

鉄道橋への2主桁橋の適用に関する検討

～複線連続合成2主I断面桁のずれ止めのせん断特性について～

Characteristics of Shear Connectors for Composite Continuous Bridges with Two Plate Girders

渡辺 滉
Hiroshi WATANABE

川田工業(株)橋梁事業部技術統括部長

橋 吉宏
Yoshihiro TACHIBANA

川田工業(株)橋梁事業部東京設計部設計二課課長

小枝 芳樹
Yoshiki KOEDA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部技術課

辻角 学
Manabu TSUJIKADO

川田工業(株)橋梁事業部M開発プロジェクト

This paper deals with shear characteristics on the slippage behavior of shear connectors used in composite continuous girders for railway bridges. The main purpose of this investigation was to study the relationships of shearing force between the steel connectors and the concrete blocks by the static push-out method. As a result, authors were able to acquire the useful slippage data (for example ; the spring constant, maximum of shear strength, the condition of destruction and others) of shear connectors, for the design of composite continuous bridges with two plate girders.

Key words : composite continuous bridges, shear connector, slippage characteristics

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への配慮と軌道設備を含む維持管理の省力化から、鋼主桁とコンクリート床版とを鋼主桁上フランジに溶接されたずれ止めで合成させた合成桁橋¹⁾が主流になっている。また、今後の鉄道用合成桁橋は、既往の数多くの研究成果が再評価され、これまで実績を得ている連続構造化(断続合成桁)に加えて2主I断面桁橋を採用すれば、材片数、溶接延長および塗装面積の低減による製作時の省力化、現場施工時の工期短縮および維持管理費の低減などが可能となり、その建設面においてますます合理化されていくものと期待できる。この合理的な2主I断面桁橋は、フランスではTGV (train de grande vitesse) の高架橋で実績のある形式である。一方、わが国の鉄道橋では、実用化に向けて各種の研究開発²⁾を実施し、それらから得られた知見をもとに設計を行っているところである。

ここで言う連続合成2主I断面桁橋の断面形状を図1に示す。床版形式としては安価なRC床版が採用されている。なお、床版厚は床版の張出し長を2.3mとした場合、遮音壁に作用する荷重等を考慮して30cmとなる³⁾。この合理的な形式を適用するにあたり、ずれ止めの構造や床版のひび割れを含めた中間支点部の設計法が問題となってくる⁴⁾。鉄道橋では、一般に繰返し荷重への配慮から馬蹄形ジベル

が採用されてきた⁵⁾。しかしこの形式におけるずれ止め構造として、馬蹄形ジベルの適用を考えた場合、2主桁化に伴って桁から床版に伝達される水平せん断力が増加するため、その配置は物理的に困難となることも予想される。また、馬蹄形ジベルにおいて橋軸直角方向の力の伝達に対する構造的配慮は多少なされてはいるものの十分であるとは言えないため、地震・風荷重などの横方向(橋軸直角方向)荷重の桁1本に作用する力の増大に対して、不都合が生じることも考えられる。このようなずれ止めの構造と配置の問題を解決するには、連続合成桁の中間支点部近傍の負荷区間におけるコンクリート床版の挙動も考慮に入れた設

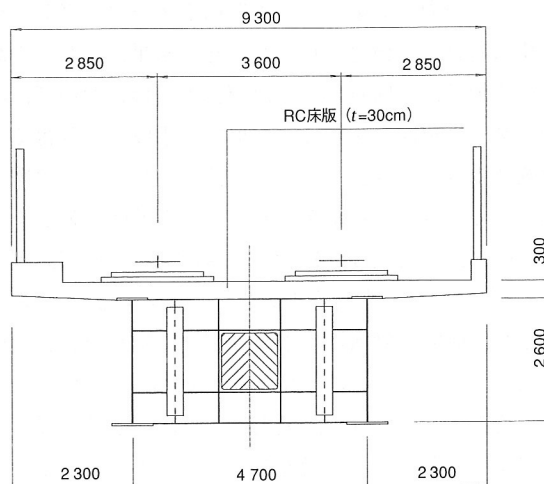


図1 連続合成2主I断面桁の断面図(中間支点部)

計法に関連づけて検討する必要がある。

そこで、本研究では連続合成桁に用いるずれ止めに対して、選定、配置、設計するうえで重要となるずれ止めの基本的なせん断特性を静的押抜きせん断試験を行って把握することとした。その結果、①各ずれ止めタイプのずれ挙動データの収集、②各ずれ止め構造のせん断特性とずれ定数の把握、③各ずれ止めの破壊性状の確認など、複線連続合成2主I断面桁を実用化するうえでの有用なデータが得られた。ここにその結果を報告する。

2. ずれ止めの種類

今回着目したずれ止めの種類とその諸元を表1に示す。

道路橋の合成桁において一般的に用いられているタイプ1のスタッドジベルは、鉄道橋においても多くの研究と疲労実験⁶⁾を踏まえたうえで、使用実績が増えてきており、施工性がよくしかも経済的であることから、従来の合成桁に多用されてきた馬蹄形ジベルに加え、使用頻度が今後さらに増えていくものと推測できる。

タイプ2の群ジベルは、プレキャストコンクリート床版(少数主桁化に伴う主桁間隔の増加による対策や床版自体のひび割れ制御、現場施工の工程短縮を主目的として適用される)を鋼主桁上フランジに結合させるために頭付きスタッドをグループ配置したずれ止めである。ここで著者らが知る限り、頭付きスタッドをグループ配置した場合のずれ挙動や耐力に関して、今のところ十分な実測データが少ないように思える。

タイプ4の柔ジベルは、連続合成桁の中間支点付近の負曲げモーメント域に作用するずれを許容できる非合成作用を持った柔なずれ止めである。今まで数多くの研究成果⁷⁾が報告されており、現在では断続合成桁⁸⁾に適用され、実用化に至っている。なお、ここでフレキシブルなずれ性能をもたせるためにH形鋼のウェブ両側に取り付けている発

泡スチロール(厚さ10mm)の効果を確認する目的で、発泡スチロールを有さないH形鋼を用いたタイプ3のようなH鋼ジベルも製作している。

タイプ5の孔あき鋼板ジベルは、ドイツのレオンハルト⁹⁾らによって開発された耐疲労性を考慮したジベルである。孔を貫通しているコンクリートのせん断力と鋼板表面の付着力で床版と鋼製フランジを接合した、全くずれを許容しないずれ止めである。海外での施工例は報告されているが、日本国内では合理的な鋼・コンクリート複合構造において近年注目され、構造特性に関する研究¹⁰⁾はなされているが、合成桁橋においてはまだ実用化に至っていない。

3. 押抜きせん断試験方法

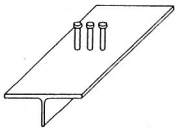
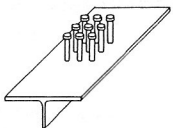
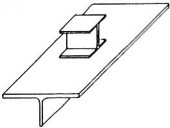
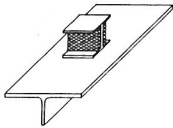
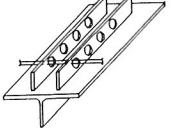
(1) 試験体

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5種類のずれ止めタイプについて3体ずつ、計15体を製作した。各ずれ止めの製作に当たって¹⁰⁾、タイプ1のスタッドジベルがスタッドの破断によって最大せん断耐力に達するものと仮定した。そして、最大せん断耐力がタイプ2を除いて、4つのタイプではほぼ一致(タイプ3,4:H形鋼ウェブの破断時の耐力,タイプ5:開口部のコンクリートのせん断破壊時の耐力)するように設計している。なお、コンクリートブロックの製作に用いられたコンクリートの目標設計基準強度は300kgf/cm²であり、その実測強度は試験直前の圧縮試験により、462kgf/cm²であった。また、鋼T形部材の材質はSM490材であり、そのフランジ面にはコンクリートブロックとの付着を除去するためにグリースを塗布している。

(2) 試験方法

押抜きせん断試験は、図2に示すような載荷・計測システムで200tf万能試験機を用いて行った。なお、コンクリートブロックは床面に速乾性の無収縮モルタルを敷いて水平

表1 ずれ止めの種類および諸元

	ずれ止めタイプ				
	スタッドジベル (タイプ1)	群ジベル (タイプ2)	H鋼ジベル (タイプ3)	柔ジベル (タイプ4)	孔あき鋼板ジベル (タイプ5)
概略図					
コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2 \rightarrow$ 実測強度462kgf/cm ²					
ずれ止め諸元	頭付きスタッドジベル 軸径: $d=19\text{mm}$, 高さ: $H=100\text{mm}$ 間隔: 50mm, 取付方法: スタッド溶接		H形鋼 材質: SS400 寸法: 100×100×6×8×120 取付方法: 6mmの全周すみ肉溶接		孔あき鋼板 材質: SS400 寸法: 70×12×400 取付方法: 10mmの全周すみ肉溶接 孔径: 4-φ35孔 孔間隔: 50mm 1孔にD13鉄筋貫通
	本数: 3本 配列: 3行1列	本数: 9本 配列: 3行3列		厚さ10mmの発泡スチロールをウェブのみに貼付	

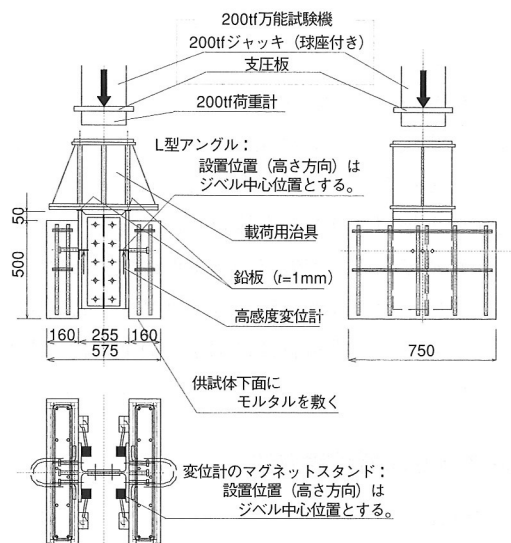


図2 荷重・計測システム

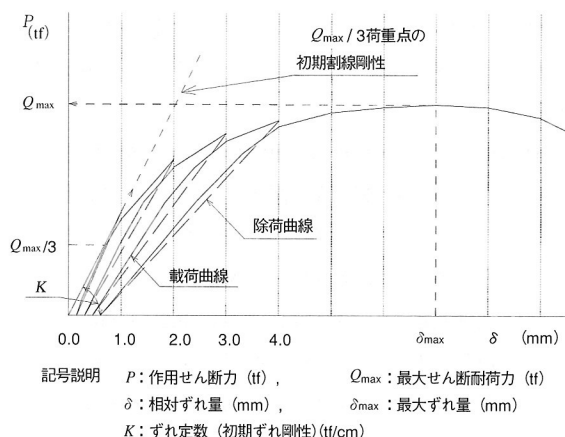


図3 荷重方法

が保持できるように設置し、載荷部には球座を取り付け、フランジ部のみに荷重が作用するようにウェブを切欠き、若干低く加工した。また、鋼T形部材とコンクリートブロックとの相対ずれ変位量は4カ所に取り付けた高感度変位計 ($500 \times 10^{-6}/\text{mm}$) を用いて静ひずみ測定器で計測した。載荷方法は変位 (ずれ) 制御による漸増繰返し載荷法で行い、最大せん断耐力 Q_{max} とその破壊モードが確認できるまで載荷を繰り返した。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」¹¹⁾ を参考とした。文献11) によれば、図3に示している最大ずれ量 (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 (初期ずれ剛性とも言う) である。

4. 押抜きせん断試験結果

(1) 終局破壊状態

ここでは、今回行った静的押抜きせん断試験により得

られた各ずれ止めタイプの試験体の破壊状態をもとに破壊過程を推測した。

a) スタッドジベルと群ジベル

図4および写真1にスタッドジベルタイプの終局破壊状態を示す。スタッドジベルを用いた試験体の終局破壊状態は、3体とも溶接余盛り上面のスタッド軸部でせん断破断しており、軸部の曲げ変形している区間はスタッド取付位置 (鋼T形部材面) からスタッド軸径 (d_s) の1.5倍程度の高さまでであった。また、コンクリートが圧壊している区間はスタッド軸芯からせん断方向に向かってスタッド軸径 (d_s) の3.0倍程度の範囲であった。

また、群ジベルの終局破壊状態は、3体ともコンクリートブロックの圧壊であった。これは水平せん断力が作用することによって、スタッド間のコンクリートがお互いに干渉し合い、早期にひび割れが発生し、それらが連係したためと考えられる。すなわち、群ジベルの場合はほとんどがコンクリートの圧壊で終局破壊状態を迎え、コンクリートの圧縮強度で終局耐力が決定されると推測できる。なお、スタッド自身は写真2に示すように曲げ変形が起きているだけで破断に至っていない。

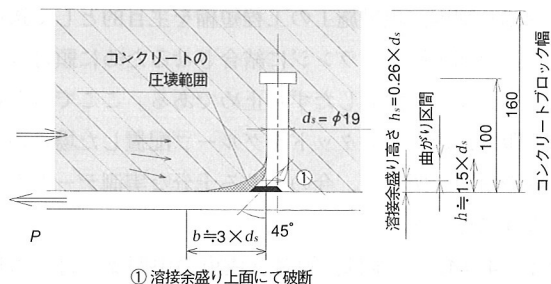


図4 スタッドジベル破壊性状

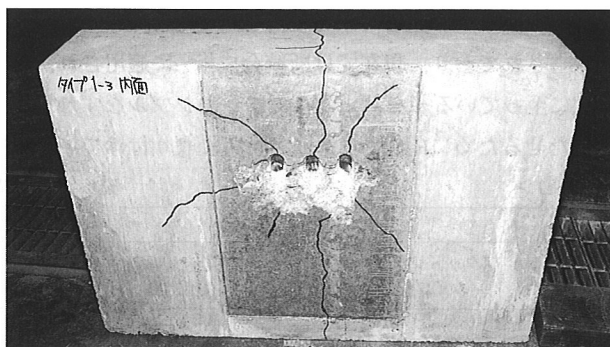


写真1 スタッドジベル破壊状況

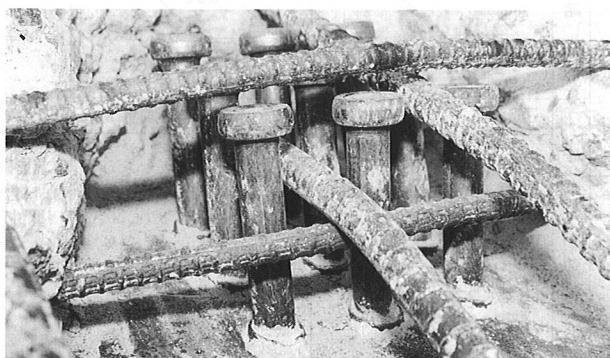


写真2 群ジベル状況 (試験後)

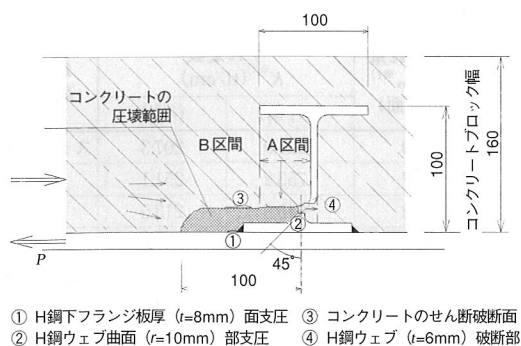


図5 H鋼ジベルおよび柔ジベル破壊性状

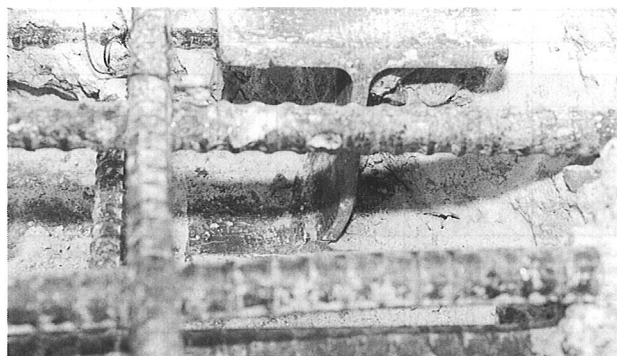


写真3 H鋼ジベル破壊状況（柔ジベルでも同様）

b) H鋼ジベルと柔ジベル

図5および写真3にH鋼ジベルおよび柔ジベルタイプの終局破壊状態を示す。H鋼ジベルと柔ジベルの試験体の破壊性状は、発泡スチロールの貼付によるコンクリート側の支圧破壊の進行の相違はあるものの、ほとんど同じ性状であると推測でき、終局破壊状態はともにH形鋼ウェブ部の破断であった。破壊に至る過程を考察すると、まず最初にH形鋼下フランジ部とH形鋼ウェブ下曲面部でコンクリートの支圧破壊がほぼ同時に発生し、進行していき、コンクリートブロックにせん断すべり面が形成されていく。その後、そのせん断破壊面にて、ずれ止めの支圧前面のコンクリート部がすべり始め、ずれ止めに大きな変形を伴い、ウェブの曲面端部で斜め引張による破断を起こすものと考えられる。

なお、現在実用化されている断続合成桁橋（連続合成桁橋）の中間支点付近における柔ジベルは、桁支間中央付近の床版圧縮域において主桁との高い合成のため、使用荷重レベルではこのような鋼主桁とコンクリートとの付着が切れてずれていくような挙動を起こさないことを付記しておく。

c) 孔あき鋼板ジベル

図6および写真4に孔あき鋼板ジベルタイプの終局破壊状態を示す。孔あき鋼板ジベルの試験体の終局破壊状態は、孔あき部のコンクリートがせん断破壊した後、鉄筋が貫通している1つの孔において鋼板がずれることで鉄筋にせん断力が作用し、その鉄筋のせん断変形が進んだことによる鉄筋の破断であった。なお、2枚の孔あき鋼板に挟まれた

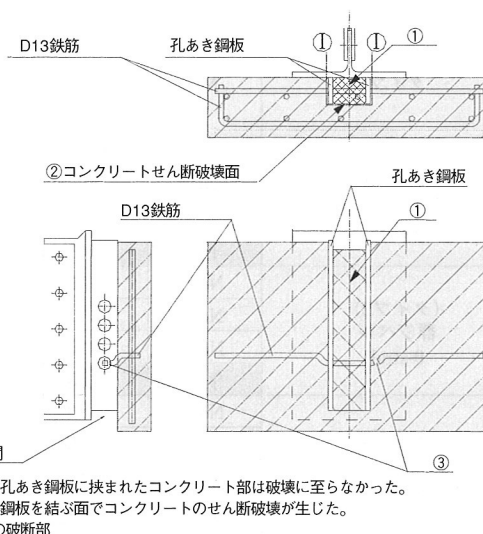


図6 孔あき鋼板ジベル破壊性状

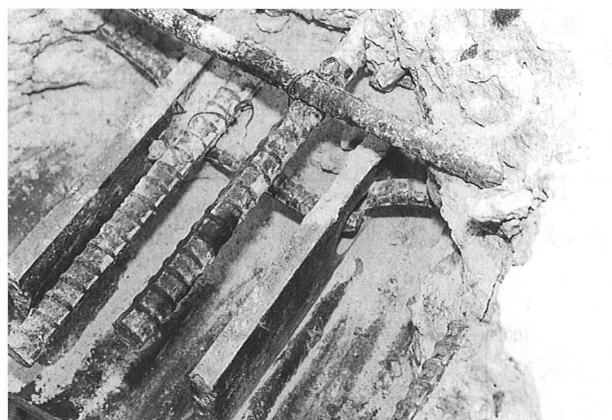


写真4 孔あき鋼板ジベル破壊状況

コンクリート部は圧壊せずに、鋼板の先端を結ぶ線でせん断面（図6中のI-I面）を形成してせん断破壊した。

(2) 相対ずれ性状とずれ定数（初期ずれ剛性）

静的押抜きせん断試験の結果を、表2と図7に示す。

スタッドジベルを用いたタイプ1は、最大せん断耐力（平均値46.083tf）に至るまで11～13mm程度とかなり大きなずれを伴っているが、最大せん断耐力に達した後はずれをほとんど伴わずに破壊したものであった。すなわち、スタッドは高い変形性能を期待できるずれ止めであると言える。

群ジベルのタイプ2は、T形鋼フランジの片面に配置したスタッド9本あたりのずれ定数（平均値918.9tf/cm/面）はかなり大きいものの、スタッド1本あたりに換算（平均値102.1tf/cm/本）すると、タイプ1のスタッドジベルの1本あたりのずれ定数（平均値224.0tf/cm/本）に比べ、小さくなることがわかる。また、スタッド1本あたりの耐力も同様、タイプ1のものに比べて、66%程度まで低減される結果となった。これは頭付きスタッド自体のせん断耐力に達しないうちにコンクリートブロックのひび割れがかなり進行していたことに起因していると考えられる。すなわち、群ジベルの終局耐力はコンクリートの圧縮強度に大きく関係していることになる。

表2 静的押抜きせん断試験結果

タイプ	No.	最大せん断耐力 $Q_{\max}$ (tf)			最大ずれ量 $\delta_{\max}^{※1)}$ (mm/面)	ずれ定数 $K^{※2)}$ (tf/cm)		最終 破壊形式
		(/面)	(/本)	低下率 ^{※4)}		(/片面)	(/本)	
(タイプ1) スタッドジベル 3-stud	No.1	45.225	15.075		13.0	621.9	207.3	スタッド破断
	No.2	47.000	15.667		10.7	753.2	251.1	"
	No.3	46.025	15.342		11.2	640.6	213.5	"
	平均	46.083	15.361	1.00	11.6	671.9	224.0	
(タイプ2) 群ジベル 9-stud	No.1	96.100	10.678		4.7	1038.0	115.3	コンクリート圧壊
	No.2	92.775	10.308		4.1	941.1	104.6	"
	No.3	85.200	9.467		6.4	777.5	86.4	"
	平均	91.358	10.151	0.66	5.1	918.9	102.1	
(タイプ3) H鋼ジベル 1-(H-section)	No.1	50.100	-----	-----	8.3	886.8	-----	H鋼破断
	No.2	45.300	-----	-----	5.1	1364.5	-----	"
	No.3	47.875	-----	-----	8.4	924.6	-----	"
	平均	47.758			7.2	1058.6	-----	
(タイプ4) 柔ジベル 1-(H-section)+ 発泡スチロール(ウェブ)	No.1	35.350	-----	-----	14.6	582.9	※3) -----	H鋼破断
	No.2	45.075	-----	-----	14.0	463.3	※3) -----	"
	No.3	42.225	-----	-----	16.2	416.7	※3) -----	"
	平均	40.883			14.9	487.6	※3) -----	
(タイプ5) 孔あき鋼板ジベル 2-PL(4×φ35)	No.1	51.100	-----	-----	0.8	2253.1	-----	鉄筋破断
	No.2	52.825	-----	-----	0.9	1724.2	-----	"
	No.3	48.000	-----	-----	0.7	1966.5	-----	"
	平均	50.642			0.8	1981.3	-----	

※1) 最大ずれ量 ($\delta_{\max}$) は、最大せん断耐力の到達時に発生するずれ量とする。

※2) ずれ定数 (K) は、荷重-ずれ曲線における初期接線の傾き (初期ずれ剛性) とする。

※3) 柔ジベルのずれ定数は、H形鋼下フランジ部の支圧に対する抵抗を含むものとする。

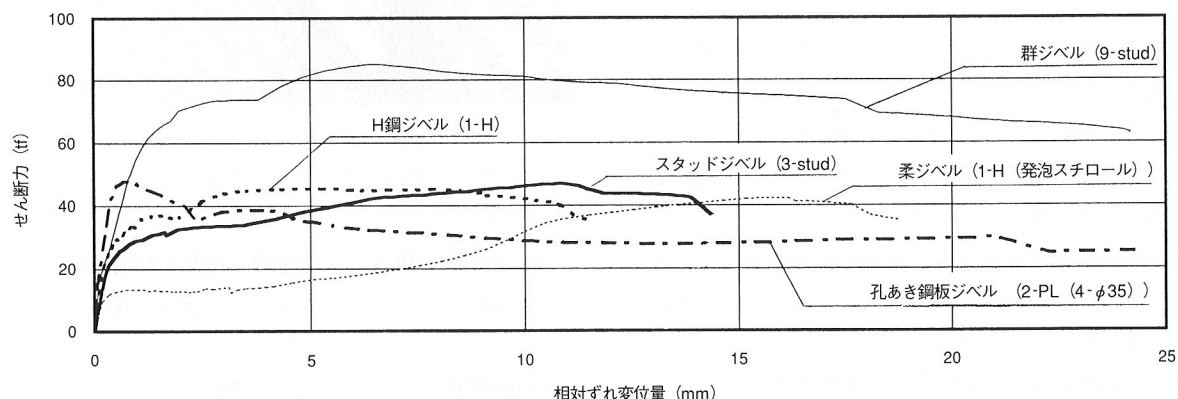


図7 相対ずれ性状の比較

H鋼ジベルのタイプ3の最大ずれ量はスタッドジベルのタイプ1 (平均値11.6mm) に比べ、若干小さい7.2mm程度であるが、ほとんどスタッドジベルのタイプ1に近いずれ挙動を示していると言える。さらに柔ジベルのタイプ4とH鋼ジベルのタイプ3を比較すると、最大せん断耐力はほとんど変わらないことがわかる。しかし、H形鋼のウェブに厚さ10mmの発泡スチロールを貼付したことで、そのウェブ下側の曲げ変形が先行し、発泡スチロールが壊れるまでの間のコンクリートの支圧破壊の進行が遅れることにより、その初期ずれ剛性が小さくなり、さらには最大ずれ量 (最大せん断耐力に達した時の相対ずれ量) にも大きな違いが認められた。すなわち、発泡スチロールをウェブに貼付すれば、比較的低い荷重レベルにおいても高い変形性能

を大いに期待でき、そのずれ性状から非合成に近い挙動を示していると言える。ここで、発泡スチロールをH形鋼ウェブ部に加え、溶接された下フランジ部のコンクリート支圧破壊面にも配置したならば、低い荷重レベルでの変形性能がさらに著しく向上し、ずれ定数 (初期ずれ剛性) はもっと大幅に小さくすることができると考えられる。

孔あき鋼板ジベルを用いたタイプ5については、平均値で0.8mmと極めて小さいずれ量で最大せん断耐力 (平均値50.6tf) に達している。その後、徐々に荷重が減少しつつ、ずれのみが進行している。すなわち、ずれに対する耐力は孔を貫通しているコンクリートのせん断破壊と2枚の孔あき鋼板間に挟まれたコンクリート部のせん断破壊との重ね合わせによって決まるものであった。ここで最大せん断耐

力を示した後も大きく載荷荷重が低下しなかった原因として、孔に貫通している1つの鉄筋が孔の側面に接触し、ダウエル作用により、その鉄筋が曲げ変形を起こしていたものと考えられる。また、ずれ定数（初期ずれ剛性）が平均で1981.3 tf/cm/面と極めて高く、最大ずれ量は極端に小さかったことから、かなり強い合成作用を有しているずれ止めであると理解できる。すなわち、ずれを認めない合成構造物に適していると言える。

5. まとめ

本論文は、鉄道用連続合成2主I断面桁橋の実務設計に向けてのずれ止め構造のせん断特性を把握することを目的とし、5種類のずれ止めに対して実施した静的押抜きせん断試験の結果を述べたものである。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

- ① スタッドジベルは過去の研究や実績から証明されているように、終局強度や破壊性状に対する評価はある程度可能で、静的耐力については十分に確立されたものであると言える。ずれ特性としては、高い変形性能をもったずれ止めであることがわかった。
- ② スタッドをグループ配置した群ジベルの評価として、スタッドの1本あたりの耐力は単列配置したスタッドの1本あたりの耐力よりかなり低減され、スタッドの耐力が十分に発揮されないうちにコンクリートのひび割れが進行し、コンクリートの圧壊に至ってしまう。よって、群ジベルの終局耐力はコンクリートの圧縮強度に大きく起因していると考えられる。
- ③ H鋼ジベルと柔ジベルの最終破壊状態はともにH形鋼のウェブの斜め引張によるせん断破断で、ウェブの発泡スチロールの有無に関係なく、終局耐力はほとんど変わらないものであった。しかし、H形鋼のウェブに発泡スチロールを貼付した柔ジベルは、発泡スチロールの弾性変形が先行し、コンクリートの支圧破壊の進行を遅らせることで初期剛性をかなり小さくすることができ、そのずれ性状も非合成に近い挙動を呈した。なお、発泡スチロールをフランジの支圧破壊面（H形鋼下フランジ部）にも配置すれば、低い荷重レベルでの変形性能が著しく向上し、ずれ定数（初期剛性）は大幅に小さくなると思われる¹⁵⁾。
- ④ 孔あき鋼板ジベルは、孔を貫通しているコンクリートのせん断破壊と2枚の孔あき鋼板に挟まれたコンクリートのせん断破壊によって最大せん断耐力が決まる。しかし、最大せん断耐力に達しても、孔に貫通している鉄筋のダウエル作用により、載荷荷重は大きく減少しなかった。また、初期剛性がかなり高く、最大せん断耐力に達しても相対ずれ量はごくわずかであった。すなわち、孔あき鋼板ジベルはずれを認めない、かつ大きな初期剛性を必

要とする場合に最適であり、静的耐力については十分設計可能であると言える。なお、一定量の変形性能を保証するために、孔あき鋼板の孔の部分に鉄筋を貫通させておく必要がある。

今後は、省力化を期待した合成桁である連続2主I断面桁の鉄道橋への適用を考えた中間支点部近傍の設計手法や構造を提案すべく、さらにFEM立体解析による考察も含めた詳細な検討を実施していく所存である。なお、本研究は日本鉄道建設公団の保坂鐵矢氏の指導のもとで実施したものであり、大阪工業大学の栗田章光教授、摂南大学の平城弘一助教授には大変貴重なご意見をいただきました。紙面を借りて厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）、丸善(株)、1992年10月。
- 2) 保坂鐵矢：北陸新幹線の複合鉄道橋、JSSC, No.25, 1997年。
- 3) 橋 吉宏・笹川大作・保坂鐵矢・渡辺 滉：鉄道橋への2主桁橋の適用に関する考察、土木学会年次学術講演会講演概要集, I -A263, pp.526～527, 1997年9月。
- 4) 牛島祥貴・保坂鐵矢・橋 吉宏・栗田章光・渡辺 滉：連続合成桁における中間支点部のひび割れ挙動に関する実験的研究、土木学会年次学術講演会講演概要集, I -A123, pp.246～247, 1997年9月。
- 5) 阿部英彦：鉄道橋合成桁のずれ止めに関する実験的研究、鉄道技術研究報告, No.961, 1975年3月。
- 6) 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、大阪大学博士学位論文, 1990年2月。
- 7) 阿部英彦・中島章典・堀内 博：合成桁におけるスラブ分割の影響と柔ずれ止めの開発、構造工学論文集, Vol.35 A, pp.1205～1211, 1989年3月。
- 8) 稲葉典昭・井口光雄：鉄道橋用断続合成桁の設計法の提案、構造工学論文集, Vol.41A, pp.1085～1096, 1995年3月。
- 9) Leonhardt Fritz, *et al.* : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/1987。
- 10) 緒方紀夫・村山 陽・沖本真之・今西直人：鋼製エレメントとコンクリートとの付着性能に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.1165～1170, 1994年。
- 11) 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年11月。
- 12) 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, pp.1497～1504, 1998年3月。