

炭素固定性を有するホタテ貝殻砂を用いた PCa コンクリート部材における 2 層打重ね仕上げ部の付着性能と破断性状の評価

DB21048 上杉 寧々

1. はじめに

地球温暖化対策の一環として、環境配慮型建材の開発が注目されている。特に、北海道で廃棄されるホタテ貝殻をコンクリートの細骨材に置換する研究が進行中であり、これにより二酸化炭素の排出削減や資源の有効活用が期待される。既往の研究^{1)~4)}から、ホタテ貝殻砂を細骨材として置換したセメント材料を使用することは、コンクリート内部に二酸化炭素を固定することで二酸化炭素排出削減に貢献する可能性がある。本研究では、ホタテ貝殻を活用した外壁プレキャストコンクリート部材（以下、PCa 部材）の実用化を目指し、コンクリートの基礎物性評価を行った。また、異種コンクリートを 2 層外壁仕上げ部として作成した PCa 部材付着強度と界面破断評価を行った。

2. 研究概要

2.1 実験の方針

本研究では、ホタテ貝殻の炭素固定性を有するという特徴に着目し、二酸化炭素を建築物に長期的に固定することが可能となるコンクリートを調合した後に、異種コンクリートを 2 層外壁仕上げ部としての製造方法を検討する。各種類のコンクリートの基礎物性、2 層打ち重ねで作製した箱型供試体を用いて付着性能について評価を行う。打設時にはコンクリートの種類とオープンタイムに変化を持たせることで、打ち重ねの時間に差を設けた様々な施工状態を想定し、強度や破断界面にどのような違いが発生するのか調査する。外壁 PCa コンクリート部材としての要求性能を満たすことができるかを検討する。

2.2 使用材料および研究内容

表 1 に使用材料、表 2 にコンクリートの実施調合、表 3 に実験要因と水準、表 4 に試験項目と内容を示す。コンクリートの種類は、①ホタテ貝殻砂、②早強セメント、③ホワイトセメント、④軽量 1 種の計 4 種類とし、円柱供試体と 2 層打ち重ねした箱型供試体（30mm×300mm×60mm）を用いた。各種コンクリートの基礎物性について評価を行い、材齢は、打設後 1 日、28 日として計測を行い評価した。材齢 28 日圧縮強度を測定する際にはコンプレッソメーターを用いて取得したデータから応力ひずみ曲線を作成し、ヤング係数を算出した。付着性能評価は打設後 28 日として、強度計測と破断面の評価をし、取得したデータから付着強度、破断界面面積割合、付着破壊エネルギーを算出した。

2.3 現場施工調査

図 1 にホタテ貝殻砂の製造フローを示す。ホタテ貝殻砂の製造工場は水産加工場より産業廃棄物であるホタテ貝殻を購入し貝殻砂の製造を行っている。本研究で使用したホタテ貝殻砂は粒径 0.6~1.2mm の製品を使用しているが、製造工場の設備が微粉末を完全に取り除けず、粒径 0.3mm 以下の砂（以下、微粉末）が約 12%含まれている。写真 1 に現場施工 2 層打ち仕上げ PCa 部材パネルの様子を示す。

2.4 2 層打ち PCa コンクリート部材を想定した打設

本研究では、外壁 PCa 部材にホタテ貝殻砂を細骨材として一部置換した部材を用いて、2 層打ちの製造方法を検討した。付着性能を評価するため、2 層打重ね箱型供試体を用いて 1 層目のコンクリート打設後のオープンタイムを 20 分、50 分、

表 1 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	Cf	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³
	Cw	ホワイトセメント	密度 3.05g/cm ³
粗骨材	Lg	高知県鳥形山石灰砕石	表乾密度 2.70g/cm ³
	M	人工軽量骨材(メサライト)	表乾密度 1.68g/cm ³
細骨材	Ls	高知県鳥形山石灰砕砂	表乾密度 2.65g/cm ³
	Hbs	ホタテ貝殻砂(4号)	表乾密度 2.62g/cm ³
混和材	Sp	シリカフューム	密度 2.20g/cm ³
化学	Ad	高性能減水剤	密度 1.03~1.13g/cm ³
混和剤	AE	AE 剤	密度 1.08~1.10g/cm ³

表 2 コンクリートの実施調合（単位量：kg/m³）

調合番号	水	セメント			混和材		粗骨材		化学混和剤			
	W	Cf	Cw	Sp	Ls	Hbs	M	Lg	Ad	C×%	AE	C×%
①	168	356	0	18	403	399	0	976	適量	0.7	0.7	0.2
②	160	356	0	0	849	0	0	976	適量	0.2	1.068	0.4
③	145	0	363	0	861	0	0	989	適量	1	0	0
④	164	351	0	0	841	0	584	0	適量	0	適量	0

※①ホタテ貝殻砂、②早強セメント、③ホワイトセメント、④軽量 1 種とする。

表 3 実験要因と水準

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメント、ホワイトセメント
コンクリートの種類	①ホタテ貝殻砂、②普通コンクリート（早強）、 ③普通コンクリート（ホワイト）、 ④軽量コンクリート 1 種
水結合比	①ホタテ貝殻砂コンクリート、②普通コンクリート（早強）：45、③普通コンクリート（ホワイト）：40、④軽量コンクリート 1 種：46.7
化学混和剤使用量	適量
空気量	4.5±1.5%、 5.0±1.5%（軽量コンクリート 1 種）
スランブ	12±2.5cm
材齢	1 日強度（圧縮強度、引張強度） 28 日強度（圧縮強度、引張強度、付着強度）
オープンタイム	20 分、50 分、80 分
材料割合 (%)	ホタテ貝殻砂置換割合/シリカフューム 添加割合/微粉末混入割合 = (50/5/12)

表 4 試験項目および内容

	試験項目	方法および内容
フレッシュ性状	スランブ試験 (cm)	JIS A 1101:コンクリートのスランブ試験方法
	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-空気室圧力方法
	密度 (g/cm ³)	ノギスにて円柱試験体本体を測定し算出
力学特性	圧縮強度 (N/mm ²)	JIS A 1108:フレッシュコンクリートの圧縮強度試験方法 算出方法：圧縮強度 $f_c = P / \pi (d/2)^2$ P: 最大荷重 (N) d: 試験体の直径 (mm) l: 試験体の長さ (mm)
	引張強度 (N/mm ²)	JIS A 1113:コンクリートの引張強度試験方法 算出方法：引張強度 $f_t = 2P / \pi d l$ P: 最大荷重 (N) d: 試験体の直径 (mm) l: 試験体の長さ (mm)
2 層打重ね仕上げ部付着性能	付着強度 (N/mm ²)	JIS A 6909:建築仕上塗材付着強度試験方法
	破断界面面積割合 (%)	付着強度の測定後の試験体を色分けにて各破断部分の面積割合の算出
	付着破壊エネルギー (N/mm)	付着強度の測定データから変位をもとに算出 算出方法：付着強度 $f_a = P / S$ P: 最大荷重 (N) S: フィラアタッチメント面積 (mm ²)

80 分とし 2 層目を打設した。施工状態の変化を考慮し、1 層目には 1 種類目のコンクリート高さ 20mm、2 層目には 2 種類目のコンクリート高さ 40mm の異種コンクリートを使用して、打ち重ねパターンによる強度の違いを評価する。図 2 に打ち重ねパターンを示す。

2.5 フレッシュ性状の試験結果

図 5 のフレッシュ性状の試験結果からスランプ値は、A シリーズ、C シリーズ、D シリーズでホタテ貝殻砂の調合は目標範囲内であった。一方、B シリーズは、高性能減水剤の添加量が多かったため目標範囲を超え、C シリーズは、ホワイトセメントの試し練りと本練りの添加量変更が影響し、目標範囲を超えたと考えられる。空気量は、A シリーズ、C シリーズは目標範囲内に収まったが、B シリーズ、D シリーズはホタテ貝殻砂の扁平形状により材料同士のかみ合わせが悪くなり、空隙が生じて巻き込み空気が増加し目標範囲を超えたと推測される。密度は、D シリーズの軽量コンクリート 1 種が他の調合と比較して小さい値を示した。これは天然骨材と異なり人工軽量骨材として加工が施され、骨材が軽量化されていることが原因と考えられる。

2.6 圧縮強度の結果

図 6 に示された圧縮強度試験に基づく応力ひずみ曲線から A シリーズは、円柱試験体の圧縮強度の値が他の調合と比較して低い強度発現を示した。B シリーズは試験体全体でほぼ同等の強度発現を示しているが、B シリーズ、C シリーズのホタテ貝殻砂を用いた調合では、ホタテ 3 (緑) が S 字状を描いており測定時の不具合が影響したと考えられる。D シリーズは軽量コンクリート 1 種の応力ひずみ曲線が直線的であり、これは円柱試験体内の骨材の不均一性によるものと推測される。図 7 の圧縮強度試験結果から、A シリーズは円柱試験体に空隙が多く、強度の発現が他の材料と比較して緩やかであった。一方 B シリーズでは、細骨材としてホタテ貝殻砂に置換したコンクリートが十分な強度発現を示した。また、ヤング係数の結果から、圧縮強度とヤング係数は、日本建築学会 RC 基準の曲線では 1 日強度より 28 日強度の方がばらつきが大きい傾向がある。

2.7 引張強度の結果

図 8 の引張強度試験結果から、A シリーズは円柱試験体に空隙が多く認められたため、引張強度の発現が他の材料と比較して緩やかであると推測される。一方 B シリーズでは、細骨材としてホタテ貝殻砂使用したコンクリートが十分な強度発現していることが確認された。C シリーズのホワイトセメントと D シリーズの軽量コンクリート 1 種では、いずれも強度上昇が緩やかであった。

2.8 2 層打ち重ね部付着性能試験結果

図 9 から図 11 に付着試験結果、図 12 から図 13 には付着強度や付着破壊エネルギーを示す。図 9 から図 11 は、A シリーズではオープンタイムの違いによる強度発現の差が見られず、オープンタイムが長いほど強度が低下する傾向があった。オープンタイム 80 分では付着強度が低下し、劣化が顕著だった。C シリーズでは、20 分と 50 分の強度発現に大きな差はなく、80 分では強度が低下し、打ち重ね境界面 (赤) での界面破壊が複数確認されたことが原因と推測される。特に 50 分の強度が最も大きく、80 分が最も小さい結果となった。D シリーズでは、20 分と 80 分で強度発現に大きな差がなく、50 分が最も大きい強度を示したが、骨材の不均一性が強度発現のばらつきの要因と考えられる。図 12 から、A シリーズと D シリーズはオープンタイムの変化に影響を受けにくい一方、B シリーズはオープンタイムが長くなるほどエネルギー発現低下した。C シリーズでは 50 分で最も高いエネルギー発現を示した。図 13 から、20 分と 50 分の条件下で C シリーズが最も高いエネルギー発現を示し、80 分では全体的にエネルギー



写真 1 現場施工 2 層打ち仕上げ PCa 部材パネル



図 1 ホタテ貝殻砂の製造フロー

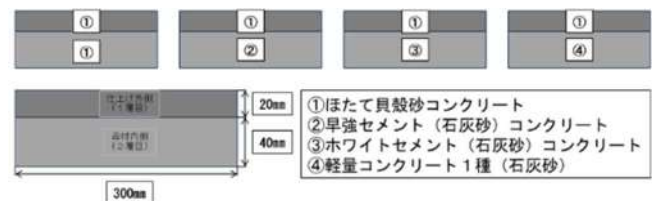


図 2 2 層打ち重ね仕上げ部コンクリートの打ち重ねパターン

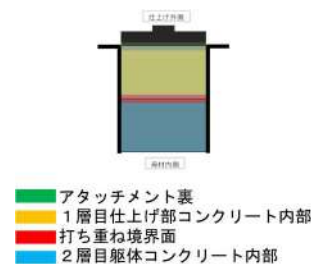


図 3 色分けの凡例

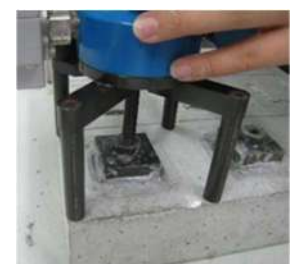


写真 2 付着試験の様子

	ホタテ	早強	ホワイト	軽量
試験体タイル表面				
破断面ごとの色分け				

図 4 各種 2 層打ち重ね仕上げ部破断面図

発現が低下した。総じて、各シリーズの練り作業効率は BDCA の順に向上したが、施工後半にかけてコンクリート内部や打ち重ね界面での破壊が多く確認され、これが強度やエネルギー発現に影響を与えたと考えられる。

2.9 2 層打ち重ね仕上げ部付着界面破壊評価

図 3 に各破断面における色分けの凡例、図 4 に各種コンクリート破断面図、図 14 に付着試験に基づく破断面面積割合 (4 種類比較)、図 15 に付着試験に基づく破断面面積割合 (時間比較) を示す。破断面の色分けは、フィラーアタッチメント裏 (緑)、1 層目仕上げ部コンクリート内部 (黄)、打ち重ね境界面 (赤)、2 層目躯体コンクリート内部 (青) とする。破断面がコンクリート内部で割れる凝集破壊は、コンクリート同士の界面で破断する界面破壊よりも接着状況が良好であることを示す。A シリーズと B シリーズでは、緑や黄色の破壊が多く確認され、これはポリエステル系樹脂接着剤の練り混ぜ時に化学反応不足や塗布量の差異が影響していると考えられる。また、接着表面積を増やす目的で使用したネットが、脱型後完全に除去しきれず引き抜き試験に悪影響を及ぼしたことも推測される。これらの課題は、接着剤の適正な塗布量の設定や、ネットを使用せずコンクリート表面に傷をつける方法などの対策で改善が可能である。一方、C シリーズや D シリーズでは、コンクリート内部 (青) での凝集破壊の割合が高く、コンクリート自体の強度が十分に確保されていることが示唆される。またこのような凝集破壊の多さは、接着状態が良好であることを示す結果と言える。B シリーズは全体的に強度発現が小さく、接着表面積を増やすために使用したネットの影響でばらつきが生じたと推測する。

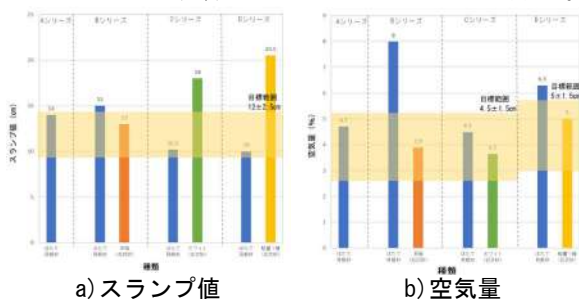


図 5 2 層打ち重ね PCa コンクリート部材-各種コンクリートのフレッシュ性状 (粗骨材かさ容積同等条件+部材工場混和剤量条件)

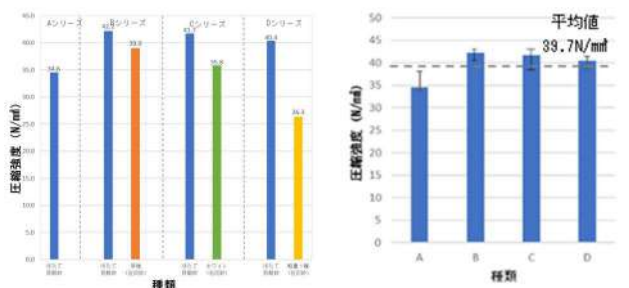


図 6 2 層打ち重ね PCa コンクリート部材-各種コンクリートの 28 日強度と応力ひずみ曲線

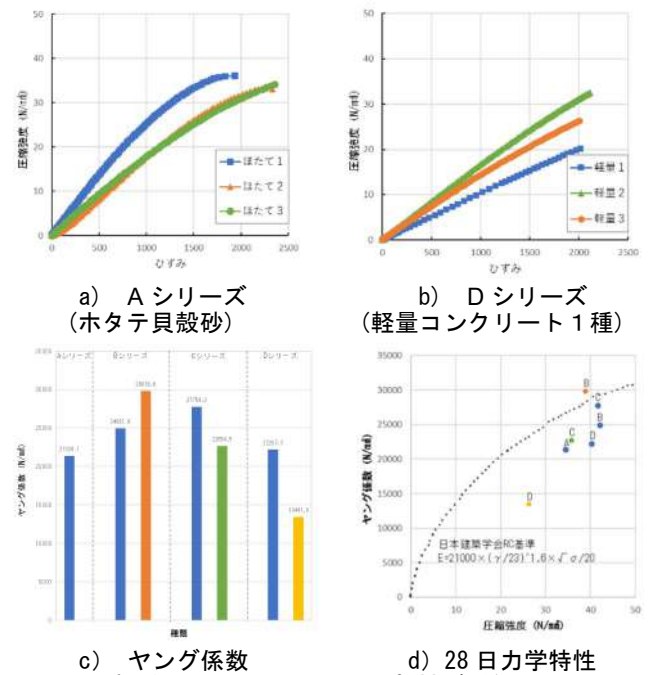


図 7 2 層打ち重ね PCa コンクリート部材-各種コンクリートの圧縮強度とヤング係数

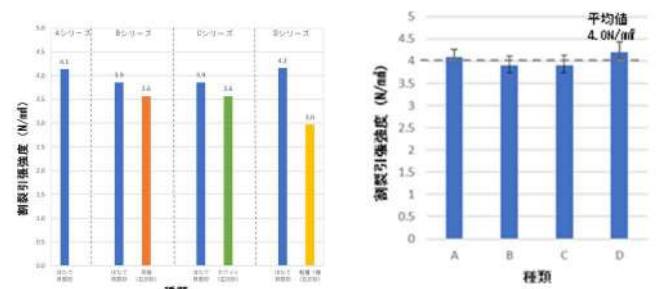


図 8 2 層打ち重ね PCa コンクリート部材-各種コンクリートの引張強度

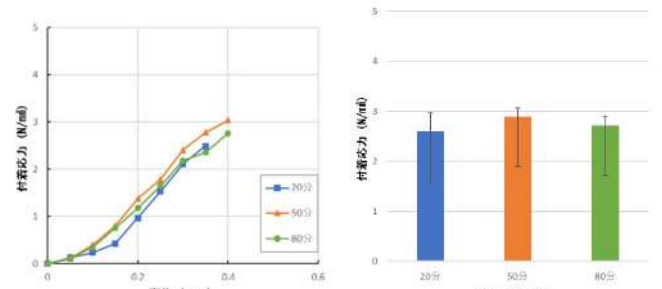


図 9 2 層打ち重ね A シリーズ付着試験結果

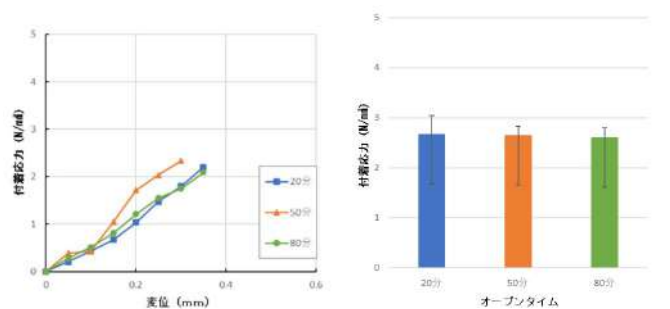


図 10 2 層打ち重ね D シリーズ付着試験結果

3. まとめ

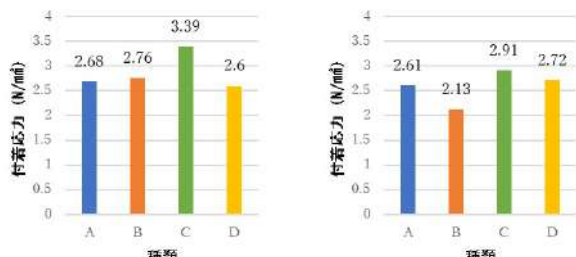
- 1) スランプ値は、材料の練り混ぜ時間や骨材の形状特性によって目標値の範囲からずれる。空気量は、高性能減水剤の添加量や骨材の形状特性の違いが巻き込み空気量に影響を与えると考えられる。密度は、人工軽量骨材は天然骨材と異なり、吸水率などの特性が影響を与える。
- 2) 圧縮強度は、材料特性の時間経過の影響が示唆される。
- 3) 割裂引張強度は、使用する材料や調合の違いが引張強度に与える影響が明らかになった。
- 4) 付着試験において、オープンタイムの管理と施工状態の確保が付着性能の向上に起因する。
- 5) 接着剤の塗布方法や補助剤の使用方法を適切に見直すことで、さらなる付着性能の向上が期待できる。

謝辞

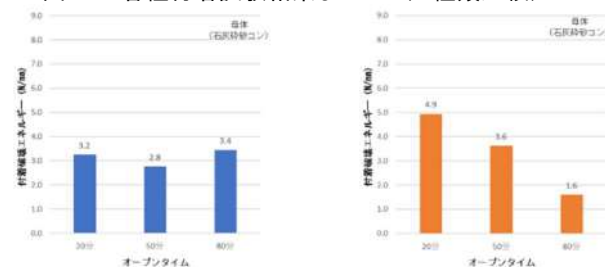
本研究は、高橋カーテンウォール工業株式会社との共同研究であり技術者各位より多大な協力をいただいた。

参考文献

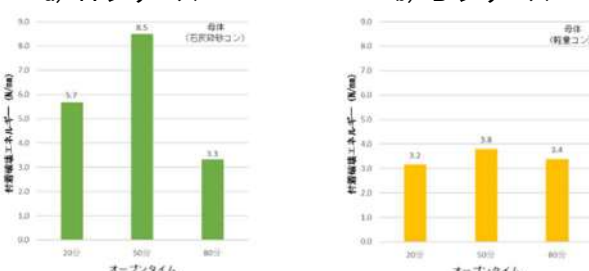
- 1) 上杉ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 8, 第 16 回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium
- 2) 上杉ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 8, 2024 年度日本建築学会
- 3) 上杉ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 9, 第 23 回 先端技術に関する国際シンポジウム (ISAT-23)
- 4) 上杉ら, 炭素固定性を有する海洋生物殻廃棄物を用いた PCa コンクリート部材の開発 その 11~12, 2024 年度日本建築学会関東支部



a) オープンタイム 20 分 b) オープンタイム 80 分
図 11 各種付着試験結果まとめ (4 種類比較)

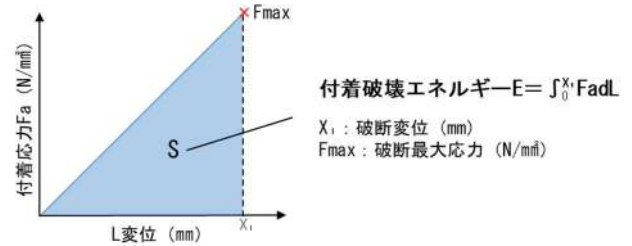


a) A シリーズ b) B シリーズ

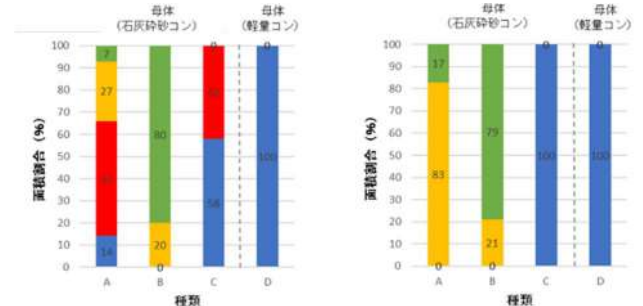


c) C シリーズ d) D シリーズ

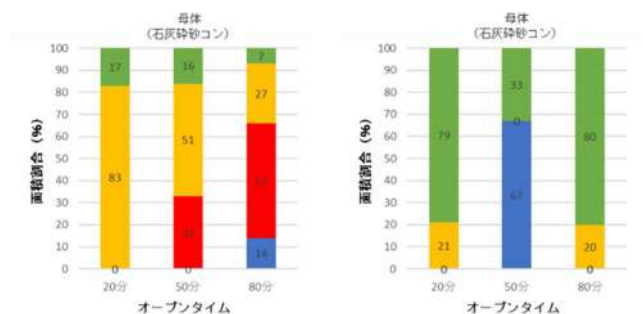
図 12 2 層打重ね付着破壊エネルギー (4 種類比較)



a) 付着破壊エネルギー算出方法

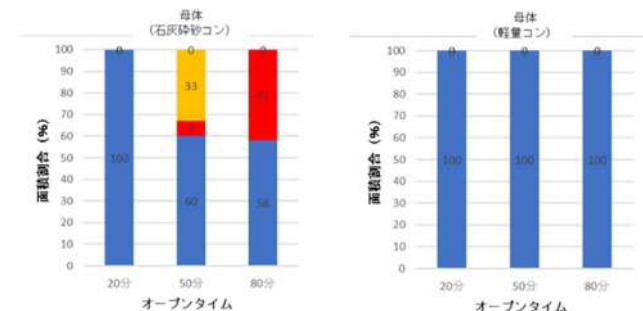


b) オープンタイム 20 分 c) オープンタイム 80 分
図 13 2 層打重ね付着破壊エネルギー (時間比較)



a) A シリーズ

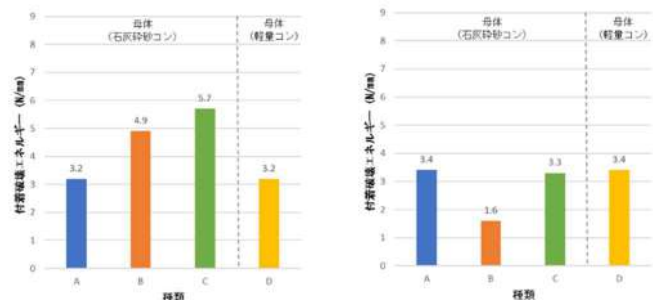
b) B シリーズ



c) C シリーズ

d) D シリーズ

図 14 付着試験に基づく破断界面面積割合 (4 種類比較)



a) オープンタイム 20 分

b) オープンタイム 80 分

図 15 付着試験に基づく破断界面面積割合 (時間比較)