

# 論文 傾斜配置したループ継手を間詰部に用いた床版の曲げ耐荷性能に関する実験的研究

島山 繁忠\*1・日野 伸一\*2・正木 守\*3・左東 有次\*4

**要旨**：本研究では、プレキャスト PC 床版の床版厚の低減を目的として、疲労耐久性に優れ鉄筋継手として実績の多いループ鉄筋を傾斜配置した場合における RC はりの曲げ耐荷性能に関する実験的検討を行った。ループ鉄筋の傾斜角度をパラメータとし、傾斜配置した場合においても RC の曲げ理論が成立するかの確認を行った。その結果、最大 45° まで傾斜しても所要の設計強度以上の曲げ耐力を保有し、また、ひび割れ性状も継手無試験体と明確な差異はなく、継手としての機能を果たすことが確認された。

**キーワード**：ループ継手、曲げ耐力、継手構造、プレキャスト PC 床版

## 1. はじめに

高速道路をはじめとする道路橋の大規模更新が全国各地で行われており、中でも床版の架け替え工事が最盛期を迎えつつある。床版の架け替えにおいては、施工性、経済性に優れたプレキャスト PC 床版が多く採用されている。NEXCO 設計要領<sup>1)</sup>では、ループ継手を用いたプレキャスト PC 床版について、床版支間が 3.6m までは床版全厚を 220mm としている。一方で、橋軸方向支点上に生じる負曲げの影響をはじめとする設計条件により鉄筋径を大きくしなければならないケースもあり、結果として床版全厚が厚くなることで死荷重の増加につながっている。これはループ継手の場合、床版厚がループ鉄筋の曲げ直径の制約を受けるためである。鉄筋径を大きくするとループ鉄筋の最小曲げ直径も大きくなるため、床版厚も大幅に厚くなる。

一方、既設鋼桁の耐荷力の制限や橋の耐震性の確保から床版重量の低減が必要であり、床版厚をできるだけ抑える必要がある。このような背景から、近年床版厚を薄くする目的で鉄筋の先端に鋼管を圧着接合し、鉄筋の付着力と鋼管の支圧力により定着する継手構造<sup>2)</sup>などが開発されている。

そこで著者らは、実績が豊富で信頼性の高いループ継手を用いての床版厚の低減を目的とし、**図-1**に示すような改良型ループ継手を開発した。橋軸方向鉄筋のループ継手を橋軸直角方向に傾斜配置することで、ループ鉄筋の最小曲げ半径を保ちつつ床版厚の低減を図ることができる構造である。本研究では、改良型ループ継手をプレキャスト PC 床版に適用した場合における曲げ耐荷性能、およびループ鉄筋を斜め配置した場合でも、既存の RC 理論による設計が成立するかの検討を行った。さ

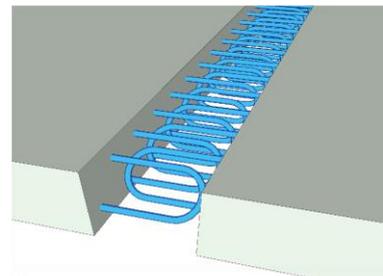


図-1 改良型ループ継手イメージ図

らに、間詰部の存在しない一体型 RC 版を対象に傾斜配置の影響がないかの検討を行うため、FEM による解析も併せて行った。なお、本実験では各試験体の断面有効高や鉄筋量が同一でないため、はりとしての曲げ剛性が異なることに留意する必要がある。

## 2. 試験概要

### 2.1 設計条件およびループ鉄筋曲げ直径

本研究における設計条件として、鉄筋のかぶりおよびあきは 40mm 以上、また、ループ鉄筋は D19 (SD345) を使用し、150mm 間隔で配置するものとし、コンクリートの設計基準強度は 50N/mm<sup>2</sup> とした。鉄筋の許容引張応力度は道路橋示方書<sup>3)</sup>に基づき有害なひび割れ発生抑制、コンクリートの剥離等への進展を避けるため、20N/mm<sup>2</sup> 程度の余裕を持たせ 120N/mm<sup>2</sup> で制御することを想定し、ループ鉄筋の曲げ始点での鉄筋応力度を 120N/mm<sup>2</sup> で設計した。上記条件で必要曲げ直径を次式 (1)<sup>4)</sup>により算出すると、約 80mm (<5φ) となる。

$$dB = (1.4 + 2.8 \cdot \varphi/e) \cdot \varphi \cdot \sigma_e / \sigma_{ck} \geq 5\varphi \quad (1)$$

ここで、 $dB$  : ループ鉄筋の最小曲げ直径 (内側) (mm)

\*1 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教 修(工) (正会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 工博 (正会員)

\*3 (株) 富士ピー・エス 土木本部 土木設計部 (正会員)

\*4 (株) 富士ピー・エス 土木本部 土木設計部 博(工) (正会員)

- $\phi$  : 鉄筋径 (mm)
- $e$  : ループ面の中心間隔 (mm)
- $\sigma_e$  : 曲げ始点での発生鉄筋応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\sigma_{ck}$  : コンクリートの設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

式(1)はレオンハルトの式が基であるループ鉄筋の必要曲げ直径の式であり、式中には角度によるパラメータは規定されていない。そのため、ループ鉄筋の曲げ直径は、図-2 に示すように最もループ鉄筋の傾斜角度が大きい45°において、側面から投影した場合の鉄筋上側と下側の間隔が必要曲げ直径相当(=81mm)となるように実験的に設定したため、用いるループ鉄筋の曲げ直径は122mm (>5 $\phi$ )となる。また、継手部における重ね継手長は鉄筋応力度を140N/mm<sup>2</sup>として算出し<sup>1)</sup>、試験体製作を簡便にするため250mmに設定した。

## 2.2 試験体

本研究で用いた試験体の一覧を表-1に、使用した材料の特性値を表-2に、試験体の配筋図を図-3、図-4に示す。試験体は長さ3.0m、幅1.0mのプレキャスト床版および接合部を模擬して作製しており、全ての試験体で接合部を設け、合計5体作製した。なお、本研究で対象とするのは橋軸方向継手であるため、全てRC構造とした。接合部は上縁の幅が330mmとなるよう作製した。基準試験体である鉄筋継手のない継手無試験体は接合部を設けているものの、左右の床版は一本の鉄筋でつながっている。L試験体はループ継手によって左右のプレキャスト床版が接合された試験体で、従来型のループ継

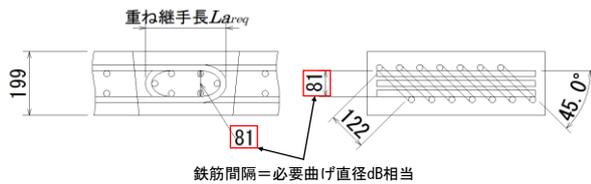


図-2 ループ鉄筋の曲げ直径設定方法 (単位: mm)

表-1 試験体一覧 (単位: mm)

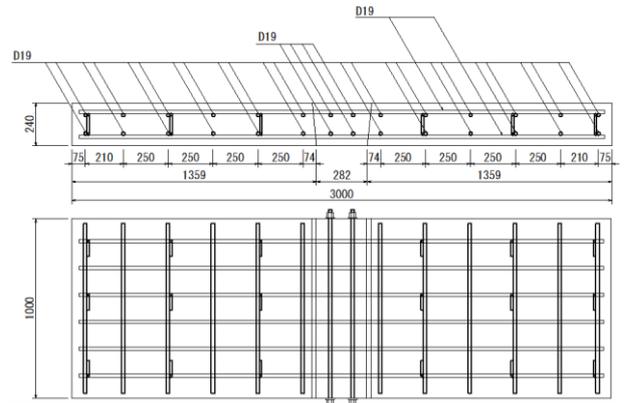
試験体名	鉄筋径	ループ鉄筋の曲げ直径	ループ鉄筋の投影高さ	重ね継手長	床版厚さ
継手無		-	-	250	240
L-90	D19	122	122	250	240
L-75	D19	122	117	250	235
L-60	D19	122	103	250	221
L-45	D19	122	81	250	199

表-2 材料特性値一覧 (単位: N/mm<sup>2</sup>)

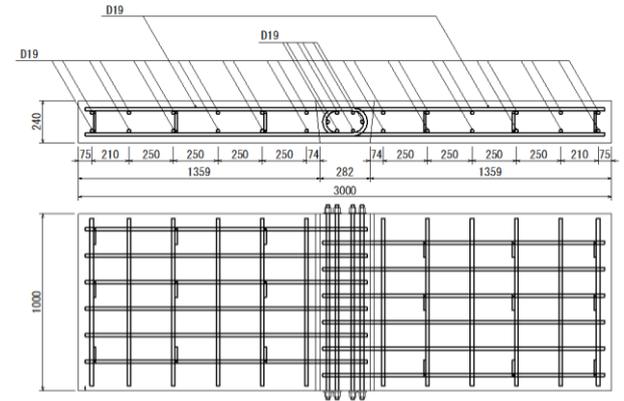
試験体名	コンクリート*			鉄筋	
	圧縮強度	引張強度	ヤング係数 ( $\times 10^4$ )	降伏強度	ヤング係数 ( $\times 10^4$ )
継手無	68.3	4.15	2.86	368	20.2
L-90	70.3	3.65	3.14		
L-75	72.3	3.96	3.77		
L-60	76.7	3.20	3.96		
L-45	77.8	3.63	3.76		

\*コンクリートは既設部、間詰部の中で最も低い値を採用した。

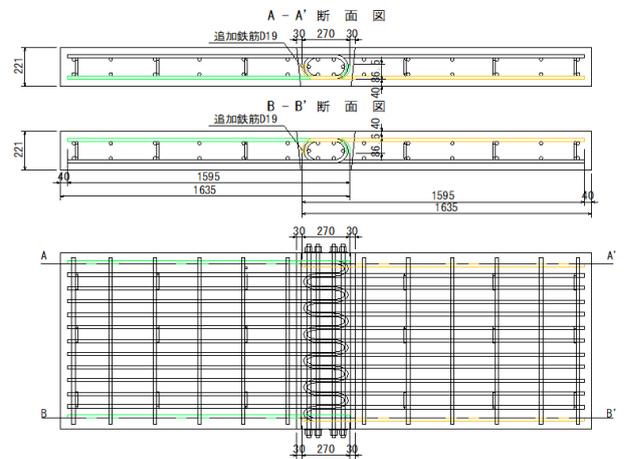
手を90°とし、15°ずつ角度を変化させ、最大45°まで



(a) 継手無試験体

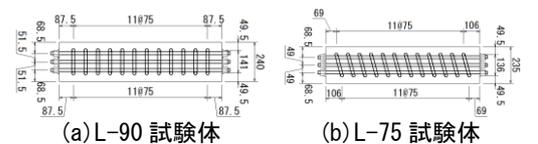


(b) L-90試験体

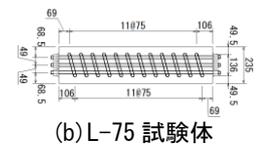


(c) L-60試験体

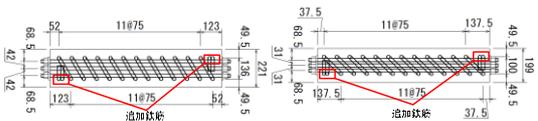
図-3 試験体配筋図 (単位: mm)



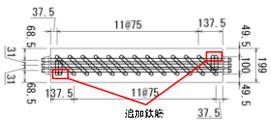
(a) L-90試験体



(b) L-75試験体



(c) L-60試験体



(d) L-45試験体

図-4 間詰め位置断面図 (単位: mm)

傾けた。また、L-60 および L-45 試験体はループ鉄筋を傾けた場合、断面端部に広い無筋部が生じるため、図-3(C)着色部および図-4 赤枠部に示すように追加鉄筋を配置し、鉄筋間隔が一定になるようにした。間詰部の橋軸直角方向鉄筋は、床版の連続性を考慮して引抜けが生じないようにプレートナットで固定した。

### 2.3 試験方法

図-5 に試験方法を示す。試験は支間長 2,800mm、載荷スパン 600mm の 4 点曲げ載荷とし、油圧ジャッキによって載荷を行った。荷重はロードセルによって計測を行った。たわみは図-5 に示すように変位計を載荷点直下および支間中央位置に設置し、橋軸直角方向にも 450mm ずつ 3 か所設置し、合計 9 か所計測を行った。橋軸方向鉄筋のひずみは、ひずみゲージを用いて接合部内および近傍において計測を行った。コンクリートひずみは上縁のみ貼付して計測を行った。

### 2.4 解析概要

接合部が存在しないプレキャスト床版を模擬してモ

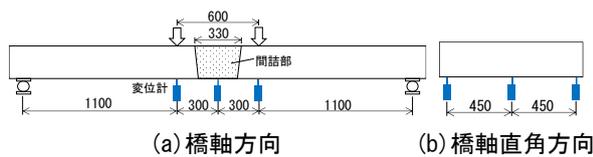


図-5 試験方法および変位計位置

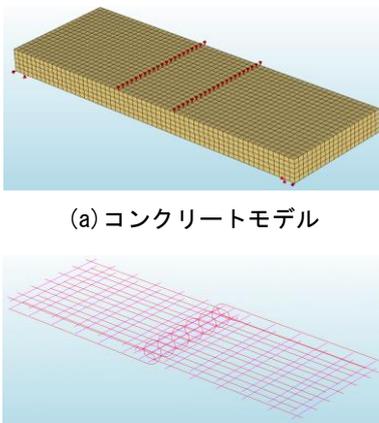
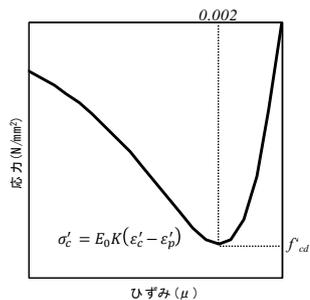
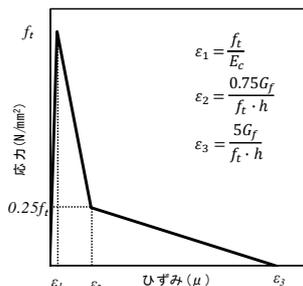


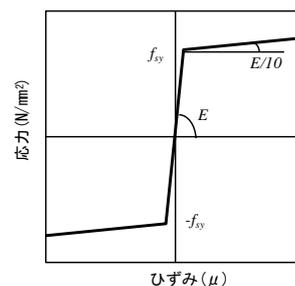
図-6 FEM モデル (L-45)



(a) コンクリート (圧縮側)



(b) コンクリート (引張側)



(c) 鉄筋

図-7 材料構成則

デルを作成し、ループ鉄筋の傾きによる曲げ挙動への影響の有無を検討することを目的に 3 次元非線形 FEM 解析を行った。解析ソフトは DIANA10.1 を使用した。解析モデルを図-6 に、材料構成則を図-7 に示す。モデルは傾斜配置したループ継手および継手無の 2 種類をそれぞれの試験体において作成した。コンクリートは、全ひずみひび割れモデルとし、圧縮側はコンクリート標準示方書モデル<sup>5)</sup>、引張側はトリリニア曲線とした。また、鉄筋は Von-Mises の降伏条件とし、降伏以降は弾性係数の 1/10 となるバイリニア曲線を採用した。さらに、ループ鉄筋および配力筋はトラス要素とし、コンクリートと完全付着とした。メッシュ間隔は 50mm 以下となるようモデルを作成し、荷重は強制変位を与えて計測した。

## 3. 試験結果

### 3.1 変形状

図-8 に荷重-スパン中央変位関係、表-3 に実験結果一覧を示す。変位の値は橋軸直角方向の 3 点の差が 1mm 未満であったため、3 点の平均値とした。また、設計値は RC の曲げ理論で計算を行い、参考文献 3) のコンクリート橋編 4 章に則り、等価応力ブロックを用い、安全率を考慮せず、表-2 に示した材料強度を用いて計算を行った。全ての試験体において、破壊形態は引張鉄筋降伏後、コンクリート上縁に圧壊を呈する曲げ引張破壊であった。継手無と L-90 試験体について比較すると、2 つの試験体は全ての荷重時において、同様の挙動を示し

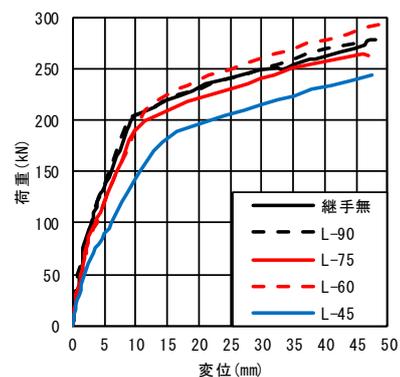


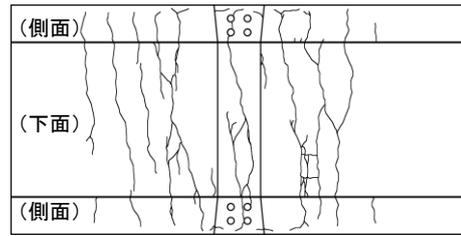
図-8 荷重-スパン中央変位関係

表-3 実験結果一覧

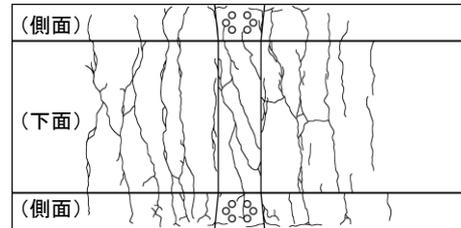
試験体名	項目	目地部 開口	ひび割 れ発生	鉄筋* 降伏	終局
継手無	設計値(kN)	-	80.0	203	248
	実験値(kN)	25.0	65.0	191	290
	解析値(kN)	-	95.8	205	243
	実験値/設計値	-	0.81	0.94	1.17
	実験値/解析値	-	0.68	0.93	1.19
L-90	設計値(kN)	-	69.8	203	250
	実験値(kN)	10.0	90.0	203	297
	解析値(kN)	-	79.4	200	273
	実験値/設計値	-	1.29	1.00	1.19
	実験値/解析値	-	1.13	1.01	1.09
L-75	設計値(kN)	-	71.5	198	245
	実験値(kN)	40.0	55.0	190	266
	解析値(kN)	-	71.8	205	272
	実験値/設計値	-	0.77	0.96	1.09
	実験値/解析値	-	0.77	0.93	0.98
L-60	設計値(kN)	-	50.9	211	260
	実験値(kN)	25.0	60.0	210	299
	解析値(kN)	-	53.1	205	282
	実験値/設計値	-	1.18	1.00	1.15
	実験値/解析値	-	1.13	1.02	1.06
L-45	設計値(kN)	-	47.1	186	233
	実験値(kN)	25.0	55.0	171	253
	解析値(kN)	-	44.0	184	246
	実験値/設計値	-	1.17	0.92	1.09
	実験値/解析値	-	1.25	0.93	1.03

\*降伏ひずみ( $\epsilon_y=1824\mu\epsilon$ )に達した時の荷重値

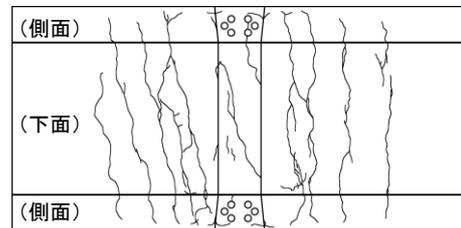
ており、ループ継手は鉄筋継手として有効な継手方法であることが本試験からも確認できた。L-90 と L-75 の比較より、ひび割れ発生までは同様の挙動を示しているものの、ひび割れ発生後は、L-75 試験体は L-90 試験体に比べ同荷重時の変位は総じてやや大きくなっている。しかし、両者の差は L-75 が L-90 より有効高が 5mm 小さいこと、また試験データのばらつきや表-3 に示すように鉄筋降伏荷重および終局荷重の設計値と実験値の比が 1.0 に近いことも考慮すれば、斜め配置による影響と考えるほどの有意差とは言えない。L-90 と L-60 を比較すると、L-60 は L-90 より床版厚は 19mm 薄く、鉄筋降伏まではたわみが同荷重時において大きくなるが、L-75 と同様の挙動を示している。しかし、鉄筋降伏以降では、L-60 の方が L-90 よりむしろたわみは小さくなっている。これは、L-60 では 2.2 で述べたように追加鉄筋を 1 本追加した影響により、表-3 にも示すように鉄筋降伏荷重の設計値・実験値がともに L-90 よりも 10kN 高くなっており、降伏が遅れたことでたわみは小さくなったものと考えられる。L-45 に着目すると、L-45 は他の試験体に比べたわみが大幅に大きくなっている。これは L-45 が他の試験体に比べ床版厚が顕著に薄くなるため大幅な曲げ剛性の低下を招いたものと考えられ、後述の解析結果からもその傾向が確認できる。



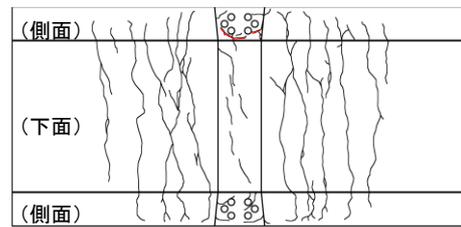
(a) 継手無



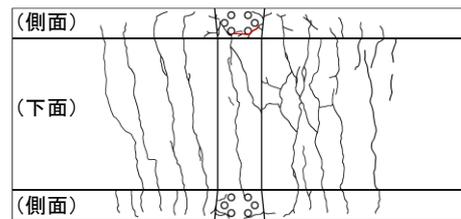
(b) L-90



(c) L-75



(d) L-60



(e) L-45

図-9 ひび割れ図

### 3.2 ひび割れ性状

図-9 に各試験体のひび割れ図を示す。間詰部の丸印はプレートナット位置を示している。図より、継手無と比較すると、ループ継手を有する試験体すべてにおいて、角度をつけた場合でも曲げひび割れ間隔およびひび割れ幅に大きな差異はなかった。ただし、追加鉄筋を配置した L-60 および L-45 試験体では、荷重が増加するにつれて間詰部のプレートナットの下側に沿って橋軸方向のひび割れ(赤線)が進展した。これは、追加鉄筋は半ループで定着しているため、定着不足による影響と推察

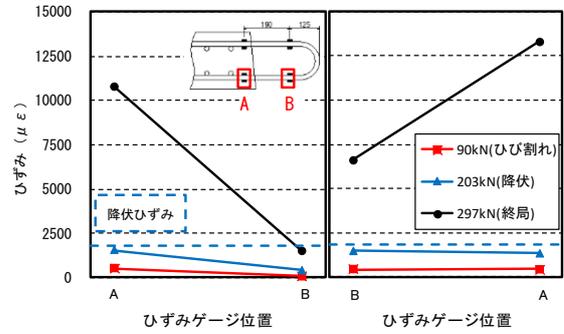
され、顕著なものではないが今後対策を講じる必要があると考えられる。

図-10に荷重-目地部目開き量関係図を示す。ここで、継手無試験体は100kNまで計測不良によりデータの記録ができなかったため、(b)の赤枠位置詳細図には示していない。図-10(a)より、いずれの試験体も鉄筋降伏前までは同程度の目開き量が生じており、継手無試験体と同様の挙動を呈した。鉄筋降伏以降も目開きに顕著な進展はなく、曲げ性能の低下は確認できなかった。図-10(b)に図-10(a)の赤枠部分を示す。荷重初期における目開き量の変曲点は各試験体で異なった。これは床版厚の違いによる影響と考えられる。図中の丸枠内に示す◇は引張鉄筋に鉄筋応力度100N/mm<sup>2</sup>が生じる設計値とグラフ曲線の交点位置を示している。道路橋示方書<sup>3)</sup>によれば、この値は既往の構造物に生じたひび割れ幅と設計上の鉄筋応力度との関係等から、コンクリート表面のひび割れ幅が0.2mm程度以下となる鉄筋応力度を示したものである。本試験においても、設計荷重相当でも目地部の目開き量は0.2mm以下となっており、所要の耐久性を満たすと考えられる。

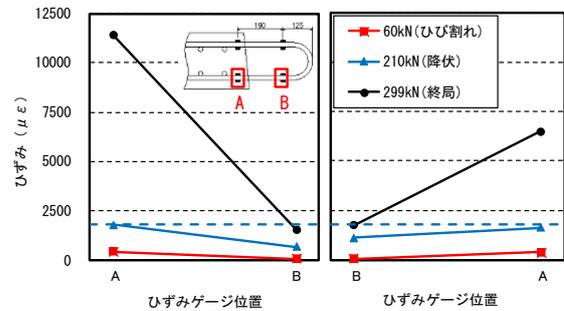
### 3.3 鉄筋ひずみ

図-11にL-90およびL-60試験体のループ鉄筋の赤枠で示す位置のひずみ分布の一例を示す。図中の左右は、プレキャスト部の左右それぞれに配置されたループ鉄

筋のひずみを示している。いずれの試験体も各荷重値において間詰部よりも既設部の方が鉄筋にひずみが生じていることが確認できる。プレキャスト部の左右でひずみが異なるのはひび割れ位置の影響によるものと考えられる。この傾向はL-75およびL-45でも確認され、ループ鉄筋を傾けた場合でも、鉄筋量が間詰部より少ない

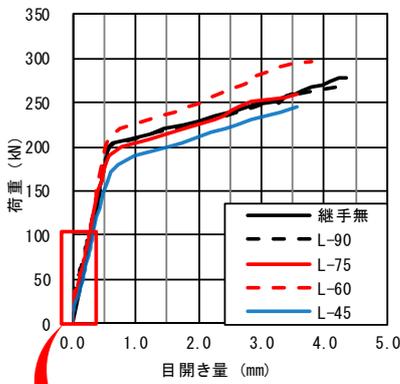


(a)L-90 試験体

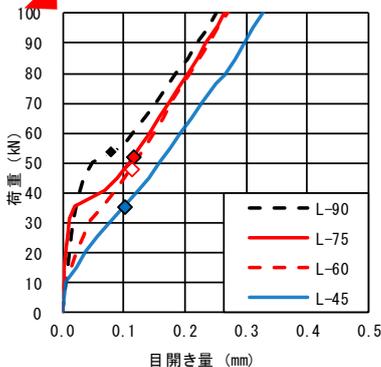


(b)L-60 試験体

図-11 ループ鉄筋ひずみ分布の一例



(a)全体図



(b)赤枠位置詳細図

図-10 荷重-目地部目開き量関係図

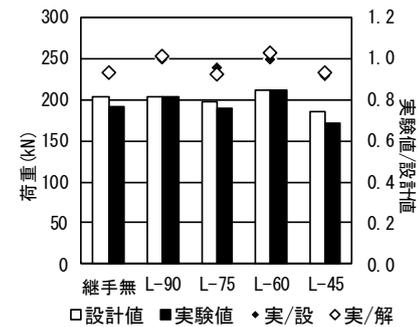


図-12 鉄筋降伏荷重時における設計値と実験値の比

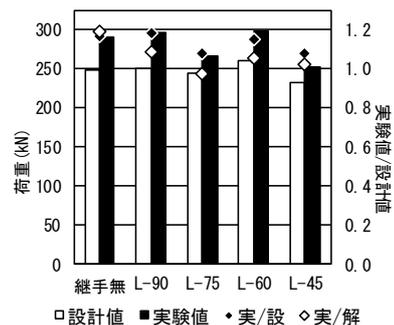


図-13 終局荷重時における設計値と実験値の比

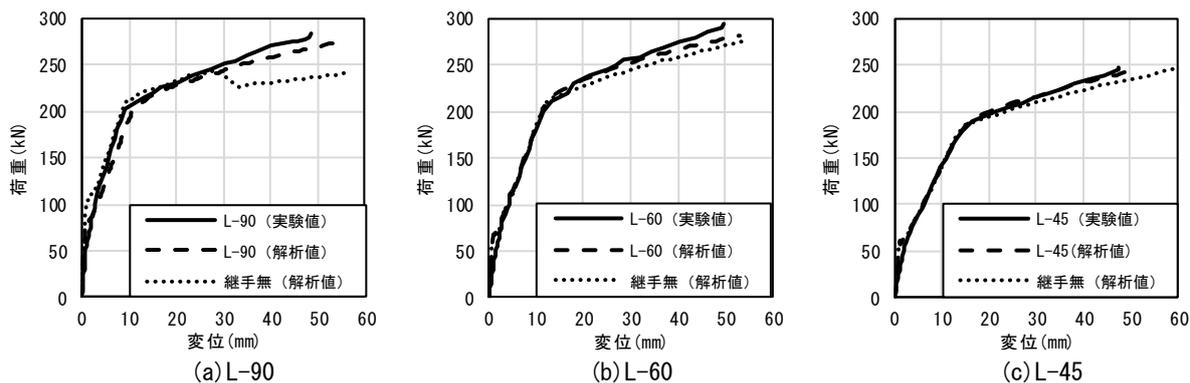


図-14 解析結果との比較の一例（荷重-スパン中央変位関係）

既設部で鉄筋ひずみは大きくなっており、各試験体間でのひずみの生じ方に明確な差異は見られなかった。

### 3.4 曲げ耐力の評価

図-12 に鉄筋降伏荷重時における設計値と実験値の比、図-13 に終局荷重時における設計値と実験値の比、および図-14 に荷重-スパン中央変位関係における実験値と解析値の比較の一例を示す。ここで、実験値における降伏荷重の決定は貼付した鉄筋ひずみの計測最大値が、実降伏ひずみ (1,824 $\mu$ ) に達した時の荷重値とした。まず、表-3 より、一部実験値が設計値や解析値を下回るものもあるが、実験結果のばらつき、また、図-14 に示す継手無の解析結果も考慮すれば、ループ継手鉄筋の傾斜による耐力低下は考えられない。図-12 の降伏荷重について、いずれの試験体も実験値は設計値とほぼ同等の値を示し、設計値に対して実験値は 0.92~1.00 倍であった。設計値より下回った原因として、鉄筋ひずみはコンクリートのひび割れ位置の影響もあり、局所的であるためと考えられる。図-13 の最大荷重について、全ての試験体で実験値は設計値を上回り、その比は 1.09~1.19 であった。以上より、ループ鉄筋を斜め配置した場合においても通常の RC 曲げ理論を用いての評価は妥当であることが明らかとなった。図-14 について、いずれの試験体も実験結果と解析結果は終局時まできわめて良い一致が得られた。ただし、載荷初期段階においては、解析値は実験値よりも高い剛性を示している。これは、解析では間詰部が存在せず、目開きが生じないためと考えられる。紙面の都合上、他項目についての比較は割愛するが、ほぼ同様の結果を示した。以上より、間詰部に傾斜したループ鉄筋を配置した場合でも、間詰部の存在しない RC はりに傾斜配置した場合および継手無の場合と同等の曲げ耐荷挙動を示すことが確認できた。

### 4. まとめ

本研究により得られた結果を次に示す。

- (1) ループ継手を傾斜に配置した場合でも所要の曲げ耐荷挙動を示すことが確認でき、ひび割れ性状や鉄

筋ひずみも継手無や通常のループ継手と明確な差異は見られなかった。

- (2) 目地部における目開き量は、ループ鉄筋を傾斜配置した場合でも引張鉄筋に許容鉄筋応力が作用した時点において許容ひび割れ幅 0.2mm 以下であり、所要の耐久性を満たすと考えられる。
- (3) FEM 解析より、間詰部に傾斜したループ鉄筋を配置した場合でも、間詰部の存在しない RC はりに配置した場合および継手無の場合と同等の曲げ耐荷挙動を示すことが確認できた。
- (4) ループ鉄筋を 45° まで傾斜した場合でも、RC 曲げ理論での評価が可能であることが明らかとなった。ループ鉄筋を斜めに配置した場合、側面から投影した場合の鉄筋上側と下側の間隔を、必要曲げ直径相当まで確保し、かつ適切な重ね継手長を設けることで、継手として十分機能を果たすと考えられる。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、(株)大林組(旧九州大学工学部 4 年生) 二郎丸裕衣氏には多大の協力を賜った。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 東日本、中日本、西日本高速道路株式会社：設計要領第 2 集橋梁保全編、平成 29 年 7 月
- 2) 阿部浩幸、原健梧、澤田浩昭、中村雅之：プレキャスト PC 床版の新しい RC 接合構造に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.29, No.3, pp.493-498, 2007
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、2012 年 3 月
- 4) F・レオンハルト、E・メニッヒ(横道英雄訳)：鉄筋コンクリートの配筋、鹿島出版、1985
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]2012 年制定、2013