

## 論文 鋼殻合成構造における型鋼モルタル充填継手の引張特性

田中 良弘\*<sup>1</sup>・白石 俊英\*<sup>2</sup>・加納 宏一\*<sup>3</sup>・羽生 剛\*<sup>4</sup>

要旨：複数の矩形断面単体シールドを接続して超大型断面トンネルを構築するMMST工法における接続部に働く曲げモーメントを模擬して、主鋼材継手部の引張要素実験を実施した。継手部の周囲コンクリートや施工誤差の有無を考慮した3種類の実験供試体について引張載荷して引張機構の相違点を明確にした。有限要素法による3次元弾塑性解析を行い、鋼材の局所的な変形や歪みの分布の実験値との比較より、接続部の挙動を明確にすると共に、接続部を合成構造として設計する際の改良点を明らかにした。

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. 序 論

最近、都市部における高速道路の建設において、用地取得はじめ、施工条件、建設時の環境保全、現状交通容量の確保等の制約条件を解決するため、大断面トンネルを従来の開削工法によらず非開削工法により施工する必要性が生じている。首都高速道路公団により考案されたMMST (Multi Micro Shield Tunnel) 工法 [1] は、このような制約条件に対応して複数の矩形断面シールドを接続して超大型断面トンネルを施工する方法である。本研究は、矩形断面単体シールドにより作られるサンドイッチ構造体相互を合理的に接続するひとつの構造方式を提案すると共に、その構造の曲げ耐力を確認するための基礎研究として、主鋼材継手部の引張要素実験を実施し、またFEMによる3次元弾塑性解析との比較により引張力伝達のメカニズムを明確にするものである。

## 2. 引張載荷実験

## 2.1 MMST工法とジョイント構造

MMST工法は、図-1に示すように、1) 複数の矩形断面シールド工法を適用してMMST鋼殻で外殻トンネル部を構築し、2) 各々のシールド相互間の土砂を掘削して接続部空間を作り、3) ここにMMST鋼殻相互間を接続するための補強鋼材を配置した後、4) 内部にコンクリートを打設して鋼殻とコンクリートの外殻部駆体を構築して、5) 最後に内部の土砂を掘削し内部構築することにより大断面トンネルを構築する施工法である。なお、接続部の土砂を掘削する際には、あらかじめ接続部周辺の土砂を補強するなどの方法が考えられる。また、接続部を含む合成構造は、内部の土砂を掘削する時に大きな断面力を受け、トンネル完成時には本設構造体となる。従って、接続部では各単体シールドの施工誤差が発生してもジョイントが確実に実施でき、設計断面力に抵抗できることが要求される。現在、MMST工法のより経済的・合理的な設計・施工法を目指して、「大師ジャンクション(仮称)の換気洞道工事」において試験工事が実施されており、接続部の継手構造についても種々の施工・構造形式が試みられる予定である。

\* 1 大成建設(株)技術研究所 構造研究部土木構造研究室室長、Ph. D. (正会員)

\* 2 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)

\* 3 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)

\* 4 大成建設(株) 土木設計計画部解析技術室、工修

図-1に示すシールドAとBの間にある接続部に曲げモーメントが生じた場合の、トンネル軸方向に並べられた鋼殻主桁の1組を取り出した継手構造の詳細を図-2に示す。本研究で提案する継手構造は、MMST鋼殻を構成している主桁（H型鋼及び溝型鋼）相互間に、継手鋼板端部を付けた溝型鋼を引張継手鋼材として配置して、これと既設の主桁間に充填される高強度モルタルの圧縮抵抗力を介して、上弦主桁に働く引張力を伝達するものである。この継手構造の特長は、シールドの施工誤差がある場合にも、溝型鋼端部と主桁端部間にモルタルを任意形状に充填できるために継手溝型鋼を任意の位置に配置することにある。そのため接続部で施工誤差を吸収でき、かつ断面力を伝達できる。また、継手材料として特殊な加工を必要としない市販の溝型鋼を用いることで経済性を考え、さらに継手鋼材を主桁の剛心位置でモルタルの圧縮抵抗力を介して直接接続することで曲げ引張鋼材として最適配置の継手構造と考えられる。

## 2.2 実験供試体

実験の目的は、図-2に示すような接続部の曲げ耐力を確保するための基礎実験として、主桁相互間を接続する継手部に働く引張特性を明確にすることにある。主桁の鋼材寸法は、「換気洞道試験工事」で計画されている主桁の実物大のものである。従って、実際の施工性を考慮した継手溝型鋼の取り付け方法や、高強度モルタルの充填施工性に関する確認ができる。供試体は図-3に示すように、主桁間隔が60cm離れている場合を基本として以下の3ケースを考える。case-1はモルタル充填幅を10cmとし、接続部周囲の拘束コンクリートがない場合で、継手鋼材や主桁鋼材のひずみや変形を詳細に計測する規準となる供試体である。しかし、実際の接続状態とは異なり継手部の周囲にコンクリートが打設されていないので、継手溝型鋼が継手部で外側に变形するのを拘束しないために、引張耐力が低下するものと考えられる。これに対してcase-2は、接続部周囲にD10の帯鉄筋を外周に配置して拘束コンクリートを打設したもので、実際の接続状態に近い。case-3はcase-2と同様に周囲に拘束コンクリートを打設しているが、シールドの施工誤差を想定して、モルタル充填幅を15cmとし（主桁の位置が平面的に所定の間隔より10cm短い）、また左右の主桁の芯が平面的に3cmず

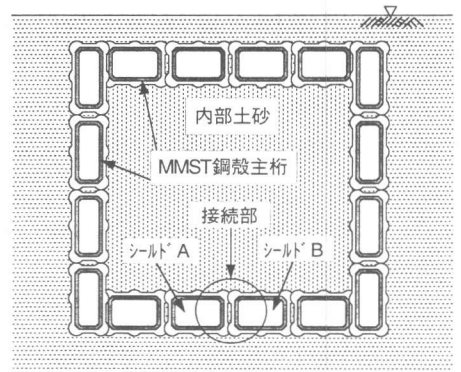


図-1 MMST工法の概要

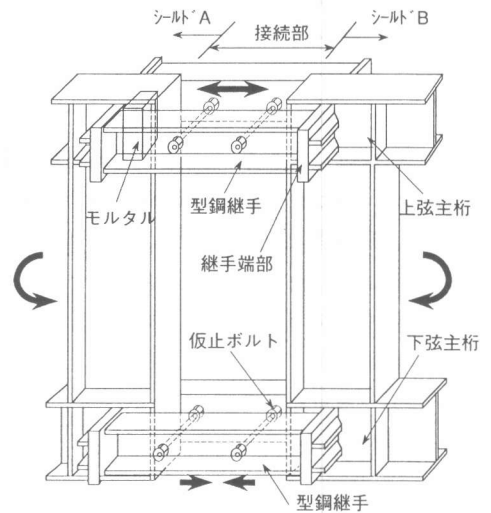


図-2 型钢モルタル充填継手の詳細

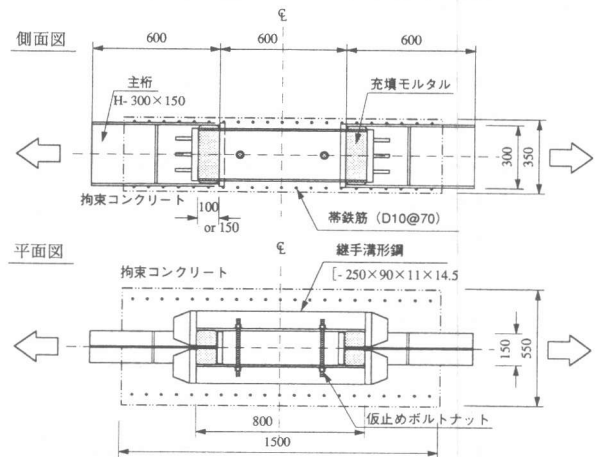


図-3 実験供試体

れた供試体（継手の溝型鋼を斜めに配置）である。

高強度モルタルの材料としては充填時の施工性と力の伝達を考慮して高流動性・無収縮モルタルを用いる。また、継手部は6面体の鋼板で囲まれているが隙間があるため形状の追従性がある布型枠を配置してモルタルの漏洩を防止する。なお、本実験に先立ち高強度モルタルの施工性、強度、さらに布型枠が種々の隙間に対しても漏洩防止出来るかを確認している。表-1に実験供試体に用いた材料特性を示す。

### 2.3 荷重方法

荷重方法は、図-4に示すように反力フレーム内部に供試体を配置して、主桁の先方に日鋼をボルト摩擦接合して一端を固定し、他端の先方に100tonfの引張ジャッキを4基配置して供試体に一樣の引張力を与える。荷重は荷重制御で単調増加である。測定項目は、荷重荷重、供試体の伸び量、継手溝型鋼端部の変形、充填モルタルの変形、主桁や継手鋼材のひずみ、拘束コンクリートのひび割れなどである。

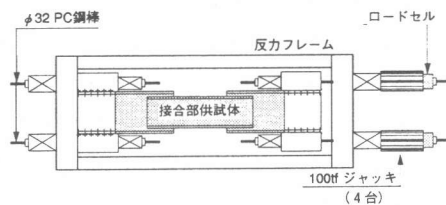


図-4 荷重方法

表-1 材料物性

		CASE-1	CASE-2&-3
充填モルタル	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	62.3	71.7
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	26800	28200
	ポアソン比	0.21	0.21
拘束コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	-	35.4
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	-	23100
		-	0.21
主桁鋼材 (ウェブ)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	373	
	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	501	
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	204000	
継手鋼材 (ウェブ)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	340	
	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	475	
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	207000	

## 3. 実験結果

### 3.1 引張荷重と変形

図-5に引張荷重と供試体（全長180cm）の全体伸び変形量の関係を示す。この変形量には主桁、継手鋼材、充填モルタル、継手鋼材端部の曲げ変形などが複合的に加算されたものである。施工誤差がないcase-2の引張荷重は主桁の全断面降伏引張力を超過して破断荷重まで達し、継手としての機能を満足している。施工誤差を想定したcase-3はcase-2とほぼ同等の引張荷重-変形関係を示しているが、130tf付近で変形が大きくなり最終引張耐力はcase-2より約10tf小さい。case-2とcase-3は、引張荷重30tf強で剛性低下を示している。これは、拘束コンクリートにひび割れが発生して引張軟化したことによるものである。これらに対して拘束コンクリートがないcase-1の場合は、事前解析でも予測されたように継手鋼材端部が外側へ曲げ変形していることが測定されている。しかし、4箇所の変計量は全て外側ではなく、引張荷重80tf前後ではジャッキ側の左側と固定側の右側が外側にそれぞれ4mmと9mm変形し、ジャッキ側の右側と固定側の左側が内側にそれぞれ1mmと4mm変形している。つまり、荷重制御により荷重しているために、モルタル充填

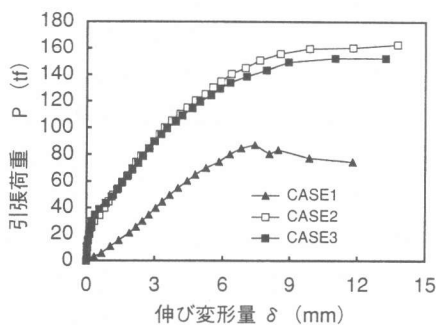


図-5 引張荷重と変形の関係

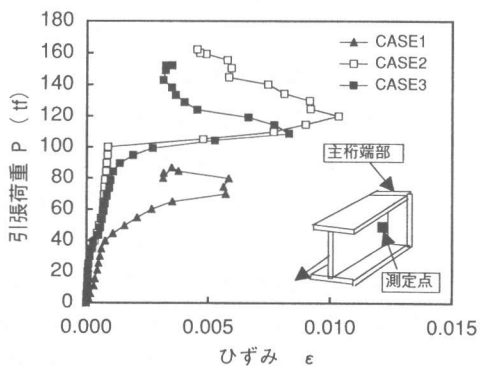


図-6 主桁鋼材端部ウェブのひずみ

部における変形量は4箇所均等ではなく斜め対角の継手2箇所に変形拘束しているものと考えられる。このことは、case-1の最終破壊モードにおいて継手鋼材端部が内側に変形している2箇所のモルタルが破壊したことに符合する。引張荷重80tf程度ではモルタルの平均圧縮応力は $22\text{N/mm}^2$ 程度であり4箇所に引張力が均等に働けばモルタルの破壊は考えにくい。

### 3.2 鋼材のひずみ

多数測定した鋼材のひずみの測定点から、引張ジャッキ側の主桁鋼材端部ウェブの表裏の平均ひずみと引張荷重の関係を図-6に示す。case-1は引張荷重40tf付近で塑性化しているのに対して、拘束コンクリートのあるcase-2とcase-3は90-100tf付近で急激に塑性化して降伏に達している。そのため、この荷重付近では全体の伸び変形が増加している。(図-5)さらに引張荷重30tf強で拘束コンクリートのひび割れ発生による引張軟化は、ウェブのひずみがこの荷重で増加していることと一致する。

### 3.3 モルタル充填部の変形

case-1については拘束コンクリートがないためにモルタル充填部付近の変位を詳細に測定している。ジャッキ側と固定側の主桁端部の相対変形は、継手鋼材の変形が小さいことからほぼモルタル部の変計量と考えても差し支えない。図-7にモルタルの全変計量と供試体の伸び量を比較する。これより両者の差は主桁の伸び量と考えられ引張荷重と共に増大し、局部的に塑性化していることがわかる。case-1の場合、供試体の全変計量の約70%程度は、モルタル自身の変形と継手端部の局所的変形によるものと考えられる。

## 4. 引張特性の解析

### 4.1 解析手法とモデル化

解析手法は鋼材にshell要素を用いモルタルにsolid要素を用いた、3次元FEM弾塑性解析による。case-1のモデル化は4箇所のモルタル充填部の剛性や鋼材の形状が全て上下、左右に対称であると仮定して、図-8に示すような1/8モデルを適用する。鋼材の応力-ひずみ構成則は表-1に示す材料物性を用いて、降伏点と破壊点を直線で結んだトリリニア-曲線とし、モルタルの引張応力を無視し圧縮側は線形とする。鋼材とモルタルの接触要素はインターフェイス要素を用いて付着応力が働かない状態をモデル化する。1/8の対象モデルを用いることは、供試体4箇所のモ

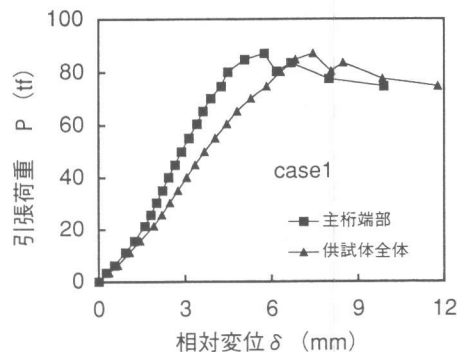


図-7 モルタル充填部の変形(case-1)

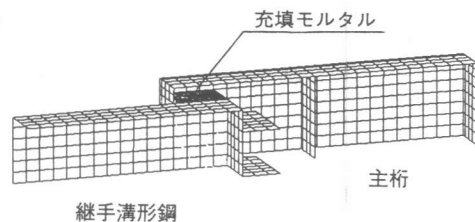


図-8 解析モデル図

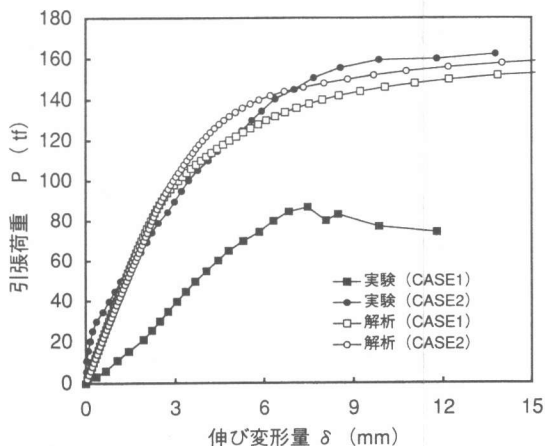


図-9 変形量の解析と実験の比較

部における変形量は4箇所均等ではなく斜め対角の継手2箇所に変形拘束しているものと考えられる。このことは、case-1の最終破壊モードにおいて継手鋼材端部が内側に変形している2箇所のモルタルが破壊したことに符合する。引張荷重80tf程度ではモルタルの平均圧縮応力は $22\text{N/mm}^2$ 程度であり4箇所に引張力が均等に働けばモルタルの破壊は考えにくい。

ルタル継手部において剛性や降伏点のバラツキがなく4基のジャッキを等変位制御で実験することを前提としている。

一方、case-2のモデル化はcase-1の場合と基本的に同じであるが、拘束コンクリートの横拘束効果を再現するために、継手鋼材が横方向に拘束されるように継手鋼材要素の法線方向に拘束コンクリートと帯鉄筋に相当するtension cutのバネをつける。

#### 4.2 解析結果と実験値の比較

case-1とcase-2における引張荷重と供試体の全体伸び変計量の解析結果と実験結果の比較を図-9に示す。case-1の実験結果に対する解析の結果は、初期剛性が約2倍に、また終局耐力が約50tf大き目に評価されている。この理由とし

ては、1)解析モデルとして、1/8の対象モデルを用いることは、4箇所モデルタル充填部の剛性が等しく、また引張端に強制変位を与えることを仮定しているが、2)実際には荷重制御の実験でありモデル部の剛性がほんのわずかにバラつくことにより初期段階から継手鋼材端部が外側と内側へ変形して、引張力のほとんどが対角のモデルタル継手を介して(引張剛性としては1/2になる)主桁に伝達され、3)そのために対角のモデルタル圧縮応力の増加が早期に進展してこれに伴うモデルタルの圧縮軟化が始まり、また継手鋼材端部の局所的変形によるモデルタルの早期破壊により最終耐力が低下するものと考えられる。なお、フルモデルの解析を実施したとしてもモデルタル充填部の剛性バラツキが不明なため解決策とならない。これに対して、case-2の解析結果は実験結果と比較的良好一致を示している。この理由としては、1)モデルタル継手部の剛性のバラつきがあっても、拘束コンクリートがあることにより継手鋼材端部が外側に変形するのを拘束するので、モデルタル継手部の引張力が一様になり、変位制御の載荷状態に近づき、2)主桁鋼材のウェブの塑性化は荷重100tf前後の高い荷重下で一斉に発生して解析条件と一致する。

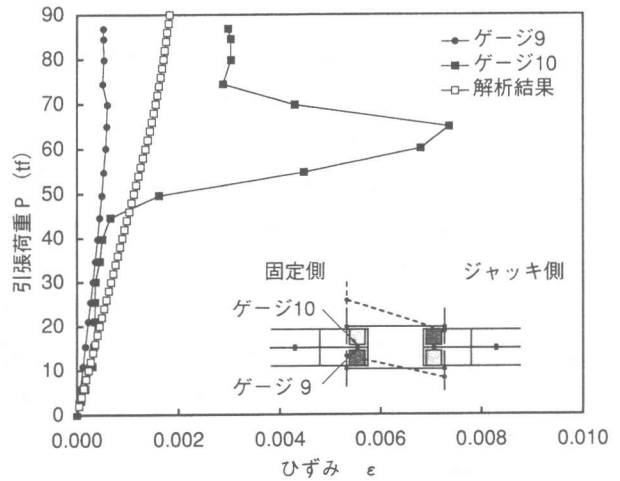


図-10 固定側主桁端部ウェブのひずみ解析結果(case-1)

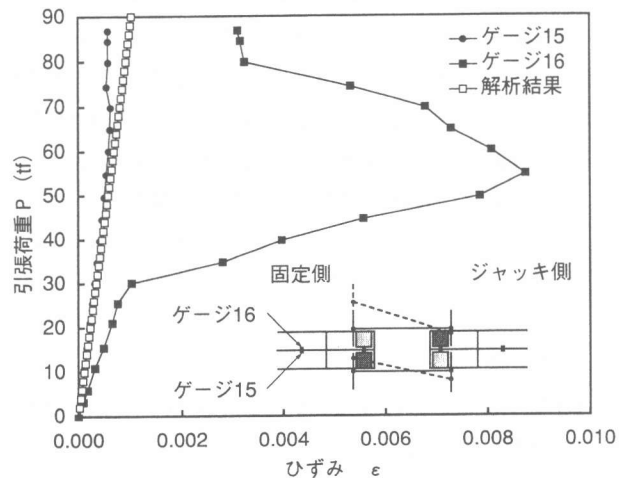


図-11 一般部主桁端部ウェブのひずみ解析結果(case-1)

図-10と図-11に、case-1における固定側主桁端部ウェブと一般部ウェブの表裏のひずみの実験結果と解析結果の比較を示す。解析では、対称構造であるためにいずれのウェブにも純引張のみが働き曲げは作用しない。しかし、前述のように実際には図中の案内図に示す引張荷重80tfの時の継手鋼材の横変形からわかるように、ウェブに引張力の他に曲げによるウェブの表裏におけるひずみの違いが発生している。ひずみゲージ9と16が大きくひずんだ後に荷重の増加と共にひずみが減少している理由については、モルタル継手部の局所的破壊により力の再配分が行われたものと考えられる。

これに対して、FEM解析によるcase-1の引張荷重80tf時における主桁、継手鋼材、モルタル部の変形図を図-12に示す。この変位はメッシュサイズの5倍に拡大して描かれている。主桁の端部鋼板の外側へのはらみだしと継手鋼材の外側へのそりが明確にわかる。

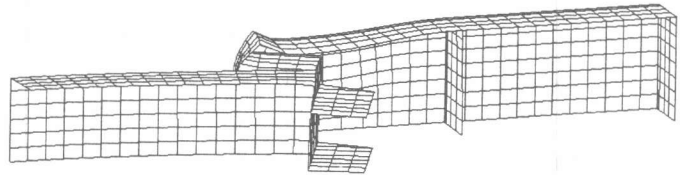


図-12 80f 載荷時の変形図 (case-1)

これに伴い充填モルタルは圧縮のみならず曲げ、せん断応力を受ける。解析による継手鋼材の外側への変位量は1.1mmであり、実験で得られた4mmや9mm (3.1を参照) に比べて小さい。これは、前述したように実験では、初期段階から図-10、-11の案内図に示すような対角のモルタル継手部で力を伝達するように釣合い状態となるためと考えられる。また、解析モデルにおいてモルタルの圧縮軟化を構成則として考慮していないことも原因している。

## 5. 結 論

本研究の結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 提案した接続部の構造は、シールドの施工誤差を吸収して施工することができ、また主桁の降伏荷重まで引張荷重を伝達できるなど、基本的な性能を有することが示された。
- 2) 拘束コンクリートが有無の引張載荷実験の検討より、実際の接続部において継手鋼材と主桁の接続後に接続部に打設されるコンクリートは、継手鋼材の横変形を拘束する効果があるために、モルタル継手部に一様な圧縮力を伝達するように作用する。これにより接続部の引張剛性の低下が防止され、また引張耐力の向上が可能である。
- 3) 実験結果とFEM解析から、主桁端部付近のウェブが弱部となるため板厚を補強することによりフランジへ力を伝達して、全体変位量を減少出来ると考えられる。
- 4) 今後の課題として、モルタルや周辺コンクリートに対する構成則を3D-Solid要素に取り込んだ非線形ひび割れ解析の検討を通じ、設計手法を確立する必要がある。

## 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.