

報告 JES 構造の曲げ特性に関する実験的検討

安保 知紀^{*1}・松岡 茂^{*2}・長尾 達児^{*3}・栗栖 基彰^{*4}

要旨：JES 構造とは、鋼製エレメントを特殊な噛み合わせ継手でつなぎ合わせ、鋼製エレメント内をコンクリートで充填する鋼コンクリートサンドイッチ構造である。JES 構造は、JES 継手と呼ばれる特殊継手で鋼製エレメントを連結しており、鋼製エレメントと中詰めコンクリートが機械的に一体化されていないという特長を有している。本検討では、この JES 構造の曲げ特性を確認するために実大の曲げ試験を実施した。試験結果より、曲げ耐力は平面保持を仮定した鉄筋コンクリート構造として概ね評価できるが、不連続面における目開きの増加により変形量は大きくなることが分かった。

キーワード：JES 継手、鋼コンクリートサンドイッチ構造、曲げ特性

1. はじめに

本検討で対象としている JES 構造は線路下横断構造物の構築工法として開発され¹⁾、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でつなぎ合わせ、エレメント内にコンクリートを充填することにより、図-2 に示すようなボックスカルバートが構築できる工法である。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²⁾ 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。

ここで、鋼コンクリートサンドイッチ構造に関する研究は、栖原ら³⁾ や服部ら⁴⁾ によって基本的な強度特性に関する研究がなされている。さらに、秋山ら^{5), 6)} によって鋼コンクリートサンドイッチ構造と鉄筋コンクリート構造の強度特性に関する研究が行われている。これらの既往の研究を受け、土木学会から「鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)⁷⁾」が発刊されている。この指針(案)によれば、鋼板とそれにはさまれたコンクリートが一体となって挙動する合成構造を前提としており、シアコネクタを適切な間隔で配置することが記載されている。そのため、平面保持の仮定を前提とした鉄筋コンクリート構造と同様の設計が可能であるとされている。すなわち、一般に鋼コンクリートサンドイッチ構造とは、鋼とコンクリートがずれ止め鋼材やアンカー等で機械的に一体化されていることが前提となっている。

ところが、本検討の対象としている JES 構造は、鋼製エレメント内に充填されたコンクリートがせん断補強鋼板によってブロック状に隔てられており、鋼製エレメントとは一体化されていない構造である。このように鋼板とコンクリートが一体化していない構造に関する既往の研究は少なく、例えば原田らの研究⁸⁾ では、連続梁部材

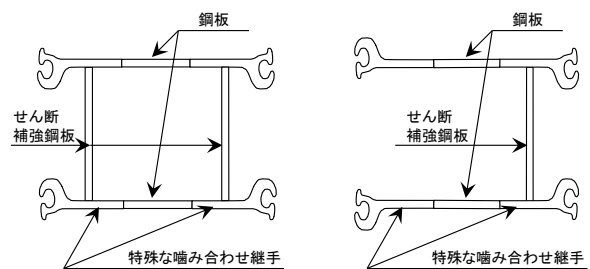


図-1 鋼製エレメントの概要

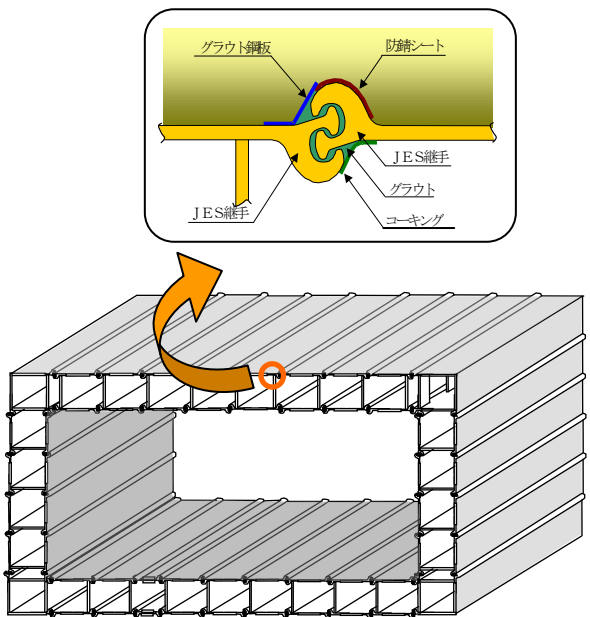


図-2 特殊継手を有するボックスカルバート

を対象として等分布荷重が作用することを想定した実験から、曲げ降伏耐力および曲げ終局耐力は平面保持を仮定して算出した耐力と同等であるが、たわみ量はかなり大きくなるという報告がされている。

そこで、本検討では JES 構造の曲げ特性を確認するこ

*1 鉄建建設(株) 土木本部 エンジニアリング部主席研究員 修士(情報) (正会員)

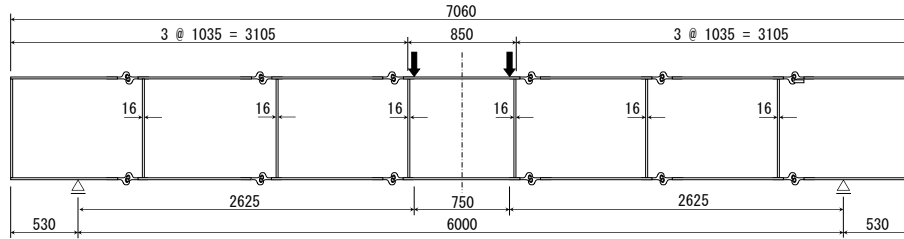
*2 鉄建建設(株) 土木本部 プロジェクト技術部長 博士(工) (正会員)

*3 鉄建建設(株) 土木本部 エンジニアリング部主幹研究員

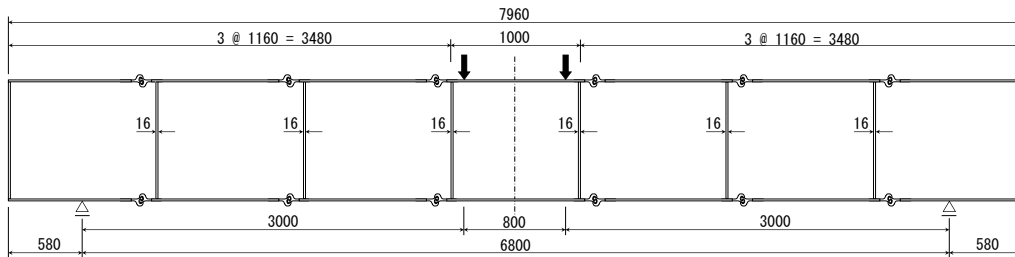
*4 鉄建建設(株) 土木本部 エンジニアリング部担当部長

表-1 試験ケース

試験体 No.	断面高さ (mm)	断面幅 (mm)	せん断スパン (mm)	せん断補強鋼板 間隔 (mm)	鋼板の降伏強度 (N/mm ²)	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)
1	850	500	2625	1035	294	28.8
2	1000	500	3000	1160	294	30.0



試験体 No.1



試験体 No.2

単位：mm

図-3 試験体概要図

とを目的に、実物大の模型を用いた載荷試験をおこない、計算値との比較による曲げ特性の評価をおこなった。

2. 載荷試験

2.1 試験概要

試験は、曲げ耐力および破壊形態の確認を目的とし、実構造物と同様に JES 継手により連結された複数の鋼製エレメント群を模した梁試験体を用いて静的曲げ載荷試験をおこなった。

載荷試験は、写真-1 に示すように 7000kN 油圧ジャッキを用いて、変位制御による 2 点単調載荷とした。

2.2 試験条件

載荷試験は、表-1 に示す通り、断面高さを変えた 2 種類の試験体を用いて行った。ここで、本工法の標準的な断面高さは 850mm（試験体 No.1）であり、比較のために 1000mm（試験体 No.2）の試験体を用いた試験も行った。また、鋼製エレメントを構成する鋼板は板厚 16mm の SM400 材を使用し、この鋼製エレメントを横にした状態で全ての JES 継手を勘合して、この遊間には設計基準強度が 30N/mm² となるセメントミルクを充填した。このセメントミルクが硬化した後、鋼製エレメントの中詰めに普通コンクリートを打ち込んだ。この時、中詰めコンクリートと接する鋼製エレメントの表面は、目粗し等の処理は行なわなかった。

試験体は、図-3 に示すようにスパン中央のせん断補強鋼板内が等曲げ区間となり、載荷点から支点間に上下



写真-1 載荷試験状況

3 箇所ずつの JES 継手が配置される形状とした。

2.3 計測項目

計測項目は、載荷荷重、梁の中央変位および図-4 に示す位置の鋼製エレメントのひずみとした。

3. 試験結果

3.1 曲げ変形特性と破壊性状

載荷試験から得られた荷重と変位の関係を図-5 に示す。試験体 No.1, No.2 とともに載荷荷重 1300kN 付近までは直線的な関係を示した。その後、荷重の増加傾向は非常に緩やかになった。

試験体 No.1, No.2 とともに、載荷に伴い載荷点直近の引張側の JES 継手からせん断補強鋼板に向かって斜めにひび割れが発生し、鉄筋コンクリート構造とは異なり、ひび割れは分散せず、ひび割れ幅のみが増大していった。

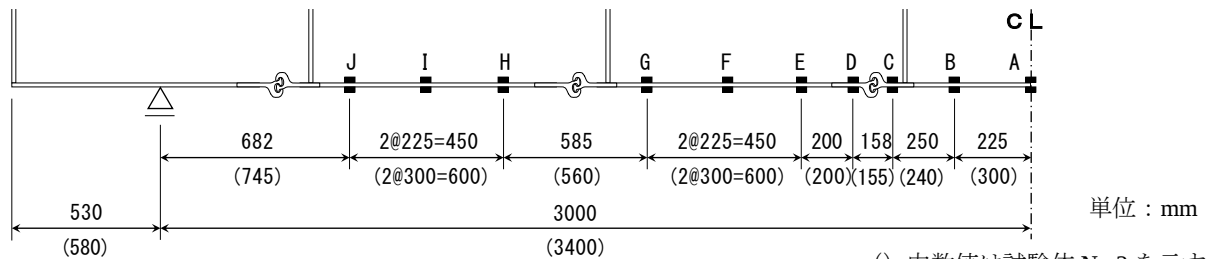


図-4 ひずみゲージ貼付け位置

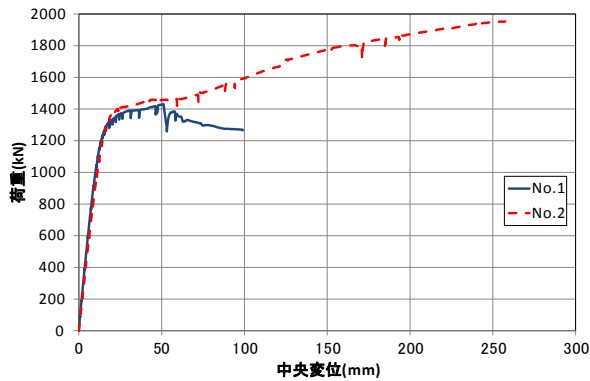


図-5 荷重と変位の関係



写真-3 試験体 No.1 最終状況



写真-2 目開き状況 (試験体 No.2)



写真-4 試験体 No.2 最終状況

それに伴い、引張側の鋼製エレメントとコンクリートの間にすべりが発生し、写真-2 に示すようなせん断補強鋼板とコンクリート間に目開きが発生した。この目開きが増大し、載荷点直下にある JES 継手近傍の引張側鋼製エレメントが降伏した。引張側鋼製エレメントの降伏後は、鋼材のひずみ硬化によるものと思われる緩やかな荷重の増加が見られた。

試験体 No.1 は、写真-3 に示すように最終的に載荷荷重が 1431kN に達した時点で載荷点間の圧縮側鋼板の座屈とともにコンクリートが破壊し、荷重は緩やかに減少した。

試験体 No.2 は試験体 No.1 と異なり、圧縮側鋼板の局部座屈が見られたもののコンクリートに大きな破壊は見られず、荷重は緩やかに増加し続けた。中央変位が 250mm を超えた時点で載荷用のジャッキストロークが最大となり載荷を終了した。試験体 No.2 の最終状況を写真-4 に示す。

さらに、いずれの試験体においても JES 継手の噛み合

わせ状況は良好で、最終状態まで JES 継手に発生した応力を伝達できていることが分かった。

以上より、鉄筋コンクリート構造と異なりコンクリートのひび割れの分散は見られず、せん断補強鋼板とコンクリートとの目開きにより変形が進んでいることが分かった。さらに、本試験のように部材有効高とせん断スパンの比が 3 程度であれば、引張鋼材が降伏するまではほぼ直線的な挙動を示し、引張鋼材が降伏後も急激に荷重が低下することは無く、圧縮側鋼板が局部座屈をおこした後に曲げ破壊に至ることが確認できた。

3.2 ひずみ分布

図-6 および図-7 に各試験体の引張側の鋼製エレメントのひずみと荷重の関係を示す。なお、図中の記号は図-4 に示す記号を表わしており、ひずみは鋼製エレメントの内側および外側の値の平均値としている。

これらの図より、等曲げ区間のひずみ (A, B) はいずれの試験体も最大荷重である 1400kN 付近 (ひずみ

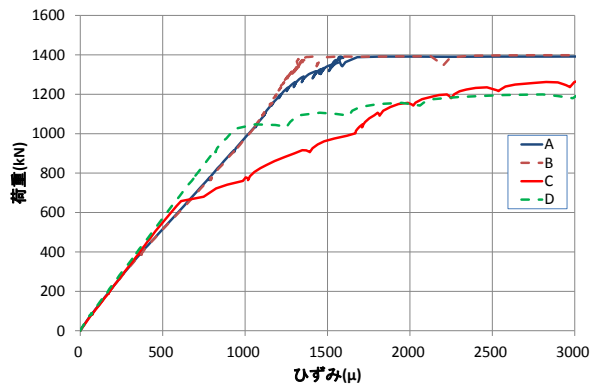


図-6 荷重とひずみの関係（試験体 No.1）

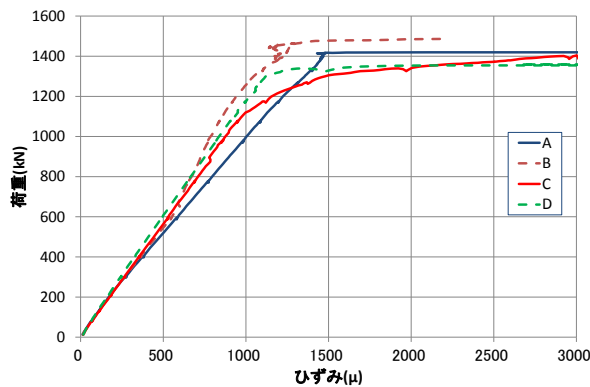


図-7 荷重とひずみの関係（試験体 No.2）

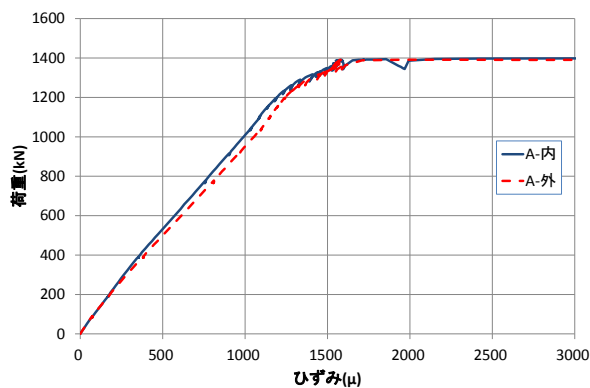


図-8 等曲げ区間のひずみ（試験体 No.1）

1500 μ 程度)までは線形に推移し、その後ひずみが急激に増加し降伏したと考えられる。ところが、JES 継手付近のひずみ (C, D) は、最大荷重に達する前にひずみが急激に増加しており、特に試験体 No.1 の C 点では荷重が 700kN 程度 (ひずみ 500 μ 程度) で初期勾配の低下が見られた。そこで、ひずみの発生状況を詳細に確認するために、試験体 No.1 における鋼製エレメントの内側と外側のひずみに着目すると、図-8 に示すように等曲げ区間のひずみは両面とも同様な引張ひずみが発生していることから、純引張の荷重が作用しているのが分かる。これに対し、せん断補強鋼板近傍の JES 継手付近では、図-9 に示すように外側に比べて内側の引張ひずみが大きくなっており、700kN 付近で内側のひずみが急激に増加している。また、せん断補強鋼板とは反対側の JES 継手

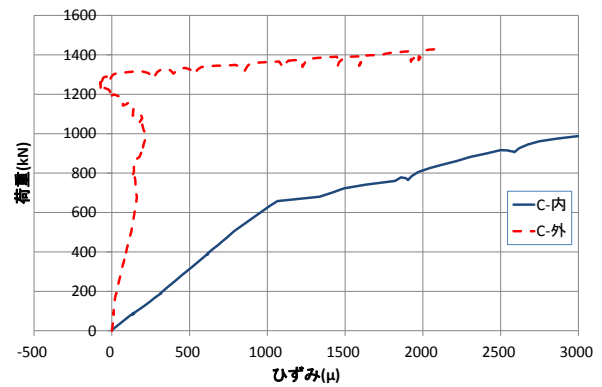


図-9 せん断補強鋼板近傍のひずみ（試験体 No.1）

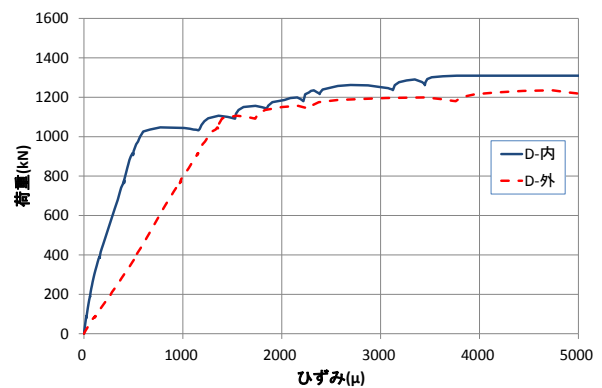


図-10 JES 継手近傍のひずみ（試験体 No.1）

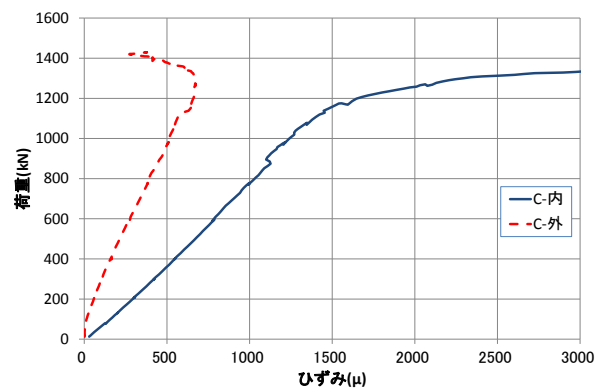


図-11 せん断補強鋼板近傍のひずみ（試験体 No.2）

付近では、図-10 に示すように逆に外側のひずみが大きく、1000kN 付近でひずみが急激に増加している。

これに対し試験体 No. 2 でも、等曲げ区間では試験体 No. 1 と同様な結果が得られている。また、図-11 に示すようにせん断補強鋼板近傍の JES 継手付近では、やはり外側に比べて内側の引張ひずみが大きくなっているが、内側のひずみが降伏ひずみに達しているのは 1200kN 程度であり、試験体 No. 1 に比べるとその降伏荷重が大きいことが分かる。

これらの結果より、鋼製エレメントの板厚は 16mm と比較的厚いこともあり、せん断補強鋼板の影響により JES 継手近傍の鋼板に曲げが発生し、局所的に曲げ降伏したと考えられる。

4. 曲げ特性の評価

4.1 計算値の算出

載荷試験から得られた結果を評価するため、引張側および圧縮側の鋼板を等価な鉄筋に換算し、せん断補強鋼板は考慮しないで、部材断面の曲げモーメントと曲率の関係から荷重と変位の間係を算出した。この結果から、文献 7)や鉄道構造物等設計標準⁹⁾に示されるような平面保持を仮定した鉄筋コンクリート構造の考え方が適用できるかを確認した。

計算に用いた材料特性値を表-2に示す。コンクリートの圧縮強度および鋼板の降伏強度は実強度とし、JES 継手の降伏強度および弾性係数は、文献 2)で報告されている試験結果の平均値として、いずれもひずみ硬化は考慮せず完全弾塑性として計算した。

4.2 曲げ耐力の評価

降伏荷重時および最大荷重時の曲げ耐力について、実験値と計算値を表-3に示す。ここで、実験値の降伏荷重はスパン中央(図-4 A 点)のひずみの平均値が降伏ひずみを超えた値とした。また、JES 継手付近で局所的に曲げ降伏していたことから、比較のために JES 継手の降伏強度を用いて算出した曲げ耐力の結果を併記した。

試験体 No.1 では、降伏荷重および最大荷重ともに計算値が実験値に対して 5%程度大きい結果となった。また試験体 No.2 では、実験における最大荷重は計算値を大きく上回っているが、降伏荷重については試験体 No.1 と同様に計算値が実験値に対して 5%程度大きい結果となった。このことより、曲げ耐力の算出においては、平面保

表-2 材料特性値

コンクリートの圧縮強度 (No.1)	28.8 N/mm ²
〃 (No.2)	30.0 N/mm ²
コンクリートの弾性係数 (No.1)	27400 N/mm ²
〃 (No.2)	28000 N/mm ²
エレメント鋼板降伏強度	294 N/mm ²
エレメント鋼板弾性係数	200000 N/mm ²
JES 継手降伏強度	256 N/mm ²
JES 継手弾性係数	74270 N/mm ²

持を仮定した鉄筋コンクリート構造として比較的精度良く評価できると考えられる。

4.3 変形性能の評価

鋼製エレメントは弾性係数の異なるエレメント鋼板と JES 継手の合成構造であることから、変形性能を評価するうえで、平均弾性係数による等価剛性を用いた。本試験に用いた JES 継手は等間隔に配置されていることから、以下に示す式で平均弾性係数を算出した。

$$\varepsilon_{ave} = \frac{\delta_{sy} + \delta_{jy}}{L_s + L_j} \quad (1)$$

$$L_s = L - L_j \quad (2)$$

$$E_{ave} = \frac{f_{jy}}{\varepsilon_{ave}} \quad (3)$$

ここに、

ε_{ave} : 平均ひずみ

δ_{sy} : エレメント鋼板の引張変位量 (mm)

δ_{jy} : JES 継手の引張変位量 (mm)

L : JES 継手の間隔 (mm)

L_s : JES 継手を除いた SM400 材の長さ (mm)

L_j : JES 継手の長さ (=220 mm)

E_{ave} : 平均弾性係数 (N/mm²)

f_{jy} : JES 継手の降伏強度 (N/mm²)

なお、JES 継手の引張特性は文献 2)の試験結果を引用しているため、解析上の JES 継手の長さは文献 2)で報告されている標点間距離とした。

載荷試験の結果と計算から求めた荷重と変位の関係について、部材高さが 850mm である試験体 No.1 の結果を図-12に、部材高さが 1000mm である試験体 No.2 の結果を図-13に示す。図には、エレメント鋼板の強度特性値を用いて計算した値も併記した。

等価剛性を用いて算出した初期の荷重勾配は、エレメント鋼板の特性値を用いて算出した値よりも傾きが緩くなっているが、実験結果では初期の荷重勾配はさらに緩やかに傾いており、計算値との乖離が見られた。また、降伏後の荷重の勾配は、実験値と計算値は近似し

表-3 曲げ耐力

試験体 No.	実験値		計算値			実験値/計算値	
	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	計算に用いた鋼材の種類	降伏荷重 (kN)	最大荷重*) (kN)	降伏荷重	最大荷重
1	1331	1431	エレメント鋼板	1414	1495	0.94	0.96
			JES 継手	1233	1299	1.08	1.10
2	1412	1953	エレメント鋼板	1460	1543	0.97	1.27
			JES 継手	1276	1342	1.11	1.46

*) 圧縮縁のコンクリートひずみが 3500 μ となった時点を超えた最大荷重とした

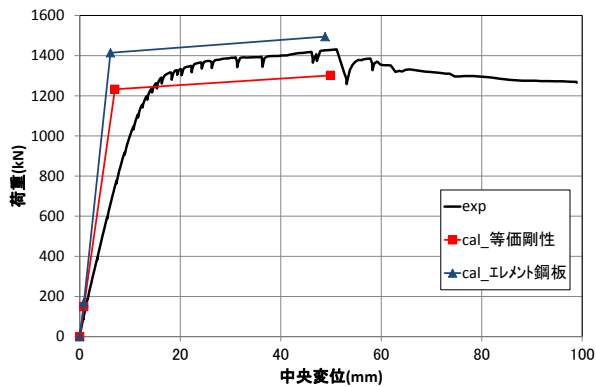


図-12 荷重と変位の関係（試験体 No.1）

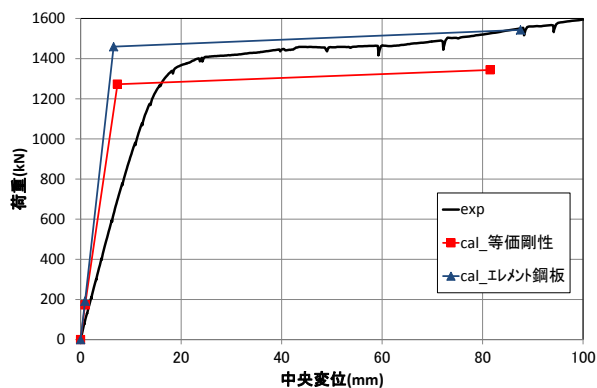


図-13 荷重と変位の関係（試験体 No.2）

ているものの、試験体 No.2の実験結果では、計算による最大荷重時の変位を超えても荷重は緩やかに増加傾向を続け、計算値と異なる挙動を示していた。

これらのことから、初期の曲げ変形性能は、不連続面となるせん断補強鋼板とコンクリート間の目開き量が増大し、それに伴いせん断補強鋼板近傍の JES 継手付近が局所的に曲げ変形していくため、部材としての曲げ剛性が低下していくと考えられる。

5. まとめ

JES 構造の実物大試験の結果と計算値による比較検討により、次の知見を得ることが出来た。

- (1) 載荷初期から直線的に荷重は上昇し、等曲げ区間の引張側鋼板が降伏したあたりから荷重の上昇は非常に緩やかになり、最大荷重以降も緩やかに荷重は減少していく。
- (2) 主なひび割れは JES 継手からせん断補強鋼板に向かって発生する。その後引張側の鋼製エレメントとコンクリートにすべりが発生することによりひび割れ幅が増大し、それに伴ってせん断補強鋼板とコンクリートとの間に目開きが発生する。
- (3) 本検討の範囲では、破壊形態は引張鋼材降伏後に圧

縮側のコンクリートが破壊し、一般的な鉄筋コンクリート構造と同様の破壊形態を示す。

- (4) 最大荷重時にも JES 継手は噛みあった状態であり、JES 継手に発生する応力を伝達できている。
- (5) 曲げ耐力は、平面保持を仮定した鉄筋コンクリート構造として比較的精度良く評価できる。
- (6) 変形性能は、不連続面となるせん断補強鋼板とコンクリート間の目開きが増大することにより、JES 継手付近が局所的に曲げ変形するため、等価剛性で評価した変形よりも大きくなると考えられる。

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, Vol.8, 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) 栖原寿郎, 西牧 興, 松石正克, 竹下治之, 岩田節雄: 鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式複合構造物の強度に関する研究 (第 1 報), 日本造船学会論文集, Vol.141, pp.205-216, 1977
- 4) 服部陽一, 松石正克, 石浜高明, 山本隆夫, 岩田節雄, 北園真澄: 鋼板とコンクリートから成るサンドイッチ式コンボジット構造の最終強度, 日本造船学会論文集, Vol.157, pp.369-382, 1985
- 5) 秋山 暉, 小関喜久夫, 平 和男, 佐々木正廣: 鋼コンクリートサンドイッチ構造部材の強度特性, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.605-608, 1986
- 6) 秋山 暉, 小関喜久夫, 平 和男, 佐々木正廣: 鋼・コンクリート合成サンドイッチ構造部材の終局耐力, 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.69-74, 1986.9
- 7) 土木学会: 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針 (案), コンクリートライブラリー73, 1992.7
- 8) 原田直樹, 島 弘: 鋼コンクリートサンドイッチ構造における合成度が小さい時の耐荷メカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.1211-1216, 1994
- 9) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 平成 16 年 4 月