

鉄道用 RC 床版の新継手構造の開発と構造性能評価—曲げ耐力・疲労強度の実験的検証—

清水建設(株) 正会員 ○星野 加奈, 吉村 友李

服部 一央, 馬場崎 宗之助

九州旅客鉄道(株)

福村 周郎, 岩瀬 玄

(公財)鉄道総合技術研究所

正会員

渡辺 健, 中田 裕喜

1. はじめに

一般的に鉄道構造物に適用するプレキャスト RC 床版（以下「PCa 床版」）の軌道方向の接続には、ループ継手が採用されることが多い。ループ継手は、ループ状の異形鉄筋を用いた重ね継手のことである。実施工では接続する 2 枚のプレキャスト（以下「PCa」）部材の端面それぞれからループ状の鉄筋を突出させておき、それをラップさせるように PCa 部材を据え付け、PCa 部材間をコンクリートであと充填することで一体化を図る。ループ継手は鉄道構造物だけでなく道路構造物でも広く採用されており、実験により強度・耐久性ともに実用上問題がないことが確認されている¹⁾。

しかし、現地条件等により PCa 床版の据付け時にループ継手が仮設材等と物理的に干渉し、施工が困難となる場合がある。本研究では、こうした施工上の制約を回避できる継手構造を開発し、鉄道構造物の要求性能を満足することを実物大スケールの載荷試験（以下「実大試験」）により確認した²⁾³⁾⁴⁾。施工面、設計面、構造成立性の観点から複数の継手構造案を提案し、優位性の高い案を選定した上で、継手構造の曲げ耐力および疲労強度を確認するため、静的載荷試験および高サイクル繰返し載荷試験による性能評価を行った。本稿では、これらの検証結果について述べる。

2. 実施工を考慮した継手構造の提案

(1) 施工条件

図-1 に示すように、工事桁及び工事桁支持杭により支持した営業線軌道（仮設時）を、PCa 床版及びバラスト軌道で本設化（本設時）する方法を想定した。その施工方法の実現には、図-2 に示す

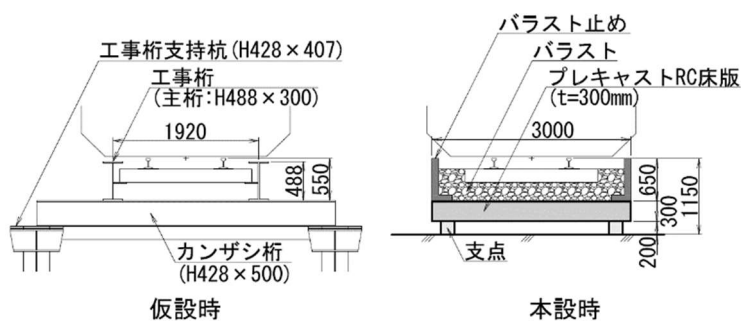


図-1 軌道本設化の想定断面図

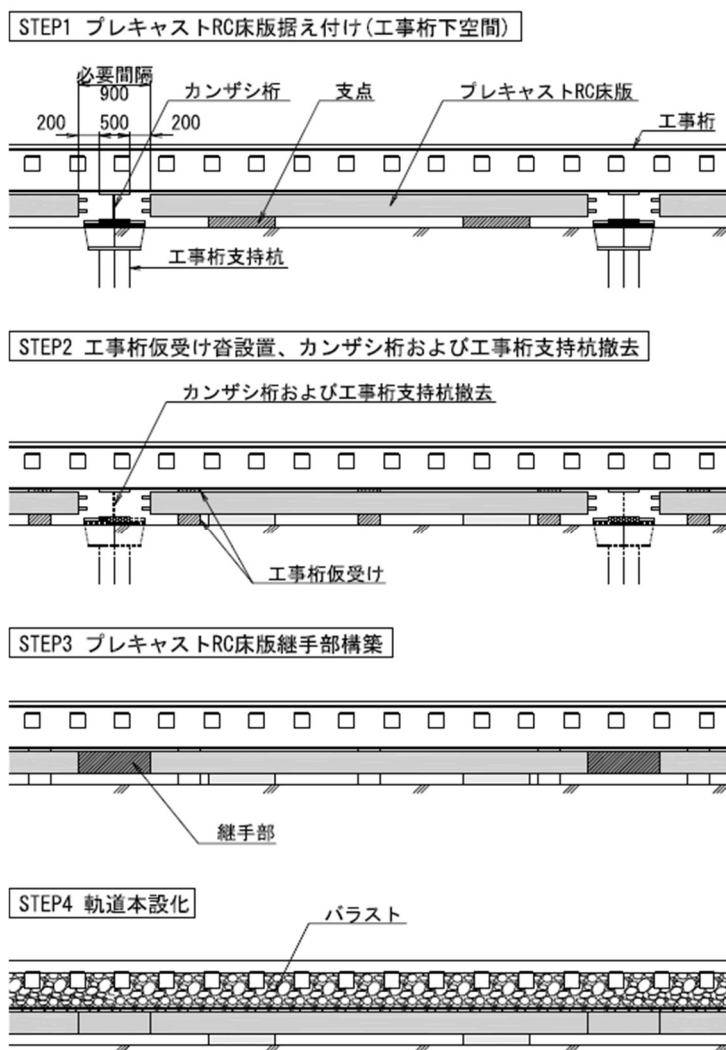


図-2 施工ステップ図（縦断図）

キーワード 鉄道用 RC 床版, プレキャスト部材, あき重ね継手, 性能確認試験, 曲げ耐力, 疲労性能
連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1

清水建設株式会社 土木技術本部 設計第二部 TEL 03-3561-3914

ように、工事桁の直下に事前に PCa 床版を据え付け、床版間をコンクリートで一体化するステップが必要となる。しかし、軌道方向に連続する工事桁を支持するために、一定間隔で軌道直角方向にカンザシ桁が配置されており、PCa 床版のループ継手が物理的に干渉してしまう問題があった。そこで、これらの問題を解決する新たな継手構造の開発を行った。開発する継手構造が、カンザシ桁に干渉することなく PCa 床版同士を一体化させるだけでなく、施工性の観点からカンザシ桁撤去後に工事桁直下で床版の鉄筋の接続や組立てが可能な限り容易となること、工程の観点から継手部の施工延長を極力短くすることに着目して検討を実施した。

(2) 継手構造案の比較

次節に示す 4 案（図-4.1～4.4、図-5）の継手構造を検討した。PCa 床版間の必要離隔は、施工性の観点から 900mm に設定した。その上で、PCa 床版からの鉄筋の突出長が最小となるような計画とした。なお、案 A を除き、継手部の鉄筋は機械式継手で接続させることを基本とした。

a) 案 A：ツインループ継手（図-4.1）

カンザシ桁との干渉回避のためには、既存技術であるダブルループ継手⁵⁾（図-3）の仕様よりも PCa 部材端のループ鉄筋同士の間隔を広げることがあることから、ループ継手間の離隔として PCa 床版間の必要離隔と同じ 900mm を確保した。これにより、各々のループ継手が単体で挙動する構造を想定した。本案では、ループ継手の設計手法が確立されていることから設計面の課題は少ないが、ループ継手部の施工性や施工延長が増えるという工程面に加えて、適用実績が無いことから構造性能の確認が必要という課題がある。

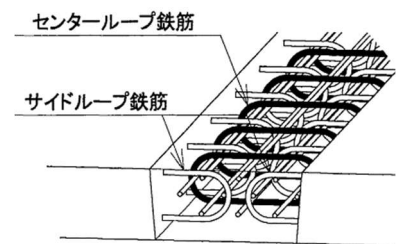


図-3 ダブルループ継手
(文献5)より引用)

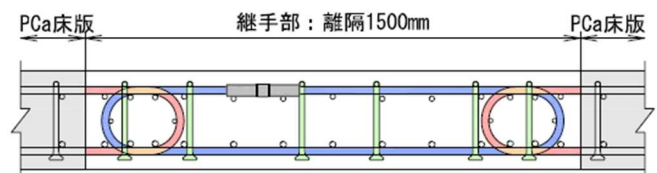


図-4.1 案 A: ツインループ継手

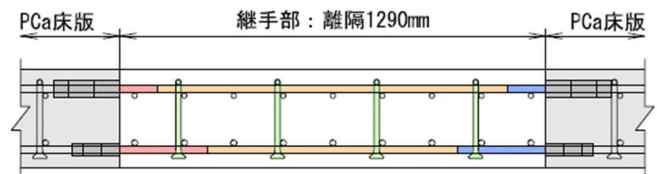


図-4.2 案 B: あき重ね継手

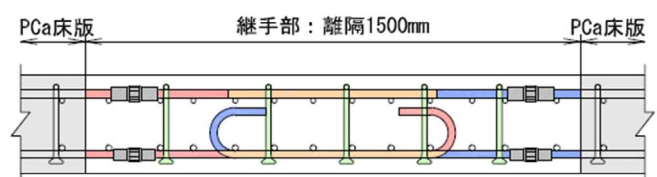


図-4.3 案 C: あき重ねフック継手

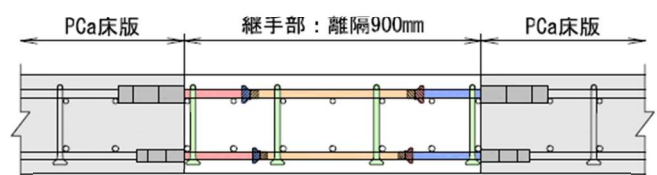


図-4.4 案 D: T ヘッド工法あき重ね継手

b) 案 B：あき重ね継手（図-4.2）
本構造は PCa 床版の継手部において上下の軸方向鉄筋を重ね継手で接続する最もシンプルな構造である。現地での PCa 床版の据え付け及び鉄筋組立の施工誤差を考慮し、重ね継手で接続する鉄筋同士にあきを設け「あき重ね継手」とした（図-5）。あき寸法は「鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説、日本建築学会、2021」の規定および粗骨材の最大寸法以上を満足するように、本研究では軸方向鉄筋の直径程度とする。一方で、工程面では重ね継手が同一断面に集中するため部材間の離隔が大きくなり施工延長が増えるという課題がある。また、既往の研究⁹⁾から、重ね継手の集中度が高くなると、引張側鉄筋がかぶりコンクリートを押し出す挙動が顕著となり、コンクリートの割裂破壊に伴い継手部の疲労性能の低下が懸念される。本案では、補強対策が必要となる点が設計・構造成立面での課題である。

c) 案 C：あき重ねフック継手（図-4.3、図-5）

案 B をベースとして、下側の引張側鉄筋を半円形フックにより定着させる構造とした。案 B で懸念された引張側鉄筋の挙動の抑制と重ね継手長の低減を目的としている。案 B のように機械式継手を PCa 床版内に埋込むと、PCa 床版の据付け後に、曲げ加工を伴う鉄筋の組立が難しい。そのため、案 B と比較して現地施工

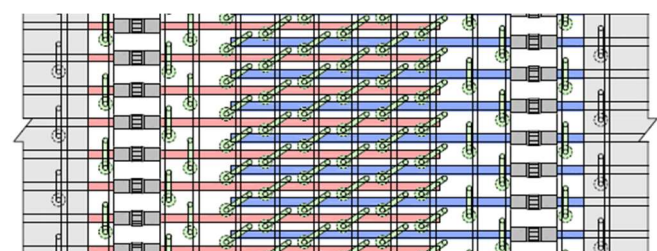


図-5 案 C: あき重ねフック継手 (平面図)

が煩雑になるが、設計・構造成立面での課題解決に効果が期待できる。

d) 案D：Tヘッド工法あき重ね継手（図-4.4）

案Cで採用した半円形フックを機械式鉄筋定着工法（Tヘッド工法等）で代用した構造である。施工面では最も優れる構造であるが、鉄道構造物のRC床版への機械式鉄筋定着工法の適用実績（軸方向鉄筋のマッシュブでないコンクリートへの定着）が無いことから、実現性には多くの課題を解決する必要があると考えられる。

(3) 検討する継手構造の選定

各継手構造の評価を表-1に示す。施工面、設計面、構造成立性の観点から最も実現性の高い継手案として案A（ツイングループ継手）および、各観点のバランスに優れた案C（あき重ねフック継手）を選出した。ループ継手では施工が困難となる条件下において、「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」令和5年1月（以下「コンクリート標準」）に従い、施工・設計・構造成立面で優位性が高いと考えられる継手構造を評価し、ツイングループ継手およびあき重ねフック継手を選出した。

表-1 継手構造の評価

継手構造	案A	案B	案C	案D
施工面	△	○	○	◎
設計面	◎	△	◎	○
構造成立性	◎	△	○	△

(4) 設計思想

今回検討した継手構造（機械式継手を除く）を採用する場合、コンクリート標準に示される、継手による鉄筋の設計引張降伏強度や設計引張疲労強度の低減は考慮しないものとしてRC床版の部材仕様の設定を行うこととした。一方、機械式継手を採用する場合、一般的には鉄筋強度の低減を見込む必要があることから、施工性だけではなく機械式継手の性能を十分確認した上で機械式継手の選定が必要となる。

3. 実大試験による性能確認試験

(1) 性能確認試験の目的

前章で提案・選定した継手構造には適用実績や既往の研究成果が無く、設計思想の妥当性を検証する必要がある。そこで、設定した継手構造を含む部材仕様が鉄道構造物への適用に必要な要求性能を満足するかどうかの実験的検証を実施した。具体的には、RC床版の継手部および接合面に曲げモーメントが発生した場合に、開発した継手構造が有効に機能し、継手が無い通常のRC部材と同等の曲げ耐力や疲労耐力を有することや過大な曲げひび割れが生じないことを、静的载荷試験および高サイクル繰返し载荷試験（以下「疲労試験」）によって評価した。以下に、継手構造が曲げ耐力および引張疲労強度（以下「疲労強度」）に及ぼす影響を確認するために実施した各種試験の結果について述べる。

(2) 試験概要

a) 静的载荷試験

試験対象とするRC床版は、離散的に単純支持される支持条件の基、列車荷重EA-17が载荷される条件として設計を実施した。ループ継手に代わる優位性の高い継手構造として2章で選定した、あき重ねフック継手とツイングループ継手の2種類の継手構造に対して、図-6.1～6.3

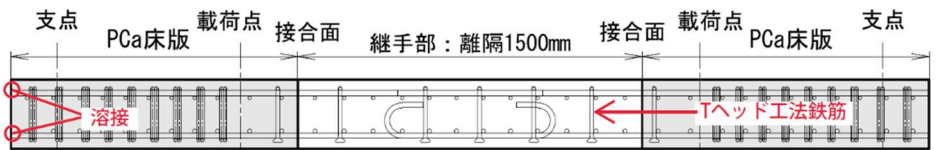


図-6.1 試験体 A: あき重ねフック継手①(LaT-ST)

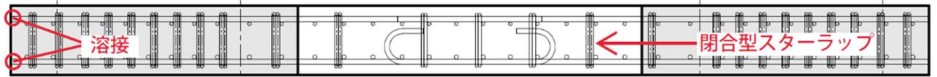


図-6.2 試験体 B: あき重ねフック継手②(LaS-ST)

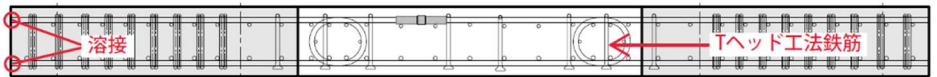


図-6.3 試験体 C: ツイングループ継手(LoT-ST)

に示す3種類の実大試験体で静的载荷試験を実施した。あき重ねフック継手については継手部の拘束の影響を確認するため、せん断補強鉄筋の仕様をTヘッド工法鉄筋とした試験体A:LaT-ST（図-6.1）、閉合型スターラップとした試験体B:LaS-ST（図-6.2）の2種類とした。ツイングループ継手構造となる試験体C:LoT-STの継手部のせん断補強鉄筋はTヘッド工法鉄筋とした（図-6.3）。

試験体名		繰返し回数：N(回)		発生応力度(N/mm ²)			<実強度>発生ひずみ(μ)			載荷荷重(kN)	
		計画日安	計画値	最小応力 σ_{min}	最大応力 σ_{max}	応力振幅 σ_r	最小値	最大値	振幅	下限P _{min}	上限P _{max}
1体目	LaT-DY5	500,000	514,220	30	225	195	155	1,165	1,010	88	645
2体目	LaS-DY5										
3体目	LaT-DY25	2,500,000	2,697,474	30	192	162	155	995	840	88	550
4体目	LaS-DY25										

(5) 計測計画

計測計画を図-11に示す。各種計測は荷重点間の等曲げ区間内を対象とし、各種ひずみ（軸方向鉄筋（B,T）、継手部に配置したせん断補強鉄筋（S）、コンクリート表面）の他、試験体下面の変位（D）とひび割れ幅（A）、更に2軸型亀裂変位計によりPCa部と継手部の接合面の目開きおよびずれ（2D）を計測する計画とした。

4. 静的荷重試験の結果

表-3に曲げ降伏耐力（ M_y ）および曲げ耐力（ M_u ）相当での荷重値、図-12.1～12.3および図-13に試験結果の一例を示す。表-3に示す通り、耐荷重に対しては実強度で計算した M_y 、 M_u 相当の荷重値に対していずれの供試体も同等の耐力が得られた。

a) あき重ねフック継手（LaT-ST, LaS-ST）

図-12.1にLaT-STのスパン中央の荷重-変位関係を示す。1,180kNで M_y に達し、最大荷重（ M_u 相当）は1,239kNが得られた。いずれも計算値と同等以上であった。

図-12.2にLaT-STの引張側軸方向鉄筋の荷重-ひずみ関係を示す。重ねフック継手部中央の引張ひずみ（B4～5,9～12）が、継手が無い範囲の引張ひずみ（B1～3,6～8）の半分程度となっている。この結果から、あき重ねフック継手が有効に機能し、隣接する軸方向鉄筋へ応力が伝達されていることが分かる。

図-12.3にLaS-STの荷重-ひび割れ幅関係を示す。降伏時の部材軸付近の最大目開き量（2D2-X）が0.25mm程度、最大ずれ量（2D2-Y）が0.1mm程度であることが分かる。部材下面のひび割れ幅（A9）は0.5mm程度であり、あき重ねフック継手区間の起終点部（A'3,7）でも降伏時に0.5mm程度のひび割れが生じている。コンクリート標準に基づくコンクリート表面の曲げひび割れ幅（ w ）は0.42mm（ $\epsilon'_{csd}=0$ とした場合）であるが、試験結果はこれを上回った。

また、LaT-STの継手部のせん断補強鉄筋の最大

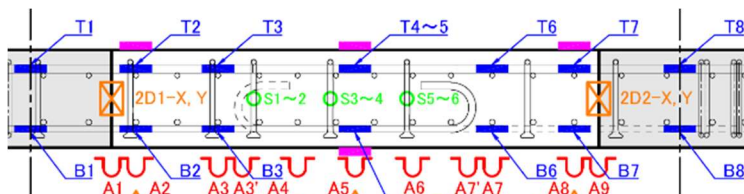


図-11 計測計画図 (LaS-ST)

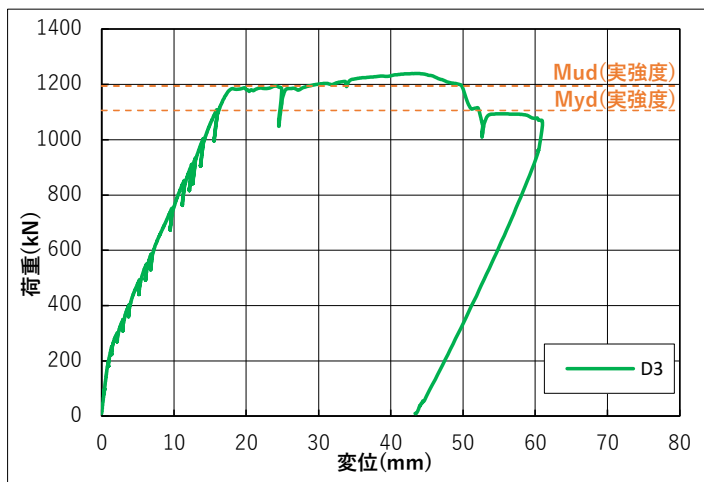


図-12.1 荷重-変位関係 (LaT-ST)

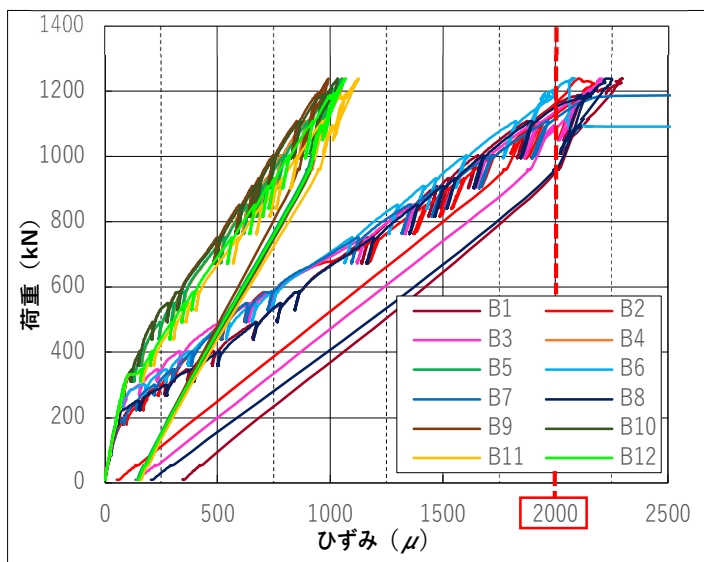


図-12.2 荷重-ひずみ関係 (LaT-ST)

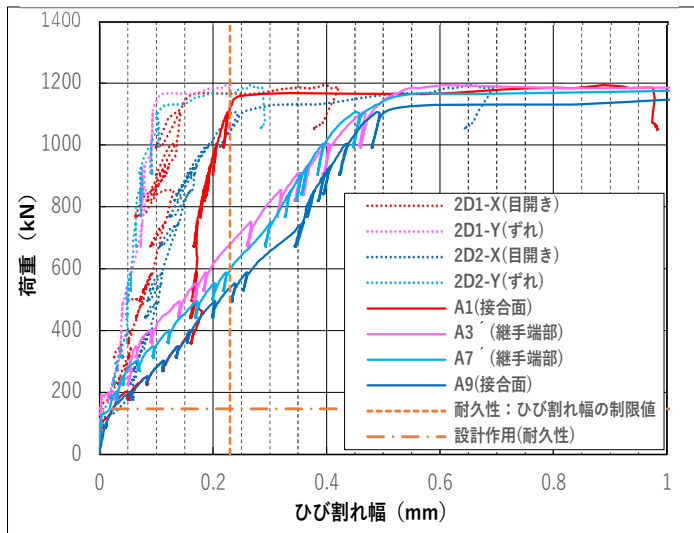


図-12.3 荷重-ひび割れ幅関係 (LaS-ST)

表-3 試験結果

		LaT-ST	LaS-ST	LoT-ST
曲げ降伏耐力 M_y	計算値	1,106	1,104	1,112
相当荷重(kN)	試験結果	1,180	1,130	1,112
曲げ耐力 M_u	計算値	1,194	1,190	1,204
相当荷重(kN)	試験結果	1,239	1,215	1,207

引張ひずみは 80μ 程度で非常に小さかった。閉合型スターラップを用いた LaS-ST でも同様の計測値であったことから、せん断補強鉄筋の形状の違いが継手部の強度に与える影響は小さいと考えられる。

b) ツインループ継手 (LoT-ST)

試験体変位、接合面の目開きおよびずれに関して、あき重ねフック継手と同様の傾向であった。図-13 に示す試験終了時のひび割れ状況からは、左右のループ継手から生じたひび割れがつながることなく、ループ継手間は通常の RC 梁と同様に等間隔で一般的な曲げひび割れが入っていることが分かる。その他、引張側軸方向鉄筋のひずみの状況などの結果から、今回設定したループ継手の間隔 ($900\text{ mm} = \text{床版厚 } t \text{ の } 3 \text{ 倍}$) を確保すれば、ループ継手が影響し合うことなく単独で挙動すると判断して良いと考える。



図-13 試験終了時のひび割れ状況 (LoS-ST)

5. 疲労試験の経過と結果

(1) 試験経過 (1 体目 : LaT-DY5)

a) $N=1 \sim 10$ 万回载荷

図-14 に計画回数の 20% の载荷である $N=10$ 万回载荷時の引張鉄筋の荷重-ひずみ関係を示す。载荷中は所定の载荷回数で軸方向鉄筋の引張ひずみを計測し、 $\sigma_{\min}$ および σ_r に換算して値を確認しながら载荷を進めた。

引張ひずみについて、上限荷重値 (645 kN) では計画通り約 $1,100 \sim 1,160\mu$ だったが、下限荷重値 (88 kN) では約 400μ で計画よりも大きく、初期载荷時から継続してひずみが残留していることが分かった。計測結果から再度繰返し回数を算出すると、 $\sigma_{\min}$ が大きく σ_r が小さくなることで計画 $N=50$ 万回が約 230 万回 (実強度では約 400 万回) に増加することとなった。所定の σ_r となるよう载荷荷重値を調整することも検討したが、ひずみが残留していることの原因追及には時間を要すると判断し、今回は $N=400$ 万回程度を目標に当初の载荷荷重で試験を継続することとした。

b) $N=10 \sim 350$ 万回载荷

当初の载荷荷重で $N=350$ 万回まで試験を継続したが、ひずみの残留状況にも変化がなく、ひび割れ幅の増大やかぶりコンクリートの剥落等の外観上の大きな損傷は見られなかった。「鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編), 平成 19 年 1 月」で示される累積疲労損傷度で評価をすると、鉄筋の実強度ベースで $N=350$ 万回時点で約 62% の累積疲労損傷度であったことから、以降、400 万回程度で累積疲労損傷度が 100% を超えるよう上限荷重値を 645 kN から 740 kN に増加させ、実測値で σ_r を 162.6 N/mm^2 として試験を継続した。

c) $N=350$ 万回载荷～試験終了

σ_{rd} を大きくしたことにより、400 万回载荷時に累積疲労損傷度が 100% を超え (102%) たことを確認した。その後、410 万回まで载荷し累積疲労損傷度が 110% にまで達したが、試験体は破壊には至らなかった。図-15

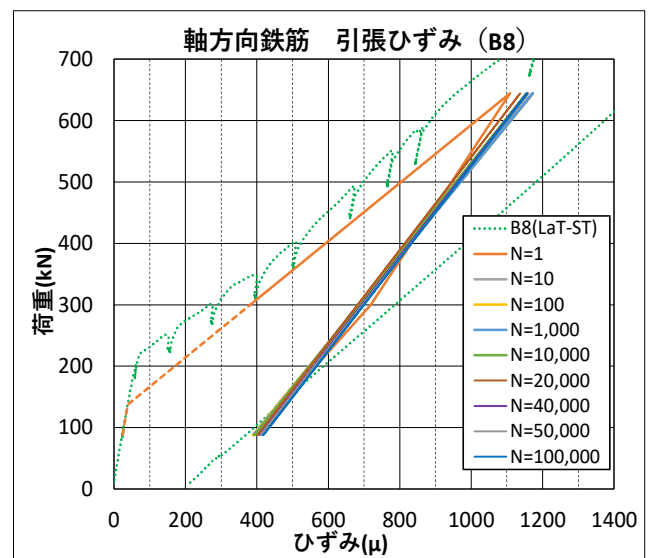


図-14 荷重-ひずみ関係 (B8)

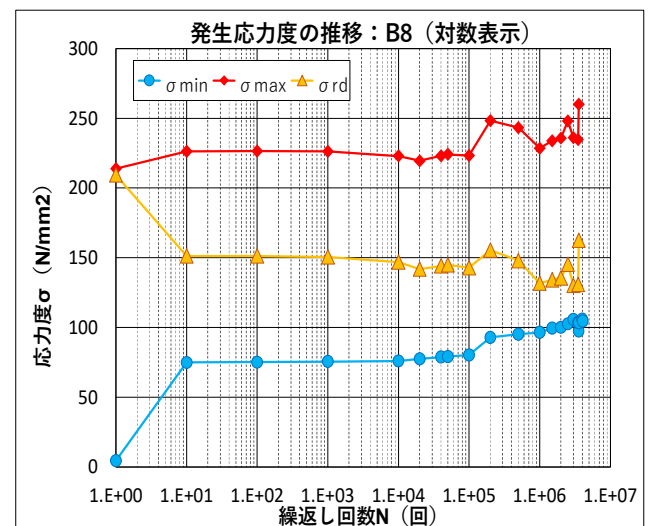


図-15 鉄筋の発生応力度の推移

に LaT-DY5 の引張鉄筋の発生応力度の推移を示す。

(2) 載荷計画の変更

1 体目の結果から、2 体目以降の試験体については当初計画繰返し回数で累積疲労損傷度が 100%を大きく上回るよう、初期載荷の時点で載荷荷重の上限一下限值を設定し、発生応力度の推移を確認しながら必要に応じて荷重値を調整しながら試験を実施した。なお、当初 50 万回の繰返し回数を計画していた LaT-DY5 の載荷回数が 250 万回を超えたため、LaT-DY25（計画：250 万回載荷）は、 σ_r を 195N/mm^2 とし 50 万回で疲労破壊に至る計画に変更した。

(3) 試験結果

計 4 体の試験結果を表-4 に示す。いずれの試験体も累積疲労損傷度が 100%を上回るように載荷を実施したが、疲労破壊には至らなかった。以上の結果から、あき重ねフック継手は、鉄筋母材と同等の疲労強度を有することが確認できた。また、せん断補強鉄筋の仕様の違いの影響があるかを検証

するため 2 種類の試験体で試験を実施したが、軸方向鉄筋に沿ったひび割れやコンクリートの割裂破壊には至らず、せん断補強鉄筋のひずみは小さいものだった。

6. まとめ

本研究では、施工条件を考慮して新たに開発した鉄道用 PCa 床版の継手構造について、実物大試験による構造性能の検証を行った。具体的には、静的載荷試験と疲労試験を実施し、継手構造の曲げ耐力および疲労強度を評価した。本研究で得られた主な知見と今後の課題を以下にまとめる。

なお、軸方向鉄筋の接続に機械式継手を用いる場合には、採用する継手の強度や施工および施工時の検査の信頼度に応じて、適切な低減係数を考慮した上で照査を行う必要がある。

(1) 静的載荷試験

鉄道用 RC 床版の継手構造が曲げ耐力に及ぼす影響を確認するため、静的載荷試験を実施した。

- あき重ねフック継手について、継手先端に設けた標準フックが機能することで、コンクリート標準に示される重ね継手と同様の要件（鉄筋量に応じて重ね合わせ長さを基本定着長（ l_{d0} ）の 1.3～1.7 倍とする等）を満足すれば、一般的な RC 部材と同等の耐力を有することを確認した。この結果から、設計での本継手による引張強度の低減は不要であると考えられる。
- ツインループ継手について、部材厚の 3 倍の離隔があれば、互いのループ継手が影響し合うことなく単独で挙動することを確認した。

(2) 疲労試験

鉄道用 RC 床版の継手構造が疲労強度に及ぼす影響を確認するため、疲労試験を実施した。

- 累積疲労損傷度による評価で、あき重ねフック継手はせん断補強鉄筋の仕様によらず、鉄筋母材と同等の疲労強度を有することが確認できた。この結果から、あき重ねフック継手を用いた場合は設計引張疲労強度の低減が不要となり、経済的な配筋仕様の設定が可能と考えられる。
- 本稿で挙げた残留ひずみの原因等の分析は今後の課題である。

表-4 疲労試験結果

試験体名	繰返し回数：N(回)		最大 応力振幅 σ_r (N/mm^2)	載荷荷重 (kN)		累積 疲労 損傷度	疲労破壊 形態
	計画値	実回数		$P_{\min}$	$P_{\max}$		
LaT-DY5	500,000	4,100,000	162.6	88	740	1.099	未破壊
LaS-DY5	500,000	500,000	228.0	50	863	1.723	未破壊
LaT-DY25	2,500,000	500,000	216.4	50	863	2.025	未破壊
LaS-DY25	2,500,000	2,100,000	179.0	50	750	1.707	未破壊

参考文献

- 1) ハーフプレキャスト工法を適用した鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針，鉄道総合技術研究所，平成 11 年 3 月
- 2) 吉村ら：鉄道用プレキャスト RC 床版の継手構造の開発，土木学会 第 80 回年次学術講演会，令和 6 年 9 月
- 3) 馬場崎ら：鉄道用 RC 床版の継手構造が曲げ耐力に及ぼす影響の実験的検証，土木学会 第 80 回年次学術講演会，令和 6 年 9 月
- 4) 服部ら：鉄道用 RC 床版の継手構造が引張疲労強度に及ぼす影響の実験的検証，土木学会 第 80 回年次学術講演会，令和 6 年 9 月
- 5) 酒井ら：ダブルループ継手構造を有する RC 床版の力学的特性に関する研究，土木学会論文集(No.760/V-63)，平成 16 年 5 月
- 6) 出雲ら：各種鉄筋継手の集中度が RC 梁の疲労特性に及ぼす影響について，第 3 回コンクリート工学年次講演会論文集，昭和 56 年