

論文 廃棄生姜を添加したグラウト材の圧縮強度および耐久性

佐藤 真帆*1・近藤 拓也*2・三本 竜彦*3・横井 克則*4

要旨：本研究では、廃棄生姜を粉末にして混入したグラウト材の圧縮強度および耐久性についての評価を行うため、圧縮強度試験、中性化深さ試験および細孔径分布の測定を行った。その結果、生姜の添加量が増加すると圧縮強度は低下し、中性化深さは進行する傾向が見られた。しかし、セメント質量×0.1%の生姜を添加したグラウトの圧縮強度は材齢 56 日で添加無しを上回った。また、細孔径分布測定の結果、生姜を添加したグラウトでも水和は阻害されておらず進行することが確認できた。

キーワード：圧縮強度、中性化、細孔径分布、生姜粉末、PC グラウト

1. 序論

PC グラウトが保持すべき性能として、PC 鋼材の防食、そして部材と PC 鋼材の一体化がある。PC 構造物のシース内にグラウト充填不良が存在すると、PC 鋼材の腐食や破断が生じるなど、PC 構造物の安全性を低下させる要因となる。そこで、施工時におけるグラウト注入が確実に行われるよう、材料分離の少ないグラウトへの性能改善を図っていくことも必要である¹⁾。

近年、グラウトへの性能改善として期待される材料の一つとしてセルロースが挙げられる。既往の研究として、グラウト材にセルロースエーテル（以下 CE と表記する）を添加することで流動性の低下をもたらすこと、また流動性の低下に伴い水中不分離性が増すことが示されている²⁾。さらに、凝結時間が遅延することも報告されている³⁾。そのため、セルロースによる PC グラウトの性能改善および廃棄物の有効活用を目的として、生姜粉末の物性を調査する試験や廃棄生姜を添加したグラウトのフレッシュ性状に関する試験を行った⁴⁾。その結果、生姜の添加量の増加に伴い、凝結時間の遅延、粘性の増加による流動性の低下、ブリーディング率の低下といった傾向が見られ、セルロースに起因すると考えられる性能の変化が確認された。一方で、凝結後のグラウトの体積変化抑制や、生姜粉末混入により生じる気泡の抑制も課題として挙げられた。しかし、これら課題を解決することで、実用化の可能性も得られた。

そこで今回は、生姜粉末を添加したグラウトの性能評価を行うため、圧縮強度および中性化阻止性について検討を行った。また細孔構造の変化を評価するため、細孔径分布の測定を行った。

2. 実験概要

2.1 試験要因および使用材料

本論文での試験項目及びパラメータを表-1 に示す。試験方法を表-2 に示す。グラウトの配合を表-3 に示す。使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³、比表面積：3380cm²/g）、混和剤が W/C=35%では高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）、W/C=40%では AE 減水剤（リグニンスルホン酸塩系）とした。W/C=45%では混和剤は使用していない。

試験要因については、既往の研究において比較的良好なフレッシュ性状が得られたきざみ生姜について、既往の研究⁴⁾と同様の設定とした。皮付き生姜については、既往の研究において C×0.5%、C×1.0%についても試験を行ったが、流動性の確保は困難であると判断した。よって今回は、皮付きは C×0.1%のみ試験を行った。

2.2 生姜の処理

本研究で用いる生姜は、既往の研究同様⁴⁾、きざみ生姜と皮付き生姜の 2 種類とした。写真-1 にきざみ生姜、写真-2 に皮付き生姜を示す。きざみ生姜は、生姜同士をすり合わせることで皮を取り除き、それを加工する

表-1 試験項目およびパラメータ

	圧縮強度	中性化深さ	細孔径分布
水セメント比	35%, 40%, 45%		35%
生姜の添加量(g)	添加無し、皮付き：セメント質量 C×0.1% きざみ：セメント質量 C×0.1%, C×0.5%, C×1.0%		添加無し、 きざみ：C×0.1%, C×0.5%
材齢	7 日, 14 日, 28 日, 56 日	28 日で中性化槽入槽	7 日, 28 日, 56 日で粉砕

*1 高知工業高等専門学校専攻科 ソーシャルデザイン工学専攻（学生会員）

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科准教授 博士(工学)（正会員）

*3 極東興和（株）技術本部技術企画部技術企画課長 博士(工学)（正会員）

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士(工学)（正会員）

表-2 グラウトの基本物性に関する試験

測定項目	測定方法
圧縮強度	JIS A 1108
中性化深さ	二酸化炭素濃度 5% の中性化槽に入槽
細孔径分布	JIS R 1655

表-3 グラウトの配合

W/C	セメント C (g)	水 W (g)	混和剤 (ml)
35%	1487	520	6
40%	1384	554	4
45%	1294	583	0

表-4 生姜 100g 当たりの成分
(文献 5) に基づき作成)

成分名	値	単位
水分	91.4	g
たんぱく質	0.9	g
脂質	0.3	g
炭水化物	6.6	g
不溶性食物繊維	1.9	g
灰分	0.7	g

表-5 生姜粉末の物性

	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	含水率 (%)
きざみ	1.44	12700	0.53
皮付き	1.45	10700	1.60

過程で排出される端切れを使用した。皮付き生姜は、収穫した生姜の保存過程で腐敗が確認されたものを使用した。

冷凍保存した生姜を 70℃の乾燥炉で保管し、1 日後に融解した水を除去した。引き続き 6 日間乾燥炉で保管し、水分を蒸発させることで生姜を乾燥状態にした。この生姜をミキサーで粉砕するために、皮付き生姜のみハンマーで潰し、手で割いた。その後、2 種類の生姜を 1 分間に 25000 回転する乾燥物専用の研究用小型粉ミキサーで 1 分 30 秒間粉砕した。きざみ生姜に関しては、乾燥材と合わせて封緘保存を行った。皮付き生姜については、目視できざみ生姜と同じ粉末度となるように粉末状のものをさらに乾燥炉で保管し、水分を十分に蒸発させた後さらに 30 秒間ミキサーで粉砕した。その後きざみ生姜と同様に乾燥材と合わせて封緘保存を行った。この粉体を試験に使用した。

2.3 生姜の物性

きざみ生姜 100g 当たりの成分について表-4 に示す⁵⁾。



写真-1 きざみ生姜



写真-2 皮付き生姜

生姜粉末の物性について表-5 に示す。セルロースは炭水化物の一つである不溶性食物繊維に含まれる⁵⁾。事前に実施した X 線回折の結果、粉末中にはセルロース、ニトロセルロース、三酢酸セルロース、アンモニアセルロースなどの不溶性食物繊維が確認された。

2.4 圧縮強度試験

圧縮試験には、φ50mm×100mm の円柱供試体を用いた。材齢 1 日で脱型を行い、試験日前日まで 20℃で水中養生を行った。供試体の載荷面は試験の前日に研磨し、その後試験直前まで室内で置いた。供試体は 1 要因につき 3 体作製し、その平均値で評価した。

2.5 中性化試験

中性化試験については、40mm×40mm×160mm の角柱供試体を用いた。材齢 1 日で脱型を行い、材齢 27 日まで水中養生を行った。材齢 27 日目で 40mm×40mm×40mm に供試体を切断し、打込み面を避けた 1 面以外に対しエポキシ樹脂で被覆を行ったうえで、材齢 28 日で中性化槽に入槽した。その後 7 日目、28 日目、56 日目に中性化槽から取り出し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。中性化深さは、ノギスで 3 カ所測定した。また供試体は 1 要因につき 3 体作製し、その平均値で評価した。

2.6 細孔径分布の測定

細孔径分布は、水銀圧入法により細孔直径 100～0.003μm の範囲を測定した。測定試料は材齢 1 日から水中養生を行い、表-1 に示す材齢毎にサンプル採取を行った。サンプルは供試体を直径 2.5～5mm の範囲となるよう粉砕した。サンプル採取後、アセトン浸漬を行うことで水和反応を阻止した。

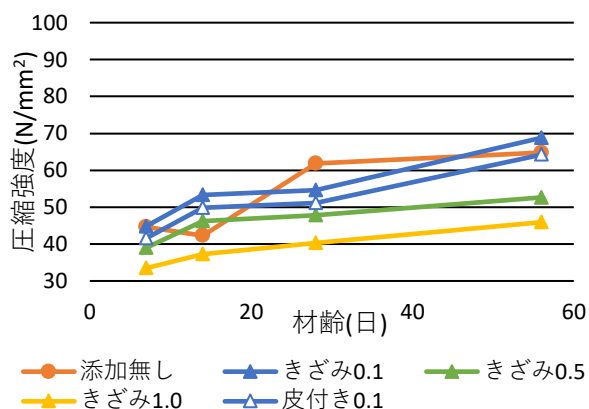


図-1 圧縮強度の経時変化 (W/C=45%)

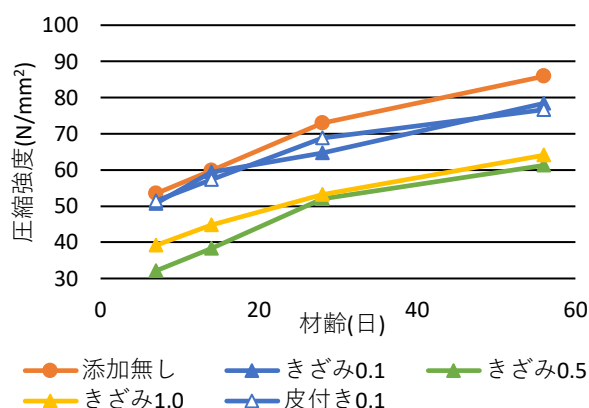


図-2 圧縮強度の経時変化 (W/C=40%)

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

圧縮強度の経時変化について、W/C=45%を図-1に、W/C=40%を図-2に、そしてW/C=35%を図-3に示す。水セメント比に関わらず、生姜の添加量増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が見られた。これは、既往の研究で示したように、生姜に含まれるたんぱく質が、アルカリと接することにより生じる気泡の作用によるものと考えられる⁴⁾。図-4に今回の供試体作製時に得られた空気量を示す。いずれの水セメント比においても、生姜の添加量が増加すると、それに伴い空気量も増加する傾向を示した。一般的に、コンクリートの圧縮強度は空気量1%の増加に対して4~6%低下することが認識されている⁹⁾。また、W/C=40%では他の水セメント比と比較し、空気量が多くなる傾向を示した。これは、混和剤としてAE減水剤（リグニンスルホン酸塩系）を使用したことに関係していると考えられる。リグニンスルホン酸塩系は空気連行性を発揮するため、生姜の添加量増加により、さらに空気量の増加が助長されたと考えられる。既往の研究でセルロース系増粘剤を混入したセメントペーストの圧縮強度を測定したものがあ³⁾。水セメント比、セルロース増粘剤の添加量が同じセメントペーストであっても、高性能AE減水剤を添加したセメントペーストは空気量

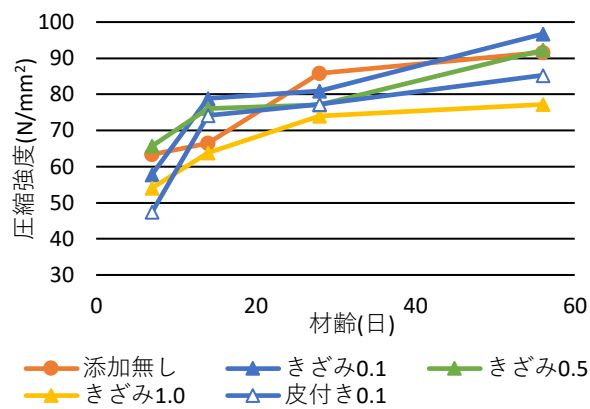


図-3 圧縮強度の経時変化 (W/C=35%)

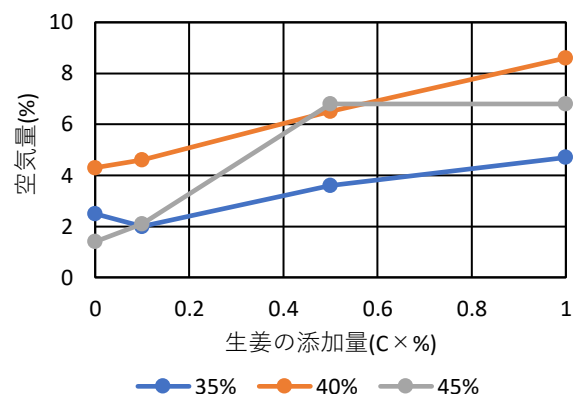


図-4 生姜添加量と空気量の関係

が少なく、圧縮強度は4週材齢で20%程度大きくなっていた。この結果からも圧縮強度低下の原因は空気が支配的であると考えられる。

W/C=45%およびW/C=35%で材齢28日から56日にかけて、圧縮強度が生姜添加無しと比較し、C×0.1%で高くなる傾向が見られた。図-4で生姜添加無しとC×0.1%の空気量を比較すると、いずれの水セメント比においても1%以下の増加量であった。そのため、気泡発生による強度低下割合は低いものと考えられる。材齢経過とともに、セルロースの存在により遅延した水和が促進され、毛細管空隙が時間的に変化し圧縮強度に影響をもたらした可能性が考えられる。そのため、細孔径分布の測定結果と照らし合わせてみる必要がある。

また、皮の有無による比較については、明確な圧縮強度差は確認できないものの、きざみと比較して皮付き生姜で低くなる傾向を示した。生姜の皮に水和を阻害する物質があるか、もしくは水和への有効成分が少ない可能性があるため、成分分析を進めていく必要がある。

3.2 中性化深さ

中性化深さの経時変化について、W/C=45%を図-5に、W/C=40%を図-6に、W/C=35%を図-7に示す。水セメント比に関わらず、生姜の添加量の増加に伴い中性化深さが進行する傾向が見られた。

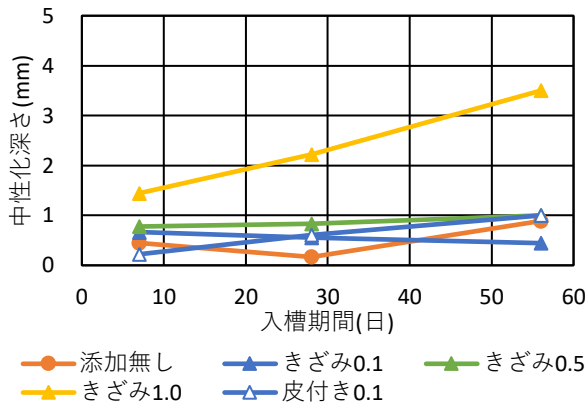


図-5 中性化深さの経時変化 (W/C=45%)

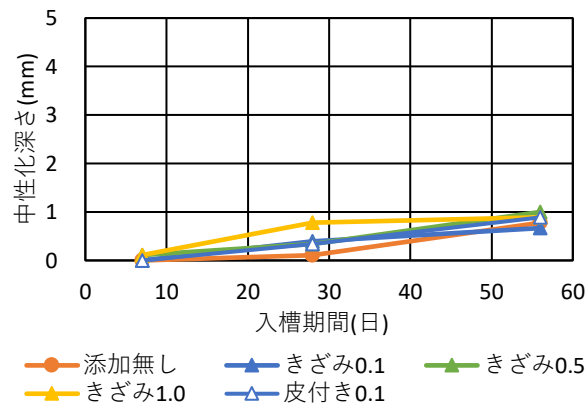


図-6 中性化深さの経時変化 (W/C=40%)

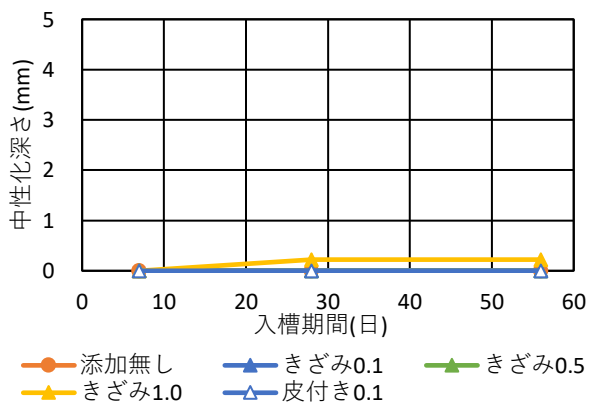


図-7 中性化深さの経時変化 (W/C=35%)

生姜添加量 $C \times 1.0\%$ では、いずれの水セメント比においても中性化深さが経時的に大きくなる傾向を示した。中性化深さは細孔構造と関係が深いので、生姜添加量 $C \times 1.0\%$ の挙動は、圧縮強度も低いことから細孔構造が疎になっていることが考えられる。特に $W/C=35\%$ では他の生姜添加量では中性化促進期間が増加しても中性化深さは 0mm であるため、生姜添加量 $C \times 1.0\%$ では細孔構造に影響を与えているものと考えられる。

生姜添加量 $C \times 0.5\%$ 以下、そして皮付き生姜については、生姜添加なし供試体と比較して有意な差は確認できなかった。圧縮強度では特に $C \times 0.5\%$ では他と比較して低下する傾向を示しているため、細孔構造以外の他の要

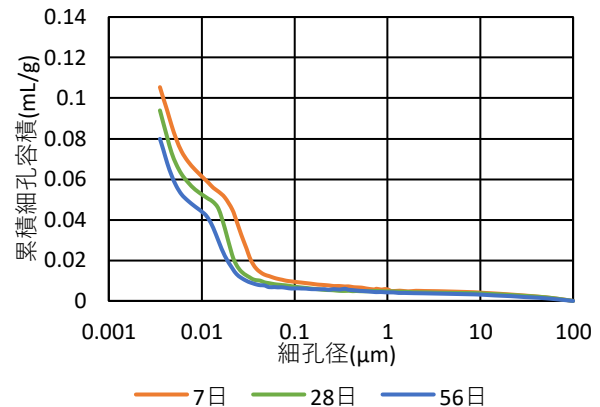


図-8 累計細孔容積 (添加無し)

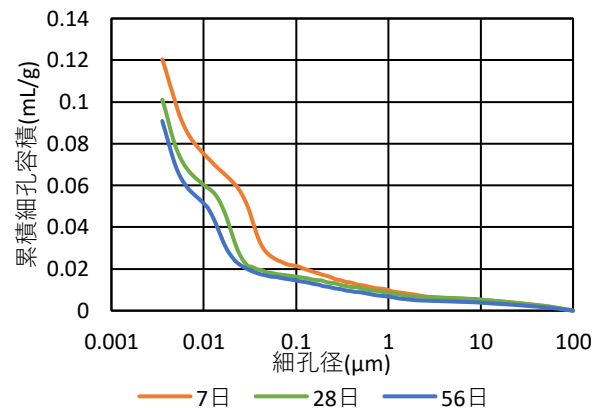


図-9 累計細孔容積 ($C \times 0.1\%$)

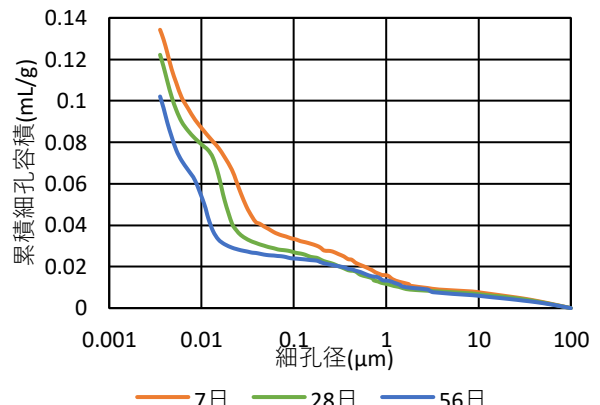


図-10 累計細孔容積 ($C \times 0.5\%$)

因が関係していると考えられる。セルロースを添加したセメントペーストは保水能力が増加すること³⁾より、中性化が進行しにくかったことが一因と考えられる。ただし中性化とセメントペースト中の湿度の関係は一意的ではないため⁷⁾、さらに検討を行う必要がある。

3.3 細孔径分布

(1) 累積細孔容積

累積細孔容積について、添加無しを図-8、 $C \times 0.1\%$ を図-9、そして $C \times 0.5\%$ を図-10 に示す。生姜の添加量に関わらず、材齢 7 日の累積細孔容積が最も大きく、材齢の経過とともに累積細孔容積が減少している傾向が確認できる。これは、材齢の経過とともに水合が進行してい

るためであり、本研究において使用した生姜の皮の有無、そしてその使用量では顕著な水和阻害は小さいものと考えられる。一方で、添加なし供試体では細孔径 $0.1\mu\text{m}$ 付近でも材齢による累積細孔容積に差は確認できないものの、生姜添加量の増加とともに材齢 7 日と他の材齢における $0.1\mu\text{m}$ 付近での累積細孔容積の差が顕著になっていることが確認できる。一般的にこの毛細管空隙にあたる領域の空隙径が強度や耐久性能に影響されている⁸⁾。そのため、この毛細管空隙に相当する空隙量の変化が初期強度、そしてその後の強度発現に影響を与えていると考えられる。

(2) Log 微分細孔容積

細孔容積測定で得られた結果に基づく Log 微分細孔容積の結果について、添加なしを図-11、 $C \times 0.1\%$ を図-12、そして $C \times 0.5\%$ を図-13 に示す。

生姜添加なし供試体では、細孔径 $0.1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ の範囲における細孔容積量は 0 に近い。しかし、生姜添加量の増加とともにこの範囲における細孔容積量が増加していることが確認できる。これは生姜混入によるものと考えられる。

中性化は直径 $0.075\mu\text{m}$ 以上の細孔空隙量と相関が高いとする報告がされている⁹⁾。そのため、中性化試験を実施する材齢 28 日におけるこの範囲の空隙量の毛細管空隙が中性化深さの進行に影響している可能性がある。

すべての生姜添加量で、直径 $0.01\mu\text{m} \sim 0.075\mu\text{m}$ で空隙量が多くなっている。この範囲はもともと水泡であった部分が未反応鉱物の水和反応による水和生成物が析出することで、総量も減少していくとされている。つまり、水和の進行とともにセメント水和物により大きな空隙が分断され、径の大きな空隙が減少し径の小さな空隙が増加する。図-11 から図-13 を確認すると、すべての生姜添加量において材齢の経過とともにピークが左、すなわち細孔空隙径が小さくなる方向にシフトしている。このように添加量が増加しても、細孔空隙量のピークの推移に変化が見られないことから、生姜の添加による水和反応の阻害は生じていないと考えられる。

既往の研究において報告した凝結試験において、生姜の添加量増加に伴い凝結時間が遅延する傾向を示した。さらに、試験を行う上で硬度を統一する際に生じた水セメント比の差が凝結時間の遅延に与える影響は小さいと考えられる⁴⁾。また、水和反応が阻害されている可能性が低いことから、生姜の添加量増加に伴う凝結時間の遅延は、生姜に含まれるセルロースの作用によるものと考えられる。今後は生姜に含まれるセルロースと水和の関係について、詳細に分析を行う必要があると考えられる。

(3) 圧縮強度と総細孔容積の関係

W/C=35%におけるセメントペーストの圧縮強度と総

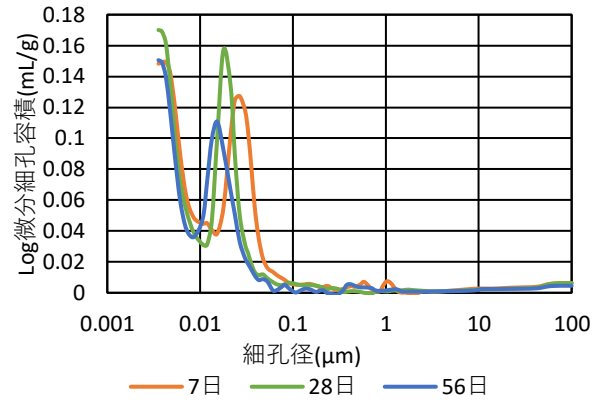


図-11 Log 微分細孔容積 (添加無し)

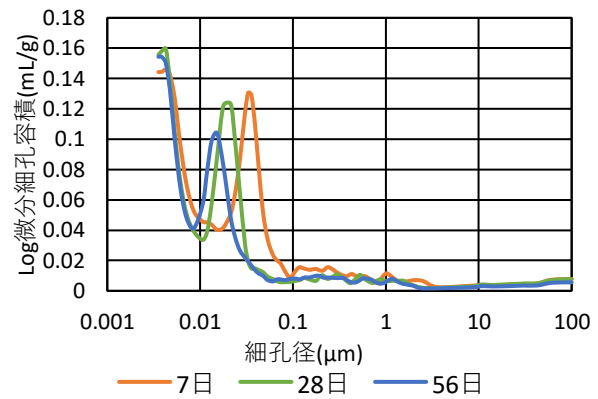


図-12 Log 微分細孔容積 ($C \times 0.1\%$)

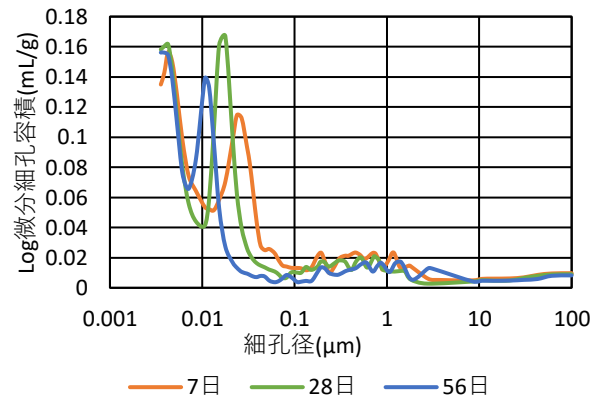


図-13 Log 微分細孔容積 ($C \times 0.5\%$)

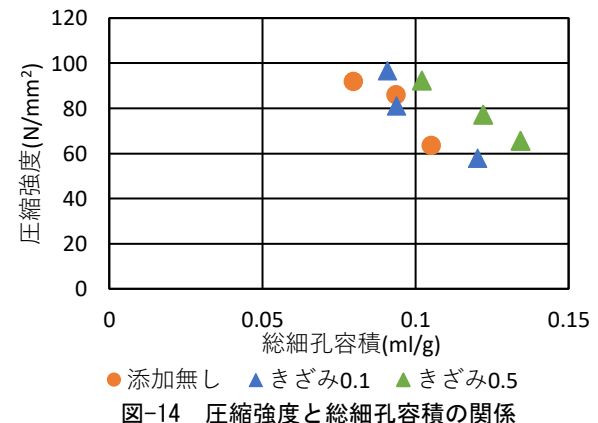


図-14 圧縮強度と総細孔容積の関係

細孔容積の関係を図-14 に示す。ここで総細孔容積は、図-8 から図-10 で得られた材齢 28 日の細孔径 100 μm から 0.003 μm の細孔容積を全て足し合わせたものとした。いずれの生姜添加量においても、総細孔容積の減少とともに圧縮強度が増加している様子が確認できる。

W/C=40%以上のコンクリートの場合、その強度は骨材とセメントペースト境界面の 0.05 μm 以上の粗大径からなる遷移帯の影響が支配的であるが、W/C=40%以下の高強度コンクリートの場合、遷移帯はほとんど形成されないため、より小径まで含めた細孔空隙量と強度の相関性が高いことが報告されている¹⁰⁾。セメントペーストであれば遷移帯は形成されないため、高強度コンクリート同様、小径まで含めた細孔空隙量と強度の相関性が高いと考えられる。ただし細孔空隙量のみで圧縮強度の関係が得られるのであればこの関係は生姜添加量に関係なく同一直線上にプロットされるものと考えられる。生姜添加量 $C \times 0.1\%$ については、生姜添加なしとほぼ同一直線上に関係が得られている。しかし $C \times 0.5\%$ については、生姜混入量の増加とともに直線が右側に推移している。これは既往の研究で示したとおり、生姜のたんばく質とアルカリの反応により生じる気泡の影響が考えられる。よって、圧縮強度と細孔径分布の関係については、エントラップトエアの影響を含め、今後さらに検討する必要がある。

3.4 今後の検討

これら生姜を混入したグラウトの圧縮強度および中性化進行特性について検討を行った。この結果、生姜添加量がセメント量の 0.1%以内であればこれらに対して影響を与えない可能性が得られた。ただし、今回圧縮強度は材齢 56 日までしか測定を行っておらず、これ以降の材齢でも長期強度の増進が発揮される可能性も考えられる。そのため、実用化に向けさらに物性調査を行っていく必要がある。

4. 結論

本研究では、廃棄生姜を添加したグラウトの圧縮試験、中性化試験、そして細孔径分布の測定を行い、グラウト硬化後の物性について評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1)生姜の添加量増加に伴い、圧縮強度は低下する傾向にあった。しかし、材齢 56 日以降では生姜添加量 $C \times 0.1\%$ において、生姜添加無しを上回る傾向を示した。また皮付着の影響は確認できなかった。
- (2)生姜の添加量が $C \times 1.0\%$ では、中性化深さが進行する傾向が見られた。しかし添加量 $C \times 0.5\%$ 以下では、生姜添加なし供試体とほとんど差が確認できなかった。

(3)生姜の添加量増加に伴い、直径 1 μm 付近の細孔径にあたる部分の細孔量が増加する傾向にあった。ただし、材齢の経過とともにこの付近の細孔量が減少し、さらに小さい細孔径における細孔量が増加する傾向を示した。

(4)同一生姜添加量では、圧縮強度と総細孔空隙量の関係には相関が得られた。ただし、生姜添加量 $C \times 0.5\%$ では細孔空隙以外の要因も考えられる結果が得られた。

謝辞

本研究で使用した生姜は(株)あさのの提供を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 上東泰：PC 橋の維持管理，プレストレストコンクリート，Vo.45，No.1，pp.64-71，2003.1
- 2) 久田真央，村上 聖，佐藤あゆみ，小西秀和：セルローズエーテル混入によるグラウト材の各種流動性，水中分離度および圧縮強度に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.74，pp.428-434，2021.3
- 3) 佐野清史，松本典人，服部篤史，宮川豊章：セルローズ系増粘剤を用いた高流動コンクリートの微細構造と物質透過性について，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.75-89，2000.11
- 4) 佐藤真帆，久川かおり，近藤拓也，三本竜彦：廃棄生姜を用いた PC グラウトの適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1222-1227，2022.7
- 5) 日本食品標準成分表 2020 年版（八訂）：https://fooddb.mext.go.jp/details/details.pl?ITEM_NO=6_06103_7
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 '16，コンクリート工学会，p.66，2016
- 7) 土木学会：平成 11 年度版コンクリート標準示方書 [施工編]-耐久性照査型-改訂資料，コンクリートライブラリー99，2000.1
- 8) 鮎田耕一：寒中コンクリートの強度，耐久性に及ぼす養生の影響，セメント技術年報，No.39，pp.130-133，1985
- 9) 橋田浩：細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の形成機構に関する検討，清水建設研究報告，第 63 号，1996.4
- 10) 羽原俊祐：コンクリートの構造とその物性，わかりやすいセメント化学，セメント協会，pp.78-104，1993