

(16) 鋼・コンクリート連結はりの三点曲げ強度実験

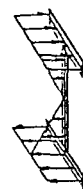
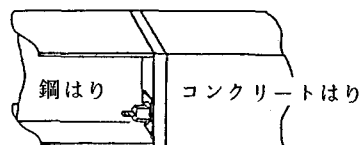
BENDING STRENGTH OF STEEL-CONCRETE JOINTED BEAMS UNDER 3-POINTS LOADING

崎元達郎\* 須崎浩二\*\* 白石隆宏\*\*\* 梶川靖治\*\*\*\*  
Tatsuro SAKIMOTO, Koji SUZAKI, Takahiro SHIRAIISHI, Yasuharu KAJIKAWA

3-points loading tests of steel-concrete jointed beams are carried out to examine the ultimate bending strength under the shear force. A steel plate welded to the end of steel H-beam is jointed to a reinforced concrete beam of rectangular cross-section by prestressing steel bars. Attentions are focused on evaluating the effects of shear span ratios and of connecting steel bars which are welded to the end plate surface of concrete side and join steel and concrete beams. It is shown that the ultimate bending strength of the joint can be estimated by using usual stress block model.

1. まえがき

はり形式の混合構造物のひとつとして、鋼H形はりとは長方形断面のコンクリートはりを長手方向に連結したはりがあるが、その連結部の強度についてはいくつかの研究が報告されている<sup>1)2)3)</sup>。連結部は一般に、鋼側の曲げや軸方向力による直応力度と、せん断力やねじり力によるせん断応力度をコンクリート側に確実に伝達しなければならない。連結部の強度は、一般に弱い側であるコンクリート母材の強度に等しいか上回ればよいと考え、できるだけ単純な細部構造とし、その挙動を明確な力学モデルで説明できることが望ましい。



(a) 鋼はり (b) コンクリートはり

このような考えから著者らは、できるだけ単純な方式として、H形鋼に端板を溶接し、コンクリートとP.C鋼棒で緊結し、一体化すると同時にコンクリートの引張側にプレストレスを導入する構造を検討することにした(図-1)。

このような構造に限定して直応力度について考えると、図-1(a)の様に分布する鋼はりの直応力度を図-1(b)の様に分布するコンクリートはりの直応力度に円滑に変化させる機能が重要となる。いま、鋼はりのフランジの応力度の最大値を $2500\text{kgf/cm}^2$ 程度と考えると、これを $500\text{kgf/cm}^2$ 程度の強度のコンクリー

\* 工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科 \*\* 工修 鹿島建設(株)当時熊本大学修士学生  
\*\*\* 大成建設(株)当時熊本大学学生 \*\*\*\* 工博 川田建設(株)工事本部開発室長

トで受けとめるためには、フランジ面積の5倍程度のコンクリートの断面積に応力を分散する必要がある。この応力の分散のためには、鋼はりの上下フランジをコンクリート側に延長して伝達域を長手方向に拡大する方法も考えられるが、ここでは、端板厚を大きくすることにより対処した。さらに、せん断に対する抵抗を増すために端板のコンクリート側の面に長方形に折り曲げたアンカー筋を部材軸に45度方向に溶接した(図-2)。これを連結筋と称することにする。供試体はせん断スパン比(せん断スパンとはり高の比)を2と3に変化させたものに、連結筋が有るものと無いものを組み合わせた4体を考え、さらに比較のために全部がコンクリートのはり(せん断スパン比2と3)2体を加えて計6体について3点曲げ試験を行った。

実験の目的は、連結筋とせん断スパン比の影響を考慮して曲げ耐力をどの様に算定すれば良いかを明らかにすることにある。

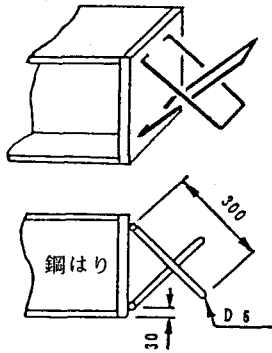


図-2 連結筋

## 2. 実験方法と供試体

実験は図-3のように連結部が支間中央となり、曲げとせん断を同時に受ける一点集中(3点曲げ)载荷で行った。コンクリートの支圧による圧壊を避けるために、連結部境界面から20mm鋼桁側の端板上を载荷点とした。

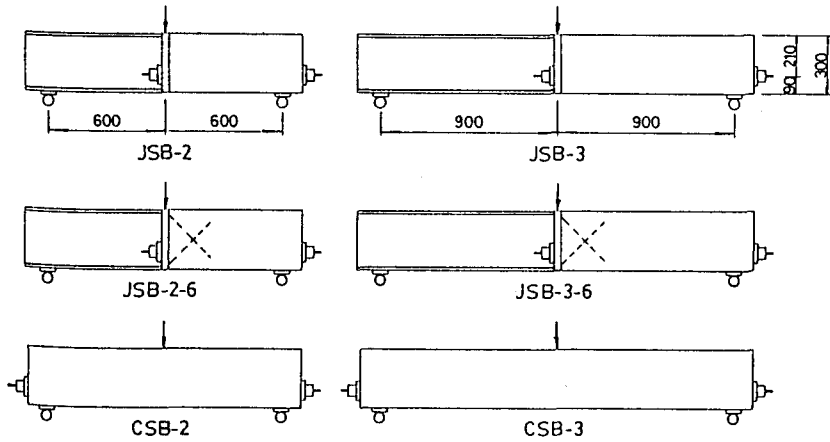


図-3 供試体名とその概略図

供試体は、H形鋼(H294x200x8x12, SS41)に端板(PL300x250x36)を溶接した鋼はりとコンクリートはり(300x250)をP C鋼棒(SBPR 95/110,  $\phi 21$ )で緊結し、一体化すると同時にコンクリートの引張側にプレストレスを導入したものである。供試体の種類は、せん断スパン比を2と3に変化させた2シリーズ(JSB-2型とJSB-3型)とし、図-2のように、D 6 mmの連結筋を設けたもの(JSB-2-6とJSB-3-6)についても行い、その効果を調べた。端板はコンクリートに弾性支持される三辺単純支持の板と考えられるが、簡単のために図-4に示す様に上下フランジで固定支持されるはりにモデル化しその厚さを定めた。すなわち、プレストレス力による曲げ応力度が降伏応力度になる厚さとして定め  $t = 36 \text{ mm}$

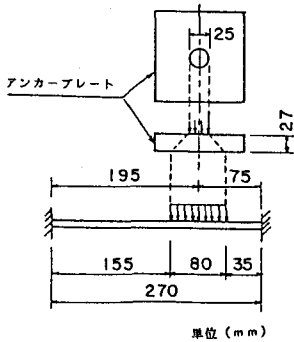


図-4 端板厚を定めるための固定はりモデル

を得た。この厚さの端板を用いれば先に行った純曲げ（４点曲げ）試験によって十分な曲げ耐力を発揮できることが明らかになっている<sup>3)</sup>。以上の他に D 6 の組立筋と 15 c m ピッチのスターラップ（D 6）を配した。

また、比較のために鋼はりを連結しないコンクリートのみのはり（CSB-2：せん断スパン比 2、CSB-3：せん断スパン比 3）2 体を製作し同様の実験を行った。供試体の寸法と鉄筋配置を図-5 に示す。コンクリートの設計基準強度は 500kgf/cm<sup>2</sup> であり、強度を保持するために水セメント比を小さくし、ワーカビリティを増すために流動化剤（花王マイテイ 150）を用いた。配合設計を表-1 に、コンクリートと鋼材の材料試験結果をそれぞれ表-2、表-3 に示す。

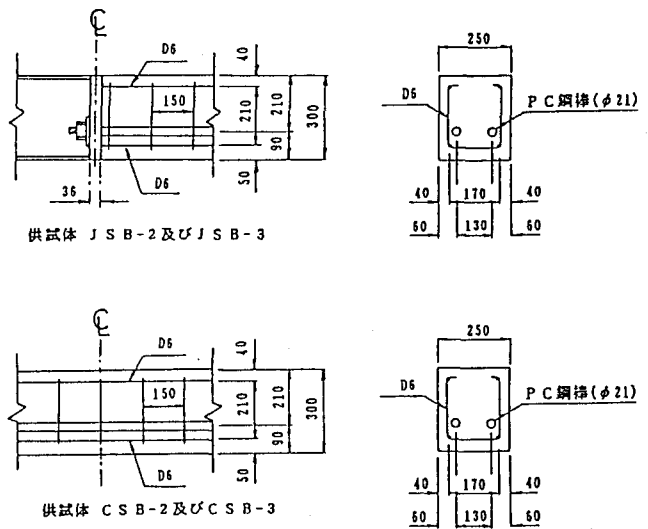


図-5 供試体寸法と配筋

表-1 コンクリートの配合

| 粗骨材<br>最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | W/C<br>(%) | S/a<br>(%) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |       |
|---------------------|--------------|------------|------------|------------|----------------------------|-----------|----------|----------|-------|
|                     |              |            |            |            | 水<br>W                     | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | 混和剤   |
| 20                  | 10           | 2.0        | 35.0       | 40.2       | 143                        | 409       | 727      | 1239     | 4.908 |

### 3. 理論値の計算方法

実験値との比較検討に用いる理論値は下記の方法で求めた。

#### (1) ディコンプレッション

モーメント：  $M_a$

プレストレス導入後の断面について曲げ引張応力度がプレストレス導入時の下縁圧縮応力度  $\sigma_{ct}$  に等しくなる時のモーメント

$$M_a = I_e \cdot \sigma_{ct} / y_c$$

ここに、

$I_e$ ：換算断面二次モーメント、

$y_c$ ：中立軸から下縁までの距離

#### (2) ひび割れモーメント： $M_{cr}$

プレストレス導入後の断面についての曲げ引張応力度がプレストレス導入時の下縁圧縮応力度  $\sigma_{ct}$  とコンクリートの曲げ引張強度  $f_{bd}$  の和に達する時のモーメント

$$M_{cr} = I_e (\sigma_{ct} + f_{bd}) / y_c$$

#### (3) コンクリート断面の終局モーメント： $M_{uc}$

図-6 のひずみ分布と応力ブロックにより、つり合い条件と適合条件を検討するとコンクリートが破壊ひずみ  $\epsilon_{cu}$  に達したとき引張鉄筋（引張側組立筋）は降伏しているが、P C 鋼棒はまだ降伏していないという結果を得る。したがって、この時の P C 鋼棒のひずみより計算した応力度に対してつり合い式より中立軸を

表-2 コンクリート材料とプレストレス力

| 供試体名    | 4 週強度 $\sigma_{cs}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ引張強度<br>$f_{bd}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | ヤング係数 E<br>$\times 10$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | プレストレス力<br>P, (ton) |
|---------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| JSB-2   | 579                                           | 56                                        | 3.96                                          | 51.44               |
| JSB-2-6 | 560                                           | 55                                        | 3.78                                          | 54.10               |
| CSB-2   | 535                                           | 56                                        | 4.00                                          | 53.56               |
| JSB-3   | 635                                           | 58                                        | 3.79                                          | 49.88               |
| JSB-3-6 | 585                                           | 57                                        | 3.49                                          | 50.84               |
| CSB-3   | 587                                           | 67                                        | 3.62                                          | 50.17               |

表-3 鋼材の材料試験結果 (kgf/mm<sup>2</sup>)

| 種 別     | 降伏応力度<br>$\sigma_y$ | 引 張 強 度<br>$\sigma_m$ | ヤング係数<br>E         |
|---------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| D 6 鉄筋  | 40.25               | 60.45                 | $2.08 \times 10^4$ |
| φ 21 鋼棒 | 111.15              | 120.00                | $2.13 \times 10^4$ |

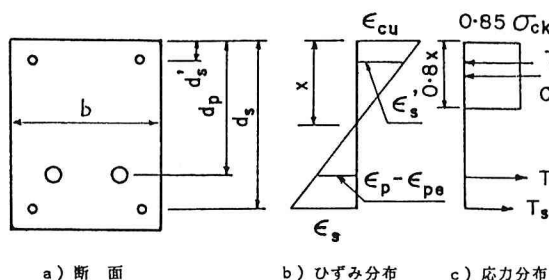


図-6 コンクリート断面の曲げ耐力を計算するための応力モデル

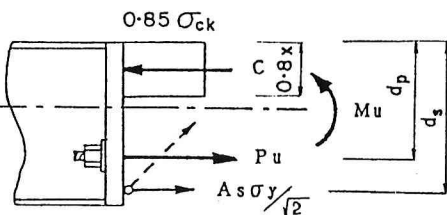


図-7 連結部の曲げ耐力を計算するための応力モデル

求め、次式により求める。

$$M_{uc} = T_p (d_p - 0.4x) + T_s (d_s - 0.4x) - T'_s (d'_s - 0.4x)$$

ただし、今回の3点曲げ試験においては、連結部が最大モーメントになるので次項で述べる連結部の曲げ耐力が問題となるので、参考として説明するにとどめ、数値は示していない。計算値は次項の連結部の曲げ耐力の計算値よりわずかに小さくなる。

#### (4) 連結部の曲げ耐力： $M_u$

図-7に示す連結部接合面に作用する力のつり合いより次式で算定する。

$$M_u = P_u (d_p - 0.4x) + A_s \sigma_{sy} (d_s - 0.4x) / \sqrt{2}$$

$$\text{ここに、} x = (P_u + A_s \sigma_{sy} / \sqrt{2}) / (0.68 \sigma_{ck} \cdot b)$$

#### (5) コンクリート断面のせん断耐力： $V_{yd}$

コンクリート示方書設計編<sup>4)</sup>に与えられている式に連結筋の強度を加えて次式で求める。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} + V_j$$

ここに、 $V_{cd}$ ：せん断補強鉄筋以外のせん断耐力

$V_{sd}$ ：せん断補強鋼材によるせん断耐力

$V_{ped}$ ：軸方向緊張材の有効引張力のせん断に平行な成分(本実験の場合0)

$V_j$ ：連結筋のせん断耐力、降伏引張力の鉛直成分

### 4. 実験結果と考察

#### (1) 実験経過

各供試体とも、支間を6等分する7測点と接合面底面に変位計を設置しP C鋼材、鉄筋と連結部のコンクリート及びH形鋼表面にひずみゲージを貼り、各荷重毎に変位とひずみの測定を行いつつ崩壊に至らした。実験中の状況を図-8に示す。コンクリートのみのはりCSB-2、CSB-3は、荷重直下とそこから10数cm離れた所に曲げひび割れが発生し、荷重直下のひび割れは直上に、離れたひび割れは徐々に載荷点方向に傾斜しつつ上方に発達した。JSB-2シリーズにおいては、曲げひび割れは観察されなかった。いずれの供試体も端板と接するコンクリートの上面が圧壊し、崩壊に至った。

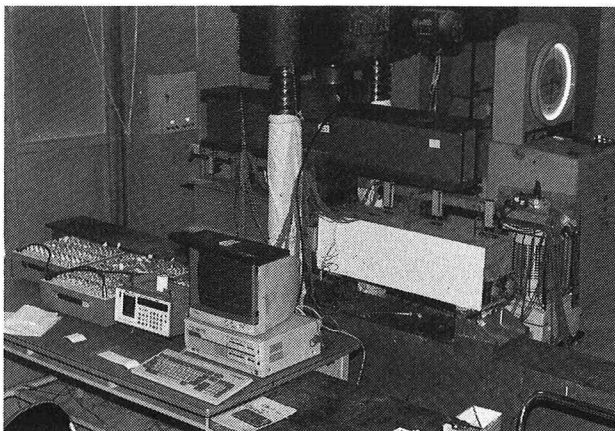


図-8 実験装置全景

崩壊後の供試体の一例を図-9に示す。

(2) 崩壊に至るまでの挙動

図-10に各供試体の荷重-たわみ図を示す。破線で示すのは、せん断によるたわみを考慮したはり理論による計算値である。連結はりのたわみは、連結部を固定端と考えたそれぞれの断面の片持ち梁の自由端のたわみを求め、その平均値とした。実験値は、コンクリートはり及び連結はり共、ディコンプレッションモーメントまではこの理論値に良く一致している。ディコンプレッションモーメント以降では、図-11に示す様に端板の接合面が開口する影響や、ひび割れ及び材料非線形性の影響により非線形性を増し、たわみは増大する。

図-12は連結筋の軸ひずみと荷重（モーメント）との関係を示している。純曲げの場合<sup>3)</sup>と違い载荷初期よりせん断力に

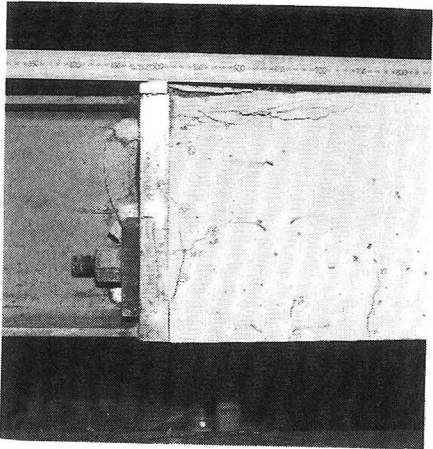


図-9 崩壊後の供試体の例 (JSB-3)

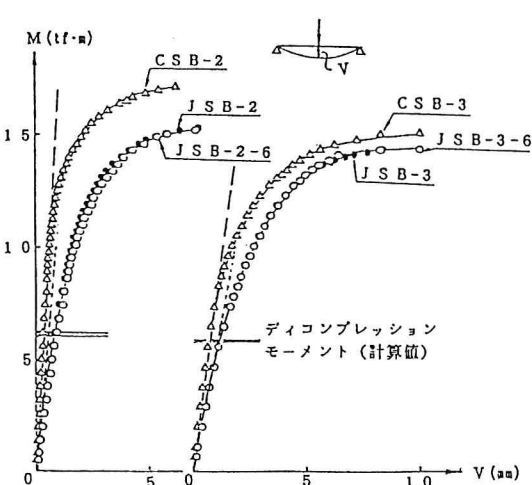


図-10 荷重 (M) -たわみ曲線

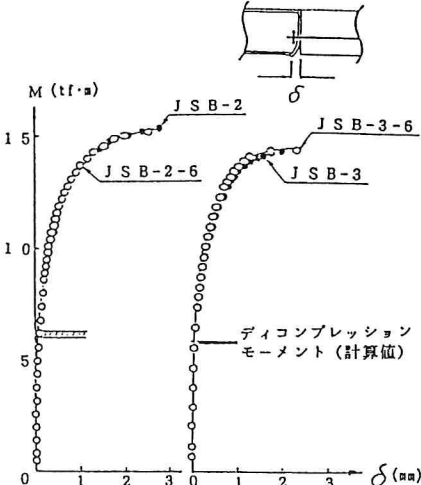


図-11 荷重 (M) -開口変位曲線

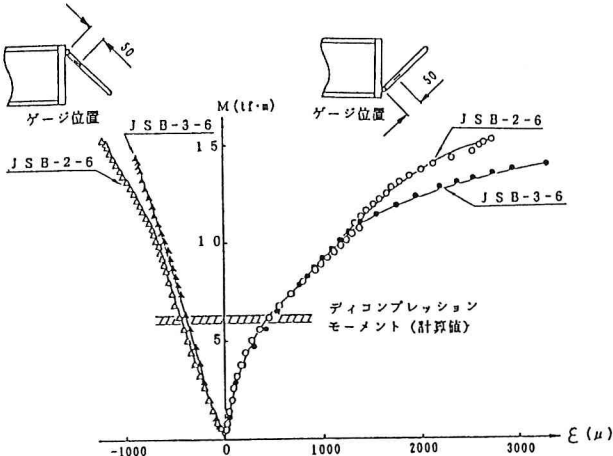


図-12 荷重 (M) -ひずみ曲線 (連結筋)

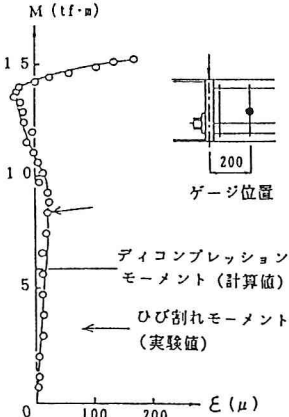


図-13 荷重 (M) -ひずみ曲線 (スターラップ)

対して連結筋が効果を發揮している様子が分かる。ただし、連結筋のひずみには、曲げによる軸ひずみも同時に測定されている。

図－１３は、スターラップの軸ひずみと荷重（モーメント）との関係を示しているが、ひび割れが発生するまではほとんどひずみは生じず、ひび割れが発達した崩壊前にひずみが急増し、スターラップのせん断抵抗が發揮されていることが分かる。

表－４ ひび割れモーメントと終局モーメント

| 供試体名      | $\sigma_{ck}$<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) | ひび割れモーメント        |                  | 終局モーメント         |                 |                 |                  | せん断耐力                      | 破壊形式                      |
|-----------|-----------------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------------|---------------------------|
|           |                                               | 計算値<br>$M_{cr1}$ | 実験値<br>$M_{cre}$ | 計算値<br>$M_{ut}$ | 実験値<br>$M_{ue}$ | $M_{ue}/M_{ut}$ | CSBに対<br>する比 $e$ | 計算値<br>$V_{yd}(\text{tf})$ |                           |
| J S B-2   | 579                                           | 8.16             | --- a)           | 14.11           | 15.30           | 1.08            | 0.83             | 15.15                      | 継手部上<br>側コンク<br>リート<br>圧壊 |
| J S B-2-6 | 560                                           | 8.43             | --- b)           | 14.38           | 15.15           | 1.05            | 0.85             | 18.76                      |                           |
| C S B-2   | 535                                           | 8.38             | 8.85             | 13.57           | 17.10           | 1.26            | 1.00             | 15.12                      |                           |
| J S B-3   | 635                                           | 8.08             | 9.65c)           | 14.33           | 14.41           | 1.01            | 0.88             | 15.36                      |                           |
| J S B-3-6 | 585                                           | 8.12             | 11.25d)          | 14.50           | 14.49           | 1.00            | 0.96             | 18.80                      |                           |
| C S B-3   | 587                                           | 8.46             | 8.26             | 13.77           | 15.21           | 1.10            | 1.00             | 15.13                      |                           |

(モーメントの単位：tf・m)

- a), b) 継手部上側コンクリート圧壊によるひび割れ
- c) 接合面からコンクリート側7cmの位置にひび割れが発生した時の値
- d) 接合面からコンクリート側25cmの位置にひび割れが発生した時の値
- e) 終局モーメント(実験値)の比を $\sigma_{ck}$ で補正した値

(3) 耐力

表－４にひび割れモーメント $M_{cr}$ と連結部の終局モーメント $M_{u0}$ の計算値と実験値を示す。ひび割れモーメントをみると、CSBについては、計算値と実験値が良く一致している。しかし、先に述べたようにJSB-2, JSB-2-6には、曲げひび割れは発生せず、ひび割れモーメントの実験値は得られなかった。JSB-3, JSB-3-6では、それぞれ接合面より7cm及び、25cm離れた位置の下縁にひび割れが生じたため、実験値は計算値より大きくなっている。これは、接合面の開口変位によって連結部付近の引張ひずみが解放されたためで、それぞれの位置がひび割れモーメントに達する時の作用モーメントを計算するとそれぞれ9.51tf・mと11.60tf・mとなり実験値と一致する。なお、ダイコンプレッションモーメントの計算値とひび割れモーメントの計算値の比は1.3以上となっている。

終局モーメントはいずれの供試体も実験値が計算値を上回りかつ良い対応を示していることから、せん断影響下の曲げ耐力についても、上述した図－７の応力ブロックによる理論値により算定できると考えてよい。また、終局モーメントの実験値は、せん断スパン比の小さいJSB-2シリーズが5%程度大きく、せん断スパン比の影響（アーチアクションなど）が現われていると考えられる。コンクリートのみのはり（CSB）に対する強度比をみると、連結筋をつけることによりいづれも強度が増しているが、まだ4～17%不足している。しかし、この不足量は、連結筋の径を大きくする事により十分補うことができる量で、例えば、D16の連結筋を用いると計算では、 $M=16.5\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度となり、母材と同じかそれ以上の強度に設計する事が可能となる。なお、ダイコンプレッションモーメントの計算値と終局モーメント(実験値)との比は2.41～2.56であった。

表－５は、連結部の曲げ耐力とせん断耐力の理論値を荷重になおして実験値と比較したものである。JSB-3－

表－５ 接合部の耐力を与える荷重の比較(P<sub>u</sub>)

| 供試体名    | 理 論 値   |       | 実 験 値 |
|---------|---------|-------|-------|
|         | 曲 げ 耐 力 | せん断耐力 |       |
| JSB-2   | 47.03   | 30.30 | 51.0  |
| JSB-2-6 | 47.93   | 37.52 | 50.5  |
| CSB-2   | 45.23   | 30.24 | 57.0  |
| JSB-3   | 31.84   | 30.72 | 32.0  |
| JSB-3-6 | 32.22   | 37.60 | 32.2  |
| CSB-3   | 30.60   | 30.26 | 33.8  |

6 の供試体を除くすべての供試体について、せん断耐力の理論値は曲げ耐力の理論値及び実験値より小さい。にもかかわらず、実験ではせん断によるひび割れや破壊は生じなかった。したがって、上述の示方書に基づいたせん断耐力の算定法は、連結 P C はりのせん断耐力には用い得ないようである。プレストレスを考慮したせん断耐力の算定については明確な方法が無いので、せん断力が支配的な実験を行って検討する必要がある、いずれ報告の予定である。

## 5. 結論

供試体数が少ないので断定的なことはいえないが、端板直接結合方式による鋼・コンクリート連結はりの 3 点曲げ試験の結果以下のようなことが分かった。

- 1) すべての供試体は、端板とコンクリートの接合面の上部のコンクリートの圧壊により強度が支配された。これは、鋼はり上フランジから伝えられる圧縮応力度が、コンクリートに対して集中応力として作用することに起因する。したがって、端板厚を十分に大きくすることが応力度の集中を緩和し、強度を増加させる上で重要である。
- 2) 所定の曲げ耐力を得るのに必要な端板厚を定める簡易な方法を示し、その有効性を示した。
- 3) せん断力作用下の曲げ耐力は、応力ブロックモデルにより精度良く評価できる。せん断スパン比が小さい場合は耐力が増加するが、これは、曲げ耐力に対しては、設計上安全側である。
- 4) 連結筋は、せん断力に対して初期状態から効果を発揮するが、今回の実験では、D 6 という細い鉄筋を用いたため、耐力に対する効果は顕著には現われなかった。曲げ耐力のある程度の調節は、連結筋の径を変化させることで可能である。
- 5) 今後、せん断力の支配的な純せん断に近い荷重状態で連結はりのせん断耐力を明らかにする必要がある。

## 謝辞

本研究は、昭和 62 年度科研費一般研究 C の補助を受けた。また、高周波熱錬株式会社（S E 部 倉重正義氏）から P C 鋼棒、付属品の提供を受けた。記して、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 田島二郎、町田篤彦：プレストレスによる鋼部材と鉄筋コンクリート部材の軸方向接合法に関する研究、構造工学論文集、V o 1. 3 2 A, 1 9 8 6. 3, pp. 71-80.
- 2) 日野伸一、浜田純夫、中野浩明、太田俊昭：鋼コンクリート混合構造における継手部の静的曲げ挙動、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1 9 8 6. 9, pp. 131-136.
- 3) 崎元達郎、須崎浩二、梶川靖治、平井一男：鋼・コンクリート結合はりの曲げ強度実験、構造工学論文集、V o 1. 3 5 A, 1 9 8 9. 3, pp. 1215-1220.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書「設計編」、昭和 61 年 10 月。