

炭素固定性を有するホタテ貝殻砂 PCa コンクリート部材の 2 層打重ね仕上げ部における
鉄筋引抜き試験による付着割裂抵抗性の評価

DC21319 本橋 柊

1. はじめに

現在、北海道では年間約 44 万トンのほたてが水揚げされているが、それに伴ない約 11 万トンの貝殻が発生している事が明らかになっている。本研究では、北海道の主要な水産物で、今後も安定した生産量が見込まれるほたて貝殻砂の持つ炭素固定性に着目し、PCa コンクリート部材（以下 PCa 部材）にほたて貝殻砂を細骨材として置換したカーボンニュートラル建材の開発を目的として、研究を進めている。2009 年国連環境計画（UNEP）にて、浅場の海洋生態系に取り込まれた炭素がブルーカーボンとして炭素吸収源と位置づけられており、ほたて貝殻は海洋中に含まれる二酸化炭素であるブルーカーボンを吸収して成長し、炭酸カルシウム（CaCO3）の殻を形成する。その炭酸カルシウムには約 44%の CO2 が含まれるため、仮にほたて貝殻を 100kg コンクリートの細骨材とした場合、約 44kg の CO2 を固定化させる事ができる。既往の研究では、北海道頭部で低コストかつ大規模設備で量産された貝殻砂（Hbs）を使用してモルタルを作成し、フレッシュ性状と力学特性を確認した。本試験では、ほたて貝殻砂使用二層打ちコンクリートにおける鉄筋引き抜き性能の検討をする。

2. 目的

炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa 部材の開発およびほたて貝殻砂使用二層打ち（貝殻砂入りコンクリート＋各種コンクリート）とした時の鉄筋引き抜き性能を評価する。

3. 研究概要

3.1 実験の方針

鉄筋の付着強度試験方法を図 1 に、コンクリートの打ち重ねパターンを図 2 にそれぞれ示す。また、PCa 実部材の鉄筋および PCa 実部材を写真 1、2 に示す。まず始めに、型枠を採寸・切断・組み立てを行う。型枠に使用する材料はウレタンが塗装されているコンクリート型枠用塗装合板で、100mm×100mm×100mm の立方供試体用型枠を作製する。その後、ほたて貝殻砂を含むコンクリートの調合に準拠し、二層打ちの供試体を A、B、C、D シリーズの方法で 4 パターン作製する。同時に円柱試験体を作製し、打設日から 1 日・28 日の圧縮強度、引張強度の確認を行う。また、打設日から 36 日以後より引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さの評価を行う。型枠の制作手法や打ち込む際の手順は、建材試験センター規格の試験方法（以下 JSTM C 2101 とする。）で行う。

表 1 貝殻砂使用コンクリートの使用材料

材料	記号	名称	内容
水	W	上水道水	密度1.00g/cm ³
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度3.14g/cm ³
		ホワイトセメント	密度3.14g/cm ³
細骨材	Ls	鳥形山石灰砕砂	表乾密度2.60g/cm ³
	Hbs	ビッシェルほたて貝殻砂	表乾密度2.62g/cm ³
粗骨材	Ad	人工軽量骨材	表乾密度1.68g/cm ³
	Ls	鳥形山石灰砕石	表乾密度2.60g/cm ³
化学混和剤	Ad	高性能減水剤8000S	密度1.06g/cm ³
	AE	AE剤	密度1.09g/cm ³

表 2 コンクリートの調査

名称	早強セメント	ホワイトセメント	シリカフェーム	水	鳥形山石灰砕砂	貝殻砂(概12% (4号))	メサライト	鳥形山石灰砕石	高性能減水剤 8000S	(C×%)	Vin W (50倍 倍)	(C×%)
ほたて貝殻砂	356	0	18	168	403	399	0	576	2.5	0.7	0.7	0.2
普通 (早強)	356	0	0	160	849	0	0	576	1.068	0.3	1.068	0.3
普通 (ホワイト)	0	363	0	145	861	0	0	589	3.63(MJ)		0	0
総量1種	351	0	0	164	841	0	584	0	3.51	0	流量	0

表 3 試験項目および内容

試験項目		方法および内容
供試体の作製	コンクリート作製	全量入れ15秒攪拌。その後、水・化学混和剤を全量入れ60秒攪拌。その後、碎石を全量入れ120秒攪拌。
	コンクリート作製打込み	10cm×10cm×10cmの立方体供試体とし、非付着部は自由端側に設けその長さは、30mmとする。自由端側の鉄筋突出長さはアムスラー試験機での引き抜き試験が行える十分な長さとし、ダイヤルゲージが接する端面は鉄筋軸に垂直で平滑な面に仕上げる。
	コンクリート脱型	打設日の翌日に脱型。28日間の封かん養生。
フレッシュ性状	スランプ試験 (mm)	JIS A 1101：コンクリートのスランプ試験方法
	空気量 (%)	JIS A 1128：フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法・空気質圧力方法
力学特性	圧縮強度 (N/mm ²)	JIS A 1108：コンクリートの圧縮強度試験方法 円柱試験体 (D:100mm,H:200mm)：封かん養生 材齢:1d,28d (各3本)
	割裂引張強度 (N/mm ²)	JIS A 1113：コンクリートの割裂引張強度試験方法 円柱試験体 (D:100mm,H:200mm)：封かん養生 材齢:1d,28d (各3本)
鉄筋引抜き試験	付着応力度 (N/mm ²)	JSTM C 2101：引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法
試験方法：JIS B 7721に規定された引張試験機で行う。		



写真 1 PCa 実部材の鉄筋



写真 2 PCa 実部材

表 4 実験の要因と水準および設計条件

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメント (A,B,C), ホワイトセメント (D)
水セメント比 (%)	45 (A,B,C,D)
普通コンクリート (早強)	45 (B)
普通コンクリート (ホワイト)	40 (D)
軽量コンクリート一種	46.7 (C)
細骨材中の貝殻砂割合 (%)	50
貝殻砂中の微粉末割合 (%)	6
化学混和剤使用量	工場標準使用量準拠
コンクリートの種類	はたて貝殻砂, 普通コンクリート (早強セメントB, ホワイトセメントD), 軽量コンクリート1種C
材齢 (日)	1 (圧縮強度), 28 (圧縮強度, 引張強度), 28日以降 (引き抜き試験)
打重ねオープンタイム (OT)	20分・50分・80分
設計基準強度 (Fc)	Fc=30.0N/mm ²
脱型強度	15.0N/mm ² (Pca用早期脱型型)
目標スランプ	12.0±2.5cm
空気量	4.5±1.5% (はたて貝殻砂入りA,B,C,D・普通コンクリート) 5.0±1.5% (軽量コンクリート1種C)
コンクリートの強度管理情報	封かん養生、材齢28日
鉄筋の呼び名	D13 (D: 公称直径)

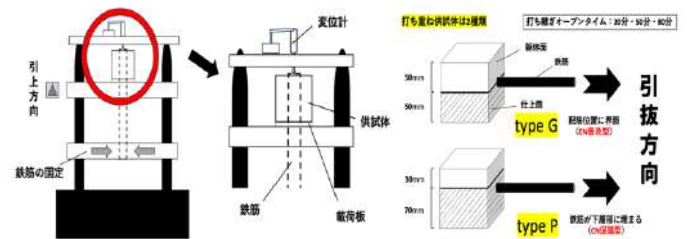


図 1 鉄筋の付着強度試験方法

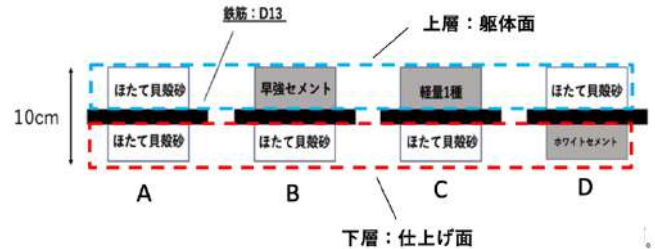


図 2 コンクリートの打ち重ねパターン (A、B、C、D)

3.2 使用材料および実験内容

表1に貝殻砂使用コンクリートの使用材料一覧を、表2にコンクリートの調合を、表3に試験項目および内容、表4に実験の要因と水準および設計条件を示す。打設するコンクリート調合はBC50/5/12とする。打重ねの種類は、A) はたて貝殻砂+はたて貝殻砂、B) はたて貝殻砂+普通コンクリート (早強セメント)、C) はたて貝殻砂+軽量コンクリート1種、D) はたて貝殻砂+普通コンクリート (ホワイトセメント) の4種類である。

3.3 実験の概要

JSTMC 2101 (引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法) は立方体の無補強コンクリートから鉄筋を引き抜く試験方法で、実際の試験では付着区間を約4D (D: 鉄筋の公称直径) とし、載荷板からの応力を均等化し試験誤差を少なくするために載荷側に非付着区間を設ける。載荷時には試験体の小形化を考慮し鉄筋の自由端のすべり量を30mmで測定し、付着応力度との関係を求める。

4. 鉄筋の付着強度試験

4.1 試験方法

図1に鉄筋の付着強度試験方法について、図2にコンクリートの打ち重ねパターンを示す。はたて貝殻砂入りコンクリートと各種コンクリート [普通コンクリート (早強セメント、ホワイトセメント)、軽量コンクリート1種] を高さ50mmの鉄筋界面で打重ね試験体は、(type G 標準型): 水平に配置した鉄筋が埋没するまで、(type P カーボンニュートラル促進型): 打重ね仕上部70mmまで打設した2種類とし、20分・50分・80分の打重ねオープンタイムを設けた後、躯体面のコンクリートを打重ねる。既往の研究ではアーキテクチャルコンクリートと軽量コンクリート1種を用いて行った試験があるが、試験結果としては、アーキテクチャルコンクリートと軽量コンクリート1種を打ち継いだ試験体の付着応力度は、アーキテクチャルコンクリート単体のものと同程度であることがわかる。これにより、打ち継ぎ界面に鉄筋が存在していても、鉄筋の付着応力度に大きな影響はないことが確

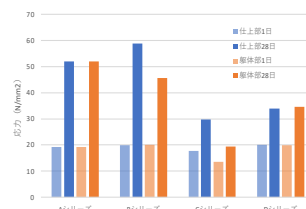


図 3 圧縮強度

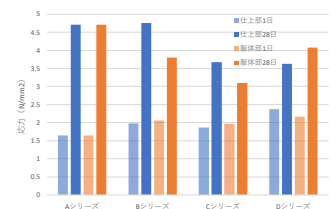


図 4 割裂引張強度

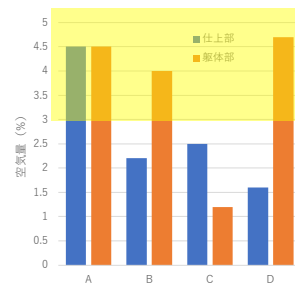


図 5 空気量

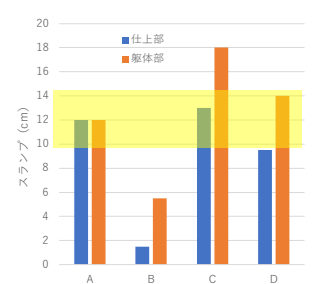


図 6 スランプ



写真 3 圧縮強度試験



写真 4 引張強度試験



写真 5 フレッシュ性状

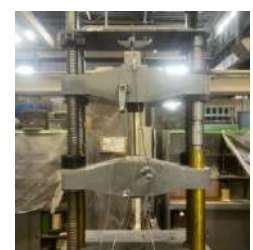


写真 6 鉄筋引き抜き試験

認められた。ほたて貝殻砂入りコンクリートでも同様の結果が得られるかを確認する。

4.2 非付着部の設定

非付着部について、本研究では型枠に鉄筋を通した後ガムテープを巻くことによって 30mm の非付着部を設ける。これにより、コンクリートの圧縮応力が溜まり付着付着強さが影響することを防ぐ。

5. 各種コンクリートフレッシュ性状と力学特性

5.1 強度試験

図 3、4 に各種コンクリートの力学特性を、図 5、6 に各種コンクリートのフレッシュ性状の試験結果をそれぞれ示す。また、各試験の様子を写真 3、4、5 にそれぞれ示す。

5.2 鉄筋引抜き試験

図 7、8、9、10 に各種 OT (20・50・80 分) ごとのコンクリートひずみを、図 11 に各種 OT ごとの鉄筋沈み量 (X) を、図 12 に各種鉄筋引抜き量 (X-Y) をそれぞれ示す。また、グラフ内における X は突出部から測定した鉄筋の沈みであり、Y は非付着部を除く 70mm (付着部) の鉄筋の変形量であり計算式は以下の通りである。

$$Y = (\text{鉄筋ひずみ}) \times 70\text{mm} \times 10^{-6}$$

Y を X から差し引くことで、鉄筋の変形量を考慮した純粋な引き抜き量を求めることができる。

鉄筋引き抜き試験の様子を、写真 6 に示す。

6. 鉄筋引抜き試験によるコンクリート破断長さ

図 13 に立方体端面 100×100mm コンクリート破断長さ平均を、界面破断の様子を写真 7 に、躯体部・仕上部破断の様子を写真 8 にそれぞれ示す。a) は各シリーズの破断長さ平均を、b) 、c) 、d) には各 OT のコンクリート破断長さ平均を示す。各シリーズ 21 個の供試体を作製し、それぞれ 1 個あたりのコンクリート破断長さを求めた。コンクリート破断は、躯体部・界面・仕上部の 3 パターンの破断がある。

7. まとめ

本研究では、計 84 個の試験体を、各種打重ねパターン (A、B、C、D)・OT (20・50・80 分)・仕上厚さ (type G 標準型、type P カーボンニュートラル促進型) 条件で 2 層打ちコンクリートの付着割裂抵抗性の評価を行った。

今後の課題としてコンクリートの打重ね時間管理の影響を踏まえつつ PRC 指針式への適応性評価を検討していく必要がある。

謝辞

本研究は高橋カーテンウォール工業株式会社と工学院大学の共同研究であり、佐々木哲也様、斉藤敬志様、尾関伶太様、小関彩乃様、山本太一様には、多大な協力いただきました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 尾関ら、炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 4~7, 2022 年

度日本建築学会学術講演会梗概集, 2023. 9

- 2) 井口ら、炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 6 2023 年度日本建築学会関東支部研究報告集 2024 年 3 月
- 3) 建材試験センター規格 JSTM C2101:1999 引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法

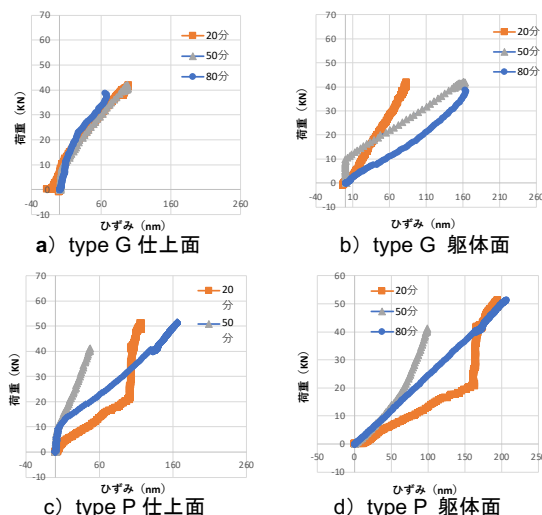


図 7 A シリーズの各種 OT ごとのコンクリートひずみ (μ)

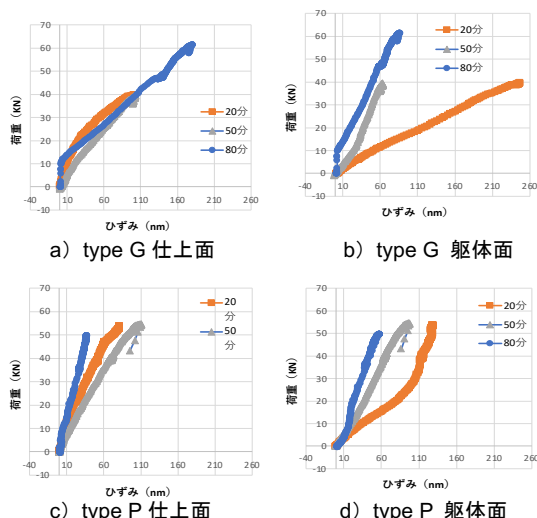


図 8 B シリーズの各種 OT ごとのコンクリートひずみ (μ)

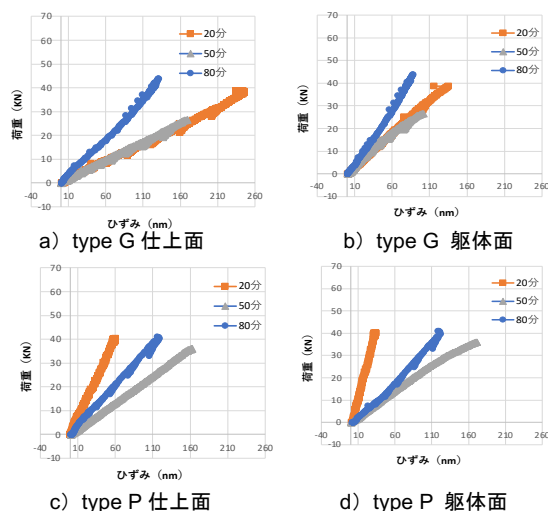
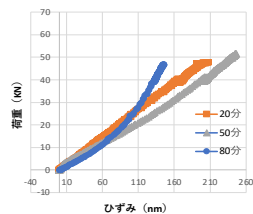
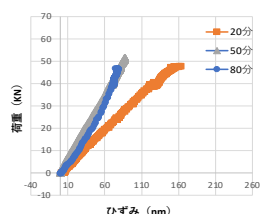


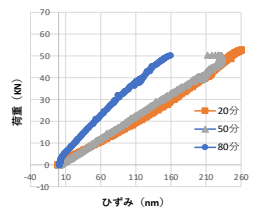
図 9 C シリーズの各種 OT ごとのコンクリートひずみ (μ)



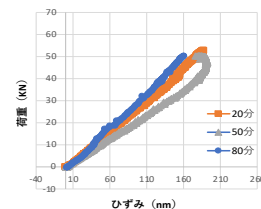
a) type G 仕上面



b) type G 躯体面

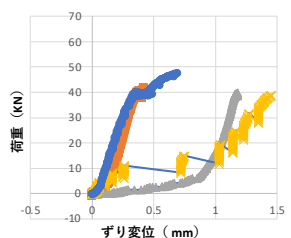


c) type P 仕上面

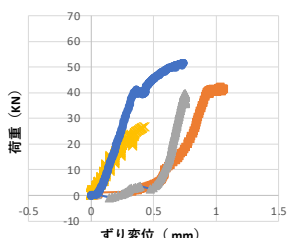


d) type P 躯体面

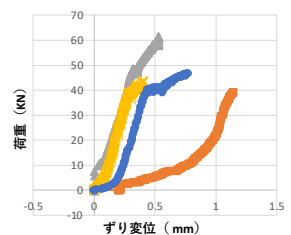
図 10 D シリーズの各種 OT ごとのコンクリートひずみ (μ)



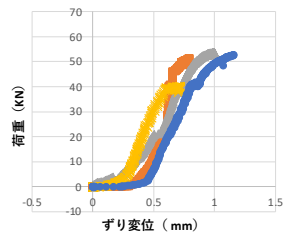
a) type G OT 20 分



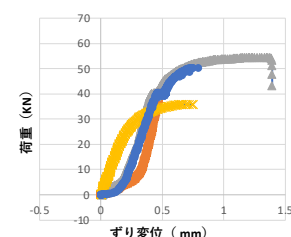
b) type G OT 50 分



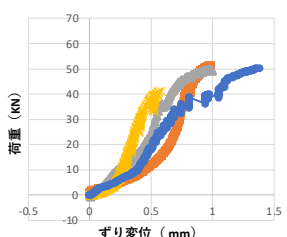
c) type G OT 80 分



d) type P OT 20 分



e) type P OT 50 分



f) type P OT 80 分

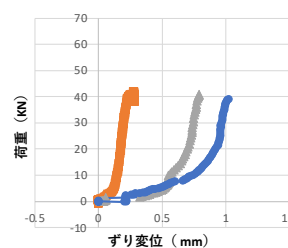
図 11 各種 OT ごとの荷重-鉄筋沈み量 (X)



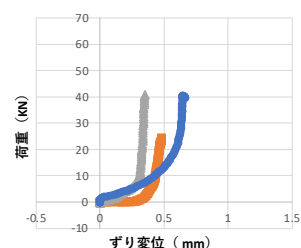
写真 7 赤:界面破断



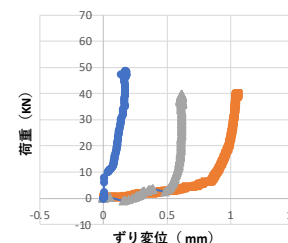
写真 8 青:躯体, 黄:仕上部破断



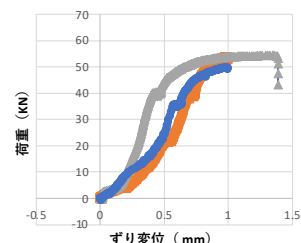
a) A シリーズ type G



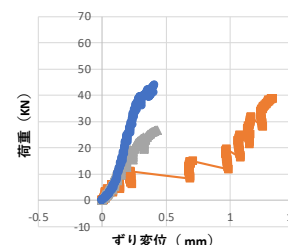
b) A シリーズ type P



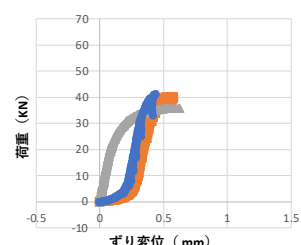
c) B シリーズ type G



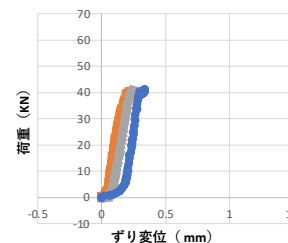
d) B シリーズ type P



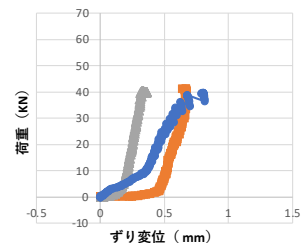
e) C シリーズ type G



f) C シリーズ type P

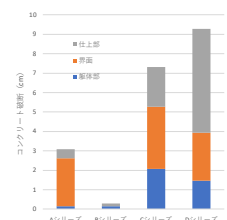


g) D シリーズ type G

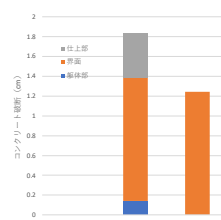


h) D シリーズ type P

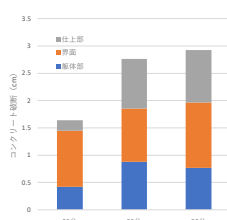
図 12 荷重-鉄筋引き抜け量 (X-Y) 関係



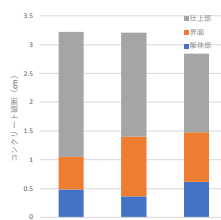
a) コンクリート破断平均



b) A シリーズ破断平均



c) C シリーズ破断平均



d) D シリーズ破断平均

図 13 コンクリート引抜き端面 (100×100mm) 破断長さ