

# 論文 継手を有する鋼殻によるサンドイッチ部材の曲げ特性

石原 美光\*<sup>1</sup>・天野 玲子\*<sup>2</sup>・三宅 正人\*<sup>3</sup>・大澤 一郎\*<sup>4</sup>

要旨：MMS T工法によるトンネル躯体は、継手を有する二重鋼殻によって補強された鋼・コンクリートサンドイッチ部材と、このサンドイッチ部材を接続するRC部材とからなる混合構造物となっている。ここでは、鋼殻間の継手として添接板による摩擦接合継手を考え、添接板で接続された主桁の引張実験及び鋼殻の継手の有無をパラメータとしたサンドイッチ部材の曲げ載荷実験を実施した。その結果、継手を有する鋼殻で補強されたサンドイッチ部材の降伏荷重や終局荷重は、鋼殻を鉄筋に置換しRCにおける考え方を適用することで、安全側に推定できることがわかった。

キーワード：鋼・コンクリートサンドイッチ部材、継手を有する鋼殻、曲げ特性

## 1. はじめに

近年、限られた地下空間を有効に使用する新しいシールド工法の一つとして、MMS T工法の適用が検討されている [1]。MMS T工法とは、鋼殻で構成される小断面単体シールドを組み合わせるにより、非開削で大断面トンネルを構築する効率的なシールド工法であり、小断面単体シールド時の鋼殻が大断面トンネルの補強材を兼ねることとなる。なお、本工法は、現在首都高速道路公団による高速川崎縦貫線の換気洞道工事に試験工事として採用されている。

MMS T工法により構築されるトンネル躯体の概要を図-1に示す。本工法によるトンネル躯体は、二重鋼殻によって補強された鋼・コンクリートサンドイッチ部材(以下、サンドイッチ部材)と、このサンドイッチ部材を接続するRC部材とからなる混合構造物となっている。鋼殻は、スキンプレート、主桁、縦リブ等から構成されており、スキンプレート上に、部材軸方向(トンネル軸方向に直交)に主桁、部材軸直角方向(トンネル軸方向)に縦リブを配している。また、鋼殻間には、部材軸方向に継手を有している。

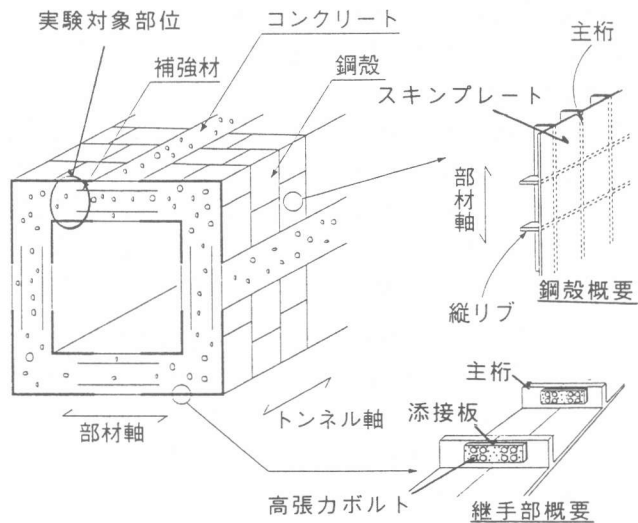


図-1 トンネル躯体及び摩擦接合継手概要図

- \* 1 鹿島(株)技術研究所第一研究部研究員(正会員)
- \* 2 鹿島(株)技術研究所第一研究部主任研究員(正会員)
- \* 3 新日本製鐵(株)技術開発本部鉄鋼研究所主任研究員
- \* 4 鹿島(株)建設総事業本部土木設計本部設計主査

ここでは、鋼殻の継手方式として摩擦接合継手を提案することとした。摩擦接合継手の概要を図-1に示す。摩擦接合継手とは、スキンプレートと主桁とで受け持つ引張力の鋼殻間での伝達を、主桁の両側に配した2枚の添接板(主桁端部において高張力ボルトを用いて摩擦接合)を介して行う継手方式である。

摩擦接合継手を有する鋼殻によるサンドイッチ部材の曲げ特性に着目し、変形やひび割れ性状、耐力等について検討するため、まず、添接板で接続された主桁のみによる鋼殻単体引張実験を実施し、継手部での引張性状の把握を行った。次に、継手のない鋼殻によって補強されたサンドイッチ部材の曲げ載荷実験、及び継手の有る鋼殻によって補強されたサンドイッチ部材の曲げ載荷実験を実施し、継手の有無によるサンドイッチ部材の特性について検討を行った。

## 2. 鋼殻単体引張実験

### 2.1 試験体及び実験方法

試験体形状及び計測位置を図-2に、使用材料の材料特性を表-1に示す。

試験体は、鋼殻の主桁を2枚の添接板で挟み、16本のボルトにより摩擦接合を行った1体とした。主桁の断面寸法は、材料特性を満足できる鋼材の最小板厚を考慮して想定実構造物の1/2縮尺とした。また、SS400相当の平板を使用した。添接板の断面寸法は、その全降伏荷重(全断面が降伏する荷重、ただしボルト孔による断面欠損を考慮)が、主桁及びスキンプレートの全降伏荷重の和と等価になるように決定した。また、主桁と添接板との接合面にはショットブラスト処理を施し、摩擦係数を0.4とした場合の摩擦による伝達力が主桁の全降伏荷重以上となるようF10T・M16の摩擦接合用ボルトを16本使用した。なお、ボルトには、115kN/本の軸力をトルク管理で導入した。

実験は、継手部が引張試験区間の中央部に位置するように試験体を設置し、両端の主桁部を引張試験機に固定させて行った。

計測は、載荷点間における全体変位や継手部の目開き量、添接板のひずみ等について行った。

### 2.2 実験結果及び検討

荷重-試験体全体変位及び継手部目開きを図-3に示す。これより、継手部は600kN程度で降伏していることがわかる。ここで、試験体各部が全降伏する荷重は、主桁一般部：605kN、添接板一般部：782kN、主桁のボルト孔欠損部：474kN、添接板のボルト孔欠損部：519kNであり、実験結果は主桁一般部の全降伏荷重と同程度であった。

最大荷重は828kNであり、破壊モードは、継手部端部のボルト孔位置での主桁破断であった。

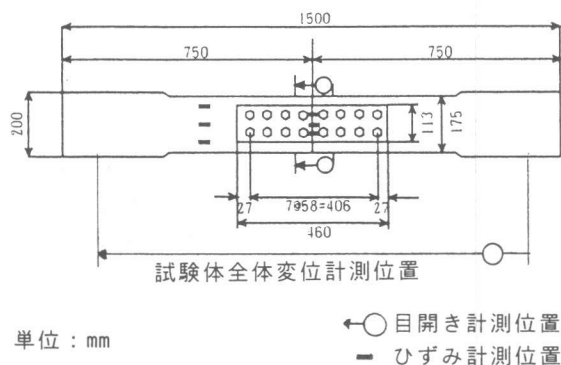


図-2 試験体形状及び計測位置図

表-1 鋼材の材料特性

板厚 (mm)	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	使用部位
3.2	285	439	スキンプレート
4.5	310	434	縦リブ
6.0	276	433	主桁
13.0	266	428	主桁、添接板

破壊に至る過程で、主桁と添接板との間に明瞭なすべりはみられなかった。最大荷重は、摩擦係数を0.4とした場合のすべり耐力735kN、主桁のボルト孔欠損部において全断面が一度に破断するとした引張耐力762kNより大きかった。

継手部での荷重-添接板ひずみ関係を図-4に示す。これより、400kN 過ぎから添接板中央のひずみが急増し始めていることが分かる。これは、ボルトによる摩擦力の影響で添接板での力の伝達性能に偏りが生じ、添接板中央から局部的に降伏したためと考えられる。さらに、この局部降伏が進み、600kN 程度で継手部としての降伏に至ったものと考えられる。

以上の結果から、摩擦接合継手での継手における引張性状は、ボルト位置での摩擦による力の伝達性能の偏りから生じる局部応力の影響を受けることがわかった。

### 3. サンドイッチ部材曲げ載荷実験

#### 3.1 試験体

試験体形状及び計測位置を図-5に示す。

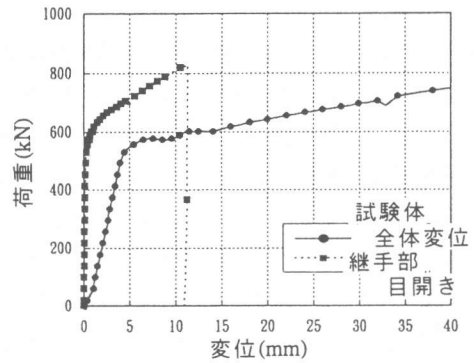


図-3 荷重-変位関係

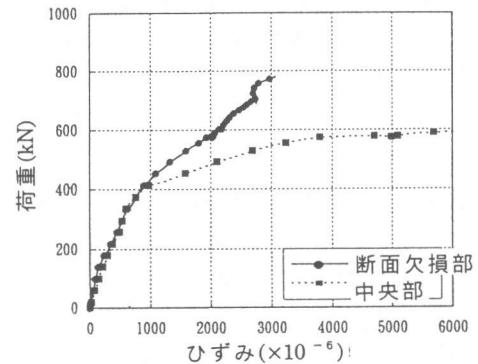
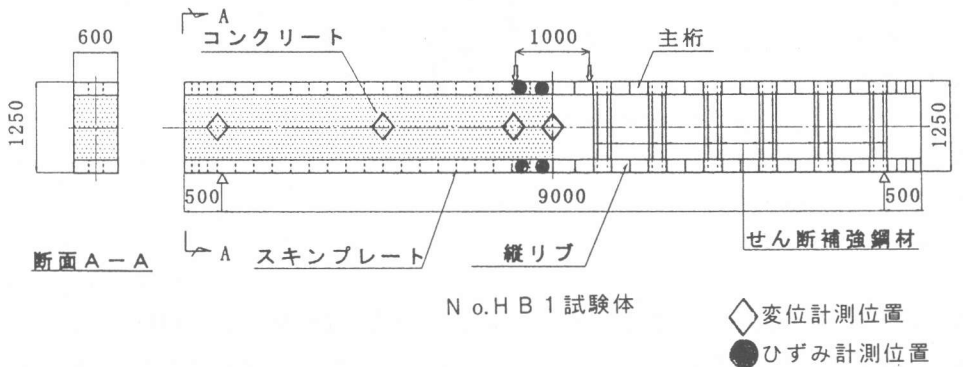
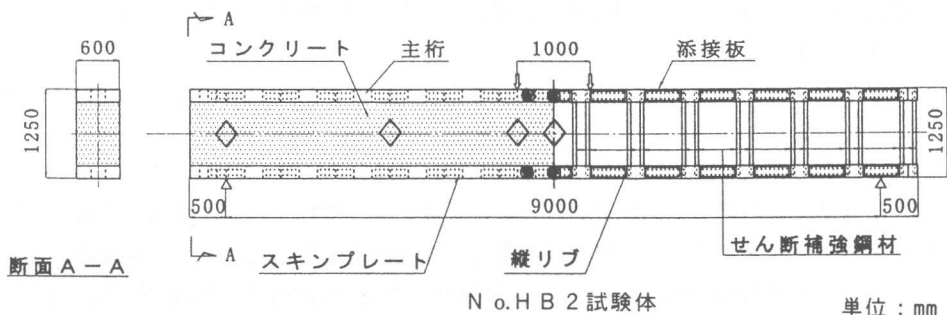


図-4 荷重-添接板ひずみ関係



No. HB 1 試験体

◇ 変位計測位置  
● ひずみ計測位置



No. HB 2 試験体

単位 : mm

図-5 試験体形状及び計測位置図

試験体は、図-1におけるサンドイッチ部材部分を奥行き1リング分取りだし、鋼殻に継手の無いもの(N o.H B 1試験体)と摩擦接合継手を設けたもの(N o.H B 2試験体)、各1体とした。鋼殻及び添接板の断面寸法や継手部の処理・接合方法等は、「2. 鋼殻単体引張実験」と同様とした。十分なせん断補強をするため、せん断補強鋼材量は0.4%とした。せん断補強鋼材には平板を使用し、主桁に高張力ボルトによって取り付けた。鋼殻でのスキンプレートと主桁・縦リブとの溶接は、全強溶接(母材強度以上)を基本とした。

コンクリートは、実験時圧縮強度を $24\text{N/mm}^2$ 、粗骨材最大寸法を試験体縮尺(1/2縮尺)にあわせて $10\text{mm}$ とした。各試験体の実験時圧縮強度は、N o.H B 1試験体： $29\text{N/mm}^2$ 、N o.H B 2試験体： $25\text{N/mm}^2$ であった。コンクリート打設は、試験体を横倒しにして側面から行った。

### 3. 2 実験方法

実験は、等曲げ区間長 $1,000\text{mm}$ の2点荷重で行い、荷重は、荷重容量 $5,000\text{kN}$ のジャッキを用いて行った。荷重ステップは、引張側鋼殻を鉄筋に置換した断面で、計算上鋼材が許容応力度に達する荷重( $602\text{kN}$ )まで荷重した後一旦除荷し、その後は、破壊に至るまでの単調増加を基本とした。ただし、ジャッキストロークが最大となった時点で、荷重装置や変位計の盛り換えのための除荷を行った。

計測は、試験体の鉛直方向変位や、主桁・添接板のひずみ等について行った。

### 3. 3 実験結果及び検討

#### (1) 継手の無い鋼殻の場合

##### ① 実験結果

継手の無い鋼殻を補強材としたサンドイッチ部材の荷重-変位(試験体中央変位)関係を図-6に示す。

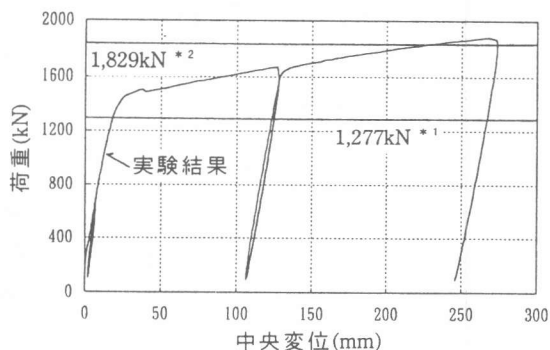
曲げひび割れは、 $312\text{kN}$ で等曲げ区間中央の縦リブ位置から発生した。 $1,020\text{kN}$ で引張側スキンプレートが、さらに $1,420\text{kN}$ で引張側主桁がそれぞれ降伏に至った。その後、荷重荷重が $100\text{kN}$ 程度上昇するたびに、せん断スパン内に生じていたひび割れが開いた。

試験体中央変位が $268\text{mm}$ に達したところ(図-6 荷重-変位関係(N o.H B 1試験体))で荷重が $1,891\text{kN}$ で最大となり、圧縮側スキンプレートが座屈して急激な荷重低下が見られた。これは、圧縮側コンクリートを拘束していた鋼殻の拘束力が、スキンプレートの座屈により小さくなったためと考えられる。

破壊時ひび割れ状況を図-7に示す。これによると、曲げひび割れは、縦リブ位置に発生していた。

##### ② 実験結果と計算値との比較検討

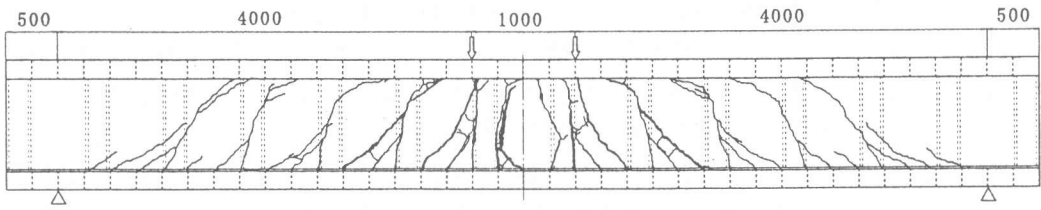
ここで、実験結果と計算値との比較を行った。計算では、鋼殻全断面を鉄筋に置換し鋼殻の図心位置に配置した断面を考え、RCにおける考え方を適用することとした。計算値は、まず、抵抗モーメントから求めた( $1,277\text{kN}$ )。さらに、破壊時の引張側鋼殻のひずみがひずみ硬化域に達していたため、実験時最大引張ひずみに対応する強度を材料試験における応力-ひずみ曲線から



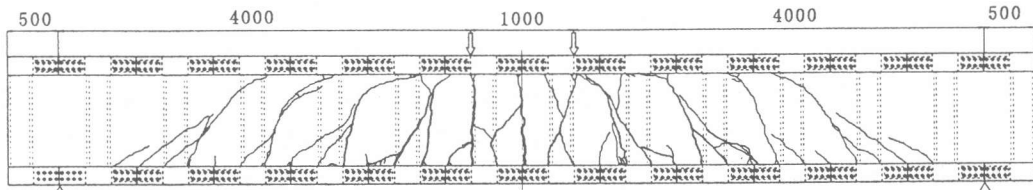
\*1: 降伏強度を使用

\*2: ひずみ硬化考慮

図-6 荷重-変位関係(N o.H B 1試験体)



N o. H B 1 試験体



N o. H B 2 試験体

図-7 ひび割れ状況図(終局時)

求め、それを使用して終局荷重を求めた(1,829kN)。図-6に、それぞれの計算値を併記する。

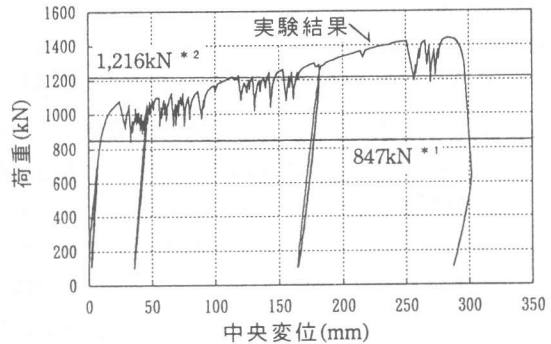
サンドイッチ部材の場合、圧縮側の鋼殻がコンクリートを拘束しているため、RC部材と異なり圧縮ひずみが $3,500 \times 10^{-6}$ に達してもすぐには圧壊に至らない。そのため、ここでは、抵抗モーメントから求めた計算値と実験での降伏荷重(約1,400kN)、ひずみ硬化を考慮した計算値と実験での最大荷重(1,891kN)をそれぞれ比較した。その結果、どちらも実験結果が計算値を上回っており、実験時の降伏荷重及び最大荷重を安全側で算定していることがわかる。

## (2) 継手の有る鋼殻の場合

### ① 実験結果

継手の有る鋼殻を補強材としたサンドイッチ部材の荷重-変位(試験体中央変位)関係を図-8に示す。

曲げひび割れは、292kNで等曲げ区間中央の縦リブ位置から発生した。1,100kN付近で、継手部において、添接板と主桁とのボルト位置での摩擦切れ、あるいはボルト背面コンクリートの割裂と考えられる現象が発生し、一時的な荷重の低下が見られた。この後、同様の現象が続いたが、荷重は上昇していった。



\*1: 降伏強度を使用

\*2: 破断強度を使用

図-8 荷重-変位関係(N o. H B 2 試験体)

試験体中央変位が284mmに達したところ、荷重が1,445kNで最大となり、等曲げ区間内の引張側継手部の添接板において、最も継手部に近いボルト孔位置で破断が生じて荷重が急激に低下した。

破壊時ひび割れ状況を図-7に示す。これによると、曲げひび割れは、継手の有無に関わらず縦リブ位置で生じており、ひび割れ分散性はN o. H B 1 試験体とほぼ同程度だった。

ここで、本試験体における最終破壊(添接板の破断)について検討を行う。「2. 鋼殻単体引張実験」では、まず継手部での添接板が降伏し、最終的に継手部端部のボルト孔位置での主桁の破

断が生じた。一方、本試験体では、継手部での添接板が降伏した後、継手部中央のボルト孔位置での添接板の破断が生じた。この要因としては次のことが考えられる。まず、実験では継手部にひび割れが生じていたが、この場合、添接板だけがそこの力を負担する。その際、添接板には、引張力だけでなく曲げモーメントも作用することとなる。また、サンドイッチ部材の鋼殻にはスキムプレートがあるため、鋼殻の図心位置と添接板の図心位置とは異なる。そのため、その影響による偏心モーメントが添接板にかかることとなる。これらの要因が重なり、添接板に単体引張時より大きな引張応力が生じ、添接板の破断が生じたものと考えられる。

## ② 実験結果と計算値との比較検討

(1)と同様の方法で、実験結果と計算値との比較を行った。ここでは、ボルト孔位置での破断が生じたため、添接板全断面からボルト孔欠損分を除いた断面積を鉄筋に置換して考えた。計算値は、まず、抵抗モーメントから求めた(847kN)。さらに、添接板が破断したため、添接板の破断強度を使用して終局荷重を求めた(1,216kN)。図-8に、それぞれの計算値を併記する。

これらの計算値と、実験での降伏荷重(約 1,100kN)及び最大荷重(1,445kN)をそれぞれ比較した結果、継手の無い鋼殻の場合同様、どちらも実験結果が計算値を上回っており、実験時の降伏荷重及び最大荷重を安全側で算定しているが、実験結果と計算値には差が見られることがわかる。これは、図-4に示すとおり、添接板では、実際には断面欠損部においても引張力を負担しているが、その分の抵抗力を計算では無視しているためと考えられる。

以上の結果から、継手が無い場合は鋼殻全断面積を、継手がある場合は添接板全断面からボルト孔欠損分を除いた断面積を、それぞれ鉄筋に置換した断面において、RCにおける考え方を適用することで、本サンドイッチ部材の降伏荷重や終局荷重を安全側に推定することができると考えられる。

## 4. まとめ

MMS T工法によるトンネル躯体における、継手を有する二重鋼殻によって補強されたサンドイッチ部材による曲げ載荷実験から、以下の結果が得られた。

- ・ 鋼殻間の継手として、その降伏荷重が、主桁及びスキムプレートの降伏荷重の和と等価になる添接板による摩擦接合継手を考えた場合、継手部における引張性状は、摩擦力による力の伝達性能の偏りから局部応力の影響を受けることがわかった。
- ・ 継手のないサンドイッチ部材の降伏荷重や終局荷重は、鋼殻全断面積を鉄筋に置換しRCにおける考え方を適用することで、安全側に推定できることがわかった。
- ・ 摩擦接合継手を用いたサンドイッチ部材の降伏荷重や終局荷重は、添接板全断面からボルト孔欠損分を除いた断面積を鉄筋に置換しRCにおける考え方を適用することで、安全側に推定できることがわかった。

## 参考文献

- [1] 桜井順、長谷川和夫、平林泰明：MMS T工法の実用化に関する研究、土木学会第51回  
年次学術講演会、pp.224-225、1996.9