

論文

鋳鉄金物を用いた改良型 RC ループ継手を有する プレキャスト PC 床版の疲労耐久性

白井悠吾*, 久保圭吾**, 鍵村俊哉***, 妹川寿秀****, 藤原俊之*****, 松井繁之*****

*博士 (工学), ヒノデホールディングス (株), 技術開発グループ
(〒849-0101 佐賀県三養基郡みやき町大字原古賀字岩崎)

** 博士 (工学), 宮地エンジニアリング (株), 設計・開発第2部
(〒550-0001 大阪市西区土佐堀1丁目4番11号)

*** エム・エムブリッジ (株), 技術部設計グループ (〒733-0036 広島県広島市西区観音新町1-20-24)

**** (株) 富士ピー・エス, 技術センター設計グループ (〒136-0071 東京都江東区亀戸-26-10)

***** 日之出水道機器 (株), 建築・土木マーケティンググループ
(〒849-0101 佐賀県三養基郡みやき町大字原古賀字岩崎)

***** 工博, 大阪工業大学客員教授, 大阪大学名誉教授 (〒565-0824 大阪府吹田市山田西4丁目-6-4)

プレキャスト PC 床版の新しい継手構造の一つとして, 鋳鉄金物を介在させた RC ループ継手を開発した. 本継手は従来の RC ループ継手と比べ, 必要継手長の減少およびループ鉄筋内部に挿入する鉄筋を省略することで, 施工性を向上させた. 本研究は, 橋軸方向継手(横目地)に本継手を適用した試験体にて, NEXCO 試験法 442 に準じた輪荷重走行試験を実施し, 100 年相当の疲労耐久性を有しており, 従来のプレキャスト PC 構造と同様の破壊形式を有することを確認した.

キーワード: PCaPC 床版, ループ継手, 鋳鉄金物継手, 輪荷重走行試験

1. はじめに

我が国の約 73 万橋の橋梁のうち, 建設後 50 年を経過した橋梁の割合は, 2033 年には約 61% となり, 道路橋の老朽化が問題となっている¹⁾. そのため高速道路会社を中心とした大規模更新が全国で行われており, 損傷した床版を耐久性に優れるプレキャスト PC 床版 (以下, PCaPC 床版) に取替える工事が数多く実施されている. PCaPC 床版は床版同士を一体化させるため, 橋軸直角方向に沿った継手の接合部 (以下, 間詰め部) を設けており, 一般的に RC ループ継手構造²⁾が用いられている. しかし, RC ループ継手は, 施工時にループ鉄筋の内部に鉄筋を挿入する必要があるため, 工程短縮および施工の省力化が求められている.

著者らは PCaPC 床版の間詰め部における施工の省力化を目的とした改良型 RC ループ継手構造 (以下, 本構造) を開発している^{3),4),5)}. 本構造は, 鋳鉄金物を介在させたループ継手となっており, RC ループ継手と比べて, ループ鉄筋内部への鉄筋挿入が省略可能なこと, 鋳鉄金物は間詰め部 1m あたり 5 分程度で設置可能なこと³⁾ から, 施工速度は RC ループ継手と同程度である. これまでの

検討により, 施工性に問題がないこと³⁾, 曲げに対して十分な耐荷性能を有していること^{4),5)}を確認しており, 実用化にあたって, 疲労耐久性の検討が必要となっている.

本研究では, 本構造を有した PCaPC 床版に対して, 輪荷重走行試験を実施し, 100 年相当の疲労耐久性を有していることを確認した. また, 本構造を有する PCaPC 床版の破壊性状および, 鋳鉄金物形状の違いが疲労耐久性に及ぼす影響を検討した.

2. 輪荷重走行試験の概要

2.1 接合構造の概要

(1) 本構造の概要

本構造の概要図を図-1 に示す. 本構造は RC ループ

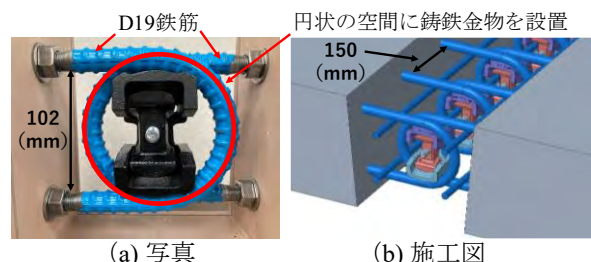
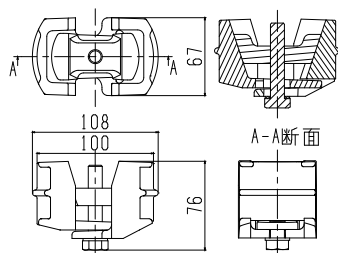
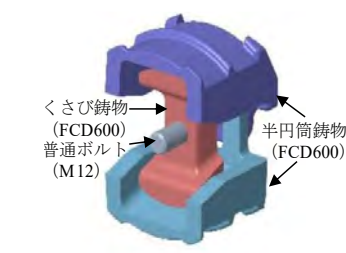


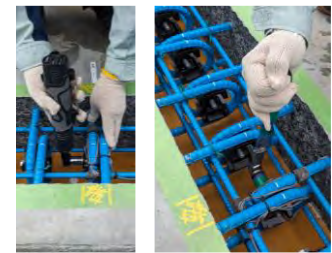
図-1 改良型 RC ループ継手構造 (本構造)



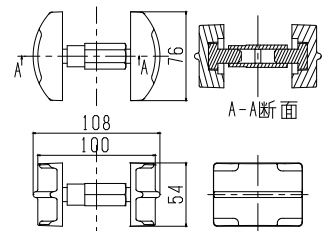
(a) 鋳鉄金物 (K 型) の図面



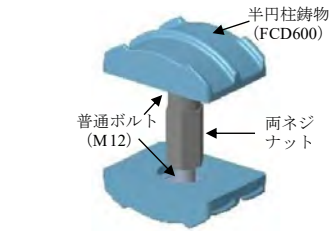
(b) 鋳鉄金物 (K 型) のアイソメ図



(c) 鋳鉄金物 (K 型) の設置状況



(d) 鋳鉄金物 (T 型) の図面



(e) 鋳鉄金物 (T 型) のアイソメ図



(f) 鋳鉄金物 (T 型) の設置状況

図-2 鋳鉄金物 (単位: mm)

表-1 材料測定値

部材	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	伸び (%)	部材	材齢 (day)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
主鉄筋(D13)	SD345	383	549	185000	23	コンクリート(床版部)	28	50.2	31300
配力筋(D19)	SD345	392	564	189000	25	コンクリート(間詰部)	28	52.2	33000
PC鋼材 (φ 23B種1号)	SBPR 1080	1056	1140	201000	14				
鋳鉄金物	FCD600-3	434	698	-	10.4				

継手同様に、左右から突出した向かい合う2つのループ鉄筋を用いるが、ループ鉄筋の重ね長さを短くし、重ねたループ鉄筋同士で形成される空間を円状とすることで間詰幅を狭めた(図-1(a))。ループ鉄筋内部に挿入する鉄筋の役割を鋳鉄金物に置き換え、重なったループ継手部分に配置した鋳鉄金物が鉄筋同士を直接連結させ、鉄筋軸力を伝達する構造となっている(図-1(b))。なお曲げ試験にて、本構造を用いた構造でも、終局挙動は圧縮側コンクリートの圧壊となり、従来のRCループ継手構造と同様の破壊形態となることを実験及び解析にて確認している^{4), 5)}。鋳鉄金物は2.1(2)にて後述するくさび型(以下、K型)およびターンバックル型(以下、T型)を用いた。

(2) 鋳鉄金物の概要

本構造に使用した鋳鉄金物を図-2に示す。K型は、図-2(b)に示すように5点(半円筒鋳物×2、くさび鋳物、普通ボルト、ワッシャー)で構成されており、ボルトを締め付けることで中央のくさび鋳物が両端の半円筒鋳物を押し広げループ鉄筋の内部に固定する構造となっている。

また、K型は半円筒鋳物とボルト接合部付近のコンクリート充填性に懸念があったことから、コンクリート充填性を向上させたT型の開発も行った。T型は図-2(e)に示すように5点(半円柱鋳物×2、普通ボルト×2、両ネジナット)で構成され、中央の両ネジナットを回転させ、

半円柱鋳物に固定された普通ボルト(右ねじと左ねじ)とともに半円柱鋳物が可動し全体が伸長することで、ループ鉄筋の内側に固定する構造となっている。

鋳鉄金物の設置時における作業性向上のため、出荷時は予め一体化した状態に組み上げた状態とし、施工時は1部品となっている。設置時は隣接させたループ鉄筋内部に鋳鉄金物を配置後、K型は電動ラチェットレンチで仮締め後にトルクレンチで本締め(図-2(c))、T型はラチェット式モンキーレンチで仮締めおよび本締めを行う(図-2(f))。ボルトの締め付けはトルク管理とし、コンクリート締め固め用のバイブレータが直接鋳鉄金物へ接触しても鋳鉄金物がループ鉄筋から脱落しないよう、締め付けトルクは施工試験³⁾にて設定した30 N・mとした。

2.2 試験体製作

試験体の概要図を図-3に示す。試験体形状はNEXCO試験方法 第4編 構造関係試験方法⁹⁾の試験法442(以下、試験法442)に準拠し、幅2.8m、床版支間中央部における床版厚を220mmとした。また、本試験では仕様の異なる2種類の鋳鉄金物に対してそれぞれの間詰部を評価するため、2つの間詰部を1.2m間隔で設置し、試験体の長さは6.1mとして、試験法442に準拠するように試験条件を検討した(2.3(2)に後述)。

コンクリートの設計基準強度は床版部、間詰部ともに50 N/mm²とし、鉄筋はSD345のエポキシ樹脂塗装鉄筋JSCE-E102⁷⁾に適合するものを、PC鋼材はPC鋼棒SBPRB

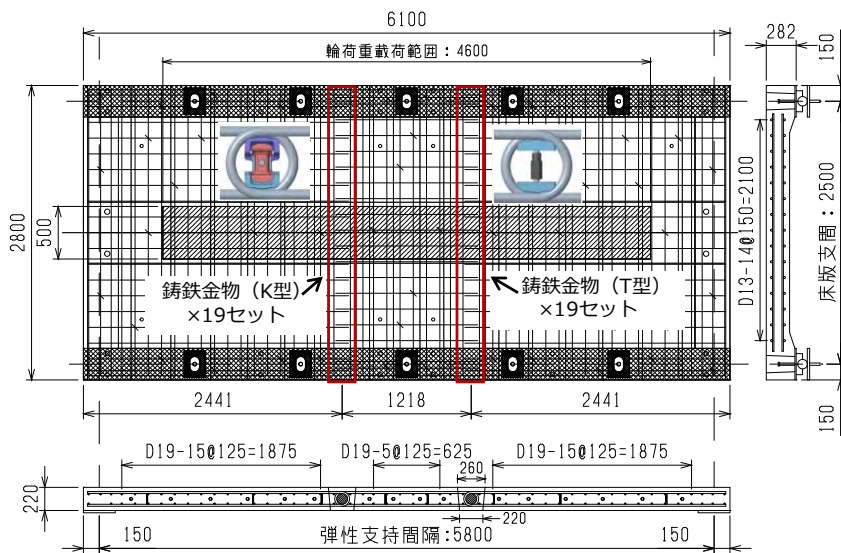


図-3 試験体の概要図 (単位: mm)



図-4 輪荷重試験機

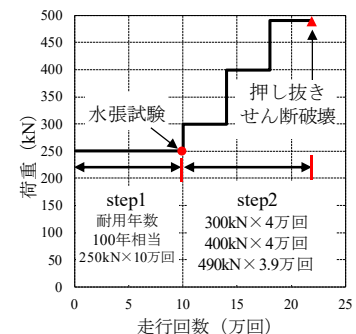
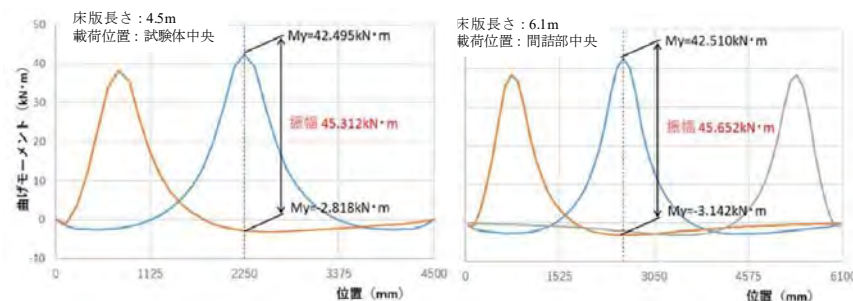


図-5 載荷荷重ステップと走行回数



(a) 試験法 442 中央載荷

(b) 本試験体 間詰部 (K) 載荷

図-6 床版載荷時における曲げモーメント分布

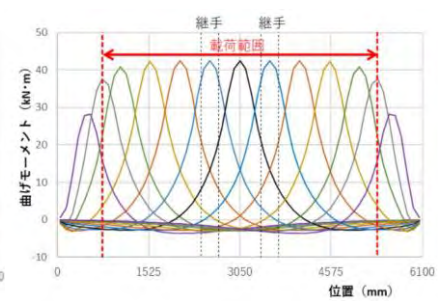


図-7 輪荷重の移動による

曲げモーメント分布

種φ23を使用した。主鉄筋の配筋はD13を125ピッチ、配力筋の配筋はD19を150ピッチとしている。使用した各材料の測定値を表-1に示す。

試験体製作は、プレキャスト床版部を3分割で打設後、湿潤養生（蒸気養生無し）を行い、所定の強度を確認したのちに、ポストテンション方式にてプレストレスを導入した。なお、PC鋼材本数および導入プレストレスは、試験法442の試験体製作例（ポストテンション式PC鋼棒φ23×16本）を参考に、着目断面である床版中央において、所定のプレストレス量が得られるよう設計を行い、導入緊張力は700 N/mm²とした。プレストレス導入後、間詰部へ铸铁金物を設置してから普通コンクリート（膨張材入）を打設し、所定の強度が得られるまで湿潤養生を行った。最後に、試験体表面の輪荷重走行位置にて不陸の大きい箇所に対し、グラインダー等により削って表面を整えた。

2.3 試験方法

(1) 輪荷重試験機

試験は（株）G&U 技術研究センターが保有している輪荷重走行試験機を使用した。試験機を図-4に示す。試験機はクランク式試験機で、載荷板の大きさは0.5 m × 0.2 m、走行時の最大荷重は490 kNである。

(2) 試験条件および計測項目

試験は試験法442に準じて行い、床版支間2.5 mの単純支持とし、橋軸方向は床版端部でH形鋼（H300×300×10×15）による弾性支持とした。載荷荷重ステップと走行回数の関係を図-5に示す。載荷荷重および走行回数は、PC床版の耐用年数100年相当の疲労耐久性評価指標として提案⁹⁾されている250 kN×10万回（以下、step1）後、水張試験を実施した。その後は階段状漸増載荷（以下、step2）として、300 kN×4万回走行、つぎに400 kN×4万回走行、最後に試験機の最大荷重である490 kNまで増加させて終局破壊に至るまで載荷を行った。

間詰部を1.2 m間隔で2箇所配置し、試験体長さを6.1 mとしたことから、間詰部への作用曲げモーメントが試験法442と同等であることを確認するため、本試験体の間詰部へ作用する曲げモーメントを算出した。結果を図-6に示す。図-6より、本試験体の間詰部に直角に作用する曲げモーメントは試験法442の幅で作製した試験体とほぼ同等であり、間詰部へ作用する曲げモーメントおよびせん断力はそれぞれ独立していることを確認した。また、図-7に示す移動載荷による最大曲げモーメント分布より、載荷範囲の端部では最大曲げモーメントは若干低下するものの、間詰部近傍と床版中央の最大曲げモーメントは同程度であったことから、間詰部の位置が床版中央と異なることによる影響がないことを確認した。

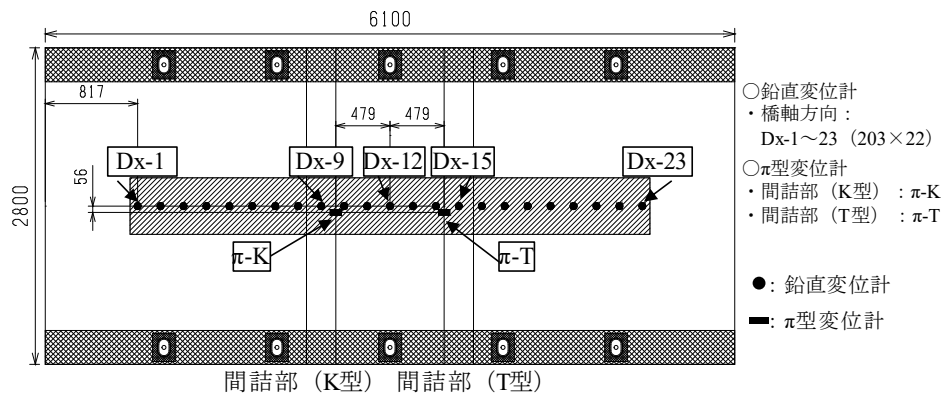


図-9 変位計およびπ型変位計設置位置（単位：mm）

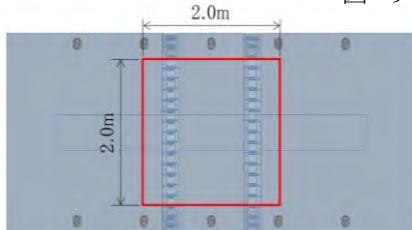


図-8 水張試験の水張範囲

載荷範囲は図-3に示すように、長さ4.6 m、幅0.5 mとした。これは、輪荷重が載荷範囲の端部に移動した際に、間詰部に曲げモーメントが作用しない載荷範囲としている。なお、間詰部同士の間隔は間詰部へ輪荷重が作用した際、隣の間詰部へ影響を与えることが無いような距離の事前検討を行った結果、間詰部を1000mm離れた場合、間詰部載荷時に反対側の間詰部に対して曲げモーメントがほとんど作用していないことを図-7にて確認したため、1000mmとしている。輪走行は試験体上の載荷範囲へ載荷板を一行に並べ、軌道上に鉄輪を往復させて行った。

水張試験は、水張範囲に2つの間詰部が十分収まるよう、床版中央から橋軸方向に±1.0 m、橋軸直角方向に±1.0 mの範囲へスポンジ等で止水壁を設け、最低水深5 mm以上となるよう水を満たした状態で6時間以上静置し、床版下面からの漏水有無を確認した。水張範囲を図-8に示す。図-9に鉛直変位計およびπ型変位計の設置位置を示す。試験中は表-2に示すタイミングにて床版中央およびそれぞれの間詰部中央に輪荷重と同じ荷重で静的載荷を実施し、床版たわみおよび床版部と目地部の境界における目地開き量の計測を行った。床版たわみは鉛直変位計、目地開き量はπ型変位計を用いて計測した。

3. 試験結果

3.1 たわみ

step1での各載荷位置における走行回数-活荷重たわみ関係を図-10に、床版中央載荷時における床版中央(Dx-12)のたわみと走行回数の関係を図-11に示す。なお、総たわみは各荷重段階における最大荷重時のたわみ、残留たわみは各荷重段階における無荷重状態(載荷直前)に計測したたわみ、活荷重たわみは総たわみから

表-2 静的載荷の実施タイミング

載荷	荷重	走行回数（回）					
ステップ	(kN)	0	1000	10000	40000	80000	100000
step 1	250	○	○	○	○	○	○
step 2	300	○	○	-	○	-	-
	400	○	○	-	○	-	-
	490	○	○	-	-	-	-

残留たわみを差し引いた値を示している。

図-10では、床版中央載荷時(Dx-12)、間詰部(K型)(以下、間詰K)中央載荷時(Dx-9)、間詰部(T型)(以下、間詰T)中央載荷時(Dx-15)における最大鉛直変位を比較している。結果、step1において床版中央の活荷重たわみは250 kN×0万回の載荷時点で、0.8 mm、250 kN×10万回走行後は0.97 mmであり、活荷重たわみはほぼ増加していなかったことを確認した。

また、各間詰部中央載荷時における活荷重たわみは、間詰K(Dx-9)と間詰T(Dx-15)にて同程度の値を示しており、床版中央載荷時と同様に、step1にてほとんど増加していないことを確認した。なお、各間詰部の活荷重たわみは床版中央と比べて大きくなっているが、これは各間詰部がRC構造であるのに対し、床版中央はPC床版一般部となっていること、床版中央は床版端部に比べてPC鋼材ピッチが小さいことから、本試験体では間詰部よりも床版中央の方が、剛性が高くなっているためと考えられる。

step1の載荷完了後に水張試験を実施し、床版下面からの水漏れが無かったことから、本試験体が100年相当の疲労耐久性を有していることを確認した。

水張試験終了後、階段状漸増載荷を行った結果、図-11に示すように載荷回数の増加に伴って活荷重たわみは増加した。特に、400 kN(14万回)以降に大きく増加し、載荷回数21.9万回(490 kN×38,682回)にて、間詰T側の床版一般部で押し抜きせん断破壊が生じた。

次に、床版中央載荷時における橋軸方向の活荷重たわみ分布を図-12に示す。図において、凡例はたわみ計測時の載荷荷重および走行回数を示している。なお、step1の結果とstep2の結果を比較するため、step2の計測結果は、250 kNを載荷荷重で除した値を係数として活荷重たわみへ乗じて補正した。

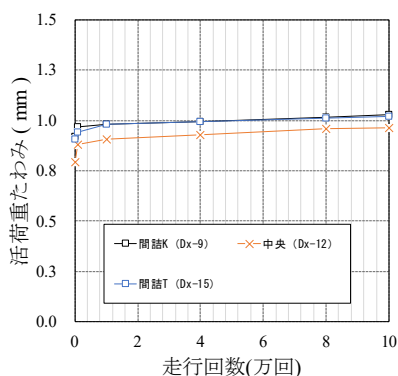


図-10 荷重 - 活荷重たわみ関係 (step1)

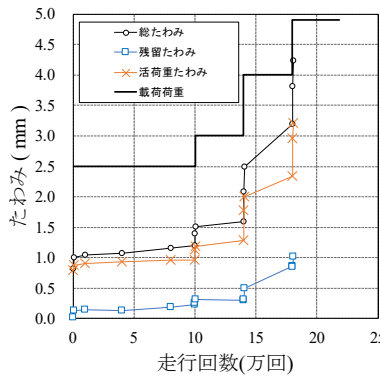


図-11 荷重 - たわみ関係 (Dx-12)

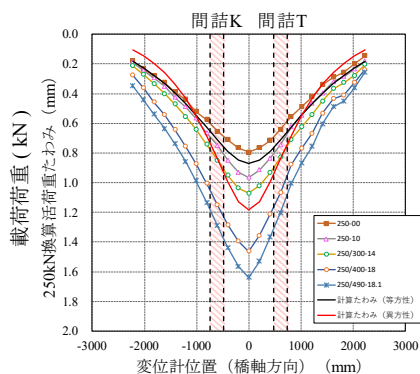


図-12 活荷重たわみ分布

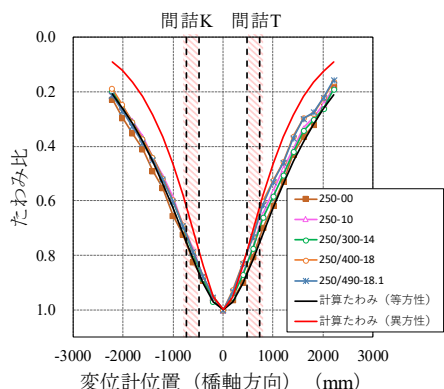


図-13 橋軸方向の活荷重たわみ比

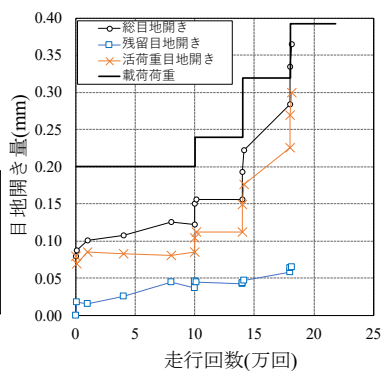


図-14 目地開き量 (π -K)

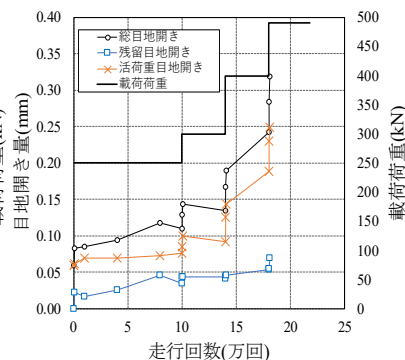


図-15 目地開き量 (π -T)

また、考察のため試験結果以外に解析的に算出したたわみ分布 (計算たわみ (等方性), 計算たわみ (異方性)) も示している。これらのたわみ分布は完全弾性の RC 床版を仮定して算出している。計算たわみ (等方性) は、初期状態を想定し、床版全断面においてコンクリートにひび割れが生じておらず、全断面が引張側コンクリートも有効であると仮定して算出したたわみ分布である。計算たわみ (異方性) は、使用限界状態を想定し、橋軸直角方向断面はプレストレスを導入しているため、等方性と同様にコンクリートへひび割れが生じておらず全断面が引張コンクリートも有効と仮定、橋軸方向に直角な断面は、RC 構造のためひび割れを考慮し、引張コンクリートを無視して算出したたわみ分布である。

図-12 より、step1 終了時において活荷重たわみ分布は橋軸方向に対してそれぞれ中央を対称に分布していることから、間詰 K および間詰 T は床版としての連続性を有していることを確認した。また、step2 においては、荷重の増加に伴いたわみが増加する傾向にあり、400 kN 以降は計算たわみ (異方性) よりも活荷重たわみ分布が大きくなっている。これは図-18 に示す橋軸方向のひび割れ状態図からもわかるように、橋軸方向にも多数のひび割れが生じ、剛性が低下しているためであり、490 kN 載荷時においても各間詰部において活荷重たわみ分布が不連続となっていないことから、各間詰部は、局所的な劣化・損傷は発生していなかったと考えられる。

次に、本構造を有する PCaPC 床版の異方性度を確認するため、図-12 に示した各荷重における活荷重たわみ

分布に対して、活荷重たわみの最大値が 1.0 となるように比をとって補正した活荷重たわみ比を図-13 に示す。図-13 より、輪荷重載荷によるコンクリートのひび割れの進展に伴い、活荷重たわみ比が計算たわみ (異方性) に近づく傾向が見られるが、step1 終了時の活荷重たわみ比は、初期状態を仮定した計算たわみ (等方性) と概ね一致していることを確認した。このことから、本構造を有する PCaPC 床版は 100 年相当の疲労荷重を受けた後も等方性版として挙動していると考えられ、床版設計における従来の設計曲げモーメント式の適用が可能と考えられる。また、床版一般部のたわみ比を間詰 K 側と間詰 T 側で比較した場合、間詰 T 側の活荷重たわみ比の方が、荷重増加に伴って計算たわみ (異方性) に近づいていたことを確認した。

3.2 目地開き

π 型変位計により計測した各間詰部における走行回数 - 目地開き量の関係を図-14 および図-15 に示す。Step1 終了時にて、総目地開き量は間詰 K 側で 0.12 mm、間詰 T 側で 0.11 mm であり、さらに残留目地開き量はいずれも 0.05 mm 以下と極めて小さく、一般的なひび割れ幅の制限値 0.20 mm 以下であったことから、目地部が一体性を有していることを確認した。また、step2 において載荷荷重の増加に伴い目地開き量は増加するものの、間詰 K 側と間詰 T 側で目地開き量は同程度であり、鑄鉄金物による差は生じなかった。

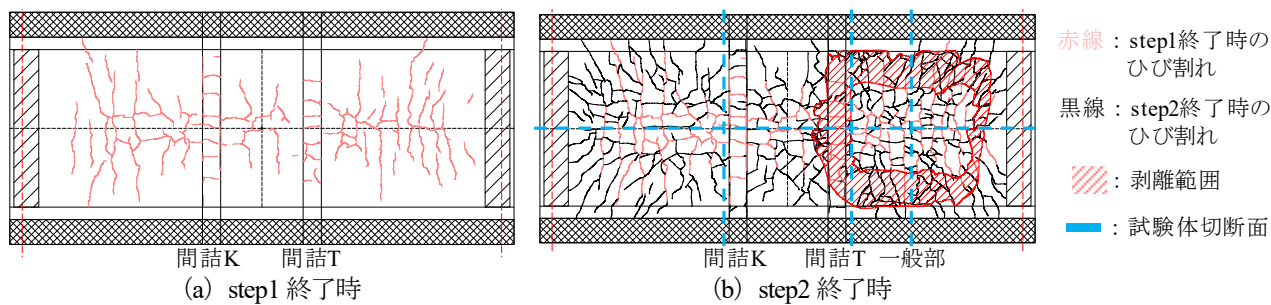


図-16 試験終了時の試験体下面ひび割れ進展図

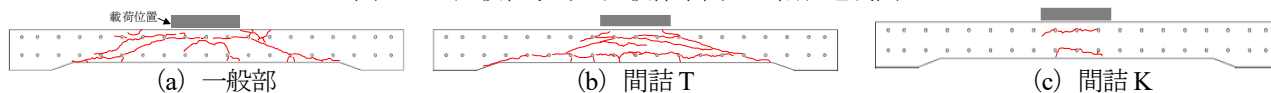


図-17 切断面におけるひび割れ状態（橋軸直角方向）

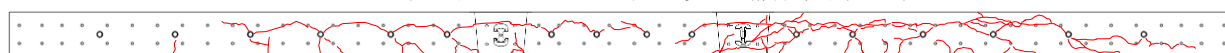


図-18 切断面におけるひび割れ状態（橋軸方向）

3.3 ひび割れ性状

試験体下面のひび割れ状態と剥落範囲を図-16、試験体切断面のひび割れ観察結果を図-17 および図-18 に示す。図-16(a)より step1 終了時のひび割れは、床版一般部は主に橋軸直角方向に生じていた。間詰部は橋軸直角方向のひび割れが生じており、これは間詰部に挿入した主鉄筋が不足していたため、初期の荷重でひび割れが生じたと考えられる。一方、試験終了時のひび割れは間詰 T 側の一般部では亀甲状に分布しており、図-17 (a) および図-18 より間詰 T 側の一般部は床版上端から下端に向かって台形状にひび割れが進展していた。また、図-17 (b), (c) より、間詰 T 側の近傍は一般部の押し抜きせん断破壊の影響を受けていたが、間詰 K 側の近傍はひび割れがほとんど生じていないこと、図-18 より間詰 T 側の床版下面において、PC 鋼材間隔程度のひび割れ間隔を確認したことから、本試験体は従来の PCaPC 床版⁸⁾と同様に梁状化が生じ、間詰 T 側の床版一般部にて押し抜きせん断破壊により破壊したと考えられる。

490kN 荷重（走行回数 18.1 万回）時点まで、たわみ性状や目地開き量は各間詰部で同程度だったことから、step1 終了時には、各間詰部の剛性は同程度であり、铸铁金物の違いによる影響は無かったと考えられる。また、試験終了後に試験体切断面を観察した結果、各間詰部にて試験終了後においてもコンクリートに埋め込まれた铸铁金物は損傷していなかったことを確認した。铸铁金物の違いによる破壊性状への影響の検討は、今後の課題としている。

4. まとめ

- 1) 250kN×10 万回の移動荷重終了後の水張試験にて、6 時間経過後も床版下面から漏水が確認されなかったことから、改良型 RC ループ継手を有する PCaPC 床版は 100 年相当の疲労耐久性を有していることを確認した。

- 2) 改良型 RC ループ継手を有する PCaPC 床版は step1 終了時において断面全体で等方性を有しており、床版設計における従来の設計曲げモーメント式が適用可能であると考えられる。
- 3) 水張試験実施後に階段状漸増荷重を実施した結果、21.9 万回付近（490 kN×38,682 回）で間詰部（T 型）側の床版一般部にて押し抜きせん断破壊が生じ、RC ループ継手を有する従来の PCaPC 床版と同様の破壊形態となることを確認した。
- 4) ステップ 1 終了時に、間詰部（K 側）および間詰部（T 側）は同程度の剛性を有しており、铸铁金物の違いによる影響は無かった。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報（令和 4 年度），https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/r04/r04_08maint.pdf（参照日 2024.6.19）。
- 2) 東日本、中日本、西日本高速道路株式会社：設計要領第 2 集 橋梁保全編 平成 29 年 7 月版，2017.9。
- 3) 山下良，松井繁之，栗原正幸，出口哲義，村上恒平，藤原俊之：铸铁金物を用いた新しいループ継手における固定構造の検討，公益社団法人土木学会，第 79 回年次学術講演会 CS19-14，2024.9。
- 4) 篠原紀夫，松井繁之，松岡充，鍵村俊哉，村上恒平，：藤原俊之：铸铁を用いた新しい床版継手構造における曲げ性能の評価その 2，公益社団法人土木学会，第 78 回年次学術講演会 CS19-10，2023.9。
- 5) 篠原紀夫，畠山繁忠，鍵村俊哉，藤田学：铸铁を用いた新しい床版継手構造における曲げ性能の評価，公益社団法人日本コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.739-744，2024.6。
- 6) 東日本，中日本，西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法，2020.7。
- 7) コンクリート委員会：コンクリートライブラリー112 エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]，土木学会，pp.29-30，2003.11。
- 8) 後藤俊吾，長谷俊彦，本間淳史，平野勝彦：PC 床版の疲労耐久性評価方法の提案，公益社団法人土木学会，構造工学論文集 Vol.66A，pp.762-773，2020.3。

（2024 年 7 月 12 日受付）