

(36) 景観に配慮した合成床版橋の構造特性に関する研究

広沢 正雄¹・森山 佳樹¹・沼田 克¹・山田 岳史²

¹正会員 (株)神戸製鋼所 構造技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島41番地)
E-mail: E-mail:m.hirosawa @engnet.kobelco.co.jp y.moriyama @engnet.kobelco.co.jp

E-mail:k.numata @engnet.kobelco.co.jp

²正会員 博(工) (株)神戸製鋼所 機械研究所 (〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台1丁目5-5)
E-mail:ta-yamada@kobelco.jp

桁高制限を受ける橋梁の需要に対して、近年では桁と床版を一体化した合成床版橋が多くの実績を重ねつつある¹⁾。これらの床版橋は都市内での適用が多いことから筆者らは景観性を考慮するために、底鋼板を橋軸直角方向で下側に凸にした合成床版橋を提案する。CB 床版橋の構造的な特色は合成前死荷重を底鋼板の膜力で抵抗する構造としている点である。さらに、底鋼板に橋軸方向の主桁フランジの機能を持たせ、床版自体が桁構造を兼ねる構造となっている。設計上無視される引張側コンクリートを省略し、死荷重の低減を図るために中空断面を採用した。また、合成床版橋の特徴は桁高が低いことであり、この構造高を実現するために、水平方向にせん断キールをもつ切欠きジベルを考案し検証実験を行ったので報告する。

Key Words : Composite slab bridge, Teeth-shaped dowel, Low depth of bridge

1. まえがき

都市内には桁高制限を受ける橋梁の需要が多く、近年では桁と床版を一体化した合成床版橋が多く提案されている。また、都市内に架設されることから景観性にも付加価値を持たせる必要があると言える。

そこで、低桁高を視覚的に強調するために、底鋼板を曲面とした合成床版橋について検討を行った。すなわち、本床版橋は(Curved Bottom:CB 床版橋と呼ぶ)、底鋼板を床版支間方向で下側に凸にした形状とすることで、合成前死荷重を底鋼板の膜力で抵抗する力学特性を有するものである。この構造を採用することにより、積極的な配横桁の省略が可能となり、合理的な構造となっている。さらに、低桁高を実現するために、主桁フランジに設けられるずれ止めは、一般的に多用される頭付きスタッド

ではなく、上フランジ幅方向に切欠きを設けたジベルを考案した。

本報では、CB合成床版橋の設計コンセプト並びに試設計例を示すとともに、このずれ止め性能を把握するために実施したはり供試体による曲げ試験、押し抜きせん断試験を行ったので報告する。

2. CB床版橋の構造検討

(1) 検討モデル

CB床版橋の底鋼板は下側に凸にした形状であるため、自重や床版コンクリート打設荷重などにより、底鋼板に膜力が発生する。この膜力によって、主桁は幅員方向に変形しようとする。幅員方向の変形を抑制するためには、外桁に横剛性を持たせるか、もしくは幅員方向に圧縮材

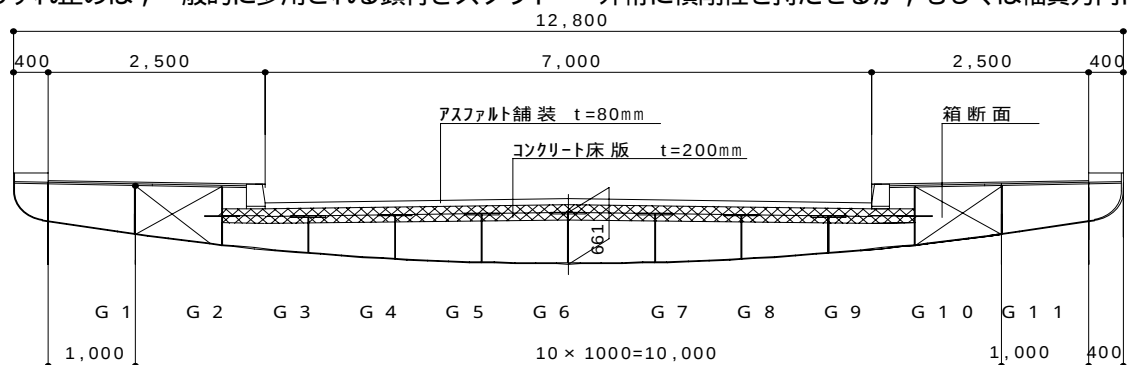


図-1. CB床版橋断面図

を配置することが必要となる。

このため、主桁と横梁である圧縮材の合理的配置を決定するために、図-2に示す3次元モデルで骨組み計算を行い、CB床版橋の基本構造を決定した。幅員構成は図-1に示すように両側歩道(2.5m)付き2車線(7m)の道路橋で総幅員12.8mである。外桁は、箱桁もしくはI桁の非合成単純桁とし、中桁は合成前の架設系は非合成I桁、完成系はコンクリート床版との合成桁とした。軽量化を図るために、床版下面と底鋼板の間は中空断面とし、コンクリートは圧縮部分だけを有効と考えた。支間24mの単純支持とし、構造高/支間比は約1/30、底鋼板の幅員方向のサグ比は1/20とした。

解析の部材モデルは、橋軸方向の主桁は梁部材、底鋼板は、2m間隔にトラス部材として配置した。

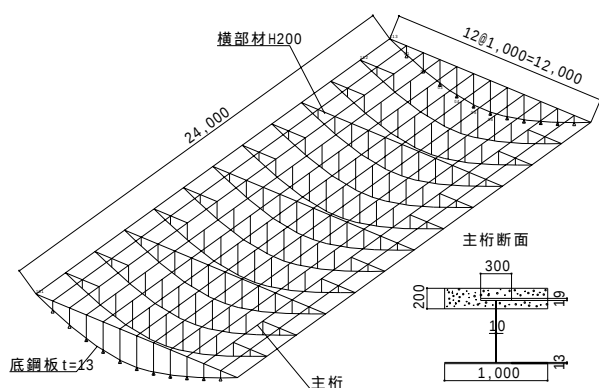


図-2. 解析モデル図

(2) 計算結果

図-3に圧縮材がない場合における外桁の横剛性の影響を示す。図中の I_z は外桁の横剛性、 I_y は内桁の平均曲げ剛性で、 $I_z/I_y=0$ のケースは、外桁がI桁のように横剛性がない場合で、底鋼板には膜力が発生しない。各々の主桁は横方向の荷重分配作用がないため独立した梁として荷重を負担する。しかし、横部材がない場合でも、外桁を箱断面にすることにより横方向の曲げ剛性を持たせると底鋼板に膜力が発生する。 I_z/I_y が大きくなるにつれ底鋼板の膜力が大きくなることがわかる。しかし、図-1のような断面構成では I_z/I_y は5~10程度であり、圧縮材がない状態では、大きな外桁の横曲げ剛性がない限り、底鋼板に発生する膜力は少ないことがわかる。

図-4に示すように、6m間隔に圧縮材を設けた場合は外桁の横剛性がなくとも底鋼板には膜力は発生する。しかし、外桁の横剛性が少ないと、膜力の発生は圧縮材近傍に限られ、橋軸方向に不均一となる。圧縮材を6m間隔に配置した場合は、外桁の横方向の剛性が鉛直方向の剛性に対して、16倍程度になるとほぼ均一化される。

また圧縮材間隔が密になるほど、底板の橋軸方向の膜力分布は均一化される。底鋼板の膜力と圧縮材間隔の関

係を図-5に示しているが、 $I_z/I_y=3$ の場合、圧縮材間隔が4~6m程度になると橋軸方向の膜力が均一化する。12mの場合は支間中央だけに設置した場合で、圧縮材の近傍だけに膜力が発生していることがわかる。圧縮材に発生する軸力は圧縮材間隔が4mで200kN、6mで300kN、12m(支間中央1本配置)で530kN程度となり、さほど大きな作用力ではない。

底鋼板の膜作用を利用した合理的なCB床版橋の基本構造をまとめる次のようになる。

外桁は水平方向に剛性のある箱断面とする。

荷重分配作用が必要な横桁を用いる必要はなく、500kN程度の圧縮力に抵抗できるH200×200程度の部材を6m間隔程度に配置すれば十分である。

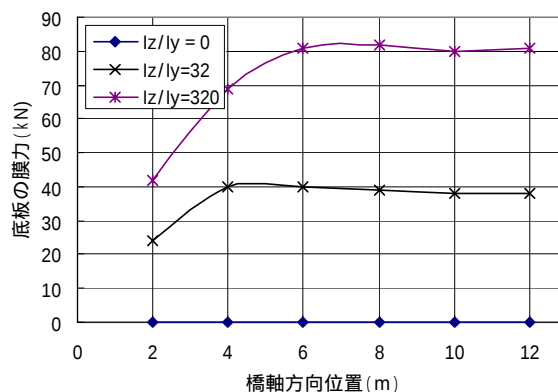


図-3. 外桁の横剛性の影響（圧縮材なし）

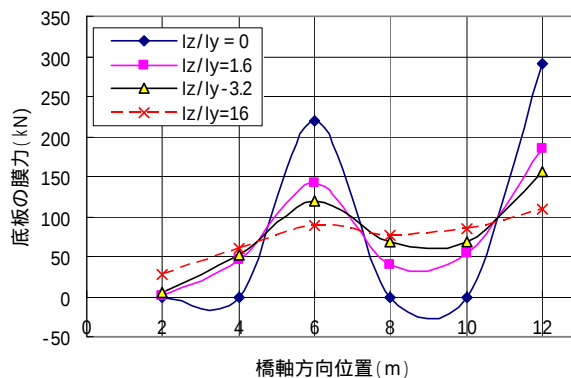


図-4. 外桁の横剛性の影響（圧縮材あり）

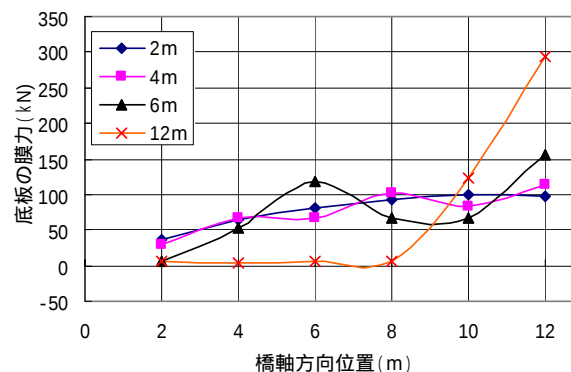


図-5. 圧縮材間隔の影響 ($I_z/I_y=3$)

3 .CB床版橋のFEM解析

(1) 検討モデル

骨組み計算で概略検討した諸元を用いてFEM解析を実施し、底鋼板の膜力や膜力による荷重分配効果などを求め、CB床版橋の構造特性を明らかにした。主桁の断面構成は、底鋼板の板厚は13mm、外箱桁の上フランジ厚は12mm、内桁の上フランジは300×19、ウェブ厚は10mmとし、圧縮材はH200×200×8×12を6m間隔に配置し、図-6に示すモデルで解析をおこなった。

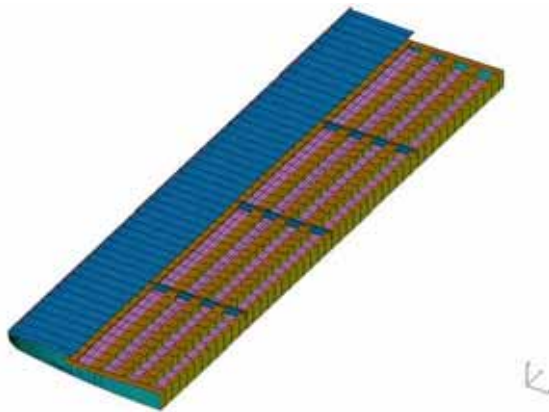


図-6. FEM解析モデル

(2) 検討結果

架設系（合成前死荷重載荷時）における底鋼板の橋軸方向応力分布を図-8に示す。一般的な多主桁橋の場合、架設時の下フランジの応力度は各主桁の剛度に比例し連続性はない。しかし、CB床版橋の場合は底鋼板が連続であるため膜効果が発生し、各主桁間の応力度の変化はスムーズである。特に外桁は箱断面で曲げ剛性が内桁に比べ大きいため、荷重負担は大きくなりがちであるが、底鋼板の膜効果により応力分布は内桁に比べ減少している。

図-7に示すように底鋼板の形状を下側に凸形状とした場合、内桁の構造高さが変化することとともない、各々の桁の剛度は変化する。荷重分配作用のない単独梁の場合は、図-9に示すように各々の内桁の剛度と分担荷重に比例して変形する。特に桁高が低いG3桁（-3.00）の場合はコンクリートと鋼桁の合成効果がない架設系では大きな変形が生じる。このため、通常の橋梁においては、不均等なたわみ変形が生じないように桁間剛度差を少なくし、十分な剛度を有する分配横桁を配置している。しかし、横桁がない区間では主桁どうしの不均等なたわみによって、床版に付加曲げモーメントが発生し、構造的な弱点となる。図-9に示すCB床版橋のFEM解析結果では、桁相互間のたわみ差は少ない。これは底鋼板が幅員方向に連続しているため、大きな変形が発生する場合は、底鋼板を介した隣接する桁の相互作用によるものである。この相互作用は、底鋼板に発生する膜力によって発揮されると考えられる。図-10に底鋼板に発生する橋軸直角

方向の応力分布を示す。圧縮材位置のG2桁で最大応力が発生するが全体としては大きな応力レベルではない。

このように下向きに凸とした連続性のある底鋼板を用いたCB床版橋は分配横桁を用いなくても、十分な荷重分配作用があり、しかも主桁相互間に滑らかな配分が行われていることが確認できた。

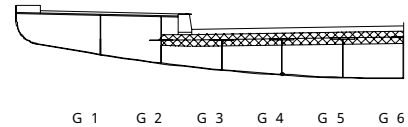


図-7. 横断面

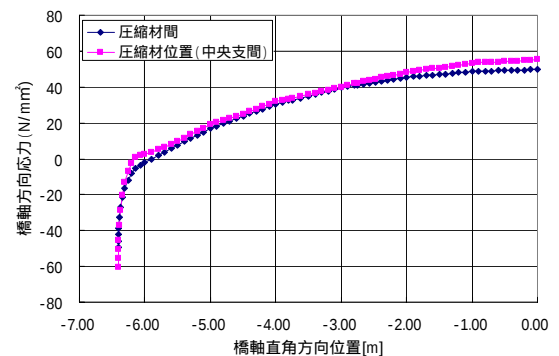


図-8. 底鋼板の橋軸方向応力分布（架設系）

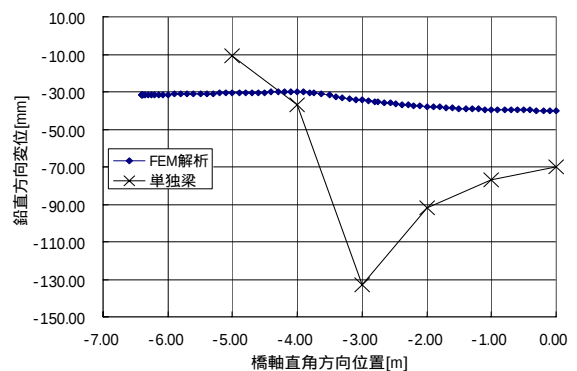


図-9. 支間中央における底鋼板の変位（架設系）

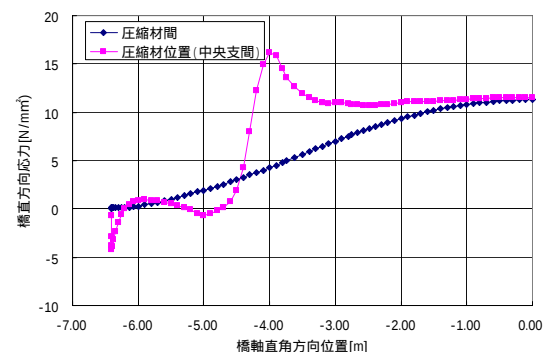


図-10. 底鋼板橋軸直角方向の応力分布（架設系）

4. 水平切欠きジベルの実験

(1) 水平切欠きジベルの押抜きせん断試験

CB 床版橋では、主桁上フランジのコンクリートかぶり厚さを最小化し、低桁高とするため、主桁上フランジの端部に切欠きを設け、床版主鉄筋を折り曲げ配置する歯形状の切欠きジベルの適用を検討した。一般的に、頭付きスタッドや、孔あき鋼板ジベルは、上フランジの上に鉛直方向に設置され、今回のように床版内に水平に設置された例はほとんどない。そこで、実構造を模擬した供試体を作成し、押抜きせん断試験を実施し、その実用性の検討を行った。

(2) 試験概要

CB 床版橋の上フランジ厚がせん断耐力に及ぼす影響を把握するため、表-1 に示す 3 タイプの供試体を製作した。なお、実橋で使用される上フランジ厚を想定して、19mm と 32mm を用意しただけでなく、異なる破壊モードにて終局を迎えることを期待した供試体として、鋼板厚 8mm も製作した。

表-1. 供試体一覧

TYPE	K-1	K-2	K-3
床版厚	180 mm	180 mm	180 mm
鋼板厚	8 mm	19 mm	32 mm
切り欠き寸法	30mm×75mm	30mm×75mm	30mm×75mm
配置鉄筋	有 (D13)	有 (D13)	有 (D13)
コンクリート圧縮強度	30 N/mm ²	30 N/mm ²	30 N/mm ²
供試体数	2 体	2 体	2 体

図-11 に、供試体の概要を示す。桁間コンクリートの拘束効果を考慮するため、2 本の主桁を配置した。図-12 には、ジベルの形状及び、鉄筋配置を示す。鉄筋は、床版主鉄筋の一部をジベル切欠き部の中央で鉛直方向に配筋するため、曲げ加工を行った鉄筋を使用し、定着は、主鉄筋方向とした。

荷重载荷は、JSSC 頭付スタッドの押抜き試験方法(案)²⁾に準拠し、変位制御にて漸増繰り返し载荷を実施し、相対変位が 1.0mm までは 0.2mm 増すごとに、それ以降 4.0mm までは 0.5mm 増すごとに、载荷・除荷の繰り返し载荷を行った。4.0mm 以降、破壊までは単調载荷を行った。

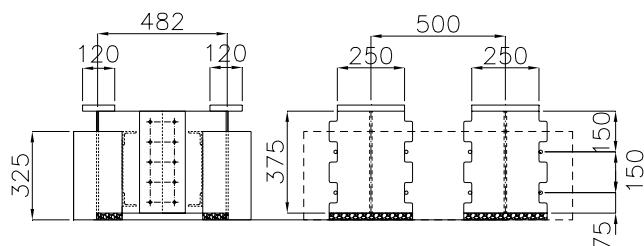


図-11. 供試体概要図

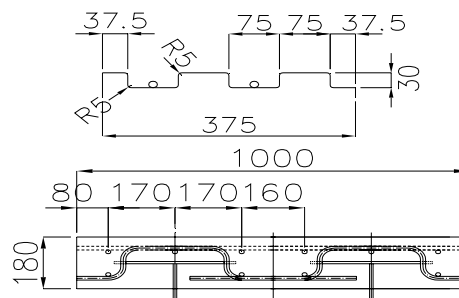


図-12. ジベル形状、鉄筋配置

(3) 試験結果

図-13 に荷重と相対ずれの関係を示し、表-2 に最大せん断耐力、降伏せん断耐力(0.2mm オフセット法)の結果を示す。なお、これらに示した結果は、試験荷重を全切欠き数 16 で除した切欠き 1 か所あたりのものである。鋼板厚 8mm と 19mm との比較では、最大せん断耐力が約 20%, 降伏せん断耐力がおおよそ 45% 上回る結果となった。しかし、19mm と 32mm のせん断耐力には有意の差はなかった。これは、保坂らが文献³⁾にて指摘

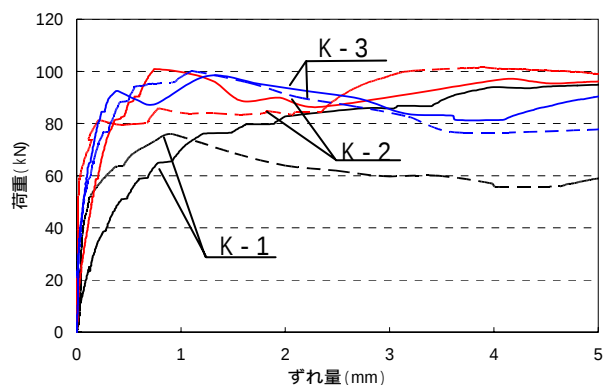


図-13. 荷重-相対ずれ

表-2. 押抜きせん断試験結果一覧表

TYPE	鋼板厚 (mm)	ピッチ (mm)	供試体No	最大せん断耐力 Q_{max} (kN)	降伏せん断耐力 Q_y (kN)
K-1	8	150	1	94.9	51.5
			2	75.8	60.8
			平均	85.4	56.2
K-2	19	150	1	100.9	81.8
			2	101.5	81.3
			平均	101.2	81.6
K-3	32	150	1	98.3	88.3
			2	100.1	76.6
			平均	99.2	82.5



写真-1. 供試体破壊状況

している、総じて板厚の最大せん断耐力に及ぼす影響は小さいものの、破壊メカニズムの進行過程が違ふことにより板厚の影響も表れていたという結果にほぼ一致するものと判断できる。特に、鋼板厚 8mm では、切欠きジベル近傍のコンクリートの圧縮領域が小さいため支圧破壊を呈していたものと考えられ、19mm、32mm では、コンクリートの圧縮領域が大きいので、支圧破壊よりもせん断破壊が先行する結果になり、せん断耐力がほぼ同等になったものと判断できる。（写真-1. に鋼板厚 8mm の破壊状況を示す。）

このことは、完成系において、ずれ止めを兼ねる上フランジの板厚は、架設時に発生する応力、または変位から決定されるものの、その板厚に応じてせん断耐力が変化することはなく、本試験の結果から判断すれば、19mm 以上の板厚であればせん断耐力を一定値として扱えることを示唆するものと言える。

また、本試験の結果を孔あき鋼板の設計耐力⁴⁾と比較すれば、50%程度の耐力となる。本ずれ止めの特長は、水平方向に切欠きジベルを配置することから、隣接する上フランジの相互の拘束効果も狙ったものであるが、図-11 に示す供試体概要図のとおり拘束が期待できない両端面にも切欠きジベルを設け、全切欠き数 16 で試験結果を除しているため、図-13 と表-2 では、せん断耐力を過小評価しているものと考えられる。

支間長 24m 単純支持の CB 床版橋の試設計によれば、上フランジ厚 19mm で、桁端部に作用する水平せん断力は、死荷重 + 活荷重の組合せで、およそ 200N/mm/桁である。切欠きジベルの安全率を 3.0 と仮定すれば、必要となるせん断耐力 Q_{ureq} は 45kN ($=200\text{N/mm} \times 150\text{mm} \times 3.0 / 2 \text{ 面}$) であり、表-2 に示す鋼板厚 19mm の降伏せん断耐力 80kN 以下となる。ただし、クリープ・乾燥収縮を考慮すると、桁端部では降伏せん断耐力を超過するものと考えられるため、実橋では床版コンクリートを支点横桁に打ち下ろし、その打ち下ろしコンクリートと主桁ウェブを合成させることも考える必要がある。

5. 構造性能確認試験

水平切欠きジベルを用いた合成梁としての挙動を確認するために図-13に示す供試体を製作し曲げ破壊試験を実施し、終局時における耐荷力や破壊状況を把握することにより、CB床版橋の構造特性を解明し、水平切欠きジベルの効果を確認した。

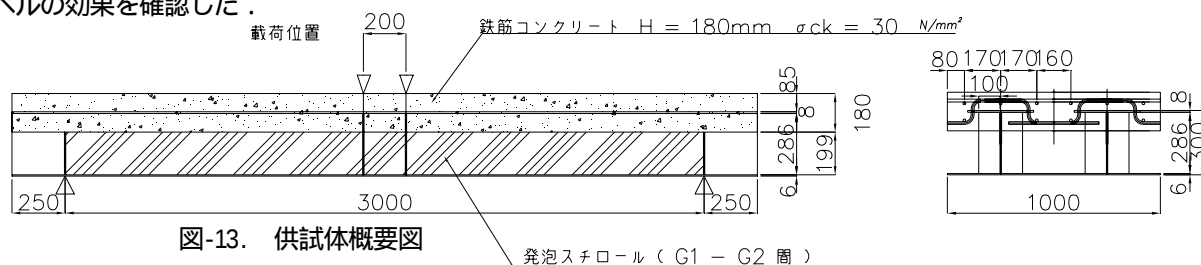


図-13. 供試体概要図

発泡スチロール (G1 - G2 間)

(1) 試験概要

図-1 に、供試体の概要を示す。桁間のコンクリートと底鋼板の拘束効果を考慮するため、2本の主桁配置とした。コンクリート床版の圧縮域である有効断面は 14.5cm であるが、床版厚は、実橋での適用性を考慮し 18cm とした。また、床版下面と底鋼板の間は、中空断面とし発泡スチロールを充填した。コンクリートの圧縮強度は 4 週強度で 30N/mm^2 である。

荷重載荷は、設計曲げ耐力である 1100kN までは 100kN 毎に漸増繰り返し載荷を実施し、1100kN 以降は、破壊まで単調載荷を行った。

(2) 試験結果

図-14 に曲げ載荷実験の結果を示す。実験の結果、以下の点が確認された。

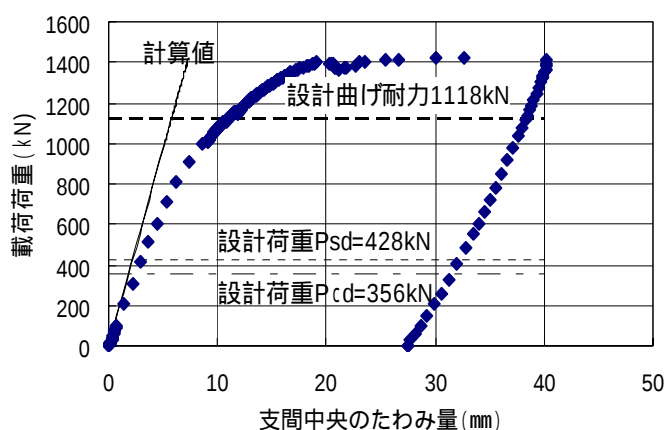


図-14. 供試体の荷重-たわみ

設計荷重 P_d はコンクリートの許容応力度を $30/3.5=8.6\text{N/mm}^2$ とすると $P_{cd}=356\text{kN}$ 、鋼板の許容応力度を 140N/mm^2 とすると $P_{sd}=426\text{kN}$ となる。設計荷重相当の載荷状態では供試体には異状が発見されず、図-14のたわみ曲線から弾性状態であることが確認された。また図-15の底鋼板のひずみも載荷荷重 800kN 程度までは荷重の増加にともない直線的に増加しており、コンクリートから鋼桁へせん断力が伝達され、合成桁としての機能をはたしていることを確認した。

設計荷重 P_d の約 2 倍に相当する 800kN 載荷時に床版支間中央において引張域にあるコンクリート下面からのひび割れが確認された。たわみ量も荷重の増加にともない非線形な挙動を示すようになった。

終局耐力算定に基づく計算耐力は塑性モーメントから計算すると $P_{us} = 1118 \text{ kN}$ となり、コンクリートの圧縮強度 $\sigma_{sc} = 30 \text{ N/mm}^2$ とすると 1070 kN となる。計算耐力近傍の 1000 kN 載荷時にコンクリートの曲げひび割れが圧縮域にも発生し、 1160 kN 載荷時には床版端部の上フランジから写真-2に示すようにコンクリートの亀裂の発生が確認された。



写真-2. 床版端部のひび割れ状況

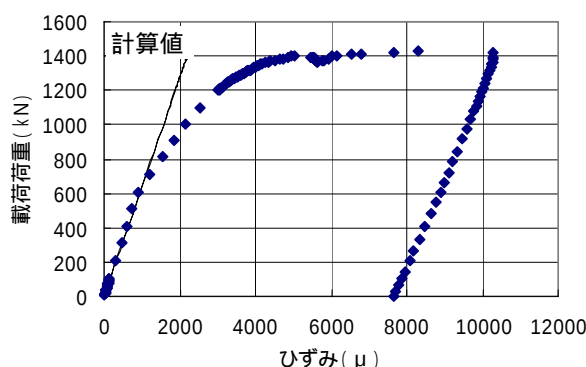


図-15. 底鋼板の下面のひずみ

最大荷重は 1420 kN でコンクリートの曲げ圧縮破壊が発生した。これは、塑性モーメントから求めた終局耐力： $P_s = 1118 \text{ kN}$ と比較すると 1.27 倍となり、道路橋として十分な耐力があることが確認された。

6. まとめ

試設計の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 底鋼板を下に凸の形状とすることで、膜作用による荷重分配効果が見込め、各主桁間の荷重分配を積極的に期待した横桁の配置は必要ないことが明らかになった。
- (2) 水平切欠きジベルは、合成床版橋の構造高を低く抑えることに有効である。
- (3) 水平切欠きジベルは、隣接する上フランジによる相互拘束効果を期待したものであるが、押抜きせん断試験供試体では、拘束効果が期待できない両端面にもそのジベルを設置した。したがって、本報の結果では、拘束効果が期待できないジベルもせん断耐力の評価に見込まれており、耐力を過小評価している可能性がある。
- (4) 曲げ試験の結果では、設計荷重では十分に合成断面として挙動しているだけでなく、終局耐力も設計計算値を上回っており、コンクリート床版と鋼主桁との十分な合成効果を発揮していることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：新形式中空床版橋の実用化および合成床版橋連続化の動向，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム，2003.11。
- 2) 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，1996.11。
- 3) 保坂，光木，平城，牛島，橋，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，2000.3。
- 4) 土木学会鋼構造委員会：孔あき鋼板ジベル設計マニュアル（案），2001.11。

STUDY ON COMPOSITE SLAB BRIDGE OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS CONSIDERED AESTHETIC VIEW

Masao HIROSAWA, Yoshiki MORIYAMA, Katsu NUMATA and Takeshi YAMADA

A steel-concrete composite slab bridge which is curved bottom skin plate has been developed to meet the need of lowering depth of bridge, lightening bridge weight and the harmony of bridge and scenery. This bridge "so called the CB bridge" is characterized by following items; 1) membrane force of a curved bottom steel skin plate resists the load before composition of steel and concrete, 2) a curved bottom plate also works as lower flange plates of main girders, 3) a hollow-type due to reduction of dead load is adopted, and shear force between upper flange plate and concrete is dealt with teeth-shaped dowels. In this paper, a trial design of the bridge with a curved bottom steel-concrete composite slab and experimental results are reported. The experimental results show the efficiency of CB bridge.