

炭素固定性を有するホタテ貝殻砂コンクリートを用いた模擬壁片面加熱温度変化と耐火残存強度の評価

DB21205 辻 健汰

1.はじめに

現在、北海道では年間約 34 万トンのほたてが水揚げされて、それに伴い約 11 万トンの貝殻が廃棄物として発生している¹⁾³⁾。本研究は、この廃棄物となっているほたて貝殻の炭素固定性に着目し、外壁プレキャストコンクリート(以下 PCa 部材)に、貝殻砂を細骨材として導入したカーボンオフセット建材を開発することを目的として進めている¹⁾⁴⁾。コンクリートは、火災による建物の延焼を防ぐための耐火性能を有する必要がある。

そこで、コンクリート模擬壁体による簡易耐火試験によって、加熱温度変化と表面の観察からほたて貝殻砂コンクリートの耐火性を評価する。また、円柱供試体による残存圧縮強度試験によって、表面のひび割れの観察と圧縮強度からほたて貝殻砂コンクリートの耐火性を評価する。

2.研究概要

2.1 実験の方針

既往の研究その 6、7 で所要の強度と耐久性が確認できた²⁾³⁾。貝殻砂コンクリート調合 BC50/5/12 と、PCa 部材製造に用いる普通コンクリート調合の 2 種類を用いてコンクリートを練り、フレッシュ性状を確認後に簡易耐火試験体を作製して試験を行う。

今回は、含水率試験、圧縮強度試験、引張強度試験、含水状態を考慮した耐火試験および簡易耐火試験、残存圧縮強度試験を行い、ほたて貝殻砂コンクリートと普通コンクリートの比較を通して、貝殻砂コンクリートが外壁 PCa 部材としての耐火性能を満たすことができるかを確認する。

2.2 使用材料およびコンクリート調合

表 1 に使用材料と、表 2 にコンクリート実施調合を示す。コンクリート調合時の使用材料は、水・セメント・細骨材・粗骨材・混和材・化学混和剤である。今回の試験で使用するコンクリート調合は、既往の研究その 6、7 で強度と耐久性が確認できた。貝殻砂置換率 50%の BC50/5/12 と、普通コンクリート調合 BC0/0 の 2 種類である。

2.3 試験項目および内容

表 3 に試験項目および内容を示す。図 1 に円柱供試体による含水率試験および含水状態を考慮した耐火試験の流れを示す。塩ビ管(内径 10cm×高さ 13cm)にほたて貝殻砂コンクリートと普通コンクリートを打設する。その後、全面をラップで覆い、28 日間封かん養生を行う。

表 1 使用材料

	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
細骨材	Ls	鳥形山石灰石砕砂	表乾密度 2.65g/cm ³
	Hbs	ほたて貝殻砂	表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	Lg	鳥形山石灰石砕石	表乾密度 2.65g/cm ³
混和材	Sp	シリカフューム	密度 2.2g/cm ³
化学混和剤	Ad	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE剤	天然樹脂酸塩

表 2 コンクリート実施調合

調合	単位量 (kg/m ³)							
	C	W	Ls	Hbs(%)	Lg	Sp	Ad(C・)	AE(C・)
BC50/5/12	356	168	403	399(12%)	976	18	2.5(0.7%)	0.71(0.2%)
BC0/0	356	160	849	—	976	0	1.1(0.3%)	0.71(0.2%)

備考) Hbsの()内は、0.3mm以下の微粉末混入率を示す。W/B=0.45で一定とする。B=C+Sp

表 3 試験項目および内容

分類	試験項目	方法および内容
円柱供試体	コンクリート練り	コンクリートの調合は、実用化最優先候補のBC50/5/12および一般BC0/0。なお、試験練りに使用するミキサーは強制二軸ミキサー。表2参照 調合:BC50/5/12, BC0/0
	コンクリート打設 (図1参照)	作製する試験体は、円柱供試体。換気用塩ビ管(内径10cm・高さ13cm,6本)に直接コンクリート打設。24時間の封かん養生後に全面をラップで覆い、28日間封かん養生。
	コンクリートの含水率(%)	塩ビ管に打設した円柱供試体の初期の質量を測定。次に塩ビ管ごと供試体を乾燥室へ入れ、数時間ごとに質量を測定。質量方式の公式を元に含水率を算出。
	コンクリートの含水状態を考慮した耐火試験 (図6、7参照)	完成したコンクリート供試体を電気炉にセット、ISO834に準拠して、30分あるいは1時間耐火での温度上昇曲線に合うよう実施。試験開始から60分後ひび割れを観察し、耐火性能を検証。耐火試験後、残存強度試験を実施。
	コンクリートの圧縮強度試験 (図4参照)	ブラモールド(内径10cm・高さ20cm,6本)にコンクリートを打設し、翌日に脱型を行い、28日間封かん養生。その後、アムスラー試験機で円柱供試体の上下端面に圧力を加え、圧縮強度を確認。
角形供試体	残存圧縮強度試験(図12参照)	耐火試験後のコンクリートの強度を調べるため、アンボンドキャッピングにコンクリートをはめ、アムスラー試験機に円柱供試体をセットし測定。
	コンクリート練り	コンクリートの調合表を参照し実施。
	コンクリート打設	型枠を用意しコンクリートを打設。28日間封かん養生を行った後、脱型。(W19cm・D30cm・H5cm)の角形供試体を作製。
	コンクリートの含水率(%) (図5参照)	型枠から取り出し角形供試体の初期の質量を測定。乾燥器に入れ、乾燥質量が変化しなくなるまで、測定間隔も様子をしながら、養生と測定の繰り返し(1時間から2-3日)。質量方式の公式を元に含水率を算出。
円柱供試体	コンクリートの簡易耐火試験 (図8、9参照)	熱電対K型タイプを角形供試体の表面、内部2.5cm、4cm、表面に取り付け固定。熱電対K型タイプを取り付けた角形供試体を、広い面を内側に向けて乗せる。熱電対を通すため電気ドリルで角形供試体を表面(S)、裏面(B)、半分以上(M1)、半分以上(M2)の4か所に穴をあける。その後熱電対を角形供試体に通す。熱を逃がさないためにグラスウールで隙間を埋めて固定。ドアを開けたまま一面加熱して、耐火性を検証。

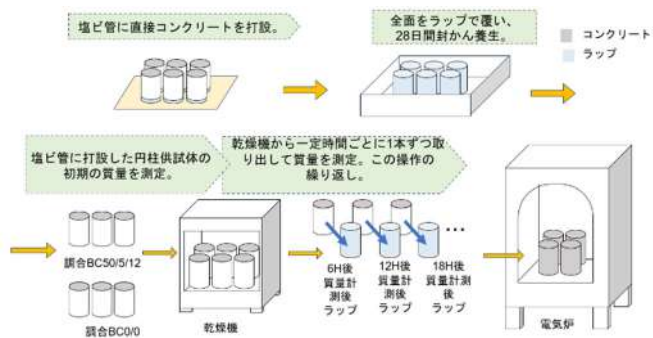


図 1 含水率試験および含水状態を考慮した耐火試験の流れ

含水率を算出するために、封かん養生後と乾燥機での乾燥時間ごとの円柱供試体の質量を測定する。

図2に角形供試体による含水率試験および簡易耐火試験の流れを示す。含水率試験では、型枠からコンクリートを取り出し、コンクリートの初期の質量を測定する。コンクリートの質量の変化がなくなるまで、乾燥と測定を継続する。簡易耐火試験では、熱電対 K 型タイプを角形供試体の表面、内部 2.5cm、4cm、裏面に水平に並ぶように取り付ける。熱電対 K 型タイプを計測器に接続し、電気炉の電源を ON にする。ドアを開けたまま一面加熱を行い、60 分後にひび割れを観察し、耐火性を検証する。

2.4 コンクリートのフレッシュ性状

図3にフレッシュ試験結果を示す。空気量とスランプの測定を行った結果、空気量は BC50/5/12 が 5.0%、BC0/0 が 5.2% となり、スランプは BC50/5/12 が 5.0cm、BC0/0 が 6.5cm となった。今回は、薄い模擬壁による片面試験で上下方向の物性変動を抑制するために、工場での部材製造条件の最小程度の混和剤量による硬練り状態とした。結果、スランプは想定した 12cm 範囲外となったが打設上問題は生じなかった。

2.5 コンクリートの力学特性

コンクリートの力学特性を確認するため、圧縮強度試験と引張強度試験を行う。試験結果は図4に示す。試験結果より BC50/5/12 と BC0/0 の強度はほぼ同等と考えられる。

2.6 角形供試体と円柱供試体の含水率試験

角形供試体(BC50/5/12 1 個、BC0/0 1 個)と円柱供試体(BC50/5/12 2 本、BC0/0 2 本)の含水率試験を行った。角形供試体と円柱供試体の質量を測定し、乾燥機に入れてから数時間ごとに供試体を取り出し質量を測定する。この操作を含水率の初期値が 2-3% になるまで行う。含水率算出公式は、含水率 (%) = (乾燥前質量 - 乾燥後質量) / (乾燥後質量 × 100) を用いた。BC50/5/12、BC0/0 どちらも含水率 0% と 2% の円柱供試体を 2 本ずつ作製した。また、含水率 0% の角形供試体(BC50/5/12 1 個、BC0/0 1 個)を作製した。

図5 a)-b)に角形供試体の含水率試験の結果を示す。含水率が 0% になる質量変化がなくなるまでの時間は、角形供試体を乾燥機に入れてから約 250 時間後となった。

2.7 含水状態を考慮した耐火試験

含水状態を考慮した耐火試験を行った。耐火試験時の様子を図6に示す。対象となる試験体は BC50/5/12(含水率 0%、2%)、BC0/0(含水率 0%、2%)である。耐火試験後の円柱供試体の様子を図7に示す。追加で、水中養生で吸水させ含水率が 3% になる円柱供試体(BC50/5/12 1 本、BC0/0 1 本)を作製した後、耐火試験を再度行った。電気炉内温度が約 800℃ に上昇するまでに約 170-190 分を要した。これは炉内が広がったことが考えられる。結果として、含水率が 0%、2%、3% の円柱供試体は、いずれも爆裂しなかった。電気炉内の温度が上昇しても、コンクリート全体に熱が伝わり温度が上昇するまでに

時間を要したためである。つまりコンクリートの熱容量が大きいことに影響していると言える。

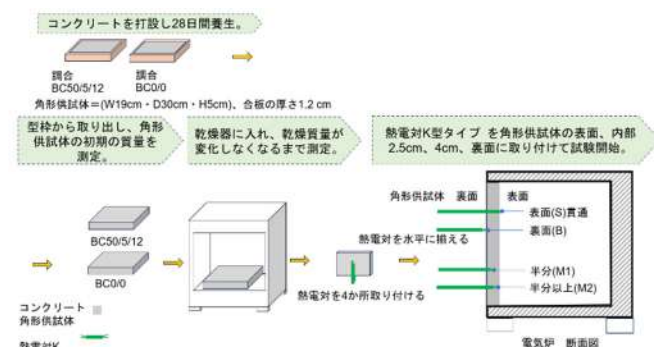


図2 含水率試験および簡易耐火試験の流れ

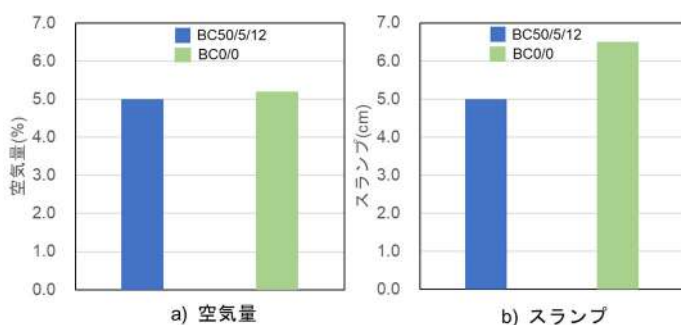


図3 フレッシュ試験結果

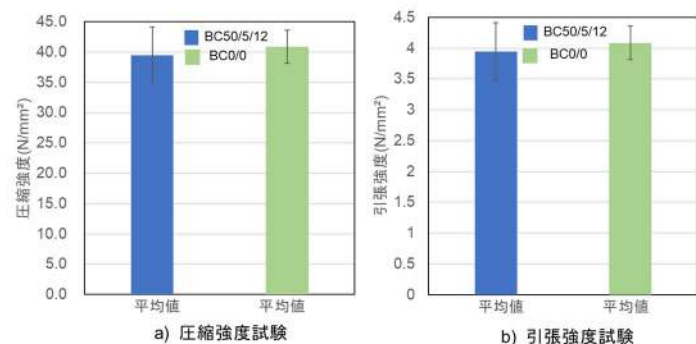


図4 強度試験平均結果(材齢 28 日強度)

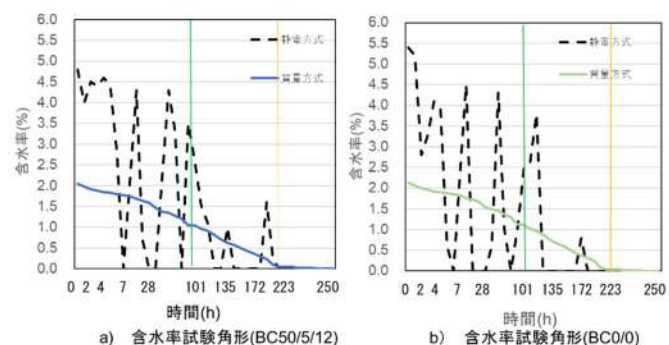


図5 角型供試体の含水率試験結果

2.8 コンクリート模擬壁体の簡易耐火試験

模擬壁体として作製した角形供試体の加熱による温度変化を見るために、熱電対を取り付けデータログに接続した⁵⁾。熱電対の取り付け箇所は、貫通した表面部分(S)、半分穴をあけた部分(M1)、少し穴をあけた裏面部分(B)、半分以上穴をあけた部分(M2)の4カ所とした。簡易耐火試験で BC50/5/12 と BC0/0 を電気炉に入れ加熱し、温度を 700-800℃まで上げて測定した。簡易耐火試験の様子を図 8、温度変化のグラフを図 9 に示す。結果として、約 90 分で S は約 800℃、M1 M2 は約 100-200℃、B は約 100℃まで上昇した。

図 9 のグラフより、BC50/5/12 の方が BC0/0 より S の温度の変化が僅かに早いことがわかる。また、裏面の奥行方向に対しては、双方で特段に熱伝達の速度に違いはなく同様であった。これは、コンクリートの熱容量が大きい特性により影響したと考える。また、簡易耐火試験後の角形供試体のひび割れの様子を観察したところ、BC50/5/12 の方が BC0/0 より僅かにひび割れが多いことがわかった。

2.9 円柱供試体のひび割れ面積

含水状態を考慮した耐火試験後の円柱供試体(BC50/5/12、BC0/0)のひび割れ部分の画像解析を解析ソフト(ImageJ)で行った。赤線で引いた画像解析図を図 11 に示す。ひび割れ画像解析図では、ひび割れ 0.2mm 以上程度の有害なひび割れに着目した。また、図 10 に円柱供試体のひび割れの様子と面積の割合を示す。ひび割れ部分の面積の算出方法は、解析ソフト(ImageJ)を用いた。0.2mm 以上程度のひび割れ部分をすべて赤線で引き、赤線部分の面積から面積割合を算出した。

図 10 より、円柱供試体のひび割れの様子は、BC50/5/12 と BC0/0 どちらも含水率が高いほどひび割れが多い傾向があった。図 10c)より、ひび割れ面積割合は、BC50/5/12 の方が BC0/0 より僅かに多いことが分かった。

2.10 残存圧縮強度試験

含水状態を考慮した耐火試験で、BC50/5/12 と BC0/0 のどちらにもひび割れが生じていることは確認できたが、供試体の内部損傷における材料強度は判明しなかった。そこで、耐火試験後の円柱供試体の残存圧縮強度を調査した。

残存圧縮強度試験では、含水状態を考慮した耐火試験後の円柱供試体(BC50/5/12、BC0/0)にアンボンドキャッピングをはめ込み、アムスラー試験機で荷重をかけて強度を読み取った。図 12 に残存圧縮強度試験結果を示す。残存圧縮強度試験の結果、BC50/5/12 は含水率が高いほど強度は大きい、BC0/0 は含水率が高いほど強度は小さい。BC50/5/12 は含水率 0%、2%、3%のいずれも材齢 28 日強度と比較して抵抗性が大きくなったが、その原因は明確でなく今後確認する。圧縮後の形状は、円柱の形を保持していた。BC0/0 は含水率 0%、2%、3%のいずれもいずれも材齢 28 日強度と比較して抵抗性が半減した。圧縮後の形状は、円柱の原形がなくなった。

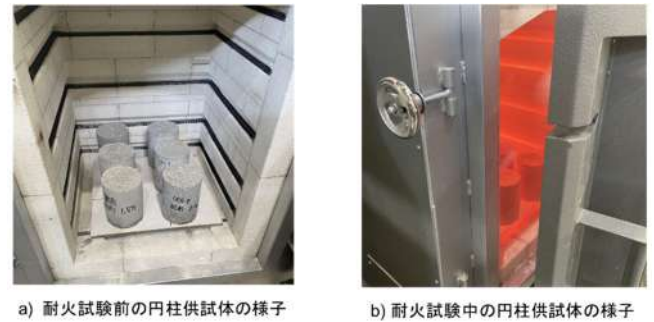


図 6 耐火試験時の円柱供試体の様子

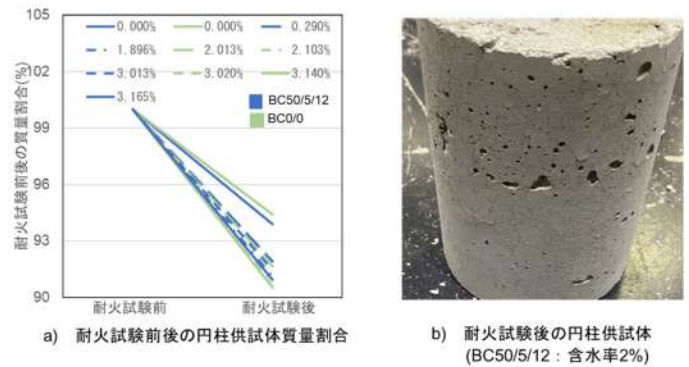


図 7 含水状態を考慮した耐火試験

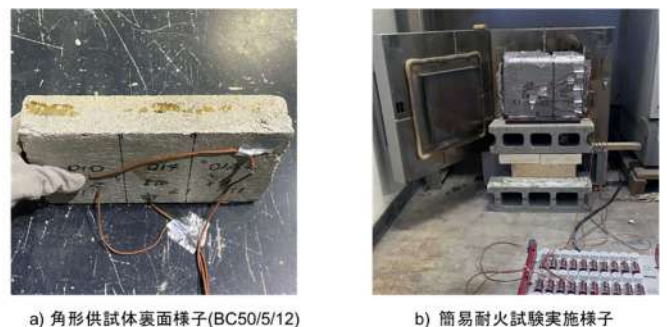


図 8 簡易耐火試験時の角形供試体様子

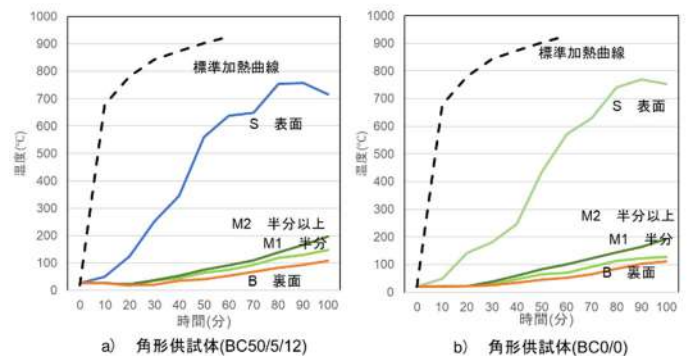


図 9 簡易耐火試験時の温度変化

3. まとめ

- 1) 含水率が 0%、2%、3%の円柱供試体による耐火試験で、BC50/5/12、BC0/0 とともに爆裂しなかったことから、いずれも十分な耐火性を有していると考えられる。
- 2) BC50/5/12、BC0/0 とともに爆裂しない理由として、電気炉内の広さとコンクリート熱容量の大きさにより温度上昇に時間を要したことが考えられる。
- 3) コンクリート模擬壁体の簡易耐火試験では、BC50/5/12 の方がBC0/0より表面部分(S)の温度の変化が僅かに早い、裏面の奥行方向に対しては、双方で特段に熱伝達の速度に違いはなく同様であった。
- 4) 強度試験結果と耐火試験後の残存強度試験結果を比較して、BC50/5/12 は耐火試験後の残存強度の方が材齢 28 日強度より抵抗性が大きく強度が増した。一方、BC0/0 は耐火試験後の残存強度の方が材齢 28 日強度より小さい結果となった。
- 5) 円柱供試体のひび割れの様子は BC50/5/12 と BC0/0 どちらも含水率が高いほどひび割れが高い傾向があった。なお、ひび割れ面積割合は、BC50/5/12 の方が BC0/0 より僅かに多いことが分かった。
- 6) 以上のことから、貝殻砂コンクリート BC50/5/12 は普通コンクリート BC0/0 と比較して、加熱によるひび割れの発生はやや多く見られたが、残存圧縮強度の抵抗性は大きく、ほぼ同等の耐火性能を有していると考えられる。

謝辞

本研究は、工学院大学と高橋カーテンウォール工業株式会社株式会社の共同研究であり、関係者各位に多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 小室ら、炭素固定性を有する海洋生物殻を混入したモルタルの基礎力学特性, 日本建築学会技術報告集, 2011 年 6 月
- 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) 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 7 2023 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2024 年 3 月
- 4) 辻ら、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 10 コンクリート模擬壁体における耐火性の検討, 2024 年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2025 年 3 月
- 5) 竹内ら、簡易耐火試験による超強度コンクリート爆裂対策の検討, コンクリート工学年論文集, 2012 年 6 月

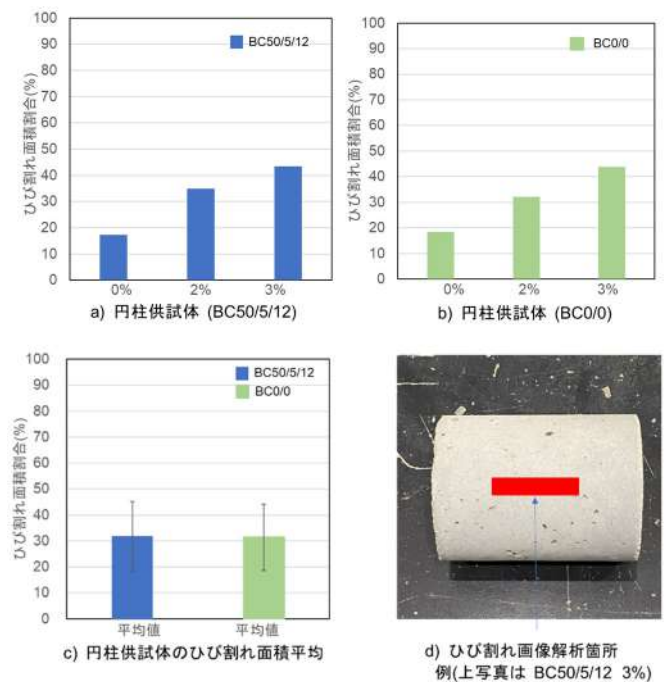


図 10 円柱供試体のひび割れ様子と面積割合

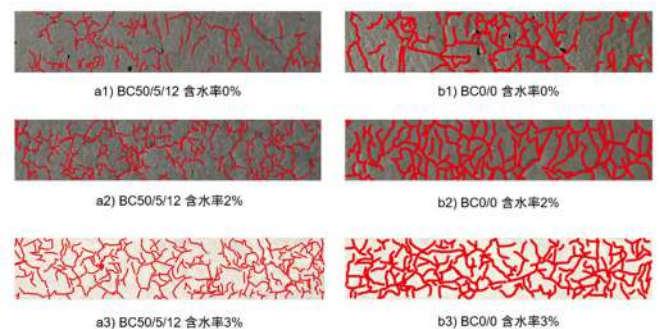


図 11 円柱供試体ひび割れ画像解析図

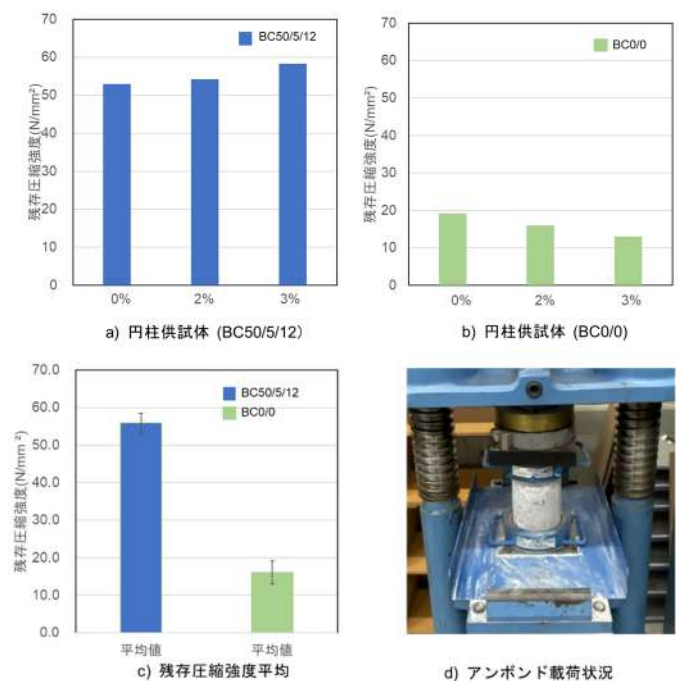


図 12 残存圧縮強度試験結果