

[2092] 合成構造における鋼・コンクリート間のせん断伝達機構

正会員○竹内浩一（石川島播磨重工業）

加藤浩司（東京大学学生）

1. まえがき

鋼板とコンクリートを用いた合成構造は、耐荷性能の向上、軽量化、止水性の確保、施工の迅速化などの観点から注目されつつある。経済的な利点として、施工時に型枠として使用した鋼板を、完成後は強度部材として使用できるという点が上げられる。鋼板を型枠として使用する場合、鋼板には強度と剛性が必要であるため、鋼板には適度な補剛材（リブ等）が設けられる。このリブが完成後の鋼板とコンクリートとのずれ止めとして有効に働けば、より経済的な構造となる。

鋼板とコンクリートのずれ止めとしてリブを用いた場合、鋼板とコンクリートとの力の伝達はリブのみを介して行われ、コンクリートのひびわれの大半はリブの取り付け位置から発生する。

一方、リブの形状・配置は、鋼殻の制作上、あるいは施工荷重に対する鋼殻強度等から決定され、条件によってはスパン内にリブが設けられない場合も有り得る。ディープビームのようなせん断スパンの小さな部材では支間内のリブの有無は部材の挙動に大きな影響を及ぼさないことが、既往の研究¹⁾で示されているが、リブの形状や配置によって、ひびわれのパターンは異なるため、せん断スパン比の大きな部材においては、部材の挙動、耐力も異なってくるものと思われる。

筆者らは、リブの形状・配置をパラメータとした $a/d = 3.5$ の合成梁の曲げせん断試験を行い、リブ形状あるいは配置が鋼とコンクリートとのせん断伝達、部材の挙動に及ぼす影響について考察した結果を報告する。

2. 実験の概要

試験体の緒元を表-1、

表-1 試験体の諸元

図-1(a)に示す。また、各試験体に用いたリブの形状を図-1(b)に示す。Aシリーズの試験体はリブ間隔をパラメータにとり、鋼板・コンクリート間のせん断伝達機能、及びたわみ性状の評価を目的とした。鋼板とリブとを溶

試 験 体		リブ' 間 隔 s (cm)	リブ' 形 状 * (mm)	リブ' 取 付 方 法	コンクリート圧縮強度 f'c (kg/cm ²)
A シ リ ズ	LFA-15	15	75x40x5x7	接着剤	229.8
	LFA-53	52.5	75x40x5x7	接着剤	226.6
	LFA-105	105	75x40x5x7	接着剤	202.8
B シ リ ー ズ	LFW-15	15	75x40x5x7	溶接	225.7
	LNW-15	15	75x5	溶接	227.0
	SFW-15	15	40x40x5x5	溶接	220.0
	SFW-35	35	40x40x5x5	溶接	259.1
	SFW-30	30	40x40x5x5	溶接	212.6

* ; $l_w \times l_f \times t_w \times t_f$

(図-1参照)

接によって取り付けると残留ひずみの影響により、信頼し得る鋼板ひずみのデータを得られない可能性がある。そこで、Aシリーズの3体は、リブをエポキシ系の接着剤によって鋼板に取り付けた。また、Bシリーズの試験体は、リブ形状、配置が部材耐

表-2 鋼板の力学的性質

弾性係数 E (kg/cm ²)	降伏強度 fy (kg/cm ²)	引張強度 fu (kg/cm ²)
2.07×10^6	3360	4530

力に及ぼす影響を調べたもので、リブと鋼板とを溶接により取り付けた。

試験体は、高さ $h = 30.0 \text{ cm}$ 、幅 $b = 10.0 \text{ cm}$ 、鋼板厚さ $t = 4.5 \text{ mm}$ 、コンクリートの最大骨材寸法は 15 mm である。荷重方法は対象 2 点荷重とし、せん断スパン $a = 105.0 \text{ cm}$ 、純曲げスパン $c = 20.0 \text{ cm}$ とした。また、荷重板および支承板の幅はいずれも部材軸方向に 9.0 cm のものを用いた。実験に用いた鋼板の強度特性を表-2に示す。

測定項目は荷重点の鉛直変位および鋼板の軸ひずみである。

3. 実験結果および考察

3. 1 鋼板ひずみと荷重変位関係

A シリーズはリブと鋼板との接着材の剥がれによって耐力が決定した。A シリーズの荷重-変位関係を図-2に、破壊直前のひびわれ図および鋼板の部材軸方向のひずみ分布を図-3に示す。図-3 (b) (c) に示すとおり、部材軸方向の鋼板ひずみは、曲げひびわれ発生前後からリブ間で一様となっており、鋼板とコンクリートとのせん

断伝達にはリブのみによって行われていることがわかった。また、図-2に示すように、リブの間隔が大きくなるに従い、剛性が低下した。

鋼板とコンクリートとが完全に合成されていると仮定すると、集中荷重時の曲げによる鋼板のひずみ分布は図-4の一点鎖線のように表され、せん断スパン内の鋼板の総伸び Δl は (1) 式のように表せる。

$$\Delta l = \int_0^a \epsilon_0 \cdot \frac{x}{a} dx = \frac{\epsilon_0 \cdot a}{2} \quad (1)$$

ここに、 ϵ_0 は荷重点下の鋼板ひずみ、 a はせん断スパンである。また、リブによって合成された部材のせん断スパン内の曲げによる鋼板のひずみ分布は、実験結果にもとづいて、図-4の実線のように仮定でき、せん断スパン内の鋼板の総伸び $\Delta l'$ は、リブ間隔を s として、(2) 式のように表せる。

$$\Delta l' = \sum_i \left(\epsilon_0 \cdot \frac{1}{a} s \right) = \left(1 + \frac{s}{a} \right) \Delta l \quad (2)$$

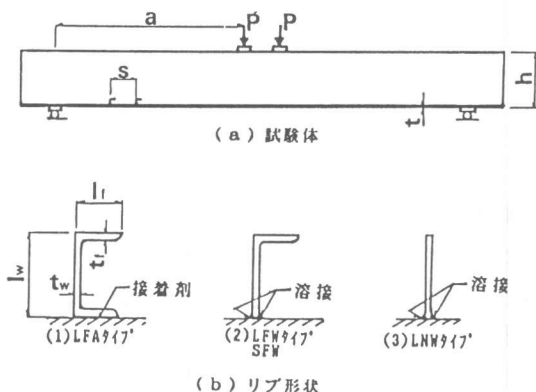


図-1 試験体の概要

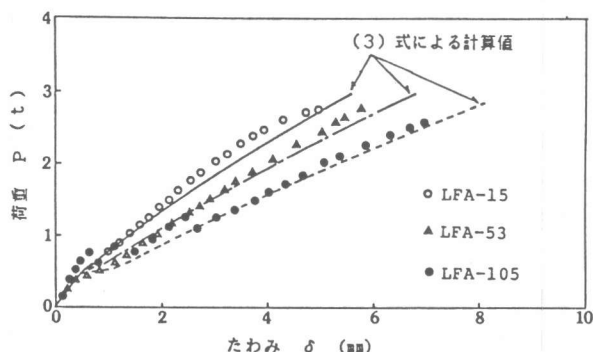


図-2 A シリーズの荷重-変位関係

これは、合成部材のせん断スパン内の曲げによる鋼板の平均ひずみが、完全合成の場合の $(1 + s/a)$ 倍となることを意味する。従って、2点荷重の場合の合成部材の曲げ剛性は鉄筋コンクリートの場合の曲げ剛性の $1/(1 + s/a)$ となり、荷重-変位関係は鉄筋コンクリートの場合の梁理論による式を修正して(3)式を得る。

$$\delta = \frac{Pa^3}{6E_c I_c} \left[\left(2 + 3\frac{c}{a}\right) \left(1 + \frac{s}{a}\right) + 6k \frac{r^2 E_c}{a^2 G_c} \right] \quad (3)$$

ここに、 δ : 載荷点下のたわみ、 P : 荷重
 E_c : コンクリートの弾性係数、 G_c : コンクリートのせん断弾性係数
 c : 純曲げ区間長さ、 r : 断面二次半径
 k : 断面重心のせん断応力度の平均せん断応力度に対する割合 (=1.5)
 I_c : Bransonの有効断面二次モーメント

(3)式による荷重-変位関係は図-2に示すとおり実験結果と良く一致した。

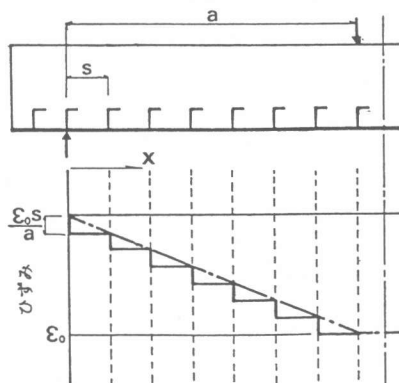


図-4 鋼板の軸ひずみ分布のモデル化

3. 2 ひびわれ性状とせん断耐力

Bシリーズのひびわれ図および各荷重段階における鋼板の部材軸方向のひずみ分布を図-5に、荷重-変位関係を図-6に、耐力および破壊形式を表-3に示す。

3. 2. 1 リブ形状の影響

試験体 LFW-15, LNW-15, SFW-15はリブの形状による比較を行ったものであるが、リブにフランジのない LNW-15 は、他の 2つの

試験体と比べて明らかに異なったひびわれ性状を示した。フランジのない場合は、ひびわれが破壊直前近くまでほぼ鉛直に向かい、鋼板のひずみ分布を見ると、破壊直前までリブがずれ止めとして有効に働いていたことがわかる。そして、鉛直に伸展したひびわれが斜めひびわれを誘発するかたちで斜め引張破壊を生じた。これに対し、フランジのあるものはひびわれはほぼ水平方向に向かい、この傾向はリブの高さが高い程顕著であった。鋼板ひずみ分布に示すとおり、フランジのないものはリブ先端からひびわれが発生することにより、リブのずれ止めとしての効果は徐々に低減して行き、破壊直前では鋼板ひずみはスパン内でほぼ一様となり、部材内の応力はアーチ的な流れとなっていたことが推定される。そして、リブから発生したほぼ水平のひびわれが連

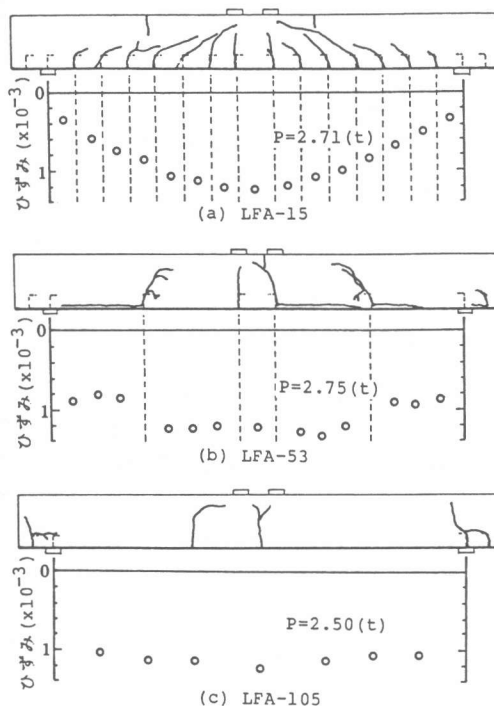


図-3 Aシリーズのひびわれ図および鋼板の軸ひずみ分布

結することにより、部材は不安定になり、崩壊した。今回の実験では3体の試験体に大きな耐力の差は見られなかったが、リブの形状により、ひびわれ性状は異なり破壊過程も異なることが判明した。

リブ形状による著しい剛性の変化はみられなかった。

3. 2. 2 リブ間隔・配置の影響

試験体 SFW-15, SFW-35, SFW-30 はリブの間隔・配置による比較を行ったものである。ひびわれはリブ取り付け位置から発生するため、リブ間隔が小さいとひびわれ本数は多くなるが、3.1で述べたとおり、剛性は高くなる(図-6(b))。

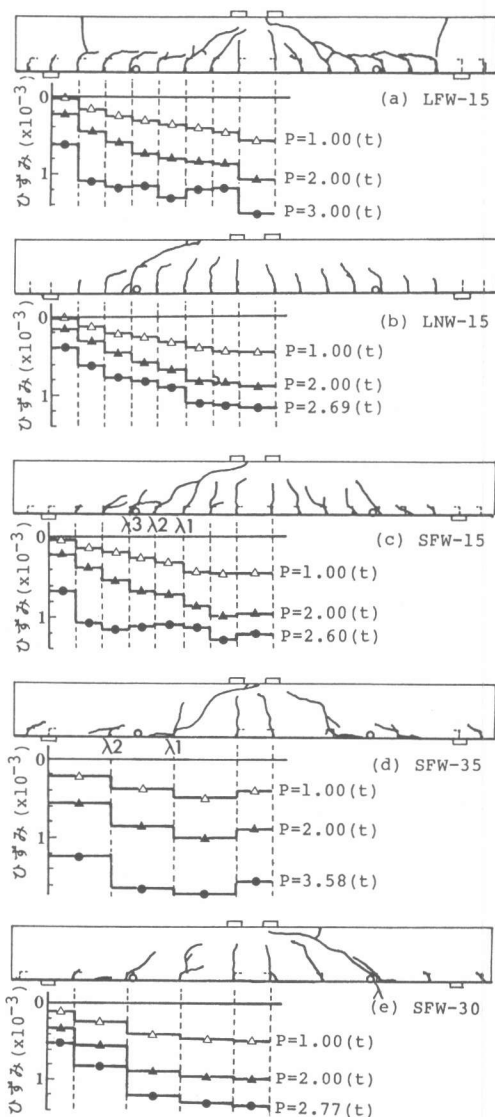
SFW-15とSFW-30を比較すると、SFW-15では図-5(c)に示す $\lambda 2, \lambda 3$ のリブから発生したひびわれが $\lambda 1$ のリブから発生しているひびわれと連結することにより、またSFW-30では図-5(e)に示す λ のリブから突然斜めひびわれが発生することにより、両者とも斜め引張破壊によるせん断破壊をした。両者の耐力はほぼ同じであった。これに対し、SFW-35では図-5(d)に示す $\lambda 1$ のリブから発生したひびわれが中立軸付近から水平方向に伸展し、また、同図の $\lambda 2$ のリブからはひびわれが発生しにくく、伸展方向は水平に近い。斜め引張破壊を起こさず、他の2体と比較して耐力が大きくなり、破壊形式はせん断圧縮破壊であった。

鉄筋コンクリートにおいてBOWERらの提案している斜めひびわれ発生位置⁴⁾を図-5のひびわれ図に示した。今回の実験で斜め引張破壊を起こした試験体は、鉄筋コンクリートにおける斜めひびわれ発生位置付近に配置されたリブから発生した斜めひびわれによって破壊している。破壊直前には鋼板のひずみがせん断スパン内で一様となったLFW-15およびSFW-15

表-3 実験結果

試験体	最大耐力 P_u (t)	破壊形式	岡村・桧貝式 P_{cal} (t)
B LFW-15	3.0	斜め引張*	3.11
シ LNW-15	2.7	斜め引張	3.11
リ SFW-15	2.7	斜め引張*	3.08
ー SFW-35	3.6	せん断圧縮	3.25
ズ SFW-30	2.8	斜め引張	3.05

*; 水平ひびわれの連結による



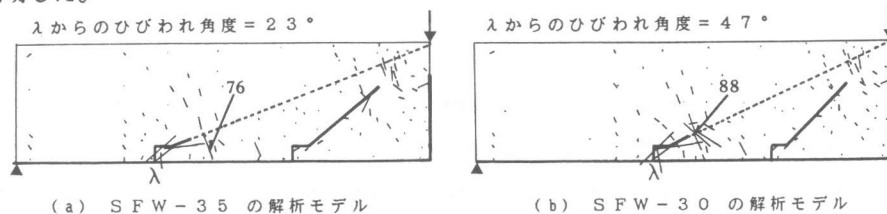
○: Bower等の斜めひびわれ発生位置

図-5 Bシリーズのひびわれ図および鋼板の軸ひずみ分布

においても、図-5に示した斜めひびわれ位置から発生した水平ひびわれが、隣のリブから発生したひびわれと連結することにより、斜め引張破壊的破壊を起こした。合成構造の場合は、ひびわれはリブの取り付け位置から発生し易いため、斜めひびわれを発生し易い位置にリブが配置されると斜め引張破壊を生じ易いものと考えられる。また、その位置は、鉄筋コンクリートの斜めひびわれ発生位置とほぼ同様の位置にあるものと考えられる。逆に、この斜めひびわれの発生し易い位置にリブを配置しなければ、斜め引張破壊は生じにくく、耐力は大きくなるものと考えられる。

SFW-35とSFW-30をモデル化し、仮想ひびわれ面に接合要素を設けた有限要素解析を行ったところ、ひびわれがコンクリートの主引張

応力により発生するものとする、図-7に示す λ のリブからのひびわれは SFW-35 では水平方向に伸展して行く傾向を示しているのに対して、SFW-30 では載荷点方向に伸展し易く、また応力レベルも高く、リブから載荷点に向かった仮想ひびわれ面に沿った斜め引張破壊を起こし易いことが判明した。

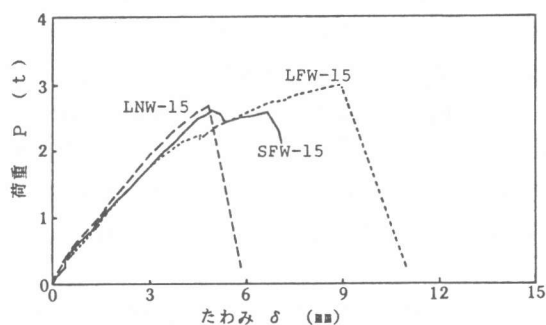


図中の数値は引張応力度の引張強度に対する比(%)
---- 仮想ひびわれ

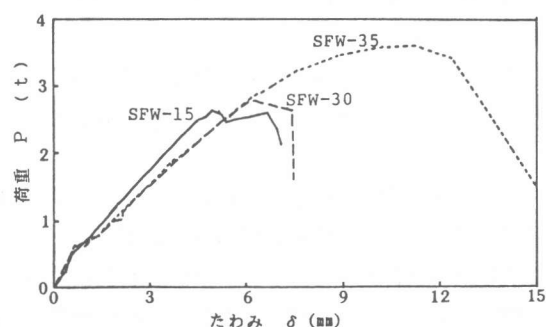
図-7 有限要素解析による同荷重レベルでの主引張応力図

4. せん断耐力の計算

表-3にせん断補強筋のない鉄筋コンクリート梁のせん断耐力式である岡村・桧貝式により求めた計算耐力⁵⁾を P_{cal} として示す。実験値 P_u と計算耐力 P_{cal} とを比較すると、斜め引張破壊を生じなかった SFW-35 は実験値が計算耐力を上回っているが、他の4体の試験体ではすべて実験値が計算耐力を下回っており、この4体の試験体についての P_u/P_{cal} の平均値は 0.907 である。この理由としては以下のことが考えられる。(1) リブ間での鋼板ひずみが一様とな



(a) リブ形状による比較



(b) リブ間隔・配置による比較

図-6 Bシリーズの荷重-変位関係

るため、変形が鉄筋コンクリートに比して大きくなり、コンクリート内に作用するせん断応力が大きくなる。(2) ひびわれがリブ取り付け位置に集中するため、ひびわれ幅が増大し、骨材の噛みあい効果が低減する。(3) 鋼板がコンクリートの外側に配置されているため、鉄筋コンクリートにおける鉄筋のようなダウエル効果が期待できない。これらは、鋼板厚さ、リブ形状、リブ間隔等に大きく影響されると考えられ、これらの要因を耐力式にいかに取り入れるかが、今後の課題であるが、今回の実験から、合成構造のせん断耐力は、斜め引張破壊を生じるようにリブが配置されている場合には鉄筋コンクリートのそれよりも小さくなることが明らかになった。

5. まとめ

鋼板に設けたリブによりコンクリートと鋼板とを合成させた合成梁の曲げせん断試験を行い、本研究の範囲で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 合成部材のたわみは、鉄筋コンクリートの梁理論による計算値を、リブ間隔によって修正することにより得られる。
- (2) リブにフランジを設けないと、リブ先端からのひびわれは鉛直に伸展し易く、このひびわれが斜めひびわれを誘発して斜め引張破壊を発生し易くする可能性がある。
- (3) リブにフランジを設けると、リブ先端からのひびわれ角度は小さく、ほぼ水平方向に伸展し、リブのずれ止め効果は低減する。この場合、リブ間隔が小さいと水平ひびわれは互いに連結することにより、部材の耐力を決定する。
- (4) リブを鉄筋コンクリートの斜めひびわれ発生位置付近に配置すると、その位置のリブから斜めひびわれを発生し易く、部材は斜め引張破壊を起こす。この場合、せん断耐力は鉄筋コンクリートのせん断耐力よりも小さい。
- (5) 一方、リブの取り付け位置を鉄筋コンクリートの斜めひびわれ発生位置からずらすと斜めひびわれは発生しにくく、支点上にリブを設けることにより、部材内の応力はアーチ的な流れとなり、異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリートに比較し、せん断耐力は大きくなる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、御指導をいただいた東京大学の岡村 甫 教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小川・判田・大須賀：鋼板とコンクリートから構成されるサンドイッチ式ディープビームの強度に関する研究(第1報)、日本造船学会論文集、第160号、1986年11月、PP.377-385
- 2) 清宮・横田：形鋼によるずれ止めの耐力評価、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、1986年9月、pp.113-118
- 3) ACI Committee 435 :Deflection of Reinforced Concrete Flexural Members, Journal of ACI, June 1966, pp.637-674
- 4) J.E.BOWER and I.M.VIEST :Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement, ACI Journal, Vol.57, July 1960, pp.73-98
- 5) H.OKAMURA and T.HIGAI :Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proceedings of JSCE, No.300, August, 1980, pp.119-128