

(35) 鋼板リブと鋼管を用いたずれ止めに関する実験的研究

An experimental study on strength of shear connector using steel plate ribs and steel pipes

○田中正明*, 中本啓介**, 大久保 宣人***, 栗田章光****

Masaaki TANAKA, Keisuke NAKAMOTO, Nobuhito OKUBO, Akimitsu KURITA

* 工修 (株) 栗本鐵工所 鉄構事業部企画開発部 (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町 2-2)

**工修 駒井鉄工 (株) 橋梁技術本部技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

*** 片山ストラテック (株) 技術本部橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

****工博 大阪工業大学 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

This paper deals with a new type of the shear connector using steel plate ribs and steel pipes. Push-out tests and fatigue tests were carried out. The result of test, as for a new type shear connector that a steel pipe is inserted in a steel rib plate, we get higher ultimate strength and higher ductility than Perfobond Strip connector. And we confirmed the excellent characteristic of the fatigue strength as a shear connector compared with the stud connector that ordinary used.

The new type shear connector is adopted to the steel concrete composite slab called "Pipe-slab" as a joint project of three corporate companies.

Key Words: shear connector, Perfobond Strip, steel pipe, steel plate rib, push-out test fatigue strength

1. 序論

現在、橋梁の合理化・省力化にともない、鋼・コンクリート複合構造が注目されている。複合構造として優れた性能を期待するには、鋼とコンクリートとのずれ止めが重要な構造要素である。ずれ止めには、スタッドなどの柔なずれ止めと、レオンハルトらが提案した孔あき鋼板ジベル(PBL)¹⁾などの剛なずれ止めがあり、近年は鋼とコンクリートを強固に結合させるための剛なずれ止めの研究・開発²⁾が数多く行われている。そこで著者らは、剛なずれ止めとして、長孔あき鋼板リブに構造用鋼管を貫通させたずれ止めの開発を行った。このずれ止めは2方向のずれ止め機能が備っている。すなわち、リブ方向は、長孔に充填されたコンクリートと鋼管がずれ止めとして機能する。リブ直角方向は、鋼板リブの支圧、曲げおよび溶接部のせん断力により鋼とコンクリートとを結合させる構造である。鋼管を配置することにより従来のPBLに比べ高いずれ止め性能が発揮される。本論文では、著者らが開発したずれ止め構造のせん断耐荷力とじん性の高さを確認するために実施した静的押し抜き試験および疲労試験について示す。

2. ずれ止めの構造概要と試験目的

開発したずれ止め構造の適用例として鋼・コンクリート合成床版³⁾の構造を図-1に示す。長孔を設けた鋼板リブ

と構造用鋼管を格子状に配置した部材を合成床版の鋼パネルとコンクリートとのずれ止め構造としている。一般に合成床版のずれ止めには図に示す橋軸方向と橋軸直角方向の直交する2方向のせん断力について考慮する必要がある。本論文では、このずれ止め構造に作用する静的および動的な荷重に対してせん断耐力および疲労強度を既往

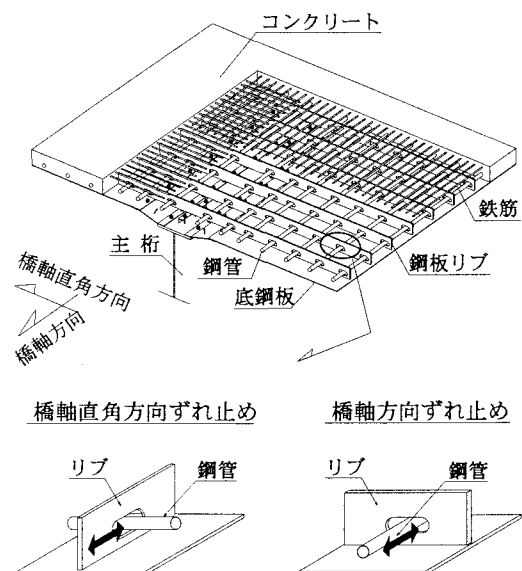


図-1 ずれ止め構造の適用例

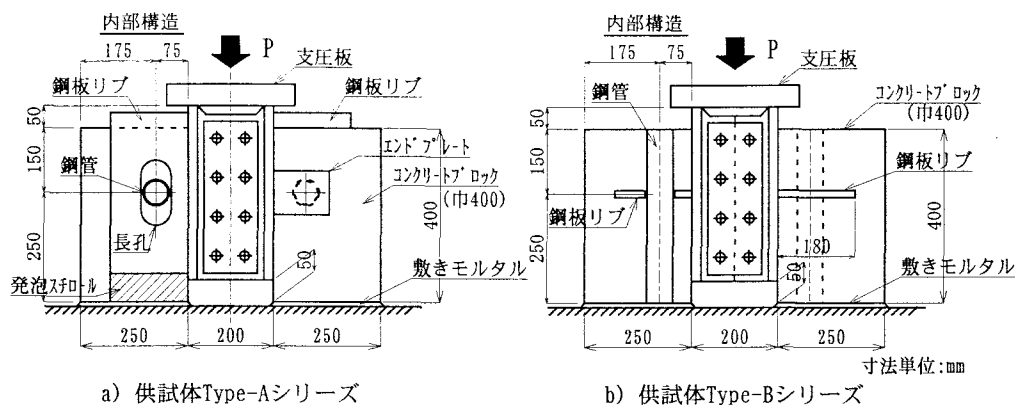


図-2 供試体構造図

表-1 供試体の種類 (Type-A)

単位mm

供試体名称 Type	鋼板リブ	リブの孔形状	鋼管		製作数	
			断面	固定の有無	静的	疲労
A1	180×16 (SM400)	円孔 φ 70	配置せず		1	—
A2		長孔 φ 70×150	配置せず		3	—
A3			φ 60.5×3.2	無	3	5
A4		円孔 φ 62	(STK400)	溶接固定	1	—

表-2 供試体の種類 (Type-B)

単位mm

供試体名称 Type	鋼板リブ	鋼板の溶接	リブの孔形状	鋼管		製作数
				断面	固定の有無	静的
B1	180×16 (SM400)	両側溶接	長孔 φ 70×150	無		1
B2				φ 60.5×3.2	無	3
B3		片側溶接	円孔 φ 62	(STK400)	溶接固定	1
B4			長孔 φ 70×150		無	1

のスタッドなどの推定式と比較することにより明らかにし、ずれ止めの効果について確認する。

3. 実験供試体および実験方法

3.1 実験供試体

供試体一覧を表-1,2 に、供試体構造図を図-2 に示す。供試体は、力の作用方向を考慮して図-3 に示すリブ方向に載荷する Type-A とリブ直角方向に載荷する Type-B の 2 種類とした。リブの断面は、全て 180×16mm とする。供試体の形状・寸法は、頭付きスタッドの押し抜き試験方法④を参考に決定した。供試体は、H 型の部材(幅 200mm, 厚さ 22mm, 長さ 400mm)と、コンクリートブロック(幅 400mm, 厚さ 250mm, 長さ 400mm)から構成されている。

Type-A シリーズの供試体では、孔形状、鋼管設置の有無、リブと鋼管の溶接固定による影響、そして疲労強度を調べるために合計 13 体製作した。せん断耐力比較のための PBL 構造としてリブに φ70mm の円孔を設け鋼管を配置しない供試体を Type-A1 とし、同じくリブに φ70×150mm の長孔を設けた供試体を Type-A2、さらに、同孔形状で鋼管を配置した供試体を Type-A3 とした。Type-A4

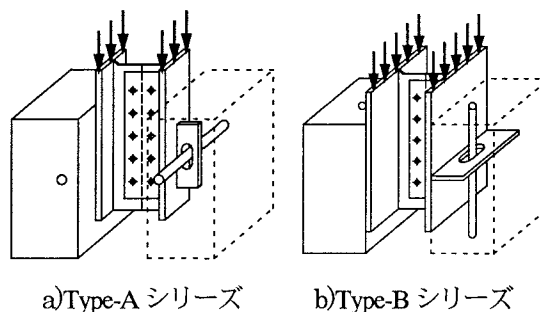


図-3 供試体概要

表-3 供試体のコンクリートの仕様

コンクリート仕様	設計値	実測値
圧縮強度	$\sigma_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{28}=41.8 \text{ N/mm}^2$
スランプ	12 cm	12.5 cm
空気量	4.5%	4.8%
セメントの種類	早強セメント	
最大粗骨材寸法	20 mm	
混和剤	AE 減水剤	

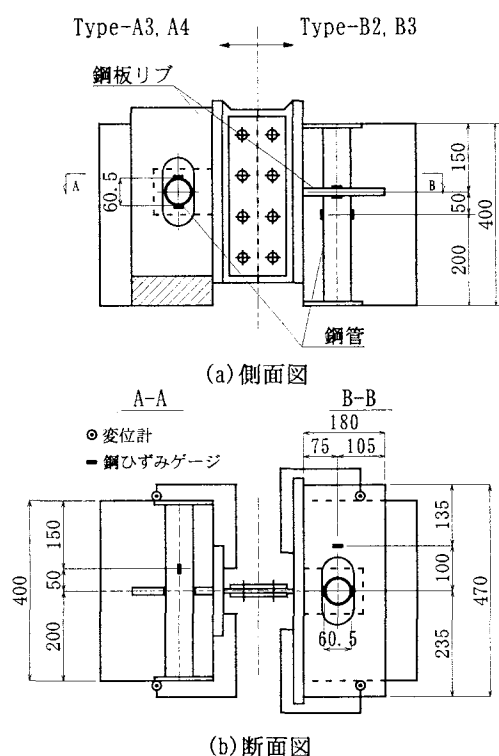


図-4 計測センサー位置

は、リブに鋼管の外径を考慮した $\phi 62\text{mm}$ の円孔を設け鋼管を配置し鋼管とリブの交差部を片側のみ3mmのすみ肉溶接にて固定した。なお、鋼管を配置するTypeでは、実構造における鋼管の連続性を考慮した境界条件とするため鋼管端部にエンドプレートを設置した。

Type-B シリーズでは、鋼管配置の有無、孔形状、リブの溶接法、リブと鋼管の溶接固定による影響を調べるため計6体製作した。リブの長孔を $\phi 70 \times 150\text{mm}$ とし鋼管を配置しない供試体を Type-B1、鋼管を配置する供試体を Type-B2 とする。Type-B3 は、 $\phi 62$ の円孔を設け鋼管とリブとを溶接固定した。さらに、Type-B4 は、供試体形状は Type-B2 と同じであるがリブと H 型部材との溶接を片側からのすみ肉溶接としている。

供試体を製作する際、コンクリートの打込み方向を実構造に合わせるため、正立の状態にしてコンクリートを打設し、コンクリート硬化後に添接板を用いて、H 型部材のウェブを高力ボルトで接合した。また、荷重時の鋼板が荷重に抵抗しないように、鋼板下側には予めポリスチレンフォームをセットした。フランジとコンクリートの接触面には剥離剤を塗付することにより、付着力を完全に除去し、荷重初期からせん断応力が孔および長孔あき鋼板ジベルに伝達されるようにした。

供試体のコンクリートの仕様を表-3 に示す。Type-A, B で同一ロットのコンクリートを用いた。各試験における計測センサー配置を図-4 に示す。コンクリートと H 型部材との相対ずれは、4 側面に配置したコンクリートと鋼フランジとの相対ずれを高感度変位計で計測し、データの整理には平均値を用いた。ずれ止めとして作用している鋼管およびリブの挙動を確認するため、Type-A3, A4, Type-B2,

B3 の各 Type1 体に鋼管およびリブに鋼ひずみゲージを貼付した。

3.2 実験方法

(1) 静的押抜き試験

押抜き試験の荷重載荷には2000kN 万能試験機を用いた。供試体は、荷重面と支持面が平行を保ち偏心荷重を防ぐため、図-2 のようにモルタルを使用してセットした。試験方法は、文献⁴⁾に従い、最大変位が4mm までは荷重制御による漸増繰り返し荷重とし、それ以降は変位制御による単調荷重とした。

(2) 押抜き疲労試験

押抜き疲労試験には、600kN サーボ試験機、1000kN サーボ試験機、および2000kN サーボ試験機を用いた。疲労試験は、下限荷重を5kN とし、押し抜き試験から得た最大せん断荷重の30~80%の荷重範囲で圧縮側の片振り(sin 波)として繰り返し荷重を行った。なお、繰り返し回数が600 万回以上で破壊しない場合、それ以降は荷重振幅を大きくして繰り返し荷重を行った。

4. 実験結果

4.1 静的押抜き試験結果

(1) 供試体 Type-A

試験結果一覧を表-4 に示す。表中における各数値は文献⁴⁾に示された方法により算出した。各供試体の代表的な荷重-相対ずれの関係を図-5 に示す。図中の各曲線は、漸

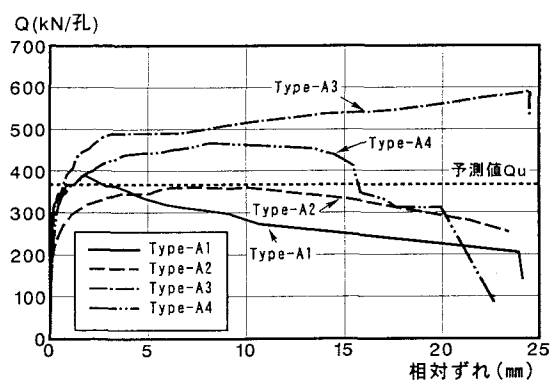


図-5 荷重-相対ずれ曲線 (Type-A)

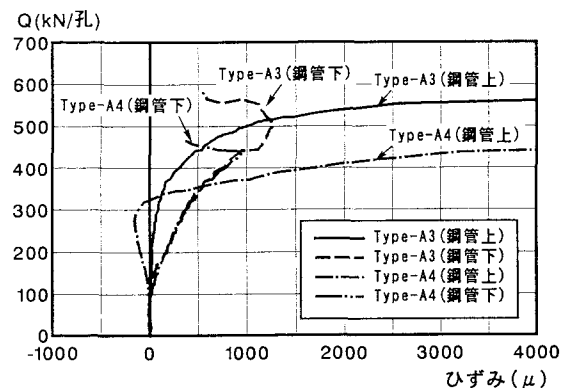


図-6 荷重-鋼管のひずみ曲線 (Type-A)

表-4 試験結果一覧（供試体 Type-A）

供試体名称 Type	最大 せん断耐力 $Q_{\max}$ kN/孔	最大ずれ $\delta_{\max}$ mm	限界荷重 Q_l kN/孔	降伏荷重 Q_y kN/孔	ずれ定数 K kN/孔/mm	予測値 Q_u kN/孔	比 $Q_{\max}/Q_u$
A1	389.1	1.79	308.7	315.0	4262.7	366.7	1.06
A2	A2-1	533.0	8.51	277.7	315.0	2347.1	1.45
	A2-2	334.7	3.16	176.6	196.1	2068.3	0.91
	A2-3	359.2	6.43	201.5	226.8	2175.3	0.98
	A2平均	408.9	6.04	218.6	246.0	2196.9	1.12
A3*	A3-1	582.3	50以上	172.7	265.5	869.1	1.59
	A3-2	705.6	50以上	275.2	303.8	1939.8	1.92
	A3-3	595.0	50以上	293.8	322.4	3349.2	1.62
	A3平均	627.6	50以上	247.2	297.2	2052.7	1.71
A4	466.1	8.54	283.3	302.0	1674.4	366.7	1.27

* : A3 は、試験打ち切り時の値

増繰り返し載荷の各ステップでの最大値のみをプロットした包絡線である。Type-A2, A3 については、それぞれ3体の試験結果のうち、最大せん断耐力が2番目に大きい供試体の結果を示している。

最大せん断耐力は、孔形状、鋼管配置の有無、リブと鋼管の固定方法によって差異が生じた。鋼管を配置しない従来形式の Type-A1 の最大せん断耐力は、レオンハルトらの提案式²⁾により算出した予測値 (367kN) とほぼ一致する結果となった。孔形状を長孔とする Type-A2 の平均値では Type-A1 を 6%程度上回る結果であった。

長孔に鋼管を配置した Type-A3 は、Type-A シリーズの中で最大せん断耐力が一番大きくなった。なお、Type-A3 の試験では3供試体とも、最大ずれ量の計測可能範囲の上限値 50mm までずれが進行しても荷重の低下が生じず、試験の続行が不可能となった。それゆえ表-4 中の最大せん断耐力は、試験打ち切り時の値である。しかし、この時点でも最大せん断耐力は、Type-A2 と比べ 1.5 倍以上の値を示しており鋼管を貫通配置させたことによりせん断耐力が著しく増加している。

Type-A3 の荷重-相対ずれ関係から 400kN 付近までは Type-A1 と同等なずれ挙動を示しており、その後ずれ量が 50mm に達するまで荷重低下が生じず、緩やかにずれが進行する現象が見られた。これは、鋼管が塑性変形することによって得られたと考えられ、鋼管を配置することにより高いじん性を有することが確認できる。

鋼管とリブを溶接により固定する Type-A4 の最大せん断耐力は Type-A3 に比べ 2 割程度小さい結果となった。これは、リブの鋼管貫通部にコンクリートが介在しないため、せん断力がリブから直接かつ集中的に鋼管に伝達されることによって Type-A3 に比べ低い荷重で鋼管の破壊が生じたものと推測される。このことより、せん断耐力を確

保するためには、鋼管とリブを溶接により固定しない構造が良いことがわかる。

鋼管の荷重-ひずみ関係を図-6 示す。鋼管の溶接による固定、孔形状に関わらず Type-A3, A4 では鋼管の下側のひずみ値を比較するとほぼ同等の挙動を示した。しかし、上側のひずみの値は、リブと鋼管を溶接した Type-A4 では鋼管の降伏荷重に達する前に圧縮力が作用し、Type-A3 と異なる挙動を示している。これは鋼管とリブを溶接により固定している Type-A4 では載荷荷重が 100kN までは、鋼管に力が伝達されず、100kN を超えると鋼管に圧縮力が導入され、載荷荷重が鋼管の降伏レベルまでに達すると、今度は鋼管が内側に座屈するため上側のひずみは引張側に増大するものと考えられる。そのため、最大せん断耐力との比較でも明らかであるが、せん断耐力を確保するためには、鋼管とリブを溶接により固定しない構造が良いことがわかる。

(2) 供試体 Type-B

試験結果一覧を表-5 に、荷重-相対ずれ関係を図-7 に示す。まず、最大せん断耐力および最大ずれ量の比較を行う。長孔の鋼管配置の有無により、鋼管を用いる Type-B2 では、鋼管を用いることにより最大せん断耐力は 1.5 倍程度大きな値を示している。さらに、最大ずれ量においても、Type-B2 は他の構造に比べ 2 倍以上の値を示している。これは鋼管が鋼板リブ前後のコンクリートを剥離させずに十分付着した状態に保つことにより、リブの変形を抑制し耐力を増加させ、じん性が向上したのと考えられる。

Type-B2 と鋼管とリブを溶接した Type-B3 を比較した場合、試験結果はほぼ同等の値となり鋼管とリブの溶接による固定の有無が試験結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。リブの溶接を片側溶接とした Type-B4 の、最大せん

表-5 試験結果一覧（供試体 Type-B）

供試体名称 Type	最大 せん断耐力 $Q_{\max}$ kN/孔	最大ずれ $\delta_{\max}$ mm	限界荷重 Q_l kN/孔	降伏荷重 Q_y kN/孔	ずれ定数 K kN/孔/mm	予測値 Q_u kN/孔	比 $Q_{\max}/Q_u$
B1	1292.6	2.86	230.1	393.5	589.0	501.8	2.58
B2	B2-1	1586.8	3.27	472.2	994.8	1596.3	3.16
	B2-2	2010.4	7.09	473.8	1130.2	1382.7	4.01
	B2-3	2078.4	8.42	543.8	1080.6	1544.1	4.14
	B2平均	1891.9	6.26	496.6	1068.5	1507.7	3.77
B3	1992.0	5.39	543.3	1008.9	1662.6	501.8	3.97
B4	1280.4	2.94	410.8	668.3	1161.5	250.9	5.10

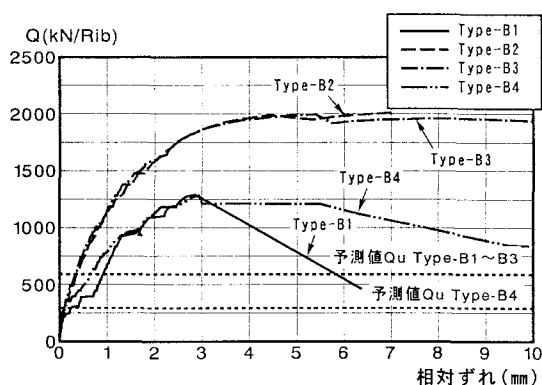


図-7 荷重－相対ずれ曲線 (Type-B)

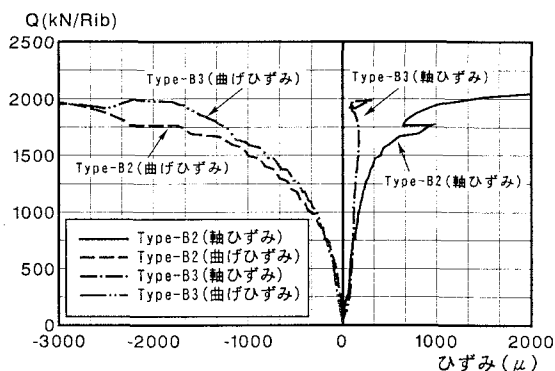


図-8 荷重－リブのひずみ曲線 (Type-B)

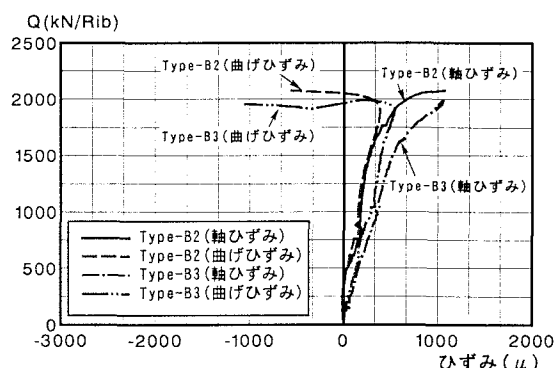


図-9 荷重－鋼管のひずみ曲線 (Type-B)

断耐力は鋼管を用いていない Type-B1 とほぼ同等となっていることから、リブを片側の溶接のみの溶接とした場合でも鋼管を用いることにより、リブを両側溶接した構造と同等なせん断耐力を有していることがわかる。

降伏荷重とずれ定数の比較を行う。降伏荷重およびずれ定数とも、Type-B2,B3 が大きな値を示し順に Type-B4, B-1 となった。その差は降伏荷重で Type-B2 は、Type-B4 より 1.3 倍程度、Type-B1 より 2.7 倍程度大きくなった。ずれ定数では Type-B2 が Type-B4 より 1.3 倍程度、Type-B1 より 2.0 倍程度大きくなった。さらに、リブの溶接部破断時を最大せん断耐力とする予測値と試験結果との比較した場合、鋼管を用いない Type-B1 で 2.6 倍、鋼管を用いる場合で 3 倍以上最大せん断耐力が大きくなり鋼管を配置することによる効果は明らかである。

つぎに、鋼管とリブの溶接による固定条件が鋼管、リブ

の計測ひずみに及ぼす影響について考察する。図-8 にリブの荷重－ひずみ関係、図-9 に鋼管の荷重－ひずみ関係を示す。図-8 より鋼管とリブの溶接による固定に関わらず、リブのひずみは、降伏点に達するまではほぼ同等の挙動を示しており、それ以降はひずみの値が急変しているのがわかる。図-9 の鋼管の荷重－ひずみ関係により比較しても、各タイプともほぼ同等な挙動を示しており、鋼管の固定の有無による差異が生じないといえる。

以上の結果より、リブに鋼管を貫通させることにより従来のずれ止めよりも著しくせん断耐力およびじん性を向上することができ、十分なずれ止め効果を発揮できることが確認された。また、リブに貫通させる鋼管は溶接により接合しなくてもずれ止めの効果は変わらないことがわかる。

4.2 押抜き疲労試験結果

Type-A の静的押し抜き試験の結果で、最もせん断耐力が大きく高いじん性を示した供試体 Type-A3 について疲労試験を実施した。破断状況までの荷重範囲、繰返し回数を表-6 に示す。表中における R/Q_u は、静的押し抜き試験で得られた Type-A3 における最大せん断荷重の平均値により作用荷重を無次元化している。 R/Q_u を 30～62% とする供試体では、1 体のみ繰返し回数 400 万回で破壊したが残りの 3 体については、載荷回数 600 万回を超えても破壊には至らなかった。このことより、 $R/Q_u=60\%$ 付近を境に、疲労破壊回数が大きく変わることがわかる。なお、 R/Q_u が 64% より大きい場合、繰返し回数が 3 万回以下で供試体は破壊している。

ずれ止めに関する疲労強度式はいくつか提案されている。そこで、我が国において代表的なスタッドの疲労強度式として提案されている松井・平城・福本⁵⁾の式を用いて、本ずれ止めの疲労強度と比較する。スタッドの疲労強度式を以下に示す。

$$R/Q_u = 1.28 \cdot N^{-0.105} \quad (1)$$

ここに、 R : ずれ止め作用するせん断力の範囲

Q_u : ずれ止めのせん断終局耐力

N : 疲労破壊に至るまでの繰返し回数

さらに、PBL の疲労強度として H.-P. André⁶⁾ の疲労強度式を用いて試験結果と比較する。

Type-A3 の R/Q_u －載荷繰返し回数を図-10 に示す。スタッドの疲労強度式における載荷繰返し回数の適用範囲内での試験結果は、スタッドの疲労強度を上回っている。

表-6 疲労試験結果

供試体名称 Type	荷重振幅 [kN]	R/Q_u	破壊繰返し回数
A3-1	375	30.0%	10,300,000 未破壊
A3-2	565	45.0%	6,580,000 未破壊
A3-3	755	60.0%	4,000,000
A3-4(A3-2)	775	62.0%	7,960,000 未破壊
A3-5	800	64.0%	30,000
A3-6	850	68.0%	320
A3-7(A3-1)	1000	80.0%	90

() 内は、同一供試体

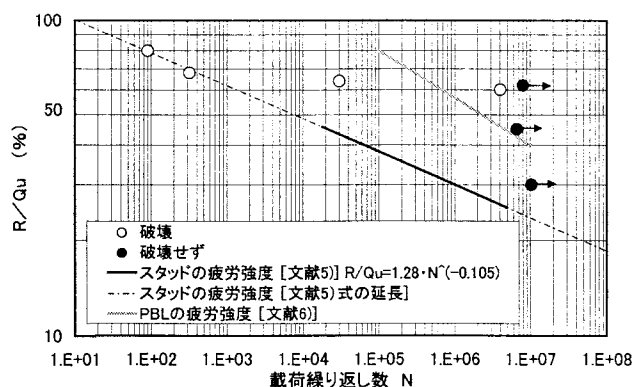


図-10 R/Q_u —載荷繰返し回数

本ずれ止めは、通常のスタッドに比べ高い疲労強度を有していることがわかる。

H.-P. Andrä の疲労強度と比較すると、 R/Q_u が 45～62% の供試体では、従来の PBL よりも高い疲労強度を有していることがわかる。このことより、鋼管を鋼板リブに配置することは疲労強度にも有効に作用すると考える。 R/Q_u が 64% 以上では、疲労強度が低下しているが、本ずれ止めの実構造への適用を考えた場合、たとえば合成床版を用いた橋梁ではずれ止めに作用する水平せん断力の大きさは、 $R/Q_u=60\%$ よりもかなり小さいため、疲労強度には問題ないと考ええる。

5. 結論

長孔あき鋼板リブと構造用鋼管を用いたずれ止めについて、静的・疲労押し抜き試験を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 孔あき鋼板に鋼管を貫通させることにより、従来の孔あき鋼板ジベルと比較して、約 1.5 倍以上のせん断耐力を有することが分かった。また、荷重—相対ずれ関係より高いじん性を有していることを確認した。
- 2) リブと鋼管を溶接で固定したタイプと固定しないタイプの試験結果より、リブ直角方向の載荷では差がなく、リブ方向に載荷した場合で、最大せん断耐力は固定しないタイプの方が小さくなった。したがって、リブと鋼管を溶接で固定する必要はないと言える。
- 3) リブ直角方向に載荷する供試体の試験結果より、リブを片側のみの溶接とした場合においても、鋼管を貫通配置することにより、従来の両側溶接形式の孔あき鋼板ジベルと同等のせん断耐力を有することを確認した。
- 4) 本ずれ止めの疲労強度は、十分な疲労強度を有しており、鋼管配置による優位性が確認された。

最後に、本研究で示したずれ止めは、駒井鉄工・片山ストラテック・栗本鐵工所の 3 社で開発した鋼・コンクリート合成床版（パイプスラブ）に採用されている。

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪工業大学の園田恵一郎教授に貴重なご意見を頂きました。また、大阪工業大学橋梁工

学研究室の研究生の皆様にも多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Fritz Leonhardt et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, 1987
- 2) たとえば、保坂、光木、平城、牛島、橘、渡辺：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, pp.1593-1604, 2000.4
- 3) 大久保、中本、田中、松井：鋼管ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版に関する実験的研究，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.97-102, 2003.6
- 4) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押し抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状，JSSC テクニカルレポート，No.35, 1996.11
- 5) 松井、平城、福本：頭付きスタッドの強度評価式の誘導—疲労強度評価式—，構造工学論文集，Vol.35A, pp.1233-1244, 1989.3
- 6) H.-P. Andrä : Economical Shear Connectors with High Fatigue Strength, IBASE SYMPOSIUM BRUSSELS, pp.167-172, 1990