

(43) リングシールド工法覆工用合成セグメントの力学特性 STRENGTH CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SEGMENT FOR RING SHIELD METHOD

○阿部幸夫* 岩橋正佳* 浅上裕司** 高松伸行** 金子正士*** 小泉 淳****
Yukio ABE, Masayoshi IWAHASHI, Hiroshi ASAKAMI, Nobuyuki TAKAMATSU, Masashi KANEKO, Atsushi KOIZUMI

The composite segment for RING SHIELD METHOD consists of concrete and steel shell. The hollow-box type shell formed by steel plates is completely filled up with concrete. They are combined by stud shear connectors welded on the inner surface of the shell. This structure is new as a segment for shield tunnelling.

Since it is necessary to clarify load carrying mechanisms of the structure for design of the segment body as a composite structure, some bending tests with real-dimension models have been carried out.

As a result, the load carrying mechanisms and the deformation characteristics of the segment were clarified. Based on the study, it has been confirmed that the proposed structure is able to be sufficiently applied to practical use.

1. まえがき

都市機能の整備・充実の重要性が各方面から指摘され、これに応える方策として、地下空間の有効利用に対する関心が高まっている。今後、道路、鉄道、地下河川など、都市部を中心に大断面トンネルに対する需要が急増するものと考えられる。

リングシールド工法は、このような大断面トンネルを効率的かつ安全に構築するものであり、図-1に示すリング状のシールドマシンでトンネルの外郭部を先行掘削して、そこにプレキャスト化された覆工体(セグメント)を搬入・連結して覆工を構築し、その後、内周地山を掘削してトンネルを構築する新しいシールド工法である^{1),2)}。

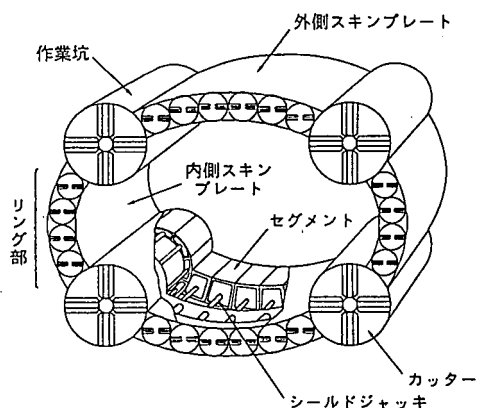


図-1 リングシールド工法の概要

* 住友金属工業(株) 建設エンジニアリング事業部
*** 住友建設(株) 土木本部土木部

** 東急建設(株) 技術本部土木技術部
**** 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

本工法に使用されるセグメントは、大断面トンネルを対象としているため、発生する断面力に応じた高い強度と剛性ならびに施工性から要求される軽量化を満足するものでなければならない。そのため本体は、図-2に示すように、トンネル円周方向に中空部を有する本体の内外面および端部を鋼板で囲んだ鋼殻内にコンクリートを充填した鋼コンクリート合成構造を採用している^{3),4)}。従来のセグメントは、鋼構造または鉄筋コンクリート構造がおもに用いられ、合成構造も一部で採用されているものの、本セグメントのように中空部を有する合成構造は過去に適用された例はない。

本研究は、このような他に類を見ないセグメントについて、実規模大の曲げ載荷実験を実施し^{3),4)}、その設計方法に検討を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

想定したトンネルは、図-3に示す横内径14.8m、縦内径10.4mの横楕円形状を有する三車線道路トンネルで、これが土被り30mの地盤内に構築されるものと仮定した。図-4にこれらの条件下でのセグメントに発生する断面力と、これをもとに設計した実験供試体であるセグメントの断面が許容応力度に達するときの性能曲線を示す。なお供試体は、図-3の斜線で示すようなトンネルの主構造を形成するリング部のセグメント群とした。

2.2 供試体の形状、種類

実験に用いたセグメント単体の形状は、図-5に示すように、外形が高さ1.0m、幅1.5m、外弧長1.0mで、中空部が高さ0.6m、幅1.15mである。

実験は図-6に示すように、この単体を円周方向に7ピース連結して行った。なお、これらのセグメントの継手部は、各々の鋼殻部分を溶接して本体と同等の性能となるように連結した。

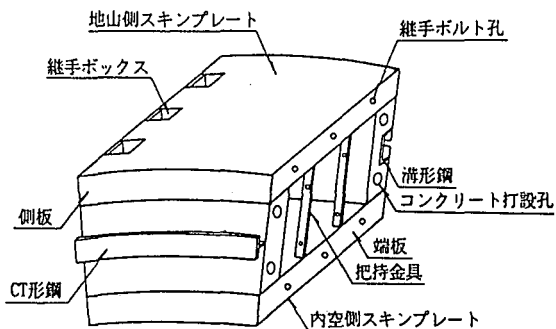


図-2 セグメントの構造

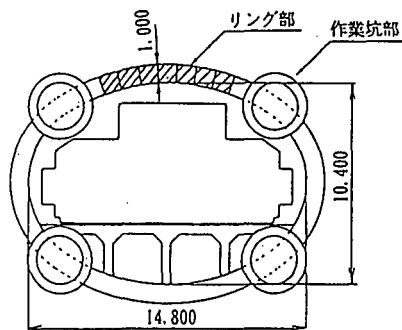


図-3 対象としたトンネル

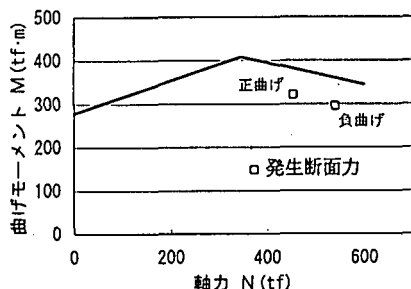


図-4 セグメントの性能曲線

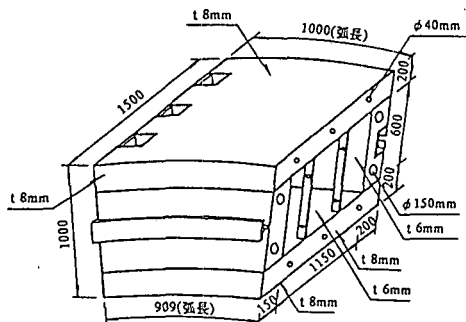


図-5 セグメント単体の形状寸法

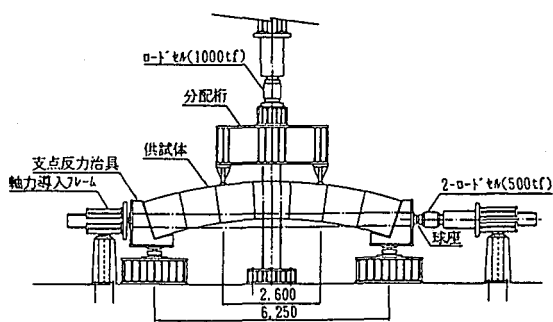


図-6 載荷方法

供試体の種類は、表－１に示すとおりで、鋼殻内に設置するスタッドジベルの配置を変えた２種類である。Ａ－１供試体は、基本的な形状と考えているものであり、Ａ－２供試体は、これに対して側部鋼殻内のスタッドジベルを省略したものである。

本セグメントはその全表面が鋼殻で覆われているため、内部のコンクリートは変形が拘束される構造となっている。このことからＡ－２供試体のように側部のジベルがなくても合成構造として十分に挙動するものと考えられる。Ａ－２供試体は、Ａ－１供試体との比較からこれを検証する目的で作製したものである。

なお供試体には、圧縮強度が 430kgf/cm^2 のコンクリートと、ＳＭ４９０材の鋼殻を用いている。

表－１ 供試体の種類

種類	スタッドジベルの配置位置
A－１	全鋼殻
A－２	側板以外の鋼殻

２．３ 載荷方法

載荷方法は図－６に示すとおりで、２点載荷による鉛直方向荷重（曲げモーメント）と水平方向荷重（軸力）を同時に導入できる方法を採用した。

載荷は、図－４に示したセグメントの性能曲線上の断面力が供試体に生じるように、鉛直および水平方向荷重を同時に作用させ、その後一旦除荷し、次に鉛直方向荷重のみを作用させて内空側スキンプレートが降伏点に至るまで行った。なお、Ａ－２供試体については、鉛直方向荷重のみの載荷とした。

３．解析方法

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。すなわち、図－６に示す全鋼殻部を、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、中立軸以下の引張側コンクリートの応力度を無視し、斜線で示す圧縮断面のみ有効とした。

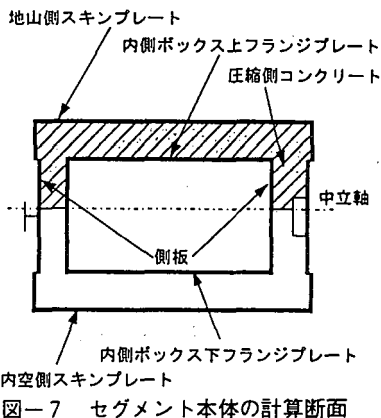
なお、実験結果との比較として示した計算結果は、すべて本解析方法により算出したものである。

４．実験結果および考察

４．１ 供試体中央の鉛直変位

表－２は、Ａ－１供試体に鉛直および水平荷重を導入して図－４に示すセグメントの性能曲線上の断面力を作用させた場合の供試体中央の変位（以下中央変位という）を示したものである。

この表より、実験結果は計算結果に比べて若干大きくなってはいるものの、両者の変形はほぼ等しいことがわかる。



図－７ セグメント本体の計算断面

表－２ 各荷重段階における中央変位（軸力導入曲げ実験）

導入軸力 N (tf)	導入曲げモーメント M (tf・m)	中央変位 δ (mm)		実験結果／計算結果 (%)
		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

図-8は、A-1およびA-2供試体に対し、鉛直方向荷重のみを導入した曲げ実験の載荷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、内空側スキンプレートが許容応力度に達する設計荷重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、本体側部の鋼殻内に配置したスタッドジベルの有無による影響は設計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ジベルのないA-2供試体は、A-1供試体に比べて設計荷重の1.5倍の荷重レベルで5%程度の変位の増加、すなわち若干の剛性低下を示すに留まった。

なお、図において最大載荷荷重がA-1供試体に比べてA-2供試体の方が大きな値を示している。これは、A-2供試体では内空側スキンプレートの降伏荷重を越えた後もさらに載荷を行ったことによるもので、両供試体の耐荷性能の違いを示すものではない。

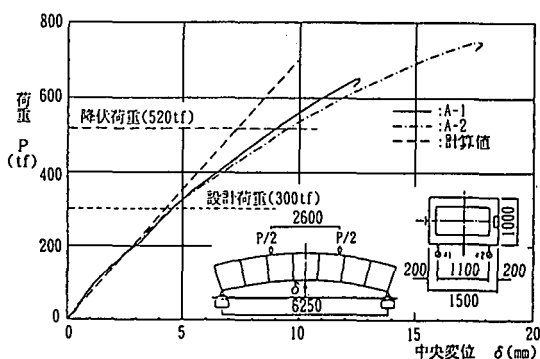


図-8 荷重と中央変位との関係

4.2 側板のひずみ

A-1供試体の鉛直方向荷重と側板ひずみとの関係を図-9に示す。

設計荷重300tf載荷時および内空側スキンプレートが降伏応力度に達したときの降伏荷重520tf載荷時とも中立軸位置は変化せず、いずれのひずみ分布も計算結果とほぼ一致していた。

また、本体中空部を形成する側板ならびに充填コンクリート内のひずみも同様の分布を示す結果となっており、少なくとも降伏荷重レベルまでは平面保持則が成立し、全鋼殻とコンクリートが一体化されていたものと考えられる。

側板にスタッドジベルのないA-2供試体の結果もA-1供試体と同様の挙動を示しており、側部のスタッドジベルの有無による影響はほとんど見られなかった。

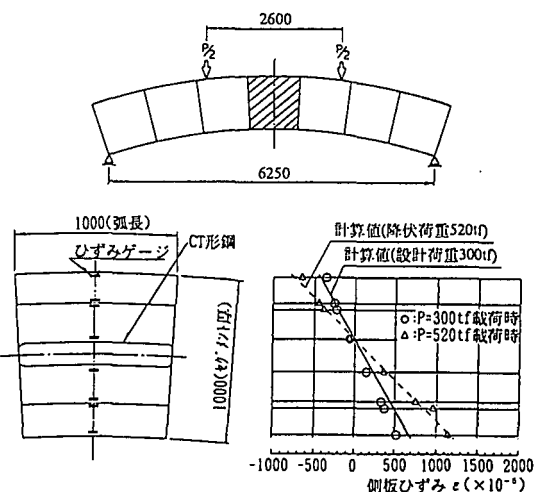


図-9 側板のひずみ分布

4.3 スキンプレートのひずみ

A-1供試体の鉛直方向荷重とスキンプレートのひずみとの関係を図-10に示す。

曲げ引張側である内空側スキンプレートのひずみに着目すると、セグメント中央部より両端部の方が大きな値を示していた。これは、中央部が継手ボックスによるスキンプレートの断面欠損により応力伝達が妨げられたこと、ならびに、セグメント本体が中空構造であり、応力が本体側部から中央部に伝達されるため、両端部の方が大きな応力を出すことによるものと考えられる。また、実験結果は計算結果よりもひずみが小さかった。これも先に述べた中空構造による応力伝達の影響であり、図-9において側板下端のひずみが計算結果とほぼ一致していたことから、側板近傍のスキ

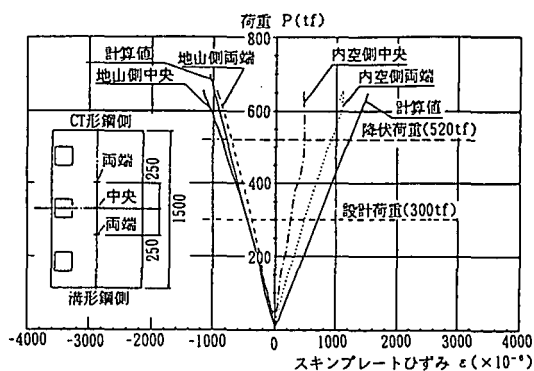


図-10 荷重とスキンプレートひずみとの関係

ンプレートにも計算値相当のひずみが生じていたものと推定される。

一方、曲げ圧縮側である地山側スキンプレートについては、中央部、両端部ともほぼ等しいひずみを示し、計算結果とも概ね一致していた。これは、圧縮応力下のためコンクリートによる応力伝達が支配的となり、スキンプレートの断面欠損による影響がほとんど生じなかったためと思われる。また、中空構造によるせん断遅れの現象は見られなかった。

4.4 スキンプレートとコンクリートとはく離量

図-11は、鉛直方向荷重と内空側スキンプレートとはく離量との関係を示したものである。

側板にスタッドジベルを有するA-1供試体では、設計荷重300tfまで、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付近ではく離が発生したが、その値は設計荷重300tfでも0.1mm以下の小さな値であった。

両供試体ともはく離が生じた後は荷重に対しほぼ線形にはく離量が増加した。この影響が図-7に示した本体剛性が設計荷重以降徐々に低下した要因の一つと考えられる。

4.5 スタッドジベルのひずみ

図-12および図-13は、鉛直方向荷重とA-1供試体の側板に設置したスタッドジベルのひずみとの関係を、軸ひずみと曲げひずみそれぞれについて示したものである。

設計荷重300tf載荷時のひずみは、軸ひずみ、曲げひずみとも30 μ 程度の小さな値であった。

5. セグメント本体設計上の考え方

今回得られた知見から、セグメント本体を設計する際の考え方を述べると以下のようなものである。

- (1) 供試体の変形ならびに各部の応力状態やひずみ分布は、降伏荷重レベルまでほぼ計算結果と一致しており、セグメント本体は全鋼殻部を鉄筋とみなした鉄筋コンクリート理論により設計可能である。
- (2) 側部のスタッドジベルは、供試体の変形や各部の応力状態などにその有無による影響は見られず、また、それに発生する応力度も小さかったことから、設置しなくても問題ないと考えられる。
- (3) 曲げ圧縮側におけるスキンプレートの有効幅は、全幅有効とした計算結果に相当する応力度が発生しており、その分布も中央部と両端部で差がなかったことから、本体の全幅を考慮できるものと考えられる。
- (4) 設計対象となる本体の形状によっては、全鋼殻部を考慮する設計が必ずしも安全側であると結論づけることができない場合も考えられる。このような場合には、今回の実験結果から発生応力のばらつきが見られた曲げ引張側のスキンプレートにおいて、発生応力度の小さな中央部分を無視するなど、有効幅を考慮に入れた設計手法を取り入れることも考えられる。

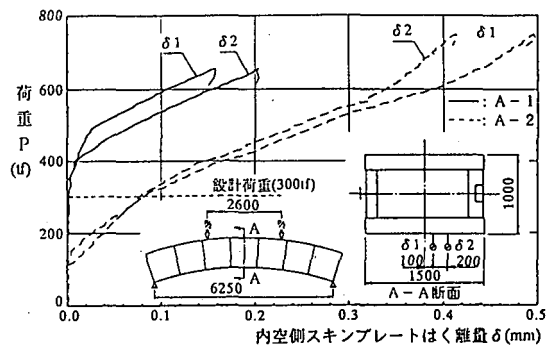


図-11 荷重とはく離量との関係

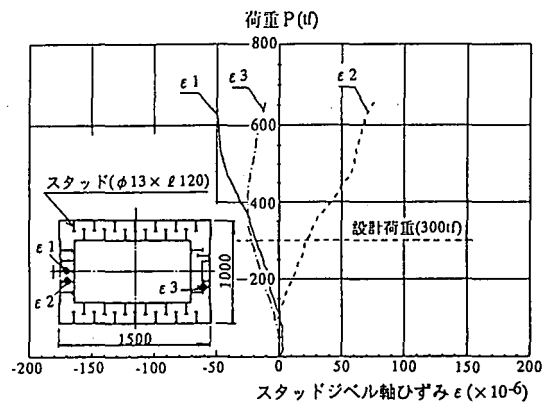


図-12 荷重とスタッドジベル軸ひずみとの関係

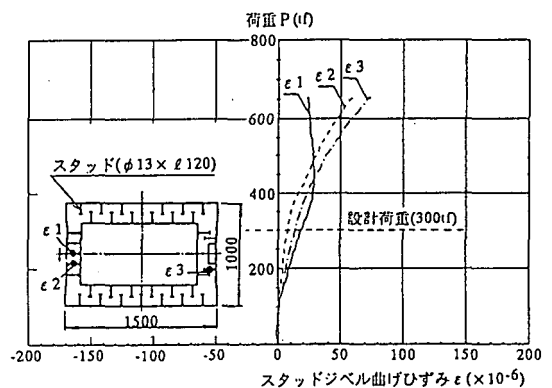


図-13 荷重とスタッドジベル曲げひずみとの関係

6. おわりに

今回の実験結果から、通常のセグメントとはまったく構造の異なる中空部を有する鋼コンクリート合成セグメントがリングシールド工法のトンネル覆工として十分実用に供しうることが確認できた。また、その設計方法についてもいくつかの知見が得られた。

今後さらに検討を重ね、詳細構造およびより合理的な設計方法の確立を目指してゆきたいと考えている。また、今回の研究はトンネル横断面に関するものであったが、トンネル軸方向の研究⁷⁾についても進めていく予定である。

なお、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)、三菱重工業(株)、住友金属工業(株)〕の共同研究として実施したものの一部である。

< 参 考 文 献 >

- 1) 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。
- 2) 毎田・浅上ら：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，pp.254～255，1993年9月。
- 3) 金子・濱田ら：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，pp.258～259，1993年9月。
- 4) 岩橋・濱田ら：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，pp.420～421，1994年9月。
- 5) 阿部・岩橋・柳本：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。
- 6) 岩橋・二宮・鶴岡・小泉：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，1995年9月。
- 7) 金子・高松ら：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，1995年9月。