

論文 施工性に優れたプレキャスト部材接合継手の両引き実験

横田 祐起^{*1}・一宮 利通^{*2}・大窪 一正^{*3}・松浦 正典^{*4}

要旨: プレキャスト壁部材同士を鉛直方向に効率よく接合するための継手として、機械式定着体付鉄筋と半円形フック付鉄筋を併用した重ね継手を考案した。本研究では、考案した継手の継手長やかぶりなどを変化させた場合の継手耐力の確認、ならびに継手周囲に補強鉄筋を配置した場合の補強効果の確認を目的として継手の両引き実験を実施した。その結果、継手長、鉄筋の芯かぶり、鉄筋間隔、コンクリートの圧縮強度が大きくなるにつれ、継手耐力が向上することを確認した。また、継手周囲に補強鉄筋を配置すると、継手耐力が15%ほど大きくなるとともに靱性が向上し、脆性的な破壊を防止する効果があることを確認した。

キーワード: プレキャスト工法, 鉛直方向鉄筋継手, 機械式定着, 両引き実験

1. はじめに

プレキャスト（以下、PCa）工法は、現場での鉄筋・型枠組立などの工程が省略できるため、通常の場合打ち工法と比較して、施工性の向上や工期短縮の効果が期待される工法である。PCa 工法では、工場で製作した PCa 部材を現場まで運搬し、部材同士を接合することで構造物を構築する。そのため、施工性を向上させるには、PCa 部材同士を効率的に接合する継手構造が不可欠である。

筆者らは、LNG 地上式タンク PC 防液堤に PCa 工法を適用（図-1）するにあたり、PCa 壁部材間を鉛直方向に効率的に接合できる継手構造として、機械式定着体付鉄筋と半円形フック付鉄筋を併用した重ね継手（以下、機械式定着体・半円形フック併用継手）の開発を進めている。筆者らはこれまでの検討¹⁾で、継手長を適切に設定した場合、本継手を有する梁部材が、継手のない通常の RC 梁として計算した耐力と同等の曲げ耐力を有することを実験により確認している。本研究では、機械式定着体・半円形フック併用継手の継手長やかぶりなどを変化させた場合の継手耐力の確認、ならびに継手周囲に補強鉄筋を配置した場合の補強効果の確認などを目的に実施した、継手の両引き実験について述べる。

2. 機械式定着体・半円形フック併用継手

2.1 構造概要

機械式定着体・半円形フック併用継手は、片方の鉄筋を機械式定着体付鉄筋とし、他方を半円形フック付鉄筋とした重ね継手である（図-2）。鉄筋の筋による付着に加え、機械式定着体と半円形フックの支圧による定着効果が期待できるため、通常を重ね継手と比較して継手長を低減することが可能である。

本継手を PCa 壁部材間の鉛直方向鉄筋の継手として適用する場合、部材間の間詰め部で継手をラップさせると、間詰め部が厚くなり、間詰め用型枠の組立てや間詰め材の打込み作業に手間がかかることが想定される。そこで、本継手構造では、部材間の間詰め部を薄くするため、先行して下側に設置される部材（以下、下部材）の内部で継手が形成される構造としている。すなわち、図-2 に示すように、下部材の内部に半円形フック付鉄筋を設置し、その鉄筋に沿った鉛直下向きの箱抜き孔を設け、凝結遅延形のモルタルをあらかじめ充填しておく。その後、後行して上側に設置される部材（以下、上部材）から突出させた機械式定着体付鉄筋を挿入する。上部材設置後は、目地周囲に型枠を組立て、モルタルを充填すること

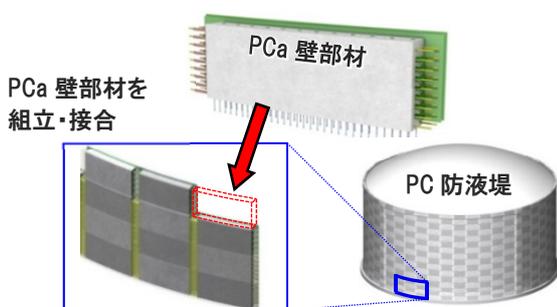


図-1 LNG 地上式タンク PC 防液堤の PCa 化

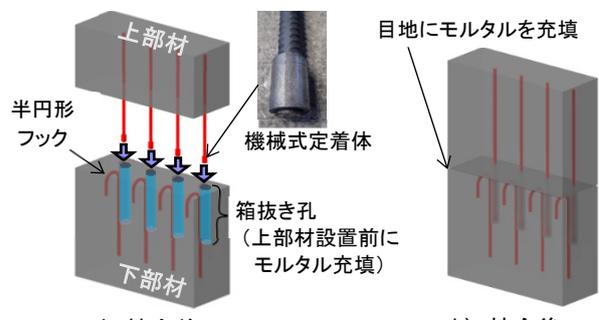


図-2 機械式定着体・半円形フック併用継手

*1 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造グループ研究員 修（工）（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造グループ上席研究員 修（工）（正会員）

*3 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造グループ主任研究員 修（工）（正会員）

*4 鹿島建設（株） 関東支店特定プロジェクトグループ担当部長

で一体化する。このような構造とすることで、部材間の目地厚は10mm程度と薄くなり、間詰め用型枠の組み立てが容易になることや、間詰め材の充填量が低減されることで、施工性の向上が期待できる。

2.2 継手の耐力算定式

機械式定着体・半円形フック併用継手の耐力算定式は、筆者らが調査した範囲では見つからなかった。そこで、本研究では継手耐力の計算値を Ledesma²⁾の提案した耐力算定式により算定し、実験結果を評価する際の参考値とした。Ledesma の耐力算定式は、機械式定着体付鉄筋同士の重ね継手の耐力算定式であり、DeVries³⁾による機械式定着体付鉄筋の付着割裂破壊耐力と、AASHTO⁴⁾の基本定着長算定式から逆算して得られる鉄筋付着力の和として継手耐力を算定している。なお、DeVries による機械式定着体付鉄筋の付着割裂破壊耐力式には、鉄筋をコンクリート躯体の角部に配置した場合の耐力低下を考慮するための係数が設けられているが、Ledesma の研究ではこの係数は用いられていない。本研究の試験体では躯体の角部に継手を配置したため、元の DeVries の式を引用し、以下に示す式(1)により継手耐力を算定した。

$$P_{cal} = \left(0.7 + 0.3 \frac{C}{3C_{min}} \right) \frac{A_{bo}}{A_{bon}} 0.017 C_{min} \sqrt{A_n f'_c} + 0.062 L_s \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ここに、 P_{cal} : 継手耐力(kN), C_{min} , C : 鉄筋の芯かぶり ($C_{min} \leq C$) (mm), A_{bo} : 交差定着の有効破壊面積 ($= (3C_{min} + L_s/2) \times S_{bar}$) (mm²), L_s : 継手長 (定着体の支圧面間の距離。ただし、本継手では、機械式定着体の支圧面と半円形フックの曲げ始点との間の距離で定義) (mm), S_{bar} : 鉄筋間隔(mm), A_{bon} : 側面割裂面積 ($= 36C_{min}^2$) (mm²), A_n : 定着体の有効支圧面積 ($=$ 定着体の外径面積 - 鉄筋の公称断面積) (mm²), f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

3. 継手の両引き実験 (補強鉄筋を配置しない場合)

3.1 実験概要

機械式定着体・半円形フック併用継手の継手長やかぶりなどを变化させた場合の継手耐力を確認するために、継手の両引き実験を実施した。

(1) 試験体

試験体は、コンクリート内に機械式定着体・半円形フック併用継手を2組配置したものとした。試験体一覧を表-1に、試験体の形状を図-3に示す。变化させたパラメータは、鉄筋径、継手長、コンクリートの圧縮強度、試験体の厚さ、および鉄筋の芯かぶりである。なお、機械式定着体・半円形フック併用継手における継手長、鉄筋の芯かぶり、鉄筋間隔は図-4のように定義している。継手長は、機械式定着体の支圧面と半円形フックの曲げ始点との間の距離とし、かぶりは鉄筋の2方向の芯かぶりに対し、図-4に示す位置関係で C_1 , C_2 として定義した。また、試験体の厚さは鉄筋間隔に相当する長さとした。

半円形フック付鉄筋は、コンクリートを打ち込む前に型枠内に設置した。箱抜き孔は、半円形フック付鉄筋に沿わせて設置した鋼製スパイラルシースを用いて設けた。コンクリート硬化後にシース管を除去し、箱抜き孔にモルタルを充填した後、機械式定着体付鉄筋を挿入して一体化した。なお、PCa 部材の製作性の観点からは、鋼製シース管の撤去作業を省略し、コンクリート内に残置することが望ましい。そこで、シース管を残置することによる継手耐力への影響を確認するため、No.4 試験体については、シースを試験体内部に残置した。

継手部には、LNG タンク防液堤の円周方向の鉄筋を模擬して SD345, D19 横方向鉄筋を 150mm ピッチで配置

表-1 試験体一覧

No.	鉄筋径 ϕ	機械式定着体		継手長 L_s	コンクリート 圧縮強度 f'_c (N/mm ²)		モルタル 圧縮強度 (N/mm ²)	試験体 厚さ S_{bar} (mm)	鉄筋の 芯かぶり (mm)		継手耐力				$\frac{P_{exp}}{P_{cal}}$	備考				
		外径 (mm)	長さ (mm)		目標値	実強度			C_1	C_2	計算値		実験結果							
											P_{cal} (kN)	σ_{cal} (※) (N/mm ²)	P_{exp} (kN)	σ_{exp} (※) (N/mm ²)						
1	D16	26.5	35	8φ	30	30.5	69.2	200	100	84	74.0	372.6	96.1	483.9	1.30					
2			8φ	29.1		60.7							82	82.6	288.3	111.6	389.5	1.35		
3				30.5		69.2								107.0	373.5	129.1	450.6	1.21		
4	D19	29	40	11φ		29.5	67.6							105.2	367.2	134.5	469.5	1.28	シース残置	
5				13φ		29.1	60.7							119.1	415.7	132.5	462.5	1.11		
6				8φ		30.5	69.2							80	101.6	262.5	128.6	332.2	1.27	
7						30.7	68.0								146.6	378.7	153.8	397.3	1.05	
8						30.7	68.0								146.6	378.7	154.4	398.9	1.05	高応力繰返し
9				13φ		29.1	61.3					57		150.9	389.8	130.1	336.1	0.86		
10						29.1	61.3			300				130	161.4	416.9	172.4	445.4	1.07	
11	D22	34.5	50	60		55.6	66.0			200				80	197.3	509.7	180.3	465.8	0.91	
12				14φ		30.7	68.0			150			100	55	150.4	388.5	119.8	309.5	0.80	
13				17φ		31.7	61.3							80	185.4	478.9	168.8	436.1	0.91	
14				20φ		29.8	71.0				200				206.2	532.7	193.3	499.4	0.94	

※継手耐力を鉄筋の公称断面積で除して、鉄筋応力として計算した値

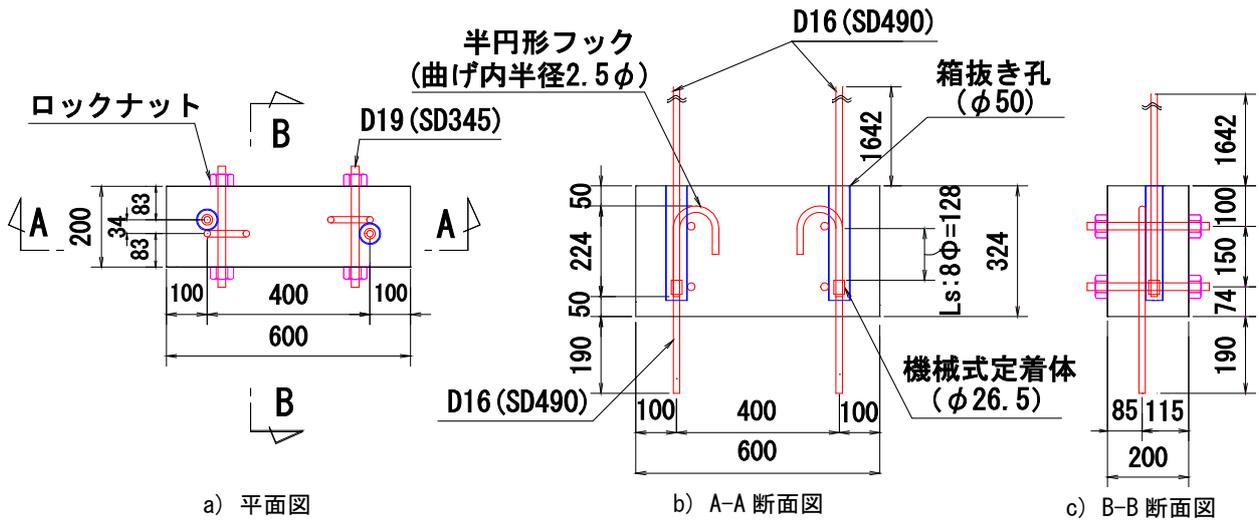


図-3 両引き試験体形状図 (試験体 No. 1)

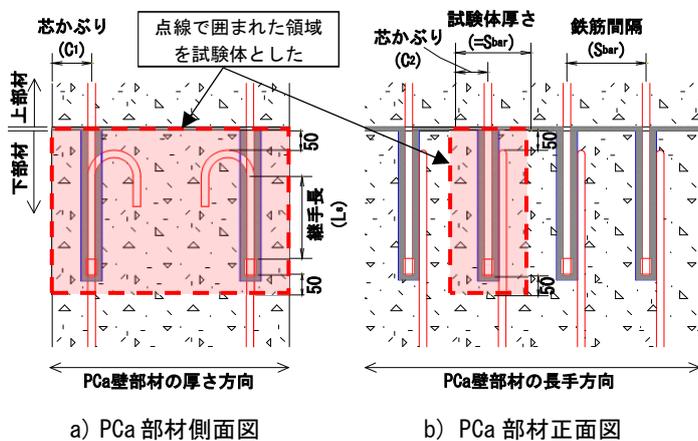


図-4 継手のパラメータの定義

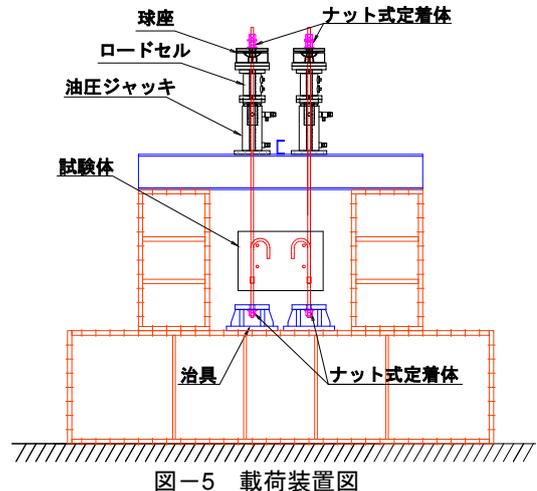


図-5 荷重装置図

し、試験体の短辺方向に貫通させた。実構造物の円周方向の鉄筋は、十分な定着長が確保されており、抜出しなどが生じないと考えられるため、試験体の配力筋はロックナットにより試験体側面に定着した。

(2) 使用材料

実構造物では鉛直方向鉄筋に SD345 鉄筋を使用することを想定しているが、SD345 鉄筋の規格降伏強度より大きな荷重を継手に載荷し、確実に継手部で破壊が生じるようにするため、本実験では SD490 鉄筋を用いた。

箱抜き孔形成用の鋼製スパイラルシースは、内径 50mm で、表面に高さ 2.5mm 程度の節状の凹凸を有するものを用いた。

コンクリートは、荷重試験時の圧縮強度の目標値を 30N/mm^2 または 60N/mm^2 とし、配合を決定した ($G_{\max}=20\text{mm}$)。モルタルには、実施工において箱抜きへの先行充填作業の完了後に上部材を設置するまでの間流動性を保持していること、ならびに狭隘な目地空間に確実に充填されることが求められるため、これらの性能を満たすフロー値 ($\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円筒容器を用いた簡易テ

ーブルフロー試験, JHS313-1999 に準拠) $300 \pm 30\text{mm}$ のプレミックスモルタルを選定した。コンクリートおよびモルタルの試験時の圧縮強度試験結果を表-1 に示す。

(3) 実験方法

荷重装置図を図-5 に示す。実験時には、試験体の下側の鉄筋 (半円形フック付鉄筋) を、ナット式定着体を介して治具に固定し、上側の鉄筋 (機械式定着体付鉄筋) に油圧ジャッキによって上方へ引張力を加えた。このとき、2 組の継手に常に等しい荷重が作用するように荷重制御で静的に荷重を実施した。

荷重は単調荷重を基本としたが、繰返し荷重が継手耐力へ及ぼす影響を確認するため、No.8 試験体については高応力繰返し荷重を実施した。高応力繰返し荷重の加力ステップは、「鉄筋定着・継手指針 [2007 年版]」⁵⁾ に準じ、鉄筋の応力振幅の下限が SD345 鉄筋の規格降伏強度の 2% 以下、上限が 95% となるように 30 回の繰返し荷重を実施し、その後、単調荷重により継手が破壊に至るまで荷重した。

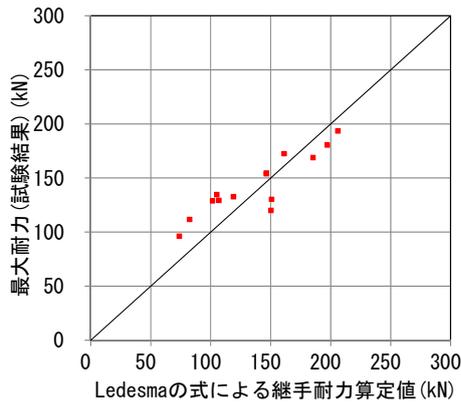


図-6 継手耐力の計算値と実験値の関係

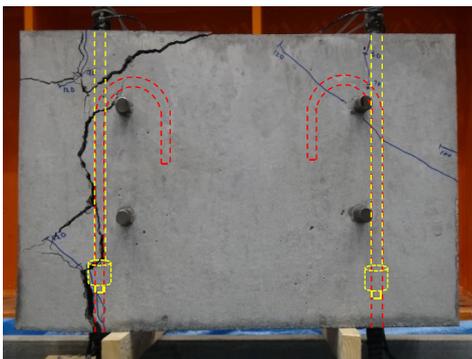


図-7 載荷後のひび割れ状況 (試験体 No. 6)

3.2 実験結果

継手耐力の式(1)に基づく計算値 (P_{cal}) および実験値 (P_{exp}) を表-1 に示す。なお、計算値は実験時のコンクリートの実強度を用いて計算したものである。また、図-6 に計算値と実験値の関係を示す。計算値と実験値間の相関係数は 0.89 であり、本実験で設定したパラメータの範囲内では、式(1)により継手耐力を推定することが可能と考えられる。ただし、表-1 の No.2, 3, 5 試験体の結果を見ると分かる通り、継手長については、大きくなるにつれて計算耐力に対する試験結果の比 (P_{exp}/P_{cal}) が小さくなる傾向が見られた。また、かぶりを小さくした試験体 No.9, No.12 においては、式(1)では継手耐力を過大評価する傾向が見られた。

破壊状況の例として試験体 No.6 (D22, 継手長 8φ) の載荷終了後のひび割れ状況を図-7 に示す。すべての試験体において、試験体側面に鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが生じ、急激に荷重が低下する脆性的な破壊を呈した。

(1) 各パラメータと継手耐力の関係

図-8 に、継手長、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の芯かぶり C_1 、試験体の厚さのそれぞれのパラメータが異なる試験体について、鉄筋応力-継手単体の伸び関係を比較したものを示す。なお、継手の伸びはコンクリートの上面および下面から 50mm ずつ離れた位置で計測した

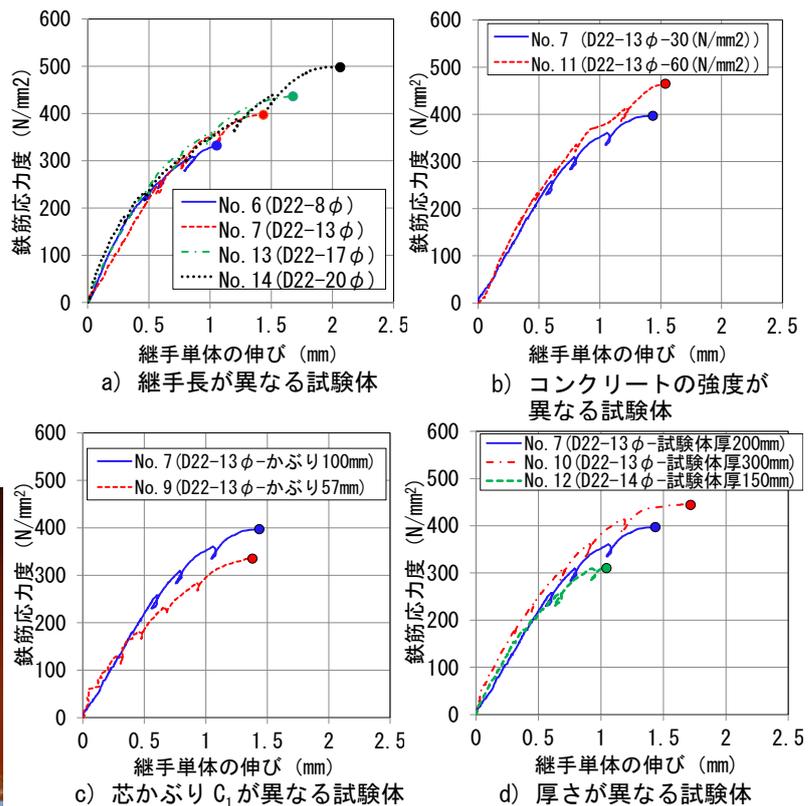


図-8 鉄筋応力-継手単体の伸び関係の比較

(マーカーは最大荷重到達点を示す)

上下の鉄筋の鉛直変位の差分として計測した値である。同図から、継手長、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の芯かぶり、試験体の厚さ(鉄筋間隔)が増加するにつれ、継手耐力も増加することが分かる。

(2) 繰返し荷重の作用による継手耐力への影響

表-1 に示すとおり、単調載荷を実施した試験体 No.7 と、高応力繰返し載荷を実施した試験体 No.8 の最大耐力は同等であった。繰返し荷重による耐力の低下は、繰返し載荷中にコンクリートに生じたひび割れや目開きが進展した場合に生じると考えられる。必要な継手長が確保された重ね継手の場合、鉄筋の降伏強度より小さい応力が生じる条件の下では、顕著な割裂ひび割れ等は生じないため、本実験においても高応力繰返し載荷による耐力の低下は生じなかったものと考えられる。

(3) シース管を残置することによる継手耐力への影響

試験体 No.3, 4 は、箱抜き形成に用いた鋼製スパイラルシースを試験体内から撤去したか否かという点のみが異なる試験体である。表-1 のとおり、これらの試験体の最大耐力は同等であることから、シースを残置することによる継手耐力への影響はないと考えられる。本研究で使用した鋼製スパイラルシースは、表面に節状の凹凸を有する。そのため、シースを残置した場合でも、シースとコンクリート間の付着切れによるシース管の拔出は生じず、継手耐力が低下しなかったものと考えられる。

表-2 補強鉄筋を配置した両引き試験体一覧

No.	補強筋	鉄筋径 ϕ	継手長 L_s	コンクリート 圧縮強度 f_c' (N/mm ²)		モルタル 圧縮強度 (N/mm ²)	試験体 厚さ S_{bar} (mm)	鉄筋の 芯かぶり (mm)		継手耐力 (実験結果)		備考
				目標値	実強度			C_1	C_2	P_{exp} (kN)	$\sigma_{exp}^{(*)}$ (N/mm ²)	
3	なし	D19	11 ϕ	30	30.6	69.2	200	100	82	129.1	450.6	No.15 との比較用
15	D6,2段				29.5	67.6		100		147.0	512.7	
16	D10,2段				34.0	71.1		73		151.5	528.8	シーす残置

※継手耐力を鉄筋の公称断面積で除して、鉄筋応力として計算した値

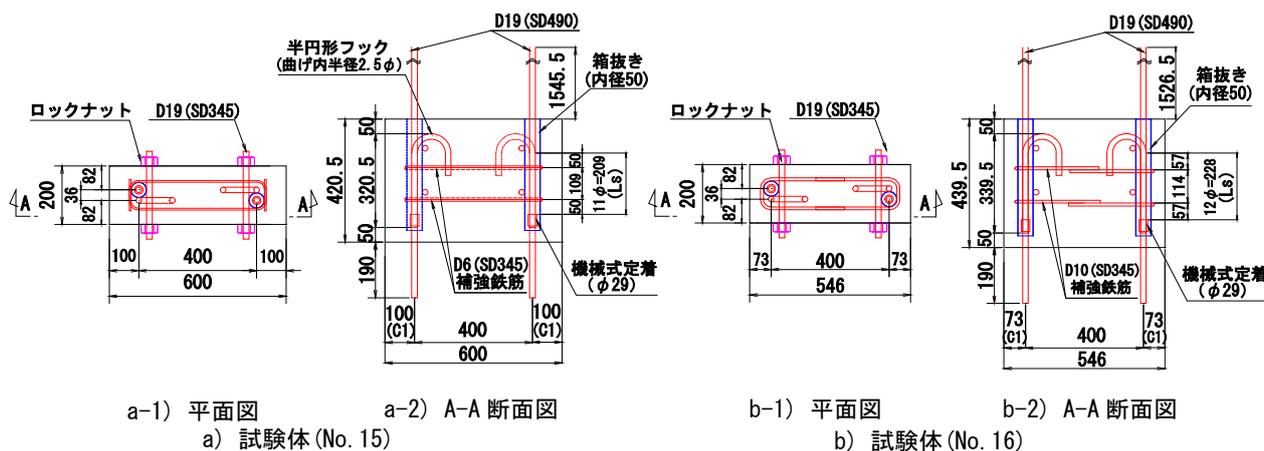


図-9 補強鉄筋を配置した試験体

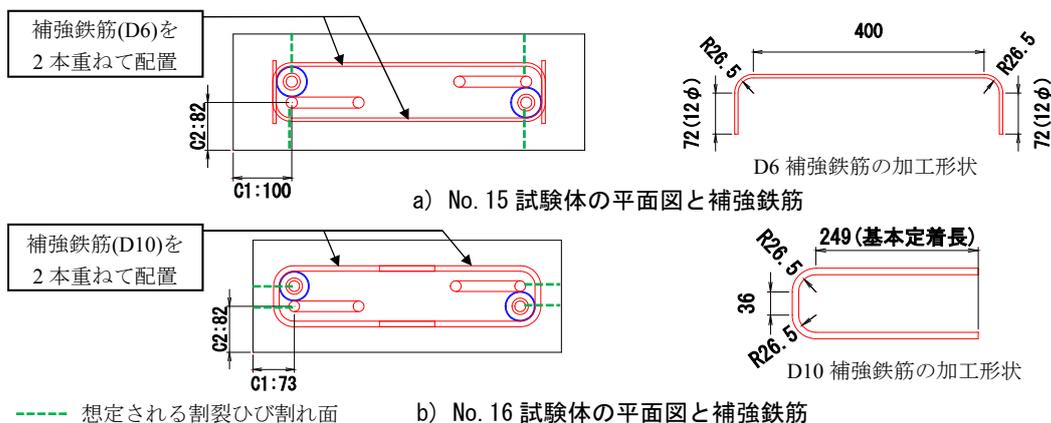


図-10 補強鉄筋と想定されるひび割れ面の位置関係

4. 継手の両引き実験（補強鉄筋を配置した場合）

4.1 実験概要

前述の機械式定着体・半円形フック併用継手の両引き実験において、すべての試験体で鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが生じ、脆性的に破壊した。そこで、脆性的な破壊の防止を目的とした補強鉄筋の配置を検討した。補強鉄筋による補強効果を確認するため、補強鉄筋を継手周囲に配置した試験体に対し、先に述べた荷重装置を用いて両引き実験を実施した。

4.2 補強鉄筋

試験体一覧を表-2に、試験体の形状図を図-9に示す。試験体には、鉛直方向鉄筋に沿って発生する付着割裂ひび割れの進展を防止するため、継手の周囲に補強鉄

筋を配置した。補強鉄筋と想定する割裂ひび割れ面の位置関係を図-10に示す。試験体の形状は、先に述べた両引き実験の試験体と同様である。なお、表-2には、No.15試験体との比較のため、No.3試験体の諸元および結果を再掲した。

No.15試験体では、SD345、D6鉄筋をコの字型に加工し、2本重ねた状態を1段として、継手の周囲に2段配置した。先に述べた両引き実験のNo.3試験体との比較により、補強鉄筋の効果を確認するため、継手長やかぶりなどのパラメータはNo.3試験体と同一としている。No.15試験体は、鉄筋の2方向の芯かぶりの大小関係が $C_1(100\text{mm}) > C_2(82\text{mm})$ であるため、鉄筋表面から平面図における試験体の長辺へ（かぶりの小さい方向へ）向か

って進展したひび割れが表面に到達し、試験体が破壊すると考えられる。そこで、補強鉄筋がひび割れと直交するように、コの字型に加工した補強鉄筋を図-10 a)のように配置した。

No.16 試験体は、鉄筋の芯かぶり C_1 を実構造物の試設計で想定している 73mm と小さくした。かぶりを小さくしたことによる継手耐力の低下が想定されたため、継手長は No.15 に比して 1φ 長い 12φ とし、補強鉄筋は SD345, D10 鉄筋を使用した。No.16 試験体は、芯かぶりの大小関係が $C_1(73\text{mm}) < C_2(82\text{mm})$ であるため、鉄筋表面から試験体の短辺へ向かって進展したひび割れが表面に達し、試験体が破壊すると考えられる。そのため、補強鉄筋がひび割れ面に直交するように、U 字型に加工した補強鉄筋を図-10 b)のように配置した。また、先に述べたとおり、シース管を躯体内に残置することは継手耐力に影響しないと考え、シース管は残置した。

4.3 実験結果

補強鉄筋を配置していない No.3 試験体と、補強鉄筋を有する No.15, 16 試験体の鉄筋応力-継手単体の伸び関係を図-11 に示す。

同図では最大荷重到達後に取得されたデータも含めて表示しているが、試験体 No.3 では、破壊が脆性的であったため、最大耐力到達以降のデータが取得されていない。一方で、補強筋を配置した No.15, 16 試験体においては、最大耐力到達後に荷重が低下したのちも最大耐力の 4 割程度の耐力を保持しながら伸びが増加しており、補強鉄筋の効果により、最大耐力到達後の靱性が向上することが確認された。また、No.3 試験体の最大耐力が 129.1kN であったのに対し、No.15 試験体の最大耐力は 147.0kN であり、補強鉄筋を配置することで最大耐力が約 15% 大きくなることが確認された。

No.16 試験体は、No.15 試験体に比べてかぶりが小さい

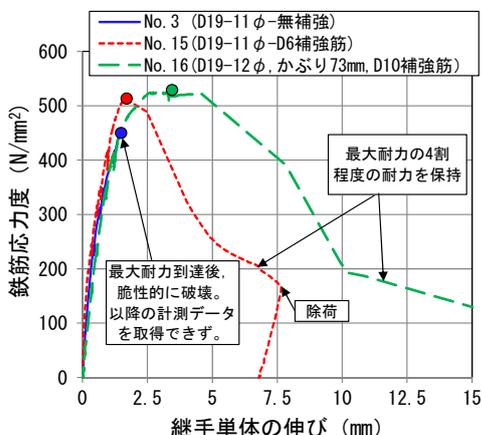


図-11 鉄筋応力-継手単体の伸び関係の比較 (試験体 No.3, 15, 16)

が、継手耐力は同等であった。このことから、鉄筋のかぶりを小さくした場合であっても、適切に補強鉄筋を配置することによって耐力の低下を抑制することが可能であることが確認された。

5. まとめ

LNG 地上タンク PC 防液堤の PCa 壁部材間の鉛直方向鉄筋を接合する継手構造として考案した、機械式定着・半円形フック併用継手に対して両引き実験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 継手周囲に補強鉄筋を配置しない場合において、本研究で検討したパラメータの範囲内では、考案した継手の耐力を、既往の継手耐力算定式 (式(1)) により推定可能と考えられる。
- (2) 継手長、コンクリートの圧縮強度、鉄筋の芯かぶり、試験体の厚さ (鉄筋間隔) が増加するにつれて継手耐力が大きくなる。
- (3) 高応力繰返し作用を受けた場合であっても、本継手の耐力は低下しない。
- (4) 箱抜き形成用の鋼製スパイラルシース管をコンクリート内に残置することは継手耐力に影響しない。
- (5) 継手部周囲に補強鉄筋を配置することで、最大耐力到達後の靱性が向上し、脆性的な破壊を抑制する効果が期待できる。また、継手耐力が大きくなる。

本論文で参考とした継手耐力算定式は、補強鉄筋による耐力の向上効果は考慮できない。本継手の合理的な設計法の確立のためには、さらなる両引き実験を実施し、データを収集・分析した上で、補強鉄筋による耐力向上効果を考慮できる本継手の耐力算定方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 大窪一正, 一宮利通, 横田祐起, 山野辺慎一: 施工性に優れたプレキャスト部材接合継手の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.409-414, 2017.7
- 2) Ledesma, A. L.: Development of Lap Splices Using Headed Reinforcement, Master Thesis, The University of Texas at Austin, May2000
- 3) DeVries, R. A.: Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete, Dissertation, The University of Texas at Austin, Dec.1996
- 4) American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specifications for Highway Bridges, 15th edition, 1993
- 5) 土木学会:鉄筋定着・継手指針[2007年版], 2007