

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04358

研究課題名(和文)短繊維補強気泡コンクリートの建築構造体への適用

研究課題名(英文)Application of Fibred Cellular Concrete to Architectural Structure

研究代表者

陶山 裕樹 (Suyama, Hiroki)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：20507876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強度増加を目的にW/OPCを0.26～0.30とした短繊維補強気泡コンクリートを検討対象とした。応答曲面を用いて、9～39 MPaの目標圧縮強度(1.3～1.7 g/cm³の密度)に応じて原料コストが最小となる調合を探索した。更に、同調合の供試体で静弾性係数、促進中性化および乾燥収縮を確認し、せん断多質点系モデルを用いたピロティ構造の地震応答解析を通じて気泡コンクリートの構造適用性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、国内の建築分野でガイドライン類が整備されていない事前発泡型気泡コンクリートの構造体利用を目指すものであった。同コンクリートは、建物重量の軽減、天然骨材のリデュースおよび工事歩掛の削減などの可能性を有し、従来の軽量骨材コンクリートと比較しても容易かつ安価に製造できるため、その市場が潜在的に求められていると考えられる。本研究の成果として得られた原料コストが最小化となる調合や基礎物性は、今後、事前発泡型気泡コンクリートの構造体利用を推し進めていくうえで基礎的知見として活用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：This paper examines mix-proportion, the physical properties and structural applicability on fiber reinforced cellular concrete with water cement ratios of 0.26 to 0.30. Response surfaces were used to search for mix-proportions that minimized raw material costs over a range of the target compressive strength from 9 to 39 MPa / the target density from 1.3 to 1.7 g/cm³. Furthermore, the static elastic modulus, the accelerated carbonation, and the drying shrinkage on the mix-proportions were investigated, and structural applicability of cellular concrete was discussed through the seismic response analysis on buildings with soft first stories using a shear multi-mass model.

研究分野：建築材料・施工

キーワード：気泡コンクリート 調合最適化 応答曲面 圧縮強度 中性化 乾燥収縮 地震応答解析

1. 研究開始当初の背景

軽量コンクリートは建築物の軽量化に資する材料である。国内で一般的な軽量コンクリートは、ALCおよび軽量骨材コンクリートである。ALCがプレキャスト建材として広く流通している一方、ほぼ同じ発泡機構で現場打ちされる Thermo-Con は、1950年代に技術導入されて以降、現時点で殆ど利用されていない。軽量骨材コンクリートに関しては、軽量骨材のサイロの確保やコンベアの改修などが必要になるため、出荷できる生コン工場が限定的なのが実状であり、供給体制が全国をカバーするに至っていない。

本研究では現場打ち可能な事前発泡型気泡コンクリートを検討対象とした。事前発泡型気泡コンクリートは、国内ではエアミルクやエアモルタルなどの名称で呼ばれ、打込み前に AE コンクリートより多く空気が導入されたセメント系硬化体を指す。比較的低い圧縮強度(1~5 MPa)を達成するように調合され、主に土木分野で充填材やトンネル用裏込め材などに利用されている。気泡コンクリートの長所は、普通コンクリートと比較して、①軽量であるため建築物の固定荷重および建設時の運搬コストを低減でき、②骨材を空気と置換するような調合となるため天然骨材の消費を削減でき、③副次的に自己充填性を有するためコンクリート工事の歩掛を削減できる点にある。また、断熱性、耐火性および吸音性にも優れることが先行研究によって報告されている。軽量骨材コンクリートと比較した場合、軽量骨材を使用しないため、生コン工場の従来設備で容易に製造できる点と原料コストにおいて優位といえる。一方、気泡コンクリートの短所は、普通コンクリートと比較して圧縮強度が低く、乾燥収縮が大きい点にある。これらの短所を根拠に、国内の多くの技術者および研究者は、気泡コンクリートを建築構造体に利用することが不適切と考えている。しかしながら、一部の研究者はその短所が改善できないほど致命的な問題と考えていない。現に海外では、2005年以降、密度 1.0~1.6 程度の気泡コンクリート (Cellular concrete, Foam concrete) を建築構造体に適用することを試みた論文の発表数が顕著に増加している。

2. 研究の目的

ACI 523 では、気泡コンクリートの水セメント比 (W/OPC) を 0.45~0.60 の範囲内で設定することが推奨されている。これに対し本研究では、元来低い圧縮強度の増強を目的に、W/OPC を 0.30~0.26 (OPC/W を 3.3~3.9) とした短繊維補強気泡コンクリートを検討対象に選定した。低 W/OPC 領域における気泡コンクリートの基準調合を確立する端緒として、先ず、原料コストを最小化する調合を検討した。次に、得られた調合で気泡コンクリート供試体を作成し、その圧縮強度、静弾性係数、促進中性化および乾燥収縮を明らかにした。更に、気泡コンクリートの建築構造への適用性として、せん断多質点系モデルを用いたピロティ構造の地震応答解析を通じて耐震性能を検討した。

3. 研究の方法

(経済的調合の探索)

研究対象とする気泡コンクリートの圧縮強度(材齢 28 日)の応答曲面を、実験計画法に基づく実験を通じて作成した。このときの実験因子は、OPC/W、目標空気量(全体の体積に占める割合)、細骨材量(固液中の体積に占める割合)および短繊維量(固液中の体積に占める割合)の4つとした。2⁴の部分実施要因計画に 4 x 2 + 7 の軸上点および中心点の5回繰返しを加えた中心複合計画(全 28 調合)で各実験因子の水準を割り付けた。供試体の養生は軽量コンクリート向けの ASTM C495 に、圧縮強度試験は JIS A 1108/ASTM C495 に準拠して実施した。

得られた応答曲面を用いて、目標強度および目標密度の水準毎に、原料コストが最小となる調合を探索した。このときの探索範囲は、実験因子の水準の-1~+1 の範囲(空気量 0.25~0.45、OPC/W 3.3~3.9、細骨材量 0.375~0.525、短繊維量 0~0.6%)とした。

(基礎物性の把握)

得られた原料コストを最小化する調合に基づいて気泡コンクリートの供試体を作成し、その圧縮強度、促進中性化速度および乾燥収縮ひずみを測定した。促進中性化試験は JIS A 1152, JIS A 1153 に準拠して実施した。乾燥収縮については、材齢 7 日まで湿潤養生した後に、気温 20°C・相対湿度 60%の環境下での収縮ひずみ(コンタクトゲージ方法: JIS A 1129-2)を測定した。

(構造適用性の検討)

ピロティ構造に気泡コンクリートを適用することを想定し、地震応答解析で1層の最大応答変形を検討した。検討対象建物は6階建てかつ7x1スパンの平面形状のRC造建物で、1階をピロティ階(短辺方向が2階以上のすべての構面に耐震壁が配置された純ピロティ構造、長辺方向は純ラーメン構造)とした。普通コンクリートの圧縮強度は 24.0 MPa、密度 2.30 g/cm³、弾性係数係数 22.7 GPa とした。気泡コンクリートの圧縮強度、密度および弾性係数には、本研究で得られた実験値をそのまま代入した。本研究の解析では、短辺方向を検討方向とし、その一構面を対象にせん断多質点系モデルに置換した。各階の荷重変形関係は、せん断余裕度から破壊モードを推定して仮定した。破壊モードは、1階の柱が曲げ破壊型、2階以上の耐震壁がせん断破壊型に分類された。入力地震動は、4つの地震波(1942年 EL CENTRO NS 波(ELC)、1995

年神戸海洋気象台 NS 波 (JMA)、2016 年熊本県益城 EW 波 (MEW)、NS 波 (MNS)) をそれぞれ、地動最大速度 25, 50, 75 cm/s に基準化して用いた。

以上の条件で、全ての階を普通コンクリートのみで構成された「NC 建物」、2 階以上に圧縮強度 15 MPa の気泡コンクリートを使用した「CC 建物 15」、2 階以上に圧縮強度 15 MPa の気泡コンクリートを使用した「CC 建物 23」を解析し、その結果を比較・考察した。

4. 研究成果

(経済的調合の探索)

本研究で得られた応答局面の一例を図 1 に示す。これらの応答曲面に基づいて求められた原料コストを最小化する調合は、OPC/W を 3.3 (探索範囲の最小値)、細骨材量を約 0.4、短繊維量を 0 に固定し、目標強度に応じて空気量を調整するものであった (図 2)。また、同調合は密度をほぼ最小化するものでもあった。

(基礎物性の把握)

目標強度に応じて原料コストが最小化された気泡コンクリート (σ 18~ σ 30、N は普通コンクリート) の圧縮強度を図 3 に示す。養生条件毎の圧縮強度の大小は、概ね ASTM 養生 (気泡コンクリート向けの養生) > 気中養生 > 封緘養生の順であった。この順は湿潤環境下における養生期間が長かった順に一致する。低水セメント比の調合であったため、OPC の水和に必要な水が十分に供給された養生条件下で圧縮強度がより増進したと考察される。

圧縮強度と併せて測定した静弾性係数 (実験値) は、JASS 5 に掲載された式 (普通コンクリート用の式) による計算値より平均して 22% 小さかった。

促進中性化試験で試薬が噴霧された供試体の割裂面を写真 1 に示す。普通コンクリート (N) において促進期間の平方根に比例して中性化が進行する一般的な傾向が確認されたのに対し、気泡コンクリート (σ 24) では、暴露面からの距離に関わらず、測定面の大部分が赤紫色に薄く呈色し、供試体の内部に呈色しない領域がスポット的に発生したこと、割裂面のマイクロスコープ画像 (写真 2) において内部の気泡表面が明らかに呈色していないことが観察された。この現象は、供試体内部の気泡がいわゆる連続空隙となった結果と考えられる。低水セメント比調合のため、中性化が固相の表層に留まって深層に殆ど進行しなかったものの、二酸化炭素が捷路となった連続空隙をすることで供試体の中心部まで供給されたことが考察される。

乾燥収縮期間に伴う収縮率の推移を図 4 に示す。先行研究で指摘された通り、気泡コンクリートの乾燥収縮は大きく、その終局ひずみは AIJ JASS5 の規定値の上限である 800×10^{-6} (計画共用期間の級が長期および超長期の場合) を超過した。気泡コンクリートには、ひび割れ低減のため短繊維や収縮低減剤の混合などの対策が必要なことが示唆

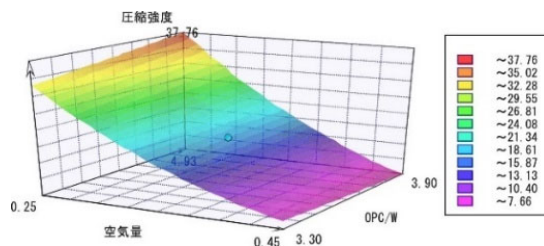


図 1 得られた応答曲面の一例

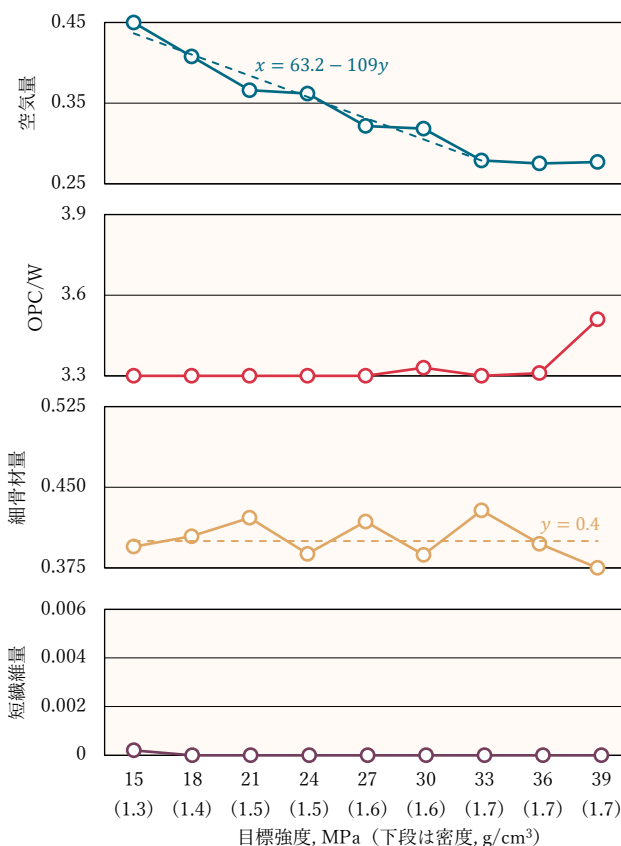


図 2 原料コストを最小化する調合

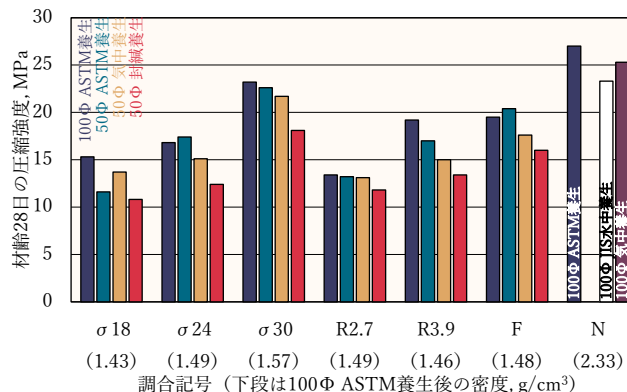


図 3 圧縮強度 (材齢 28 日)

される。

(構造適用性の検討)

各地震動におけるCC建物15およびCC建物23の1階の応答比率を図5に示す。ここで、応答比率とは、各地震波において、NC建物の最大層間変形角に対するCC建物15(またはCC建物23)の最大層間変形角の比である。CC建物15の応答比率(平均値)は、地動最大速度:25 cm/sで0.67(0.57~0.83)、同:50 cm/sで0.74(0.52~0.99)、同:75 cm/sで0.74(0.66~0.91)であった。検討地震動において、CC建物15のほうがNC建物に比べて1階の最大層間変形角が小さくなった。一方、CC建物23の応答比率(平均値)は、地動最大速度:25 cm/sで0.68(0.58~0.84)、同:50 cm/sで0.81(0.53~1.02)、同:75 cm/sで0.78(0.67~0.90)であった。多くの地震動において、CC建物23のほうがNC建物に比べて1階の最大層間変形角が小さくなったものの、その応答低減効果は、CC建物15よりやや小さかった。

一例として、地動最大速度75 cm/sとしたMEWにおける1階の層せん断力係数-層間変形角関係を図6、1階の層間変形角の時刻歴を図7に示す。NC建物の最大層間変形角は8.49%であり、崩壊変形(21.90%)に対して約39%の応答であった。一方、CC建物15の最大層間変形角が5.64%、CC建物23が6.24%となり、崩壊変形(前者:23.26%、後者:23.04%)に対して前者が約24%、後者が約27%の応答であった。すなわち、2階以上に気泡コンクリートを用いることで、1階の層崩壊の危険性を軽減できる可能性があるといえる。

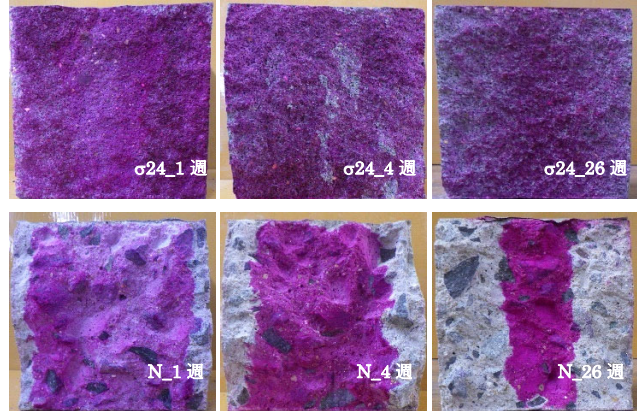


写真1 促進中性化試験における測定面

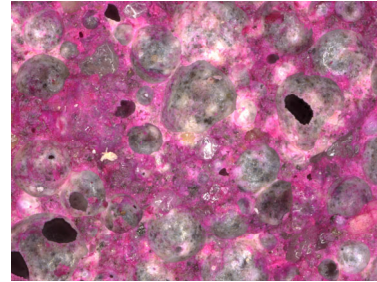


写真2 マイクロスコープ画像(σ24 調査_促進期間8週)

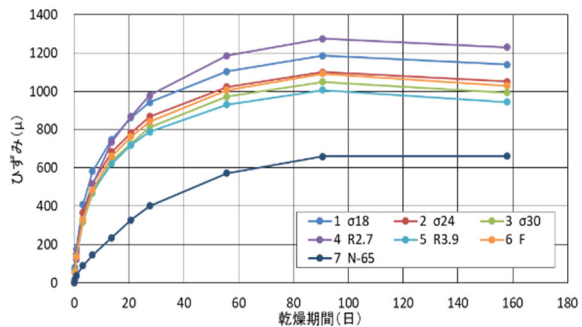


図4 乾燥収縮期間に伴う収縮率の推移

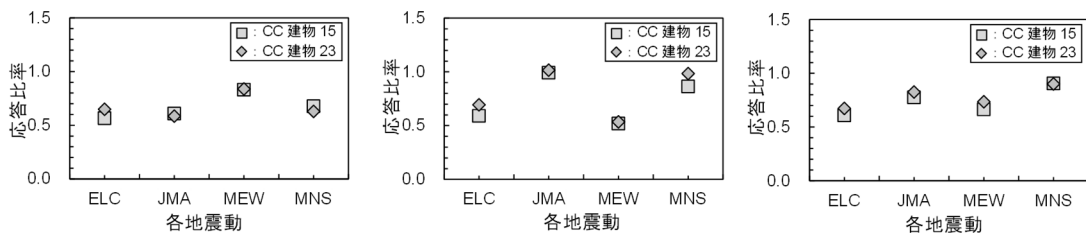


図5 各地震動における1階の応答比率(左から地動最大速度25cm/s, 50cm/s, 75cm/s)

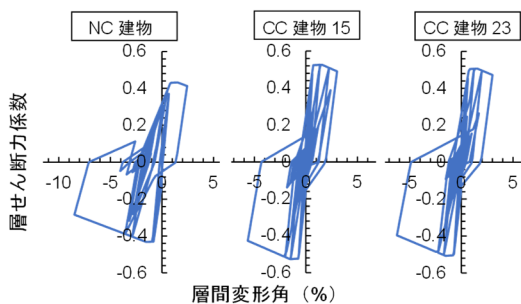


図6 1階の層せん断力係数-層間変形角関係

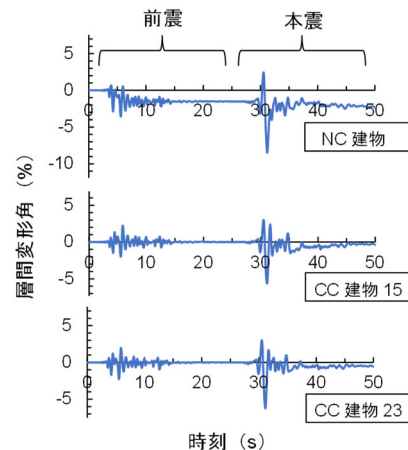


図7 1階の層間変形角の時刻歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘
2. 発表標題 低水セメント気泡コンクリートの原料コスト最適化への応答曲面法の適用
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki KUMO, Hiroki SUYAMA, Koji TAKASU and Hidehiro KOYAMADA
2. 発表標題 Application of response surface methodology to Optimize Material Cost of Cellular Concrete with Low Water Cement Ratio
3. 学会等名 International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete (CCSC 2022) Lausanne, Switzerland (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 久毛裕輝, 陶山裕樹, 高巢幸二, 小山田英弘
2. 発表標題 低水セメント比領域において短繊維補強気泡コンクリートの密度を最小化する調合の探索
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本直樹, 陶山裕樹, 秋吉善忠, 高巢幸二, 小山田英弘
2. 発表標題 低水セメント比調合の気泡コンクリートにおける強度・中性化・乾燥収縮特性の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 保木和明, 陶山裕樹, 秋吉善忠
2. 発表標題 1 階にピロティを有する建物を対象とした短繊維補強低水セメント気泡コンクリートの適用性その1 荷重低下を考慮したせん断多質点系モデルによる基礎的検討
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	秋吉 善忠 (Akiyoshi Yoshitada) (40713467)	大分大学・理工学部・助教 (17501)	
研究分担者	保木 和明 (Hoki Kazuaki) (70599026)	北九州市立大学・国際環境工学部・准教授 (27101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------