

鋼・コンクリート連結はりのせん断強度実験

ULTIMATE STRENGTH OF STEEL-CONCRETE JOINTED BEAMS UNDER SHEAR FORCES

崎元達郎*

梶川靖治**

須崎浩二***

白石隆宏****

Tatsuro SAKIMOTO, Yasuharu KAJIKAWA, Koji SUZAKI, Takahiro SHIRAIISHI

Three specimens of steel-concrete jointed beams are tested to examine the ultimate shear strength of the joint. 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. The aim of the test is to find the mechanism of the shear failure and seek for a proper method to evaluate the ultimate shear strength of the joint. A quite accurate formula is proposed. The formula is based on the criteria that the shear failure of the concrete occurs when the tensile principal stress reaches to the tensile strength of the concrete.

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考えられるが、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¹⁾²⁾。著者らは、できるだけ単純な細部構造を持つ連結方式として、H型鋼に溶接した端板とコンクリートはりとを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してきた³⁾⁴⁾(図-1)。このような構造の曲げ耐力については、図-1(a)の様に分布する鋼はりの直応力度を図-1(b)のよう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必要があり、そのためには端板厚を大きくして鋼フランジからの集中的な応力度をできるだけ広いコンクリート断面に分散させることが重要である。

著者らは、5体の供試体に対する4点(純)曲げ試験と6体の供試体に対する3点曲げ試験の結果、曲げ耐力が通常の応力ブロックモデルを基礎に求められることを示すと同時に、簡易な端板厚の決定方法を提案した。

ここでは、これらの実験シリーズに引き続く最後のシリーズとして、純せん断に近い载荷条件のもとで実験を行い、連結部の終局せん断挙動と耐力について検討したので報告する。実験の目的は、連結部の破壊状況を観察してせん断抵抗の機構を明らかにし、せん断耐力をどのように算定すれば良いかを知ることにある。

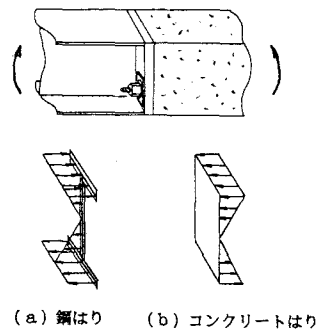


図-1 曲げ応力度分布の相違

* 工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科

** 工博 川田建設(株)工事本部開発

*** 工修 鹿島建設(株)当時熊本大学大学院学生

**** 大成建設(株)当時熊本大学工学部学生

2. 実験方法と供試体

実験は図-2 に示すように、接合面に純せん断が作用するような載荷方法で行った。接合面から載荷点までの30cmの区間が主たる試験対象となる。

供試体は、H形鋼 (H-294x200x8x12, SS41) に端板 (PL-300x250x36) を溶接した鋼はり とコンクリートはり (H-300x250) をPC鋼棒 (SBPR95/110, φ21) に緊結し、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。端板厚は上下フランジで固定支持される板としてモデル化した時、プレストレス力による曲げ応力度が降伏応力度になる時の厚さとして定め $t = 36\text{ mm}$ とした⁴⁾。また、鋼桁の支点部は、ウェブの座屈を防ぐため、補剛材で補強した。

供試体の種類は、図-3 に示すような連結筋 (D6) を設けて、かつフルプレストレスしたもの (JS-6) と、プレストレス力をフルプレストレスの30%にして連結筋を設けた場合 (JSR-6)

と、設けない場合 (JSR) の3体とした。

JSR-6とJSRについては、プレストレスの低下により曲げ耐力が小さくなるので、D19の主鉄筋を3本配して曲

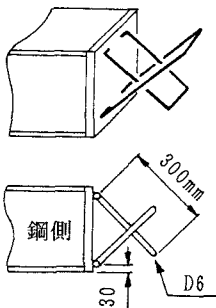


図-3 連結筋

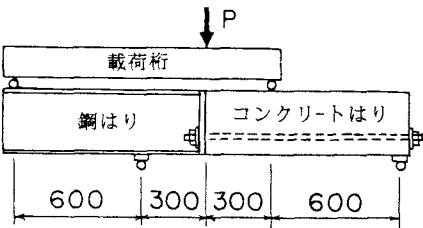
断破壊が先行するようにした。以上の他にD6の組立筋と15cmピッチのスターラップ (D6) を配した。各供試体の配筋と寸法を図-4に示す。

コンクリートの基準強度は500 kgf/cm²であり、強度を得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 (花王マイティ150) を用いた。

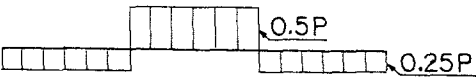
配合設計を表-1に、コンクリートと鋼材の材料試験結果をそれぞれ表-2、表-3に示す。表-2の引張強度は、割裂試験を行わなかったため、理論値

$f_t = 0.58 (f_{28})^{2/3}$

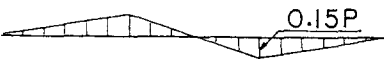
を示している。後のせん断耐力の計算にはこの値を用いた。



(a) 載荷方法 (単位mm)

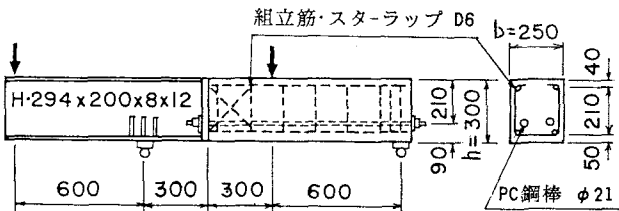


(b) せん断力図

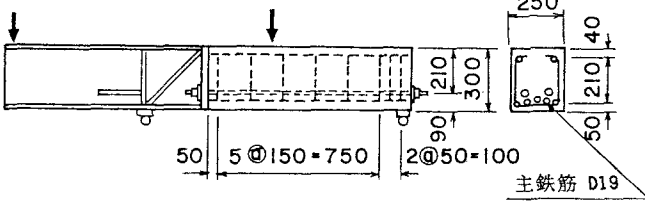


(c) 曲げモーメント図

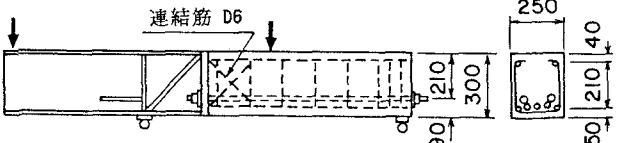
図-2 実験の載荷方法とQ-図、M-図



JS-6 (連結筋有、フルプレストレス、主鉄筋無)



JSR (連結筋無、30%プレストレス、主鉄筋有)



JSR-6 (連結筋有、30%プレストレス、主鉄筋有)

図-4 供試体の寸法と配筋図 (単位mm)

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (g)
20	10	2.0	35.0	40.2	143	409	727	1239	4.908

3. 耐力実験

表-2 コンクリートの材料定数とプレストレス力

供試体名	4週強度 f_{28} (kgf/cm^2)	曲げ強度 f_b (kgf/cm^2)	引張強度 f_t (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)	プレストレス力 P_t (tf)
JS-6	624	49.2	42	3.87×10^5	52.28
JSR	553	58.0	39	3.44×10^5	16.90
JSR-6	584	57.9	40	3.34×10^5	15.68

(1) 実験経過

変位の測定

は各供試体とも、
部材長を6等分す

る7測点のたわみと接合面の鉛直方向ずれ変位について行った。ひずみの測定は、P C鋼棒、連結筋、スターラップ及びコンクリート側面(材軸から45°の方向)について行った。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めた。各供試体ともコンクリート側載荷点直下の下縁から曲げひび割れが発生し、その後、端板側のP C鋼棒定着部と載荷点を結ぶ線上(材軸から約35°の方向)にせん断によるひび割れが発生し、荷重の増加とともにこのせん断ひび割れが上下に発達すると共に複数本発生発達し、せん断破壊に至った。崩壊後のひび割れ状況の例を図-5に示す。

(2) 崩壊に至るまでの挙動

図-6は、2本の連結筋の内、引張力で抵抗する側の連結筋の軸ひずみを荷重(せん断力)に対して描いたものである。連結筋は、載荷当初からせん断に抵抗しており、コンクリートのせん断ひび割れ発生とともに急増していることがわかる。特に、JSR-6の場合は、ひび割れの発生と同時に500 μ 程度急増している。また終局状態では、連結筋はほぼ降伏($\epsilon_y = 2120\mu$)に至っていることが確認される。図-7は接合面から2本目のスターラップの軸ひずみの荷重(せん断力)に対

表-3 鋼材の材料試験結果 (kgf/mm^2)

種 別	降伏応力度 f_y	引張強度 f_u	ヤング係数 E_s, E_c
PC 鋼棒	111.15	120.00	2.13×10^4
D19 鉄筋	35.43	49.02	2.12×10^4
D 6 鉄筋	40.25	60.45	2.08×10^4

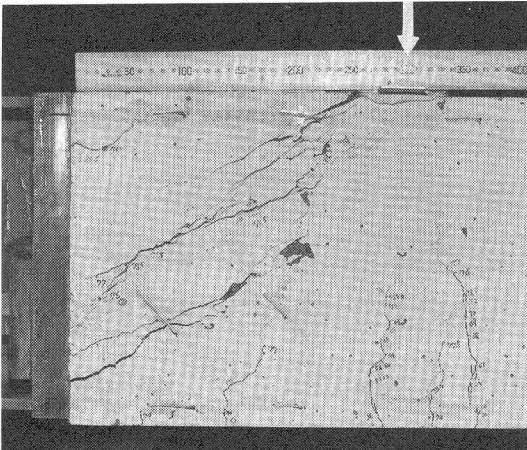


図-5 供試体 JS-6 の最終ひび割れ状況

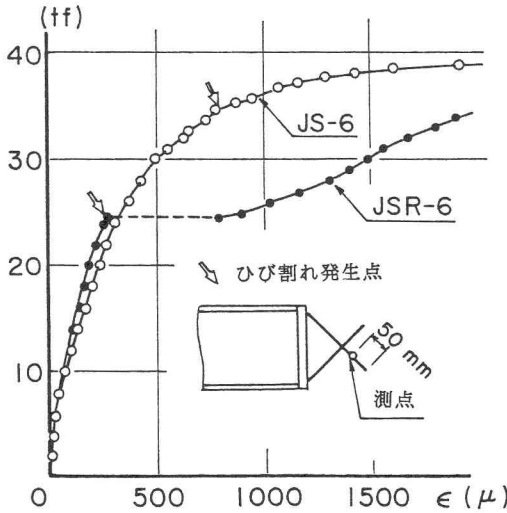


図-6 連結筋のひずみ変化

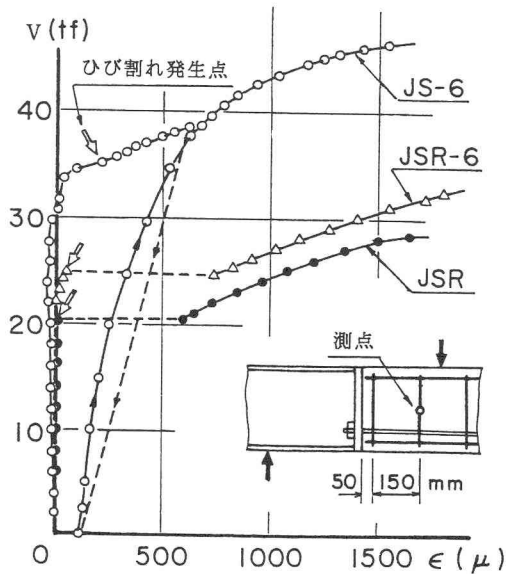


図-7 スターラップのひずみ変化

する変化を示している。スターラップは連結筋と異なり、コンクリートのせん断ひび割れ発生まではほとんど抵抗せず、せん断ひび割れが発生後、ひずみが急増し抵抗を開始しており、終局状態ではほぼ降伏に至っていることが確認できる。

図-8はコンクリート表面のせん断ひずみ（はり高の中央で軸線と45°方向）を荷重（せん断力）に対して示したものである。図中、JSR-6に対する水平軸のゼロ点は、紙面節約のため500μ右にずらしてある。せん断ひび割れはゲージの位置で開始したわけではないが、ひび割れ開始時のひずみは120～160μであり、応力値にして、46～53kgf/cm²となる。この値はコンクリートの引張強度の計算値39～42kgf/cm²と良い対応を示している。ひび割れ発生後のコンクリートひずみは、ひび割れ位置とゲージの位置関係で、急増するものと停留するものが生じている。図-9は、接合面の鉛直方向のずれ変位を荷重に対して示したものである。いずれの供試体においても、ひび割れ発生荷重の70%程度からずれが増加し、ひび割れ発生と共に急増する様子が分かる。また連結筋を有するJSR-6のずれ変位は連結筋の無いJSRに比べてかなり小さく、ずれ変位に対しても連結筋の効果が現われていることが確認される。

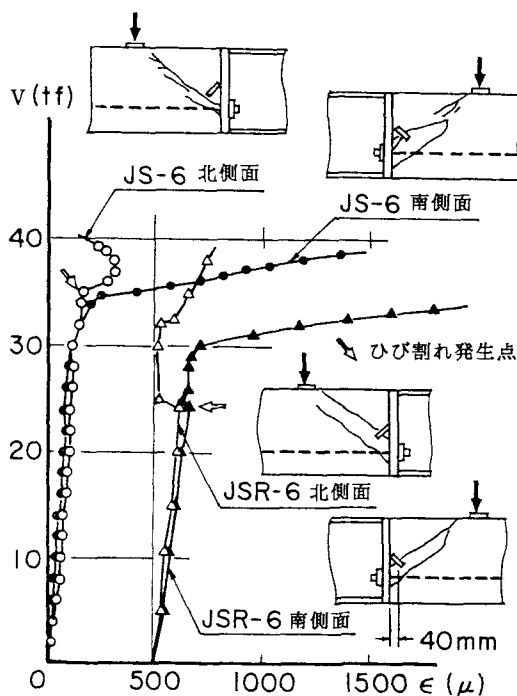


図-8 コンクリート表面の45°方向ひずみ

4. 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) 曲げひび割れモーメント: M_{or}

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 σ_{ct} とコンクリートの曲げ引張強度 f_b の和に達する時のモーメント

$$M_{or} = I_o (\sigma_{ct} + f_b) / y_c \quad (1)$$

ここに、

I_o : 全断面有効とした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) せん断ひび割れ耐力: V_{or}

はり高さの中心の引張主応力度 σ_{pt} が、コンクリートの引張強度 f_t になる時のせん断力とする。

この時、引張主応力度の計算は、直応力度については、プレストレス力 P_t による断面平均応力度 σ_x 、せん断応力度については断面の高さ方向に放物線分布を仮定し、その最大値 τ_m とする。すなわち

$$\sigma_{pt} = -\sigma_x / 2 + \sqrt{(\sigma_x / 2)^2 + \tau_m^2} = f_t \quad (2)$$

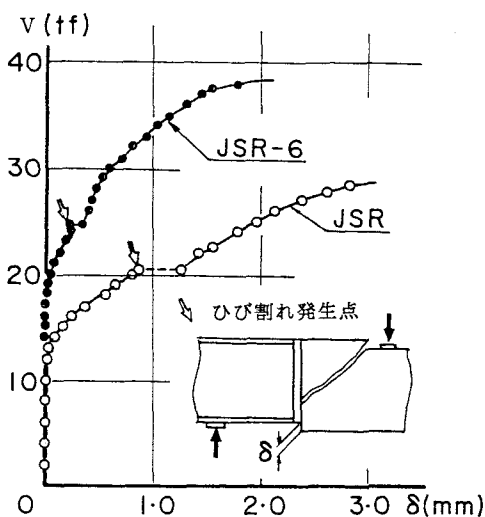


図-9 接合面のずれ変位の変化

に $\sigma_x = P_t/bh$ と $\tau_m = 3V/2bh$ を代入して V について解いて次式を得る。

$$V_{cr} = (2bh/3) \sqrt{(f_t + P_t/2bh)^2 - (P_t/2bh)^2} \quad (3)$$

(3) 終局せん断耐力: V_u

せん断耐力 V_u は、せん断補強筋以外のせん断抵抗 V_c とスターラップのせん断抵抗 V_{s1} と連結筋のせん断抵抗 V_{s2} の和として求める。すなわち、

$$V_u = V_c + V_{s1} + V_{s2} \quad (4)$$

この時、 V_c は、終局時のコンクリート、P C 鋼棒、ひび割れ面の骨材などによるせん断抵抗であるが、その抵抗機構は、通常の R C はり、P C はりについても未だに解明されておらず、直接その大きさを求めることは困難である。。そこで、ここでは、コンクリートのせん断耐力に等しい耐力が破壊時にも保持されると仮定して、それと等置することにした。コンクリートのせん断耐力はコンクリートの有効断面積 $b d$ に対して、平均せん断応力度 $\tau = V_c / b d$ とプレストレスによる平均直応力度 $\sigma = P_t / b d$ とを組合せた引張主応力度がコンクリートの引張強度 f_t に等しくなった時のせん断力として求める。また、この時の有効高さ d は、「コンクリート道路橋設計便覧」等により

$$d = (A_s f_{sy} d_s + A_p f_{py} d_p) / (A_s f_{sy} + A_p f_{py}) \quad (5)$$

として求める。この V_c がさきに求めた V_{cr} に等しいと考えると上述の方法による値より若干小さな値となる。 V_{s1} は、スターラップの降伏軸力として求める。実験の場合、せん断スパン内に 2 組のスターラップがあるので、スターラップ 2 組分の降伏軸力としたが、一般には「コンクリート設計示方書」の式等を用いて

$$V_{s1} = \{A_w f_{wy} d (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s\} z / \gamma b \quad (6)$$

などとして求める。

V_{s2} は、ひび割れと交差する 1 組の連結筋のみ有効と考え、その降伏軸力の鉛直成分とする。以上の抵抗形態を模式的に示したのが図-10 である。

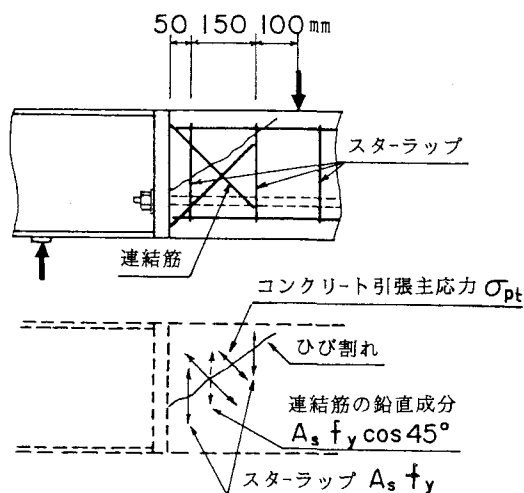


図-10 せん断に対する抵抗力

(4) 接合面の直接せん断強度

端板とコンクリート面の摩擦係数を 0.4 と仮定

したプレストレス力に対する鉛直方向摩擦力に、P C 鋼棒の直接せん断強度と連結筋の降伏軸力の鉛直成分を加えたものとして求める。この時 P C 鋼棒のせん断強度は、材料的強度としてプレストレス力による直応力度と平均せん断応力度により、von Mises の降伏条件が満足されるものとして求めた。

5. 実験値の検討

上記の理論値は、表-4 に実験値と対比して示している。曲げひび割れモーメント、せん断ひび割れ耐力及び終局せん断耐力とも、理論値が比較的良く実験値に一致していることが分かる。せん断耐力については、当初、コンクリート標準示方書の式により算定してみたが、表-5 に示すように実験値に比べてかなり小さく計算される。これは、示方書の V 。

表-4 せん断試験のまとめ

供試体名	項 目	曲げひび割れ モーメント M_{cr}	せん断ひび割れ 耐力 V_{cr}	終局せん断耐力 V_u
JS-6	実験値	8.10 tf・m	35.0 tf・m	47.48 tf・m
	理論値	8.03 (99%)	34.5 (99%)	43.25 (91%)
JSR	実験値	4.20 tf・m	21.0 tf・m	28.5 tf・m
	理論値	4.39 (105%)	24.1 (115%)	28.58 (100%)
JSR-6	実験値	4.05 tf・m	24.5 tf・m	37.5 tf・m
	理論値	4.26 (105%)	24.3 (99%)	34.01 (91%)

の算定式において、プレストレスの影響が安全側に評価されていることと、本供試体のようにせん断支間が小さい場合を考えていないことによる。上の議論で問題にしたせん断耐力は、接合部を含むコンクリートのそれであるが、実験前は接合面で直接せん断破壊する可能性も考慮に入れていた。その計算値は表－５の最右欄に示すが、いずれの供試体についても実験値を上回る結果となった。なお、接合面における直接せん断は特殊な荷重条件でしか生じ得ないが、連結部コンクリートと接合面の両方について照査をする必要があろう。

表－５ せん断耐力（ t_f ）の理論値の比較

供試体名	接合部コンクリート			接合面
	示方書	提案法	実験値	
JS-6	22.15	43.25	47.48	54.56
	(47%)	(91%)	(100%)	(115%)
JSR	20.88	28.58	28.50	48.06
	(73%)	(100%)	(100%)	(169%)
JSR-6	25.33	34.01	37.50	51.34
	(68%)	(91%)	(100%)	(137%)

6. 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せん断強度実験の結果、以下のようなことが明らかになった。

- 1) すべての供試体は、接合部の P C 鋼棒定着位置と載荷点を結ぶ線上（軸線と約 3.5° 方向）に生じたせん断ひび割れが伸展することにより破壊に至った。
- 2) せん断ひび割れ荷重の実験値は、コンクリートの引張主応力度が引張強度になる荷重として求めた計算値と比較的良好一致を示した。
- 3) 連結部コンクリートのせん断耐力の実験値は、平均応力度に対する引張主応力度がコンクリートの引張応力度に達した時と考えたコンクリートの有効断面積部分のせん断耐力と、連結筋とスターラップのせん断耐力の和として求められる計算値と、比較的良好的対応を示した。
- 4) 連結筋は載荷当初から、スターラップはひび割れ発生後、それぞれの効果を発揮する。この両者の設置量によりせん断耐力をある程度調節することができ、必要なせん断耐力を得ることができる。

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、Vol. 32A, 1986. 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強度、合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、1986. 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、Vol. 35A, 1989. 3, pp. 1215-1220.
- 4) 崎元達郎、須崎浩二、白石隆宏、梶川靖治：鋼・コンクリート連結はりの三点曲げ強度実験、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、1989. 9, pp. 101-107.

（1989 年 10 月 2 日受付）