正曲げ



(a) 正曲げ



(b) 負曲げ



(b) 負曲げ

図-13 荷重～たわみ曲線

図-14 ウェブ梁軸方向応力分布(正:引張)

と思われる。そこでフランジ部の有効幅を考慮した簡易計算においては、せん断変形の影響を考慮して計算を行った。計算の結果、梁中央でのたわみは4.20mmとなり、またウェブ端部の応力値についても試験値、FEM解析値よりも大きな値となった。これは、簡易計算では継手を考慮しておらず母材が連続しているものと仮定しているのに対し、実験およびFEM解析では継手部で添接板が母材と一体化しており箱桁の断面剛性が大きくなっているためであると思われる。

以上のことにより、本覆工構造における箱桁梁は構造的に十分な性能を有していると考えられる。またその解析的検討においては、設計で用いられる簡易計算である程度までは応力状態を把握することができるものの、FEM解析を用いれば部分的な応力状態まで把握することが可能であり、これによって更に検討を進めることができるものと思われる。今後これを基にして箱桁梁の連続梁挙動について検討していく予定である。

5. まとめ

これまでの検討の結果、本覆工構造が構造的に十分に実現可能であることを確認した。また、従来の設計および解析手法に加えてFEM解析を用いることにより、本覆工構造をはじめとする多円型シールド覆工構造に関する解析的なアプローチが可能となった。今後は、中央部セグメントについてその横断面方向を含めた挙動の評価などについて、解析、試験を行って構造全体に関する検討および覆工構造の具体化を進めていきたいと考えている。

本研究に際しては、これまでに東京理科大学松本嘉司教授をはじめ多くの有識者の方々に御指導を頂いた。また、載荷試験をはじめ本覆工構造の検討に際しては新日本製鉄(株)の御協力を戴いた。御礼を申しあげる次第である。

6. 参考文献

- 1) 松本嘉司、小山幸則、松本吉雄、岡野法之、菊入崇：多円型シールド駅部トンネルの設計法に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集、pp.125～130、1991、12
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説、1986