

# MMS T工法によるトンネル構造の部材実験

三桶達夫・趙唯堅・加納宏一

*Keywords : MMST Method, joint and connection structure, bearing-type connection, bolts of temporary works cyclic loading test, shear reinforcement*

MMS T工法, 継手・接続構造, 支圧方式, 仮設ボルト, 交番試験, せん断補強

## 1. はじめに

現在、高速川崎縦貫線本線のうち大師河原ジャンクションから約540mのトンネル区間の実施工をMMS T工法 (Multi-Micro Shield Tunneling Method) により行っている。MMS T工法は、トンネル外殻部を複数の単体トンネルにより先行して構築し、それらを相互に連結、外殻部躯体を構築した後に内部土砂を掘削しトンネルとする特有の施工手順を有する工法である (図-1)。MMS Tトンネルでは、単体トンネルの鋼殻を本設外殻構造の主鋼材として利用する。そのため、鋼殻ピース間の継手構造や単体トンネル間の接続構造は不可欠となってくる。それらに対してこれまで種々の構造形式を検討し、実験を行い、MMS T工法のパイロット工事である換気洞道工事に適用してきた。その結果を受け今回新たに、支圧方式継手・接続構造の提案を行った。本報では、支圧方式継手・接続構造の構造特性を静的及び交番載荷試験により確認した結果について報告する。

## 2. 支圧方式継手・接続構造

支圧方式継手・接続構造のイメージを図-2 に示す。この支圧方式継手・接続構造は、接続鋼材に作用する引張力を支圧板→コンクリート→エンドプレート→主桁に伝達する構造であり、機械的に直接接続する方式に比べて、①エンドプレートが薄くできる、②鋼殻に施す細工が少なく製作性に優れる、などの特徴がある。

図-3 に支圧方式接続部の非線形FEM解析のイメージを示す。実験結果より、非線形FEM解析により設計されたエンドプレートは載荷終了時まで降伏せず、今回の解析モデルの設計への適用の妥当性が確認された。

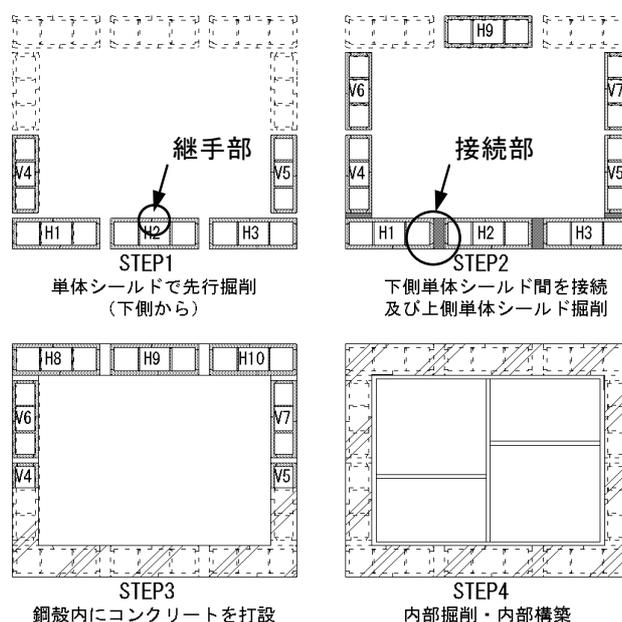


図-1 MMS T工法施工手順

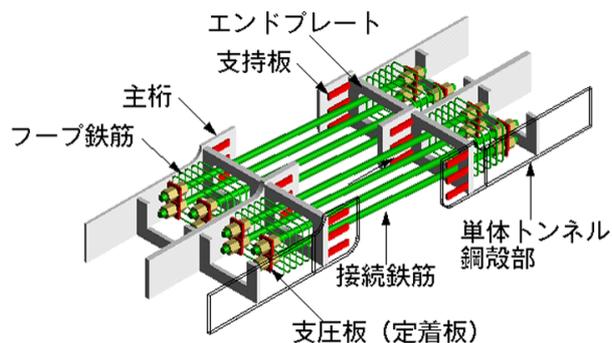


図-2 支圧方式接続構造

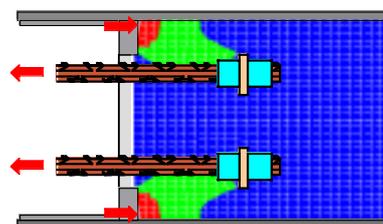


図-3 非線形FEM解析イメージ

### 3. 実験概要

高速川崎縦貫線本線対応の部材試験として、以下に示す3ケースについて試験を行った。

- ・ケース1：6-1 継手部曲げ試験
- ・ケース2：7-1 接続部曲げ試験
- ・ケース3：8-1 接続部交番試験

ケース1, 2においては単体トンネル内の継手部及び単体トンネル間の接続部に着目し、梁部材の静的載荷試験を行い、ケース3については、トンネル隅角部に着目し交番試験を行った(図-4)。

ケース1, 2の実験目的は、上記の支圧方式継手・接続構造をそれぞれ鋼殻ピース間継手部と単体トンネル間接続部に適用した場合の外殻部構造特性を確認するとともに、ケース1については仮設ボルトの破断の影響、ケース2については接続部施工誤差の影響を確認することにある。

実験はそれぞれ1体ずつ行い、供試体の形状寸法は図-5に示すように実構造の1/2スケールとした。ケース1において、継手部には仮設ボルトとして普通ボルト4.8 M12 10本と継手鉄筋 D25 (SD345) を12本配置している。ケース2においては接続部長400mm、施工誤差として設計想定100mmの1/2スケールの50mmを考慮した。接続鉄筋はD25 (SD345) を8本配置した。載荷方法は単純梁の2点単調載荷とし、計測項目はたわみ、継手・接続鉄筋およびエンドプレート歪みなどとした。

ケース3は、支圧方式接続構造を単体トンネル間の接続部に適用した場合の交番載荷による接続部耐震性能(耐力、破壊性状、変形性能)及び、接続部せん断補強効果をj確認することを目的として行った。供試体は1/2スケールの柱部材とした。ケース3の載荷方法を図-6に、試験体の概要を図-7に示す。載荷は常時軸力を導入し、外側主鉄筋が降伏歪みに達した時点を $\pm 1 \delta y$ とし、各 $\delta y$ 毎に3回ずつ水平に交番載荷を行った。試験体の設計仕様は接続部長さ600mm、支圧方式接続部にはD25 (SD345) を8本配置し、せん断補強鉄筋は、SC一般部で2-D13@130、RC接続部で4-D10@100とした。なお、ケース2の結果、支圧方式接続部に与える施工誤差の影響はほとんど確認されなかったため、今回の実験では施工誤差を考慮しなかった。計測項目は荷重及び水平変位、および各種鋼材の歪みなどとした。

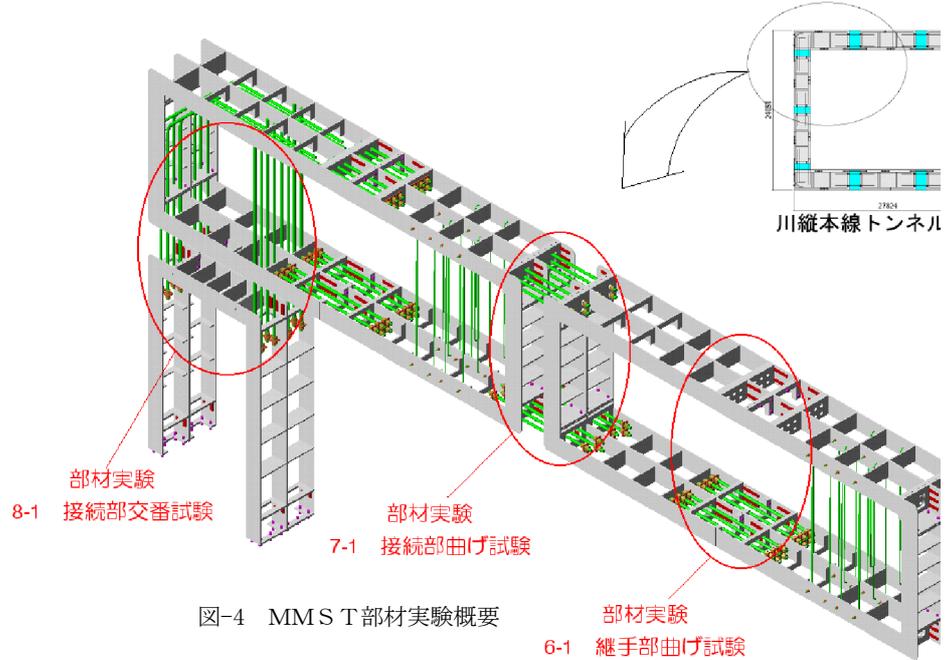


図-4 MMS T部材実験概要

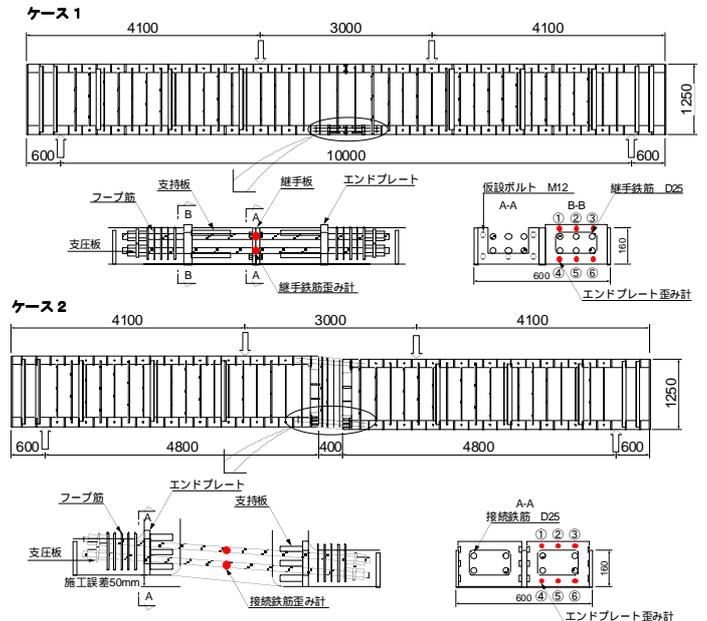


図-5 ケース1, 2試験体構造

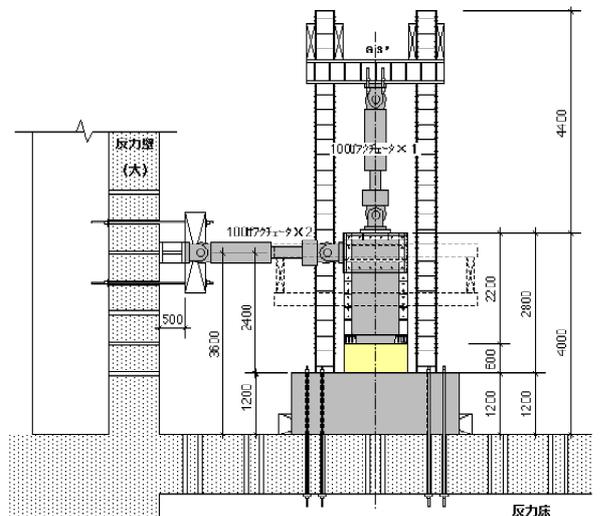


図-6 ケース3載荷方法

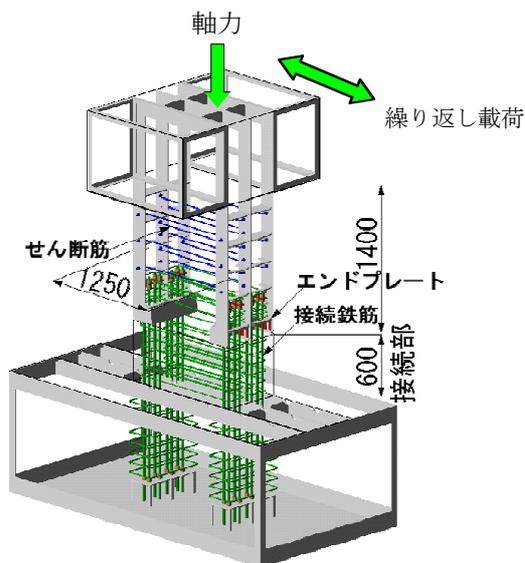
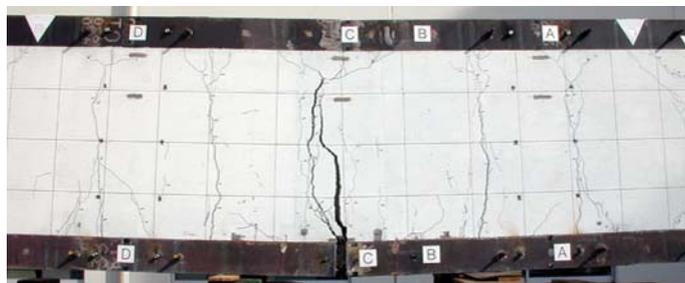


図-7 ケース3試験体概要

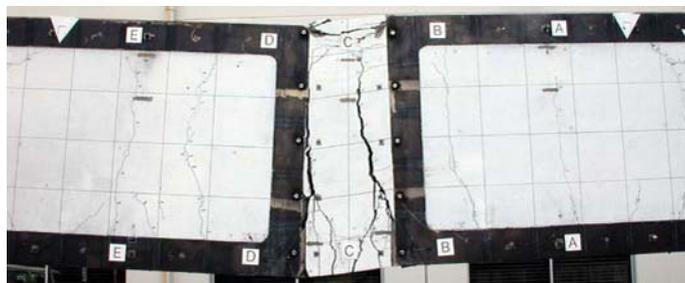
#### 4. 実験結果及び考察

図-8 にケース1, 2の実験終了時のひびわれ状況を、図-9 に両実験の荷重-たわみ関係および Fiber モデルによる解析結果を示す。また、図-10 および図-11 にそれぞれ継手・接続鉄筋の歪みおよびエンドプレートの歪みを示す。なお、参考のためにこれらの図には継手・接続鉄筋の許容応力度相当荷重も示している。

鉄筋許容応力度相当荷重（常時設計荷重）レベルにおいては、鉄筋やエンドプレートなど各構成部材の応力は材料の許容応力度以下に収まっており、ひびわれ幅や目開き量は供用に支障のないものであった。また、継手・接



ケース1



ケース2

図-8 終局時ひびわれ状況

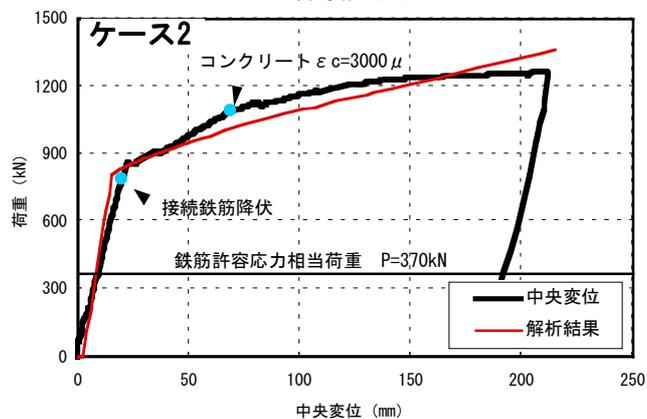
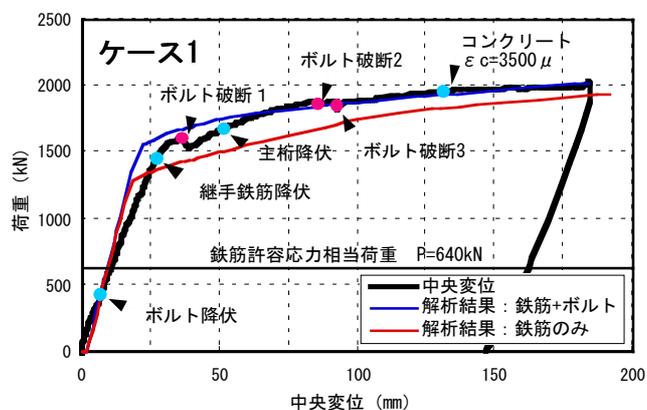


図-9 荷重-変位関係 (ケース1, 2)

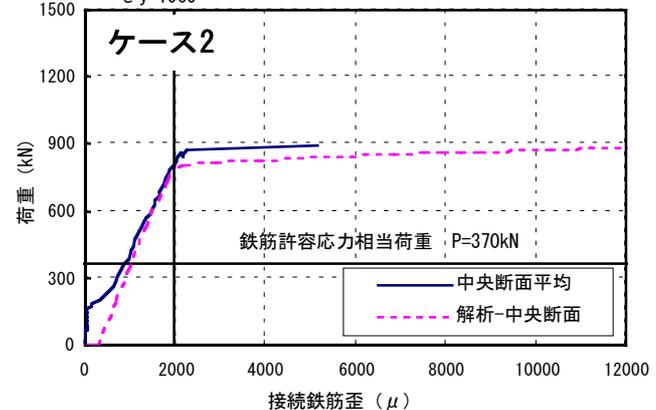
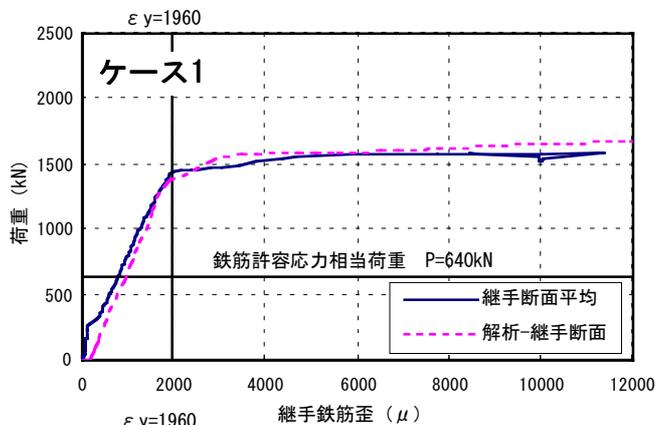


図-10 荷重-継手・接続鉄筋歪み関係 (ケース1, 2)

続鉄筋が降伏後、変形は継手部や、鋼殻一般部と接続部の境界面に集中したが、両ケース共に曲げ破壊性状を示しており、耐力はRC理論解析値と同等であるとともに、部材角はそれぞれ 1/27 と 1/25 になっても耐力低下は見られなかった。ただし、一般部を含む P- $\delta$  曲線の降伏剛性はRC解析値に比べ約 7 割と低く、鋼-コンクリート間の応力伝達特性や継手・接続鉄筋の抜け出し、せん断変形等に起因すると考えられる。

ケース 1 の仮設ボルトは継手鉄筋降伏前に引張強度に達し、継手鉄筋降伏の直後に破断した。

ボルト破断は全数同時ではなかったため衝撃の影響は小さかった。また、ケース 2 では、終局荷重レベルでかぶりが小さい側の定着部コンクリートにひびわれが観察される程度で、施工誤差の影響は小さかった。

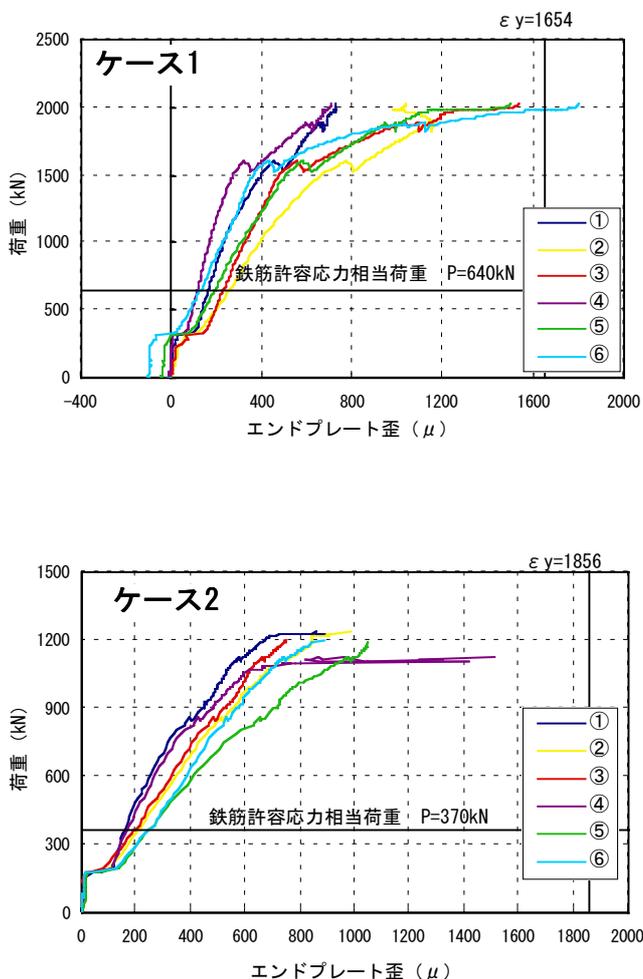


図-11 荷重-エンドプレート歪み関係 (ケース 1, 2)

ケース 3 の実験結果について、図-12 に荷重-水平変位関係を Fiber モデル及び FEM による解析結果と合わせて示す。また、図-13 に接続鉄筋の歪みを示す。なお、参考のためにこれらの図には接続鉄筋の許容応力度相当荷重 (常時設計荷重) も示している。図-14~16 に実験時のひびわれ状況を示す。常時設計荷重レベルにおいては、鉄筋やエンドプレートなど各構成部材の応力は材料の許容応力度以下に収まっており、ひびわれ幅も 0.06mm と供用に支障のないものであった。降伏荷重レベルでひびわれ幅は 0.3~0.7mm であったが、除荷後は 0.1mm まで閉じていた。±3 $\delta_y$  からせん断補強鉄筋は降伏を開始し、±6 $\delta_y$  (部材変形角 1/40) 以後から耐力が低下し始め、せん断補強鉄筋はほぼ全面で降伏し、せん断補強効果は最大に達していた (図-16 中、赤○位置)。なお、今回載荷は±8 $\delta_y$  まで行った。一般部を含む P- $\delta$  曲線の降伏剛性はせん断変形を考慮した RC 解析値に比べ約 7 割と低く、柱基部や接続部構造変化点での抜け出し変形、および鋼-コンクリート間の応力伝達特性に起因するものと考えられる。

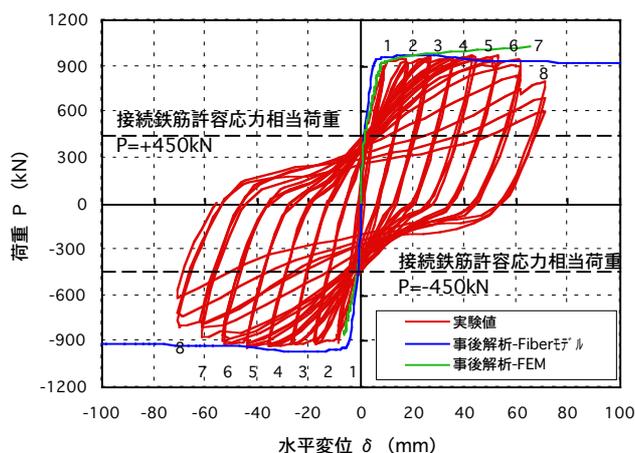


図-12 荷重-水平変位関係 (ケース 3)

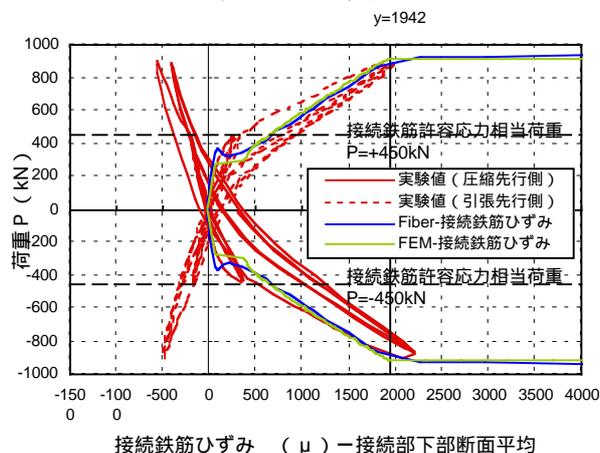


図-13 荷重-接続鉄筋歪み関係 (ケース 3)

## 5. まとめ



図-14  $\pm 1 \delta y = 8.8 \text{mm}$  時 (ひびわれ  $0.3 \sim 0.7 \text{mm}$ )



図-15  $\pm 6 \delta y = 52.8 \text{mm}$  時 (耐力が低下し始める)

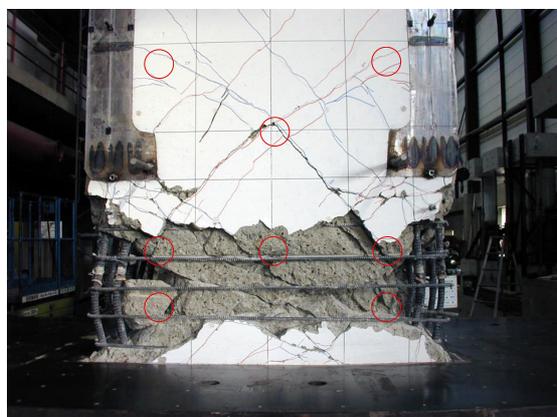


図-16 最終破壊時 ( $\pm 8 \delta y$ )

(1) 支圧方式継手・接続構造はRC構造と同等の耐力と十分な変形性能を有していることが確認された。ただし、一般部を含む  $P-\delta$  曲線の降伏剛性はRC解析値の約7割程度と低かった。

(2) 継手部仮設ボルトの破断は継手鉄筋降伏以降に生じたこと、及びボルトの破断による全体系への影響は小さいことが確認された。

(3) 設計想定程度の接続部施工誤差による部材耐力や変形性能への影響は小さいことが確認された。

(4) ケース3についても部材耐力はRC理論による解析値とよく一致していた。 $\pm 6 \delta y$  の時点から耐力が低下しはじめ、最終破壊形態は曲げ降伏型からせん断滑り型へ移行したが、 $\pm 6 \delta y$  時点の部材変形角は  $1/40$  であった。

(5) 接続部のひびわれ分散性が優れていた。交番試験においては軸力の効果により、降伏荷重を経験しても除荷後にはひびわれ幅は  $0.1 \text{mm}$  以下に収まっていた。また、接続鉄筋の定着域は載荷終了時まで健全であった。

(6) 以上のことから、支圧方式継手・接続構造は、優れたひびわれ分散性および交番繰返し定着性能を有していること、また、接続部を含む部材は十分な耐力と靱性を有していることが確認された。

### 参考文献

- 1) 内海和仁, 森健太郎, 田中充夫, 安部吉生, 服部佳文: MMST 工法によるトンネル構造の課題と実験その1, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, VI-36, pp. 71-72, 2002.9
- 2) 三桶達夫, 趙唯堅, 松葉保孝, 内海和仁, 森健太郎: MMST 工法によるトンネル構造の課題と実験その3, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, VI-38, pp. 75-76, 2002.9