

# 論文 タイバーを用いたフルサンドイッチ合成床版の終局耐力について

古内 仁\*1・上田 多門\*2・温泉 重治\*3・佐藤 政勝\*4

**要旨:** タイバーにより上下フランジ鋼板を一体化させたフルサンドイッチタイプの合成床版に対して載荷試験を行い、終局耐力について検討を行った。実験変数は、タイバーの間隔で、それぞれ 250mm, 300mm, 350mm の 3 種類の供試体を用意した。各供試体は、押抜きせん断の性状を示した後、再び荷重が増加し最終的にはタイバーの間隔の違いにより上フランジの座屈あるいはせん断ひび割れの発生により終局に至った。終局耐力については、鉄筋コンクリートに準じて行い、妥当な評価を行えることが明らかとなった。

**キーワード:** タイバー, フルサンドイッチ合成床版, 圧縮フランジの座屈, 終局耐力, 押抜きせん断

## 1. はじめに

橋梁構造物において、床版は交通活荷重や気象条件などの影響を受けて劣化や損傷が最も発生しやすい部材である。とくに、道路橋では交通荷重の増加や大型車両による輸送の効率化をはかるため規制緩和が行われ、平成 5 年には設計荷重が変更となった。今後さらに、既存の床版において劣化・損傷が助長されていくことが懸念されている。このような背景を踏まえて、床版厚が小さく耐久的な部材であるとされているフルサンドイッチ合成床版の適用を行うことは 1 つの対策として有効であると考えられる。本研究では、種々の形式のあるサンドイッチ合成床版の中で、比較的施工性が良いタイバーを用いたサンドイッチ合成床版について、タイバーの配置間隔が耐力に与える影響について実験的に検討したものである。

## 2. 実験概要

実験供試体には、図-1 から図-3 に示すように矩形のフルサンドイッチスラブを用いた。

上面と下面のフランジは、いずれの供試体も厚さ 6mm の平鋼板で、両者をタイバーによって一体化させた。タイバーには、異形鉄筋 D25 (SD345) の両端をねじ切りしたものをを用い、各々のフランジ鋼板を挟み込むように 2 個のナットを締め付けて接合させた。実験変数は、表-1 に示すようにタイバーの配置間隔で、250mm, 300mm, 350mm の 3 種類とした。

表-1 供試体寸法

	$h$ (mm)	$t_f$ (mm)	$l$ (mm)	$b_w$ (mm)	$s$ (mm)
SP350	160	6	1400	1400	350
SP300					300
SP250					250

注)  $h$  : 部材高さ  $t_f$  : 上下フランジ鋼板の厚さ  
 $l$  : 支間長  $b_w$  : 部材幅  $s$  : タイバーの配置間隔

載荷は、門型フレームに油圧ジャッキを取り付けて行った。載荷板は、200mm×200mm の正方形の鋼板を用い、供試体上面中央部に据え付けた。ただし、載荷位置にタイバーが配置されている場合には、中心を円形にくり抜いた鋼板を用いた (供試体 SP350)。支承部は、棒球

\*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*3 ショーボンド建設 (株) 北海道支店技術部 (正会員)

\*4 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所室長 工博 (正会員)

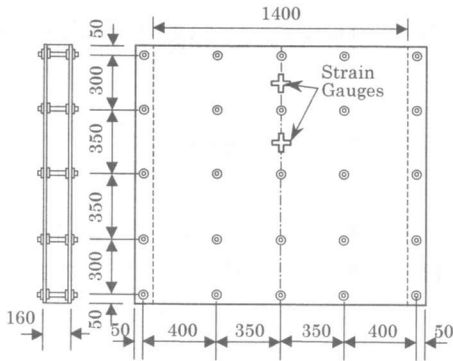


図-1 供試体 SP350 の形状寸法

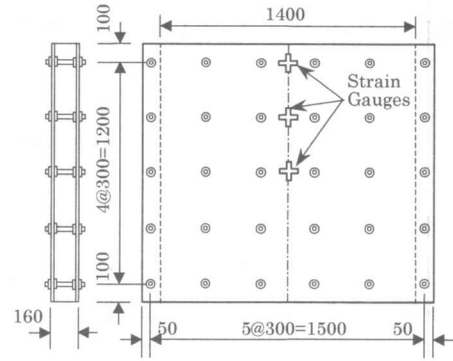


図-2 供試体 SP300 の形状寸法

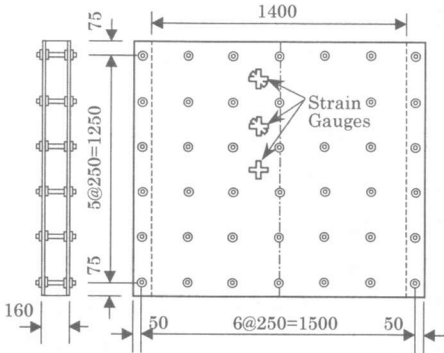


図-3 供試体 SP250 の形状寸法

表-2 コンクリート圧縮強度

供試体	SP350	SP300	SP250
養生日数	16	22	28
$f_c'$ (MPa)	28.1	30.5	32.4

表-3 使用鋼材の機械的性質

材 料	降伏点 ( $N/mm^2$ )	引張強さ ( $N/mm^2$ )	伸び (%)
6mm 厚鋼板	341	461	28
タイバー(D25)	427	562	20

座により支持を行ったが、反力が均等に伝わるようにするため、供試体と棒球座の間に石膏および鋼板（幅 45mm×厚さ 10mm）を挿入し供試体底面に密着させた。

測定項目は、載荷点の変位およびフランジ鋼板のひずみである。載荷点変位は供試体の下面より変位計を用いて測定した。鋼板のひずみ測定位置は、図-1 から 3 に示すように支間中央線上付近の数カ所の位置で 2 方向または 3 方向について測定を行った。

3つの供試体は同時に作製され、順次異なる養生期間を経て、実験が行われた。各供試体の実験日における圧縮強度は表-2 に示すとおりである。また、使用したタイバーおよびフランジ鋼板の降伏強度は表-3 に示すとおりである。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひび割れの進展状況および破壊性状

供試体の側面に現れたひび割れを図-4 に

示す。各供試体とも、側面に現れる曲げひび割れは、245~270kN 程度で最大曲げモーメント作用位置近傍のタイバーの位置付近で発生した。その後、荷重の増加とともにひび割れが鉛直方向に進展し、また支点奇りのタイバー位置にもひび割れが生じた。これらのひび割れについても、ほぼタイバーに沿って鉛直に進展しており、その方向はせん断力の影響よりもタイバーの配置による影響の方が大きいと考えられる。

SP350 の最大荷重は 717kN であるが、荷重の低下を招いたのは、左側支点近傍で斜めひび割れが発生したためであると推察される。このひび割れは、支点から載荷点方向の隣接するタイバーの上端を斜めに結ぶように発生しており、タイバーの配置間隔がひび割れ角度の決定要因に少なからず影響しているものと考えられる。

SP300 の最大荷重は 829kN であるが、終局直前より圧縮フランジの鋼板が座屈している（写真-1 参照）。ピーク荷重以降はその部分のコンクリートの圧壊が観察されており、この供試体における部材耐力の主要因であると考えら

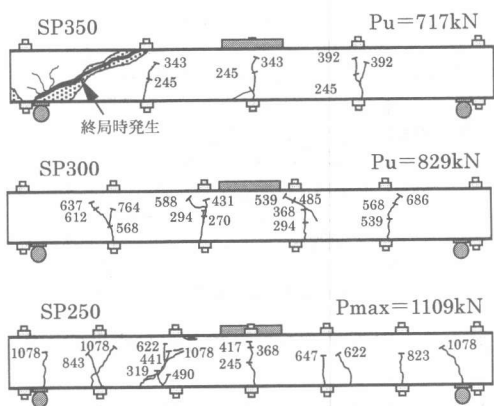


図-4 供試体のひび割れ状況

れる。この場合も、タイバーの配置間隔が圧縮フランジ座屈の影響因子になると予想される。

SP250の最大荷重は、載荷試験機の最大容量に達したため、部材の荷重-変位曲線での軟化をみることなく除荷したので不明である。

### 3.2 たわみ性状

図-5は、各供試体の荷重-載荷点変位の関係を示したものである。なお、載荷点変位は支点沈下量を差し引いて補正を行っている。各供試体とも初期の剛性は大きく、ある荷重に達すると急激に剛性が低下することが観察された。このとき、荷重はいったん低下したが、さらに載荷を行うと荷重は徐々に増加した。ここでは、その荷重を「部材降伏荷重」と呼ぶこととする。また、SP350とSP300は、部材降伏荷重直後において1度除荷し再載荷を行った。SP250は、部材降伏荷重では除荷せず、さらに荷重を加えた後、除荷・再載荷を行った（2回目の除荷・再載荷はジャッキ交換のため）。初期の剛性は、各供試体ともほぼ同じ程度であり顕著な差は見られず、タイバーの配置間隔の影響はあまり見

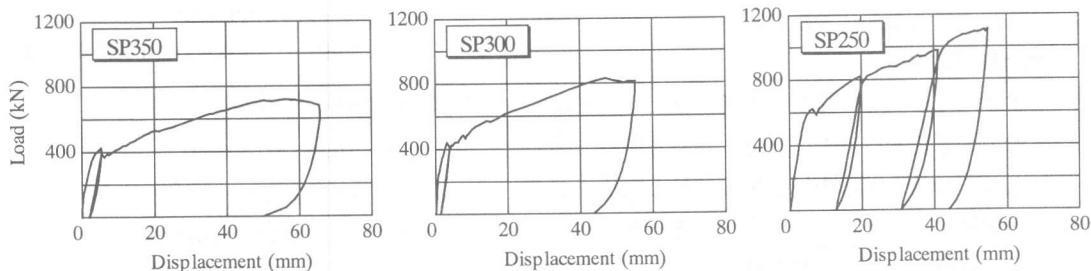


図-5 荷重-変位（載荷点）関係

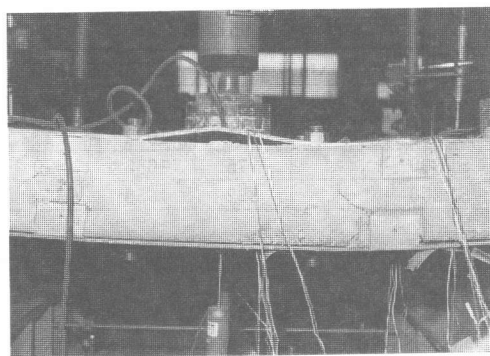


写真-1 圧縮フランジ鋼板の座屈 (SP300)

られない。配置間隔の影響は、部材降伏荷重の大きさとその後の変位の大きさに現れている。部材降伏荷重は、SP350とSP300で430kN程度で同じであるが、SP250では620kNとかなり大きくなり、それ以降の変位の大きさは、タイバーの配置間隔が大きくなるに連れて増加する傾向にあった。

### 3.3 部材終局耐力の検討

以下では、曲げに対する耐力、せん断に対する耐力および圧縮フランジの座屈耐力について検討を行う。

#### (1) 曲げ降伏耐力

ここでは、鉄筋コンクリートと同様に鋼板とコンクリートは一体として扱い、ひずみ分布は平面保持の仮定に基づいて線形としている。また、コンクリートは弾性体として引張応力は無視した。降伏耐力は引張フランジのひずみが降伏ひずみに達したときとして計算をした。曲げ降伏耐力について全幅を有効としたときの計算値と実験値を表-4に示す。ただし、実験値の降伏耐力は、載荷点直下の領域で引張フランジが降伏したときで、全供試体とも自由縁付近で

表-4 曲げ耐力

供試体	降伏耐力 (kN)		終局耐力 (kN)	
	計算値	実験値	計算値	実験値
SP350	1193	525	1652	717
SP300	"	775	1655	829
SP250	"	822	1658	(1078)

は最大荷重時においても降伏は見られなかった。その様子の一例を図-6に示す。この図では、供試体 SP300 支間中央線での軸方向のひずみのみを示しているが、降伏判定には2方向のひずみより主応力を算出し、von-Mises の降伏条件により行った(図中●印)。その結果、計算値は概ね 1200kN であるが、実験値はいずれの供試体も計算値を大きく下回り、おおよそ 530~820kN 程度であった。これらの供試体では、押抜きの影響を受けて局所的な変形となり、載荷点付近の引張フランジのひずみが卓越してくるようである。また、鉄筋コンクリート部材に比べれば、フランジ鋼板とコンクリートの付着作用が小さく鋼板のひずみが大きくなる傾向があることも1つの原因であると考えられる。

(2) 曲げ終局耐力

曲げ終局耐力は、上記同様 RC 部材に準じて検討を行った。コンクリートは圧縮縁において終局ひずみ 0.0035 として、応力は等価ブロックを用いた。このとき、フランジ鋼板の応力は、圧縮側を降伏強度、引張側を引張強度とした。

計算結果と実験における破壊荷重を表-4に示す。ただし、SP250は最大載荷荷重である。この結果から、計算値はいずれの供試体においても実験値を上回っているが、3.1に述べたように破壊がいずれも完全な曲げ破壊として実験を終了していないので、算定値が妥当であるかは確認することができない。

(3) せん断耐力

タイバー形式のフルサンドイッチとしてせん断耐力の算定を行った。上田ら<sup>1)</sup>によれば、部材としてのせん断耐力は、RC部材と同様、トラス機構を考えて求めることができるとされている。本研究で用いられた供試体のようにタイ

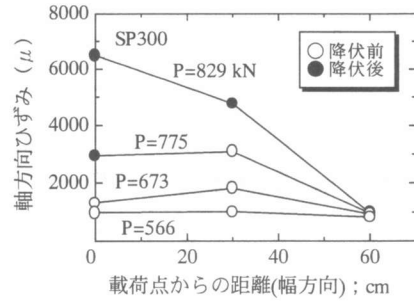


図-6 引張フランジの軸方向ひずみの一例

バーの間隔が比較的大きい場合には、タイバーを引張斜材、タイバー間のコンクリートを圧縮斜材、曲げ圧縮部および曲げ引張部のフランジを弦材とするトラス的な機構と考える。部材耐力は、コンクリートの圧縮斜材とタイバーの引張斜材の破壊による場合があり、両者のうち小さい方の値をとることにより算定することができる。

a) 圧縮斜材の耐力

$$V_u = f_{vc} \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

ここに  $f_{vc}$  : 以下の値の大きい方をとる。

$$0.9 f'_c{}^{1/3} \beta_d \beta_p \beta_n k$$

$$0.6 f'_c{}^{1/2} \beta_d \beta_p \beta_s$$

ただし、 $\theta > 30^\circ$  の場合は  $\theta = 30^\circ$  と

して  $f_{vc} < 4 \cdot f'_c{}^{1/2}$  であるときに限り

$z \cdot \cot \theta / s$  を乗じてよい。

$d$  : 有効高さ

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \leq 1.5 \quad (d : \text{cm})$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100/p} \leq 1.5$$

$$\beta_n = 1 \quad (\text{軸力が無い場合})$$

$$\beta_s = 5 / (1 + \cot^2 \theta)$$

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$k$  : せん断ひび割れ発生強度の低減係数 (=0.85)

$p$  : 引張鋼材比

$$\theta = \cot^{-1}(s/z)$$

$s$  : タイバーの配置間隔

$z$  : 圧縮合力と引張合力作用位置間の距離

b) 引張斜材の耐力 (降伏)

$$\theta < 30^\circ \text{ の場合 } V_u = A_w \cdot f_{wy} \quad (2)$$

$$\theta \geq 30^\circ \text{ の場合 } V_u = \cot^2 30^\circ (z/s) A_w \cdot f_{wy} \quad (3)$$

ここに  $A_w$  : タイバーの断面積

$f_{wy}$  : タイバーの降伏強度

計算結果を表-5に示す。実験においてせん断破壊した供試体はSP350であり、その最大荷重は717kNであった。算定値と破壊荷重が同等であることおよび破壊性状から、SP350の供試体では、終局耐力がせん断破壊によって決まるものであると考えられる。また、他の2つの供試体では、いずれも実験値の最大荷重が計算上のせん断耐力算定値には達していない。なお、実験結果の荷重-変位曲線で示されているように、このような形式のサンドイッチ部材では、せん断破壊によって終局をむかえても脆性的な破壊とはならず十分な変形性能をもつことが明らかとなった。

#### (4) 押抜きせん断耐力

本研究で用いられているサンドイッチ床版では、引張フランジの破断が生じなければ押抜きによって終局に至ることはないと思われ。その理由としては、コアコンクリートが押抜きによってコーン状に破壊面が形成されても、引張フランジの端部定着が十分であればコーンの外側のコンクリートが連続しているため(載荷点の押し抜けた部分を除いて)、鋼板に作用している引張力に見合うだけの圧縮力を伝えることができるからである。上記の理由から、押抜きが生じたサンドイッチ床版では、載荷位置周辺において局部的に変形が大きくなるが、さらに大きな荷重に耐えうるといことが予想される。以下では、「コンクリート標準示方書」<sup>2)</sup>におけるRC面部材に対する押抜きせん断耐力の算定を行い、実験結果と比較を行った。耐力算定式を以下に示す。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (4)$$

ここに  $\beta_r = 1 + 1 / (1 + 0.25 u / d)$

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_c}$$

$u$  : 載荷面の周長

$u_p$  : 設計断面の周長

$$\gamma_b = 1.0$$

ここでは、3.2で定義された「部材降伏荷重」が押抜きせん断の影響によるものと考えて検討を行った。表-6に部材降伏荷重と上記押抜き

表-5 せん断耐力の計算値

供試体	圧縮材耐力 (kN)	引張材耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)
SP350	728	2163	728
SP300	980	2163	980
SP250	1335	2622	1335

表-6 押抜きせん断耐力と部材降伏荷重

供試体	部材降伏荷重 (kN)	押抜きせん断耐力 (kN)	両者の比
SP350	426	697	0.61
SP300	440	727	0.61
SP250	622	749	0.83

せん断耐力の計算結果を示す。いずれの供試体においても、実験では部材降伏荷重では1度荷重が減少した後、勾配を緩やかにしながら再び荷重が増加する。既往の研究<sup>3) 4)</sup>によれば、サンドイッチ床版の押抜きせん断耐力は、鉄筋コンクリートスラブに比べてせん断抵抗メカニズムが異なり、引張鋼材補強量を同一とした場合、RCよりも小さくなることが指摘されている。これは、RCの場合の押抜きせん断破壊面における引張鉄筋のダウエル作用(ダボ作用)があまり期待できないからであると考えられる。既往の研究では、RCの押抜きせん断耐力式をそのままサンドイッチ床版に適用した場合、その耐力は危険側に予測することが示されている。本研究の供試体において、部材降伏が押抜きせん断によるものと考えれば、既往の研究とほぼ同様の結果となった。

#### (5) 圧縮フランジ鋼板の座屈耐力

以下では、タイバー間での圧縮フランジに対して座屈耐力の検討を行った。長柱の座屈に対する荷重は、オイラーの公式によって与えることができる。次式は、一般式から与えられる座屈応力を表したものである。

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 EI}{A \cdot l^2} = k \frac{\pi^2 E_s}{12} \left( \frac{t_f}{s} \right)^2 \quad (7)$$

ここに  $b$  : 供試体幅

$E_s$  : フランジ鋼板のヤング係数

$t_f$  : フランジ鋼板の厚さ

$k$  : 両端単純支持の場合 (=1)

両端固定の場合 (=4)

タイバー間で座屈を起こす圧縮フランジは、タイバーが離散的に配置されているため、両端の境界条件が明確ではない。そこで、単純支持と固定の2つ場合について計算を行った。座屈時の荷重の算定については、断面のひずみおよび応力とも 3.3.(1)の曲げ降伏耐力を求めたときと同様の仮定を用いて算定した。

算定値を表-7に示す。実験において、圧縮鋼板の座屈を起こした供試体はSP300であり、その破壊荷重は829kNであった。この算定方法では、計算上の境界条件(タイバー位置)を単純支持とした場合で372.4kN( $k=1$ )、固定で1489.6kN( $k=4$ )となり、実験値は両者の算定値の間にある結果となった。逆にSP300の実験値から適合する $k$ の値を算出すると、2.2程度である。したがって、両端では半剛結な状態であり、座屈長が2倍程度になっているためと思われる。タイバーの配置間隔が異なれば、おそらく境界条件も異なり $k$ の値も変化すると考えられるが、もし、 $k=2.2$ を用いて他の供試体の座屈耐力を算出すれば、803kN(SP350)、1436kN(SP250)となり、両者とも実験における最大荷重を上回る。この2つの供試体においては圧縮鋼板の座屈が生じていないことから、上記方法が妥当である可能性を示しているが $k$ の値については検討の余地がある。

表-7 圧縮鋼板の座屈耐力

供試体	境界条件	$\sigma_{cr}$ (MPa)	座屈耐力 (kN)
SP350	単 純	48.3	365
	固 定	193.4	1461
SP300	単 純	65.8	372
	固 定	263.2	1490
SP250	単 純	95.8	653
	固 定	379.0	2612

#### 4. まとめ

フルサンドイッチ床版において、タイバーの配置間隔を変数として実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 配置間隔が大きくなるにつれて、終局荷重が減少する傾向があることが明らかとな

った。また、配置間隔によって部材の破壊形式は異なり、タイバー間での斜めひび割れ発生による破壊、タイバー間の圧縮フランジの座屈による破壊が観察された。

- 2) 曲げ降伏耐力をはりとして算定を行った場合、計算値が実験値を上回った。実験では引張フランジが全幅にわたって降伏しておらず、載荷直下の局所的な領域だけが降伏していることが確認された。
- 3) はりとして計算されたせん断耐力は、せん断破壊したSP350の供試体と比較したところ、概ね計算値と実験値が一致しており、妥当な評価を与える。
- 4) 荷重-変位曲線における「部材降伏荷重」は、押抜きせん断の影響によるものと思われる。部材降伏荷重が押抜きせん断によるものとすれば、その耐力はRC部材の押抜きせん断耐力式による算定値より危険側の値となる。
- 5) 圧縮フランジの座屈耐力は、SP300の供試体と比較したところ、実験値は計算上の座屈領域の鋼板における支持条件を単純支持とした場合と固定支持とした場合の算定値の間にあると結果となった。

#### 参考文献

- 1) 上田多門、塩屋俊幸；鋼コンクリート系サンドイッチ構造、コンクリート工学、Vol.30, No.4, pp.5-20, 1992.5
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書「設計編」平成8年制定、土木学会、1996.3
- 3) K. Sonoda and H. Kitoh : Failure Modes and Capacities of Steel Plate and Concrete Composite Slabs with Different Arrangement of Stud Connectors, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, pp.509-514, Sep. 1991
- 4) 高橋良輔ほか；鋼コンクリートオープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊に対する引張鋼材比の影響、第53回土木学会年次学術講演会講演概要集、CS, pp.330-331, 1998.10