

論文 モルタル充填式継手を同一断面に配置したRCはりの曲げ性状に関する研究

安田 瑛紀*1・中村 拓郎*2・松本 智夫*3・二羽 淳一郎*4

要旨: 本研究では、モルタル充填式継手を同一断面に配置した RC はりの曲げ性状を検討することを目的として、5体のRC供試体の載荷実験を行った。その結果、いずれの供試体においても計算値以上の曲げ耐力を有しており、継手位置によっては曲げ耐力が向上することを確認した。また、供試体内のひずみや変位の分布は、継手の有無によらず同様の性状を示したが、ひび割れの発生箇所やひび割れ幅は、継手の存在によって大きく影響されることが明らかになった。

キーワード: モルタル充填式継手, RC はり, 集約配筋工法, 曲げ性状, 繰返し載荷, ひび割れ幅

1. はじめに

近年、施工の合理化や構造性能の向上を図るため、太径鉄筋や高強度鉄筋の利用が拡大しており、これらに対応できる鉄筋継手としてモルタル充填式継手の利用が増加している。鉄筋先組工法やプレキャスト工法は、モルタル充填式継手の利点を活かした施工方法であるが、継手が同一断面に配置されることとなる。特に、プレキャスト部材においては部材端等の断面力の大きい位置に継手が配置される場合が多い。しかしながら、土木学会の「コンクリート標準示方書」¹⁾では、「継手を同一断面に集めないことを原則とする。」「鉄筋の継手位置は、できるだけ応力の大きい断面を避けることを原則とする。」と定められており、このような継手配置を行う際には、その力学的性能を十分に把握する必要がある。著者らは、これまでモルタル充填式継手を有するRCはりのせん断性状と合理的配筋方法について実験的に検討し、継手の存在によってせん断耐力が損なわれないことを確認してきた²⁾。しかしながら、設計荷重下における曲げ挙動等については、より実用的な検討が求められる。

本研究では、モルタル充填式継手を同一断面や応力の大きい断面へ配置した場合の曲げ性状について検討するため、5体のRCはりの載荷実験を行った。載荷実験は、

鉄筋の許容応力度レベルでの繰返し載荷を導入し、常時荷重と地震荷重が作用する際に、継手の存在がRCはりに与える影響を検証した。また、せん断補強鉄筋の配筋には、著者らがこれまで検討してきた「集約配筋工法」²⁾を採用し、せん断補強鉄筋の合理的な配筋方法の適用性も検討した。

2. 実験概要

2.1 実験ケースおよび供試体概要

表-1に実験ケースを、図-1に供試体概要を、表-2に供試体の共通諸元を示す。供試体は、曲げ引張破壊先行型となるよう設計したせん断スパン比 $a/d=4.0$ 、全長

表-1 実験ケース

供試体	継手	載荷方法	継手位置 x (mm)
No-Sleeve	なし	繰返し	-
C-600	あり	繰返し	600
C-1065	あり	繰返し	1065
C-1300	あり	繰返し	1300
M-1065	あり	単調	1065

x: 支点から継手中央までの距離

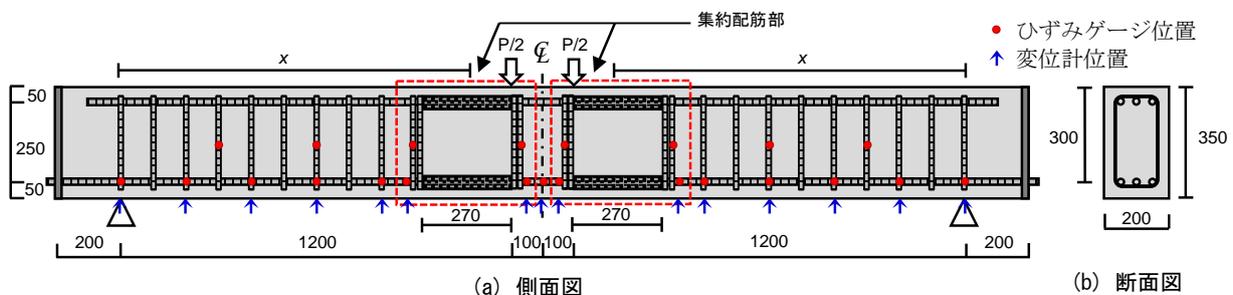


図-1 供試体概要

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
 *2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)
 *3 日本プライススリーブ(株) 技術本部 顧問 博士(工学) (正会員)
 *4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 供試体の共通諸元

せん断スパン比 a/d	コンクリート		主鉄筋および圧縮鉄筋		せん断補強鉄筋			
	呼び強度 (N/mm ²)	規格および呼び径	p_w (%)	f_y (N/mm ²)	規格および呼び径	r_w (%)	f_{wy} (mm ²)	s (mm)
4.0	30	SD345 D19	1.43	398	SD345 D10	0.71	380	100

p_w : 主鉄筋比, f_y : 主鉄筋の降伏強度, r_w : せん断補強鉄筋比, f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度,
 s : せん断補強鉄筋間隔 (集約配筋部を除く)

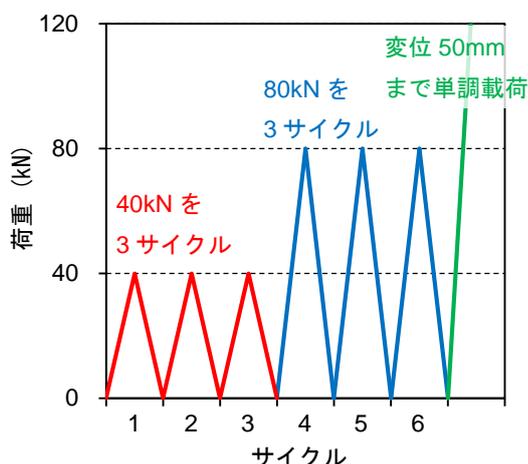


図-2 繰返し载荷における载荷履歴

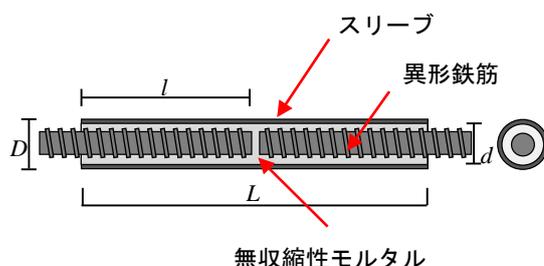


図-3 継手部の詳細

表-3 スリーブ諸元

規格	降伏強度 (N/mm ²)	外径 D (mm)	内径 d (mm)	長さ L (mm)	挿入長 l (mm)
FCD700	540	40	25	270	130

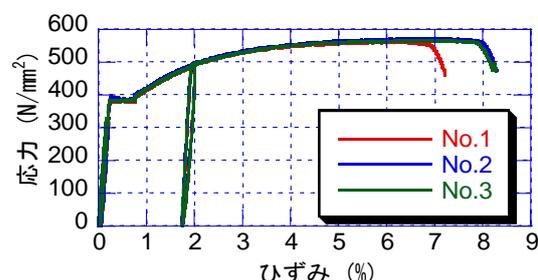


図-4 継手試験 (高応力繰返し試験) 結果

3m, 断面幅 200mm, 高さ 350mm の RC はりとした。なお、供試体は既報のせん断破壊型の実験²⁾を基準に断面設計を行った。実験パラメータは、1) 継手位置, 2) 継手の有無および 3) 载荷方法である。継手を配置しない No-Sleeve を基準に、継手配置の異なる合計 5 体の供試体を作製した。C-1065 ならびに M-1065 では、継手の端部が载荷点直下と一致するように継手を配置した。C-600 および C-1300 では、継手の中央位置がそれぞれせん断スパン中央および等曲げ区間中央と一致するように継手を配置した。C-600, C-1065, C-1300 および M-1065 では、継手上のせん断補強鉄筋を継手端に移動させ集約することで集約配筋を行った。静的単調载荷とした M-1065 を除く他の供試体では、繰返し载荷を行った。図-2 に繰返し载荷の履歴を示す。载荷履歴は、日本道路協会「道路橋示方書・同解説」³⁾が定める鉄筋の許容応力度を参考に、2 段階の荷重レベルを設定した。等曲げ区間の主鉄筋の応力度が 100N/mm² に達する荷重として 40kN を、200N/mm² に達する荷重として 80kN を、それぞれ事前計算により設定した。継手の有無や位置にかかわらず、载荷履歴を与える供試体では同一の载荷履歴を導入し、合計 6 サイクルの繰返し载荷を実施した後、最大荷重までの静的载荷を行った。

2.2 使用材料

コンクリートは、呼び強度 30N/mm², 粗骨材最大寸法 20mm の市販のレディーミクストコンクリートを使用し、

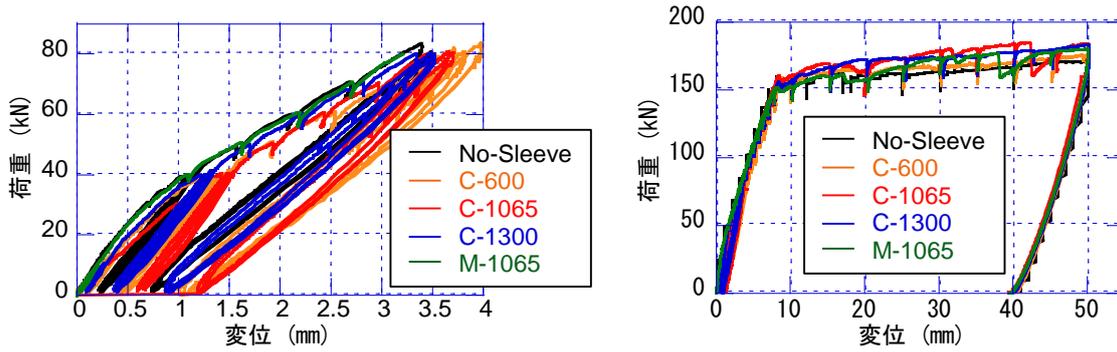
5 体の供試体を同時に打設した。主鉄筋と圧縮鉄筋は、異形鉄筋 D19 (SD345) を 3 本ずつ配筋した。主鉄筋は供試体端部で厚さ 9mm の鋼板に溶接することによって定着を確保した。せん断補強鉄筋は、異形鉄筋 D10 (SD345) を使用し、せん断補強鉄筋間隔 $s=100\text{mm}$ で配筋した。スリーブを配置した供試体では、スリーブ上のせん断補強鉄筋をスリーブの両端にまとめて配筋する集約配筋工法²⁾を採用した。

2.3 モルタル充填式継手および継手試験

継手部の詳細を図-3 に、継手に使用したスリーブ諸元を表-3 に示す。スリーブの材質には FCD700 を使用し、グラウト材には圧縮強度 70N/mm² の無収縮性モルタルを使用した。RC はり供試体の载荷実験に際して、継手単体の性能を判定するために継手試験を行った。継手試験は、RC はり供試体に使用された継手と同様の手順で

表-4 載荷実験結果

供試体名	コンクリート強度 (N/mm ²)	曲げ耐力		
		計算値 $P_{u,cal}$ (kN)	実験値 $P_{u,exp}$ (kN)	$P_{u,exp} / P_{u,cal}$
No-Sleeve	33.2	157.9	170.0	1.08
C-600			174.7	1.11
C-1065			184.4	1.17
C-1300			183.1	1.16
M-1065			180.4	1.14



(a) 繰返し載荷範囲 (0~80kN) (b) 載荷開始から載荷終了まで

図-5 荷重-変位関係

作製された3本の供試体を用いた。継手試験は、母材鉄筋の規格降伏強度の95%まで引張載荷し、2%まで除荷することを30回繰返したのち、破断まで引張載荷する高応力繰返し試験⁴⁾を行った。継手試験の結果を図-4に示す。継手試験の結果、本実験に使用した継手は土木学会「鉄筋定着・継手指針」⁴⁾の継手性能判定基準のA級を満足していることを確認した。

2.4 載荷実験方法

載荷実験は、油圧式1000kN万能試験機を用いて2点載荷で行った。載荷点は、石膏を用いて水平にした上で幅64mmの鋼板を設置した。支点は、回転支承の上に幅72mmの鋼板を設置し、鋼板と供試体との間にグリスを2枚のテフロンシートで挟んだ減摩パッドを使用することで、供試体の回転と水平変位の拘束を防いだ。

鉄筋に貼付したひずみゲージ位置と、変位計の設置位置を図-1内にそれぞれ赤丸、青矢印のマークで示す。主鉄筋のひずみとRCはりの変位は、共に支点から載荷点方向に200mm間隔の位置を基準として計測した。継手を有する供試体では、スリーブの両端から30mmの位置を計測点に加えた。主鉄筋のひずみゲージは、3本あるうちの中央の鉄筋に貼付した。また、せん断スパン内の一部のせん断補強鉄筋にもひずみゲージを貼付した。

載荷実験中は、荷重が10kN増加する毎、または変位が2.5mm増加する毎に載荷を一時停止し、ひび割れ状況

を観察した。また、観察と同時に、デジタル式ひび割れ幅測定器(ひび割れ幅検出精度:±0.03mm以下、ひび割れ幅検出範囲:0.05~2.0mm)を用いて、与えられた荷重における幅が最大となるひび割れ(以降、「最大ひび割れ」と称する)の位置と幅を記録した。なお、ひび割れ幅は、供試体の底面において測定した。

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

表-4に曲げ耐力の計算値と載荷実験の結果を、図-5に全供試体の荷重-変位関係を示す。表-4中の計算値 $P_{u,cal}$ は、「コンクリート標準示方書」¹⁾に従って求め、計算においてコンクリートの終局圧縮ひずみは $\epsilon_{cu}=0.0035$ と仮定した。また、図-5の荷重-変位関係の変位はスパン中央の変位である。

いずれの供試体においても、主鉄筋降伏後は荷重の増加が横ばいとなり明確な荷重低下は確認されなかったため、スパン中央の変位が50mmに達した段階で載荷を終了とした。本研究では、このときの荷重を曲げ耐力の実験値 $P_{u,exp}$ とした。また、いずれの供試体においても、せん断補強鉄筋の降伏は生じなかった。

載荷実験の結果、全ての供試体で計算値以上の曲げ耐力を保有していることを確認した。継手の有無による耐力差を比較すると、継手のないNo-Sleeveと比較して、

表-5 繰返し載荷における各サイクルの変位

供試体	第1サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第6サイクル	
	40kN時 変位 (mm)	除荷時 残留変位 (mm)	40kN時 変位 (mm)	除荷時 残留変位 (mm)	80kN時 変位 (mm)	除荷時 残留変位 (mm)	80kN時 変位 (mm)	除荷時 残留変位 (mm)
No-Sleeve	1.02	0.22	1.13	0.25	3.38	0.88	3.49	0.92
C-600	1.33	0.44	1.45	0.50	3.65	1.05	3.98	1.13
C-1065	1.41	0.59	1.51	0.67	3.48	1.20	3.64	1.21
C-1300	1.22	0.37	1.30	0.40	3.34	0.88	3.53	0.92
M-1065* (参考)	1.05	-	-	-	3.21	-	-	-

*M-1065において、静的単調載荷における40kNと80kN荷重時の変位を、便宜上第1サイクルと第4サイクルの値として載せた。

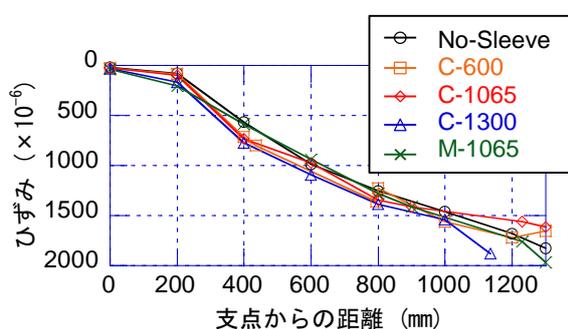


図-6 ひずみ分布

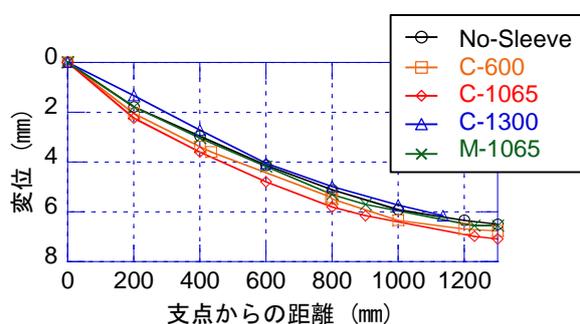


図-7 変位分布

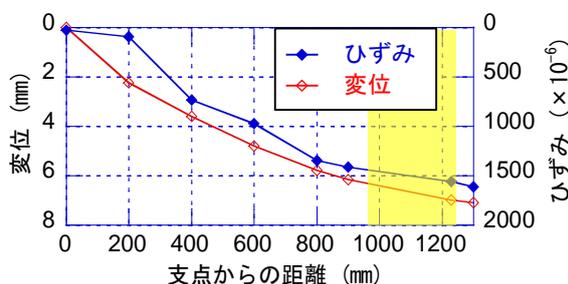


図-8 ひずみ・変位分布の比較 (C-1065)

継手を有する他4体の供試体の方が高い曲げ耐力を有していた。さらに、継手位置による耐力差を比較すると、せん断スパン中央に継手を配置したC-600に比べて、曲げモーメントの大きい位置に継手を配置したC-1065、C-1300およびM-1065の方が、若干ではあるが高い曲げ耐力を有していることを確認した。これは、母材鉄筋よりも断面積の大きいスリーブを使用することにより、継手部の曲げ剛性が増加していることに起因すると考えられる。特に、等曲げ区間の中央に継手を配置したC-1300では、曲げ破壊の発生が等曲げ区間の断面から継手端部(支点から1165mmの断面)の断面に移動したため、等曲げ区間で曲げ破壊した他の供試体よりも若干ではあるが高い曲げ耐力を示したものと考えられる。

繰返し載荷部分の荷重-変位関係を図-5(a)に示す。

参考として、単調載荷としたM-1065も付記した。また、各サイクルにおけるピーク荷重(40kNまたは80kN)時の変位と除荷時の残留変位を表-5にまとめる。繰返しによってピーク荷重時の変位または除荷時の残留変位は増加しているが、その増加量は0.1~0.2mm程度でわずかなものである。各供試体における荷重-変位関係と各サイクルの変位の比較から、繰返し載荷時には継手のある供試体の方が継手のないNo-Sleeveに比べて剛性が若干低下しているように見受けられる。これは継手による影響と考えられるものの、供試体間の変位の絶対量の差は0.5mmを超えない程度のわずかなものである。そのため、鉄筋の許容応力度レベルでの繰返し載荷を導入しても、継手によって荷重-変位性状に大きな影響は無かったといえる。また、単調載荷のM-1065と比較しても、繰返し載荷を導入した供試体で荷重-変位関係の大きな違いは認められなかった。

以上の結果より、「道路橋示方書」³⁾による鉄筋の許容応力度レベルに相当する繰返し載荷を含めて、A級判定のモルタル充填式継手を同一断面に配置した供試体の荷重-変位関係は、継手のない供試体と同等程度のものであることが確認された。一方で、高応力度や大変形領域での繰返し載荷を受ける場合、あるいは配筋諸元の異なる場合については、さらなる検討が求められる。

3.2 ひずみ・変位の分布

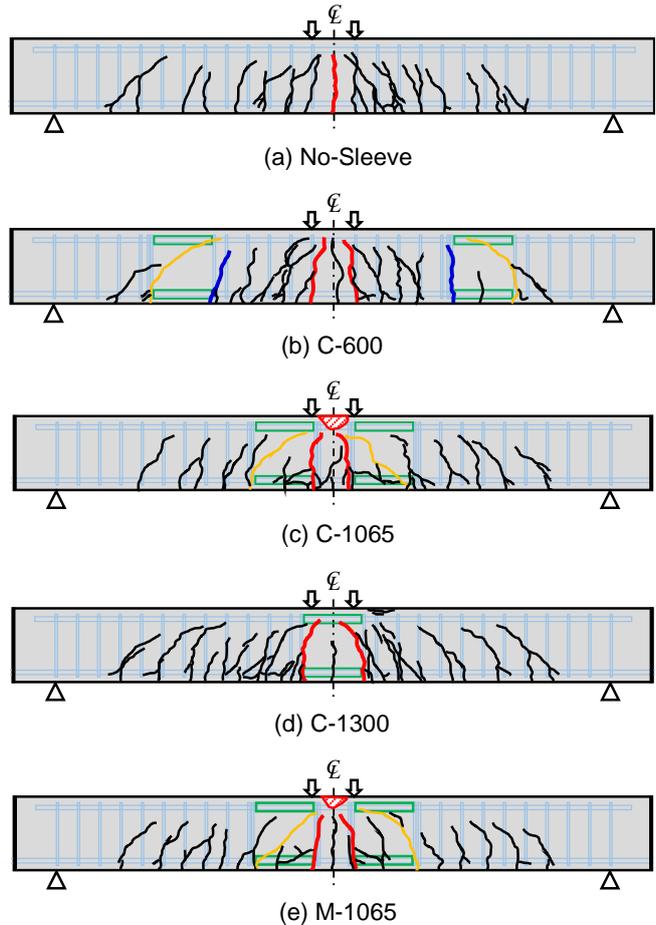
130kN 荷重時における、全供試体の左スパン内のひずみと変位の分布を、それぞれ図-6 と図-7 に示す。いずれの分布性状も、各供試体で同様の傾向を示した。典型的な分布性状として、C-1065 のひずみ・変位分布の比較を図-8 に示す。なお、スリーブ区間は図中の黄色で示す範囲である。継手を有する供試体では、スリーブの両端から 30mm 位置を計測点に加えたが、スリーブ区間をはさんでひずみ・変位ともにほぼ線形な挙動になっていた。モルタル充填式継手のスリーブは、異形鉄筋と異なり比較的滑らかな表面性状を有しているために、継手区間全体での附着性能の低下が懸念される。しかしながら、鋳鉄製のスリーブが表面に微細な凹凸を有していることに加えて、母材鉄筋よりも大きな表面積を有しているために、継手区間全体での附着性能は確保されていたと考えられる。その結果、継手区間を含めて、スパン内全域でひずみや変位の分布性状がほぼ直線的になったと推察される。以上より、モルタル充填式継手を同一断面に集中して配置した場合においても、局所的な変位やひずみの変化は発生しないことが実験でも確認された。

3.3 ひび割れ性状

全供試体の 50mm 変位時におけるひび割れ性状を図-9 に示す。図中において、デジタル式ひび割れ幅測定器によって判定した最大ひび割れを赤線で、継手位置を緑枠で、コンクリートの圧壊部を赤斜線で示している。

継手を配置していない No-Sleeve では、最大ひび割れは常に等曲げ区間中央のひび割れであった。継手を配置した供試体においては、いずれの供試体でも継手端部近傍における曲げひび割れの発生を確認した。特に、曲げモーメントの大きい位置に継手を配置した C-1065、C-1300 および M-1065 では、最大ひび割れは荷重終了時まで一貫して継手端部近傍のひび割れであった。これは、曲げモーメントによって継手に引張力が作用した際に、スリーブ端のコンクリートに発生する支圧力に起因するものと考えられる。その結果、継手端部からコンクリートが押し出されるようなひび割れが発生したものと推測される。等曲げ区間直下に継手端部が一致するように配置した C-1065 および M-1065 では、等曲げ区間でのコンクリートの圧壊が他の供試体よりも激しく生じていた。これは、等曲げ区間が、継手の集中配置された剛性の大きい断面にはさまれることによって、この区間への損傷が集中したことによると考えられる。

主鉄筋降伏前後のひび割れ幅を比較するため、No-Sleeve、C-600 および C-1065 における、第 6 サイクル 80kN 時と 150kN 時のひび割れ幅測定結果を表-6 にまとめた。また、コンクリート標準示方書における曲げひび割れ幅算定式(1)¹⁾による計算値と比較した。



(赤線：最大ひび割れ，緑枠：継手位置，赤斜線：圧壊部)

図-9 50mm 変位時のひび割れ性状

$$w = 1.1k_1k_2k_3(4c + 0.7(c_s - \varphi))\left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd}\right) \quad (1)$$

ここで、 k_1 : 鋼材の表面形状に関する係数、 k_2 : コンクリートの品質に関する係数、 k_3 : 主鉄筋の段数に関する係数、 w : ひび割れ幅(mm)、 c : コンクリートかぶり(mm)、 c_s : 鋼材中心間距離(mm)、 φ : 鋼材径(mm)、 σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量(N/mm²)、 E_s : 鋼材のヤング係数(N/mm²)、 ε'_{csd} : 収縮・クリープの指標である。材齢が短いことから収縮やクリープの影響は無視できるとし、 $\varepsilon'_{csd}=0$ とした。また、鋼材径 φ には母材鉄筋の径を、コンクリートかぶり c には母材鉄筋からのかぶりの値をそれぞれ用いて、継手の有無は無視した。

C-600 においては、最大荷重時には最大ひび割れは等曲げ区間のひび割れであるが、80kN 時点では継手端部のものが最大ひび割れとなった。図-9(b)にこのひび割れを青線で示す。このことより、荷重レベルによっては断面力の大きさよりも、継手の存在がひび割れ幅に与える影響が卓越すると考えられる。この現象は、計算値と測定値の比較より明確にとらえられる。80kN 時点において、計算値と測定値の比は概ね 1.4 以下の値にとどまってい

表-6 ひび割れ幅の比較

供試体	ひび割れ位置	第6サイクル 80kN 時のひび割れ幅			150kN 時のひび割れ幅		
		計算値 (mm)	測定値 (mm)	測定値/ 計算値	計算値 (mm)	測定値 (mm)	測定値/ 計算値
No-Sleeve	載荷点直下 (等曲げ区間)	0.18	0.25	1.39	0.33	0.35	1.06
C-1065	載荷点側継手端部 (等曲げ区間)	0.18	0.25	1.29	0.33	0.35	1.06
C-600	載荷点直下 (等曲げ区間)	0.18	0.20	1.11	0.33	0.35	1.06
	載荷点側継手端部 (せん断スパン内)	0.09	0.25	2.78	0.17	0.25	1.47

るが、上述のひび割れにおいてのみ、計算値の倍以上のひび割れ幅が測定された。このひび割れは、以降の荷重増加による開口は確認されず、150kNに達しても同じひび割れ幅に留まり、結果として計算値との差は減少した。また、150kN時点では、他のひび割れにおいて測定値は概ね計算値と一致しており、継手がある場合でも既往の算定式を用いて曲げひび割れ幅の予測は可能であると考えられる。このとき、計算には母材鉄筋を基準とした値を用いて、継手の影響を無視しても曲げひび割れ幅を概ね精度よく評価できると考えられる。

3.4 集約配筋の適用性の確認

継手を配置した供試体においては、スリーブ上のせん断補強鉄筋をスリーブ両端に集約する集約配筋を行っている。このため、スリーブ長さの270mmに相当する区間では、せん断補強鉄筋が配筋されない状態となるが、せん断補強鉄筋の降伏は認められず、せん断破壊は生じなかった。図-9のひび割れ性状に注目すると、せん断スパン内に継手を配置したC600、C-1065およびM-1065において、継手間にもぐりこむような斜めひび割れが発生していた。図-9にこのひび割れを黄線で示す。これは、集約区間で局所的にせん断補強鉄筋間隔が広がったことに起因すると考えられる。しかしながら、この区間のコンクリートが集約したせん断補強鉄筋と剛性の高いスリーブに囲まれていることによって拘束され、せん断破壊には至らなかったものと推察される。既往の実験においても、載荷点近傍に継手を配置した供試体で同様のひび割れを確認したが、その後発生した継手の無い区間における斜めひび割れの開口によりせん断破壊に至った。このことから、剛性の高いモルタル充填式継手を配置することで、集約配筋に起因するせん断破壊を防止することができると考えられる。以上より、少なくとも本実験の配筋諸元の範囲では、せん断補強鉄筋の集約配筋に起因するせん断破壊の発生は確認されなかった。

4. まとめ

モルタル充填式継手を同一断面に配置したRC供試体の載荷実験により、以下の知見を得た。

- (1) A級判定のモルタル充填式継手がRCはりの曲げ性状に及ぼす影響は小さく、曲げ耐力や剛性は継手のないRCはりと同程度かそれ以上であった。本実験の配筋諸元の範囲内では、せん断補強鉄筋の集約配筋を行っても、破壊形態がせん断破壊に移行することはなかった。
- (2) モルタル充填式継手の同一断面への配置は、RCはりのひずみ・変位の分布性状にほとんど影響を与えないことを確認した。また、本実験の範囲内では、継手部分での付着伝達性能も良好であると推測された。
- (3) コンクリートの支圧抵抗により、継手端部でひび割れが発生する。このとき荷重レベルによっては、断面力よりも継手の影響が卓越して、最大ひび割れは継手端部近傍に発生する可能性が示唆された。
- (4) 荷重レベルや配筋の状態によって継手の影響が顕著となる場合を除けば、既往の算定式を用いて、継手を有するRCはりの曲げひび割れ幅を概ね予測することができた。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2012
- 2) 安田瑛紀，松本浩嗣，松本智夫，二羽淳一郎：モルタル充填式継手と集約配筋がRCはりのせん断性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.517-522，2015.7
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I共通編・IIIコンクリート橋編），pp.131~133，2012
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー128 鉄筋定着・継手指針 [2007年版]，pp.34~54，2007