論文　鋼とコンクリートの合成度が低いサンドイッチ部材の補強に関する基礎的研究

安保　知紀[*1]・松岡　茂[*2]・栗栖　基彰[*3]・桑原　清[*4]

要旨：鋼板にシアコネクタ等のずれ止めが配置されていない鋼コンクリートサンドイッチ部材のように，鋼板とコンクリートの合成度が低い部材断面内に補強鋼材を配置した場合の部材の耐力や変形量及び破壊性状を確認するために，曲げ載荷試験と非線形有限要素解析の比較により補強鋼材による影響を考察した。これより，鋼板とコンクリートの境界には付着や摩擦の影響が小さいことが分かった。さらに，補強鋼材を配置することで部材の耐力は向上するものの，補強鋼材に異形鉄筋を用いたケースと普通丸鋼を用いたケースの曲げ剛性に優位な差が見られず，補強鋼材とコンクリートの付着や摩擦の影響が小さいことが分かった。

キーワード：鋼コンクリートサンドイッチ部材，JES 工法，付着，摩擦

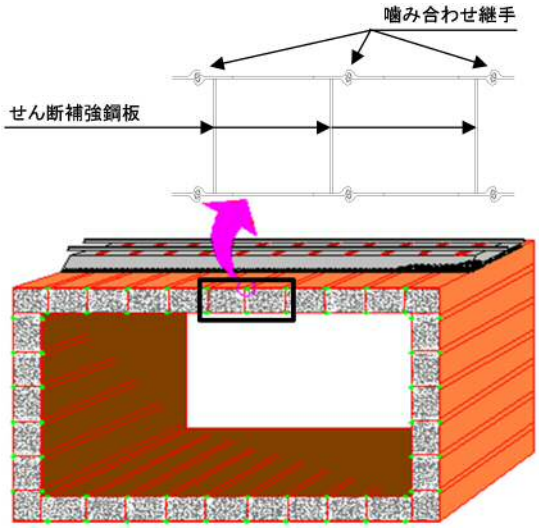
1. はじめに

鉄道や道路の下に非開削でボックスカルバート等の構造物を構築する工法として JES(Jointed Element Structure) 工法が開発され [1)]，現在までに 100 件を超える実績がある。この工法は，**図－1** に示すように鋼製エレメントを JES 継手と呼ばれる噛み合わせ継手で繋ぎ合わせ，エレメント内をコンクリートで充填することで部材を構築する。この部材は，部材高が 1.0m 程度の断面で使用されることが多いが，最近では地下構造物の大型化や大深度化に伴い，設計断面力に対して曲げ耐力が不足する場合が見られる。

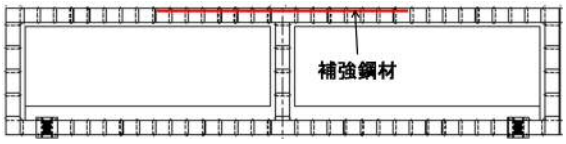
部材の耐力を向上するためには，鋼製エレメントの高強度化に伴い噛み合わせ継手の強度を大きくする必要があるが，この噛み合わせ継手は唯一の仕様であり，実大の継手を用いた数十体の強度試験の結果から力学特性がまとめられている [2)]。継手の強度を向上させるためには新たな継手の開発が必要となるため，多くの労力と期間が必要となる。そこで本研究では，土被り等の上載荷重により**図－2** に示すような中壁との接合部に発生する断面力に対して補強鋼材を部材断面内に配置することを検討した。

ここで，鋼コンクリートサンドイッチ部材の設計に関する基準は，2014 年制定土木学会複合構造標準示方書［設計編］[3)]の「Ⅲ．鋼コンクリートサンドイッチ合成版編」にまとめられている。その中では，2 枚の鋼板とそれに挟まれたコンクリートが一体となって挙動する合成構造となっており，鋼材とコンクリートの一体性を確保するために，適切なずれ止めを適切な間隔で設けなければならないとされている。このように鋼コンクリートサンドイッチ部材の設計では，一般には鋼材とコンクリートが一体化された前提で行われている。

しかし，JES 部材の鋼製エレメントにはシアコネクタ等のずれ止めは無く，部材軸直角方向にのみ一定間隔でせん断補強鋼板が配置されているだけであり，鋼製エレメントとコンクリートの境界面では滑りが発生し，平面保持を仮定して算出した曲げ剛性に比較して小さくなる [4)]。このように合成度の低い部材に補強鋼材を配置した



図－1　JES 工法の概要

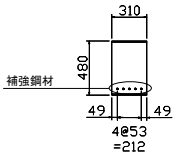


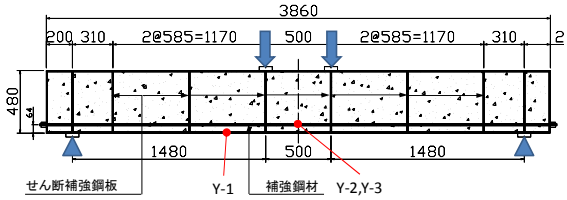
図－2　補強の概要

*1 鉄建建設（株）　建設技術総合センター　研究開発センター主席研究員　博士(工学)　(正会員)
*2 鉄建建設（株）　執行役員　土木本部副本部長　博士(工学)　(正会員)
*3 鉄建建設（株）　土木本部　地下・基礎技術部長
*4 （株）ジェイテック　常務執行役員　技術企画本部長

場合，補強鋼材とコンクリートの付着特性が曲げ耐力や変形量に大きく影響すると考えられる。

鋼材とコンクリートの合成度が低い部材に関する研究には，完全合成を仮定した理論値よりも変形量がかなり大きくなる [5]という研究成果がある。さらに著者らは，本研究で対象とする部材に対して曲げ変形量を定量的に算定できる手法 [6]を提案しており，いずれの研究でもせん断補強鋼材を適当に配置すれば曲げ耐力は平面保持を仮定して算出できるとしている。しかし，鋼製エレメント等の引張主部材の他に補強鋼材を配置した部材に関する研究は無いことから，本論文では合成度が低い鋼コンクリートサンドイッチ部材内に配置した補強鋼材とコンクリートの付着特性に着目して模型試験体による載荷試験と数値解析を実施し，その結果から部材の耐力や変形量，破壊性状について考察した。

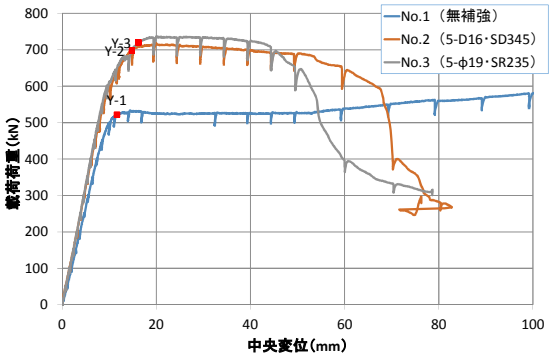




図－3　試験概要

表－1　試験ケース

ケース	補強鋼材
1	無し
2	5-D16　SD345
3	5-φ19　SR235



図－4　荷重と変位の関係

2. 曲げ載荷試験

2.1 試験概要

曲げ載荷試験は，**図－3** に示すように載荷点と支点間を 1.48m とする 4 点曲げ載荷とした。試験体は部材高さを 480mm，部材幅を 310mm とし，部材軸方向にせん断補強鋼板を 585mm 間隔で配置した。使用した鋼板は全て板厚 9mm の SM400 材とし，鋼板の接合部は溶接で堅固に固定した。補強鋼材は，部材下縁から 64mm の位置に配置し，せん断補強鋼板を貫通して端部をナットで定着した。試験体の製作では，同日に全ての中詰めコンクリートを打ち込み，載荷試験時の一軸圧縮強度はいずれも 26.5N/mm^2～27.5N/mm^2 の範囲であった。

2.2 試験ケース

曲げ載荷試験は，補強鋼材とコンクリートの付着の違いが部材の曲げ変形や破壊性状に与える影響の違いを確認するため，配置する補強鋼材の付着特性に着目して**表－1** に示すような 3 ケースを実施した。補強試験体には無補強試験体の曲げ耐力の約 1.4 倍となるような補強鋼材を配置し，補強鋼材に異形鉄筋を配置した試験体と普通丸鋼を配置した試験体の 2 種類を製作して載荷をおこなった。

2.3 試験結果

(1) 荷重と変位量の関係

曲げ載荷試験から得られた載荷荷重とスパン中央位置の鉛直方向の変位量（たわみ量）の関係を**図－4** に示す。図中の Y-1～Y-3 点は各試験において**図－3** に示す位置の下側鋼板及び補強鋼材が降伏した時点を表わしている。無補強の試験ケース No.1 は補強鋼材を配置した試験ケースに比較して，載荷開始から下側鋼板が降伏する程度までの荷重の増加傾向が小さく，降伏程度までの曲げ剛性が小さいことが分かる。また，試験ケース No.2 と試験ケース No.3 の降伏程度までの荷重の増加傾向はほとんど同じであり，補強鋼材の付着特性の違いによる影響がほとんど見られなかった。

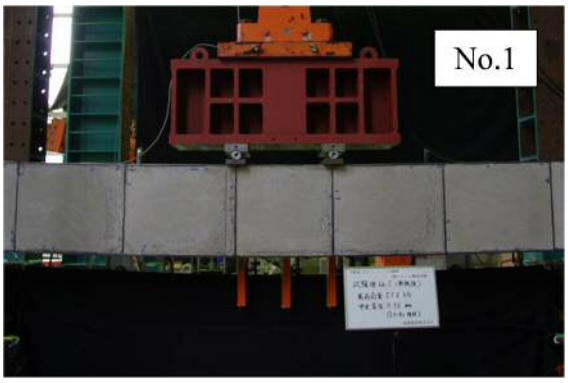
試験ケース No.1 は，スパン中央の変位量が約 12mm

表－2　荷重の比較

ケース	試験値			計算値			試験値／計算値		
	下側鋼板降伏荷重	補強鋼材降伏荷重	最大荷重	下側鋼板降伏荷重	補強鋼材降伏荷重	最大荷重	下側鋼板降伏荷重	補強鋼材降伏荷重	最大荷重
1	522 kN	-	587 kN	516 kN	-	543 kN	1.01	-	1.08
2	695 kN	698 kN	718 kN	625 kN	718 kN	741 kN	1.11	0.97	0.97
3	662 kN	720 kN	737 kN	685 kN	740 kN	772 kN	0.97	0.97	0.96

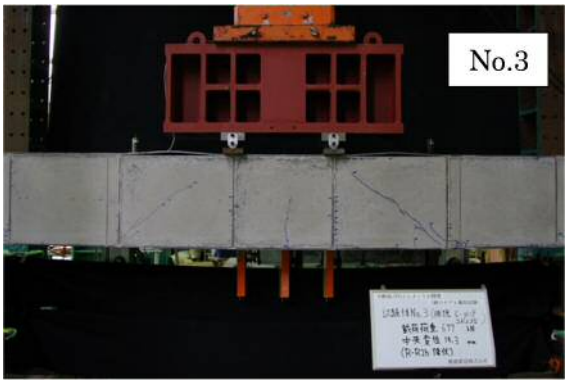
となった時点（Y-1 点）で鋼板が降伏し，それ以降も緩やかに荷重が増加していき，変位量が約 160mm となるまで大きな荷重の低下は見られなかった。これに対し試験ケース No.2 はスパン中央の変位量が約 15mm となった時点（Y-2 点）で鋼板及び補強鋼材がほぼ同時に降伏した。試験ケース No.3 はスパン中央の変位量が約 12mm となった時点で下側鋼板が降伏し，変位量が約 16mm となった時点（Y-3 点）で補強鋼材が降伏した。ケース No.2，No.3 は変位量が 20mm 程度で最大荷重となり，その後は緩やかに荷重が減少した後に急激に荷重が低下した。

載荷試験から得られた降伏荷重及び最大荷重と平面保持を仮定して算出した降伏耐力及び曲げ耐力から荷重に換算した値の比較を**表－2** に示す。ここで，計算では圧縮側の鋼板も考慮して耐力を算出した。また，載荷試験の降伏荷重とは，鋼材に貼り付けた 2 枚のひずみゲージから得られたひずみの平均値が降伏ひずみに達した時の荷重とした。さらに，計算から求めた最大荷重はコンクリートの圧縮縁ひずみが 0.0035 に達する曲げモーメントから算出した。この表では試験値が計算値を少し下回る結果となったが，載荷試験では下側の鋼板が降伏する前から圧縮側（上側）の鋼板にはらみ出しが見られたため，試験値が圧縮側の鋼板を考慮して算出した計算値を少し



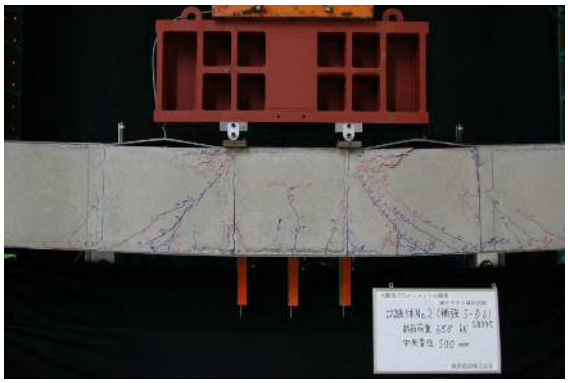
写真－1　下側鋼板降伏時の損傷状況（変形角 1/127）

写真－2　補強鋼材降伏時の損傷状況（変形角 1/101）

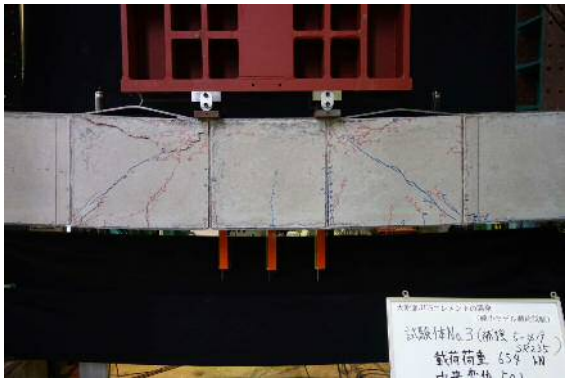


写真－3　補強鋼材降伏時の損傷状況（変形角 1/91）

写真－4　変形角 1/50 時点の損傷状況（No.1）



写真－5　変形角 1/50 時点の損傷状況（No.2）



写真－6　変形角 1/50 時点の損傷状況（No.3）

下回ったと考えられる。

(2) 損傷状況

各試験ケースの下側の鋼板及び補強鋼材が降伏した時点の試験体の状況を**写真－1～写真－3** に示す。試験ケース No.1 は，せん断補強鋼板とコンクリートとの界面にひび割れが発生している程度であり，目立った損傷は見られなかった。試験ケース No.2 は，鋼板が降伏した直後に補強鋼材も降伏し荷重の増加は見られなくなり，載荷点に向かうひび割れが分散して複数発生した。概ね鉄筋コンクリート部材と同様な曲げひび割れが発生して進展している状況と考えられる。これに対し試験ケース No.3 は，鋼板が降伏した後も荷重は増加し，補強鋼材が降伏した時点で荷重の増加は見られなくなった。補強鋼材が降伏した時点で中央のブロックと隣接するブロックにひび割れが 1 本ずつ発生したが，ケース No.2 のようなひび割れの分散は見られなかった。

次に，変形角が約 1/50 となる時点の各試験体の状況を**写真－4～写真－6** に示す。試験ケース No.1 は，せん断補強鋼板とコンクリートとの接触面が大きく開口し，コンクリートに目立った損傷は見られなかった。試験ケース No.2 は，下縁からのひび割れが適度に分散しており，載荷点直下のコンクリートに圧縮による損傷が見られた。試験ケース No.3 は，下縁からのひび割れの本数は少なく，上縁のコンクリートが広範囲に渡って大きく損傷しており荷重が急激に低下していった。

(3) 鋼材のひずみ

試験ケース No.2 における下側の鋼板に発生したひずみと鉛直変位との関係を**図－5** に示す。スパン中央のひずみ（0）と両隣のブロックのひずみ（L1～L3，R1～R3）の発生状況がほとんど一致していることから，これらのブロックにはコンクリートの付着及び摩擦の影響がほとんど無いことが分かる。さらに，その外側のブロックの鋼板のひずみ（L4，R4）が小さいことから，せん断補強鋼板を境に鋼板に発生するひずみが異なることが分かる。他の試験ケースも同様なひずみの発生状況であり，補強鋼材の有無や種類に関係なく下側の鋼板には付着や摩擦の影響がほとんど無いと考えられる。

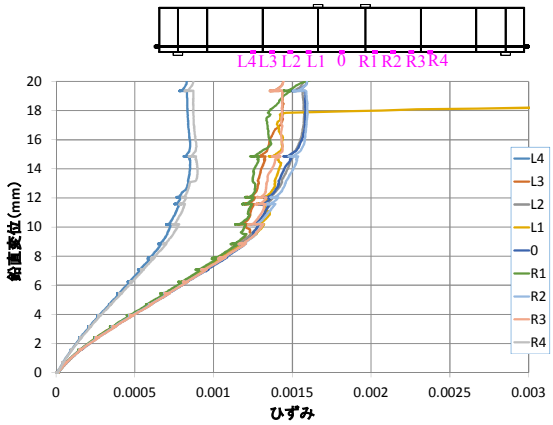
次に，補強鋼材に発生したひずみと鉛直変位との関係を**図－6** 及び**図－7** に示す。いずれの結果もスパン中央のひずみ（R-0）と隣接ブロック内の載荷点側のひずみ（R-L1，R-R1）は概ね値が同じであるが，同一ブロック内の支点側のひずみ（R-L2，R-R2）が載荷点側の値と比較して小さくなっていることが分かる。これは，コンクリートとの摩擦や付着の影響によるものと考えられるが，試験ケース No.2 では，変形が進むにつれてひずみの値が近似する傾向が見られており，すべりが生じて補強鋼材に一様にひずみが発生してきたと考えられる。

4. 数値解析による検証

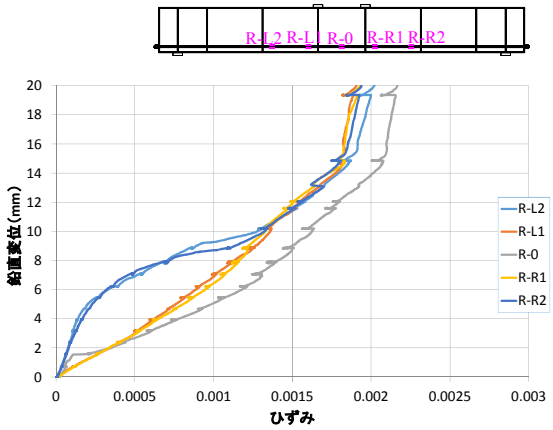
4.1 数値解析モデル

(1) 概要

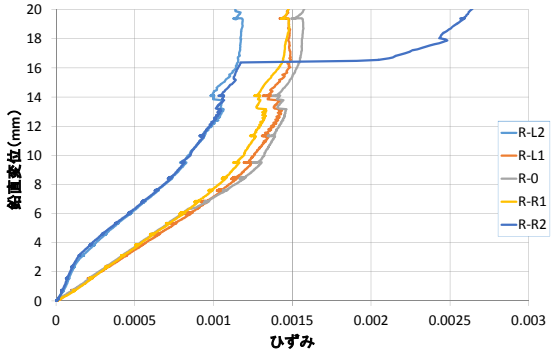
載荷試験の結果から，補強鋼材の付着や摩擦の影響が耐力や変位量にあまり影響していないと考えられたため，補強鋼材とコンクリートの境界条件に着目して 3 次元非線形有限要素解析により検証を行った。数値解析は，接触解析を可能とする汎用非線形有限要素解析プログラム「Marc（MSC Software）」を使用した。



図－5　変位と下鋼板ひずみの関係（No.2）



図－6　変位と補強鋼材ひずみの関係（No.2）



図－7　変位と補強鋼材ひずみの関係（No.3）

表－3　材料の物性値

ケース	鋼板		補強鋼材		コンクリート	
	降伏強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
1	306	199	-	-	27.1	24.1
2	306	199	383	184	26.5	26.6
3	306	199	313	203	27.5	28.0

(2) 材料のモデル化

数値解析に使用した材料の物性値を**表－3** に示す。鋼板及び補強鋼材の物性値は引張試験から得られた値とし，応力とひずみの関係は降伏以降の弾性係数を 1/100 とするひずみ硬化を考慮してモデル化した。また，コンクリートの物性値は載荷試験時に実施した強度試験から得られた値とし，応力とひずみの関係は複合構造標準示方書［設計編］[3)]を参考に，一軸圧縮応力下における圧縮軟化及び引張軟化を考慮してモデル化しており，三軸応力状態下による影響は考慮していない。

(3) 境界条件

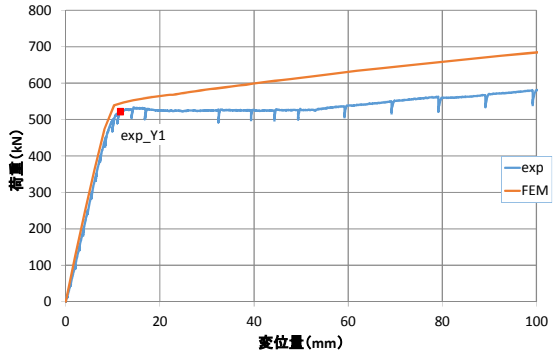
数値解析に適用した境界条件は，鋼板及び普通丸鋼とコンクリートの接触面では圧縮力のみを伝達する圧縮接触とし，異径鉄筋とコンクリートの接触面では全ての力を伝達する完全付着とした。

4.2 荷重と変位量の関係による比較

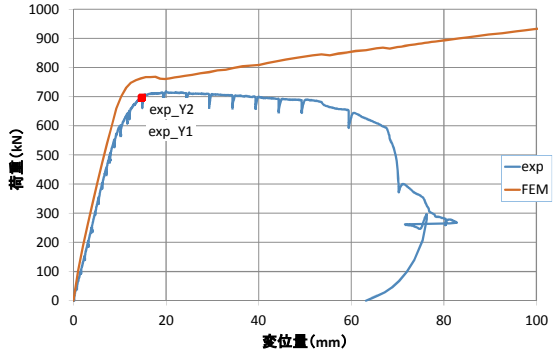
数値解析から得られた荷重とスパン中央の変位量の関係を**図－8～図－10** に示す。ここで，図中の■で示す「exp_Y1」及び「exp_Y2」は，載荷試験において下側鋼板及び補強鋼材のひずみが降伏ひずみに達した時点を表わしている。試験ケース No.1 では，鋼板が降伏する程度までは精度良く再現できているが，降伏以降の挙動が再現できていない。また，補強鋼材とコンクリートを完全付着状態とした試験ケース No.2 では，初期の剛性が載荷試験の結果よりも少し大きく，両者に乖離が見られた。これに対し補強鋼材とコンクリートを接触状態とした試験ケース No.3 は，補強鋼材の降伏程度までを非常に精度良く再現できている。このことから，異形鉄筋を用いた試験ケース No.2 でも，コンクリートと補強鋼材の境界面ですべりが発生している可能性が考えられる。

4.3 ひずみ分布による比較

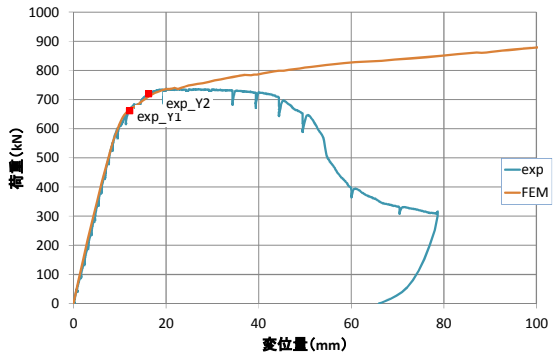
載荷試験で下側鋼板及び補強鋼材のひずみが降伏ひずみに達した時点の変位量に対し，数値解析のひずみ分布により比較をおこなった。数値解析の主ひずみの分布を**図－11～図－13** に示す。図中の紫色～濃い灰色が圧縮ひずみを表し，橙色～薄い灰色が引張ひずみを表している。ここで，薄い灰色の領域はひずみが 0.005 以上の領域であり，コンクリートにひび割れが発生すると考えられる



図－8　荷重と変位量の関係（No.1）



図－9　荷重と変位量の関係（No.2）



図－10　荷重と変位量の関係（No.3）

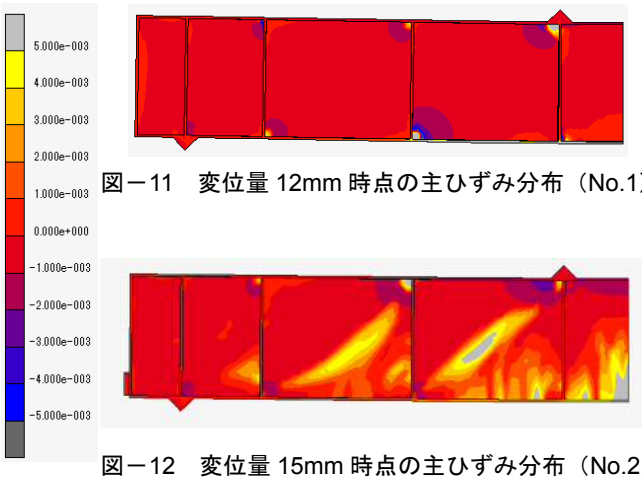
ひずみである。なお，試験ケース No.3 の図は，斜めに 1 本の引張ひずみが発生した時点を示しており，載荷試験

時の降伏時変位量よりも数ミリ大きい変位量となった時点である。以上より，数値解析におけるコンクリートの引張ひずみの分布が載荷試験時のコンクリートのひび割れ発生状況に近似していることから，数値解析における応力状態は下側鋼板及び補強鋼材が降伏する程度までは載荷試験を概ね再現できていると考えられる。

4.4 載荷試験との比較による考察

数値解析の結果から，鋼板とコンクリートの境界面は付着や摩擦の影響が非常に小さく，圧縮力のみを伝達する接触状態に近い状態になっていると考えられる。また，補強鋼材に異形鉄筋を用いた場合は，載荷試験及び数値解析ともにコンクリートのひび割れが分散して発生するが，載荷試験では付着の影響が小さくなり普通丸鋼を用いた試験ケースと曲げ剛性に差は見られなくなる。補強鋼材に普通丸鋼を用いるとブロック内に 1 本のひび割れが発生し分散せずに変形が進む。

数値解析では，部材が降伏する程度までは比較的精度良く再現可能であるが，その後は明確な最大荷重と荷重低下が再現できていない。本研究で対象とした部材は，鋼板に囲まれた隅部のコンクリートに局所的な圧縮応力が発生していることが数値解析で確認できたが，このような応力状態のコンクリートの応力とひずみの関係が未解明であり更なる検討が必要であると考える。



図－11　変位量 12mm 時点の主ひずみ分布（No.1）

図－12　変位量 15mm 時点の主ひずみ分布（No.2）

図－13　変位量 22mm 時点の主ひずみ分布（No.3）

5. まとめ

載荷試験と数値解析から，以下に示す知見が得られた。

(1) 鋼板とコンクリートの境界面では，付着や摩擦の影響が小さく，概ね圧縮力のみを伝達する接触状態であることが分かった。

(2) 補強鋼材を配置すると，曲げ耐力と降伏程度までの曲げ剛性が向上する。ただし，耐力は平面保持を仮定して算出した値よりも小さめになる傾向があり，正確に耐力を把握するためには圧縮側の鋼板のはらみ出しによる影響を考慮する必要があると思われる。

(3) 補強鋼材に異形鉄筋を用いても，降伏程度までの曲げ剛性は補強鋼材に普通丸鋼を用いた曲げ剛性とほとんど同じであり，本研究の範囲では付着による影響はほとんど見られなかった。

(4) 補強鋼材に異形鉄筋を用いると，コンクリートにはある程度分散したひび割れが発生するが，補強鋼材に普通丸鋼を用いると，鋼板に囲まれたブロックには 1 本のひび割れが発生する。異形鉄筋による付着の影響が見られるが，曲げ剛性にはあまり寄与していないことから，ひび割れの分散と付着状態については今後解明していく必要があると思われる。

(5) 数値解析では，降伏以降の挙動が再現できていなかった。鉄筋コンクリート部材と異なり，鋼板に囲まれたコンクリートの応力とひずみの関係やコンクリートの局所的な破壊の挙動は複雑になっていることが考えられる。本研究で対象としているような部材の挙動を精度良く再現するために，コンクリートの圧縮及び破壊挙動を明確にする必要があると考える。

参考文献

1) 森山智明，桑原　清，茂木　聡，三島大輔：鋼製エレメントを用いた新しい線路下横断工法の開発，第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.263-268，1999.11

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) 土木学会：複合構造標準示方書［設計編］，2014

4) 安保知紀，松岡　茂，長尾達児，栗栖基彰：JES 構造の曲げ特性に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，Vol.36，No.2，pp.1099-1104，2014

5) 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集，Vol.16，No.2，1994

6) 安保知紀，石橋忠良，松岡　茂，長尾達児，栗栖基彰：噛み合わせ継手で鋼製エレメントを接合した鋼コンクリートサンドイッチ部材の曲げ変形，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.71，No.3，pp.248-256，2015