

炭素固定性を有する各種ほたて貝殻砂を用いたモルタル・コンクリートの
フレッシュ性状・力学特性・耐久性および外観防汚効果の検討

DB19135 佐々木亮人

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いるが、それに伴い約 13 万トンの貝殻が廃棄物として発生していることが明らかになっている¹⁾。本研究では、ほたて貝殻の持つ炭素固定性¹⁾に着目し、コンクリート材料の細骨材をほたて貝殻に置換した PCa コンクリート部材の開発を目指す。ほたて貝殻砂(記号 Hs)を使用したコンクリートの耐久性と、外観防汚効果を評価し、実施工を想定して生じる課題に関して検討する。また、低コストの貝殻砂を大規模設備で量産が可能な、北海道東部にあるもう一つの製造会社からほたて貝殻砂(記号 Hbs)を入手して、これまでと同様の実験を行い、コンクリート用の細骨材として使用できるかを検証する。

2. 研究概要

2.1 実験の方針(研究1・2)

研究1では、事前研究²⁾よりほたて貝殻砂で置換したモルタルはほたて貝殻砂置換率の増加に伴い流動性が下がり、空気量が増大した。そこにシリカフュームを加えることで、流動性と空気量の改善が見られることがわかったため、それらのモルタル調合を元に調合したコンクリートを使用し、耐久性評価と外観色彩変化について試験を行い、外壁PCaカーテンウォールの要求性能と貝殻砂による防汚効果、意匠性の可能性について検証する。

研究2では、貝殻砂の Hbs を用いたコンクリート試験を行うための事前検討として、Hbs を用いたモルタルによるフレッシュ性状、圧縮強さ、曲げ強さ、せん断強さについて確認する。既往の研究²⁾で、貝殻砂 Hs を使用したモルタルでは、貝殻砂置換率の増加に伴い、流動性が低下して空気量が増大したが、シリカフュームを添加す

ることで、流動性と空気量に改善が見られた。今回は、既往の研究³⁾と同じ調合にHbsを用いて、モルタルによる試験練りを行い、その結果を比較する。

2.2 使用材料および研究方法(研究1・2)

研究1・2について、表1に使用材料を、表2に実験の要因と水準を、表3-1にほたて貝殻砂Hsを使用したコンクリー

表 2 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	早強ポルトランドセメントー定
水結合比	45%ー定
細骨材中のほたて貝殻砂の割合(%)	0,30,50,70%
セメントに対するシリカフュームの割合(%)	0,5,20%
化学混和剤使用量	通常使用量以下で、フレッシュ性状評価
空気量	4.5±1.5%目標(一定混和剤量以下)
スランプ	12±2.5cm 目標(一定混和剤量以下)
コンクリートの種類	ほたて貝殻砂置換割合/シリカフューム添加割合 =(0/0),(30/0),(50/0),(50/5),(70/0),(70/20) 計 6 種類 供試体サイズ (cm):角柱 10×10×40,養生期間:28 日間
中性化試験前養生	水中養生(温度 20±2,材齢 4 週)
屋外暴露試験 供試体設置条件	斜壁表面(45Bw 面):雨水の流化→中, 含水特性→中,プラスト有 斜壁裏面(135Bd 面):雨水の流化→小, 含水特性→小,プラスト有 水平面(180Bw 面):雨水の流化→小, 含水特性→大,プラスト有 垂直面(90Bw,90Nw 面):雨水の流化→大, 含水特性→小,プラスト有

a) コンクリート調合

置換率 CHs/Sp	単位量(kg/m ³)							
	C	W	Ls	Hs	Lg	Sp	Ad(C×)	AE(C×)
C0/0	356	160	849	0	976	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
C30/0	356	160	594	252	976	0	1.068(0.3%)	1.068(0.3%)
C50/0	356	160	425	420	976	0	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
C50/5	356	168	403	399	976	18	2.136(0.6%)	0.712(0.2%)
C70/0	356	160	255	588	976	0	1.78(0.5%)	0.712(0.2%)
C70/20	356	192	204	470	976	71	2.492(0.7%)	0.712(0.2%)

b) 既往の研究²⁾で行ったモルタル調合

置換率 MHs/Sp	単位量(kg/m ³)					
	C	W	Ls	Hs	Sp	Ad(C×)
M0/0	508	228	1498	0	0	1.52(0.3%)
M50/5	573	270	548	641	29	5.73(1.0%)
M70/10	573	283	368	859	57	5.73(1.0%)
M70/20	573	309	327	754	115	8.60(1.5%)

c) 本研究で行ったモルタル調合

置換率 MHs/Sp	単位量(kg/m ³)					
	C	W	Ls	Hs	Sp	Ad(C×)
M0/0	573	257	1365	0	0	1.72(0.3%)
M50/5	573	270	648	641	29	8.60(1.5%)
M70/20	573	309	327	755	115	7.16(1.3%)

表3 コンクリート・モルタル調合

備考) 化学混和剤使用量は通常使用量範囲内にて流動性が見られるまで後添加をしたうえで、空気量・フロー値の比較を行う

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	C	早強ポルトランドセメント (外壁 PCa パネル想定)	密度 3.14g/cm ³
混和材	Sp	シリカフューム	密度 2.2g/cm ³
細骨材	Ls	高知県鳥形山石灰石砕砂	表乾密度 2.65g/cm ³
	Hs	貝殻砂(M シリーズ)	表乾密度 2.62g/cm ³
	Hbs	貝殻砂(BM シリーズ)	表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	Lg	高知県鳥形山石灰石砕石	表乾密度 2.65g/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

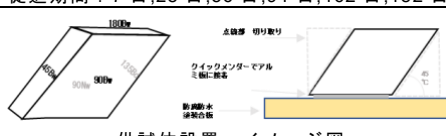
ト調合(Cシリーズ)、表3-2に既往の研究²⁾で、ほたて貝殻砂Hsを使用したモルタル調合(Mシリーズ)を、表3-3にほたて貝殻砂Hbsを使用したモルタル調合(BMシリーズ)を、表4に研究の試験方法と内容を示す。研究1では、Cシリーズコンクリートの中性化深さ、質量減少率、長さ変化率、表面粗さ測定、色差測定を行い、評価する。次に、研究2では、フレッシュモルタルのフロー値、単位容積質量、空気量、塩化物量と、硬化モルタルの圧縮強さ、曲

げ強さ、せん断強さを測定し、過去にほたて貝殻砂Hsで行ったモルタル試験練りの結果と比較しながら評価をする。

2.3 貝殻砂コンクリートの促進中性化試験(研究1)

図1に各供試体の中性化深さ特性について、材齢毎の変化を示す。ほたて貝殻砂の置換割合と中性化深さ測定の結果から、ほたて貝殻砂の割合が大きいほど、中性化深さも大きな値がでてくる。基本調合C0/0と比較するとC70/0は約1.8倍の中性化深さとなる。また、同じ割合の

表 4 試験項目と方法及び内容

試験項目	方法および内容
中性化深さ	促進中性化試験 JIS A 1153:コンクリートの促進中性化方法に準じ、湿度 20±2℃、相対湿度(60±5)%,二酸化炭素濃度(5±0.2)%の恒温温室にて中性化促進試験を行う。 中性化深さ測定位置: 間隔は 16mm, 左右 5箇所ずつ 供試体サイズ (cm): 角柱 10 - 10 - 40, 水中養生期間: 28 日間 試験開始日程: 2021 年 11 月 30 日 保存期間: 7 日, 14 日, 28 日, 56 日, 91 日, 162 日, 182 日, 273 日, 364 日
長さ変化試験	コンタクトゲージ方法 JIS A 1129-2:コンクリート及び長さ変化測定方法第 2 部:コンタクトゲージ測定方法に準じ、湿度 20±2℃、相対湿度(60±5)%の恒温温室で保管し、コンクリート供試体の収縮率を測定する。 供試体サイズ (cm): 角柱 10 - 10 - 40 水中養生期間: 28 日間 試験開始日程: 2021 年 11 月 11 日 促進期間: 7 日, 28 日, 56 日, 91 日, 162 日, 182 日
屋外暴露試験	供試体設置方法  ・日照、雨、雪、風などの自然状態における大気環境下で試料を暴露 ・コンクリートプラスト後状態 切断面(切り取り面): 骨材が露呈、プラストにより多少凹凸がある。打ち込み面: 凹凸が目立つ。プラスト有側面: プラストによる凹凸がある。プラスト無側面: 見た目は平坦である。 ・数値: 角度 B: プラスト有 N: プラスト無 w: 雨垂れ有 d: 雨垂れ無 傾き/プラスト有/雨垂れ有無 (45Bd: 45°/プラスト有/雨垂れ無)
表面粗さ測定	表面粗さ測定器 (サーフコム FLEX <JIS B 0651>) を使用し、Ra(μm)を計測。ISO1997 に準拠し、算術平均粗さによって評価する。
色彩測定	JIS Z 8730: 色差計を用いて、L* 値・a* 値・b* 値を計測し、$\Delta L^* \cdot \Delta a^* \cdot \Delta b^*$として表示
モルタルフレッシュ性状	フロー試験(mm) JIS R 5201:セメントの物理試験方法よりフロー値を測定 単位容積質量(g/mm³) JIS A 1116:フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法により単位容積質量を算出 空気量(%) JIS A 1116:フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法および空気量の質量による試験方法により単位容積質量を算出 塩化物イオン量測定 JIS A 5308 では、コンクリートの塩化物含有量により塩化物イオン量を測定。
モルタル力学特性	圧縮強さ(N/mm²) JIS A 1108:フレッシュコンクリートの圧縮試験方法を参照し、円柱供試体(直径 50mm, 高さ 100mm)(材齢 7d, 28d 各 3 本)(20℃封緘養生)を用いて圧縮強度を測定 曲げ強さ(N/mm²) JI S R 5201:セメント物性試験方法に準じ角柱供試体 (40x40x160mm)(材齢 28d 各 3 本)(20℃封緘養生)を用いて、3 線式中央一点載荷方により曲げ強度を計測 せん断強さ(N/mm²) 角柱供試体 (40x40x80mm)(材齢 28d 各 3 本)(20℃封緘養生)に圧縮強さ試験機を用いる。鋼製角柱を使用し、鋼製角柱と凹形鋼に挟んだ角柱供試体を圧縮することで供試体に加重を加え、せん断荷重を測定し、下記に示す計算式からせん断強さを算出

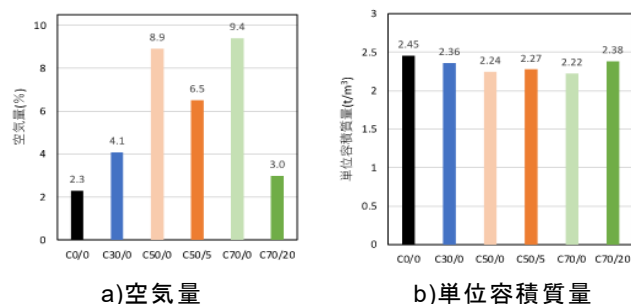


図 1 コンクリートのフレッシュ性状の試験結果

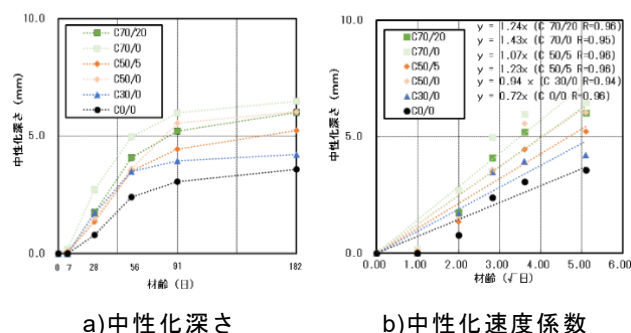
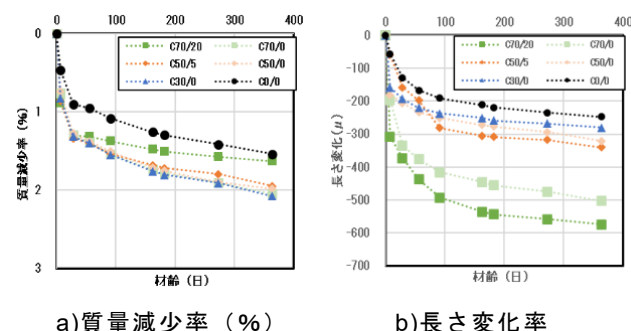
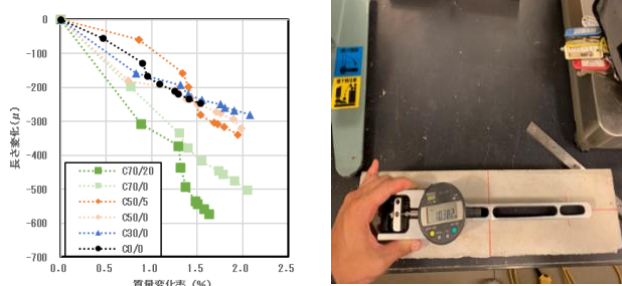


図 2 ほたて貝殻砂置換割合による中性化深さ特性



a)質量減少率 (%) b)長さ変化率



c)長さ質量変化率の相関 d)コンタクトゲージ法

図 3 ほたて貝殻砂コンクリートの収縮特性

たものは中性化が遅く、ほたて貝殻砂置換割合50%のC50/0とC50/5を比較すると、C50/5がシリカフュームにより、約0.77倍に中性化深さが抑制され、ほたて貝殻砂置換割合70%のC70/0とC70/20を比較すると、C70/20がシリカフュームによって、約0.8倍に中性化深さが抑制されることがわかる。シリカフュームをいれることで、見かけ上の空隙を埋めることができるため、二酸化炭素が入りにくくなり、中性化深さに関しても、同じほたて貝殻砂置換割合のものと比較して、小さい値になると考えられる。建築基準法施行令第79条では、鉄筋コンクリートの非耐力壁のかぶり厚さは20mm以上、日本建築学会のJASS5鉄筋コンクリート工事標準仕様書⁴⁾では30mm以上とされており、本研究の結果から、最も中性化深さの大きいC70/0やC70/20の中性化深さ6mmは耐久性上問題ないと言える。

2.4 貝殻砂コンクリート長さ変化試験(研究1)

図2に、各供試体のほたて貝殻砂コンクリートの収縮特性を示す。貝殻砂の置換割合が増加するにつれて質量減少、長さ変化の割合が増大していることがわかる。図2のa)質量減少率(%)からほたて貝殻砂置換割合による質量減少の変化の特徴を考える。C70/0とC70/20を比較すると、シリカフューム添加によって、質量減少率が抑制されていることがわかる。図2のb)長さ変化率から、貝殻砂置換割合70%のC70/0とC70/20の二つを比較する。シリカフューム20%添加のC70/20の長さ変化が各計測値において増大しているとわかる。たて貝殻砂置換割合が増加するほどグラフの値が下り、長さ変化率が増大しているとわかる。図3のc)平均長さ変化率と質量減少率の相関から、C50/5,C70/20はともに質量減少が落ち着いた計

測終盤において、再び大きく収縮している。

2.5 貝殻砂コンクリートの屋外暴露試験

図3のa),b)に供試体ブラスト後の色差測定の結果、c)~h)にブラスト後の供試体毎に行った算術表面粗さ測定値をそれぞれ示す。図3のa)L*値による明暗から、C0/0,C30/0,C50/0,C70/0とほたて貝殻砂の置換割合の異なる供試体のL*値を比較すると、ほたて貝殻砂置換割合が増加するにつれてL*値が増加している。これは、石灰石砕砂からほたて貝殻砂に置換したことで、ほたて貝殻砂の持つ白色性がコンクリート供試体に反映されたためと考えられる。また、シリカフュームの添加割合について比較する。C70/0とC70/20のL*値を比較すると、C70/20がC70/0よりもL*値が低いことが分かる。図4のb)a*値b*値による色相より、シリカフュームを添加していないものと比較して、シリカフュームの添加されているC50/5,C70/20においては、他の供試体よりもa*値、b*値ともに低い値とであるため、シリカフュームの添加によって色相が寒色に寄っているという傾向が掴める。

2.6 貝殻砂モルタルのフレッシュ性状

図5にほたて貝殻砂Hbsを使用したモルタルのフレッシュ性状試験の結果を示す。a)フロー試験の結果、ほたて貝殻砂Hbsを使用した調合BMシリーズでは、貝殻砂の置換率に関係なく、15打前後のフロー値を結んだ直線の傾きは同等である。次にBMシリーズとMシリーズで、ほたて貝殻砂の置換割合が同等のものどうしを比較すると、BM50/5やBM70/20の方が、M50/5やM70/20よりも傾きが大きく、BMシリーズの方が高い流動性を有している。b)塩化物量は、ほたて貝殻砂Hbsの置換率が大きいほど増えているが、BM70/20で0.02kg/m³程度であり、JIS A 5308レディーミクストコンクリートの規定値である0.3kg/m³と比べても小さい値であるため、問題のない範囲である。c)単位容積質量とd)空気量の結果は、Mシリーズと比較してBMシリーズの方が、単位容積質量が小さく、空気量が多い。

2.7 貝殻砂モルタルの力学特性

図6に硬化モルタルの試験結果を示す。M70/20については過去の試験データが無いため、条件に近いM70/10と比較している。a)圧縮強さは、材齢7日と28日のいずれにおいても、BM50/5の方がM50/5よりも低く、同様にBM70/20の方がM70/10よりも低い。試験結果から、空気量と圧縮強度に相関があると考えられ、空気量の最も大きいBM50/5の圧縮強度が最も低く、次いで空気量が2番目に多いBM70/20の圧縮強度が低い結果となる。b)曲げ強さは、ほたて貝殻砂の置換により数値は伸びており、ほたて貝殻砂とシリカフュームを入れていないBM0/0と比較して、BM50/5,BM70/20はともに約1.1倍の値を示した。一方、Mシリーズと比較してBMシリーズは曲げ強さが小さい値で

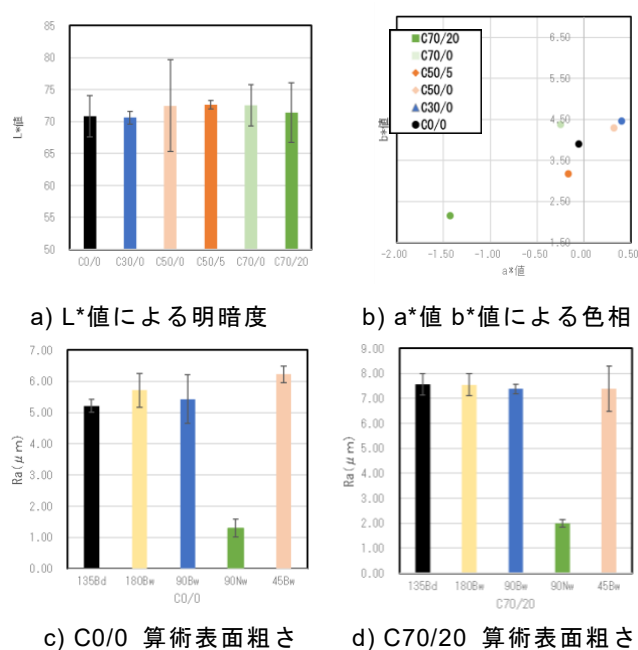


図4 ブラスト面の初期の色差と粗さ評価(2022 施工時)

ある。c)せん断強さは、基本調合のBM0/0と比較して、BM50/5は約0.6倍、BM70/20は約 0.75倍の数値が得られた。これは圧縮強さや単位容積質量に表れている傾向と同様の結果であり、PCa部材へのほたて貝殻砂置換コンクリートの実用化に向けては適切な空気量を得るための検討が必要であると考えられる。

3. まとめ

- 1) 貝殻砂コンクリートの促進中性化試験の結果、ほたて貝殻砂の置換割合が大きいほど中性化深さが大きく、基本調合と比較して、貝殻砂を70%入れたものは約1.8倍だが、シリカフューム20%を併用することで2割近く改善され、中性化深さは約6mmとである。
- 2) 長さ変化率は、ほたて貝殻砂の置換割合が増加するにつれて値が大きい。また、シリカフュームを併用したものは、無添加のものより値が大きくなり、貝殻砂70%にシリカフュームを20%入れた調合では、 600×10^{-6} 近い値を示した。
- 3) 耐久性上有効な仕上がりがない、外壁PCaカーテンウォール製品の最低かぶり厚さが30mm以上である、日本建築学会JASS5などで規定のある 800×10^{-6} 以下であることから、使用上問題ない範囲である。
- 4) 長期暴露試験について、初期の色差測定を行った結果、ほたて貝殻砂の置換割合が大きいほど明色を示すが、そこにシリカフュームを添加すると、添加割合が大きくなるにつれて暗色となる。コンクリートはほたて貝殻砂(白色)の置換割合が増加することで、供試体のL*値が増加し、シリカフューム(黒色)の添加割合が増加することで、その供試体のL*値が減少する。
- 5) 貝殻種類の違うモルタルのフレッシュ性状・力学特性から、空気量においてMシリーズと比較してBMシリーズが大きい。力学特性においても、BMシリーズが低い値を示しているために、空気量と相関ある。

謝辞

本研究は、高橋カーテンウォール工業株式会社との共同研究であり、(株)北海道裕雅高柳雅保氏及び技術者各位より多大な協力をいただいた。

参考文献

- 1) 水産系廃棄物の発生状況等、北海道水産林務部水産局水産振興課HP, 2021
- 2) 小室ら、炭素固定性を有する海洋生物殻を用いた

鉄筋コンクリート造建築物のカーボンニュートラル性の検討、日本建築学会技術報告集、第40号、2012

- 3) 高橋、田村ら、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1～3 ほたて貝殻使用モルタルのフレッシュ性状・力学特性、2021年度 日本建築学会関東支部研究報告集、CD-ROM、2022.3
- 4) 日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022

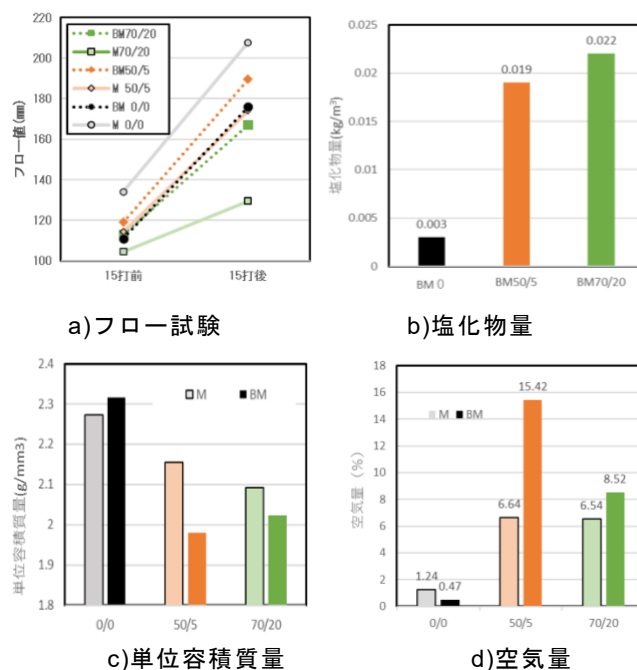


図5 モルタルのフレッシュ性状

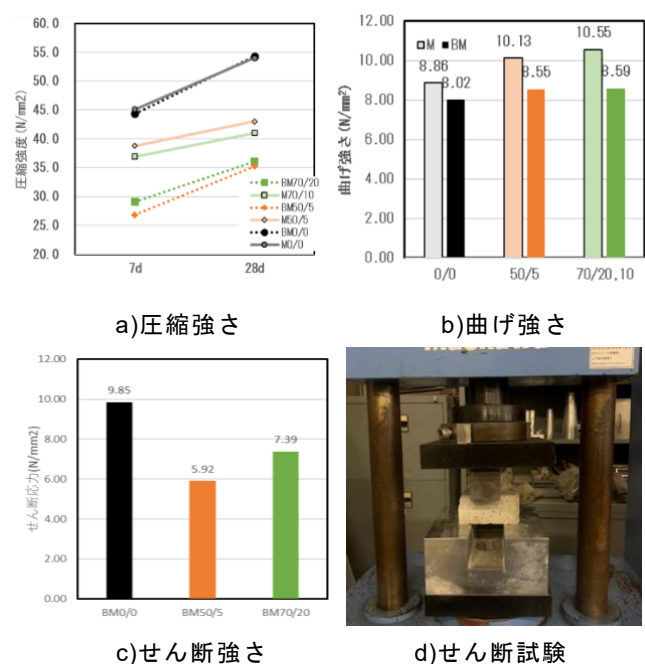


図6 モルタルの力学特性