

# 新規開発した道路橋床版継手(KL-C継手)の 繰返し載荷試験による耐疲労性の検討

澤田純之<sup>\*1</sup>・工藤朗太<sup>\*2</sup>・内田雅博<sup>\*3</sup>・今田遥介<sup>\*2</sup>・東山浩士<sup>\*4</sup>

近年、道路橋床版を取替えるリニューアル工事が全国的に実施されている。本工事は通行規制を伴うため、工事期間の短縮化が重要な課題である。道路橋床版の取替工事では、プレキャスト床版を桁上に並べ、その床版間をループ継手で接続する工法が一般的である。本開発では、継手部の隙間が狭く、現地のコンクリート打設が省略されることにより、施工の省力化および継手部の品質安定が可能となる、新たな継手(KL-C継手)を開発している。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る。本研究では、KL-C継手の基本的な性能の確認を目的に、本継手を有する床版試験体の繰返し載荷試験を実施し、継手の耐疲労性について実験的に検討を行った。

キーワード：リニューアル工事、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、道路規制を伴う工事のため、規制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、本工事の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。継手部のコンクリート打設は、足場設置、型枠設置、打設、養生、と施工工種が多いため、現場打設を省略することで工事の省力化、工期短縮が図れる。そこで、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が、その確認方法としてNEXCO試験法442<sup>1)</sup>の輪荷重走行試験による疲労促進試験がある。この試験は床版試験体に所定の活荷重を輪荷重走行により繰返し載荷し、載荷終了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限られている。一方、近年の床版取替工事の増加や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、装置の予約が困難な状況である。そこで、一般的な載荷装置を利用した簡易的な試験での事前検討が望まれている。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した。そのため、技術研究所で保有する油圧ジャッキを使用した載荷システムを構築し、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。

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、せん断キーの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

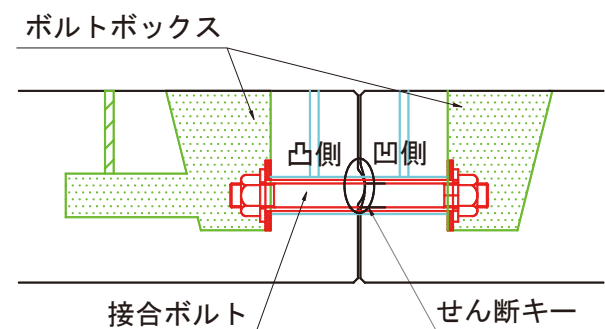


図-1 KL-C継手概要

\*1 土木研究部 \*2 技術第二部 \*3 青山機工(株)営業統括部 \*4 近畿大学理工学部

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 ( $\sigma_{28}$ )		載荷概要	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 <sup>2</sup>	59.4N/mm <sup>2</sup>	255kN：10万回繰返し 255～497kN：静的載荷	水中接着型・ 汎用エポキシ接着剤
B70	2本	700mm	56.5N/mm <sup>2</sup>	62.9N/mm <sup>2</sup>	255kN：10万回繰返し	濡面接着型・ 弾性エポキシ樹脂

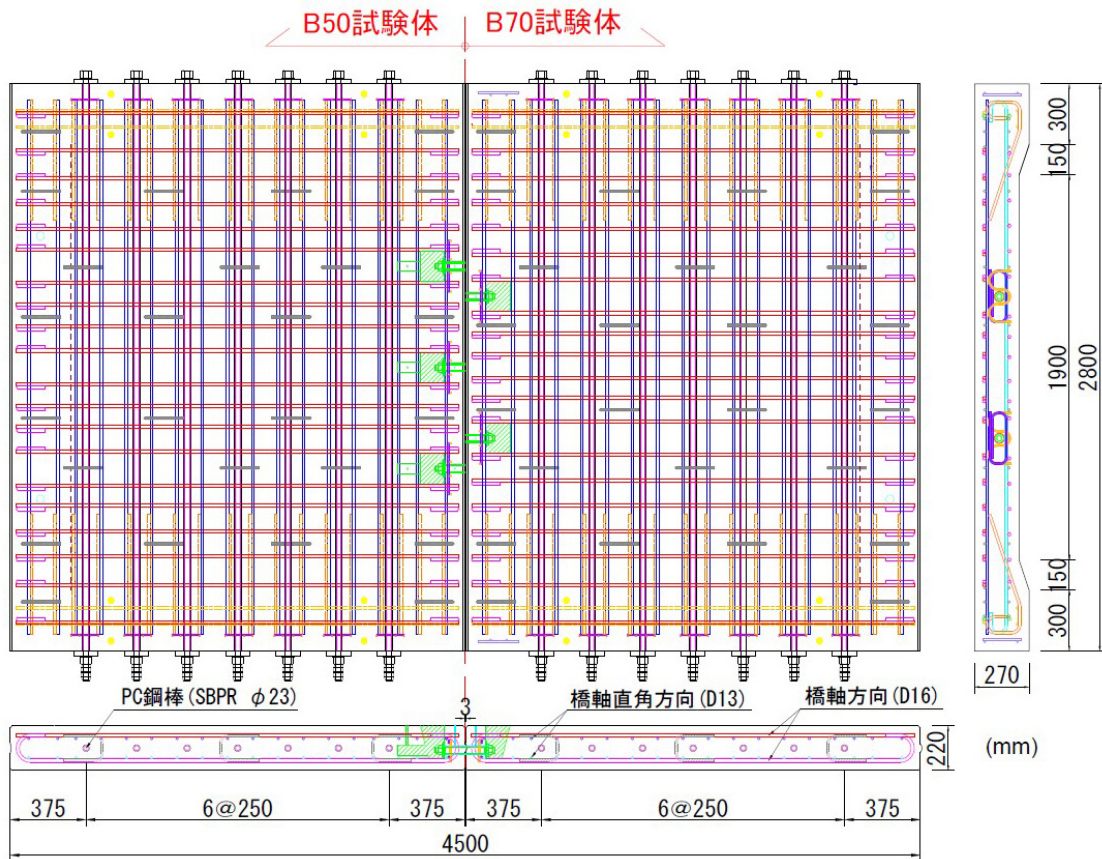


図-2 試験体の形状寸法および配筋状況

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442<sup>1)</sup>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体接合して試験体を作製した。配筋は、床版の実設計を考慮してNEXCO試験法よりも鉄筋比の小さい条件とし、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/mm<sup>2</sup>)以下となるよう242kN/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

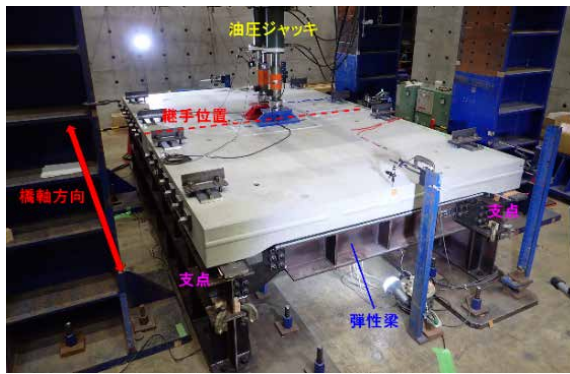
表－2 鋼材の材料特性値

使用箇所	使用鉄筋	鋼材種	引張試験結果	
			降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
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
接合ボルト	M27	-	369.8	207.8
PC鋼棒	φ23	C種1号	508.5	213.3

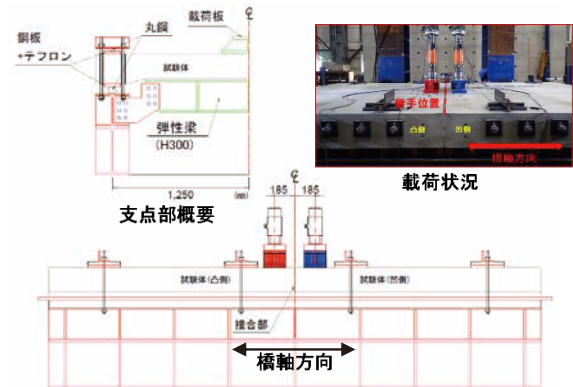
表－3 隙間充填材の材料特性値 (カタログ値<sup>2),3)</sup>)

使用隙間充填材	カタログ値		
	圧縮せん断強度 N/mm <sup>2</sup>	接着強度 (乾燥) N/mm <sup>2</sup>	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



写真－1 繰返し載荷試験の状況 (全景)



図－3 繰返し載荷試験の概要図

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た。

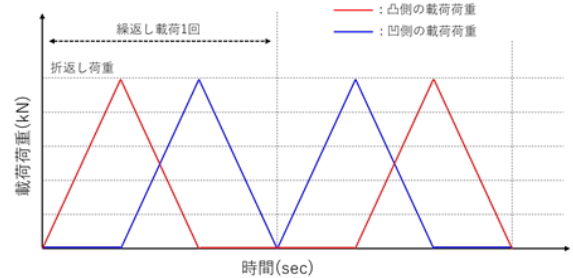
### 3.2 材料物性値

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/mm<sup>2</sup> 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<sup>2),3)</sup>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/mm<sup>2</sup>であった。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, 図－3には、繰返し載荷試験の状況(全景)および載荷試験の概要図を示している。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)部に、鋼板とテフロンシートを挟んで設置し、ピン支持に近い支持条件としている。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(H形鋼:H300・300・10・15)を配置し、床版との隙間には無収縮モルタルを充填した。

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－4には、載荷パターン概要図を示す。載荷



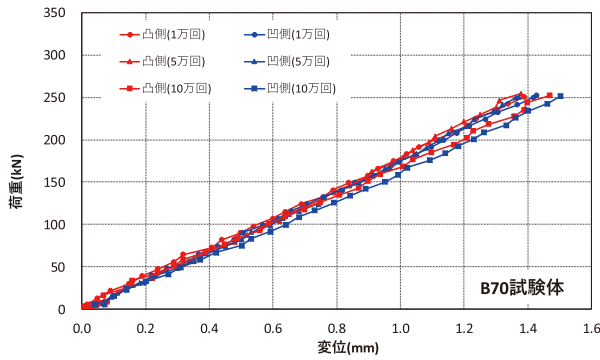
図－4 載荷パターン概要図

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た。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のため、赤色⇒青色,青色⇒赤色と交互に載荷を実施し、輪荷重の往復載荷を想定して負荷を掛けている。載荷速度は試験時には約17秒/回とし、試験データを取得する際には、載荷速度を落として載荷を行った。なお、B50については、所定の繰返し載荷試験を実施した後、497kNまで約20kNずつ折返し荷重を段階的に増加させ、試験データの取得速度にて載荷を実施してデータを取得した。

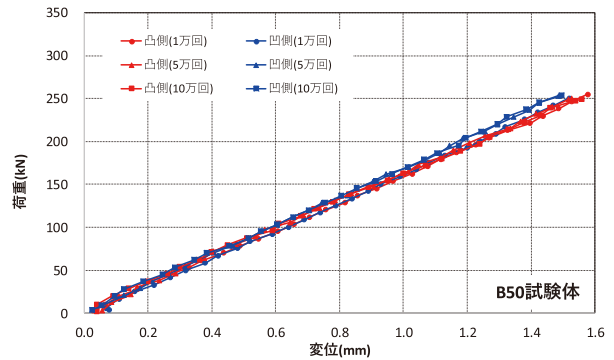
## 4. 試験結果および考察

### 4.1 荷重－変位関係

図－5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,



(a) B70 試験体



(b) B50 試験体

図-5 荷重-変位関係 (繰返し回数の比較)

10万回後のデータを重ねて示している。本継手部はせん断キーが非対称のため、各載荷回数において継手部の凹側、凸側を載荷した両データを示している。なお、ここに示す変位は、載荷初期からの総変位より計測載荷直前の残留変位を差し引いた活荷重変位を示している。図-5 (a) 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、剛性は概ね一致している。図-5 (b) の B50 の結果は、B70 よりも剛性にばらつきが少ない状態であるものの、その差は 0.1mm 程度であり、ほぼ一致していると判断できる。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、接合ボルトの配置位置、本数による影響はほぼないことが明らかになった。

図-6 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 の剛性はほぼ一致しているが、333kN 載荷時には剛性の低下が確認できる。333kN 載荷時の剛性は、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低下が見られるものの、その勾配は一定の傾きに漸近する傾向が見られる。また、勾配変化点が見られないことから、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 以上でも剛性は線形的であることから、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-7 には、載荷履歴と床版中央の残留変位 / 活荷重

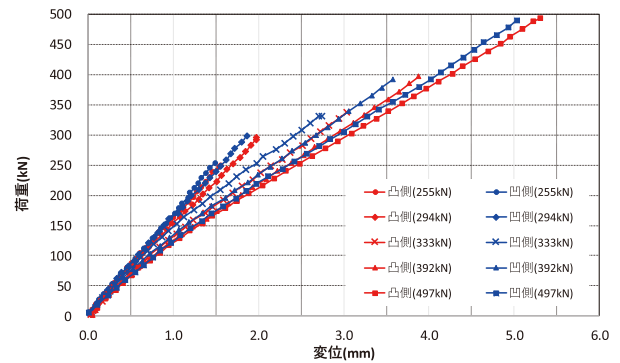
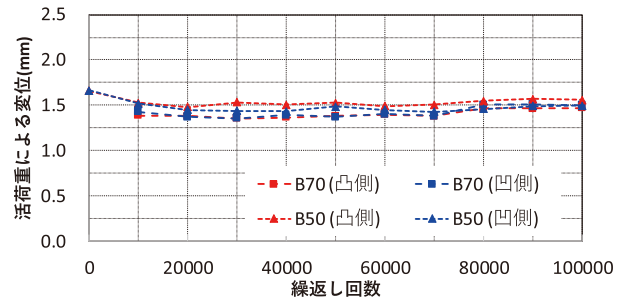
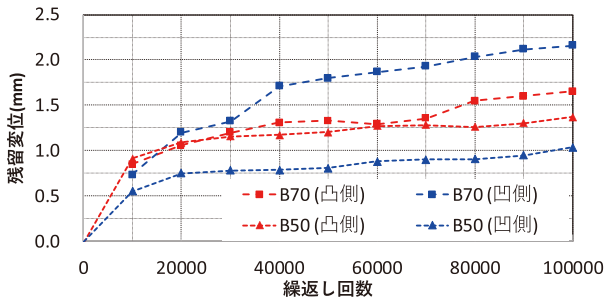


図-6 荷重-変位関係 (載荷荷重の比較)

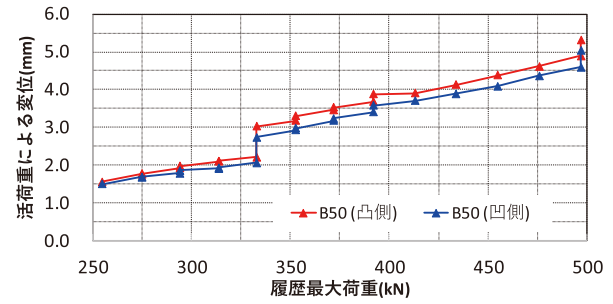
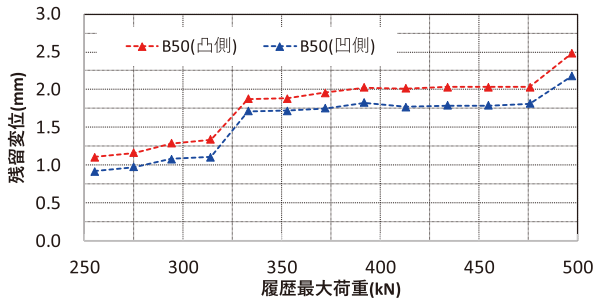
変位の関係を示している。図-7 (a) には、繰返し回数と各変位の関係、図-7 (b) には B50 の 255kN 以上の計測載荷時の載荷荷重と各変位の関係を示している。なお、図には残留変位 (左図) と活荷重による変位 (右図) の結果を示している。

図-7 (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、中心部での継手開口と共に残留変位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、段階的に残留変位が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、接合ボルトの配置位置は残留変位に影響すると考えられる。

図-7 (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

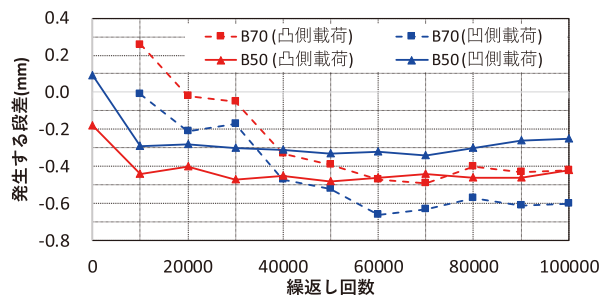


(a) 繰返し回数と残留変位（左図），活荷重載荷時の変位（右図）の関係（B70/B50 試験体）

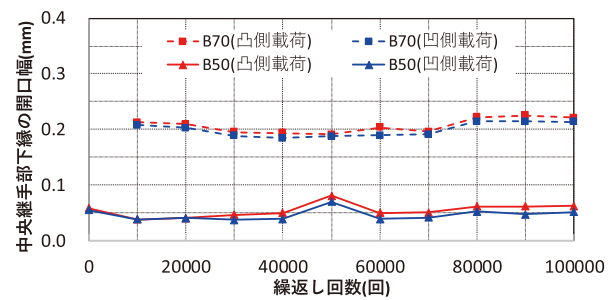


(b) 計測載荷時の載荷荷重と残留変位（左図），活荷重載荷時の変位（右図）の関係（B50 試験体）

図－7 載荷履歴と中央変位の関係



図－8 継手中央部の段差



図－9 継手中央部の開口幅

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。

### 4.3 継手中央部の挙動

図－8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 万回以降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 万回載荷以降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、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、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－9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、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箇所であり、接合ボルトを配置することで継手

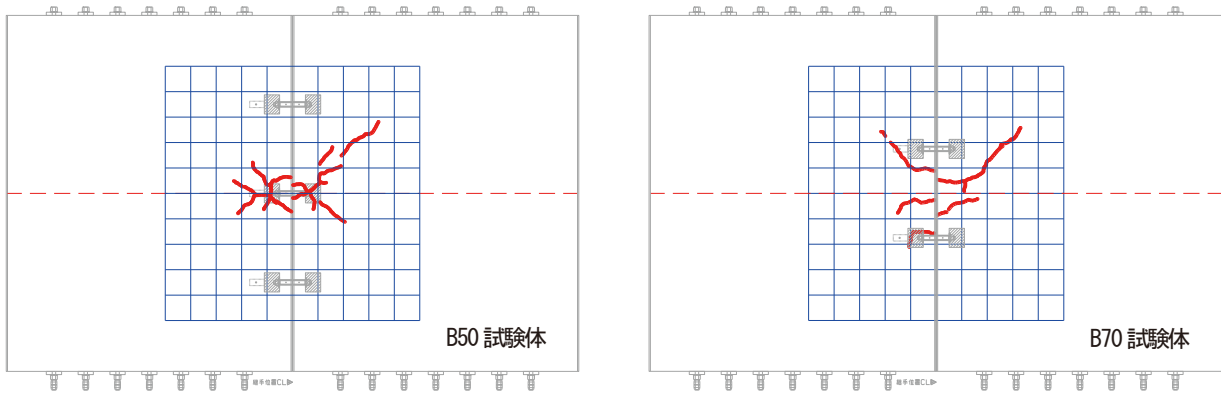


図-10 255kN 荷重 10 万回終了後のひび割れ状況

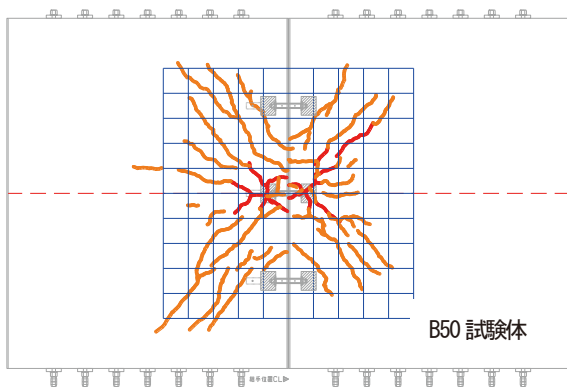


図-11 497kN 静的荷重終了後のひび割れ状況

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。

#### 4.4 ひび割れ性状

図-10, 11 には、荷重試験終了後の床版下面のひび割れ状況を示している。図-10 には、B50/B70 の 255kN 繰返し荷重試験終了後、図-11 には、B50 の 497kN の計測荷重終了後の状況を示している。

図-10 より、いずれの試験体も荷重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荷重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。

繰返し荷重後に水張試験（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-11 より、荷重荷重の増加に伴うひび割れ状況を確認すると、床版中央より放射状にひび割れ範囲が拡大している。接合ボルト近傍のひび割れに着目すると、中央の接合ボルト近傍には 255kN 時で既に発生していたひび割れが確認できるが、その外側に配置され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、床版中央の荷重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、モルタル充填材の影響により破壊性状に影響を及ぼす可能性があることが推察される。

#### 4.5 接合ボルトの発生ひずみ

図-12 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。貼付位置は、接合ボルトの端部、上下面に貼付している。図-13 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、荷重荷重が 255kN、294kN、392kN、497kN 時の結果を比較している。

255kN 荷重時の波形より凸側の荷重時には、荷重側の上面に圧縮ひずみ、下面に引張ひずみが発生し、継手部を挟んだ反対側は上面に引張ひずみ、下面に圧縮ひずみが発生している。荷重荷重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。これは、接合ボルトに逆対称の曲げモーメントが作用していると推察され、それに対応するモーメントとせん断力が作用していると考えられる。また、荷重位置の入れ替わりに伴いせん断力の方向が逆転することによる、繰返しの作用力を受ける状況と考えられる。

接合ボルトに発生するひずみに着目すると、荷重荷重の増加に伴い増加する傾向にある。そのひずみは、255kN 荷重時に  $-218 \sim 251 \mu$ 、497kN 時には  $-353 \sim 836 \mu$  であった。本結果を考慮し、接合ボルトの疲労破壊に対する影響についても検証を行う予定である。

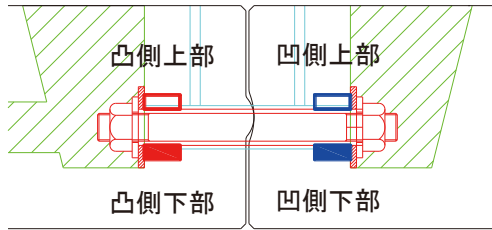


図-12 接合ボルトのゲージ貼付位置

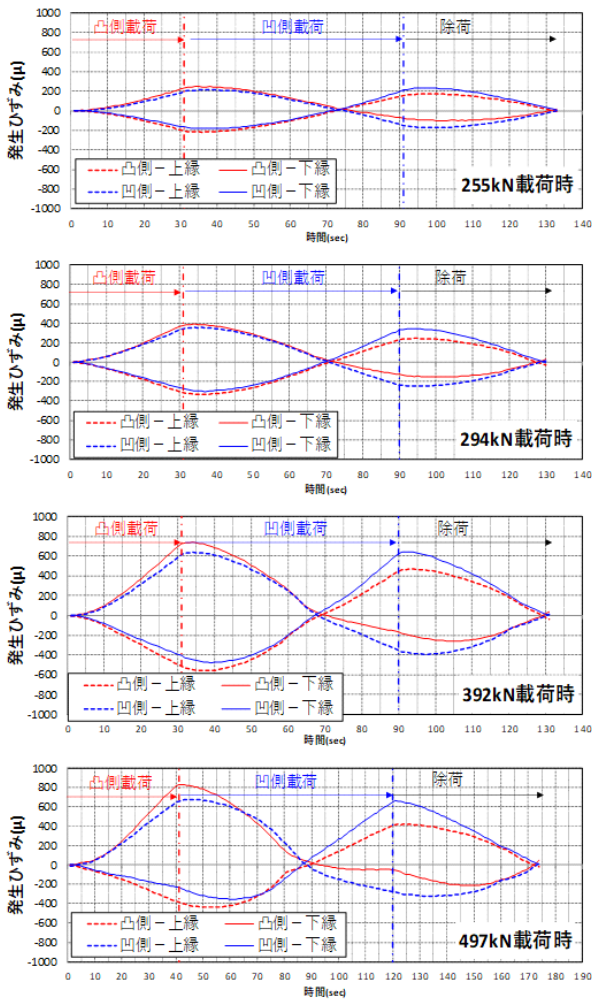


図-13 中央接合ボルトの発生ひずみ

## 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载荷試験を実施した。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) 繰返し载荷試験の結果、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、逆対称の曲げモーメントが作用する状況にあり、それに伴うせん断力が作用していると推察される。また、载荷位置の入れ替わりによって正負交番のひずみを受ける状況である。

本試験では、技術研究所にて油圧ジャッキによる繰返し载荷試験を実施し、開発継手の基本的性能を確認できたと考えている。継手部の性能を事前に確認する簡易試験としての有効性については、輪荷重走行試験との比較によって確認する予定である。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
- 2) アルファ工業製品一覧・アルファテック 340 (AT340)、アルファ工業株式会社
- 3) アルファ工業製品一覧・アルファテック 343 (AT343)、アルファ工業株式会社

## Experimental study on fatigue resistance of newly developed road bridge slab joints (KL-C joints) by cyclic loading test

Sumiyuki SAWADA, Ryota KUDO, Masahiro UCHIDA, Yosuke IMADA and Hiroshi HIGASHIYAMA

A new joint (KL-C joint) is being developed to save labor and improve the quality of road bridge slab replacement work, which has been conducted extensively in recent years. The joint under development consists of an arc-shaped shear key formed on the joint surface of the precast slab, joint bolts, and crevice filling material, eliminating the need for concrete at the joint. In this study, a cyclic loading test was performed to confirm the basic performance of the KL-C joint, and the fatigue resistance of the KL-C joint was examined.