

報告 閉合鉄筋継手を用いて接合した梁部材の疲労特性

田口 隆治*1・西村 知晃*2・中田 裕喜*3・安保 知紀*4

要旨：鉄道高架橋構築時の工期短縮を目的に開発をしている閉合鉄筋継手には、コの字状に折り曲げた軸方向鉄筋を重ね合わせる特徴があるが、一般に折曲げ部を有する鉄筋は折曲げ部で疲労破断しやすい傾向がある。本稿では、閉合鉄筋継手が梁部材の疲労強度に及ぼす影響を把握するため、高サイクル繰返し載荷試験を実施した。その結果、閉合鉄筋継手は、軸方向鉄筋の折曲げ部に曲げ応力が発生し、折曲げ開始位置のふしの根元で破断することがわかった。試験から得られた引張疲労強度は、二羽らが提案している異形鉄筋の疲労強度算定式に従って繰返し回数から求めた値より最大で約7%小さくなった。

キーワード：プレキャスト、接合部、疲労特性、折曲げ部、鉄道高架橋

1. はじめに

わが国では人口減少に伴う生産年齢人口の不足が深刻であり、特に建設業界では技能労働者の不足が課題となっている。このような背景の中、鉄筋コンクリート工事では生産性向上を目的にプレキャスト工法が期待されている。鉄道ラーメン高架橋の梁部材にプレキャスト梁部材を適用する場合、梁部材の製作誤差や施工精度が要求される。そこで、施工誤差をある程度吸収できる継手構造として開発された閉合鉄筋継手¹⁾を用いて、プレキャスト梁部材の接合工法の開発を行っている^{2,3)}。

図-1に、閉合鉄筋継手の概要を示す。閉合鉄筋継手はコの字状に折り曲げた鉄筋を重ね合わせ、鉄筋の隅角部に補強鉄筋を配置することで支圧耐力が向上し、短い継手長さで十分な耐力が発揮できる構造となっている。この継手を用いることで、プレキャスト梁部材を上方から架設することが可能となり、工期を大幅に短縮することが期待できる。閉合鉄筋継手は列車荷重を繰返し受ける梁部材に適用することを想定していることから、その疲労特性を明らかにする必要がある。

鉄筋コンクリート梁の疲労特性は、使用される異形鉄筋の疲労特性により定まると考えられる。閉合鉄筋継手の軸方向鉄筋は、折曲げ部を有する特徴があるが、一般に折曲げ部を有する鉄筋は折曲げ部で疲労破断しやすい傾向がある。鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)⁴⁾では、梁のスターラップを想定して折り曲げられた鉄筋の設計引張疲労強度は、母材の65%に低減するように規定が示されている⁵⁾。また、土木学会コンクリート標準示方書(設計編)⁶⁾では、折曲げ部を有する鉄筋の設計引張疲労強度は母材の50%に低減するように規定が示されている。

本稿では、閉合鉄筋継手を用いて接合した梁部材にお

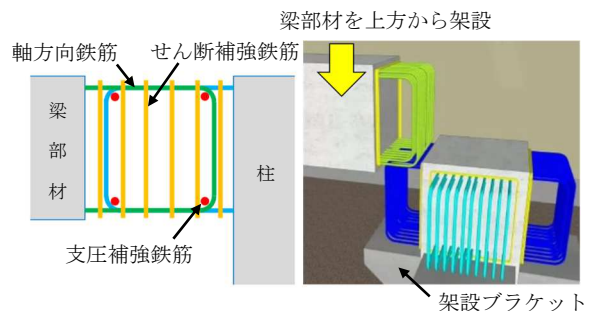


図-1 閉合鉄筋継手の概要

いて、折曲げ部が引張疲労強度に与える影響を確認することで、疲労特性を把握することを目的に実施した高サイクル繰返し載荷試験について報告する。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

図-2に試験体概要を、表-1に材料諸元を示す。本試験の疲労破壊は鉄筋の疲労破壊と想定したため、鉄筋径は実大相当としたが、試験装置の制約から、試験体の大きさは縮小モデルとした。

プレキャスト梁部材は長さを1700mm、幅を300mm、高さを400mmとした。軸方向鉄筋は、JIS G 3112に適合しているたけ節鉄筋を用いた。折り曲げ部の曲げ内半径は鉄道標準⁴⁾に従い鉄筋径の3倍とし、鉄筋の加工は節のある面を90°にコの字状に折り曲げた。なお、軸方向鉄筋の両端部は、試験体端部で厚さ19mmのプレートに溶接して定着させた。接合面は、型枠内にフィルムタイプの凝結遅延剤を貼り付け、脱型後に表面の骨材を洗い出すことで、表面に露出した粗骨材の凹凸が確認できる程度に目荒し処理を施した。

プレキャスト部材同士の軸方向鉄筋を重ね合わせた

*1 (公財) 鉄道技術総合研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修(工)(正会員)

*2 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター 修(工)(正会員)

*3 (公財) 鉄道技術総合研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博(工)(正会員)

*4 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター 博(工)(正会員)

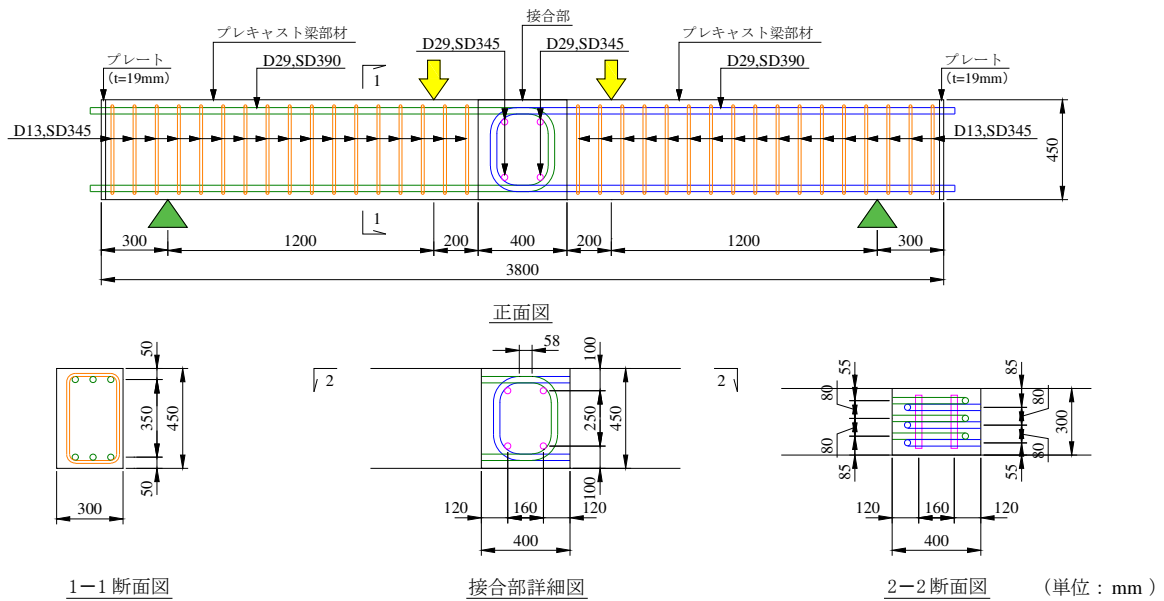


図-2 試験体概要

表-1 材料諸元

	(a)コンクリート			(b)鉄筋								
	プレキャスト梁部材 コンクリート			接合部 無収縮モルタル			鉄筋径 規格	弾性係数 (kN/mm^2)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	適用
	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	材令 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	D29 SD390	192.5	2298	442.4	666.1	軸方向鉄筋
No.1	91	35.4	34.0	85	78.7	28.4	D13 SD345	182.9	2004	366.5	527.5	せん断補強鉄筋
No.2	236	37.1	33.0	230	73.2	27.9	D29 SD345	184.9	2122	392.2	606.3	支圧補強鉄筋

表-2 荷荷条件

	荷荷荷重 (kN)		鉄筋応力 (N/mm^2)		周波数 (Hz)	引張疲労強度 f_{sr} (N/mm^2)
	最大 P_{max}	最小 P_{min}	最大 σ_{max}	最小 σ_{min}		
No.1	292	20	262	17.6	1.0~2.5	244
No.2	274	20	242	17.6	2.0	225

接合部は、長さを 400mm とした。重ね合わせられた軸方向鉄筋の直線部となる継手長さは、軸方向鉄筋径の 2 倍となる 58mm とした。コの字状に折り曲げた軸方向鉄筋の隅角部には、軸方向鉄筋と同径の支圧補強鉄筋を 1 本ずつ配置した。本試験では、軸方向鉄筋の折曲げ部の影響を確認することを目的としたため、接合部には帯鉄筋を配置しなかった。接合部は、無収縮モルタルを充填して試験体を一体化させた。

2.2 荷荷概要

表-2 に、荷荷条件を示す。高サイクル繰返し荷荷試験は、鉄筋に発生する引張応力の振幅を明確にするために 800mm とした等曲げ区間の中央に閉合鉄筋継手を配置し、せん断スパンを 1200mm とした 4 点曲げ荷荷として実施した。試験ケースは、引張疲労強度と繰返し回数との関係を確認するために、応力振幅をパラメータとして

2 ケース実施した。最大荷荷荷重は、閉合鉄筋継手を考慮しない接合部の断面諸元に対して、材料試験から得られた鉄筋およびモルタル応力とひずみの関係を用いて算出した。

荷荷方法は設定した周波数で片押し繰返し荷荷とした。さらに 1 回、10 回、100 回、1000 回、10,000 回、100,000 回、300,000 回、500,000 回を基本とした、あらかじめ設定した繰返し回数に達した時点で、所定荷重の静的荷荷を実施し計測を行った。

3. 試験結果

3.1 ひび割れ状況

図-3 に繰返し回数毎のひび割れ状況を、写真-1 に試験後の接合部を示す。1 回目の荷荷では、荷荷点間の下面から曲げひび割れが発生し、その後荷重の増加に伴

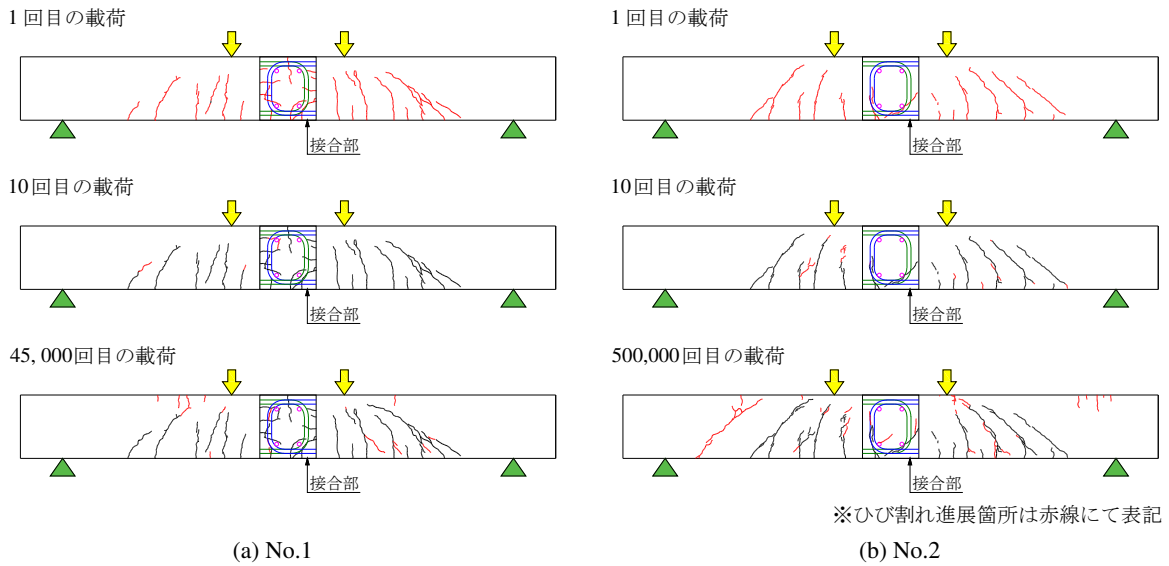


図-3 ひび割れ状況



(a) No.1



(b) No.2

写真-1 試験後の接合部

い、ひび割れの本数および長さが進展した。接合部では曲げひび割れは下側の軸方向鉄筋まで進展した後、コの字状に折り曲げた軸方向鉄筋に沿って進展した。繰返し回数が増加すると曲げひび割れは進展し、ひび割れ幅も大きくなったが、1回目の载荷ほどの顕著な進展は見られなかった。No.1 および No.2 は最大载荷荷重が異なるが、ひび割れの進展は概ね同様の傾向であった。

図-4 に、繰返し回数に応じた接合面の目開き幅の変化を示す。目開き幅は、繰返し回数の増加に伴い緩やかに大きくなっていったが、試験終了直前の载荷で急激に大きくなった。

3.2 破壊状況

試験終了の直前に、軸方向鉄筋の破断音と思われる大きな音の発生とともに、接合部では軸方向鉄筋に沿った大きなひび割れが発生した。その後、他の軸方向鉄筋の破断音と思われる大きな音の発生とともに、接合部付近の上端のコンクリートでは局所的な圧縮破壊が生じ、载荷荷重は最大载荷荷重まで増加しなくなった。また、疲労破断時の繰返し回数はNo.1 が510,644回となり、No.2

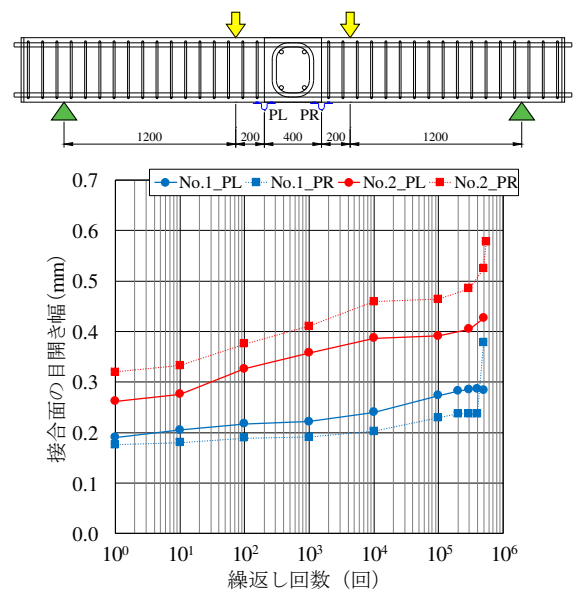


図-4 繰返し回数に応じた目開き幅の変化

が553,763回となった。

図-5 に試験終了時に軸方向鉄筋を破断した位置を、

写真-2 に軸方向鉄筋の破断状況を示す。試験終了時に複数の軸方向鉄筋が破断していた。破断した軸方向鉄筋は、No.1 が左側の梁部材で1本、右側の梁部材で2本であり、No.2 が右側の梁部材で2本であった。いずれの軸方向鉄筋も、折曲げ開始位置のふしの根元で破断した。

3.3 鉛直変位および曲げ剛性

図-6 に、No.2 の荷重と試験体中央の鉛直変位の関係を示す。残留変位は、10 回目の荷重では約 2.5mm となったことに対して、500,000 回目の荷重では約 3.5mm となったことから、10 回目の荷重から 500,000 回目の荷重の間では残留変位の増加は小さい。しかし、疲労破断時の荷重で残留変位が約 11mm となったことから、疲労破断時に残留変位が急激に大きくなる傾向が見られた。また、No.1 でも同様の傾向であった。

図-7 に、繰返し回数に応じた曲げ剛性の変化を示す。同図の縦軸は、10 回目の荷重の曲げ剛性に対する各繰返し回数の曲げ剛性の割合である。なお、曲げ剛性は図-6 に示す荷重と鉛直変位の関係から、概ね直線とみなせる荷重の最大値の 20% から 80% の範囲を直線近似した値とした。曲げ剛性は、繰返し回数を増加しても 10 回目の荷重の約 90% となり、曲げ剛性の低下はあまり見られなかった。しかし、疲労破断時の荷重では 10 回目の荷重の約 70% となったことから、疲労破壊する直前に曲げ剛性が急激に低下する傾向が見られた。

3.4 軸方向鉄筋のひずみ

図-8 に、No.2 の軸方向鉄筋が疲労破断した右側の引張側軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。同図には、全てのひずみを計測することができた最大の繰返し回数である 300,000 回目のひずみ分布を併記し、表-2 に示す最大鉄筋応力 σ_{max} を軸方向鉄筋の弾性係数で除して算出したひずみ (1257×10^{-6}) を併記した。また、軸ひずみは鉄筋の外側および内側に貼ったひずみゲージの値を平均した引張ひずみである。軸ひずみは、軸方向鉄筋の直線部である AR-2~AR-6 が最大鉄筋応力時のひずみと概ね同程度の引張ひずみが発生していたことに対して、軸方向鉄筋の鉛直部である AR-1 では約 400×10^{-6} となり直線部より小さな引張ひずみが発生した。さらに、1 回目の荷重から 300,000 回目の荷重で引張ひずみが増加したのは AR-2 のみであったことから、繰返し荷重の影響は折曲げ開始位置近傍に集中していることがわかる。AR-3 は、鉄筋の外側ひずみが内側ひずみより大きいことから外側へ変形した。300,000 回目の荷重は 1 回目の荷重より外側ひずみと内側ひずみの差が大きくなっていることから、繰返し回数の増加に伴い曲げ変形が大きくなっていることがわかる。AR-4 でも、300,000 回目の荷重では AR-3 と同様な傾向を示した。これに対して、AR-2 では鉄筋の内側ひずみが外側ひずみより大きく、内側ひずみは 300,000

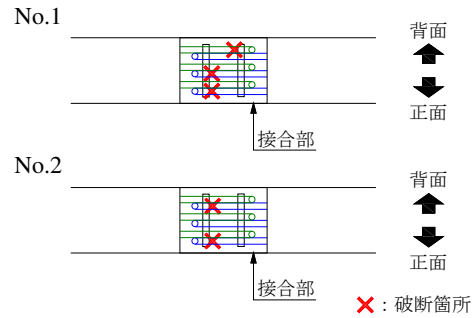


図-5 軸方向鉄筋が破断した位置



写真-2 軸方向鉄筋の破断状況

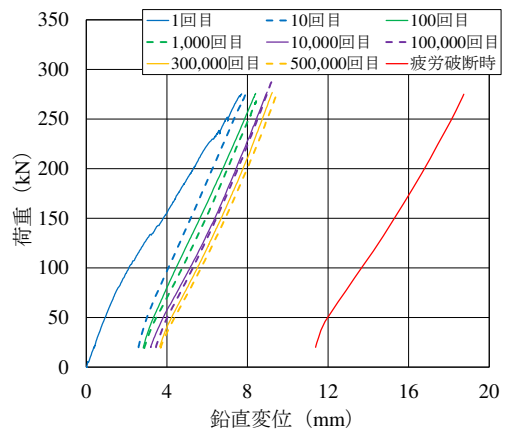


図-6 荷重と鉛直変位の関係 (No. 2)

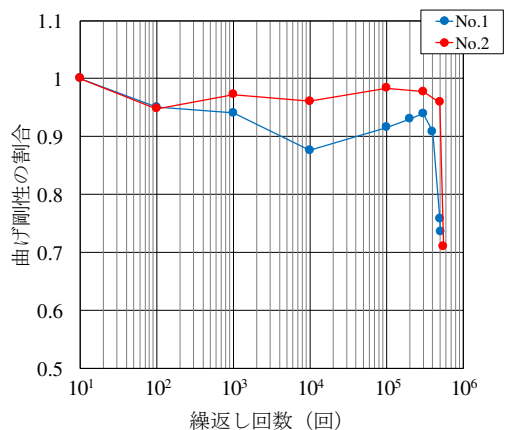


図-7 繰返し回数に応じた曲げ剛性の変化

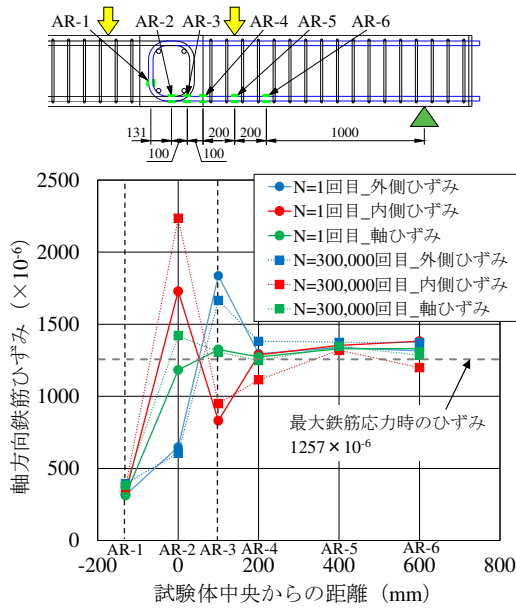


図-8 軸方向鉄筋のひずみ分布 (No. 2)

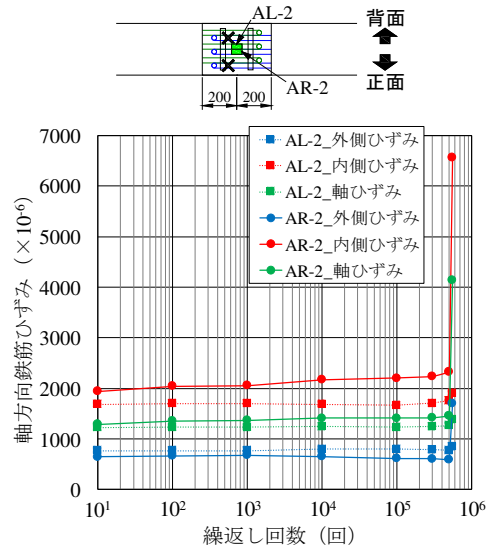


図-10 繰返し回数に応じた軸方向鉄筋ひずみの変化 (No. 2)

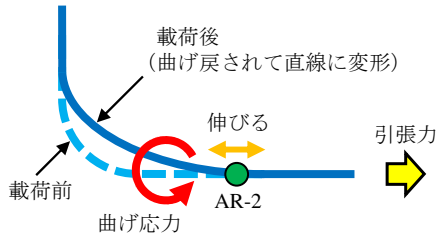


図-9 軸方向鉄筋の変形の模式図

回目の載荷が1回目の載荷より大きくなった。なお、No.1の軸方向鉄筋でも同様の傾向であった。

図-9に、繰返し回数が大きくなった時の軸方向鉄筋の変形の模式図を示す。載荷に伴い、軸方向鉄筋の直線部に引張力が作用すると、折曲げ部が引張られることで、曲げ戻されて直線に変形しようとする。すなわち、折曲げ部では、内側が伸びながら折曲げ開始位置を支点とした曲げ応力が発生する。折曲げ開始位置では、繰返し載荷によってこのような応力振幅が発生したため、疲労破断に至ったと考えられる。

図-10に、No.2の折曲げ開始位置の近傍であるAL-2およびAR-2の繰返し回数に応じた軸方向鉄筋のひずみの変化を示す。引張ひずみは、繰返し回数に増加に伴いわずかに大きくなった。その後、疲労破断時の載荷で急激に大きくなり、降伏ひずみ (2298×10^{-6}) より大きくなった。軸方向鉄筋が疲労破断したことで、破断した軸方向鉄筋が負担していた引張応力を他の軸方向鉄筋が負担したことがわかる。また、外側ひずみと内側ひずみの差も急激に大きくなったことから、折り曲げ部に発生した曲げ応力も急激に大きくなったことがわかる。

3.5 コンクリートのひずみ

図-11に、繰返し回数に応じたコンクリートのひずみ

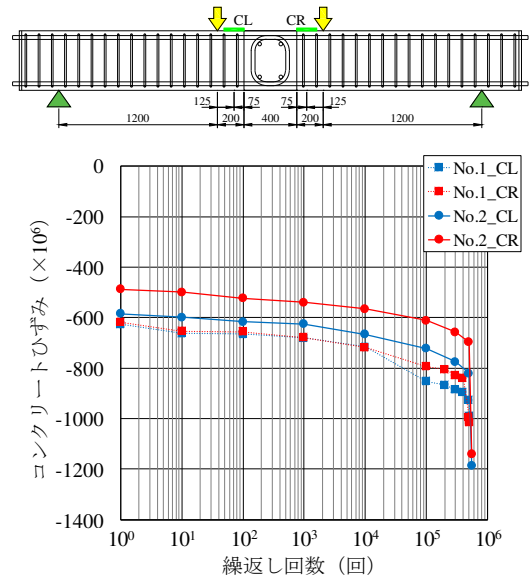


図-11 繰返し回数に応じたコンクリートのひずみの変化

の変化を示す。コンクリートの圧縮ひずみは、繰返し回数の増加に伴い緩やかに大きくなったことから、コンクリートは収縮やクリープの影響を受けていることが考えられる。その後、圧縮ひずみは疲労破断時の載荷で急激に大きくなった。ここから、引張側で軸方向鉄筋が疲労破断したことにより、中立軸が圧縮側に極端に移動したことがわかる。

4. 計算値との比較

図-12にS-N線図を、表-2に疲労破断時の引張疲労強度の比較を示す。同図には、実験式および設計式により算出したS-N線図を併記した。実験式は母材を直

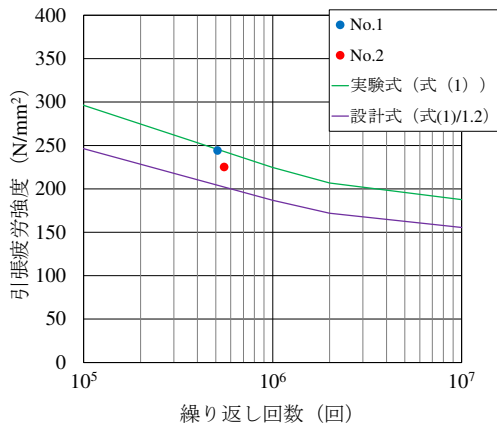


図-12 S-N線図

表-2 引張疲労強度の比較

	実験値 (kN/mm ²)	実験式 (式(1)) (kN/mm ²)	設計式 (式(1)/1.2) (kN/mm ²)
No.1	244	243 (1.00)	203 (0.83)
No.2	225	241 (1.07)	201 (0.89)

() 内の数字は実験値に対する実験式および設計式の比率

筋とし、式(1)に示す二羽らが提案している異形鉄筋の疲労強度算定式⁷⁾を適用し、設計式は鉄道標準⁴⁾に示される f_{sr} の算定式を適用した。ただし、ここでは材料係数を1.0とした。なお、鉄道標準⁴⁾に示される f_{sr} は式(1)の f_{sr} の1/1.2倍である。

$$f_{sr} = (1 - \sigma_{min} / f_{su}) \frac{10^\alpha}{N^k} \quad (1)$$

f_{sr} : 引張疲労強度

σ_{min} : 鉄筋の最小応力 (N/mm²)

f_{su} : 鉄筋の引張強度 (N/mm²)

$$\alpha = k_0(3.17 - 0.003D) \quad (2)$$

k_0 : 鉄筋の節の形状に関する係数。ここでは、1.00とした。

D : 鉄筋径 (mm)

N : 繰返し回数 (回)

k : 0.12

いずれの実験値も設計式より大きかった。しかし、No.2の実験値は実験式より約7%低い値であった。これは、図-9に示すように軸方向鉄筋を折り曲げた影響によって疲労破断したためであると考えられる。これに対して、No.1の実験値は実験式と概ね同等であった。しかし、高サイクル繰返し载荷試験では試験結果にばらつきがあることが考えられるため、閉合鉄筋継手の設計引張疲労強度は母材の設計引張疲労強度を低減するのがよいと考えられる。

5. まとめ

閉合鉄筋継手を鉄道ラーメン高架橋の柱梁接合部に適用した場合の疲労特性を把握するため、同継手を用いて接合した梁部材の高サイクル繰返し载荷試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 閉合鉄筋継手は、軸方向鉄筋の折曲げ部に曲げ応力が発生し、折曲げ開始位置のふしの根元で破断することがわかった。
- (2) 軸方向鉄筋の一部が疲労破断したことにより、中立軸が圧縮側に極端に移動したことで接合面の目開き幅が急激に大きくなり、残留変位が急激に大きくなり、曲げ剛性が急激に低下し、接合面付近の上端のコンクリートでは圧縮ひずみが急激に大きくなる傾向が見られた。
- (3) 閉合鉄筋継手の引張疲労強度は、軸方向鉄筋を折り曲げた影響を受けて、二羽らが提案している異形鉄筋の疲労強度算定式⁷⁾に従って繰返し回数から求めた値より最大で約7%低い値となった。

参考文献

- 1) 渡邊明之, 石橋忠良, 栗栖基彰, 西島和男: 補強鉄筋を有する閉合形状に曲げ加工した重ね継手に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.791, VI-67, pp.11-18, 2005.6
- 2) 土井至朗, 安保知紀, 西村知晃, 中田裕喜: 閉合鉄筋継手で接合した梁部材のせん断挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.619-624, 2022
- 3) 西村知晃, 安保知紀, 松岡茂, 石橋忠良: 閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト梁柱接合部の高応力繰返し性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.625-630, 2022
- 4) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 2004
- 5) 佐藤勉, 斎藤啓一, 寺田年夫, 宮本征夫: スターラップを有するRC梁のせん断疲労強度, 鉄道総研報告, Vol.4, No.1, pp.29-35, 1990.1
- 6) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書 (設計編), 2018.3
- 7) 二羽淳一郎, 前田詔一, 岡村甫: 異形鉄筋の疲労強度算定式, 土木学会論文集, 第354号, V-2, pp.73-79, 1985.2