

報告

プレキャストPC床版の新しい接合方法に関する研究

川口昇平*, 守屋裕兄**, 三澤孝史***, 御器谷直子****, 坂井悟******, 松井繁之*****

* 工修, 株式会社奥村組, 技術本部技術戦略課 (〒100-7022 東京都千代田区丸の内 2-7-2 JPタワー22階)

** 工修, 株式会社奥村組, 土木本部土木・リニューアル技術部 (〒545-8555 大阪府大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

***工博, 株式会社奥村組, 技術本部技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

****工修, 株式会社奥村組, 技術本部技術研究所土木研究グループ (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

*****昭和コンクリート工業株式会社, 営業本部開発部開発課 (〒500-8703 岐阜県岐阜市香蘭 1-1)

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

道路橋のプレキャストPC床版の施工性向上を目的として, 矩形スパイラル筋によりループ筋の周囲を拘束することで継手部の接合力を高める機能を持つ, 新たな接合工法を開発した。PC床版で多く採用されるループ継手では, ループ筋の中へ側方より橋軸直角方向に通し筋を後挿入する作業が必要であり, その省力化が課題であった。この通し筋に替わる床版上面から挿入可能な矩形スパイラル筋による接合工法について, 輪荷重走行試験を実施し, 100年相当の交通荷重に対する耐久性を確認した。また, 静的載荷試験を実施し, ループ継手に準ずる曲げ耐力を有することを確認した。

キーワード: プレキャストPC床版, 継手構造, 輪荷重走行試験, 疲労耐久性

1. はじめに

近年, 老朽化した道路橋床版の更新工事が進められており, 工事に伴う交通規制の期間を短縮するため, プレキャスト工法の需要が高まっている。プレキャストPC床版の接合部の一般的な継手構造であるループ継手は, ループ筋の中へ橋軸直角方向の鉄筋(以下, 通し筋)を後挿入し組み立てるが, この作業のために軸体のループ継手の曲げ半径を変えたり, 挿入作業に足場を設置するなど十分な作業スペースが必要なことが施工上の課題となっている。筆者らは特殊な矩形状のスパイラル筋(以下, 矩形スパイラル筋)を床版上面からループ筋の周りを囲うように挿入して接合する, 施工性に優れた接合工法「Zスパイラル工法」(図-1)を考案した。本稿では同工法により接続したプレキャストPC床版の性能について報告する。

2. Zスパイラル工法の特徴

本工法で使用する鉄筋の形状は, ループ筋の重ね継手の外側を囲むように横長の矩形状となっている。図-2 のようにループ継手工法では側面からの通し筋の挿入が必要であるが, Zスパイラル工法で使用するスパイラル筋は, 床版上面から簡単に挿入できるため, 施工性に優れる。加えて, ループ継手では通し筋を挿入する

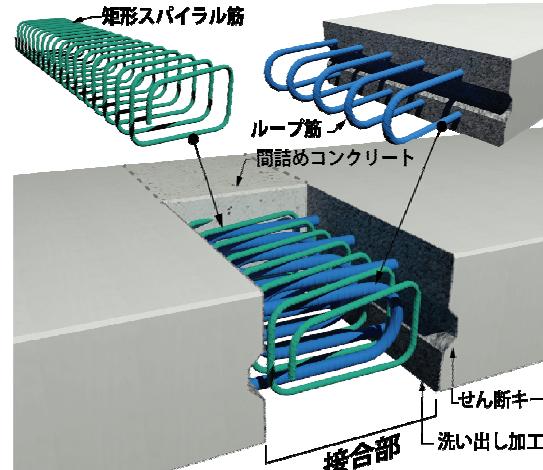


図-1 接合部イメージ図

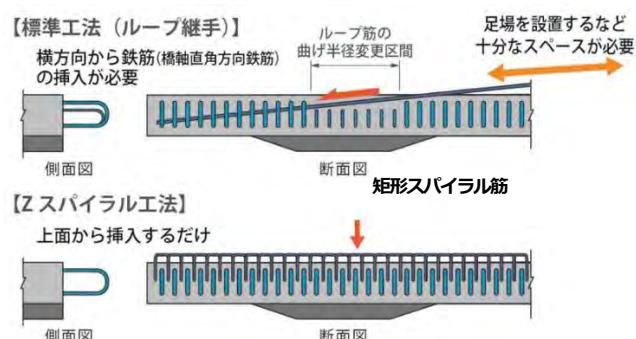


図-2 Zスパイラル工法とループ継手工法の違い

ために、ループ筋の鉄筋径や曲げ半径を変更して段差を設け、側面に足場や作業床の設置が必要となるが、Zスパイラル工法は通し筋を配置するためこれらの仮設工事が不要となるため、作業や工程の短縮の効果が期待できる。

3. 静的曲げ載荷試験

載荷時の接合部の補強鉄筋ならびにループ筋に作用する応力を把握するため、静的曲げ載荷試験を実施した、試験体は矩形スパイラル筋による継手構造(Type-A)と標準工法であるループ継手(Type-B)¹⁾の2ケースとした。図-3、図-4に試験体の概要を示す。試験体は、長さ3,200mm、幅675mm、厚さ220mmで、プレストレスを導入したPC床版2枚を中央で接合して製作した。鉄筋は、TypeA,Bともに床版部の主筋はD13を125mm間隔で配置し、配力筋(ループ筋)はD19を150mm間隔で配置した。接合部の鉄筋は、Type-AにD10を75mm間隔で1周するように加工した矩形スパイラル筋を配置し、Type-BにはD19の橋軸直角方向鉄筋6本を配置した。接合部の幅は、Type-Aが上下縁ともに280mmとし、せん断キーを有する。一方、Type-Bは上縁400mm、下縁380mmであり、テーパー形状となっている。床版部および接合部のコンクリートは床版取替の標準工法での強度仕様(設計基準強度:50N/mm²)とし、床版部は普通ポルトランドセメント、接合部は膨張材を添加した早強ポルトランドセメントを用いた。試験で使用した材料試験結果を表-1に示す。

3.1 試験方法

図-5に載荷方法を示す。載荷試験は、1基の油圧ジャッキ(容量1MN)を荷重制御し、支間2,800mm、載荷幅800mmの二点載荷で単調増加した。配力筋が降伏するまでは荷重制御により、配力筋降伏後は変位制御により載荷した。測定項目は、載荷荷重、鉛直変位、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみ及びひび割れ開口幅などである。

3.2 試験結果

(1) 載荷荷重と変位の関係

載荷荷重と変位の関係を図-6に示す。変位は支間中央の鉛直変位である。図中の降伏荷重及び設計荷重は、床版部の断面計算で引張鉄筋が降伏強度(345N/mm²)及び安全率1/3を考慮した許容応力度(140N/mm²)に達する荷重である。また、最初に配力筋が降伏した荷重を丸印で示した。荷重と変位の関係が比例の関係にある荷重40kN以下(または支間中央鉛直変位2mm以下)の初期剛性はType-AとType-Bはほぼ同等であった。Type-Aは、最大荷重まで荷重が増加し、最大耐力を維持しながら変位65mmまで変形が進んだ後、上面コン

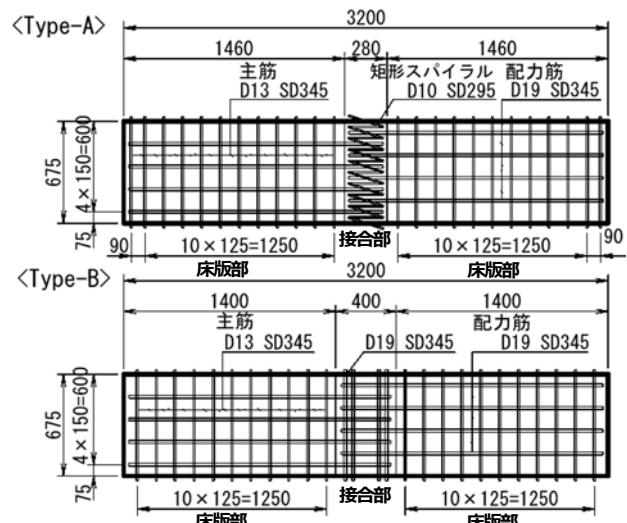


図-3 静的曲げ載荷試験の平面配筋図

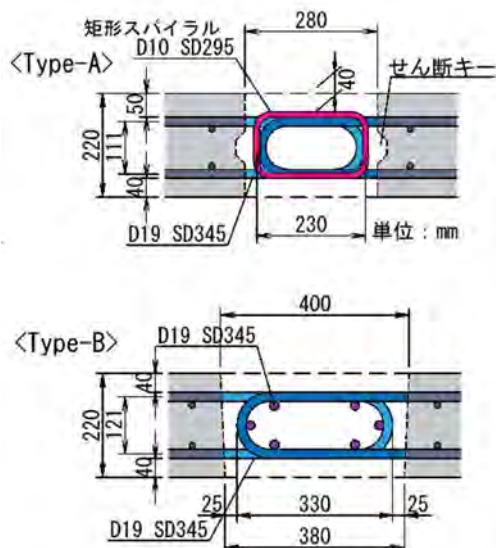


図-4 静的曲げ載荷試験体の接合部の側面配筋図

表-1 静的曲げ載荷試験に用いた材料の物性

鉄筋	降伏強度 N/mm ²	降伏ひずみ μ	弾性係数 10 ⁵ N/mm ²	引張強度 N/mm ²
D19 (SD345)	384	2163	1.78	558
D13 (SD345)	407	2282	1.79	577
D10 (SD295)	371	2085	1.78	489
コンクリート	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 10 ⁴ N/mm ²	備考
Type-A	床版部 51.8	2.64	3.52	試験日の 材料試験 結果
	接合部 61.4	3.02	3.58	
Type-B	床版部 49.2	3.43	3.37	
	接合部 60.5	3.10	3.58	

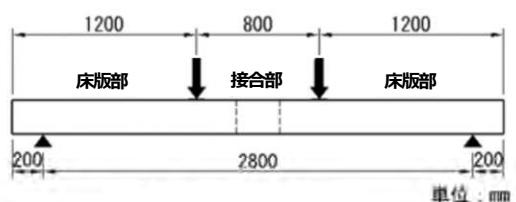


図-5 静的曲げ載荷試験の載荷条件

クリートが圧壊し、変位が 80mm を超えると荷重が低下した。一方、Type-B は最大荷重が Type-A より大きいが、変位 50mm あたりで耐荷力が低下した。その後、耐荷力を維持したまま変形が進み、変位が 80mm を超えると荷重が低下した。Type-B は橋軸直角方向の通し筋の効果により、配筋の降伏後も耐荷力が上昇するが、変位 50mm 付近でその効果を失ったと考えられる。一方、Type-A はループ筋の降伏後もスパイラル筋は降伏に至らず、一定の拘束力を維持することで、耐荷力の変化が緩やかになるという違いがある。Type-A も Type-B と同様に、設計荷重に対して十分な耐力を示しており、降伏荷重については設計値の降伏荷重相当の結果になった。

なお、次節の輪荷重走行試験の結果から、100 年相当の疲労状態での PC 床版の最大たわみ量（つまり支間中央鉛直変位）は 1.26mm であり、静的曲げ載荷試験における初期剛性域での話であることが分かる。そのため、支間中央で 2mm を超える鉛直変位は実際の PC 床版においては生じず、床版上面のコンクリートの圧壊も生じないと考えられる。道路橋の RC 床版ならびに PC 床版についてはコンクリートの押し抜きせん断による破壊が生じることが知られており、静的曲げ載荷試験において、初期剛性域を超える変形については、実際の PC 床版の挙動とは異なるものと考えられる。

（2）接合部の鉄筋ひずみ

Type-A の配筋（下筋）のひずみと載荷荷重の関係を図-7 に示す。配筋は最初に接合部と床版部の境界付近のひずみが先行し、110kN を超えたあたりで、接合部の中間部（SB3）のひずみが大きくなり、120kN を超えたあたりで 3 つの測定箇所のひずみが降伏に至った。その後、荷重の増加とともに境界近傍及び接合部のひずみが大きくなっていることから、接合部のループが有効に機能し、配筋の抜け出しが生じず、継手が十分な変形性能を有することを確認できた。

図-8 に載荷荷重と矩形スパイラル筋のひずみの関係を示す。上側（圧縮側）の計測点 SP1 では、最大荷重付近まで圧縮ひずみを示すが、配筋（ループ筋）が降伏し、変形が大きくなるとともにひずみが引張側に変わり、その後は変位の増加とともに引張ひずみが増加した。一方、下側（引張側）の計測点 SP3 では、80kN を超えたあたりから急激に引張ひずみが大きくなり、最大荷重の前後で高い引張ひずみを維持した。側部の SP2, SP4 については、変形が進むに伴い引張ひずみが増加する傾向を示した。これは、接合部の配筋が抜け出そうとする際に、配筋の曲線部の外側に配置した矩形スパイラル筋が、内部のコンクリートの変形を拘束するため、引張ひずみが増大したものと考えられる。これらの載荷時の鉄筋ひずみの挙動から、床版の変形が大きくなても、矩形スパイラル筋が配筋（ループ筋）の抜け出しに抵抗する作用を示し、有効に機能していると考えられる。

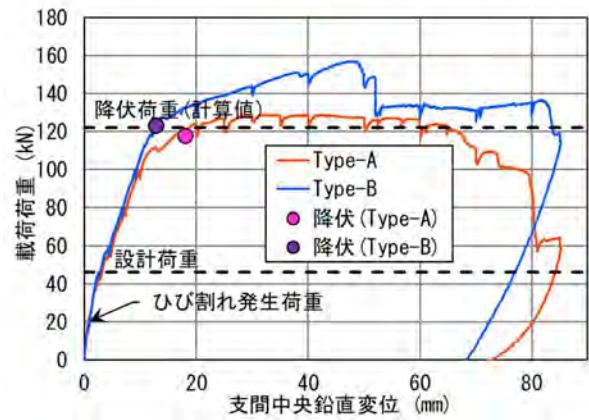


図-6 荷重と変位の関係

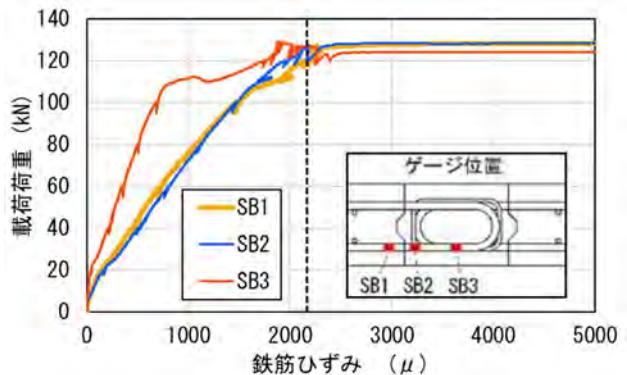


図-7 ループ筋下縁のひずみと載荷荷重の関係

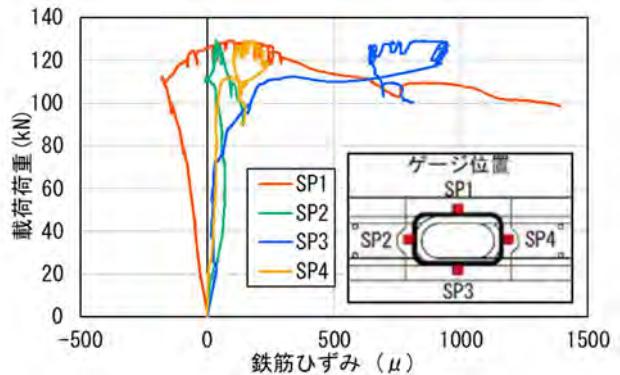


図-8 矩形スパイラル筋のひずみと載荷荷重の関係

（3）ひび割れの発生状況

図-9 に Type-A の降伏時および終局時のひび割れ状況を示す。終局時に継手と床版の境界付近の矩形スパイラル筋の外側に斜めひび割れが発生し、変形の増大にともない上面コンクリートに圧壊が生じた。一方で、Type-A の接合部側面の矩形スパイラル筋で囲まれた内側の範囲には比較的ひび割れは少なく、矩形スパイラル筋の拘束効果により内部のコンクリートと配筋が一体となっていることを確認できた。

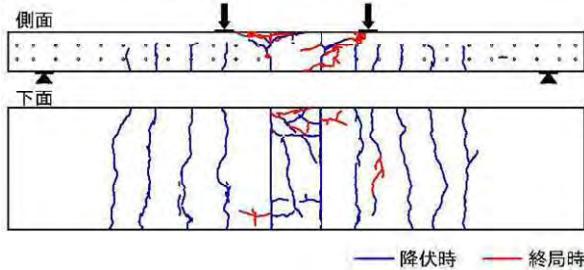


図-9 降伏時および終局時のひび割れ状況 (TypeA)

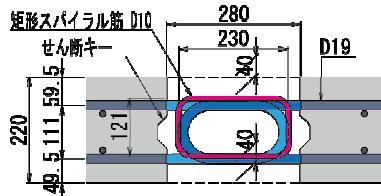


図-10 試験体の継手接合部の側面図

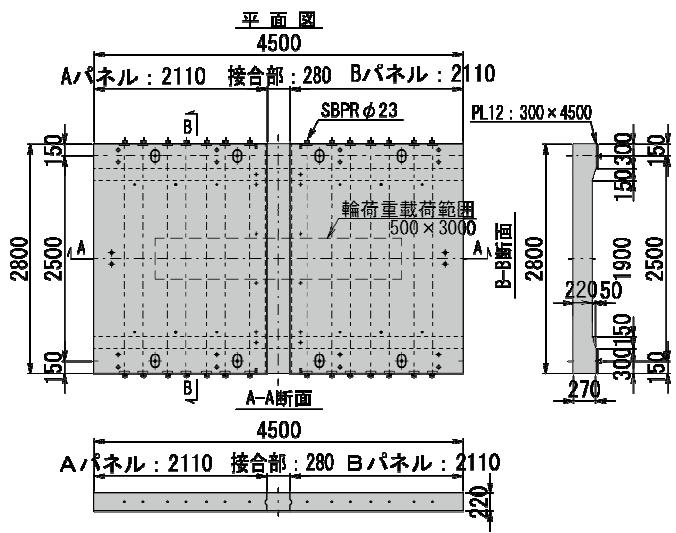


図-11 試験体形状図

4. 輪荷重走行試験

4.1 試験体および試験条件

試験体製作ならびに試験方法は NEXCO 試験方法²⁾に準じた。本試験に用いた試験体の接合部の側面図を図-10, 試験体形状図を図-11, 試験体の主要諸元を表-2 に示す。試験体の寸法は、長さ 4,500mm, 幅 2,800mm, 厚さ 220mm であり、別々に製作したプレキャスト PC パネル 2 枚 (A パネル, B パネル) の継手部に Z スパイラル工法を用いて接合した。矩形スパイラル筋は D10 鉄筋を特殊な鉄筋加工機で加工して製作した。接合部に配置する各鉄筋はエポキシ樹脂塗装を施し、接合部のコンクリートは標準工法でも使用される設計基準強度 50N/mm^2 の膨張材入り早強コンクリートを使用した。

試験に使用した輪荷重走行試験機（つくば市、国立研究開発法人土木研究所所有）の主要諸元を表-3に示す。試験体は床版支間 2,500mm で単純支持し、橋軸方向は弾性支持した。輪荷重の載荷範囲は 500mm × 3,000mm であり、直径 700mm、幅 500mm の鉄輪を走行させる。図-12 に輪荷重走行試験の試験条件を示す。荷重および載荷回数は NEXCO 試験方法²⁾に、耐用年数 100 年相当の評価試験として示されている 250kN × 10 万回の載荷を実施し、除荷後に漏水確認試験を行った。その後、破壊時までの性状を把握するため、50kN ずつ荷重を漸増して各 4 万回載荷し、22 万回以降は試験機の最大性能の 490kN で 9 万回載荷し、31 万回の載荷後の状態を最終の状態と仮定して状態の確認を行った。載荷速度は 30 回／分 (15rpm) で実施した。なお、図中の等価繰り返し回数は、荷重と繰り返し回数により求まる疲労損傷率指数³⁾を荷重 250kN 時の繰り返し回数に換算し求めた。

表-2 試験体の仕様

		仕様
寸法		L:4,500mm×W:2,800mm×d:220mm
コンクリート		床版部：普通コンクリート 接合部：早強コンクリート 膨張材 $20\text{kg}/\text{m}^3$
鉄筋	床版部	主筋 D13, 配力筋 D19 (SD345)
	接合部	矩形スパイラル筋 D10 (SD295)
PC		SBPR B 種 $\phi 23\text{mm}$

表-3 輪荷重走行試験機の主要諸元

表-3 横荷重走行試験装置の主要諸元	
項目	仕様
試験機	フレーム 高さ 5m, 長さ 8m
	フライホイール 直径 3.5m, 質量 10t
	走行車輪 鉄輪 ϕ 700mm × 幅 500mm
	載荷速度 20～50 回/分(10～25rpm)
	最大載荷力 490kN (50tf)
	走行範囲 $\pm 1.5m$ (3m)

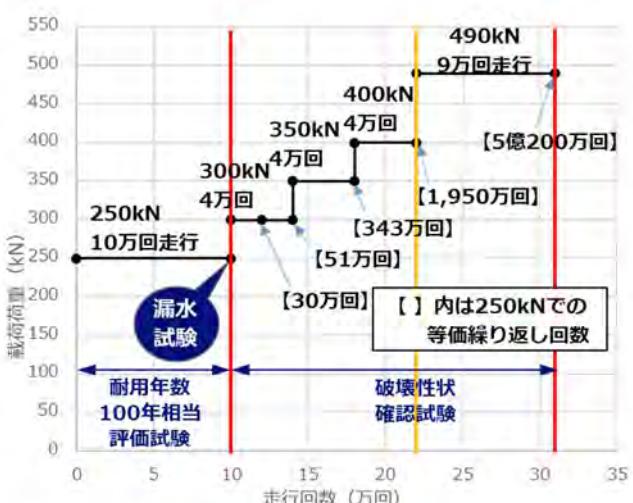


図-12 輪荷重走行試験の載荷条件

輪荷重走行試験の結果を表-4, 輪荷重走行試験の状況を写真-1に示す. 耐用年数 100 年相当の試験の結果, 除荷後の最大たわみは 0.28mm, 継手部の最大の目開き量は 0.01mm であり, 最大ひび割れ幅は床版部 0.06mm, 接合部 0.04mm であった. また載荷後の漏水試験において漏水が生じず, 十分な耐久性があることが確認された. 以下にそれぞれの試験結果の詳細を示す.

(1) 最大たわみ量

試験体中心点のたわみの推移を図-13 に示す。走行回数の増加に応じて中心点のたわみが増加する傾向がみられ、10 万回走行後の 250kN 載荷時の最大たわみ（総たわみ）は 1.26mm であり開始時 0.88mm からの増加分は 0.38mm であった。また、除荷後の最大たわみ（残留たわみ）は 0.28mm であり、総たわみから残留たわみを差し引いた活荷重たわみは 0.98mm であった。載荷時の最大目開き量は 0.08mm であり、10 万回走行後除荷時の残留目開き幅は 0.01mm であった。

(2) 最大ひび割れ幅

10万回走行までの試験過程の試験体下面のひび割れ発生状況を図-14に示す。下面では、載荷初期の0.1万回までに床版パネルに橋軸直角方向に伸びるひび割れが複数本発生するとともに接合部中央に橋軸方向のひび割れが1本発生した。1万回にかけて橋軸直角方向のひび割れ本数が増加し、接合部境界面に沿ったひび割れが発生した。その後8万回から10万回にかけてひび割れが進展するとともに、橋軸方向にひび割れが複数発生した。10万回で250kN載荷時の最大ひび割れ幅は床版部0.10mm、接合部0.08mmであり、除荷後はそれぞれ0.06mm、0.04mmとなった。當時水圧作用環境下ではない部材厚180mm以上の部材において、防水性・水密性の観点からのひび割れの部材性能への影響が小さいと評価できるひび割れ幅は0.15mm以下⁴⁾とされるが、載荷時においても0.15mmを下回った。また、床版部と接合部のひび割れに発生状況に差異がなかったことから、接合部は床版部と同等以上の疲労耐久性を有していると考えられる。なお、10万回走行時点では試験体の上面や側面にはひび割れは確認されなかった。

(3) 漏水確認試験

10万回の載荷終了後に接合部を中心とした 1000mm×2000mm の範囲にウレタン材による枠を設置し、深さ 5 mm の水で満たして 6 時間放置した後、試験体下面からの漏水の有無を確認した。載荷終了後の漏水確認試験

(写真-2) では下面からの漏水は確認されず、耐用年数100年に相当する耐久性を有することを確認できた。

(4) 破壊性状確認試験

100年耐久性を確認後、250kNを超える荷重を載荷し、破壊時までの性状確認を行った。図-13より、荷重ならびに走行回数の増加に伴いたわみ量が増加し、31万回走行時点の490kNの載荷状態（250kNでの等価繰り返し回数5億200万回）で、継手部中央で5.46mmのたわみが発生した。

表-4 輪荷重走行試験の結果

測定項目	耐用年数 100 年相当 (250kN×10 万回)		破壊時 (31 万回)
	載荷時	除荷後	除荷後
最大たわみ量	1.26mm	0.28mm	1.87mm
最大目開き量	0.08mm	0.01mm	0.08mm
最大ひび割れ幅 (床版部) (接合部)	0.10mm 0.08mm	0.06mm 0.04mm	0.10mm 0.25mm
漏水の有無	—	漏水なし	—



写真-1 輪荷重走行試験状況

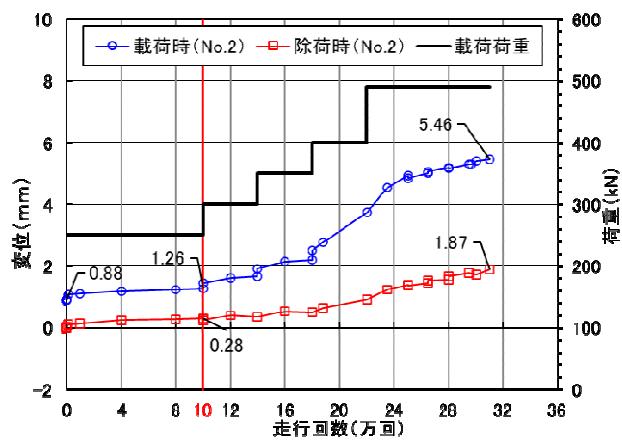


図-13 最大たわみ量の推移

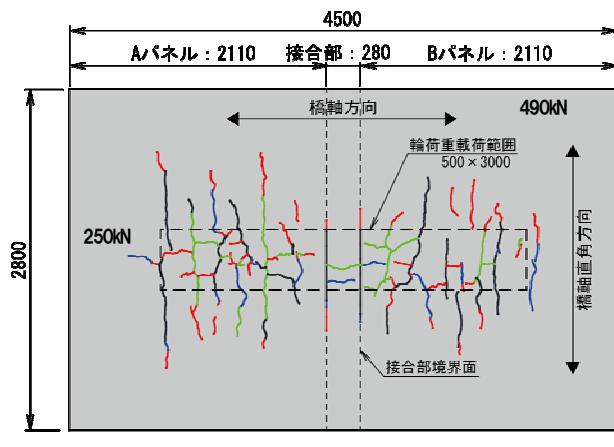


図 14 王冠アーチ構造発生状況

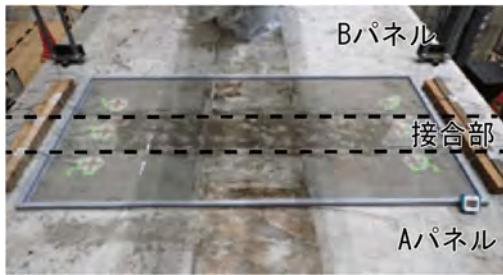


写真-2 漏水確認試験の様子（湛水状況）

みが生じており、除荷後に1.87mmの残留たわみが残った。また、走行回数とひび割れ幅の関係を図-15に示す。ひび割れ幅は490kNの荷重の載荷状態で床版部が0.25mm、接合部は0.40mmであり、除荷時は床版部が0.10mm、接合部は0.25mmであった。10万回を超えると荷重の増加とともにひび割れ幅が大きくなる傾向が見られ、12万回（250kNでの等価繰り返し回数30万回）で最大ひび割れ幅が0.15mmに達した。特に荷重が400kNを超えると接合部でひび割れが顕著に大きくなる傾向が見られた。31万回走行後の床版のひび割れ発生状況を図-16に示す。上面では床版中心から700～900mmの範囲に橋軸直角方向にひび割れが入ったが、接合部での段差等の発生は無かった。一方、下面では、押し抜きせん断ならびに曲げによるひび割れが発生し、ひび割れ位置関係から一部は下面から上面まで貫通していると推察されるが、数mm以下の微小な角落しか生じなかった。近年、床版上面は防水仕様となっており、防水工が確実に行われている場合、所定の試験荷重の2倍（490kN）ならびに3倍（31万回）の走行回数（但し、荷重は一定ではない）でも、急激な劣化に至る可能性は低いと考えられる。

5. おわりに

開発したプレキャストPC床版の新たな継手工法について、各種試験より以下の結果を得た。

（1）静的曲げ載荷試験

- ・40kN以下（支間中央鉛直変位2mm以下）における初期剛性は標準工法であるループ継手と同等であった。
- ・矩形スパイラル筋の拘束効果により内側のコンクリートと配力筋が一体となっていることを確認できた。

（2）輪荷重走行試験

- ・10万回走行試験後の漏水確認試験の結果、100年耐久性を確保できることが確認できた。
- ・所定の2倍の荷重（490kN）ならびに3倍の走行回数（31万回）によっても、接合部および床版部に数mmの微細な角落しか生じず、十分な耐久性を有していることが確認できた。
- ・250kNでの等価繰り返し回数5億200万回（耐用年数100年に相当する回数（10万回）の約5,000倍）においても破壊に至らず十分な疲労耐久性を確認できた。

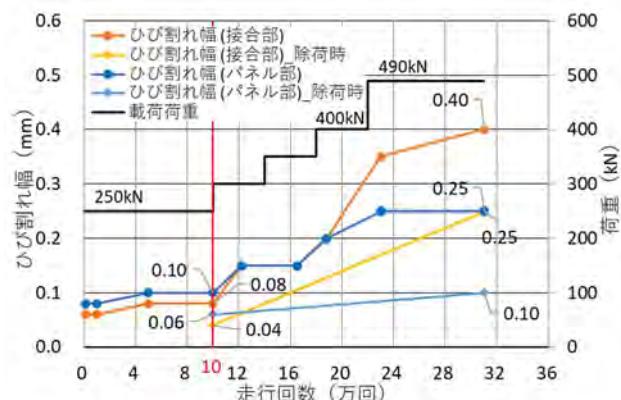
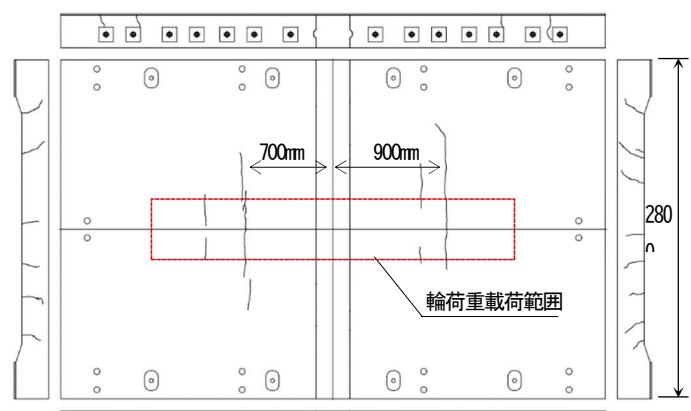
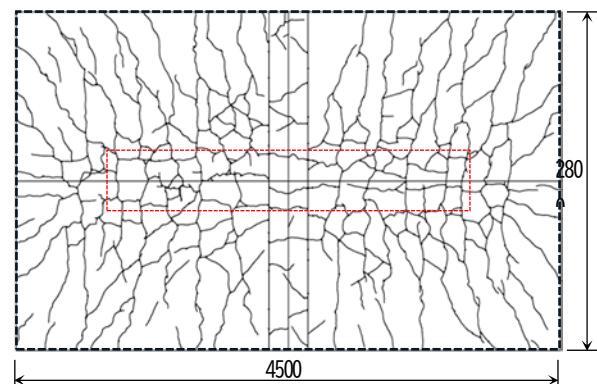


図-15 走行回数ならびに載荷荷重とひび割れ幅の推移



[床版上面および側面]



[床版下面]

図-16 破壊性状確認試験後の床版のひび割れ状況

参考文献

- 1) 東日本高速道路会社(株)、中日本高速道路会社(株)、西日本高速道路会社(株)：設計要領 第2集 橋梁保全編 令和5年10月
- 2) 東日本高速道路会社／中日本高速道路会社／西日本高速道路会社：NEXCO 試験方法 第4編, 2023.10
- 3) 松井繁之：道路橋床版、森北出版, 2012.2, P272
- 4) コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2022-, 日本コンクリート工学会, 2022, P86

(2024年7月12日受付)