

続成作用をモデルとした硬化体の作製

高松第一高等学校 箕田 彩花 小西 理央 筒井 旬平 三木 創太

1. 要旨

現在使用されているコンクリートは、セメントと砂・石から作製されている。しかし、コンクリート作製に用いる川砂の不足や、セメントの作製過程での多量の二酸化炭素の排出など、様々な環境問題を抱えている。そこで私たちは、身近な素材を利用しつつ、より環境負荷を抑えられるコンクリート様物体(以下、硬化体と呼ぶ)を作製したいと考えた。

本研究では、堆積岩の形成メカニズムである“続成作用(圧密作用と膠結作用)”に注目し、曲げ強度がより高い硬化体の作製を目標にして実験を行った。予備実験で、炭酸カルシウムを主成分とするチョークによって砂粒同士の接着が可能であることを明らかにし、さらに砂とチョークと水の適切な混合比を検討した。この結果を踏まえ、本実験では、①加熱温度、②加熱時間、③加圧重量を変数とした硬化体を複数作製し、それぞれの曲げ強度の平均値を算出した。その結果、①100℃、②25分、③300gでの条件で曲げ強度が大きくなることがわかった。100℃以上、25分以上の加熱では曲げ強度が小さくなった。また、加圧重量が重いほど曲げ強度は大きくなると予測していたが、硬化体の脱水が不十分だと曲げ強度は十分に大きくならないこともわかった。このことから、硬化体内に含まれる水分量が曲げ強度に大きく影響することが示唆された。最終的に、100℃/25分の条件において、1つだけ市販の家庭用コンクリートと同程度の曲げ強度を持つ硬化体の作製に成功した。

今後、さらに硬化体の強度を上げるために、水分量や加圧方法の検討、ノジュール(生物遺骸由来の岩石)生成の仕組みを活用した実験などが考えられる。また、岩石生成で起こっている本来の続成作用と、私たちの硬化体作製で起こっている作用の違いを詳しく検討し、硬化体自体が持つ性質をより深く探ることが今後の課題である。

2. 研究目的

コンクリートは世界的に利用されている主な建材の一つである。また、セメント利用は、都市化やインフラ開発、住宅や商業ビルの需要の高まりによって推進され、その市場は世界的に拡大している。一方で、コンクリートの作製には主にセメント、川砂、水が必要であるが、これらは様々な問題を抱えている。セメントの作製過程では、高温かつ長時間の加熱によって多量にエネルギーを消費し、原料である炭酸カルシウムが熱分解することにより、多量の二酸化炭素が発生する>(*1)また、コンクリートの作製において、骨材として利用される砂利には、砂粒子の大きさに制限があるため(20mm~のものを利用している)、主に川砂が利用されており>(*2)コンクリート需要の増加に伴って、適した大きさの川砂が不足している。また、粒の大きさが0.125~0.5mmの細粒砂や中粒砂などの粒子の小さすぎる砂のみではコンクリートをつくることができない。こうした問題に対して、触媒を用いることで微小な砂粒子同士を直接接着する方法が開発されている(*3,*4)が、ここで利用されている触媒は、私たちには扱いにくく、高価であった。そこで本実験では、1.セメントを用いない、2.粒の小さな砂を用いる、3.身近な素材を利用する、4.堆積岩の形成メカニズムの再現をする、5.コンクリート程度の強度を持つ の5点を満たす硬化体の作製を目標とする。

<続成作用(圧密作用と膠結作用)について>

堆積岩は続成作用という作用によって形成される。本研究では、この続成作用をモデルとして硬化体の作製を行った。続成作用には主として圧密作用と膠結作用がある。圧密作用とは、砂が堆積すると、上部の堆積物によって、下部の堆積物が圧力を受け、間隙水と呼ばれる砂粒子の隙間を満たしている水が押し出されることで、砂粒子同士の隙間が狭く、密になる反応のことである。また、膠結作用とは、砂粒子間の水が脱水したり、水に溶解していた炭酸カルシウムや二酸化ケイ素が沈着したりすることにより、砂粒子同士が接着する反応のことである。

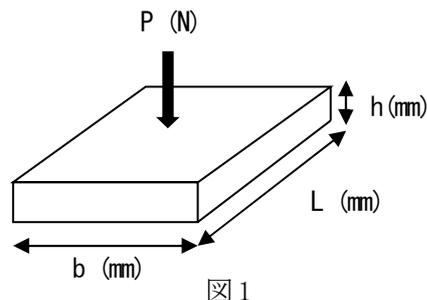
圧密作用の再現のために、加熱前に上面から加圧、または加熱時に上面に分銅を乗せた。また、膠結作用の再現のために、炭酸カルシウムが主成分であるチョークを用いることとした。

<本実験で用いた曲げ強度の算出方法について>

本実験では、デジタルフォースゲージをもちいて三点曲げ試験を行い、石川県生コンクリート工業組合の単位体積当たりの強度の計算式を用いて曲げ強度を算出した>(*5)

以下は用いた公式である。図1において、L=長辺、b=短辺とすると、

$$\text{曲げ強度(N/mm}^2\text{)} = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (\text{式 1})$$



3. 予備実験

3-1 予備実験 I

目的 チョークで砂の接着が可能なのかを調べた。

器具、材料 ・海砂（以下、砂）・チョーク（CaCO₃）
 ・水道水（以下、水）・ガスバーナー
 ・乳鉢・乳棒
 ・アルミニウムの容器（図2）



- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂，水，チョークを以下 a,b の組み合わせで乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 a 砂+水 b 砂+チョーク+水
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし，ガスバーナーを使い，加熱温度を変数として1時間加熱した。
 (4) 加熱終了後，観察した。

結果 aは硬化しなかったが，bのみ一部が硬化した。

考察 チョークに硬化作用があるために，b は硬化したと考えた。したがって，以後の実験では砂，チョーク，水を混ぜて使用する。

3-2 予備実験 II

目的 砂，チョーク，水の適した割合(安定して，曲げ強度がほかの割合の硬化体より高い割合)を調べた。

器具、材料 ・砂・チョーク・水・乾熱装置・乳鉢・乳棒・アルミニウムの容器(図2)
 ・デジタルフォースゲージ

- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂，水，チョークを乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし，ガスバーナーを使い，加熱温度を変数として1時間加熱した。
 (4) 加熱終了後，観察し，曲げ強度測定をした。
 (5) 硬化体を合計22個作製し，曲げ強度を比較した。

結果 (砂:チョーク:水)=(5:2:1)が3.8Nと一番高く，他の割合では3.8Nより低かった。

考察 (砂:チョーク:水)=(5:2:1)のときが最も曲げ強度が高かった。したがって，(砂:チョーク:水)=(5:2:1)を以降の実験で用いる。

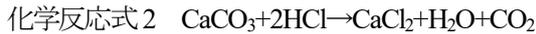
(※) ガスバーナーを使うときと比べて，乾熱装置を使ったときの方が加熱温度を一定にすることができ，加熱時間を短縮できたので，以降の実験では乾熱装置を使うこととする。

3-3 予備実験 III

目的 加熱後の炭酸カルシウムの有無を調べた。

器具・材料 ・作製した硬化体・砂・チョーク・塩酸(0.02mol/L)・ガラス容器

原理 本実験では材料を加熱するが，炭酸カルシウムは，800度から900度で熱分解され，酸化カルシウムと二酸化炭素に分かれる。(化学反応式1)(*6)膠結作用は炭酸カルシウムの存在が必要な結合のため，本実験では炭酸カルシウムの熱分解を阻止し，存在が不可欠である炭酸カルシウムの存在を確認したい。そこで，炭酸カルシウムと塩酸による化学反応(化学反応式2)を用いて，二酸化炭素の発生の有無を確認することで，加熱による炭酸カルシウムの熱分解の有無を確認した。



- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂, 水, チョークを乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし, ガスバーナーを使い, 加熱温度を変数として1時間加熱した。
 (4) 加熱終了後, 作製した硬化体をガラス容器に入れ, 塩酸を100mL加え, 反応の様子を観察した。

結果

反応物	反応の様子	炭酸カルシウムの有無
硬化体	多量の気体が発生した	○
チョーク(加熱前)	多量の気体が発生した	○
チョーク(加熱後)	多量の気体が発生した	○
砂(加熱前)	反応しない	×
砂(加熱後)	反応しない	×

考察 硬化体作製時の加熱により, 炭酸カルシウムは失われないと考えた。

3-4 予備実験IV

目的 身近なコンクリートの強度を測定した。

器具 ・インスタントコンクリート(トーヨー)・水・アルミニウムの容器
 ・デジタルフォースゲージ

- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) インスタントコンクリートと水を取扱説明書のと通りの質量比で混ぜ, 6gとり, アルミニウムの容器に入れた。
 (3) 一日乾燥させ, 曲げ強度を測定した。

結果 1.5~4.0(N/mm²)の強度が得られた。

4. 本実験

仮説 膠結作用は水の脱水によって生じるので, 加熱温度が高いほど水が蒸発し, 炭酸カルシウムの沈殿が促進され, 曲げ強度が大きくなるのではないかと。

4-1 実験 I

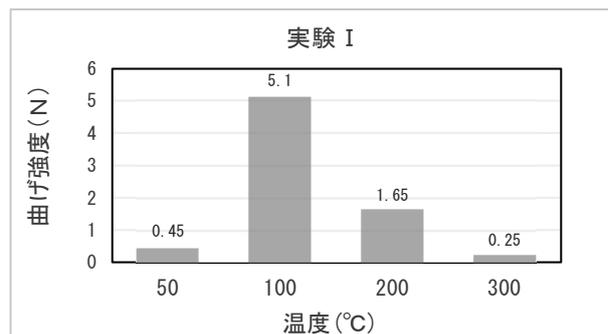
目的 乾熱装置を用いて, 加熱温度を変数にした硬化体をそれぞれ3個ずつ製作し, 曲げ強度の平均を調べた。

器具, 材料 ・砂・チョーク・水・乾熱装置・乳鉢・乳棒・アルミニウムの容器

- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂, 水, チョークを乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし, 乾熱装置を使い, 加熱温度を変数として20分加熱した。
 (4) 加熱終了後, 観察し, 曲げ強度測定をした。
 (5) 曲げ強度の平均を求めた。

結果

	加熱温度(°C)	曲げ強度平均(N)
1-①	50	0.45
1-②	100	5.1
1-③	200	1.65
1-④	300	0.25



考察 100℃のものが最も曲げ強度が高かった。また、200℃、300℃のものが曲げ強度が低かった理由として、加熱による水の過剰な蒸発が考えられる。

4-2 実験Ⅱ

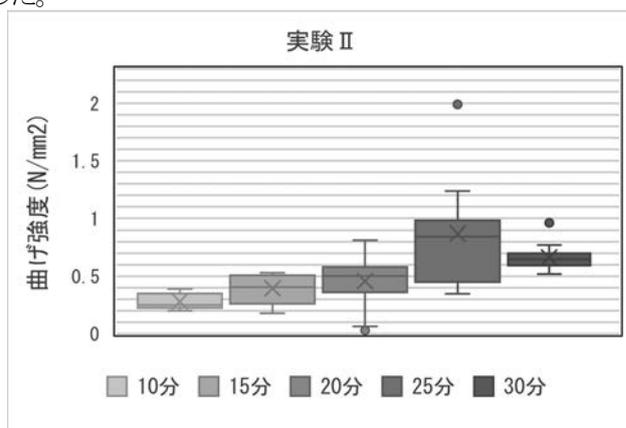
目的 加熱時間を変数にした硬化体をそれぞれ10個ずつ製作し、曲げ強度の平均を調べた。

器具, 材料 ・砂・チョーク・水・乾熱装置・乳鉢・乳棒・アルミニウムの容器

- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂, 水, チョークを乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし, 乾熱装置を使い, 加熱時間を変数として100℃で加熱した。
 (4) 加熱終了後, 観察し, 曲げ強度測定をした。
 (5) 加熱終了後, 曲げ強度測定をし, 式1に代入した。

結果

	加熱時間(分)	曲げ強度平均(N/mm ²)
Ⅱ-①	10	0.28
Ⅱ-②	15	0.40
Ⅱ-③	20	0.60
Ⅱ-④	25	0.87
Ⅱ-⑤	30	0.66



考察 加熱時間25分のときが最も曲げ強度が高かった。また、外れ値であるが、加熱時間が20分、30分のとき、それぞれコンクリートの曲げ強度を超える硬化体を作製することができた。よって、目的5である“コンクリートと同程度の曲げ強度を得る”に近づくことができた。

4-3 実験Ⅲ

目的 加熱時に上からおもりを乗せ、加圧しながら加熱した。おもりの重さを変数とし、それぞれ3個ずつ作製し、平均の曲げ強度を調べた。

器具, 材料 ・砂・チョーク・水・乾熱装置・乳鉢・乳棒・アルミニウムの容器・分銅・アルミ箔

- 方法 (1) アルミホイルを加工して (L,b,h) = 4.0×2.0×2.0 (cm) の容器を作った。
 (2) 砂, 水, チョークを乳鉢に入れて乳棒を使ってよく混ぜた。
 (3) (1)に(2)を入れ上からガラス棒で表面をならし, (1)上にアルミ箔を敷き, 上から分銅を乗せ, 乾熱装置を使い, 加熱温度を変数として20分加熱した。
 (4) 加熱終了後, 観察し, 曲げ強度測定をした。
 (5) 加熱終了後, 曲げ強度を測定し, 式1に代入した。

結果

	分銅の重さ(g)	曲げ強度平均(N/mm ²)
Ⅲ-①	100	0.63
Ⅲ-②	300	0.71

考察 分銅を重くすると曲げ強度は大きくなった。

しかし、十分に脱水できていない物が多くできてしまった。これは、分銅の土台として使用したアルミ箔が、上面からの蒸発を阻害したためだと考える。

(※) 海砂を使っており、砂の付着物によって結果に差が出る可能性も検討した。塩酸で中和させた砂と蒸留水で洗浄した砂をそれぞれ使用して実験を行ったところ、海砂で作った硬化体の曲げ強度と差はほとんど見られなかったため、海砂の付着物による影響はないものと考えられる。

5. 結論

本実験から、目標 1.セメントを用いない 2.粒の小さな砂を用いる 3.身近な素材を用いる 5.コンクリート程度の強度を持つ、を満たす硬化体を、以下の条件で作製することに成功した。

条件・砂:チョーク:水の比は 5:2:1 付近

- ・加熱温度は 100℃付近
- ・加熱時間は 25℃付近
- ・圧力をかけながら加熱する

6. 謝辞

大の場海岸の砂の利用にあたり、高松市役所スポーツ振興課のみなさまのご協力に心から感謝いたします。また、本研究にあたって、指導して下さった帆玉真悟先生、増田裕明先生をはじめ本校の先生方に深く感謝いたします。

7. 参考文献

- *1 コンクリートメディカルセンター
<https://concrete-mc.jp/cement-material/#3>
- *2 土木建設資材「砂利」の種類について
https://www.kk-ty.co.jp/mg_detail.php?id=14
- *3 砂同士の間接接着による硬化体の製造に向けた基礎的検討 酒井雄也
https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/73/3/73_185/_pdf
- *4 産総研 砂の主成分であるシリカからケイ素化学産業の基幹原料を効率的に合成
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2014/pr20140520/pr20140520.html
- *5 石川県生コンクリート工業組合 曲げ強度試験方法 (コンクリート)
<https://isinama.main.jp/index.php?%E6%9B%B2%E3%81%92%E5%BC%B7%E5%BA%A6%E8%A9%A6%E9%A8%93>
- *6 天然炭酸カルシウムと人造炭酸カルシウムの識別
https://www.customs.go.jp/ccl_search/info_search/inorganicss/r_59_12_j.pdf
- *7 国土交通省 利用用途ごとの要求品質その4 (れんが・インターロッキングブロック)
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/fukusanbutsu/kensetsuodei/odei_file1-6-4_5.pdf