

ダブルスクエア継手を有するPCa梁の 曲げ載荷実験および適用範囲の提案

池野 勝哉¹・齊藤 創太²・川端 雄一郎³・加藤 絵万³・岩波 光保⁴

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 土木部門 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³ 正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴ 正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

近年、建設現場の省力化を目的として、プレキャスト部材(以下、PCa梁)の適用が増えている。PCa梁同士の接合には、一般に鉄筋の重ね継手や機械式継手による方法が広く用いられているが、港湾の栈橋上部工では波浪による動揺下での接合になるため、鉄筋同士の接触損傷や施工精度の観点から適用が容易ではない。著者らは過去に、PCa梁接合時の鉄筋干渉を回避できる継手構造としてダブルスクエア継手(以下、DS継手)を考案し、継手のないRC梁と同等の曲げ耐荷力を有していることを確認している。本研究では、DS継手の実用化に向けて、梁断面の大きさやコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比を変化させた曲げ載荷実験を行い、曲げ剛性や耐荷力、ひび割れ性状、断面内のひずみ分布からDS継手のメカニズムを考察し、実用的な適用範囲について提案する。

Key Words : precast concrete beam, double-square joint, bending load test, application range

1. はじめに

近年、建設現場の省力化を目的として、RC梁におけるプレキャスト部材(以下、PCa梁)の適用が増えている。PCa梁は工場あるいは現地ヤードで製作し、PCa梁同士を接合させて構造の一体化を図る。PCa梁の接合には、一般に鉄筋の重ね継手や機械式継手による方法が広く用いられているが、港湾の栈橋上部工では波浪による動揺下での接合になるため、鉄筋同士の接触損傷や施工精度の観点から適用が容易ではない。

一方、上記以外の継手方法として、PCa床版では海外のDIN1045を基にしたループ継手が実用化¹⁾され、国内において多くの応用的研究がなされている^{2,3)}。しかし、ループ継手をPCa梁に適用する場合、幾何学的に梁高程度のループ径が必要となり、鉄筋径や付着強度のみならず梁高によってPCa梁間の継手長が決定されるため、比較的大きな現場打ち幅とそれに伴う型枠支保工が必要となる。加えて、ループ継手はループ筋が交互に重なり合うため、起重機船を用いた海上施工においてはループ筋同士の接触損傷が懸念される。

このような背景から著者らは過去に、PCa梁接合時の鉄筋干渉を回避できる継手としてダブルスクエア継手(以下、DS継手)を考案し、継手のないRC梁と同等の

曲げ耐荷力を有していることを確認している⁴⁾。DS継手は、PCa梁端面からコ字状の鉄筋を突出させ、コ字筋同士を突き合わせて設置した後、コ字筋と接する様にスクエア状の鉄筋を挿入し、せん断補強筋を配置して現場打ちコンクリートで一体化するものである。DS継手はスクエア形状であるため梁高の影響を受けにくく、コ字筋同士に離隔を設けて突き合わせ設置することで鉄筋同士の接触が回避され、栈橋上部工でのPCa梁の接合に適した継手構造として期待される(図-1)。

本研究では、DS継手の実用化に向けて、梁断面の大きさやコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比を変化させた曲げ載荷実験を行い、曲げ剛性や耐荷力、ひび割れ性状、断面内のひずみ分布からDS継手のメカニズムを考察し、実用的な適用範囲について提案する。

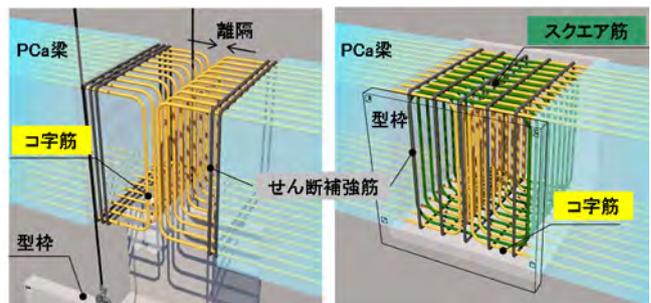


図-1 DS継手の概要(イメージ)

2. DS継手を有するPCa梁の曲げ載荷実験

実験は、概ね1/6~1/3程度の縮尺で栈橋上部工梁を想定した試験体を製作し、2点对称一方向の曲げ載荷を実施した。詳細を以下に述べる。

(1) 実験ケースおよび試験体諸元

実験ケースは表-1および図-2に示す3種類の梁断面(S, M, L)に対し、継手のないRC梁およびDS継手のコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比 (l_h/l_v) を変化させた計12ケースである。DS継手は既往のループ継手³⁾に準じて、コ字筋とスクエア筋で形成される閉合域内の梁軸直角方向にD10の補強筋を上下に2本ずつ配置した。各試験体の純曲げ区間には2箇所の鉛直打継面(遅延剤を塗布してワイヤーによる粗面仕上げ)を設け、現場打ち部に後からPCa梁と同配合の現場打ちコンクリート ($f'_{ck}=30\text{ N/mm}^2$) を打設することで構造の一体化を図った。DS継手の配筋例を写真-1に示す。

(2) 載荷条件・計測項目および使用材料

試験体に鋼製のピン・ローラー支承を設置し、載荷治具を介して1000kN油圧ジャッキによる漸増載荷を行った。各梁断面における材料公称値 ($f'_{cd}=30\text{ N/mm}^2$, $f_{yd}=235\text{ N/mm}^2$) を用いた設計荷重を表-2に示す。ここで、許容ひび割れ荷重 P_{ad} とは、「特に厳しい腐食環境」での許容ひび割れ幅 $w_a=0.0035c$ (c : かぶり) に相当する荷重を曲げひび割れ幅算定式⁹⁾から逆算して求めた。実験に用いた材料物性値を表-3に示す。

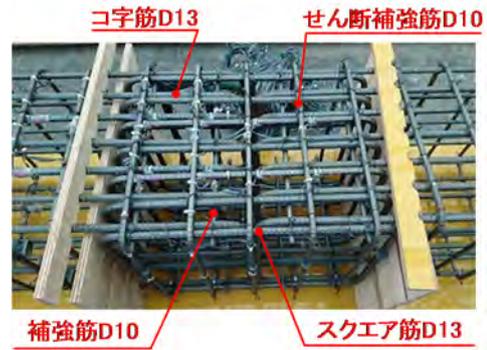


写真-1 DS継手の配筋例

表-1 実験ケースの一覧

断面	軸方向鉄筋	梁高	梁幅	梁長	有効高	鉄筋比	せん断スパン比	基本定着長*	水平重ね長	l_h/l_v	鉛直筋長	l_h/l_v	備考	
		H (mm)	B (mm)	L (mm)	d (mm)	A_s/Bd	a/d	l (mm)	l_h (mm)		l_v (mm)			
断面S	RC-S	5@D10	300	280	3600	260	0.005	3.8	255	-	-	-	継手無し	
	DS-S1									130	0.51	160	0.81	
	DS-S2									100	0.39	160	0.63	
	DS-S3									60	0.24	160	0.38	
断面M	RC-M	7@D13	440	420	3600	400	0.005	2.5	332	-	-	-	継手無し	
	DS-M1									200	0.60	282	0.71	
	DS-M2									150	0.45	282	0.53	
	DS-M3									100	0.30	282	0.35	
断面L	RC-L	5@D13	600	280	5000	560	0.004	2.9	332	-	-	-	継手無し	
	DS-L1									280	0.84	442	0.63	
	DS-L2									240	0.72	442	0.54	
	DS-L3									200	0.60	442	0.45	

*基本定着長の定義: $l = \alpha \frac{f_{yd}}{4f_{bod}} \phi$

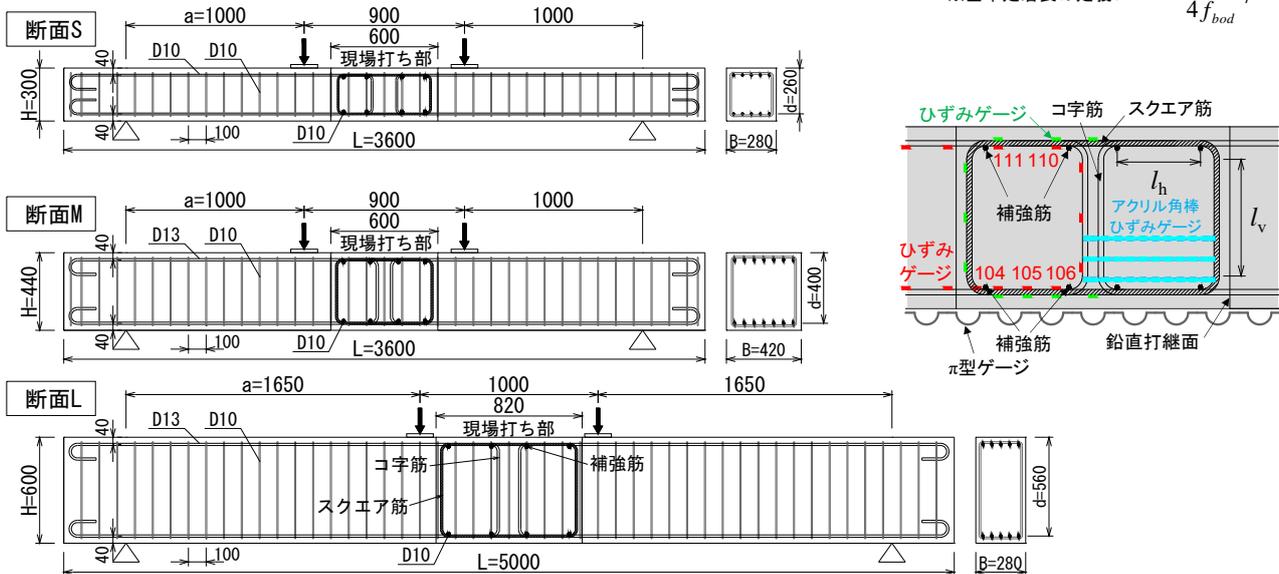


図-2 試験体の側面・断面図 (単位: mm)

表-2 各梁断面の設計荷重

設計値		断面S	断面M	断面L
ひび割れ発生荷重	P_{cd} (kN)	20.0	66.2	49.1
許容ひび割れ荷重	P_{ad} (kN)	24.1	87.2	54.5
曲げ降伏荷重	P_{yd} (kN)	59.0	225.2	137.8
曲げ終局荷重	P_{ud} (kN)	61.8	236.0	144.3

表-3 実験に用いた材料物性値

		断面S	断面M	断面L
コンクリート (30-18-13N)				
圧縮強度	σ_c (N/mm ²)	38.1	37.3	32.8
割裂強度	σ_t (N/mm ²)	3.0	2.9	2.5
弾性係数	E_c (N/mm ²)	31.5×10^3	31.7×10^3	—
鉄筋 D10 (SD345)				
降伏点	f_y (N/mm ²)	380.7	374.5	—
引張強さ	f_t (N/mm ²)	561.7	573.9	—
弾性係数	E_s (N/mm ²)	18.5×10^4	18.4×10^4	—
鉄筋 D13 (SD345)				
降伏点	f_y (N/mm ²)	—	399.9	382.2
引張強さ	f_t (N/mm ²)	—	556.2	529.2
弾性係数	E_s (N/mm ²)	—	18.0×10^4	17.8×10^4

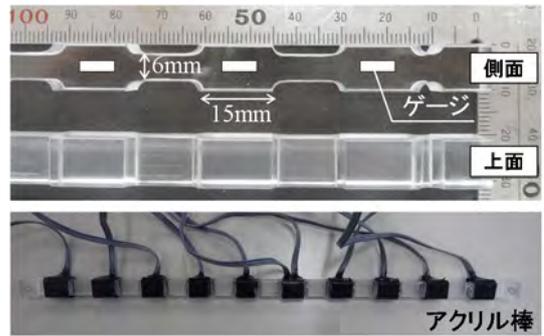


写真-2 コンクリートひずみの計測方法

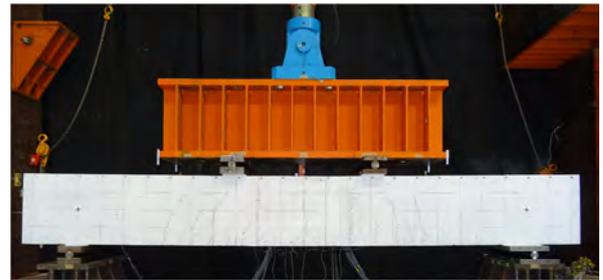


写真-3 曲げ載荷実験の状況

載荷条件は、許容ひび割れ荷重 P_{ad} および設計曲げ降伏荷重 P_{yd} でそれぞれ除荷・載荷を1回ずつ繰り返し、その後、概ね0.1~0.2 mm/sの載荷速度で単調に載荷した。

測定項目は、試験体中央の図心位置における荷重-変位関係、鉛直打継面を含む現場打ち部のひび割れ幅、鉄筋のひずみ、コ字筋とスクエア筋で形成される閉合域内のコンクリートひずみである。現場打ち部のひび割れ幅はπ型ゲージ、コンクリートひずみは平野ら⁹⁾に倣い、側面を凹凸加工した1辺1cmのアクリル角棒 ($E=3.5 \times 10^3$ N/mm²) にひずみゲージを貼り付け、試験体内に埋設することで把握した(写真-2)。実験状況を写真-3に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 荷重変位・打継面のひび割れ幅・鉄筋ひずみ挙動

試験体中央における荷重-変位、打継面のひび割れ幅および代表的な鉄筋ひずみ挙動を図-3、設計曲げ降伏荷重 P_{yd} におけるひび割れ性状を図-4に示す。なお、図-3の鉄筋ひずみは図-2のゲージ番号に対応し、補強筋は各段それぞれ2本の平均値とした。いずれの試験体も打継面のひび割れが先行したのち、DS継手ではコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域を避けるようにひび割れが分散した(図-4)。

図-3(a)の荷重-変位は、曲げひび割れ後に非線形性が現れ、軸方向鉄筋の降伏(図中の丸印)を超えた辺りですぐに荷重の伸びが緩やかとなり、実際の材料強度を用いた曲げ終局耐力 P_u を超える耐荷力を発揮した。

DS継手の曲げひび割れ発生後の剛性に注目すると、断面SではDS-S2およびDS-S3、断面MではDS-M2およびDS-M3、断面LではDS-L3がそれぞれのRC梁よりも剛性が小さく、コ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比 (I_h/I_v) が小さくなるほど曲げ剛性が低下している。

図-3(b)には、曲げひび割れが集中すると考えられる打継面のひび割れ幅(2箇所)の打継面の平均)を示しているが、概ね使用限界状態の許容ひび割れ幅 w_a までは設計ひび割れ幅式⁹⁾での評価が可能である。なお、DS-S3、DS-M3およびDS-L3は途中、ひび割れ幅が閉じる方向に大きく転じているが、これはスクエア筋の下側隅角部(図-4の箇所a)にひび割れが集中したためである。このように、コ字筋とスクエア筋で形成される閉合域の縦横比 (I_h/I_v) が小さいケースでは、設計曲げ降伏荷重 P_{yd} に至る前にスクエア筋の下側隅角部にひび割れが集中する傾向が確認された。

図-3(c)には縦横比 (I_h/I_v) の大きなDS継手(DS-S1、DS-M1、DS-L1)のコ字筋および上下の補強筋のひずみ挙動(+引張、-圧縮)を示している。鉄筋ひずみはコ字筋に沿って徐々に変化しており、純曲げ区間において一定ではない。一方、梁軸直角方向に配置した閉合域内の補強筋は、設計曲げ降伏荷重 P_{yd} 時においてもひずみが最大150 μ程度と小さく、梁軸直角方向の拘束に寄与していないように見受けられる。これは、DS継手部に配置したせん断補強筋が、梁軸直角方向の変位を拘束するため、PCa床版で適用されるループ継手と比べて補強筋の寄与が小さくなるものと推察される。

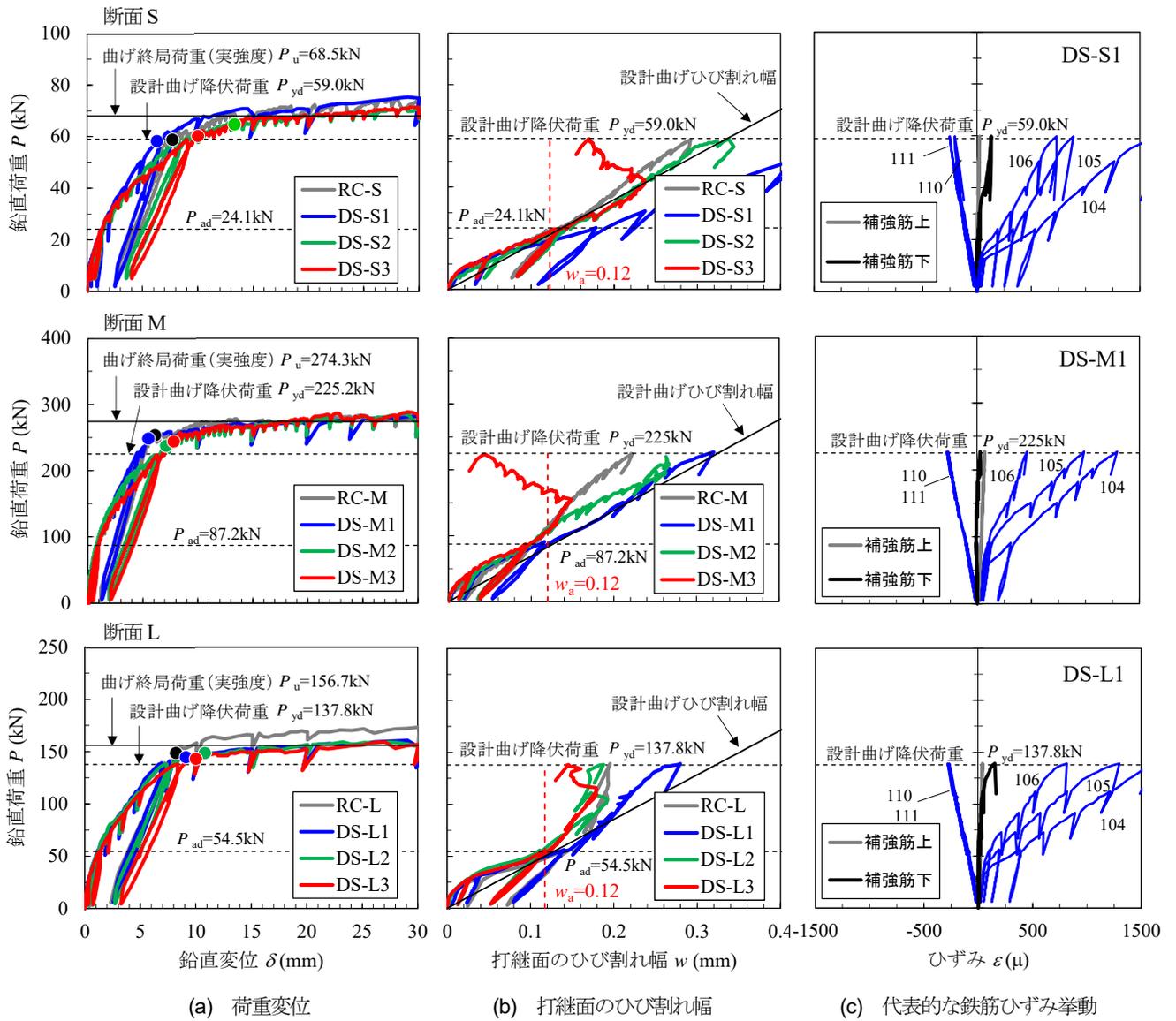


図3 荷重変位・打継面のひび割れ幅・代表的な鉄筋のひずみ挙動

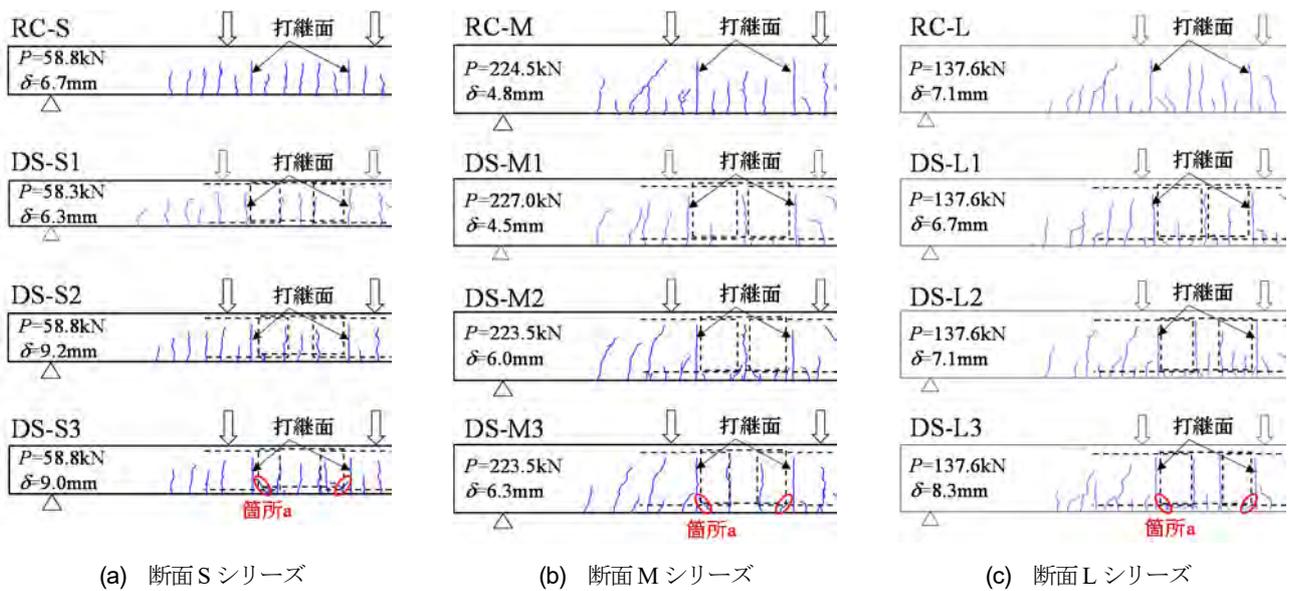


図4 設計曲げ降伏荷重 P_{yd} のひび割れ性状

(2) コ字筋のひずみ分布

代表的な断面 M について、無次元変位 $\delta/\delta_y=0.2, 0.5, 1.0$ におけるコ字筋のひずみ分布 (+引張, -圧縮) を図-5 の軸座標を定義して図-6 に示す。ここで、 δ_y は引張側の軸方向鉄筋が降伏したときの鉛直変位である。図中には黒線で RC 梁 (RC-M) の同一座標における鉄筋ひずみを併記した。a'~a 間は引張領域, b~b'間は圧縮領域, a~b 間は引張から圧縮への遷移領域としてひずみが分布している。DS 継手の引張領域 (a'~a) では、RC 梁と概ね同レベルの引張ひずみが生じているが、a 点付近では a~b 間の遷移領域と接続するように低下し、その傾向は δ/δ_y が大きいほど顕著である。なお、紙面の都合上、図示しないが、このような傾向は断面 S および断面 L でも同様であった。

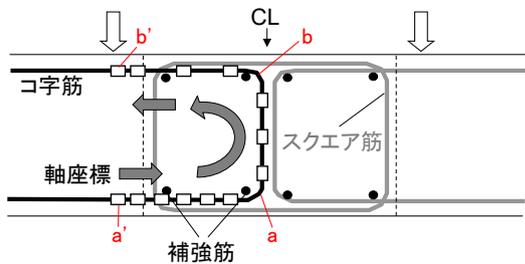


図-5 コ字筋における軸座標の定義

(3) 断面内のひずみ分布

断面 M の無次元変位 $\delta/\delta_y=0.2, 0.5, 1.0$ における断面内のひずみ分布を図-7 に示す。ここで、断面内のひずみは、圧縮縁のコンクリート表面ひずみ、軸方向鉄筋ひずみ、アクリル角棒で計測したコンクリートひずみ(各段、閉合域内で平均) より求めた。図中より、RC 梁 (RC-M) では断面内で平面保持が成立しているが、DS 継手では概ね $\delta/\delta_y=0.5$ 以降で平面保持が成立していないことが分かる。すなわち、 $y=400$ mm のコ字筋は概ね RC 梁と同程度の引張ひずみが発生するが、閉合域内のコンクリート部 $y=270\sim 370$ mm では極端に低いひずみレベルに抑えられている。梁曲げによってコ字筋とスクエア筋で形成される閉合域内に支圧反力として圧縮力が作用することで、引張領域の軸方向鉄筋に作用する引張力が軽減されるため、DS 継手は基本定着長よりも短い水平重ね長で曲げ耐荷力が確保できるものと考えられる (図-8)。

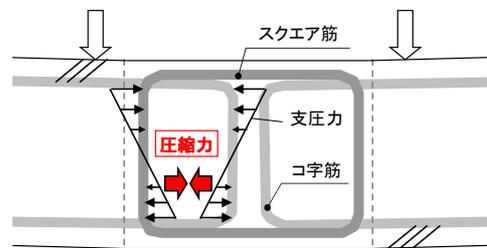


図-8 DS 継手の曲げ耐荷メカニズム

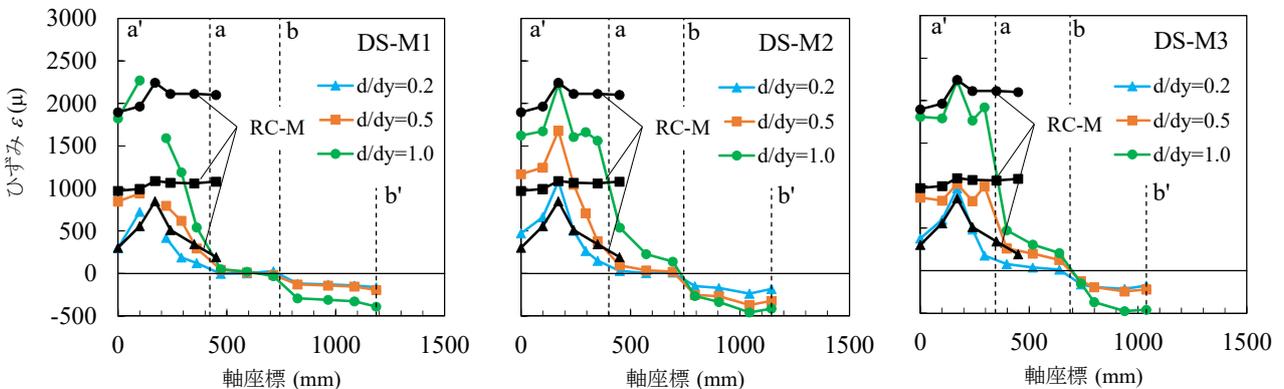


図-6 コ字筋のひずみ分布 (断面 M)

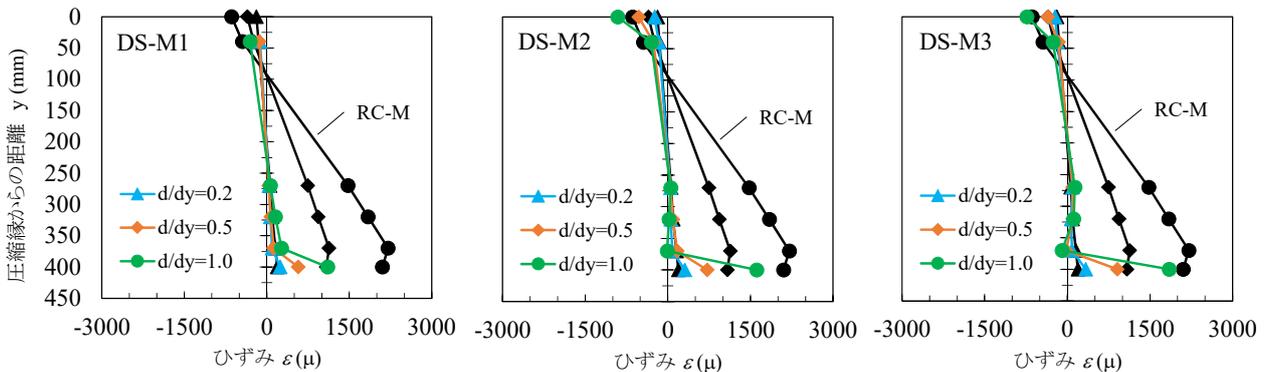


図-7 DS 継手断面内のひずみ分布 (断面 M)

4. DS 継手の適用範囲の提案

本実験による曲げ剛性や曲げ耐荷力, ひび割れ性状および断面内のひずみ分布から DS 継手の適用範囲について提案する. 具体的には, 閉合域の縦横比 ($l_h/l_v(d)$) を横軸, 基本定着長 l に対する水平重ね長 l_h の比 (l_h/l) を縦軸にとり, DS 継手の評価結果をプロットした. なお, 鉛直筋長 l_v は直角フック⁷⁾ ($l_v \geq 12\phi$) を満足し, 且つ, 有効高 d の関数となる.

DS 継手の評価結果を表-4, 提案する適用範囲を図-9 に示す. 評価結果は RC 梁と比較して同程度以上: ○, やや劣る: △, 劣る: × と判定して明示した. 図-9 の破線の右上領域にプロットされる DS 継手の形状が, 本研究で提案する PCa 梁での適用範囲である.

表-4 DS 継手の評価結果

		曲げ剛性	曲げ耐荷力	ひび割れ性状	閉合域内の 圧縮作用	評価結果
断面S	DS-S1	○	○	○	○	○
	DS-S2	△	○	○	○	△
	DS-S3	×	○	△	○	×
断面M	DS-M1	○	○	○	○	○
	DS-M2	△	○	○	○	△
	DS-M3	×	○	△	○	×
断面L	DS-L1	○	○	○	○	○
	DS-L2	○	○	○	○	○
	DS-L3	△	○	△	○	△

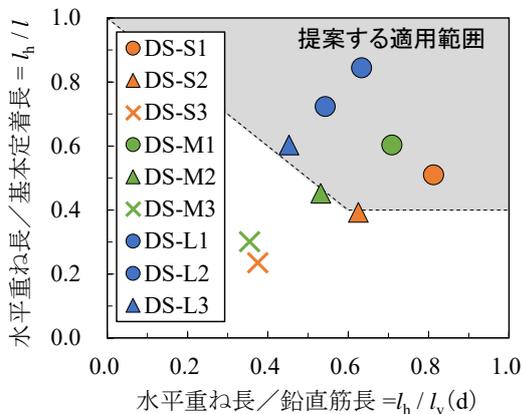


図-9 DS 継手の適用範囲の提案

5. おわりに

本研究では栈橋上部工の PCa 梁接合に適した DS 継手の実用化に向けて, 梁断面の大きさや閉合域の縦横比を変化させた曲げ載荷実験を実施し, RC 梁と比較することで適用範囲を提案した. DS 継手は, 全てのケースで RC 梁と同程度の曲げ耐荷力が確認されたが, 塩害環境下での適用を想定すると, 一部のケースで曲げ剛性やひび割れ性状(ひび割れ幅の局所化)に課題が見られた.

今後, PCa 梁接合の更なる省力化には, 埋設型枠の適用や梁軸直角方向の補強筋の省略が有効だと考えられる. 埋設型枠は構造部材として考慮されるため, 高剛性の埋設型枠を現場打ち部の外側に配置する場合には, 曲げ剛性の向上やひび割れ性状の改善が期待される. また, DS 継手では, フープ状のせん断補強筋が梁軸直角方向の変位を拘束している可能性があるため, 補強筋の省略可否について今後の課題として取り組む予定である.

参考文献

- 1) 日本橋梁建設協会: PC 床版設計の手引き, 2012.
- 2) 酒井秀昭, 上杉泰右, 上平謙二: ダブルループ継手構造を有する RC 床版の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.45-61, 2004.
- 3) 森田俊哉, 辻幸和, 飯塚豊, 松山哲也: ダブルループ鉄筋継手を用いた RC はりの力学的性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.607-612, 2006.
- 4) 池野勝哉, 岩波光保, 川端雄一郎, 加藤絵万: ダブルスクエア継手を有する PCa 梁の曲げ耐荷特性に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.40-51, 2019.
- 5) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, pp.230-234, 2018.
- 6) 平野貴規, 中村光, 斉藤成彦, 檜貝勇: 一軸圧縮応力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.146-150, 2002.
- 7) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, pp.350-351, 2018.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

BENDING LOAD TEST OF PRECAST BEAMS CONNECTED WITH DS JOINTS AND PROPOSAL FOR ITS SCOPE OF APPLICATION

Katsuya IKENO, Sota SAITO, Yuichiro KAWABATA, Ema KATO and Mitsuyasu IWANAMI

Recently, the application of precast beams is increasing for the purpose of labor saving at construction sites. In the past, authors devised a double-square joint (referred to DS joint) as a bar joint structure for precast superstructures of port piers. In this study, bending load tests for DS joint of precast beams were carried out by changing the size of beam section and width/length ratio of square shaped bar in closure area. A practical scope of application for DS joint was proposed by considering the flexural rigidity, bending load capacity, crack behavior and strain distribution in the beam section.