

論文

荷重分布型伸縮装置の耐疲労性の評価および建研式引張式罫による引張接着強度

水口和彦*, 阿部忠**, 佐々木茂隆***, 野口博之****, 深水弘一*****, 金子昌明*****

*博(工) 日本大学教授, 生産工学部土木科学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**博(工), 日本大学 名誉教授 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

****博(工), 日本大学助教, 生産工学部土木科学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

*****山王株式会社 (〒 861-8043 熊本県熊本市東区戸島西 5-5-57)

本研究は、伸縮装置を設置した RC はりの定点疲労実験を行い、耐疲労性を検証した。その結果、従来型の伸縮装置を設置した RC はりに対して荷重分布型伸縮装置を設置した RC はりおよび接着剤を塗布して設置した RC はりは 63 倍、接着剤を用いることで 153.9 倍の疲労寿命が向上した。破壊状況は、従来型の伸縮装置を設置した RC はりは荷重載荷版直下で曲げ破壊となり、破壊位置から支点間がはく離し、荷重分布鋼板を設置した RC はりおよび接着剤を用いて設置した RC はりは支間中央で曲げ破壊した。荷重分布鋼板が引張応力を分担し、RC はりのたわみ・鉄筋ひずみの増加が抑制された。建研式引張試験においても接着剤を用いることで終局時まで引張強度が確保されることを確認した。

キーワード: RC はり, 荷重分布型装置, 定点疲労実験, 耐疲労性, 破壊モード

1. はじめに

道路橋の伸縮装置は、大型車両の荷重変動に伴う衝撃により損傷を受け、取替工事が年々増加している。伸縮装置は早くも 3, 4 年、平均 10 年程度で取替られている。伸縮装置を通過する際に発生する荷重変動は、段差量 20mm で軸重量を基準荷重とした場合に約 47 %の荷重変動が作用するとともに 0.4 以上の衝撃係数が作用している¹⁾。伸縮装置の損傷原因の多くは、車両の衝撃による破損劣化や伸縮装置部のコンクリート、さらには RC 床版の損傷によるものである。伸縮装置の取替工事においては、老朽化した伸縮装置を撤去し、設置においては RC 床版にアンカー筋挿入用の孔を開け、ハンマーの打撃によりアンカー筋を打ち込み、伸縮装置の骨組み筋と溶接し、超速硬コンクリートを打ち込み一体化している。しかし、アンカー筋の打ち込みによる新たなひび割れの発生や輪荷重設置面から 45 度下方に輪荷重が分布することから、その周辺の RC 床版の損傷が懸念されている。これらの課題を解決するために、荷重分布型伸縮装置²⁾ (以下、荷重分布型装置とする) が提案され、実橋に採用されている。しかし、伸縮装置には輪荷重の衝撃が連続的に作用することから、疲労実験による耐疲労性を検証する必要があると考える。

そこで本研究では、荷重分布型装置を設置した RC はりに定点疲労実験を実施し、等価繰り返し回数より耐疲労性を検証する。実験に用いる供試体には、突き

合わせタイプの荷重集中型装置を設置した RC はり、荷重分布型装置を設置した RC はりおよび荷重分布型装置の設置において 2 種類の接着剤を用いて設置した RC はりの 3 タイプとし、荷重集中型装置を設置した RC はりの繰り返し回数を基に耐疲労性を評価した。また、たわみ、ひずみ、さらには建研式引張試験による界面の引張接着強度試験を行い、荷重分布型装置の実用性を評価する。

2. 伸縮装置の寸法および使用材料

2.1 実験供試体の寸法

本実験では、伸縮装置の耐荷力性能および耐疲労性の検証を行う。伸縮装置を設置した RC 床版を図-1 に示す。本供試体は、図-1 に示す実橋 RC 床版の張出部に伸縮装置を設置した寸法を考慮した RC はりとした。ここで、伸縮装置の断面寸法を図-2、RC はり供試体の寸法を図-3に示す。

(1) 荷重集中型装置

荷重集中型装置の断面寸法は図-2(1)に示すように、厚さ 9mm の鋼板パラペットに D16 のジベル筋を溶接し、この部位を縦筋 D16 と溶接した。また、圧縮鉄筋として D13 をジベル筋と縦筋の交差部に溶接した。また、供試体の寸法は図-3(1)に示すように、RC はりの厚さを 100mm とし、鉄筋は引張側のみに D16 を 3 本配置した単鉄筋配置として、その上に伸縮装置を設置した。よって、設置後は RC はりは高さ 200mm、

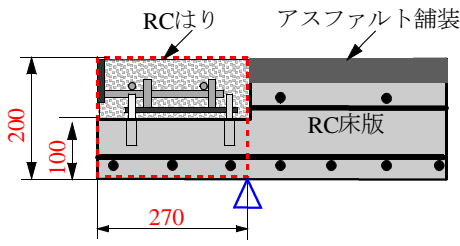
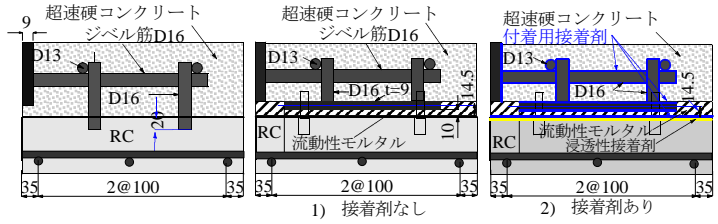
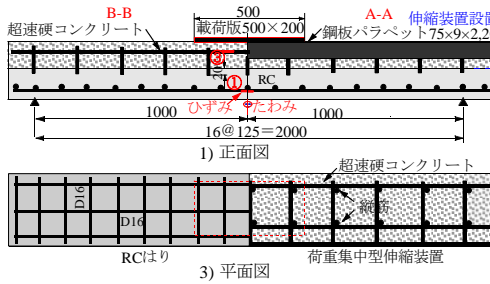


図-1 伸縮装置を設置したRC床版

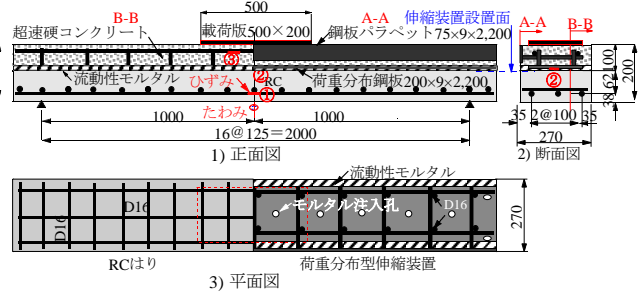


(1) 荷重集中型装置 (2) 荷重分布型装置

図-2 伸縮装置の断面寸法



(1) 荷重集中型装置



(2) 荷重分布型装置

図-3 RCはり供試体寸法

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋 (SD345)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RCはり	36.3	D16	360	496	200

表-2 伸縮装置に用いた材料の特性値

材料		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
鋼製パラペット	一般鋼板SS400	305	445	200
荷重分布鋼板				
ジベル筋	D16 (SD345)	388	516	
縦筋	D16 (SD345)	401	574	
交差部軸方向筋	D13 (SD345)	389	592	

幅 270mm, 長さ 2,200mm である。

(2) 荷重分布型装置 (接着剤なし)

荷重分布型装置を設置した供試体の断面寸法を図-2(2)に示す。伸縮装置の鋼板パラペット、ジベル筋、縦筋および圧縮鉄筋の配置は荷重集中型装置と同様である。荷重分布型装置は、荷重分布鋼板の上面に荷重集中型装置の縦筋を溶接した構造である。よって、鋼材および骨組み鉄筋の寸法は荷重集中型装置と同様である。また、供試体の寸法は図-3(2)に示すように、RCはりの引張側にD16を3本配置した単鉄筋配置とし、設置後の寸法は、高さ200mm、幅270mm、長さ2,200mmである。

(3) 荷重分布型装置 (接着剤あり)

接着剤を用いた供試体の断面寸法は、接着剤を用いないRCはりと同様とし、設置では、RC床版コンクリート上にひび割れ補修用の浸透性接着剤と打継ぎコンクリートと伸縮装置に付着用接着剤を塗布して設置する(図-2(2))。なお、供試体の寸法は図-3(2)に示すように、単鉄筋配置とした。設置後寸法は、高さ200mm、幅270mm、長さ2,200mmである。

2.2 供試体材料

(1) RCはりの使用材料

伸縮装置を設置するRCはりのコンクリートには、普通セメントと5mm以下の砕砂および5mm~20mmの砕石を使用した。コンクリートの設計基準強度は、道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)³⁾に規定する24N/mm²を目標とした。次に、供試体の鉄筋にはSD345, D16を用いる。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1に示す。材齢28日での

コンクリートの圧縮強度は36.3N/mm²、鉄筋の降伏強度は360N/mm²である。

(2) 伸縮装置に用いる鋼材

荷重集中型装置および荷重分布型装置の鋼板パラペットおよび荷重分布鋼板にはSS400、厚さ9mmの一般鋼板を用いる。ここで、鋼板および鉄筋の材料特性値を表-2に示す。また、骨組み材にはSD345, D16のジベル筋と異形棒鋼を用いる。

(3) 伸縮装置の設置に用いる材料

荷重分布型装置の設置においては、10mmの隙間を要することから流動性超速硬モルタルを用いる。ここで、流動性超速硬モルタルの配合条件を表-3に示す。また、荷重集中型装置および荷重分布型装置の荷重分布鋼板上面には、材齢3時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度24N/mm²以上が発現可能な超速硬コンクリートを用いる。よって、セメントには超速硬セメントに最大寸法20mmの骨材が配合されたプレミックス材を用いた。ここで、超速硬コンクリートの配合を表-4に示す。なお、3時間後の圧縮強度は25.4N/mm²、24時間後では51.9N/mm²である。

表-3 超速硬モルタルの配合条件

水材料比	練り上げ量 (約13.50)	
	プレミックス	水
18	25kg	4.5

表-4 超速硬コンクリートの配合条件

練り上げ量 (25L)			材齢3時間の 圧縮強度
セメント 骨材	粗骨材	水・減水剤 遅延剤	
30kg	25kg	4.0kg	25.4N/mm ²

表-5 接着剤の特性値

項目		浸透性接着剤	付着用接着剤
外観	主剤	無色液状	白色ペースト状
	硬化剤	無色液状	青色液状
混合比		10 : 3	5 : 1
硬化物比重		1.2	1.4
圧縮強度		108.0N/mm ²	114.0N/mm ²
圧縮弾性係数		2,904N/mm ²	3,612N/mm ²
曲げ強さ		96.0N/mm ²	50.0N/mm ²
引張せん断強さ		14.0N/mm ²	14.9N/mm ²
コンクリート 付着強さ		2.6N/mm ² 以上	3.7N/mm ² 以上

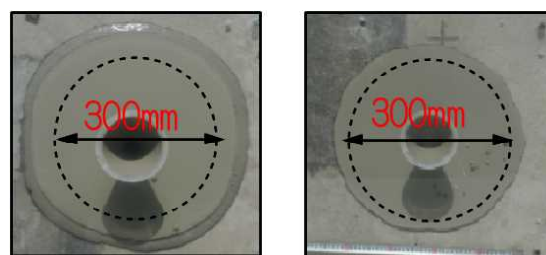
(4) 浸透性接着剤および付着用接着剤

伸縮装置撤去時に発生する新たなひび割れの補修には、低粘度エポキシ系接着剤（以下、浸透性接着剤とする）を用いた。浸透性接着剤は 0.05mm 以上のひび割れに浸透する結果が得られている。また、打ち継ぎモルタルおよびコンクリートとの付着力を高めるために高耐久型エポキシ系接着剤（以下、付着用接着剤とする）を用いる⁴⁾。ここで、浸透性接着剤および付着用接着剤の特性値を表-5に示す。

3. 流動性モルタルの充填範囲の検証

3.1 流動性モルタルの充填状況に関する実験

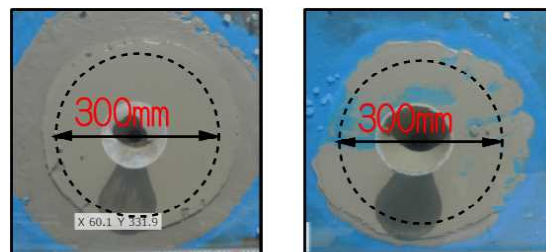
荷重分布鋼板と既設 RC 床版との隙間 10mm に接着剤を塗布した場合における流動性モルタルの充填状況の確認を行った。実験方法は、図-3(2)に示す流動性モルタルを充填するためにφ 30mm の孔を設けたアクリル板を RC 床版表面から、隙間 10mm, 5mm を確保して固定した。その後、表-3に示す流動性モルタルをそれぞれ充填した。なお、充填状況の確認に関する実験で用いた流動性モルタルの材齢 3 時間の圧縮強度は 26.5N/mm² と静荷重実験に用いた供試体の強度と概ね同じである。ここで、供試体名称を隙間 10mm を FM-10、隙間 5mm を FM-5 とする。次に、コンクリート表面に浸透性接着剤および付着用接着剤を塗布した場合の検証も行う。供試体名称は FM-10-A, FM-5-A とした。



1) 隙間10mm

2) 隙間5mm

(1) 接着剤なし



1) 隙間10mm

2) 隙間5mm

(2) 接着剤あり

写真-1 流動性モルタルの充填状況

3.2 流動性モルタルの充填範囲

流動性モルタルの充填状況に関する結果を写真-1に示す。供試体 FM-10, FM-5 では、接着剤が塗布されていないことから流動性モルタルを注入した直後から十分な広がり確認され、最終的な半径はそれぞれ 220mm, 200mm であった。また、供試体 FM-10-A, FM-5-A では、接着剤塗布により注入した直後は供試体 FM-10, FM-5 に比べ緩やかであったが、硬化に至る前には十分な広がりとなり、最終的な半径はそれぞれ 190mm, 175mm であった。よって、実橋梁における不陸を考慮してコンクリート表面と荷重分布鋼板に 2 種類の接着剤を塗布した場合でも、荷重分布鋼板に 200mm 間隔で設けられたφ 30mm の孔から流動性モルタルは十分な充填が可能といえる。

4. 試験体の施工手順

4.1 荷重集中型装置

荷重集中型装置の設置手順を図-4に示す。まず、図-3(2)に示す RC 床板張出部を模擬した RC はりを型枠に設置する（図-4(1)に示す赤枠）。コンクリート上面をドリルで深さ 20mm の孔を 22 箇所削孔し、研掃する。次に、伸縮装置の縦筋をアンカー筋として孔に挿入する（図-4(2)）。既往の設置では、孔に設置した後はそのままの状態コンクリートを打ち込みするが、本供試体の孔と鉄筋の隙間には樹脂接着剤を充填し、設置した。設置終了後、表-4に示す配合条件で練混ぜた超速硬コンクリートを既設床版上面から 100mm の範囲に打ち込み、パイプレータで締め固めた後、表面仕上げして養生する（図-4(3)）。なお、

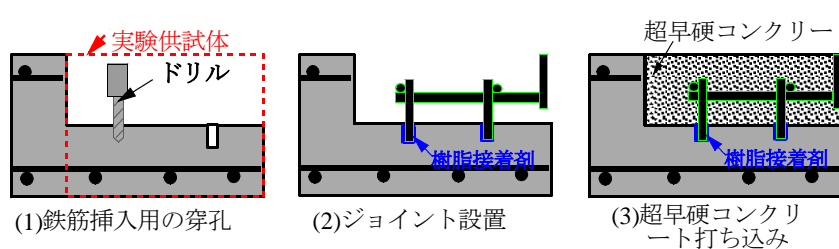


図-4 荷重集中型装置の設置手順

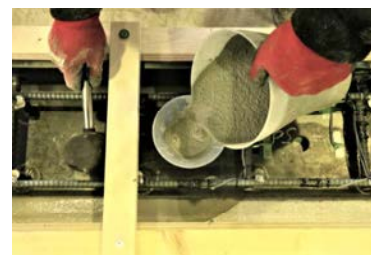


写真-2 流動性モルタル充填

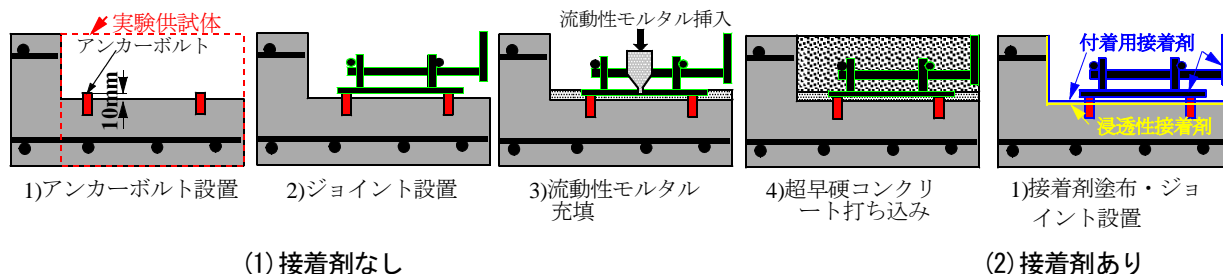


図-5 荷重分布型装置の設置手順

鉄筋端部を埋め込む孔の削孔からコンクリート打ち込み終了までの時間は 180 分程度であった。

4.2 荷重分布型装置

荷重分布型装置の設置方法を図-5、流動性モルタルの充填状況を写真-2に示す。まず、型枠に設置した後、RC 床版を模擬した RC はりコンクリートの表面を骨材が見える程度まで研掃する。研掃後、荷重分布鋼板の端部 4 箇所アンカーボルトを設置する(図-5(1), 1))。次に、荷重分布型装置をアンカーボルトに固定する(図-5(1), 2))。流動性モルタルの注入方法は写真-2に示すように、荷重分布鋼板にはφ 30mmの孔を 200mm 間隔で設けたことから、この孔に専用の円錐形のジョウゴを設置し、ハンマーで衝撃を与えながら順次充填する(図-5(1), 3))。充填時間は 1 人で行った場合は 20 分程度であり、10mm の隙間における流動性は良好であった。その後、荷重分布型装置の荷重分布板表面から 80mm の高さに超速硬コンクリート打ち込み、パイプレータで締め固めた後、表面仕上げして養生する(図-5(1), 4))。伸縮装置設置からコンクリート打ち込み終了までの所要時間は 90 分程度で、荷重集中型装置と比較して設置に要する時間は大幅に短縮される。

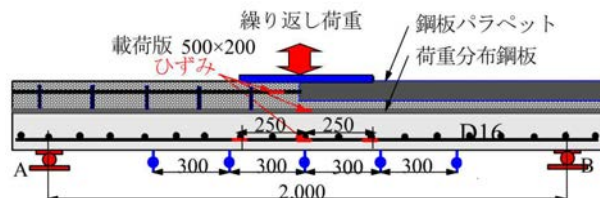


図-6 定点疲労実験による計測位置

疲労実験に用いる供試体名をそれぞれ RCF-J, RC-F-J-N, RC-F-J-A とする。また、計測は、たわみ、RC はりの鉄筋のひずみ、伸縮装置の鋼板および圧縮鉄筋のひずみとする。また、破壊時のひび割れ状況を観察する。

5.2 等価繰り返し回数

定点疲労実験における耐疲労性の評価は、等価繰り返し回数 N を算出して検証した。等価繰り返し回数 N はマイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。伸縮装置は鋼材と鉄筋を溶接した鋼構造であることから等価繰り返し回数 N の算定には、鋼材の S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 $m = 3.0$ を適用する。

$$N = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

ここで、 N : 等価繰り返し回数(回)、 P_i : 载荷基準荷重 (kN)、 P : 基準荷重 (50kN)、 n_i : 実験走行回数(回)、 m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 (= 3.0)

5. 定点疲労実験および等価繰り返し回数

5.1 定点疲労実験方法および計測

定点疲労実験は図-6に示すように、道示に規定する輪荷重設置面 500mm×200mm の载荷版を用いた。本実験の载荷基準荷重は 50kN とし、振幅は ±30kN (最大 80kN, 最小 20kN) で、2Hz の正弦波形で载荷した。载荷基準荷重 50kN で 20 万回、その後、20 万回ごとに荷重を 20kN 増加する段階荷重载荷とした。定点疲

6. 定点疲労実験における結果および考察

6.1 等価繰り返し回数

定点疲労実験において各供試体の破壊に至るまでの等価繰り返し回数を表-6に示す。

供試体 RC-F-J は、表-6より、等価繰り返し回数は

表-6 定点疲労実験による等価繰り返し回数

供試体		等価繰り返し回数 (回)				合計 (回)	等価繰り返し回数比
		載荷荷重 50kN	載荷荷重 70kN	載荷荷重 90kN	載荷荷重 110kN		
RC-F-J	N	12,500				12,500	
	N _{eq}	24,414				24,414	—
RC-F-J-N	N	200,000	200,000	8,566		408,566	
	N _{eq}	390,625	1,071,875	97,572		1,560,072	63.90
RC-F-J-A	N	200,000	200,000	200,000	849	600,849	
	N _{eq}	390,625	1,071,875	2,278,125	17,657	3,758,282	153.94

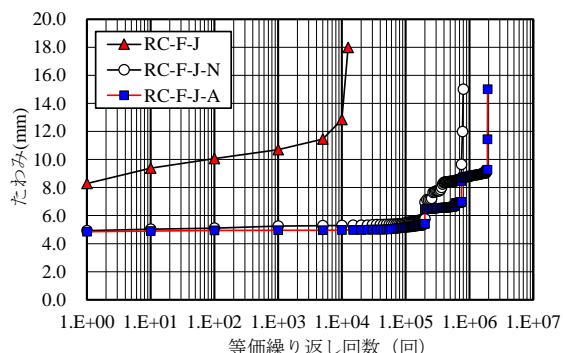


図-7 たわみと等価繰り返し回数の関係

24,414 回である。これを基準に耐疲労性を検証した。

次に、直接伸縮装置を設置した供試体 RC-F-J-N の等価繰り返し回数は 1,560,072 回であり、供試体 RC-F-J の 63.9 倍である。また、2 種類の接着剤を塗布して伸縮装置を設置した供試体 RCF-J-A の等価繰り返し回数は 3,758,282 回であり、供試体 RC-F-J および供試体 RC-F-J-N の累積繰り返し回数のそれぞれ 153.9 倍、2.41 倍である。

以上より、荷重集中型装置を設置した RC はりに対して、荷重分布型装置を設置した RC はりおよび接着剤を塗布した RC はりは耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

6.2 たわみと繰り返し回数の関係

供試体 RCF-J のたわみと等価繰り返し回数の関係は、図-7より1回でのたわみは 8.24mm であり、等価繰り返し回数 10,000 回で 11.45mm、等価繰り返し回数 24,414 回で 17.98mm とたわみの増加が著しい。

次に、供試体 RC-F-J-N の等価繰り返し回数 1 回のたわみは 4.93mm であり、等価繰り返し回数 390,625 回、1.071×10⁶ 回においても供試体 RC-F-J のたわみを大幅に下回っている。等価繰り返し回数 1.560×10⁶ 回での最大たわみが 15.00mm である。また、供試体 RC-F-J-A の等価繰り返し回数 1 回のたわみは 4.85mm である。等価繰り返し回数 390,625 回、1.071×10⁶ 回時において供試体 RC-F-J-N のたわみを下回っている。等価繰り返し回数 3.758×10⁶ 回のたわみが 15.01mm で、破壊と見なした。

以上より、荷重分布型装置を設置した場合、接着剤の有無に関わらずたわみが増加が大幅に抑制された。

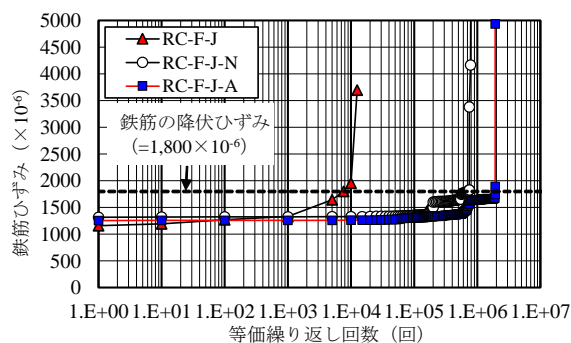


図-8 主鉄筋ひずみと等価繰り返し回数の関係

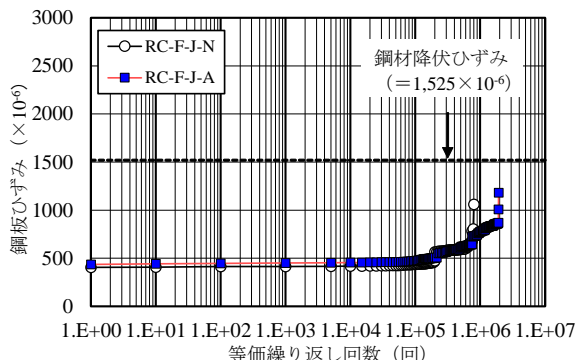


図-9 荷重分布鋼板のひずみと等価繰り返し回数の関係

6.3 鉄筋ひずみと等価繰り返し回数の関係

図-8より、供試体 RC-F-J の等価繰り返し回数 1 回のひずみは、1,160×10⁻⁶ である。降伏ひずみに達した等価繰り返し回数は 8,800 回で、最大等価繰り返し回数 24,414 回でひずみは 3,694×10⁻⁶ である。

次に、供試体 RC-F-J-N の等価繰り返し回数 1 回のひずみは 1,312×10⁻⁶ である。降伏ひずみに達した等価繰り返し回数は 1.462×10⁶ 回であり、最大等価繰り返し回数 1.560×10⁶ 回の 94 % である。なお、最大ひずみは 4,162×10⁻⁶ である。また、供試体 RC-F-J-A の等価繰り返し回数 1 回のひずみは 1,256×10⁻⁶ であり、降伏ひずみに達したのは等価繰り返し回数は 3.740×10⁶ 回で、最大等価繰り返し回数 3.758×10⁶ 回の 99% である。最大ひずみは 4,933×10⁻⁶ である。

以上より、荷重分布型装置を設置した RC はりは、たわみと同様に主鉄筋ひずみの増加が大幅に抑制されている。

6.4 荷重分布鋼板ひずみと等価繰り返し回数の関係

荷重分布鋼板のひずみと等価繰り返し回数の関係を図-9に示す。なお、材料特性値より算出した降伏ひずみは 1,525×10⁻⁶ であり、図-9に併記した。

供試体 RC-F-J-N の等価繰り返し回数 1 回のひずみは 400×10⁻⁶ であり、その後の繰り返し回数の増加に伴って緩やかに増加している。等価繰り返し回数 1.560

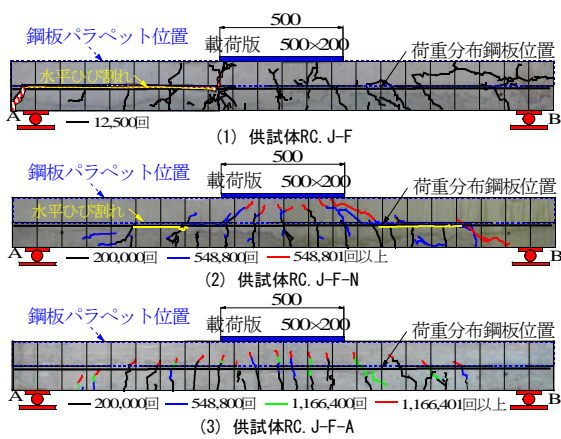


図-10 破壊状況（側面）

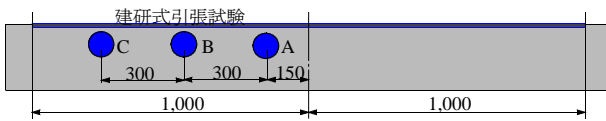


図-11 建研式引張試験の位置

$\times 10^6$ 回でのひずみは $1,059 \times 10^{-6}$ である。

次に、供試体 RC-F-J-A の鋼板ひずみの増加傾向は供試体 RC-F-J-N と同様な増加傾向を示し、等価繰り返し回数 3.758×10^6 回でのひずみは $1,181 \times 10^{-6}$ であり、両供試体ともに降伏には至っていない。

以上より、荷重分布鋼板も引張応力度を分担することから全体の耐力が向上し、耐疲労性が向上する結果が得られた。

6.5 破壊状況

各供試体の破壊状況を図-10に示す。全ての供試体において最終的な破壊モードは曲げ破壊であった。

供試体 RC-F-J の破壊状況は図-10(1)に示すように、載荷版の範囲内にひび割れが発生し、曲げ破壊した。破壊位置から支点 A 方向に伸縮装置と既設 RC はりの界面ではく離している。

次に、供試体 RC-F-J-N の破壊状況は図-10(2)に示すように、載荷位置から 45 度範囲内にひび割れが集中すると同時に荷重分布鋼板の底面において付着切れによる水平ひび割れが発生している。また、供試体 RC-F-J-A の破壊状況は図-10(3)に示すように、広範囲にわたってひび割れが発生しているが、接着剤の効果により破壊時においてもひび割れが上縁に達していない。また、荷重分布鋼板の底面にも水平ひび割れの発生も見られず、破壊時においても一体性は保たれていたが、たわみの急激な増加により破壊と見なした。

6.6 建研式引張試験による引張接着強度

建研式引張試験は、破壊した供試体 RC-F-J-N および RC-F-J-A の荷重分布鋼板と流動性モルタルおよび RC はりコンクリートとの界面の引張接着強度を検証

する。ここで、検証位置を図-11に示す。

供試体 RC-F-J-N における No.A ~ No.C の引張接着強度は、それぞれ 0.00N/mm^2 、 0.01N/mm^2 、 0.42N/mm^2 であり、全ての採取位置において接着強度 1.00N/mm^2 を下回っている。供試体 RC-F-J-A における No.A の引張接着強度は 0.86N/mm^2 であり基準値 1.00N/mm^2 を下回っているものの、破断面は流動性モルタル層であった。No.B の引張接着強度は 1.08N/mm^2 であり、破断面は流動性モルタル層である。No.C の引張接着強度は 3.23N/mm^2 であり十分な付着強度が確認されて、破断面は母材コンクリートであった。

以上より、定点疲労実験では接着剤の有無により界面の引張強度に顕著な差異が確認された。接着剤を塗布することで流動性モルタル層で引張破壊し、十分な付着効果が得られている。なお、実橋に用いる場合は鋼板をショットブラストで処理するとともに、セメント系材料との接着性も得られる防錆剤を塗布することが望ましいと考える。

6. まとめ

- (1) 荷重集中型装置を設置した RC はりの等価繰り返し回数に対して、荷重分布型装置を設置した RC はりおよび接着剤を用いて荷重分布型装置を設置した RC はりは 63.9 倍、153.9 倍となり、大幅に寿命が向上する結果が得られた。
- (2) たわみ・ひずみと等価繰り返し回数の関係においては、荷重分布型装置を設置した RC はりは、荷重分布鋼板を設けることで伸縮装置全体の剛性の向上と荷重が分布することからたわみ・ひずみの増加が抑制された。荷重分布鋼板ひずみと繰り返し回数の関係より、鋼板も引張応力を負担し、耐疲労性が向上した。
- (3) 建研式引張試験において、接着剤を塗布することで、供試体の破壊後においても十分な引張強度が確保されていることが確認された。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書（II-1987），土木研究所資料，No.2508，1987
- 2) 深水弘一：道路橋の伸縮装置及び道路橋伸縮装置の施工方法，特許第 6567920 号，2019
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，1994
- 4) 伊藤清志，阿部忠，児玉孝喜，小林哲夫：SFRC 上面増厚補強法における湿潤状態での接着剤の効果および耐疲労性の評価，セメント・コンクリート論文集，No. 65，pp.477-484，2012

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)