

鋼管ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版に関する実験的研究

Experimental Studies on Steel-concrete Composite Slab with Pipe Dowels

大久保宣人*, 中本啓介**, 田中正明***, 松井繁之****

Nobuhito Okubo, Keisuke Nakamoto, Masaaki Tanaka, Shigeyuki Matsui

* 片山ストラテック (株) 技術本部橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

** 工修 駒井鉄工 (株) 技術本部技術研究室 (〒293-0011 千葉県富津市新富 33-10)

*** 工修 (株) 栗本鐵工所 鉄構事業部企画開発部 (〒590-0977 堺市大浜西町 2-2)

**** 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

The steel concrete composite slab for bridges aims at the reduction of construction cost and period. Recently in Japan, because of the constructive and economic advantages, this composite slab type is adopted widely and its number is increasing remarkably. The steel concrete composite slab is expected with having a high load carrying capacity and durability.

The authors developed the new type of the steel concrete composite slab called “Pipe-slab” as a joint project of three corporative companies. This paper deals with the outline of the “Pipe-slab” and the results of the positive and negative bending test of the slab and the negative bending test of the composite girder bridge respectively.

Key Words: composite slab, pipe dowel, bending test, large span slab

1. はじめに

近年、鋼道路橋のコスト削減を目的として、構造の合理化や製作・架設の省力化の要望が高まり、床版の長支間化、耐久性の向上、および施工の簡素化に対応した各種の鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と称する）が開発、実用化¹⁾されてきている。

合成床版は、一般に以下のような特長を有している。

- 1) 鋼とコンクリートとの合成作用により耐荷力・耐久性に優れ、長支間床版へ適用可能である。
- 2) 床版厚が薄いため軽量である。また、工場から架設現場への輸送時には鋼パネルのみであるため軽量である。
- 3) 型枠支保工の設置が省略でき、省力化や急速施工が可能である。

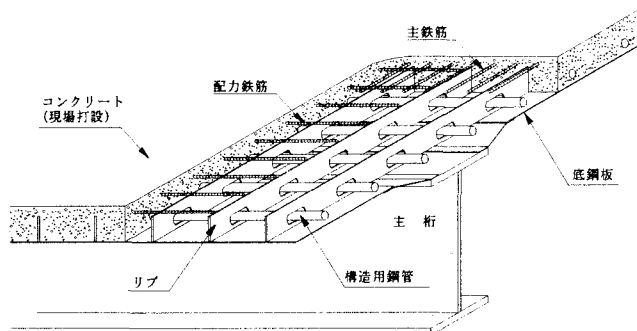


図-1 パイプスラブの構造概要

筆者らは、片山ストラテック (株)、駒井鉄工 (株)、および (株) 栗本鐵工所の 3 社共同体制により、平成 13 年度から鋼管を用いた新形式の合成床版（パイプスラブと称する）の開発を進めている。本論文ではこのパイプスラブの概要を紹介し、実施した一連の静的な性能確認試験の中から、版の正曲げ載荷試験・負曲げ載荷試験、および合成桁の負曲げ載荷試験について報告する。

2. 構造概要

パイプスラブの構造概要を図-1 に示す。床版下面全体に敷設する鋼パネルの上面には、橋軸直角方向にリブを断続溶接し、このリブを貫通する方向（橋軸方向）に鋼管を配置している。リブに設けた長孔に充填されたコンクリートが底鋼板とコンクリート間のずれ止めの役割を果たしているが、鋼管を貫通配置させることによりずれ止め効果が向上する（鋼管ジベルと称する）。本ずれ止め構造の性能は、別途実施した押し抜き試験^{2)・3)}により確認している。

橋軸方向および橋軸直角方向の両方向において、底鋼板はコンクリートと合成し、応力部材として機能するため、下側の主鉄筋および配力鉄筋が省略でき、軽量化が図られている。また、鋼管の重量よりも鋼管が排除するコンクリートの重量の方が大きいため、鋼管の使用によって床版重量が軽減される。なお、鋼パネル間の現場継手は底鋼板の応力伝達を考慮して高力ボルトによる一面摩擦接合を採用している。

さらに、鋼管を橋軸方向全長にわたって配置するため、鋼

管の内部空間を利用してライフライン、通信設備、ロードヒーティングなどへ応用することが可能である。

3. 版の正曲げ載荷試験⁴⁾

3.1 試験概要

本合成床版の正曲げ部の耐荷力を検証するため、図-2に示すように床版支間部を想定した試験体を製作し、正曲げ載荷試験を実施した。試験のケースは、リブ間の中央位置で載荷した場合と、リブの直上に載荷した場合の2種類とした。

また、底鋼板とコンクリートとのずれの挙動を計測することにより、曲げ挙動下でのずれ止め効果についても確認するものとした。

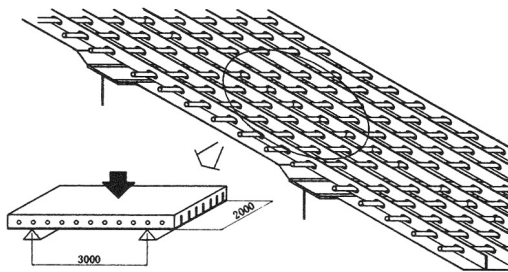


図-2 版の正曲げ試験概要

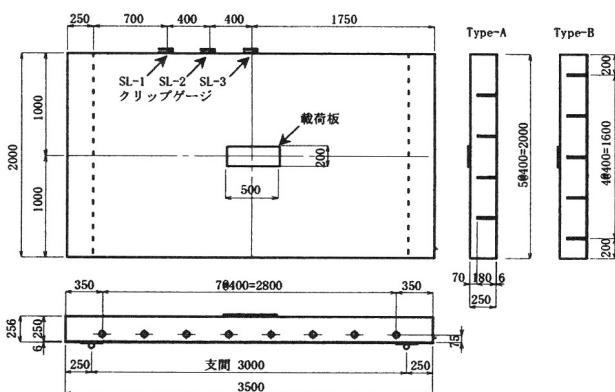
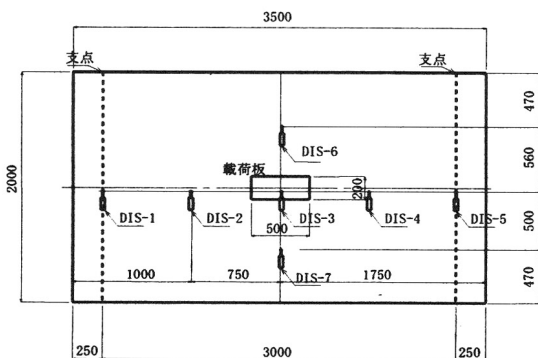


図-3 版の正曲げ試験体形状



注：変位計は鉛直方向に取付ける。

図-4 変位計取付け位置

表-1 版の正曲げ試験体鋼パネルの材料

部材	寸法	材質
リブ	断面 H 180mm×t 16mm	SM400
底鋼板	板厚 6mm	SM400
鋼管	断面 φ 60.5mm×t 3.2mm	STK400

表-2 版の正曲げ試験体コンクリートの仕様

	設計値	実測値
圧縮強度	$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$	試験体Type-A $\sigma_{21}=46.0\text{N/mm}^2$
		試験体Type-B $\sigma_{19}=41.9\text{N/mm}^2$
スランブ	12cm	11.5cm
空気量	4.5%	4.6%
セメントの種類	早強セメント	
最大粗骨材寸法	20mm	
混和材	膨張材 30kg/m ³	

本試験の試験体形状を図-3に、鋼パネルの材料を表-1にそれぞれ示す。試験体は載荷点がリブ間の中央位置となるType-A、および載荷点がリブ直上となるType-Bの2種類を各1体ずつ製作した。

試験体の設計は床版支間を6mと仮定し、土木学会の複合構造物の性能照査指針(案)に基づいて設計曲げモーメントを算出した。主鉄筋はD16の125mmピッチ、配力鉄筋はD16の250mmピッチであり、材質はどちらもSD295Aとした。

試験体のコンクリートの仕様を表-2に示す。圧縮強度の実測値は、載荷試験の実施日に行った材料試験の値を示している。なお、セメントの種別を早強としたのは、試験体の製作工程を短縮するためである。

載荷は1,500kN油圧サーボ試験機を用いて行った。試験体の支持方法は支間3mの単純支持とし、支間中央への載荷とした。載荷位置には輪荷重の載荷面を模した大きさ500mm×200mm、板厚16mmの載荷板を設置した。載荷方法は漸増繰返し載荷とした。

試験体の鉛直変位の測定は、図-4に示す位置に設置した変位計(DIS-1~DIS-7)にて行った。また、図-3に示すように試験体側面にはクリップゲージ(SL-1~SL-3)を設置し、コンクリートと底鋼板の支間方向の相対ずれを測定した。載荷試験の状況を写真-1に示す。

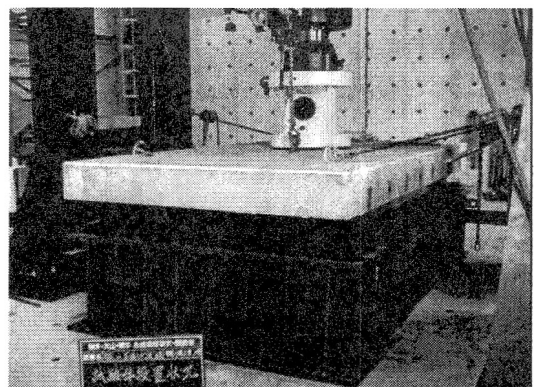


写真-1 版の正曲げ載荷試験状況

3.2 試験結果および考察

試験体中央位置（変位計 DIS-3）の鉛直変位と載荷荷重の関係を図-5に示す。これらの図中の設計荷重（240kN）とは、試験時の載荷方法で前述の設計曲げモーメントを与えるような荷重である。

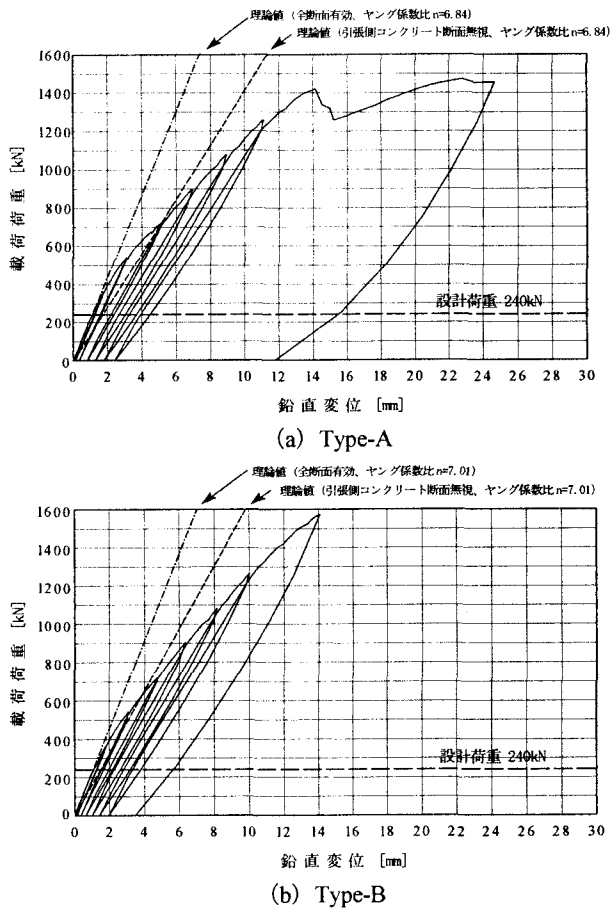


図-5 載荷荷重-鉛直変位関係

Type-A では、1,400kN 付近でコンクリート上面にひび割れが発生し、その後 1,470kN で載荷位置近傍のコンクリートが圧壊したため、載荷を終了した。一方、Type-B では試験機の載荷性能上限値である 1,570kN まで載荷を行ったが破壊に至らなかった。

Type-A は Type-B に比較して、鋼パネルのリップ本数が少なく剛性が小さいことと、リップ間位置への載荷であることから、Type-B よりも小さな荷重で破壊したものと考えられる。しかしながら、Type-A の破壊荷重 1,470kN は試験体の設計荷重 240kN の 6 倍以上の大きさである。

図-5 には、載荷試験結果とともに、梁理論によって算出した理論値を示している。計算はコンクリートを全断面有効としたものと引張側のコンクリート断面无視したものの 2 種類行った。これらの理論値の計算にはそれぞれの試験体コンクリートの材料試験結果より算出したヤング係数比を用いている。試験結果と理論値を比較すると、両試験体とも載荷荷重が約 400kN までは全断面有効の理論値とほぼ一致している。この 400kN の荷重は、試験体側面にひび割れが発現し始めた荷重と一致する。

図-6 に、底鋼板とコンクリートの相対ずれと載荷荷重との関係を示す。両試験体ともに鋼とコンクリートとの相対ずれが発生したのは、約 400kN の荷重であることがわかる。この荷重は図-5 に示した載荷荷重-鉛直変位関係の傾きの変曲点とほぼ一致する。また、試験体側面にひび割れが発現し始めた荷重とも一致している。これらのことから、本試験体の曲げに対するひび割れ発生荷重は約 400kN であり、Type-A の破壊荷重 1,470kN はこの値の 3 倍以上となっている。

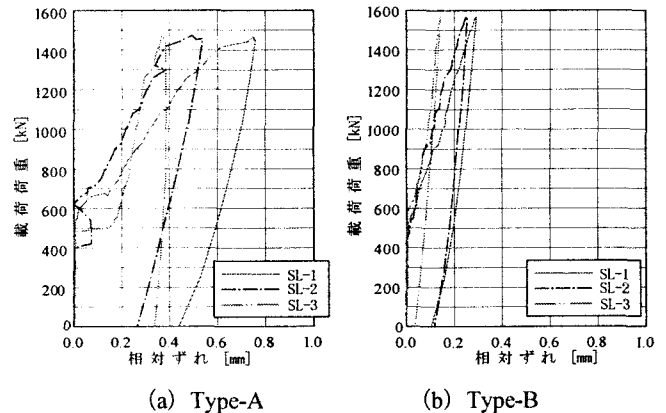


図-6 底鋼板とコンクリートとの荷重-相対ずれ関係

4. 版の負曲げ載荷試験

4.1 試験概要

主桁上の床版の負曲げモーメントに対する耐荷力、およびひび割れ性状を確認するために、主桁近傍の版をモデル化した試験体を用いて、版の負曲げ載荷試験を行った。試験体は、ハンチ部および主桁への取付け部を忠実に再現した構造とした。試験体の形状を図-7に、鋼パネルの材料を表-3に、コンクリートの仕様を表-4にそれぞれ示す。

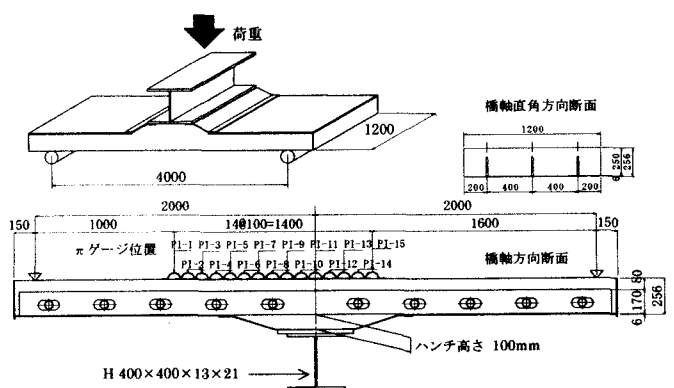


図-7 版の負曲げ試験体形状

表-3 版の負曲げ試験体鋼パネルの材料

部材	寸法	材質
リップ	断面 H 170mm×t 16mm	SM400
底鋼板	板厚 6mm	SM400
鋼管	断面 φ 60.5mm×t 3.2mm	STK400

表-4 版の負曲げ試験体コンクリートの仕様

	設計値	実測値
圧縮強度	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	$\sigma_{1s}=29.3\text{N/mm}^2$
スランブ	12cm	12.5cm
空気量	4.5%	4.7%
セメントの種類	早強セメント	
最大粗骨材寸法	20mm	
混和材	膨張材 30kg/m ³	

試験体の設計は床版支間 6m, 張出し支間 2.75m の 2 主桁橋を想定して行い, 鉄筋配置は主鉄筋を D22 の 125mm ピッチ, 配力鉄筋を D16 の 200mm ピッチとした。

載荷試験時には床版を下側に反転させ支間 4m にて単純支持し, 支間中央 (主桁ウェブ位置) に 1,500kN 油圧サーボ試験機を用いて漸増繰返し載荷を行った。

床版コンクリートの表面には, 図-7 に示す位置に合計 15 個のεゲージを取り付け, ひび割れ幅の計測を行った。測定精度を上げるために, 主要なひび割れに対してはクリップゲージによる計測を併用した。写真-2 に, 載荷試験の状況を示す。

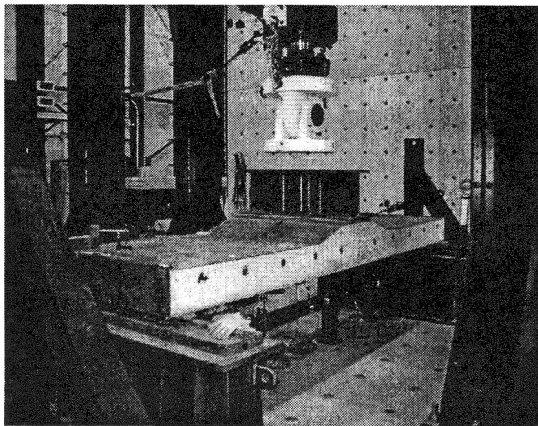


写真-2 版の負曲げ載荷試験状況

4.2 試験結果および考察

載荷荷重と試験体中央の鉛直変位の関係を図-8 に示す。同図には, コンクリートの材料試験結果より算出したヤング係数比を用いた理論値 (コンクリート全断面有効, および引張側のコンクリート断面無視とした梁理論) を示している。この理論値の計算には, ハンチによる断面変化を考慮している。また, 図中に示す設計荷重 (150kN) は, 設計時の曲げモーメントを与える載荷荷重である。

この図より, 載荷初期は全断面有効の傾きに近く, その後は徐々に勾配が小さくなり, 設計荷重の時点で引張側のコンクリート断面を無視した理論値とほぼ一致していることがわかる。最大荷重は設計荷重の 3.5 倍程度の約 520kN であった。

初期ひび割れはハンチ部と一般部の交点近傍に, 載荷荷重が約 90kN の時点で発生した。終局段階でのひび割れ間隔は 150~200 mm 程度であったが, 交点近傍ではそれよりも密に発生し, 最終的にこの部分のコンクリートが圧壊して試験を終

了した。なお, 設計荷重載荷時点の最大ひび割れ幅は約 0.15mm であった。

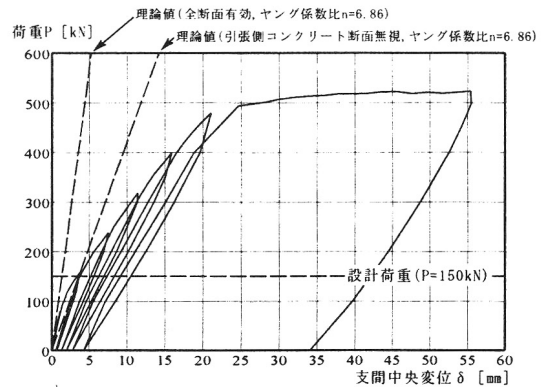


図-8 試験体中央の荷重-変位関係

5. 合成桁の負曲げ載荷試験

5.1 試験概要

本合成床版を連続合成桁へ適用するための検討として, 床版に主桁作用の負曲げモーメントが発生する中間支点近傍の主桁および床版をモデル化した静的な載荷試験を実施した。本試験では, 中間支点近傍の床版のひび割れ間隔, ひび割れ幅などを計測することにより, 本合成床版のひび割れ特性を確認する。

さらに, 比較用の試験体として RC 床版モデルによる試験も実施し, 両者のひび割れ特性の比較を行った。

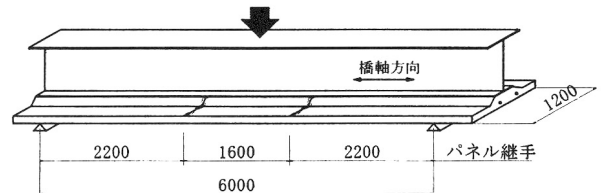


図-9 合成桁の負曲げ試験概要

表-5 合成桁の負曲げ試験体の種類

名称	形式	鉄筋配置	備考
Type-1	RC床版	主鉄筋 D13 100mmピッチ 配力鉄筋 D19 100mmピッチ (鉄筋比1.9%)	-
Type-2	合成床版	主鉄筋 D22 125mmピッチ 配力鉄筋 D22 125mmピッチ (鉄筋比1.3%)	鋼パネル材料は表-3と同じ

試験体は表-5 に示す 2 体を製作した。合成床版試験体である Type-1 の設計に際しては, 版の負曲げ載荷試験と同様な試設計を実施した。鋼パネルの材料は前掲の表-3 と同じである。RC 床版試験体である Type-2 の床版厚は, 合成床版の版厚に合わせるものとした。なお, ハンチ高さはどちらも 50mm とした。

載荷試験の概要は, 図-9 に示すように, 床版が下側となるように試験体を反転させて単純支持し, 支間中央に載荷す

ることにより負の曲げモーメントを与えるものとした。

試験体の鋼桁部は桁高 1m, 支持支間 6m の I 桁形式とした。桁高の決定は、床版断面に発生する応力の勾配が概ね標準的なものとなるように決定した。支持支間については、ジャッキの能力の限界荷重時 (約 5,000kN) に、支間中央部の鋼桁断面が降伏するように設定した。

荷重は漸増荷重とし、各荷重ステップ毎に床版コンクリートのひび割れの確認および記録を行った。試験体の鉛直変位と床版のひび割れ幅は図-10 に示す配置箇所に変位計、および π ゲージによりそれぞれ測定した。なお、版の負曲げ試験と同様に、主要なひび割れ幅の測定においては、クリップゲージを併用した。

表-6 に試験体のコンクリートの仕様を、写真-3 に荷重試験の状況をそれぞれ示す。

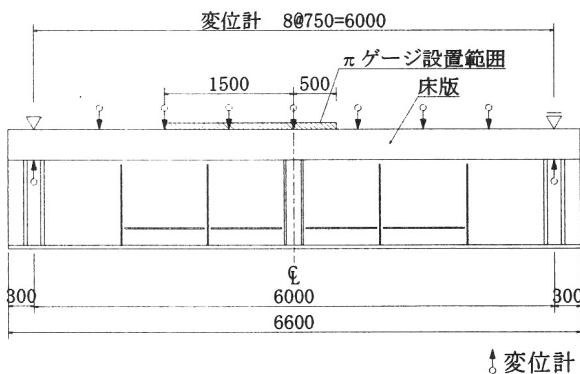


図-10 変位およびひび割れ幅の測定位置

表-6 合成桁の負曲げ試験体コンクリートの仕様

	設計値	実測値
圧縮強度	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	試験体Type-1 $\sigma_{21}=34.2\text{N/mm}^2$
		試験体Type-2 $\sigma_{28}=36.0\text{N/mm}^2$
スランプ	15cm	12.5cm
空気量	4.5%	4.7%
セメントの種類	早強セメント	
最大粗骨材寸法	20mm	
混和材	膨張材 30kg/m ³	

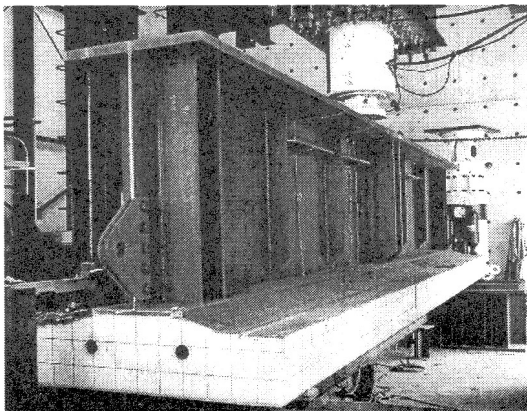


写真-3 合成桁の負曲げ荷重試験状況

5.2 試験結果および考察⁵⁾

(1) 床版と主桁の合成効果

図-11 に、試験体中央位置での荷重荷重-鉛直変位関係を示す。荷重はジャッキの能力限界まで荷重して終了させた。どちらの試験体もほぼ線形的に推移しており、特筆すべき差異は認められなかった。

図-12 は実験値と理論値を比較したものである。理論値の算出においては、床版コンクリートの全断面を有効としたもの、鉄筋のみを有効としたもの、鋼桁のみを有効としたもの、などの数種類とした。図中の縦軸と横軸は、作用曲げモーメント M と変位 δ を、鋼桁のみの断面で算出した降伏モーメント M_y 、降伏変位 δ_y でそれぞれ無次元化している。Type-1 の結果では、コンクリートにひび割れが発生するまでは全断面有効の理論値に近く、その後は鋼桁と鉄筋を考慮した理論値へと近づいている。これはひび割れの発生に伴って床版の剛性が低下したためである。Type-2 の結果も同様な挙動を示しており、床版形式の違いによるたわみの差異は認められない。

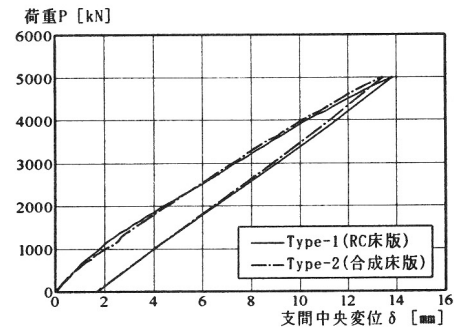
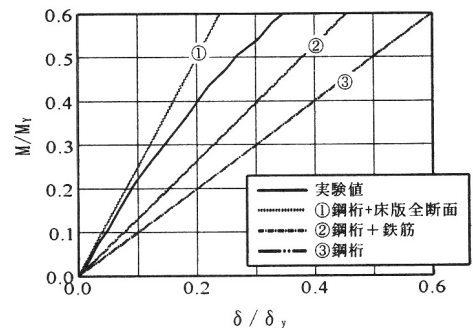
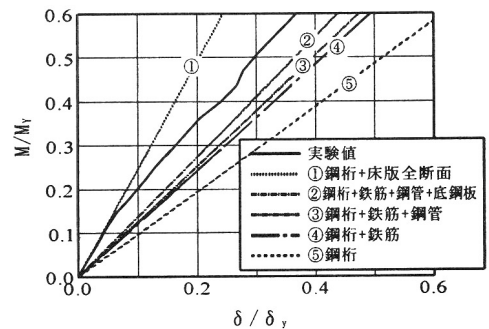


図-11 荷重荷重-鉛直変位関係 (試験体中央)



(a) Type-1



(b) Type-2

図-12 曲げモーメント-鉛直変位関係

次に、荷重増大に伴う中立軸位置の変化を考察する。各試験体のモーメント比と中立軸位置の変化の関係を、図-13に示す。中立軸は図中に示す位置で測定した鋼桁のひびき分布より算出した。Type-1の中立軸は初期ひび割れが発生する $M/M_f=0.25$ を境に全断面有効の理論値から鋼桁と鉄筋を考慮した理論値へと移行している。鉄筋の応力に着目すると、鉄筋降伏時の中立軸位置は、理論値と実測値でほぼ一致していることが確認できた。

また、Type-2の結果においても、Type-1とほぼ同様な傾向となっていることがわかる。

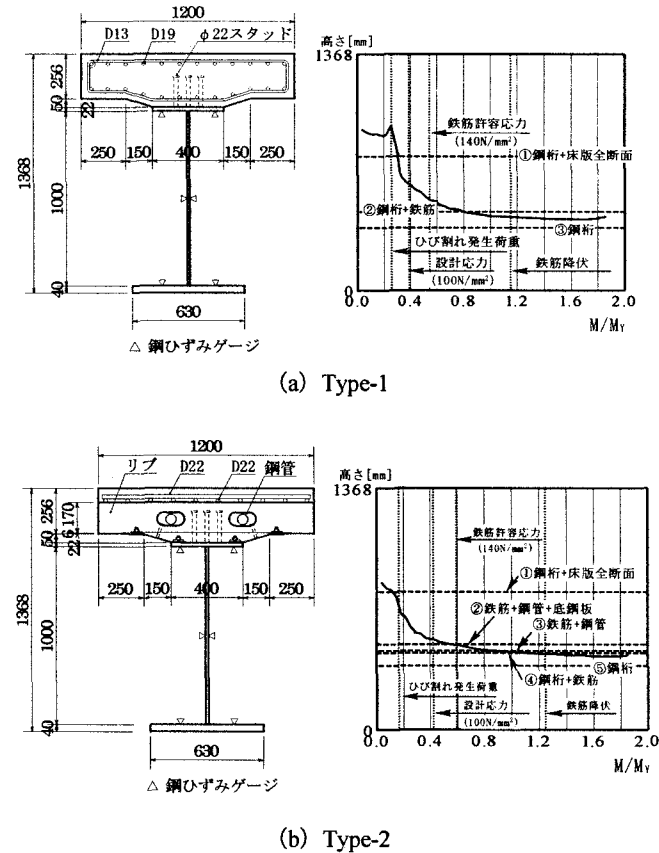


図-13 中立軸位置の変化

(2) コンクリートのひび割れ状況

床版上面のひび割れは、両試験体ともほぼ全長にわたり一定の間隔で発生した。配筋鉄筋の応力が許容応力に達する時点、および今回の試験の最終荷重時点でのひび割れ間隔を表-7に示す。ひび割れ間隔の測定は、図-10に示した2mの範囲とした。

鉄筋許容応力時で比較すると、Type-1の平均のひび割れ間隔は286mmであったが、Type-2では222mmと若干小さくなった。試験の最終荷重時点のひび割れ間隔においても同様の傾向となった。次に、参考文献5)と同じ手法により平均ひび割れ幅を算出した。この手法とは、 π ゲージを5個ずつのグループに分け、各グループの中央断面の上段鉄筋が計算上の許容応力に達する時点で各グループに発生した最大のひび割れ幅を平均するものである。その結果、Type-1とType-2の平均ひび割れ幅はそれぞれ、約0.20mm、約0.19mmとなっ

た。これらの結果から、平均ひび割れ間隔と平均ひび割れ幅のどちらにおいても、合成床版試験体の方がRC床版試験体より若干小さいことがわかった。

表-7 ひび割れ間隔

試験体	鉄筋許容応力時	最終荷重時		
	平均間隔	最大間隔	最小間隔	平均間隔
Type-1	286mm	200mm	100mm	182mm
Type-2	222mm	250mm	100mm	167mm

6. おわりに

本論文では、鋼管ジベルを用いた合成床版に対して実施した各種の静的荷重試験について報告した。これらの試験によって得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 床版支間部をモデル化した試験体により、版の正曲げ荷重試験を実施した。その結果、設計荷重に対して6倍以上の耐荷力を有していることを確認した。また、この耐荷力は、鋼とコンクリートとの相対ずれ関係から想定される曲げに対するひび割れ発生荷重に比べて3倍以上の大きさであった。
- 2) 主桁近傍の版をモデル化した試験体により、版の負曲げ荷重試験を実施した。その結果、設計荷重に対して3.5倍程度の耐荷力を有することを確認した。また、設計荷重載荷時の最大ひび割れ幅は約0.15mmであった。
- 3) 本合成床版の連続合成桁への適用を検討するため、中間支点近傍の主桁と床版をモデル化した試験体により、合成桁の負曲げ荷重試験を実施した。同様に行ったRC床版モデルの試験結果との比較により、両者の荷重-変位関係および中立軸位置変化の傾向に大きな相違はないことを確認した。また、ひび割れ性状の比較から、本合成床版の方がRC床版よりもひび割れの分散がよいことがわかった。

参考文献

- 1) 例えば、佐藤政勝、関口幹夫、辻本和敬：鋼・コンクリート合成床版およびプレキャスト床版の開発と最近の動向、第2回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.43-48、2000.10
- 2) 田中正明、石川敏之、大久保宣人、内田裕也、橘肇、大山理：鋼管を用いたずれ止めの押し抜き試験、第57回土木学会年次学術講演会講演概要集I-361、2002.9
- 3) 大久保宣人、石川敏之、田中正明、大山理、辻野竜介、木津良太：鋼板リブを用いたずれ止めの押し抜き試験、第57回土木学会年次学術講演会講演概要集I-360、2002.9
- 4) 石川敏之、石原靖弘、田中正明、細見雅生、大久保宣人、中村隆志：鋼管ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の曲げ荷重試験、第57回土木学会年次学術講演会講演概要集CS4-052、2002.9
- 5) 八部順一：我が国における合成床版の開発・適用状況について、第4回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、pp.35-44、2001.8