

論文 軽量化した鋼・コンクリート合成部材のせん断耐力

東山浩士^{*1}・上中宏二郎^{*2}・石川敏之^{*3}・有馬博人^{*4}

要旨：鋼・コンクリート合成床版の軽量化を目的に、底鋼板に溶接された溝形鋼内を中空とした合成部材のせん断耐力について基礎的実験を行った。本構造では、従来型の鋼・コンクリート合成床版に比べて単位面積あたりの質量を 10～15%程度軽減できる。本研究では、はり試験体を用いた橋軸方向および橋軸直角方向のせん断耐力について、せん断スパン比の影響を考慮して検討した結果、既往のせん断耐力算定式によって評価できることが分かった。

キーワード：合成床版、軽量化、溝形鋼、せん断耐力、せん断スパン比

1. はじめに

鋼道路橋床版の高耐久性、長支間化、経済性に対応するために種々の鋼・コンクリート合成床版(以下、合成床版と呼ぶ)が研究開発され、実施工されてきた。一方で、鋼道路橋全体の死荷重に占める床版の割合は大きく、合成床版はその一部が鋼部材により構成されているため、必然的に同体積の鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版と呼ぶ)よりも質量が増加する。橋脚部材への負担軽減、耐震性の向上を考えると、床版自重の軽減が望ましいことは言うまでもない。これまでも合成部材の軽量化を目的としたいくつかの研究が見られ、本研究で提案する構造と同様に、合成床版を構成する鋼部材に軽量溝形鋼を用いて床版内部を中空とした構造¹⁾や軽量コンクリートを用いてコンクリート自体を軽量化した構造²⁾が検討されている。

園田ら¹⁾による研究では、底鋼板に溶接した軽量溝形鋼と溝形鋼上面に溶接した鉄筋をずれ止めとした合成床版の正曲げ、負曲げ強度および継手部の強度について設計計算値との比較がなされ、その安全性が検討されている。

著者らは園田らによる研究と同様に、溝形鋼

を橋軸直角方向に配置し、ずれ止めとしては頭付きスタッドジベル(以下、スタッドと呼ぶ)を併用した合成床版のはりモデルによる橋軸直角方向のせん断耐力および疲労破壊性状について、これまで検討を行ってきた³⁾。本研究では、合成床版の橋軸方向および橋軸直角方向をはり状にしたモデルのせん断耐力について、せん断スパン比(a/d)の影響と既往のせん断耐力算定式の適用性を検討した。また、せん断耐力算定における本構造の有効高さについても検討した。

2. 軽量化した合成床版

2.1 本合成床版の特徴

本合成床版は、図-1に概略図を示すように、底鋼板、溝形鋼、スタッド、鉄筋およびコンクリートから構成される。溝形鋼を橋軸直角方向に溶接した底鋼板は、型枠の用途だけでなく架設時に作用する荷重に抵抗するという特徴を有している。底鋼板とコンクリートとのずれに対して、橋軸方向は溝形鋼とスタッドが、橋軸直角方向はスタッドが抵抗する。

スタッドの高さは、鋼構造物設計指針 PART B⁴⁾に準拠し、圧縮側鉄筋位置付近に至るまでと

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科講師 博(工) (正会員)

*2 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科助教授 博(工) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科特任研究員 博(工)

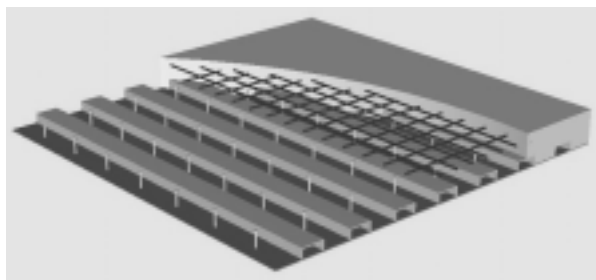
*4 バウエンジニアリング 修(工)

表－１ 合成床版の質量比較

項目	ロビンソン型	波形鋼板	成型鋼板	本合成床版
床版厚(mm)	259	365	260	260
底鋼板厚(mm)	9	6	6	6
質量(kg/m ²)	700	730	718	633
質量比	1.11	1.15	1.13	1.00

表－２ コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
20	53	44	183	345	748	972	3.66



図－１ 本合成床版の概略図

した。また、溝形鋼の高さは、床版厚の 1/3 程度とした。これは、合成床版の押抜きせん断破壊時に発生すると推察される斜めせん断ひび割れが溝形鋼上面を伝播する可能性があり、中立軸より上側の圧縮側コンクリートの厚さをある程度確保することによってコンクリートのせん断抵抗を期待するためである。

2.2 質量比較

軽量化を図るために溝形鋼内部を中空としている本合成床版が代表的な合成床版（ロビンソン型、波形鋼板、成型鋼板）と比べてどの程度軽量化できるのかを検討した。文献 5) を参考に、床版支間長 6.0m、張出し長 2.0m、床版厚 260mm（底鋼板厚 6mm を含む）の条件にて道路橋示方書⁶⁾および鋼構造物設計指針 PART B⁴⁾に準拠した許容応力度設計法による試設計を行った。なお、溝形鋼（高さ 75mm、幅 180mm）は 400mm 間隔で配置し、スタッド（Φ16mm）は溝形鋼の間に 300mm 間隔で 1 列配置する。また、鋼種は底鋼板が SM400、溝形鋼が SS400、コンクリートの設計基準強度は 30N/mm²とした。

代表的な合成床版と本合成床版の単位面積あたりの質量を表－１に示す。その結果、本合成床版は代表的な合成床版と比べて 10～15% 程度軽量化されることが分かる。

3. 実験概要

3.1 試験体

試験体は、図－２に示すように、合成床版の橋軸直角方向（A type）および橋軸方向（B type）をはり状にしたモデルとした。各試験体ともに、幅 300mm、高さ 150mm（底鋼板厚 6mm を含む）を一定とし、せん断スパン比の影響を調べるために支間長を 600mm、900mm、1500mm とした。溝形鋼には幅 100mm、高さ 50mm のものを使用し、底鋼板にすみ肉溶接（脚長 4mm）により取り付けた。ずれ止めにはスタッド（Φ13mm）を用い、上・下鉄筋には D13 をそれぞれ 2 本用いた。

3.2 使用材料

試験体に使用したコンクリートの配合表および材料試験結果をそれぞれ表－２および表－３に、また、鋼材の機械的性質を表－４に示す。

3.3 載荷方法

載荷方法は、写真－１に示すように、単純支持した試験体の支間中央に、幅 70mm の載荷板とローラーを設置し、容量 500kN 油圧ジャッキにより中央載荷した。ここで、本研究では、支点から載荷板端までの距離をせん断スパンとする。

表－３ コンクリートの材料試験結果

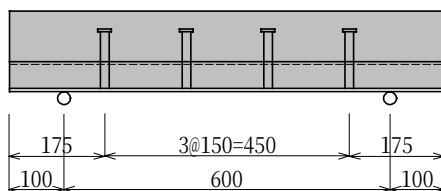
圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
32.3	29.4	0.208

表－４ 鋼材の機械的性質

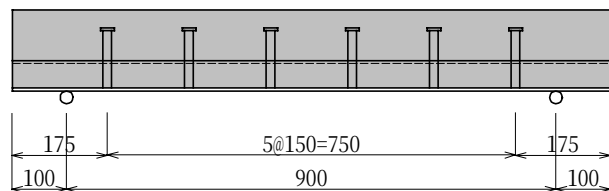
鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
底鋼板	313	471	31
溝形鋼	360	438	35
スタッド	359	492	36



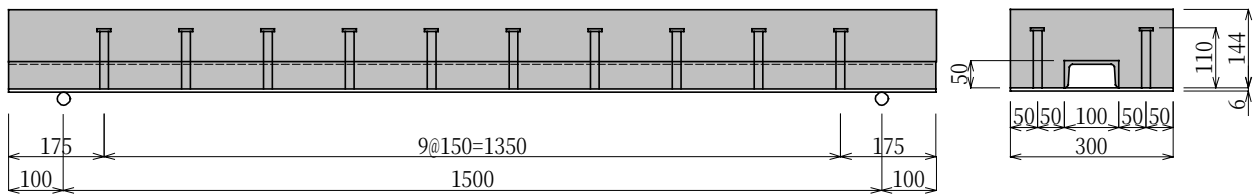
写真－１ 荷重状況



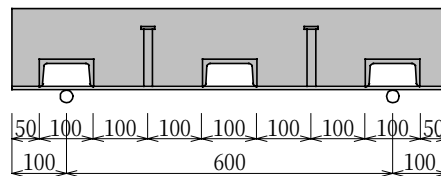
(a) 試験体 A-1



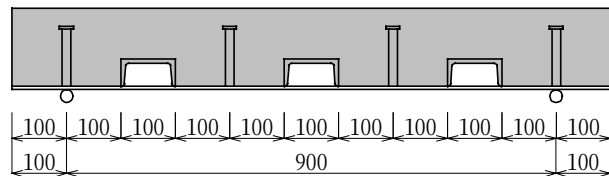
(b) 試験体 A-2



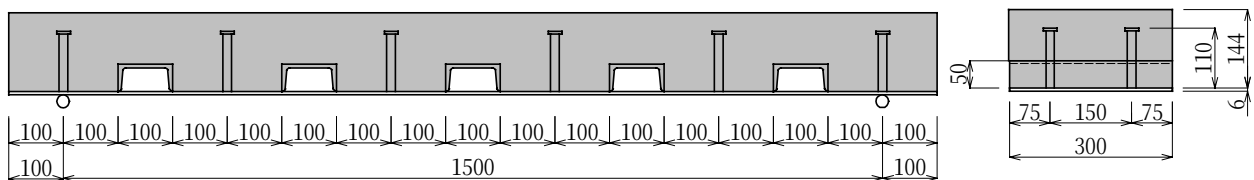
(c) 試験体 A-3



(d) 試験体 B-1



(e) 試験体 B-2



(f) 試験体 B-3

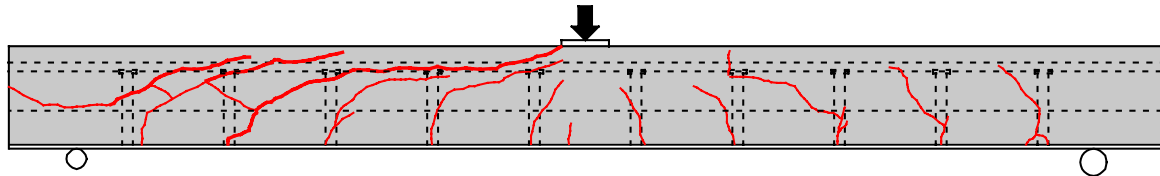
図－２ 試験体一覧

4. 実験結果と考察

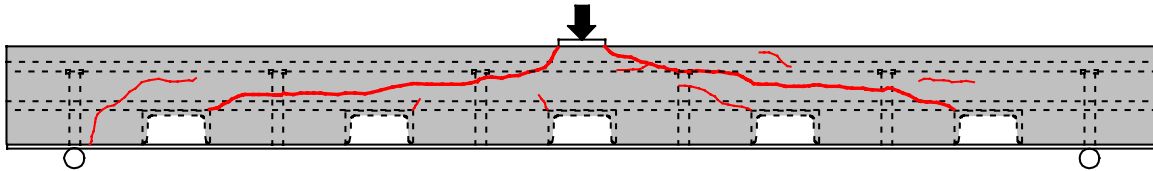
4.1 破壊性状および変形状

試験体 A-3 および試験体 B-3 の終局状態におけるひび割れ図を図－３に、また、荷重と支間

中央たわみの関係を図－４に示す。試験体 A-3 では、スタッド位置の近傍から曲げひび割れが先行して発生した。その後、せん断スパン内に曲げせん断ひび割れが発生したが、すぐさま荷

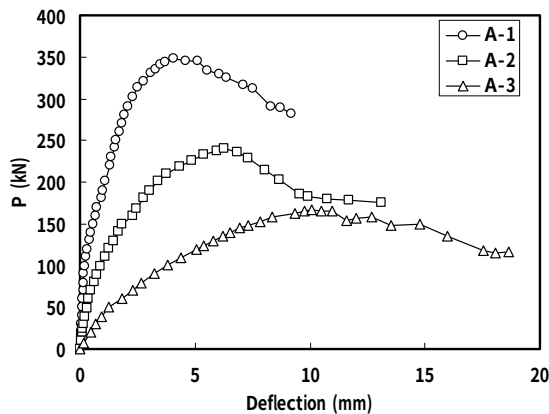


(a) 試験体 A-3



(b) 試験体 B-3

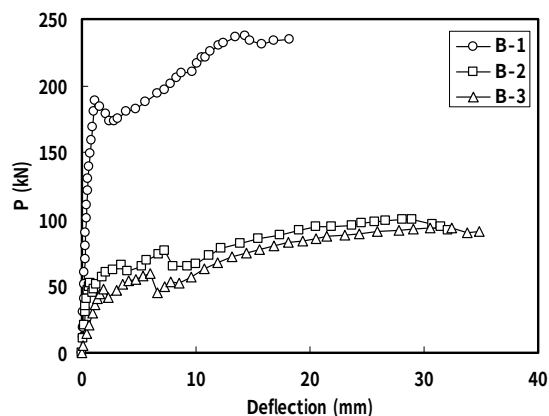
図－３ ひび割れ発生状況



(a) A type 試験体

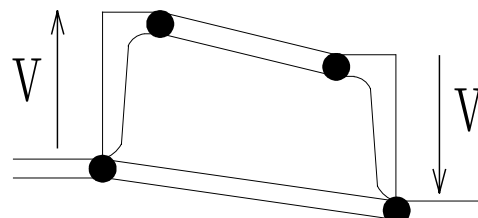


写真－２ 溝形鋼の終局状態 (試験体 B-2)



(b) B type 試験体

図－４ 荷重－たわみの関係

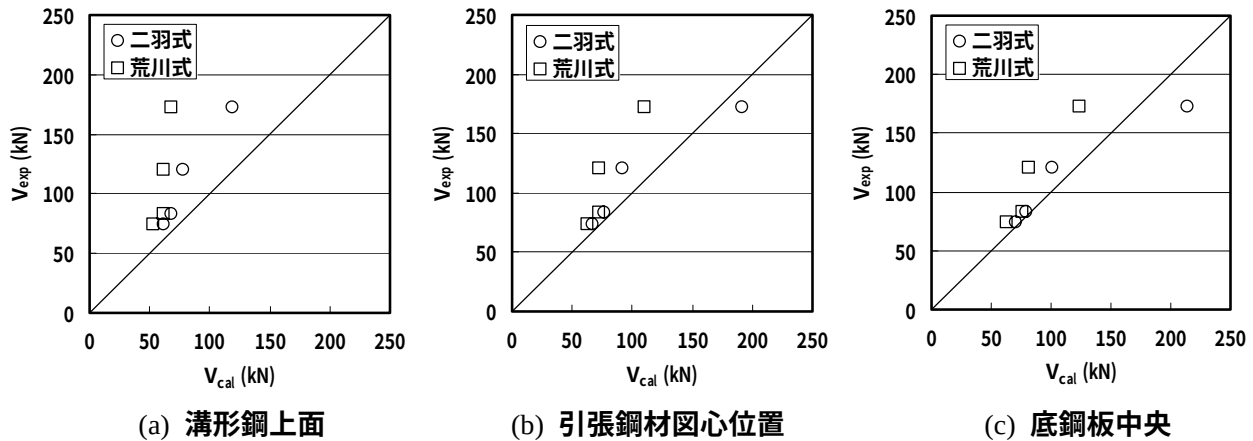


図－５ 塑性ヒンジの形成モデル

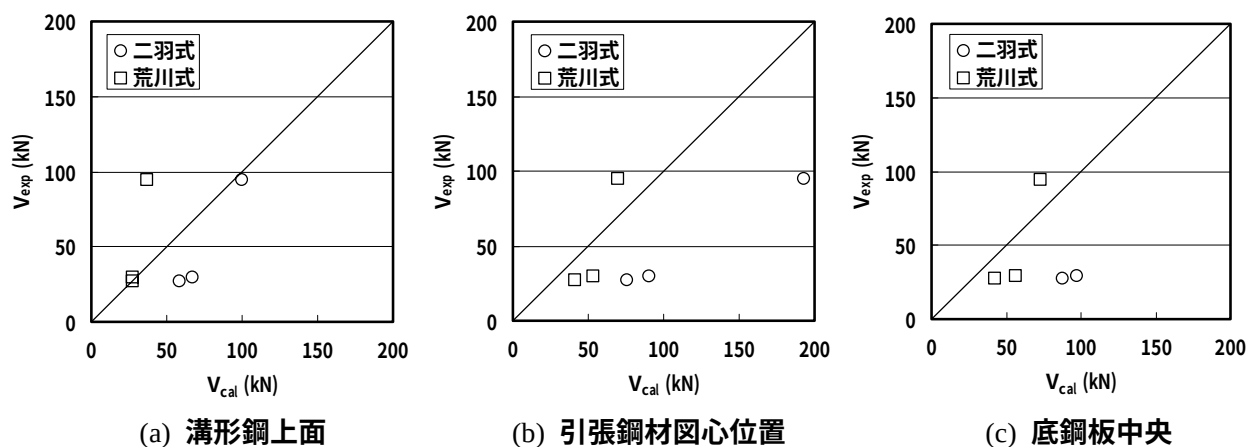
重の低下は見られなかった。これは、曲げせん断ひび割れ発生後、タイドアーチ機構に移行したためと考えられる。他の A type 試験体も同様な傾向を示した。また、最大荷重に至るまでに底鋼板や溝形鋼が降伏することはなかった。さ

らに、図－４(a)から、A type 試験体のせん断耐力は、せん断スパン比の増加に伴って顕著に低下することが分かる。

図－３(b)から、B type 試験体では、曲げひび割れは発生せず、溝形鋼の隅角部から斜めせん断ひび割れが発生して荷重が一旦低下した。その後は、写真－２および図－５に示すような支点に近い溝形鋼がせん断変形し始め、塑性ヒンジが溝形鋼と底鋼板に形成され終局に至ったと考えられる。試験体 B-2 および試験体 B-3 に関



図－6 実験結果と計算結果との比較（A type 試験体）



図－7 実験結果と計算結果との比較（B type 試験体）

しては、せん断耐力に差はほとんどなかった。しかし、試験体 B-1 は支点上に溝形鋼が配置されたため、他の試験体と異なり、支点上の底鋼板が局部的に変形し始め、斜めひび割れの発生、鋼材の局部降伏により終局に至った。

4.2 有効高さとせん断耐力

せん断耐力の算定を行うために本試験体の有効高さを検討する。これまでに提案されている、二羽らの斜めせん断耐力式⁷⁾とディープビームのせん断耐力式⁸⁾、すなわち、せん断圧縮破壊に対する算定式、ならびに、荒川⁹⁾のせん断ひび割れ強度式とせん断終局強度式を用いて、本試験体の有効高さを変化させたときの実験値と計算値との関係を調べた。

鉄筋コンクリートはりでは、はり上縁から引張側鉄筋位置までの高さを有効高さとするが、本試験体の断面構成においては、溝形鋼、底鋼

板および引張側鉄筋が引張力を受け持つと考えられる。そこで、A type 試験体については、有効高さをはり上縁から、(a)溝形鋼上面まで、(b)溝形鋼、底鋼板および引張側鉄筋の引張鋼材図心位置まで、(c)底鋼板中央までの3ケースを仮定し、二羽らの斜めせん断耐力式とディープビームのせん断耐力式、荒川のせん断終局強度式と実験結果（せん断耐力）との比較を文献 4)の試験体 (S-150) 1 体を含めて行った。また、B type 試験体については、(a)溝形鋼上面まで、(b)底鋼板および引張側鉄筋の引張鋼材図心位置まで、(c)底鋼板中央までの3ケースを仮定し、二羽らの斜めせん断耐力式とディープビームのせん断耐力式、荒川のせん断ひび割れ強度式と実験結果（斜めせん断ひび割れ耐力）との比較を行った。その結果を図－6、7 および表－5 に示す。

表－５ せん断耐力算定結果

試験体		実験値 V_{exp} (kN)	計算値 V_{cal} (kN)					
			(a) 溝形鋼上面		(b) 引張鋼材図心位置		(c) 底鋼板中央	
			二羽式	荒川式	二羽式	荒川式	二羽式	荒川式
A type	A-1	172.5	119.1 (1.45)	67.7 (2.55)	191.4 (0.90)	110.4 (1.56)	213.6 (0.81)	123.9 (1.39)
	A-2	120.5	78.0 (1.54)	62.2 (1.94)	91.6 (1.32)	72.4 (1.66)	101.2 (1.19)	81.0 (1.49)
	A-3	83.5	68.3 (1.22)	62.2 (1.34)	77.2 (1.08)	72.4 (1.15)	79.2 (1.05)	75.8 (1.10)
	S-150	74.0	61.2 (1.21)	53.5 (1.38)	67.0 (1.10)	62.3 (1.19)	71.0 (1.04)	62.7 (1.18)
B type	B-1	94.5	100.4 (0.94)	37.2 (2.54)	193.4 (0.49)	69.4 (1.36)	205.4 (0.46)	73.3 (1.29)
	B-2	29.5	67.0 (0.44)	27.7 (1.06)	90.5 (0.33)	53.5 (0.55)	97.3 (0.30)	56.8 (0.52)
	B-3	27.0	58.6 (0.46)	27.7 (0.97)	75.8 (0.36)	41.1 (0.66)	87.7 (0.31)	42.3 (0.64)

()内は、実験値/計算値

図－６および表－５より、A type 試験体は有効高さを上記(c)の底鋼板中央までとすることによって二羽式とよく一致する結果を得た。また、図－７および表－５より、B type 試験体は有効高さを上記(a)の溝形鋼上面までとすることによって試験体 B-1 を除く他の試験体は荒川のせん断ひび割れ強度式とよく一致する結果を得た。試験体 B-1 は二羽式に近い結果となった。しかし、試験体 B-1 は支点上に溝形鋼が配置されたため、支点上の底鋼板の局部変形が先行して生じたことから、正確なせん断耐力の評価はできていないと考えられる。

5. まとめ

鋼・コンクリート合成床版の軽量化を目的に、溝形鋼を設けた合成床版のはりモデルによるせん断耐力実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 橋軸直角方向をモデルとした A type 試験体の有効高さを底鋼板中央までとすることによって、せん断耐力を二羽式により算定することができた。
- (2) 試験体 B-1 を除いて、橋軸方向をモデルとした B type 試験体の有効高さを溝形鋼上面までとすることによって、せん断ひび割れ耐力を荒川式により算定することができた。

参考文献

- 1) 園田恵一郎ほか：鋼型枠補強コンクリート

合成床版の静的強度、コンクリート工学年次講演論文集、Vol.3, pp.337-340, 1981

- 2) 合田寛基ほか：短繊維補強された超軽量コンクリートの鋼・コンクリート合成構造への適用に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.2, pp.1459-1465, 2002
- 3) 東山浩士ほか：軽量化した鋼・コンクリート合成床版の提案とはり試験体による基礎的実験、平成 18 年度土木学会関西支部年次学術講演会、I-70, 2006.5
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B, 鋼構造シリーズ, 1997.10
- 5) 日本橋梁建設協会：デザインデータブック, pp.64-67, 2003.7
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002
- 7) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372/V-5, pp.167-176, 1986
- 8) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.119-128, 1983
- 9) 荒川 卓：鉄筋コンクリート梁の許容せん断応力度とせん断補強について、コンクリートジャーナル、Vo.8, No.7, 1970