土木学会論文集, Vol. 81, No. 18, 25-18168, 2025.

PCa型有脚式離岸堤の接合部に着目したせん断載荷実験および解析的検討

児玉　浩惇[1]・Varie John OROZCO[2]・山本　敦[3]・池野　勝哉[4]・
中谷　郁夫[5]・谷口　哲憲[5]・桑原　政道[5]

[1] 正会員　五洋建設（株）土木本部　土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: hiroatsu.kodama@mail.penta-ocean.co.jp(Corresponding Author)
[2] 五洋建設（株）土木本部　土木設計部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[3] 正会員　五洋建設（株）土木本部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
[4] 正会員　五洋建設（株）技術研究所　土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
[5] 正会員　ジオスター（株）技術本部　開発部
（〒112-0002 東京都文京区小石川 1-4-1 住友不動産後楽園ビル 14 階）

著者らは，有脚式離岸堤である斜面スリット型透過式ケーソン（S-VHS 工法）について，従来現場打ちの鉄筋コンクリート構造であった函体をプレキャスト（以下，PCa）化した，PCa 型 S-VHS 工法を提案している．PCa 函体は機械式継手により部材同士が接合されるため，波浪作用による接合部の耐荷性能の低下や，部材間の開きに伴う鉄筋の腐食等が懸念される．著者らは過去に，同継手による接合部を対象に，曲げ作用に対する耐荷性能および開き抵抗を確認した．後続検討となる本研究では，接合部を模擬したせん断載荷実験および非線形 FEM 解析を実施し，せん断作用に対する接合部の耐荷性能や開き抵抗を評価した．その結果，接合部は使用時波浪に相当するせん断力に対して十分な耐荷性能を有していること，また，接合部の開きは許容ひび割れ幅以下であることを確認した．

Key Words : *precast concrete, S-VHS, mechanical joint, shear loading experiment, finite element analysis*

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，海岸侵食防止を目的とした有脚式離岸堤である（図-1）．著者らは，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，ケーソン函体を柱，梁等の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[2]．

PCa施工技術は，一般的に部材同士の接合が技術的課題として挙げられる．本工法においても，波浪作用による接合部の耐荷性能の低下や，部材間の開きに伴う鉄筋の腐食等が懸念される．本工法のPCa部材同士はモルタル充填式機械式継手[3]で接合されるが，齊藤ら[2]は同継手で接合されたPCa部材の接合部を対象とした載荷実験および非線形FEM解析を実施し，曲げ作用に対する耐荷性能および開き抵抗性を確認している．後続検討となる本研究においては，せん断作用に対する耐荷性能や開き抵抗性を確認することを目的として，接合部を模擬したせん断載荷実験および非線形FEM解析を実施した．本研究

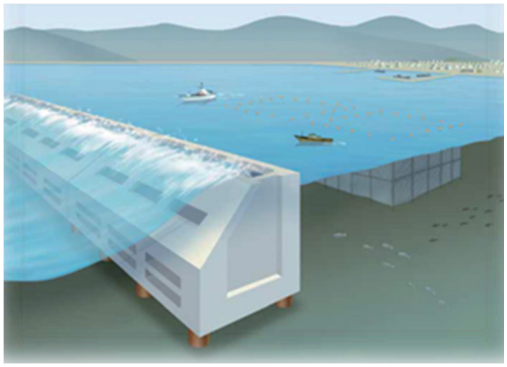


図-1　有脚式離岸堤（S-VHS工法）

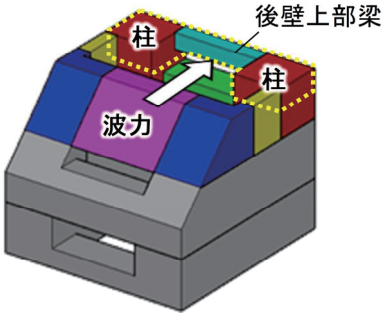


図-2　本研究の対象とするPCa梁（後壁上部梁）

では**図-2** に示す通り，最も大きい波力が作用する後壁上部梁を検討対象部材とし，PCa 型 S-VHS 工法への機械式継手の適用性について検討した．

2. 接合部を有する PCa 梁のせん断載荷実験

実験は，梁と柱の接合部を2箇所設けた左右対称の門型模型を用いて梁上面から集中荷重を2点載荷した．試験体のセットアップ状況を**図-3**に示す．なお，ケーソン函体の梁はせん断作用と曲げ作用を同時に受ける状況下にあるため，極力，実構造を模した柱-梁-柱の実験とした．実構造では梁部材に波浪が分布荷重として作用するが，実験では分布荷重を試験体に作用させることが難しいため，梁上面に集中荷重を載荷した．

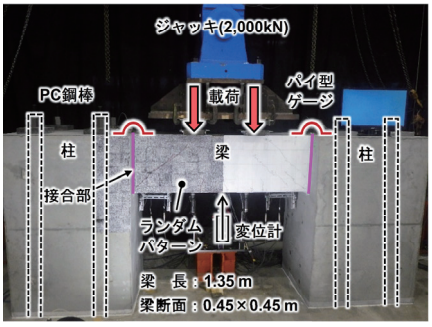


図-3　試験体のセットアップ状況

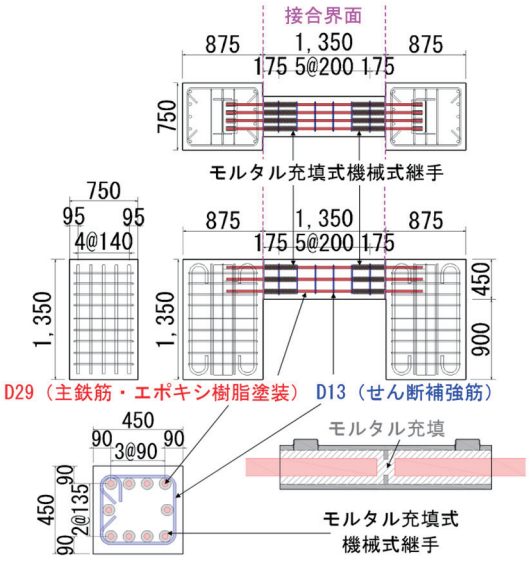


図-4　試験体諸元（単位：mm）

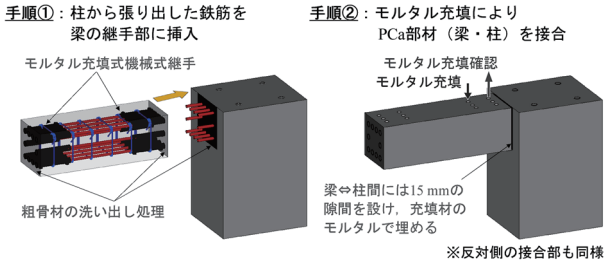


図-5　試験体施工イメージ（PCa 梁）

(1)　実験ケース・試験体諸元および計測項目

実験ケースは接合部がない連続梁と，接合部を有する PCa 梁の 2 ケースとした．試験体の諸元を**図-4** に，施工イメージを**図-5** に示す．梁断面は 0.45 m×0.45 m とし，実構造に対して約 2/3 の縮尺比とした．ここで，S-VHS 工法は海域での腐食性環境に対応したエポキシ樹脂塗装鉄筋が用いられているため，本実験の主鉄筋においても同様の塗装鉄筋を用いた．また，PCa 梁の接合界面は，実構造と同じく粗骨材の洗い出し処理を実施した．なお，試験体の柱は PC 鋼棒を用いて反力床に固定した．

計測項目は，梁下部中央における荷重-変位関係，接合部の開き，主鉄筋とせん断補強筋のひずみである．各鉄筋のひずみ計測位置を**図-6** に示す．また，試験体の対称性から**図-3** の左側半分に対してランダムパターンを塗布し，画像解析の一種である DIC 解析（Digital Image Correlation，デジタル画像相関法[例えば4)]）を用いて，コンクリート表面に発生するひずみを把握した．

(2)　使用材料・載荷条件

実験に用いた材料物性値を**表-1** に，載荷条件および設計荷重を**表-2** に示す．**表-2** の材料公称値とは，コンクリー

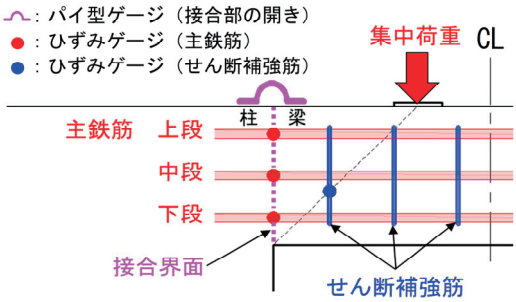


図-6　ひずみゲージ位置図

表-1　実験に用いた材料物性値

コンクリート（f'_{cd}=30 N/mm^2）		連続梁	PCa梁
圧縮強度	σ_c (N/mm^2)	32.6	32.0
弾性係数	E_c (N/mm^2)	20.3×10^3	20.8×10^3
鉄筋（SD345）		D29	D13
降伏点	f_y (N/mm^2)	385.5	367.5
引張強さ	f_t (N/mm^2)	598.4	539.9
弾性係数	E_s (N/mm^2)	19.5×10^4	19.2×10^4

表-2　載荷条件および設計荷重

ジャッキ荷重（kN）		備考
使用時波浪相当	100	除荷3回
使用時波浪相当×2	200	除荷3回
使用時波浪相当×3	300	除荷3回
設計せん断耐力 （材料公称値，部材係数考慮）	463	-
設計せん断耐力 （**表-1**の材料強度，部材係数未考慮）	601	-
設計せん断圧縮破壊耐力（部材係数考慮）	1,168	-
使用ジャッキの性能限界	2,000	実験終了

トf′cd=30 N/mm², 鉄筋fyd=345 N/mm²であり，設計せん断耐力は，コンクリート標準示方書[5]より算定した．載荷条件は，有脚式離岸堤の設置海域における設計波高から換算した使用時波浪相当の100 kNを基準とし，基準の1～3倍の荷重で除荷と載荷を各々3回繰り返した．その後，ジャッキ性能限界の2,000 kNまで漸増載荷を行った．

(3) 実験結果および考察

梁下部中央における荷重-変位関係を**図-7** に示す．両ケースの実験結果から，300 kNまでの繰返し載荷に対しては概ね弾性的に挙動することを確認した．せん断ひび割れが発生した1,000 kN付近以降でPCa梁の傾きが若干小さくなる違いが見られた．これは，接合部を有するPCa梁において，せん断ひび割れ発生後に載荷重の増加に伴って接合部の開きが徐々に大きくなるため，接合部の存在が影響を与えたことが一因と考えられる．なお，2ケースとも**表-1** の材料強度を用いた設計せん断耐力(601 kN)を超える耐力を有していた．

次に，連続梁とPCa梁のせん断ひび割れ発生状況を**図-8** に赤線で示す．両者とも，載荷点下部付近から梁下部の端部に向かって斜め方向にせん断ひび割れが発生し，同様のひび割れ傾向を示していることが分かる．

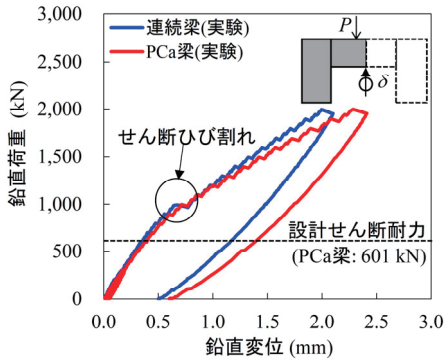
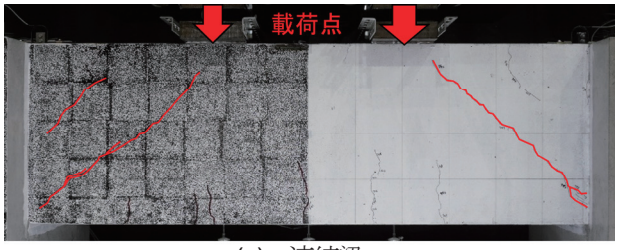
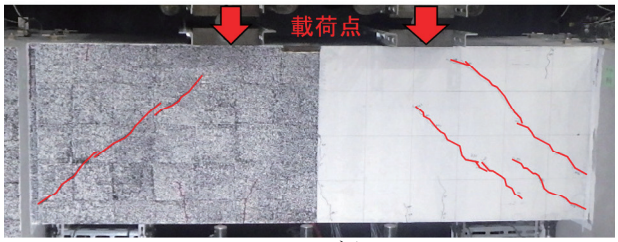


図-7 荷重-変位関係（実験）



(a) 連続梁



(b) PCa梁

図-8 せん断ひび割れ発生状況（2,000 kN載荷時）

3. 非線形FEM解析による接合部の評価

解析は，まず前章の実験を再現し，実験結果と対比することでモデル設定の妥当性を検証した．次に，実物大のスケールでモデル化したうえで，実験では考慮できなかった波浪相当の分布荷重を作用させ，実構造におけるPCa梁の接合部に対して検討を行った．解析には，汎用FEM解析プログラムDIANA(Ver.10.8)[6]を用いた．

(1) 解析モデル

実験の再現解析モデルを**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とした．PCa梁と柱の接合面には面インターフェースを設け，圧縮やせん断に抵抗し，引張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梁接合部のモルタル充填式機械式継手の部分は，剛バネとしてモデル化し，剛バネの剛性を変化させることで実験における試験体挙動を再現した．なお，連続梁においては主鉄筋の物性を剛バネに与えることで，継手のない1本の鉄筋を再現した．

次に，実構造の解析モデルを**図-10** に示す．実構造の解析では，実験より梁寸法および鉄筋径を変更した．具体的には，梁断面を実験の 0.45 m×0.45 m から 0.70 m×0.70mに，梁長を1.35mから5.0 mに変更するとともに，

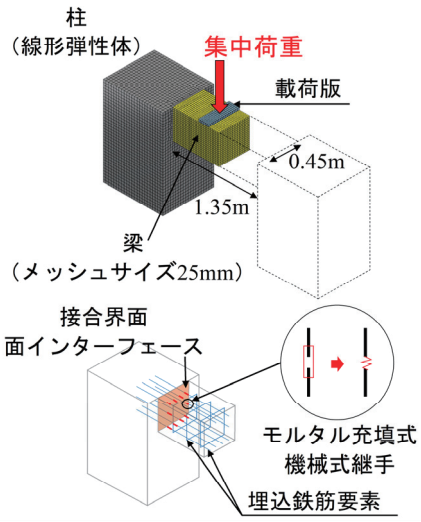


図-9 解析モデル（実験の再現解析）

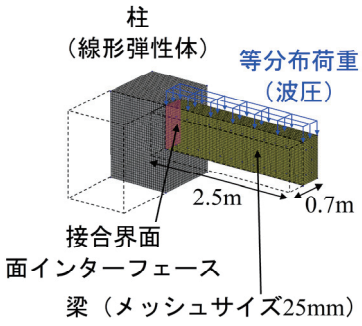


図-10 解析モデル（実構造の解析）

主鉄筋を D25, せん断補強筋を D16 とした. モデルは 1/4 対称とし，その他のモデル化は実験の再現解析モデルと同じとした.

(2) 解析物性値および載荷条件

解析ケースの一覧を**表-3** に，解析に用いた材料物性値を**表-4** に示す．解析物性値について，再現解析では**表-1** に示した実験の材料物性値を設定し，実構造の解析では材料公称値に基づき設定した．載荷条件については，再現解析では集中荷重とし，実験と同じ荷重履歴を梁に与えた．実構造の解析では波浪を想定した等分布荷重を単調載荷させた.

表-3 解析ケース一覧

解析	解析対象	寸法	載荷条件
実験の再現解析	連続梁	梁断面：0.45 m×0.45 m 梁　長：1.35 m 鉄　筋：D29×D13 有効高さ:360 mm	集中荷重
	PCa梁		
実構造の解析	連続梁	梁断面：0.70 m×0.70 m 梁　長：5.0 m 鉄　筋：D25×D16 有効高さ:555 mm	等分布荷重（波浪）
	PCa梁		

※鉄筋径は，主鉄筋×せん断補強筋で記載
※せん断補強筋の間隔は200 mm

表-4 解析物性値一覧

(a) 実験の再現解析

コンクリート（f'_{cd}=30 N/mm^2）		連続梁		PCa梁	
		梁部	柱部	梁部	柱部
圧縮強度	σ_c (N/mm^2)	32.6	-	32.0	-
弾性係数	E_c (N/mm^2)	20.3×10^3	20.3×10^3	20.8×10^3	20.8×10^3
ポアソン比	ν_c	0.2	0.2	0.2	0.2
最大粗骨材寸法	d_{max} (mm)	25	-	25	-
引張強さ	f_t (N/mm^2)	2.35	-	2.32	-
引張破壊エネルギー	G_t (N/mm)	0.087	-	0.086	-
鉄筋（SD345）		D29		D13	
断面積	A (mm^2)	642.4		126.7	
弾性係数	E_s (N/mm^2)	19.5×10^4		19.2×10^4	
ポアソン比	ν_s	0.3		0.3	
降伏強度	f_y (N/mm^2)	385.5		367.5	

(b) 実構造の解析

コンクリート（f'_{cd}=40 N/mm^2）		連続梁		PCa梁	
		梁部	柱部	梁部	柱部
圧縮強度	σ_c (N/mm^2)	40.0	-	40.0	-
弾性係数	E_c (N/mm^2)	31.0×10^3	31.0×10^3	31.0×10^3	31.0×10^3
ポアソン比	ν_c	0.2	0.2	0.2	0.2
最大粗骨材寸法	d_{max} (mm)	25	-	25	-
引張強さ	f_t (N/mm^2)	2.69	-	2.69	-
引張破壊エネルギー	G_t (N/mm)	0.100	-	0.100	-
鉄筋（SD345）		D25		D16	
断面積	A (mm^2)	506.7		198.6	
弾性係数	E_s (N/mm^2)	20.0×10^4		20.0×10^4	
ポアソン比	ν_s	0.3		0.3	
降伏強度	f_y (N/mm^2)	345.0		345.0	

4. 解析結果および考察

(1) 実験と再現解析の比較

荷重-変位関係を**図-11** に示す．図中では，せん断ひび割れが発生した 1,000 kN 付近までは，実験と再現解析が良好に対応していることが分かる．しかし，せん断ひび割れ発生後は，解析の方が荷重-変位関係の傾きが小さくなり，実験との乖離が見られた. この要因の一つとして，柱の固定状態の違いが考えられる. 実験では，柱は PC 鋼棒によって反力床に固定しており，柱にはプレストレス力が導入されているが，解析では柱の下端節点に固定条件を課している．このような柱の拘束条件の違いは，柱の変形に少なからず影響している．また，せん断ひび割れ後のかみ合わせ効果については，本解析で十分な再現ができていないと考えられる．しかし，せん断ひび割れが生じるまでの荷重-変位挙動は解析で良好に再現することができた.

次に, 荷重と代表的な主鉄筋ひずみとの関係を**図-12** に, せん断補強筋ひずみとの関係を**図-13** に示す．主鉄筋ひずみに関して，解析と実験は良好に対応している．せん断補強筋ひずみは，せん断ひび割れ発生後から増加し始め，ひび割れ間のかみ合わせ効果などの違いにより若干の違いが見られるが，概ねよく対応している． なお，紙面の都合上，PCa 梁ケースのみ鉄筋ひずみを示したが，連続梁のケースも解析は実験を良く再現できていた．続いて，荷重と接合部の開きの関係を**図-14** に示す. 接合部の開きは, 載荷から除荷挙動まで良好に再現できている.

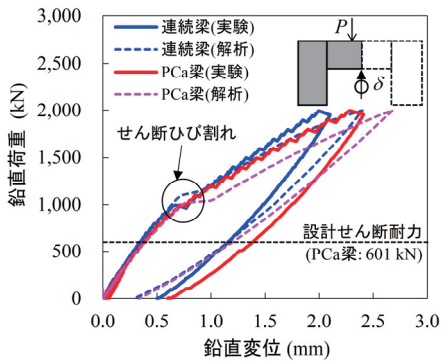


図-11 荷重-変位関係

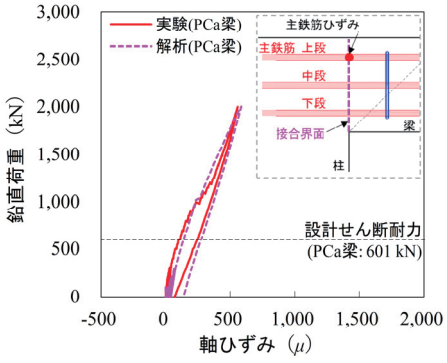


図-12 荷重-主鉄筋ひずみ関係

なお，**図-11** から**図-14** に示した実験と解析の比較結果は，柱の拘束条件やひび割れ間のかみ合わせ効果の違い，接合面を模した面インターフェースやモルタル充填式機械式継手のモデル化などが，複合的に影響している可能性が考えられる．

最後に，2,000 kN 載荷時における梁部のコンクリート主ひずみを**図-15** に示す．DIC 解析（実験）と FEM 解析の主ひずみは，画像のピクセルサイズやメッシュサイズの影響のため定量的な比較は出来ないが，せん断ひび割れ発生位置や傾向が概ね捉えられていることが分かる．

以上より，再現解析は実験を概ね再現できており，解析モデルは妥当であると考えられる．

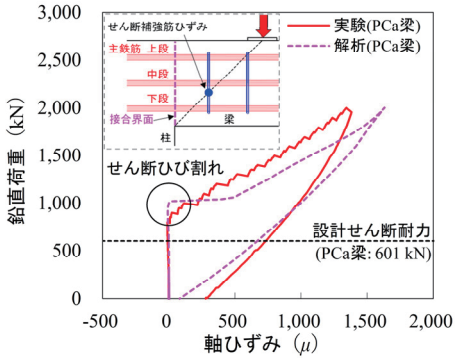


図-13　荷重-せん断補強筋ひずみ関係

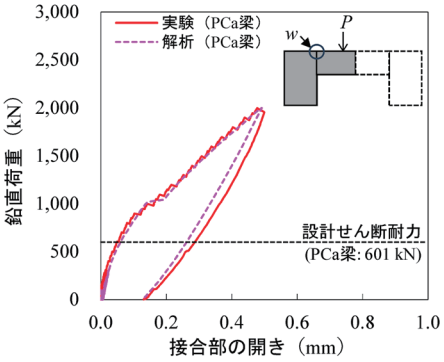
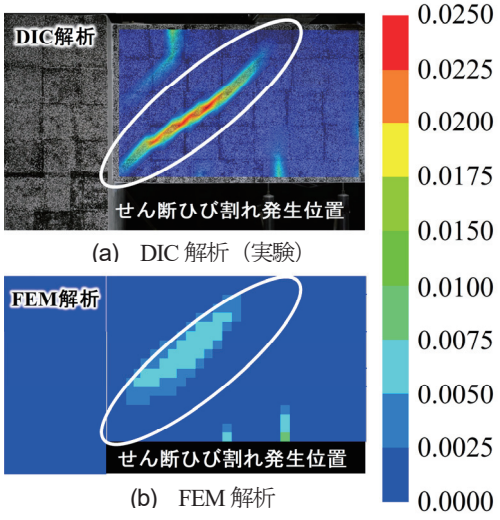


図-14　荷重と接合部の開きの関係



(a)　DIC 解析（実験）

(b)　FEM 解析

図-15　コンクリート主ひずみ分布（2,000 kN 載荷時）

(2)　実構造の解析

実構造の解析の荷重-変位関係を**図-16** に示す．使用時波浪相当において，連続梁と PCa 梁はどちらも線形的な挙動を示しており，両者の挙動はほぼ同じと言える．

次に，鉄筋ひずみの抽出位置を**図-17** に，荷重と鉄筋ひずみの関係を**図-18** に示す．主鉄筋ひずみは接合部の位置の値であり，せん断補強筋ひずみは，せん断力が最大となる最端部の鉄筋を対象とした．使用時波浪相当の約 3 倍程度の 500 kN/m^2 においても，主鉄筋は降伏ひずみ(1,725μ)に達しておらず，せん断補強筋にはわずかしかひずみが発生していない．また，使用時波浪相当の範囲において，連続梁と PCa 梁とで代表的な鉄筋のひずみ挙動はほぼ同じである．

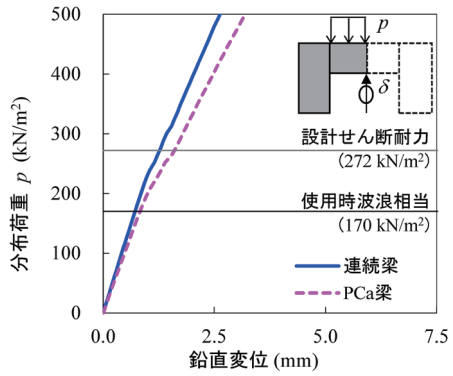


図-16　荷重-変位関係（実構造の解析）

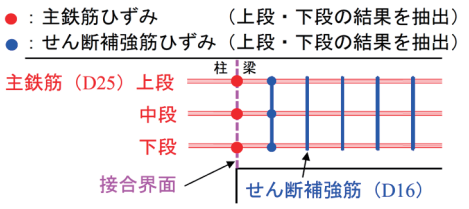


図-17　実構造の解析における鉄筋ひずみ位置図

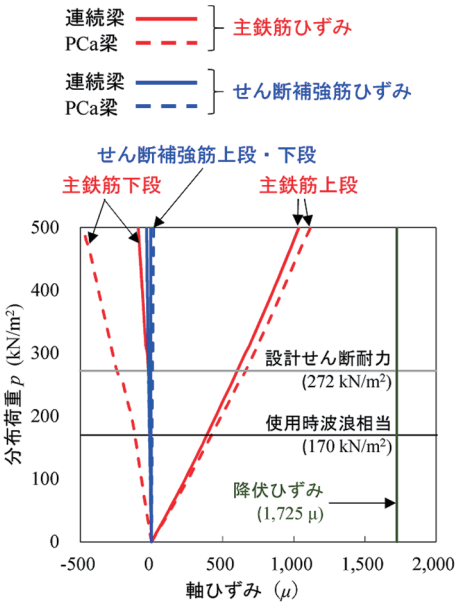


図-18　荷重と鉄筋ひずみの関係（実構造の解析）

続いて，荷重と接合部の開きの関係を図-19 に示す．使用時波浪相当における接合部の開きは 0.15 mm であり，港湾基準 [8]における特に厳しい腐食性環境でのひび割れ幅の許容値（0.0035c=0.35 mm, c=100 mm の場合）の半分程度であることが確認された．ここで，港湾基準 [8]で記載されるかぶりの標準値 70 mm 以上に従い，S-VHS 工法で採用されるかぶり値 c=100 mm を採用した．

最後に，使用時波浪相当におけるコンクリートの主ひずみ分布を図-20 に示す．連続梁と PCa 梁とで，ひずみ量の最大値は若干異なるものの，主ひずみの発生傾向は概ね同じであることが確認できた．

以上より，連続梁と PCa 梁とで，荷重-変位関係，主な鉄筋のひずみ，接合部の開きおよびコンクリートの主ひずみは，使用時波浪相当においてほぼ同様の挙動を示すことが確認できた．したがって，PCa 型 S-VHS 工法において，使用時波浪相当におけるせん断作用に対して，接合部は十分な耐荷性能を有し，開きも許容内であると考える．すなわち，本工法の従来設計において，せん断作用に対する機械式継手の適用性を確認できたと考える．

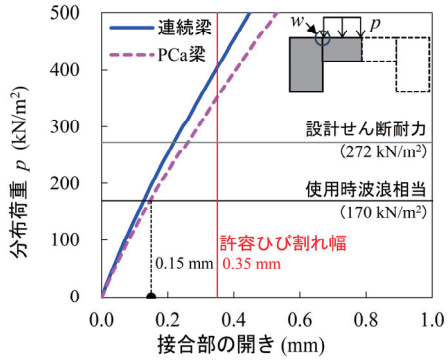
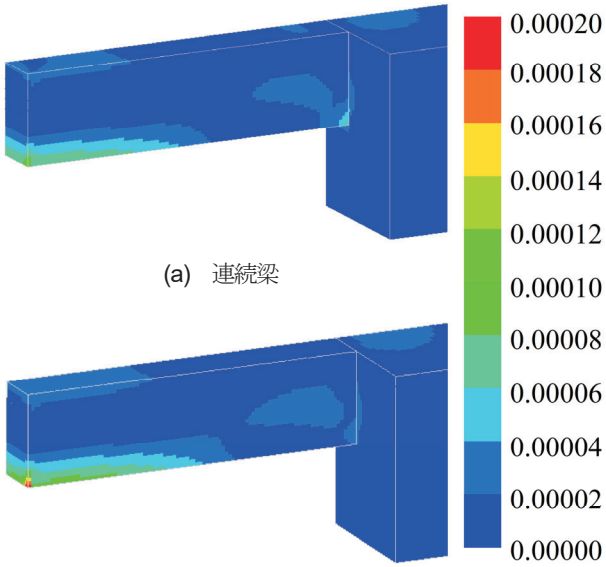


図-19　荷重と接合部の開きの関係（実構造の解析）



(a)　連続梁

(b)　PCa 梁

図-20　コンクリート主ひずみ分布（実構造の解析）
（使用時波浪相当 170 kN/m² 載荷時）

5.　本研究のまとめ

本研究では，斜面スリット型透過式ケーソンの PCa 部材のうち，最も大きい波力が作用する後壁上部梁を対象としたせん断載荷実験および非線形 FEM 解析を実施し，せん断作用に対する機械式継手の適用性について検討した．その結果，以下の知見が得られた．

(1)　せん断載荷実験より，連続梁と PCa 梁は 300 kN までの載荷と除荷の繰返し荷重に対し弾性的に挙動した．また，せん断ひび割れの発生に伴い PCa 梁の荷重-変位関係の傾きは連続梁と比較して低下した．

(2)　せん断載荷実験の再現解析より，せん断ひび割れ発生前における荷重-変位関係，鉄筋やコンクリートのひずみ挙動を概ね再現できた．せん断ひび割れ発生後の挙動は実験と若干の乖離はあるものの，傾向を概ね捉えており，解析モデルの設定は妥当と考える．

(3)　実物大の梁部材に波浪相当の等分布荷重を作用させる解析を実施した．連続梁と PCa 梁の荷重-変位関係は，使用時波浪相当において線形的な挙動を示し，両者の挙動はほぼ同じであった．加えて，使用時波浪相当において，接合部の主鉄筋やせん断補強筋は降伏ひずみには達しておらず，連続梁と PCa 梁とで代表的な鉄筋のひずみ挙動は概ね同じであった．接合部の開きは，使用時波浪相当において 0.15 mm であり，特に厳しい腐食性環境におけるひび割れ幅の許容値 0.35 mm の半分以下であった．また，コンクリート主ひずみについて，使用時波浪相当において連続梁と PCa 梁とでひずみ量の最大値が若干異なるが，発生傾向は概ね同じであった．

6.　おわりに

本研究と先行研究 [2]の結果より，モルタル充填式機械式継手を用いた PCa 型 S-VHS 工法において，使用時波浪相当の曲げ作用，せん断作用に対して，接合部は十分な耐荷性能を有しており，接合部の開きも許容内であることが確認された．

REFERENCES

1)　土木研究センター：建設技術審査証明報告書「S-VHS 工法」，2023. [Public Works Research Center: *Report of Construction Technology Review and Certification "S-VHS method"*, 2023.]

2)　齊藤創太，石塚新太，池野勝哉，山本敦：PCa 型有脚式離岸堤における機械式継手の適用性検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），第 77 巻，2 号，pp. I_943-I_948, 2021. [Saitou S., Ishizuka A., Ikeno K. and Yamamoto A.: Examination of applicability of mechanical joints in precast

type legged breakwater, *Japanese J. Jpn. Soc. Civil Eng.*, *B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 77, No. 2, pp. I_943-I_948, 2021.]

3) 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. [Road Precast Concrete Construction Technical Committee, Guideline Review Subcommittee: *Guidelines for the Application of Mechanical Rebar Joint Method to Precast Concrete Structures*, 2019.]
4) 尾上幸造，佐川康貴，松下博道：コンクリートのひずみ分布計測へのデジタル画像相関法の適用性に関する検討, 土木学会第61回年次学術講演概要集, V-488, pp. 971-972，2006. [Onoue, K., Sagawa, Y. and Matsushita, H: A study on the applicability of digital image correlation method to measuring of strain distribution on the surface of concrete*, Proc. Of 61st annual conf. of Jpn. Soc. Of Civil Eng.*, V-488, pp. 971-972, 2006.]
5) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 丸善, pp. 198-205, 2022. [Jpn. Soc. Civil Eng.: *Standard Specifications for Concrete Structures-2022 "Design"*, *Maruzen*, pp. 198-205, 2022.]
6) DIANA FEA B.V. : DIANA 10.8 User's Manual, 2023. <https://manuals.dianafea.com/d108/>（参照 2025.04.03）
7) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブ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. [Shima H., Chou L. and Okamura H.: Bond-Slip-Strain Relationship of Deformed Bars Embedded in Massive Concrete, *Japanese J. Jpn. Soc. Civil Eng.*, No. 378/V-6, pp. 165-174, 1987.]
8) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説(中巻)，pp. 597-599，日本港湾協会，2018. [Ports and Harbours Bureau of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, Vol. 2, pp. 597-599, Ports and Harbours Association of Japan, 2018.]

(Received February 4, 2025)
(Accepted May 15, 2025)

SHEAR LOADING EXPERIMENTS AND ANALYSES ON PRECAST-TYPE OFFSHORE LEGGED BREAKWATER

Hiroatsu KODAMA, Varie John OROZCO, Atsushi YAMAMOTO, Katsuya IKENO, Ikuo NAKAYA, Tetsunori TANIGUCHI and Masamichi KUWAHARA

The authors propose a PCa-type S-VHS Method, herein referred to as "PCa", a precast development of the conventional cast-in-place reinforced concrete S-VHS (slope-slit type permeable caisson) offshore legged breakwater. Since the structural members of the PCa are to be connected using mechanical joints, there are concerns about the possible reduction of the load-bearing capacity of the joints due to the wave actions, and that the reinforcing bars may corrode due to the opening at the members' connection interface. The load-bearing capacity and the resistance to opening against flexure using similar joint had already been confirmed. In this subsequent study, shear loading experiments and nonlinear FEM analysis replicating the joints were conducted to evaluate the joints' strength and its resistance to opening against shear force. The results confirmed that the joints have sufficient load-bearing capacity against the design wave equivalent shear force, and that the openings between the joined members were less than the allowable crack width.