

軽量コンクリートの自己治癒性能に影響する因子

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○櫻井滉平
群馬工業高等専門学校 正会員 田中英紀

1. はじめに

当研究室の既存研究で、普通コンクリートにおいて、若材齢コンクリートには早期ひび割れに対する自己治癒性能が存在することが分かっており、その性能は養生水温と混和材（シリカフューム、フライアッシュ）に影響することも確認されている。¹⁾本研究では、普通コンクリートで確認されている自己治癒性能を軽量コンクリートでも発揮するか確認し、養生期間や養生温度と自己治癒の関係について調査する。また、pHと強度回復率の関係についても調査したため、その結果をまとめた。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合条件

本実験で使用した配合表を表-1
に、使用材料を表-2に示す。

2.2 実験方法

2.2.1 養生期間

軽量コンクリートの自己治癒に必要な養生期間を調べるため、材齢を7, 14, 28日でそれぞれ実験を行い、強度回復率の変化を調べた。強度回復率とは、材齢3日時の圧縮強度を材齢t日の圧縮強度で割ったものとして定義した。材齢3日に圧縮を行ったのは、水和熱による温度ひび割れを設定したためである。

$$R = \sigma_t / \sigma_3 \times 100 \quad [\%]$$

R: 強度回復率(%), σ_t : 材齢t日の圧縮強度(N/mm²), σ_3 : 材齢3日の圧縮強度(N/mm²)

2.2.2 養生水温

普通コンクリートでは、フライアッシュを使用した場合養生温度が高いほど強度回復率が高かった。¹⁾軽量コンクリートにフライアッシュを使用したものを20℃、30℃、40℃で実験を行った。

2.2.3 圧縮強度試験

試験体は、直径100mm×高さ200mmの円柱供試体を用いた。圧縮試験では、「万能試験機 SHIMADZU UH-F1000KNI」を用い、ひずみ測定には、コンプレッソメーターを用いた。

2.2.4 pH測定

本実験では、混和剤なしのものを材齢14日で実験した。pHを1日1度測定しその最大値を選び、pHと強度回復率との関係性を調査した。養生する際、養生水槽にラップで蓋をすることにより養生水が蒸発することや空気と接触し反応することを防いだ。

表-1 配合設計

使用混和材	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	高性能 AE減水剤
なし	15	8	55	7	44	162	295	0	565	601	1.475
	15	8	50	7	44	162	324	0	558	591	1.296
	15	8	45	7	44	162	360	0	548	581	1.260
あり	15	8	55	7	44	162	295	30	553	585	1.475

※混和材としてフライアッシュを用いる

表-2 使用材料と仕様

材料名	仕様
普通ポルトランドセメント	密度3,15g/cm ³ (太平洋セメント)
軽量細骨材	表乾密度1.91g/cm ³ ,吸水率15.0%,粗粒率2.53
軽量粗骨材	表乾密度1.59g/cm ³ ,吸水率25.0%,粗粒率6.34
フライアッシュ	高品質フライアッシュ(CfFA)
高性能AE減水剤	高性能AE減水剤レオビルドSP-8N

キーワード 自己治癒, 軽量コンクリート, 強度回復, pH, Ca(OH)₂

連絡先 〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 番地 群馬工業高等専門学校 田中研究室
TEL. 027-254-9184 E-mail: htanaka@cvtl.gunma-ct.ac.jp

水槽の種類ごとに pH を変化させるため、体積比(養生水の体積に対するコンクリート体積の割合)を変化させる。これにより、pH と強度回復率の関係を知る。

2.2.5 走査型電子顕微鏡による観察

SEM(走査型電子顕微鏡)によって、pH と強度回復率の関係性を知る実験を行った際に、養生水槽の底に溜まった白い沈殿物について観察した。

3. 実験結果

3.1 養生期間と強度回復率の関係

表-3 に養生期間と強度回復率の関係を示す。材齢 14, 28 日で強度回復率は 100%を超え、材齢が 14 日以上で自己治癒によって強度回復することが分かった。材齢 14 日と材齢 28 日の強度回復率の差は、僅か 3% であるため材齢 14 日で強度回復が収束していると考えられる。材齢 3 日に対して材齢 28 日の強度回復は 14%程度であった。

図-1 は材齢 3 日目の応力-ひずみ曲線とその後水中養生し、材齢 28 日で再び圧縮した時の応力-ひずみ曲線である。この図からも強度回復が分かる。

3.2 ひび割れと強度回復率の関係

材齢 3 日の圧縮後のコンクリート断面図(混和材なし)を図-2 (ひび割れ:破線, 円形・多角形:粗骨材)に示す。材齢 3 日の圧縮を与えた際、内部のひび割れは粗骨材に入っていた。粗骨材が材齢 3 日の圧縮時に割れているため、軽量コンクリートの強度回復率は低かったと分かった。また、水セメント比が 45%、50%でも同様の結果が確認できた。

3.3 養生水温の影響

フライアッシュ有りで養生温度が 20℃, 30℃, 40℃である強度回復率の結果を表-4 に示す。30℃より 40℃の方が強度回復率は大きくなると分かった。この関係は普通コンクリートと同様だが、20℃は 30℃, 40℃より強度回復率が大きいいため、軽量コンクリートの場合の強度回復率は養生水温の影響は少ないと考えられる。

3.4 pHの影響

3.4.1 pHと強度回復率の関係

pH と強度回復率の関係を表-5 に示す。図-3 の相関係数は 0.806 であった。pH が高くなるほど強度回復率は低くなる関係があり、pH による強度回復への影響は大きいと言える。

表-3 養生期間の影響

材齢(日)	圧縮応力(N/mm ²)		強度回復率(%)	初期圧縮によるひび割れ幅(mm)
	材齢3日	材齢t日		
7	16.44	15.11	91.87	0.15
14	22.78	25.39	111.5	0.25
28	18.70	21.39	114.4	0.20

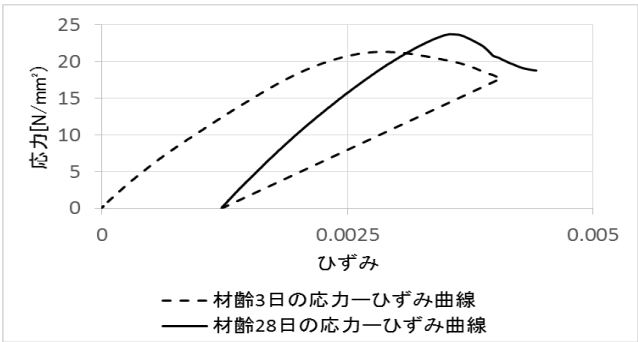


図-1 強度回復の例



図-2 材齢 3 日の圧縮後の断面図 (W/C=55%)

表-4 養生温度の影響

養生温度(℃)	平均強度回復率(%)
20℃	134.26
30℃	112.97
40℃	127.03

図-4はpHの最大値と体積比(%)の関係を表す。体積比が増加するほどpHも増加した。このことから、コンクリートや養生水の体積がpHに影響することも分かった。つまり、体積比が強度回復率に影響を与えている。

3.4.2 考察

セメントの水和反応にはエーライト、ビーライト、C₃Aなどの水和がある。本実験では材齢14日の期間で実験を行ったため、エーライトの反応が本実験の強度発現に深く関係していると考えられる。(エーライトの水和： $2\{3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2\} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$)²⁾この反応では、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)が生成されるため、養生水はアルカリ性となる。これにより、養生水中にOH⁻が増加する。ルシャトリエの法則により、平衡が移動しH₂Oが増加するためアルカリ性であるほどエーライトの水和反応は促進される。本実験では、材齢3日で供試体にひび割れを入れている。これにより、生成される水酸化カルシウムがひび割れ面から養生水に溶解した。水酸化カルシウムが強度回復に必要であるが、養生水のpHを上昇させるために使われた。そのため、pHが高いほど強度回復率が小さくなったと考えられる。

3.5 普通コンクリートとの対比

普通コンクリートの強度回復率は材齢7日で約85%、材齢14、28日で約130%前後である。³⁾軽量コンクリートの強度回復率は、表-3に示した。材齢7日では、軽量コンクリートの方が強度回復率は高いが、材齢14日以降では普通コンクリートの方が強度回復した。材齢28日では、15%程度普通コンクリートの方が強度回復すると分かった。

普通コンクリートに比べ軽量コンクリートの強度回復率が小さいのは、材齢3日の圧縮で軽量コンクリートの粗骨材にひび割れが入ったためであると考えられる(図-2参照)。軽量コンクリートに使用されている骨材は普通コンクリートに使用される骨材より強度が小さいため、材齢3日の圧縮で粗骨材にひび割れが発生した。粗骨材に入ったひび割れはコンクリート自身が修復できないため、軽量コンクリートの強度回復率は普通コンクリートに比べ小さいのだと分かった。

3.6 走査型電子顕微鏡による観察結果

図-5はpHと強度回復の関係を調べる際、実験後の養生水槽中の底に発生したものをSEMで観察した結果である。図-6はCa(OH)₂の集合組織のSEM画像である。⁴⁾図-5は、層状の積層構造を形成している。2つの写真を

表-5 pHと強度回復率の関係

体積比(%)	供試体	圧縮応力(N/mm ²)		強度回復率(%)	pH(最大値)
		材齢3日	材齢28日		
2.29	1	11.99	19.35	161.43	10.81
	2	11.61	19.13	164.68	10.54
	3	11.51	18.81	163.37	10.59
8.52	2	12.19	19.07	156.51	11.77
	3	11.97	17.23	143.95	11.87
	4	10.85	15.85	146.09	11.81
18.62	1	11.76	17.23	146.53	12.29
	3	12.31	18.42	149.66	12.22
	4	12.15	18.99	156.31	12.22

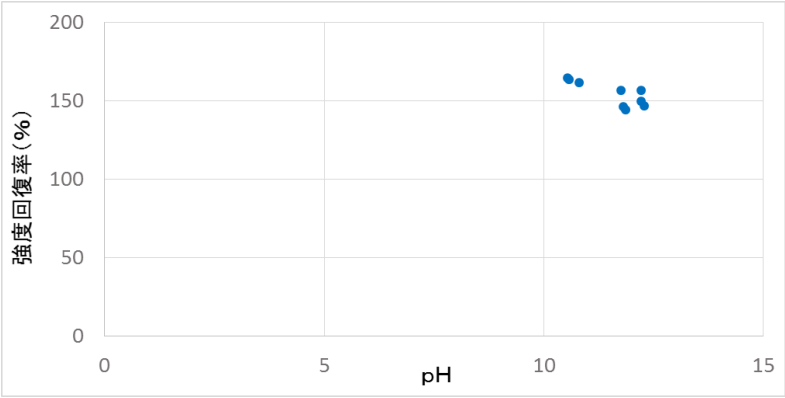


図-3 pHと強度回復率の関係

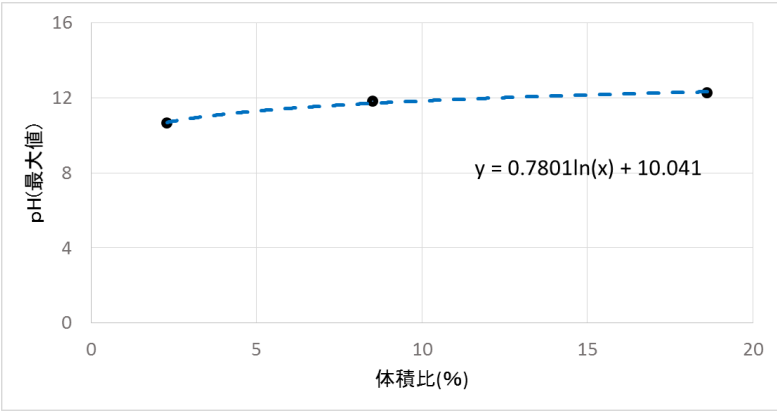


図-4 pH(最大値)と体積比の関係

比較すると同様の層構造を見ることができた。よって、図-5は水酸化カルシウムであると考えられる。このことから、生成された水酸化カルシウムの一部が養生水に溶け出したと分かった。

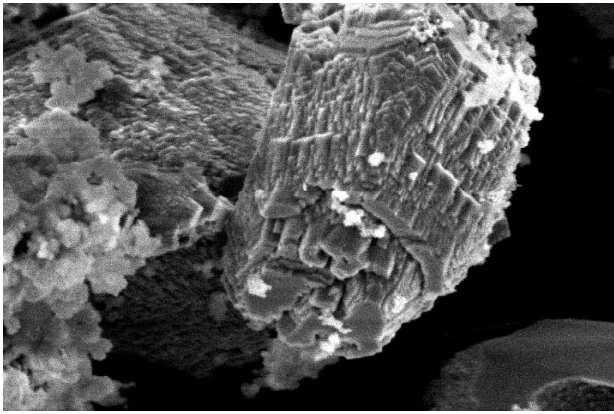


図-5 バケツ底の沈殿物のSEM画像
(電圧：5kV、倍率：7000倍)

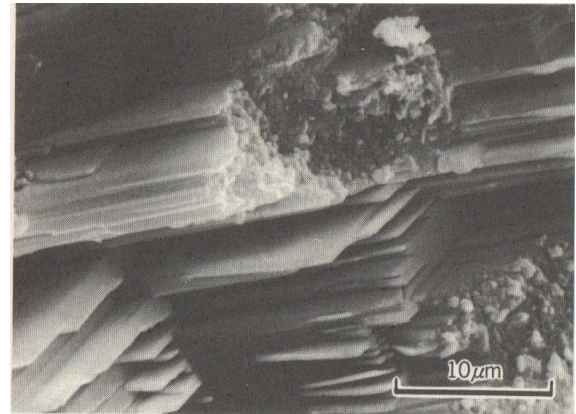


図-6 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の集合組織のSEM画像⁴⁾

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 軽量コンクリートにおいて養生期間と強度回復率の関係は、養生期間が長いほど強度回復率が大きくなることが分かった。また、材齢14日で強度回復が収束していると考えられる。
- (2) フライアッシュを用いた軽量コンクリートは、養生温度が強度回復率に与える影響は少ないと考えられる。
- (3) pHと強度回復率には関係性があり、pHが高いほど強度回復率は小さくなる傾向がある。
- (4) pHが高い養生水槽ほど、ルシャトリエの法則によってエーライトの反応が促進され、より多くひび割れ面から水酸化カルシウムを排出するため、強度回復率が小さくなったと考えられる。
- (5) 軽量コンクリートの強度回復率は普通コンクリートに比べ小さかった。これは、軽量骨材の強度が小さく材齢3日の圧縮時に、粗骨材にひび割れが入ったためである。
- (6) SEMによって沈殿物を観察した結果、水酸化カルシウムであると分かった。

5. 今後の課題

本研究において、養生温度と強度回復率の関係について明確な傾向を見ることはできなかった。そのため、養生温度以外の条件を一致させ実験を再度行うべきである。

pHと強度回復率の関係を見る際、体積比の値は最大18.62%であった。現場はより大きな体積比で養生しているため、現場に近い体積比で実験を行うことで強度回復率にどんな影響があるか検討する必要がある。

謝辞：本研究で使用した軽量骨材は、関西太平洋鉱産株式会社のご厚意によりご提供いただきました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 島田奈緒：養生水の温度及び混和材がコンクリートの自己治癒性能に与える影響について，第43回土木学会関東支部技術研究発表会 講演会概要 V34, H28.3
- 2) 社会法人セメント協会「C&C エンサイクロペディア」p19（参照：2017年1月）
- 3) 田中光：電気化学的手法によるコンクリートの自己修復性能の促進，専攻科特別研究，2014
- 4) 社会法人セメント協会「C&C エンサイクロペディア」p22～p28（参照：2017年1月）