

合成セグメント（ICセグメント）の技術開発

Technical Development of Composite Segment (IC Segment)

山田 晃 司 株式会社 IHI 建材工業 事業統括部セグメント部
山口 隆 一 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査
小林 一 博 株式会社 IHI 建材工業 事業統括部セグメント部 部長
荒井 孝 株式会社 IHI 建材工業 事業統括部セグメント部 部長

都市部などの大深度での施工によって高土水圧を受けるシールドトンネル工事において、薄肉幅広化が可能になる合成セグメント（ICセグメント）の開発を行った。鋼殻とコンクリートを鉄筋を介して一体化させた合成構造であり、薄型化や工期短縮による経済性に加え、優れた止水性が期待できる。載荷試験を実施し、解析値と近似した挙動を示すことや、十分な強度、変形性能を有していることを確認した。

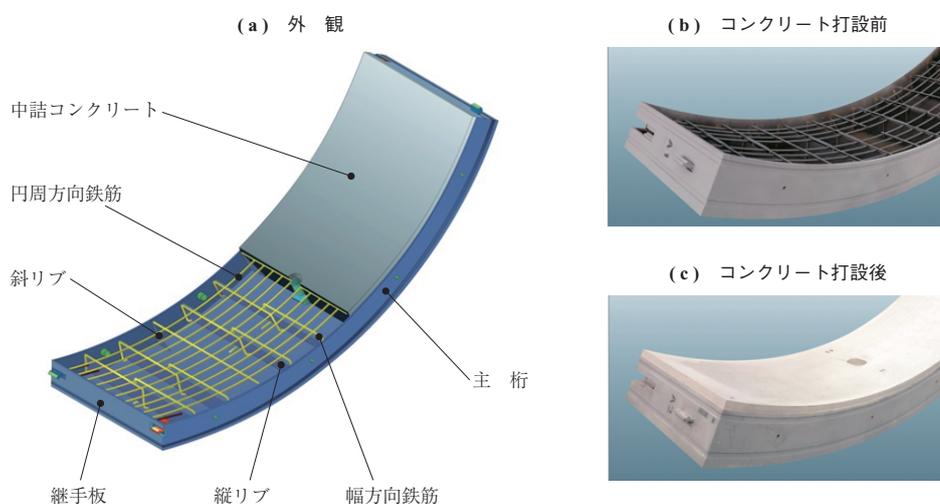
We have developed a composite segment (IC segment) that can be made thinner and wider in a shield tunnel construction that receives great sediment pressure during construction at large depths in urban areas. It is a composite structure in which the steel shell and concrete are integrated via reinforcing bars, which can be economically advantageous due to thinning and a shorter construction period, and excellent watertightness. We carried out a loading experiment, confirming that it showed behavior similar to the theoretical value and that it had sufficient strength and deformability.

1. 緒 言

近年のシールドトンネル工事の傾向として、コスト低減、工期短縮を目的とした薄肉幅広化や二次覆工の省略化が挙げられる。従来、鉄筋コンクリート（RC：Reinforced Concrete）製セグメントと鋼製セグメントとが広く用いられているが、前者は開口部などの特殊荷重部においては鉄筋量が増加し、断面を大きくしなければならない。後者は

大深度での施工による高土水圧下では大きな軸力が作用して、鋼材量が増大する。そこで、鋼殻と鉄筋コンクリートの合成化によって高土水圧下や、特殊荷重部においても、薄肉幅広化が可能な合成セグメント（ICセグメント：IKK Composite Segment）の開発を行った。合成セグメント概要図を第1図に示す。

本稿では載荷試験の結果および FEM (Finite Element Method) 解析による試験結果との比較について報告する。



第1図 合成セグメント概要図
Fig.1 Overview of synthetic segment

2. 構造概要

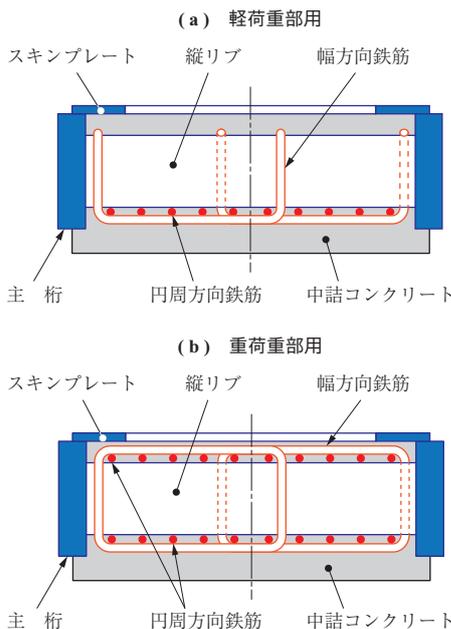
第2図に合成セグメントの本体断面概念図を示す。鋼殻の縦リブとスキンプレートの間に空隙を設けており、コンクリートの充填性を高めている。軽荷重用（第2図 - (a)）では縦リブと円周方向鉄筋をフック状に加工された幅方向鉄筋を用いて一体化させ、重荷重用（第2図 - (b)）では縦リブとスキンプレートの空隙に円周方向鉄筋を配置して、内外の円周方向鉄筋を幅方向鉄筋で一体化させた。解析値の算定には主桁およびスキンプレートの有効断面を鉄筋としてモデル化し、引張側コンクリートを無視したRC断面を用いた。

合成構造によって覆工厚を薄くできるため経済性に優れており、幅広化による工期短縮も可能である。また、内面を除く5面が鋼板で覆われているため、施工時の割れ・欠けに起因する漏水を防ぎ、優れた止水性が期待できる。

3. 載荷試験

3.1 試験方法

第1表に合成セグメントの供試体諸元、第3図に供試体の主断面概要図を示す。供試体は第2図に示す - (a)、- (b) のうち、内外面に円周方向鉄筋を配置した重荷重用（第2図 - (b)）とした。第4図に試験概要図を示す。ジャッキによる荷重は載荷ジグを介して2点で供試体に載荷される（載荷スパン 900 mm）。支承部にはローラを設置

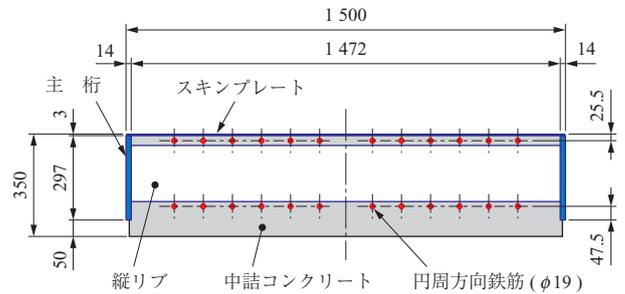


第2図 合成セグメントの本体断面概念図
Fig. 2 Concept of body section cross section of synthetic segment

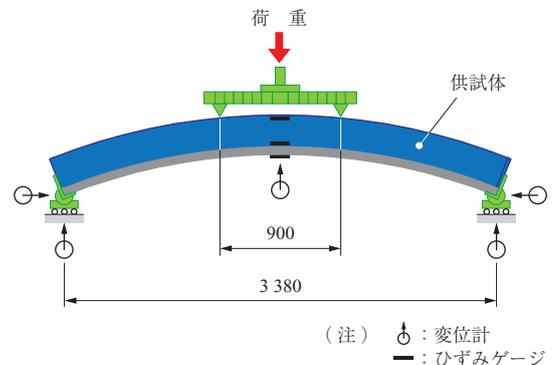
第1表 供試体諸元
Table 1 Sample specimen

項	目	単位	仕様
外観形状	外径	mm	6 700
	幅	mm	1 500
	厚さ	mm	350
	$f'_{ck}{}^1$	N/mm ²	42
スキンプレート	厚さ	mm	3
	材質	-	SM490YA
主桁	高さ	mm	297
	厚さ	mm	14
	材質	-	SM490YA
円周方向鉄筋	鉄筋径	mm	$\phi 19$
	本数	本	12
	材質	-	SD345

(注) *1: コンクリート設計基準強度



第3図 供試体の主断面概要図 (単位: mm)
Fig. 3 Main section schematic drawing (unit: mm)

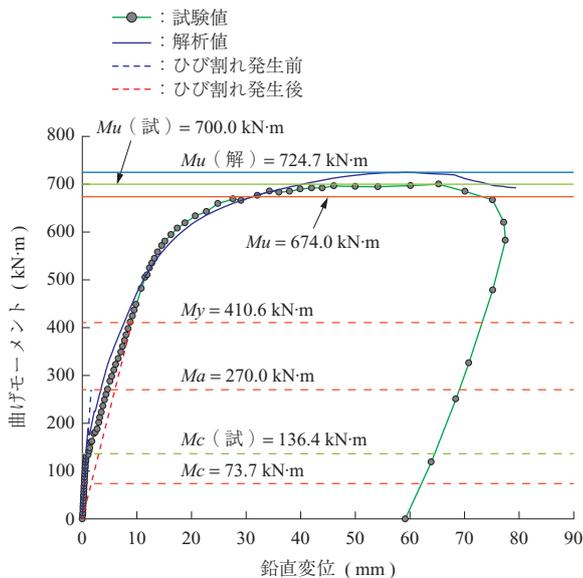


第4図 試験概要図 (単位: mm)
Fig. 4 Test overview (unit: mm)

し、両端可動支持条件としている（支持スパン 3 380 mm）。載荷中は①荷重②変位③各部材のひずみ、を計測して、耐力や剛性、鋼殻と鉄筋コンクリートが一体化して挙動しているかを検証した。その際、実構造の性能を確認するために、コンクリートと鋼板の接触面はグリリスによる付着切りを行わなかった。

3.2 試験結果

第5図に曲げモーメントと鉛直変位の関係図を示す。



(注) Mu (試) : 破壊モーメント (試験値)
 Mu (解) : 破壊モーメント (解析値)
 Mu : 破壊モーメント
 My : 降伏モーメント
 Ma : 設計モーメント
 Mc (試) : ひび割れ発生モーメント (試験値)
 Mc : ひび割れ発生モーメント

第 5 図 曲げモーメントと鉛直変位関係図

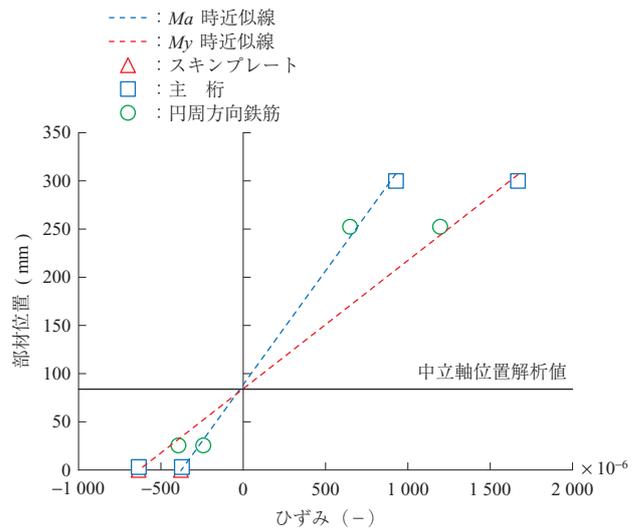
Fig. 5 Bending moment - vertical displacement relationship diagram

ひび割れ発生前は RC 断面を用いて算定した解析値と近似した勾配を示し、ひび割れ発生と同時に勾配を変化させてひび割れ発生後の解析値へと推移している。耐力は解析値の最大モーメント 674.0 kN·m を上回り、700.0 kN·m であった。また、最大モーメント到達後も極端な荷重低下が発生せず、十分な変形性能を有していることを確認した。この変形性能によって地震時にはぜい性的な破壊を防ぐことが期待できる。

第 6 図に設計モーメント (Ma) 時と降伏モーメント (My) 時の主構造部材のひずみ分布図を示す。ひずみは直線上に分布しており、中立軸位置が解析値とほぼ一致していることから、平面保持が成立し鋼殻と鉄筋コンクリートが一体となって挙動しているといえる。

4. FEM 解析

従来、コンクリートの非線形性や鋼板との接触要素を定義する必要性から、合成構造は FEM 解析の収束性が悪いとされてきた。しかし、近年の解析環境の充実によって合成構造であっても解析による評価が可能になりつつある。以上の背景から本稿では FEM 解析を行い、載荷試験結果との比較を行った。また、第 1 図に示す斜リブのピッチをパラメータとして解析を行い、耐荷挙動に及ぼす影響を



(注) Ma : 設計モーメント
 My : 降伏モーメント

第 6 図 ひずみ分布図

Fig. 6 Strain distribution map

検討した。

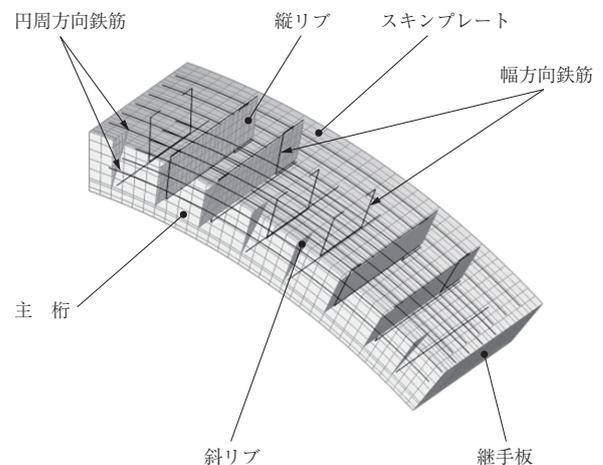
本稿の解析は汎用有限要素解析コード ABAQUS ver. 6.12 を用いて行った。

4.1 解析パラメータ

解析パラメータは斜リブのピッチとし、① 縦リブと縦リブの間隔 746 mm を 2 等分するよう斜リブを配置したケース 1 ② 3 等分するよう斜リブを配置したケース 2 ③ 4 等分するよう斜リブ配置したケース 3、とした。

4.2 解析モデル

例としてケース 2 の解析モデル図を第 7 図に示す。解析モデルは対称性を考慮して 1/4 モデルとした。鋼板はシェル要素、鉄筋はビーム要素、コンクリートはソリッド要素とした。また、試験体ではグリスによる付着切りを行



第 7 図 解析モデル図 (ケース 2)

Fig. 7 Analysis model diagram (Case 2)

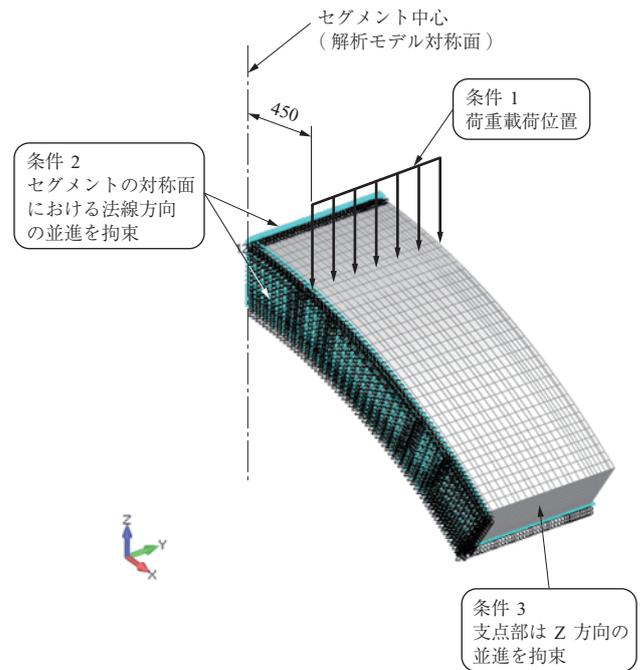
わなかったが、付着作用はごく早期に喪失すること着目するのは最大荷重付近であることから、コンクリートと鋼板の境界面には接触要素を定義し、摩擦係数は 0.0 とした。

4.3 材料物性

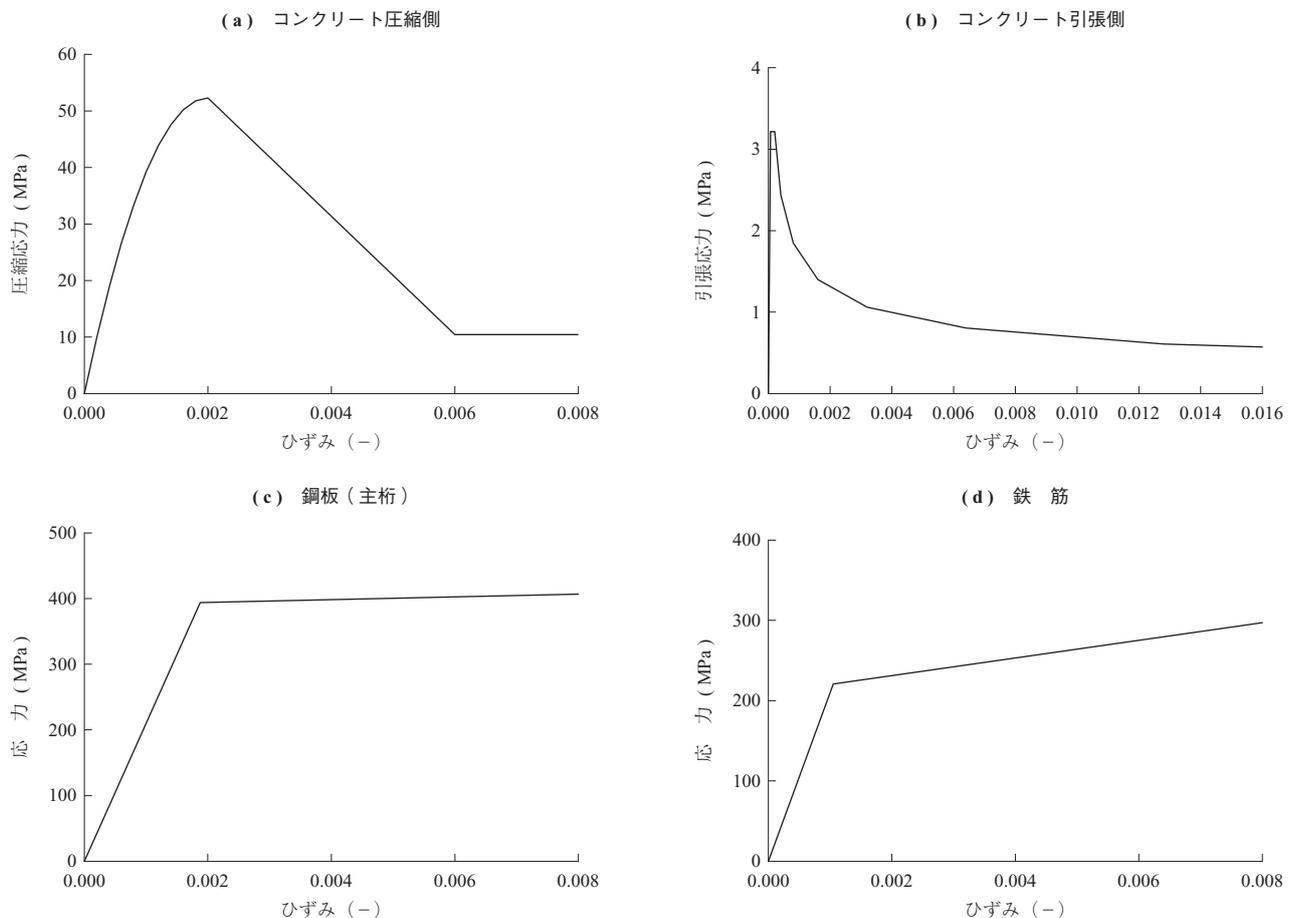
各材料のひずみと応力の関係を第 8 図に示す。コンクリートの圧縮強度は試験値である 52.3 N/mm²、コンクリートの引張強度は 3.2 N/mm² とし、鋼板および鉄筋のひずみと応力の関係は弾性係数を 210 × 10³ N/mm² とした⁽¹⁾。鋼板の降伏点 (394 N/mm²) 以降は弾性係数の 1/100 とするバイリニア型を用い、コンクリートの軟化域や鉄筋の降伏後の挙動は、コンクリートと鉄筋の付着の影響を考慮した⁽²⁾。また、ポアソン比はコンクリート 0.2、鋼板および鉄筋 0.3 とした。

4.4 荷重条件および拘束条件

本解析の荷重条件と拘束条件を第 9 図に示す。荷重載荷位置は試験と同様、セグメント中心から 450 mm の位置への線載荷とした。荷重載荷方向は第 9 図に示す Z 軸の負の方向とし、荷重載荷方法は解析の収束性を考慮して強制変位とした。拘束条件は第 9 図に示すように、解析



第 9 図 荷重・拘束条件 (単位: mm)
Fig. 9 Load/constraint condition (unit: mm)



第 8 図 各材料のひずみと応力関係図
Fig. 8 Strain-stress relationship diagram of each material

モデルの対称面にはその法線方向の並進を拘束した。また、支点部は試験と同様に Z 方向の並進を拘束した。

4.5 解析結果

(1) 荷重試験結果との比較

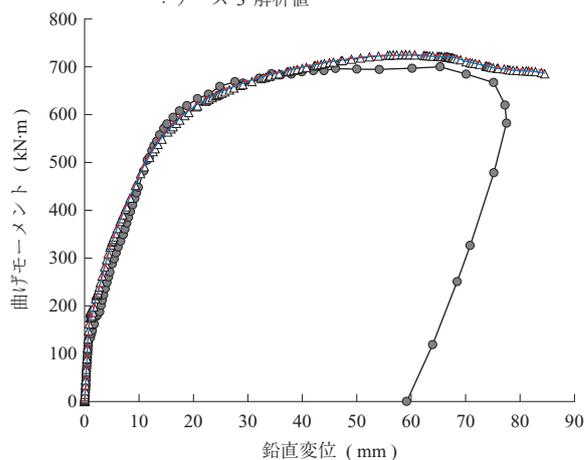
破壊モーメントは実測値が 700.0 kN・m、解析結果が 724.7 kN・m となった。試験値と解析値の差異は 5%未満と小さく、ほぼ一致した(第 5 図参照)。

第 10 図に - (a) 鉛直変位 59.1 mm の時(最大曲げモーメント時)と、- (a) から変位が 5 mm 進行した - (b) 鉛直変位 64.1 mm の時のコンクリートの最小主応力コンター図を示す。荷重載荷位置からセグメント中心側のコンクリート上縁の最小主応力が、- (a) で示す最大曲げモーメント時よりも変位が進んだ - (b) では低下しているのが分かる。荷重載荷位置よりセグメント中心側は等曲げモーメント発生区間であり、せん断力は発生しない。つまり、本試験の供試体はせん断力ではなく曲げ圧縮力による破壊によって部材耐力を失ったものと推測される。

(2) 斜リブのピッチの影響

第 11 図に斜リブのピッチが異なるケース 1, 2, 3 の曲げモーメントと鉛直変位関係図を示す。ここで、第 11 図に示すケース 1 とケース 3 を比較すると斜リブのピッチが狭くなるとごくわずかに耐荷力が増加する。斜リブを部材周方向に断続的に数多く設けることでスキンプレーットの曲げモーメントに対する有効幅が部分的に増加していることが考えられるものの、本検討の結果ではその影響は小さいといえる。

● : ケース 2 試験値
 ▲ : ケース 1 解析値
 ○ : ケース 2 解析値
 - - : ケース 3 解析値



(注) 条件: ケース 1, 2, 3

第 11 図 曲げモーメントと鉛直変位関係図

Fig. 11 Bending moment – vertical displacement relationship diagram

5. 考 察

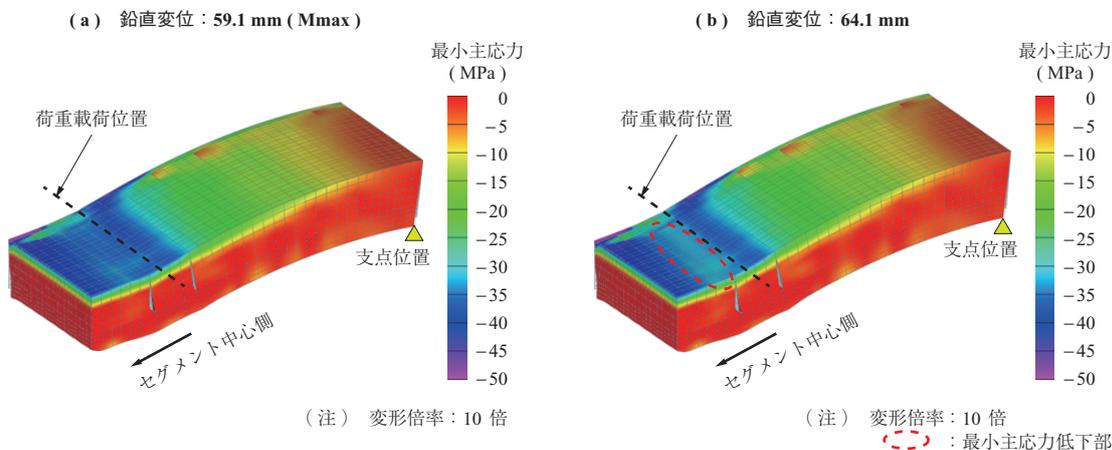
(1) 荷重試験結果

曲げモーメントと鉛直変位の関係、耐力ともに解析値と近似した結果が得られ、計算手法が適正であり、平面保持が成立したことで鋼殻と鉄筋コンクリートの一体化が確認された。

(2) FEM 解析に結果

荷重試験結果と FEM 解析結果がほぼ一致しており、合成セグメントの性能を解析的に評価できた。

斜リブのピッチが鉛直変位と曲げモーメントの関係に及ぼす影響は小さい。この原因はコンクリートとスキンプレーットの間にスキンプレーットの面外方向



第 10 図 コンクリートの最小主応力コンター図
 Fig. 10 Minimum main stress contour plot of concrete

のずれ（すき間の発生）を抑制するようなずれ止め機構が存在しないことによるものと考えられる。また、このことから合成効果は端部にある継手板の拘束によるところが大きいと思われる。

6. 結 言

今回実施した荷重試験および FEM 解析によって合成セグメントの設計手法と解析的評価の基礎を確立することができた。今後は、本セグメントの特長である高剛性、高止水性および耐震性（高変形性）などによって、多様化す

るシールドトンネルの用途に対応して社会の発展に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 公益社団法人土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕 2013 年 3 月 pp. 34 - 47
- (2) 公益社団法人土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕 2013 年 3 月 pp. 452 - 467