

# 論文 孔あき鋼板ジベルの疲労特性

平 陽兵\*1・天野 玲子\*2・大塚 一雄\*3

**要旨：**合理的な構造形式として、鋼・コンクリート複合構造が注目されている。複合構造のより一層の省力化施工を可能にする接合要素として、孔あき鋼板ジベルを取り上げた。本研究ではこの接合方法が繰返し荷重を受けた時のずれ特性及び残存せん断耐力の把握を目的として、疲労試験及び押抜き試験を行った。その結果、鋼材に加わるせん断応力度と鋼材の降伏点の比を同じにして繰返し荷重を与えた時、孔あき鋼板に生じるずれは頭付きスタッドの場合と同等であった。また、疲労試験後の残存せん断耐力では、頭付きスタッドよりも優れた結果を示した。

**キーワード：**ずれ止め、孔あき鋼板、疲労試験、押抜き試験

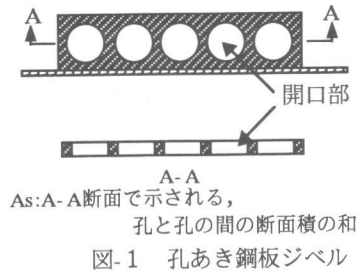
## 1. はじめに

近年、部材の合理的な利用といった点などから複合構造形式の構造物が数多く見られる。橋梁の上部工においても、異なる材料により一断面を構成している合成構造、あるいは異なる材料から成る部材を接合した混合構造などの構造形式が利用されている。

混合構造では、例えば鋼桁とPC桁とを接合したものがある。混合構造における部材間の接合部では、断面力を伝達するために様々な接合方法が用いられている。ずれ止めを使用する方法はそのひとつであり、ずれ止めとして一般に頭付きスタッド（以下、スタッド）が多く利用されている。しかし、スタッドは剛性が低いずれ止めであるため、繰返し荷重を受けるとずれが大きくなることが考えられる。

孔あき鋼板ジベル（以下、孔あき鋼板）は、図-1に示すような孔あき鋼板の孔にコンクリートを貫通させて、そのコンクリートがジベルの働きをして、ずれ止めとして働くものである。この方法は、ドイツのレオンハルト [1] らによって開発が行われており、鋼製フランジと、床版又は底版との接合に孔あき鋼板を用いた橋梁が建設されている。レオンハルトによると、孔あき鋼板はスタッドと比較して疲労特性に優れており、省力化が可能な接合方法である。

そこで、複合構造の異なる部材のずれ止め方法として孔あき鋼板を取り上げ、その基本的な特性を調べることにした。本研究では基本的な特性として、そのせん断耐力（以下、耐力とする）と繰返し荷重を受けた時のずれ特性を調べるために、押抜き試験及び疲労試験を行った。



\* 1 鹿島（株）技術研究所第一研究部研究員

\* 2 鹿島（株）技術研究所第一研究部主任研究員

\* 3 鹿島（株）建設総事業本部土木設計本部設計長

## 2. 試験体の設定

孔あき鋼板の特性を調べるために、孔あき鋼板をずれ止めとした試験体を3体用いて、押抜き試験と大きさを変えた2種類の載荷荷重による疲労試験をそれぞれ行った。また、スタッドを用いた試験体を同様に3体用いて、同じ試験を行い、孔あき鋼板と比較することとした。表-1に試験体一覧を示す。

孔あき鋼板は、孔を貫通したコンクリートが一つの孔につき2面でせん断力に抵抗する。そして、このせん断力は孔あき鋼板の孔と孔の間の部分に伝達される。そのため、孔あき鋼板をずれ止めとして使用した場合の試験体の終局状態として、孔を通過しているコンクリートのせん断破壊、孔あき鋼板の孔と孔の間の鋼材のせん断破壊、又は孔あき鋼板の取り付け部（溶接部）の破壊が考えられる。溶接部を破壊に対して十分な強度を持たせた場合、レオンハルトは、孔あき鋼板のずれ止めとしての設計式を、実験から得られた結果を元にそれぞれの破壊に対して次のように提案している。

$$\cdot \text{コンクリートが破壊する場合} \quad P_c = 1.4 \times d^2 \times \sigma_c' \quad (1)$$

$d$  : 孔の径 (mm)

$\sigma_c'$  : コンクリートの立方体強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$\cdot \text{鋼材が破壊する場合} \quad P_s = 1.44 \times A_s \times \sigma_{sy} \quad (2)$$

$A_s$  : 鋼板断面積 (mm<sup>2</sup>) (図-1 参照)

$\sigma_{sy}$  : 鋼板の降伏点 (N/mm<sup>2</sup>)

つまり、上式はコンクリート強度が一定ならば、孔あき鋼板の孔と孔の間の面積を大きくすればコンクリート、小さくすれば鋼板が破壊することを示している。本研究では、孔あき鋼板試験体は孔を貫通しているコンクリートがせん断破壊するように孔の径及び鋼板断面積  $A_s$  を設定した。

スタッド試験体は、孔あき鋼板との比較を行うために、(2)式より求まる孔あき鋼板試験体の鋼材が破壊する場合の耐力と同程度となるように設定した。スタッドの耐力は、試験体の形状、製作方法などによりばらつきがあるため、いくつかの算定式が提案されている。本研究では、スタッドの終局耐力を Fisher の式 [2] より求め、スタッドの本数を決定した。

## 3. 試験体

試験体の形状は、文献 [1] を参考にして決めた。図-2 に試験体の形状を示す。ずれ止めは H 形鋼 (SS400) のフランジに溶接し、H 形鋼とコンクリートを接合している。図-3 に孔あき鋼板の形状を示す。孔あき鋼板の材質は SS400 で、形状は板厚 12mm、高さ 60mm、孔径 35mm とし、片側のフランジに2枚、計4枚の孔あき鋼板をすみ肉溶接で取り付けした。これより、孔あき鋼板1枚あたりの  $A_s$  は 1500mm<sup>2</sup> となる。孔あき鋼板の孔の一部に切り欠きを設けているのは鉄筋を配置するためである。図4にスタッドの形状を示す。スタッドは JIS の規格品で、道路橋示方書で標準とさ

表-1 試験体一覧

試験体名 *1	ずれ止め方法	試験方法	鋼材総断面積 (mm <sup>2</sup> )
P-S	孔あき鋼板	押抜き	1500×4=6000 (枚)
P-F1		疲労1	
P-F2		疲労2	
S-S	スタッド	押抜き	380×12=4560 (本)
S-F1		疲労1	
S-F2		疲労2	

\*1 ずれ止め方法-試験方法-(荷重レベル)

P:Plate -S:Static

S:Stud -F:Fatigue

れる径 22mm, 長さ 150mm のものを片側のフランジにつき 6 本を 2 列に配置した。

コンクリートは, 最大粗骨材寸法を 20mm とした。表-2 に実験時のコンクリート強度を示す。

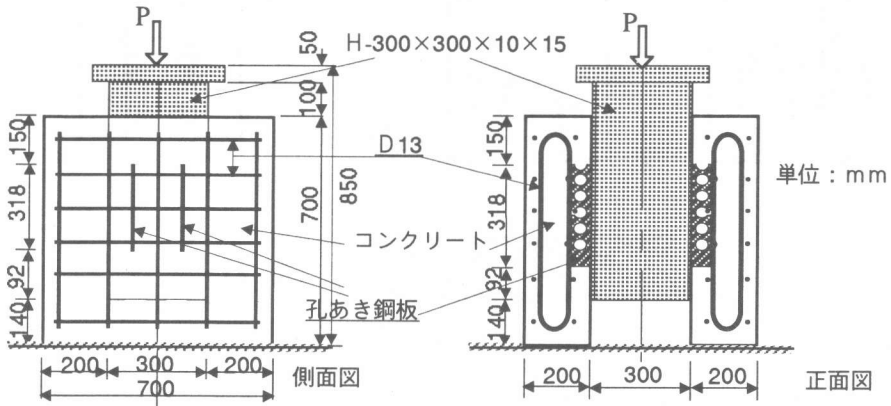


図-2 試験体の形状

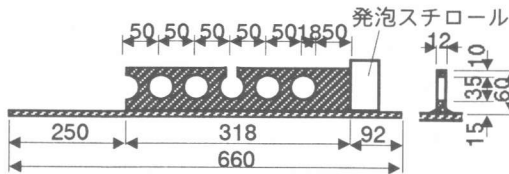


図-3 孔あき鋼板の形状

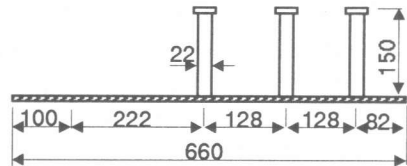


図-4 スタッドの形状

## 4. 押抜き試験

### 4.1 試験概要

押抜き試験は, 孔あき鋼板とスタッドの両ずれ止めの耐力の確認, 及び算定式との比較を行うために行った。試験は 5000kN アムスラー載荷試験機を使用した。載荷部は球座となっており, 床にセメントペーストを敷いて試験体を設置した。載荷は単調増加とした。計測は, H形鋼とコンクリートの相対ずれ及びH形鋼の変位を鉛直にセットした変位計で行い, 孔あき鋼板とスタッドのそれぞれのひずみをひずみゲージにて計測した。図-5 に各試験体の計測位置図を示す。

### 4.2 結果と考察

#### (1) P-S 試験体 (孔あき鋼板)

図-6 に荷重-相対ずれ関係を示す。なお, 相対ずれは 4カ所の平均値で示す。また, 計算値は (1) 式により求めたものである。P-S では, ずれが約 4mm の時に最大荷重 1472kN であった。最大荷重に達した後, 荷重が徐々に減少しながら変形が進んだ。最大荷重時の鋼板の最大ひずみは,  $\epsilon_{\max}=1220 \mu$  であり降伏ひずみ  $\epsilon_{sy}=1380 \mu$  に達しておらず, 試験体の耐力は孔を貫通しているコン

表-2 コンクリート強度

試験体	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>
P-S	39.1
P-F1	41.3
P-F2	—
S-S	53.3
S-F1	38.3
S-F2	42.6

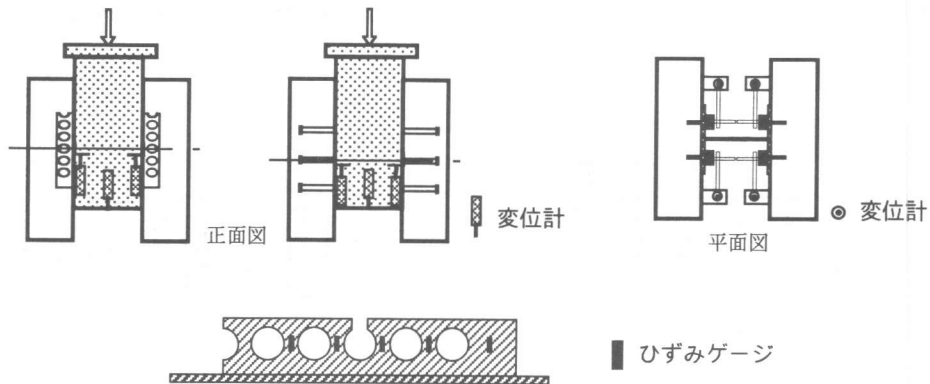


図-5 計測位置図

クリートのせん断破壊によって決まったと考えられる。試験終了後の孔あき鋼板の状況は、孔にはコンクリートが詰まった状態で鋼板の面に沿ってコンクリートがせん断破壊をしていた。また、鉄筋を配置した孔には、鉄筋が引っかかって変形が生じており、最大荷重を示した後も大きく荷重が低下しなかったのは、このためだと思われる。

耐力の実験値と計算値の比は0.93であり、実験値と計算値は差がなかった。

## (2) S-S試験体(スタッド)

計算値はFisherの式より求めたものである。

S-Sでは、ずれが約10mmの時に最大荷重2132kNを示した。最大荷重到達後に、大きな音と共にスタッドが破断し荷重が若干低下した。その後も変位を増加させるとスタッドが破断し、ずれが約18mmの時、3回目の音がして急激に荷重は低下した。最終的に、片側のフランジの3本のスタッドが、溶接余盛りを残して根元で破断していた。

耐力の実験値と計算値の比は1.06であり、実験値と計算値は差がなかった。

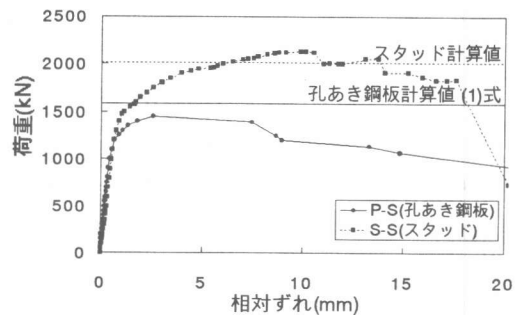


図-6 荷重-ずれ関係

## 5. 疲労試験

### 5.1 試験概要

疲労時のずれ特性を把握するために、疲労試験を行った。疲労試験は2000kNアクチュエータを用いて行った。載荷は部分片振りとし、上限荷重をレベル1とその2倍の大きさのレベル2の2種類の試験を行った。下限荷重は上限荷重の1割とした。表-3に、疲労試験の条件を示す。スタッド試験体の場合、道路橋示方書によるスタッドの許容せん断力を求めると338kNとなることから、レベル1の上限荷重をこれに近い値とし、鋼材に働くせん断応力度( $\tau_s$ )と鋼材の降伏点( $\tau_{sy}$ )との比を0.38とした。孔あき鋼板試験体の上限荷重は、スタッドと同様に $\tau_s/\tau_{sy}$ が等しくなるよう設定した。計測は、H形鋼とコンクリートの相対ずれ及び鋼材のひずみとし、計測位置は押抜き試

験と同じとした。

また、繰返し荷重を受けた後のずれ止めの特性を把握するために、押抜き試験を行い、残存耐力を調べた。

表-3 疲労試験の条件

試験体名	載荷荷重 (kN)		鋼材に働くせん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	鋼材の降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断応力度と降伏点の比	コンクリートせん断面に働くせん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
	上限	下限				
P-F1	560	56	93.3	245	0.38	14.6
S-F1	408	40.8	89.5	235	0.38	
P-F2	1120	112	187	245	0.76	29.1
S-F2	816	81.6	179	235	0.76	

### 5.2 結果と考察

図-7に、レベル1の載荷荷重であるP-F1とS-F1の相対ずれと載荷回数(回)の関係を示す。試験は両試験体とも210万回を越えるまで行った。P-F1とS-F1のずれは、1回目の載荷の時にともに0.19mmであった。210万回の際には、両試験体ともずれ量が初期のずれ量の2.3倍にまで増加した。P-F1とS-F1を比較すると、ずれ量の増加の程度は同程度であり、載荷回数が200万回を越えた時点のずれ量に差は見られなかった。これより、レベル1における孔あき鋼板とスタッドの疲労時のずれ特性は、ほぼ同程度であると考えられる。ただし、疲労試験の載荷荷重と「4.押抜き試験」で得られた耐力の比は、孔あき鋼板は0.38、スタッド試験体は0.19となることから、孔あき鋼板の方がずれが生じにくい特性を持つと考えられる。

図-8に、レベル2の載荷荷重であるP-F2とS-F2の相対ずれと載荷回数(回)の関係を示す。P-F2は回数が増えるに従い、ずれも増加しているのに対し、S-F2は比較的緩やかに増加している。載荷回数が1万回の際におけるずれ量は、P-F2が1.42mmに対し、S-F2は0.71mmであった。しかし、その後S-F2のずれが急激に増加し、10万回の際にずれ量が約3mmとなり実験を終了した。P-F2は35万回載荷を行い、この時のずれ量は2.12mmであった。

次に、疲労試験後に行った押抜き試験について述べる。図-9に孔あき鋼板試験体(P-S, P-F1,

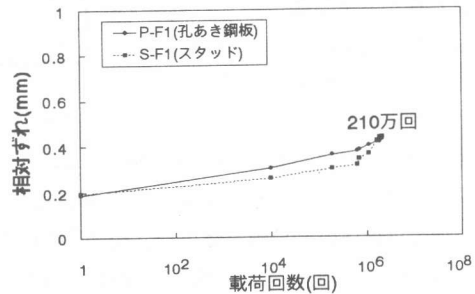


図-7 ずれ-載荷回数関係

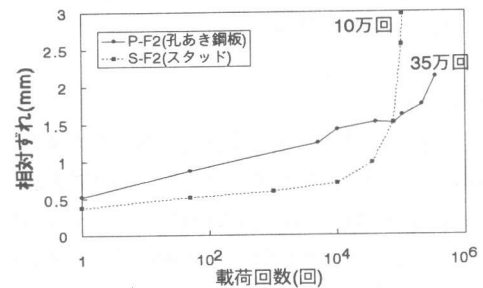


図-8 ずれ-載荷回数関係

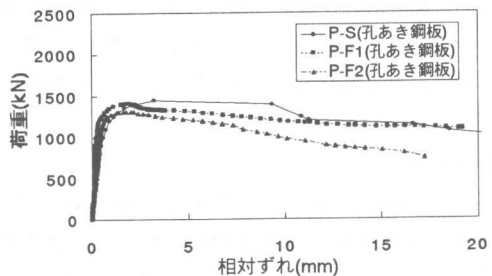


図-9 荷重-ずれ関係

P-F2), 図-10 にスタッド試験体 (S-S, S-F1, S-F2) の荷重-相対ずれ関係を示す。疲労試験を行っていない P-S 試験体と, レベル 2 の疲労試験を行った P-F2 を比べると, P-F2 の耐力は約 1 割低下した。それに対し, スタッド試験体は耐力が約 4 割低下した。最大荷重以後の挙動を見ると, 孔あき鋼板試験体は緩やかに減少しているのに対し, スタッド試験体の S-F2 ではスタッドが破断することで急激に耐力が低下している。スタッドの破断面を見ると, 破断位置はフランジ側の熱影響部に沿っており, 疲労試験で観察できる破壊形式であった。これより, 耐力の低下の理由としてスタッドに疲労試験による影響が生じていたと考えられる。

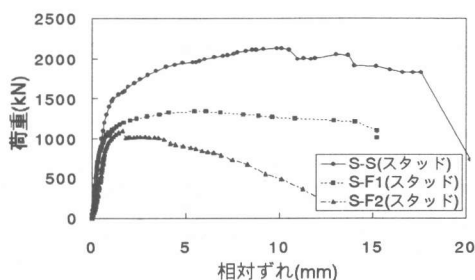


図-10 荷重-ずれ関係

表-4 実験値と計算値の比較

試験体	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値/計算値	
P-S	1472	1578	0.93	
	実験値(kN)	計算値(kN)	計算値×0.93	実験値/計算値
P-F1	1407	1667	1550	0.91
P-F2	1305	1667	1550	0.84
	実験値(kN)	計算値(kN)	実験値/計算値	
S-S	2132	2011	1.06	
	実験値(kN)	計算値(kN)	計算値×1.06	実験値/計算値
S-F1	1350	2011	2132	0.63
S-F2	1100	2011	2132	0.52

表-4 に, 耐力の実験値及び計算値を示す。表-4 に示すように P-S と S-S の押抜き試験で得られた実験値と計算値の違いを考慮し, 疲労試験の試験体の計算値を修正し, 疲労試験後の押抜き試験の耐力と修正した計算値を比較した。P-F1 の耐力は, 計算値より約 1 割の低下に対し, S-F1 の耐力は約 4 割低下していた。また, P-F2 と S-F2 を比較した場合も, スタッド試験体の方が低下の度合いが大きいことが分かる。このことから, 孔あき鋼板は繰返し荷重を受けた後も大きな耐力を有しており, スタッドよりも優れている。

## 6.まとめ

合成構造あるいは混合構造を対象としたずれ止め方法として, 孔あき鋼板を用いることを考え, 押抜き試験及び疲労試験を行った。本研究をまとめると以下の通りである。

- (1) 疲労試験において, 鋼材に加わるせん断応力度と鋼材の降伏点との比が約 4 割 (レベル 1) となる載荷荷重の時には, 孔あき鋼板とスタッドの 200 万回時のずれに差は見られなかった。
- (2) 孔あき鋼板とスタッドの鋼材に加わるせん断応力度と鋼材の降伏点との比が同じであれば, 孔あき鋼板の方が疲労後の残存耐力の低下の割合は小さかった。

今後, 孔あき鋼板については, 孔の大きさなど形状が異なる場合, あるいはコンクリートの応力状態が異なる場合の特性などについて研究を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] Leonhardt, F. et al: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/1987
- [2] Ollgaard, J. et al: The Strength of Stud Shear Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC, Engineering Journal, Vol. 8, No. 2, 1971