

# 論文 サンドイッチ構造における形鋼モルタル充填継手の力学特性

田中 良弘\*<sup>1</sup>・加納 宏一\*<sup>2</sup>・榊 利博\*<sup>3</sup>・柄 登志彦\*<sup>4</sup>

要旨：複数の矩形断面単体シールドをトンネル横断方向に接続して、サンドイッチ構造としての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及び接続部の曲げ載荷実験を実施した。引張要素実験と3次元弾塑性解析より形鋼モルタル充填継手部の力の伝達機構を明らかにした。この引張特性をもとに接続部の曲げ変形と耐力特性を説明することを試み、またサンドイッチ構造相互の接続部を設計する際の簡易な構造評価手法を提案した。

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. はじめに

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<sup>1)</sup>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トンネル横断方向に接続して超大型断面トンネルを構築する方法である。本研究は、サンドイッチ構造体相互を接続する形鋼モルタル充填継手構造の提案と基礎的研究<sup>2)</sup>に引き続き、引張要素実験と接続部の曲げ載荷実験を実施して、接続部が無い場合や接続部に施工誤差を含む場合と比較して接続部の曲げ変形能力と耐力特性を明確にする。さらに力の伝達メカニズムを実験結果の解析と解析により明らかにして、接続部を設計する際に必要とされる接続部の曲げ特性を簡易に評価する手法を提案する。

MMST工法の概要は前報<sup>2)</sup>で述べた通りであり、本工法の一つのポイントである接続部では、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工法により経済的・合理的な設計・施工法の確立を目指して、「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いる。

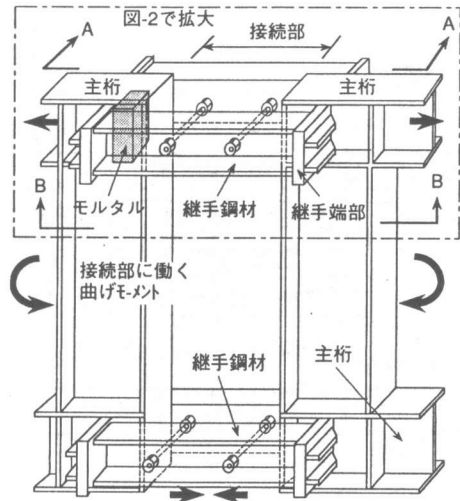


図-1 形鋼モルタル充填継手の概念図

## 2. MMST工法と載荷実験

### 2.1 MMST工法と接続構造

- \* 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次長 (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主任 M. S.
- \* 4 大成建設(株)技術研究所 構造研究部土木構造研究室課長

本研究で提案する継手構造は、図-1に示すようにMMST鋼殻を構成している主桁相互間に、端部がL型形状の継手鋼材を配置して、これと既設の主桁間の空間に70MPa圧縮強度のモルタルを充填して、モルタルの圧縮抵抗力を介して、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接続部で施工誤差を吸収でき、かつ継手鋼材を主桁の位置で直接的に引張力を伝達できることにある。

## 2.2 引張要素実験

前報<sup>2)</sup>では接続部の曲げ耐力を確保するための基礎実験として、接続部に対する実物大の引張基礎実験を実施して施工性と接続部の引張特性を明らかにした。今回は、前回の結果を踏まえて主桁のウェブを補強し、また周囲のコンクリートの影響により継手鋼材が横方向に変形拘束することを考慮した引張要素実験を行った。実験供試体は、図-2に示すような(図-1の上側の継手鋼材を取出す)鋼殻を1/2に縮尺したもので、継手端部と主桁端部との空間にモルタルを充填した後、桁高と同じ150mm厚のコンクリートを打設した。

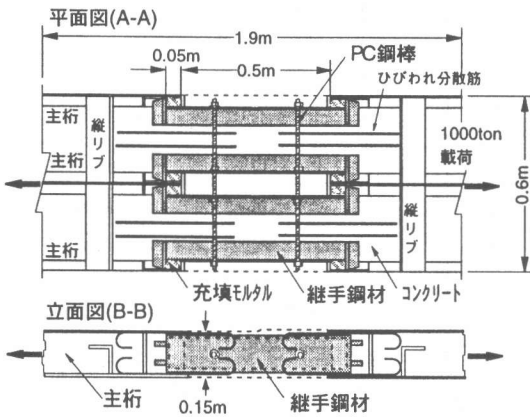


図-2 引張実験の供試体と荷重方法

荷重に際して接続部の幅方向で平面歪み状態とするために、図-2に示すような継手鋼材や主桁端部が側方に変形しないようにPC鋼棒によ

り事前に約10tf/本の張力を与えて横拘束する。

## 2.3 曲げ載荷実験

曲げ載荷実験の目的は、サンドイッチ構造相互をジョイントするモルタル充填継手構造が、曲げ耐荷力やひび割れ特性、また塑性領域での変形性能などのMMST工法として要求する構造性能を満足することを確認することにある。図-3に示すような、1/2に縮尺した長さ11m、幅0.6m、高さ1.25mの3種類の実験供試体を用いた。すなわち、モルタル充填継手を有しない一体供試体(供試体BS)を標準として、施工誤差がなくジョイントされた施工誤差なし供試体(BJ1)、ジョイント部に上下方向に施工誤差を10cm考慮した施工誤差あり供試体(BJ2)の3種類である。供試体の幅0.6mは、MMST鋼殻の1リング分の幅である。鋼殻主桁とアングル(図-2の縦リブ)は直交して格子状に組み立てられる。従って、アングルはサンドイッチ構造におけるシェアーコネクターの役目をしているため、この部分から曲げクラックが発生する。また、中柱はMMST鋼殻を組み立てる際に中間支柱の役目とサンドイッチ構造におけるせん断補強の役目をするが、せん断補強としては不十分なので鋼殻組立て後、鉄筋によるせん断補強を行う。表-1に実験供試体に用いた材料特性と解析に用いた物性値を示す。

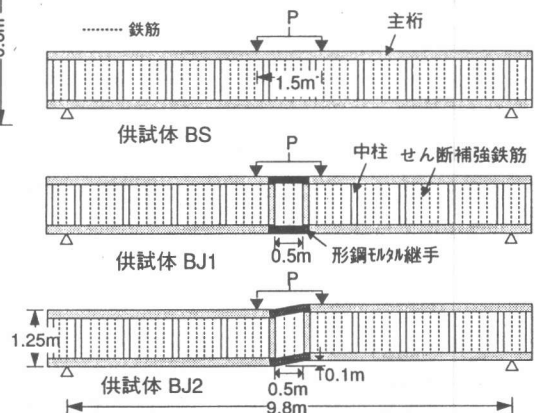


図-3 曲げ載荷実験の供試体と荷重方法

表-1 材料物性

		材料試験	解析の物性
充填モルタル	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	68.3	70
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	24,700	25,000
	ポアソン比	0.21	0.21
コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	31.5	30
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	28,700	25,000
	ポアソン比	0.21	0.21
主桁鋼材 (ウェブ)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	370	343
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	460	490
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	205,800	205,800
継手鋼材 (ウェブ)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	350	343
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	490	490
	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	205,800	205,800

### 3. 実験結果

#### 3.1 引張荷重と伸び変形

引張要素実験により得られた、引張荷重と供試体全体 (スパン長1.9m) の伸び量との関係を図-4に示す。また、一般部主桁 (図-2の縦リブより外側) のウェブ歪みと伸び量との関係も併記する。引張荷重と伸び量との関係から、引張荷重が40tf前後、120tf前後において勾配が大きく変化し、さらに150tf前後においても若干変化している。最初の変曲点は15cm厚のコンクリートによるtension stiffeningの影響である。第二の変曲点は、継手鋼材が主桁の降伏の影響とも考えられるが試算の結果、充填モルタルの圧縮強度の相当荷重とほぼ一致する。また、第三の変曲点は主桁鋼材の降伏と考えられる。主桁のウェブは伸び量5mm付近で降伏し、その後、フランジへ引張荷重が再配分され、フランジが降伏する。

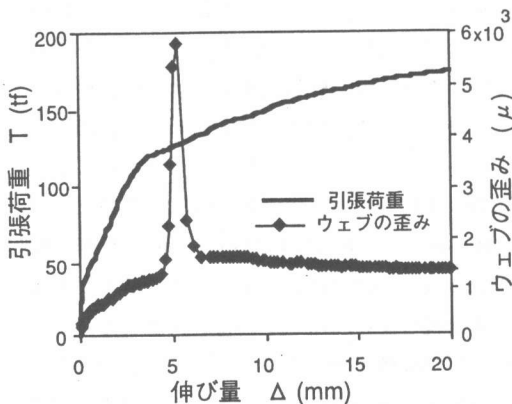


図-4 引張荷重と伸び量の関係

接続部の終局破壊形態は、モルタルを充填した主桁端部と継手鋼材端部のエンドプレートが大きく変形することにより、内部のモルタルが圧縮耐力を保持出来なくなる状態であると考えられる。

#### 3.2 載荷荷重と撓み量

4点曲げ載荷実験による載荷点荷重と中央点の撓みの関係を図-5に、また終局時のひび割れ分布を図-6に示す。いずれの供試体も荷重30tf前後で初期クラックが発生し、荷重-変位曲線の第一変曲点と一致する。第二変曲点はいずれの供試体も荷重100-110tf前後に認められる。接続部がある供試体は標準供試体に比べて初期クラック以降の剛性低下が大きい。また、一体供試体(BS)の終局変形は、降伏時の撓み量  $y$  の14倍 ( $\delta = 14.2y$ )と変形能力が高いが、施工誤差なしの接続部供試体(BJ1)は  $\delta = 6y$ であり、施工誤差がある場合(BJ2)は  $\delta = 4y$ である。一体供試体は最終荷重が135tfであり引張側主桁が破断して終局状態となった。一方施工誤差なし・ありの供試体は、終局荷重がそれぞれ116tf, 120tfであり、終局状態はモルタル継手付近の鋼材の局所的変形の増大と、圧縮側コンクリートの圧縮破壊がほぼ同時に発生した。一体供試体に対するRCと仮定した耐力計算は、115tfとなりいずれの供試体もこれを上回る耐力を示している。

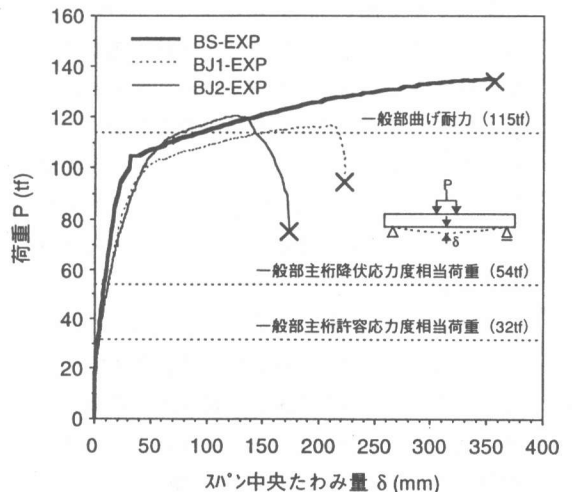


図-5 載荷荷重と撓み量の関係

図-6のひび割れ分布図より接続部がある場合も一体供試体と同様に曲げひび割れの分散性が良好であることがわかる。接続部のクラックは、一般主桁端部と接続部の境界に集中しているのが特徴である。施工誤差がある場合の境界面におけるひび割れ幅は、凹側の方が凸側よりも大きい。

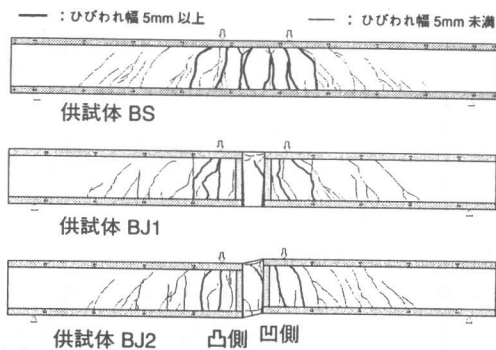


図-6 曲げ実験のひび割れ分布図（終局時）

#### 4. 簡易計算法

##### 4.1 解析手法とモデル化

サンドイッチ構造の接続部を設計する際の構造評価法として、FEMによる非線形解析法を用いることも出来るがモデルの作成に手間がかかる。そこで、部材の曲げ特性を比較的簡易にしても精度良く予測できるファイバーモデルを考える。その際、接続部の引張特性をいかにモデル化するかがポイントとなる。つまり、引張要素実験の荷重-変形関係を精度良く計算できれば、その手法をそのままファイバーモデルに取り込めば良い。

接続部の力学特性と引張力の伝達機構を調べるために、まず3次元FEMによる弾塑性解析を実施する。鋼材の構成則は、降伏点までは線形で降伏点以降は破断点の応力・歪み点に向けて硬化するバイリニアとする。周囲のコンクリートによる横拘束はtension cutの圧縮バネを設定

し、充填モルタルは圧縮強度以降も線形と考える。

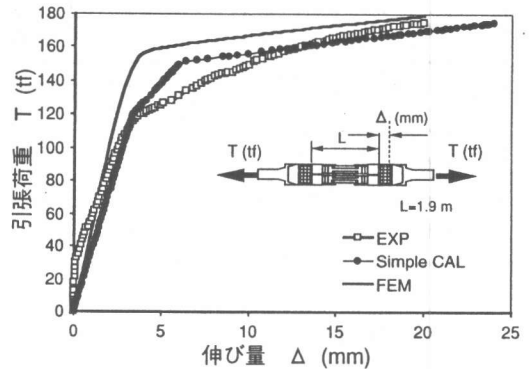


図-7 引張荷重と伸び量の簡易計算

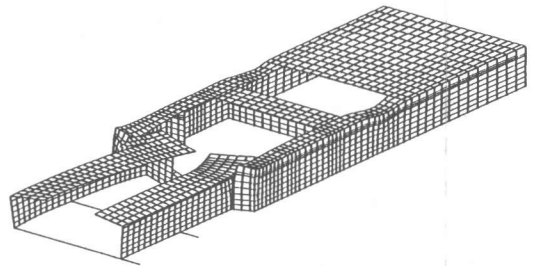


図-8 FEM解析による変形図（荷重157tf）

従って、この解析モデルによる変形応答は、鋼材の局部的変形挙動は実状に近いが、モルタルの変形に関しては圧縮破壊以前は良いが以降は小さく評価される。図-7に3次元FEMによる解析結果と実験結果の比較を示す。また、図-8には引張荷重157tf時の変形図を示す。この時の荷重は歪み分布の解析結果から主桁鋼材が全体的に降伏する荷重であることがわかる。特に一般部主桁が全体的に降伏し、モルタル継手より外側の主桁のウェブの歪みが降伏点を超える。荷重30tf付近まで実験値がFEM解析より剛性が高いのは、FEMでは周辺コンクリートの引張剛性を無視しているためである。荷重120tf以降において実験値が大きく変形するのはFEM解析においてモルタルのピーク圧縮強度以降の硬化特性をモデル化していないためである。

接続部の引張変形に起因するものとして、概ね鋼材の引張変形とモルタルの圧縮変形とに分離できる。ここで提案する簡易計算法とは、これらの変形を一軸の材料構成則から表計算により荷重-変形量を簡易に求めるものである。鋼材の変形計算については、継手鋼材、主桁補強ウェブ（図-2のモルタル充填部から縦リブまで）、および一般部主桁の変形とモルタル充填部のエンドプレートの曲げ変形の和と考える。但し、主桁ウェブ補強部については部材断面としてウェブのみを考える。エンドプレートの曲げ変形の塑性解析は困難なので線形範囲のみを考えて総変形計算に取り込む。また、鋼材の構成則はFEM解析と同様にバイリニアで考える。

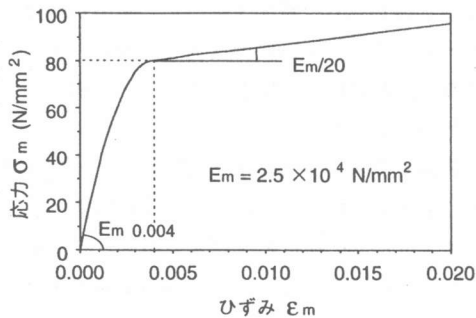


図-9 モルタルの応力-歪み関係

モルタルの圧縮変形は周囲の6面が鋼板により拘束されているので、一軸圧縮状態での応力-歪み関係とは異なる。つまり、モルタルを囲む鋼板が変形をしながらも直方体を形成しようとするために直方体の圧縮強度は一軸圧縮強度よりも増加し、さらにモルタルのピーク圧縮強度以降においても剛性は低下するものの圧縮耐力を保持するものと考えられる。図-9に示すような、鋼板により拘束されたモルタルの圧縮強度を一軸圧縮強度の15%増とし、ピーク圧縮強度までの応力-歪み関係を2次関数で表し、ピーク圧縮強度以降の剛性低下を初期剛性の1/20に仮定したモルタルの構成則を考える。

以上、各材料の部位ごとの変形を算定しこれ

らを総和した計算結果と実験値の比較を図-7に併記した。簡易計算の結果はマクロ的にはモルタルおよび鋼材の降伏-硬化特性を表している、実験結果を大体推定できる。但し、モルタルの構成則において実際には破壊に至る歪みが存在するはずであるが、ここではピーク圧縮強度以降の応力-歪み勾配を一定に考えてどこまでも変形を許す仮定をしているので、破断荷重を推定できないという問題点を残している。

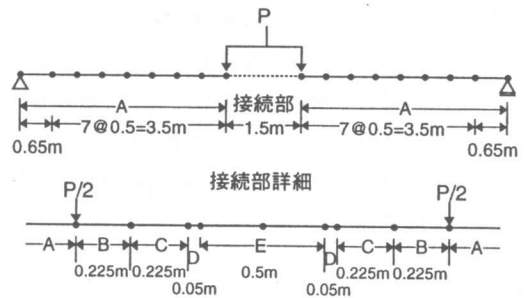


図-10 ファイバーモデルの要素分割

#### 4.2 解析結果と実験値の比較

前節で得られた簡易計算法をファイバーモデルの各材料に依存する応力-歪み関係に適用して、接続部を含むサンドイッチ構造部材の曲げ性能照査法とする。施工誤差が無い供試体(BJ1)を対象に簡易解析する場合のファイバーの要素分割モデルを図-10に示す。要素Aは標準部材でスキンプレートを含む鋼材をモデル化し、またコンクリートの構成則はスキンプレートによる横拘束効果を考慮して、歪み0.2%以降も応力を一定に保持するものとする。接続部については要素Bから要素Eまでを考える。この内スキンプレートがない部分は要素Eのみであるが、ここではスキンプレートによるコンクリート拘束効果はないと考え、コンクリート構成則として修正Kent-Parkモデルを用いる。要素Bは一般部主桁、要素Cは主桁補強ウェブ、そして要素Eは継手鋼材をモデル化する。また、要素Dは充填モルタルをモデル化したもので、図-9の構成則を適用する。

標準供試体と施工誤差が無い供試体に対する実験結果とファイバーモデルによる計算結果を図-11に比較する。解析結果は概ね実験結果を推定しているが、いずれの場合も解析値の方が降伏付近の剛性が高めに推定している。この原因として以下のことが考えられる。ファイバーモデルでは曲げによるRC断面内での歪み勾配を鋼材とコンクリートの歪みが同じになるように（鋼材とコンクリートとの付着は完全であると仮定）、力の釣合を考慮して曲率を算定している。しかし、実際には鋼材は異形鉄筋でなくシェアコネクタにより離散的にコンクリートからのせん断力を鋼材に伝達してしているため、鋼材とコンクリートとの間に付着ずれが生じ、そのためファイバーモデルでは高めの剛性と荷重を推定することになる。

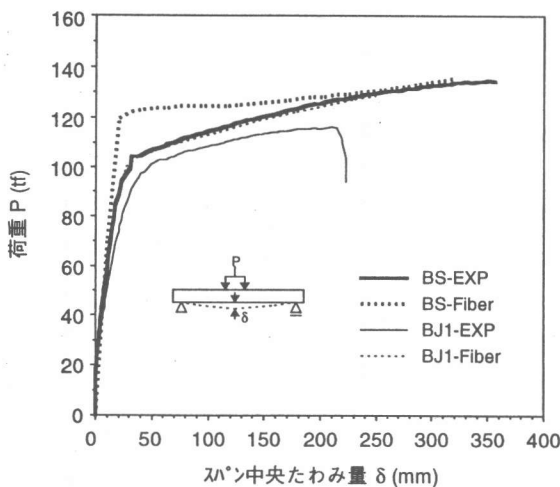


図-11 曲げ載荷による荷重-撓み曲線の比較

接続部を含むファイバーモデルの計算結果は一体供試体の計算結果に比べ荷重100tf付近での剛性低下の状況を良く再現しているものと考えられる。しかし、要素解析で指摘したようにモルタルの構成則においてモルタルの破壊を規定していないために、現状の計算モデルでは曲げ載荷荷重が漸増して最終耐荷力と終局変形量を推定できない。

## 5. 結論

- 1) 提案した形鋼モルタル充填継手の接続部構造は、シールドによる施工誤差を吸収して施工することができ、また一般部主桁の降伏荷重まで大きな剛性低下もなく引張荷重を伝達できるため、接続部を含むサンドイッチ構造は所定の構造性能を満足する。
- 2) 提案の継手構造は、構造的に一番不利な上下方向の施工誤差が1/5の勾配で発生しても、接続部としての性能を発揮することができる。それは、主桁の引張力を継手鋼材に伝達するモルタル充填部が施工誤差がある場合でも、モルタル周囲の鋼板が横拘束効果として働き、所定の性能を発揮するためである。
- 3) 継手鋼材から一般部主桁へと引張力が伝達するメカニズムが引張要素実験と解析から明らかになり、部位による塑性化の順番と変形のモードが明らかになった。
- 4) 形鋼モルタル充填継手の引張特性を簡易計算する手法を提案し、さらにこれを接続部を有するサンドイッチ構造の曲げ変形特性を予測するファイバーモデルに取込み、概ね実験を再現できることを示した。
- 5) 今後の課題として、モルタル部の破壊を表現できるような構成則の研究が必要である。そのために、局所的にモルタル部をモデル化した3次元非線形解析や要素実験が必要である。

## 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.
- 2) 田中良弘，白石俊英，加納宏一，羽生剛：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1419-1424，1997.