

# 論文 MMST鋼殻における後施工PC鋼棒継手

加納 宏一\*<sup>1</sup>・羽生 剛\*<sup>2</sup>・坂下 克之\*<sup>3</sup>・安部 吉生\*<sup>4</sup>

要旨： MMST鋼殻の継手方法として提案する「後施工PC鋼棒継手」における設計の考え方は、単体トンネル掘削時に掘削解放力を受け持つPC鋼棒と、大断面トンネルの内部掘削時に全引張力を受け持つPC鋼棒（後施工PC鋼棒）とを明確に分離し、単体トンネルの掘削解放力による残留応力の影響を後施工PC鋼棒から排除するものである。

論文では、設計的見地から「後施工PC鋼棒継手」の有効性を述べ、全引張を受けるPC鋼棒継手に対して実施した構造実験と解析結果の比較検討を行う。特に、複数のPC鋼棒が受ける力の分散性と鋼殻継手部のコンクリートに発生するひび割れについて言及する。

キーワード：継手構造，合成構造，都市大断面トンネル，有限要素法，弾塑性解析

## 1. はじめに

首都高速道路公団により考案されたMMST (Multi Micro Shield Tunneling) 工法<sup>1)</sup>は、トンネル外殻部を複数の小断面矩形単体シールドにより先行掘削し、それらをお互いに接続してトンネル外殻部躯体を構築することにより、大断面トンネルを施工する方法である。現在、首都高速道路公団により、高速川崎縦貫線と横羽線を結ぶ大師ジャンクション（仮称）内の換気洞道構築工事において、MMST工法の実用化に向けた試験施工の実施と技術的課題の検討が進められている。

本研究では、MMST工法の技術的課題のひとつである、小断面矩形単体シールドにおけるMMST鋼殻の継手構造に関して、MMST工法の特徴を反映したより合理的な設計の考え方に基づくPC鋼棒による継手構造形式を提案する。そして、継手構造の特性を把握するために、要素実験および部材実験を実施し、またFEMによる弾塑性解析との比較により継手構造における引張力の伝達メカニズムを明確にする。

## 2. MMST工法と鋼殻継手構造

MMST工法の施工手順は、図-1に示すように、ステップ1でトンネル外殻部をまず矩形の小断面単体シールドで掘削し、ステップ2で単体シールド間の掘削と接続用の配筋などを行い、隣り合うシールド同士を接続する。続くステップ3では、鋼殻内および接続部にコンクリートを打設して外殻部躯体の構築を行う。そして、最終のステップ4では、機械掘りによる内部土

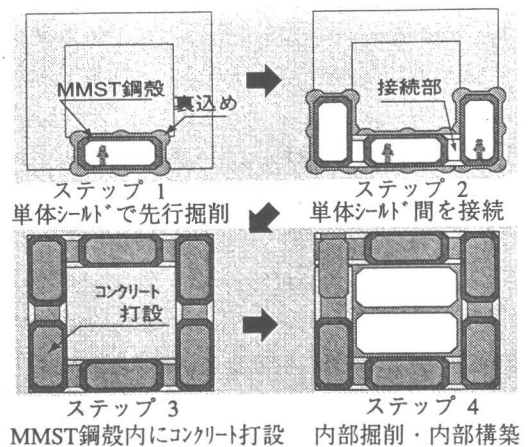
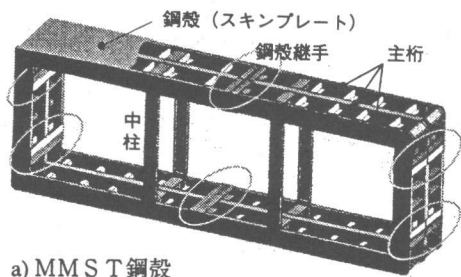
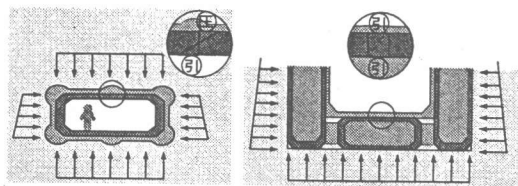


図-1 MMST工法の施工手順図

\*1 大成建設(株) 技術研究所 構造研究部土木構造研究室課長（正会員）  
 \*2 大成建設(株) 土木設計部 解析技術室主任、工修  
 \*3 大成建設(株) 技術研究所 構造研究部土木構造研究室係長  
 \*4 大成建設(株) 土木設計部 陸上設計室課長、工修



a) MMST 鋼殻



b) ステップ1の荷重

c) ステップ4の荷重

図-2 MMST 鋼殻と作用荷重

砂の掘削を行い内部構築を完了して、大断面トンネルを完成させる。

図-2 a)に示すMMST鋼殻は、周辺地盤からの土水圧に抵抗する主桁と中柱、スキムプレートとしての鋼板などから構成されるS部材であり、ステップ1の単体シールド掘進時に配置されシールドの覆工体として働く。ステップ3以降の外殻部躯体の構築後は、内部に打設されるコンクリートと一体となりSC部材として成り立つ。

MMST鋼殻継手は、通常の円形シールドなどと同様に短ボルト継手を基本構造としているが、単体シールドに対応したMMST鋼殻は矩形断面であるため、ステップ1のシールド覆工体においては、曲げ部材として設計する必要がある(図-2 b)。ステップ4の内部掘削と内部構築以後において、MMST鋼殻はトンネル外殻部躯体の一部として周辺地盤から土水圧を受けて変形し、MMST鋼殻の主桁および鋼殻継手は、純引張力を受けることになる(図-2 c)。このように、施工ステップごとに構造系が大きく変化するのが、MMST工法の特徴である。したがって、MMST鋼殻に対しては、このような特徴を設計的に考慮する事により、曲げ部材および純引張力に対応した合理的な鋼殻継手構造の

検討が必要となる。

本研究では、最初に、曲げ部材および純引張力に対応した合理的な鋼殻継手構造の一つとして提案している、PC鋼棒による鋼殻継手構造形式に対して、ステップ4における純引張力を想定した要素実験および部材実験をそれぞれ実施した。一つは、後施工PC鋼棒鋼殻継手構造の引張要素実験(以下、PC継手引張要素実験)であり、もう一つは、後施工PC鋼棒鋼殻継手構造のSC部材曲げ実験(以下、PC継手曲げ部材実験)である。

### 3. 後施工PC鋼棒鋼殻継手の特徴

本研究で提案する後施工PC鋼棒鋼殻継手構造は、単体トンネル時に発生する主桁曲げ引張応力については仮設ボルトとしての先行施工PC鋼棒で抵抗し、エンドプレートとアンカープレート間に充填された高強度モルタルの圧縮抵抗力を介して引張力を主桁に伝達する。トンネル外殻部構築後の主桁純引張力に対しては、断面の中立軸位置に配された本設ボルトとしての後施工PC鋼棒が、引張主鋼材として働く。

施工は以下の手順で行う。

- (1)セグメント端部に設けられた鋼殻ボックスに予め高強度モルタルを充填する。
- (2)単体トンネル構築時に、曲げ部材として外力に対応するため、内空側のボルトとして先行施工PC鋼棒を使い鋼殻を組み立てる。
- (3)鋼殻内コンクリートの打設に合わせて、純引張力に対応するため、スキムプレート側のボルトとして後施工PC鋼棒を設置する。

後施工PC鋼棒鋼殻継手構造の特徴は、次の通りである。

- (1)先行施工PC鋼棒と後施工PC鋼棒の負担する外力が、施工過程に応じて明確に分離されているので、残留応力の問題を考慮する必要がない。
- (2)単体トンネル掘削時には、必要最小限の先行施工PC鋼棒を取りつけるため、シールドマシンの施工サイクル時間を短縮するのに有効であ

る。後施工PC鋼棒は、シールドマシンの施工サイクルと関係なく、後施工で設置することができる。

(3)エンドプレートとアンカープレート間の閉塞された空間に、鋼殻製作時に予め高強度モルタルが充填されているため、エンドプレートの剛性が十分に確保され、ボルトの軸力分散性が良くなる。

#### 4. 後施工PC鋼棒鋼殻継手の要素実験

##### 4.1 要素実験の供試体と载荷方法

後施工PC鋼棒鋼殻継手構造のトンネル外殻部構築後の主桁純引張力に対する基本特性を把握するために、PC継手引張要素実験を実施した。図-3に実験供試体と载荷方法を示す。実験は、鋼殻継手部分を縮尺1/2の供試体でモデル化し、高強度モルタルを充填した鋼殻継手部の後施工PC鋼棒には、ボルトの許容応力である  $380\text{N/mm}^2$  の80%の  $304\text{N/mm}^2$  (ひずみで  $1500\mu$ ) の導入力を与えた。

実験は、供試体の両端を単調载荷で引張り、鋼殻継手部の耐力と目開き量を把握した。

##### 4.2 要素実験の結果と解析の比較

PC継手引張要素実験に対する解析モデルの概要を図-4に、解析に使用した材料定数を表-1に示す。解析は、対称条件を利用して鋼殻

継手部の1/4を対象とした。鋼材とPC鋼棒は弾塑性材料のシェル要素とビーム要素に、充填モルタルは弾性材料のソリッド要素にそれぞれモデル化した。また、充填モルタルとその周囲の鋼材との間には、接触または剥離を表わすインターフェイス要素を用いて、境界非線形を考慮した。図-4c)に示すように解析ステップ1では、 $1500\mu$ に相当する引張荷重をPC鋼棒の対称面端部より与え、続く解析ステップ2では、供試体における引張治具側の節点に一樣な伸びび変形が生じる条件で引張荷重を与えた。

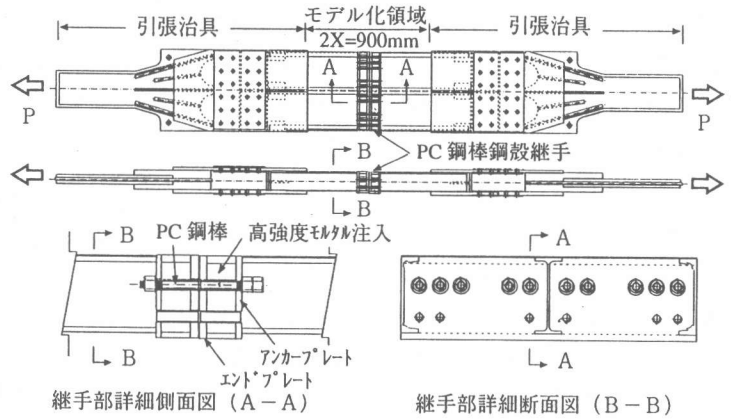


図-3 要素実験の供試体と载荷方法

表-1 材料物性値

鋼材種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
主鋼材	351.1	454.1	同左	210,000	0.3
エンドプレート	289.5	433.2	〃	210,000	0.3
アンカープレート	271.7	423.4	〃	210,000	0.3
スキンプレート	284.0	452.2	〃	210,000	0.3
PC鋼棒	862.2	1,019.0	〃	213,500	0.3
充填モルタル	弾性	弾性	弾性	28,000	0.2

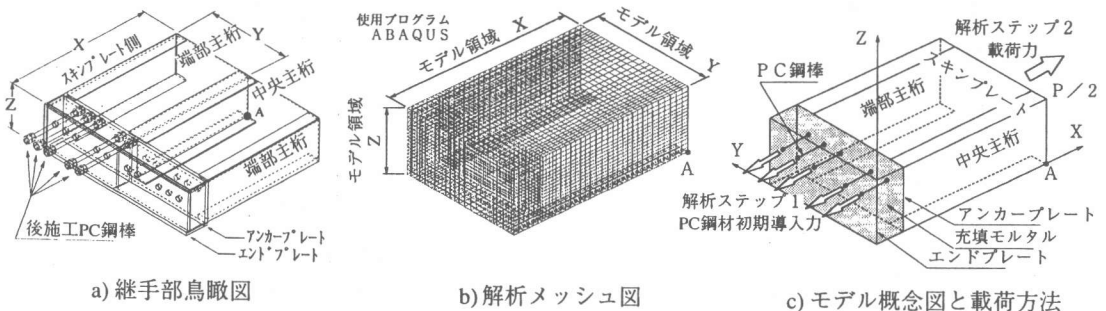


図-4 要素実験解析モデルの概要

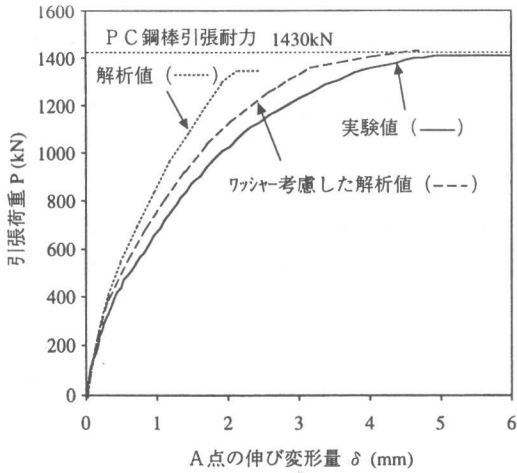


図-5 変形量の解析と実験の比較

図-4 b)のA点における載荷方向の変位 $\delta$ と引張荷重Pの関係を図-5に、継手部目開き量 $\Delta u$ と引張荷重Pの関係を図-6に、実験結果とともにそれぞれ示す。図-5のグラフより、実験値はP C 鋼棒引張耐力1430kNにはほぼ等しい引張荷重で最大耐力をむかえている。しかし、解析値に比べ実験値の変形量は、解析値の最大耐力1350kN付近で約1.5mm程度大きくなっている。この傾向は、図-6の継手部目開き量 $\Delta u$ についても同様である。この原因は、その後の検討の結果、供試体のP C 鋼棒両端のアンカープレート上に取り付けられているワッシャーのへこみによる変形であると予想された。供試体における実際のへこみ量も片側ワッシャーで、最大1mm弱程度発生していた。そこで、実際にワッシャーの変形量を確認すべく、1本分のP C 鋼棒とその片側端部のワッシャーおよびアンカープレートを対象にした引張実験を実施し、図-7の結果を得た。これより、要素実験の供試体に換算すると、解析値の最大耐力1350kN付近では約1.2mm程度の変形を生じていることが分かる。したがって、実験結果の変形量が、解析値より大きくなる原因の大部分は、ワッシャーの変形によるものと思われる。事実、要素実験

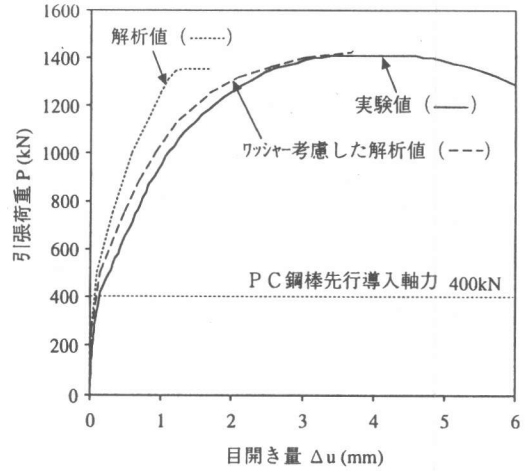


図-6 目開き量の解析と実験の比較

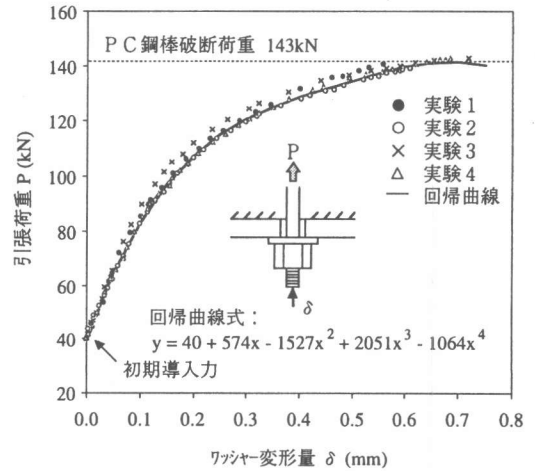


図-7 ワッシャーの引張実験結果

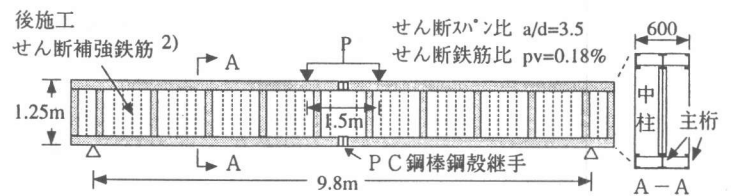


図-8 部材実験の供試体と載荷方法

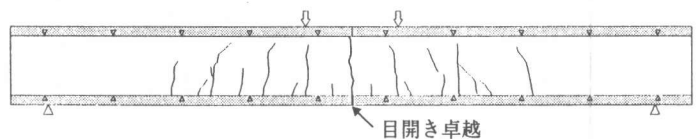


図-9 ひびわれ状況

の解析において、各P C 鋼棒とアンカープレートを結ぶ節点間を図-7の荷重と変形関係を表

わす非線形バネ要素に置き換えて行ったワッシャーの変形を考慮した解析値は、図-5および図-6に示すように、実験値を比較的良く表わしている。

## 5 後施工PC鋼棒鋼殻継手の部材実験

### 5.1 部材実験の供試体と載荷方法

後施工PC鋼棒鋼殻継手構造は、トンネル外殻部構築後は内部に打設されるコンクリートと一体となりSC部材として成り立つ。後施工PC鋼棒鋼殻継手構造のSC部材としての力の伝達機構を把握することを目的に、PC継手曲げ部材実験を実施した。図-8に実験供試体と載荷方法<sup>2)</sup>を示す。実験は、後施工PC鋼棒鋼殻継手構造を含むトンネル外殻部を縮尺1/2の供試体でモデル化した。鋼殻継手部の仕様と後施工PC鋼棒に与える初期導入力は、4.1節のPC継手曲げ要素実験と同様である。載荷は単調載荷により実施した。

### 5.2 部材実験の結果と解析の比較

PC継手曲げ部材実験における供試体のひび割れ状況を、図-9に示す。供試体中央の引張側鋼殻継手部

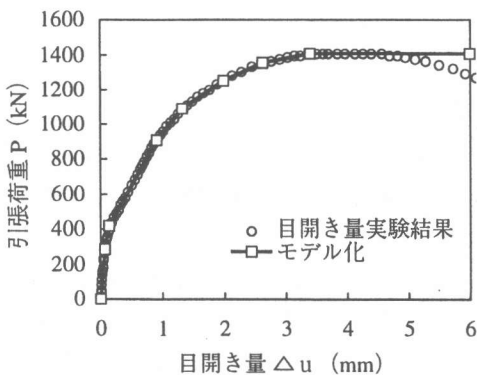


図-12 要素実験における引張荷重と目開き量の関係

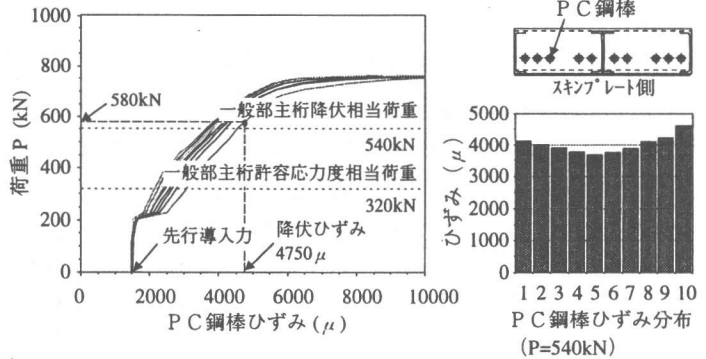


図-10 PC鋼棒のひずみ

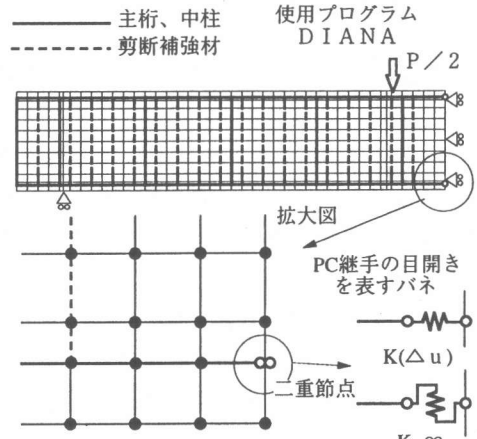


図-11 部材実験のFEM解析モデル

表-2 材料物性値

鋼材種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊エネルギー (N/m)	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
せん断筋	351.1	454.1	同左	-	210,000	0.3
コンクリート	-	2.9	35.0	50.0	27,000	0.2

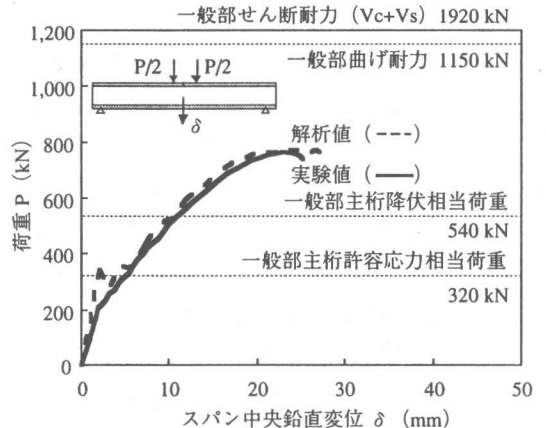


図-13 部材実験の荷重と変形関係における解析と実験の比較

分に、ひびわれによる目開きが卓越していることが分かる。

引張側鋼殻継手における10本のPC鋼棒のひずみと載荷荷重の関係およびひずみ分布を図-10に示す。荷重の増加に伴うひずみの変動は、10本のPC鋼棒ともほぼ同様な傾向を示している。主桁降伏相当荷重( $P=540\text{kN}$ )におけるひずみ分布は、その平均値に対して1割程度の変動が認められるだけであり、比較的均等なひずみ分布となっている。

PC継手曲げ部材実験に対するFEM解析モデルの概要を図-11に、解析に使用した材料定数を、4.2節の表-1および表-2に示す。解析は、2次元平面応力問題として扱い、対称条件を利用して供試体の1/2を対象とした。主桁と中柱は弾塑性材料のビーム要素で、せん断補強材は弾塑性材料のトラス要素で、コンクリートは、破壊エネルギーに基づく多方向固定ひびわれモデルによる平面応力要素でそれぞれモデル化した。後施工PC鋼棒による鋼殻継手部のモデル化は、鋼殻継手部の目開き量と主桁純引張力の関係等を考慮して図-11に示すバネ要素を用いた。すなわち、鉛直方向のバネ定数は無限大の剛性とするが、水平方向のバネ定数は、4章のPC継手引張要素実験から求められた図-6の継手部目開き量 $\Delta u$ と引張荷重の関係から図-12に示す折れ線の関係にモデル化して求めた。

図-13にスパン中央鉛直変位と荷重の関係を、図-14に引張側継手部鋼殻目開き量と荷重の関係を、実験結果と解析結果を比較してそれぞれ示す。両者とも、荷重200~300kN付近の折れ曲がり付近で実験と解析に違いが見られるものの、荷重がより大きい領域では良く一致している。実際の供試体のひびわれが、供試体中央の引張側鋼殻継手部分に局所化して、ひびわれによる目開きが卓越していることから考えて、SC部材としての鋼殻継手の解析を行う場合には、鋼殻継手の目開き量と主桁引張力の関係を精度良くモデル化することが重要と思われる。

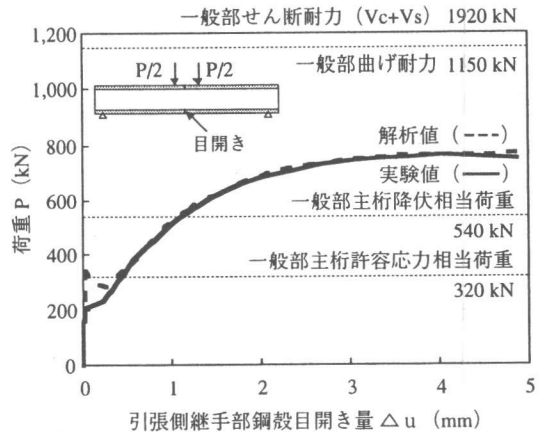


図-14 部材実験の目開き量における解析と実験の比較

## 6 まとめ

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

- (1)後施工PC鋼棒鋼殻継手構造は、主桁の降伏相当の比較的大きな荷重状態でも、ひずみの分散性が比較的良好いことが分かった。高強度モルタルの充填効果によりエンドプレートの剛性が有効に保持されているものと思われる。
- (2)鋼殻継手に関する引張要素実験を精度良く行い、継手の目開き量と荷重の関係を正しく求めておけば、鋼殻継手を有するMMST鋼殻のSC部材としての挙動は、精度良く求まるものと思われる。
- (3)後施工PC鋼棒鋼殻継手に限らず、MMST鋼殻のSC部材では、鋼殻継手にひびわれが局所化してひびわれ幅が卓越する傾向がある。鋼殻継手のひびわれに対する設計の見地からの検討が今後必要と思われる。

## 参考文献

- [1] 柄川伸一, 徳村秀二, 斎藤亮: MMST工法実用化の検討, トンネルと地下, Vol.28, No.1, pp.47-53, 1997.1.
- [2] 榊利博, 田中良弘, 加納宏一, 坂下克之, 「MMST工法における合成構造のせん断補強効果」, 土木学会年次学術講演会論文集, V-236, 472~473, 1997.