

JES 構造の骨格曲線に基づいた耐震性能評価

安保 知紀*1・松岡 茂*2・長尾 達児*3・柳 博文*4

概 要

JES 構造の耐震設計基準には、JR 東日本が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される。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、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、JES 構造が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することを確認した。さらに、コンクリートと鋼板の境界条件に摩擦を考慮した FEM 解析により、弾性領域での JES 構造の挙動を精度よく再現することができた。

キーワード：JES 構造・耐震性能・耐震設計

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE BASED ON SKELETON CURVE OF JES

Tomonori ABO *1, Shigeru MATSUOKA *2

Tatsuji NAGAO *3, Hirofumi YANAGI *4

Abstract

Seismic design of JES structures conforms to the design manual established by East Japan Railway Company. Ordinary underpasses by the JES are designed based on this manual. However, for complicated geometries of large road structures and projects with special ground conditions, deformations should be investigated in detail in the event of a large earthquake. In the study discussed in this paper, horizontal alternating loading tests with a full-size model of a JES structure were made to verify that the structure had an excellent seismic performance, resisting well horizontal loads even at significant deformation angles, maintaining axial force. In addition, the elastic behavior was successfully simulated by FEM analysis involving the boundary condition between concrete and steel plate.

Keywords : JES structure, Seismic performance, Seismic design

*1 Foundation / Structure Group, Research and Development Department, Engineering Division

*2 General Manager, Civil Engineering Technology Business Department, Civil Engineering Division

*3 Manager, Construction Technology Group, Research and Development Department, Engineering Division

*4 Manager, Foundation / Structure Group, Research and Development Department, Engineering Division

JES 構造の骨格曲線に基づいた耐震性能評価

安保 知紀*1・松岡 茂*2・長尾 達児*3・柳 博文*4

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、地震による影響は小さいと考えられ、大規模地震時の耐震設計を省略する設計基準が多い。しかしながら、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が標準とされている。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いる。

本報告の対象は、図-1に示すような構成エレメントを特殊な噛み合わせ継手でつなぎ合わせ、エレメント内にコンクリートを充てんすることにより、ボックスカルバート等の地下構造物を構築する工法としてしている。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、文献2に力学特性が報告されている。また、この継手を用いて構築される鋼・コンクリートサンドイッチ構造を JES 構造と称している。

一般的なアンダーパスに使用する場合の JES 構造物の耐震設計の基準には、JR 東日本で制定している設計マニュアル³⁾があり、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いる。そこで本研究では、JES 構造の変形挙動を確認し、大規模地震を想定した JES 構造の耐震性能を

評価することを目的とした。

2. 試験概要

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載荷試験を実施した。実物大の模型は、図-2に示すように底版を有する壁部材を模擬し、本工法の標準的なエレメントを想定して部材高を 850 mm、部材軸直交方向のせん

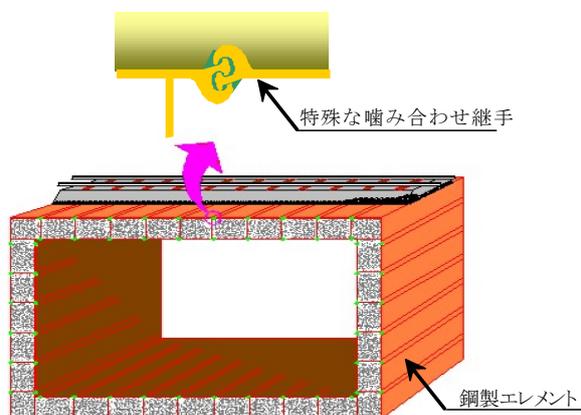


図-1 特殊継手を有するボックスカルバート

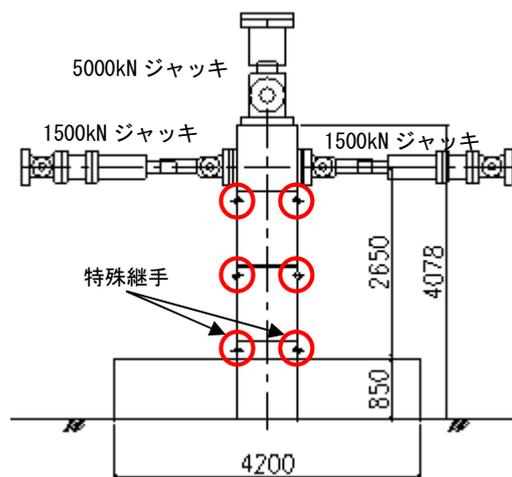


図-2 試験概要図

*1 エンジニアリング本部 研究開発部 基礎・構造グループ

*2 土木本部 プロジェクト技術部長

*3 エンジニアリング本部 研究開発部 施工技術グループ グループリーダー

*4 エンジニアリング本部 研究開発部 基礎・構造グループ グループリーダー

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。また、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。壁部材には軸圧縮応力度が 1 N/mm^2 となるように鉛直ジャッキにて一定载荷をおこなった。

正負水平交番载荷は、底版上面より 2.65m の位置に取り付けたアクチュエーター 2 基により静的に载荷をおこなった。载荷パターンは、図-3 に示すように水平変位が約 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、最終 260 mm (変形角約 1/10) まで単調载荷をおこなった。

3. 試験結果

3. 1 荷重と変位の関係

実物大の試験から得られた荷重-変位関係を図-4 に示す。この図より、水平変位約 26 mm (変形角約 1/100) 付近までは弾性的な履歴であり、その後約 1500kN の荷重を保持したバイリニアの形状を示している。

3. 2 損傷状況

主な損傷の過程を次に示す。

2 サイクル目 (変形角約 1/33) で中詰めコンクリートにひび割れが確認され、3 サイクル目 (変形角約 1/66) の負側载荷時に中詰めコンクリートに斜めひび割れが発生した。

その後、荷重増加の傾きが緩やかになり、水平荷重が 1500kN 程度まで増加した後、その荷重を保持しながら水平変位のみが増加していった。3 サイクル目の負側载荷終了時点 ($\delta=40\text{mm}$) の損傷状況を写真-1 に示す。

8 サイクル目 (変形角約 1/15) の载荷途中で中詰めコンクリートの端部が圧縮破壊し、荷重が一時的に 1100 kN 程度まで低下した。8 サイクル目の正側载荷終了時点 ($\delta=179\text{mm}$) の損傷状況を写真-2 に示す。その後の 8 サイクル目の負側载荷時にも同様に中詰めコンクリート端部のコンクリートが圧縮破壊し、一時的に荷重が低下した。

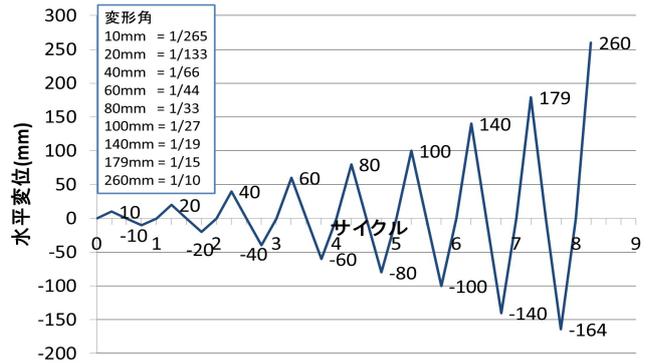


図-3 载荷パターン

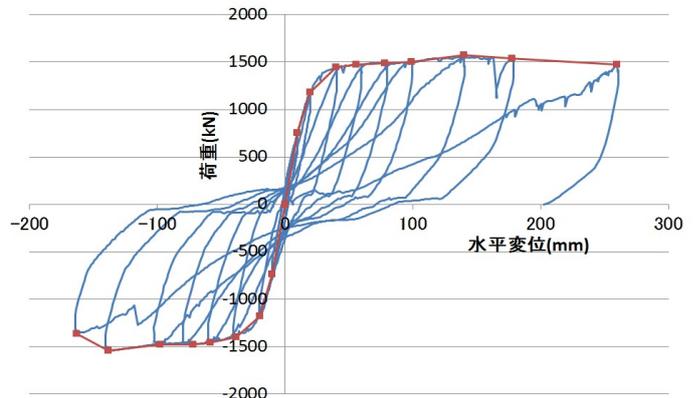


図-4 荷重-変位関係

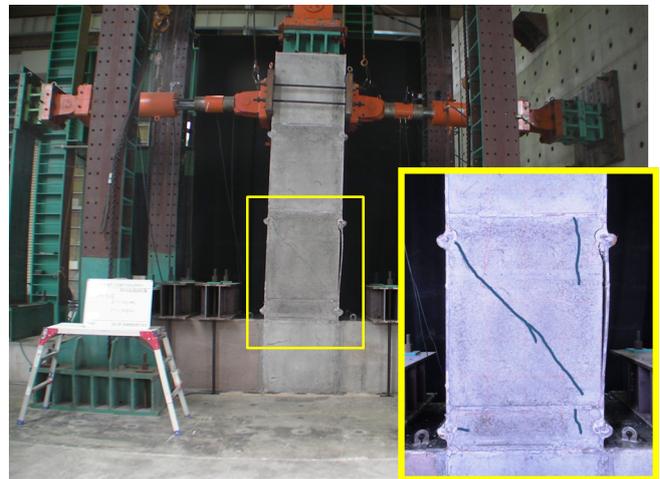


写真-1 3 サイクル目 (負側)

最終的には、水平変位 260mm (変形角約 1/10) まで载荷をおこなった。载荷終了時点で水平荷重は約 1500kN まで上昇し、大きな荷重低下は見られなかった。このとき中詰めコンクリートには圧縮力によると思われるひび割れが発生し、大きく進展した。さらに、圧縮側の鋼

板が大きく撓んでいるのが確認できた。最終載荷終了時点 ($\delta=260\text{mm}$) の損傷状況を写真-3に示す。

次に、載荷終了時点での引張側に配置されている JES 継手の状況を写真-4に示す。継手間には隙間ができていないものの爪は噛み合っている状態であり、変形角約 1/10 という大きな変形状態になっても引張力を伝達できていることが確認できた。

3.3 試験のまとめ

部材高 850mm、せん断補強鋼板を 1035mm 間隔で配置した JES 継手を有する鋼・コンクリートサンドイッチ部材に対して、実物大の正負水平交番載荷試験より以下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す。
- 2) 変形角が約 1/10 までは水平荷重 1500kN(曲げモーメント約 4000kN・m) を保持したバイリニアの形状を示す。
- 3) 変形角が約 1/10 となった状態でも JES 継手は噛み合ったまま引張力を伝達しており、優れた変形性能を有している。

4. 数値解析

4.1 数値解析の概要

実物大の試験結果から、その損傷の過程が非常に特徴的であることが分かった。そこで、2次元の弾塑性 FEM 解析をおこない、実物大の試験から得られた結果との比較・評価をおこなった。

FEM 解析に用いた材料の物性値は、実物大試験に用いた材料の物性試験結果を用いた。材

表-1 材料物性値

コンクリートの圧縮強度	48.6
コンクリートの引張強度	3.14
鋼板の引張降伏強度	296
鋼板の弾性率	184,194
鋼板の弾性率 (降伏後)	2,198
JES 継手の降伏強度*1)	256.3
JES 継手の弾性率*1)	74,270
JES 継手の弾性率 (降伏後)	742.7

*1)文獻2に記載されている試験の平均値とした

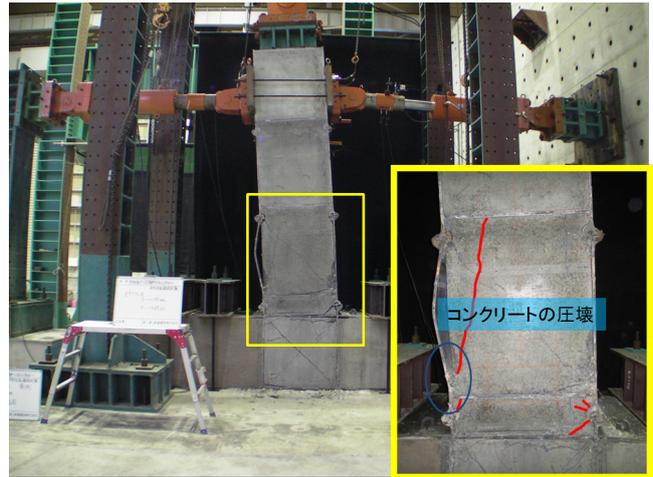


写真-2 8サイクル目 (正側)

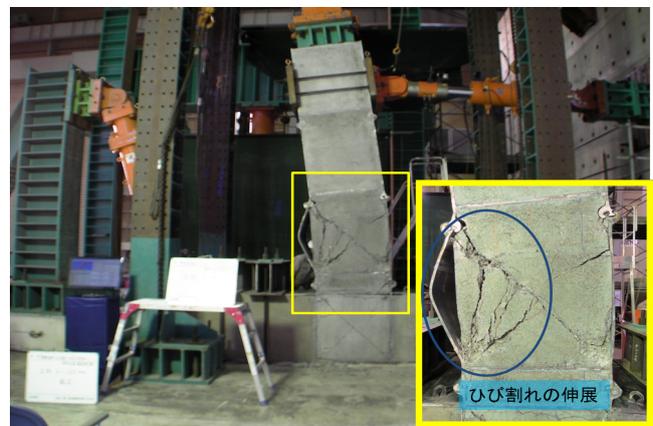


写真-3 載荷終了

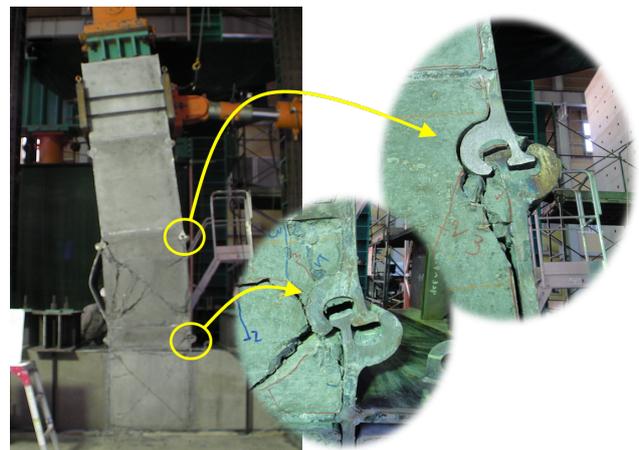


写真-4 JES 継手の損傷状況 (載荷終了時点)

料物性値を表-1に示す。

ここで、鋼板はひずみ硬化を考慮するため、引張試験より得られた応力とひずみの関係から、降伏点と最大荷重時の点を結んだ傾きを降伏後の弾性率とした。また、JES 継手については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。

4. 2 解析モデル

2次元 FEM 解析モデルを図-5に示す。

解析に用いた各要素は4節点平面応力要素とし、鉛直荷重として1N/mm²の一定軸力作用下で解析をおこなった。

4. 3 解析ケース

コンクリートと鋼板の付着特性に着目して解析をおこなった。解析のケースを表-2に示す。

表-2 解析ケース

ケース	付着特性	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	圧縮力と摩擦力($\mu=0.5$)を考慮

5. 解析結果

5. 1 荷重と変位の関係

試験および解析から得られた荷重と変位の関係を図-6に示す。

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、ケース2およびケース3では、塑性領域で荷重の増加がほとんど見られず試験値と差がある結果となっているものの、弾性域での荷重と変位の関係は非常に相関が高くなった。

5. 2 ひずみ分布

載荷点位置での水平変位が180mmとなった時点のひずみ分布を図-7~図-9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となっている。

ケース1では、柱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、RC部材と同様なひび割れ発生状況といえる。

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、鋼板隅角部からの圧縮ひずみが局所的に発生していることが分かる。

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、縦方向に引張ひずみが発生している。これは、水平のエレメント

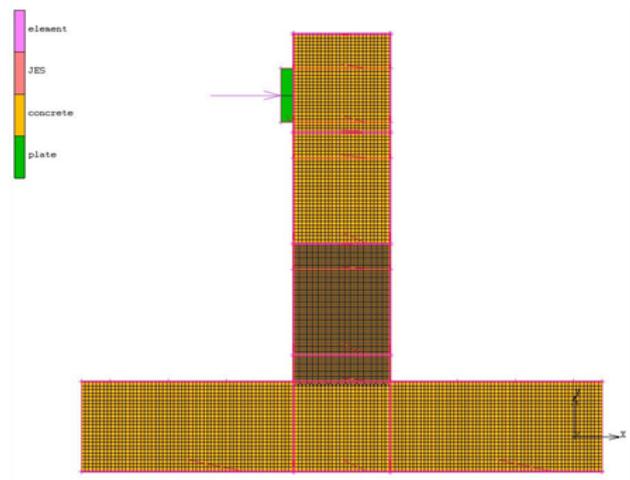


図-5 解析モデル

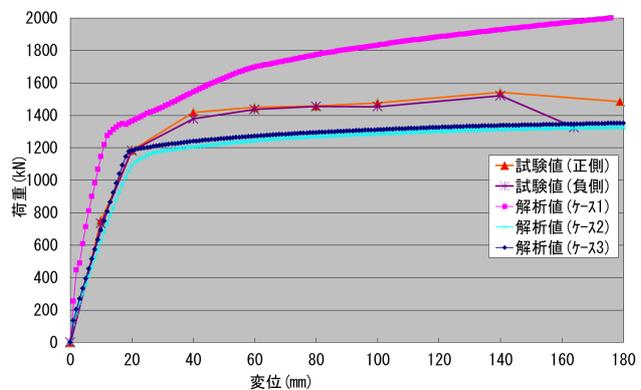


図-6 荷重-変位関係

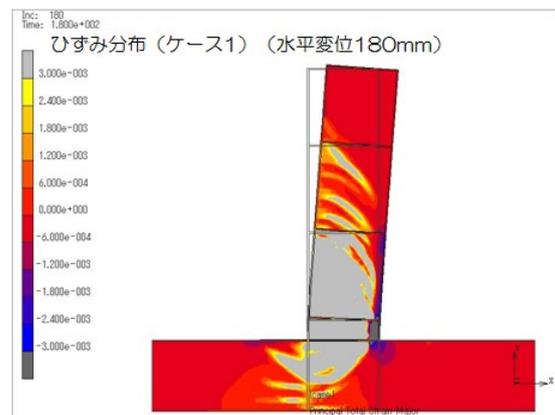


図-7 ひずみ分布(ケース1)

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ためと考えられる。

ここで、実物大試験のコンクリートの損傷状況を確認すると、2サイクル目(水平変位20mm)で同様な位置に縦方向にひび割れが発生しているのが確認できた。このときの試験体の状況と、解析結果(水平変位20mm時点)を

図-10 に示す。この図より、試験体の挙動が高い精度で再現できていると考えられる。

6. まとめ

実物大の模型を用いた正負水平交番载荷試験より、JES 継手を有した JES 構造は、1/10 程度の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対して抵抗でき、優れた耐震性能を有していることが分かった。

また、数値解析の結果から、コンクリートと鋼板の摩擦を考慮することにより、特に弾性領域での JES 構造の挙動を精度よく再現することができた。ただし、実物大の試験では、载荷途中で JES 継手から柱付け根に向けた斜めのひび割れが発生しており、今回の解析モデルではこの点が十分再現できていない。

参考文献

- 1) 清水満ほか：構成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，1998 年 11 月報告(56)
- 2) 石橋忠良ほか：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），非開削工法設計施工マニュアル，2009.7

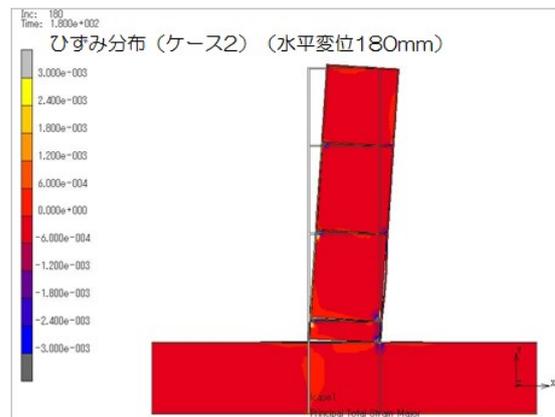


図-8 ひずみ分布(ケース 2)

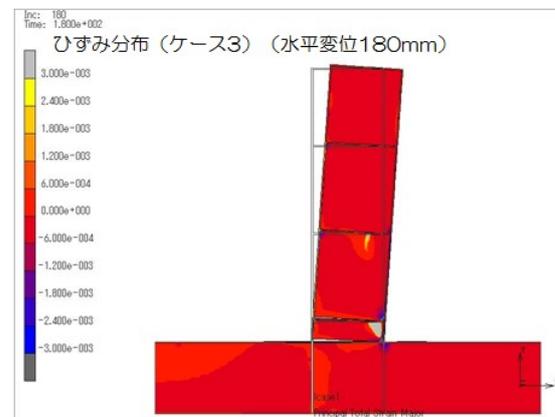


図-9 ひずみ分布(ケース 3)

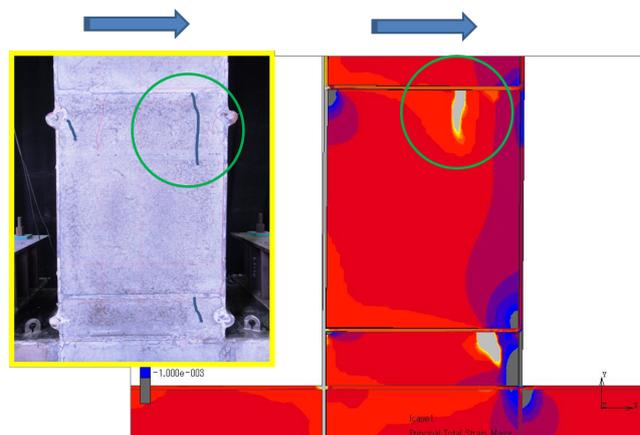


図-10 ひび割れの比較