

# 報告 JES 構造の正負交番載荷試験による耐震性能評価

安保 知紀<sup>\*1</sup>・松岡 茂<sup>\*2</sup>・長尾 達児<sup>\*3</sup>

**要旨** : JES 構造の耐震設計基準には, JR 東日本で制定している設計マニュアルがあり, 一般的なアンダーパスに使用する場合に適用している。しかし大規模道路構造物等の複雑な形状や特殊な地盤条件の場合には, 大規模地震時の変形挙動に関する詳細な検討が求められている。本研究では, JES 構造の実物大の模型を用いた正負水平交番載荷試験をおこない, 大きな変形角となっても軸力を保持したまま水平荷重に抵抗し, 優れた耐震性能を有していることを確認した。さらに, コンクリートと鋼板の接触条件として, 圧縮力と摩擦によるせん断伝達力が伝わる条件として FEM 解析をおこなったところ, 弾性的な挙動を示す範囲では荷重と変位の関係を精度良く再現することができた。

**キーワード** : JES 継手, 耐震性能, 鋼・コンクリートサンドイッチ構造

## 1. はじめに

ボックスカルバート等の地下構造物が均一な地盤中にある場合は, 地震による影響が小さいと考えられ, 大規模地震時の耐震設計を省略する設計基準が多い。鉄道構造物では, 兵庫県南部地震以降に耐震基準が改訂され, 地下構造物でも大規模地震時の耐震設計をおこなうことを標準としている。さらに近年では, 道路構造物等でも, その重要度や規模の大きさ等から大規模地震に対する耐震性能として変形挙動までを求められる機会が多くなってきている。

本報告の対象は, 図-1 に示すような鋼製エレメントを特殊な噛み合わせ継手をつなぎ合わせ, エレメント内にコンクリートを充填することにより, ボックスカルバート等の地下構造物を構築する工法<sup>1)</sup>である。ここで, この特殊な噛み合わせ継手は JES (Jointed Element Structure) 継手と呼ばれ, 既往の研究<sup>2)</sup>でその力学特性が報告されている。この継手を用いて構築された鋼・コンクリートサンドイッチ構造を JES 構造と称している。

JES 構造物の耐震設計の基準には, JR 東日本で制定している設計マニュアル<sup>3)</sup>があり, 一般的なアンダーパスに使用する場合の JES 構造物の耐震設計に適用している。しかし, 大規模道路構造物等の複雑な形状や特殊な地盤条件にボックスカルバート等の地下構造物を構築する場合には, 大規模地震時の変形挙動に関する詳細な検討が求められるようになってきている。

そこで本研究では, 大規模地震を想定した JES 構造の耐震性能を評価するために, 実物大の模型を用いた試験をおこなった。さらに, 模型試験と同条件で数値解析をおこない JES 構造の評価をおこなったので, それらの成果をここに報告する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験概要

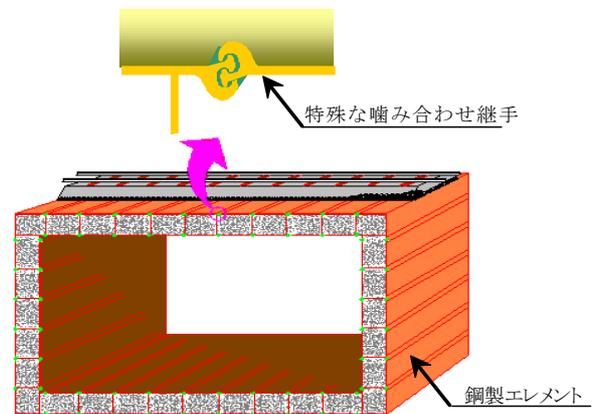


図-1 特殊継手を有するボックスカルバート

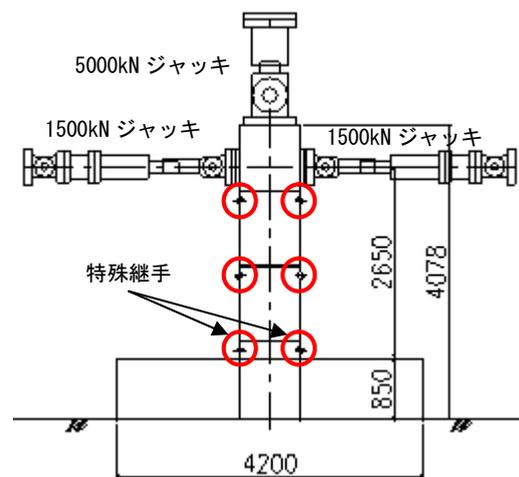


図-2 試験概要図

\*1 鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 研究開発部主席研究員 情修 (正会員)

\*2 鉄建建設 (株) 土木本部 プロジェクト技術部長 工博 (正会員)

\*3 鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 研究開発部主幹研究員

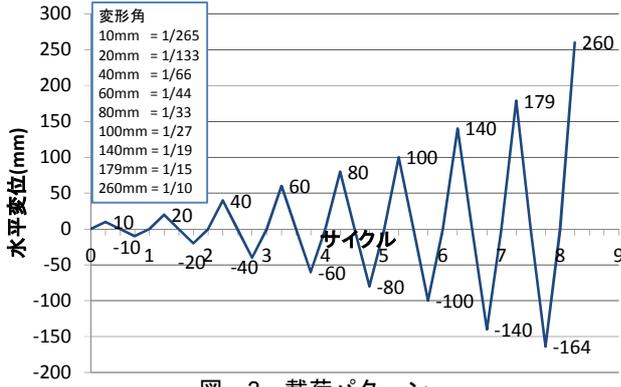


図-3 荷重パターン

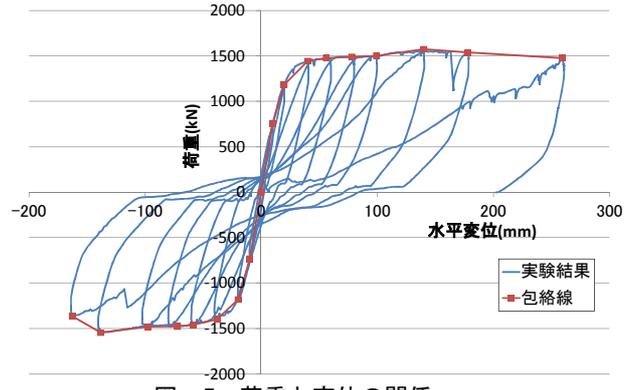


図-5 荷重と変位の関係

表-1 使用材料の強度特性

JES 型鋼の降伏強度	296 N/mm <sup>2</sup>
JES 型鋼の破断強度	424 N/mm <sup>2</sup>
普通鋼板の降伏強度	405 N/mm <sup>2</sup>
普通鋼板の破断強度	534 N/mm <sup>2</sup>
コンクリートの圧縮強度	48.6 N/mm <sup>2</sup>
コンクリートの割裂引張強度	3.14 N/mm <sup>2</sup>
継手グラウトの圧縮強度	64.3 N/mm <sup>2</sup>

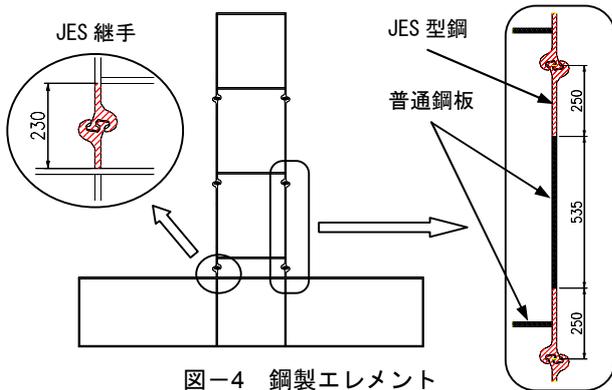


図-4 鋼製エレメント

本研究では、JES 構造の変形挙動および破壊状況を確認するために、実物大の模型を用いた正負水平交番荷重試験を実施した。実物大の模型は、図-2 に示すように壁部材の基部での耐震性を確認することを目的に、底版を有する壁部材を模擬した。また、試験体の部材は、本工法の標準的なエレメントの大きさを想定して、部材高を 850 mm、部材軸直交方向のせん断補強鋼板の間隔を 1035 mm とし、壁部材の奥行き長さは部材高と同値の 850 mm とした。さらに、エレメントの部材厚は標準的なエレメントと同様に 16mm とした。ここで、底版は PC 鋼材にて反力床に固定し、浮き上がりおよび横滑りを防止した。

## 2.2 荷重方法

荷重は、底版上面より 2.65 m の位置に取り付けたアクチュエーター 2 基により静的に荷重をおこなった。荷重

パターンは、水平変位が約 180 mm (変形角約 1/15) に達するまで 8 サイクルで段階的に増分させ、その後 260mm (変形角約 1/10) まで単調荷重をおこなった。本試験の荷重パターンを図-3 に示す。また、壁部材には軸圧縮応力度が 1 N/mm<sup>2</sup> となるように鉛直ジャッキにて一定荷重をおこなった。

## 3. 使用材料

### 3.1 鋼製エレメント

本試験に用いた鋼製エレメントは、SM400 材で製作された JES 型鋼 (t=16mm) と厚さ 16mm の普通鋼板 (SM490) を溶接により接続して製作した。JES 型鋼および普通鋼板の引張強度特性を表-1 に、概要図を図-4 に示す。

### 3.2 中詰めコンクリート

エレメントの中詰めを使用したコンクリートは、スランプ 13.5cm、空気量 2.9% の普通コンクリートを使用した。このコンクリートの強度特性も表-1 に示す。

### 3.3 継手グラウト

JES 継手の噛み合せ部には遊間が生じるためセメントミルクによるグラウトをおこなう。このセメントミルクの強度特性も表-1 に示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 荷重と変位の関係

実物大の試験から得られた荷重と変位の関係を図-5 に示す。正側荷重および負側荷重ともに変形角が約 1/100 までは弾的な挙動を示した。その後 3 サイクル目 (水平変位 40mm, 変形角 1/66) の終了時点で荷重荷重が約 1500kN に達している。その後の荷重で、荷重が約 1500kN に達した後にその荷重を保持するような、バイリニアの形状を示す結果となった。

### 4.2 損傷状況

#### (1) ひび割れの発生

正側荷重および負側荷重ともに 2 サイクル目 (水平変位 20mm, 変形角 1/133) で中詰めコンクリートにひび割

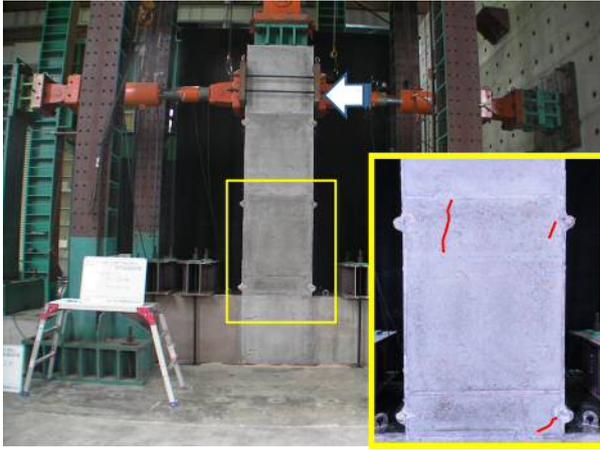


写真-1 ひび割れ状況（正側 2 サイクル目）

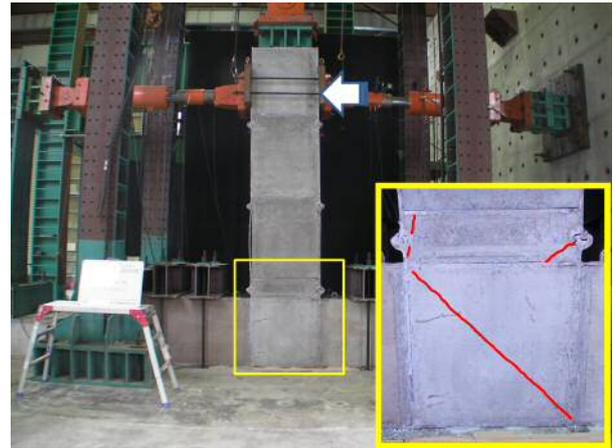


写真-3 ひび割れ状況（正側 4 サイクル目）



写真-2 ひび割れ状況（負側 3 サイクル目）

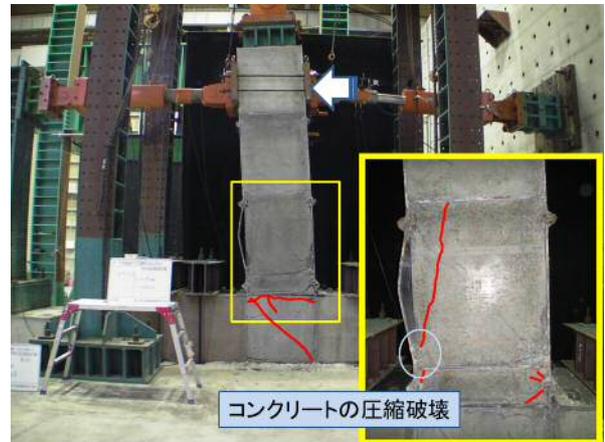


写真-4 圧縮破壊状況（正側 8 サイクル目）

れが発生した。このとき、ほぼ同時に 2 種類の特徴的なひび割れが確認された。一つは、引張側の JES 継手から対角方向に発生したひび割れであり、もう一つは、せん断補強鋼板の途中から鉛直下方に発生したひび割れである。特に後者のようなひび割れは、RC の柱部材では発生することは無く非常に特徴的なひび割れであった。正側載荷時のひび割れの発生状況を写真-1 に示す。

#### (2) ひび割れの伸展

負側載荷の 3 サイクル目（水平変位 40mm, 変形角 1/66）の途中で JES 継手から対角隅部に向けてひび割れが伸展した。このひび割れの発生により荷重が一時低下し、荷重は復元したが増加の程度が緩やかになった。さらに、圧縮側のエレメント鋼板のはらみ出しが確認された。負側載荷時のひび割れの状況を写真-2 に示す。

また、この時点で水平荷重はほぼ最大荷重に達した。

#### (3) 隅角部のひび割れの発生

正側載荷および負側載荷ともに 4 サイクル目（水平変位 60mm, 変形角 1/44）で底版との隅角部に対角方向にひび割れが発生した。正側載荷時のひび割れの状況を写真-3 に示す。

#### (4) コンクリートの圧縮破壊

正側載荷および負側載荷ともに 8 サイクル目（水平変位約 180mm, 変形角約 1/15）の途中で圧縮側隅部のコンクリートが面外方向に圧縮破壊し、一時的に荷重が低下した。その後の載荷により正側の載荷では最大荷重付近まで荷重が増加したものの、負側の載荷では荷重の増加程度が緩やかになり、最大荷重までは増加しなかった。正側載荷時のコンクリート圧縮破壊状況を写真-4 に示す。

#### (5) JES 継手の噛み合せ状況

正側載荷のみ 9 サイクル目（水平変位 260mm, 変形角 1/10）まで載荷をおこなった。強度の増加傾向は非常に緩くなったが、変形角が約 1/10 となった状態でも JES 継手は噛み合っており、引張力を伝達できることが分かった。この時の JES 継手の噛み合せ状況を写真-5 に示す。

### 4.3 ひずみ分布

#### (1) 中詰めコンクリートのひずみ分布

本試験では、下段エレメントの対角方向のコンクリートのひずみを計測した。右上から左下への対角方向の計測結果を図-6 に示す。ここで、横軸に示す変位は、正側載荷時をプラスとして表しており、縦軸に示すコンク

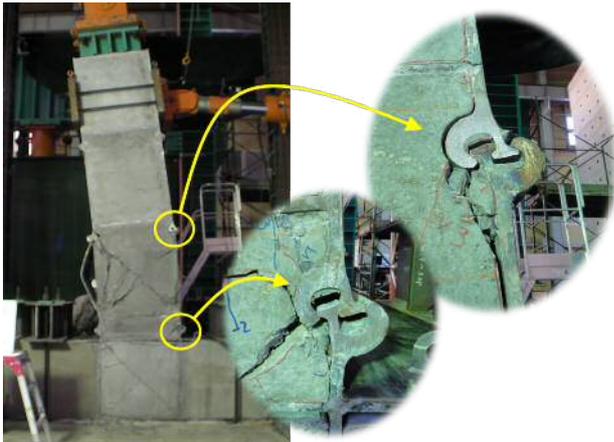


写真-5 JES 継手噛み合せ状況(正側 9 サイクル目)

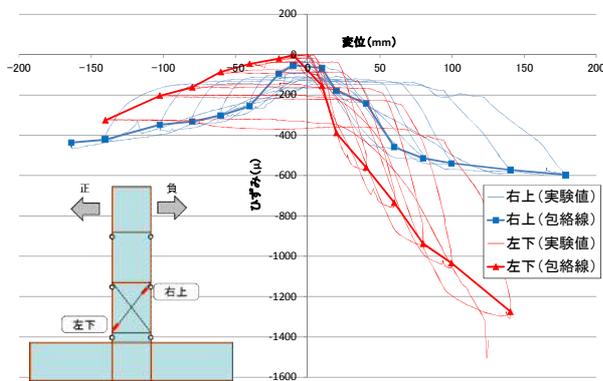


図-6 コンクリートひずみ

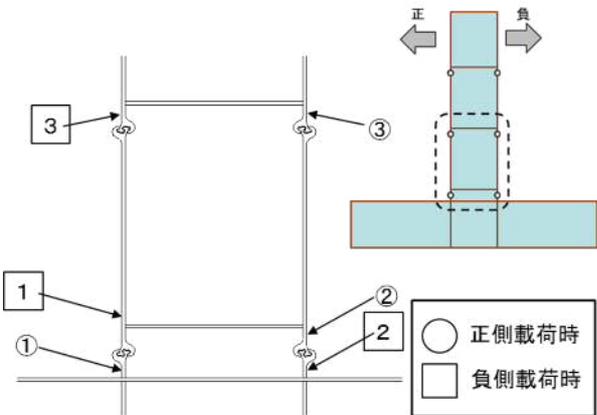


図-7 エレメント降伏順序

リートのひずみは、圧縮時をマイナスとして表している。このグラフより、正側載荷時に対角方向に圧縮力が導入され、特に対角の下隅部に大きな圧縮ひずみが発生している。この圧縮ひずみが、最終的にコンクリートの圧縮破壊ひずみに達することにより、水平荷重が一時的に低下したと考えられる。

#### (2) エレメントのひずみ分布

本試験では、エレメント鋼材のひずみを計測した。正側の載荷では、2 サイクル目 (水平変位 20mm, 変形角 1/133) で圧縮側鉛直鋼板の最下端部が圧縮降伏をした後、3 サイクル目 (水平変位 40mm, 変形角 1/66) 以降に引

張側鉛直鋼板の下段 JES 継手上部および 2 段目 JES 継手上部が降伏した。また、負側の載荷では、2 サイクル目で引張側鉛直鋼板の下方部の引張降伏と圧縮側鉛直鋼板の最下端部の圧縮降伏がほぼ同時に発生した後、3 サイクル目以降に引張側の 2 段目 JES 継手上部が降伏した。降伏の順番を図-7 に示す。

#### 4.4 試験のまとめ

実物大の模型を用いた正負水平交番載荷試験の結果より、次のことが確認できた。

- 1) 変形角が約 1/100 までは弾性的な挙動を示した。
- 2) 水平荷重が 1500kN になるまで緩やかに荷重が増加した。
- 3) 変形角が約 1/15 までは、水平荷重 (1500kN) を保持したバイリニアの形状を示した。
- 4) 変形角が約 1/10 となっても、JES 継手は噛み合ったままであった。
- 5) 中詰めコンクリートには、通常の RC 曲げ部材に見られるような曲げひび割れは発生せず、森山ら<sup>4)</sup>の研究で示されているような斜め圧縮ひび割れが発生した。
- 6) 中詰めコンクリートの圧縮破壊により荷重は一時的低下したが、その後の載荷で再度荷重は増加した。
- 7) 鋼製エレメントは、鉛直部材の最下端部が圧縮降伏した。

### 5. 数値解析

#### 5.1 数値解析の概要

実物大の試験結果より、ひび割れの発生が特徴的であることが分かった。そこで、2次元の弾塑性 FEM 解析により、実物大の試験から得られた結果との比較を試みた。

ここで、FEM 解析に用いた各要素は 4 節点平面応力要素とし、下段エレメントについては解析の精度をあげるためメッシュを細かくしてモデル化した。解析モデルを図-8 に示す。

#### 5.2 材料物性値

##### (1) エレメント鋼板

FEM 解析に用いた鋼製エレメントの強度特性値は、実物大の試験体で使用した実強度を用いた。さらに破断までのひずみ硬化を考慮したバイリニアモデルとし、鋼板の座屈は考慮していない。鋼製エレメントの物性値を表-2 に示す。

##### (2) 中詰めコンクリート

FEM 解析に用いた中詰めコンクリートのモデルは次のように設定した。

ひび割れ発生による引張軟化を考慮し、その曲線はコンクリート標準示方書【設計編】に示されるひび割れ発生直後の第 1 勾配とした。また、圧縮応力とひずみの関

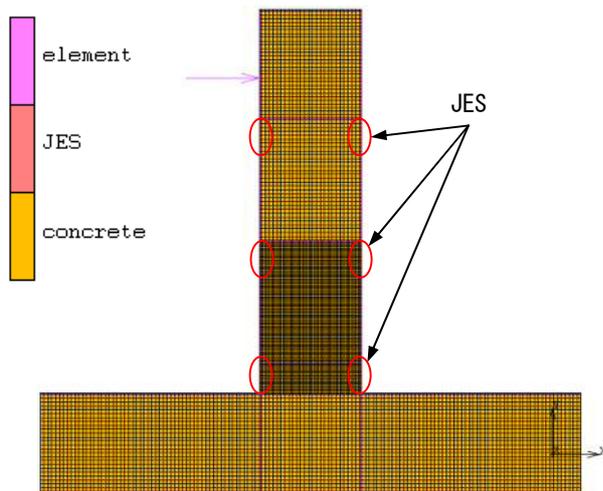


図-8 解析モデル

表-2 解析に用いた材料の強度特性

JES 型鋼の弾性率	184,194 N/mm <sup>2</sup>
JES 型鋼の降伏後弾性率	2,193 N/mm <sup>2</sup>
JES 継手の降伏強度	256.3 N/mm <sup>2</sup>
JES 継手の弾性率	74,270 N/mm <sup>2</sup>
JES 継手の降伏後弾性率	742.7 N/mm <sup>2</sup>

表-3 解析ケース

ケース	接触条件	備考
1	完全付着	平面保持を仮定
2	接触	圧縮力のみ伝達
3	摩擦接触	圧縮力と摩擦せん断力を伝達

係は同示方書に示される係数  $k_1$  を 1.0 とした 2 次曲線タイプとした。

さらに、松岡ら<sup>5)</sup>の研究を参考に、ひび割れ発生後のせん断剛性の保持率を式(1)として評価した。

$$\beta = \exp(-\alpha \cdot w) \quad (1)$$

ここに、 $\beta$  : せん断剛性保持率、 $\alpha$  : せん断剛性保持率の低減率、 $w$  : ひび割れ開口幅である。

最後に、コンクリートの強度特性値は、実物大の試験時に確認した実強度を用いた。

### (3) JES 継手

石橋ら<sup>2)</sup>の実験では、標点間距離 220mm 区間を JES 継手として評価していることから、本解析では同等区間(モデル化の都合上 230mm 区間)を JES 継手とした。JES 継手のモデル化では、部材厚さ 16mm の 4 節点平面応力要素とし、石橋ら<sup>2)</sup>がおこなった試験結果の平均値を JES 継手の強度特性値とした。さらに、降伏後のひずみ硬化を評価するため、降伏後の弾性率を二次勾配比が 1/100 となるように設定したバイリニアモデルとした。

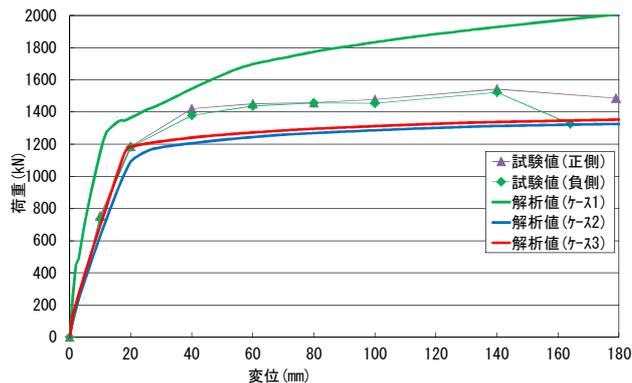


図-9 荷重-変位関係

解析に用いた JES 継手の物性値を表-2 に示す。

### 5.3 解析ケース

コンクリートと鋼製エレメントとの境界条件をパラメータとし、表-3 に示す 3 ケースについて解析をおこなった。ここで、ケース 3 については摩擦係数が不明であることから、その値を 0.5 と仮定して解析をおこなった。

## 6. 数値解析の結果

### 6.1 荷重と変位の関係

実物大の試験および FEM 解析から得られた荷重と変位の関係を図-9 に示す。

解析値のケース 1 では、試験値に比較して全体的に荷重が大きい結果となった。これに対して、解析値のケース 2 およびケース 3 では、水平変位 20mm 程度までは直線的に推移し、実験結果と同様の結果となった。しかし、その後は荷重の増加が試験値に比べ緩やかとなり、試験値と異なる結果となった。

### 6.2 コンクリートのひずみ分布

載荷点位置での水平変位が 180mm となった時点の主応力方向のひずみ分布を図-10~図-12 に示す。図中の色が淡い(灰色)ほどコンクリートに引張ひずみが発生している状態を表している。

ケース 1 では、壁の付け根部から曲げひび割れが分散するように発生しており、通常の RC 部材と同様に引張補強鋼材とコンクリートの付着によるひび割れ発生状況を再現している。

これに対してケース 2 では、目立った曲げひび割れは発生しておらず、鋼製エレメント隅部に圧縮ひずみが局部的に発生しているのが分かる。

最後にケース 3 では、ケース 2 同様に目立った曲げひび割れは発生していないが、上から 3 段目のエレメントの上部に、縦方向にひび割れが発生している。これは、せん断補強鋼材とコンクリートの摩擦により、コンクリートに引張ひずみが発生したと考えられる。このひび割れは水平変位 20mm 程度の時点で発生しており、写真-1 に示す 2 サイクル目(水平変位 20mm)の試験体に発

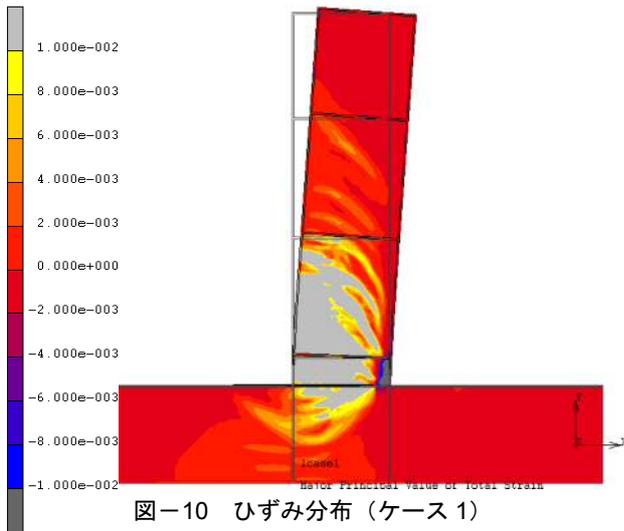


図-10 ひずみ分布 (ケース 1)

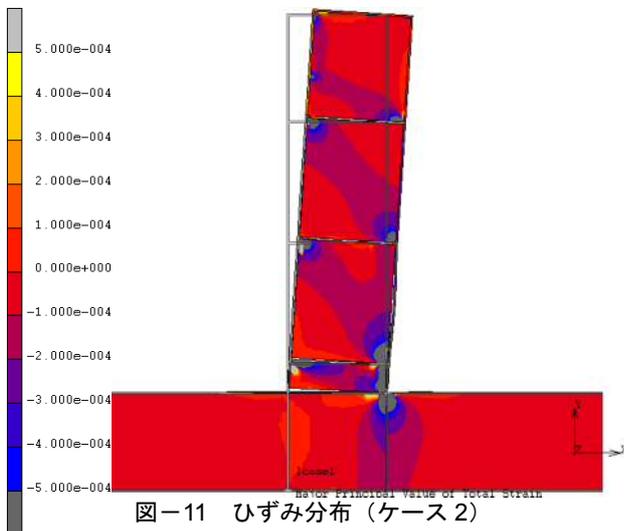


図-11 ひずみ分布 (ケース 2)

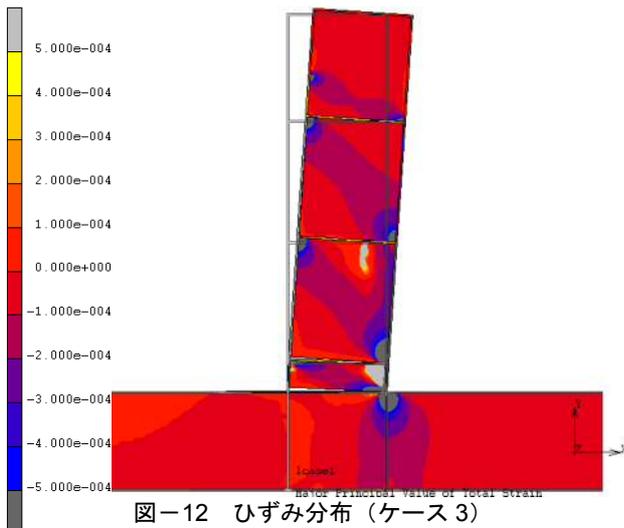


図-12 ひずみ分布 (ケース 3)

生じたひび割れを再現していると考えられる。

しかし、いずれのケースにおいても、写真-3 あるいは写真-4 に示すような圧縮によるものと思われる斜めひび割れが再現できていなかった。この要因には、JES

継手の突起による機械的な拘束や、JES 継手の回転等が考えられ、これを再現するためには JES 継手のモデル化を精度良くおこなう必要があると考える。

## 7. まとめ

部材高を 850mm、せん断補強鋼板の間隔を 1035mm とした標準的な JES エレメントを用いた鋼・コンクリートサンドイッチ構造に対して、実物大の模型を用いた正負水平交番載荷試験をおこない、次のことが確認できた。

- (1) 変形角が 1/100 程度までは、弾性的な挙動を示し、その後、変形角が 1/66 程度までに概ね最大荷重(1500kN)に達する。
  - (2) 荷重と変位の関係は、バイリニアの形状を示す。
  - (3) 変形角が 1/10 程度となっても、JES 継手は噛み合ったままの状態であり、非常に高い変形性能を有している。
  - (4) 中詰めコンクリートには、曲げひび割れではなく斜め圧縮ひび割れが発生する。
- また、FEM 解析から次のことを確認した。

- (1) 鋼製エレメントとコンクリートの接触条件について、完全付着ではなく摩擦を考慮することにより、弾性的な挙動を示す範囲においては試験値と同様な荷重と変位の関係を再現できる。
- (2) コンクリートに発生する応力は、一般的な RC 部材に見られる曲げ引張りひび割れとは異なり、エレメント隅部からの圧縮力が卓越している。

## 参考文献

- 1) 清水 満, 森山智明, 木戸素子, 桑原 清, 森山泰明: 鋼製エレメントを用いた線路下横断トンネルの設計法, トンネル工学研究論文・報告集, 第 8 巻, pp.407-412, 1998.11
- 2) 石橋忠良, 清水 満, 渡邊明之, 森山智明, 栗栖基彰, 山口 昭: 噛み合わせ継手の力学特性, 土木学会論文集, No.777, VI-65, pp.73-82, 2004.12
- 3) 東日本旅客鉄道(株), 非破壊工法設計施工マニュアル, 2009.7
- 4) 森山智明, 石橋忠良, 小林 薫: コンクリート充填された鋼製エレメントはりのせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.15-28, 2006.2
- 5) 松岡 茂, 益田彰久, 武田康司, 土井至朗: ひび割れ発生・進展に支配されたコンクリート構造物の解析モデル, 土木学会論文集, No.620, V-43, pp.1-13, 1999.5