

論文

接合面にせん断キーを有する道路橋床版継手の耐疲労性に関する実験的検討

澤田 純之*, 工藤 朗太**, 内田 雅博***, 今田 遥介****, 東山 浩士*****

*博(工), 安藤ハザマ, 建設本部 技術研究所 土木研究部 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1)

**修(工), 安藤ハザマ, 建設本部 土木技術統括部 技術第二部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)

***修(工), 青山機工(株), 営業統括部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2 丁目 18-4)

****修(工), 安藤ハザマ, 建設本部 土木技術統括部 技術第二部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)

*****博(工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1)

近年、盛んに実施されている道路橋床版取替工事の省力化、床版の品質向上を目的として、新たな継手(KL-C 継手)を開発している。開発中の継手は、プレキャスト床版の継手面に成形した凹凸円弧状のせん断キー、接合ボルトおよび隙間充填材で構成され、継手部のコンクリートが不要となる継手である。本継手の耐疲労性を確認する輪荷重走行試験の実施前に、継手性能の確認を目的に、簡易的な試験として油圧ジャッキを用いた繰返し載荷試験を実施した。本論文では、繰返し載荷試験結果より得られた、KL-C 継手の耐疲労性について取りまとめている。

キーワード：道路橋床版，KL-C 継手，耐疲労性，繰返し載荷試験

1. はじめに

近年、インフラ構造物の老朽化に伴うリニューアル工事が盛んに実施され、道路橋については、床版取替工事が全国的に行われている。床版取替工事では、道路の片側を閉鎖して工事を実施するため、片側通行期間を可能な限り短縮することが望まれる。また、道路橋は河川や道路を跨ぐ高架橋も多いため、床版取替工事の際に施工工種を省力化することが工期短縮に繋がると考えられる。特に、コンクリートの現場打設は足場設置、型枠設置、打設、養生、と施工工種が多いため省略することで工事の省力化、工期短縮が図れる。そこで、本開発では、道路橋床版の継手部に現場打ちコンクリートが不要となる Key-Lock Connected 継手(以下、KL-C 継手)を考案し、その実用化に向けた検討を進めている。

床版継手の要求性能のひとつとして 100 年相当の耐疲労性を確認する必要がある。その確認方法として NEXCO 試験法 442¹⁾の輪荷重走行試験による疲労促進試験がある。この試験は所定の活荷重を輪荷重走行により繰返し載荷し、試験後に実施する水張試験の漏水確認により有害な損傷の有無を確認する方法である。しかしながら、本試験を実施可能な輪荷重載荷装置は全国的にも少なく、近年の床版取替工事の増加、各機関での継手開発の活発化、に伴って載荷装置の使用頻度が増加してお

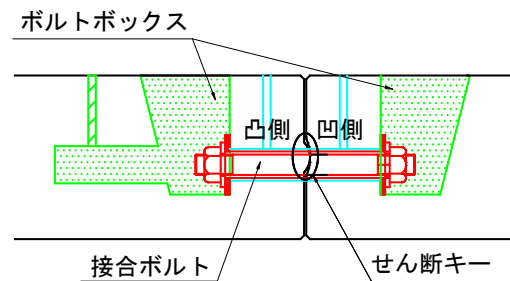


図-1 KL-C 継手概要

り、事前検討が可能となる試験方法が必要と考える。本研究では、輪荷重走行試験の実施前に、開発中の KL-C 継手の耐疲労性について見当をつけることを目的とする。そのため、油圧ジャッキを使用した載荷システムを活用し、KL-C 継手を有する床版試験体の繰返し載荷試験により、継手の耐疲労性および力学性状を事前に確認することとした。

2. KL-C 継手の概要

図-1 には、KL-C 継手の概要を示している。KL-C 継手は、プレキャスト床版の継手面に成形したせん断キー(円弧状の凹凸形状の突起)、接合ボルトおよび継手部の隙間充填材により構成された継手である。

表-1 試験体に関する情報の一覧

ケース名	ボルト		圧縮強度 (σ_{28})		荷重概要	使用隙間充填材
	本数	間隔	凸側床版	凹側床版		
B50	3本	500mm	61.2N/mm ²	59.4N/mm ²	255kN、10万回繰返し、255~497kN(12段階)静的荷重	水中接着型・汎用エポキシ接着剤
B70	2本	700mm	56.5N/mm ²	62.9N/mm ²	255kN、10万回繰返し	濡面接着型・弾性エポキシ樹脂

表-2 鋼材の材料特性値

使用箇所	使用鉄筋	鋼材種	引張試験結果	
			降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
橋軸方向鉄筋	D16	SD345	384.0	189.9
橋軸直角方向鉄筋	D13	SD345	389.8	187.6
接続ボルト	M27	-	369.8	207.8
PC鋼棒	ϕ 23	C種1号	508.5	213.3

表-3 隙間充填材の材料特性値(カタログ値)

使用隙間充填材	カタログ値		
	圧縮せん断強度 (N/mm ²)	接着強度 (乾燥) (N/mm ²)	伸び率 (%)
水中接着型・汎用エポキシ接着剤	5 MF	6.5 MF	2~3
濡面接着型・弾性エポキシ樹脂	3.5 COF	3 COF	50

MF：セメントモルタル破壊、COF：接着剤破壊

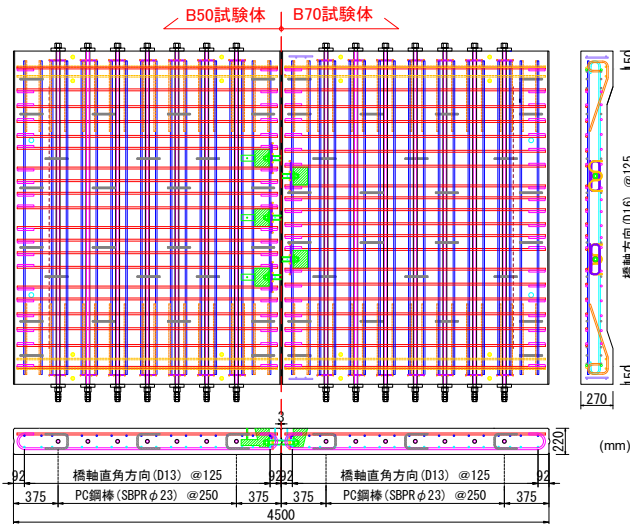


図-2 試験体概要図

KL-C 継手の接続機構は、隣接床版に荷重が作用した場合、1) 継手部の凹凸せん断キーのかみ合わせによりせん断力を伝達、2) 荷重が作用した床版と接合する床版に相対変位が発生することで、せん断キー乗り越え作用に伴う継手部の開口が発生、3) 継手部の開口に対して接合ボルトが抵抗、する機構である。隙間充填材は主として継手部の止水の役割を担っている。

本継手の施工手順は、1) 隣接する床版をせん断キーの凹凸部の先端が接触するまで引寄せ、2) ボルトボックスに予め格納していた接合ボルトを接合部に引出し、座金とナットを設置、3) 継手部に所定の隙間がある状態を確保し、ナットに締付力が掛かるまで締付ける、4) ボルトボックス内を無収縮モルタルで充填、5) 継手部に隙間充填材を注入、である。継手部に発生する隙間は、床版間の 3mm および接合ボルトと孔の隙間(全周 4.3mm)であり、この隙間を隙間充填材(エポキシ系樹脂)で充填する。

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

表-1 には、試験体に関する情報を一覧にして示している。本試験では、接合ボルトの配置間隔をパラメータとし、配置間隔が 700mm の B70、配置間隔が 500mm の B50 の 2 体とした。なお、接合ボルトの配置本数は、B70 では 2 本(中央配置無し)、B50 は 3 本(中央配置有り)である。

図-2 には、試験体の形状寸法および配筋状況を示し

ている。試験体の形状寸法は NEXCO 試験法 442¹⁾に準拠して設定した。床版試験体の寸法は、橋軸方向 2,250mm、橋軸直角方向 2,800mm、床版厚さ 220mm であり、この床版試験体を 2 体接合して作製した。配筋は、床版の実設計を考慮し、橋軸方向に D16 を 125mm 間隔、橋軸直角方向に D13 を 125mm 間隔となるよう配筋した。また、橋軸直角方向には PC 鋼棒を配置し、ポストテンションによりプレストレスを導入している。プレストレス力は、設計荷重載荷時に許容引張応力(3.0N/mm²)以下となるよう 242 kN/本を導入した。

本試験の計測項目は、中央部に継手部を挟んで配置した油圧ジャッキの荷重および床版下面の変位、継手中央下面の開口幅(パイゲージ)および接合ボルトのひずみである。試験終了後には、試験体底面のひび割れ状況を観察している。

3.2 材料特性値

床版試験体のコンクリート圧縮強度は、いずれも呼び強度 50 N/mm²を確保している(表-1 参照)。表-2、表-3 には、使用した鋼材、隙間充填材の材料特性値(カタログ値)を一覧にして示している。接合ボルトは M27 の長ボルトを使用し、降伏強度は 369.8N/mm²であった。なお、隙間充填材は、材料の充填性を確認するため試験ケースで異なる材料を使用した。

3.3 繰返し載荷試験方法

写真-1、写真-2 には、繰返し載荷試験の状況(全景)

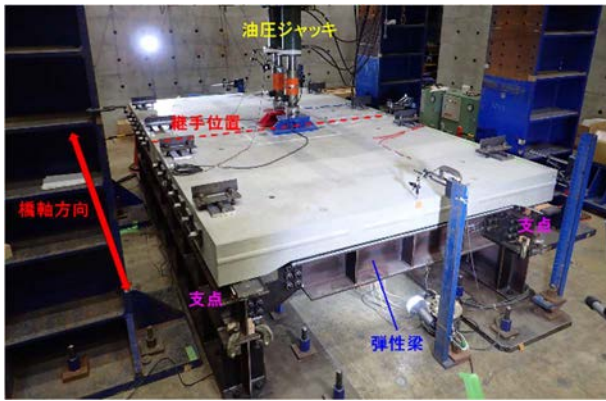


写真-1 繰返し載荷試験の状況(全景)

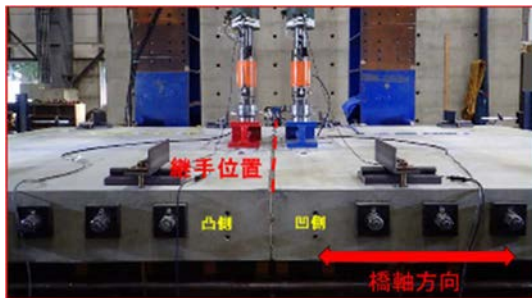


写真-2 載荷状況

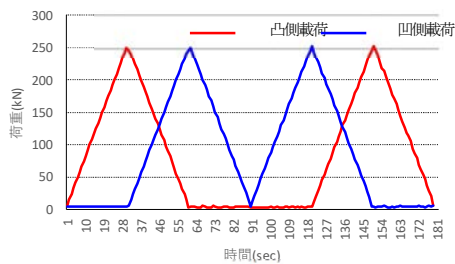


図-3 載荷パターン

および載荷状況を示している。試験体は、橋軸方向に橋桁を模擬したピン支点(支点間隔 2,500mm)上に、鋼板とテフロンシートを挟んだ状態で設置しており、ピン支持に近い支持条件となっている。試験体の橋軸方向端部には、隣接床版の剛性を模擬した弾性梁(H300)を配置した。

載荷は、載荷位置に設置した載荷板(200×500mm, 凸側：赤色, 凹側：青色)を油圧ジャッキで載荷することで行った。載荷位置は油圧ジャッキの最小設置間隔とし、継手位置から橋軸方向 185mm の位置とした。制御荷重は所定の載荷荷重を確保するため、5~255kN の範囲とした。図-3 には、載荷パターンを示す。載荷パターンは、輪荷重走行試験の事前確認試験のため、輪荷重走行による載荷を模擬している。繰返し回数は、継手部を挟んだ油圧ジャッキ(赤色および青色)を各 1 度載荷した段階で 1 回とし、総繰返し載荷回数を 10 万回とした。なお、本継手は継手構造が非対称であるため、輪荷重の往復を想定して負荷を掛けることとし、赤色⇒青色, 青色⇒赤色と交互に載荷を実施している。載荷速度は、約 17 秒/回である。試験体データの取得は、所定回数の繰返し

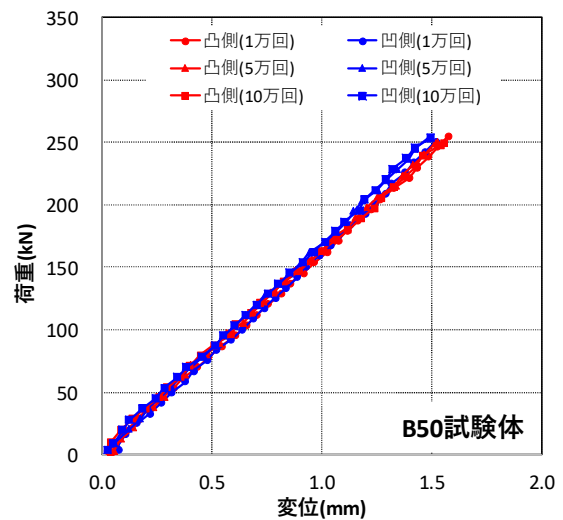
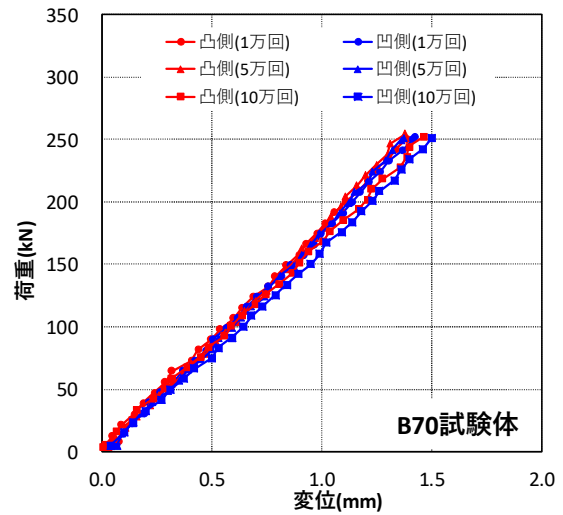


図-4 荷重-変位関係(繰返し回数の比較)

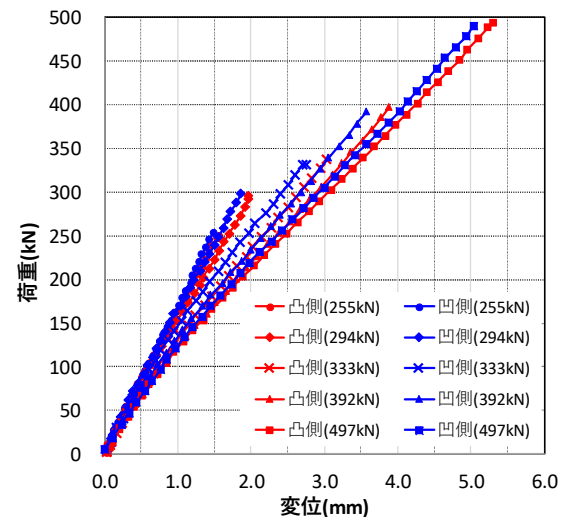
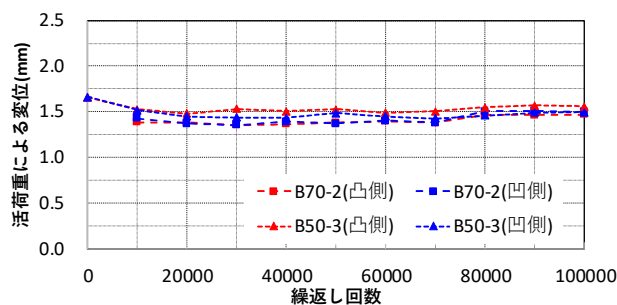
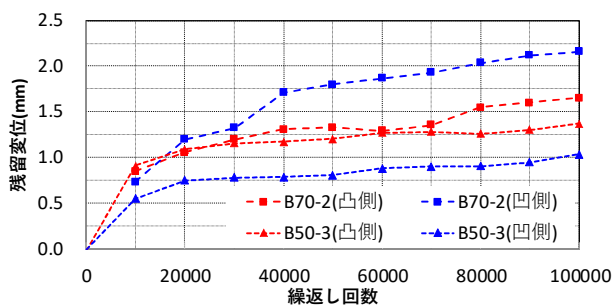
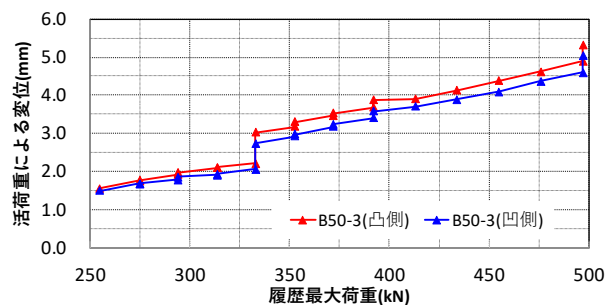
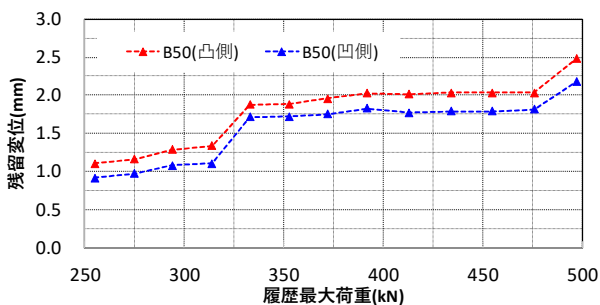


図-5 荷重-変位関係(載荷荷重の比較)

載荷後に、載荷速度を落とした計測載荷を実施した。なお、B50 については、所定の繰返し載荷試験の実施後、段階的に 497kN まで増加させてデータを取得した。



(a) 繰返し回数と残留変位(左図), 活荷重載荷時の変位(右図)の関係(B70/B50 試験体)



(b) 計測載荷時の載荷荷重と残留変位(左図), 活荷重載荷時の変位(右図)の関係(B50 試験体)

図-6 載荷履歴と中央変位の関係

4. 試験結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-4 には, 各繰返し回数終了後の荷重-変位関係を示している. 図には, 繰返し載荷回数 1 万回, 5 万回, 10 万回後の凹凸載荷時のデータを重ねて示している. なお, ここに示す変位は, 載荷初期からの総変位から計測載荷直前の残留変位を差し引いた, 活荷重変位にして示している.

図より, B70 の荷重-変位関係を見るとほぼ線形であり, 255kN 載荷時で約 1.4mm の変位が生じている. また, 10 万回載荷後の変位は, 1 万回載荷後の変位と比較して約 0.1mm の増加があるものの, 剛性勾配は概ね一致している. B50 の結果は, B70 とほぼ同様の性状を示している. また, 繰返し回数に関わらず剛性勾配にばらつきが少なく, ほぼ一致していることが分かる. 本結果より, 載荷荷重 255kN で 10 万回の繰返し載荷に対しては剛性への影響はほとんど無く, 接合ボルトの配置位置, 本数による違いはないことが明らかになった.

図-5 には, B50 の 10 万回載荷終了後に実施した段階的に荷重を増加させた結果を重ねて示している. 図には, 測定結果のうち, 255kN, 294kN, 333kN, 392kN, 497kN 載荷時の結果を示している.

図より, 載荷荷重 255kN, 294kN の剛性勾配はほぼ一致しているが, 333kN 載荷時には剛性勾配の低下が確認できる. 333kN 載荷時の剛性勾配は, 150kN を過ぎたあたりで 255kN 載荷時の勾配と差異が見られるが, その後はほぼ直線的に増加している. 392kN, 497kN 載荷時は 333kN 載荷時に比較し徐々に剛性勾配低下が見られるも

の, 勾配は概ね同様である. 本結果から, 333kN 載荷時から見られる初期勾配の低下は, 鉄筋降伏を伴う剛性低下ではなく橋軸直角方向の曲げひび割れの発生による低下と推察される.

本結果から, 294~333kN で床版下面の曲げひび割れが進展するものの, 392kN 以上でも剛性勾配は線形的で荷重低下も見られないことから, 弾性域内であると推察され, 継手構造として成立していると考えられる.

4.2 床版中央の変位

図-6 には, 載荷履歴と床版中央の変位の関係を示している. 図-6(a)には, 繰返し回数と変位の関係, 図-6(b)には B50 の 255kN 以上の計測載荷時の載荷荷重と変位の関係を示している. なお, いずれも残留変位(左図)と活荷重による変位(右図)の結果を示している.

図-6(a)より, 残留変位は全体的に B50 より B70 で残留変位が大きく示されている. また, B70 は繰返し回数 4 万回で凹側, 繰返し回数 8 万回で凸側の残留変位に変化が見られる. これは, 橋軸直角方向の曲げ変形が床版中央で大きくなり, 中央部での継手開口と共に残留が大きくなったと推察される. また, せん断キーの非対称性に伴って, 段階的に発生していると考えられる. 一方, B50 の残留変位は繰返し回数に関わらず, ほぼ一定値を示している. これは, 床版中央の接合ボルトの作用により, 載荷位置のせん断ずれに伴う継手部開口が抑制されたためと推察される. 右図の活荷重(255kN)による変位は, 繰返し回数に関わらず B70/B50 のいずれも 1.5mm 程度の変位で推移している. この結果より, KL-C 継手は活荷重 255kN では十分な耐疲労性を保有している. 以上より,

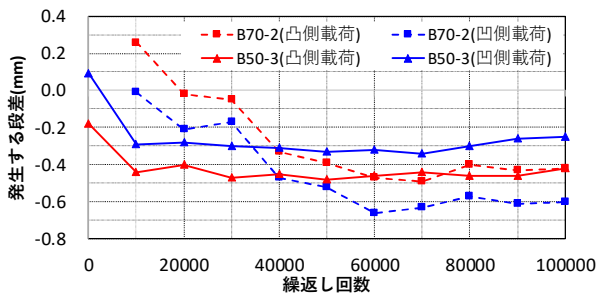


図-7 継手中央部の段差

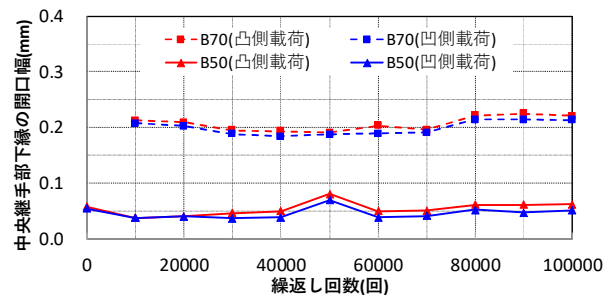
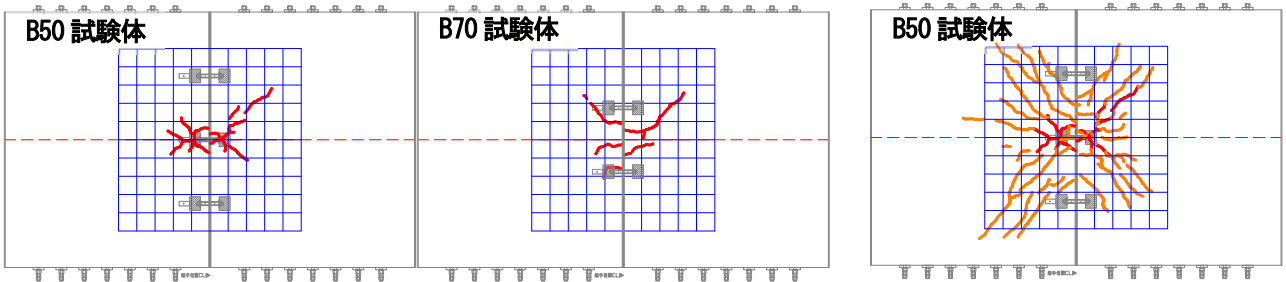


図-8 継手中央部の開口幅



(a) 255kN 載荷 10 万回載荷終了後

(b) 497kN 静的載荷終了後

図-9 試験終了後のひび割れ状況

接合ボルトの配置位置および配置間隔は残留変位に影響すると考えられる。

図-6(b)より、履歴最大荷重と残留変位および活荷重作用時の変位との関係を見ると 333kN 載荷時に増大している。その増加量は、残留変位は約 0.6mm、活荷重による変位は約 0.9mm であった。変化発生の前後における増加勾配は概ね同様であることから、B50 では 333kN 載荷時に橋軸直角方向の曲げひび割れの発生により、残留および活荷重変位に影響したと推察される。

4.2 継手中央部の挙動

図-7には、繰返し回数と 255kN 載荷時の継手部の段差の関係を示している。段差は床版継手部を挟んで測定した下面中央変位の差分により算出している。この段差は、凸側変位から凹側変位を差し引いたため、凸側の変位が大きい場合が正、凹側の変位が大きい場合が負となる。なお、段差は初期状態からの差となるため、載荷初期からの総変位を用いて算出した。

図より、B70 は繰返し回数の増加とともに段差が増加する傾向にあり、6 万回付近で一定の段差を示しており、最大の段差は約-0.7mm である。一方、B50 は 1 万回載荷時の段差でほぼ一定値を示しており、最大の段差は約-0.5mm である。この段差の違いは、接合ボルトによって接合部の開口が抑制されたことによるものと考えられる。また、段差が載荷位置に関わらず凹側で大きくなる傾向にあるが、これはせん断キーによる力の伝達位置が影響していると推察される。しかしながら、橋軸断面における円弧状の凹凸せん断キーの接触位置は載荷床版と継手部の離れに影響し、橋軸直角方向の接触範囲は接合ボルト位置とたわみ量に影響すると考えられ、本挙動を把握

することは困難である。そのため、3 次元数値解析等の実施により接触位置等の検証を進める予定である。

図-8 には、255kN 載荷時の床版継手の中央下面の開口幅と繰返し回数の関係を示している。図には、凹凸側それぞれの活荷重載荷時における開口幅を比較して示している。図より、開口幅はいずれの試験体も載荷回数に関わらず、ほぼ一定値を示している。その値は、B70 で約 0.2mm、B50 で約 0.05mm であり、中央に接合ボルトを配置した B50 で小さい。

以上の結果より、継手部に発生する段差は変形し易い個所で大きいものの、接合ボルトを配置することで継手部の開口が抑制され、せん断キーの接触位置が固定されることで、段差を小さくすることが可能になると考えられる。

4.3 ひび割れ性状

図-9 には、載荷試験終了後の床版下面のひび割れ状況を示している。図-9 (a)には、B50/B70 の 255kN 繰返し載荷試験終了後、図-9 (b)には、B50 の 497kN の計測載荷終了後の状況を示している。

図-9 (a)より、いずれの試験体も載荷位置付近に放射状のひび割れが発生していることが分かる。また、発生位置は B70 では、接合ボルト間に曲げひび割れ、B50 では、中央の接合ボルト直下にひび割れが集中する状況である。B70 の接合ボルト間における曲げひび割れは載荷回数の増加と共に徐々に広がったと考えられ、段差の増加はこのひび割れの発生によるものと推察される。

繰返し載荷後に水張試験(NEXCO 試験法 442 における確認試験)を実施し、6 時間後の床版下面からの漏水が無いことを確認した。本継手は、設計荷重において試験終

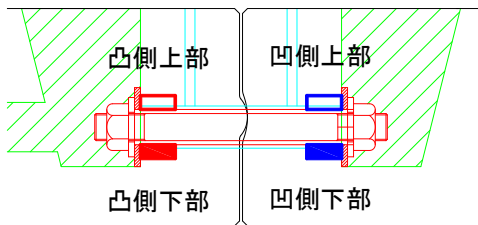


図-10 接合ボルトのゲージ貼付位置

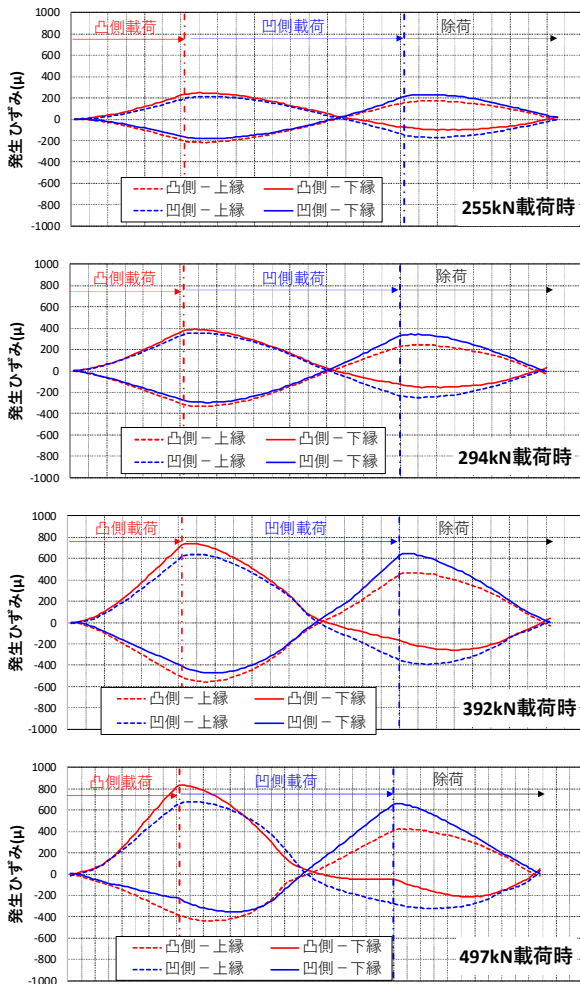


図-11 中央接合ボルトの発生ひずみ

了時まで弾性の性状が確認でき、有害なひび割れも確認されず、耐疲労性は保持していることを明らかにした。

図-9 (b)図より、載荷荷重の増加に伴うひび割れ状況を確認すると、放射状にひび割れ範囲が拡大するものの、サイドに配置した接合ボルトを起点とするひび割れは見られない。これより、床版中央位置に接合ボルトを配置した場合は、接合ボルト、ボルトボックスの断面欠損、そのモルタル充填材により最終的な破壊性状に影響する可能性があることが推察される。

4.4 接合ボルトの発生ひずみ

図-10には、接合ボルトに貼付したひずみゲージの位置を示している。その位置は、接合ボルトの端部、上下

面に貼付している。図-11には、B50の中央接合ボルトの発生ひずみを時系列で示している。図には、載荷荷重が255kN、294kN、392kN、497kN時の結果を比較している。

255kN 載荷時の波形より凸側の載荷時には、載荷側の上縁に圧縮ひずみ、下縁に引張ひずみが発生し、継手部を挟んだ反対側は上縁に引張ひずみ、下縁に圧縮ひずみが発生している。載荷位置が凹側へ移行するとともに、圧縮ひずみと引張ひずみの発生位置が逆転している。また、発生ひずみが逆転する時には、発生ひずみがほぼ同時にゼロ近傍となる。このことから、接合ボルトは主にせん断変形に対して抵抗していると考えられる。また、載荷終了後には再びゼロ近傍に戻っていることから、弾性的な挙動を示していることも分かる。

載荷荷重の増加に伴う発生ひずみを比較すると、荷重の増加とともに発生ひずみが大きくなっており、接合ボルトに発生するひずみは、255kN 載荷時に-218~251 μ 、497kN 時には-353~836 μ であった。今後は、接合ボルトの疲労破壊に対する影響についても検証を実施する。

5. まとめ

開発中のKL-C継手に対する耐疲労性に関する検討を行うため、本継手を有する床版試験体に対して、油圧ジャッキを活用した繰返し載荷試験を実施した。本試験の範囲で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 繰返し載荷試験の結果、接合ボルトの配置位置、間隔に関わらず、255kN、10万回の繰返し後は弾性挙動を示した。また、繰返し試験後の水張試験においても漏水は確認されず、本継手は耐疲労性を有することを明らかにした。
- 2) 継手部の挙動として、継手部の段差、継手部の開口が確認できた。また、その挙動は接合ボルトの配置位置により抑制が可能であることを確認した。
- 3) 接合ボルトは継手部のせん断変形に対して抵抗していることが分かった。

本試験では、簡易な確認方法として油圧ジャッキによる繰返し載荷試験を実施し、その適用性についても確認した。継手部の性能を事前に確認する試験として有効であると考えられる。また、継手開発では、数値解析による継手部の挙動把握、接合ボルトの疲労破壊などについて要素に関する検討を継続する予定である。

参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、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、令和2年7月

(2022年7月8日受付)

(2022年9月9日受理)