

軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断疲労特性に関する実験的研究

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

鈴木喜弥*, 藤原良憲*, 平城弘一**, 児島哲朗***, 辻角 学****, 橋 吉宏*****

Yoshiya SUZUKI, Yoshinori FUJIWARA, Hirokazu HIRAGI,

Tetsuro KOJIMA, Manabu TSUJIKADO, Yoshihiro TACHIBANA

- * 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 鉄道建設本部, 設計技術室
(〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)
- ** 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, 橋梁事業部営業部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)
- **** 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)

Composite girders for railway bridges generally apply U-shaped, perfobond strip and headed studs. In order to estimate shear capacity of connectors, compression and bearing strength of concrete are the important factors. A practical application of composite bridge with lightweight concrete slab for a railway bridge has constructed under a concept of cost reduction.

A relationship between shear capacity of connectors and lightweight concrete has not characterized definitively in the past investigations. Therefore, fatigue characteristics with failure modes with respect to 3 sorts of shear connectors for composite girder with lightweight concrete are investigated to reveal a relationship of shear capacity corresponding lightweight concrete characteristics.

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

キーワード: 軽量骨材コンクリート, 押抜きせん断疲労試験, ずれ止め

1. まえがき

コンクリート構成材のおよそ 70%を占める細・粗骨材の軽量化が構造物に大きな経済効果をもたらす可能性があることは自明である。この研究の歴史は古く、1950 年代には既に石炭殻や火山礫を用いた骨材の軽量化が研究され、種々の建築物に使用され始めた。さらに 1960 年代には安定材料の供給と天然資源の枯渇を背景として、人工軽量骨材の製造・販売が開始され、それ以来広く構造物に採用され現在に至っている。

鋼橋においては、1960 年代中頃に合成桁の床版として初めて軽量骨材コンクリートが採用¹⁾されて以降の歴史があるが、必ずしも実績は多いものではない。しかし近年になって鉄道橋では死荷重の減少による合理化、軟弱地盤対策などを考慮して、人工軽量骨材コンクリート（以下、軽量コンクリートと呼ぶ）を合成桁の床版に採用した例もあり、1990 年代後半、この方面の研究成果²⁾を目にする機会も増えている。

これら既往の研究は、多くが軽量コンクリート自身の物性に着目しており、有用な知見の積み重ねがあるものの、構造物の力学的挙動に及ぼす影響など、手つかずの課題は

依然として多いように見受けられる。

鋼橋合成桁における最も大きな課題のひとつは鋼とコンクリートとを一体化させる要である“ずれ止め”であろう。

現在の鉄道橋における軽量コンクリートの設計³⁾では、軽量コンクリートの曲げ強度・引張強度・付着強度が同一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、特性値を普通コンクリートの 70%とすることが規定されている（一部に普通細骨材を混ぜて用いる場合には 70%より大きな値としてよいとしている）。また、ずれ止めの設計耐力に関する規定のある文献⁴⁾には軽量コンクリート使用時について特別の言及はなく、ずれ止め（馬蹄形ジベルおよびスタッドジベル）の設計耐力算定式中コンクリート強度に関するパラメータが圧縮強度あるいは支圧強度であることから、現状ではずれ止めに関して普通コンクリート・軽量コンクリートが同様の設計を行うことになる。しかしながら、例えば普通コンクリート・軽量コンクリートで終局状態・破壊状況が異なれば、当然のこととして普通コンクリートの試験結果から導出された各種ずれ止めの耐力算定式は、軽量コンクリート構造物において適用することはできないことになる。

軽量コンクリートに埋め込まれた各種ずれ止めのずれ挙動・せん断耐荷特性に関して、既往の研究成果は未だ十分ではなく、合成桁の床版に軽量コンクリートを適用する場合には、研究開発を急ぐ必要がある。

そこで本研究は、普通コンクリート・軽量コンクリートの試験結果を基に、各種ずれ止めのずれ挙動・破壊状況・せん断耐力を把握し、設計指針作成のための基礎データを得ようとするものである。

上記の目的に沿って、筆者らはすでに普通・軽量コンクリートに埋め込まれた各種ジベルに関する静的な押抜きせん断試験を実施し³⁾、一定の成果を得ている(2.に概要を示す)。

今回、既往の静的試験結果を含めて再整理し、さらに新規の押抜きせん断疲労試験を実施し、設計静的耐力式の妥当性の検証と疲労強度特性について考察するものである。

2. 静的押抜きせん断試験結果の再整理

既往の試験データを含めて筆者らの研究成果である静的押抜きせん断試験データを再整理した結果を以下に示す。

2-1 馬蹄形ジベル

図-1に馬蹄形ジベルの静的押抜きせん断試験結果と既往の研究データ⁶⁾とを併記して示す。図中に記した“設計値”は文献4)に規定されている式(1)~(3)の設計耐力算定式を示したものである。

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⁴⁾。

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

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

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

ここで、

Q_u : ずれ止めの設計耐力(N)

Q_d : 最大作用せん断力(N)

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度の特性値(N/mm²)

f_{ad} : ずれ止め前面のコンクリートの設計支圧強度(N/mm²)

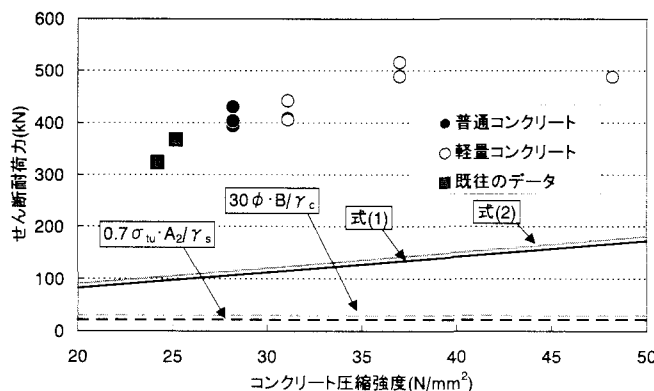


図-1 馬蹄形ジベルのせん断耐力

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

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

A_1 : ずれ止めの有効支圧面積(mm²)

A_2 : ずれ止めに斜めに取り付けた輪形筋の断面積(mm²)

A : ハンチのないスラブの場合、 $2h_0^2$ (mm²)

h_0 : スラブ厚(mm)

B : ずれ止めの幅(mm)

σ_u : 構造用鋼材の引張強度の特性値(N/mm²)

ϕ : ずれ止めに斜めに取り付けた輪形筋の直径(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

上記の式(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。この図より明らかなように、設計値に対して実験値は、式(1)と式(2)の傾きとほぼ同じで約4~5倍を示しており、十分安全性を有していることが分かった。また、コンクリートの種類によるせん断耐力の影響はほとんど見られず、軽量骨材コンクリートを用いた場合でも、式(1)および式(2)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考えらる。

2-2 頭付きスタッド

図-2に頭付きスタッドの静的押抜きせん断試験結果と既往の研究データ⁷⁾とを併記して示す。頭付きスタッドは、これまで数多くの実験がなされ、設計式が提示されている。図中に記した“設計値”は文献4)に規定されている式(4)の設計耐力算定式より求めた。

$$Q_u = 3.0dH\sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

$$Q_d = Q_u / \gamma, \gamma = 1.3 \quad (5)$$

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-2から明らかなように、今回の試験範囲すべてにおいて、式(4)を満足していることがわかる。頭付きスタッ

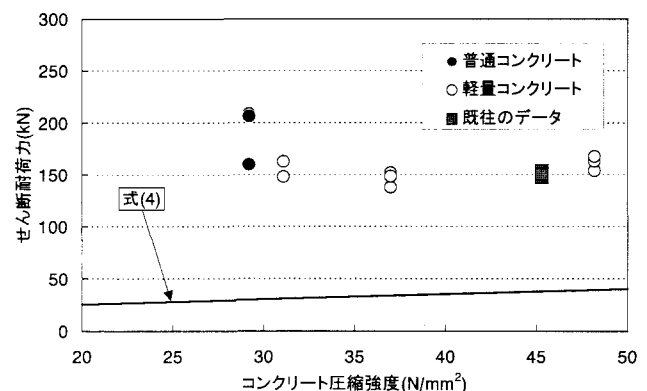


図-2 頭付きスタッドジベルのせん断耐力

ドに関してコンクリートの種類に関係なく、破壊状況がスタッド自身のせん断破壊であった。また、図-2から明らかなように、せん断耐力は普通・軽量コンクリートとも、十分な余裕を有していることから、軽量コンクリートにおいても普通コンクリートと同様な設計で行うことができると考えられる。

2-3 孔あき鋼板ジベル (PBLジベル)

PBLジベルは文献 4)に規定が無く、文献 8)において設計耐力算定式(6)、(7)が示されている。

$$Q_u = 1.85 \cdot \left\{ \frac{\pi(d^2 - \phi_{st}^2)}{4} f'_{cu} + \frac{\pi \phi_{st}^2}{4} f_{st} \right\} - 106.1 \times 10^3 \quad (6)$$

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

ここで、

- f'_{cu} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²)
- 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/mm²)
- γ : 安全率

図-3は孔1個当たりのせん断耐力と式(6)中の A 値：

$$\frac{\pi(d^2 - \phi_{st}^2)}{4} f'_{cu} + \frac{\pi \phi_{st}^2}{4} f_{st}$$

の関係に既往の試験結果を含めてプロットしたものであり、軽量コンクリートの試験結果は若干、式(6)を下回る結果であった。しかしながら、設計値である式(7)との比較においては十分安全性を有していることが分かった。

軽量コンクリートの破壊状況は孔周りの軽量骨材を含むせん断破壊が観察され、骨材の種類の違いによる影響を受けている。したがって軽量コンクリートのPBLジベル耐力算定式には普通コンクリートの場合に何らかの低減係数を考慮する必要があると考えられる。

そこで、式(6)中のコンクリートのせん断耐力を表す項である $\frac{\pi(d^2 - \phi_{st}^2)}{4} f'_{cu}$ に低減係数： $\mu=0.7$ を乗ずることによ

り、軽量コンクリートの結果はすべて式(6)を上回るものとなった (図-4 参照)。

図-4に既往のデータと筆者らの試験結果 (低減係数考慮) を示す。この図よりはいずれも式(7)を上回り、既

往のデータを含めてすべての試験データがばらつき範囲内にあることが分かる。本試験の範囲内では上述の低減係数 μ として0.7を考慮することで、PBLジベルでは普通コンクリートの設計式を軽量骨材コンクリートに対しても適用できるものと考えられるが、設計式を決定づけるだけの十分な試験体数は得られておらず、さらに試験データを拡充する必要がある。

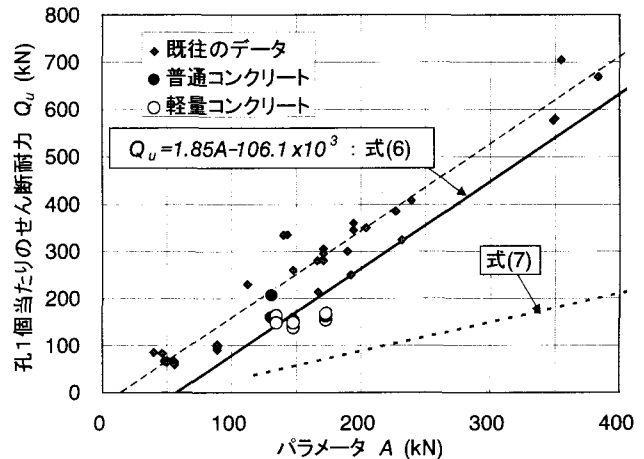


図-3 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力

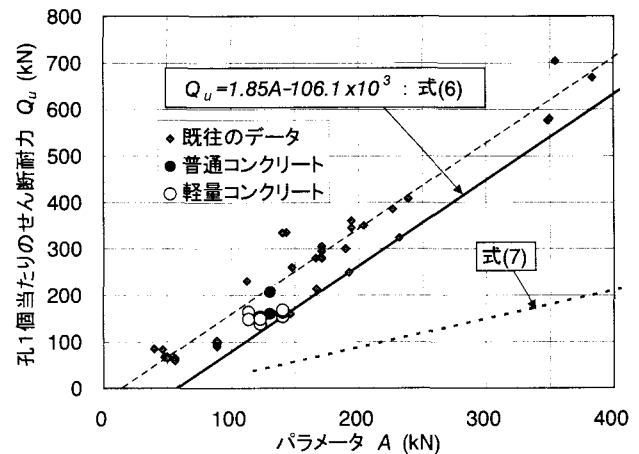


図-4 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力
(低減係数0.7考慮)

表-1 供試体の概要

ずれ止め	馬蹄形ジベル	頭付きスタッド	孔あき鋼板ジベル
概要図			
試験体数	普通コンクリート 5体 軽量コンクリート 5体	普通コンクリート 5体 軽量コンクリート 5体	普通コンクリート 5体 軽量コンクリート 5体
諸元	ジベル高 25mm ジベル幅 110mm ジベル厚 9mm 輪形筋 9φ	スタッド本数 2本 スタッド径 19mm スタッド高さ 100mm	鋼板高 90mm 鋼板厚 9mm 孔径 55φ 貫通鉄筋 D13

3. 押抜きせん断疲労試験

3-1 供試体

押抜きせん断疲労試験体は、同一の製作条件と形状寸法で、表-1に示した試験体についてタイプごとに5体ずつ、計30体を製作した。ここで試験体は、実橋の主桁上に設置した床版を想定して、ジベル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に9mmの添接板を用いて、ウェブを高力ボルトで接合した。鋼材のコンクリート接触面は、鋼材の黒皮付およびワックス塗布を施すことにより付着力を除去し、載荷初期からせん断力がジベルに伝達されるように工夫している。また、PBLジベルは、鋼板端部コバ面の支圧効果を除外するため、鋼板下側には予め発泡スチロールをセットしている。

なお、本試験で用いた軽量コンクリートは、粗骨材のみに人工軽量骨材を使用し細骨材には天然砂を使用した、いわゆるJIS A5002で規格されたⅠ種軽量コンクリートである。

3-2 試験方法

押抜き試験は300kN型疲労試験機、1000kN型疲労試験機の2台を用い、図-5に示す載荷方法で行い、荷重制御にて繰り返し載荷を行った。載荷荷重は、下限荷重10kNを一定にし、上限荷重をせん断力振幅により種々変化した。コンクリートブロック下面には速硬化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。

4. 試験結果

押抜きせん断疲労試験結果を、筆者らの静的押抜きせん断試験結果⁵⁾と併記する形で表-2に示す。表中の設計値が意味するのは、“鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物⁴⁾”に規定されている設計耐力であり、疲労を考慮した設計耐力では繰り返し回数200万回程度を想定している。PBLジベルについては同設計標準で設計耐

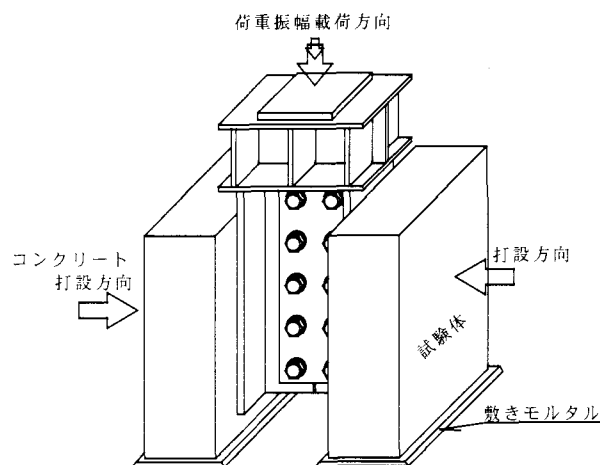


図-5 載荷方法

表-2 試験結果

ジベル形式	コンクリート種類	静的載荷試験結果 ⁵⁾				疲労試験結果						R/Q	疲労回数 N(回)	至破壊:○
		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	せん断耐力Q(kN) 試験値 設計値	供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	荷重振幅R(kN) 試験値 設計値						
馬蹄形 ジベル	軽量	31.1	1.77 x 10 ⁴	419.0	88.8	BA-K-1	32.4	1.67 x 10 ⁴	145	75.4	0.35	10,000,000	破壊せず	
						BA-K-2			180		0.43	3,449,816	○	
						BA-K-3			200		0.48	259,502	○	
						BA-K-4			210		0.50	393,983	○	
						BA-K-5			230		0.55	75,082	○	
	普通	28.2	2.73 x 10 ⁴	409.4	82.1	BA-F-1	32.0	2.78 x 10 ⁴	145	74.5	0.35	10,000,000	破壊せず	
						BA-F-2			200		0.49	1,997,948	○	
						BA-F-3			210		0.51	295,310	○	
						BA-F-4			220		0.54	262,234	○	
						BA-F-5			235		0.57	127,953	○	
頭付き スタッド ジベル	軽量	31.1	1.77 x 10 ⁴	115.5	24.5	ST-K-1	32.4	1.67 x 10 ⁴	27.0	24.5	0.23	10,000,000	破壊せず	
						ST-K-2			31.8		0.27	3,111,900	○	
						ST-K-3			36.8		0.32	1,112,200	○	
						ST-K-4			41.5		0.36	266,200	○	
						ST-K-5			51.5		0.45	84,800	○	
	普通	29.2	2.79 x 10 ⁴	138.9	23.7	ST-F-1	32.0	2.78 x 10 ⁴	31.8	23.7	0.23	10,000,000	破壊せず	
						ST-F-2			36.8		0.26	762,200	○	
						ST-F-3			41.5		0.30	383,600	○	
						ST-F-4			46.5		0.33	527,600	○	
						ST-F-5			51.5		0.37	156,200	○	
孔あき鋼板 ジベル	軽量	31.1	1.77 x 10 ⁴	153.0	33.0	P1-K-1	32.4	1.67 x 10 ⁴	95	—	0.62	5,000,000	破壊せず	
						P1-K-2			101		0.66	10,000,000	破壊せず	
						P1-K-3			107		0.70	511,600	○	
						P1-K-4			119		0.78	129,500	○	
						P1-K-5			131		0.86	188,900	○	
	普通	29.2	2.79 x 10 ⁴	191.8	45.1	P1-F-1	32.0	2.78 x 10 ⁴	131	—	0.68	10,000,000	破壊せず	
						P1-F-2			145		0.76	5,000,000	破壊せず	
						P1-F-3			150		0.78	194,863	○	
						P1-F-4			160		0.83	5,000,000	破壊せず	
						P1-F-5			220		1.15	12,565	○	

力算定式が示されていないため，“孔あき鋼板ジベル設計マニュアル（案）⁸⁾”に拠っている。また，疲労試験の圧縮強度は疲労試験前後に得られた結果を平均した値である。また，疲労試験体における普通コンクリートと軽量コンクリートの圧縮強度は，ほぼ同値を示していた。

4-1 馬蹄形ジベル

(1) 破壊状況

馬蹄形ジベルの破壊状況の一例を写真－1に示す。

普通・軽量のコンクリート種類に関わらず，試験体の破壊状況は，疲労破壊に至った8体すべてが，静的試験結果⁴⁾と同様ジベル前面でのコンクリートの斜めせん断破壊（今回の破壊形状を呼ぶ）であり，軽量コンクリートの場合のコンクリートせん断破壊面は骨材を含む破壊であった。また，繰返し回数が概ね100万回以上では，コンクリートの破壊と同時にジベル自身の疲労破壊（馬蹄形ジベルと鋼フランジ面のルート部）が確認された。その状況を写真－2に示す。

(2) 疲労耐荷性能と考察

図－6に馬蹄形ジベルにおけるせん断荷重振幅－繰返し載荷回数を示す。また，文献4)における設計式を下記に示す。

$$Q_u' = f_{ad} \cdot A_l \quad (8)$$

ここで，

f_{ad} : ずれ止め前面のコンクリートの設計支圧強度 (N/mm²)

$$f_{ad} = \eta \cdot f_{\alpha} / \gamma_c$$

ただし， $A \geq 4A_l$ の場合， $\eta = 1.1$

$$A < 4A_l \text{ の場合， } \eta = 0.55 \sqrt{\frac{A}{A_l}}$$

f_{α} : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²)

A_l : ずれ止めの有効支圧面積 (mm²)

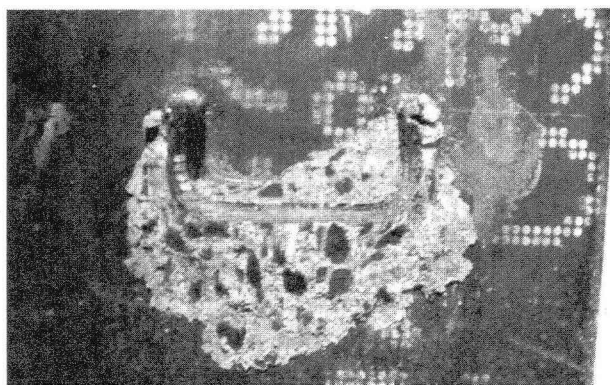
γ_c : コンクリートの材料係数 ($\gamma_c = 1.3$)

図－6より明らかなように，普通・軽量コンクリートの疲労強度は概ね一致している。また，設計値は，75kN程度（200万回の載荷で1.5の安全率確保が前提）であり，本試験では普通コンクリート・軽量コンクリートともに145kN－1000万回で破壊に至っておらず，設計値に比べ，大きな安全率を確保できていることが分かる。

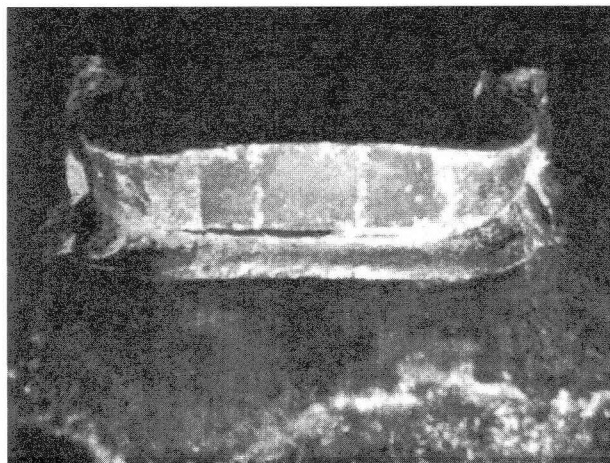
4-2 頭付きスタッド

(1) 破壊状況

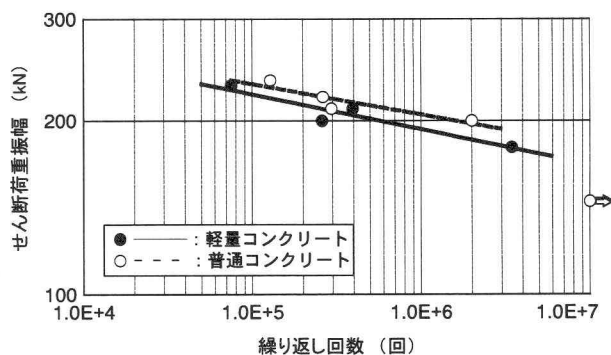
頭付きスタッドの破壊状況の一例を写真－3に示す。普通・軽量のコンクリート種類に関わらず，試験体の破壊状況は，疲労破壊に至った8体全てが，頭付きスタッド根元部のせん断破断であり，静的試験結果⁴⁾に同様である。スタッド自身の破壊であるということから，疲労強度が骨材の物性に依存しておらず，普通コンクリート・軽量コンクリートで挙動に差を生じないことが類推される。また，繰返し載荷回数が100万回を超える試験体については，根元



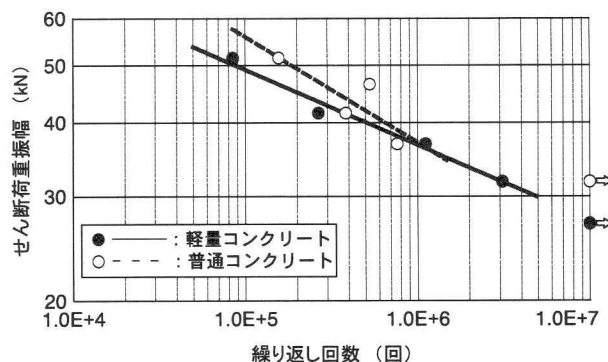
写真－1 馬蹄形ジベル破壊状況



写真－2 馬蹄形ジベル破壊状況



図－6 馬蹄形ジベル 疲労振幅－繰返し載荷回数関係



図－7 頭付きスタッド 疲労振幅－繰返し載荷回数関係

部から約 30mm 程度の位置で軸部が疲労破断している試験体があった（写真－４）。これは、せん断振幅が小さい領域において、繰返し荷载されたことによる頭付きスタッド自身の曲げ変形に伴うものである。

(2) 疲労耐力性能と考察

図－７に頭付きスタッドにおけるせん断荷重振幅一繰返し荷载回数を示す。図より明らかなように普通コンクリートと軽量コンクリートの疲労強度は概ね一致していることがわかる。

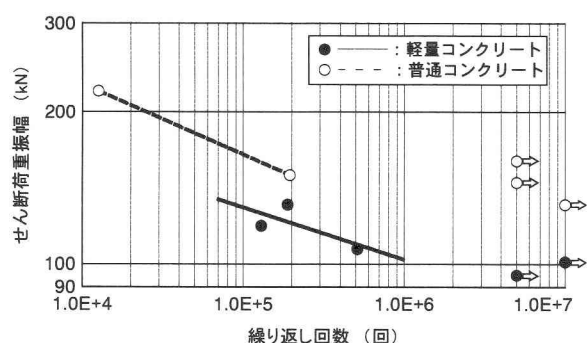
4-3 PBLジベル

(1) 破壊状況

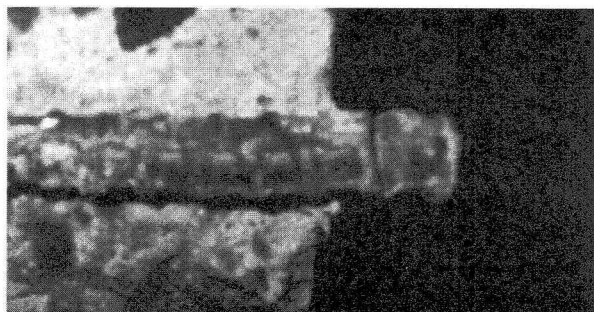
PBLジベルの破壊状況の一例を写真－５，６に示す。一部の試験体では正確な破壊状況の確認に至らなかったものの、普通・軽量のコンクリート種類に関わらず、疲労破壊に至った試験体の破壊状況は、孔周りのコンクリートがせん断破壊したのち、貫通鉄筋回りのコンクリートが圧壊し始めて、やがて貫通鉄筋が孔に接触し貫通鉄筋が疲労破壊したと考えられる（写真－７）。この破壊形式は静的試験結果⁴⁾に同様である。また、疲労試験でも軽量コンクリートにおいて骨材自身がせん断破壊に至っている点も静的試験結果⁴⁾と同様である。

(2) 疲労耐力性能と考察

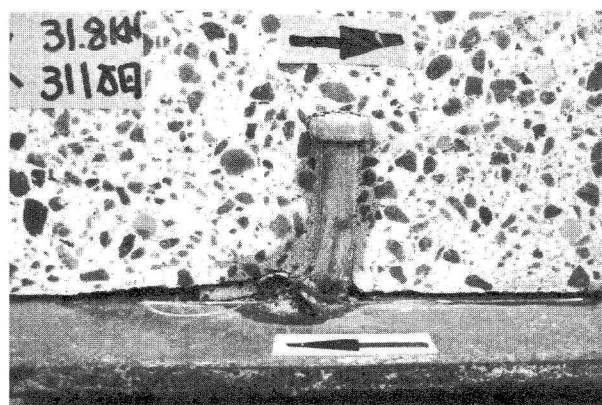
図－８にPBLジベルにおけるせん断荷重振幅一繰返し荷载回数を示す。図より明らかなように、軽量コンクリートは普通コンクリートに比べ疲労強度が低下していることがわかる。普通・軽量コンクリートの疲労試験データはともに、せん断荷重振幅一繰返し回数関係の傾きは緩い



図－８ 孔あき鋼板ジベル 疲労振幅一繰返し荷载回数関係



写真－７ 孔あき鋼板ジベル貫通鉄筋破壊状況



写真－３ 頭付きスタッドジベル破壊状況



写真－４ 頭付きスタッド破壊状況（311 万回）



写真－５ 孔あき鋼板ジベル破壊状況



写真－６ 孔あき鋼板ジベル破壊状況（写真－５の裏面）

ものとなっている。

5. 各種ずれ止めにおけるずれ量と繰返し回数の関係

図-9 に各種ずれ止めにおけるずれ量と繰返し回数を示す。図示したずれ止めは各種の代表的なものを示す。

馬蹄形ジベルは、図からも明らかなように、破壊するまでずれ量の変化が少なく、破壊前に急激にずれ量が増加する。これは、ジベル前面におけるコンクリートのせん断破壊が生じたことによると考えられる。

方、頭付きスタッドのずれ進展は、若干ではあるが繰返し回数が増加するとともに増加する傾向を示す。これは、スタッド自身の变形とスタッド周辺のコンクリートが支圧を受け徐々に圧壊が進行していくためと考えられる。

最後に、PBLジベルのずれ量は、繰返し回数の増加に合わせ、徐々にずれ量が増加する。これは、孔回りのコンクリートがせん断破壊した後に、貫通鉄筋回りのコンクリートが支圧を分担し、貫通鉄筋の曲げ変形に伴いずれ量が増加していくものと考えられる。これらの破壊に至る詳細なメカニズムは、解析的手法も導入するなど、今後、更なる実験により解明が必要である。

6. 設計のための疲労強度評価式の検討

6-1 馬蹄形ジベル

図-10 に馬蹄形ジベルのせん断力振幅/せん断耐力-疲労繰返し回数 ($R/Q-N$) 関係を示す。図中矢印(→)を付したデータは試験体が繰返し回数 1000 万回で破壊に至らなかったことを示している。破壊に至らなかったデータを除き、普通・軽量コンクリートの各々のデータを直線回帰させ、図中にそれぞれ直線・破線で示した。疲労強度の評価は、筆者の一人によって提案されている頭付きスタッドの $R/Q-N$ 関係による合理的な疲労強度評価法⁹⁾を用いて行うものとした。

図-10 より明らかなように、普通・軽量コンクリートで疲労強度に大きな差はない。文献 6)における疲労を考慮した場合の設計耐力は表-2 に示しているとおりであり、よって、軽量コンクリートを用いた馬蹄形ジベルの疲労考慮下における設計耐力は、普通コンクリートの設計耐力式をそのまま用いることができると考えられる。

6-2 頭付きスタッド

図-11 に頭付きスタッドのせん断力振幅/せん断耐力-疲労繰返し回数 ($R/Q-N$) 関係を示す。図中矢印をつけたデータは試験体は、 $N=1000$ 万回で破壊に至らなかったことを示している。

文献 9)では普通コンクリートにおける頭付きスタッドの疲労強度に関して既往の試験データから回帰直線 $R/Q = 1.28N^{0.105}$ を導いており、標準偏差の 2 倍の範囲に試験データが収まることが示されている。図-10 に示したその範囲に本試験データは収まっており、また、普通コンクリート・軽量コンクリートで有意な差は生じていない。静的

試験結果⁴⁾においても同様の結果が得られている。

よって、本試験で用いた頭付きスタッドの形状 ($H/d=5.26$) に類似している場合、軽量コンクリートを用いた頭付きスタッドの疲労考慮下における設計耐力は、普通コンクリートの設計耐力式をそのまま用いることができると考えられる。

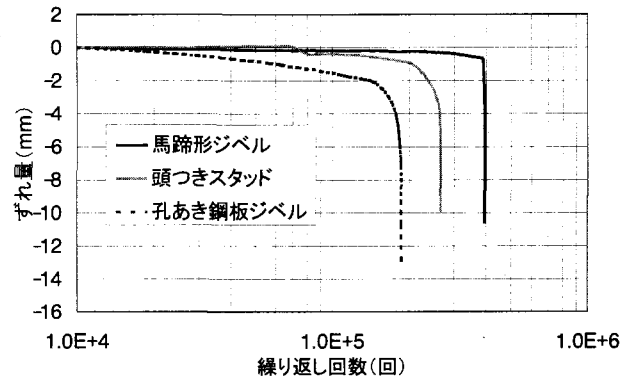


図-9 ずれ量と繰返し回数の関

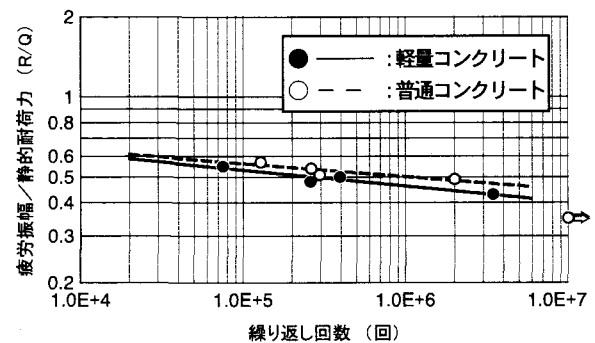


図-10 馬蹄形ジベル $R/Q-N$ 関係

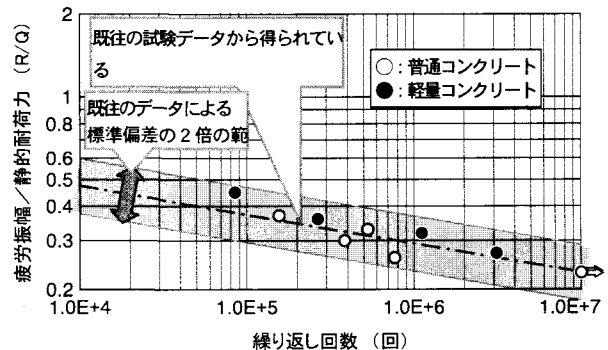


図-11 頭付きスタッド $R/Q-N$ 関係

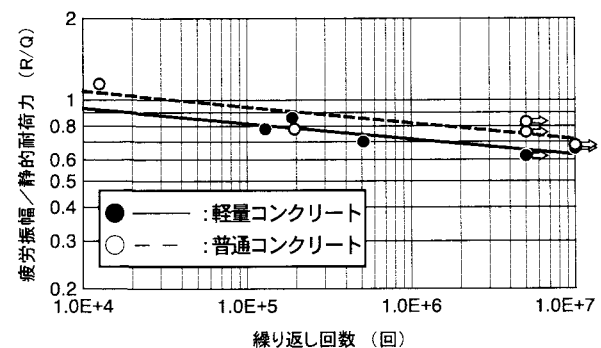


図-12 孔あき鋼板ジベル $R/Q-N$ 関係

6-3 PBLジベル

図-12 にPBLジベルのせん断力振幅/せん断耐荷力一繰返し回数 ($R/Q-N$) を示す。矢印をつけたデータは試験体が $N=500, 1000$ 万回で破壊に至らなかったことを示している。破壊したデータが少ないため、明確な数値を示すことは出来ないが、普通コンクリートおよび軽量コンクリートごとに全データを直線回帰させ、参考として図中にそれぞれ直線・破線で示した。図からも明らかなように、普通コンクリートと軽量コンクリートに大きな差異は見られない。また、PBLジベルの試験結果は他のずれ止めと比較して総じて R/Q 値が高く、かつ破壊に至らなかったデータが多いことから、疲労による耐荷力低下が比較的少ないと判断でき、耐疲労性に優れていることがわかる。

7. まとめ

本研究は、筆者らが既に実施した静的押抜きせん断試験結果を再整理し、さらに、各種ジベルに対して押抜きせん断疲労試験を実施し、普通・軽量コンクリートの比較検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 馬蹄形ジベルにおいて、疲労試験での破壊状態は普通コンクリート・軽量コンクリート共にジベル前面での斜めせん断破壊であり、静的試験⁹⁾結果と同様である。疲労強度も普通・軽量コンクリートで大きな差はなく、文献4) 設計値に対し大きな安全率を有していることがわかる。静的試験⁹⁾結果も踏まえれば、馬蹄形ジベルにおいては普通コンクリートにおけるずれ止め耐荷力設計式が、軽量コンクリートにおいてもそのまま用いることができると考えられる。

(2) 頭付きスタッドにおいて、疲労試験での破壊状態は普通コンクリート・軽量コンクリート共にスタッド根元部でのせん断破壊であり、静的試験結果⁹⁾と同様である。スタッド軸部のせん断破壊であるため、疲労強度も普通コンクリート・軽量コンクリートで大きな差はなく、文献4) の設計値に比べ大きな安全率が得られている。静的試験結果⁹⁾も考慮すれば、頭付きスタッドにおいては普通コンクリートにおけるせん断耐荷力設計式が、軽量コンクリートにおいてもそのまま用いることができると考えられるが、今後、頭付きスタッドの形状 (H/d) を変化させた場合の疲労強度の相違を確認する必要がある。

(3) PBLジベルにおいて、疲労試験での破壊状態は孔周りのコンクリートがせん断破壊したのち、貫通鉄筋が孔に接触して貫通鉄筋が疲労破壊したと推定されるが、本試験結果では疲労破壊に至るデータを十分に得られていない。しかしながら、すべての試験体は総じて疲労強度が高く、かつ破壊に至らなかった試験体が多いことも考慮すると、疲労による耐荷力低下が比較的少ないように思われる。

また、実施した試験の範囲においては、軽量コンクリートに普通コンクリートの設計耐力式を用いる場合、式(6)中のコンクリートのせん断耐力を示す項に低減係数を用

いることにより、評価することが可能であるといえる。文献8)に示されているPBLジベル耐荷力設計式を軽量コンクリートに適用するには、今後さらにデータの蓄積が必要である。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。

今回、静的押抜き試験を再整理し、さらに押抜きせん断疲労試験を実施し、軽量コンクリートを用いた各種ずれ止めのせん断疲労特性を検証した。今後、実橋へ適用する場合には、骨材の材料性能を十分に分析し、改善して使用することが望ましい。また、今後、更にパラメータを変化させて実験を行い、軽量コンクリートを用いた各種ずれ止めのせん断疲労特性の検証をしていく予定である。

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の学部生である、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) 千葉静雄, 橘善雄, 中井博, 矢幡健: 軽量コンクリート合成げた橋の現場実験, 土木学会誌 Vol.52 No.9, 1967.9.
- 2) たとえば, 保坂鐵矢, 杉本 朗, 山田高裕, 中野幹一郎, 藤木英一: 連続合成桁の中間支座位床版に用いる鋼繊維軽量コンクリートの強度特性—阿佐線・物部川橋梁—, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集I, 1999.9.
- 3) 運輸省鉄道局・鉄道総合技術研究所編: 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, 丸善, 2002.12.
- 4) 運輸省鉄道局・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物, 丸善, 2000.7.
- 5) 鈴木喜弥, 阿部久義, 平城弘一, 児島哲朗, 橘吉宏: 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, 構造工学論文集 Vol.50A, 2004.3.
- 6) 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.
- 7) 保坂鐵矢, 平城弘一, 小枝芳樹, 橘 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.
- 8) 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.
- 9) 平城弘一: 頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究, 学位論文, 1990.2.
- 10) 保坂鐵矢, 光木 香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘 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.46A, 2000.3.

(2004年9月17日受付)