

論文 スパイラル鉄筋で補強した軸方向鉄筋の重ね継手を有する梁部材の繰返し曲げ載荷試験

鈴木 辰彦*1・佐々木 尚美*2

要旨: プレキャスト部材を接合する際の合理化を目的として、スパイラル鉄筋で補強した重ね継手を考案し、耐疲労性について確認するため、実構造物の鉄筋径を用いて、梁部材の繰返し曲げ載荷試験を行った。その結果、軸方向鉄筋に実構造物同等の D38 を用い、重ね継手長を 15ϕ 、スパイラル鉄筋による補強鉄筋比を 3.4%以上とした試験体では、実構造物の設計における要求性能を満たす十分な耐疲労性を有することを確認した。また、繰返し載荷試験後においても、継手の無い通常の鉄筋コンクリート梁の設計計算値以上の十分な曲げ耐力を有することを確認した。

キーワード: 重ね継手、スパイラル鉄筋、プレキャスト部材、繰返し曲げ載荷、曲げ性能、耐疲労性

1. はじめに

鉄道構造物の建設に代表される時間的・空間的制約を受ける建設プロジェクトにおいて、安全性、経済性や周辺環境への影響などからプレキャスト鉄筋コンクリート部材の採用が注目を集めている。その中で、プレキャストラーメン高架橋の施工においては、部材の製作、運搬、組立てを考慮して、柱、梁などに分割されている部材を、施工現場で継手を介して一体化する必要がある。そこで施工性と経済性を考慮した継手構造として、スパイラル鉄筋で補強した重ね継手を考案した¹⁾²⁾。スパイラル鉄筋で補強した重ね継手構造と施工手順の案を図-1に示す。施工は、最初に①接合する2つの部材（梁、柱）の端面からそれぞれ梁の軸方向鉄筋を突出させておき、片方の部材の軸方向鉄筋に差し込むようにスパイラル鉄筋を配置しておく。次に②梁部材を降下させ、スパイラル鉄筋を水平移動させることにより所定の位置に配置する。最後に③コンクリートを場所打ちするという手順である。

既往の研究³⁾では、パラメータとして重ね継手長 10ϕ 、 15ϕ 、 20ϕ の試験体に対して載荷試験を行い、重ね継手長を 15ϕ 以上とし、スパイラル鉄筋に異形鉄筋を用いた場合の補強筋比 p_w を 3.1%以上とすることで、鉄道構造物等設計標準³⁾の式で算定される耐力及び変形性能を有

することを確認している。そこで本研究では、実構造物と同等の軸方向鉄筋を使用し、既往の研究で耐力及び変形性能を有することが確認できている重ね継手長を 15ϕ 、スパイラル鉄筋による補強筋比を 3.1%以上とした梁試験体の耐疲労性について確認した。

2. 梁の曲げ載荷試験

2.1 試験概要

(1) 試験体概要

試験体概要を図-2に、試験体諸元を表-1に示す。本継手は梁端部を想定しているが、今回の試験では、疲労性能を確認する上では発生応力が大きく繰返し回数も多い、最も厳しい条件となる等曲げモーメント区間に継手を設けて実施した。

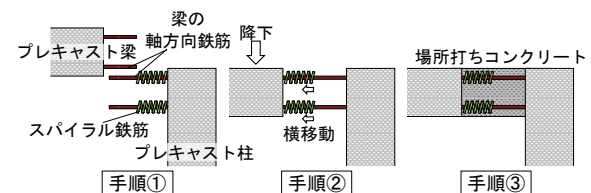


図-1 スパイラル鉄筋で補強した重ね継手構造と施工手順の案

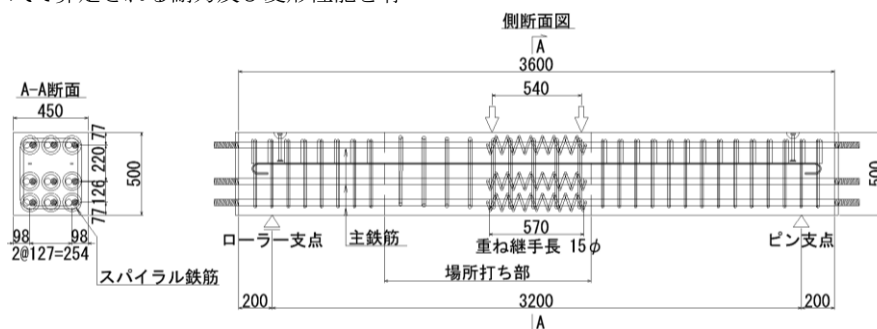


図-2 試験体概要

*1 東日本旅客鉄道（株） JR 東日本研究開発センター 研究員 修（工） （正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） JR 東日本研究開発センター 主幹研究員 博（工） （正会員）

軸方向鉄筋は、実構造物の 2 段配筋を想定し、D38 (SD390) を下端 2 段と上端 1 段に 3 本ずつ配置し、すべてスパイラル鉄筋で補強した重ね継手とした。重ね継手長は 15ϕ (=570mm) である。継手区間は等曲げ区間であるが、試験体製作時に継手部の施工性を確認するため、せん断破壊をしないようにせん断スパン内に配置したものと同様に、D22 (SD345) を 140mm ピッチで配置した。せん断補強鉄筋はフレア溶接により閉合した。スパイラル鉄筋は、一般的な材料である D13 (SD345) を用いた。試験体 No.2 はスパイラル鉄筋を 4 分割した。4 分割した理由は、場所打ちコンクリートの範囲を極力小さくするためである。スパイラル鉄筋 1 本もので補強鉄筋比を 3.1%以上とした場合、場所打ちコンクリートの範囲は 1250mm 必要となる。そこで、分割したスパイラル鉄筋では、図-1 の手順①の時点で、4 分割したスパイラル鉄筋を 2 つ 1 組で重ね合わせて配置しておくことが可能となり、場所打ちコンクリート部の範囲を実設計で求められている 1000mm 以内に収めることができる。No.2 試験体のスパイラル鉄筋のピッチは、4 分割したスパイラル鉄筋を 2 つ 1 組で重ね合わせた際に最小のピッチとなる 27mm とした。ここで、本研究における補強筋比とは、スパイラル鉄筋の断面積に対するスパイラル鉄筋のピッチと直径から定まる値であり、以下の式 (1) で算出される。

$$p_w = \frac{2A}{bs} \quad (1)$$

ここに、 p_w ：補強筋比(%)

A：スパイラル鉄筋の断面積(mm²)

S：スパイラル鉄筋のピッチ(mm)

b：スパイラル鉄筋の直径(mm)

また、試験体に用いたコンクリートの粗骨材の最大寸法は 20mm として、スパイラル鉄筋間にコンクリートが充填されるようにした。

(2) 材料の力学特性

a)コンクリート

コンクリートの圧縮強度試験結果を表-2 に示す。コンクリートは普通コンクリートとした。プレキャスト部材に合わせ、実験時の強度が 40N/mm²以上となるように設定した。

b)鉄筋

軸方向鉄筋は SD390、スパイラル鉄筋とせん断補強鉄筋は SD345 を用いた。各鉄筋の降伏強度、および弾性係数を表-2 に示す。

(3) 荷重方法と計測項目

荷重方法は図-2 に示すように 4 点曲げ荷重とし、図-3～図-5 に示すように軸方向鉄筋、スパイラル鉄筋、

せん断補強鉄筋にゲージを貼り付けてひずみを計測した。図中の上、中、下は軸方向鉄筋の鉛直方向の位置を、A～C および a～c は A-A 断面において水平方向の位置を示している。計測位置の値は梁中央からの水平距離で示している。変位量は荷重点とスパン中央にて計測した。曲げ荷重試験は、繰返し曲げ荷重試験と静的曲げ荷重試験の 2 種類実施した。

a)繰返し曲げ荷重試験

荷重は荷重制御で、周波数を 5Hz とした。試験体 No.1 は 10Step、試験体 No.2 は 17Step と、荷重パターンを分けて試験を行った。各 Step での荷重荷重、荷重回数を表-3 に示す。なお、表中 P_y は降伏荷重を表している。Step1 では、実構造物の軸方向鉄筋に発生する応力を試験体でも再現するため、350kN まで荷重した。Step2 以降では、確認したひずみの値から、荷重荷重を設定した結果、300kN までの荷重となった。Step11 以降は、疲労を促進させるため、応力振幅を変化させた。荷重回数については、今回参考とした列車を支持する RC ラーメン高架橋の設計計算結果より、実構造物の設計疲労回数である 1,440 万回を踏まえ、1,500 万回を目標として設定した。試験体 No.1 は繰返し曲げ荷重後の試験体の保有耐力を確認するため、累計荷重回数が 1,500 万回 (Step10) に達した時点で試験を終了した。試験体 No.2 は実際の耐疲労性能を確認するために、試験体が破壊するまで、荷重荷重を増加させることにより疲労を促進させながら試験を継続した。ここで、No.2 の Step11 以降の最大荷重としている 480kN は、試験設備の性能から与えられる最大の荷重である。なお、試験時には各 Step の終了後に静的荷重を行い、試験体の変位やひび割れ状況を確認した。

b)静的曲げ荷重試験

繰返し曲げ荷重試験を終えた試験体 No.1 に対して、繰返し試験後の試験体の耐力について確認するため、静的荷重を行った。荷重位置等は、繰返し曲げ荷重試験と同じである。

2.2 繰返し曲げ荷重試験の結果と考察

(1) 損傷状況

実構造物の設計において目標である 1,500 万回荷重 (Step10) 終了時の試験体 No.1 の損傷状況を写真-1 に示す。重ね継手範囲の両端部付近と試験体中心付近で曲げひび割れの進展が見られたが大きな損傷は見られなかった。

Step10 終了時の試験体 No.2 の損傷状況を写真-2 に示す。梁下面から試験体高さの 4 分の 3 程度まで曲げひび割れの進展が見られたが、試験体 No.1 同様、大きな損傷は見られなかった。

破壊に至った試験体 No.2 の荷重終了時の損傷状況を写真-3 に示す。重ね継手端部でひび割れが進展し、載

表－1 試験体諸元

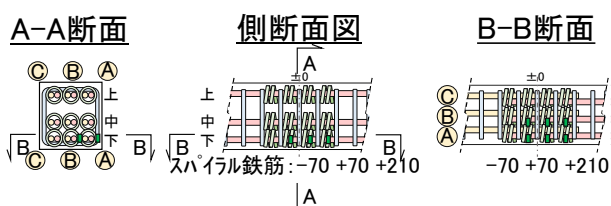
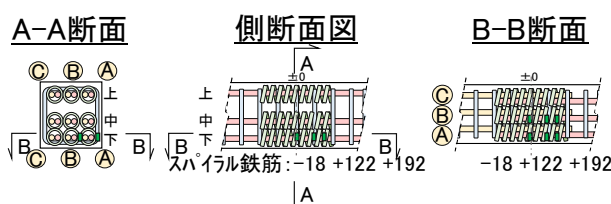
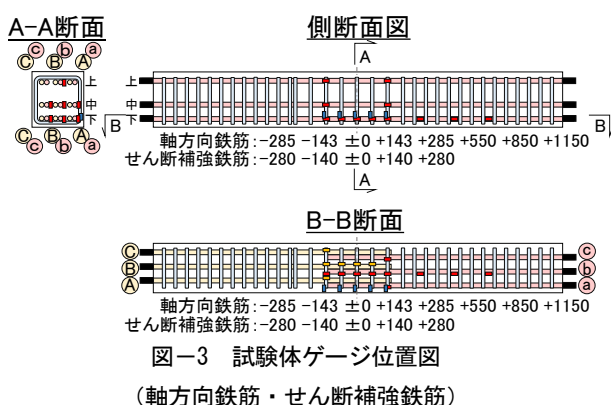
試験体	軸方向鉄筋		重ね 継手長	継手スパイラル鉄筋				補強筋比 (%)
	材質	径 (mm)		線径 (mm)	直径 (mm)	ピッチ (mm)	分割	
No. 1	SD390	38	15φ	13.0	105.0	70.0	なし	3.4
No. 2						27.0	4分割	8.9

表－2 材料力学特性

試験体	コンクリート	軸方向鉄筋 (D38)		継手スﾊﾟｲﾗﾙ鉄筋 (D13)		せん断補強鉄筋 (D22)	
		圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
No. 1	40. 1	444. 5	190. 0	382. 7	182. 7	379. 0	194. 4
No. 2	42. 4	444. 5	190. 0	382. 7	182. 7	369. 3	179. 5

表－3 載荷 Step

試験体	載荷 Step	載荷荷重 (kN)			載荷回数 (回)	累計載荷回数 (回)
		最小荷重	最大荷重	荷重振幅		
No. 1 No. 2	1	0	350 (0.33Py)	350	1	1
	2				99	100
	3				900	1,000
	4				9,000	10,000
	5				90,000	100,000
	6	130 (0.12Py)	300 (0.28Py)	170	900,000	1,000,000
	7				1,000,000	2,000,000
	8				3,000,000	5,000,000
	9				5,000,000	10,000,000
	10				5,000,000	15,000,000
No. 2	11				50,000	15,050,000
	12	330 (0.31Py)	480 (0.45Py)	150	50,000	15,100,000
	13				400,000	15,500,000
	14	400 (0.38Py)	480 (0.45Py)	80	500,000	16,000,000
	15				2,000,000	18,000,000
	16	100 (0.09Py)	480 (0.45Py)	380	3,000,000	21,000,000
	17				1,148,558	22,148,558



荷点直下のせん断補強筋が写真－4 に示すように破断していた。後述するが、実際には最下段の軸方向鉄筋がすべて破断していたことから、軸方向鉄筋が繰返し載荷により破断し、それに伴い、せん断補強鉄筋が破断して破壊に至ったものと推察される。なお、写真－4 は、写真－3 に対して反対面の下隅部付近である。重ね継手範囲の端部である+285mm 位置付近のせん断補強鉄筋が下隅角部から立ち上がった直線部（フレア溶接外）で破断していた。また、試験後にコンクリートをはつったところ、+285mm 位置付近で最下段の軸方向鉄筋が3本とも

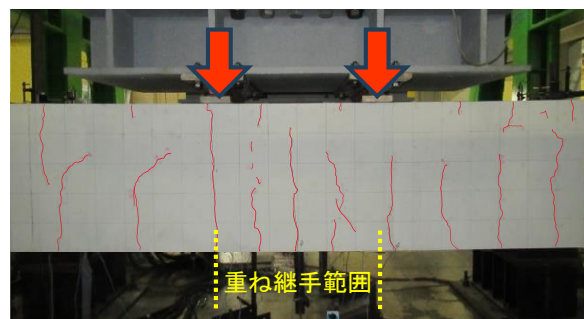
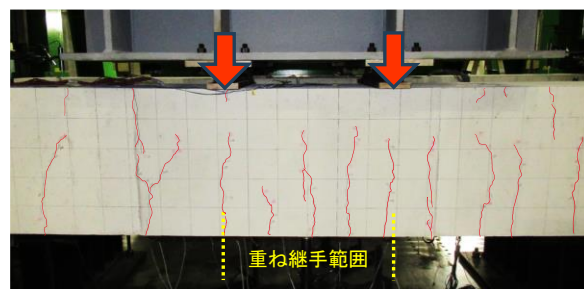
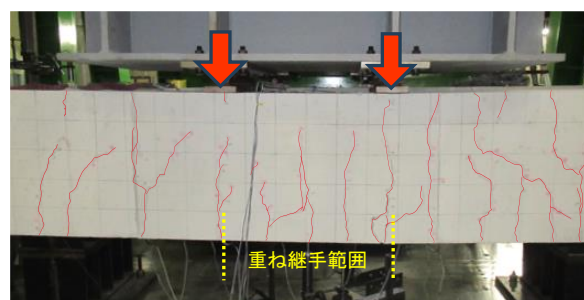
写真－1 試験体 No. 1 側面損傷状況
(繰返し曲げ載荷試験 Step10 終了時)写真－2 試験体 No. 2 側面損傷状況
(繰返し曲げ載荷試験 Step10 終了時)写真－3 試験体 No. 2 側面損傷状況
(繰返し曲げ載荷試験 Step17 終了時)



写真-4 試験体 No. 2 せん断補強鉄筋破断状況
(繰返し曲げ載荷試験 Step17 終了時)

破断していた。試験体 No.1 について計算式³⁾により算出される繰返し回数は、Step10 までの応力振幅が一定の場合、2,871 万回となったが、試験体 No.2 は、Step17 まで応力振幅を上げた状態で、2,214 万回まで高い疲労性能を有した。このことから、試験体 No.1 および試験体 No.2 とともに、設計繰返し回数に対して、十分な耐疲労性能を有することを確認した。

(2) 中央変位と載荷回数

各繰返し曲げ載荷 Step 後の静的曲げ載荷において載荷荷重が 300kN に達した時のスパン中央変位と載荷回数の関係を図-6 に示す。試験体 No.1 は、載荷回数の常用対数に比例するように中央変位が緩やかに増加している。鉄筋の破断まで載荷を繰返した試験体 No.2 では、1,000 万回を超えるまでは No.1 と同じく載荷回数の常用対数に比例するように中央変位が増加した。載荷荷重（応力振幅）を増加させた累計載荷回数 1,505 万回以降、急激に変位が増加していることから、急激に損傷が進んだことを確認した。

(3) 鉄筋のひずみと載荷回数

各繰返し曲げ載荷 Step 後の静的曲げ載荷において載荷荷重が 300kN に達した時の軸方向鉄筋のひずみ量と載荷回数の関係を図-7、図-8 に示す。なお、図中の凡例に示している"B"、"b"は図-3、図-4 に示す鉄筋 B、鉄筋 b を示している。試験体 No.1 は載荷回数が増えても、鉄筋のひずみ量はほとんど変化がなかった。また、試験体中央付近よりも、重ね継手端（±285mm）および重ね継手範囲外（+550mm）のひずみ量大きいことがわかる。これは、試験後もスパイラル鉄筋内外部のコンクリートが損傷なく充填された状態であったことから、スパイラル鉄筋に拘束されていることで重ね継手部の付着破壊が生じず、継手端部および継手部外の位置でひずみが増大したことが考えられる。重ね継手端（±285mm）と重ね継手範囲外（+550mm）のひずみは、累計載荷回数 100 万回以降はほとんど同じ値を示している。

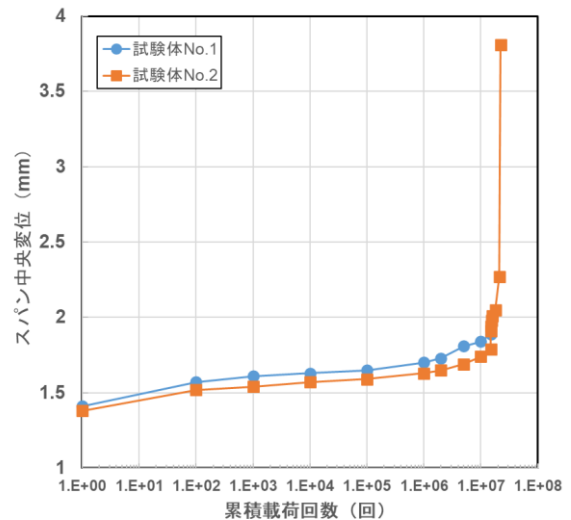


図-6 中央変位と載荷回数
(載荷荷重 300kN 時)

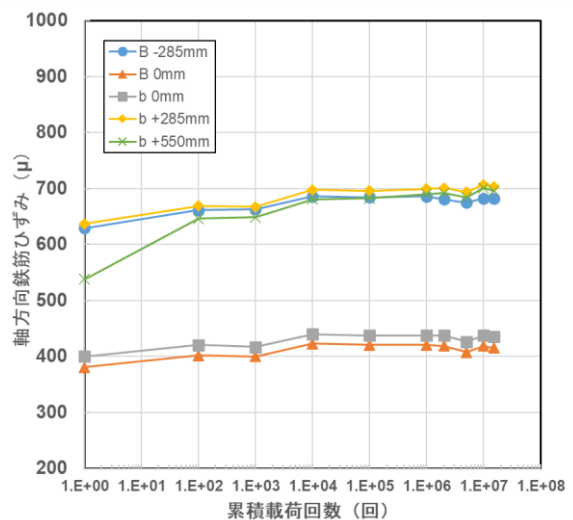


図-7 試験体 No. 1 軸方向鉄筋ひずみと載荷回数
(載荷荷重 300kN 時)

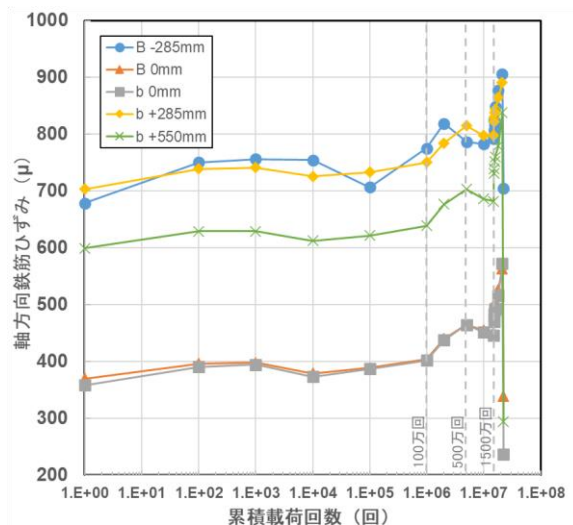


図-8 試験体 No. 2 軸方向鉄筋ひずみと載荷回数
(載荷荷重 300kN 時)

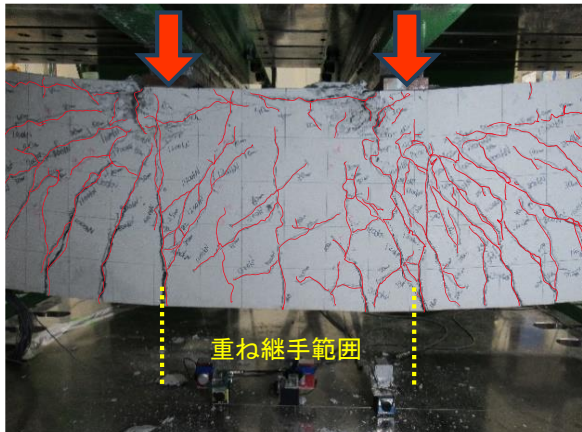


写真-5 試験体 No.1 側面破壊状況
(静的曲げ載荷試験 スパン中央変位 120mm 付近)

表-4 降伏荷重と最大荷重

試験体	降伏荷重			最大荷重		
	実験値 Pyexp (kN)	計算値 Pycal (kN)	Pyexp /Pycal	実験値 Puexp (kN)	計算値 Pucal (kN)	Puexp /Pucal
No. 1	1243.0	1063.8	1.17	1750.9	1329.2	1.32

試験体 No.2 は累計載荷回数が 100 万回に達するまでは、試験体 No.1 と同様、鉄筋のひずみにほとんど変化がなかった。載荷回数が 100 万回を越えてからは 500 万回に達するまで、ひずみが様に増加した。しかし、ひび割れ長さやひび割れ幅が目立って進展した様子はなかった。その後、載荷回数が 1,500 万回に達するまでは、どの鉄筋もひずみが様に低下した。載荷回数 1,500 万回以降は、2,100 万回に達するまで、どの鉄筋も様に急激にひずみが増加し、せん断補強鉄筋および軸方向鉄筋の破断によって 2,214 万回で急激にひずみが低下した。重ね継手端付近 ($\pm 285\text{mm}$) と比較して、重ね継手範囲外 ($+550\text{mm}$) のひずみは常に低い値を示している。

2.3 静的曲げ載荷試験の結果と考察

(1) 破壊状況

写真-5 に試験体 No.1 の破壊状況を示す。静的曲げ載荷試験では、重ね継手範囲より両外側で曲げひび割れ幅が大きく開き、その曲げひび割れは載荷点付近に向かって進展した。その後、荷重を増加させると、試験体に変形していくとともに、発生している曲げひび割れの幅が大きくなり、最終的には圧縮縁のコンクリートが圧壊して最大荷重に達した。

(2) 降伏荷重と最大荷重

静的曲げ載荷試験における軸方向鉄筋の降伏荷重と最大荷重を表-4 に示す。表中の計算値は鉄道構造物等設計標準³⁾の計算式にしたがって算出した降伏曲げモーメント、曲げ耐力を載荷荷重に換算したものである。計

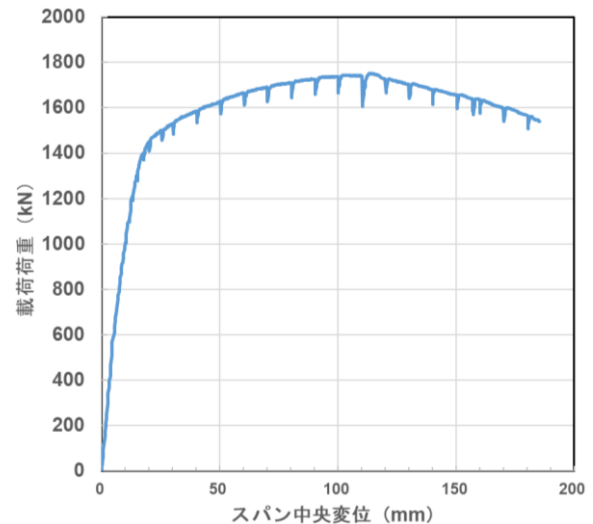


図-9 試験体 No.1 載荷荷重と中央変位

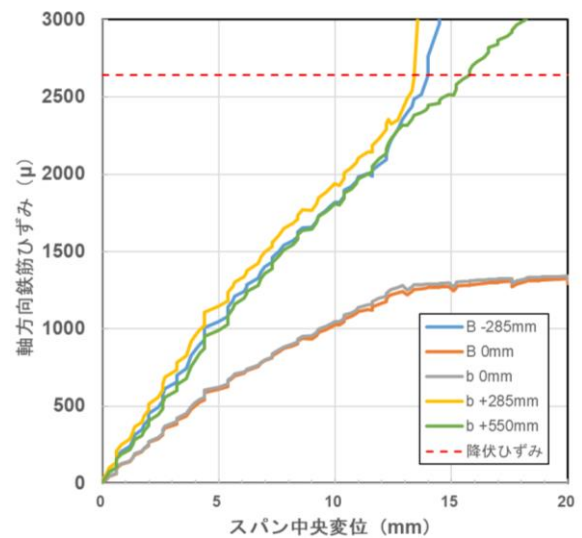


図-10 試験体 No.1 軸方向鉄筋ひずみと中央変位

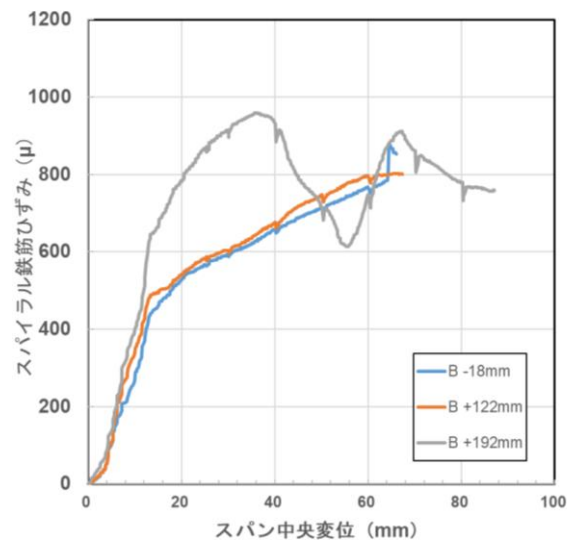


図-11 試験体 No.1 スパイラル鉄筋ひずみと中央変位

算に使用した材料特性値は表-2 の材料試験値を用いた。試験体 No.1 の降伏荷重の実験値の計算値に対する比は 1.17, 最大荷重の実験値の計算値に対する比は 1.32 であった。これらの結果より, 本試験の範囲においては, 重ね継手をスパイラル鉄筋で補強した場合, 実構造物の設計に相当する荷重で 1,500 万回の繰返し曲げ载荷を受けていても, 継手の無い通常の鉄筋コンクリート梁の設計計算上の曲げ降伏耐力および曲げ耐力を満足する十分な曲げ耐力を有していることを確認した。

(3) 載荷荷重と変位

試験体 No.1 の載荷荷重とスパン中央変位との関係を図-9 に示す。スパン中央変位が 14mm 付近で載荷荷重が 1243.0kN に達し, 軸方向鉄筋が降伏した。その後最大荷重に至るスパン中央変位 115mm 付近まで載荷荷重は緩やかに上昇し, その後も緩やかに荷重は低下した。

(4) 鉄筋のひずみと中央変位

部材軸方向の各位置での軸方向鉄筋ひずみとのスパン中央変位と関係を図-10 に示す。縦軸は, 鉄筋降伏ひずみ(図中の赤破線)を超える程度の $3,000\mu$ までを示している。スパン中央変位が 14mm 付近において重ね継手の端部である+285mm 位置, -285mm 位置の 2 か所, 続いて+550mm 位置の順でほぼ同時に鉄筋が降伏した。その後, 载荷を続けると, -285mm 位置でおよそ $44,000\mu$, +285mm 位置でおよそ $34,000\mu$, +550mm 位置でおよそ $6,000\mu$ のひずみが発生したが, いずれも鉄筋破断には至らなかった。また, 0mm 位置(スパン中央)の鉄筋は降伏にも至らなかった。部材軸方向の各位置でのスパイラル鉄筋ひずみとスパン中央変位との関係を図-11 に示す。データは計測できた範囲で示しているが, 载荷終了まで継手部の大きな損傷は見られなかった。ひずみが 500μ 程度に達するまではどの位置のひずみも一様に増加した。以降は+192mm 位置ではスパン中央変位が 35mm 程度でひずみが 960μ まで達し, その後増減を繰り返しながらひず

みは低下していった。-18mm 位置, +122mm 位置では, 500μ 以降はグラフの傾きが緩やかになり, スパン中央変位 70mm 付近まで一様にひずみが増加した。スパイラル鉄筋に発生したひずみは, 最大で $1,000\mu$ 程度であった。

3. まとめ

スパイラル鉄筋で補強した重ね継手を用いた梁部材の耐疲労性の確認を目的に, D38 を用いて重ね継手長さを 15ϕ とした試験体で繰返し曲げ载荷試験を行った結果, 以下の知見を得た。

- (1) スパイラル鉄筋を分割せずに補強筋比を 3.4%とした試験体と, スパイラル鉄筋を 4 分割し補強筋比を 8.9%とした試験体において, 実構造物の設計における要求性能を満たす十分な耐疲労性を有することを確認した。
- (2) 静的曲げ载荷により, 繰返し曲げ载荷後も継手の無い通常の鉄筋コンクリート梁の設計計算値以上の十分な曲げ耐力を示す十分な曲げ耐力を有することを確認した。

参考文献

- 1) 平山 武志, 渡部 太一郎: スパイラル鉄筋で補強した重ね継手を有する梁部材の力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.799-804, 2023.7
- 2) 渡部 太一郎, 平山 武志: 小径スパイラル鋼材で補強した引張鉄筋の重ね継手を塑性ヒンジ区間に集中配置した柱部材の地震時変形性能とプレキャスト高架橋接合部への適用検討, SED, No.64, pp.2-11, 2024.11
- 3) 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, pp.134-140, 2004.4