

論文 鋼・コンクリート合成床版用かすがい継ぎ手の性能確認試験

山下 幸生*1・野口 堅冬*2・安東 祐樹*3・横山 広*4

要旨：鋼・コンクリート合成床版同士を接合するかすがい継ぎ手の性能確認のため、はり試験および実物大床版供試体による輪荷重走行試験を実施した。かすがい継ぎ手の構造はコの字に加工した鉄筋をプレキャスト床版の箱抜き位置に差し込み樹脂モルタルで定着するものである。はり試験の結果、かすがい継ぎ手の性能は継ぎ手の無い構造に対して差は無く、同等の耐荷性能を確認した。この継ぎ手を設けた実物大床版供試体による輪荷重走行試験でも現行の要求性能に対して十分な疲労耐久性を有していることが認められた。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版、かすがい継ぎ手、簡易継ぎ手

1. はじめに

近年、橋りょうの長寿命化が叫ばれ、数多くの橋りょうで床版打ち替えが計画されている。その際には厳しい施工条件と耐久性能が要求される場合も少なくなく、疲労耐久性能の向上に加えプレキャスト床版継ぎ手の簡略化による施工の効率化が望まれる。対象となる床版には高度経済成長期に建設された薄い床版が多く、打ち替え床版を現行の道路橋示方書で設計した場合には既設床版との厚さの差が大きくなることから、床版の死荷重増加が支持桁や下部構造にも影響を及ぼすことになる。それらの問題に対応するため、床版厚さの増加を抑えて現行の道路橋示方書に準拠した床版の剛性が確保可能な鋼・コンクリート合成床版が採用されるようになり、近年その実績を増加させている。

対象とする鋼・コンクリート合成床版は、溶接疲労の問題を解消するため止め高力ボルトを採用した形式で、基礎的な耐荷性能は既往研究¹⁾で把握している。この合成床版同士の接合部は、高力ボルトと添接板を用いた摩擦接合による鋼板継手と鉄筋の重ね継手で構成されるもので、その幅は橋軸直角方向に 300mm とし、現場にて合成床版と同等以上のコンクリートを充填する構造であった。その接合部の更なる効率化を図ることを目的に、その幅を 20mm 程度とした加工鉄筋とエポキシ樹脂モルタルから構成される簡易な接合法（以後、かすがい継ぎ手と称す）を考案した。

床版継手には、曲げ、せん断およびねじりに対して抵抗できる構造が求められるとともに、輪荷重による疲労耐久性を確保しなければならない。本研究では、継ぎ手構造の性能確認を実施することで打ち換え構造としての耐久性を評価するものとした。評価項目は、はり供試体による基礎実験および実物大の床版供試体を用いた輪荷重走行試験による疲労耐久性確認とした。

2. 性能確認試験の概要

2.1 継ぎ手性能確認のための床版部分モデルはり試験

(1) はりモデル供試体

供試体は継手部を模擬したモデルで、図-1 に示すように幅が 1.0m で全長を 2.26m とし、試験時の支間は 2.0m で単純支持するものとした。供試体厚さは 180mm であり、継ぎ手構造の試験であるため底鋼板ではなく異形鉄筋 D19 を 140mm 間隔で継ぎ手位置を貫通して設置するものとした。試験対象となるかすがい継ぎ手構造を図-2 に示す。本構造は異形鉄筋 D13 をコの字型に加工して、継ぎ手両側の箱抜きされたコンクリート部分にエポキシ樹脂モルタルを定着材として埋め込むものである。なお、比較用として、継ぎ手のない供試体も製作し、同様の試験を実施した。

載荷試験実施時のコンクリートの圧縮強度、ヤング係数は表-1(a)の通りである。エポキシ樹脂モルタルは表-1(b)に示すエポキシ樹脂と骨材（乾燥珪砂）との配合比が 1:3 のものを使用している。

(2) はり試験の概要

継ぎ手構造の基礎的な耐荷性能を確認するために、定点での繰り返し載荷試験を実施した。使用した試験機は、最大 200kN の載荷が可能なもので、荷重は支間方向に 200mm、幅方向 500mm の載荷板を介して供試体に伝達される（写真-1）。継手はせん断スパン内で曲げモーメントが最大となる位置に設定した。計測項目は図-3 に示すように供試体下面側のたわみと鉄筋ひずみである。なお、試験終了時にひび割れ発生状況を観察した。

試験では、上限荷重を道路橋床版の許容曲げ圧縮応力度²⁾を参考にし、供試体圧縮強度の 1/3 程度の応力度 10N/mm²となる荷重の $P_{max}=65.0kN$ とし、下限荷重は試験機能力に依存した $P_{min}=20kN$ の正弦波を周波数 3Hz にて 200 万回まで定点載荷にて実施した。

*1 ショーボンド建設（株）西日本支社 技術部 課長（正会員）

*2 ショーボンド建設（株）補修工学研究所

*3 ショーボンド建設（株）補修工学研究所 副所長 博士（工学）

*4 大日本コンサルタント（株）インフラ技術研究所 保全エンジニアリング研究室 室長 博士（工学）

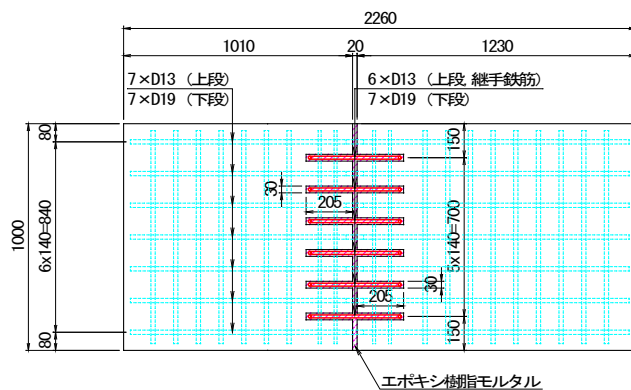


図-1 はり供試体 (単位: mm)

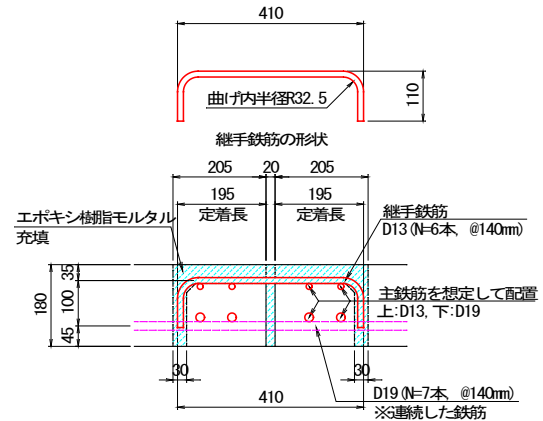


図-2 かすがい継ぎ手断面 (単位: mm)



写真-1 定点疲労試験状況

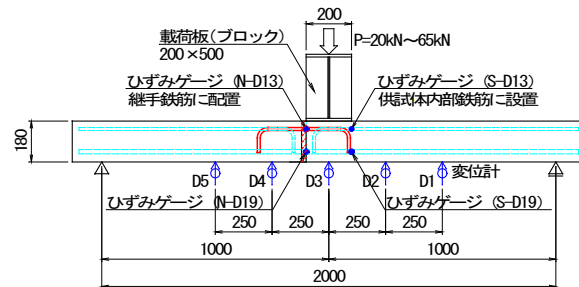


図-3 計測位置 (単位: mm)

なお、試験機は雰囲気温度を制御できる室内に設置されており、本研究では20℃で管理した。

2.2 実物大床版供試体の輪荷重走行試験

(1) 実物大床版供試体

実物大床版供試体では、前述のはり試験で基礎的な性能を確認したかすがい継ぎ手の供試体形状、配筋を図-4に示す。供試体形状は既往研究³⁾を参考に、使用した輪荷重走行試験機の架台に合わせて、走行方向が4.50mで幅方向が2.80mとした。床版厚さは連続版の床版支間3.0mで設定した全厚190mmで、鋼板厚さは本床版構造の標準仕様である9mmとした。上面側の配筋も床版支間に合わせて設定した。鋼板継ぎ手は添接板形式であり、添接板の厚さは母材と同じ9mmとした。床版下面の鋼板継ぎ手は埋め込みナットを用いた頭締め高力ボルトによる摩擦接合で、その構造が成立することは既往研究⁴⁾で確認している。また、比較用として圧縮側継ぎ手を重ね継ぎ手とした供試体も製作した。図-5に重ね継ぎ手供試体の継ぎ手部分を示す。圧縮鉄筋の重ね継ぎ手長である20Dを確保している。なお、両供試体ともに継ぎ手位置は一般部と比較するため中央より走行方向に525mmの位置に設定した。

走行試験実施時の供試体コンクリートおよび、重ね継ぎ手供試体に用いた超速硬コンクリートの物性値は表-

表-1(a) 供試体コンクリートの物性

試験種別／供試体種別		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
はり試験	本体	31.9	22.3
輪荷重走行試験／ かすがい	本体	69.7	42.6
輪荷重走行試験／ 重ね継ぎ手	本体	62.8	40.5
	継ぎ手	80.9	41.0

※重ね継ぎ手部分は超速硬コンクリートを使用

表-1(b) 供試体エポキシ樹脂モルタルの物性

試験種別	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
はり試験	87.1	7.23
輪荷重走行試験	79.8	10.3

1(a)に示すとおりであり、実際の打替仕様に準じたものである。かすがい継ぎ手で使用したエポキシ樹脂モルタルははり試験と同配合のもので、試験時の物性値は表-1(b)に示す。

(2) 実物大供試体の試験概要

輪荷重走行試験機³⁾は国立研究開発法人土木研究所が所有するクランク式の鉄輪が往復運動する試験機を使用した(写真-2)。走行範囲は中央から±1.50mで車輪幅は0.50mとし、供試体へは走行軸方向200mm、幅方向

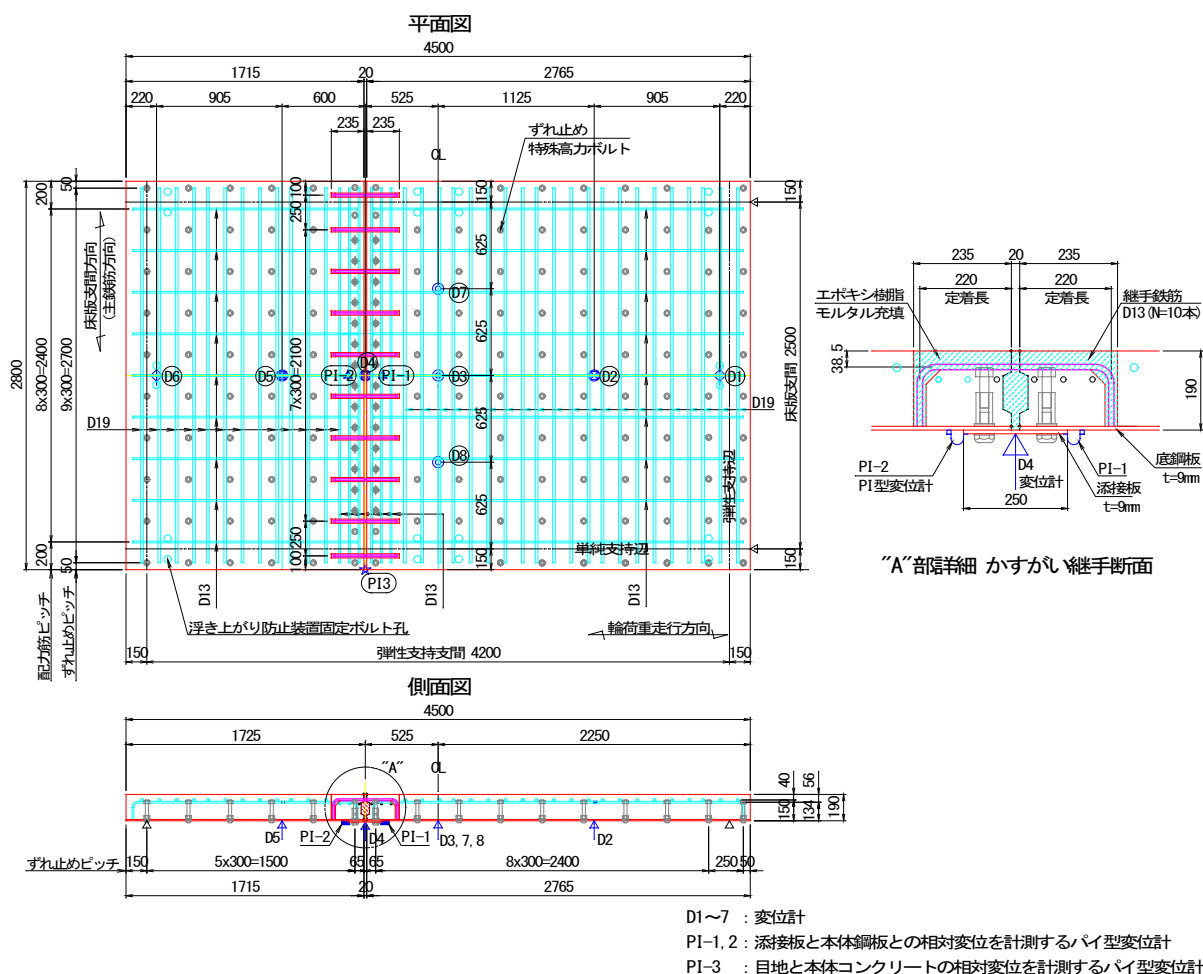


図-4 かすがい継ぎ手床版供試体 (単位: mm)

500mm の载荷ブロックを介して荷重が供試体に伝達される。供試体の支持条件として、床版支間方向は剛な架台に支持された回転可能な単純支持とし、相対する端部は横桁による弾性支持で、四隅と中央側端部では浮き上がり防止装置を設置している。

載荷プログラムは道路橋示方書⁵⁾にも記載されている
 階段載荷による載荷方法とし初期荷重 157kN から 4 万回
 毎に 19.6kN 荷重を漸増させ、走行回数の累計が 52 万回、
 荷重では 392kN で試験終了となる。計測項目は図-4 に
 示すように下面側のたわみ、継ぎ手側面の変位である。

3. 性能確認試験の結果

3.1 継ぎ手構造確認のためのはり試験

(1) たわみと鉄筋ひずみ

はり供試体試験結果のスパン中央たわみと載荷回数
の関係を図-6 に示す。図-6(a)は載荷時と除荷時（無
負荷）の変位を示したもので、図-6(b)は、載荷時から
除荷時を減じた弾性成分のたわみと載荷回数の関係であ
る。

図-6(a)によれば、かすがい継ぎ手供試体では、継ぎ

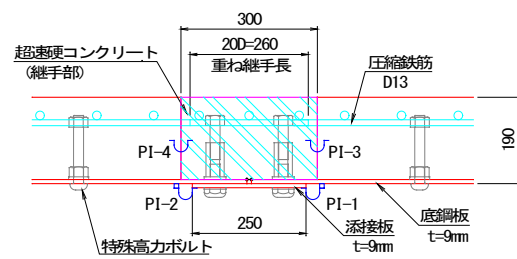
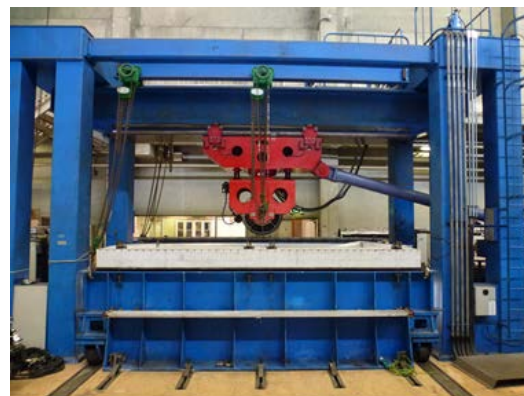
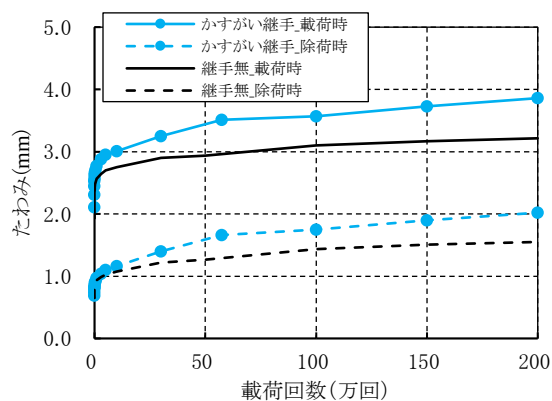
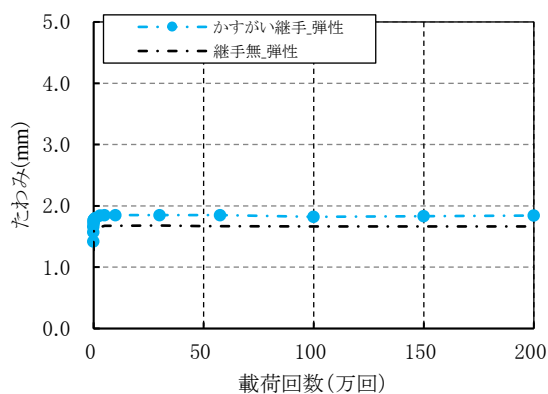


図-5 重ね継ぎ手供試体（継ぎ手部）（単位：mm）

写真-2 輪荷重走行試験機³⁾



(a) 載荷時と除荷時のたわみ



(b) 載荷時から除荷時を減じた弾性成分のたわみ

図-6 たわみと載荷回数の関係

手無し供試体に対して載荷初期からたわみが大きくなっており、載荷時では当初 2.1mm 程度から載荷 10 万回までに 3.0mm と増加した後は緩やかに増加する傾向で、試験終了時は 3.9mm であった。図-6 (b) の弾性たわみでは、試験終了までかすがい継ぎ手供試体、継ぎ手無し供試体ともに一定値で推移しており、剛性の変化は認められなかった。図-7 は、支間方向のたわみ分布を示したものであるが、載荷回数が増加してもほぼ左右対称となっており、継ぎ手の有無による影響はなかった。

つぎに継ぎ手鉄筋 (N-D13) のひずみと載荷回数との関係を図-8 に示す。図には継手断面 (N-D13) に載荷点 (CL) に対して対称位置にある圧縮側鉄筋 (S-D13) のひずみも示す。継手断面の有無で比較してみると、継ぎ手断面 (N-D13) の方が対称位置にある断面 (S-D13) よりも載荷時、除荷時の圧縮ひずみが大きい値で推移した。継ぎ手の無い断面 (S-D13) の鉄筋ひずみは載荷回数 50 万回以降ほぼ一定で推移しているが、継ぎ手がある断面 (N-D13) では微増する傾向であった。この傾向は引張側の鉄筋ひずみ (N,S-D19) も同様であった。

(2) ひび割れ状況

載荷試験終了時の継ぎ手上面の状況を写真-2 に示す。コンクリートのひび割れは確認されておらず、目地部分や継ぎ手鉄筋のエポキシ樹脂モルタルとの界面にも剥離等の異常は見られなかった。

はり試験の結果より、たわみの弾性成分の推移をみると剛性変化は認められていない。さらに、ひずみの傾向から継ぎ手鉄筋が有効に荷重を伝達していることがわかった。また、継ぎ手の影響で変形は継手なしよりも大きくなるものの、その分布が対称形であることから連続性は確保されていた。

以上のことから、はり試験では継ぎ手に起因した特異な損傷や剛性低下はみられないため、輪荷重走行試験で床版構造の継ぎ手としての性能を確認することにした。

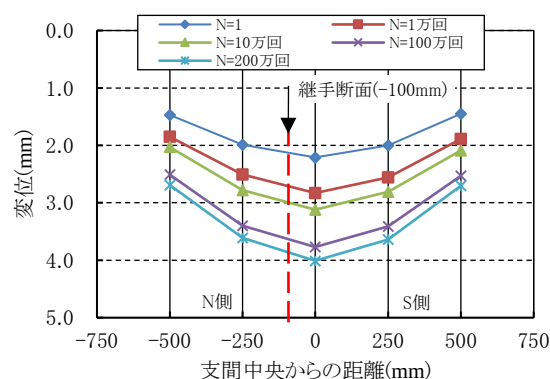


図-7 支間方向のたわみ分布 (かすがい継ぎ手)

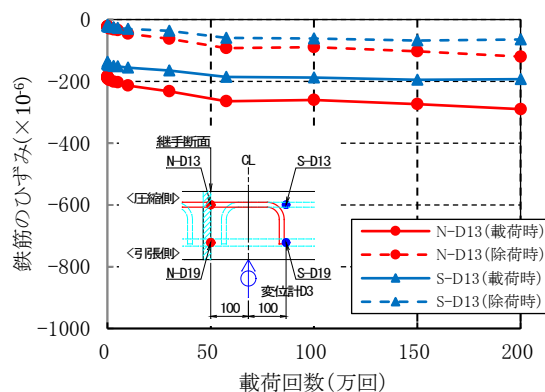


図-8 鉄筋ひずみと載荷回数の関係



写真-2 かすがい継ぎ手の試験後の状況

3.2 実物大床版供試体の輪荷重走行試験

実物大供試体の輪荷重走行試験では、かすがい継ぎ手供試体と重ね継ぎ手供試体ともに走行回数 52 万回、載荷荷重 392kN で破壊しなかった。次に各計測項目で両供試体を比較検討する。

(1) たわみの比較

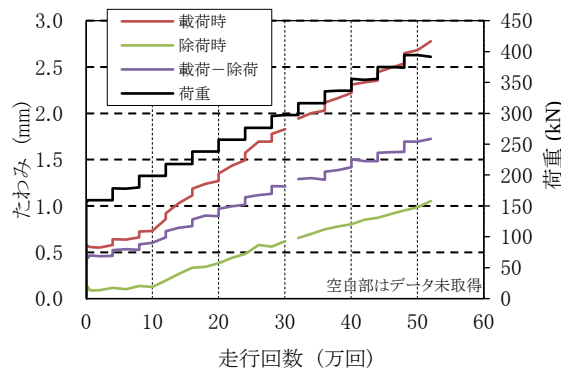
輪荷重走行試験による供試体中央のたわみの推移を図-9 に示す。図には載荷時と除荷時のたわみ、および載荷時から除荷時を減じた弾性たわみを示している。なお、試験装置の仕様により荷重を増加させる段階では、増加後に除荷時の計測が実施されないためその時点の除荷時の値は直前に取得されている値により弾性成分を算出している。

図-9 によれば、かすがい継ぎ手供試体と重ね継ぎ手供試体はほぼ同様のたわみの増加傾向を示し、試験終了時のたわみ値も同等であった。両供試体ともに走行回数 10 万回程度でたわみの増加傾向が変化しているが、この時点で鋼板の付着切れが進展していることが観察されており、その影響であると考えられる⁹⁾。なお、継ぎ手位置のたわみも両供試体で差異が無いことを確認している。ここで、図-9(a)のかすがい継ぎ手供試体の 30 万回走行時点でデータが不連続となっているが、これは軌道に敷設する鋼板を取り替える際に試験機制御エラーが生じてデータが取得できなかったためである。

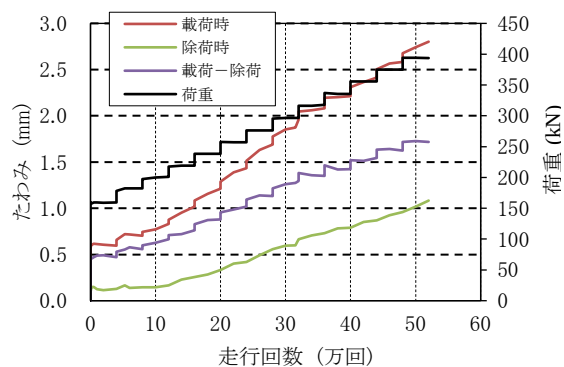
(2) 継ぎ手部の変位（開き）の比較

継ぎ手部分に設置したパイ型変位計による変位の推移を図-10 に示す。それぞれの値は全て載荷時から除荷時を減じた弾性成分で示している。図中の PI-1、PI-2 は底鋼板と添接鋼板のずれを確認するためのものであり、図-4 に示すように輪荷重走行位置の床版下面に設置した。また、継ぎ手の開き、相対水平変位を確認するものとして、かすがい継ぎ手の PI-3 は供試体側面の目地を挟むように設置し、重ね継ぎ手供試体では後打ちコンクリートとの打継ぎ部を跨ぐように床版中央側と端部側に PI-3、PI-4 を設置している。

図-10(a)に示すかすがい継ぎ手供試体では、添接鋼板の中央側で引張方向の、端部側で圧縮方向の変位となっており添接鋼板自体が端部側にずれるような挙動となっている。図-10(b)の重ね継ぎ手供試体では、添接板の中央側の変位は少ないが、端部側で引張方向の変位が生じていることから、端部側のみ滑りが生じていることが認められる。ただし、試験終了時点の 392kN 載荷時でも 0.02mm 程度の変位であることから、通常の使用状態では継ぎ手性能として問題は無いと思われる。なお、両供試体ともに継ぎ手側面に設置したパイ型変位計の値をみると、開き等の相対変位は生じていないことが分かった。なお、図中の変位データの不連続は、試験機制御エラー

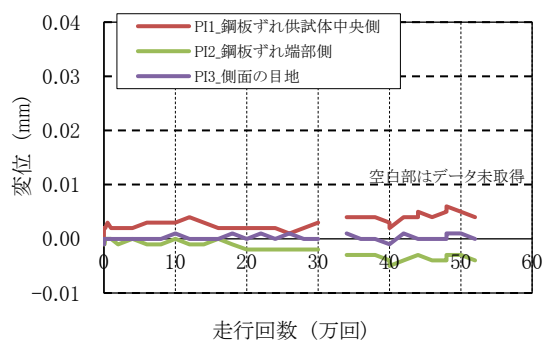


(a) かすがい継ぎ手供試体

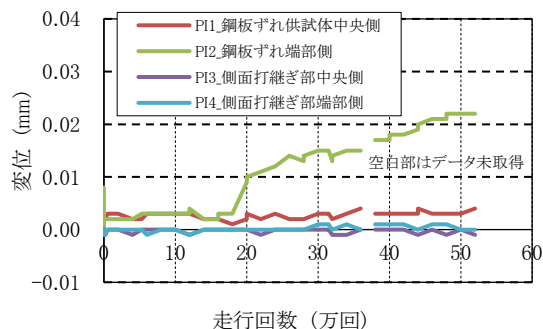


(b) 重ね継ぎ手供試体

図-9 輪荷重走行試験でのたわみの推移



(a) かすがい継ぎ手供試体



(b) 重ね継ぎ手供試体

図-10 輪荷重走行試験での継ぎ手部の挙動

によるデータ未取得部である。

輪荷重走行試験では、かすがい継ぎ手供試体と重ね継ぎ手供試体のたわみやひずみ、継ぎ手部の挙動に有意な差は無く、同等の継ぎ手性能であることが認められた。

(3) コンクリート強度を加味した走行回数

輪荷重走行試験の結果では破壊に至っていないので、本供試体の疲労耐久性は高いものと推察される。しかしながら、かすがい継ぎ手および重ね継ぎ手の両供試体のコンクリート圧縮強度は走行試験時に $f_{ck}=60\text{kN/mm}^2$ 以上と高いことから、これが床版の疲労耐久性にも影響を及ぼしている可能性がある。よって、既往研究³⁾で示されている同様の補正を行って疲労耐久性を評価することにした。補正の手順は、始めに階段載荷の結果を既往の S-N 関係の傾きにより一定荷重載荷での走行回数に換算する。つぎにその走行回数と材料試験結果のコンクリート圧縮強度によるはり化した床版の押し抜きせん断耐力 (P_{sx}) と補正するコンクリート強度による P_{sx} から S-N 関係式に戻すことでコンクリート強度の影響を補正した階段載荷の走行回数となる。

図-11 に補正前と補正後の荷重と走行回数を示す。図には既往研究³⁾での平成 8 年以降の道路橋示方書に準拠した鉄筋コンクリート床版(RC8)の試験結果の範囲も示す。本供試体の試験結果を、疲労耐久性が明らかになっている鉄筋コンクリート床版(RC8)と相対的に比較すると、かすがい継手を有する鋼・コンクリート合成床版は道路橋示方書レベルで要求されている疲労耐久性を有していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ずれ止めを高力ボルトとした鋼・コンクリート合成床版に用いる簡易な継ぎ手構造として、加工鉄筋とエポキシ樹脂モルタルから構成されるかすがい継ぎ手の耐荷性能および疲労耐久性を、はり供試体による基礎実験と実物大床版供試体による輪荷重走行試験を実施して評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) はり試験の結果、継ぎ手の影響でたわみは継ぎ手無しよりも大きくなるが、その分布が対称形であることから弱点になるものではないことが認められた。また、たわみの弾性成分の推移からも剛性の変化は認められていない。さらに、ひずみの傾向から継ぎ手鉄筋が有効に荷重を伝達していることから、継ぎ手構造としての性能に問題は無いことが確認された。

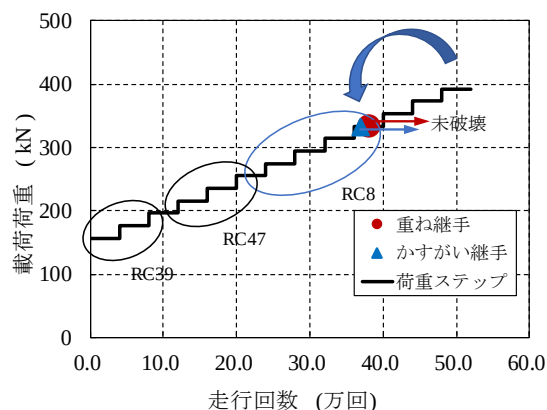


図-11 コンクリート強度を補正した破壊走行回数

- (2) 輪荷重走行試験の結果、かすがい継ぎ手供試体と重ね継ぎ手供試体の疲労耐久性は同等であった。添接板や目地部分の変位も問題となる異常は確認されていない。供試体コンクリートの強度補正後の走行回数も既往研究による平成 8 年以降の道路橋示方書に準拠した鉄筋コンクリート床版と同等であった。よって、継ぎ手も含め合成床版としての疲労耐久性は現行の要求性能を満足できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 佐藤昌志, 中井健司, 松井繁之, 曳村俊貴, 藤井康平: 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 回年次学術講演会概要集, pp.882-883, 1996.9.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, p.277, 2012.3.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国総研資料第 28 号, pp.7-49, 2002.3.
- 4) 加藤暢彦, 小野康文, 若菜和之, 城岡英敏, 平幸二: 高力ボルトの頭部を回して締付ける場合の軸力管理方法, : 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, pp.116-117, 2001.10.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋・鋼部材編, p.286, 2017.11.
- 6) 野口堅冬, 安東祐樹, 横山広: 高力ボルトをずれ止めを使用した鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験, 土木学会第 73 回年次学術講演概要集, pp.733-734, 2018.8.