報告　高力ボルトをずれ止めに用いたプレキャスト合成床版の耐荷性能について

横山広*1・佐藤政勝*2・辻本和敬*3・相川收*4

要旨：高力ボルトをずれ止めとした，床版支間の小さい橋りょうに適用する薄肉のプレキャスト合成床版の耐荷性能を把握するため，実物大床版供試体を用いて定点繰返し載荷実験と押抜きせん断実験を行った。供試体は合成床版と比較用の現行示方書に準じたＲＣ床版である。実験の結果，合成床版は高荷重レベルでも安定した挙動を示し，鋼板に発生した応力レベルから疲労に対しても問題ないと推察された。また，押抜きせん断実験では合成床版，ＲＣ床版がほぼ同じ最大荷重を示し，同等の耐荷性能であると理解された。よって，本合成床版の床版支間の小さい橋りょうへの適用には問題がないと判断した。

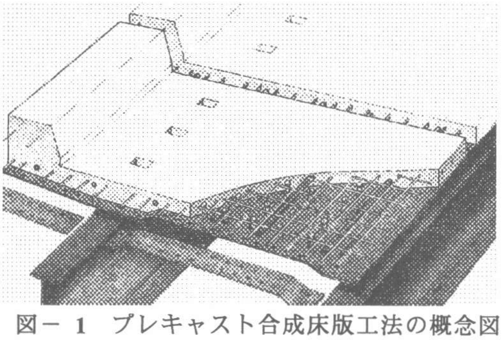
キーワード：合成床版，高力ボルト，プレキャスト，薄肉化，耐荷性能

1.　はじめに

道路橋に適用されるプレキャスト合成床版に，コンクリートと鋼板のずれ止めに高力ボルトを用いたものがある。従来の合成床版では溶植されたスタッドをずれ止めに用いる例が多く，疲労損傷の問題が指摘されていた[1]。ずれ止めをスタッドから高力ボルトに変えれば疲労の問題がなくなり，より高耐久性が望める。図－1は合成床版による床版工の概念図である。

本構造の床版は過去に輪荷重試験機によって疲労耐久性に関する実験が行われており，ボルトの安全性についても着目されていた[2]。その実験結果では，床版供試体は最大荷重 206kN，累計走行回数約 150 万回の載荷で破壊せず，高力ボルトにも問題のないことが確認されている。当時の実験供試体は，道路橋示方書に規定されている最小床版厚さを意識してコンクリートと鋼板の厚さの合計が 16cm となるように設計されていた。

一方，トラス形式のように密な間隔で床版を支持する縦桁が配置されている橋りょうでは，床版厚さを薄くすることによる軽量化によって主構造の応力減少が図れるだけではなく，歩道添加等の改築が可能になる場合もある。本研究で対象とする合成床版は，プレキャスト形式であり，工場で製作することから製作精度が良好で，品質も安定している。よって，床版支間の適用範囲を制限することで，ねじりモーメントによる床版上面の有害なひび割れ発生を抑制すれば，道路橋示方書に示された最低厚さを下回る厚さでも適用可能と考えられる。本研究では1.5m 程度の床版支間を有する橋りょうを想定し，床版厚さを前述の最低厚さから低減した実物大の供試体で，耐荷性能を把握するための実験を行った。以下にその結果を報告する。



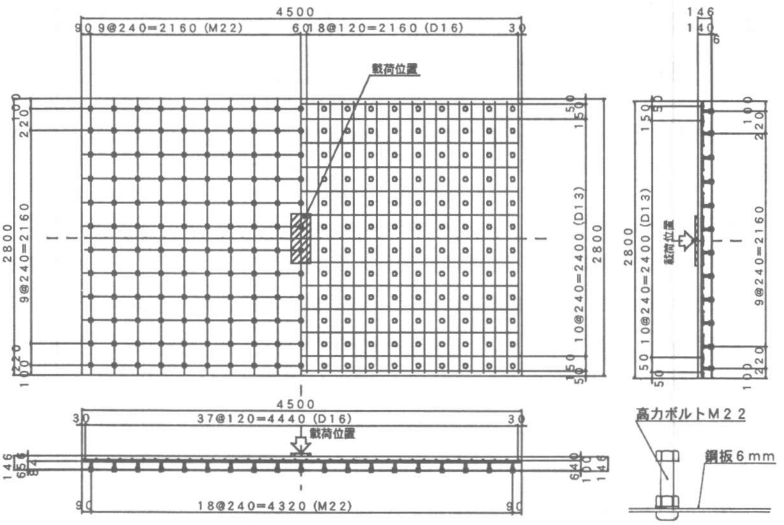
図－1　プレキャスト合成床版工法の概念図

＊1　ショーボンド建設㈱補修工学研究所佐藤研究室課長　（正会員）
＊2　同上　室長　工博　（正会員）
＊3　同上
＊4　ショーボンド建設㈱関東支店技術部部長

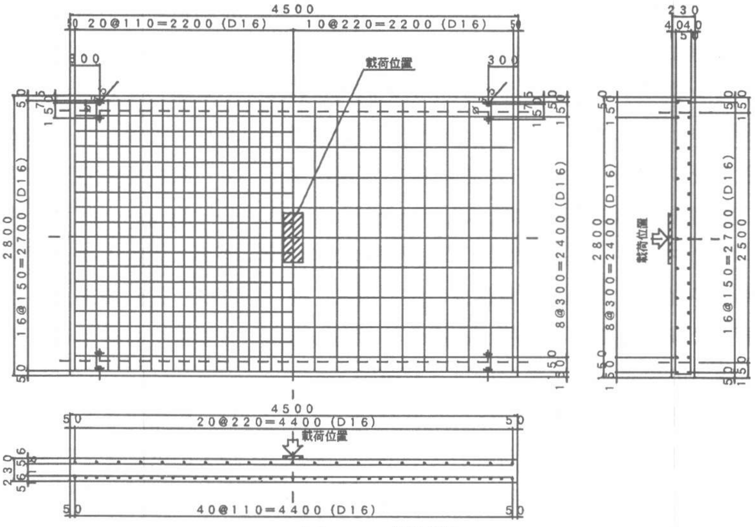
2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状寸法を図－2に示す。合成床版は鋼板厚さが6mmでコンクリート厚さが14cm，全厚が14.6cmである。コンクリート厚さは，土木学会の鋼構造物設計指針[3)]に示されている式(1)により，床版支間を1.5mとして算出した値である。鋼板とコンクリートのずれ止めに用いる高力ボルトはM22で24cmの間隔で配置した。断面の上側に配した鉄筋は，橋軸直角方向がD16で橋軸方向がD13である。本研究では，実験結果の比較用として現行道路橋示方書に準じた鉄筋コンクリート床版（以下，RC8とよぶ）供試体も製作し，同じ条件で実験を行った。



(a) 合成床版供試体　　(b)高力ボルト固定部



(c) RC8 供試体

図－2　供試体の形状寸法　　(単位：mm)

ただし，床版厚さの設計では，合成床版の曲げ剛度が大きいことを考慮してRC8では全厚を23cmとした（表－1）。この厚さは床版支間2.5mで大型車交通量の割増しを考慮した床版厚さに相当する。

$$hc\ (\mathrm{cm}) = 2.5 \cdot L + 10 \qquad (1)$$

ここに hc：コンクリート部の最小厚さ(cm)

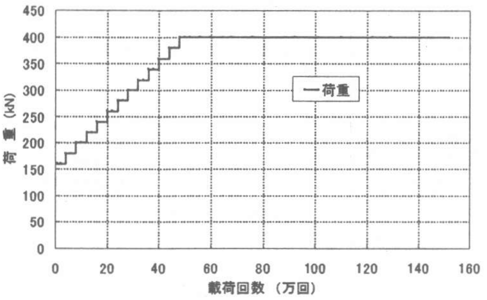
L：床版支間(m)

表－1　床版供試体の曲げ剛性

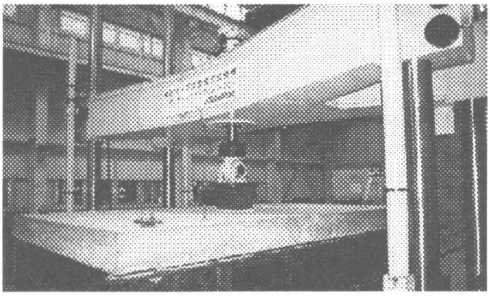
供試体名称	床版厚 (cm)	中立軸 (cm)	断面二次モーメント (cm^4)
合成床版	14.6	9.4	49,300
RC8(橋軸直角)	23	7.3	51,500
RC8(橋軸)	23	6.5	32,800

2.2 実験方法

高力ボルトをずれ止めに用いた合成床版で



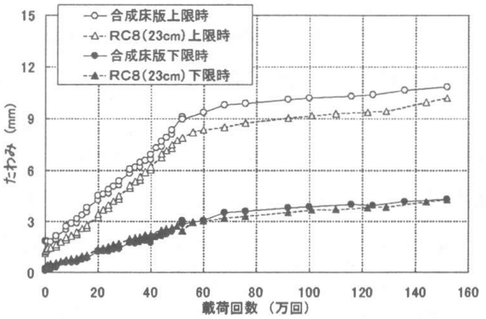
図－3　繰り返し載荷プログラム



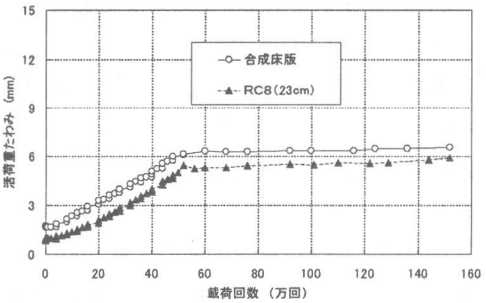
写真－1　試験状況

表－2　コンクリートの材料特性

種別	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング率 (N/mm²)	ポアソン比
合成床版	30	23300	0.194
ＲＣ床版	33	24500	0.204



図－4　中央たわみの経時変化



図－5　活荷重たわみの経時変化

は，鋼板の疲労により耐久性が支配されると考えられたので，実験には最大載荷能力 500kN の定点疲労試験機を用い，繰返し載荷実験を行った。載荷方法は正弦波で速度を 3Hz とし，載荷プログラムは**図－3** に示すように，上限荷重は 160kN から開始し最大 400kN まで，載荷回数 4 万回毎に荷重が 20kN 増加する階段型漸増載荷とした。載荷荷重 400kN に到達後は，荷重はそのままで 100 万回の繰り返し載荷を追加した。下限荷重は全体を通して 10kN で統一している。荷重載荷面の形状は供試体の橋軸方向×橋軸直角方向が 20 × 50cm で道路橋示方書による活荷重の載荷面形状と同じにした。

供試体の支持は，橋軸直角方向の端部を回転可能なように単純支持し，橋軸方向の端部は支持桁による弾性支持とした。供試体の四隅は回転を拘束しないように，浮き上がり防止のボルトで固定した。実験状況を**写真－1** に示す。

計測項目は，供試体中央でのたわみと，鉄筋および鋼板のひずみである。

合成床版供試体，RC8 供試体ともに繰返し載荷では終局に至らなかったので，同じ支持条件で静的な押抜きせん断実験を行っている。

使用したコンクリートの圧縮強度は，繰返し載荷実験の初日に測定し，その結果は**表－2** のとおりである。

3.　実験結果と考察

3．1　繰返し載荷実験

繰返し載荷時の供試体中央におけるたわみの経時変化を**図－4** に示す。図には合成床版供試体と，RC8 供試体の両方の結果を示している。たわみ値は載荷荷重にあわせて増加し，上限荷重が一定になった後には微増する傾向を示した。合成床版の上限荷重載荷時のたわみは，400kN 一定載荷時で，RC8 供試体よりも 11%程度大きい値で推移した。下限荷重時のたわみに

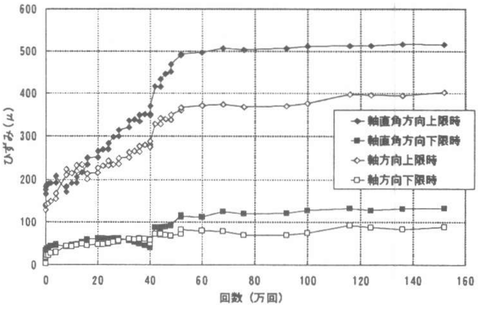
関しては，合成床版供試体，RC8 供試体ともにほぼ同じ値で推移している。

図－5には上限荷重時のたわみから下限荷重時のたわみを減じた値の経時変化を示した。本報告においてはこの上限から下限を減じたたわみ値を活荷重たわみと定義する。

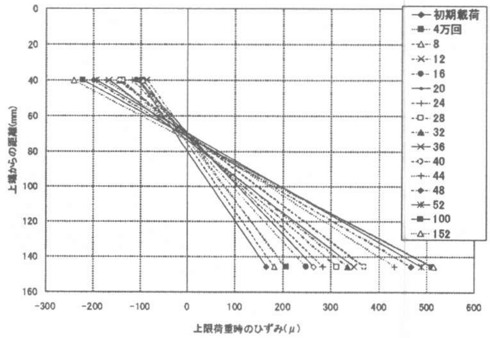
図より，活荷重たわみは上限荷重載荷時と同様に合成床版供試体が大きい値で推移している。ただし，合成床版供試体では，上限荷重一定時の活荷重たわみが停留していることから，高荷重レベルも安定した状態であったと推察される。RC8 供試体では，繰返し載荷終了前に活荷重たわみが増加傾向を示している。一般に，定点繰返し載荷おける RC 床版での 200 万回疲労強度が押抜きせん断耐力の 55%程度と言われており[4]，後述する押し抜きせん断耐力の計算結果の 55%は 430kN になることから，RC8 供試体の活荷重たわみの増加は，繰返し載荷による耐力低下が考えられる。

図－6は合成床版の鋼板下面中央に貼り付けたストレインゲージによるひずみの経時変化を示したものである。載荷初期の荷重 160kN での橋軸直角方向ひずみの値は約 170 μで，4 万回載荷後には約 190 μまで増加した。その後，橋軸直角方向とそれに直交する橋軸方向のひずみの値が逆転しているが，載荷荷重 240kN 以降は橋軸直角方向が大きい値で推移している。ひずみの値が逆転した現象については，コンクリートのひび割れの影響が考えられるが，今後の検討が必要である。

高力ボルトをずれ止めに用いる構造では，ずれ止めよりも，鋼板の疲労が破壊に対して支配的になる。鋼構造物設計指針[5]には合成はりによる疲労実験結果が示されており，それによれば 6mm 鋼板の 200 万回疲労限強度は 92N/mm² とされている。合成床版供試体の鋼板のヤング率を 206kN/mm² とすれば 160kN での載荷終了時の応力は 39N/mm² となり，ボルト周辺の応力集中の程度が不明であるが，道路橋示方書の設計活荷重が 100kN であることから，疲労に関しては特に問題にならないと考えられる。



図－6　鋼板下面中央のひずみの経時変化



図－7　載荷回数毎のひずみ分布

載荷回数 40 万回，載荷荷重が 360kN の載荷ステップで上限および下限荷重時のひずみが急増しているが，この時に合成床版のコンクリートと鋼板が付着切れを起こした可能性がある。上限荷重一定時の繰返し載荷終了前のひずみの値は，橋軸直角方向および橋軸方向でそれぞれ約 510 μと 400 μであった。

図－7は合成床版の供試体中央における床版断面の上側に配した鉄筋のひずみと鋼板下面ひずみの載荷回数毎の分布を示したものである。初期載荷での中立軸は上端から約 80mm の位置にあり，その後の載荷で上方へ移動しているのがわかる。

3．2　押抜きせん断実験

合成床版供試体，RC8 供試体ともに繰返し載荷では終局に至らなかったので，繰り返し載荷試験の支持条件を変えずに静的な押抜きせん断実験を行った。載荷には能力 2MN のオイルジャッキを用い，荷重の検出にはロードセルを

用いた。荷重は事前に行われた繰り返し載荷における初期荷重の 160kN と最大荷重の 400kN で載荷と除荷を繰り返し，その後は終局に至るまで載荷した。

図－8 に合成床版供試体の荷重と供試体中央でのたわみの関係を示す。荷重－たわみ曲線は最大荷重である 725kN までほぼ直線的で，大音響とともに載荷位置での陥没破壊を起こした後は荷重値が急減した。下面の鋼板は広範囲に変形していた。最大荷重を記録したときの中央たわみの値は約 13mm であった。

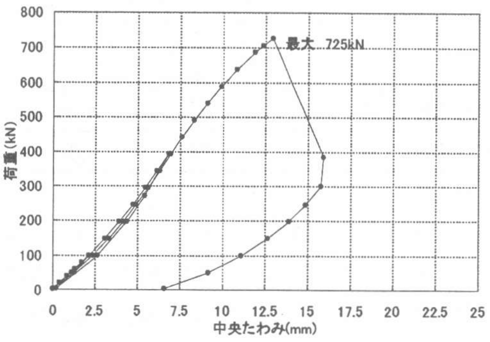
図－ 9 は合成床版供試体の荷重と下面鋼板下側中央のひずみの関係を示したものである。ひずみもたわみと同様に直線的に増加し，破壊後は急減した。橋軸直角方向と橋軸方向の最大ひずみはそれぞれ 680 μ と 610 μ で鋼板の降伏ひずみを超えなかった。

RC8 供試体の荷重と中央たわみの関係は**図－ 10** のとおりで，載荷荷重 450kN 以降は荷重－たわみ曲線の勾配が緩やかになり，最大荷重 723kN で大音響とともに載荷位置で陥没破壊した。最大荷重を記録したときの中央たわみの値は 19.3mm であった。

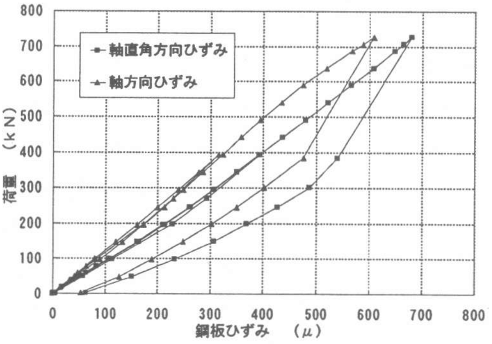
合成床版供試体と RC8 供試体の結果を比較すれば、最大荷重では合成床版供試体が 725kN で RC8 供試体が 723kN とほぼ同じ値を記録した。荷重－たわみ関係では，合成床版供試体の最大荷重を記録したときの中央たわみは約 13mm で RC8 供試体の 19.3mm よりも小さいが，合成床版供試体では鋼板の降伏がなく脆性的な破壊性状を示している。

コンクリート標準示方書[6]では，面部材の設計押抜きせん断耐力の算式に式(2)を与えている。式(2)で両供試体の押抜きせん断耐力を計算した結果を**表－ 3** に示す。合成床版供試体では，鋼板を鉄筋と同様に扱い耐力を算出した。

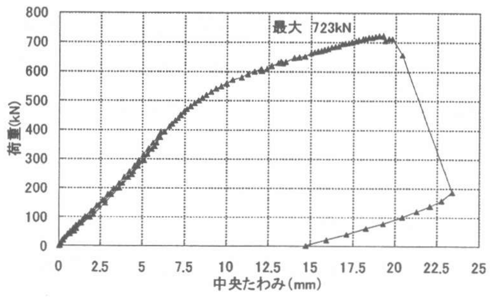
合成床版供試体の計算結果では，実験値が計算値より 20%小さい結果となっており，既往の実験結果[7]と同様な傾向を示した。RC8 供試体においても実験値が 8%小さい値を示した



図－ 8　合成床版の荷重と中央たわみの関係



図－ 9　合成床版の荷重と鋼板ひずみの関係



図－ 10　RC8 の荷重と中央たわみの関係

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p d / \gamma_b \quad (2)$$

ここに、 $\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$ $(d：\mathrm{m})$

$\beta_p = \sqrt[3]{100p}$

$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$

$f_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}$ $(\mathrm{N/mm^2})$

u ：載荷面の周長

u_p ：設計断面の周長

$\gamma_b = 1.0$

表－3　押し抜きせん断耐力の計算結果

種別	実験値 (kN)	計算値 (kN)	計算／実験
合成床版	725	874	1.20
ＲＣ床版	723	782	1.08

が，原因としては繰り返し載荷による損傷の蓄積の影響が考えられる。その影響は合成床版供試体にもあると考えられるが，RC8 供試体とは構造が異なるため，影響の程度も異なると思われる。

4．まとめ

本研究では，ずれ止めに高力ボルトを用いたプレキャスト合成床版の耐荷性能を把握するため，定点での繰返し載荷実験と静的な押抜きせん断実験を行った。実験供試体は実物大の合成床版供試体と現行道路橋示方書に準じて製作したＲＣ床版供試体の 2 体である。供試体の設計では，1.5m 程度の床版支間を有する橋りょうを想定しており，プレキャスト製品の特長である品質，精度の優位性から道路橋示方書で規定されている最小厚さの 16cm を下回る床版厚さ 14.6cm を設定した。以下に実験結果のまとめを示す。

①繰返し載荷実験での上限荷重時のたわみは載荷プログラムにあわせて増加し，一定荷重の 400kN になってからも微増した。ただし，活荷重たわみは 6mm を超えた位置で停留しており，高荷重レベルでも安定した挙動を示した。

②繰返し載荷初期の 160kN 載荷での鋼板ひずみを応力に換算した値は 39N/mm^2 程度であり，既往の実験結果を参考にすれば疲労に対して問題はない。

③繰返し載荷の 40 万回、360kN 載荷でひずみが急増しており，コンクリートと鋼板が付着切れを起こした可能性がある。ただし，高荷重レベルであり，通常使用の範囲では付着に問題はないと考えられる。

④静的な押抜きせん断実験の結果，合成床版供試体と RC8 供試体の最大荷重はそれぞれ 725kN と 723kN でほぼ同じ値を示した。土木学会式による押し抜きせん断耐力の計算結果では，合成床版供試体のほうが大きい値を示したが，計算手法が確立されていない現状では，両供試体の耐荷力に関する性能は同等と考えるべきである。

本実験結果より，対象としたプレキャスト合成床版は疲労耐久性に優れた構造であり，床版支間 1.5m 程度の橋りょうへの適用には問題がないと判断できる。

今後は，プレキャスト合成床版のボルト周辺部の鋼板応力に着目して輪荷重試験を行い，移動荷重による構造特性を把握する予定にしている。

参考文献

1) 松井繁之ほか：鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労破壊性状について，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1303-1311，1993.3
2) 佐藤昌史ほか：活荷重剛性に配慮した複合構造床版の移動載荷実験，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，Ｉ－Ａ, pp.882-883, 1996.9
3) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物平成 9 年版，p.91，1997.9
4) 岸谷孝一ほか：疲労，技報堂出版，pp.77-81，1987.9
5) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物平成 9 年版，pp.167-170，1997.9
6) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編平成 8 年制定，pp.65-67，1996
7) 高橋良輔ほか：鋼コンクリートオープンサンドイッチスラブの押抜きせん断破壊に対する引張り鋼材比の影響，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, CS, pp.330-331, 1998.9