

混和材の添加による木灰コンクリートの強度増進

学籍番号：1210058 氏名：北村真由子 指導教員：大内雅博

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

要旨：木灰コンクリートの強度増進のために 3 つの手段の有効性を検証した。消石灰を添加した木灰コンクリートを高濃度二酸化炭素中で養生すると炭酸カルシウムの生成量は増加したものの強度は低下し、過大な炭酸化は強度低下を引き起こすことを明らかにした。飛灰に石膏を添加すると一部の配合で特に長期において強度の増進が見られた。石膏の添加により水和反応が促進され、それにより生成するエトリンガイトが木灰コンクリートの強度増進に関係している可能性を得たが、熱重量測定では定量化ができなかった。充填材としてのマイクロセルロースの添加は強度および充填率の向上に繋がらなかった。

Keywords：木灰コンクリート，混和材，消石灰，石膏，エトリンガイト，マイクロセルロース

1 はじめに

…式(b)

森林率 84%を誇る高知県では木質バイオマス発電が事業化されており、その副産物である木灰の有効活用が求められている。高知工科大学コンクリート研究室ではその木灰を用いて物質循環を可能にするコンクリートを開発したが、実用化のためには強度を高める必要がある。

本研究では、混和材の添加により木灰コンクリートの強度増進を図る。

2 使用材料と配合計算式

使用材料の特性を表-1 に、配合計算に使用した式を式(a)，(b)に示す。

表-1 使用材料

水	水道水
主灰	密度 2.33g/cm ³
飛灰	密度 2.23g/cm ³
消石灰	密度 2.21g/cm ³
石膏（半水石膏）	密度 2.26g/cm ³
セルロース（TFL-LT）	密度 0.02g/cm ³
セルロース（TFL-RC）	密度 0.15g/cm ³

$$\text{水結合材比：W/B(\%)} = \frac{\text{水(g)}}{\text{混和材(g)} + \text{飛灰(g)}} \times 100 \quad \dots \text{式(a)}$$

$$\text{混和材置換率(\%)} = \frac{\text{混和材(g)}}{\text{混和材(g)} + \text{木灰(g)}} \times 100$$

3 消石灰の添加と二酸化炭素デシケータ養生

3.1 圧縮強度試験

木灰コンクリートでは炭酸硬化反応(式(c))が起こり、消石灰を添加すると強度が増進することが分かっている。また、消石灰の置換率は 5～10%，水結合材比は 80%付近が最適値とされている¹⁾。炭酸カルシウムの生成量が増加すると強度が増進すると仮定し、炭酸化を促進するために最適値とされる値よりも消石灰と水の量を増やした配合で供試体を作成し、さらに二酸化炭素を充満させたデシケータ内で養生し圧縮強度を測定した。



圧縮試験の結果を図-1 に示す。消石灰置換率は全て 20%とした。いずれの水結合材比においても、デシケータ養生をすると気中養生よりも強度が低下した。

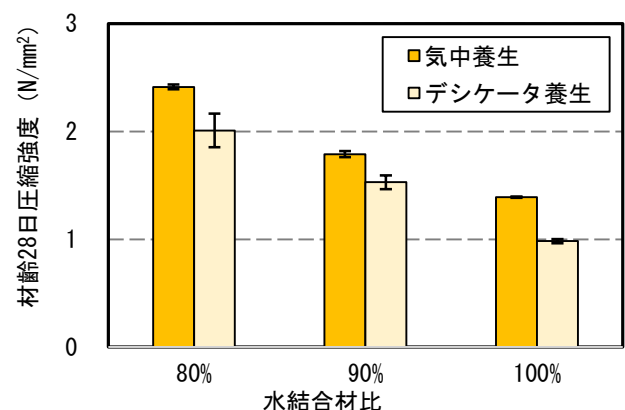


図-1 気中養生とデシケータ養生

3.2 炭酸カルシウム生成量測定と強度との関係

3.1 で作成した供試体のうち、水結合材比 80%と 100%のものの熱重量測定を行い、脱炭酸量から炭酸カルシウムの割合を計算した(図-2)。

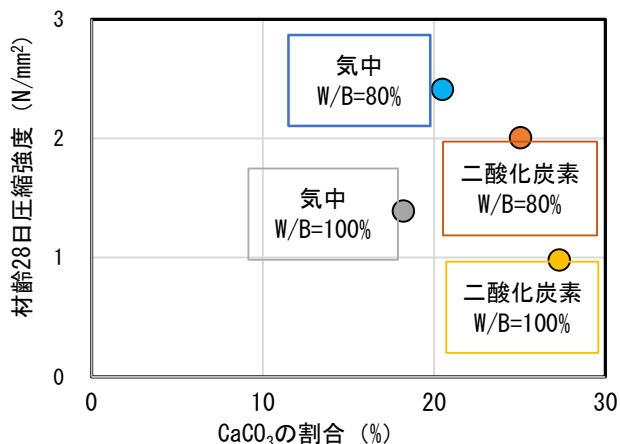


図-2 炭酸カルシウムの割合と圧縮強度

デシケータ養生をすると強度は低下したものの炭酸カルシウムの割合は増加した。

小林²⁾は、普通コンクリートにおいて炭酸化が進行すると体積収縮(炭酸化収縮)が起こるとしている。同様の収縮が木灰コンクリートでも起こる可能性があり、本実験においては過大な二酸化炭素により炭酸化は促進できたが、それに伴い炭酸化収縮が進行し、強度の低下に繋がったと考察した。

また須田ら³⁾は、相対湿度が炭酸化収縮の進行に影響し、中程度の相対湿度(40~60%)で炭酸化収縮ひずみが最大になることを明らかにした。今回の実験ではデシケータ内の相対湿度が不明であり、木灰コンクリート養生における相対湿度の影響を正しく検証することはできない。そこで各養生条件における W/B=80%の供試体の充填直後と 28 日養生後の質量や水分量から相対湿度の違いを推定した(図-3)。

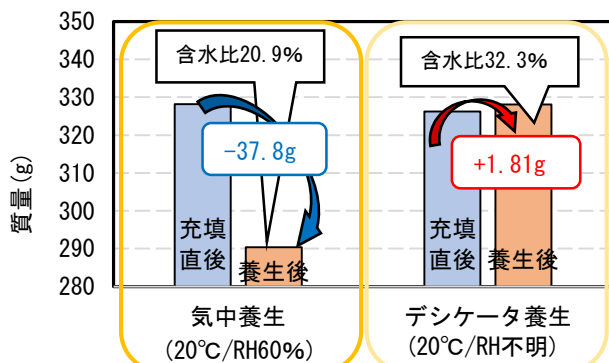


図-3 質量・水分量の変化

気中養生を行った供試体は質量が約 40g 減少した一方、デシケータ養生を行ったものは約 2g 増加し

た。また前者の養生後含水比が 20.9%であったのに対し、後者は 32.3%であった。またデシケータ内は二酸化炭素の送入時以外は密閉されていた。これより、蒸発した水分が発散されにくく、デシケータ内部は気中よりも高湿度であったと想像される。この相対湿度の推定と須田らの結果から考察すると、相対湿度が 60%である気中養生の方が炭酸化収縮は進行することになり、デシケータ養生で炭酸化収縮がより進行したという先に述べた考察と合致しない。木灰コンクリートの強度と養生時の相対湿度の関係を今後明らかにする必要があるといえる。

4 石膏を添加した木灰コンクリート

4.1 圧縮強度試験

既往研究により、飛灰に石膏を添加し水を加えて硬化させると飛灰と水を混ぜたものや石膏と水を混ぜたものよりも高い強度が出ることが分かっている⁴⁾。そこで水結合材比と石膏置換率を変えて圧縮強度を測定した。既往研究と同様に、木灰は飛灰のみを用いた。結果を図-4~6 に示す。

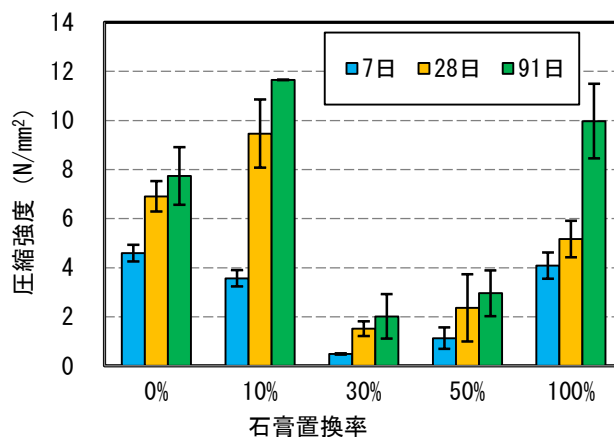


図-4 水結合材比 62.5%における強度発現

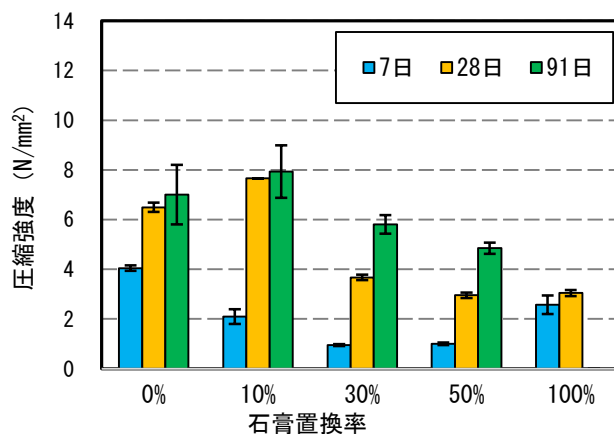


図-5 水結合材比 80%における強度発現

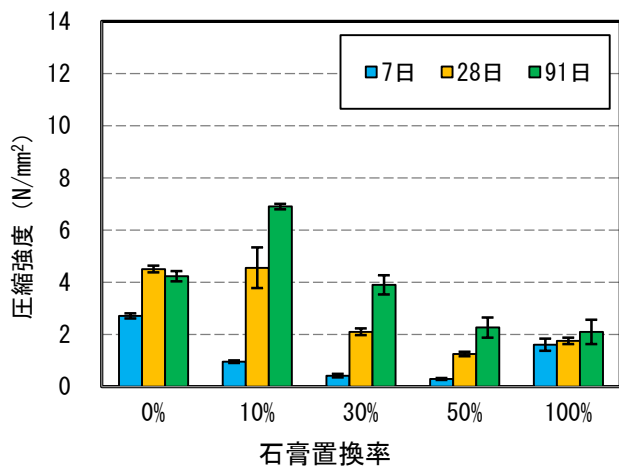


図-6 水結合材比 100%における強度発現

設定した全ての水結合材比において、石膏置換率 10%の材齢 28 日と 91 日の圧縮強度が無添加のものよりも高くなった。これより、水結合材比は 62.5% 付近、石膏置換率は 10%付近にそれぞれ強度発現の最適値がある可能性を得た。

石膏を添加する際の最適水結合材比と最適置換率を求めるため、配合を調整して強度を求めた(図-7)。

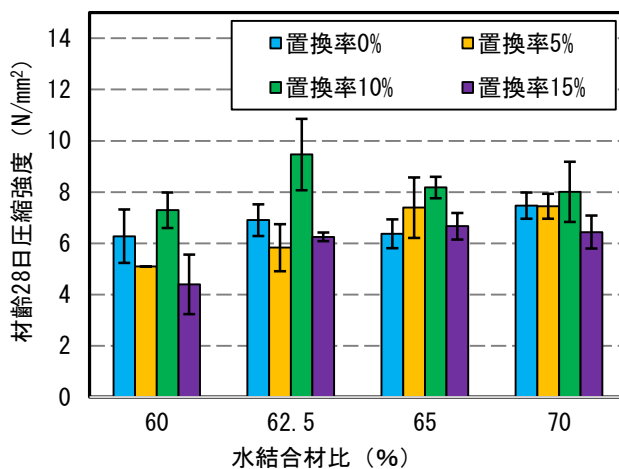


図-7 水結合材比と石膏置換率の最適値を求めた

水結合材比 62.5 から 70%の間では、強度に大きな差は見られなかった。最適な水結合材比は 62.5%、石膏置換率は 10%と判断した。実験を円滑に進めるための充填性を考慮すると、水結合材比を 70%程度まで高めても大きな問題はないといえる。

4.2 生成物質の定性化

最も高い強度が出た水結合材比 62.5%の供試体(石膏置換率 0%と 10%)を X 線回折で分析し生成し

た物質を調べた(図-8, 9)。炭酸カルシウムのピークを「C」、エトリンガイトのピークを「E」で示した。

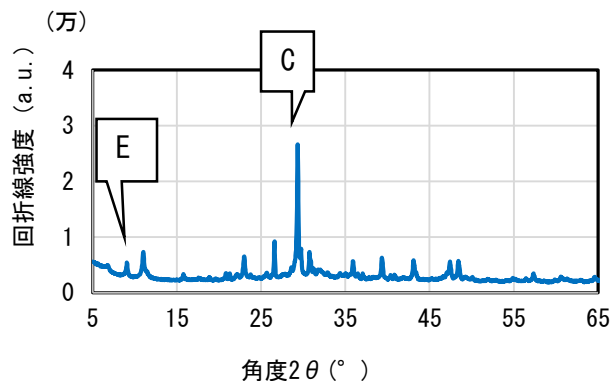


図-8 X線回折結果(石膏置換率 0%)

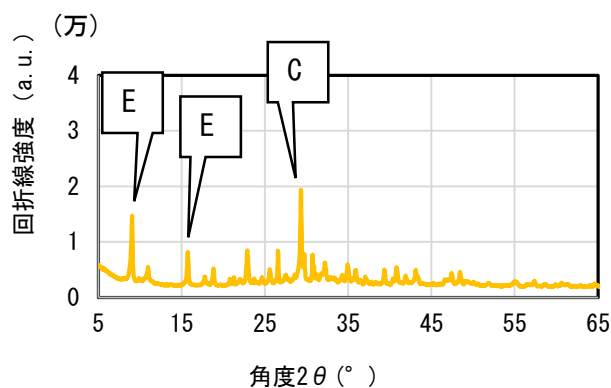
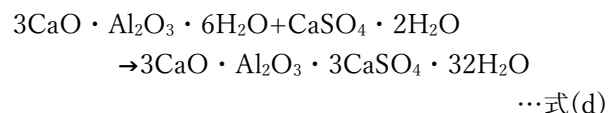


図-9 X線回折結果(石膏置換率 10%)

石膏置換率 0%, 10%ともに炭酸カルシウムが検出されたが、これは飛灰に含まれる水酸化カルシウムから生成したと考察した。石膏置換率 10%において、0%とは異なりエトリンガイトが 2 番目に強く検出された。飛灰には CaO と Al_2O_3 が含まれているため、石膏の添加によって式(d)に示す水和反応が促進され、それ自体が強度を発現するエトリンガイトの生成と強度の増進に繋がったと考察した。



4.3 エトリンガイトの定量化

4.2 で強度の差の原因と考えられたエトリンガイトを定量化するため、同じ供試体で熱重量測定を行った。温度と質量変化率の関係を示す(図-10)。

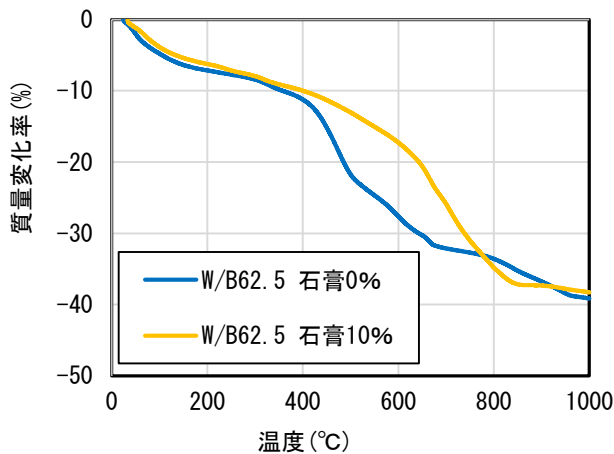


図-10 石膏を添加した供試体の熱重量測定

エトリンガイトは水和物であり 100℃付近で脱水するため、水の減少量からエトリンガイトを定量化可能と予想していた。しかし結果は図-10 に示す滑らかなグラフとなり、脱水反応の始点と終点が判別不可能であった。熱重量測定による定量化は難しいと判断した。

5 マイクロセルロースの添加

普通コンクリートとは異なりスランプ値が小さく充填が困難な木灰コンクリートの圧縮強度は、供試体の充填率(式(e))に左右される可能性がある。木灰の粒の隙間を埋め充填率を向上させることで圧縮強度増進が期待できると考え、樹脂用充填材の TFL-LT と TFL-RC の 2 種類のマイクロセルロースを添加し、圧縮強度と充填率を測定した(図-11, 12)。

$$\text{充填率(\%)} = \frac{\text{実際の供試体質量(g)}}{\text{配合計算上の供試体質量(g)}} \times 100$$

…式(e)

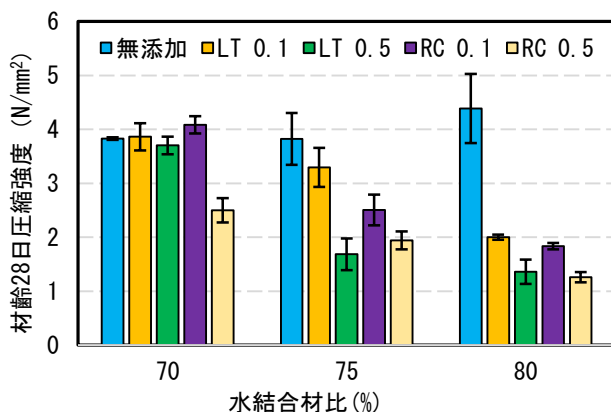


図-11 セルロースの添加による強度への影響

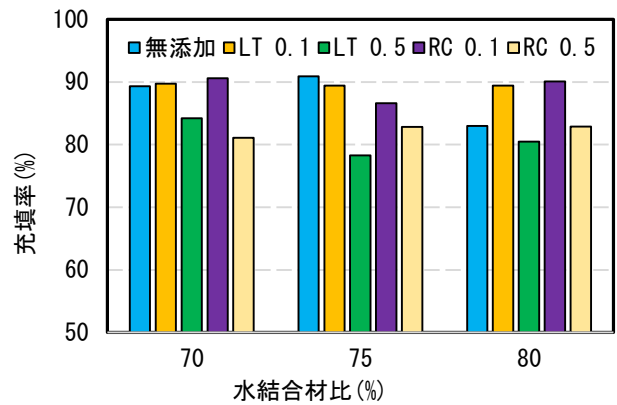


図-12 水結合材比と充填率の関係

無添加のものが最も圧縮強度が高くなった。また一部の配合では充填率が向上したものもあったが、全体としては添加量と充填率に相関は見られなかった。添加したマイクロセルロースは少量であり、配合計算に含まない外割りとしていたため、マイクロセルロースの吸水率を考慮していなかったことが原因の 1 つであると考察した。本来、木灰コンクリートの硬化に使われるはずの水がマイクロセルロースに吸水され、実際の水結合材比が配合計算値よりも小さくなったことが強度低下の原因と考察した。

6 結論

- 1) 消石灰を添加した木灰コンクリートを高濃度二酸化炭素中で養生すると、炭酸カルシウムの生成量は増加したが強度は低下した。強度と養生時の相対湿度の関係を明らかにする必要がある。
- 2) 木灰コンクリートに石膏を添加すると、一部の配合で無添加のものより特に長期強度が増進した。X線回折によりエトリンガイトが生成していることが分かったが、熱重量測定では定量化はできなかった。
- 3) 2 種類のマイクロセルロースを添加したが、強度増進には至らなかった。添加率と充填率にも相関は見られなかった。

【参考文献】

- 1) 仲井友香：消石灰を添加した木灰コンクリートの強度増進，高知工科大学卒業論文，2020
- 2) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版株式会社，2000
- 3) 須田裕哉他：セメント硬化体の炭酸化収縮と水和物に及ぼす相対湿度の影響，セメント・コンクリート論文集 73 巻，2019
- 4) 鈴木麻由：木灰コンクリートの接水による崩壊促進と消石灰に代わる混和材の選定，卒業論文，2017