

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

群馬工業高等専門学校 学生会員 ○島田 奈緒

群馬工業高等専門学校 正会員 田中 英紀

1. はじめに

近年、耐用年数が約 50 年と言われているコンクリート構造物において、高度経済成長期に建設されたものが修繕・補強の時期を迎えている。しかしその数は膨大であり、全ての構造物に対して維持管理を行うことは不可能だと言われている。そのような中脚光を浴びているもののひとつが、自己修復材料である。そしてコンクリートにも、発生したひび割れをコンクリート自体が充填する自己治癒能力の存在が知られている。自己治癒とは、コンクリートにおける若材齢でのひび割れを修復する方法のひとつであり、コンクリートに特殊材料を使用せずとも利用できる技術として注目されている¹⁾。

当研究室の既存研究では、若材齢コンクリートには早期ひび割れに対する自己修復能力が存在することが分かっている。また、この能力はひび割れの入ったコンクリートの強度に関するものである。本研究では、異なる配合で製作した供試体において養生水の温度を 3 段階に変化させ、その自己治癒の応答を調査する。更に、その際の混和材による影響についても併せて調査することを目的とする。

2. 実験概要

2.1. 使用材料

本研究ではシリカフェュームとフライアッシュの 2 つの混和材を使用した。どちらの配合も粗骨材最大寸法、細骨材率、水粉体比が同一、設計スランプ値、空気量も同じとした。下記より使用材料を、表-1 に粗骨材最大寸法 15mm の際の配合、表-2 に 20mm を用いた時の配合をそれぞれ示す。

○普通ポルトランドセメント：密度 3.15g/cm^3

○細骨材：表乾密度 2.61g/cm^3

○粗骨材：表乾密度 2.64g/cm^3

○シリカフェューム：巴工業 シリカフェューム CF-CX

○フライアッシュ：

高品質フライアッシュ(CfFA)Ⅱ種

○高性能 AE 減水剤：

遅延型高性能 AE 減水剤 I 種 レオビルド

表-1 配合表(粗骨材最大寸法 15mm)

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ(cm)	水粉体比 (%)	空気量(%)	細骨材率 (%)
15	8	55	7	45.1

単位量(kg/m ³)					
水 W	セメント C	シリカフェューム	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
170	289	20	779	959	3.091

単位量(kg/m ³)					
水 W	セメント C	フライアッシュ	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
170	278	31	779	959	2.473

表-2 配合表(粗骨材最大寸法 20mm)

粗骨材 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量(%)	細骨材率 (%)
20	8	55	6	44.2

単位量(kg/m3)					
水 W	セメント C	フライアッシュ	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤
165	270	30	784	1001	3.901

2.2. 実験方法

本研究では、コンクリートの自己治癒性能の養生水の温度変化による影響を定量的に評価するため、強度の観点から比較を行う。

2.2.1. 初期損傷導入方法

供試体製作後、材齢 3 日のコンクリート供試体に圧縮強度試験を行う。その際に供試体に生じている圧

キーワード コンクリート構造物, 維持管理, 自己治癒, ひび割れ, エトリンガイト

連絡先 〒371-0845 群馬県前橋市鳥羽町 580 群馬工業高等専門学校 E-mail: htanaka@cvtl.gunma-ct.ac.jp

縮応力が圧縮強度から 15%低下するまで载荷をし、その点で除荷させ初期損傷を与えた。なお、材齢 3 日で初期損傷を負荷するのは、若材齢でのコンクリートの温度ひび割れを仮定してのことである。初期損傷導入後、それぞれの養生水温下で養生して自己治癒させ、圧縮強度試験を行う。

2.2.2. 養生水温

20℃、30℃、40℃の 3 段階の養生水温を用いて実験を行った(写真-1)。養生水には水道水を使用し、20℃環境は本校養生室にて、30℃、40℃は本校コンクリート実験室設置の恒温器にて水温を保持した。



写真-1 恒温器及び水中養生の様子

2.2.3. 圧縮強度試験

試験体は、直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体を製作した。3 段階(20℃、30℃、40℃)の養生水温で水中養生を行い、初期損傷を与える供試体(初期損傷あり)、与えない供試体(初期損傷なし)とも材齢 28 日での強度を測定した。

2.3. 強度回復率

コンクリートの自己治癒性能の、養生水の温度変化による影響を強度により評価するため、強度回復率を定義する。これは初期損傷ありの供試体の 28 日強度が材齢 3 日初期損傷時の強度と比べてどの程度回復しているかを示す指標である。すなわち、強度回復率 R が 100%を超えたときそれは強度回復した、自己治癒したと判断されることとなる。

$$R = \frac{\sigma_{28}}{\sigma_3} \times 100 (\%)$$

R:強度回復率(%),
σ28 : 材齢 28 日強度(N/mm²),
σ3 : 初期損傷時の強度(N/mm²)

3. 実験結果及び考察

3.1. 養生水温と自己治癒性能

図 - 1 にシリカヒュームを用いた養生水温 20℃の供試体における応力ひずみ関係を示す。

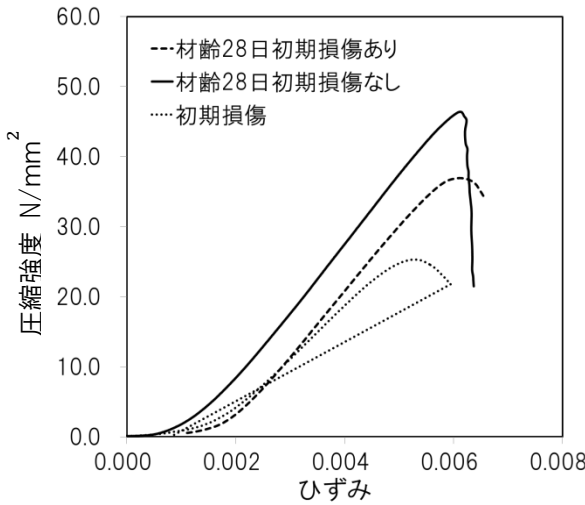


図-1 供試体の圧縮強度試験結果 (20℃)

養生水温 20℃でシリカヒュームを用いた配合の供試体においては、初期損傷時の強度に比べて 28 日後強度は初期損傷ありなしともに大きな値を示していることが分かる。次に養生水温の違いによる強度、強度回復率について表-3 と図-2 を示す。

表-3 養生水温と強度・強度回復率の関係(シリカヒューム)

		養生水温(℃)		
		20	30	40
3日初期損傷	強度(N/mm ²)	25.3	22.9	34.7
28日初期損傷あり		37	35.1	14.1
28日初期損傷なし		46.4	52.2	60.5
強度回復率(%)		146.245	153.275	40.634

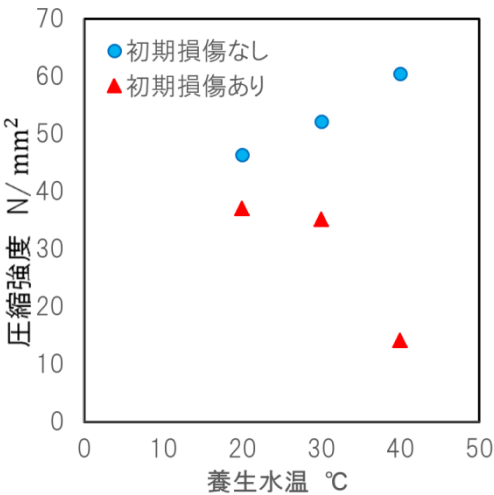


図-2 養生水温と圧縮強度の関係(シリカヒューム)

初期損傷なしの供試体の強度は養生水温が高くなるにつれて、圧縮強度 46.4N/mm^2 、 52.2N/mm^2 、 60.5N/mm^2 と大きくなっている(図-2 参照)。一方、初期損傷ありの供試体の強度は養生水温 40°C の時には 14.1N/mm^2 と極端に低下している。次に表-3 について、養生水温 20°C 、 30°C においては初期損傷時に比べて材齢 28 日に約 5 割の強度回復がみられた。しかし、水温 40°C では 100%をはるかに下回る 40.634% と強度回復がなく、自己治癒能力は全くなかった。これらの結果から初期損傷時(若材齢時)に供試体が大きな強度を発現し過ぎたことにより、コンクリートが脆性的な破壊を起こしたということが言える。脆性的な破壊によって大きくひび割れが入り、自己治癒能力を失った供試体は、材齢 28 日が経過しても強度回復をすることができないまでに損傷を受けてしまい、自己治癒能力を発揮できなかったと考えられる。

3.2. 混和材と自己治癒性能

表-4 に混和材の違いによる供試体の各々に条件での強度、強度回復率の違いを示す。

表-4 混和材と強度・強度回復率の関係

		混和材種類	
		シリカヒューム	フライアッシュ
3日初期損傷	強度(N/mm ²)	23.5	27.2
28日初期損傷あり		37	35.3
28日初期損傷なし		46.4	49.5
強度回復率(%)		146.245	129.779

表-4 について、2 種類の混和材の各条件での強度を比較すると、材齢 3 日初期損傷時、材齢 28 日初期損傷あり、材齢 28 日初期損傷なしの場合、全ての条件において混和材の違いによる差は $2\sim 3\text{N/mm}^2$ 程度であり、ほとんど見られなかった。よって、養生水温 20°C の環境においては、シリカヒューム、フライアッシュの 2 つの混和材の間で自己治癒性能に差はないと考えられる。

3.3. SEM 解析結果と考察

初期損傷を与えた供試体の材齢 28 日強度が回復している原因について調査するため、シリカヒュームを用いた配合の初期損傷時において生じたひび割

れの、材齢 28 日圧縮強度試験後の同ひび割れ面を、SEM(走査型電子顕微鏡)を用いて分析した。ひび割れ面に生成した析出物の SEM 画像を写真-2 に示す。

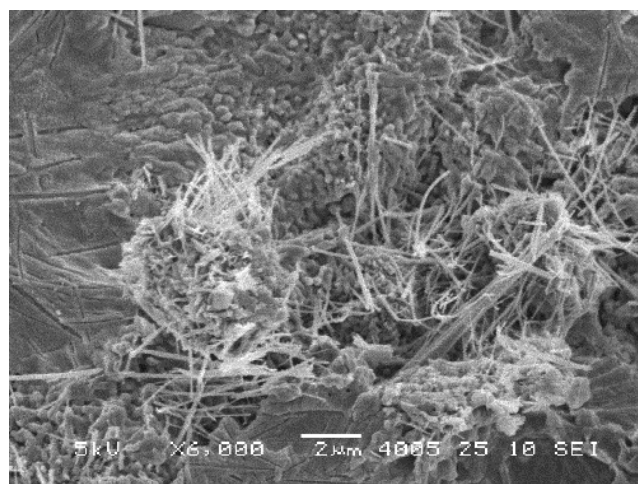


写真-2 ひび割れ面の SEM 画像(シリカヒューム)

写真-2 には針状結晶がいくつも見られる。これはセメントの水和生成物のひとつであるエトリンガイトであると考えられる。セメントが水と接触するとアルミネート相及びフェライト相と石膏の反応により、急速にこのエトリンガイトを生成する。エトリンガイトは水和反応生成物の中でも水和の初期の段階において生成される物質である。また、このエトリンガイトにはそれ自体で強度を発現する性質があることが知られている²⁾。したがって、コンクリートの強度発現、回復にはこのエトリンガイトが影響していると考えられる。

3.4. フライアッシュと自己治癒性能

粗骨材最大寸法 20mm を用いた供試体の実験結果と考察を次から示す。なお、粗骨材最大寸法 15mm の実験とは材料の条件が違い、配合も異なるため、両者の比較はせずにあくまで参考実験として記す。粗骨材最大寸法 20mm の使用にあたっては、15mm の実験結果をふまえ、より施工性に優れており、なおかつ単位水量を減少でき長期的な高強度発現を期待できるフライアッシュを用いた配合で供試体を製作し、15mm と同様の方法で試験を行った。

表-5 に各養生水温条件でのそれぞれの強度・強度回復率を示す。また、図-3 に養生水温の変化に伴う圧縮強度の変化を表す。

表-5 養生水温と強度・強度回復率の関係(フライアッシュ)

		養生水温(℃)		
		20	30	40
3日初期損傷	強度(N/mm ²)	21.8	25.8	23.4
28日初期損傷あり		29.3	34.6	34.8
28日初期損傷なし		43.9	46.4	48.4
強度回復率(%)		134.256	134.086	148.743

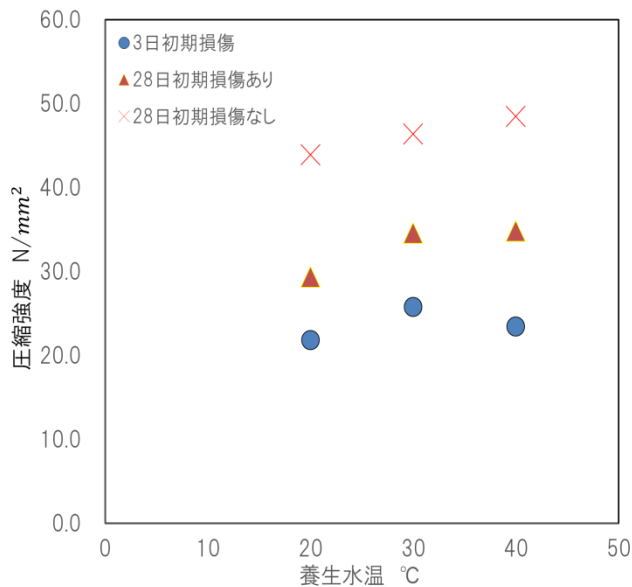


図-3 養生水温と圧縮強度の関係(フライアッシュ)

粗骨材最大寸法 20mm、フライアッシュを混和材に用いた供試体においては、材齢 3 日での初期損傷時の強度は安定せず、30℃の際の強度が最も大きい、材齢 28 日になると初期損傷ありなしともに養生水温が高くなるほど、強度発現している。その結果、強度回復率を算出すると、どの水温でも 100%を上回り、強度回復していると言えるが水温 40℃のとき 148.743%と最も大きな強度回復率を示した。また養生水温 20℃、30℃の際の強度回復率は 0.2%程しか変わらない。よって、粗骨材最大寸法 20mm、混和材にフライアッシュを用いた場合には若材齢での供試体強度にバラつきがあることを考慮すると、養生水温 20℃、30℃の時には水温 40℃ほどに材齢 28 日強度の回復は期待できないと言える。

4. まとめ

本研究でこれまで得られた成果を次に示す。

- ①シリカヒュームを混和材に用いた配合において、その養生水温が高いほど材齢 3 日の供試体にお

いて大きな強度発現を期待できる。

- ②高強度発現による脆性破壊の発生リスクから、自己治癒には必ずしも養生水温の高温環境が適しているとは言えない。
- ③シリカヒュームとフライアッシュを用いた配合では、養生水温 20℃の環境においては初期損傷あり・なしともに材齢 28 日圧縮強度に差がほとんど見られない。
- ④コンクリートの自己治癒(強度回復)に起因すると考えられる水和生成物・エトリンガイトがひび割れ面に生成していることが確認できた。
- ⑤フライアッシュを混和材に用いた配合においては材齢 3 日の供試体強度に養生水温による差は見られないが、材齢 28 日強度は初期損傷あり・なしともに養生水温が高いほど強度を発現した。またその結果、強度回復率は養生水温が高いほど大きな値を示し、強度回復した(自己治癒した)と考えられる。

5. 今後の課題

過去の研究成果及び今回の研究により、自己治癒能力の発現には養生水温が影響する一つの因子であること、自己治癒を目的としたコンクリートには用いる混和材に適するものとそうでないものがあることがわかった。今後は更に、養生水温に多段階の変化を与え自己治癒能力の応答を見る、自己治癒を目的としたコンクリートに適する混和材を調査するなどを課題としてあげる。

また、本研究では自己治癒性能の評価に強度、強度回復率を用いたが、自己治癒性能のひび割れを自然閉塞するという能力をより直接的に評価するために、試験方法として透水試験や薬品耐久性試験も併せて実施することも検討したい。

参考文献

- 1)セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会「セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会報告書」(参照：2015 年 9 月)
<http://www.jci-net.or.jp/j/jci/study/oldlist/committee/tc075b/activity.html>
- 2)社会法人セメント協会「C&C エンサイクロペディア」2004 p22～p29,p34,p35 (参照：2015 年 10 月)