

PCa型有脚式離岸堤における 機械式継手の適用性検討

齊藤 創太¹・石塚 新太²・池野 勝哉²・山本 敦³

¹ 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)
E-mail: souta.saitou@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 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)

³ 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)

斜面スリット型透過式ケーソン (S-VHS 工法) は静穏海域の創出, 背後地の浸水防止, 砂浜の海岸侵食防止を目的とした有脚式離岸堤である. 本工法の RC 函体製作時の課題として, 現場施工の煩雑化, マスコンクリートによる温度ひび割れの懸念等が挙げられる. これらの課題に対し, 現場施工の省力化, 生産性向上, およびコンクリートの品質向上を図るため, 函体を PCa 部材に分割して工場製作し, 現場搬入後に接合し一体化する PCa 型 S-VHS 工法を提案している. 工場製作した PCa 部材同士は機械式継手で接合されるが, 現場打設による従来工法と比較して, 接合部の剛性低下や目地開きによる鉄筋腐食等が懸念される. そこで, 本検討では接合部を有する PCa 部材を対象とした載荷実験および FEM 解析を行い, PCa 型 S-VHS 工法における機械式継手の適用性を確認した.

Key Words : S-VHS, precast concrete, mechanical joint, applicability

1. はじめに

斜面スリット型透過式ケーソン (S-VHS工法)¹⁾は静穏海域の創出, 高波浪時における背後地の浸水防止, 砂浜の海岸侵食防止を目的とした有脚式離岸堤である(図-1). 本工法のRC函体は, 陸上ヤードで現場製作したのち大型の起重機船で据付箇所まで海上運搬される. 函体製作時の課題として, 斜面やスリットを有する複雑かつ大型な構造のため, 鉄筋, 型枠支保工, 足場の設置作業の煩雑化, マスコンクリートによる温度ひび割れへの懸念等が挙げられる. 上記の課題に対し, 現場施工の省力化およびコンクリートの品質向上を図るため, 函体を柱, 梁等のPCa部材に分割してそれぞれ工場製作し, 現場搬入後に接合し一体化するPCa型S-VHS工法(図-2)を提案している. これにより, 現場施工日数の短縮や人工数減による生産性の向上, 現地における建設資材(型枠等)の削減などの効果が期待される. 工場製作したPCa部材同士は, 機械式継手の一種であるモルタル充填継手²⁾で接合されるが, 現場打設による従来工法と比較して, 波浪作用により発生する曲げモーメントによる接合部の剛性低下や目地開きによる鉄筋腐食等が懸念される. そこで, 接合部を有するPCa部材を対象として実物スケールの模型を使用した曲げ載荷実験および非線形FEM解析を行い, 有脚式離岸堤における機械式継手の適用性を検討した.

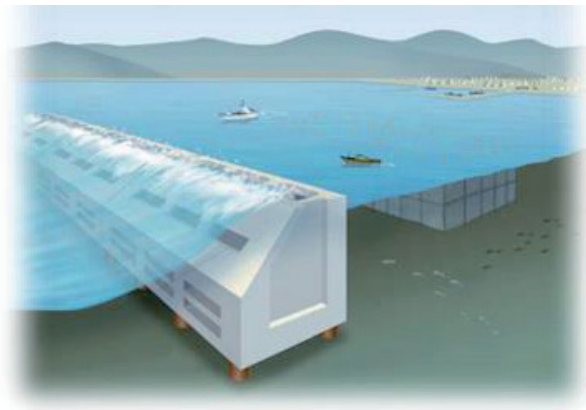


図-1 S-VHS 工法

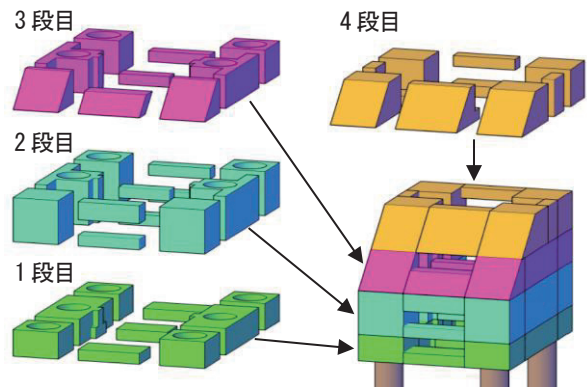


図-2 RC 函体の PCa 化

2. 接合部を有するPCa 梁の曲げ載荷実験

載荷実験で対象とする部材は、最も大きい波力が作用する後壁上部梁とし、梁と柱の接合部を模擬した実物スケールの逆T形模型を用いて載荷を行った(図-3)。ここで、実構造では両端固定梁に波圧が分布荷重として作用するが、実物スケールの載荷実験では再現が難しいため片持ち梁として梁端面に集中荷重を作用させた。詳細を以下に述べる。

(1) 実験ケースおよび試験体諸元

実験ケースは図-4に示すように接合部の有無による2ケースとし、腐食性環境に適用するため主鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。梁と接合される柱部材は、函体据付前に海上に打設する鋼管杭と比べて一回り径の大きい鞘管を内部に埋設した剛性の高い部材であるため、実験ではスタブに鋼材を密に配置することで模擬した。また、連続梁の試験体は梁とスタブを一体で製作し、PCa梁は実際の現場と同様に梁とスタブを別々に製作後、モルタル充填継手で接合を行った。

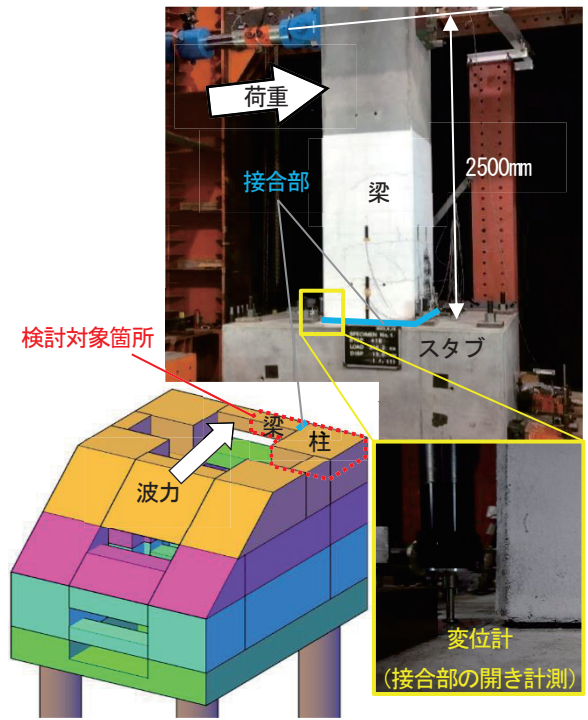


図-3 実験状況 (破線部を実物スケールでモデル化)

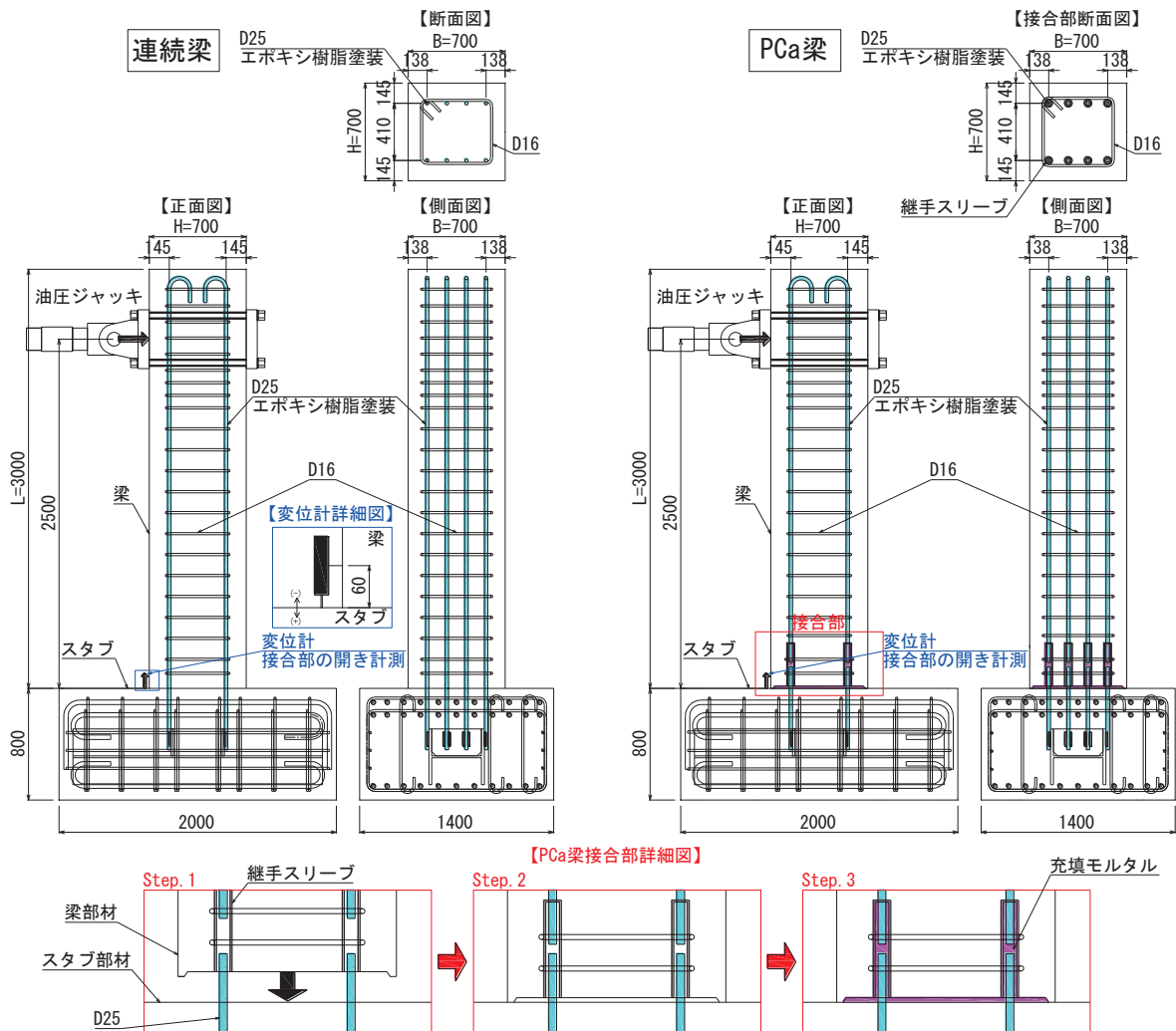


図-4 試験体の正面・側面・断面図 (単位: mm)

表-1 設計荷重および除荷を行った荷重

荷重 (kN)	除荷
設計曲げ降伏荷重×0.5倍 (部分係数考慮)	54.9 ●
ひび割れ発生荷重	83.2 ●
設計曲げ降伏荷重 (部分係数考慮)	109.7 ●
設計曲げ降伏荷重	143.4

表-2 実験に用いた材料物性値

コンクリート ($f'_{cd}=40\text{N/mm}^2$)		連続梁	PCa梁
圧縮強度	σ_c (N/mm ²)	52.0	58.8
弾性係数	E_c (N/mm ²)	33.6×10^3	35.8×10^3
鉄筋 (SD345)		D16	D25
降伏点	f_y (N/mm ²)	375.0	382.8
引張強さ	f_t (N/mm ²)	557.7	560.7
弾性係数	E_s (N/mm ²)	18.5×10^4	17.8×10^4

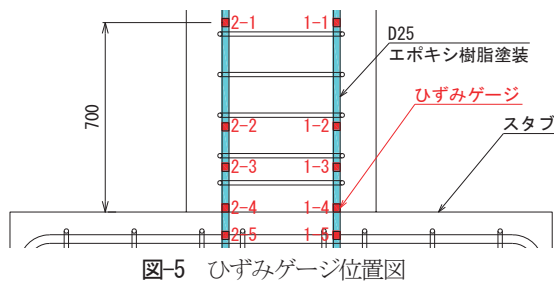


図-5 ひずみゲージ位置図

(2) 載荷条件・計測項目および使用材料

スタブを反力床に固定し、1000kN 油圧ジャッキによる漸増載荷を行った。載荷条件は、連続梁におけるひび割れ発生荷重、道路橋示方書の部分係数³⁾を考慮した設計曲げ降伏荷重およびその 0.5 倍の荷重でそれぞれ除荷・載荷を 1 回ずつ繰り返し、その後梁内部の主鉄筋が降伏するまで単調に載荷した。材料公称値 ($f'_{cd}=40\text{N/mm}^2$, $f_{yd}=345\text{N/mm}^2$) を用いた設計荷重および除荷を行った荷重を表-1、実験に用いた材料物性値を表-2 に示す。計測項目は載荷点における荷重-変位関係、接合部の開き、主鉄筋のひずみである。ひずみゲージ位置図を図-5 に示す。

(3) 実験結果および考察

載荷点における荷重-変位関係を図-6 に示す。連続梁の曲げ剛性は PCa 梁よりも大きく、 $P=100\text{kN}$ 付近で梁にひび割れが発生して以降は荷重の伸びが緩やかとなった。一方、PCa 梁では接合面に沿った境界が存在するため、連続梁と比較して初期の曲げ剛性が小さくなる傾向が確認された。連続梁では実際の材料強度を用いた設計降伏荷重 (図中の破線部) を上回った点で軸方向鉄筋が降伏ひずみ ($\epsilon_y=2150\mu$) に達した (図中の丸印) のに対し、PCa 梁では設計値とほとんど差が生じなかった。これは、曲げを受けた PCa 梁が設計降伏荷重算出時の RC 理論⁴⁾と同様に鉄筋のみで引張力を受け持つ状態になっていたためであると考えられる。

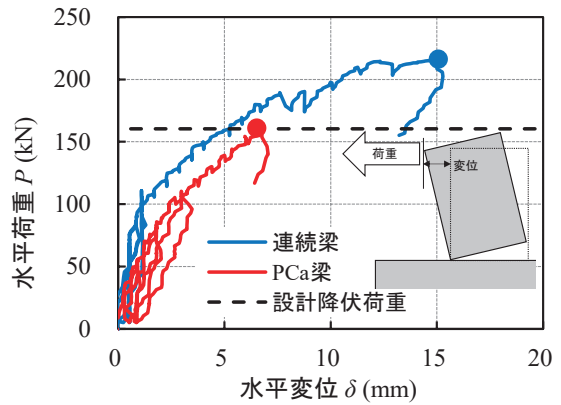


図-6 荷重-変位関係

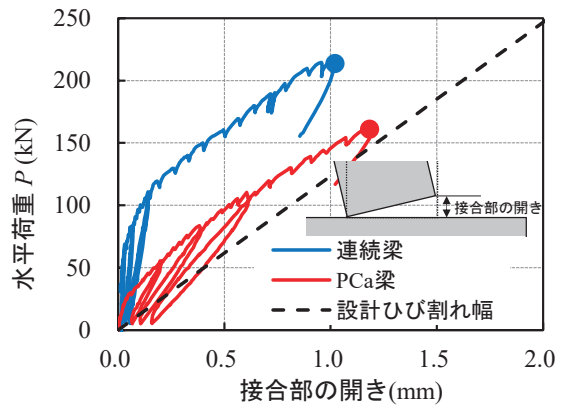


図-7 接合部の開き

荷重と接合部の開きの関係を図-7 に示す。荷重-変位関係と同様に、連続梁では梁にひび割れが発生する前後で挙動が異なり、ひび割れ発生前は開きが微小であるが、ひび割れ発生後の $P=100\text{kN}$ 付近からは PCa 梁と同様の傾きとなっている。一方、PCa 梁は連続梁よりも開きが大きい結果となったが、コンクリート標準示方書の設計曲げひび割れ幅⁵⁾よりも小さい傾向を示している。

引張鉄筋のひずみ挙動を図-8 に示す。連続梁では、ひび割れ発生後の $P=100\text{kN}$ 以降、接合部以外のゲージ (1-2) においてもひずみが増大しているが、PCa 梁では接合部のゲージ (1-4) にひずみが集中する結果となった。これは、連続梁では載荷終了時において水平方向のひび割れが 4 本程度 (平均幅 0.6mm) と分散していたのに対し、PCa 梁では 1 本 (幅 0.2mm) にとどまり、接合部に開きが集中していたことが原因として考えられる。

これらの結果より、PCa 梁接合部に曲げによる引張力が作用すると目地部の剥離が生じ、剛接合とピン接合の中間のような挙動を示す傾向が確認された。しかし、本載荷実験は片持ち梁であるのに対し、実構造は両端固定梁であるため境界条件が異なる。また、実際の外力は集中荷重ではなく、波圧による分布荷重であることから、次章では FEM 解析によりその影響を検討する。

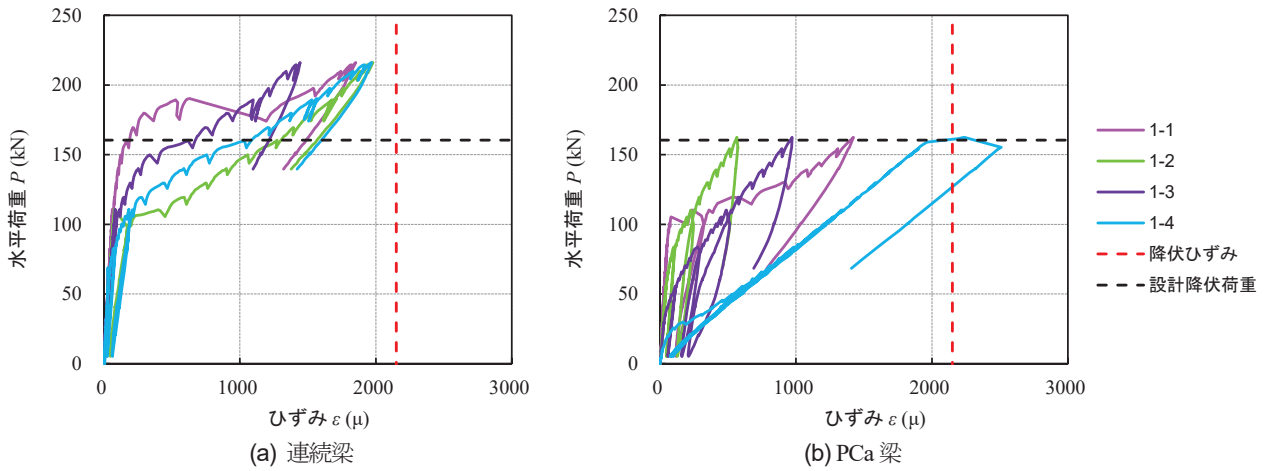


図-8 鉄筋のひずみ挙動

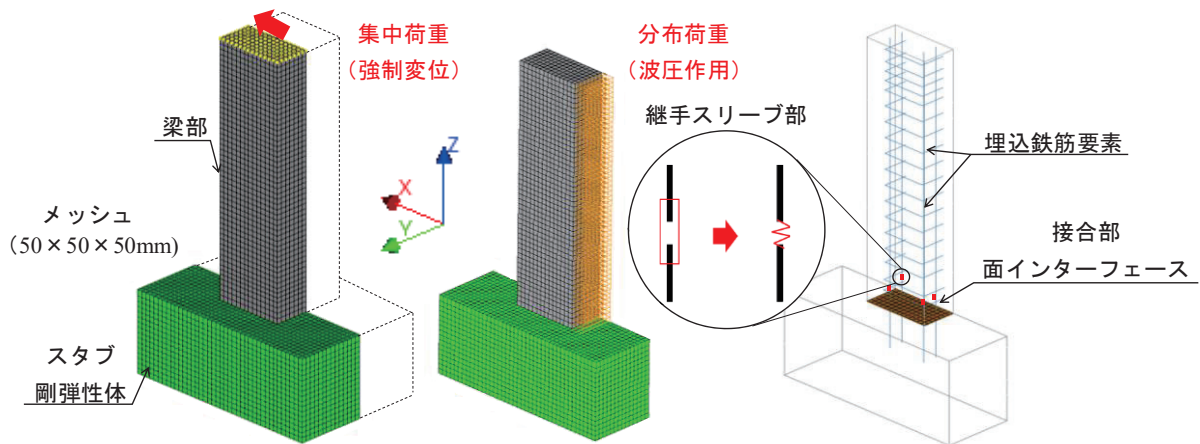


図-9 解析モデル図

3. 非線形 FEM 解析

実構造の両端固定および波圧作用（分布荷重）を再現するため、非線形 FEM 解析を実施した。解析には汎用 FEM 解析プログラム DIANA (Ver10.4) ⁹⁾を用い、前章で実施した載荷実験の再現解析を行うことで解析モデルの妥当性を確認し、境界条件（両端固定）および波圧（分布荷重）の影響を考察した。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-9 に示す。モデルは 1/2 対称とし、コンクリートは 8 節点六面体ソリッド要素、スタブは剛弾性体とした。PCa 梁とスタブの接合面には面インターフェースを設け、圧縮のみに抵抗し、引張およびせん断には抵抗しないモデルとした。鉄筋は埋込鉄筋要素とし、付着すべり関係に島モデル ⁷⁾を採用した。PCa 梁接合部の継手スリーブ箇所は剛バネとしてモデル化した。

表-3 解析ケース

解析対象	境界条件	載荷条件	備考
連続梁 PCa梁	片持ち梁	集中荷重	載荷実験を再現
連続梁 PCa梁	両端固定梁		
連続梁 PCa梁			分布荷重

(2) 解析ケースおよび物性値

解析ケースの一覧を表-3、材料試験から設定した解析物性値を表-4 に示す。連続梁と PCa 梁それぞれにおいて境界条件を片持ち梁、載荷条件を集中荷重として載荷実験の再現解析を行い、解析モデルの妥当性を確認した。その後、より実構造の状態に近づけるため、境界条件を両端固定梁、載荷条件を分布荷重とした場合の影響を検討した。各ケースとも図中の Y 軸方向の変位を拘束し、X 軸方向に強制変位を作用させた。片持ち梁のケースでは Z 軸方向の変位および Y 軸まわりの回転を自由とし、両端固定梁のケースでは拘束した。

表-4 解析物性値

コンクリート ($f'_{cd}=40\text{N/mm}^2$)		梁部	
圧縮強度	σ_c (N/mm ²)	58.8	
弾性係数	E_c (N/mm ²)	35.8×10 ³	
ポアソン比	ν_c	0.2	
最大骨材寸法	d_{max} (mm)	20	
引張強度	f_t (N/mm ²)	3.48	
引張破壊エネルギー	G_t (N/mm)	0.1056	
鉄筋 (SD345)		主鉄筋 (D25)	せん断補強筋 (D16)
断面積	A (mm ²)	506.7	198.6
弾性係数	E_s (N/mm ²)	17.8×10 ⁴	18.5×10 ⁴
ポアソン比	ν_s	0.3	0.3
降伏強度	f_v (N/mm ²)	382.8	375.0

(3) 解析結果および考察

a) 載荷実験との比較

載荷点における荷重-変位関係を図-10 に示す。実験および解析ともに、PCa 梁は連続梁と比較して初期の曲げ剛性が小さくなる傾向が確認されたが、両ケースとも設計曲げ降伏荷重を上回る耐力があることを確認できた。解析結果は連続梁で再現性が高く、PCa 梁では実験よりも曲げ剛性を過小評価しているが、これはモルタル充填継手のスリーブを十分にモデル化できていないためだと推察される。また、PCa 梁では実験と解析で荷重のピーク値に差が生じているが、これは載荷実験では、主鉄筋が降伏ひずみに達した点（図中の丸印）で除荷したためである。

PCa 梁における載荷位置の変位と接合部の開きの関係を図-11、載荷位置の変位 $\delta=15\text{mm}$ における鉄筋のひずみ分布を図-12 に示す。接合部の開きは、変位の大きい領域で若干の差異が見られたものの、実験結果と概ね同様の傾向を示した。ひずみ分布では、接合部付近で差異が見られたが、梁内部の傾向は概ね捉えることができた。

以上より、概ね実験を再現できており、境界条件や波圧作用による検討が可能な解析モデルとして判断した。

b) 境界条件および波圧作用の影響検討

境界条件を片持ち梁から両端固定梁に変化させた場合の違いについて、最小主応力 S3 コンター（降伏曲げモーメント M_y 作用時）の比較を図-13、曲げモーメントと接合部の開きの関係を図-14 に示す。両端固定梁では梁軸方向に圧縮力が作用しているため、片持ち梁よりも接合部の開きが抑えられていることが分かる。また、実構造を再現するため境界条件を両端固定とし、波圧を作用させた場合の波圧-変位関係を図-15 に示す。図-10 の結果と比較して、水平変位量が 2 割以下 (6.9mm から 1.2mm) に低減され、連続梁、PCa 梁両ケースの剛性差もほぼ無くなっていることが分かる。

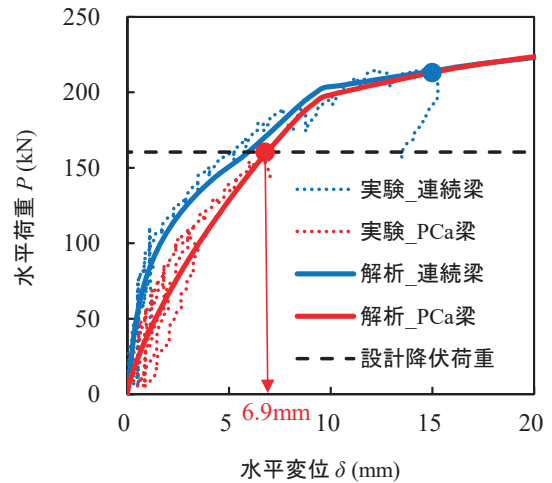


図-10 荷重-変位関係

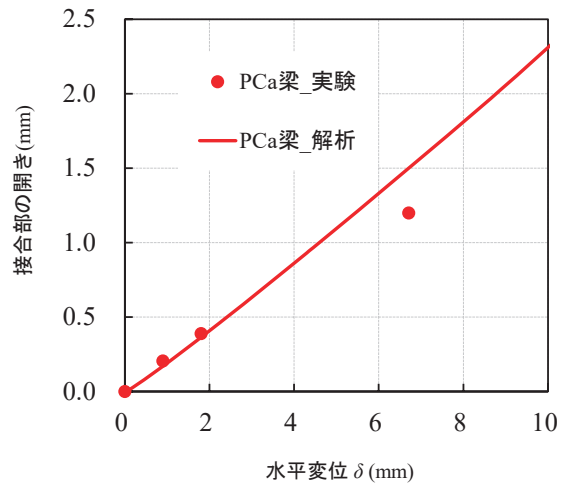


図-11 水平変位と接合部の開き

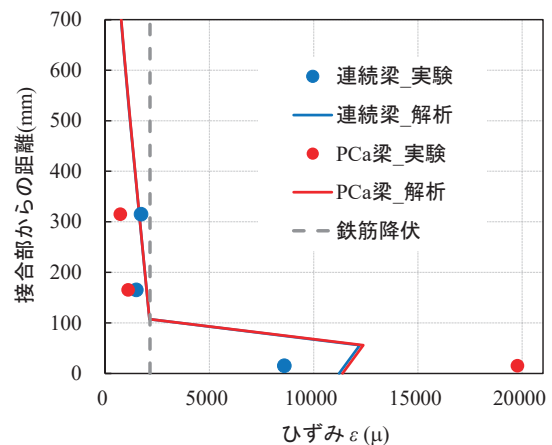


図-12 ひずみ分布 ($\delta=15\text{mm}$)

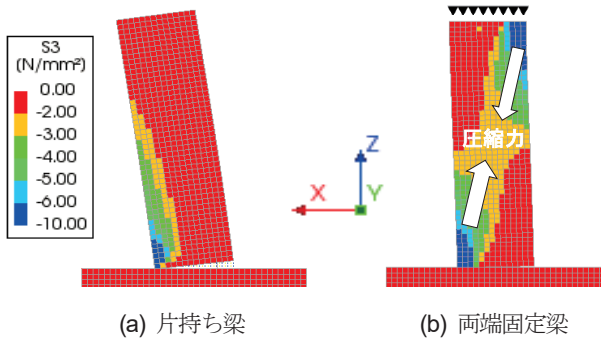


図-13 最小主応力 S3 コンター (M_y 作用時_変形倍率 50 倍)

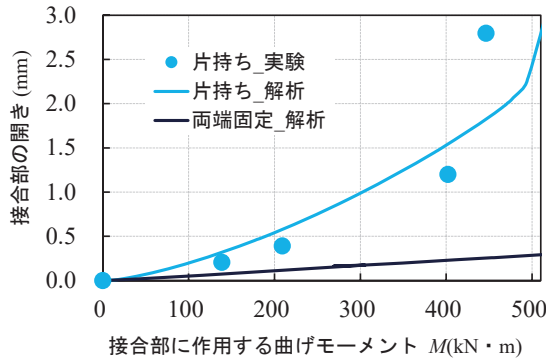


図-14 曲げモーメントと接合部の開き

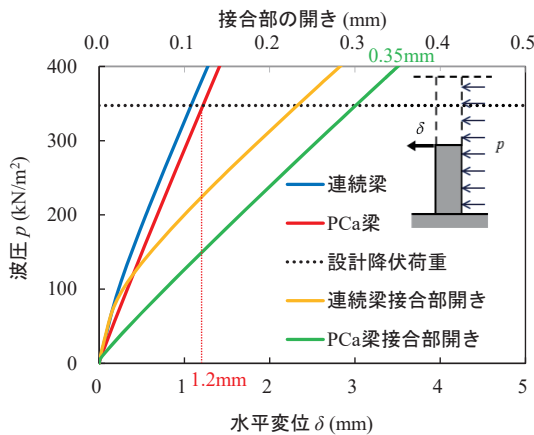


図-15 波圧-変位関係 (両端固定_分布荷重)

4. おわりに

片持ち梁で実施した荷重実験では、連続梁と比較して PCa 梁の剛性が小さく、接合部の開きが出やすい結果となった。しかし、実構造と同じく両端固定梁とすることで梁軸方向に圧縮力が作用し、連続梁との剛性差がほぼ無くなることを解析により確認できた。また、PCa 梁において接合部の開きが腐食性環境における許容ひび割れ幅の 0.35mm に達する際の波圧を波高に換算すると約 22m となる。このように、実構造においては接合部の有無による剛性差はほぼ無く、波高 22m 以下の波浪条件下では接合部の開きも許容値内である。また、より腐食の厳しい環境においても、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用することで耐久性を確保できると考えられる。

実構造への適用に向けて、接合面のせん断耐力をどう評価するかが今後の課題と考えられる。せん断キーの配置等、せん断耐力を発揮できる接合方法について引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書「S-VHS 工法」, 2018.
- 2) 道路プレキャストコンクリート工技術委員会 ガイドライン検討小委員会：プレキャストコンクリート構造物に適用する機械式鉄筋継手工法ガイドライン, 2019.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, pp.123-124, 2017.
- 4) 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.180-185, 2018.
- 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) DIANA-10.1 User's Manual, DIANA FEA BV.
- 7) 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

EXAMINATION OF APPLICABILITY OF MECHANICAL JOINTS IN PRECAST TYPE LEGGED BREAKWATER

Sota SAITO, Arata ISHIZUKA, Katsuya IKENO and Atsushi YAMAMOTO

S-VHS is a legged breakwater method used for wave dissipation. We are proposing precast S-VHS method to improve productivity and concrete quality when manufacturing RC caissons. Precast members are connected by mechanical joints, but there are concerns that the rigidity of the joints may be reduced and the reinforcing bars may corrode due to joint opening compared to the conventional cast-in-place method. Therefore, in this study, we conducted loading experiments and FEM analysis on precast members with joints, and confirmed the applicability of mechanical joints to precast S-VHS method.