

論文 浄水場施設における整流壁のプレキャスト化に関する検討

皆川 春奈*1・加藤 元帥*1・横田 祐起*1・曾我部直樹*2

要旨：浄水場施設で設置される整流壁は、処理水を通すための多数の開口を有する RC 部材である。これを場所打ち工法で構築する場合、開口部を含めた型枠の設置手間やコンクリートの充填性が課題となることから、同部材のプレキャスト化を検討している。本研究では、プレキャスト化した整流壁と側壁の接合構造として、ボルトと形鋼による接合構造と、ループ鉄筋を用いた接合構造を考案した。それぞれの接合構造を模擬した試験体に対して載荷実験を実施した結果、両構造ともに場所打ち施工で構築した場合と同等以上の耐力および変形性能を有することを確認した。

キーワード：整流壁, プレキャスト工法, 接合構造, 浄水場施設, ループ継手

1. はじめに

ろ過方式の浄水場施設では、池状構造物の側壁の間に多数の開口を有する鉄筋コンクリート（以下、RC という）製の整流壁が設置される。整流壁は、その開口に処理水を通し、水流の乱れを整えることで処理効率を上げる役割を担う部材である。

RC 整流壁を場所打ち工法で構築する場合、型枠組立時に開口用の円筒型枠を多数設置する必要がある。そのため、一般的な RC 壁部材の構築時と比べて手間がかかるうえ、コンクリート打込み時において開口周囲に充填不良などの品質不良が生じるリスクが高い。一方で、一般的に整流壁は部材厚さが 300mm 程度の薄肉の部材であり、プレキャスト（以下、PCa という）工法を適用した場合に PCa 部材の重量が大きくなりやすいことから、PCa 工法に適した部材であるといえる。

以上の背景から、整流壁の構築における工程短縮と品質確保を両立できる手段として、PCa 工法の適用を検討している。整流壁の下部には、汚泥を排出するための空間が設けられる場合があることから、底版と PCa 部材が接合されずとも成立する形式が望ましい。そこで本検討では、図-1 に示すように個々の PCa 部材は整流壁を底版と並行するように分割した形状とし、それらを積層することにより整流壁を構築することとした。この場合、積み上げた PCa 部材は両端部で既設の側壁と接合する必要がある。そこで、本検討では、施工時の作業量やコスト等に配慮して、2 種類の接合構造を考案した。ひとつ目は、形鋼を介してボルトによって PCa 整流壁を側壁に接合する構造であり、接合部の施工にあたって現場で行う作業量を極力少なくした構造である。ふたつ目は、両者をループ形状の鉄筋継手によって接合する構造であり、形鋼などを用いずにコストを抑えた構造である。本稿では、各接合構造を含む PCa 整流壁の耐力および変形性能の評価を目的として実施した載荷実験について報告する。

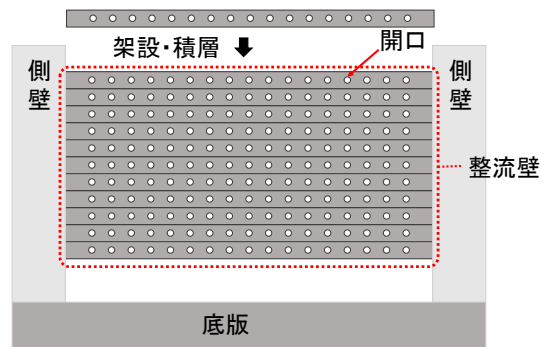


図-1 PCa 工法による整流壁の構築イメージ

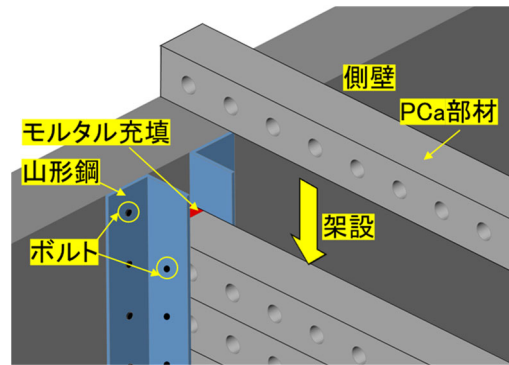


図-2 形鋼とボルトによる接合構造のイメージ

2. 形鋼とボルトによる接合構造

2.1 概要

形鋼とボルトによる接合構造の概要を図-2 に示す。側壁の高さ方向に取り付けられた 2 列の山形鋼の間に、PCa 部材を積層することで整流壁を構築する。側壁および PCa 部材は山形鋼とボルトで接合する。山形鋼は、側壁に埋設したインサートナットを用いて、ボルトで固定する。PCa 部材の軸方向への設置誤差を吸収することを目的として、PCa 部材の端部に現場打ちによる間詰め部を設け、モルタルを充填する。

*1 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所 土木構造グループ 工博（正会員）

2.2 接合部の設定

ボルトの仕様は、図-3 に示すように整流壁に水平荷重が作用した際に、引張側のボルトに引抜力、圧縮側のボルトにせん断力が作用することを想定して設定した。

引張側のボルトに作用する引抜力は図-3 中の A 点周りのモーメントの釣合式に基づき、式(1)によって求めた。

$$T = P \times a / s \quad (1)$$

ここで、 T ：引抜力(N)、 s ：アーム長(mm)、 P ：水平荷重(N)、 a ：載荷点までの距離(mm)

また、接合に用いる山形鋼の形状、寸法は、PCa 部材と接する山形鋼の長辺が、コンクリート標準示方書¹⁾に従って算出した主鉄筋の基本定着長よりも長くなるように設定した。PCa 部材の最大曲げ耐力に相当する荷重が作用した場合でも、山形鋼が降伏することがないように板厚やリブを設定した。

2.3 載荷実験の概要

図-4 に示すように試験体は側壁を模擬したフーチングに、山形鋼とボルトを介して整流壁を模擬した PCa 部材を接合したものである。試験体数は 2 体で、整流壁の主鉄筋径をパラメータとした。PCa 部の主鉄筋は、一般的な整流壁の主鉄筋径を考慮して、No.1 試験体には SD345 D13 を、No.2 試験体には SD345 D19 を使用した。PCa 部材の厚さは一般的な整流壁を想定して 300mm とした。フーチングと PCa 部の間には、厚さ 20mm の間詰め部を設け、PCa 部材の設置後に無収縮モルタルを充填した。使用した材料の強度試験結果を表-1 に示す。

前節で述べた接合部の設定方法に基づき、整流壁を模擬した PCa 部材が曲げ破壊に至るまでの間、引張側のボルトが降伏せず、圧縮側のボルトによる摩擦力でせん断力を負担できるように、道路橋示方書²⁾に記載される摩擦接合の設計式に基づいて接合部の諸元を設定した。試験体におけるボルトの径、本数および締付けトルクを表-2 に示す。PCa 部と接する山形鋼の長辺の長さは、主鉄筋径が D13 の No.1 試験体の場合は鉄筋の基本定着長 260mm に対して 350mm、主鉄筋径が D19 の No.2 試験体の場合は基本定着長 380mm に対して 450mm とした。

(1) 載荷方法と計測

実験では、試験体の上部に串型油圧ジャッキを取り付け、正負交番載荷を実施した。表-3 に示す各目標荷重で 3 回の繰返しの載荷をした後、水平荷重の低下が確認されるまで正方向に単調載荷を行った。各目標荷重は、PCa 部の主鉄筋の引張応力が道路橋示方書³⁾における許容応力度に達する時点 (P_a)、規格降伏強度に達する時点 (P_{345})、実降伏強度に達する時点 (P_y) の荷重を断面計算に基づいて設定したものである。 P_a および P_{345} はコンクリート強度を設計基準強度 (30N/mm^2) とし算出し、 P_y は各材料の強度試験結果を用いて算出した。

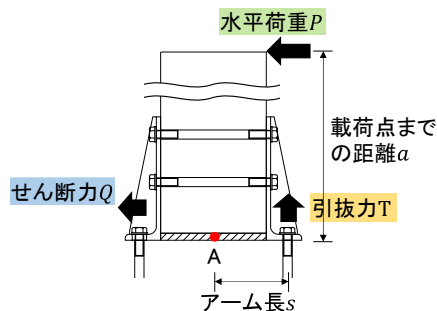


図-3 接合部に作用する力

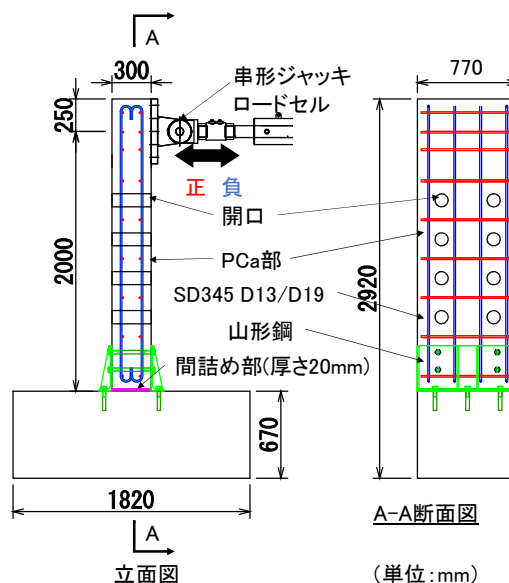


図-4 試験体

表-1 使用材料の強度試験結果

材料	試験項目	No. 1	No. 2
		(主鉄筋：D13)	(主鉄筋：D19)
コンクリート (実験時)	圧縮強度	51.2	50.7
	ヤング係数	32,000	32,200
モルタル (実験時)	圧縮強度	65.2	71.7
	ヤング係数	22,400	22,700
主鉄筋 SD345	降伏強度	361	388
	ヤング係数	192,000	192,000

(単位：N/mm²)

表-2 接合部の諸元

諸元	No. 1 (主鉄筋：D13)	No. 2 (主鉄筋：D19)
ボルト径	M24×6 本	M24×10 本
強度区分	4.8	4.8
導入軸力	56.5 kN	67.8 kN

表-3 荷重ステップの目標荷重

記号	No. 1 (主鉄筋：D13)		No. 2 (主鉄筋：D19)	
	鉄筋応力 (N/mm ²)	目標荷重 (kN)	鉄筋応力 (N/mm ²)	目標荷重 (kN)
P_a	180	11.8	180	25.1
P_{345}	345	23.4	345	49.9
P_y	361	25.1	388	58.8

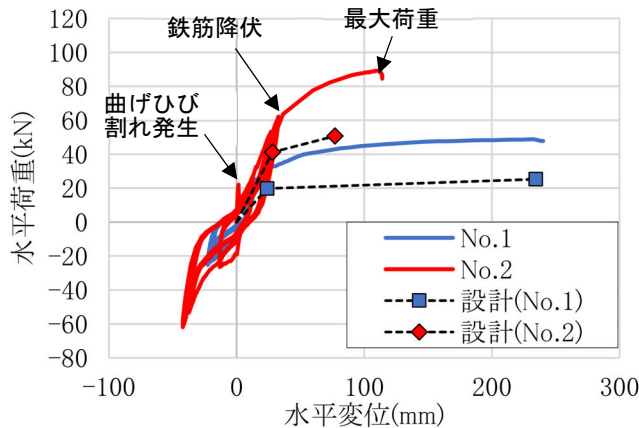


図-5 荷重-変位関係

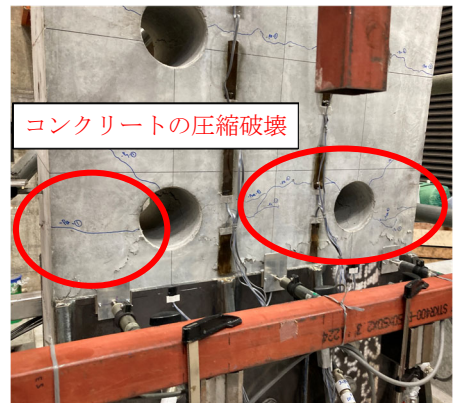


写真-1 山形鋼天端付近の破壊状況 (No. 2 試験体)

載荷荷重は串型ジャッキに取り付けたロードセルで、試験体の水平変位は載荷点位置に設置した変位計でそれぞれ計測した。また、接合部においては、山形鋼の水平変位を変位計で計測し、正方向載荷時に引張力を受けるボルトには埋め込まれたひずみゲージから軸力が計測できるボルト軸力計を使用した。

2.4 実験結果

(1) 荷重-変位関係および破壊モード

図-5 に荷重-変位関係を示す。同図には、場所打ちによる整流壁を想定した断面計算による降伏、終局時の荷重、変位の算定値も示した。なお、同解析では、コンクリートは整流壁の設計基準強度、鉄筋は規格降伏強度を用いている。

No. 1 試験体では、 P_a による繰返し載荷に対して剛性の低下は生じず、ほぼ線形となる挙動を示した。 P_a から P_{345} への途中である水平荷重 20.1 kN 作用時に、PCa 部の下端と間詰め材の界面に隙間が生じて、荷重が一時的に低下した。これは、PCa 部と山形鋼の接触面に不陸があり、部分的に隙間が生じていたことが影響したものと考えられる。そのため、試験体の変形が進み、当該箇所側面が安定して山形鋼と接触し始めると、再び荷重が増加した。水平荷重 32.9 kN 到達時に主鉄筋が降伏し、最大荷重となる 48.8 kN に到達した後、山形鋼の天端付近における PCa 部のコンクリートが圧縮破壊して荷重が低下した。

No. 2 試験体も、載荷荷重が P_a に至る途中で No. 1 試験体と同様な荷重低下が生じたが、その後試験体の変形が進むと荷重が増加し、最大荷重となる 89.2 kN に達した後、No. 1 試験体と同様に山形鋼上端部のコンクリートの圧壊によって荷重が低下した (写真-1)。試験体の破壊モードはいずれも曲げ引張破壊であった。接合部内の不陸に起因した滑りにより、No. 1 試験体の場合は設計よりも剛性が低くなったものの、いずれの試験体においても、最大荷重や曲げ破壊時の変位は終局時の算定値を超える

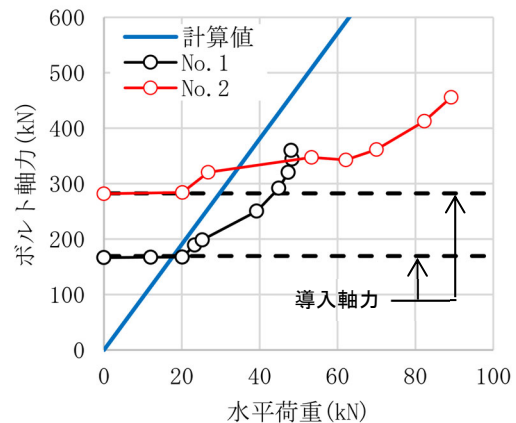


図-6 ボルト軸力-水平荷重関係

結果となった。また、PCa 部が曲げ破壊に至るまで、接合部の損傷が先行することはなかった。

(2) 接合部の挙動

図-6 に荷重と引張側ボルトの軸力の関係、および式(1)によって算定した最大荷重時にボルトに生じる軸力の計算値を示す。同図より、荷重と引張側ボルトの軸力には概ね正の相関があることを確認した。最大荷重時の軸力は No. 1 試験体では計算値の約 90%、No. 2 試験体では約 55%であった。また、フーチングと山形鋼の接合面では、実験終了まで目視で確認できるようなせん断ずれは、生じていなかった。

3. ループ鉄筋を用いた接合構造

3.1 概要

本接合構造は、整流壁となる PCa 部材と側壁の双方から突き出したループ状の鉄筋を交差させたうえで、同部分にコンクリートを間詰めすることによって構築するものである。まず、この場合、図-7 に示すようにループを底板に対して垂直に設置する場合 (以下、縦ループという) と、底板に対して水平に設置する場合 (以下、横ル

ープ) が考えられる。前者の場合、周囲の作業空間が狭く、真上から PCa 部材を架設する場合に適する。一方で、ループ内に補強筋を配筋する場合は短尺の鉄筋を各ループ内に配筋する必要があるため、作業が煩雑になる。後者は横から PCa 部材を水平移動させて架設する必要があるが、側壁にかまち梁などの張出し部がある場合は真上から架設できないため有効である。また、長尺の鉄筋を上から挿入することで複数のループ内部の補強筋を一括で配置できるため、補強筋の設置が容易である。

3.2 接合部の設定

接合部において、ループ内部の支圧と直線部の付着の重ね合わせで鉄筋の規格降伏荷重以上の引張力に抵抗できるように設定した。ループ内部の支圧による負担分はループの曲げ直径が大きいほど大きくなるが、PCa 部材の寸法と配筋間隔によって曲げ直径が制限されるため、規格降伏荷重に対して不足する分は直線部の付着で補うこととした。

ループ内部の支圧が負担する引張力 Z_1 は、レオンハルト⁴⁾によるループ継手の設計式を用いて算出した。ループ部への作用力の概要を図-8 に示す。レオンハルトによる式では、ループ径とそのループ曲げ始点で負担できる鉄筋の応力の関係を、ループ内部の補強筋がない場合を式(2)で、補強筋がある場合を式(3)で表している。

$$\sigma_0 = \frac{\beta_{wN} d_B}{5.24 \phi \sqrt{\frac{e}{e}}} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = \frac{\beta_{wN} d_B}{(1.4+2.8\frac{e}{e})\phi} \quad (3)$$

$$Z_1 = \sigma_0 \cdot A_s \quad (4)$$

ここで、 σ_0 ：ループ曲げ始点部の鉄筋応力度(N/mm²)、 β_{wN} ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 d_B ：曲げ直径(mm)、 e ：鉄筋間隔(mm)、 ϕ ：鉄筋径(mm) A_s ：鉄筋断面積(mm²)

PCa 部材の部材諸元に対して、かぶりを確保できる範囲でループ径を設定し、式(2)、式(3)に基づいて算出したループ曲げ始点の鉄筋応力に鉄筋断面積を乗じた力をループ内部の支圧による負担分とした(式(4))。

直線部の付着で負担する引張力 Z_2 は、式(5)によって算出した。コンクリートの付着強度はコンクリート標準示方書¹⁾に基づいて設定した値を用いた。

$$Z_2 = f_b \cdot u \cdot a \quad (5)$$

ここで、 f_b ：コンクリートの付着強度(N/mm²)、 u ：鉄筋の周長(mm)、 a ：重ね継手長(mm)

ループ部の支圧が負担する荷重 Z_1 と直線部の付着が負担する荷重 Z_2 の和が規格降伏荷重より大きくなるように、試験体の主鉄筋のループ鉄筋の直線部の長さ、すなわち重ね継手長 a を設定した。

3.3 荷重実験の概要

(1) 試験体

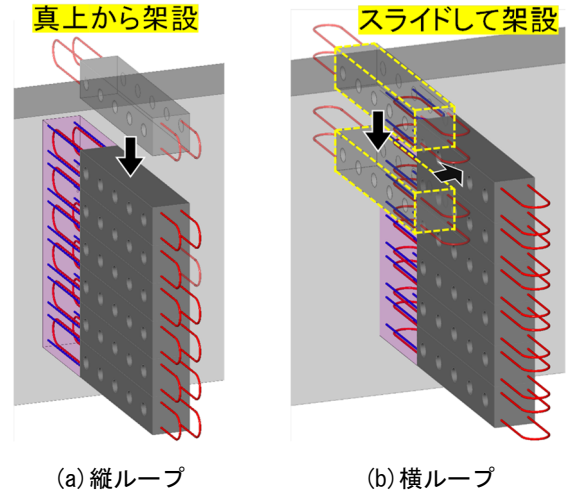


図-7 ループ鉄筋を用いた接合構造のイメージ

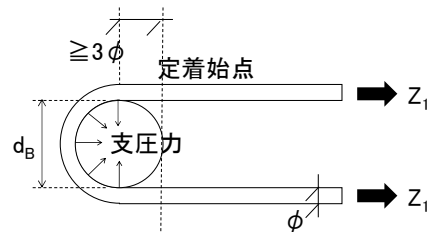


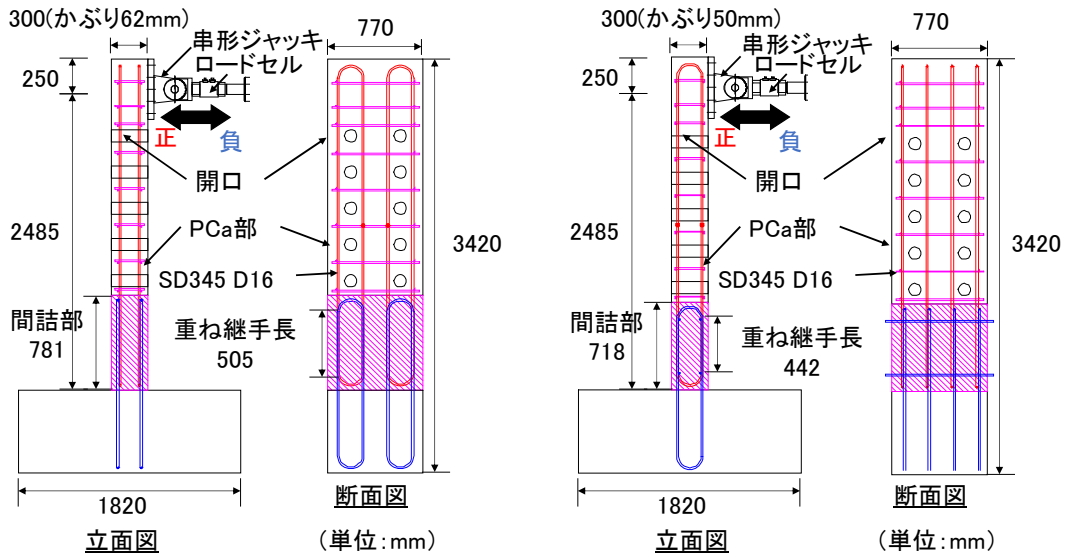
図-8 ループ部への作用力⁴⁾

図-9 に試験体を示す。試験体は、ループ鉄筋の向きをパラメータとして2体製作した。整流壁を想定したPCa部の主鉄筋は、いずれもSD345 D16を使用した。No.1試験体は、図-7(a)に示す縦ループを用いた接合部を模擬し、ループ内部に補強筋は配置していない。No.2試験体は図-7(b)に示す横ループを用いた接合部を模擬し、実施工でループ鉄筋内部の配筋が容易であることを想定して、補強筋としてSD345 D13 4本を配置して継手長を短くすることとした。

間詰め部のコンクリートの設計基準強度は30N/mm²として、ループの内径は一般的な整流壁における主筋の間隔(200mm)を考慮して184mmとした。前述の方法で設定した各試験体の継手長を表-4に示す。表-5に試験体に使用した材料の強度試験結果を示す。なお、間詰め部に面したフーチング、PCa部の表面には、打継ぎ処理として、凝結遅延材を散布したうえで、ハイウォッシャーで目粗しを行った。

(2) 荷重方法と計測

前章の実験と同様な荷重装置で、正負交番荷重を行った。表-6に本実験の荷重ステップと、各ステップにおける目標荷重を示す。目標荷重は基部の断面を対象として、2.3(1)と同様に断面計算によって求めた。No.2試験体では、鉄筋の配置位置の関係からNo.1試験体よりもPCa部材の有効高さが大きくなるため、その分、曲げ耐



(a) No. 1 試験体 (縦ループ, 補強筋なし)

(b) No. 2 試験体 (横ループ, 補強筋あり)

図-9 試験体

力および目標荷重が大きくなっている。

載荷荷重, 水平変位については, 前章の実験と同様な方法で計測した。継手部内のループ鉄筋の表面には, ひずみゲージを設置してひずみを計測し, 間詰め部と PCa 部の界面には ϵ 型変位計を設置して目開き幅を計測した。

3.4 実験結果

(1) 荷重-変位関係および破壊モード

実験における荷重-変位関係を図-10 に示す。同図には, 図-5 と同様に場所打ちによる整流壁を想定した断面計算による降伏, 終局時の変位, 荷重についても併記している。いずれの試験体も, P_a , P_{345} , P_y による繰返し載荷に対して剛性が変化することはなく, 主鉄筋の降伏以後, フーチングと PCa 部との境界において圧縮縁のコンクリートが破壊し, 曲げ引張破壊に至った。終局時の接合部基部の破壊状況を写真-2 に示す。かぶりコンクリートの剥落後も明確な荷重低下は見られず, 載荷装置の限界により載荷を終了した。最大荷重, 変位ともに算定値を上回ったことから, 本構造で接合されたプレキャスト整流壁が場所打ちによる整流壁を想定した曲げ性能に対して, 十分な性能を有していることが確認できた。

(2) 曲げひび割れの発生状況

図-11 に正方向載荷で引張側になる面の載荷終了時におけるひび割れ発生状況を示す。 P_a に至るまでの載荷において, 間詰め部と PCa 部およびフーチングの界面においてひび割れが発生した。その後の P_{345} に至る途中で, PCa 部と間詰め部に曲げひび割れが発生した。載荷終了時の基部から載荷点までの平均曲げひび割れ間隔は No. 1 試験体において 223mm, No. 2 試験体において 154mm

表-4 接合部の諸元

諸元	No. 1 (縦ループ)	No. 2 (横ループ)
主鉄筋の規格降伏荷重 (kN)	68.5	
ループ部が負担する荷重 (kN)	26.0	32.5
直線部が負担する荷重 (kN)	42.5	36.0
重ね継手長 (mm)	505	442

表-5 使用材料の強度試験結果

材料	試験項目	No. 1 (縦ループ)	No. 2 (横ループ)
PCa 整流壁	圧縮強度	32.1	31.9
	ヤング係数	29,700	30,900
コンクリート	ヤング係数	29,700	30,900
	ヤング係数	28,300	29,100
間詰め部	圧縮強度	30.7	30.4
	ヤング係数	28,300	29,100
主鉄筋	降伏強度	378	
	ヤング係数	194,000	
補強鉄筋	降伏強度	—	372
	ヤング係数	—	190,000

(単位: N/mm²)

表-6 荷重ステップの目標荷重

記号	鉄筋応力 (N/mm ²)	目標荷重 (kN)	
		No. 1 (縦ループ)	No. 2 (横ループ)
P_a	180	11.9	12.9
P_{345}	345	23.6	25.4
P_y	372	26.0	27.9

であった。これは, コンクリート標準示方書¹⁾に基づくひび割れ間隔の算定値よりも小さく, 通常の RC 部材と同様にひび割れが分散して発生したことが確認できた。 P_y に達して以降の片押し載荷において, PCa 部と間詰め部の界面における目開き幅が増大する傾向がみられたが, P_a 載荷時の目開き量は両試験体で 0.04mm であり, コンクリート標準示方書¹⁾の耐久性から決まるひび割れ幅の限

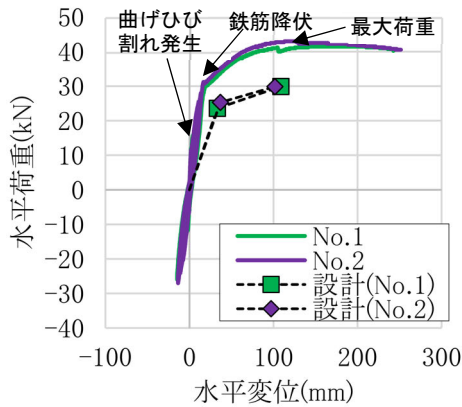


図-10 荷重-変位関係

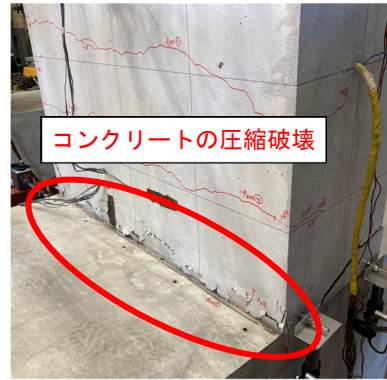


写真-2 基部の破壊状況
(No. 1 試験体)

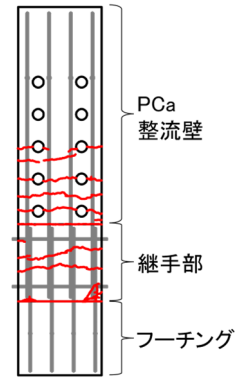


図-11 ひび割れ発生状況
(No. 1 試験体)

界値である $0.005c$ (c はかぶり) 以下であった。

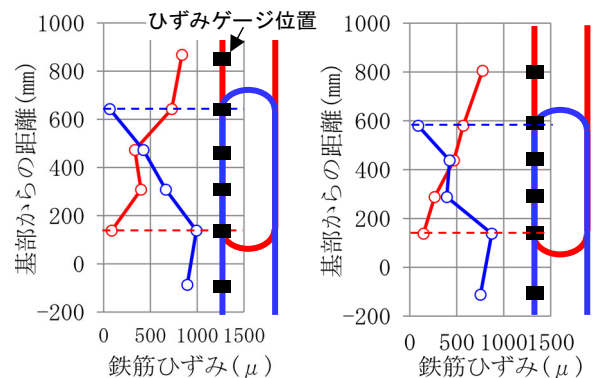
(3) 鉄筋のひずみ分布

図-12 に、接合部における鉄筋のひずみ分布を示す。なお、図中の破線はそれぞれの鉄筋のループ曲げ始点の位置を示している。この図が示すように、継手部ではそれぞれの鉄筋の端部に向かってひずみが小さくなっており、直線部においてコンクリートとの付着を介して応力が伝達されていることがわかる。 P_{345} 到達時のループ曲げ始点における鉄筋ひずみはいずれの試験体においても小さく、ループ内部の支圧による応力負担分は接合部における応力の伝達に対して寄与していなかったことが示唆された。これは、直線部の付着によって伝達された応力が想定よりも大きかったためと考えられる。ただし、繰返しの大きさや回数によっては、直線部の付着が劣化する可能性もあり、その場合はループ内部の支圧による負担分が増加することも考えられる。

4. まとめ

本研究では、浄水場施設の整流壁の構築における工程短縮、品質確保を目的として、同部材のプレキャスト化とその接合構造について検討を行った。PCa 化した整流壁と側壁の接合構造として、山形鋼とボルトによる構造とループ鉄筋による構造の2種類の接合構造を考案し、載荷実験によってそれぞれの耐力および変形性能について検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 形鋼とボルトによる接合構造では、PCa 部材と山形鋼の不陸によって曲げに対して滑りが生じる挙動が生じたものの、最大耐力と終局変位は場所打ちで施工による整流壁を想定した算定値を大きく上回った。また、許容応力度相当荷重 P_a の繰返し載荷において、ボルト軸力に変動が生じることはなかった。
- (2) ループ鉄筋継手による接合構造では、曲げ耐力、剛性、終局変位のいずれも場所打ち施工による整流壁



(a) No. 1 試験体

(b) No. 2 試験体

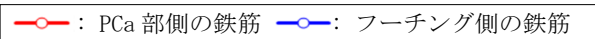


図-12 継手のひずみ分布 (規格降伏荷重 P_{345})

を想定した算定値を上回る結果が得られた。また、今回の実験では接合部における鉄筋と間詰め材の付着によって、応力の大部分が伝達されていることを確認した。

本研究により考案した接合構造を含む PCa 整流壁において、整流壁として十分な耐力と変形性能を期待できることが確認できた。今後は、現場における PCa 部材の架設方法、接合構造部の施工方法など、本工法の適用に向けた検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：2022 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2023. 3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012. 11
- 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. 11
- 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. 4