

4心円駅シールド工法に用いる覆工構造のリング載荷試験 LOADING TESTS OF THE LINING WITH 4-CIRCULAR FACE SHIELD

窪田元 恢¹⁾・新治均²⁾・小山幸則³⁾・西尾誠高⁴⁾・粥川幸司⁵⁾

Motohiro KUBOTA, Hitoshi NIIHARI, Yukinori KOYAMA, Masataka NISHIO and Koji KAYUKAWA

In the metropolitan subway route no.12 roppongi section, 4-circular face shield method is projected. The lining used this shield method is formed out of specific segments. In this paper, the ring loading tests and beam analysis used design method were carried out on this lining. In this tests, as a method of loading, water pressure with rubber bags was used to simulate that this lining existed underground. As a result of tests and analysis, it was clear that this specific lining had enough strength and it was able to apply to this shield tunnels.

Key Words: 4-circular face shield, loading tests, water pressure, beam analysis

1. はじめに

都営地下鉄12号線六本木駅(仮称)工区では、図-1~2に示すような4心円駅シールド工法による駅トンネルが計画されている¹⁾。本工区に用いられる覆工構造は、特殊な形状をしたセグメントに桁の役割を持たせ、組立時にその桁を1リング毎の摩擦接合により連結し1本柱にて支持する、従来にない特殊な構造となっている。

そこで、このような特殊な形状を有する覆工構造に対し、実荷重を想定したリング全体の安全性およびその性能を確認することを目的として、実物大の試験体を用いたリング載荷試験を計画、実施することとした。本報ではその試験結果について報告する。

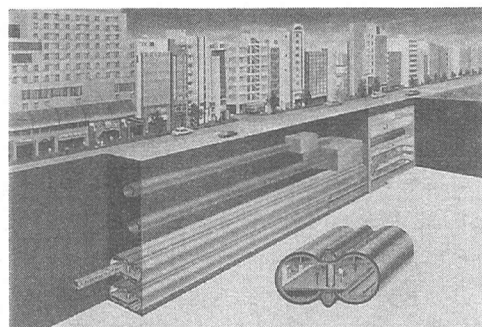


図-1 六本木駅工区
4心円駅シールド工法概要

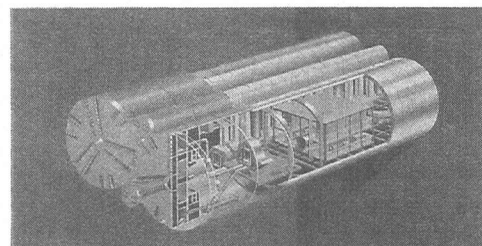


図-2 4心円駅シールドマシン

2. 覆工構造の特徴とその具体化への取り組み方²⁾

(1) 覆工構造の特徴

本覆工構造の概要を図-3に示す。本覆工の断面形状は、2円が横に接するように配置された形となっており、両円の接する部分の上下に特殊な形状のセグメント(以下、中央部セグメントと称す)を配置し、この間に鉛直方向の荷重を伝達する柱を組み込む構造となっている。中央部セグメントは、トンネル軸方向に箱桁状の梁を構成する部材を組み込み一体化した構造である。

- 1) 正会員 東京都地下鉄建設(株) 工事本部
2) 東京都地下鉄建設(株) 工事本部 工事調整部 関連工事課
3) 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 構造物技術開発事業部
4) 正会員 ハザマ 東京支店 六本木青山出張所
5) 正会員 ハザマ 上本本部 都市上本統括部

外径寸法は、12.92m×6.80mである。

トンネルの掘進にともなうセグメントの組立には、リング毎に本設の柱および仮設の柱を用いて行う。リング間の連結を行うに際して、中央部セグメント内の箱桁部材も同時に連結してトンネル軸方向の箱桁梁を構築する。箱桁梁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立を行い、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、不要部分の少ない断面形状となっており、トンネル軸方向に連結された箱桁梁により、図-3に示したようなスムーズな荷重伝達を行うことが可能となっている。

なお、本覆工構造の側円部セグメントは鋼・コンクリートの合成構造、中央部セグメントおよび本設の柱はスチール構造となっており、また継手構造は、セグメント間、リング間ともにボルトを用いない嵌合方式を採用している³⁾。

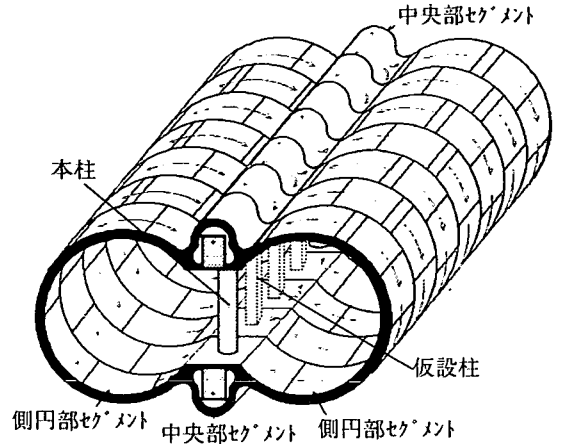


図-3 覆工構造の概要と荷重の流れ

(2) 覆工構造の具体化への取り組み方

本覆工は従来にない構造となっており、また、本覆工を含む多円形シールド工法に用いられる覆工構造の設計においては、確立された方法がないのが現状である。そのため、本覆工構造の具体化および設計に際しては、従来の円形シールドトンネルの設計手法を参考としながらも、図-4に示すような検討フローにしたがい、セグメント構造の具体化および設計を進めてきている。その中でも、特に中央部セグメントに関する検討では、従来にない複雑な構造となることから、箱桁部および中央部セグメント単体に関する性能確認試験および解析を実施した。試験、解析の結果、現在の構造で十分な安全性を有していることが確認されている²⁾。

しかしながらこれまでの試験、解析等は、覆工全体から見れば、中央部セグメントという覆工の一部分に関する要素試験であり、継手を有する複雑な覆工全体の挙動把握は行っていない。

このような背景のもと、本覆工構造がリングとして組まれたときの変形性能や本柱への荷重伝達に関する照査、および設計モデルと実構造の整合性については試験による確認が必要であり、ここに、実物大の試験体を用いたリング荷重試験を実施することとした。

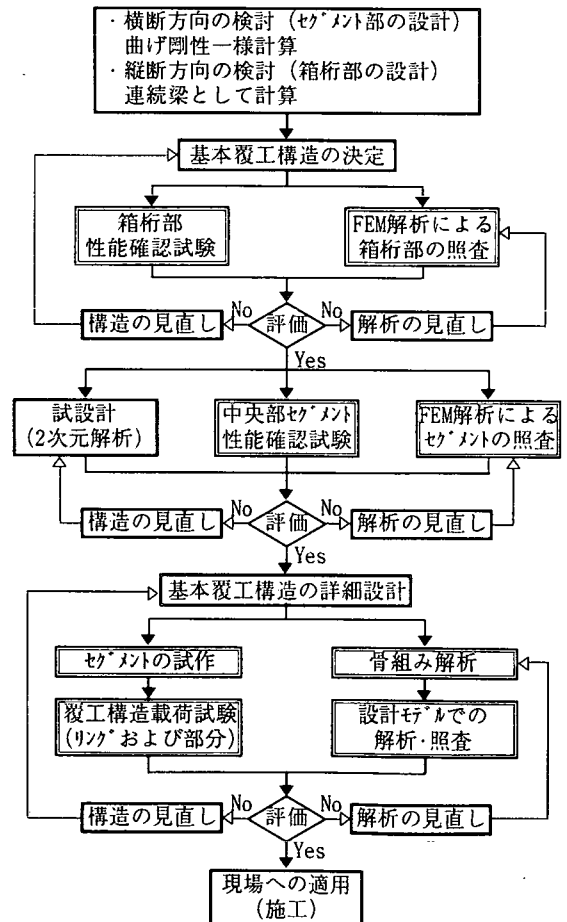


図-4 4心円形シールド工法覆工構造検討フロー
(: 今回の検討部分)

3. 試験概要

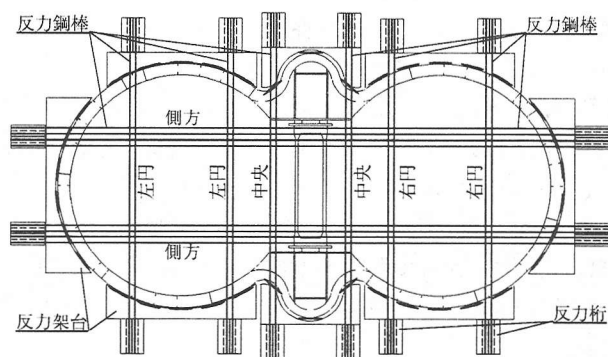


図-5 試験体および荷重装置平面図

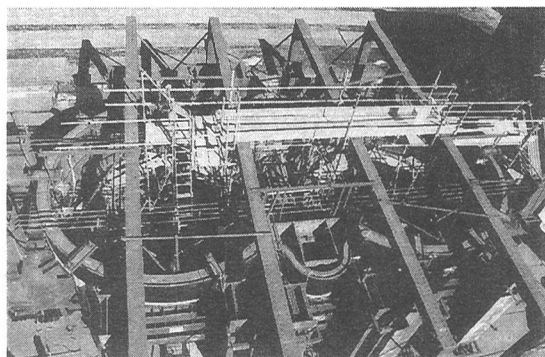


写真-1 試験体および荷重装置概要

(1) 試験の目的

本覆工構造に対し、ここでは次の具体的な3点について確認することを試験の目的とした。

- ・ 本覆工完成時に土水圧が作用した場合のリング全体の安全性および性能(変形や発生応力)の確認
- ・ 本覆工に偏土圧が作用した場合の本柱の性能確認
- ・ 覆工構造に対する設計手法の妥当性の確認

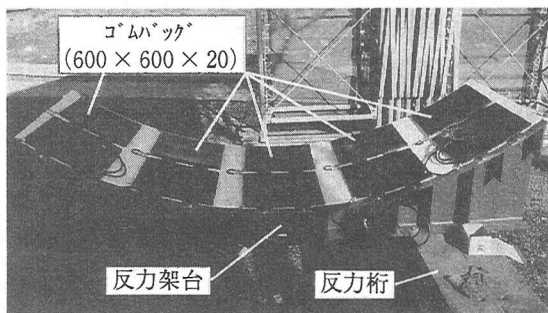
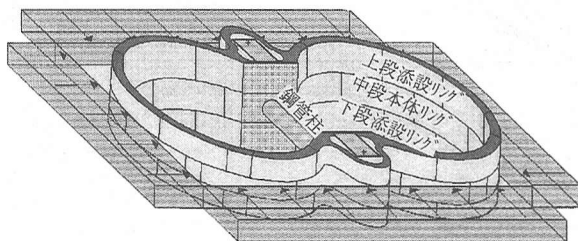


写真-2 耐水圧ゴムバッグ設置状況

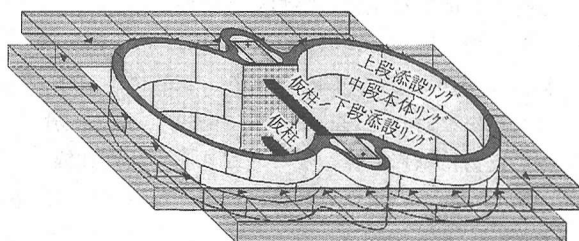
(2) 試験方法および試験ケース

試験体は、実物3リング(本体リング甲組+添設2リング乙組)を用い、平組みとした。図-5および写真-1に試験体および荷重装置の概要を示す。なお今回の試験体では、継手部のモルタル充填、側円部セグメントの中詰めコンクリートは省略している。

試験体への荷重方法に関しては、試験の目的が土水圧荷重を受けたときの覆工の性能確認にあること、および、設計荷重が約 55tf/m^2 (約 700tf/リング°)と非常に大きく、ジャッキ等による集中荷重ではセグメントに局部破壊が発生する可能性があること、から、試験体外周面に写真-2に示すような耐圧性のゴムバッグを配置し、これに充水して水圧で荷重する分布荷重荷重方式を採用した。また試験での荷重では、左右両側



(a) 本柱試験ケース1シリーズ



(b) 仮柱試験ケース2シリーズ

図-6 試験での柱の位置関係

表-1 試験ケース一覧

CASE No.	荷重の等偏	柱の位置	最大荷重 ^{*1*2}				曲げによる本柱偏心量(cm)
			左円	中央	右円	側方	
本柱試験	11 等分布	本体リング	11(275)	11(144)	11(275)	4.4(132)	18.2
	12 偏分布		7(175)		7(175)		18.2
仮柱試験	21 等分布	添設リング	11(275)	11(144)	11(275)	4.4(132)	—
	22 偏分布		7(175)		7(175)		—
	23 載荷				11(275)		—

注*1: 水圧を示す(単位 kgf/cm^2)。ただし()内の数値は荷重値を示す(単位 tf)。

注*2: 試験での水圧 11kgf/cm^2 は、設計荷重約 55tf/m^2 に相当する。

円部および中央部の鉛直方向の載荷3ブロックと側方からの載荷ブロックの合計4ブロックを独立に制御できるようにした。

試験ケースについて、図-6および表-1にまとめて示す。試験は柱のあるリングを想定して中段となる本体リングに本柱を組み込んだケース(本柱試験)と、柱のないリングを想定して上下段の添設リングに仮の柱を組み込み、本体リングを柱のないリングと見なしたケース(仮柱試験)を実施することとした。

載荷荷重については、左右両側円部の鉛直方向荷重に関し、設計荷重レベル55tf/m²に相当する水圧11kgf/cm²まで載荷することとした(試験ケース11、21)。さらに、設計で考慮されている偏土圧によって柱に曲げモーメントを発生させるため、試験において左右側円部の鉛直方向荷重を違えることとした(試験ケース12、13、22、23)。

(3) 解析方法

本試験の解析について、ここでは設計で用いている継手での曲げ剛性低下を考慮した一様剛性による骨組み解析を実施することとした。解析では、図-6に示した試験体に対して、各リングを骨組み部材とし、リング間の結合条件を剛結合とした3リングモデルを基本とした。また、中段の本体リングのみをモデル化した1リングモデルでも解析を行った。

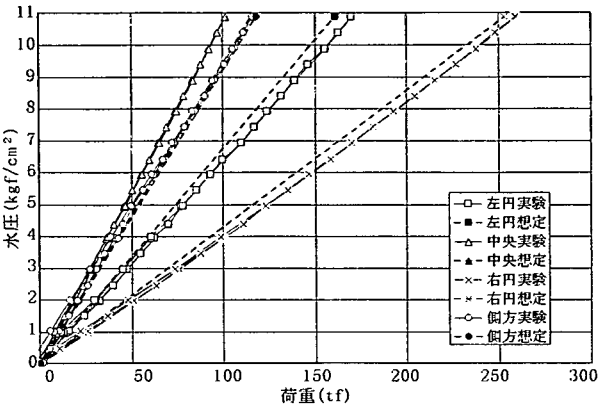


図-7 水圧～荷重曲線(試験ケース13)

4. 試験および解析結果

(1) 試験の再現性の確認

① 載荷荷重の確認

今回の試験では、ゴムバッグを用いた水圧制御による分布荷重方式で載荷を行っている。そのため、導入した水圧と実際に試験体に作用する荷重の関係を把握しておく必要がある。

そこで、図-5に示した反力鋼棒に発生する軸引張力と水圧との関係により、試験体への作用荷重を検討した(図-7)。その結果、水圧と鋼棒の反力は線形関係となっており、また、破線で示した想定荷重に対しほぼ同等となっていることから、試験体に対し想定通りの荷重が作用していることを確認した。

② 仮柱試験における箱桁たわみの確認

柱のない断面を想定した仮柱試験では、実構造における箱桁のたわみ、すなわちトンネルのつぶれ(約2.4mm)を再現することが重要となる。

そこで、本体リング上下の中央部セグメント間の内空変位により、その確認を行った。代表例として、試験ケース21における結果を図-8に示した。その結果、中央部セグメント間の内空変位は破線で示した想定値に近い値を示しており、試験状況は実構造における柱のないリングを再現しているものと判断された。

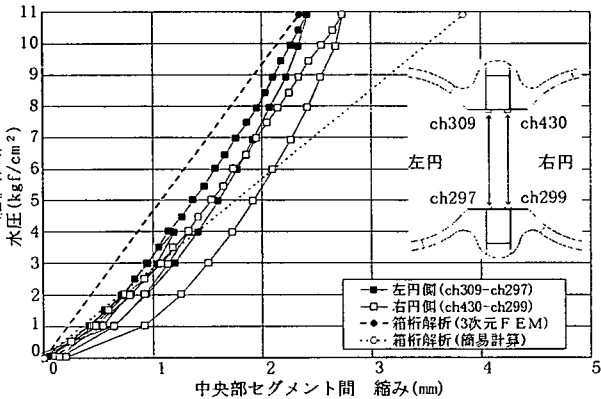


図-8 荷重～箱桁たわみ曲線(試験ケース21)

(2) 試験および解析結果

試験は、表-1に示した6ケースを実施したが、試験結果の傾向はいずれもほぼ想定通りとなった。そこでここでは、本柱試験である試験ケース13について、その結果を示すこととする。

①試験体変位

図-9に最大荷重時における本体リングの変位状況を、図-10に右円鉛直方向の内空変位に関する荷重～変位曲線を解析値と併せて示す。

試験の結果、いずれの試験ケース、計測点において、発生変位は3リングモデルの解析値より大きく、1リングモデルよりは小さくなった。また曲線の傾き(荷重/変位)について、载荷の初期段階では1リングモデルによる傾きに近いが、荷重レベルの上昇に伴い3リングモデルの傾きに近くなった。これは試験体においてリング間継手にモルタルが充填されておらず、その半径方向の拘束(継手のせん断剛性)が緩やかであるため、载荷の初期段階では荷重が主に中段の本体リングで負担されたためと考えられる。

②側円部発生ひずみ

次に、図-11に最大荷重時における本体リング側円部の鋼棒ひずみ分布を、図-12に右円天端鋼棒での荷重～ひずみ曲線を解析値と併せて示す。

発生したひずみは、载荷の初期段階から3リングモデルとほぼ同等となっている。また、载荷にともなうひずみの発生の仕方もほぼ直線的となっており、除荷終了後の残留ひずみはほとんど認められなかった。ただし、スプリングライン位置における内空側の鋼棒の圧縮ひずみ(図-11の393ch)のみ、3リングモデルによる解析値より大きめであった。

③本柱の挙動

本柱試験においては、等分布荷重時(試験ケース11)はもとより、特に偏荷重時(試験ケース12、13)における柱の挙動が重要となる。そこで試験ケース13において、図-13に最大荷重時における本柱の変位状況を示した。

等分布荷重時では、本柱の変位はほとんど認められなかったが、偏荷重時には、柱は側円部の鉛直方向荷重の小さい左円方向に最大約2.2mm程度変位した。なお、除荷後の残留変位はほとんど認められず、また、中央部セグメントと本柱の接合

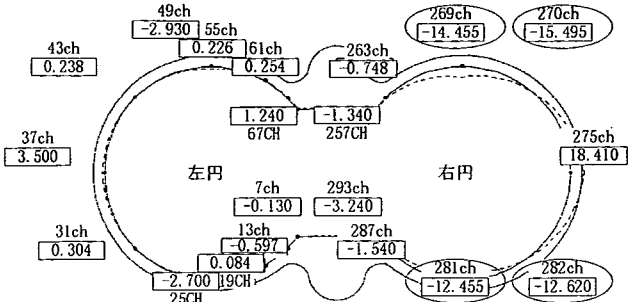


図-9 本体リング変位分布(試験ケース13)

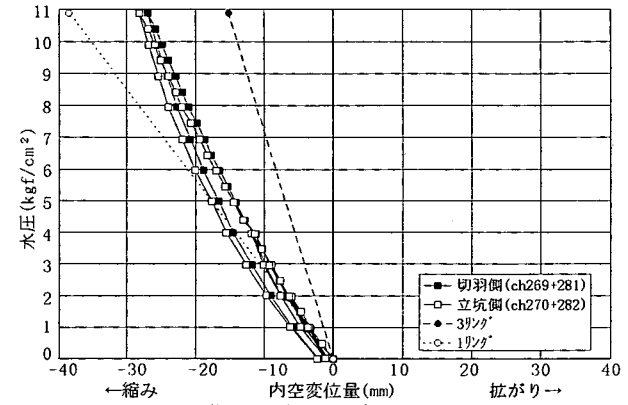


図-10 荷重～変位曲線(試験ケース13)

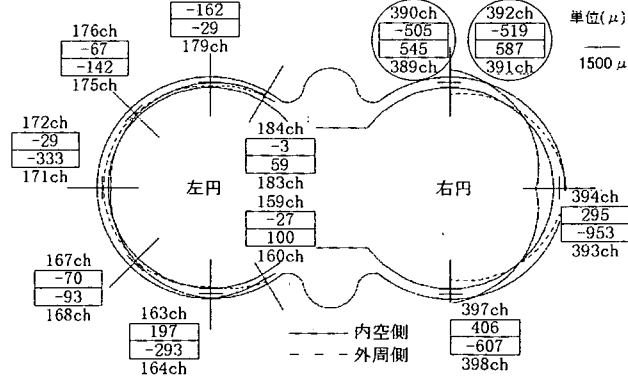


図-11 本体リング切羽側鋼棒ひずみ分布(試験ケース13)

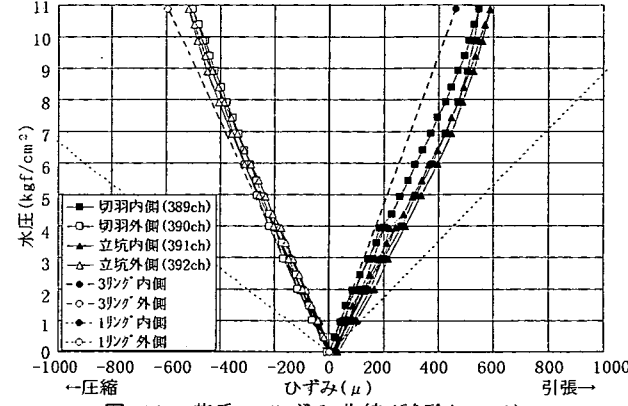


図-12 荷重～ひずみ曲線(試験ケース13)

面において、滑り等の現象は認められなかった。

次に、本柱中央の外周面に発生する柱軸方向ひずみの分布を図-14に示す。試験ケース13では、左右側円部の鉛直方向荷重の相違により、本柱には軸圧縮とともに曲げが発生することとなるが、試験の結果、柱断面の圧縮縁側(右円側)は想定よりも若干大きめの、引張縁側(左円側)は小さめのひずみとなった。なお、載荷時、除荷時ともにひずみは直線的に増減しており、残留はほとんど認められなかった。

(3) 試験、解析結果のまとめ

以上の試験、解析結果より、本覆工構造に関する考察を以下に示す。

① リング全体の挙動

試験の結果、リングの変形は特に側円部で大きくなった。しかしながら、セグメント間、リング間継手への継手モルタルの充填、側円部の中詰めコンクリートの打設により、覆工構造全体の剛性向上が期待されることから、実構造では変形量は小さくなるものと推定される。また発生する応力度についても、十分許容応力度以内であると予想される。

② 本柱の挙動

今回の試験では、実構造で発生すると予想される軸力(約1600tf)よりも小さい軸力下であるが、側円部への偏荷重載荷により、設計値以上の偏心曲げモーメントを本柱に発生させた。その結果、載荷の範囲内において本柱は弾性挙動を示し、実構造においても発生応力度は許容応力度以内であると予想された。

③ 設計手法の妥当性

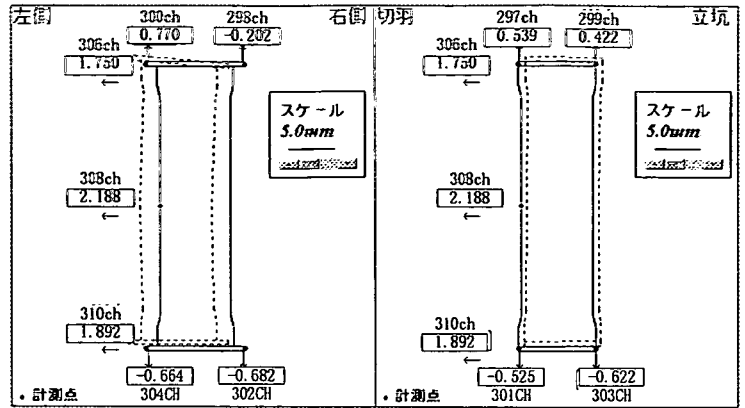
設計で用いた剛性一様の骨組みモデルによる解析を実施し、試験値と比較した。その結果、解析値は試験値とよく一致しており、今回採用した設計手法が妥当であるものと判断された。

5. おわりに

今回の試験により、本覆工構造は十分な構造的性能、安全性を有していることが確認された。本試験をうけて現在セグメントを製作中であり、実施工に向けてシールド掘進準備中である。なお、本試験および解析の実施に際しては、12号線環状部特別委員会のご指導をいただいた。ここに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 福島：21世紀の交通ネットワーク拡大を目指す新技術 (2)、トンネルと地下、vol125、pp. 41～54、1994
- 2) 井上、新治、西尾、粥川：4心円駅シールド工法の開発、トンネルと地下、vol127、pp. 37～44、1996
- 3) 小山、園田、中村：自動化・省力化に適したセグメントの開発、トンネルと地下、vol125、pp. 23～32、1994



(a) 左右円方向 (b) トンネル軸方向
図-13 本柱変位(試験ケース13)

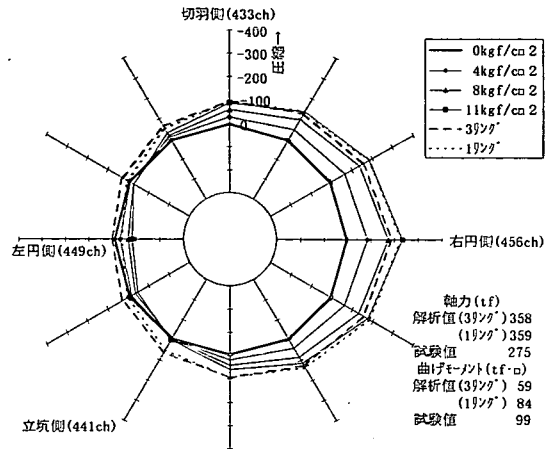


図-14 本柱(鋼管柱)ひずみ分布(試験ケース13)