

軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断特性に関する実験的研究

Experimental Study on Shearing Property of Shear Connectors for Steel and Lightweight Concrete Composite Girder

鈴木喜弥*, 阿部久義**, 平城弘一***, 児島哲朗****, 橘 吉宏*****

Yoshiya SUZUKI, Hisayoshi ABE, Hirokazu HIRAGI,
Tetsuro KOJIMA and Yoshihiro TACHIBANA

- * 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構設計技術室 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)
 ** 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構札幌工事事務所 (〒060-0004 札幌市中央区北四条西 4 伊藤ビル)
 *** 工博 摂南大学, 工学部都市環境システム工学科, 助教授 (〒572-8508 大阪府寝屋川池田中町 17-8)
 **** 川田工業株式会社, 橋梁事業部技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)
 ***** 工博 川田工業株式会社, 橋梁事業部技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

In the composite girder for railway bridge, 3 kinds of shear connectors of U-shaped, perfo-bond strip and headed stud are mainly used. In the shear load bearing capacity calculation formula of these shear connectors, compression strength or bearing strength of the concrete become one parameter. Recently, the practical application of the bridge using lightweight concrete slab is being examined as a trial for cost reduction in railway bridge.

However, the sufficient research has not been made on shear on load bearing capacity characteristics of the shear connectors using such lightweight aggregate concrete in present state. Then, for 3 kinds of shear connectors for composite girder using lightweight aggregate concrete, slippage property, shear load bearing capacity, slippage constant and failure modes of those shear connectors were clarified in this study.

Key Words: Lightweight Concrete, Push-out Test, Shear Connector

キーワード: 軽量骨材コンクリート, 押抜きせん断試験, ずれ止め

1. まえがき

現在、鉄道橋として適用されている鋼橋は、列車走行時における騒音・振動の配慮から、鋼主桁とコンクリート床版とをずれ止めで一体化した合成桁橋が主流になっている¹⁾。その鉄道用合成桁橋のずれ止めには、馬蹄形ジベル、孔あき鋼板ジベル、頭付きスタッドの3種類のずれ止めが使用されており、これらのずれ止めの耐力算定式では、コンクリートの圧縮強度あるいは支圧強度がひとつのパラメーターとなっている。

また、最近の建設業界においては、時代の背景からコスト削減に着目した技術開発が進められ、鉄道橋のコスト削減に着目した取り組みとしては、既設構造の合理化、市場性のある素材・材料・製品の適切な活用、技術開発による新しい構造の研究・開発・実用化が進められている²⁾。そのうち、既設構造の合理化のひとつとして、軽量コンクリート床版が鉄道桁に採用されつつある。

現在の鉄道橋における軽量骨材コンクリートを用いたジベルの設計方法では、細骨材、粗骨材の全部に軽量骨材を用いる場合、軽量骨材コンクリートの曲げ強度、引張強度、付着強度および支圧強度は同一の圧縮強度の普通コン

クリートに比べ 30%程度小さいことから、それらの特性値を普通コンクリートの 70%としている。また、骨材の一部に普通骨材を混ぜて使用する場合の強度の特性値は、類似配合の実績や試験結果などを参考にして、上記の 70%よりも大きくとってよいとしている³⁾。しかし、このような軽量骨材コンクリートに埋め込まれたずれ止めの強度特性については十分な研究がなされていないのが現状である。

そこで本研究では、軽量骨材コンクリートを用いた合成桁で用いる上記3種類のずれ止め形式を対象に、普通コンクリートと軽量骨材コンクリート(本論文では、粗骨材に人工軽量骨材、細骨材に天然砂を用いたコンクリートを軽量骨材コンクリートと称する)の試験体を製作し、静的押抜きせん断試験を行い、その特性について検討を行った。実験では、ずれの挙動の比較、せん断耐力特性とずれ定数の把握および破壊性状に着目し、比較検討を行った。そして、普通コンクリートと軽量骨材コンクリートのコンクリート強度の特性値とずれ止めの強度との関係について考察を行い、設計耐力式の妥当性について検討を行った。本文はこれらの結果を報告するものである。

2. 押抜きせん断試験

2-1 試験体

押抜きせん断試験の試験体は、同一の製作条件と形状寸法で、表-1に示した3種類4タイプのずれ止めを使用した普通コンクリートおよび圧縮強度の異なる3種類の軽量骨材コンクリートで各々3体ずつ、計48体を製作した。試験体の製作は、実橋の主桁上に設置された床版を想定して、文献4)を参考に、各ずれ止めを正立の状態にしてコンクリートを打設した。コンクリートの硬化後、H形鋼のウェブを9mmの添接板を用いて、高力ボルトで接合した。また、鋼材のコンクリート接着面には鋼材の黒皮およびワックス塗布を施すことにより付着力を完全に除去し、載荷初期からせん断力がずれ止めに伝達されるように行った。孔あき鋼板ジベルについては、試験時の鋼板端部への影響を除外するために、鋼板下側には予め発泡スチロールをセットした。押抜きせん断試験に使用したコンクリートの材料特性を表-2に示す。鋼材と鉄筋はそれぞれ、SS400とSD345を使用し、軽量骨材コンクリートの配合は、I種(細骨材は天然砂、粗骨材は人工軽量骨材)とした。

2-2 試験方法

押抜きせん断試験は万能試験機を用い、図-1に示すような載荷・計測システムで行うこととした。

コンクリートブロック下面には速乾性の無収縮モルタルを敷いて試験体が水平に保持できるようにした。また、

H形鋼の載荷部は均等な加力が作用するよう鋼ブロックに球座を設け、H形鋼のフランジのみに荷重が作用するようにウェブ部を切削加工した。

H形鋼とコンクリートブロックの相対ずれ変位量は鋼とコンクリートの接合部の中央(ずれ止め取付け位置)に取り付けた4台の高感度変位計(500×10⁻⁶/mm)を用いて、載荷荷重はロードセルを用いて計測を行った。

載荷方法は、変位が0.1mmに達するまで荷重制御による単調増加載荷法、その後、変位制御による漸増繰返し載荷法で行った。載荷荷重が最大せん断耐力に達した後もずれ止めの変形性能・破壊形式が確認できるまで載荷を続けた。また、馬蹄形ジベルの押抜き試験は、試験体に載荷荷重を作用させていく際、H形鋼両側のコンクリートブロックが上下端でH形鋼のフランジから離れようとする傾向を示すため、「開止め」治具を用いて行った。

ここで、押抜きせん断試験を行うに当たって「頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状」⁴⁾を参考とした。また、データ整理については、文献4)と同様に、最大ずれ量(δ_{max})は最大せん断耐力(Q_{max})に達した時に発生した相対ずれ変位量で、ずれ定数(K)は荷重-ずれ曲線における $Q_{max}/3$ 荷重点の初期割線の傾きとした(図-2)。

表-2 コンクリートの材料特性

試験体タイプ	コンクリート種類	圧縮強度 f_{cu} (N/mm ²)	弾性係数 E (N/mm ²)
BA-1	普通	28.2	27293
BA-2	軽量	31.1	17741
BA-3		37.0	18914
BA-4		48.2	21869
P1-1	普通	29.2	27882
P1-2	軽量	31.1	17741
P1-3		37.0	18914
P1-4		48.2	21869
P2-1	普通	29.2	27882
P2-2	軽量	31.1	17741
P2-3		37.0	18914
P2-4		48.2	21869
ST-1	普通	29.2	27882
ST-2	軽量	31.1	17741
ST-3		37.0	18914
ST-4		48.2	21869

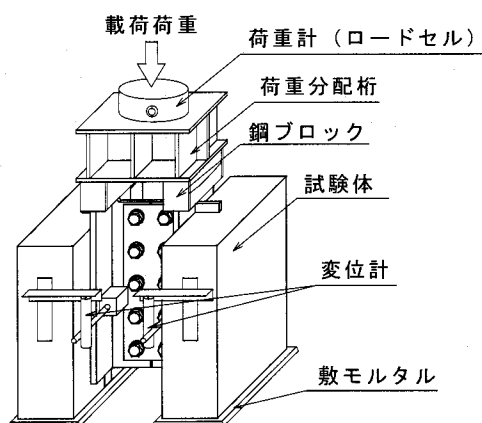


図-1 載荷・計測システム

表-1 試験体の諸元

試験体タイプ	BA-1	BA-2	BA-3	BA-4	P1-1	P1-2	P1-3	P1-4	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4
概要図	馬蹄形ジベル				孔あき鋼板ジベル				孔あき鋼板ジベル				頭付きスタッド			
ずれ止め	馬蹄形ジベル				孔あき鋼板ジベル				孔あき鋼板ジベル				頭付きスタッド			
諸元	ジベル高 ジベル幅 ジベル厚 輪形筋	25mm 110mm 9mm 9φ	鋼板高 鋼板厚 孔径 貫通鉄筋				90mm 9mm 55φ D13	鋼板高 鋼板厚 孔径				90mm 9mm 55φ	スタッド本数 スタッド径 スタッド高さ	2本 19mm 100mm		

3. 押抜きせん断試験結果

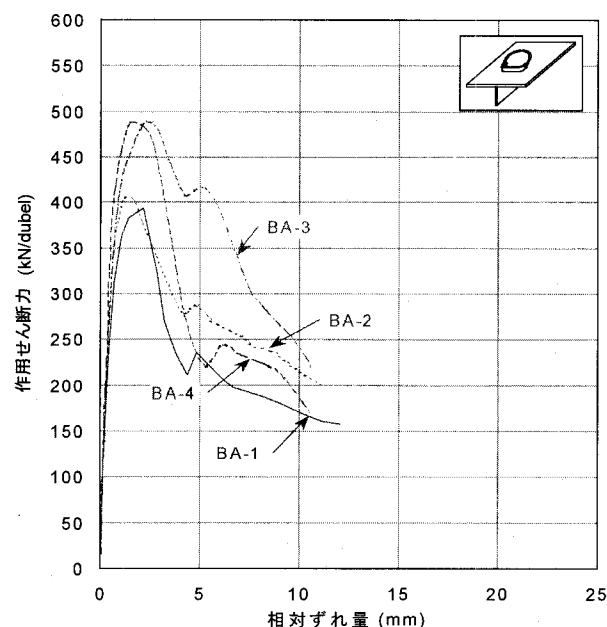
表一3に各試験体の最大せん断耐力 (Q_{max})、最大ずれ量 (δ_{max}) およびずれ定数 (K) をまとめた。図一3～6に各ずれ止めの作用せん断力—相対ずれ変位量を示す。ここで示す曲線は、変位制御による漸増繰返し載荷法で得られた各変位ステップでの最大せん断力のみをプロットして描かれた包絡線である。

ずれ定数とは、ずれ止め単位あたりの載荷初期におけるずれ止め部の単位ずれ量に対するせん断耐力の比で、コンクリートと鋼桁の合成効果の強さを表し、コンクリートと鋼桁の間に働く水平せん断力の分布や合成桁各部の応力に影響を与える指標となる¹⁾。表一3に示す孔あき鋼板ジベルの最大ずれ量は、ずれ量 10mm 未満の値から抽出した。

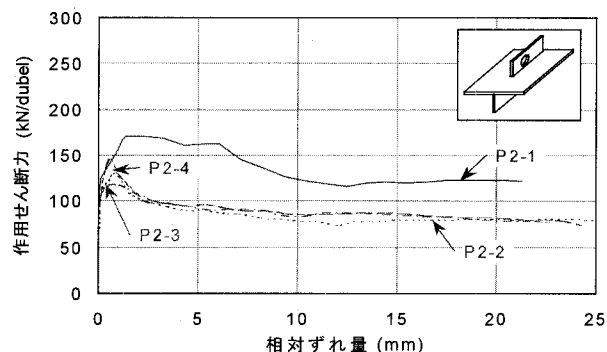
3-1 馬蹄形ジベル

(1) 最大せん断耐力 (Q_{max})

表一3に示すように実験結果の最大せん断耐力は、タイプ BA-1 (普通コンクリート) で、409.4kN、タイプ BA-2 (軽量骨材コンクリート) で、419.0kNであり、コンクリート強度がタイプ BA-2 より大きいタイプ BA-3 は、502.3kNであった。なお、本試験ではコンクリート強度が大きく



図一3 作用せん断力—相対ずれ量 (馬蹄形ジベル)



図一5 作用せん断力—相対ずれ量 (孔あき鋼板ジベル鉄筋なし)

なると、最大耐力時に偏心が大きくなる傾向にあり、特に表一3中の括弧で示す試験体については、偏心が著しく参考値として比較検討から除いてデータを整理することとした。

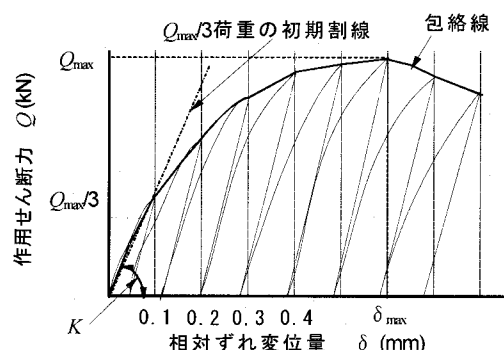
(2) ずれ性状

馬蹄形ジベルのずれ性状を図一3に示す。各タイプとも載荷初期におけるずれ定数の相違について、大きな差は見受けられなかった。すべてのタイプにおいてずれ性状は、載荷初期に最大せん断耐力を示した後に作用せん断力は減少するが、一時的に再度、作用せん断力が若干増加した。これは、輪形筋にせん断力が再分配された時の挙動であると考えられる。

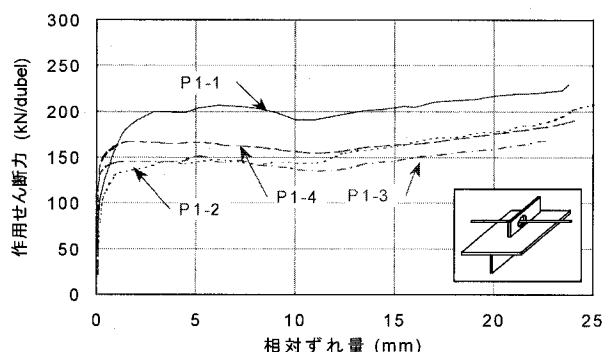
3-2 孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋あり)

(1) 最大せん断耐力 (Q_{max})

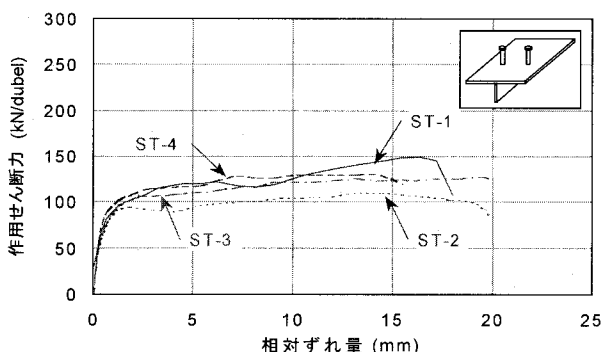
表一3よりタイプ P1-1 (普通コンクリート) の最大せん断耐力は、191.8kNであった。一方、タイプ P1-2～4 (軽量骨材コンクリート) の最大せん断耐力は、タイプ P1-1 に比べて平均で約 16～24% 小さい値となった。



図一2 せん断力—ずれ変位曲線の例



図一4 作用せん断力—相対ずれ量 (孔あき鋼板ジベル鉄筋あり)



図一6 作用せん断力—相対ずれ量 (頭付きスタッド)

(2) ずれ性状

図-4に孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋あり）の代表的な作用せん断力-相対ずれ変位量関係を示す。タイプP1-2~4（軽量骨材コンクリート）のずれ性状は、載荷初期において高い剛性を示したあと、ずれの急変点をもたらす耐荷性能を維持した状態で推移する。軽量骨材コンクリートのずれ性状は、タイプP1-1（普通コンクリート）

と異なり、最大せん断耐力時前後でずれの急変点を迎える。

3-3 孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋なし）

(1) 最大せん断耐力 (Q_{max})

表-3よりタイプP2-1（普通コンクリート）の最大せん断耐力は、166.0kNであった。一方、タイプP2-2~4（軽量骨材コンクリート）の最大せん断耐力は、タイプP1-1に比べて試験体平均で約14~28%小さいことが分かる。

表-3 せん断耐力およびずれ定数の実験値と設計値

タイプ	諸元		供試体	実験値			普通コンクリートを用いる場合の設計値		実験値(a) 設計値(b)
	コンクリート			最大 せん断耐力 $Q_{max} \cdots (a)$ (kN)	最大ずれ量 δ_{max} (mm)	ずれ定数 K $\left[\frac{kN}{mm} \right]$	せん断耐力 $Q_a \cdots (b)$ (kN)	設計値の引用式	
	種別	実強度 (N/mm ²)							
BA-1	普通	28.2	No.1	430.5	1.69	993	82		5.25
			No.2 *	393.7	2.15	1013			4.80
			No.3	404.0	1.61	1565			4.92
			平均	409.4	1.82	1190			4.99
BA-2		31.1	No.1	408.5	1.78	1020	89	「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物」 ⁵⁾ における設計耐力式に、安全係数 $\gamma=1.3$ を考慮。 式(3)	4.60
			No.2	442.5	2.09	1018			4.98
			No.3 *	406.0	1.23	1368			4.57
			平均	419.0	1.70	1135			4.72
BA-3	軽量	37.0	No.1	515.7	2.09	910	103		5.03
			No.2	(391.8)	(1.54)	(1703)			(3.82)
			No.3 *	488.8	2.29	845			4.77
			平均	502.3	2.19	878			4.90
BA-4		48.2	No.1 *	487.6	1.47	1194	129		3.79
			No.2	(337.4)	(0.99)	(1058)			(2.62)
			No.3	(342.0)	(0.89)	(2830)			(2.66)
			平均	487.6	1.47	1194			3.79
P1-1	普通	29.2	No.1	160.0	6.09	1608	45		3.55
			No.2	209.0	5.38	1437			4.63
			No.3 *	206.5	6.10	1620			4.58
			平均	191.8	5.86	1555			4.25
P1-2		31.1	No.1 *	148.0	6.09	1074	48	「孔あき鋼板ジベル設計マニュアル(案)」 ⁶⁾ における設計耐力式に、安全係数 $\gamma=3$ を考慮。 式(5)	3.10
			No.2	163.0	2.40	1660			3.41
			No.3	148.0	5.94	1537			3.10
			平均	153.0	4.81	1424			3.20
P1-3	軽量	37.0	No.1 *	152.1	5.22	1633	56		2.72
			No.2	137.9	4.59	2009			2.47
			No.3	148.5	5.21	1539			2.66
			平均	146.2	5.01	1727			2.61
P1-4		48.2	No.1	154.1	0.80	2339	71		2.16
			No.2	163.2	2.98	3416			2.29
			No.3 *	167.8	2.15	1554			2.35
			平均	161.7	1.98	2436			2.26
P2-1	普通	29.2	No.1 *	170.8	2.29	---	---		---
			No.2	159.7	2.48	1797			---
			No.3	167.6	5.68	1638			---
			平均	166.0	3.48	1718			---
P2-2		31.1	No.1	125.5	0.87	2306	3	「孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究/構造工学論文集 Vol.46A」 ⁷⁾ における耐力評価式に、安全係数 $\gamma=3$ を考慮。 式(7)	49.34
			No.2 *	129.5	0.85	4200			50.92
			No.3	133.5	0.26	1792			52.49
			平均	129.5	0.66	2766			50.92
P2-3	軽量	37.0	No.1 *	117.6	0.77	4383	11		11.01
			No.2	122.7	0.96	1811			11.49
			No.3	116.6	1.00	1511			10.92
			平均	119.0	0.91	2568			11.14
P2-4		48.2	No.1	145.0	0.60	2053	26		5.55
			No.2	137.7	0.75	2909			5.27
			No.3 *	145.8	0.53	1573			5.58
			平均	142.8	0.63	2178			5.47
ST-1	普通	29.2	No.1 *	148.7	16.42	305	24		6.28
			No.2	133.4	12.73	202			5.63
			No.3	134.5	11.05	275			5.68
			平均	138.9	13.40	261			5.86
ST-2		31.1	No.1	119.8	15.56	290	24	「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物」 ⁵⁾ における設計耐力式に、安全係数 $\gamma=1.3$ を考慮。 式(9)	4.90
			No.2	114.8	15.01	230			4.69
			No.3 *	111.8	14.96	252			4.57
			平均	115.5	15.18	257			4.72
ST-3	軽量	37.0	No.1	156.8	9.50	173	27		5.88
			No.2	152.6	14.75	329			5.72
			No.3 *	127.3	19.70	246			4.77
			平均	145.6	14.65	249			5.46
ST-4		48.2	No.1	131.0	5.47	963	30		4.30
			No.2	135.7	18.40	285			4.46
			No.3 *	131.0	14.25	328			4.30
			平均	132.6	12.71	525			4.35

注) 1. () 内は偏心が著しく比較検討から除いたデータを示す。

2. タイプP2（孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋なし））は、設計式が確立されていないため、文献7）より引用した。

3. 供試体欄の*印は、図3~6に示した供試体を表す。

(2) ずれ性状

図-5に孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋なし）の代表的な作用せん断力-相対ずれ変位量関係を示す。軽量骨材コンクリートの初期ピーク時の最大せん断耐力は、コンクリート強度が高いほど大きい。タイプP2-2～4（軽量骨材コンクリート）のずれ性状は、タイプP2-1（普通コンクリート）と異なり、載荷初期に最大せん断耐力を示すものの、せん断耐力が著しく減少する傾向を示す。各タイプとも載荷初期におけるずれ定数は、有意な差は見受けられなかった。

3-4 頭付きスタッド

(1) 最大せん断力 (Q_{max})

表-3より明らかなように、タイプST-1（普通コンクリート）の最大せん断耐力は、138.9kNであった。タイプST-2～4（軽量骨材コンクリート）の最大せん断耐力は、普通コンクリートとの大きな差は見られなかった。

(2) ずれ性状

図-6に頭付きスタッドの代表的な作用せん断力-相対ずれ変位量関係を示す。各タイプとも載荷初期におけるずれ定数において、大きな差は見受けられなかった。

4. 破壊状況および考察

試験終了後、コンクリートのひび割れ状況を把握するため、試験体のコンクリートブロック部を切断し、最終破壊状態を目視観察した（写真1～5）。写真1～5において、各タイプの破壊状況の切断面写真をa)に、ずれ止め付近のスケッチをb)に示す。

4-1 馬蹄形ジベル

(1) 破壊状況

写真-1, 2にタイプBA-1（普通コンクリート）およびタイプBA-2（軽量骨材コンクリート）の破壊状況を示す。BA-1は、ジベル前面のコンクリートが斜めせん断破壊を生じているとともに接触面付近でコンクリートが圧壊していた。BA-2は、ジベル前面のコンクリートが斜めにせん断破壊のみ生じていた。タイプBA-3およびタイプBA-4の試験体の破壊形状もタイプBA-2と同様であった。

(2) 設計式との比較

設計式は、式(1)および式(2)によって計算した値の小さい方を用いて式(3)より設計値 Q_d を算出している⁵⁾。

$$Q_u = f_{ad} \cdot A_1 + 0.7 \sigma_{ht} \cdot A_2 / \gamma_s \quad (1)$$

$$Q_u = f_{ad} \cdot A_1 + 30 \phi \cdot B / \gamma_c \quad (2)$$

$$Q_d = Q_u / \gamma, \gamma = 1.3 \quad (3)$$

f_{ad} : ずれ止め前面のコンクリートの設計支圧強度 (N/mm^2)

$f_{ad} = \eta \cdot f_{ck} / \gamma_c$ ただし、 $A \geq 4A_1$ の場合、 $\eta = 1.1$

$$A < 4A_1 \text{ の場合、} \eta = 0.55 \sqrt{\frac{A}{A_1}}$$

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm^2)

A_1 : ずれ止めの有効支圧面積 (mm^2)

A_2 : ずれ止めに斜めに取り付けられた輪形筋の断面積 (mm^2)

A : ハンチのないスラブの場合、 $2h_0^2$ (mm^2)

h_0 : スラブ厚 (mm) B : ずれ止めの幅 (mm)

σ_{ht} : 構造用鋼材の引張強度の特性値 (N/mm^2)

ϕ : ずれ止めに斜めに取り付けられた輪形筋の直径 (mm)

γ_c : コンクリートの材料係数 ($\gamma_c = 1.3$)

γ_s : 鉄筋の材料係数 ($\gamma_s = 1.0$) γ : 安全率

上記式(1), (2)の第1項はずれ止め本体による耐力を、また、第2項は、輪形筋のみによる耐力を表している。図-7に実験値/設計値-コンクリート圧縮強度関係を示す。この図より明かなように、計算値に対して実験値は、約4～5倍を示しており、十分安全であることが言える。また、コンクリートの種類によるせん断耐力の影響は見られず、軽量骨材コンクリートを用いた場合でも、設計式(1)式および(2)式の第1項のずれ止め前面のコンクリートの設計支圧強度 (f_{ad}) の低減は必要ないと判断できる。

(3) 骨材の種類の影響

馬蹄形ジベルは、ジベル前面の支圧側コンクリートが支配的であり、設計式の適応が妥当であると推測できる。馬蹄形ジベルのように支圧面が比較的大きい場合は、骨材の種類よりもコンクリートの圧縮強度が影響していると考えられる。

4-2 孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋あり）

(1) 破壊状況

写真-3にタイプP1-4の破壊状況を示す。写真-3からも明かなように、鋼板の孔回りのせん断面では、人工骨材自体もせん断破壊していた。貫通鉄筋周辺の軽量骨材は、鉄筋のずれに伴い一部圧壊していた。

(2) 設計式との比較

文献6)で示されている普通コンクリートに対する設計式(4)および式(5)を用いて実験値との比較を行う。

$$Q_u = 1.85 \cdot \left\{ \frac{\pi(d^2 - \phi_{st}^2)}{4} f'_{cu} + \frac{\pi \phi_{st}^2}{4} f_{st} \right\} - 106.1 \times 10^3 \quad (4)$$

$$Q_d = Q_u / \gamma, \gamma = 3 \quad (5)$$

ここで、 f_{cu} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm^2)

d : 孔径 (mm)

ϕ_{st} : 貫通鉄筋の鉄筋径 (mm)

f_{st} : 貫通鉄筋の設計引張強度 (N/mm^2)

図-8に実験値/設計値-コンクリート圧縮強度関係を示す。図-8よりタイプP1-1（普通コンクリート）は、設計値に対して実験値は、平均4.3倍示しているが、タイ

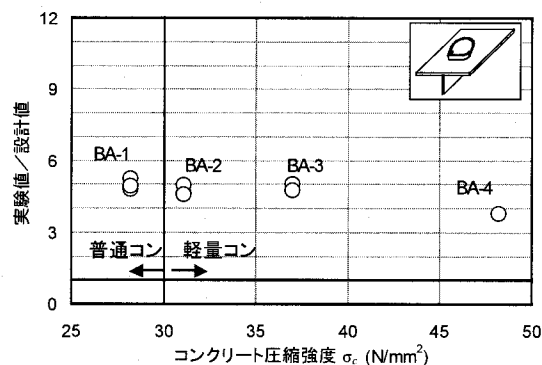
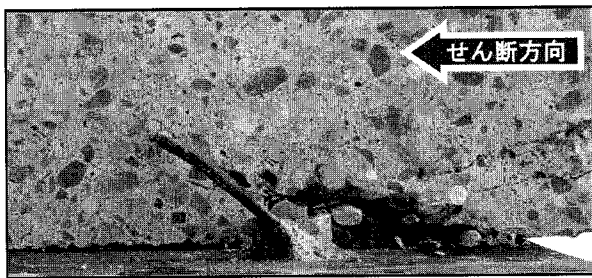
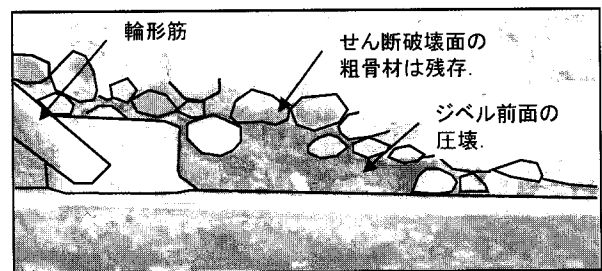


図-7 せん断耐力の比較（馬蹄形ジベル）

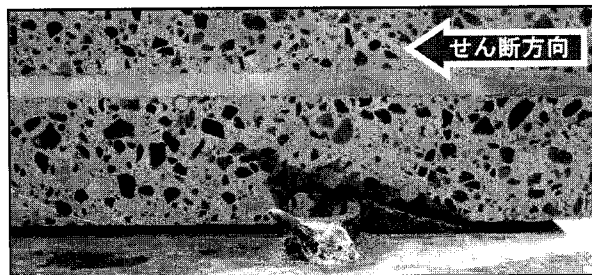


a) 全体

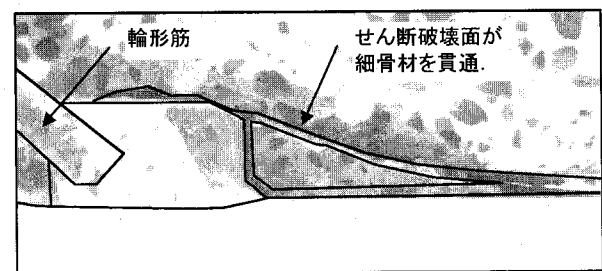


b) ジベル付近

写真-1 破壊性状 (馬蹄形ジベル：普通コンクリート)

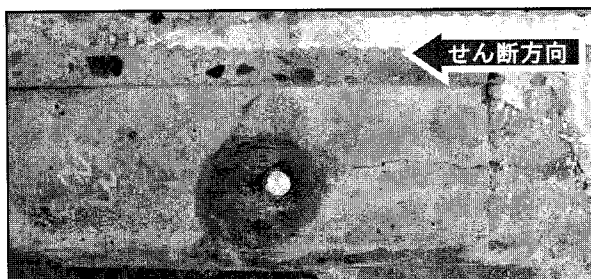


a) 全体

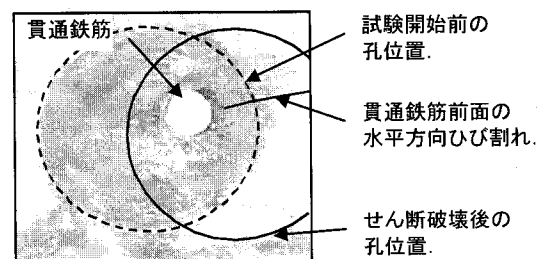


b) ジベル付近

写真-2 破壊性状 (馬蹄形ジベル：軽量骨材コンクリート)

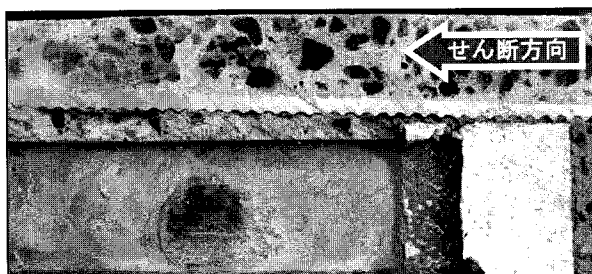


a) 全体

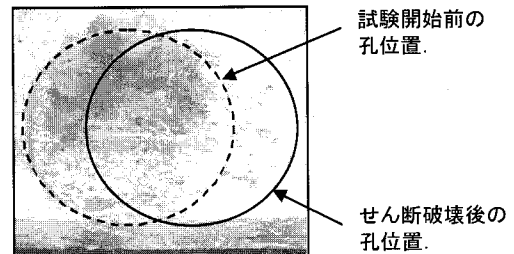


b) ジベル付近

写真-3 破壊性状 (孔あき鋼板ジベル鉄筋あり：軽量骨材コンクリート)



a) 全体

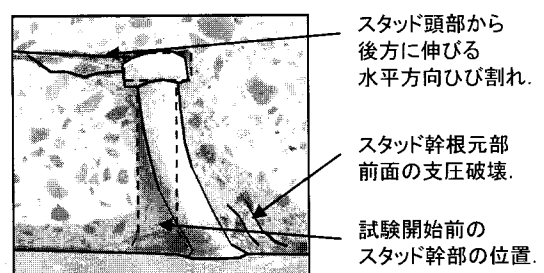


b) ジベル付近

写真-4 破壊性状 (孔あき鋼板ジベル鉄筋なし：軽量骨材コンクリート)



a) 全体



b) スタッド付近

写真-5 破壊性状 (頭付きスタッド：軽量骨材コンクリート)

プ P1-2~4 (軽量骨材コンクリート) は, 平均 2.3~3.2 倍程度の値を示しており, タイプ P1-1 (普通コンクリート) に比べ, せん断耐力が劣る. このことから, 軽量骨材コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルは, 普通コンクリートの設計耐力式をそのまま適用することはできないと考えられる.

(3) 骨材の種類の影響

普通コンクリートの破壊状況は, 文献7) によれば, 孔中のコンクリートが破壊する領域において貫通鉄筋がコンクリートを拘束し, せん断耐力の向上に寄与しているとされている. しかし, 軽量骨材コンクリートを用いた試験体は, 写真一3から軽量骨材コンクリートのせん断面で, 人工骨材自体もせん断破壊しており, 貫通鉄筋がコンクリートのせん断破壊を拘束しているとは考えられない. これは, 鋼板の孔中のコンクリートが圧壊してしまい貫通鉄筋による拘束効果が発揮されないためである. したがって, 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は, 骨材の種類に影響すると考えられる.

4-3 孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋なし)

(1) 破壊状況

写真一4にタイプ P2-3 の破壊状況を示す. 写真一4からも明らかなように, 鋼板孔中のせん断面は, 人工骨材も同時にせん断破壊しているのが分かる. 図一5の作用せん断力—相対ずれ変位量に示される包絡線が最大せん断耐力を示した後, 著しく低下するのは, 人工骨材自身がせん断破壊しているため, 耐荷性能を失ったことによると判断できる.

(2) 設計式との比較

孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋なし) の設計式は, 文献7) において式(6)が提案されている. この提案式に文献8) に示されている孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋あり) の安全率 γ を採用し, 参考値のため設計値を求めるものとする (式(7)).

$$Q_u = 3.38 \cdot d^2 \left(\frac{t}{d} \right)^{1/2} f_{cu} - 121.0 \times 10^3 \quad (6)$$

$$Q_d = Q_u / \gamma, \gamma = 3 \quad (7)$$

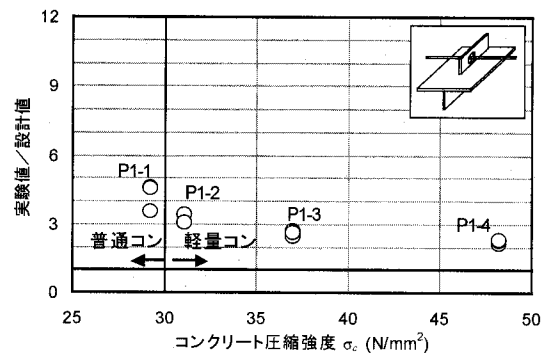
ここで, t : 孔あき鋼板ジベルの板厚 (mm)

f_{cu} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

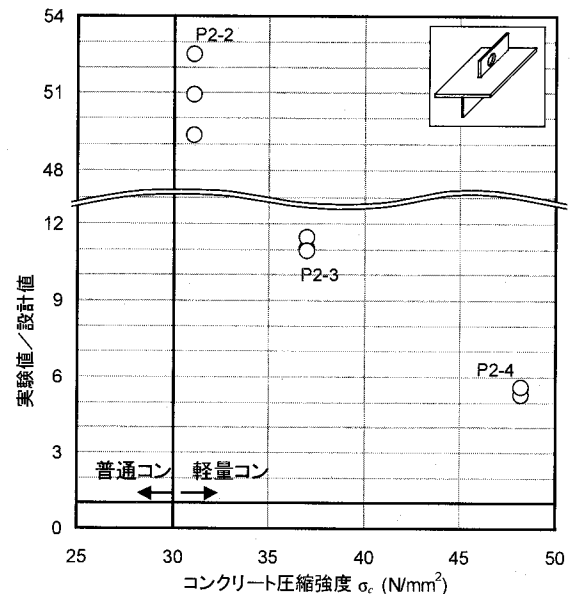
図一9に実験値/設計値—コンクリート圧縮強度関係を示す. なお, 文献8) には, 貫通鉄筋なしの孔あき鋼板ジベルの設計式は規定されていない. そこで, 図一10に実験値を文献7) で示されている既往の実験結果の平均値を含めた図を示す. この図より明らかなように, 提案式に比べ全ての実験値は, 十分な安全側を示しているが, タイプ P2-2~4 (軽量骨材コンクリート) は, タイプ P2-1 (普通コンクリート) に比べ耐力が小さい. このことから, 軽量骨材コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋なし) は, 普通コンクリートの設計式と同等に適用することはできないと考えられる.

(3) 骨材の種類の影響

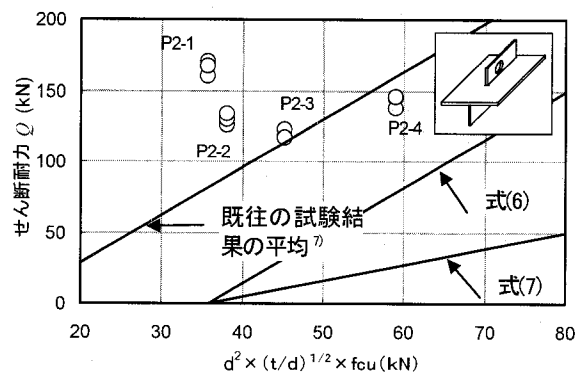
図一5からも明らかなようにせん断耐力は, 孔あき鋼板



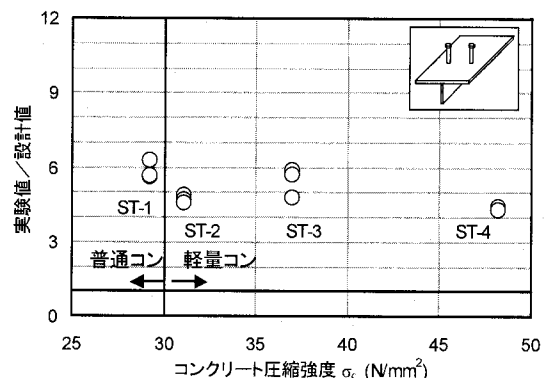
図一8 せん断耐力の比較 (孔あき鋼板ジベル鉄筋あり)



図一9 せん断耐力の比較 (孔あき鋼板ジベル鉄筋なし)



図一10 既往の研究との比較 (孔あき鋼板ジベル鉄筋なし)



図一11 せん断耐力の比較 (頭付きスタッド)

ジベル（貫通鉄筋あり）と同様に、骨材の種類に影響を受けると判断できる。

4-4 頭付きスタッド

(1) 破壊状況

写真-5にタイプST-2の破壊状況を示す。破壊状況は、タイプST-2を除いて、すべてのスタッドがせん断破壊していた。タイプST-2の破壊状況は、写真5より明らかにように、頭付きスタッド根元部のコンクリートの圧壊が顕著であった。

(2) 設計式との比較

頭付きスタッドは、これまで数多くの実験がなされ、設計式が示されている。文献5)に示されている頭付きスタッドの設計式(8)および式(9)を示す。

$$Q_u = 3.0dH\sqrt{f_{ck}} \quad (8)$$

$$Q_u = Q_u / \gamma, \gamma = 1.3 \quad (9)$$

ここで、 d ：頭付きスタッドの径 (mm)

H ：頭付きスタッドの高さ (mm)

図-11に実験値/設計値—コンクリート圧縮強度関係を示す。図-11から、すべてのタイプにおいて、式(9)を満足している。しかし、タイプST-2～4（軽量骨材コンクリート）は、タイプST-1（普通コンクリート）に比べ、若干耐力が小さい傾向にある。

(3) 骨材の種類の影響

設計耐力式は、コンクリート圧縮強度の平方根に比例しているが、今回の実験結果からは、コンクリート強度が異なるにも関わらず、各タイプのせん断耐力およびずれ性状の差異は僅少であった。

5. まとめ

本研究では、軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断特性について、3種類のずれ止め形式に着目し、押抜きせん断試験を実施した。本実験で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 馬蹄形ジベルにおいて、最大せん断耐力 (Q_{max}) は、普通コンクリートと軽量骨材コンクリートとに差異は見受けられなかった。したがって、コンクリート圧縮強度 37N/mm^2 以下の軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断耐力の算出は、普通コンクリートの設計式を用いてよい。

(2) 孔あき鋼板ジベルにおいて、普通および軽量骨材コンクリートの最大せん断耐力 (Q_{max}) は、普通コンクリートに対する設計式よりも高い値を示していて、設計値に対する安全性は確保されている。しかしながら、軽量骨材コンクリートの最大せん断耐力は、普通コンクリートのそれに比べて若干減少の傾向を示した。これは、試験終了時に破壊面を詳細に観察したところ、骨材自体の破壊状況の相違が影響を及ぼしているためであり、普通コンクリートの孔あき鋼板ジベルの設計式の適用には、検討が必要であると考えられた。また、実施工においては、安全性を高めるために、鋼繊維補強コンクリートを用いて耐力低下を抑える

方策などが考えられる。今後、軽量骨材コンクリートの破壊メカニズムの解明、安全率の設定を含めた算定式の検討が課題となる。

(3) 頭付きスタッドにおいて、今回の実験結果から、軽量コンクリートでは、コンクリート強度の違いによるせん断耐力には、大きな差は見られなかった。

本研究において、人工軽量骨材の性能がずれ止めのせん断耐力に影響を及ぼすことが分かった。したがって、実橋へ適用する場合は、骨材の材料性能を十分に確認した上で使用することが望ましい。

今回、静的押抜きせん断試験を実施し、軽量コンクリートを用いたずれ止めのせん断特性を検証したが、今後、実橋に供する試験データを蓄積するために、疲労試験を実施し、疲労特性についても検討を進める予定である。

謝辞：本実験を行うにあたり、多大なご助力を頂いた摂南大学生である山崎朗正氏、矢本和之氏、坂本真治氏、西岡憲司氏に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究，鉄道技術研究所報告 No. 961, 1975. 3.
- 2) 保坂鐵矢：経済性を追求した鋼鉄道橋の試み，第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会鋼構造委員会 1998. 8.
- 3) 丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物，1998. 7.
- 4) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，1996. 11.
- 5) 丸善：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物，2000. 7.
- 6) 孔あき鋼板ジベル設計マニュアル(案)，土木学会 鋼構造委員会 新形式の鋼・コンクリート複合橋梁調査研究小委員会，2002. 11.
- 7) 保坂鐵矢，光木 香，平城弘一，牛島祥貴，橋 吉宏，渡辺 滉：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集 vol. 44A, 2000. 3.
- 8) 保坂鐵矢，光木 香，平城弘一，牛島祥貴：孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究，構造工学論文集 vol. 48A, 2002. 3.
- 9) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，鋼構造シリーズ⑨B，1998.
- 10) 保坂鐵矢，平城弘一，小枝芳樹，橋 吉宏，渡辺 滉：鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集 vol. 44A, 1998. 3.
- 11) 平城弘一，松井繁之，福本秀士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導—静的強度評価式—，構造工学論文集 vol. 44A, 1989. 3.
- 12) 社団法人 セメント協会：人工軽量骨材コンクリート，コンクリートパンフレット 第79号
- 13) 保坂鐵矢，杉本一郎：鉄道橋における最近の鋼・コンクリート複合橋梁，橋梁と基礎 2000. 7.

(2003年9月12日受付)