

## 5. ずれ止めをせん断補強筋として用いた鋼・超軽量コンクリート合成はりの曲げせん断特性に関する研究

尾上 佑介

### 1. 目的

鋼・コンクリート合成構造は、水密性が良好、省力化が可能、靱性に優れ、修復が容易といった特長から、浮き桟橋をはじめとする港湾構造物に多く採用されている。一方で、鋼構造に比べて重量があり、架設や係留設備が大掛かりで、不経済であるといった問題を抱えていることから、経済性、施工性の向上が期待できる軽量化の一方策として、超軽量コンクリートの適用が有用視されている。また、鋼とコンクリートの一体化に用いられるずれ止めを長尺化し、せん断補強筋としても機能させることで、施工の簡略化とさらなる合理的設計が可能になると考えられる。そこで本研究では、超軽量コンクリートおよび長尺ずれ止めの鋼・コンクリート合成構造への適用を目的として、ずれ止めをせん断補強筋として用いた鋼・超軽量コンクリート合成はりの曲げせん断特性について検証を行った。

### 2. 内容

#### 2.1 合成はりの力学特性および耐力算定方法

供試体は、鋼板と超軽量コンクリートを高さ 200mm の長尺ずれ止めで一体化した長さ 1800mm、幅 200mm、高さ 256mm の単純合成はりである。図 1 に供試体一般図を示す。パラメータは表 1 に示すように荷重方向、長尺ずれ止めの配置間隔および種別とし、計 8 種類の供試体を 1 体ずつ製作した。荷重方向は正曲げ (P) と箱型断面の隅角部付近を想定した負曲げ (N) とし、長尺ずれ止めの配置間隔は 100mm (100) と 200mm (200)、種別はずれ止めとして一般的なスタッドジベル (S) とせん断補強筋にずれ止め機能を期待した異形鉄筋ジベル (D) とした。また、超軽量コンクリートには膨張頁岩を原料とした人工軽量骨材を粗骨材および細骨材に使用し、比重が 1.4、水中養生 14 日時点の圧縮強度が  $35\text{N/mm}^2$ 、スランプが  $18\pm 2\text{cm}$ 、空気量が 5.0%となるように配合設計した。表 2 に示方配合を示す。荷重方法は支間中央から 150mm 支点側への 2 点線荷重とし、破壊まで漸増荷重を行った。

表 3 に試験結果を示す。正曲げで長尺ずれ止めの配置間隔が 100mm の 2 体が曲げ破壊、他の 6 体がせん断破壊で終局に至った。図 2 に正曲げの荷重-たわみ曲線を示す。曲げ破壊した供試体は終局時に靱性に富んだ挙動を示し、長尺ずれ止めのせん断補強効果が確認された。一方、せん断破壊した供試体はひび割れ発生後に曲げ剛性が低下し、鋼板の降伏前に終局に至っている。図 3 に正曲げの荷重-ずれ曲線を示す。荷重初期段階では鋼板とコンクリートの付着によりずれは生じなかったが、ひび割れ発生荷重付近で両者の付着が切れてずれが発生した。また、たわみ性状と同様にずれ止め種別によるずれ性状に差はなかったことから、異形鉄筋ジベルはスタッドジベルと同様のずれ止め性能を

表 1 供試体の種類

Type	荷重方向	長尺ずれ止め		
		配置間隔 [mm]	種別	径および 呼び名
P-100S	正曲げ	100	スタッド	$\phi 16$
P-100D			異形鉄筋	D16
P-200S		200	スタッド	$\phi 19$
P-200D			異形鉄筋	D19
N-100S	負曲げ	100	スタッド	$\phi 16$
N-100D			異形鉄筋	D16
N-200S		200	スタッド	$\phi 19$
N-200D			異形鉄筋	D19

表 2 示方配合

水セメント比 W/C [%]	細骨材率 s/a [%]	単位置 [kg/m <sup>3</sup> ]						
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE減水剤 SP	AE助剤 AE	分離 抵抗剤 B
50	43	180	360	459	345	3.6	3.6	1.0

図 1 供試体一般図

表3 試験結果

Type	試験値 最大荷重 P [kN]	曲げ耐力 Pu [kN]	計算値			P/Pu	P/(Pc+Ps)	破壊形式
			Pc [kN]	Ps [kN]	Pc+Ps [kN]			
P-100S	247	204	118	95	213	1.21	-	曲げ
P-100D	242	203	114	105	219	1.19	-	曲げ
P-200S	215	204	115	96	211	-	1.02	せん断
P-200D	200	204	113	90	203	-	0.99	せん断
N-100S	151	217	84	49	133	-	1.14	せん断
N-100D	151	217	83	43	126	-	1.20	せん断
N-200S	103	217	85	30	115	-	0.90	せん断
N-200D	139	217	86	44	130	-	1.07	せん断

有していることがわかった。図4にひび割れ進展状況を示す。曲げ破壊した供試体ではひび割れがずれ止めに沿って分散し、斜め引張ひび割れは見られなかったことから、長尺ずれ止めは適正に配置することでせん断補強筋として十分機能することがわかった。一方、せん断破壊した供試体ではひび割れが分散せずに斜め引張ひび割れ

が発生し、ずれ止め頭部周辺では水平方向のひび割れに進展した。次に、本試験結果から耐力算定方法の検討を行った。曲げ耐力の算定には等価応力ブロック法によるRC断面の曲げ破壊モーメント式を準用した。曲げ破壊した供試体の試験値は計算値に対して1.2程度で安全側評価を示しており、曲げ耐力は既往の算定方法で評価できることがわかった。また、せん断耐力はコンクリートとせん断補強筋の分担分の和で表され、コンクリートの分担分はコンクリート標準示方書の耐力式のもとになった式を用いて算定を行った。なお、この式を軽量コンクリート部材に適用する場合、一律70%に低減することが規定されているが、比重や品質の違いを反映できず、耐力を過大あるいは過小評価する可能性があるため、次式に示す脆度係数(圧縮強度/引張強度)を考慮した低減係数 $\eta$ を採用した。

$$\eta = 0.84 \eta_{\xi} + 0.32, \quad \eta_{\xi} = \xi / \xi_N$$

ここで、 $\xi$ は脆度係数の逆数、 $\xi_N$ は普通コンクリートの脆度係数の逆数である。次に、せん断補強筋の分担分はせん断補強筋の降伏が成立限界であるトラス理論により算定されるが、図5に示すようにせん断破壊した供試体の長尺ずれ止めは終局時に降伏しておらず、トラス理論による計算値はかなりの過大評価となる。また、せん断破壊した供試体はずれ止め頭部周辺に水平方向のひび割れが確認され、これが原因で最終的な破壊に至っている。そこで、水平方向ひび割れが発生した領域を水平抵抗領域と定義し、長尺ずれ止めのせん断補強効果を水平抵抗領域におけるコン

クリートの引張耐力とみなして耐力の算定を行った。図6に水平抵抗領域の概念図を示す。水平抵抗領域の始点は載荷板の端から45°の角度でおろした直線が長尺ずれ止めの頭下部に達した位置とし、領域長さは終局時における領域内ずれ止めの引張力の総和と水平抵抗領域におけるコンクリートの引張耐力が一致するような長さとした。以上の方法で算定されたコンクリートとせん断補強筋の分担分の和をせん断耐力の計算値として、せん断破壊した供試体の試験結果と比較すると、試験値は計算値に

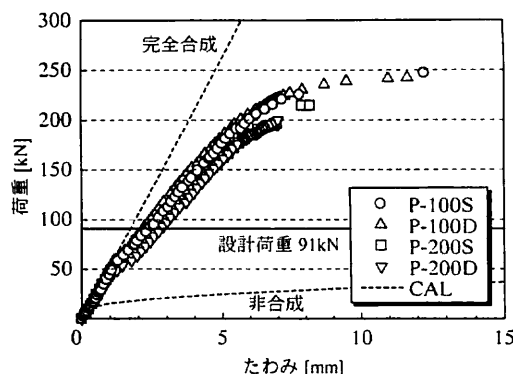


図2 荷重-たわみ曲線(支間中央)

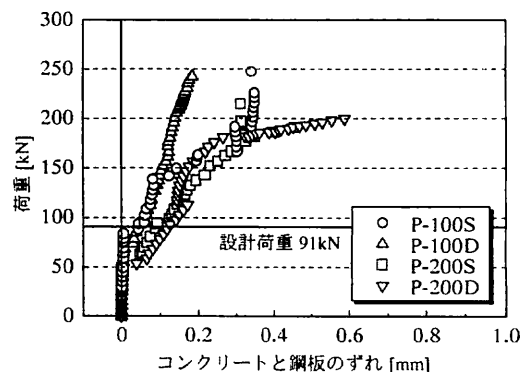


図3 荷重-ずれ曲線(支点近傍)

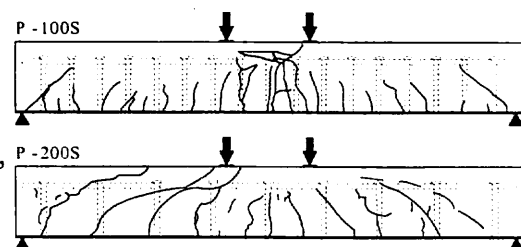


図4 ひび割れ進展状況

対して 0.9~1.2 で比較的一致した。このことから今回検討した算定方法は、超軽量コンクリートの材料特性を反映でき、さらに長尺ずれ止めが降伏しない場合におけるせん断補強効果を評価できることがわかった。

## 2.2 合成はりのせん断破壊メカニズムとずれ止め頭部による補強効果

長尺ずれ止めは適正に配置することでせん断補強筋として十分機能することがわかった。しかし、配置間隔が過大なものはずれ止め頭部周辺に水平方向ひび割れが発生し、せん断破壊で終局に至った。その破壊状況や終局時に長尺ずれ止めが降伏していなかったことから、超軽量コンクリートの脆性的な材料特性が原因として考えられる。すなわち、せん断破壊メカニズムは次のように仮定できる。曲げの作用下で長尺ずれ止めの下向きの引張力が作用し、ずれ止めの頭下部に局所的な応力が生じる。この応力によってずれ止め頭部周辺の超軽量コンクリートが割裂破壊して水平方向ひび割れが発生し、最終的な破壊に至る。このとき、ずれ止め頭部の支圧面積を大きくすると、頭下部に作用する応力が低減され、より高い荷重域まで水平方向ひび割れの発生を抑制でき、終局耐力の増加とさらにはせん断破壊の回避も期待できる。そこで本節では、せん断破壊した供試体 P-200S を対象として、ずれ止め頭部に着目した合成はりの静的載荷試験ならびに FEM 解析を行い、仮定したせん断破壊メカニズムとずれ止め頭部による補強効果について検証を行った。パラメータは表 4 に示すように長尺ずれ止めの頭径とし、計 2 種類の供試体を 2 体ずつ製作した。頭径は通常の  $\phi 32$  (Type A) と設計範囲内で最大径の  $\phi 45$  (Type B) とした。また、解析モデルは供試体の対称性を考慮して 1/2 モデルとし、軸方向に 106 分割、鉛直方向に 28 分割とした。図 7 に解析モデルを示す。コンクリート、鋼板、長尺ずれ止めの頭部および軸部には 4 節点平面応力要素、軸方向鉄筋には 2 節点はり要素を使用した。また、コンクリートと鋼板の接合面には水平せん断力の伝達による相対的なずれを考慮するため、離散的に分布する長尺ずれ止めを連続的に分布するものと仮定してバネ要素を挿入した。バネ要素には水平バネと鉛直バネを配置し、水平バネ特性は押し抜き試験から得られた非線形の荷重-ずれ関係を図 8 に示すように 2 本の直線で近似し、鉛直バネ特性は肌離れ現象を無視して剛結とみなし、バネ定数は無限大とした。

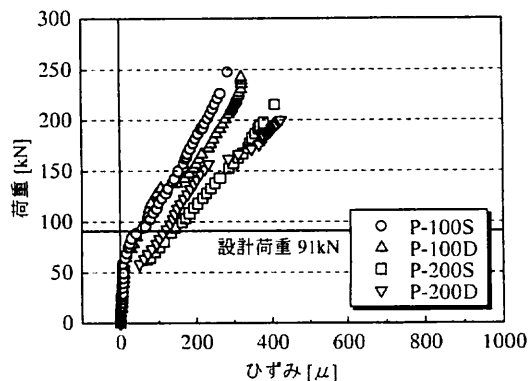


図 5 荷重-ひずみ曲線 (長尺ずれ止め)

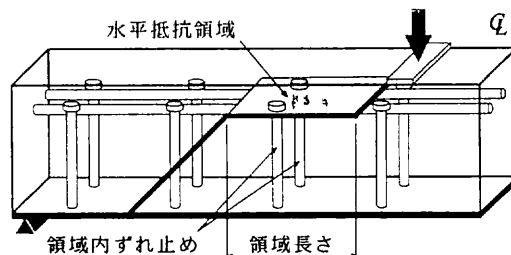


図 6 水平抵抗領域の概念図

水平方向ひび割れが発生し、最終的な破壊に至る。このとき、ずれ止め頭部の支圧面積を大きくすると、頭下部に作用する応力が低減され、より高い荷重域まで水平方向ひび割れの発生を抑制でき、終局耐力の増加とさらにはせん断破壊の回避も期待できる。そこで本節では、せん断破壊した供試体 P-200S を対象として、ずれ止め頭部に着目した合成はりの静的載荷試験ならびに FEM 解析を行い、仮定したせん断破壊メカニズムとずれ止め頭部による補強効果について検証を行った。パラメータは表 4 に示すように長尺ずれ止めの頭径とし、計 2 種類の供試体を 2 体ずつ製作した。頭径は通常の  $\phi 32$  (Type A) と設計範囲内で最大径の  $\phi 45$  (Type B) とした。また、解析モデルは供試体の対称性を考慮して 1/2 モデルとし、軸方向に 106 分割、鉛直方向に 28 分割とした。図 7 に解析モデルを示す。コンクリート、鋼板、長尺ずれ止めの頭部および軸部には 4 節点平面応力要素、軸方向鉄筋には 2 節点はり要素を使用した。また、コンクリートと鋼板の接合面には水平せん断力の伝達による相対的なずれを考慮するため、離散的に分布する長尺ずれ止めを連続的に分布するものと仮定してバネ要素を挿入した。バネ要素には水平バネと鉛直バネを配置し、水平バネ特性は押し抜き試験から得られた非線形の荷重-ずれ関係を図 8 に示すように 2 本の直線で近似し、鉛直バネ特性は肌離れ現象を無視して剛結とみなし、バネ定数は無限大とした。

表 4 供試体の種類

Type	載荷方向	長尺ずれ止め			
		配置間隔 [mm]	種別	頭径	軸径
P-200S	A	200	スタッド	$\phi 32$	$\phi 19$
	B			$\phi 45$	

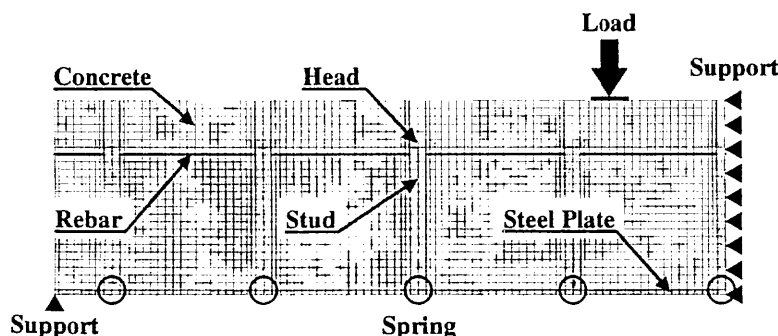


図 7 解析モデル (Type B)

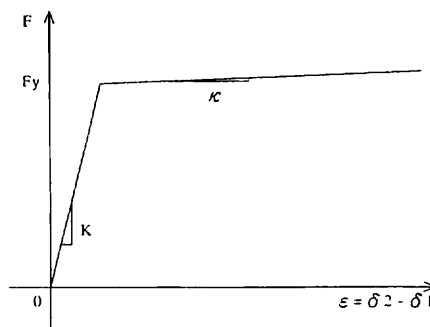


図 8 水平バネ特性

表 5 試験結果

Type	試験値	計算値			P/(Pc+Ps)	破壊形式
	最大荷重 P [kN]	せん断耐力				
		Pc [kN]	Ps [kN]	Pc+Ps [kN]		
A1	216	122	83	205	1.05	せん断
A2	231	122	90	212	1.09	せん断
B1	276	123	149	272	1.01	せん断
B2	262	123	144	267	0.98	せん断

表 5 に試験結果を示す。Type A, B ともにせん断破壊で終局に至った。図 9 に荷重-たわみ曲線を示す。全体を通して Type A, B の挙動に差は見られなかったが、Type A は約 220kN, Type B は約 270kN で終局に至っており、ずれ止め頭部による補強でせん断破壊は回避できなかったものの、頭下部の支圧面積を約 2 倍にすると耐力は約 1.2 倍に増加した。また、解析値は初期剛性やその後のたわみ挙動など試験値とよく一致している。図 10 にひび割れ進展状況を示す。ひび割れは Type A, B ともにずれ止めの根元から発生し、30~45° の傾きで斜め引張りひび割れに進展していることが確認できる。解析によるひび割れも同様の傾向を示しており、試験結果を精度良く再現できているといえる。また、Type A, B ともに水平方向ひび割れの発生によって終局に至ったが、Type B の方がより高い荷重域までその発生を抑制できることがわかった。図 11 に 200kN 時のずれ止め頭部周辺の応力分布を示す。ずれ止めの頭下部に局所的な引張応力が作用しているのが確認できる。これは長尺ずれ止めの下方向への引き抜き作用によるものと考えられ、仮定したせん断破壊メカニズムは妥当であるといえる。

3. 結論

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- ① 長尺ずれ止めは、適正に配置することでせん断補強筋として十分機能する。
- ② 異形鉄筋ジベルは、スタッドジベルと同様のずれ止め性能を示す。
- ③ 曲げ耐力は、既往の RC 曲げ耐力式を適用して算定できる。
- ④ コンクリートの分担せん断耐力は、脆度係数を考慮した低減係数を用いて算定することで、超軽量コンクリートの材料特性を反映できる。
- ⑤ せん断補強筋の分担せん断耐力は、終局時に長尺ずれ止めが降伏しない場合、長尺ずれ止め作用する引張力とずれ止め頭部周辺のコンクリートに作用する引張力の関係から評価できる。
- ⑥ せん断破壊は、長尺ずれ止めの下方向への引き抜き作用と超軽量コンクリートの脆性的な材料特性にともなう水平方向ひび割れの発生が原因となって起こる。
- ⑦ ずれ止め頭部による補強は、より高い荷重域まで水平方向ひび割れの発生を抑制することにより、終局耐力を増加させることができる。

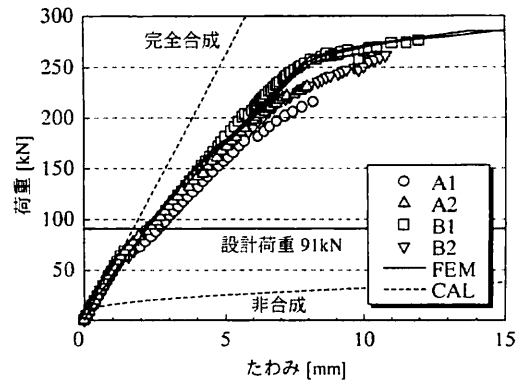


図 9 荷重-たわみ曲線 (支間中央)

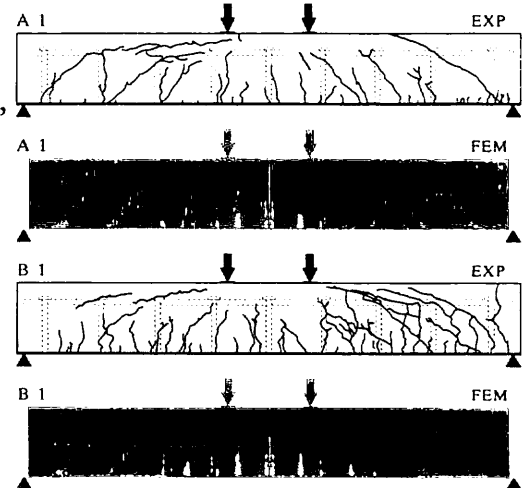


図 10 ひび割れ進展状況

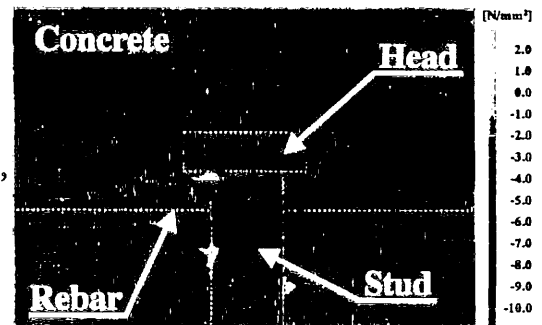


図 11 応力分布 (Type A : 200kN 時)

## **5. A Study on Flexural and Shear Characteristics of Steel-Super Lightweight Concrete Composite Beams using Shear Connecters as Web Reinforcements**

**Yusuke ONOUE**

Steel-concrete composite structures integrated by shear connectors are the third structure to follow steel structures and concrete structures. And steel-concrete composite structures have been applied to port structures such as floating piers, caissons and immersed tubes, because of having high water-tightness, good toughness and durability. However there are some problems that steel-concrete composite structures are heavier than steel structures and expensive due to necessity of large mooring. Therefore, it is expected that super lightweight concretes, which enable reduction of dead loads, will be applied to steel-concrete composite structures. Super lightweight concretes use artificial lightweight aggregates, and the specific gravity of those is about 1.4. Moreover, in steel-concrete composite structures, shear connectors that used to integrate steel with concrete can function as web reinforcements by lengthening. Therefore, the use of long shear connectors is useful for the improvement of construction and the further rational design. This study presents flexural and shear characteristics of steel-super lightweight concrete composite beams using shear connectors as web reinforcements to consider the application of super lightweight concretes and long shear connectors to steel-concrete composite structures.

In this study, the static loading test on steel-super lightweight concrete composite beams using shear connectors as web reinforcements was carried out to investigate the mechanical property and the calculation method of ultimate strengths. As long shear connectors, stud dowels and deformed bar dowels were used. Furthermore, to elucidate the mechanism of shear failure and the reinforcement effect by the head of stud, the static loading test and the FEM analysis in consideration of the head of stud was carried out.