

開 発

鋼・コンクリート合成床版

「パイプスラブ」の開発（第2報）

中本 啓介* 橋 肇**

近年、橋梁の合理化・省力化にともない、床版の長支間化・高耐久性・施工の合理化を目的とした鋼・コンクリート合成床版が実橋梁に適用されている。当社においても、鋼板リブと構造用鋼管をジベルとした合成床版「パイプスラブ」を3社共同で開発している。前報では、本合成床版の構造概要および、性能確認試験の中より、ずれ止めの押し抜き試験と版の正曲げ載荷試験の結果について報告した。第2報となる本報では、継続して行った版の負曲げ載荷試験、合成桁の負曲げ試験および輪荷重走行試験などの基本性能確認試験と鋼管を利用したロードヒーティング効果検討のための試験結果を報告する。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版，鋼管，鋼板リブ，孔あき鋼板ジベル

まえがき

近年、橋梁の合理化・省力化にともない、床版の長支間化・高耐久性・施工の合理化を目的とした鋼・コンクリート合成床版が開発・実用化され適用実績も増えてきている。現在、当社においても鋼板リブと構造用鋼管を有する鋼・コンクリート合成床版の開発¹⁾を片山ストラテック株式会社、株式会社栗本鐵工所と共同で行っている。

本合成床版は図-1に示すように、長孔を設けた鋼板リブと構造用鋼管を格子状に配置した部材を、鋼パネルとコンクリートのずれ止め構造として採

用している。鋼管はリブに設けた長孔を貫通させた構造とし、底鋼板を構造部材として考慮しているため下鉄筋を省略し施工時の合理化を図っている。構造概要、特徴そして基本的な性能を確認するために実施したずれ止めの押し抜き試験と版の正曲げ載荷試験については第1報¹⁾で報告している。本報告では、パイプスラブの実用化に向けて行っている各種の性能確認試験の中から第2報として版の負曲げ載荷試験²⁾、合成桁の負曲げ試験²⁾、輪荷重走行試験³⁾、ならびに、床版内部の鋼管を利用したロードヒーティング⁴⁾の効果検討のための試験などの結果を示す。

1. 合成床版に要求される強度と耐久性

合成床版に要求される性能、施工、品質保証を統一して標準化を図る目的で、日本橋梁建設協会では「橋建協標準合成床版」⁵⁾に必要な条件を示している。その条件の強度と耐久性に関しては、解析により静的挙動が確認でき実験との整合がとれること、疲労強度が評価でき移動輪荷重による耐久性がPC床版と同等以上であること、連続桁の負曲げおよび床版張り出し部の負曲げに

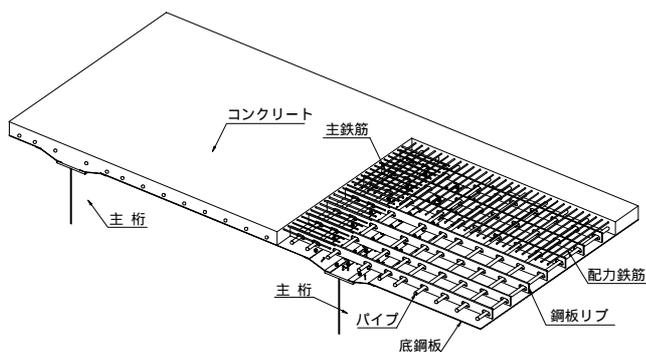


図-1 パイプスラブの概要

* 技術研究室係長 ** 橋梁部東京設計課係長

対して RC 床版と同等のひび割れ制御ができること、が項目として挙げられている。パイプスラブでは次節以降に示す性能確認試験により合成床版の強度と耐久性を確認している。

2. 版の負曲げ載荷試験

(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と、ひび割れ性状を確認するため、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試験

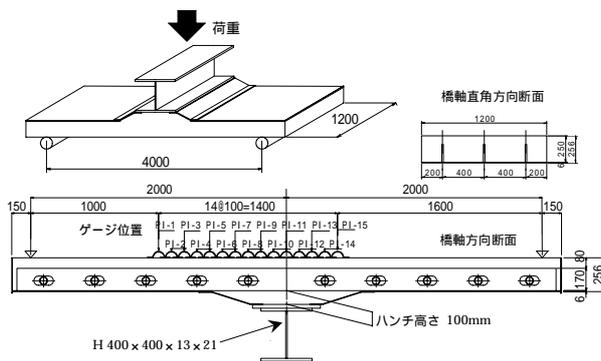


図-2 版の負曲げ試験体形状

表-1 版の負曲げ試験体鋼パネルの材料

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

表-2 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	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	$\sigma_{15}=29.3\text{N/mm}^2$
スランプ	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	

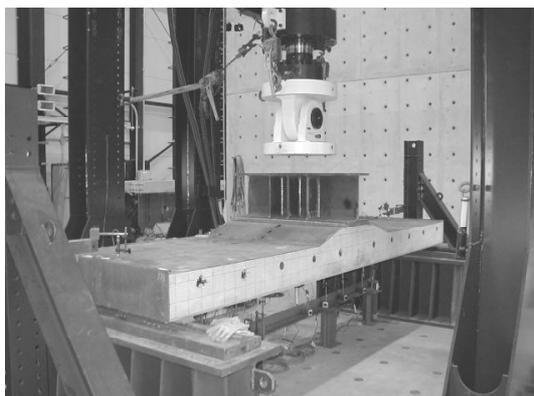


写真-1 版の負曲げ載荷試験状況

を実施した。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、負の曲げモーメントを載荷する静的載荷試験とした。試験体の形状、概要を図-2 に、鋼パネルの材料を表-1 に、そして、コンクリートの仕様を表-2 に示す。

試験体は床版支間 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-2 に示す位置に合計 15 個の ゲージを取り付け、ひび割れ幅の計測を行った。また、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-1 に、載荷試験の状況を示す。

(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-3 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。図中における設計荷重（150kN）は、設計時の曲げモーメントを与える載荷荷重である。

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。

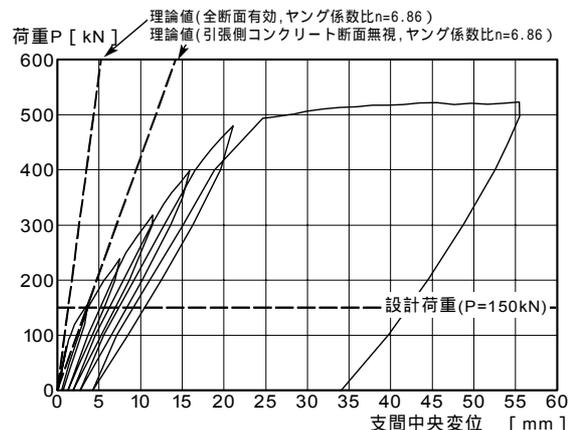


図-3 試験体中央の荷重 - 変位関係

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。

3. 合成桁の負曲げ試験

(1) 試験概要

パイプスラブ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。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した。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、ひび割れ特性の比較を行った。

試験体は表-3 に示す 2 体とした。RC 床版の試験体を Type-1、合成床版の試験体を Type-2 とした。合成床版試験体である Type-2 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。比較用の RC 床版試験体である Type-1 の床版厚は、合成床版の版厚に合わせた。なお、ハンチ高さはどちらも 50mm とした。表-4 には、試験体のコンクリートの仕様を示す。

載荷試験の概要は、図-4 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、支間中央に静的載荷試験機を用いて載荷すること

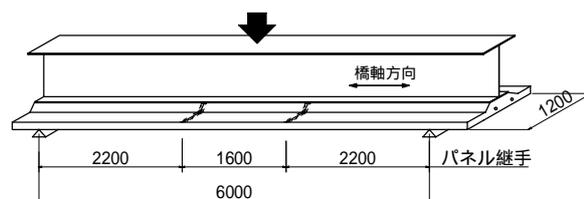


図-4 合成桁の負曲げ試験概要

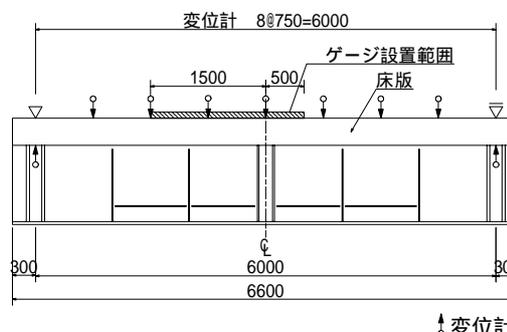


図-5 変位およびひび割れ幅の測定位置

により負の曲げモーメントを与えた。

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、試験機の能力の限界荷重時(約 5000kN)に、支間中央部の鋼桁断面が降伏するように設定した。

荷重は漸増載荷とし、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-5 に示す側面図の位置で変位計、および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。

(2) 試験結果および考察

1) 床版と主桁の合成効果

図-6 に、試験体中央位置での載荷荷重 - 鉛直変位関係を示す。載荷は試験機の能力限界まで載荷

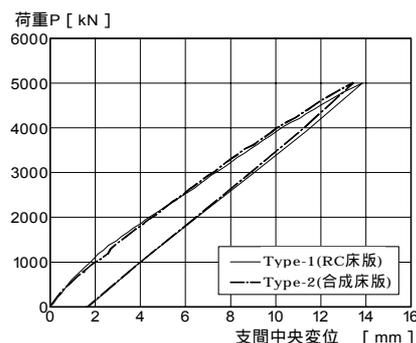


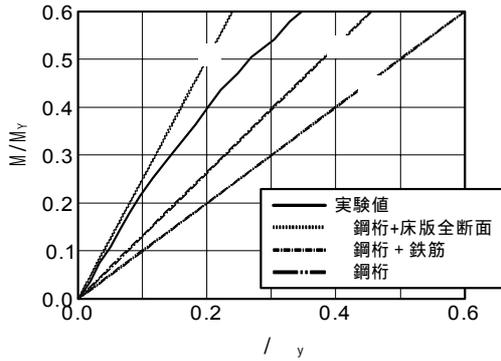
図-6 載荷荷重 - 鉛直変位関係 (試験体中央)

表-3 合成桁の負曲げ試験体の種類

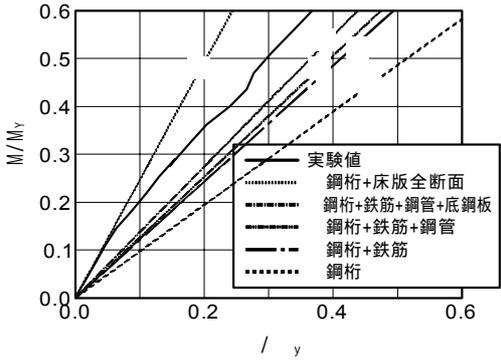
名称	形式	鉄筋配置		備考
Type-1	RC床版	主鉄筋 配力鉄筋	D13 100mmピッチ D19 100mmピッチ (鉄筋比1.9%)	-
Type-2	合成床版	主鉄筋 配力鉄筋	D22 125mmピッチ D22 125mmピッチ (鉄筋比1.3%)	鋼パネル材料は表-1と同じ

表-4 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	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	$\sigma_{15}=29.3\text{N/mm}^2$
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	



(a) Type-1

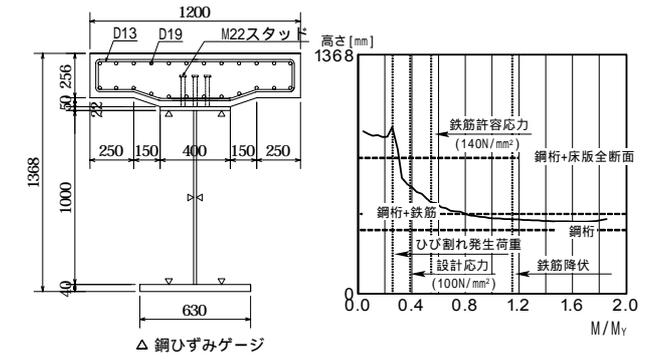


(b) Type-2

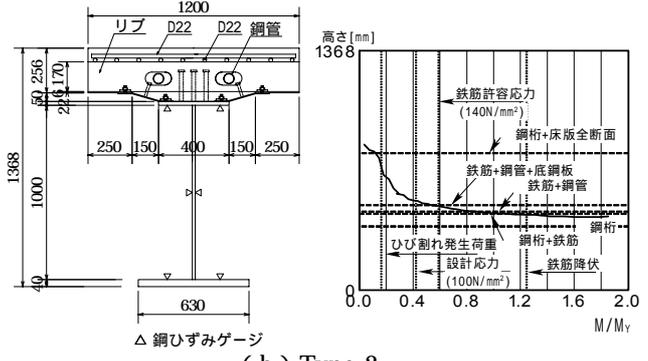
図-7 曲げモーメント - 鉛直変位関係

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、大きな差異は認められなかった。図-7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_y 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。

次に、载荷荷重の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-8に示す。中立軸は図中に示す位置で測定した鋼桁のひずみ分布より算出した。Type-1の中立軸は初期ひび割れが発生する $M/M_y=0.25$ を境に全断面有効の理論値から鋼桁+鉄筋断面の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



(a) Type-1



(b) Type-2

図-8 中立軸位置の変化

表-5 ひび割れ間隔

試験体	鉄筋許容応力度時		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

論値と実測値でほぼ一致していることが確認できる。Type-1とType-2の結果を比較すると、初期段階におけるコンクリートのひび割れ発生位置に差があるため全断面有効の理論値から鋼桁+鉄筋断面の理論値への変化傾向に若干違いがある。しかし、両者とも鉄筋降伏時の中立軸は理論値と実測値でほぼ一致していることがわかる。

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。まず、ひび割れ間隔の比較を行う。配力鉄筋の応力が許容応力度に達する時点、および今回の試験の最終荷重点でのひび割れ間隔を表-5に示す。ひび割れ間隔の測定は、図-5に示すゲージ設置範囲の2mとした。鉄筋許容応力時と比較すると、Type-1の平均のひび割れ間隔は286mmであるが、Type-2では222mmと若干小さくなる。試験の最終荷重点のひび割れ間隔においても同様の傾向である。

次に、ひび割れ幅について比較を行う。ゲ-

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して平均ひび割れ幅を求めた。平均ひび割れ幅を求めるこの方法は、(参考文献6)と同じ手法である。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。

4. 輪荷重走行試験による耐久性確認(その1, 大阪大学実施編)

(1) 試験概要

疲労耐久性の評価方法として移動荷重に対する走行試験が、実際の床版の疲労損傷現象、挙動を再現できる試験法として用いられている。パイプスラブについても疲労耐久性を確認するために、輪荷重走行試験を実施した。試験体の形状、寸法を図-9に示す。試験体は、荷重条件をB活荷重とする床版支間3.0mの連続版として設計した。使

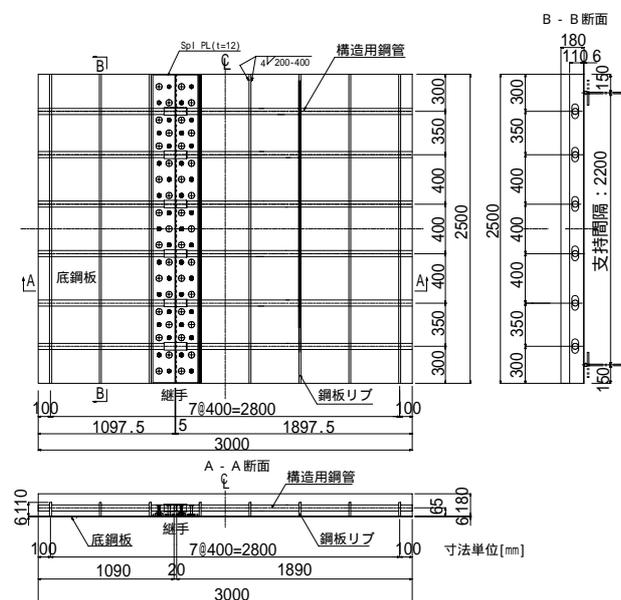


図-9 輪荷重走行試験体

表-6 輪荷重走行試験体の使用材料

	設計値	実測値
コンクリート圧縮強度	30.0N/mm ²	41.2N/mm ²
コンクリート静弾性係数	2.8×10 ⁴ N/mm ²	3.3×10 ⁴ N/mm ²
鋼板リブ	SM400, 断面110mm×12mm 配置間隔400mm	
構造用鋼管	STK400, φ48.6mm×2.3mm 配置間隔400mm	

用したコンクリートおよび鋼材の種類を表-6に示す。試験は大阪大学所有の輪荷重走行試験機を用いて行った。

試験体の支持条件は、橋軸方向の2辺を単純支持し、残る2辺を横桁により弾性支持することで、連続版として設計した試験体と等価な曲げモーメントが作用するようにした。輪荷重は、試験体上に並べた300mm×120mmの鋼ブロック上を±1.0mの範囲で移動する。載荷荷重は、最初177kNで30万回走行した後、206kNで30万回、さらに235kNで40万回の合計100万回(50万往復)を載荷した。

2) 試験結果

走行回数と試験体の静的載荷による支間中央の鉛直たわみ関係を図-10に示す。図-10よりたわみは、走行回数100万回に至るまで、疲労劣化による増加は見られず、最大弾性たわみは0.8mmであった。さらに、載荷荷重を98kNとして換算した弾性たわみは、0.3mm程度で推移しており、疲労に対する損傷度が小さいことがわかる。

次に、各載荷段階毎の配力筋方向におけるたわみ分布の変化状況を図-11に示す。なお、載荷回数毎のたわみ値は、全ての載荷荷重を177kNに線形換算したものである。同図には、コンクリー

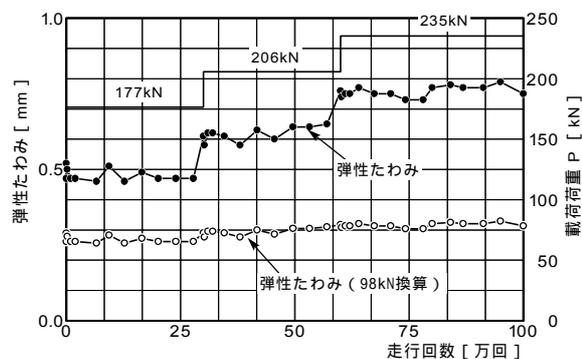


図-10 試験体中央での弾性たわみと走行回数

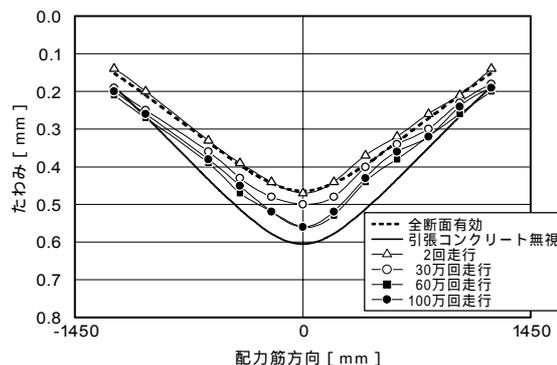


図-11 載荷段階毎のたわみ分布(177kN換算)

ト断面を全断面有効としたケースおよび引張コンクリートを無視したケースの FEM 解析結果も併記した。図-11 より、荷重初期段階においてはコンクリート全断面を有効とした場合の解析結果と一致している。その後、荷重回数の増大に伴い、徐々にたわみが増加し、引張側コンクリートを無視した解析結果に近づいていく。この場合、荷重荷重 235 kN、走行回数 100 万回において、測定値は解析値の 90%程度であった。さらに、底鋼板パネル継手部の静的荷重時における開閉量は、0.02mm(177kN) 0.026mm(206kN) 0.03mm(235kN) 程度であり、輪荷重走行試験に伴う継手部の疲労劣化は生じてないと判断している。最後に、実験終了後に試験体の切断を行ったが、有害な内部ひび割れは発生していなかった。

5. その他の性能確認試験

(1) 輪荷重走行試験による耐久性確認
(その2, 土木研究所実施編)

パイプスラブでは、さらなる耐久性の確認、また平成8年版の道示に基づいた RC 床版⁷⁾⁸⁾など

の既存床版との試験データ比較を目的として、最大荷重 392 kN、走行回数を 52 万回とする階段状荷重漸増荷重(以下、階段荷重)による輪荷重走行試験を実施している。試験は、新規開発床版の耐久性確認では数多くの試験実績を有する独立行政法人土木研究所の輪荷重走行試験機を用いた。写真-2 には試験状況を示す。試験の結果、所定の階段荷重を完了し、パイプスラブは破壊に至らず高い耐久性を有していることを確認した。試験結果の一例として走行回数と試験体の支間中央の鉛直たわみ関係を図-12 に示す。この図は、静的荷重時における総たわみ量と除荷時のたわみ量の推移を示している。走行終了する 52 万回まで、荷重増大によるたわみ量の増加傾向は確認できるが、急激なたわみの増加はなく高い疲労耐久性を有していることがわかる。なお、詳細な内容は、別の機会に報告する。

(2) ロードヒーティング試験

パイプスラブでは、鋼管を橋軸方向全長にわたって設置するため、鋼管内部を利用したロードヒーティングの利用が考えられる。そこで、基礎的



写真-2 輪荷重走行試験状況 (土木研究所)

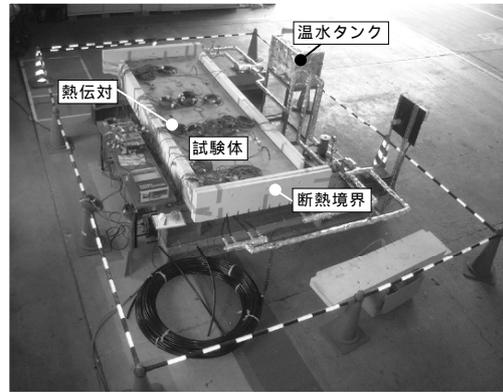


写真-3 ロードヒーティング試験状況 (温水利用)

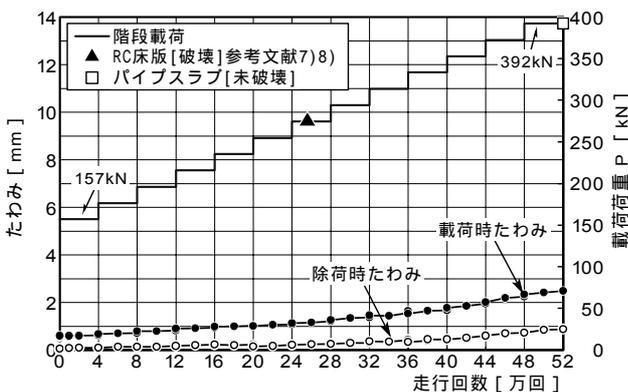


図-12 試験体中央のたわみと走行回数

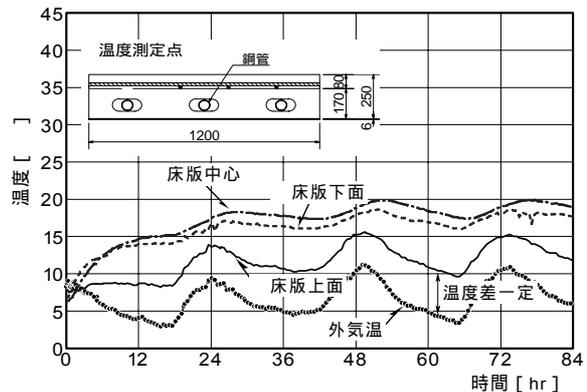


図-13 ロードヒーティング試験結果 (温水利用)

検討として試験体による確認試験⁴⁾を実施した。ヒーティングの熱源は、鋼管内部に電熱線を配置する形式と耐熱性および耐食性のあるポリエチレン管を鋼管内に通し、温水を循環させる形式の2種類としている。温水循環形式の試験状況、結果の一例を写真-3、図-13にそれぞれ示す。なお、試験は株式会社栗本鐵工所の大阪臨海工場内で実施した。図-13に示す結果は、循環させる温水の温度を50とした場合を示す。コンクリート床版全体が暖められる時間は、半日程度であり、温水循環中は外気温に対してコンクリート表面は5の温度差を保ちヒーティングの効果があることがわかった。

ヒーティング効果については、さらに厳しい条件下での基礎データを収集し実用化に向けた検討が必要と考えている。

6. まとめ

現在開発中の合成床版「パイプスラブ」に対して実施した性能確認試験について示した。これらの試験により得られた知見をまとめる。

- 1) 桁近傍の版をモデル化した試験体により、版の負曲げ試験を実施した。その結果、設計荷重の3.5倍程度の耐荷力を有していることがわかった。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。
- 2) パイプスラブの連続合成桁への適用を検討するために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載荷試験を実施した。同時に行ったRC床版モデルとの比較により、両者の荷重-変位関係および中立軸位置変化の傾向には差がなく、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。
- 3) 大阪大学での輪荷重走行試験の結果、パイプスラブは最大載荷荷重235kNとする走行回数100万回に至るまで急激な挙動の変化を生じることなく十分な疲労耐久性があることがわかった。このことは、載荷条件などを変えて実施した土木研究所での試験でも確認することができた。
- 4) パイプスラブ内部の鋼管を利用したロードヒーティングの結果、ヒーティングの効果を確認

することができた。今後は、さらに厳しい条件下での試験が必要になると考える。

あとがき

前報と併せて、パイプスラブの基本的な性能を確認するために実施した性能試験結果について示した。各種の試験よりパイプスラブは、合成床版の強度と耐久性に関する必要条件を満足していることが分かった。今後は、施工実績による詳細構造の事例を蓄積していく予定である。紙面の都合で紹介しきれなかった内容、たとえば床版打設時の型枠剛性確認試験⁹⁾、パネル間接合部の新型継手¹⁰⁾に関する確認試験内容などについては、順次報告する予定でいる。

謝辞

パイプスラブの輪荷重走行試験を行うにあたり、大阪大学の松井繁之教授には多大なる御指導頂きました。また、試験実施時には大学関係者の皆様に御協力を頂きました。独立行政法人土木研究所での試験設備利用に際しては土木研究所の関係者の皆様に御協力を頂きました。本稿の執筆にあたり共同開発会社の関係者各位には便宜を図って頂きました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) 中本啓介・辻野竜介・橘肇・篠田隆広・細見雅生：鋼・コンクリート合成床版「パイプスラブ」の開発，駒井技報，Vol.22，pp.78-83，2003.3.
- 2) 大久保宣人・中本啓介・田中正明・松井繁之：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，第3回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.97-102，2003.6.
- 3) 大山理・田中裕紀・中本啓介・大久保宣人・西脇美智子・橘肇・松井繁之：鋼管を用いた鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，CS6-012，2003.9.
- 4) 橘肇・中村隆志・大山理・中本啓介・田中裕紀・大久保宣人：鋼・コンクリート合成床版

- のロードヒーティングに関する基礎的研究，
土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，
CS6-028，2003.9.
- 5) 日本橋梁建設協会：橋建協標準合成床版，
2003.11.
- 6) 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.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（共
通編，鋼橋編），pp.233-236，2002.3.
- 8) 国土交通省土木研究所他：道路橋床版の輪荷
重走行試験における疲労耐久性評価手法の開
発に関する共同研究報告書（その 5）- 評価
編 - ，2001.3.
- 9) 田中正明・中本啓介・大久保宣人・中村隆志・
橘肇・大山理：鋼管を用いた鋼・コンクリー
ト合成床版の型枠剛性試験，土木学会第 58 回
年次学術講演会講演概要集，CS6-033，2003.9.
- 10) 中本啓介・大久保宣人・田中正明・橘肇・大
山理・内田裕也：鋼・コンクリート合成床版
の新形式継手構造に関する基礎的研究，土木
学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，I-148，
2003.9.