

(28) ヨーロッパにおける革新的なずれ止めを用いた複合橋梁の施工事例と設計法

今川 雄亮¹・大山 理²・Wojciech LORENC³

¹正会員 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 准教授（〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1）
E-mail: yusuke.imagawa@oit.ac.jp

²正会員 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 教授（〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1）
E-mail: osamu.oyama@oit.ac.jp

³Professor(full) at Wroclaw University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Wroclaw, Poland
E-mail: wojciech.lorenc@pwr.edu.pl

2000年代初頭、ドイツにおいて小スパン橋への適用を目的とした、H形鋼のウェブを波形状に切断した鋼T桁を用いたプレキャスト合成桁（VFT-WIB工法）が開発され、2004年に初めて実橋に適用された。初期のVFT-WIB工法では、パズル型の形状で切断したずれ止めが適用されたが、近年、ポーランドを中心に、切断形状を改良したクロソイド型ジベルをずれ止めとしたプレキャスト複合橋の適用例が増加している。本文では、ポーランドで施工されたクロソイド型ジベルを用いた最近の複合橋梁を紹介する。さらに、クロソイド型ジベルの設計せん断耐力式とその計算例を示す。この計算結果と孔あき鋼板ジベルのせん断耐力とを比較し、クロソイド型ジベルの力学特性の特徴について述べる。

Key Words: prefabricated composite bridge, shear connection, composite dowels, clothoid shape dowel

1. はじめに

2000年代初頭、ドイツにおいてプレテンションPC桁の適用割合が多い小スパン橋への導入を目的として、図-1に示すような経済的で合理的なプレキャスト合成桁であるVFT-WIB工法が開発され、2004年に初めての実橋が完成した¹⁾²⁾。この工法は、安価なH形鋼のウェブを図-2に示すような波形状に切断し、鋼桁上フランジを省略して、ウェブ上端がずれ止めとして機能する合成桁を製作するものである。工場で鋼桁断面とコンクリート床版を一体化したプレキャスト桁を製作し、現場架設の後、床版上部を場所打ちして完成系となる。本工法における初期の切断形状は、図-2に示す一定の曲率半径で切断された形状で、一度の切断で2本の鋼T桁を得ることができる。なお、同図のような切断形状をヨーロッパではパズル型ジベルと呼んでいる。

本工法は、ドイツにおいて図-1(a)および(b)の断面を有する合成桁に適用された後、断面(d)のようにコンクリートT桁の外補強として鋼桁を用いた合成桁としてポーランドやオーストリアなどでも適用された。さらに、断面(c)のように、コンクリートと鋼の両方のウェブを有する合成桁断面も開発され、現在では、断面力に応じて

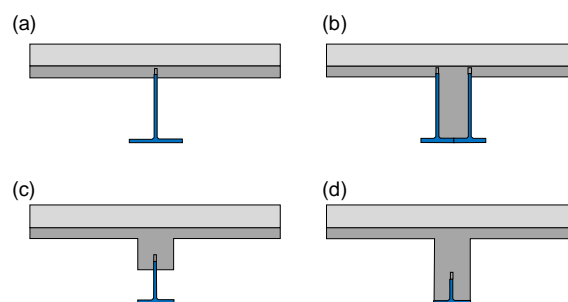


図-1 VFT-WIB工法の合成桁断面の例



図-2 鋼ウェブの切断加工例（パズル型ジベル）

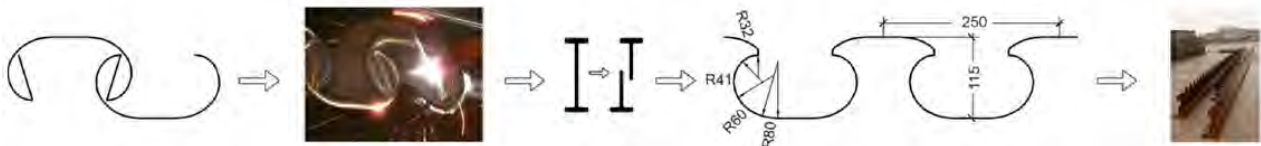
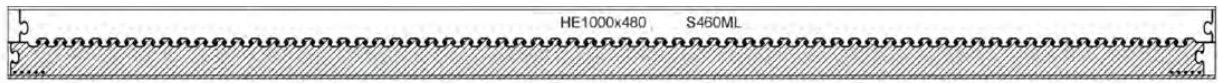


図-3 クロソイド型ジベルの切断加工例

変断面構造として1径間内に断面(a)～(d)の複数を有する複合桁も施工されている。

このような合成桁断面の適用範囲の拡大に伴って、鋼桁とコンクリートを結合するずれ止めには、より高いせん断耐力や疲労強度が要求され、様々な切断形状のずれ止めが提案された。図-2に示したような形状の場合、切断工程において鋼ずれ止め基部の過加熱や応力集中による疲労耐久性への影響が懸念された。

この課題を解決するためにいくつかの切断形状が提案されたが、最も新しい切断方法として、図-3に示すようなクロソイド型ジベルが開発された³⁾。クロソイド型ジベルは、ずれ止めの基部をクロソイド曲線とし、かつ1本の切断ラインとすることで過加熱や応力集中が低減されるため、パズル型ジベルと比較して高い疲労強度を有するのが特長である。

以上のように、H形鋼または平鋼板を切断して、パズル型ジベルやクロソイド型ジベルとしたずれ止めは、ヨーロッパでコンポジットダウエル (Composite Dowels) と呼ばれている。これは、特殊な切断形状の鋼板によるずれ止めの効果 (Steel dowel) と鋼板の凹部内の鉄筋コンクリート (Concrete dowel) との複合作用でせん断力を伝達することに由来する^{2,3)}。

わが国の建築分野においては、コンポジットダウエルの耐震性能 (繰返し荷重に対する性能) に着目した研究が始まっている^{4,5)}。一方、橋梁の分野においては、コンポジットダウエルと同様の抵抗機構を有するずれ止めとして孔あき鋼板ジベル (以下、PBL と略記) が普及しているものの、クロソイド型ジベルを適用した施工事例は、筆者が調べた限り見当たらない。PBLは、施工時に孔に鉄筋を通す煩雑な作業が必要であり、施工性の観点からもわが国においてクロソイド型ジベルを適用する利点があると考えられる。

そこで、本文では、クロソイド型ジベルを適用したポーランドにおける最新の複合橋梁を紹介するとともに、クロソイド型ジベルの幾何学的条件と種々の破壊形式に基づく設計せん断耐力について述べる。さらに、せん断耐力の計算例を示し、国内規準に基づくPBLのせん断耐力と比較して、ヨーロッパでの適用が拡大しているコンポジットダウエルの特性について述べる。

2. ポーランドにおけるクロソイド型ジベルを用いたプレキャスト複合桁橋の施工事例

2008年、ポーランドにおいて図-3のクロソイド型ジベルを用いた初めての鉄道橋であるビエルナ・ジェカ (Wierna Rzeka) 橋が設計された。本橋は、径間内の全断面が図-1(b)のタイプのプレキャスト合成桁であったが、近年、ポーランドではこのプレキャスト合成桁を連続桁橋に適用し、断面力の変化に応じて断面のタイプも変化させたプレキャスト複合桁橋 (合成桁かつ混合桁) が施工されている。さらに、クロソイド型ジベルの適用範囲を拡大させて、アーチ橋に使用した事例も報告されている。本章では、ポーランドにおいて建設された最近 (2016～2023年) の複合橋梁の施工事例を紹介する。

(1) エルブロンクの跨線橋^{3),6),7)}

2016年に建設されたエルブロンク (Elbląg) の跨線橋の概要を図-4に示す。本橋は、全幅員 15.10m、支間 37.90 + 38.32 + 37.90 + 38.32 + 37.90m の5径間連続複合桁橋 (主桁間隔 2.5m の6主桁) である。本橋の大きな特徴は、図-4(e)に示すように、断面力の変化に応じて抵抗断面を変化させた構造である。正曲げ部は、鋼ウェブを有する断面 (図-1(a)タイプ)、負曲げとせん断力が同時に作用する中間支点部は鋼T桁で外補強したコンクリートウェブを有する断面 (図-1(d)タイプ) として、鋼板の局部座屈に対する配慮が必要ない合理的な断面構成としている。

クロソイド型ジベルの形状は、支間全長にわたって高さ 100mm、間隔 250mm としており、上記のような断面変化によって全てが圧縮域に配置されている。このクロソイド型ジベルの形状 (CL100/250) は、同種の複合橋梁において標準的な幾何学的条件である。

また、桁端部の断面は、1枚の鋼ウェブのクロソイド型ジベルでせん断力に抵抗できなかったため、正曲げ部よりも薄い2枚の鋼ウェブを用いて、その間にコンクリートを充填している。また、径間部の断面から中間支点部の断面に移行する範囲では、ウェブに長孔のPBLが設けられており、この孔にコンクリートウェブ中の主鉄筋やスターラップを通して配筋している。



(a) 橋梁側面の外観



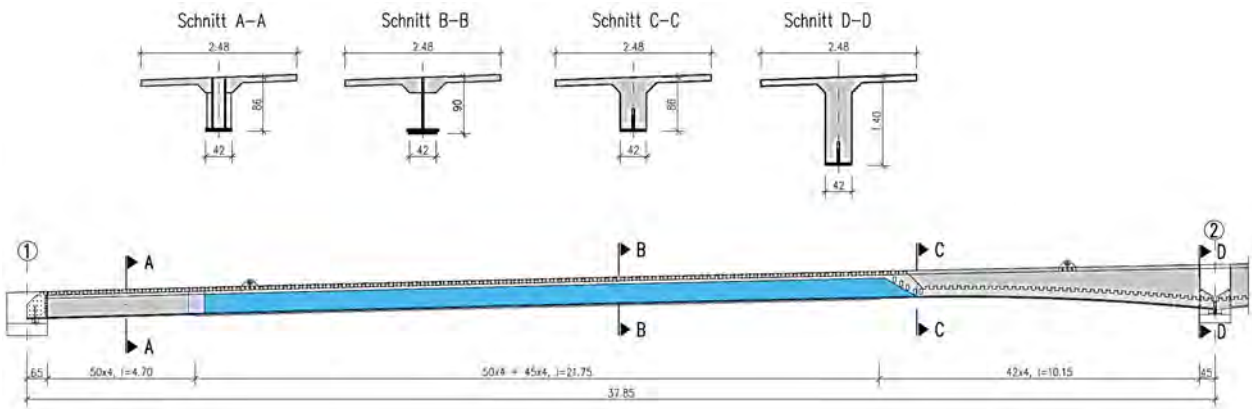
(b) 橋梁下面の外観



(c) 鋼桁およびクロソイド型ジベル



(d) プレキャスト桁の配筋



(e) 主桁側面と各位置の断面

図4 エルブロンクの跨線橋の概要

以上のような合理的な断面構成を採用することで、本橋は、支間長約38mに対して正曲げ部で全高1200mm程度（プレキャスト桁の桁高900mm、場所打ち床版厚300mm程度）の非常に低い桁高を実現している。また、鋼桁は40mm厚の鋼板（S460N：降伏強度460N/mm²）を溶接して組み立てられたプレートガーダーであり、コンクリートの圧縮強度は40N/mm²である。

ここで、本橋の当初の設計コンセプトは、図5に示すように、H形鋼（高さ1100mm）のフランジに近い位置のウェブをクロソイド型に切断し、低い桁高を半分の長さに切断することで、桁高の高い部分を正曲げ部、低い部分を負曲げ部に配置するものであった。このコンセプトは、安価な圧延H形鋼を有効利用できるため、非常に合理的で経済的な製作方法であった。しかし、請負業者が自社工場に優れた溶接・加工システムを保有しており、

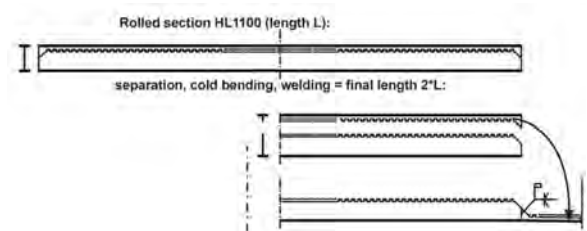


図5 当初の設計コンセプト

圧延H形鋼から製作するよりプレートガーダーとする方が経済的であったため、本橋では図5の製作方法は採用されなかった。なお、図5の設計コンセプトは、本橋と同様の複合橋梁として2018年に架設された、チェンストホヴァ（Częstochowa）近くの高速度道路の高架橋で採用された。



(a) 複合桁橋の外観



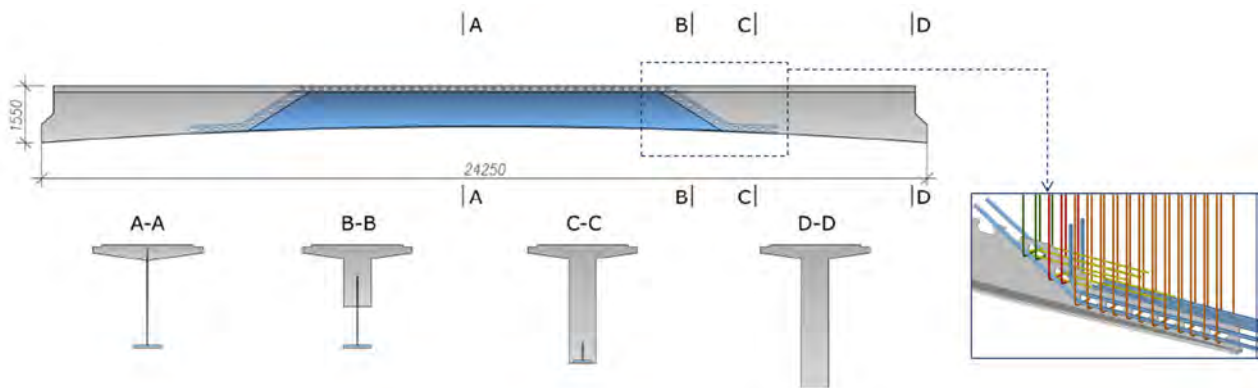
(b) 主桁下面



(c) プレキャスト複合桁の架設状況



(d) プレキャスト複合桁架設後の状況



(e) 主桁側面と各位置の断面

図-6 ソビエシェボ橋の概要

(2) グダニスク近郊のソビエシェボ橋^{3),9)}

2018年に建設されたソビエシェボ橋は、中央にポーランド最大の跳ね橋とそのアプローチとして2径間連続のプレキャスト複合桁橋から構成された道路橋である。本橋の複合桁橋の概要を図-6に示す。

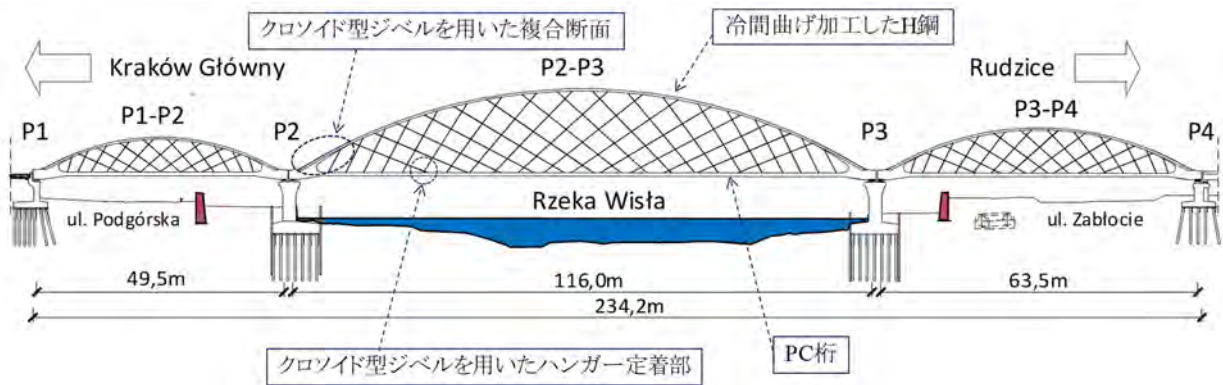
前述のエルブロンクの跨線橋から改良された本橋の最大の特徴は、負曲げ域の中間支点部の圧縮領域に鋼逆T桁を配置せず、純粋な鉄筋コンクリート断面となったことである。この複合桁では、図-6(e)の断面BからC、Dへの移行区間の構造が重要となる。この移行区間において、断面Cの鋼T桁に施されたずれ止めには、大きな引抜き力が作用する。上部が開放しているクロソイド型ジベルは、この引抜き力に対して十分な抵抗力を発揮することができず、構造上の弱点となる。そこで、この移行区間のずれ止めをPBLとして、引抜き力に抵抗する構造

としている。さらに、このPBLにはコンクリートウェブ中の主鉄筋を通さず、スターラップのみを通す構造とすることで、大きな径の鉄筋を配置でき、引抜き力に対してより大きな抵抗力を確保している。また、コンクリートウェブ幅の縮小や、配筋の簡素化などの利点もあり、当然のことながら、エルブロンクの跨線橋より経済的な断面となっている。さらに、プレキャスト桁のコンクリート床版の張出し長をエルブロンクの跨線橋より小さくし、桁架設後に別途プレキャスト床版を敷設することで、プレキャスト桁の重量を低減している。

また、詳細は割愛するが、中央径間の跳ね橋のアンカレッジシステムには、クロソイド型ジベルを用いたアンカーが初めて採用されており、本ずれ止めの適用範囲の拡大が図られている。



(a) 橋梁側面の外観（建設中）



(b) 橋梁側面



(c) アーチリブのクロソイド型ジベル



(d) アーチリブの架設状況



(e) 完成後の載荷試験(M-2)



(f) クロソイド型ジベルを用いた定着部



(g) 定着部の施工状況

図-7 ヴィスワ川に架かるネットワークアーチ橋の概要

(3) ヴィスワ川に架かるネットワークアーチ橋

クラクフ (Kraków) 中心部のヴィスワ川に架かるネットワークアーチ橋は、革新的な複合橋梁である。本橋の概要を図-7 に示す。橋梁全体は 3 つの独立した橋梁 (M-1 : 複線, M-2 : 単線, M-3 : 歩道付きの単線) で構成されており、それぞれ支間長が異なる 3 つのアーチ (49.5m, 116.0m, 63.5m) を有する。最初の橋梁である M-2 が 2020 年に完成し、M-3 が 2022 年、M-3 が 2023 年に完成した。それぞれのアーチのライズ比は、ポーランドの古都であるクラクフの景観に配慮して 15% に抑えられた。張力が作用するコンクリート床版は、ポストテンション方式の PC 床版として設計されており、ネットワークアーチの特徴である交差させた鋼棒のハンガーで吊られている。鋼アーチリブは、通常、高層建築で使用される極厚 (フランジ厚 : 最大 140mm) の圧延 H 形鋼を冷間曲げ加工しており、厚さに対して降伏強度の低下が小さい S460HISTAR が使用されている。アーチリブの基部は、図-7(c) に示すように、冷間曲げ加工された T 断面にクロソイド型ジベルを設けて、鋼フランジ間にコンクリートが充填されている。本橋のクロソイド型ジベルは、これまでに建設されたものの中で最も厚く、初めて複合アーチに適用した施工事例である。アーチリブの基部にクロソイド型ジベルを用いた剛性の高い複合断面とすることで、鋼アーチリブから PC 床版へのスムーズな応力伝達区間を構築している。タイ材となる PC 床版の厚さは、M-2 で 450mm、M-1 および M-3 で 650mm で、圧縮強度は 50N/mm^2 である。また、図-7(f) および (g) に示すように、M-1 および M-2 の PC 床版側のハンガー定着部には、クロソイド型ジベルを用いたアンカーが採用された。

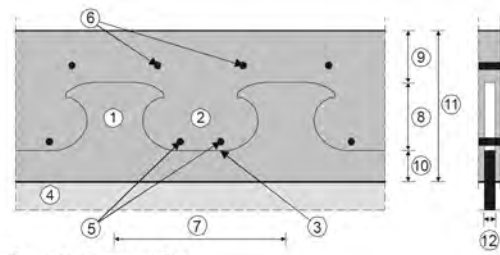
3. クロソイド型ジベルの規定と設計せん断耐力

クロソイド型ジベルに関する規定や設計せん断耐力は、文献 9) に纏められ、ドイツとポーランドの両国で適用された。その後、文献 3) には文献 9) に最新の研究成果を踏まえた修正・追記された規定が示されている。この規定に基づいて、現在、クロソイド型ジベルの設計方法をヨーロッパの設計規準である Eurocode 4 に盛り込む準備がなされている。以下に、文献 3) に基づくクロソイド型ジベルの幾何学的条件と材料の規定ならびに設計せん断耐力について述べ、せん断耐力に関する計算例を示す。

(1) 幾何学的条件の規定と使用材料の適用範囲

クロソイド型ジベルの幾何学的条件を図-8 に示す。また、同図中の寸法に関する規定は以下の通りである。

- e_x : ジベルの配置間隔 $150 \leq e_x \leq 400\text{mm}$
- t_w : ジベル鋼板の厚さ $6 \leq t_w \leq 40\text{mm}$



- 1 steel connector
- 2 concrete dowel
- 3 dowel base
- 4 hot rolled section or steel plate
- 5 bottom reinforcement with area A_b
- 6 top reinforcement with area A_t
- 7 longitudinal distance between connectors e_x
- 8 height of the connector h_c
- 9 concrete cover over the connector c_o
- 10 concrete cover under the connector c_u
- 11 height of the concrete part h_c
- 12 thickness of the steel plate with connectors t_w

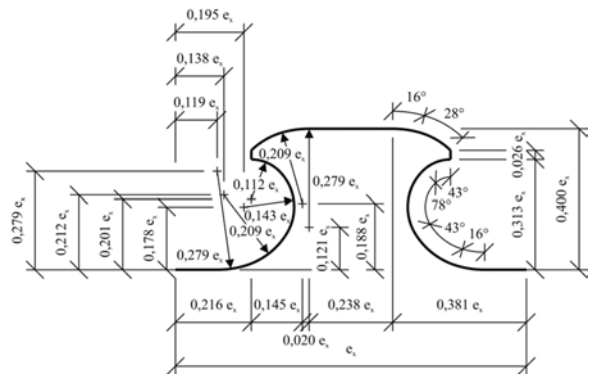


図-8 クロソイド型ジベルの幾何学的条件

- h_d : ジベルの高さ $60 \leq h_d = 0.4 e_x \leq 160\text{mm}$
- h_c : コンクリート部の高さ
- c_u : ジベル基部から下側のコンクリートのかぶり厚
 $c_{u,\min} \geq 30\text{mm}$
- c_o : ジベル基部から上側のコンクリートのかぶり厚
 $c_{o,\min} \geq 30\text{mm}$
- A_{b1} : ジベル内の下段鉄筋の断面積
- A_{t1} : ジベル間の上段鉄筋の断面積

さらに、使用材料の適用範囲は、鋼が S235~S460 (降伏強度 : $235 \sim 460\text{N/mm}^2$)、コンクリートが C20/25~C60/75 (円柱供試体の圧縮強度 : $20 \sim 60\text{N/mm}^2$) で最大骨材寸法を 19mm 以下としている。

(2) 設計せん断耐力

複合桁に用いるクロソイド型ジベルの支配的な破壊形式は、図-9 に示すような鋼ジベルの降伏(a)、コンクリートのプライアウト破壊(b)またはせん断破壊(c)のいずれかとなる。しかし、図-1 に示したような典型的な断面に適用する場合、クロソイド型ジベルの破壊形式は(a)または(b)となる。

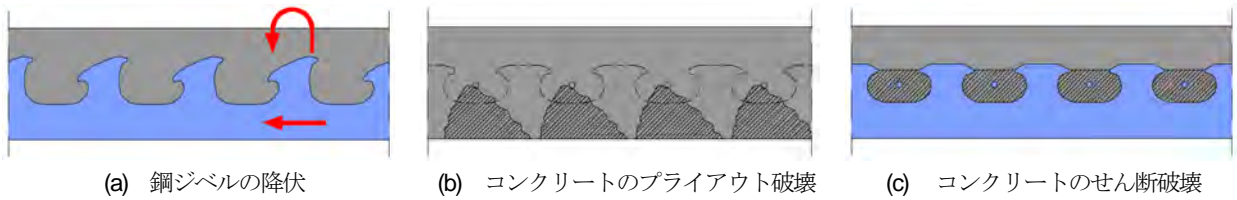


図-9 クロソイド型ジベルの破壊機構

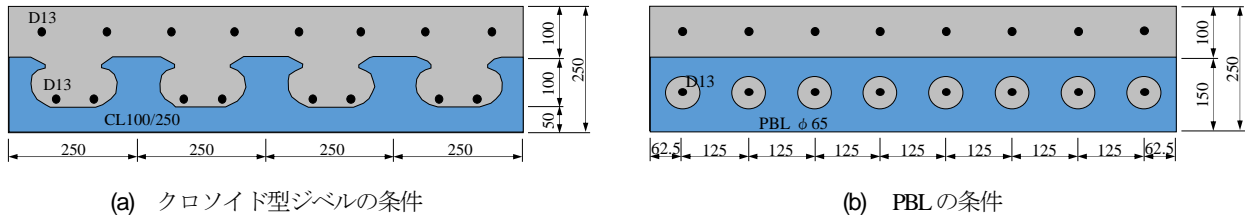


図-10 数値計算における幾何学的条件 (単位: mm)

そこで、複合桁に用いるクロソイド型ジベルの設計せん断耐力は、鋼ジベルの降伏を考慮した式(1)とコンクリートのプライアウト破壊を考慮した式(2)の内、小さい方の値が用いられる。同式に示すように、クロソイド型ジベルのせん断耐力は、単位長さあたりの耐力として与えられる。ただし、同式の適用条件として、 $0.08 \leq t_w/h_d \leq 0.50$ ならびに式(3)および式(4)を満足する必要がある。

$$P_{Rd,pl} = 0.25 \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_v \quad (\text{kN/m}) \quad (1)$$

$$P_{Rd,po} = 90 \cdot \frac{h_{po}^{1.5}}{e_x} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_{D,i}) \cdot \chi \cdot \psi_{cr} / \gamma_v \quad (\text{kN/m}) \quad (2)$$

$$h_{po} = \min \left\{ \begin{array}{l} c_o + 0.07 \cdot e_x \leq 240 \quad (\text{mm}) \\ c_u + 0.13 \cdot e_x \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\rho_{Di} = 5.7 \frac{A_{sf}}{A_{d,i}} \leq 0.06 \quad (4)$$

ここに、

f_y : 鋼の降伏強度 (N/mm²)

f_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$A_{d,i}$: 1 ジベルあたりのコンクリートの有効面積 (mm²)

$$A_{d,i} = e_x \cdot h_c$$

A_{sf} : 1 ジベルあたりの鉄筋の有効面積 (mm²)

$$A_{sf} = A_{b1} + A_n$$

χ : プライアウト破壊における軸方向と軸直角方向の相互作用を考慮した低減係数

$$e_x \leq 4.5 \cdot h_{po} \text{ のとき } \chi = \frac{e_x}{4.5 \cdot h_{po}} \quad (5)$$

ψ_{cr} : ジベル鋼板に垂直なコンクリートひび割れの影響を考慮した低減係数: $s_r = \min(0.6h_c, 250\text{mm})$

$$\psi_{cr} = \frac{s_r}{6 \cdot h_{po} + s_r} + \frac{\sqrt{h_{po}}}{15.4} \leq 1.0 \quad (6)$$

γ_v : 終局限界状態における部分安全係数 (Eurocode では $\gamma_v = 1.25$)

また、クロソイド型ジベルが深く埋め込まれている場合、すなわち式(3)および(4)の条件を満たさない場合、ジベルの破壊形式は図-9(c)に示すコンクリートのせん断破壊となる。この場合のクロソイド型ジベルの設計せん断耐力は、式(7)で与えられる。

$$P_{Rd,sh,CL} = \left(3 - \frac{e_x}{180} \right) \cdot e_x \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_D) / \gamma_v \quad (\text{kN/m}) \quad (7)$$

$$\rho_{D,CL} = 5.7 \frac{A_{b1}}{0.20 \cdot e_x^2} \quad (8)$$

なお、参考までに、文献9)によれば、図-2のパズル型ジベルの設計せん断耐力は、式(9)で与えられる。

$$P_{Rd,sh,PZ} = \left(2 - \frac{e_x}{400} \right) \cdot e_x \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (1 + \rho_D) / \gamma_v \quad (\text{kN/m}) \quad (9)$$

$$\rho_{D,PZ} = 5.7 \frac{A_{b1}}{0.13 \cdot e_x^2} \quad (10)$$

(3) 設計せん断耐力の計算例

本節では、前述の設計せん断耐力式を用いた計算例を示す。まず、鋼板の板厚をパラメータとしたクロソイド型ジベルのせん断耐力を算定する。クロソイド型ジベル

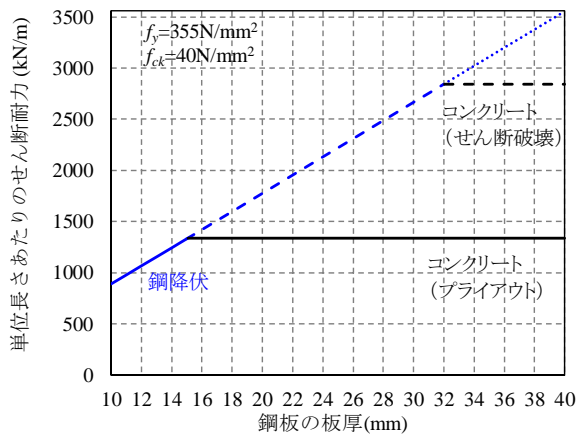


図-11 クロソイド型ジベルのせん断耐力の算定結果

の幾何学的条件は図-10(a)に示す通りで、実橋で標準的に用いられている 250mm 間隔の高さ 100mm (CL100/250) とした。コンクリートの厚さは 250mm とし、鉄筋は上下段ともに D13 を 1 ジベルあたり 2 本ずつ配置した。鋼およびコンクリートの強度は、それぞれ $f_y=355\text{N/mm}^2$, $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ とした。以上の条件で、鋼板の板厚 t_w を 10～40mm としたときの、クロソイド型ジベルのせん断耐力を図-11 に示す。なお、本計算例では、式(1)および(2)における部分安全係数を $\gamma=1.00$ としている。

同図より、本計算条件下では、 $t_w=15\text{mm}$ 以下の場合に鋼ジベルの降伏により耐力が決まり、それ以上の場合にはコンクリートのプリアウト破壊によって耐力が決まることがわかる。ヨーロッパの施工事例における標準的な鋼ウェブ厚は 20mm 以上であり、計算結果からコンクリートの破壊を想定した設計がなされていることがわかる。また、同図における破線は、本計算条件からコンクリートの厚さを除外して、鋼ジベルの降伏またはコンクリートのせん断破壊で耐力が決定する場合の計算結果である。この結果から、コンクリートの部材厚が大きく、ジベルに十分な拘束力が作用するような条件下では、鋼ジベルの降伏とコンクリートのせん断破壊の境界が $t_w=32\text{mm}$ 程度であることがわかる。この時、せん断耐力はプリアウト破壊に対する耐力の約 2 倍である。

つぎに、図-10(a)に示したクロソイド型ジベルと同等の幾何学的条件となるように PBL を配置した図-10(b)のケースを考える。1m の範囲に孔径 65mm の PBL を 8 個、貫通鉄筋を D13 (SD345) とし、孔 1 つあたりのせん断耐力は、土木学会の複合構造標準示方書¹⁰⁾に準拠して算定する。また、クロソイド型ジベルと間隔や高さが同じ場合のパズル型ジベルのせん断耐力 (式(9), 式(10)) とも比較する。以上の 3 種類のずれ止めについて、コンクリートの圧縮強度をパラメータとしたせん断耐力の計算結果を図-12 に示す。なお、本計算例は、ジベル内のコンクリートのせん断破壊を想定した耐力であり、鋼ジ

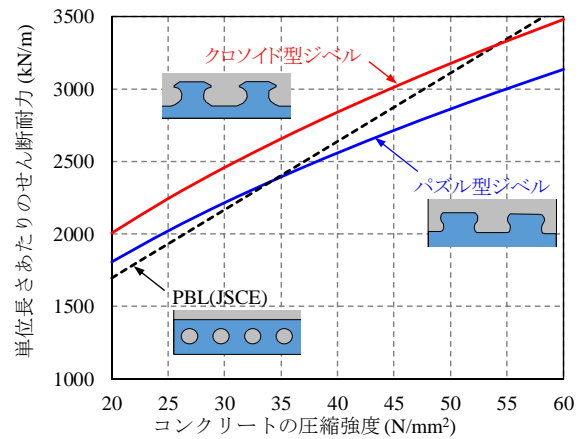


図-12 コンクリートのせん断破壊による耐力の比較

ベルの降伏やコンクリートのプリアウト破壊に対しては十分な耐力を有すると仮定した結果である。

図-12 より、クロソイド型ジベルとパズル型ジベルを比較すると、クロソイド型ジベルの方が 10% 程度高い値であることがわかる。また、クロソイド型ジベルのせん断耐力は、国内規準に基づく PBL のせん断耐力とほぼ同等であることがわかる。PBL との比較結果は、ジベルの幾何学的条件によって異なるため参考ではあるものの、PBL の代替としてクロソイド型ジベルを適用してもせん断耐力の観点からは問題がないことを示唆している。

5. まとめと今後の展望

本文は、ヨーロッパで適用が拡大しているクロソイド型ジベルを適用した最近の複合橋梁の施工事例を示し、クロソイド型ジベルの設計せん断耐力の概要についてまとめたものである。それらの要点を以下に示す。

- 1) 2016 年に建設されたエルブロンクの跨線橋 (5 径間連続桁橋) では、桁端部、径間部および中間支点部において断面構成を変化させた合理的なプレキャスト複合桁としている。
- 2) 2018 年のソビエシェボ橋は、中間支点部の断面を RC 断面とした複合桁であり、合成断面から RC 断面への移行区間のずれ止めには PBL が採用されている。
- 3) 2020～2023 年に建設されたクラクフのヴィスワ川に架かるネットワークアーチ橋は、アーチリブに冷間曲げ加工された極厚の圧延 H 形鋼を用い、タイ材を PC 床版とした複合橋梁であり、アーチリブの基部に厚板のクロソイド型ジベルを配置している。
- 4) 複合桁橋に用いるクロソイド型ジベルの支配的な破壊形式は、鋼ジベルの降伏、コンクリートかぶり部のプリアウト破壊またはジベル内のコンクリートのせん断破壊であり、それぞれの破壊形式の耐力式



図-13 オーストリアにおける施工事例

から最も小さい値を設計せん断耐力としている。

- 5) クロソイド型ジベルは、同条件のパズル型ジベルより大きいせん断耐力を有しており、幾何学的条件を同等にした PBL と同程度のせん断耐力を有する。

ここで、PBL はドイツのレオンハルトらによって提案されたヨーロッパ発祥のずれ止めであるが、ヨーロッパでは定着しなかった。一方、わが国では PBL の高い剛性や疲労強度に着目して、鋼桁と橋台や橋脚との剛結部、波型鋼板ウェブ橋、合成床版あるいは鉄道橋の合成桁の負曲げ域など広く普及している。しかし、近年、2.(2)節で述べたように、クロソイド型ジベルを用いた複合橋梁の断面の移行区間において、ヨーロッパでも PBL (閉じたコンポジットダウエル：Closed Composite Dawel と呼ぶ場合もある) の適用が拡大しつつある。

このような経緯を踏まえれば、PBL が普及しているわが国でも PBL の代替として、あるいは PBL と併用してクロソイド型ジベルをはじめとするコンポジットダウエルが適用できる可能性は高いと考えられる。一方で、ヨーロッパとわが国では、設計法、製作条件、輸送条件ならびに架設条件など異なる点も多い。したがって、本文中で紹介した施工事例のような大胆な発想のプレキャスト複合桁橋をわが国に導入するためには、わが国の条件を考慮した詳細な検討が必要である。

そこで、クロソイド型ジベルを配置した連続する鋼板の補剛効果とずれ止めの機能を活かし、配筋が容易になる施工性の利点を考慮すれば、わが国への当初の導入案として以下のような構造が提案できる。

まず、合成床版や合成床版橋への適用である。わが国において PBL を用いた合成床版が普及しており、クロソイド型ジベルを用いても同等の性能が期待できる。また、わが国における将来的な小規模橋梁の掛け替えの需要に対して、小スパンで低桁高の合成床版橋としての適用も見込める。この種の橋梁は、図-13 に示すように、オーストリアのザールフェルデン (Saalfelden) で施工事例がある。

つぎに、合成 I 桁橋におけるずれ止めとしての適用である。これは、一般的な頭付きスタッドの代替として、クロソイド型ジベル形状に切断した連続する鋼板を鋼上フランジの橋軸方向に溶接した断面である。これにより、ジベル基部から下側の鋼板が鋼桁の抵抗断面に寄与して上フランジを補剛するため、鋼桁断面の縮小が図れる可能性がある。

また、プレキャスト複合桁の導入検討においては、わが国における輸送条件などを考慮すると、コンクリートに超高強度繊維補強コンクリートや軽量コンクリートなどを適用して、プレキャスト桁の重量を低減することが有効と考えられる。

以上のような提案構造の実現のためには、ヨーロッパで膨大に実施された標準的な押抜き試験との比較検証などの基礎的な研究も重要であり、わが国の状況に応じた設計せん断耐力式の構築も重要である。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造レポート 02 最新複合構造の現状と分析 一性能照査型設計法に向けて一，2008。
- 2) SSF Ingenieure AG, ArcelorMittal Belval & Differdange, Politechnika Wroclawska, Université de Liège, Acciona S.A., Ramböll Sverige AB, FOSTA: Design Guide - Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission-, 2013.
- 3) W. Lorenc: Composite Dowels: The Way to The New Forms of Steel-Concrete Composite Structures, IABSE Symposium, 2020.
- 4) A. Suzuki, K. Hiraga, Y. Kimura: Mechanical Performance of Puzzle-Shaped Shear Connectors Subjected to Fully Reversed Cyclic Stress, Journal of Structural Engineering, 149(7), 2023.
- 5) A. Suzuki, K. Hiraga, Y. Kimura: Cyclic Behavior of Steel-Concrete Composite Dowel by Clothoid-Shaped Shear Connectors under Fully Reversed Cyclic Stress, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 21, 76-91, 2023.
- 6) J. Berthelmy, G. Seidl, W. Lorenc: Recent structures and bridges built with the CL steel-concrete connection, 40th IABSE Symposium, 2018.
- 7) M. Stacewicz, T. Kolakowski, W. Kosecki, W. Lorenc: Nowatorska Konstrukcja Zespólona Prezesel Nowego Wiaduktu w Ciagu Drogi Krajowej NR 22 NAD Linia PKP Kolo Miejsosci Elblag, Wroclawskie Dni Mostowe, pp.329-342, 2016.
- 8) Piotr Koziol, W. Lorenc, M. Kozuch, W. Kosecki, A. Stempniewicz: New Type of Transition Zone for Steel-Concrete Hybrid Beams in Bridges: 9th International Conference Composite Construction in Steel and Concrete, 2021.
- 9) Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung der Verbunddübelbleiste, No. Z-26.4-56, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2013.
- 10) 土木学会：2014 年制定 複合構造標準示方書原則編・設計編，2015。

(Received August 25, 2023)

EXAMPLES AND DESIGN OF HYBRID BRIDGE USING INNOVATIVE SHEAR CONNECTION IN EUROPE

Yusuke IMAGAWA, Osamu OHYAMA and Wojciech LORENC

In the early 2000s, a prefabricated composite girder (VFT-WIB technology) using T-beams, which was cut from an I-beam web in a corrugated shape, was developed in Germany. The first real bridge to which this solution was applied was completed in Germany in 2004. Initially, this solution was applied with a puzzle-shaped share connection. In recent years, the number of prefabricated hybrid bridges using clothoid shape shear dowels with improved cut shape has been increasing in European countries, especially Poland.

The recent hybrid bridges using clothoid shape shear dowels constructed in Poland are reported in this paper. In addition, the design shear strength formula of the clothoid dowels and its calculation example are shown.