

外殻先行シールド工法用セグメントの横断面設計法について

SECTIONAL DESIGN METHOD OF THE SEGMENTAL LINING

APPLIED TO THE OUTER-SHELL-DRIVEN SHIELD

高松伸行*・小泉 淳**・阿部幸夫***・岩橋正佳***・浅上裕司****

Nobuyuki TAKAMATSU, Atsushi KOIZUMI, Yukio ABE, Masayoshi IWAHASHI, Hiroshi ASAKAMI

The shield tunneling methods by which only outer shell of a tunnel is excavated in advance have been spotlighted for large sectional tunnels. One of those is the ring shield method. The earth corresponding to the tunnel lining is removed by one machine at the same time. Segmental linings are assembled into the space created. Afterward inner core is excavated.

A series of loading tests of the segments applied to the technique has been carried out in order to establish the design method. In the paper, the test results are mentioned. The analytical model that simulates the results is proposed and its suitability is discussed.

Keywords : shield tunnel, segment, design, loading test, outer-shell-driven shield method

1. はじめに

東京湾横断道路や環七地下河川などを代表とする都市部大断面シールドトンネルが現在盛んに計画され構築されつつある。今後、道路や地下河川のみならず駅部などの鉄道施設、地下駐車場、共同溝などの建設を考えるとさらに断面の大きな、いわゆる超大断面トンネルに対する需要が増大するものと想定される。超大断面トンネルの定義は必ずしも明確ではないが、外径 15m 程度以上と仮定すれば、このようなトンネルを構築するのに全断面を一括掘削するよりは、まず覆工部分だけを先行して構築し、その後内部地山を除去する施工法の方が周辺への影響が少なく、安全にトンネルを構築できると考えられる。このため、トンネルの外殻部（覆工部）を先行して構築する外殻先行シールド工法¹⁾の開発が最近盛んになってきている。

外殻先行シールド工法の覆工構築方式は、大別すると以下の3つになる。

- ① トンネルの部分部分を通常のシールド工法などで先行して構築し、これら複数の先行トンネルを横断面方向に連結してトンネルを完成させる方法。
 - ② 通常の単円、矩形あるいは多円形シールドトンネルなどを積み重ねて断面を形成しトンネルを完成させる方法。
 - ③ 外殻覆工部分を 1 つのシールドにより一括掘削し、連続した覆工体を一度に構築してトンネルを完成させる方法。
- ③に示す工法のうちの一つであるリングシールド工法^{2),3)}は、通常のシールド工法におけるセグメントの組立

* 正会員 工博 東急建設株式会社 技術本部土木技術部
** 正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科
*** 正会員 住友金属工業株式会社 建設エンジニアリング事業部
**** 正会員 東急建設株式会社 技術本部土木技術部

方法とは違って、トンネル円周方向にセグメントを送り出しながら覆工体を構築していく方法を探る。このため、セグメントは送り出しガイド兼用のリング継手を有する。また、地盤やトンネル形状などの条件によっては作用断面力がかなり大きくなることが考えられる。以上のことから、リングシールド工法用のセグメントとして、通常のシールド工法で用いられるセグメントとはまったく異なる構造のセグメントを開発した^{4),5)}。

本研究はこのセグメントを対象に、設計方法の確立を目的に行った実規模載荷実験^{6),7),8),9)}の結果を述べるとともに、その結果を説明できる解析モデルを提案してこれに考察を加えたものである。

2. 工法概要

(1) 工法概要とシールド

リングシールド工法は、図-1に示すように外殻覆工部分のみをリング状に一括掘削して覆工を形成した後、内空部の土砂を取り除いてトンネルを構築する新しいシールド工法である。トンネルは覆工の組み立て、資機材の搬出入および掘削土砂の送排出を行う数個の作業坑部と、作業坑間を連結する直線または円弧状のリング部とから成っている。

本工法で用いるシールドは、通常のものとは異なり覆工体部分のみを掘削するため、内外二重のスキンプレート¹⁾を有するリング形状である。掘削機は多軸ビットなどの掘削装置部分の後方に推進ジャッキを備え、覆工部に反力を取りながら掘進する¹⁰⁾。

(2) 覆工の種類と構築方法

本工法で用いる覆工には、

- ①鉄筋コンクリートセグメントによるもの
- ②中空部を有する鋼・コンクリート合成構造セグメントによるもの
- ③袋詰め直打ちコンクリート¹¹⁾によるもの

などがあり、これらは地山条件やトンネル形状などを考慮して合理的なものを選択して用いる。

本研究は、これらの覆工のうち最も厳しい応力条件下で用いられる「②中空部を有する鋼・コンクリート合成構造セグメント」のリング部を対象として行ったものである。

リング部覆工に合成構造セグメントを用いる場合（①の場合にも適用可）のセグメント組立は、図-2に示すように、各作業坑に装備する特殊なエレクタを用いて行う。まず、すでに組み立てられたセグメントと新たに組み立てるセグメントとをボルトにより接合し、次にセグメントのリング継手とシールドに装備されたガイドとに沿ってこれをエレクタにより作業坑から円周方向に押し込む。この作業を繰り返してリング部のセグメント覆工が完了したら従来工法と同様に作業坑部のセグメントを組み立てる。

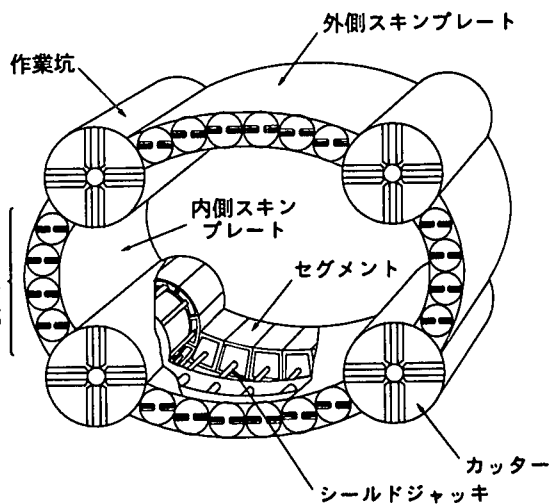


図-1 リングシールド工法の概要

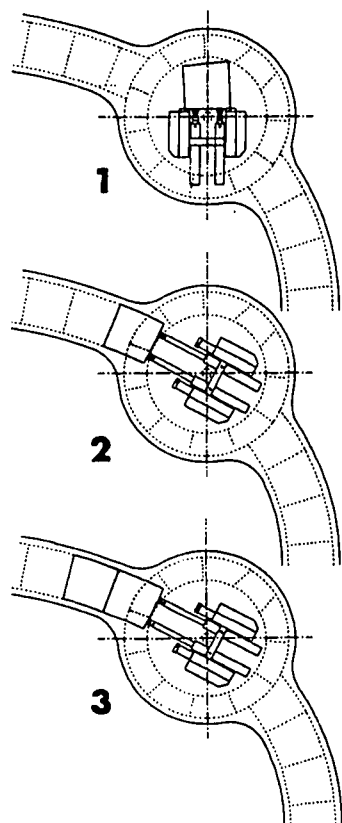


図-2 リング部セグメントの組立方法

3) 鋼・コンクリート合成構造セグメントの概要

本工法で用いるセグメントは前述したように、

- ①トンネル円周方向へセグメントを送り出しながら覆工を構築してゆくため、リング継手の構造が通常のセグメントとは異なる。
- ②地盤やトンネル形状などの条件によっては作用断面力がかかなり大きくなる。
- ③セグメントの搬送時や組立時には、設備の軽減や施工性を良好にする必要があることから、セグメントの重量は軽量にした方がよい。

などの理由から、中空部を有する鋼・コンクリート合成構造セグメントを考案した。図-3はセグメントの概要を示したものである。内外面および端面をぐりと囲んだ鋼殻部の内側にはコンクリートを充填している。

セグメント継手は通常のセグメント継手と機構的には同様のものである。リング継手は、図-4に示すように、CT 形鋼と溝形鋼を組み合わせた送り出しガイド兼用の構造である。リング継手の隙間は 1 リング分のセグメントの組立が完了したら直ちにモルタルを充填し、リング間せん断力の伝達性能を確保するとともに止水性を向上させる。

3. 実験概要

実験を行うにあたって想定したトンネルは、図-5に示すように横内径 14.8m、縦内径 10.4m の三車線道路トンネルで、土被り 30m の洪積砂質土中（地下水位 G.L-1m）に構築されると仮定したものである。実験に用いたセグメントはこれらの条件下で概略設計（図-6）を行い製作した実物大セグメントである。なお、実験は図-5の斜線部を対象に、セグメント本体の曲げ実験、セグメント継手の曲げ実験およびリング継手のせん断実験を行った。

(1) 本体曲げ実験⁷⁾

実験に用いたセグメント単体は、厚さ 1.0m、幅 1.5m、地山側スキムプレート弧長 1.0m である。その形状寸法を考えると単体の曲げ試験は困難なことから、曲げ実験はこの単体を 7 ピース用いて行った。セグメント継手部の剛性は本体剛性と同等となるよう連結板を溶接により接合した（図-7）。供試体の種類は表-1および図-8に示す 2 種類で、スタッドジベルを全鋼殻に配置したものを A-1、側板にスタッドジベル

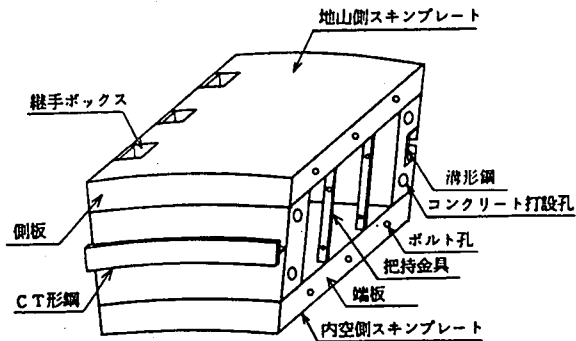


図-3 セグメントの構造

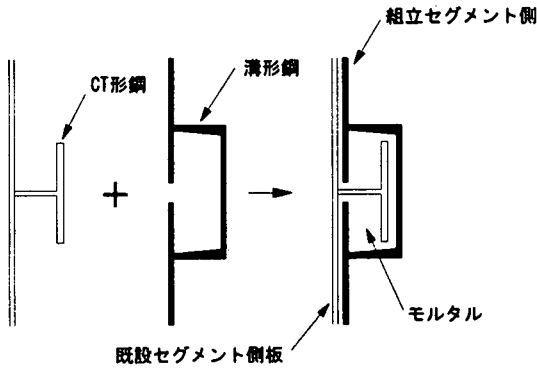


図-4 リング継手の構造

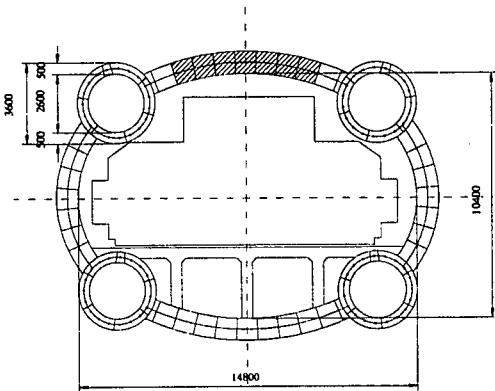


図-5 対象としたトンネル

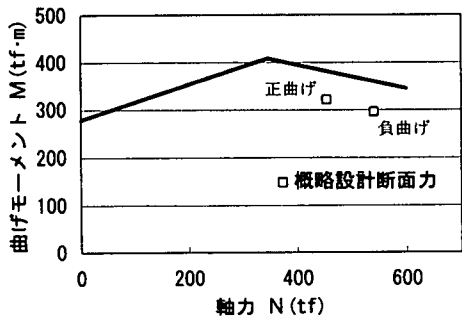


図-6 セグメントの性能曲線¹²⁾

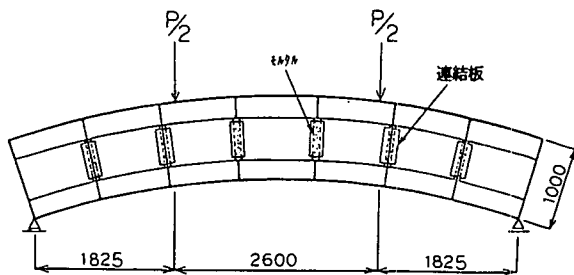


図-7 セグメント本体の曲げ実験

ルを設けないものを A-2 とした。使用したコンクリートの圧縮強度は 430kgf/cm^2 で、鋼殻部には SM490 材を用いた。載荷は図-7に示すように、集中荷重を対称な位置に 2 点載荷し、内空側スキンプレートが降伏点に至るまで行った。なお、供試体 A-1 については、鉛直荷重（曲げモーメント）のほかに水平方向荷重（軸力）を同時に導入し、図-6に示すセグメントの性能曲線上の断面力が生じるように載荷したものも行った。

(2) セグメント継手の曲げ実験⁸⁾

継手曲げ実験は、図-9に示すように、セグメント単体を 6 ピース連結して行った。セグメント継手は図-10に示すように単体の地山側および内空側にそれぞれ 3 箇所ずつ配置しており、十分な組立精度を確保し施工の合理化をはかる目的でナット側は埋め込みナット（補強リブにより本体鋼殻部に固定）としている。なお、着目したセグメント継手は供試体中央の継手のみとし、それ以外のセグメント継手は本体曲げ実験と同様、セグメント本体と同等の剛性を有するように連結板を用いて溶接接合している。継手曲げ実験の供試体は、表-2に示すように、ボルト初期締め付け力の異なる 2 体を用いている。セグメント継手に使用した主な材料は、継手板（ $t=32\text{mm}$ ）および側板（ $t=12\text{mm}$ ）が SM490、埋め込みナットが SS400 である。また、ボルト（M 36）の材質は 10.9 とした。載荷は本体曲げ実験と同様な 2 点載荷である。

(3) リング継手のせん断実験⁹⁾

図-11はリング継手せん断実験の概要を示したものである。セグメントはトンネル軸方向に 3 ピース連結して所定の位置に固定し、CT 形鋼と溝形鋼との隙間にはモルタルを充填して十分に硬化した後でせん断実験を行った。供試体は表-3に示すようにモルタルの強度の違いによる 2 種類とした。同表にはこれらのモルタルの強度試験結果も示してある。リング継手部に使用した CT 形鋼および溝形鋼はともに SS400 材であ

表-1 供試体の種類（本体曲げ）

種類	スタッドの配置位置
A-1	全鋼殻
A-2	側板以外の鋼殻

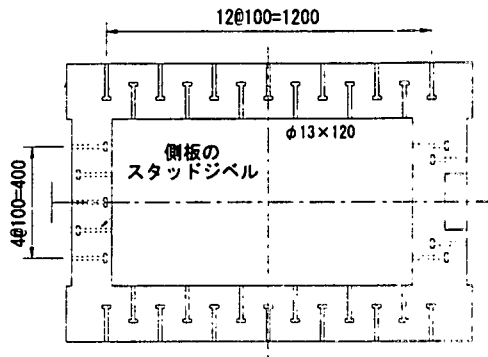


図-8 スタッドジベルの配置

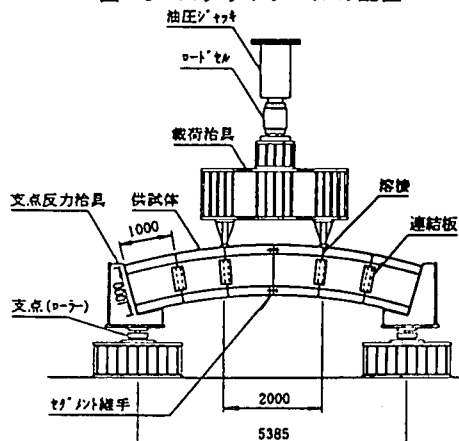


図-9 セグメント継手曲げ実験

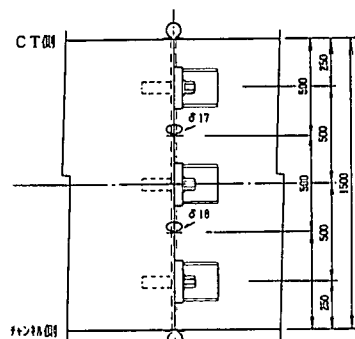


図-10 継手ボックスの配置

表-2 供試体の種類（継手曲げ）

種類	ボルトの初期締め付け力
B-1	2400kgf/cm^2
B-2	4500kgf/cm^2

る。載荷は中央のセグメントの地山側スキムプレートに鉛直方向に等分布荷重を作用させて行った。なお両端のセグメントは内空側スキムプレートが浮き上がらないように固定している。

4. 解析方法

(1) セグメント本体の曲げ剛性

セグメント本体の曲げ剛性は鉄筋コンクリート理論に準拠して求めた。図-12に示すように全鋼殻を鉄筋とみなし、それぞれの図心軸に等分布する等価な断面積を有する鉄筋に置き換えた。また、コンクリートについては圧縮断面のみ有効な断面とした。

(2) セグメント継手の回転ばね定数

セグメント継手の回転ばね定数は、村上一小泉の方法¹³⁾にしたがって定めた。

ただし、引張側のセグメント継ぎボルトは3本とも均等に有効であるものとしてばね定数を算定している。

(3) リング継手のせん断ばね定数

図-13は、リング継手の構造とセグメントリング半径方向のせん断挙動とを模式的に表したものである。

いま、リング継手部のせん断面は b) に示すように溝形鋼側の側板と注入モルタルとの接合面であると仮定する。

リング継手のせん断ばね定数は、図-14に示すように、CT 形鋼はそのウェブを側板側で固定、フランジ側でローラー支持されたはりにモデル化し、フランジ周辺の注入モルタルはウェブと一体となって変位するものとして、このはりが固定端近傍でばねによって弾性支持されるものと考えて定めた。

モルタルのばね定数を算定するにあたっては以下のような仮定を設けた。

- ①CT 形鋼の形状は円周方向に円弧状であるが本解析では直線とした。
- ②注入モルタルを評価するばねの単位面積あたりのばね定数 K は、モルタルの圧縮試験より求められた弾性係数 E (表-3) を用いて以下のように定めた。

$$K = \frac{k}{A} = \frac{EA}{\ell} \cdot \frac{1}{A} = \frac{E}{\ell}$$

ここに、 k は注入モルタルを評価するばねのばね定数、 A は CT 形鋼ウェブ部が注入モルタルに支持される部分の面積、 ℓ は注入モルタルが CT 形鋼ウェブ部に圧縮される部分の長さである。

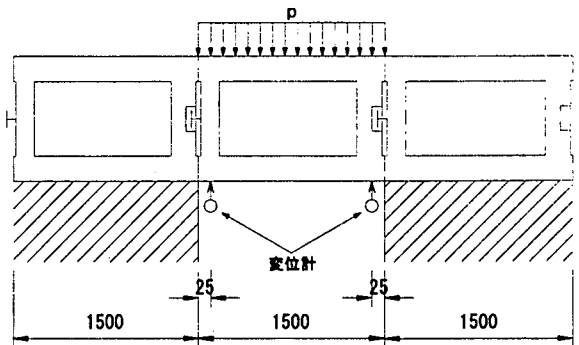


図-11 リング継手せん断実験

表-3 供試体の種類とモルタルの性状(せん断)

種類	圧縮強度	弾性係数 E
C-1	455kgf/cm ²	$2.09 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
C-2	60kgf/cm ²	$3.71 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$

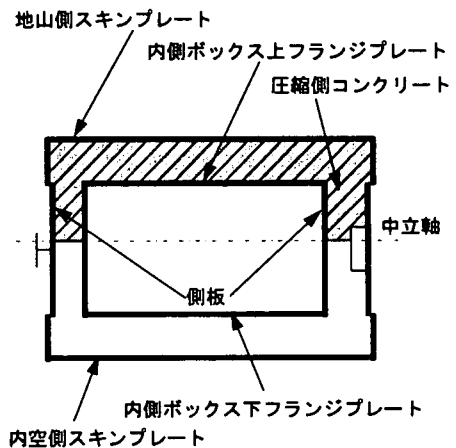


図-12 セグメント本体の設計断面

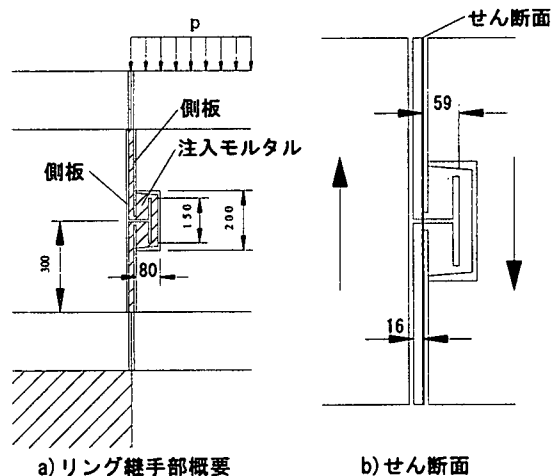


図-13 リング継手部の詳細

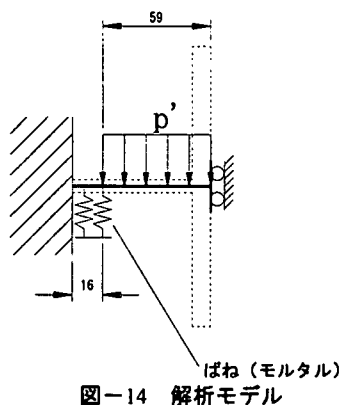


図-14 解析モデル

5. 実験結果と解析結果との比較およびその考察

(1) 本体曲げ実験

a) 供試体中央の鉛直変位

表-4は、A-1 供試体に軸力を導入して行った曲げ実験結果のうち、荷重（軸力と曲げモーメント）と供試体中央変位との関係を示したものである。この表より、セグメントの性能曲線（図-6）上の各荷重段階において、実験結果は計算結果に比べてやや大きくなってはいるものの両者はほぼ一致した。なお、計算に用いたコンクリートの弾性係数は、管理供試体の圧縮試験結果から $E = 3.5 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ とした。また、以下に述べる許容荷重は、セグメント本体内容側スキンプレートが表-5に示す許容応力度となる荷重である。

図-15は、A-1 および A-2 供試体の軸力を導入しない曲げ載荷実験結果のうち荷重と中央変位との関係を示したものである。この図から、許容荷重 300tf までは実験結果と計算結果とはほぼ一致していることがわかる。また、本体側部の鋼殻内部に配置したスタッドの有無による影響は許容荷重まではほとんど見られず、その後の載荷においても側板にスタッドのない A-2 供試体は、A-1 供試体に比べてやや剛性が低下する程度であった。

b) スキンプレートのひずみ

A-1 供試体の荷重とスキンプレートのひずみとの関係を示したものが図-16である。A-2 供試体の結果もほぼ同様な傾向を示しており、曲げ引張側である内容側スキンプレートのひずみはセグメント中央部よりも両端部の方が大きな値を示している。また、実験結果は計算結果よりも小さな値を示している。これはセグメント本体の断面がボックス構造であるため、応力が本体側部から伝達されて、両端部の方が中央部よりも大きな値を示したためと考えられる。一方、圧縮側である地山側スキンプレートについては、中央部、両端部ともにほぼ等しいひずみを示し、計算結果とも概ね一致している。

表-4 各荷重段階における中央変位（軸力導入本体曲げ実験）

導入軸力 N(tf)	導入曲げ モーメント M(tf・m)	中央変位 δ (mm)		割合(実験/計算) (%)
		実験結果	計算結果	
200	353.2	5.71	5.56	102.7
347	408.3	6.60	6.49	101.7
400	395.0	6.54	6.31	103.6
500	370.0	6.19	5.97	103.7
600	345.0	5.74	5.62	102.1

表-5 許容応力度と弾性係数

材料	許容応力度(kgf/cm ²)			弾性係数 (kgf/cm ²)
	引張	圧縮	せん断	
鋼材(SM490)	1900	1900	1100	2.1×10^6
鋼材(SS400)	1400	1400	800	
ボルト(10.9)	4500	—	1900	
コンクリート	—	134	—	3.5×10^5

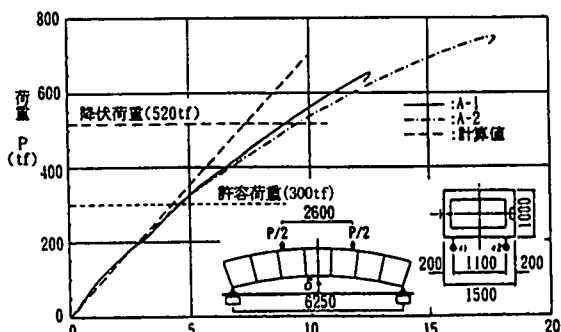


図-15 荷重と中央変位との関係（本体曲げ）

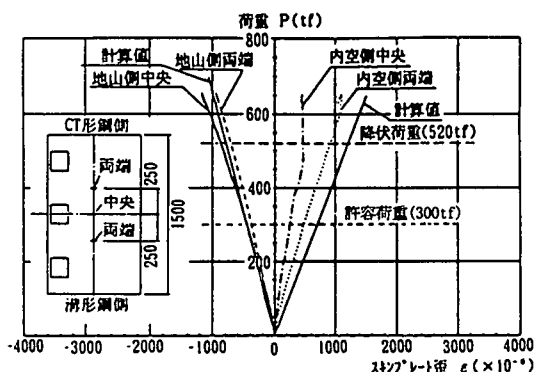


図-16 荷重とスキンプレートひずみとの関係

c)側板のひずみ

図-17は、A-1 供試体の荷重と側板ひずみとの関係を示したものである。許容荷重 300tf および降伏荷重 520tf 載荷時とも中立軸位置は変化せず、ひずみの分布は計算結果とほぼ一致した。

d)スキンプレートとコンクリートとのはく離量

図-18は、スキンプレートとコンクリートとののはく離量と荷重との関係を示したものである。側板にスタッドを有する A-1 供試体では、許容荷重 300tf までのはく離はまったく生じなかった。また、A-2 供試体は荷重 100tf すぎではく離が発生したが、その値は許容荷重 300tf で 0.1mm 以下の小さな値であった。

(2) セグメント継手の曲げ実験

a)供試体中央の鉛直変位

図-19は荷重と継手位置である供試体中央変位との関係を示したものである。この図から、荷重 15tf 程度までは変位の実験結果は両供試体とも継手板離間前の計算結果と概ね一致していることがわかる。その後は荷重とともに継手部に目開きが生じ、継手板の変形およびボルトの伸びなどによりセグメント継手の剛性が低下するが、その傾きは継手板離間後の計算結果とほぼ一致した。また、ボルトの初期締め付け力を増加させることにより継手部の剛性が向上していることがわかる。

b)継手回転角

継手部に作用させた曲げモーメントと継手回転角との関係を図-20に示す。図中、実線と太い点線は開口変位計により得られた継手回転角を、●印はセグメント本体の曲げ実験結果との変位差から算出した B-2 供試体に関する継手回転角を示す。

B-2 供試体について二つの実験結果を比較すると、まず、開口変位計から求めた継手回転角は、継手部に目開きが生じる前の状態が明確に表れていない。これは継手部の変形が微小で、セグメント本体の回転変位の影響をも結果に含んでいるためと考えられる。実際には●印で示すように、載荷初期の段階では継手部に目開きが生じない範囲があると考えられる。またこのことは、前述の荷重と中央変位との関係（図-19）からもわかる。これに対して、荷重が大きな領域では実験結果と計算結果とが概ね一致しており、村上-小泉の方法により継手部の設計を行うことが可能であると考えられる。

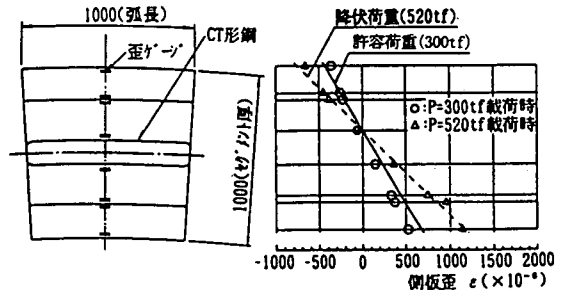


図-17 側板のひずみ分布

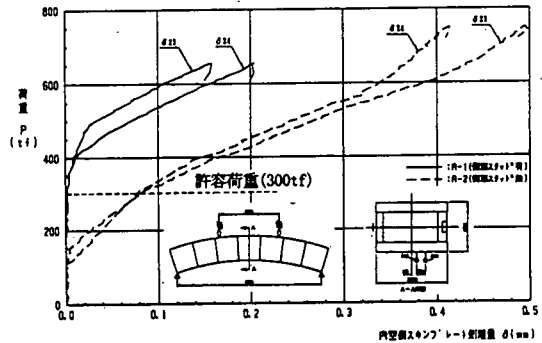


図-18 荷重とのはく離量との関係

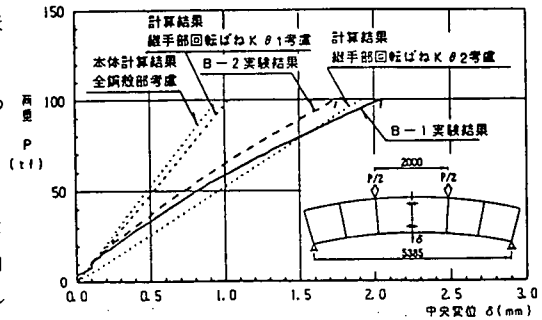


図-19 荷重と鉛直変位との関係（継手曲げ）

●：B-2 実験結果
(セグメント本体の曲げ実験結果)
との変位差から算出

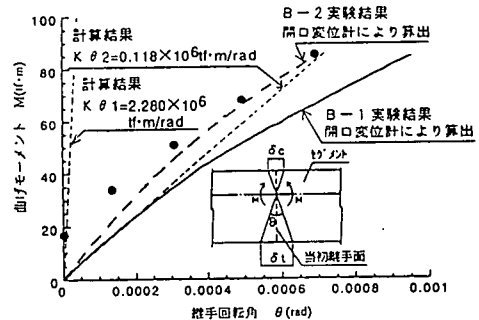


図-20 曲げモーメントと継手回転角との関係

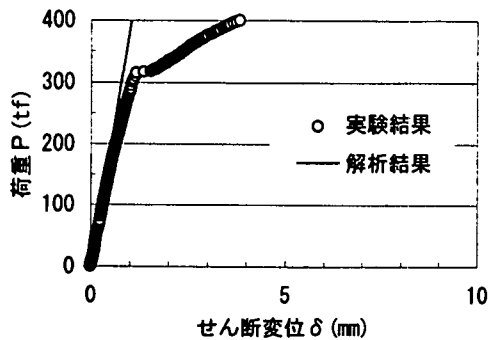


図-21 荷重とせん断変位との関係(実験 C-1)

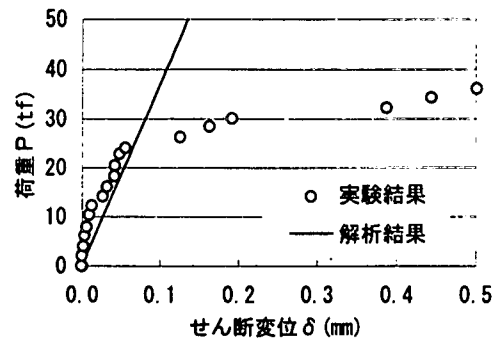


図-22 荷重とせん断変位との関係(実験 C-2)

(3) リング継手のせん断実験

図-21および図-22は、実験 C-1 と実験 C-2 の荷重とせん断変位との関係を示したものである。図中○印は載荷セグメント内空側スキンプレーットの鉛直変位の平均値を、実線は図-14に示す解析モデルを用いた解析結果を示す。これらの図を見ると高強度モルタルを用いた実験 C-1 の実験結果と解析結果とはよく一致している。一方、低強度モルタルを用いた実験 C-2 では、載荷初期の段階で実験結果と解析結果とは概ね一致しているものの荷重が 25tf 以上になるとモルタルに発生するひび割れがかなり多くなり、実験結果と解析結果とは符合していない。これは弾性体として挙動する領域が限られているモルタルを弾性ばねで評価しているためであると考えられる。実際のトンネルではモルタルのひび割れをある程度抑制しなければ防水上支障が生じられると思われる。したがって、リング継手部のモルタルは実験 C-1 に示すように許容荷重の範囲内で弾性ばねと仮定できるような強度が必要になると考えられる。

6. おわりに

通常のセグメントとはまったく構造の異なるリングシールド工法用セグメントの横断面の設計方法について、以上述べたような知見が得られた。この設計方法は本文で示した載荷実験の結果のみで検証を行っているため、今後さらに実験を重ねることで構造モデルの解析精度を高めてゆきたいと考えている。また提案した構造モデルを基にトンネル軸方向の設計方法¹⁴⁾についても研究を進めてゆく予定である。

本研究は、リングシールド工法研究会〈五洋建設(株)、住友建設(株)、(株)銭高組、東急建設(株)、日本国土開発(株)、不動建設(株)、住友金属工業(株)、三菱重工業(株)〉の共同研究の一部として実施したものである。

7. 参考文献

- 1) 菅 健彦：超大断面をより安くより早く構築 実現狙う外殻先行シールド、日経コンストラクション、1993.8.13 号、pp.58～62、1993 年 8 月。
- 2) 毎田敏郎：リングシールド工法、建設機械、Vol.30, No.8, pp.67～73、1994 年 8 月。
- 3) 毎田ら：リングシールド工法の開発(その 1)、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、VI-100, pp.254～255、1993 年 9 月。
- 4) 金子ら：リングシールド工法の開発(その 3)、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、VI-98, pp.258～259、1993 年 9 月。
- 5) 岩橋ら：リングシールド工法の開発(その 5)、土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集、VI-212, pp.420～421、1994 年 9 月。
- 6) 阿部ら：大断面シールドトンネル用合成セグメントの強度特性、日本鉄鋼協会第 129 回春期講演大会 材料とプロセス、Vol.8, No.2, p.462、1995 年 4 月。
- 7) 岩橋ら：リングシールド工法の開発(その 7)、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、III-629, pp.1258～1259、1995 年 9 月。
- 8) 阿部ら：リングシールド工法の開発(その 8)、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、III-630, pp.1260～1261、1995 年 9 月。
- 9) 高松ら：リングシールド工法の開発(その 9)、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、III-631, pp.1262～1263、1995 年 9 月。
- 10) 鶴岡・奥ら：リングシールド工法の開発(その 2)、土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集、VI-99, pp.256～257、1993 年 9 月。
- 11) 定塚正行・松尾勝弥・伊藤 淳：超大断面トンネルでの急速施工、トンネルと地下、第 25 巻 12 号、pp.31～37、1994 年 12 月。
- 12) 土木学会・日本下水道協会編：シールド工事に用標準セグメント、p.330、1990 年 4 月。
- 13) 村上博智・小泉 淳：シールド工事に用セグメントのセグメント継手の挙動について、土木学会論文報告集、第 296 号、pp.73～86、1980 年 4 月。
- 14) 金子ら：リングシールド工法の開発(その 10)、土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集、III-632, pp.1264～1265、1995 年 9 月。