

(14) 帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の研究開発と適用について

Development and application of composite slab using Perfobond Strip

高田和彦*, 永田淳**, 清田鍊次**

Kazuhiko Takata, Jun Nagata, Renji Kiyota

*Ph. D, (株)横河ブリッジ, 技術本部研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

** (株)横河ブリッジ, 技術本部研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

A composite slab using a perfobond strip was developed. A perfobond strip has large durability against shear force, which was confirmed through pull-out experiments. A loading test was carried out on a composite slab using the strip as a shear connector and the slab showed proper performance. Also a loading test using wheel tracking machine was conducted, which proved that the composite slab has large fatigue strength and durability. After the various examinations the composite slab was applied to an open type box girder bridge. The steel panel of the slab could be used as stiffening members of the bridge during the erection and the application made a large contribution to rational and economical bridge construction.

Key Words: Perfobond strip, Composite slab, Pull-out test, Wheel tracking machine

キーワード: 帯鋼ジベル, 合成床版, 引抜き実験, 輪荷重載荷試験機

1. はじめに

従来、鋼橋の床版構造には、鉄筋コンクリート床版、プレキャスト床版、鋼床版などが用いられており、その耐久性の向上および省力化をめざし多くの研究がなされている。また、コンクリート床版の現場施工の省力化や品質向上を目的とした工場製作のプレキャスト床版も用いられるようになってきた。さらに近年、鋼橋価格を低減できる構造として少数主桁鉸桁が脚光を浴び、少数主桁構造に使用できる長支間対応の床版の開発が盛んとなっている。

筆者らも、上記のような床版工事の課題に対して、施工性・経済性の向上および床版の長支間化を目的として帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の研究開発を行ってきた¹⁾²⁾。ここでは、開発した床版の構造検討と性能確認のために行った一連の実験および実橋に適用した工事について報告する。

2. 基本構造

本床版の基本構造は図-1に示すとおり、底鋼板、縦リブ、配力筋の3種の鋼部材とコンクリートで構成される。床版施工のコンクリート打設時には底板を型枠代わりに利用して、現場での型枠・支保工の設置作業をなくし、コンクリート硬化後は、鋼部材とコンクリートが合成して大きな剛性を有する床版となる。鋼部の基本部材である、底鋼板、縦リブ、配力筋の3種の機能を以下に述べる。

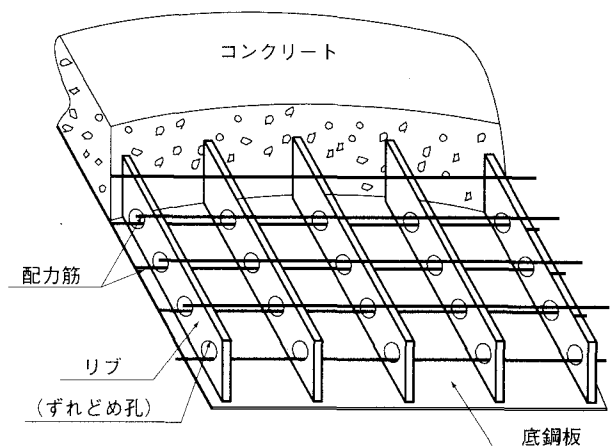


図-1 基本構造図

(1) 底鋼板

型枠および引張り側部材として機能する。床版敷設時には前死荷重(鋼自重とコンクリート死荷重)に対して抵抗する。供用時にはさらに後死荷重(舗装等)と活荷重に対して、コンクリートとの合成部材として抵抗する。鋼板厚は腐食を考慮して、最低6mmとする。

(2) 縦リブ(帯鋼ジベル)

架設・供用時の荷重に対して底鋼板と共に抵抗する。側面に70φ程度の孔が明いており、その中に配力鉄筋が配置されている。この孔は、コンクリートとのずれ止めとしても機能しており、合成効果を高めている。板厚12mmの縦リブを30cm間隔に配置することを標準とする。

(3) 配力鉄筋

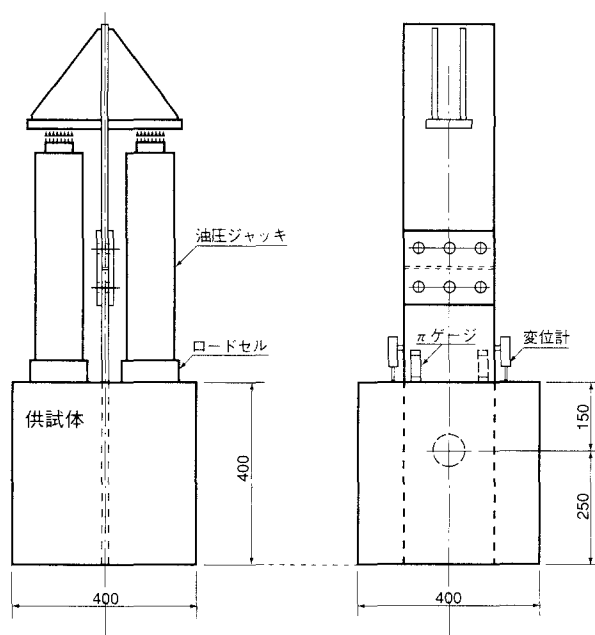
縦リブの孔内と、縦リブの上面に配置し、リブの直角方向の補剛とひび割れ防止として機能する。

3. ずれ止め構造のせん断耐力に関する検討

3.1 実験概要

本床版の特徴に、ずれ止めとして帯鋼ジベル（孔空き鋼板）を用いることがある。床版の開発を進めるにあたり、ずれ止めの基本的な性能を把握するため、図－2に示すようにコンクリートブロックに埋め込まれた孔空き鋼板を引き抜く実験を行なった。実験供試体は表－1に示す8種類とし、パラメータは孔の直径と鋼板の板厚とした。鋼板にはグリスを塗布し、コンクリートとの付着の影響が減少するように配慮した。

実験装置は、供試体の鋼板を2台の油圧ジャッキで引き抜く自旋式とした。計測には、荷重の大きさにロードセル、鋼板とコンクリートの相対ずれ量に π ゲージおよび変位計を用いた。



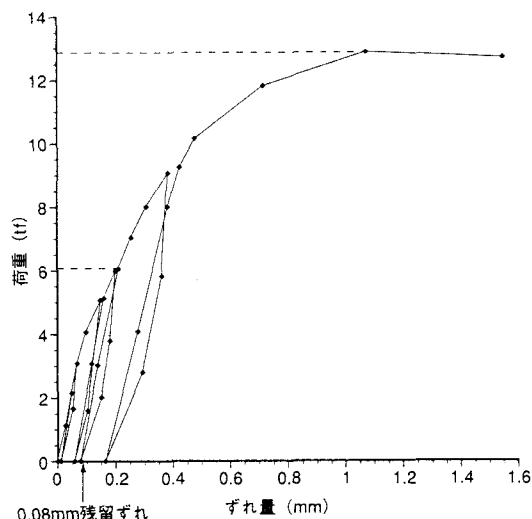
図－2 供試体および試験装置

表－1 実験供試体一覧

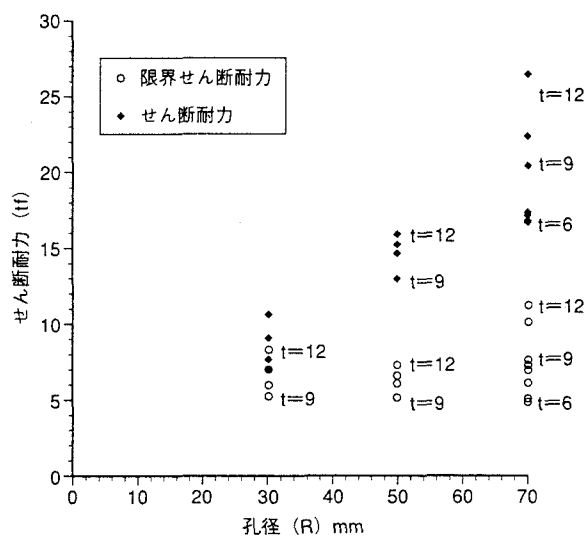
孔径 (mm)	リブ板厚 (mm)	供試体数	供試体記号 A(孔径)-(板厚)
70	12	2	A70-12
70	9	2	A70-9
70	6	2	A70-6
50	12	2	A50-12
50	9	3	A50-9
30	12	3	A30-12
30	9	3	A30-9
無し	12	2	孔無し

3.2 実験結果

実験結果の例として、図－3に供試体 A50-12 の荷重-変位曲線を示す。鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン⁴⁾ではスタッドジベルのせん断実験に関して、鋼板とコンクリートの間の残留ずれ量が 0.08mm となる荷重値を限界せん断耐力とし、最大荷重値をせん断耐力と定めている。残留ずれ量を 0.08mm とした場合の供試体 A50-12 の限界せん断耐力は 6.05tf となる。また、供試体 A50-12 のせん断耐力は 12.75tf である。図－4にずれ止め孔の直径とせん断耐力の関係を示す。図の横軸は孔の直径を、縦軸はせん断耐力を示す。同図より、限界せん断耐力、せん断耐力ともに孔径、板厚が大きくなるにしたがって増加を示しているが、特に、せん断耐力に及ぼす影響が顕著である。また、ずれ止め孔の直径が 30mm と小さな場合においても、5tf 以上という大きな限界せん断耐力を有している。提案の合成床版の設計において、ずれ止め1個あたりに作用するせん断力は 2tf 程度と計算できるので、帯鋼ジベルを本構造に適用することが可能と分かる。



図－3 モデルA50-12の荷重-変位曲線



図－4 孔径とせん断耐荷力の関係

4. 合成床版の曲げ性能に関する検討

前章の実験により、帯鋼ジベルが大きなずれ止め作用を有することが分かったが、これはずれ止め単体での性能であり、実際の構造物に適用した場合には、その構造の中で必要な機能を発揮できるかを新たに確認する必要がある。帯鋼ジベルを合成床版に適用した梁モデルに曲げモーメントを作用させ、床版としての性能を有しているかを確認する実験を行なった。

4.1 実験概要

(1) 供試体

曲げモーメントに対する床版の断面性能を確認する目的で、梁モデルの供試体による静的曲げ実験を行った。各シリーズの供試体形状を図-5に、供試体の緒元を表-2に示す。

① 供試体 B シリーズ

着目した検証事項は、ずれ止め（リブ孔）による合成効果および配力筋の配置である。供試体の鋼板にはグリスを塗布し、コンクリートとの付着を減少させている。供試体 B1 はリブに孔を明けずに重ね梁としたもの、供試体 B2 はリブの孔内に鉄筋（配力筋）を通さないもの、供試体 B3 はリブ上面および孔部に配力筋を配した標準タイプであり、供試体 B4 は供試体 B3 の上側配力筋とリブとを溶接した構造である。

② 供試体 C シリーズ

供試体 C シリーズでは、標準タイプにさらにずれ止め要素を増やした場合の合成効果を検証した。標準タイプの供試体 C2 に対し、供試体 C3、C4 はずれ止め孔のピッチを半分とした。供試体 C1、C4 は底鋼板にスタッドを併用し、合成効果をさらに付加している。鋼板表面は黒皮状態とし、グリスは塗布していない。

表-2 曲げ実験供試体一覧

B シリーズ

供試体 (個数)	幅×支間長 (mm)	コンクリート厚 (底鋼板厚) (mm)	設計 荷重 (tf)	ずれ止め 孔の間隔 (mm)	上配力筋と リブの溶接
B1(2)	600×280	260(6)	9	200	しない
B2(2)	600×280	260(6)	9	200	しない
B3(2)	600×280	260(6)	9	200	しない
B4(2)	600×280	260(6)	9	200	する

C シリーズ

供試体 (個数)	幅×支間長 (mm)	コンクリート厚 (底鋼板厚) (mm)	設計 荷重 (tf)	ずれ止め 孔の間隔 (mm)	上配力筋と リブの溶接
C1(1)	900×270	250(6)	14	250	しない
C2(1)	900×270	250(6)	14	250	しない
C3(1)	900×270	250(6)	14	125	しない
C4(1)	900×270	250(6)	14	125	しない

(2) 実験方法

実験は写真-1に示すように、2辺単純支持とし、支間中央にジャッキを用いて、供試体の全幅に渡り載荷した。

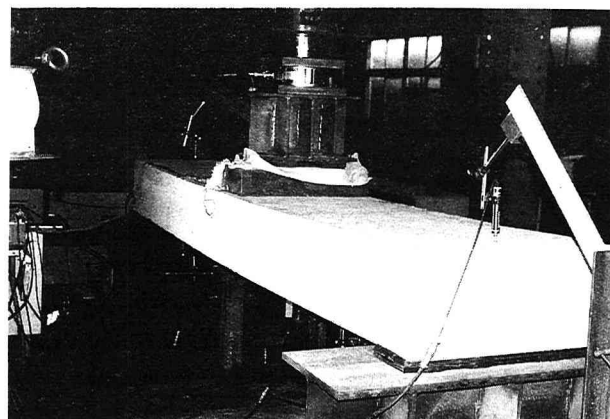


写真-1 荷重状況

4.2 実験結果

供試体支間中央の荷重-たわみ曲線を図-6に示す。図中における直線は、鋼部材とコンクリートの弾性係数比 $n=10, 15$ について、両者が合成していると仮定し、引張り側コンクリートを無視したときの計算値である。

① 配力筋の影響

B シリーズは、配力筋の設置状況による相違を検証した実験である。上下に配力筋を配置した標準供試体 (B3) は、設計荷重の2倍程度まで合成断面として機能し、耐力力は設計荷重の5倍の50tfであり、破壊形態は床版上部コンクリートの圧壊であった。下配力筋のない供試体 (B2) は、上下配力筋を有する供試体 (B3、B4) に比べると、設計荷重までの剛性は変わらないが、その後の剛性はやや小さく、耐力も40tfと下回る。下配力筋は、リブ両側のコンクリートブロックの一体化作用を補強し、リブ孔部コンクリートの変形が大きくなった時にずれ止め

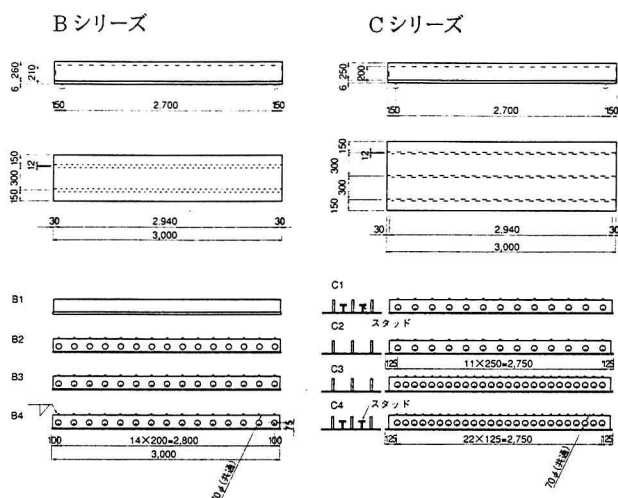


図-5 曲げ実験供試体の構造

機能を発揮するものと推定される。供試体 B4 は上配力筋とリブを溶接しているが、それによる特別の効果はみられない。また、リブ孔および配力筋のない供試体 B1 は、付着力等により設計荷重まで合成作用を示すが、さらに荷重を増すと剛性の低下が著しく、せん断クラックが発生して破壊した。耐荷力は標準供試体の 1/2 にすぎない。

② ずれ止め孔の間隔とずれ止め補強の影響

C シリーズは、ずれ止め孔の間隔とずれ止め補強の影響を検証した実験である。供試体 C 1 と C 4、供試体 C 2 と C 3 は、ずれ止め補強のスタッドがある場合とない場合について、ずれ止め孔の間隔の効果を比較できる。ずれ止め孔間隔は 250mm、125mm であるが、両者の剛性および耐荷力に有意な差は認められない。供試体 C 1 と C 2、供試体 C 3 と C 4 は、ずれ止め孔の間隔が大きい場合と小さい場合について、ずれ止め補強のスタッドによる影響を比較できる。それぞれ若干の差はあるが、いずれも供試体の個体差によるものと推測され、剛性および耐荷力に有意な差はみられない。

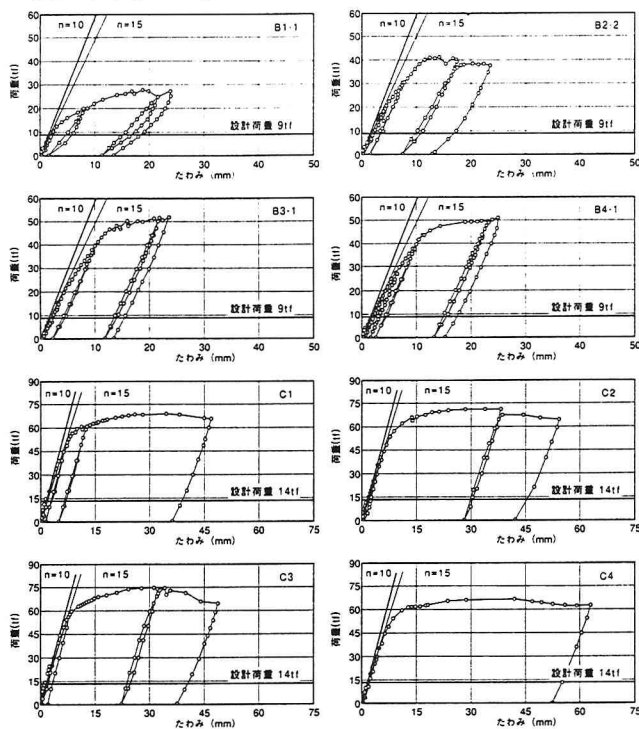


図-6 曲げ-たわみ曲線

実験結果より以下の事項が確認される。

- ・正曲げモーメントに対しては、設計荷重の 2 倍程度まで合成断面として機能し、設計荷重の 5 倍の耐荷力が確認された。破壊モードはコンクリート上面の圧壊で、かつ大きな変形性能を有している。
- ・実構造においてコンクリートの付着力が少ない場合を想定しても、リブ孔のずれ止めによって十分大きな剛性および耐荷力を有する床版となる。
- ・底鋼板の付着強度は必要なく、リブ孔間隔 250mm は、ずれ止めとしての十分な機能を有している。
- ・ずれ止め孔の配力筋は、剛性および耐荷力を向上させる。
- ・上側配力筋のリブへの固定の効果は認められない。

5. 移動輪荷重試験機による疲労性能に関する検討

道路橋床版における疲労耐久性の検証には、近年、移動輪荷重載荷試験を実施する例が増えている。移動輪荷重載荷試験は、松井らが実橋の RC 床版にみられる亀甲状のひび割れの破壊形態を再現することができる載荷試験方法として提案したもので、車両荷重を直接受ける橋梁部材の疲労耐久性の評価に用いられる試験方法である。開発の合成床版に対して、移動輪荷重載荷試験を行なった。また、比較のために同支間に対応する RC 床版での試験も行なった。

5.1 移動輪荷重の概要

本試験には横河ブリッジ所有の移動輪荷重載荷試験機（写真-2）を使用した。同試験機は、回転アームとシャフトからなるクランクによって、モーターの回転力を台車の前後動に変換する。荷重は、鋼板製の重りにより 5.5tf ~ 20tf の範囲で調整し、鋼製車輪の車輪を介して供試体に伝えられる。荷重の移動範囲は 2 m である。

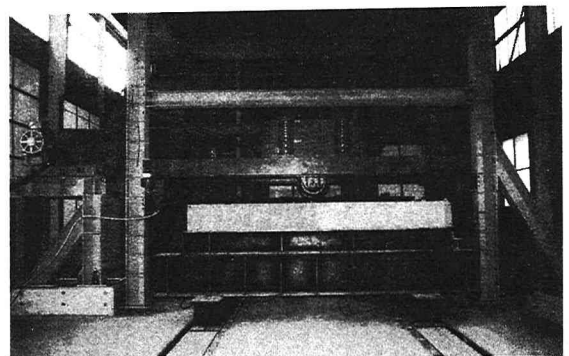


写真-2 移動輪荷重載荷試験機

5.2 実験概要

輪荷重載荷試験は、合成床版、RC 床版の 2 種類に対して行い、疲労性状の違いを調べた。それぞれの供試体を図-7、8 に示す。

試験体は共に幅 2.51m（床版支間 2.0m）、橋軸方向長さ 3.9m とし（縦横比 1.95）、版としての挙動を得られるように配慮した。合成床版のコンクリート厚は、鋼・コンクリート合成床版設計指針⁵⁾に定める式

$$h=2.5L+10$$

h : コンクリート厚さ(cm), L : 床版支間長(m)

より決定し、15cm ($2.5 \times 2.0\text{m} + 10 = 15\text{cm}$) とした。底鋼板厚は 0.6cm とした。RC 床版の床版厚は、道路橋示方書の最小版厚の式

$$h=4L+11$$

h : 床版厚さ(cm), L : 床版支間長(m),

重交通による割増し無し

より、19cm ($4 \times 2.0\text{m} + 11 = 19\text{cm}$) とした。

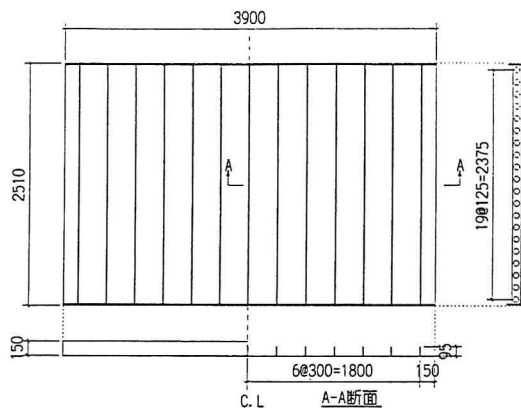


図-7 輪荷重載荷試験に用いた合成床版供試体

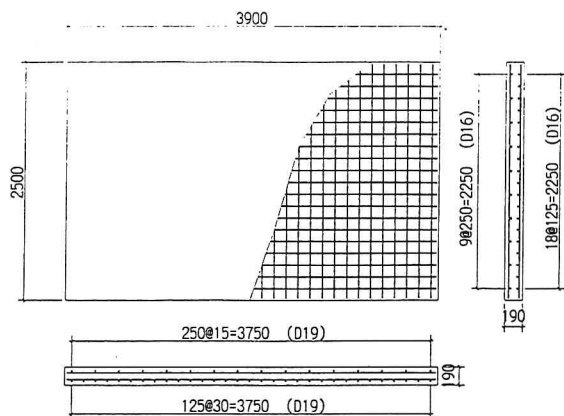


図-8 輪荷重載荷試験に用いたRC床版供試体

5.3 実験結果

合成床版、RC床版の供試体を用いて移動輪荷重試験を行なった。合成床版は、20tfで330万回の繰返し載荷後（試験期間3ヶ月）、工程の都合により試験を打ち切った。RC床版については20tfで70万回の繰返し載荷で、供試体の動的な変動が大きく危険となったので終了した。

図-9に合成床版の繰返し載荷回数0回、300万回後の静的載荷による荷重-変位の関係を示す。図中の破線は、引張り側のコンクリートを無視したモデルでFEM解析にて求めた荷重-変位曲線である。図中の荷重-変位曲線の傾きに0回と300万回後で大きな変化がないことから、本試験体の版としての曲げ剛性は300万回の移動輪荷重載荷に対して健全性を保持したと言える。計算値に比して載荷初期の剛性が小さくなっているのは、試験体支点部の初期不整により支持桁と試験体のなじみが生じたせいと考えられる。

図-10にRC床版の繰返し載荷回数0回、70万回後の静的載荷による荷重-変位曲線を示す。同図より、RC床版試験体の曲げ剛性は、輪荷重の載荷によって急激に小さくなり、実験終了時（輪荷重載荷70万回）には初期値の1/5程度にまで低下することが分かる。

試験終了後のRC床版下面には、亀甲状のひび割れが発達し（写真-3）、上面には輪荷重走行レールの周囲を囲むようにひび割れが発達していた。供試体を切断したところ、床版支間方向、支間直角方向に斜めにひび割れが発展

しており（写真-4）、床版が押し抜きせん断破壊を起こしていることが分かった。合成床版の供試体は、330万回の繰返し載荷後も外観上の損傷は見られなかった。供試体の切断面においても目視可能なひび割れは観測されず（写真-5）、非常に健全な状態であった。

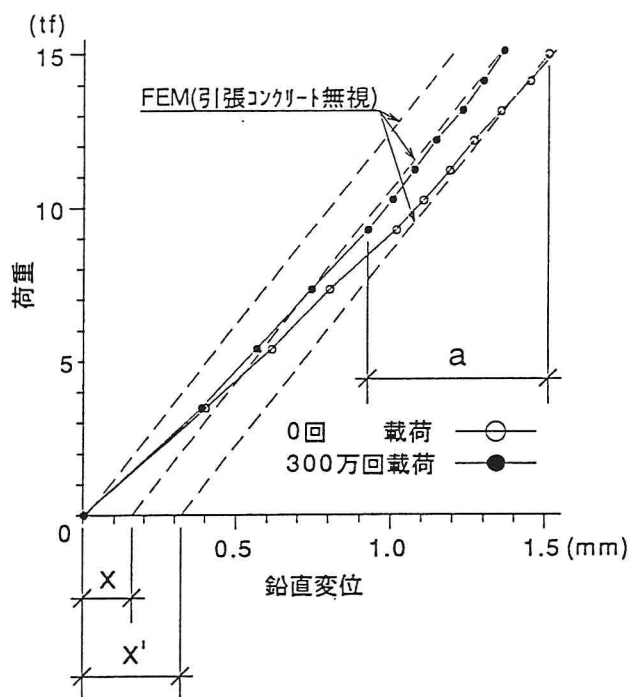


図-9 輪荷重載荷試験後の合成床版の荷重-変位曲線

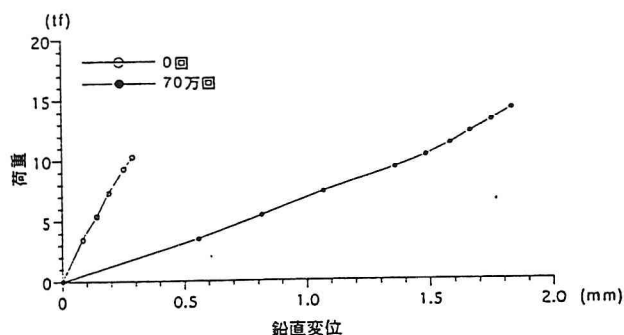


図-10 輪荷重載荷試験後のRC床版の荷重-変位曲線



写真-3 RC床版下面の損傷

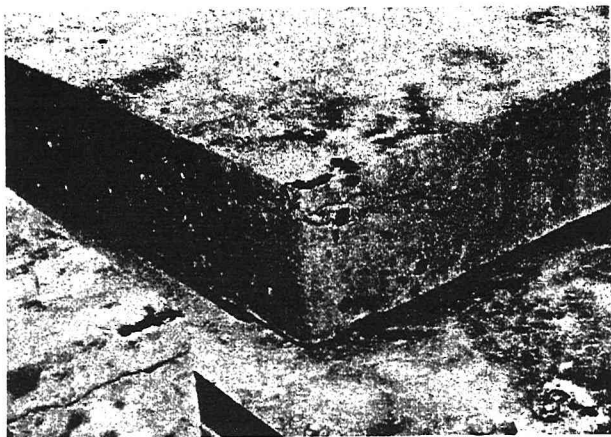


写真-4 70万回の輪荷重載荷によるRC床版の損傷

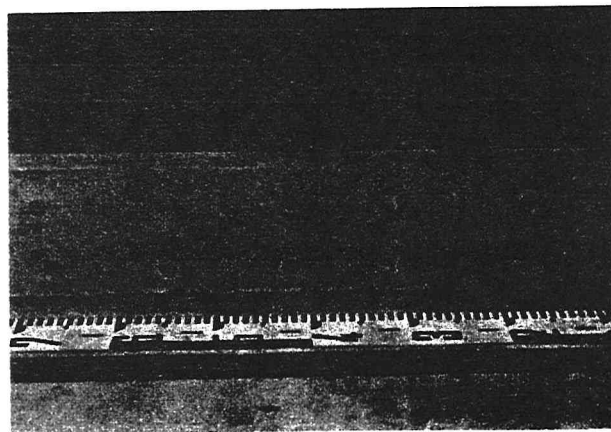


写真-5 300万回の輪荷重載荷後の合成床版

6. 合成床版の実橋への適用

本床版の開発においては、ここに示す実験の他に、床版パネル間の継手に関する実験、張り出し部モデルでの移動輪荷重試験、床版支間 5.2mの実大モデルによる移動輪荷重試験等を行なった。各種の実験で性能確認を行なった後、実橋へ適用することとなった。

適用された橋は、鋼開断面箱桁と呼ばれる形式のもので、上下フランジおよびウェブによって閉断面を構成する従来の箱桁に対して、工場製作時には上フランジ部が開口したU型断面を有する。床版を敷設後、はじめて箱断面が完成するものである。工場製作時は、構造の単純な鉄桁に近く、作業性・加工性が良いという特徴を有している。床版打設後は閉断面構造となり、通常の箱桁と何ら相違ない。一方、床版打設前の開断面構造については、そのねじり剛性に関して通常の箱桁に劣る場合があり、曲線桁の張出し架設や送り出し架設においては、架設時の安全性のために架設時補強が必要となる。そこで、鋼板を底板とする合成床版を桁に配置した後に架設すると(図-11)、架設時において箱断面が準閉断面化し、ねじり剛性が増し、架設時の安全性を確保することができる。

合成床版パネルを、開断面箱桁に設置し(写真-6)、送出し架設にて架設した。架設時の安全性に関しては、実験および解析にて検証した。架設完了後、コンクリートを

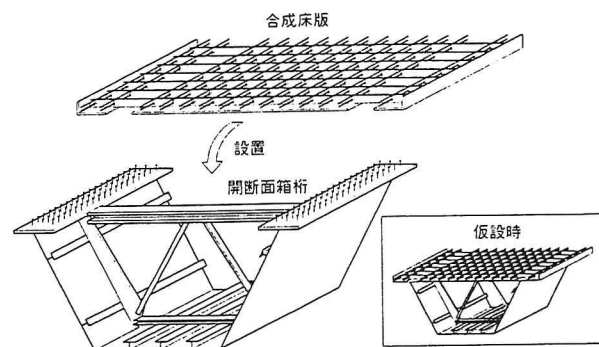


図-11 合成床版の開断面箱桁橋への適用

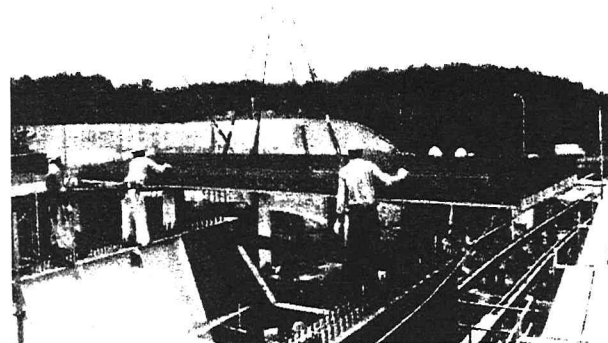


写真-6 合成床版の施工

打設し、床版施工作業を無事終了した。なお、この橋梁では連続桁の中央支点上床版にプレストレスを導入したが、その性能確認のために、長期の計測を継続中である。

7. まとめ

帯鋼ジベルをずれ止めとする鋼・コンクリート合成床版の開発を行なった。帯鋼ジベルは大きなせん断耐力を有することがジベルの引抜き実験にて分かった。このジベルを合成床版に適用できることは、床版梁モデルの曲げ性能確認実験で確認された。帯鋼ジベルを用いた合成床版は、輪荷重載荷実験において20tf荷重による300万回の繰返し載荷後も問題となる損傷は発生せず、実用に耐えられることが確認された。

各種の性能確認実験を経て、この合成床版は実橋に適用された。合成床版は桁施工時には、架設補強としても利用できることが分かり、橋梁建設の合理化に寄与できた。

参考文献

- 1) (社)日本橋梁建設協会：既存床版工法調査書，1989
- 2) 大間知，白水，清田：製作・施工の省力化を図った合成床版の開発，横河ブリッジ技報 No. 24，1995
- 3) 高田，清田，大間知，春日井：「合成床版」を用いた開断面箱桁の橋の提案，横河ブリッジ技報 No.25，1996
- 4) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，構造工学シリーズ3，1989
- 5) (社)土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997