

(17) 波形鋼板ウェブのPCT桁橋への適用

藤岡 篤史¹・角田 隆洋²

¹株式会社ピーエス三菱 技術本部土木技術第一部 (〒104-8215 東京都中央区銀座七丁目16-12)

E-mail:a-fujioka@psmic.co.jp

²正会員 PSM Construction USA, Inc.

E-mail:t-kakuta@psmic.co.jp

従来、箱桁橋に用いられてきた波形鋼板ウェブをプレキャストのT桁に適用した波形鋼板ウェブPCT桁橋（以下コルティー工法と記す）を開発した。これは、主桁の軽量化により、死荷重の軽減と運搬できるプレキャスト部材寸法の拡大を可能にする新技術である。これらにより、従来技術と比較して、上・下部工全体のコスト削減やPC橋の経済的な適用支間長の拡大が図れる。2005年1月には世界で初めてのコルティー桁橋として、曾宇川橋が石川県加賀市に完成している。本稿は、コルティー工法の特長とともに、曾宇川橋プロジェクトの概要について紹介するものである。

Key Words : *new technology, weight saving, corrugated steel web, PCT-girder bridge*

1. はじめに

波形鋼板ウェブPC橋は、従来のPC橋のコンクリートウェブを波形状に加工した構造用鋼板に置き換えた、コンクリートと鋼との複合構造橋梁の一種である。フランスで開発された後、主に日本で発展し、現在に至るまで施工中のものを含め国内で60橋以上の実績がある。しかしながら、そのすべての橋梁において、主桁断面は一室もしくは多室箱桁となっており、T桁断面の実績は1橋もなかった。

コルティー工法は、従来の波形鋼板ウェブPC橋の技術を小～中支間対応のPCT桁橋に適用し、自重の軽減を図ることで、コスト削減および適用支間の拡大を可能にするものである。

2005年1月には、世界初のコルティー桁橋として、曾宇川橋（橋長23.9m）が石川県加賀市に完成している。曾宇川橋では、波形鋼板使用による自重軽減効果から、上部工工費で約6%のコスト削減に成功している。

また、曾宇川橋の施工に先立ち、桁長23.8mの実物大主桁供試体を用いたせん断載荷試験および曲げ載荷試験を行い、コルティー桁の力学的特性、耐荷性能、破壊性状などを確認した。さらに橋梁完成後には、実橋載荷試験を行い、橋梁が設計で想定する所要の性能を有し、橋梁全体として安全であることを確認している。以下に、コルティー工法の特長を紹介するとともに、曾宇川橋の設計概要および性能確認試験の結果について報告する。

2. コルティー工法の特長

一般的な波形鋼板ウェブPC橋は、コンクリートウェブを波形鋼板に置き換えることにより、以下の特長を有する。

- ① 自重を軽減でき、上部構造および基礎、下部構造への負担の低減が可能となる。
- ② 波形鋼板のアコーディオン効果（波形鋼板が橋軸方向の曲げ、軸力に抵抗しない）により、効率的なプレストレスの導入が可能となる。
- ③ 鋼板を波形状に加工することで高いせん断座屈耐力が得られるため、補剛材を必要としない。

さらに、コルティー工法は上記に加えて、以下の特長を有している。

- ④ ウェブの軽量化により、運搬可能なプレキャスト部材寸法の拡大が図れ、主桁本数の低減、支承数の減少などが可能となる。

3. コルティー工法の適用範囲

コルティー工法は、主桁製作方法により、プレテンタイプとポステンタイプの2種類に分類できる。それぞれ、以下のような場合の適用が効果的であると考えられる。

●コルティエー工法プレテンタイプ

- ① 支間 20 m～25 m 程度で、従来のプレテン T 桁橋に比べて主桁本数を 6 割程度以下にできる場合。これは、幅員にもよるが、桁高スパン比を 1/17 程度にできる場合に相当することが試設計の結果からわかっている。
- ② 地盤条件などから、従来のプレテン T 桁橋に比べて死荷重反力を軽減したい場合。
- ③ 多径間連結構造などでタイプ B 支承数の低減によりコスト削減効果が期待できる場合。

●コルティエー工法ポステンタイプ

- ① 従来の PC 桁橋では鋼橋に対して重量過多で不利とされていた支間 40 m～60 m クラスに適用する場合。
- ② 地盤条件などから、従来の PCT 桁橋に比べ、上部構造の軽量化を図りたい場合。
- ③ 従来の PCT 桁橋に比べ、タイプ B 支承数の低減によりコスト削減効果が期待できる場合。

4. 曾宇川橋プロジェクト

2005年1月、世界初のコルティエー工法プレテンタイプとして、石川県加賀市に曾宇川橋が竣工した(写真-1)。曾宇川橋では、波形鋼板使用による自重軽減効果から、上部工工費で約6%のコスト削減に成功している。以下に曾宇川橋プロジェクトについて紹介する。

(1) 曾宇川橋の概要

曾宇川橋の概要を以下に示す。

- 工事名：南加賀道路いしかわ広域交流幹線軸
道路整備工事(曾宇川橋上部工工事)
- 工事場所：石川県加賀市曾宇町
- 橋長：23.900 m
- 桁長：23.800 m
- 幅員：15.124 m(A1)～13.964 m(A2)
- 斜角：左 78° 16' 39"



写真-1 曾宇川橋全景

(2) 曾宇川橋の構造

a) 主桁構造

曾宇川橋では、支間長 23.100 m という条件から、コルティエー工法プレテンタイプを採用している。曾宇川橋の主桁断面を写真-2 に示す。また、図-1 から従来のプレテンション方式 PCT 桁との断面比較を示す。コンクリートウェブを軽量の波形鋼板に置き換えることで、主桁 1 本あたりの重量を増加することなく、上フランジ幅を 800 mm から 1200 mm に拡張できている。

発注時幅員での比較では、従来の PCT 桁橋では 14 本必要であった主桁本数を、コルティエー工法の採用により 9 本にまで低減できることを確認した(図-2)。これにより全死荷重で 20%、活荷重合計でも 13% の下部工反力の軽減が可能となった(次ページの図-3)。



写真-2 コルティエー桁断面

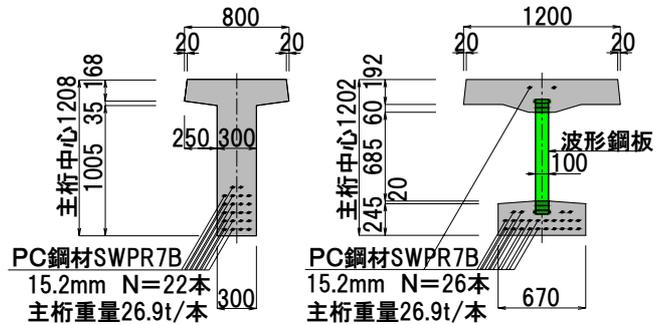


図-1 PCT桁とコルティエー桁の主桁断面比較

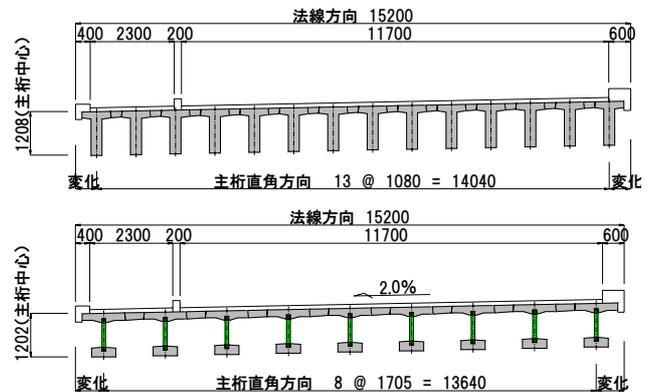
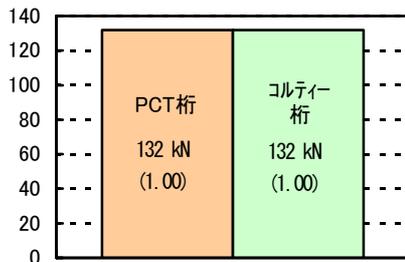
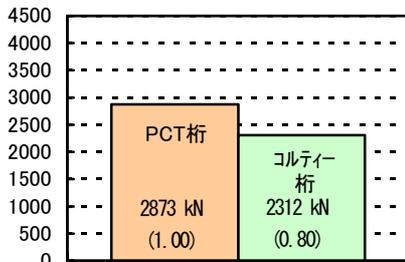


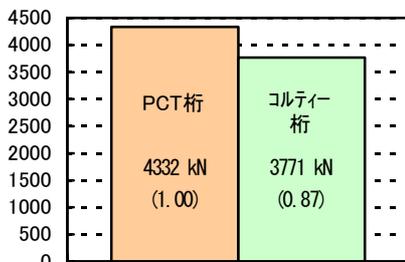
図-2 PCT桁とコルティエー桁の主桁配置比較



主桁自重(主桁1本あたり)



死荷重(下部工反力)



死荷重+活荷重(下部工反力)

図-3 PCT桁とコルティー桁の反力(kN)比較

b) 波形鋼板とコンクリートの接合部

曾宇川橋の主桁に採用した波形鋼板の形状は、1波長800mm、波高100mmである(図-4)。箱桁と比較して、波形鋼板に作用する断面力が小さいため、箱桁で採用される一般的な形状よりコンパクトにしている。

コンクリートと波形鋼板の接合部は埋込み方式を用いている。埋込み高は100mmとした。埋込み方式は、他の接合方法に比べ、フランジやスタッドジベルが不要で溶接延長が減ることから、省力化およびコスト削減が可能なものである。また、溶接部が少ないことなどから、疲労耐久性も他の接合構造に比較し優れていることが報告されている¹⁾。

c) 横桁構造

曾宇川橋の横桁はPC部材としている。各支点部に支点横桁、支間中央部に中間横桁を設けている(写真-3)。横桁部に埋込まれる波形鋼板には孔があけられており、その孔により形成されるコンクリートジベル、孔を貫通して配置される横締めPC鋼材、貫通鉄筋によって一体化を図る構造である。

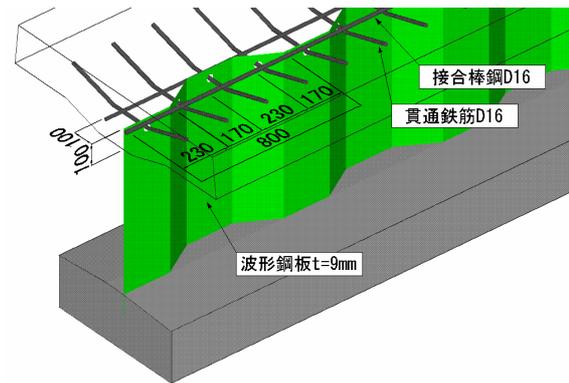


図-4 波形鋼板形状図



写真-3 曾宇川橋下面

(3) 曾宇川橋の設計

a) 主桁の設計

主桁の設計手順は図-5(次ページ)に示すとおりである。一般的に波形鋼板ウェブPC橋の設計に使用される『波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル(案)(以下、計画マニュアル)²⁾』は、箱桁橋への適用を原則としている。しかしながら、T桁供試体を用いた既往の実験も数多く行われており³⁾、波形鋼板のアコーディオン効果や平面保持の仮定が、断面形状によらず成立することは明らかである。そのため、波形鋼板の設計や、波形鋼板とコンクリートの接合部の設計、その他付随する事項については計画マニュアルを準用した。ただし、波形鋼板貫通鉄筋量については、『複合構造の性能照査指針(案)⁴⁾』での、孔あき鋼板ジベル式(下式1a)を用いて算出した。なお、断面力は、『道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編⁵⁾9章Tげた橋』に従い、直交異方性版理論解析により算出した。

$$V_{ud} = [1.45 \{ (d^2 - \phi_{st}^2) \times f'_c + \phi_{st}^2 \times f_{st} \} - 106.1] / \gamma_b \quad (1a)$$

ここに、 V_{ud} : ジベルの設計せん断耐力(N)

d : 孔の直径(mm)

ϕ_{st} : 貫通鉄筋径(mm)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

f_{st} : 鉄筋の引張強度(N/mm²)

γ_b : 部材係数 = 1.0

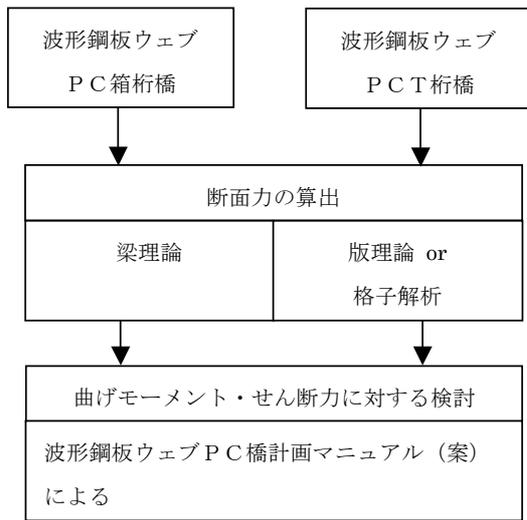


図-5 波形鋼板ウェブPC橋の設計手順

b) 横桁の設計

曾宇川橋の横桁は前述のように PC 部材としている。横桁は主桁上下フランジおよび場所打ち床版に結合されるとともに、波形鋼板にあげられた孔（コンクリートジベル）、横締め PC 鋼材、貫通鉄筋によって一体化されている（図-6）。これにより、一般的な PCT 桁橋と同様な主桁と横桁間の荷重分配が可能であると考えられる。そのため、横桁の設計も、一般的な PCT 桁橋と同様に、曲げ応力度および曲げ破壊に対する照査を行っている。

c) 床版の設計

計画マニュアルは一室箱桁橋を対象として作成されたものであるため、床版支間方向の設計曲げモーメントを『道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編』と『道路橋示方書Ⅱ鋼橋編⁹⁾』の規定値の中間である“単純版の 90%”としている。しかしながら、多主桁の場合は、コンクリート橋、鋼橋ともに、“単純版の 80%”としているため、コルティエー桁橋においても、床版支間方向の設計曲げモーメントを“単純版の 80%”として設計している。

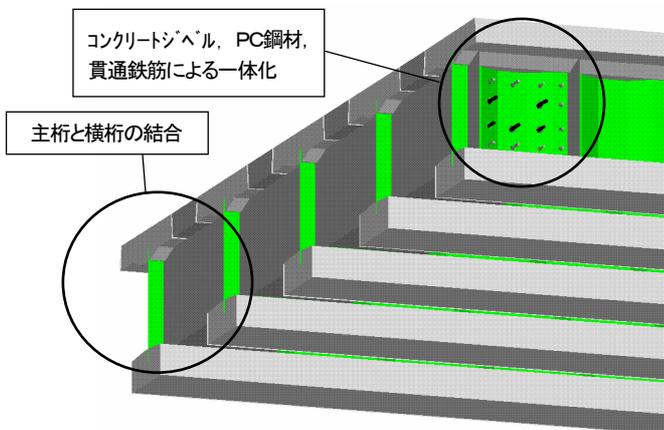


図-6 中間横桁部のイメージ図

(4) 性能確認試験

世界初となるコルティエー工法による曾宇川橋の施工に際しては、各種の性能確認試験を行っている。実施した試験項目を図-7 に示す。コルティエー桁の力学的特性、耐荷性能、破壊性状などを確認する目的で、桁長 23.8 m の実物大主桁供試体を用いたせん断載荷試験および曲げ載荷試験を行っている。また、波形鋼板埋込み部直上の床版コンクリートの押抜きせん断破壊耐力を確認するため、上床版の押抜きせん断試験も行っている。さらに橋梁完成後には、橋梁が設計で想定する所要の性能を有し、橋梁全体として安全であることを確認するため、実橋載荷試験も行った。以下に各試験内容について詳述する。

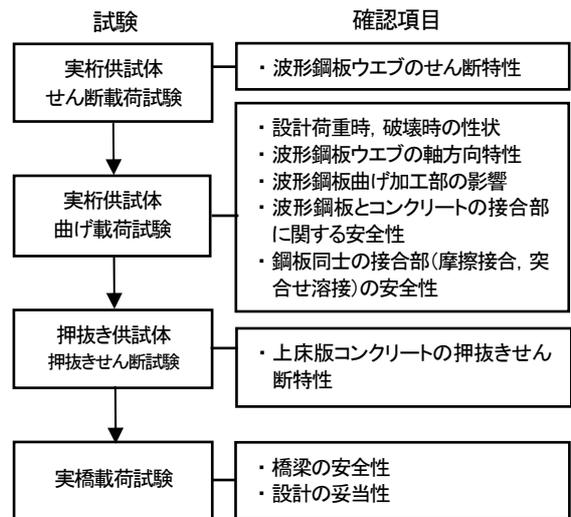


図-7 実施したコルティエー桁橋の試験項目

a) せん断載荷試験

桁長23.8mの実物大主桁供試体を用いてせん断載荷試験を行った。せん断載荷試験要領図を図-8（次ページ）に、載荷試験状況を写真-4に示す。試験は、供試体を支



写真-4 せん断載荷試験状況

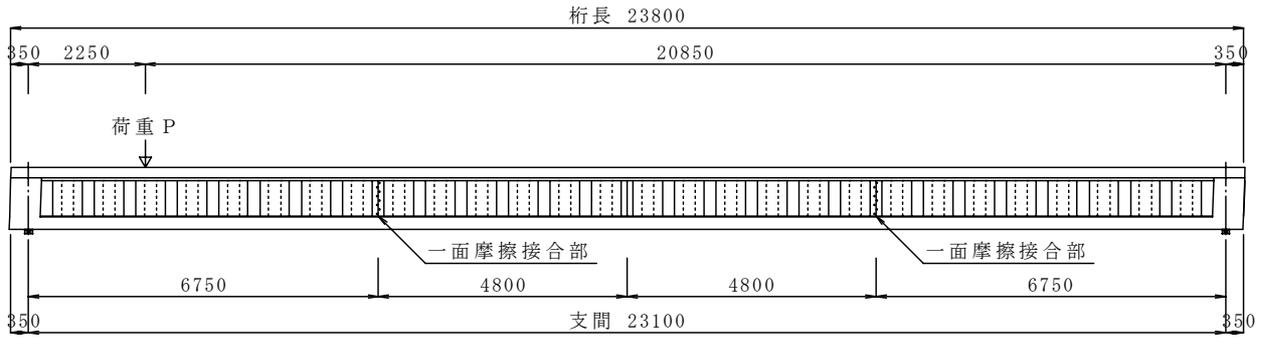


図-8 せん断载荷試験要領図

点位置で単純支持し、1点集中载荷（支点位置より2250 mm）により行った。せん断検討位置（桁高1/2点）でのせん断力が設計値に達するまでの荷重（ $P=370\text{ kN}$ ）を载荷した。370 kN载荷時の波形鋼板せん断応力度分布の設計値および試験値の比較を図-9に示す。図-9に示すとおり、試験から得られたせん断応力度は最大で 37 N/mm^2 と、設計計算によるせん断応力度 61 N/mm^2 に比べて、かなり小さいものであった。これは、設計計算では、コンクリートに埋込まれる部分を除いた波形鋼板だけでせん断力に抵抗すると仮定しているのに対し、実構造においては、埋込み部の波形鋼板や上下コンクリートフランジによ

てもせん断力がある程度分担されるためと考える。

以上の結果から、コルチー桁における波形鋼板ウェブのせん断に対しては安全側の設計となっていることを確認した。

b) 曲げ载荷試験

せん断载荷試験に引続き、同供試体を用いて曲げ载荷試験を行った。曲げ载荷試験要領図を図-10に、载荷試験の状況を写真-5に示す。支間中央での2点集中载荷（载荷点間距離1500 mm）とし、主桁が破壊するまで载荷を行った。

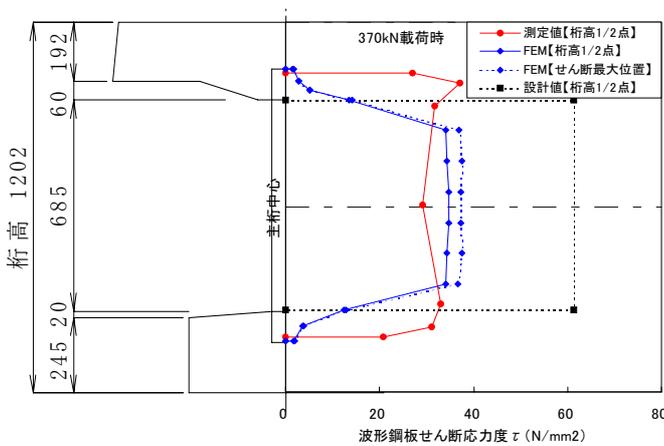


図-9 波形鋼板のせん断応力度分布（桁高1/2点）



写真-5 曲げ载荷試験状況

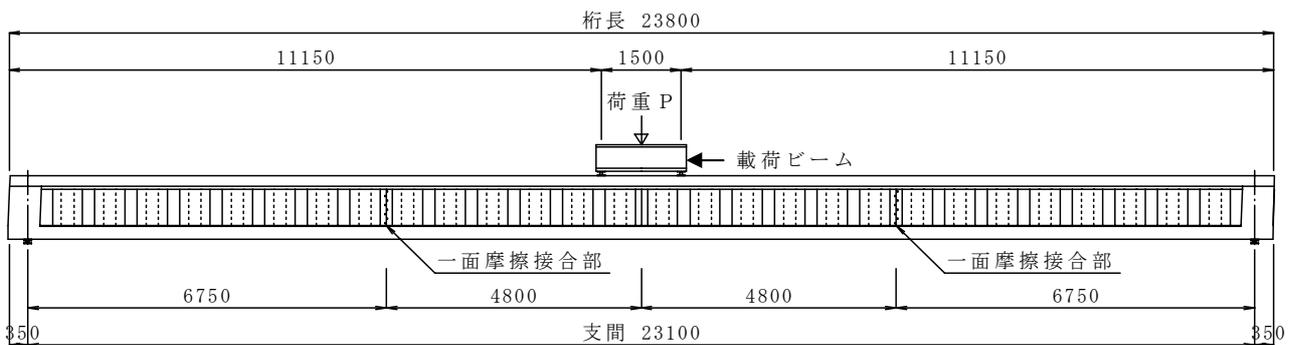


図-10 曲げ载荷試験要領図

曲げ載荷試験の荷重－変位関係を図-11 に示す。図内の弾性計算は、コンクリートの実強度 ($\sigma_c=72 \text{ N/mm}^2$) に基づき弾性係数 37.2 kN/mm^2 として算出したものである。「弾性計算 (曲げ)」では、コンクリートの曲げ剛性だけを考慮した曲げ変形を、「弾性計算 (曲げ+せん断)」では、これにせん断変形を加えた計算値を示している。弾性域での変位は「弾性計算 (曲げ)」と「弾性計算 (曲げ+せん断)」の間にあることがわかる。

図-11 に示すとおり、曾宇川橋の設計荷重相当である載荷荷重 359 kN に対しては、主桁にひび割れなどの変状がないことを、終局荷重相当の載荷荷重 775 kN に対しては、主桁が破壊しないことを確認した。

ひび割れは、最初に支間中央付近の下床版コンクリート下縁に発生した後、支点方向に均等に分散していった。曲げ載荷試験後のひび割れスケッチ図を図-12 に示す。破壊に至るまでに確認されたひび割れは、下床版コンクリートの曲げひび割れだけであり、その他の局所的なひび割れは確認されなかった。

供試体への最大載荷荷重は、破壊抵抗曲げモーメントから算出した破壊荷重 1010 kN を上回る 1146 kN であった。主桁は、PC 鋼材の降伏後に上縁コンクリートの圧壊で終局に至った。この時、PC 鋼材の破断は確認されなかった。

以上の結果から、コルティー桁の曲げ挙動に対する設計法の妥当性ならびに曲げ破壊性状の確認ができた。

次に、支間中央断面での主桁軸方向ひずみの断面分布を図-13 に示す。波形鋼板にはほとんど軸方向ひずみが発生せず、ほぼコンクリート断面だけで曲げに抵抗していることがわかる。これにより、アコーディオン効果が想定通り機能していることを検証できた。

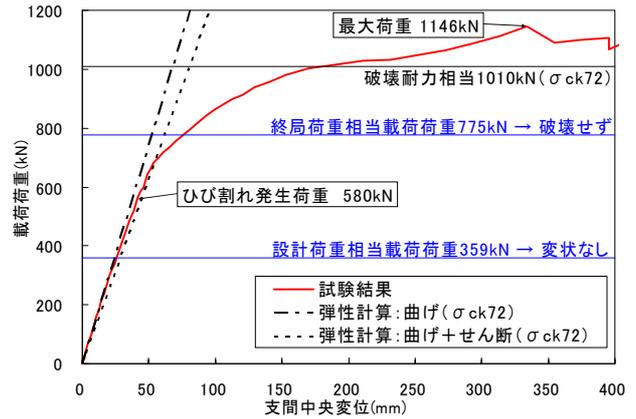


図-11 荷重－変位関係 (支間中央)

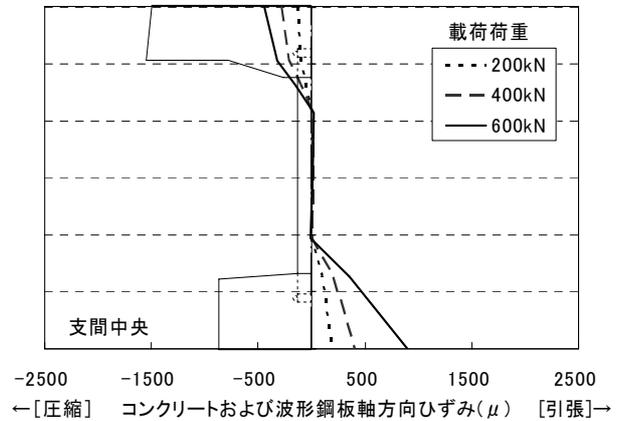


図-13 主桁軸方向ひずみの断面分布 (支間中央)

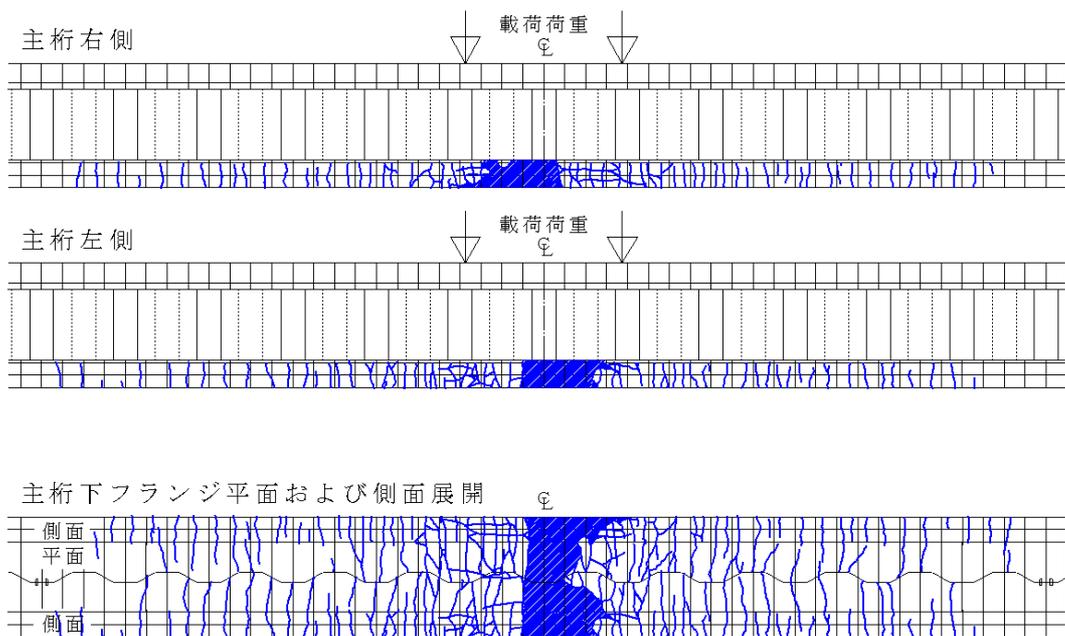


図-12 曲げ載荷試験後のひび割れスケッチ図

c) 押抜きせん断試験

コルティアー桁橋は、従来の波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋に比較して主桁サイズが小さく、波形鋼板上の床版コンクリートの厚さが実績より小さい。そのため、床版に作用する輪荷重に対して、波形鋼板上端で抵抗し、波形鋼板直上の床版コンクリートが押抜きせん断破壊することが推測された(図-14)。これに対して、図-15 に示すコンクリート上床版および波形鋼板をモデル化した供試体を製作し、輪荷重を想定した鉛直載荷試験を実施することにより、上床版の押抜きせん断破壊耐力ならびに破壊形態の確認を行った。

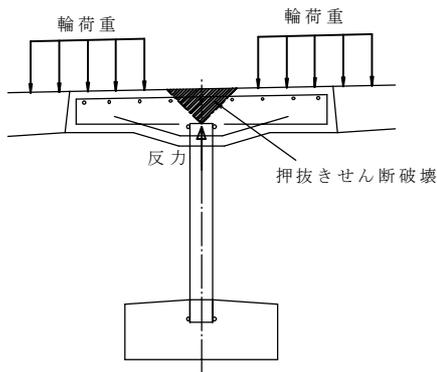


図-14 押抜きせん断破壊のイメージ

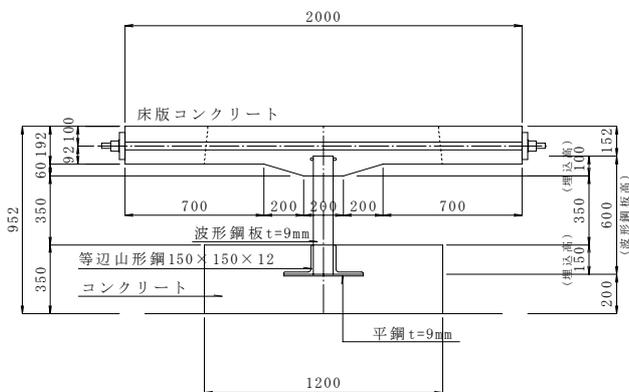


図-15 押抜きせん断破壊試験用の供試体断面図

表-1 設計状態と試験結果

載荷荷重	設計状態	試験結果
197kN	設計押抜きせん断力相当 (輪荷重作用時相当)	変状なし
460kN	—	ひび割れ発生確認 (曲げひび割れ)
650kN	設計押抜きせん断耐力	破壊せず
1800kN	—	破壊せず



写真-6 押抜きせん断試験状況



写真-7 実橋載荷試験状況

写真-6 に試験状況を示す。供試体は、載荷装置の限界であった 1800 kN (1 載荷面あたり 900 kN) の荷重載荷時においても破壊に至らなかった。設定された設計状態と試験結果を表-1 に示す。

供試体は1主桁分を再現したものであるが、実際は場所打ち床版および横桁で結合された格子構造に輪荷重が載荷されるため、荷重分配効果から、輪荷重によって実構造に作用する応力は、同じ荷重によって供試体に作用する応力と比較して小さくなる。これらより、当初想定したような、輪荷重に対する波形鋼板直上の押抜きせん断破壊に対しては、十分な安全性が確保できていることを確認した。

d) 実橋載荷試験

コルティアー桁の主桁の安全性および設計法の妥当性については、前述した各種の試験結果により検証できた。

実橋載荷試験は、完成後の橋梁にダンプトラックを載荷し、橋梁が設計で想定している所要の性能を有し、橋

梁全体として安全であるか確認することを目的に行った。試験には荷重を 200kN に調整したダンプトラックを使用し、橋面上に静的に載荷させた（前ページの写真-7）。載荷時の主桁下縁の軸方向ひずみ、および変位の測定値と解析値の比較から、完成後の橋梁が設計で想定している荷重分配傾向を示していることを確認した。

5. 今後の展開

コルティー桁橋の安全性および設計法の妥当性に関しては、実施した各種試験により検証することができた。さらに、コルティー工法プレテンタイプによる実橋の完成も 2005 年 1 月に終えている。今後は、経済性のさらなる向上とともに、従来、PC 橋が鋼橋に対して、重量過多で不利とされていた支間長 40 m～60 m クラスの橋梁への経済的な適用をめざし、コルティー工法ポステンタイプの実現に向けた取組みを継続していく予定である。

謝辞：世界で初めての試みとなったコルティー工法による曾宇川橋の完成に至るまでには、石川県、独立行政法人土木研究所、(株)ハルテックをはじめとする様々な方々から貴重なご意見を頂いた。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木、紫桃、桜田、立神：波形鋼板ウェブ橋におけるコンクリート床版接合部の横方向性状、コンクリート工学論文集第 15 巻第 1 号、2004.1
- 2) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル（案）、1998.1
- 3) 山口恒太、山口隆裕、池田尚治：波形鋼板をウェブに用いた複合プレストレスコンクリート桁の力学的挙動に関する研究、コンクリート工学論文集第 8 巻第 1 号、1997.1
- 4) 社団法人土木学会：複合構造の性能照査指針（案）、2002.10
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、2002.3
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、2002.3
- 7) 依田、大浦：波形鋼板ウェブを用いた合成 PC 箱桁のねじり特性について、土木学会、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1251～1258、1993.
- 8) 依田、多田、中島、大内：波形鋼板ウェブを持つ合成桁の力学的挙動に関する実験的研究、鋼構造論文集、Vol.1.1、No.2、pp.57～66、1994.
- 9) 小門前、渡辺、松本、大浦：プレテンション方式波形鋼板ウェブ T 桁橋の検討、土木学会、第 57 回年次学術講演会、V-595、pp.1189～1190、2002.
- 10) 角田：波形鋼板ウェブ PCT 桁橋の開発、北陸地方建設事業推進協議会、建設技術報告会報文集、pp.67～70、2004.

Application of the corrugated steel webs to PCT-girder bridge — Sou River Bridge —

Atsushi FUJIOKA and Takahiro KAKUTA

PCT-girder bridge constructed by corrugated steel webs T-shape girders, namely Corru-T, was newly introduced based on the box-girders bridges with corrugated steel webs in the past. By this new technique, the reduction of girder weight has advantage on the dead load of bridge and the capability to transport the larger size of precasted girder. Comparing with the construction techniques in the past, the cost of the super-structures and sub-structures can be reduced and the economy prestressed bridge with the longer span can be designed. Sou River Bridge in Ishikawa prefecture, completed in January, 2005, is the first bridge in the world constructed by Corru-T technique. In this paper, the characteristics and guidelines of Corru-T construction technique and Sou River Bridge Project were introduced.