

## 論 文

## [2202] 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

原田直樹<sup>\*1</sup>・島 弘<sup>\*2</sup>

## 1. まえがき

鋼コンクリートサンドイッチ構造において、鋼板とコンクリート間でせん断力を伝達するためには、土木学会の「鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)」[1]に、鋼板の軸方向力が完全合成時の分布に近くなるようにシアコネクタを配置するのが望ましいとされている。そのために、どのような構造物に対しても完全合成が要求されることから設計は安全側になる。塩屋ら[2]によるシアコネクタを配置しない方がせん断特性がよいという報告などから、シアコネクタを配置せずに合成度を小さくして構造物を建造することは可能であると考えられる。ゆえに、鋼コンクリートサンドイッチ構造において合成度が小さい時の部材耐力などについて知ることは非常に重要である。しかし、既往の研究において鋼板とコンクリート間の合成度に注目して、合成度が小さい時の耐荷メカニズムなどについて研究を行った例は見られない。

そこで本研究では、鋼板とコンクリート間の合成度が小さい3体の供試体を作製し、せん断補強鋼材の有無および部材高さとスパンの比を実験条件として、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を実験的に検討することを目的とする。

## 2. 実験概要

## 2.1 対象部材および載荷方法

実際の鋼コンクリートサンドイッチ構造に作用するほとんどの荷重は集中荷重ではなく等分布荷重であるにもかかわらず、等分布荷重を作成させた載荷実験[3]はあまり行われていない。そこで本研究では、図-1に示すように、鋼コンクリートサンドイッチ構造の連続はり部材が等分布荷重を受けることを想定し、本実験ではその1/2スパンを実験の対象とし、以下、実験対象区間と呼ぶこととする。供試体の概形および載荷方法、曲げモーメント、せん断力(鉛直方向)を図-2に示す。実験対象区間に正負の曲げモーメントを作用するために一端張出しはりを用いた。さらに等分布荷重の曲げモーメントである2次曲線に近くなるように、実験対象区間では2000kN万能試験機からトーナメント式に荷重を4点に分散させ、張出し部はジャッキにより載荷を行った。ここで、各断面において図-2のような割合で曲げモーメントを供試体に作用させるために、張出し荷重Pに対して万能試験機の荷重が1.745Pになるように設定した。荷重ステップは、張出し部の荷重で5.0kN(SC-0', SC-00)および2.5kN(SC-0")である。実験対象区間では、載荷治具の拘束を排除し、供試体になるべく垂直力のみが作用するよ

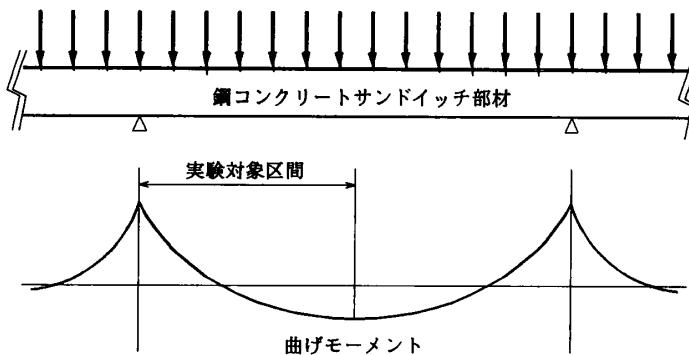


図-1 対象部材

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻(正会員)

\*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博(正会員)

うに、テフロンシートにグリースを塗ったものをロードセル下部に設置した。

## 2.2 実験条件および供試体

実験条件は表-1に示すように、せん断補強鋼材の有無、部材高さとスパンの比である。供試体の形状・寸法を図-3に示す。対象構造の部材高さとスパンの比が $1/8$ (SC-0', SC-00)および $1/16$ (SC-0")となるよう、部材高さを30cmおよび15cm、実験対象区間を120cmとした。供試体の全長は230cm、部材幅は15cmである。

使用鋼材の性質を表-2に示す。鋼材は、圧縮および引張側の軸方向鋼板、せん断補強鋼材、ダイヤフラムとともにJIS G-3101、材質SS400で板厚5.5mmのものを使用した。

コンクリートには、粗骨材最大寸法10mm、スランプ25cmの不分離性高流动コンクリートを使用し、圧縮強度はSC-0'(36.6MPa), SC-0"(44.3MPa), SC-00(37.4MPa)である。

### 軸方向鋼板の部材断面

に対する面積比は圧縮、引張側それぞれ $p = A_s/b \cdot h = 1.83\%$ (SC-0', SC-00),  $3.67\%$ (SC-0")である。

最大せん断力に対する部材の終局せん断耐力の比を供試体SC-0'は1.19(せん断耐力[1]203kN/作用せん断力170kN), 供試体SC-0"は1.18(101kN/85.

8kN)にするために、せん断補強鋼材として供試体SC-0'およびSC-0"には、幅10mm、板厚5.5mmのタイププレートを断面外側両端に溶接により定着させた。供試体SC-00は、供試体SC-0'からタイププレートを取り除いたものである。せん断補強鋼材としてフルウェブではなく幅の小さいタイププレートを使用した理由は、ウェブ鋼板が上下鋼板間でせん断力を伝達するのを取り除くためである。また、タイププレートと

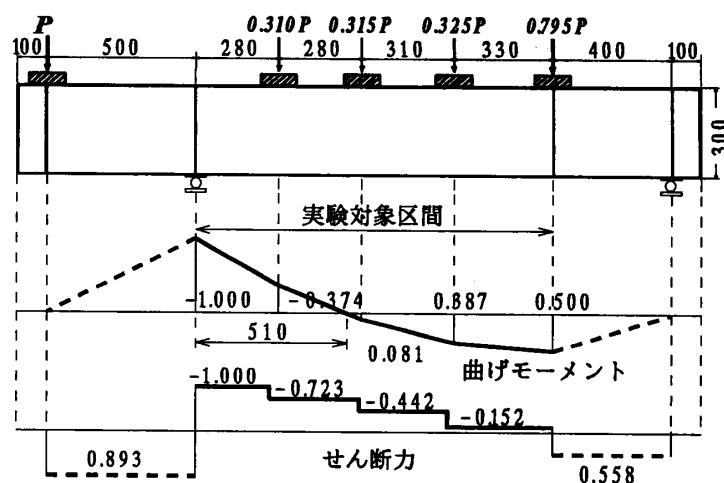


図-2 載荷方法および曲げモーメント、せん断力

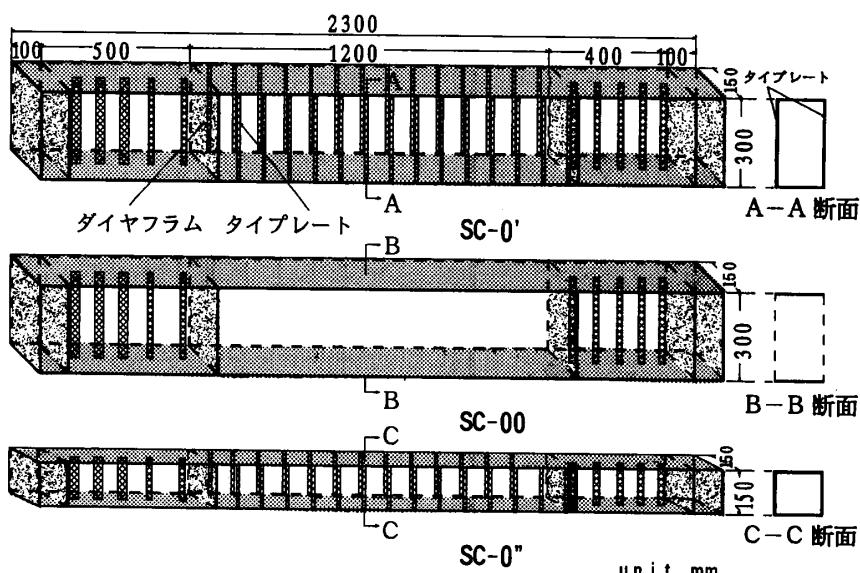


図-3 供試体の形状・寸法

表-1 実験条件

| 供試体名  | せん断補強鋼材 | 部材高さとスパンの比 |
|-------|---------|------------|
| SC-0' | あり      | 1/8        |
| SC-0" | あり      | 1/16       |
| SC-00 | なし      | 1/8        |

表-2 使用鋼材の性質

| 鋼材の種類         | 材質    | 降伏強度<br>fy(MPa) | ヤング係数<br>Es(GPa) | 引張強度<br>fu(MPa) |
|---------------|-------|-----------------|------------------|-----------------|
| 鋼材<br>t=5.5mm | SS400 | 315             | 211              | 400             |

コンクリート間のせん断伝達を完全になくすために、タイププレートを断面外側に配置した。

ダイヤフラムは、上下鋼板を結合するための鋼板であり、幅は部材幅と同じで供試体端部と、曲げモーメントが最大と最小の断面である実験対象区間の両端に配置し、溶接により定着させた。

### 2.3 測定項目

測定項目はそれぞれの荷重点における荷重と変位、鋼材のひずみおよびコンクリートのひずみである。図-4に供試体SC-0'の変位計およびひずみゲージの測定位置を示す。鋼材のひずみは、軸方向鋼板である上側鋼板で7点、下側鋼板で5点およびタイププレートは6点測定した。また、コンクリートのひずみは、60mmおよび20mmの3軸ゲージで9点測定した。

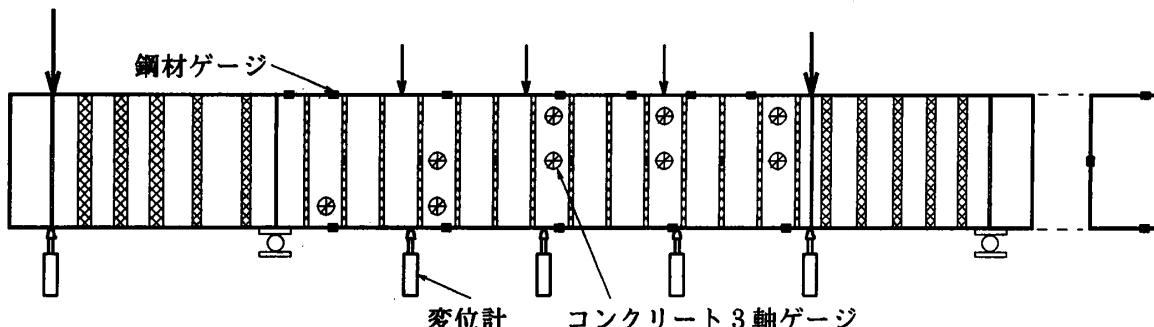


図-4 供試体SC-0'の測定項目

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験結果

降伏荷重時および終局荷重時における各供試体の曲げ耐力の実験値と平面保持の仮定より求めた計算値[1]を表-3に示す。合成度が小さい供試体SC-0'およびSC-0"は、曲げ耐力は低下しない結果になった。また、合成度が極めて小さい供試体SC-00は、降伏荷重後に張出し部の溶接箇所が破壊したため終局には至らなかった。

### 3.2 部材のたわみ

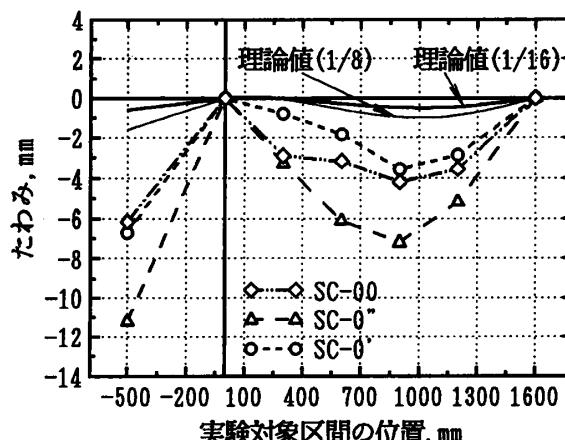


図-5 降伏荷重時におけるたわみ分布

表-3 実験結果

| 供試体名  | My<br>(kN·m) | Mu<br>(kN·m) | Mycal<br>(kN·m) | Mucal<br>(kN·m) | $\frac{My}{Mycal}$ | $\frac{Mu}{Mucal}$ |
|-------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| SC-0' | 6.95         | 7.45         | 7.10            | 7.81            | 0.98               | 0.95               |
| SC-0" | 3.25         | 3.58         | 3.45            | 3.83            | 0.94               | 0.93               |
| SC-00 | 5.45         | -            | 7.10            | 7.81            | 0.77               | -                  |

My : 降伏時曲げ耐力(実験) Mu : 終局時曲げ耐力(実験)  
Mycal : 降伏時曲げ耐力(計算) Mucal : 終局時曲げ耐力(計算)

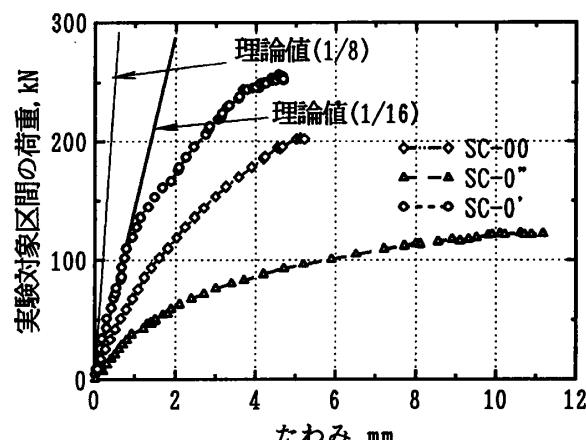


図-6 荷重-たわみ曲線

降伏荷重時における各供試体の軸方向のたわみ分布を図-5に、実験対象区間における荷重とたわみが最大になる点との関係を図-6に示す。図中の実線は、ひびわれ換算断面を用いた理論値[1]である。これより、合成度が小さい程、理論値よりたわみがかなり大きくなっている。合成度が極めて小さい供試体SC-0'では、実験対象区間の最大たわみが理論値の約7.0倍になっている。つまり、鋼コンクリートサンドイッチ構造において合成度が小さい時は、たわみは理論値よりもかなり大きくなるといえる。

### 3.3 鋼板の応力分布

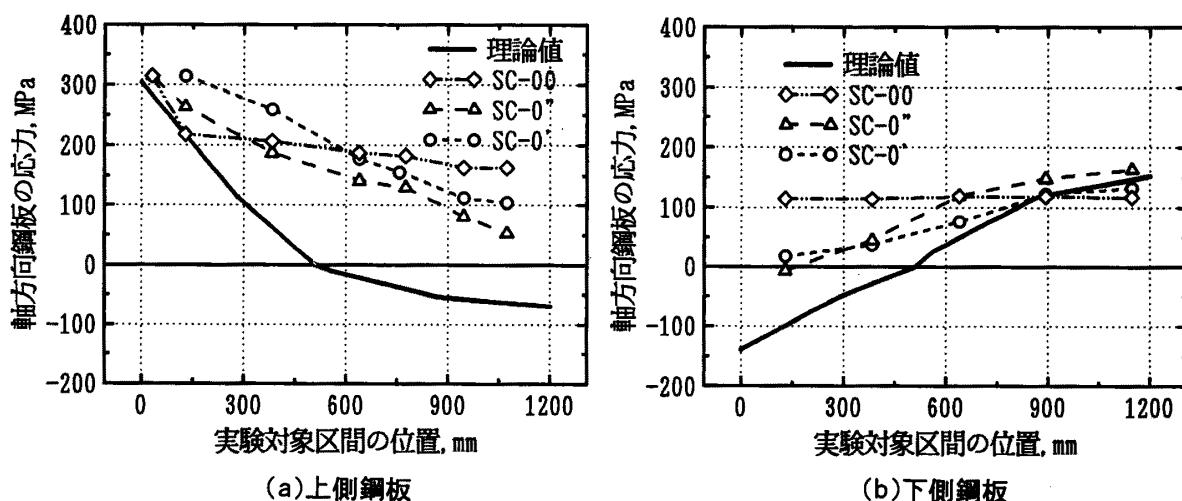


図-7 引張側および圧縮側鋼板の応力分布

降伏荷重時における各供試体の引張側および圧縮側鋼板の応力分布を図-7に示す。図中の実線は、完全合成(平面保持)を仮定した理論値である。実験値は、各供試体の上下鋼板とともに引張領域になっており、合成度が小さいために平面保持の仮定が成り立っていないことがわかる。鋼板の応力分布から、鋼板とコンクリート間のせん断伝達力を定量的に考察してみる。各供試体とともにせん断伝達方法は鋼板とコンクリート間の摩擦力のみである。上側鋼板においては、荷重作用による垂直力と部材にせん断力が作用することによってタイプレートに生じる引張力の反力によって摩擦力が生じる。降伏荷重時における実験対象区間の荷重とタイプレートに生じる力の和を各供試体について計算すると、SC-0'(358kN)、SC-0''(410kN)およびSC-00(186kN)になる。せん断伝達力は鋼板の応力分布からそれぞれ173kN、216kN、47kNであるから、摩擦係数は0.48、0.53、0.25になり、これは鋼とコンクリートの摩擦係数(0.65~0.75)[4]から判断すると、シアコネクタがない場合でも、タイプレートがあると摩擦力によってせん断力が伝達されるが、タイプレートがないとほとんどせん断力は伝達されないと見える。

次に、降伏荷重時におけるタイプレートの応力分布について図-8に示す。図中の実線は、トラスモデルによる理論値[1]である。これより、供試体SC-0''は供試体SC-0'に比較

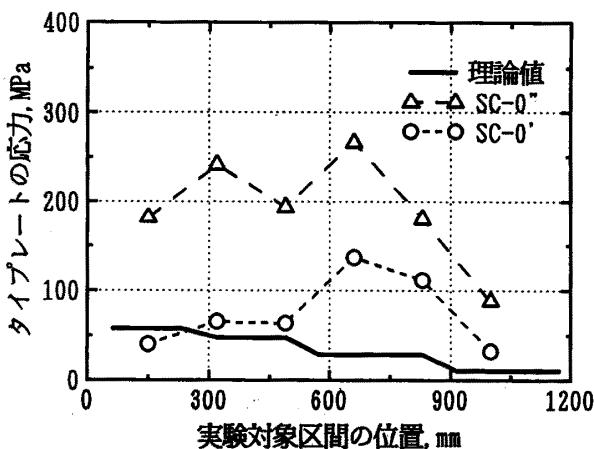


図-8 タイプレートの応力分布

してコンクリート断面が $1/2$ であるために、タイプレートの応力は約2.5倍になっている。さらに、実験値はせん断力(鉛直方向)がそれほど大きくない断面において大きくなっている。これは、鋼板とコンクリート間にずれが生じたことにより、コンクリートの応力と曲げモーメントが釣り合わなくなりひびわれが発生し、ひびわれ位置近くでタイプレートの応力は、トラスモデルによる理論値よりもかなり大きくなつたと考えられる。

### 3.4 コンクリートの主ひずみおよび軸方向圧縮合力位置

ロゼットゲージより測定した降伏荷重におけるコンクリートの主ひずみとその角度について図-9に示す。これより、各載荷点および中間支点近傍の主ひずみが大きくなつており、タイプレートがない供試体SC-00は供試体SC-0'より

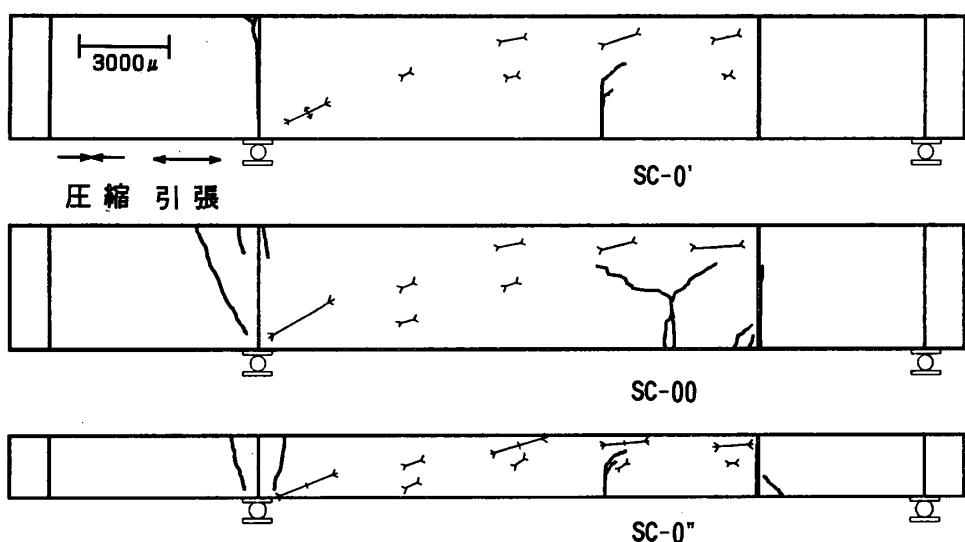


図-9 コンクリートの主ひずみ分布

り、主ひずみの分布が大きいことがわかる。さらに、主ひずみの角度をみると、全供試体とともに各載荷点と中間支点を結ぶ方向に主ひずみが分布しており、小沢ら[5]および横田ら[6]が報告しているように、合成度が小さい時においても、アーチ状圧縮ストラットが形成されている。つまり、上下鋼板の引張材とコンクリートのアーチ状圧縮ストラットによって曲げおよびせん断力に抵抗するメカニズムになっていると考えられる。

次に、最大曲げモーメント断面における鋼板応力-軸方向圧縮合力位置曲線を図-10に、鋼板応力-主ひずみ曲線を図-11に示す。ここで軸方向圧縮合力位置は、軸方向圧縮合力および上下

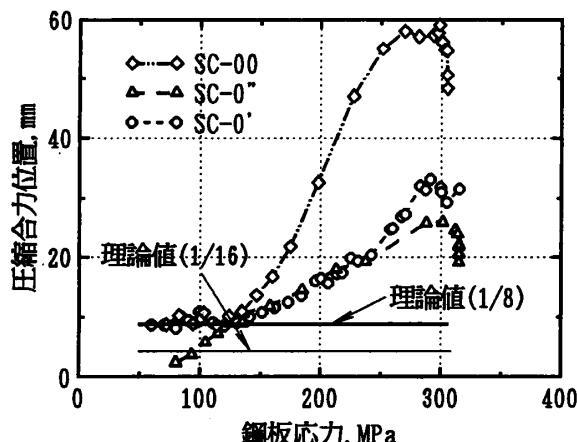


図-10 鋼板応力-軸方向圧縮合力位置曲線

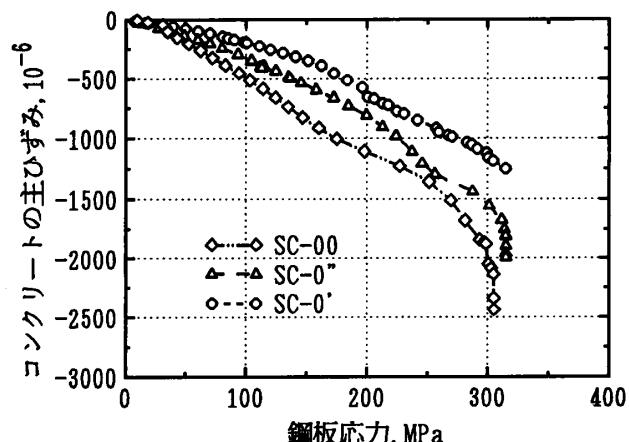


図-11 鋼板応力-主ひずみ曲線

鋼板力によって断面に生じる曲げモーメントと実測の作用曲げモーメントが釣り合っていると仮定して計算によって求めたものである。これより、合成度が小さい程、軸方向圧縮合力位置曲線の勾配は大きくなっている、圧縮合力位置は断面中心方向に移動している。また、合成度が小さい程、コンクリートの主ひずみが大きくなり、形成される圧縮ストラットの応力が大きいことがわかる。以上から、合成度が極めて小さい時には、最大曲げモーメント断面においてコンクリートの圧縮合力位置が断面中心方向に移動し、曲げ耐力低下の原因となると考えられる。

### 3.5 耐荷メカニズム

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について考察する。合成度が小さい時には、軸方向鋼板は上下鋼板ともに引張領域になり、それと釣り合うコンクリートは載荷点と支点とを結ぶアーチ状圧縮ストラットを形成する。また、合成度が極めて小さい時には、鋼板とコンクリート間で伝達されるせん断力が小さいことから、圧縮ストラットの応力はかなり大きくなり、コンクリートの圧縮合力位置は断面中心方向に移動し、曲げ降伏耐力の低下の原因になる。

## 4. 結論

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連続はり部材に正負の曲げモーメントを作用させる曲げ耐力実験を行った試験結果から得られた結論は以下に示す通りである。

- (1)たわみは完全合成を仮定した理論値よりもかなり大きくなる。
- (2)タイプレートの応力は、コンクリートのひびわれ位置近くでトラスモデルによる理論値よりもかなり大きくなる。
- (3)シアコネクタがない場合でも、タイプレートがあると鋼板とコンクリート間の摩擦力によっていくらかのせん断力が伝達される。
- (4)上下鋼板の引張材とコンクリートのアーチ状圧縮ストラットによって、曲げおよびせん断力に抵抗する。
- (5)合成度が小さい程、圧縮ストラットの応力が大きくなる。
- (6)合成度が極めて小さい時には、最大曲げモーメント断面においてコンクリートの圧縮合力位置が断面中心方向に移動し、曲げ降伏耐力の低下の原因になる。

【謝辞】本研究を実施する際に、河野清教授(徳島大学工学部)にご支援頂いたことと、実験準備の際には、石丸啓輔技官(徳島大学工学部)にご協力頂いたことに深く感謝の意を表します。

【参考文献】[ 1 ]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・ライブラー第73号，1992. 7 [ 2 ]塩屋俊幸・大内田博喜・大野文良・長谷川俊昭：鋼/コンクリート・コンポジット構造のせん断特性に関する2, 3の考察, 第2回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. 157-162, 1989. 9 [ 3 ]長谷川俊昭・塩屋俊幸：OS-SHELプロジェクト小型試験供試体 Phase II -せん断実験- 実験報告書, 清水建設技術研究所, 1987. 9 [ 4 ]日本コンクリート工学協会：混合構造研究委員会報告書, 1991. 12 [ 5 ]小沢一雅・田中征登・上田多門：鋼コンクリート合成構造のせん断耐荷機構, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 8, pp. 777~780, 1986 [ 6 ]横田弘・清宮理：鋼・コンクリートハイブリッドはりの力学特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 149-158, 1992. 8