

論文 補修剤封入による自己修復機能付加に関する基礎的研究

沼尾達弥^{*1}・福沢公夫^{*2}・三橋博三^{*3}

要旨: コンクリートに自己修復機能を付加させるために、短く切断したガラス管(カットガラス管)に補修剤を封入して打設時にコンクリートに混入することにより、自己補修機能を付加できるかどうかの基礎的データを得るために実験的検討を行った。補修剤封入の効果は、圧縮強度試験を繰り返し行い強度減少の程度を評価することにより行った。その結果、カットガラス管を混入することにより圧縮強度は小さくなるものの、繰返し載荷回数が増える場合に、補修効果が現れることが分かり、封入の方法を改良することにより自己修復機能を付加できる可能性があることが示された。

キーワード: 自己修復, カットガラス管, 補修剤, 圧縮強度

1. はじめに

近年、インテリジェント材料に対する関心の高まりにより、この種の材料に関する研究が数多く報告されている¹⁾。しかし、建設分野で多用されるコンクリートを対象とした研究はきわめて少ないのが現状である。

本研究では、コンクリートに修復機能を付加するための一つの方法として、短く切断したガラス管(以下カットガラス管)に補修剤等を封入し、コンクリート打設時に、このガラス管ごとコンクリートに混入することにより、機能性を付加できる可能性があるかどうかを実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験の種類

本研究では、以下の2種類の実験を行った。

実験1: 封入剤の流出実験

カットガラス管に封入した液剤が圧縮試験によってガラス管が壊れ、コンクリートに生じたひびわれを通して流出するかどうかを調べる。

実験2: 補修効果実験

カットガラス管に市販の補修剤を封入し、供試

体の破壊直前まで圧縮荷重を繰り返すことにより、封入された補修剤が補修効果を発揮するかどうかを調べる。

2.2 使用材料及びコンクリートの配合

本研究で使用した材料は、セメントとして、普通ポルトランドセメント(比重: 3.15)を使用した。骨材は、細骨材として、岩瀬産粉砕砂と鬼怒川産天然砂を3:7の重量比で混ぜ合わせた砂(比重: 2.56, FM: 2.29)、及び粗骨材として岩瀬産砕石5号と6号を55:45の割合で混ぜたもの(比重 2.68, FM 6.79)とした。また、混和剤として、AE減水剤及びAE助剤を使用した。

カットガラス管に封入する液剤は、実験1では粘性と表面張力の異なる低粘性油(油A)と高粘性油(油B)の2種類を、また、実験2では、水ガラス系補修剤(1液性)及びエポキシ系補修剤(硬化剤と主剤の2液性)の2種類を使用した。

表-1には、実験に使用したコンクリートの配合を示す。コンクリートの配合は、水セメント比を30, 45, 60%の3種類とし、目標スランプを 8 ± 1 cm, 空気量を 5 ± 1 %として試し練りにより決定した。

*1 茨城大学助教授	都市システム工学科	工博	(正会員)
*2 茨城大学教授	都市システム工学科	工博	(正会員)
*3 東北大学大学院教授	工学研究科	工博	(正会員)

表-1 コンクリートの配合

G max (mm)	スランプ [°] (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s / a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
					W	C	S	G		
			3.0	40.1	156	520	646	1010	0.25	0.05
2.0	8 ± 2	5 ± 1	4.5	47.7	186	412	789	1007	0.25	0.08
			6.0	46.5	174	290	882	1045	0.25	0.02

2. 3 カットガラス管への液剤封入方法

図-1に示すように、カットガラス管の一方を合成ゴム系接着剤で閉じた後、液剤を注入し同様の接着剤でもう一方を閉じることにより、液剤をガラス管内に封入した。

2. 4 コンクリート供試体作製方法

供試体は、φ10×20cmの円柱供試体を用いた。前述の方法により予め作製しておいた液剤封入済みのカットガラス管を、コンクリート打設時に5層に分けて、一方向に偏らないように注意しながら混入した(図-1参照)。尚、2液性の補修剤については、主剤と硬化剤を別にガラス管に封入し、主剤と硬化剤の割合(2:1)に応じて、混入した。また、比較のために、ガラス管を混入しない供試体も作製して実験を行った。供試体は材令1日で脱型し、実験1では、2週間水中養生後に、実験2では4週間水中養生後に実験に使用した。

2. 5 実験方法

2. 5. 1 実験1: 封入剤の流出実験

(1) 要因と水準

本実験では、水セメント比30%のコンクリートを用いて、供試体に混入するカットガラス管の径と長さ、混入量、及び混入する液剤の物性を変化させて、コンクリート表面に流出する液剤の程度の違いを調べた。表-2には、これらの要因と変化させた水準をまとめて示している。

尚、ガラス管の混入量は、ガラス管内径にばらつきが見られるため、コンクリートの容積に対するガラス管の外径により求められる容積の割合とした。

(2) 実験の進め方

本実験は、L8直交表による実験計画法に従っ

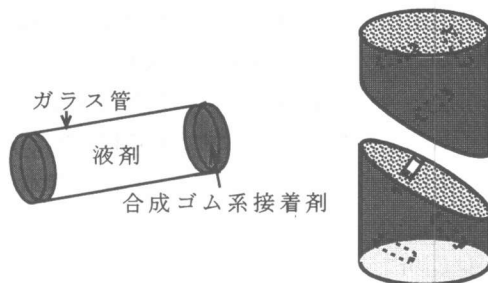


図-1 ガラス管への封入とガラス管混入供試体

表-2 実験1の要因と水準

要因	水準
A: ガラス管外径	3, 5 (mm)
B: ガラス管長	20, 30 (mm)
C: ガラス管混入率	3, 5 (vol. %)
D: 液剤	油A (低粘性油) 油B (高粘性油)

表-3 実験1に使用した直交配列表

実験 No.	列番号						
	1	2	3	4	5	6	7
1	①	①	①	①	①	①	①
2	①	①	①	②	②	②	②
3	①	②	②	①	①	②	②
4	①	②	②	②	②	①	①
5	②	①	②	①	②	①	②
6	②	①	②	②	①	②	①
7	②	②	①	①	②	②	①
8	②	②	①	②	①	①	②
要因	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D
①	5mm	20mm	—	5%	—	—	油A
②	3mm	30mm	—	3%	—	—	油B

って行った。使用した直交配列表を表-3に示す。このようにして決められた8種類の供試体を各3体ずつ作成して実験を行った。実験によって得られた測定値をもとに分散分析を行い、統計的に各要因の影響評価を行った。尚、交互作用としてA×B, A×C, B×Cを取り上げた。

(3) 測定項目

本実験では、圧縮試験後の供試体に発生したひび割れから封入した液剤が流出する様子を観察して、流出が見られるまでに要した時間と供試体表面に広がった液剤の面積を測定した。

尚、圧縮試験においては、供試体が原型を留めるように、最大荷重に達する直前に徐荷した。

2. 5. 2 実験2：補修効果実験

(1) 要因と水準

この実験での要因は、水セメント比と補修剤の種類とした。水セメント比を30, 45, 60%の3水準、カットガラス管に封入する液剤を、水ガラス系補修剤(1液性)及びエポキシ系補修剤(2液性)の2水準とした。この要因と水準をまとめて表-4に示す。尚、本実験では、混入したガラス管の外径は3mm, 長さ20mm, 混入率は5%と一定にした。また、供試体は各5体作製し、その平均値を求めた。

(2) 測定項目

前述と同様、圧縮試験において供試体の原形を留めるように破壊に至る直前に徐荷し、その後、常温で4日間放置した後、再度圧縮試験を行い強度の測定を繰り返した。ここでは、繰り返し測定した圧縮強度が、1回目の圧縮強度に対してどの程度発現したかによって補修剤の効果を調べた。

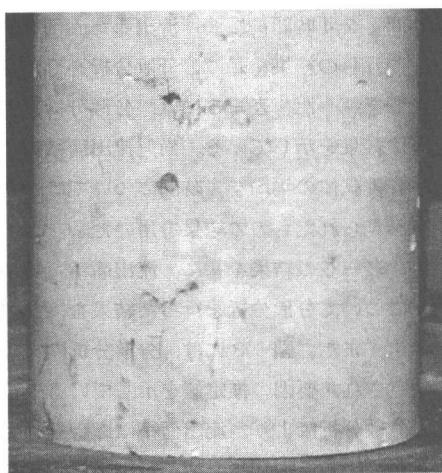
3. 結果と考察

3. 1 実験1：封入剤の流出実験

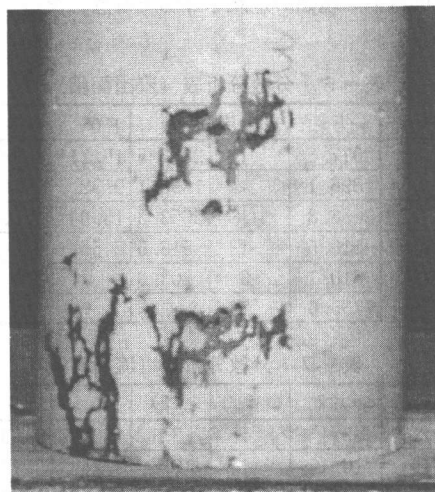
写真1には、圧縮試験直後と圧縮試験後4時間経過した時の供試体側面の様子の一例を示している。この写真から、圧縮試験によって生じたひび割れから封入した油が流出している様子が分かる。流出時間や面積に差はあるものの、全ての供試体で油の流出が確認できた。

表-4 実験2の要因と水準

要因	水準
A：水セメント比	30, 45, 60 (%)
B：補修剤の種類	水ガラス系補修剤 (一液性) エポキシ系補修剤 (二液性)
ガラス管径	3 (mm)
ガラス管長	20 (mm)
ガラス管混入率	5 (vol. %)



a) 圧縮試験直後



b) 4時間経過後

写真1 油の流出状況 (実験No. 4 供試体)

次に、圧縮試験の結果を、ガラス管外径、長さ及び混入率で整理したものを図-2に示す。この図より、ガラス管外径については5mmよりも3mmの方が強度に与える影響は少ないことが分かる。また、ガラス管長さについては、長さ2cmよりも3cmの方が、混入率については5%よりも3%の方が強度に与える影響は少なくなるという傾向が得られた。しかし、ガラス管無混入の場合は65N/mm²程度の強度を示したことから、全体としてガラス管混入により強度が低下した。

更に、コンクリート表面から油の流出が観察された時間と24時間後に油が流出した面積を測定した。これらの結果を基に、分散分析を行い各要因の影響を調べた。表-5には、分散分析に使用した実験結果を示している。尚、流出面積については、各供試体の平均を、時間については一番早く流出が見られたものの結果を用いた。

次に、表-5の結果を基に、流出面積、流出時間各々について分散分析を行った結果を、表-6、7に示す。また、図-3には、分散分析の結果有意と判定された要因の推定値を示している。

この分散分析により、流出面積に影響を与える要因として、ガラス管径と油の種類が危険率5%で有意となり、流出するまでの時間に影響を与える要因は油の種類が危険率5%で有意となった。

表-6 分散分析表 (流出面積)

要因	平方和	自由度	分散	F0	確率
A	2077.5	1	2077.5	10.21*	0.049
C	1896.1	1	1896.1	9.32	0.055
D	2653.3	1	2653.3	13.04*	0.036
A・B	518.5	1	518.5	2.55	0.209
誤差	610.1	3	203.3		
計	7755.6	7			

表-7 分散分析表 (流出時間)

要因	平方和	自由度	分散	F0	確率
A	3.1	1	3.1	1.00	0.391
B	10.1	1	10.1	3.24	0.170
D	36.1	1	36.1	11.56*	0.042
A・C	10.1	1	10.1	3.24	0.170
誤差	9.4	3	3.1		
計	68.8	7			

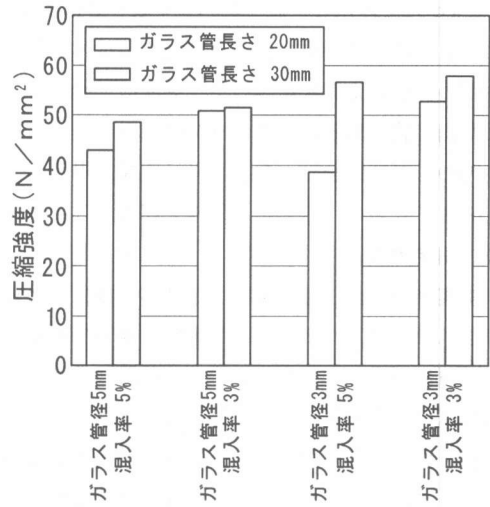


図-2 圧縮試験結果 (実験1)

表-5 分散分析に用いた実験結果

実験No.	流出面積 (cm ²)	流出時間 (h)
1	117.2	1
2	26.0	3
3	48.5	5
4	59.5	1
5	23.2	3
6	23.4	1
7	59.5	1
8	16.2	10

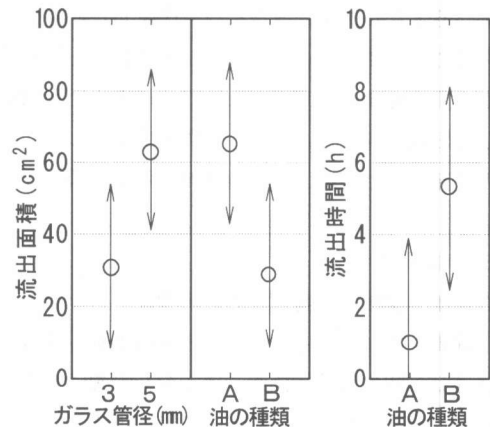


図-3 流出面積及び流出時間の推定値

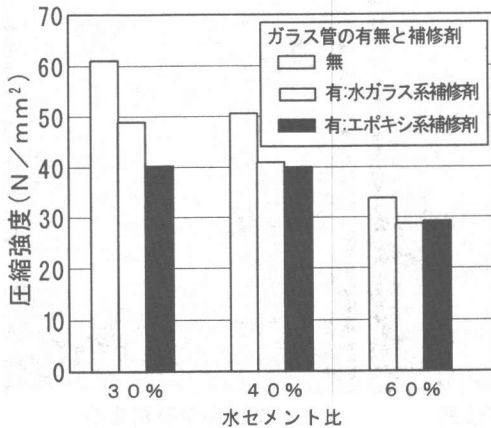


図-4 圧縮試験結果 (実験2)

これより、液体の粘性が小さければ表面に流出するまでの時間は短く、かつ表面に広がる面積は大きくなり、ガラス管径が大きいほど、つまりガラス管1本当当たりの液体の量が多いほど流出面積が大きくなることが示された。

以上の結果をまとめると、強度に与える影響を少なくするためには、ガラス管径は小さい方がよく、液体の流出に関しては、ガラス管径は大きく、粘性の低い液体を用いるのがよいということになるが、すべての供試体で流出が確認できたことで、封入した液剤の流出確認のためであれば流出の程度は必要最小限でよく、強度に与える影響が少ない管径3mmのガラス管を使用した方がよいといえる。

以上の結果を踏まえ、実験2においては、ガラス管外径3mmのものを使用することとした。また、ガラス管長さについては、1本当当たりの液剤量は少なくなるが、コンクリート供試体全体への分散性を考慮して、20mmとした。

3.2 実験2：補修効果実験

実験結果として、図-4には1回目の圧縮試験の結果より得られた強度の平均について、水セメント比及びガラス管混入の有無に関して整理したものである。

この結果より、ガラス管を混入した供試体強度は、混入しない供試体のほぼ80%程度の強度減少を示し、水セメント比が大きくなるほど減少割

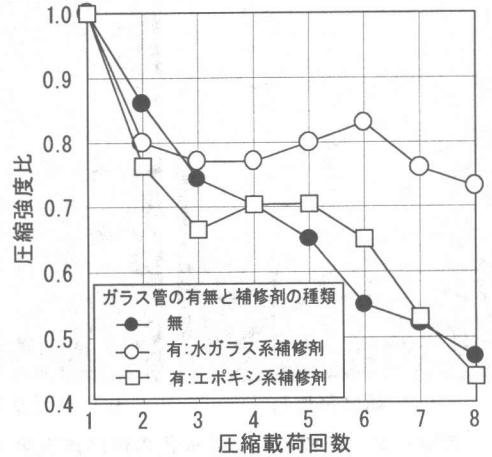


図-5 圧縮荷回数と圧縮強度比 (W/C=30%)

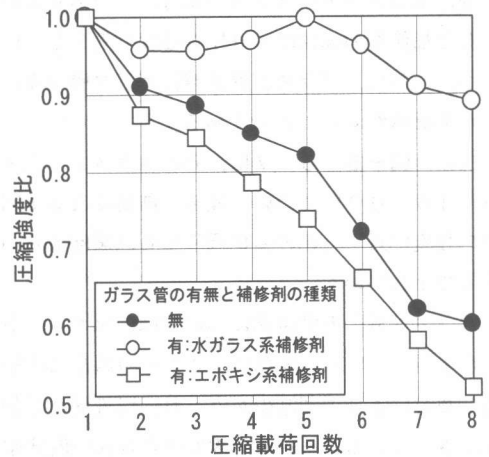


図-6 圧縮荷回数と圧縮強度比 (W/C=45%)

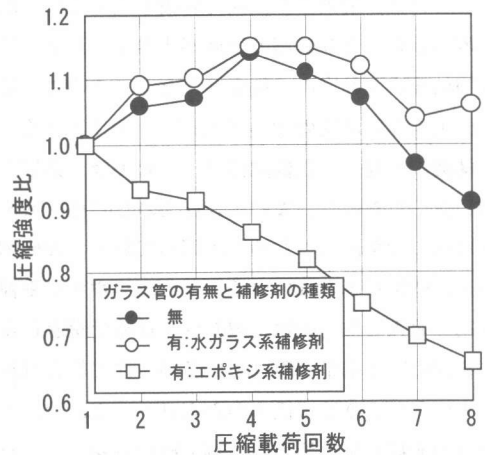
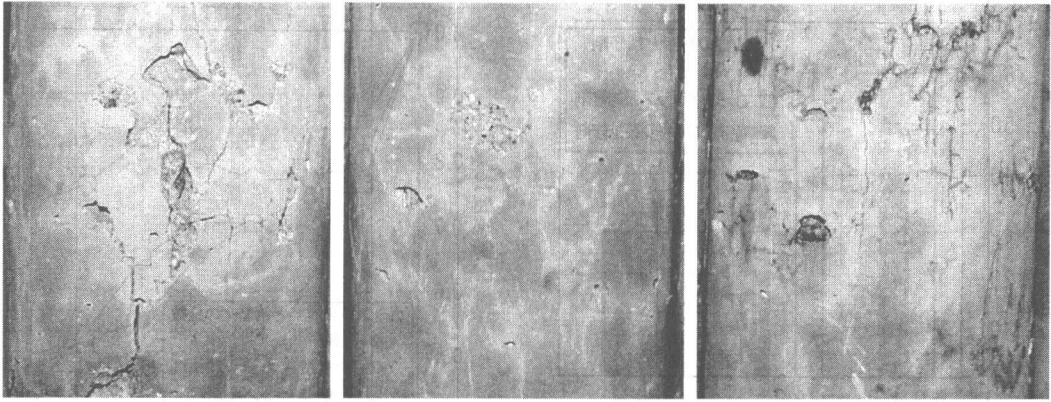


図-7 圧縮荷回数と圧縮強度比 (W/C=60%)



a) 補修剤無し

b) 水ガラス系補修剤

c) エポキシ系補修剤

写真-2 圧縮繰返し载荷後の供試体表面（繰返し回数：5回目、水セメント比：45%）

合が少なくなる傾向を示していることが分かる。

尚、水セメント比30%の場合、ガラス管に封入した補修剤の種類により圧縮強度が変化しているが、これは、ガラス管混入時にガラス管が偏在した供試体があったためである。

次に、図-5、6、7は、各々水セメント比30、45、60%について繰返し载荷による1回目の強度に対する比の変化過程を各試験回数との関係で示している。

ガラス管無しの供試体については、水セメント比が小さい、 $W/C=30\%$ 、 45% の場合には繰返し载荷により強度減少がみられ、脆性的な挙動が示されている。しかし、 $W/C=60\%$ の供試体では、6回目まで初期の強度より大きな値を示した。これは、最大荷重直前で除荷したために、高強度の供試体より破壊の程度が小さく、更に、試験開始後は実験室内で気中養生としたために、乾燥により強度増進の効果が現れたと考えられる。

補修剤を混入した供試体では、水ガラス系補修剤を使用した場合、 $W/C=30\%$ の2回目を除きほぼ全てで無混入のものを上回っており、補修剤混入の効果が示されている。一方、エポキシ系補修剤を混入したものは、 $W/C=30\%$ で繰返し3～6回の間で効果が現れているが、他の場合は無混入のものより強度低下がみられた。これは、エポキシ系補修剤の場合、主剤と硬化剤を別にガラス管に封入しコンクリートに混入したために、主剤と硬化剤のガラス管が同時に壊れ、かつ、ひび

割れの中で混ざり合うとは限らないために、補修剤としての効果が現れ難く、また、ガラス管が強度上では欠陥となったためと思われる。

写真-2には、圧縮繰返し载荷後の供試体表面の状況の例として、水セメント比45%、繰返し回数5回目の場合を示している。この写真から分かるように、補修剤を混入したものに比べ、混入しない供試体に表面剥離が多く観察された。また、エポキシ系補修剤では、ひび割れからの流出が確認できた。一方、水ガラス系補修剤では、流出後すぐに乾いて見えなくなるため、流出を確認できるものは少なかった。

4. まとめ

本実験では、カットガラス管を用いて液剤を封入し、コンクリート中に混入する方法による自己補修効果の可能性を調べた。その結果、本実験で用いた方法により、ひび割れからの流出が観察できると共に、補修剤を封入することで強度低下を抑制できる可能性が示された。今後、液剤の選定や封入方法の工夫により、流出量の調整がはかれれば、ひび割れに対する効果ばかりでなく、耐久性改善やその他の機能付加にも応用できるものと思われる。

参考文献

- 1) たとえば、P. Vincenzini, "INTELLIGENT MATERIALS AND SYSTEMS", Techna, 1994.