

論文 施工性に優れたプレキャスト部材接合継手の開発

大窪 一正*1・一宮 利通*2・横田 祐起*3・山野辺 慎一*4

要旨：プレキャスト部材同士を接合する継手部分の製作・施工の合理化を目的として、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。一方のプレキャスト部材に箱抜き孔を設けておき、他方のプレキャスト部材から突出させた機械式定着体付鉄筋を挿入し、モルタル充填により一体化する構造とした。これにより、現場での間詰め材料の打設量を低減し、施工性を向上させた。本継手構造を有する梁試験体の4点曲げ実験を実施し、既往の評価式で曲げ耐力を安全側に評価可能なこと、通常のRC梁として設計可能なことを確認した。

キーワード：プレキャスト工法, 施工性向上, 鉛直方向鉄筋, 継手, 機械式定着体

1. はじめに

プレキャスト（以下、PCa）工法は、場所打ち工法と比較して鉄筋・型枠組立等が省略できるため、現場の施工性向上や工期短縮への効果が認められている。しかし、PCa部材の製作・輸送費も含めたトータルコストが高くなる傾向があり、十分に普及しているとは言いがたい。また、運搬や架設の制限等から部材を分割して施工する必要があり、PCa部材同士を接合する継手構造が不可欠となるため、製作・施工が容易で合理的なPCa部材接合継手を開発することで、製作費・施工費低減、工期短縮等の効果が期待できる。

筆者らは、コンクリート構造物のPCa化に向けた開発を行っており、PCa部材間を接合する継手形式について検討している。本報告では、鉛直方向鉄筋の継手構造として開発した、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）に関して、継手を有する梁試験体の4点曲げ実験による構造性能の評価について述べる。

2. 機械式定着体・半円形フック併用継手

2.1 概要

PCa床版等で実績のあるループ継手や機械式定着体併用重ね継手¹⁾は、接合する鉄筋の端部にループ状の曲げ加工を施したり、機械式定着体を用いたりすることで、通常の実継手と比較して継手長を低減可能な継手構造である。これらの継手は、PCa部材の設置後、継手部に横方向鉄筋を配置し、間詰め部に膨張コンクリートや無収縮モルタルを打設して一体化される。このような継手構造は、PCa床版の橋軸方向鉄筋のような水平方向鉄筋の継手においては有効であるが、柱や壁状構造物などにおける鉛直方向鉄筋の継手においては、間詰め部の型枠

組立や打設の作業が困難である。

そこで本研究では、先行して設置される部材（継手の下側に位置する部材。以下、下部材とする）にあらかじめ箱抜き孔を設けておき、後行して設置される部材（継手の上側に位置する部材。以下、上部材とする）から突出させた鉄筋を挿入し、モルタル充填により一体化する構造を考案した。このとき、箱抜き孔に挿入する上部材の鉄筋は先端に機械式定着体を取付けることで、継手長を基本定着長よりも短くするとともに、箱抜き孔の寸法を小さくした。一方、下部材側の鉄筋は、あらかじめPCa部材内に埋設しておくことが可能なため、製作費を低減する観点から、機械式定着体は用いずに半円形フック付鉄筋とした（図-1）。

2.2 構造・施工方法

本継手構造は、接合する鉄筋の一方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することで、継手長を低減させた重ね継手である（図-1）。

下部材に設ける箱抜き孔は鉛直下向きの孔となるため、型枠等を用いず、上部材設置前にあらかじめ凝結遅

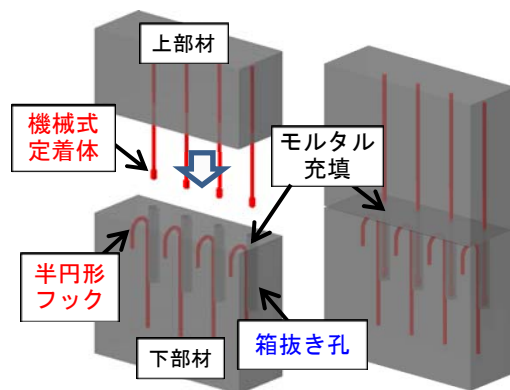


図-1 機械式定着体・半円形フック併用継手

*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研究員 修（工）（正会員）

*4 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造グループ担当部長 博（工）（正会員）

延型のモルタルを充填しておくことが可能である。両部材間には厚さ 10mm 程度の目地を有し、上部材設置後に目地型枠を設置し、モルタルを充填する。

2.3 耐力算定式

機械式定着体と半円形フックを併用した重ね継手は、その継手耐力の算定式が定められていない。そこで、既往の類似技術である、機械式定着体付鉄筋 2 本で構成される重ね継手の耐力算定式を準用し、耐力の算定を試みた。二井谷ら¹⁾は、機械式定着体の引抜耐力に、土木学会の基本定着長算定式²⁾から逆算して求められる鉄筋の付着力を加えることで継手耐力を算定している。機械式定着体の引抜耐力には、機械式定着体付鉄筋の引抜試験結果 (D19, D22, D25 で試験を実施。鉄筋部分はアンボンド) を用いており、定式化はされていない。

Ledesma³⁾は、DeVries⁴⁾による機械式定着体付鉄筋の付着割裂破壊耐力と、AASHTO⁵⁾の基本定着長算定式から逆算して求められる鉄筋の付着力との和から、次式のように継手の耐力を算定している。

$$P_d = \frac{A_{bo}}{A_{bon}} 0.017C_1 \sqrt{A_n f'_c} + 0.062L_s \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ただし、 P_d : 継手耐力(kN)、 A_{bo} : 交差定着の有効破壊面積 ($= (3C_1 + L_s/2) \times S_{bar}$) (mm^2)、 C_1 : 鉄筋の芯かぶり(mm)、 L_s : 継手長 (定着体の支圧面間の距離) (mm)、 S_{bar} : 鉄筋間隔(mm)、 A_{bon} : 側面割裂面積 ($= 36C_1^2$) (mm^2)、 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) (mm^2)、 f'_c : コンクリート圧縮強度(N/ mm^2)

ここで、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、側面かぶりが小さい場合の影響を評価する係数が示されているが、Ledesma の論文では、側面かぶりの影響は無いものとしてこの係数は用いられていない。後述する本研究の試験体は側面かぶりが小さいため、元となった DeVries の式を引用して、本研究では以下の式を用いて継手耐力を算定した。

$$P_d = \left(0.7 + 0.3 \frac{C_2}{3C_1} \right) \frac{A_{bo}}{A_{bon}} 0.017C_1 \sqrt{A_n f'_c} + 0.062L_s \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

ただし、 C_2 : 鉄筋の側面芯かぶり(mm)

3. 小型梁を用いた曲げ実験

3.1 実験概要

機械式定着体・半円形フック併用継手の耐力を確認することを目的に、継手を有する PCa 梁試験体の 4 点曲げ実験を行い、機械式定着体併用重ね継手¹⁾との比較を行った。試験体は、壁状構造物を想定した PCa パネルを約 1/2 に縮小したものから、鉛直方向鉄筋 4 本分の幅を切り出して模擬した梁試験体とした。

(1) 試験体

本実験では、継手構造が異なる 3 体の試験体を用いた。

試験体一覧を表-1 に、試験体形状を図-2 にそれぞれ示す。試験体 SB-C は、機械式定着体付鉄筋同士の重ね継手で、接合される鉄筋同士を等間隔に配したもの、試験体 SB-L は、機械式定着体付鉄筋同士を、通常を重ね継手と同様沿わせて配したもの、試験体 SB-LH は、SB-L の鉄筋の一方を半円形フック付鉄筋としたものである。試験体形状は、断面高さ 300mm、長さ 3,800mm を 3 体で共通とし、幅は主鉄筋の配置に合わせ、試験体 SB-C は 756mm、試験体 SB-L, LH は 710mm とした。各試験体は長さ 1,895mm ずつの 2 体の PCa 部材に分けて打設した後、実施工を想定して立て起こした状態で所定の位置に設置し、モルタル充填により一体化した。PCa 部材間には厚さ 10mm の目地を設けており、目地内にもモルタルを充填している。

主鉄筋は D16 とし、圧縮側鉄筋は 2 本、引張側鉄筋は 4 本である。下部材の箱抜き孔は、内径 45mm の鋼製スパイラルシースを用いて設け、シースはコンクリート硬化後に撤去した。機械式定着体は、鉄筋先端に鋼管を圧着して形成した。圧着後の外径 26.5mm、長さ 35mm である。試験体 SB-LH の半円形フックの曲げ内半径は 2.5 ϕ (ϕ : 鉄筋径) とした。

継手長は、試験体 SB-C, L は機械式定着体の支圧面間距離で、試験体 SB-LH は機械式定着体の支圧面と半円形フックの曲げ始め点との距離でそれぞれ定義し、いずれも 128mm (8 ϕ) とした。これは、式(2)により算定される継手耐力が、SD345 鉄筋の規格降伏強度である 345N/ mm^2 にほぼ相当するよう設計した継手長である。継手部には、D19 横方向鉄筋を 75mm ピッチで配置した。横方向鉄筋は試験体を幅方向に貫通させ、ロックナットにより試験体側面に定着した。

(2) 使用材料

主鉄筋は、試設計で想定される SD345 に対して、継手部がその降伏強度以上の耐力を持つことを確認するため、SD490 鉄筋を使用した。使用した鉄筋の引張試験結果を表-2 に示す。コンクリートは実験時の圧縮強度の目標を 30N/ mm^2 とし、配合を決定した ($G_{\text{Max}}=20\text{mm}$)。モルタルには、先充填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、狭隘な目地空間に確実に充填されることが求められることから、これらの性能を満たす、フロー値 ($\phi 50 \times H100\text{mm}$ 円筒容器を用いた簡易テーブルフロー試験, JHS313-1999 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、実験時の圧縮強度試験結果を表-1 に示す。

(3) 実験方法

載荷は、試験体を支間長 3,000mm で単純支持し、等曲げ区間 1,000mm の 2 点載荷として行った。

計測は、荷重とスパン中央鉛直変位の他に、継手外側

表-1 試験体一覧 (縮小梁曲げ実験)

試験体名称	継手形式	主鉄筋径	継手長	コンクリート圧縮強度	モルタル圧縮強度	継手耐力計算値 P_d	最大耐力実験結果 P_m	P_m / P_d
SB-C	機械式定着同士・中心配置	D16	128mm (8φ)	29.6N/mm ²	59.7N/mm ²	108kN	155kN	1.43
SB-L	機械式定着同士・重ね配置			29.2N/mm ²	62.1N/mm ²	108kN	155kN	1.44
SB-LH	半円形フック併用・重ね配置			30.0N/mm ²	61.7N/mm ²	108kN	175kN	1.62

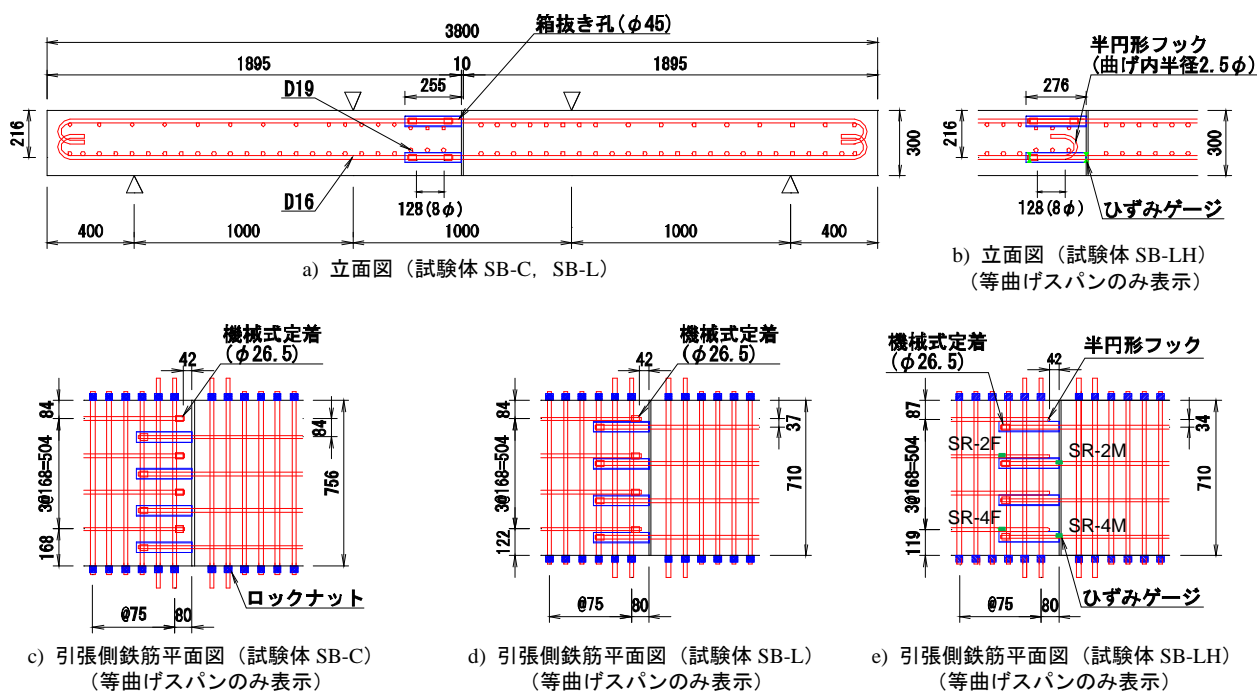


図-2 試験体形状図 (縮小梁曲げ実験)

での主鉄筋ひずみを計測した。ひずみの計測位置を、図-2 b) および e) に示す。ひずみは、鉄筋の上下面で計測し、その平均値として整理した。

表-2 鉄筋引張試験結果

種別	鉄筋径	弾性係数	降伏強度	引張強度
SD490	D16	192kN/mm ²	559 N/mm ²	747N/mm ²

3.2 実験結果

前述の通り、試験体の継手長は式(2)に基づいて、継手耐力が SD345 鉄筋の規格降伏強度である 345N/mm² にほぼ相当するように設計した。一方、試験体の主鉄筋には SD490 を用いており、試験体は、主鉄筋の降伏より先に継手部で破壊するように設計されている。コンクリート標準示方書に従って求めた、主鉄筋応力が継手耐力に達する荷重 (継手耐力の計算値) および最大耐力の実験値を表-1 に、計測された荷重-スパン中央鉛直変位関係を図-3 にそれぞれ示す。3 体の試験体で、初期剛性やひび割れ発生後の挙動に大きな差異は見られなかった。試験体 SB-C および SB-L は 155kN、試験体 SB-LH は 175kN で最大耐力を示し、その後急激に耐力が低下した。実験

により得られた最大耐力の計算耐力に対する比は、1.43 ~ 1.62 であり、既往の算定式(2)により安全側に評価できることが確認された。

図-4 に、試験体 SB-LH で計測された荷重-主鉄筋ひずみ関係を示す。継手外側において、主鉄筋ひずみは SD345 の規格降伏強度の下限値に対応するひずみを上回っており、破壊時の継手部鉄筋応力は、480~560N/mm² 程度であったことが確認された。他の 2 体の試験体についても同様に、主鉄筋ひずみは同ひずみを上回った。

図-5 に、試験体 SB-LH の継手部の破壊状況を示す。最大耐力を記録した直後、継手区間の側面、引張側主鉄筋に沿うような位置に軸方向のひび割れ (図-5 内に青点線で示す) が発生し、継手区間引張側のかぶりコンクリート (図-5 内に赤点線で示す範囲) が浮き上がるような破壊が生じ、終局に至った。残り 2 体の試験体についても、同様の破壊形態であった。

このような破壊形態から、主鉄筋間を繋ぐような付着割裂破壊が生じ、主鉄筋先端の機械式定着体による押広げ力によって、継手区間の引張側かぶりコンクリートが持ち上げられるようにして破壊に至ったと考えられる。このときの付着割裂破壊面に直交するような鉄筋は配置

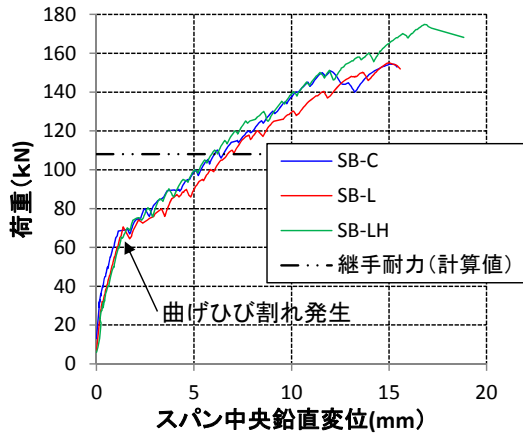


図-3 荷重-鉛直変位関係 (小型梁曲げ実験)

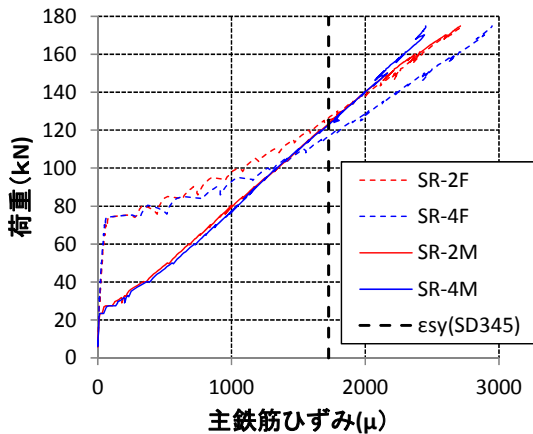


図-4 荷重-主鉄筋ひずみ関係 (小型梁曲げ実験)

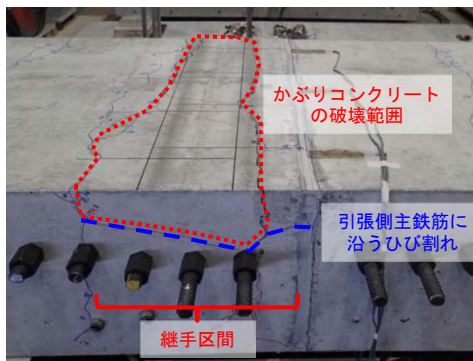


図-5 継手部の破壊状況 (SB-LH, 上面が引張側)

されていなかったため、脆性的な破壊となったと考えられる。また、試験体 SB-LH が他の 2 体 (機械式定着体付鉄筋同士の継手) と比較して 1 割程度大きな最大耐力を示したが、この原因は以下のように考えられる。

機械式定着体付鉄筋に引抜力が作用した際、支圧力は内部コンクリートとかぶりコンクリートの両方に作用し、かぶりコンクリートには押し広げ力が作用する。このため、機械式定着体付鉄筋同士の継手の場合 (試験体

SB-C,L), かぶりコンクリート内で両鉄筋から作用する押し広げ力が干渉し、それぞれの押し広げ力に抵抗できるコンクリートの有効面積は鉄筋 1 本での引抜時よりも小さくなる。これに対し、機械式定着体・半円形フック併用継手の場合 (試験体 SB-LH), フックからの支圧力は内部コンクリートに作用し、かぶりコンクリートに作用する押し広げ力は機械式定着体付鉄筋からの力が主となるため、抵抗できるコンクリートの有効面積は機械式定着体付鉄筋同士の継手よりも大きくなり、耐力が増したと考えられる。また、本試験体で使用した機械式定着体は、単体で標準フックの代替として用いられる一般的な機械式定着体と比較して支圧面積が小さいものであったため、半円形フックによる定着力よりも小さかった可能性が考えられる。

4. 大型梁を用いた曲げ実験

4.1 実験概要

小型梁を用いた曲げ実験で、機械式定着体・半円形フック併用継手を有する試験体が、機械式定着体併用重ね継手を有する試験体と同等以上の最大耐力を有することが確認されたため、製作コストの面で有利となる機械式定着体・半円形フック併用継手に着目し、大型梁の曲げ実験を実施することとした。

壁状構造物を想定した PCa パネルから、鉛直方向鉄筋 4 本分の幅を切り出して模擬した大型梁試験体を用いて 4 点曲げ実験を行い、継手性能を確認した。

(1) 試験体

本実験では、機械式定着体・半円形フック併用継手を有する試験体 1 体を用いた。試験体形状は、断面高さ 700mm、幅 836mm、長さ 5,800mm である。長さ 3,305mm の下部材、および、長さ 2,485mm の上部材の 2 体の PCa 部材に分けて打設した後、実施工を想定して立て起こした状態で所定の位置に設置し、モルタル充填により一体化した。PCa 部材間には厚さ 10~30mm の目地を設け、モルタルを充填した。なお、目地にはモルタルの充填性確保のため、断面高さ方向に 20/700 の勾配を設けた。

主鉄筋は D19 とし、圧縮側、引張側共に 4 本とした。下部材の箱抜き孔は、内径 50mm の鋼製スパイラルシースをを用いて設け、シースはコンクリート硬化後に撤去した。機械式定着体は、鉄筋先端に鋼管を圧着して形成した。圧着後の外径は 29.0mm、長さは 40mm である。半円形フックの曲げ内半径は 2.5φ とした。継手長は、SB-LH と同様に定義し、209mm (11φ) とした。これは、式(2)により算定される継手耐力が、SD345 鉄筋の規格降伏強度である 345N/mm² を上回るよう設計した継手長である。継手部には、D19 横方向鉄筋を 200mm ピッチで配置した。横方向鉄筋は試験体を幅方向に貫通させ、ロ

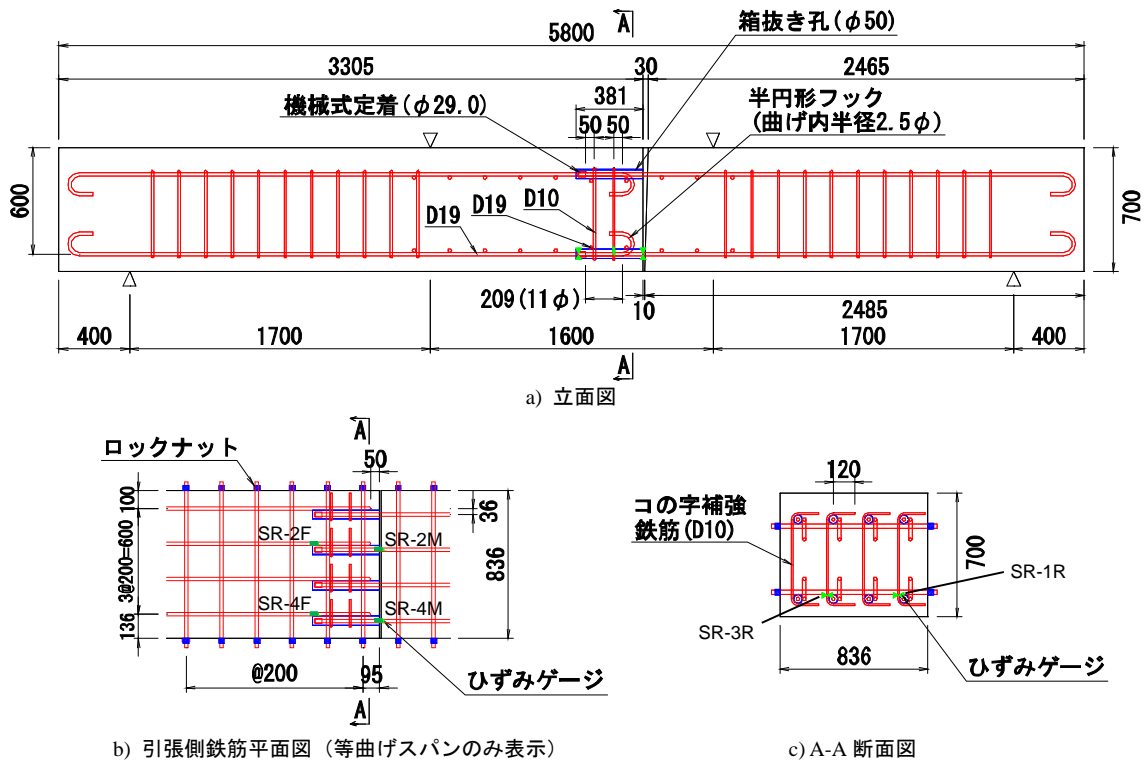


図-6 試験体形状図 (大型梁曲げ実験)

ックナットにより試験体側面に定着した。また、小型梁を用いた曲げ実験において主鉄筋間を繋ぐような付着割裂破壊が生じたため、この破壊面に直交する補強鉄筋として、コの字型の D10 鉄筋を配置した。試験体形状を図-6 に示す。

(2) 使用材料

主鉄筋は、試設計で想定した SD345 を用いた。使用した鉄筋の引張試験結果を表-3 に示す。コンクリートおよびモルタルは、小型梁と同じ仕様とした。コンクリートおよびモルタルの、実験時の圧縮強度試験結果は表-4 に示した。

(3) 実験方法

荷重は、試験体を支間長 5,000mm で単純支持し、等曲げ区間 1,600mm の 2 点荷重として行った。

計測は、荷重と鉛直変位の他に、継手外側での主鉄筋のひずみ、コの字補強鉄筋のひずみを計測した。ひずみの計測位置を、図-6 に示す。ひずみは、鉄筋の両面で計測し、その平均値として整理した。

4.2 実験結果

実験により得られた最大耐力、および継手が無いものとしてコンクリート標準示方書に従って求めた、RC 梁曲げ耐力を表-4 に、計測された荷重-スパン中央鉛直変位関係を図-7 にそれぞれ示す。曲げひび割れの発生、主鉄筋の降伏と、通常の RC 梁と同様の挙動を示し、最大耐力の計算値を上回った後、継手付近に軸方向・軸直交方向のひび割れが生じ、荷重が低下した。荷重低下後

表-3 鉄筋引張試験結果

種別	鉄筋径	弾性係数	降伏強度	引張強度
SD345	D19	190kN/mm ²	403 N/mm ²	577N/mm ²

表-4 大型梁曲げ実験結果

コンクリート 圧縮強度	モルタル 圧縮強度	最大耐力		P _m / P _d
		計算値 P _d (RC 梁 曲げ耐力)	実験結果 P _m	
34.6N/mm ²	60.0N/mm ²	384kN	409kN	1.07

も脆性的な破壊は生じず、ある程度の耐力を保持した。実験により得られた最大耐力の計算耐力に対する比は 1.07 であり、継手が無い通常の RC 梁として計算した耐力と同等の耐力を有することが確認された。また、スパン中央での終局変位は主鉄筋降伏時変位の 11.8 倍であった。図-7 には、コンクリート標準示方書に従って求めた、主鉄筋応力が式(2)による継手耐力に達する荷重(継手耐力の計算値)を併せて示した。小型梁を用いた曲げ実験結果と同様、既往の算定式(2)により継手耐力を安全側に評価できることが確認された。

図-8 に荷重-主鉄筋ひずみ関係を示す。継手外側において主鉄筋が降伏し、最終的に主鉄筋ひずみは 2% 以上となっていたことが確認できる。なお、機械式定着体付鉄筋でのひずみ計測位置 (SR-2M, 4M) は曲げひび割れ位置に近く、曲げによる引張応力を主鉄筋のみで負担

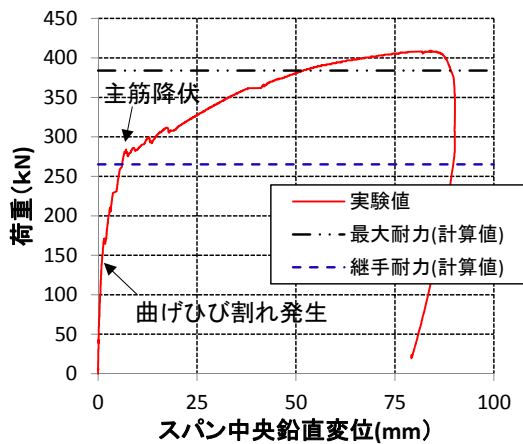


図-7 荷重-鉛直変位関係 (大型梁曲げ実験)

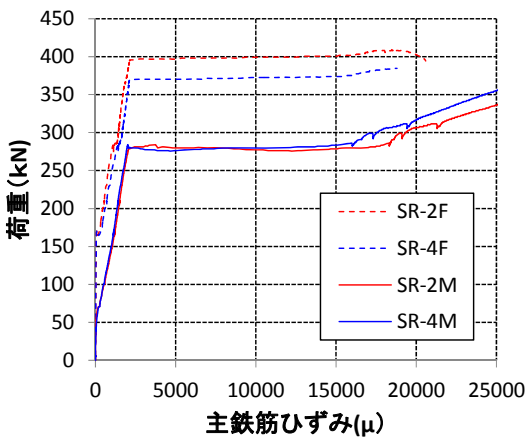


図-8 荷重-主鉄筋ひずみ関係 (大型梁曲げ実験)

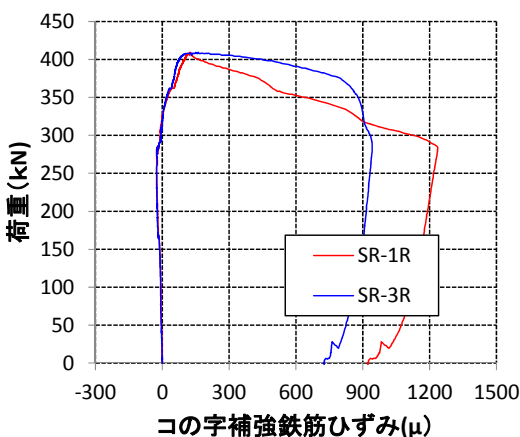


図-9 荷重-コの字補強鉄筋ひずみ関係 (大型梁曲げ実験)

していたのに対し、半円形フック付き鉄筋での計測位置 (SR-2F, 4F) はひび割れ位置から遠く、曲げ応力の一部をコンクリートが負担したため、両者のひずみ挙動に差異が見られた。

図-9 に荷重-コの字補強鉄筋ひずみ関係を示す。最大耐力を示した後、コの字補強鉄筋のひずみが急激に増大しており、付着割裂ひび割れが入った後に、脆性的な破壊を抑制する効果があったと考えられる。

5. まとめ

PCa 部材間の鉛直方向鉄筋を接合する継手構造として、機械式定着体・半円形フック併用継手を開発した。同継手を有する梁試験体の4点曲げ実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 既往の耐力算定式を用いて、継手耐力を安全側に評価可能である。
- (2) 継手長を適切に設計することで、継手が無い通常のRC 梁としてコンクリート標準示方書に従って求めた耐力計算値と、同等の耐力を持たせることが可能である。
- (3) 継手部に、主鉄筋間を横断するような補強鉄筋を入れることで、脆性的な破壊を抑制する効果が期待できる。

本論文で用いた耐力算定式は、機械式定着体付鉄筋同士の重ね継手を想定して定められた式であるため、今後、継手長やコンクリート強度等をパラメータとした継手要素試験を実施し、さらに合理性のある設計法の確立に向けた検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 二井谷教治, 原 健悟, 大信田秀治, 大谷悟司: 機械式定着を併用した重ね継手の実用化に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会 第19回シンポジウム論文集, pp.181-186, 2010.10
- 2) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2012
- 3) Antonio Lopez Ledesma: Development of Lap Splices Using Headed Reinforcement, Master Thesis, The University of Texas at Austin, 2000.5
- 4) Richard Alan DeVries: Anchorage of Headed Reinforcement in Concrete, Dissertation, The University of Texas at Austin, 1996.12
- 5) American Association of State Highway and Transportation Officials: Standard Specifications for Highway Bridges, 15th edition, 1993