

自己修復機能を有するインテリジェント コンクリートの開発に関する研究

(研究課題番号 07555466)

平成7年度～平成9年度科学研究費補助金 (基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 **三橋 博三**
(東北大学工学研究科教授)

自己修復機能を有するインテリジェント コンクリートの開発に関する研究

(研究課題番号 07555466)

平成7年度～平成9年度科学研究費補助金 (基盤研究(A)(1))
研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 **三橋 博三**

(東北大学工学研究科教授)

東北大学図書



00010132573

附属図書館

研究組織

研究代表者：三橋博三（東北大学工学研究科教授）

研究分担者：大濱嘉彦（日本大学工学部建築学科教授）

大塚浩司（東北学院大学工学部土木工学科教授）

野村希晶（東北大学工学研究科助教授）

出村克宣（日本大学工学部建築学科助教授）

沼尾達弥（茨城大学工学部都市システム工学科助教授）

佐藤幸男（スリーボンドユニコム(株)技術開発部）

金子佳生（清水建設(株)設計本部）

花田 南（(株)スリーボンド研究部）

研究協力者：西脇智哉（元・東北大学大学院、現・(株)大林組）

乾 弘泰（東北大学大学院）

研究経費

平成7年度	9,200 ^{千円}
平成8年度	4,400 ^{千円}
平成9年度	1,300 ^{千円}
計	14,900 ^{千円}

研究発表

- 1) 西脇智哉、三橋博三、大塚浩司、野村希晶、桐越一紀、“自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究”、東北大学建築学報、第35号、pp.81～86、1996.3
- 2) 乾弘泰、西脇智哉、三橋博三、“建築材料のインテリジェント化の可能性に関する一考察”、日本建築学会東北支部研究報告書、pp.397～400、1997.6
- 3) 乾弘泰、西脇智哉、三橋博三、“建築材料のインテリジェント化に関する一考察”、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1材料施工、pp.643～644、1997

執筆担当者名 担当章・節

三橋博三・・・1、2.1、2.2、3.1、5.1、5.6、6.1、6.3、7

大濱嘉彦・・・6.5

大塚浩司・・・4.4、6.4

野村希晶・・・5.1、報告書編集

出村克宣・・・4.1、5.3、5.4、5.7、6.2、6.5

沼尾達弥・・・5.2、5.5

佐藤幸男・・・4.2、5.7

金子佳生・・・3.2

花田 南・・・4.3、5.7

西脇智哉・・・5.1、6.1、6.3

乾 弘泰・・・2.1、2.2、5.1、5.6、6.1、6.3

目 次

1. 序論	-----	1
2. 既往の研究		
2.1 インテリジェント材料開発に関する既往の研究	-----	3
2.2 機能性コンクリート	-----	5
3. インテリジェントコンクリートの概念		
3.1 インテリジェントコンクリートの概念	-----	9
3.2 インテリジェントコンクリートの構造物への応用	-----	11
4. インテリジェントコンクリートに応用可能な先行技術		
4.1 多機能性はく離剤	-----	13
4.2 高性能各種コンクリート補修材	-----	17
4.3 カプセル化技術とその応用	-----	20
4.4 X線技術	-----	23
5. コンクリートのインテリジェント化のための基礎実験		
5.1 ひび割れ幅の制御及び補修効果との関係	-----	25
5.2 ひび割れ幅と補修剤の浸透特性	-----	34
5.3 耐久性付与剤の貯蔵安定性	-----	39
5.4 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入モルタルの強さ性状	-----	44
5.5 カットガラスを用いたカプセル化の基礎実験	-----	48
5.6 人工軽量骨材を用いたカプセル化の基礎実験	-----	56
5.7 機能性カプセルの作製	-----	59
6. インテリジェントコンクリートの試作		
6.1 自己止水コンクリート	-----	61
6.2 自己カプセル化による自己修復コンクリート	-----	65
6.3 ガラス管を用いた自己強度回復コンクリート	-----	74
6.4 細孔ネットワークによる自己強度回復コンクリート	-----	79
6.5 高耐久性コンクリート	-----	92
7. 結び	-----	99

1. 序論

1. 序論

近年、コンクリート構造物の早期劣化の可能性が顕在化して以降、その高耐久性化への社会的要請が大きい。一方、宇宙構造物、放射性廃棄物処理施設あるいは毒性の強い廃棄物用のタンクの障壁など、高气密性保持等が要求されるこれまでに考えられなかったような新しい分野でのコンクリートの利用が検討され始めている。

しかし、コンクリートは圧縮応力下では極めて優れた抵抗性能を示すのに対し、引張応力下ではその性能は著しく低下する。従って通常は鉄筋によって補強されるが、過度の引張応力が発生した場合にはひび割れが発生してしまう。また温度応力や乾燥収縮が発生する場合でもひび割れは発生してしまい、完全にそれを抑制することは極めて困難で、様々な外力により、構造上の亀裂などの損傷が発生、進展するという疲労現象は受け入れざるを得ないものとして存在してきた。この様なひび割れは、強度の低下や気密性の低下などの直接的な劣化性能だけでなく、微細なものであっても空気中の炭酸ガスや酸性雨、また塩分などが躯体中に入り込むことで中性化や塩害などの劣化を引き起こす。これらは鉄筋の錆を誘発し、早期劣化の原因となる。しかしながら場所と場合によっては、この様な早期劣化を引き起こしても、使用期間中に人間の手が届かないために、それを修復することはおろか検査することさえ出来ない。このことは、人が容易に近づけない宇宙空間や原子炉内ではより顕著になり、また、構造物が大規模であるほど損傷の発生する危険性も高くなる。

最近、各分野でインテリジェント材料の開発が取り上げられている。これは材料強度や耐久性等の物理的な指標に加えて、情報の概念を取り入れたものである。つまり、複数の機能を組織的に提携させて、より高次の機能を能動的に実現しようという視点を導入したものである。そのことにより、環境条件の変化に応じて材料自体の機能や構造が変化する自己制御能力や、部分的な破壊が生じて自己修復を行う機能を持たせたものである。従来材料は、受動的性質に重きがおかれていたが、インテリジェント材料は、それと対照的な性質、つまりある状態を検知し、その情報を処理してあるレベルで判断する。そしてそれに基づいて能動的に行動を実行できる機能を材料自身に組み込もうとしたものである。材料自身が劣化や破壊を診断して寿命を予測したり、自己分解して自然に戻ったり、自己学習してより賢くなったりするインテリジェント材料は、安全工学の上からも、環境問題・省資源の立場からも極めて有用である。これと同様の機能を既存の材料の複合化で行うスマート構造についても実用化の研究が活発に行われている。特に航空機や人工衛星、また医療分野などでその研究が進んでおり、実用化もなされてきている。このことは建築・土木構造物においても例外ではない。構造物の決定的破壊以前に現れる変化を早期に発見し、修復して、橋梁や建築物の崩壊、ダムが決壊事故を未然に防ぐため、インテリジェント化の研究が活発化してきた。また、このインテリジェント材料・スマート構造システムの研究開発は、人間社会と自然に対応し、調和・強調できる材料・構造設計それ自体への変革を目指している点からしても、工業・社会経済分野にも広範で大きな影響を及ぼして行くことが予想できる。

このような背景を踏まえて、本研究は建築材料のインテリジェント化の可能性について考察し、特に自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発について検討したものである。開発対象の材料は、検知・判断・制御の3つの機能を組み合わせて実現できるものであることから、各々の機能を担うことのできる可能性のある既存技術をインテリジェントコンクリートに応用可能な先行技術として取り上げた。更に、様々な基礎実験を重ねることによって問題点を整理した。最後に、幾つかの機能に絞ってインテリジェントコンクリートの試作を行った。

2. 既往の研究

2.1 インテリジェント材料開発に関する既往の研究

1. はじめに

本節では、各分野のインテリジェント材料についての既往の研究を概説する。但し、インテリジェント材料そのものが開発された例はどの分野についても未だない。そのためインテリジェント材料の創製に向けて必要とされる技術、もしくはスマート構造の一翼を担うことを期待されている技術などについて紹介する。

科学技術庁航空・電子等技術審議会第13号答申の中で、インテリジェント材料という新材料の創製を行うためには、ミクロからメゾスコピック領域での研究が必要不可欠とされている。この領域の研究を行うにあたって、走査型トンネル顕微鏡 (STM; Scanning Tunnel Microscope) の技術が注目を集めている。STMは直接原子を観察、分析することや、ナノメートルのレベルで加工を行うことが可能であり、原子・分子を一つずつ動かすことも実現しつつある。このため原子・分子レベルでの材料の設計が可能となり、インテリジェント材料という新材料の創製に大きな役割を果たすものと考えられている。

しかし、構造材料のインテリジェント化の観点からは、上記のような材料創製技術はあまりにミクロ的である。そのため圧電材料、形状記憶合金、光ファイバ、電気粘性流体などの機能材料をFRP (Fiber Reinforced Plastics) などの構造材料に組み込んで、センシング、変形制御、振動制御、損傷制御などを可能にしようという試みが盛んに行われている[松岡三郎、1992]。中でも、インテリジェント材料の概念が適用されることが期待される、その殆どが長大構造物の保守、ヘルスマonitoringや制振・免振に関するものである。

2. 各種機能性材料

ここに取り上げる機能材料は、それぞれがインテリジェント材料というわけではないが、その機能からインテリジェント機能を部分的に受け持ち、構造もしくは材料全体のインテリジェント化に寄与することが期待されているものである。

2.1 圧電材料

力を加えてひずませると電圧を発生する (圧電効果)、逆に電圧を加えるとひずみあるいは応力を発生する (逆圧電効果) 性質を有する物質である。インテリジェント材料への適用は、電気エネルギーと機械エネルギーの変換現象のうち、圧電効果を利用したアクチュエータ (駆動機械要素) や、逆圧電効果を利用したセンサに用いられる。振動制御に多く用いられており、アクチュエータと同時にセンサとしても用いることで、そこからのフィードバックにより振動をより能動的に制御することが可能になる。また、代表的なアクチュエータの適用例として前述のSTMの微動機構が挙げられる[泉守他、1992.11]。

2.2 形状記憶合金 (SMA :Shape Memory Alloy)

外界の温度の変化に伴い、予め記憶させた元の形状に伸縮できるサーモセンサ (熱感知) とアクチュエータの機能を兼ね備えており、さらには時間的記憶 (メモリー) ・回復 (リカバリー) 機能も有する。このことはインテリジェント材料としての機能を“材料自体に内包”していると考えられ、知的機能性要素材料として注目されている。また大ひずみと高強度アクチュエータとしての特長があるので、他の金属、ポリマー、コンクリートなどのコンポジット化により知的な構造材料化が可能である[古屋泰文、1992.9][古屋泰文、1992.10]。

2.3 光ファイバ

センサとしての機能を持つことが知られており、FRPなどの成形性に優れた構造材料中に埋設することで、構造物全体の内部のひずみが直接測定可能になることが期待される。コンクリート構造物に対して埋設することで、ヘルスマonitoringを行うことも既に実用化されつつある[越出慎一、1992]。

2.4 電気粘性流体 (ER流体:Electro-Rheological fluid)

電場を加えることによって、見かけ上粘性を変化させることの出来るコロイド溶液である。絶縁性流体中に微粉末を分散させたもので、効果のある微粉末は種々報告されている。振動制御機器、特に機械の分野での衝撃の吸収、振動の減衰、ダンパへの適用などが盛んに取り上げられている[森下信、1992]。

特にこの様なスマート構造には、センサから得た情報をアクチュエータに伝えるために、コンピュータなどによるプロセッサが必要になる場合が多い。例えばひずみセンサから得たひずみの情報によって、破壊の発生や進展を判断、決定することはいわゆる逆問題となり、どの場合も一意に決定されるわけではない。しかしこの様な曖昧な判断に対して、従来のコンピュータは本質的に苦手である。この為人間の脳の、ニューロンとシナプスの関係をコンピュータに持ち込んで、コンピュータに学習能力を持たせることで、より最適な解を導き出せるようにする概念が取り上げられている。この様なシステムを「ニューラルネットワー

ク」と呼び、このことに関する研究が盛んである[轟章、1994]。

これらとは別に、生体・医療に関わる分野でも盛んに研究が行われている。例えば薬自身が患部を認識して、その部分にのみ薬を働かせることによって、副作用を最低限に抑えることが可能な薬物送達システム (DDS ; Drug Delivery System) や人工臓器などで具体的な成果が上がりつつある[原田英典、1992][高木俊宜、1993]。

3. まとめ

以上のように、各分野において機能性材料が次々に提案されている。次節では特にコンクリートにインテリジェント機能を付与させることを目的とした研究例を概説する。

参考文献

- 古屋泰文、“形状記憶合金の材料特性と利用、その1”、機械の研究、vol.44、pp.999-1003、1992.9
古屋泰文、“形状記憶合金の材料特性と利用、その2”、機械の研究、vol.44、pp.1090-1096、1992.10
原田英典（編集部），“究極のインテリジェント制がん法”、工業材料、vol.40、No.10、pp.108-111、1992.8
泉守、小野富男、足立忠晴、“圧電材料”、機械の研究、vol.44、pp.1192-1198、1992.11
越出慎一、“光ファイバ・センサ”、機械の研究、vol.44、pp.893-898、1992.8
松岡三郎、“金属系インテリジェント構造材料と走査型トンネル顕微鏡技術”、機械の研究、vol.45、pp.500-506、1993.4
森下信、“電気粘性流体”、機械の研究、vol.44、pp.1282-1287、1992.12
高木俊宜、“インテリジェント材料の概念とその動向—明日の材料を考える”、セラミックス、vol.28、pp.539-544、1993.6
轟章、“ニューロネットによるき裂検出”、機械の研究、vol.46、pp.387-392、1994.3

いる。ここで、ガラスパイプの破壊とはマトリクスの破壊の検知、それによる内包赤インクの放出は補修を行うとの判断、この赤インクのクラック中への浸透とは補修作業の実行を、材料が自ら能動的に行ったものであるとしている。図2にこの概念を示す。次の段階として赤インクを補修剤に変更し、載荷－除荷－再載荷の繰り返し荷重をかけることで、剛性・強度の復元、もしくは上昇を観察している。また、autogeneous機能が働いた可能性も指摘している [Victor C. Li, 1995]。

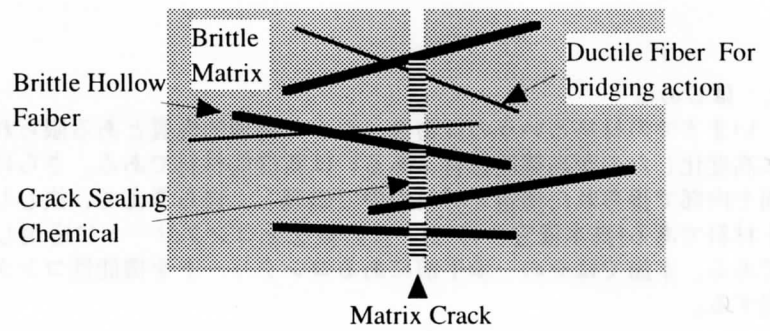


図2 Victor C. Liによるインテリジェント化の手法 [Victor C. Li, 1995]

5. 自己修復コンクリート (Dry, C.M.)

径の小さな補強筋と、刺激に感知しやすい (破壊しやすい) 繊維中に粘性物質 (補修剤) を内包したものをコンクリート中に埋設し、強度の自己回復を試みている。試験方法としては3点曲げ試験を行っている。

この試験結果を表1に示す。この表より、補修剤封入繊維を混入した Sample A～Eの2回目の強度が増加しているのに対し、補修剤封入繊維を混入していない Control 1～3は減少している。また2回目試験の荷重曲線の勾配が緩やかになっていることから、靱性も改善されたことを指摘している。尚、Sample Eと Control 3は例外である。

しかし繊維を破壊することなくコンクリート中に分散させるのが困難であり、大きな荷重がかかった際の対応、補修剤の保存など課題は多い [C.M.Dry, 1995b] [C.M.Dry, 1996] [C.M.Dry, 1997]。

6. 腐食防止コンクリート

塩害、中性化による鉄筋コンクリートの劣化防止機能を材料自身に持たせることで、コンクリートの高耐久性化を図っている。

塩化物イオンが進入して、コンクリート内部のpHが変化しあるpHに達すると、ポリオールコーティングされた中空多孔質繊維が感知し、繊維内に封入されていた防せい剤 (亜硝酸カルシウム) が放出される。この繊維の配置方法として、マトリクス全体に均等に分散させるもの、補強筋付近にかたまった状態で配置するもの、補強筋に巻き付けるものを挙げている。これらをASTM標準試験により各シリーズの鉄筋の電位差を測定することで比較している。繊維内に防せい剤を封入したものの電位差は低く、防せい剤をそのままの状態に混入したもの、防せい剤を混入しないものについては電位差が高くなるという結果を得ている [C.M.Dry, 1992a] [C.M.Dry, 1992b]。

7. 自己強靱化コンクリート

Dry (1994) は、ひび割れが起こった際に、補修剤を放出してその箇所を補修するといったパッシブなものではなく、そういったひび割れなどの破壊が起こらないように、自らを強靱化するというアクティブなインテリジェント機能を備えたコンクリートを提案している。

コンクリート中に予め流動性メチルメタクリレートの封入された中空多孔質ポリプロピレン繊維を混入する。そして低熱を当てるとWAXコーティングされた繊維が溶け、封入されていたメチルメタクリレートがマトリクス中に放出される。さらに熱を上げていくとメチルメタクリレートがポリマー化し、コンクリート内部の空隙を充填するというものである。試験ではコンクリートの透水性の低下、強度の増加が結果として得られ、自己強靱化ともいふべき機能がはたらいたとしている [C.M.Dry, 1994]。

表1 曲げ試験結果

Sample	Bending Test			
	1st Tests [kN]	2nd Tests [kN]	Increase [kN]	Increase [%]
A	0.7484	0.8845	0.1361	18.2
B	0.7711	0.9526	0.1815	23.5
C	0.8051	1.0297	0.2246	27.9
D	0.8959	0.9888	0.0929	10.4
E	0.7893	0.7666	-0.0227	-2.9
Control 1	0.7802	0.6713	-0.1089	-14.0
Control 2	0.7938	0.6985	-0.0953	-12.0
Control 3	0.7666	1.0660	0.2994	39.1

8. まとめ

インテリジェントコンクリートの開発が幾つか既に行われている。特に、Li (1995) やDry (1995b、1996、1997) のひび割れ発生に対する自己修復コンクリートの提案は、本研究のテーマと関連が深い。また、これらの論文が発表された時期と本研究が開始された時期がほぼ一致していることは、このテーマが国際的にも深い関心が寄せられているものであることを物語っている。

また、Dry (1992a、1992b) による塩害防止用インテリジェントコンクリートの提案は、本研究が目差した耐久性インテリジェントコンクリートと対応するものである。しかしながら、細部の情報が見事に覆われており、追実験が不可能である点は、この種の研究の特徴の一つともなっている。

参考文献

- Dry,C.M.、 “Smart Materials which Sense, Activate and Repair Damage ; Hollow Porous Fibers in Composites Release Chemicals from Fibers for Self-Healing,Damage Prevention, and/or Dynamic Control”、SPIE、vol.1777、pp.367-371、1992a
- Dry,C.M.、 “Smart Building Materials which Prevent Damage or Repair Themselves”、Materials Research Society Symposium Proceeding、vol.276、pp.311-314、1992b
- Dry,C.M.、 “Matrix Cracking Repair and Filling Using Active and Passive Modes for Smart Timed Release of Chemicals from Fibers into Matrices”、Journal of Smart Materials and Structures、vol.3,no.2、pp.118-123、1994
- Dry,C.M.、 “Smart Multiphase Composite Materials which Repair Themselves by a Release of Liquid which become Solids”、Proceedings of the Society of Photo-optical instrumentation Engineers (SPIE)、vol.2444、pp.410-413、1995a
- Dry,C.M.、 “Time Release of Chemicals into Hardened Cementitious Matrices for Crack Repair, Fiber Rebond, and Increase in Flexural Toughening”、Fractural Mechanics 25th Volume、pp.268-282、1995b
- Dry,C.M.、 “Smart bridge and building materials in which cyclic motion is controlled by internally released adhesive”、SPIE、vol.2719、pp.247-254、1996
- Dry,C.M.、 “Building Materials That Self Repair”、Architectural Science Review、vol.40、pp49-52、1997.6
- Li,Victor C.、 “Development of passive smart self-healing cementitious composites at Univ. Michigan”、JTTAS インテリジェントコンクリート研究小委員会資料、1995
- 中辻照幸、杉田稔、柳田博明、武藤範雄、“インテリジェント建設構造材料”、機械の研究、vol.44、pp.408-411、1993
- 高木俊宜、基礎研究から世界をリードする日本のインテリジェント材料開発、工業材料、Vol.40、No.10、pp.102-107、1992
- 座古勝、“複合材料の特性評価とインテリジェント化”、炭素繊維、アラミド繊維、複合材料等を利用した耐震補強工法の展開、工業技術会講習会テキスト、1997
- 柳田博明、“知能をもった材料をつくる”、化学、vol.49、No.1、pp.3-4、1994
- 柳田博明、“インテリジェントマテリアルの現状—ケンマテリアル=コンクリート系構造への適用を中心として—”、コンクリート工学、Vol.35、No.6、pp.3-7、1997

3. インテリジェントコンクリートの概念

3.1 インテリジェントコンクリートの概念

1. はじめに

材料は、歴史的にはまず素材があって構造材料となり、それが耐磨耗、耐摩擦、耐熱といった受動的な構造材料となり、さらに光が当たればそれを電気エネルギーに変えるといったような能動的機能を持つところまで発展してきた。構造的には鉄は鉄、木は木というようなdiscrete（分離型）なものから、次はセメント、半導体と有機物という様な複合型すなわちhybrid（混合型）なものとなり、やがては異種物質間の境が分からなくなって一体化するmonolithic（融合型）なものとなる。

本研究で対象としているインテリジェント材料は、そこから更に進んで、物性と機能のみならず情報の概念を取り込み、複数の機能を組織的に連携させて、より高次の機能を能動的に実現しようという視点を導入したものである。材料中に、周辺的环境情報や材料の内部情報を検知し（センサ機能）、判断・命令し（プロセッサ機能）、行動を起こすメカニズム（アクチュエータ機能）が内蔵されている究極の姿がインテリジェント材料である。

インテリジェント材料はしばしば生物にたとえられる。材料の中に組み込まれたソフトウェア、つまりファームウェアの比重が次第に大きくなって究極的には材料＝ソフトウェアとなると考えられている。この姿こそ我々人間を含めた生命体といえよう。生物体は、我々が研究してきたいろいろな機能と比べ、外部刺激や時間軸に対応して積極的に自ら変わる能動的機能を持つという点で決定的に優れている。例えば寿命予告、自己修復、自己学習というような機能がそれである。

本項では、インテリジェント材料の定義とインテリジェントコンクリートの概念について述べる。

2. インテリジェント材料の定義

インテリジェント材料が提案されている科学技術庁航空・電子等技術審議会第13号答申（1989年11月）において、構造材料がインテリジェント化された姿として図1が示されている。荷重が作用し、亀裂が発生すると、亀裂先端での着色や電子放出などによって外部にこれを知らせる。これがセンサ機能としての自己診断性となる。更に、物質の容積膨張で亀裂先端を丸くしたり、含有成分の溶出で亀裂内を充填させることにより、亀裂進展を抑制・修復する。これがアクチュエータ機能としての自己修復性となる[松岡三郎、1993]。

インテリジェント材料の定義は現段階ではまちまちであり、コンセプトのみで一つに確定したものは未だ無い。先に述べた航電審第13号答申による定義の他に、良く知られているものとして、1990年になされたWada, Fanson, Crawleyの定義がある。ここでは、システムを変えることのできるアクチュエータを有する材料（可動材料）の機能と、外界の刺激を感知できる材料（検知材料）の機能を併せ持ち、システムの状態を能動制御できる材料を制御材料と呼んでいる。その中に含まれた制御機能と構造機能を併せ持つものが能動材料であり、その機能を更に高度に推し進めたものが知的材料であるとしている。

3. インテリジェントコンクリート

上述したようなインテリジェント材料としての機能をコンクリート材料に付与する試みが 2.2 節でも述べ

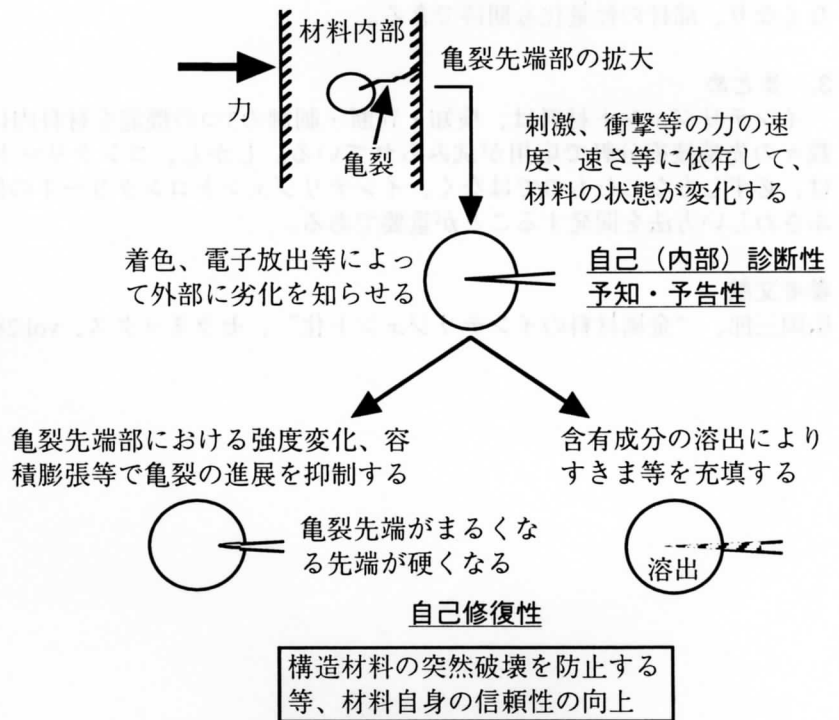


図1 航電審第13号答申が描く構造材料のインテリジェント化の姿[松岡三郎、1993]

たように幾つかはなされている。他の材料に用いられている方法と同様に、コンクリートにおいても光ファイバーを埋設しておいて、ある一定レベル以上の歪みが生じると検知する方法などが提案されている。しかし、航空機や人工衛星などとは異なり、コンクリート構造物では高価なセンサーやアクチュエータを多量に配置して高性能なコンピュータでコントロールする方法は未だなじまず、材料そのものの中により安価な装置を埋設しておく程度のもので性能が十分発揮される必要があると考えている。例えば、ひび割れ幅がある限界を超えると自動的に樹脂がにじみでて、ひび割れを塞いでしまうカプセルや、コンクリートの中酸化や塩分浸透が起こったときに、再アルカリ化や塩分固定を自ら行うことによって化学的性質を自己修復するシステムをコンクリート材料に付与する方法の開発が期待される。

現在の保守点検の困難さを考えると、インテリジェント機能のうちセンサ機能のみが実現されたとしても、大きな利益がもたらされることが期待される。しかし、特に建築の分野ではそれだけでは不十分な場合も発生する。これは例えば阪神大震災の際に大きな問題となった杭の破壊があげられる。地中にある杭は、もちろん検査でさえ困難であるために大きな問題となったのであるが、例え破壊の箇所やその状態を把握できたとしても、これを補修し再び使用することはほとんどの場合極めて困難であり、修復工事もより大規模化する。この他に核廃棄物処理施設の壁面などもその例に挙げられる。この場合はたとえ微細なクラックが発生しただけであっても、地下水の侵入や流出が引き起こされる場合大きな被害に拡大してしまうことが懸念される。これらの例のような場合では、通常の修復工事による補修が物理的に不可能であることが多いため、センサ機能だけでは不十分である。そのため、センサ機能のみにとどまらない、自己修復機能までを持つことが期待される。

逆にこの自己修復機能を与えることに成功すれば、例に挙げた杭や核廃棄物施設のような物理的に補修が困難な部位への適用はもちろん、先述の高架高速道路等の疲労クラックへの対応など、より広い範囲への適用が期待できる。さらには、このような手段によりその性能が飛躍的に向上すれば、過剰な安全率の必要もなくなり、部材の軽量化も期待できる。

3. まとめ

インテリジェント材料は、検知・判断・制御の3つの機能を材料内に取り込んだ高度な機能材料であり、数々の先端技術分野で応用が試みられている。しかし、コンクリート材料にそのままの形で取り込むことは、必ずしもなじむものではなく、インテリジェントコンクリートの開発に当っては、コンクリート材料にふさわしい方法を開発することが重要である。

参考文献

松岡三郎、“金属材料のインテリジェント化”、セラミックス、vol.28、No.6、1993

3.2 インテリジェントコンクリートの構造物への応用

1. はじめに

コンクリート構造物におけるインテリジェンスとしては、種々の形態が考えられるが、ここでは完全に防止することが極めて困難であるひび割れ現象を、自己補修する機能を持つコンクリートの応用について検討する。

2. コンクリート構造物と自己修復

十分な強度確保を必要とする構造部材や高度の止水性が要求される壁体などにおいて、その性能を満足するためには、あらかじめ設計時に将来予想されるひび割れ劣化状況を十分に考慮して過度の性能を付加するか、ひび割れの有無を頻繁に点検し、ひび割れを発見した際には速やかに補修を行うことが必要となる。

しかしながら、ひび割れ現象の不明確さのため、過度の性能付加は追加費用に見合った性能を確保することが困難と考えられる。また、コンクリートに対する点検や補修を頻繁に行うことは、多大な手間と費用を要することは言うに及ばず、点検が不可能であったりひび割れを発見しても補修が困難な場合は多々ある。さらに、ひび割れがある程度成長するまではそれを発見出来ないことが通常であることから、ひび割れの早期発見が困難である。

これに対し、ひび割れが発生したら自ら補修することの出来るコンクリートの役割は、要求される構造的強度や止水性能の信頼性を長期に渡って確保でき、過度な性能付加やひび割れの有無を点検するための点検作業及びそれにより発見したひび割れの補修作業を不要とすることができ、極めて有効であると考えられる。

こういった性能を持つインテリジェントコンクリートが応用できる領域としては、既に述べたひび割れの発生を防止する必要がある構造部材や止水壁のみでなく、一般の建築物や構造物における柱・梁・壁、それらの接合部、さらには屋根床スラブ、地下外壁、打込み型枠、杭、基礎など、広く応用可能と考えられる。特に、厳しい環境条件にさらされる構造物として、貯水槽、廃棄物の貯蔵施設、放射線遮蔽壁、原子炉格納容器、道路橋の床版などは、ひび割れの自己補修機能の重要度が非常に高い。

さらに、現場打ち施工のみでなく、プレキャスト製品として工場製作することにより、大量生産が可能であり、品質管理も容易となる。また、補修液を着色することにより、ひび割れ発生の有無やひび割れ補修がなされたことを目視により確認することもできる。こういった手法により、インテリジェンスの機能は、ますます拡張可能となる。

具体的応用の一例として、場所打ちコンクリート杭の杭頭補修を示す。兵庫県南部地震において、かなりの杭が損傷を受けたと報告されているが、損傷箇所の調査及び補強工事が非常に困難な場所だけに、建物の傾斜などの処理も含めて、建物の継続使用に対してどういった補強を行うかという課題が現在問題になっている。特に、損傷箇所としては、杭中間部もあるが基本的には杭頭に集中しているため、この部分の改善が望まれている。

このような問題に対し、図2に示すように、強度や剛性を回復させる補修用固化材により自己損傷修復性を持つインテリジェントコンクリートを杭頭に使用することにより、構造体の繰り返し劣化、破壊の進行、ひび割れ分散などを制御させ、地震による損傷後も継続して建物が使用できる。ここで、インテリジェントコンクリートの仕様としては、ひび割れ補修材を配合した場合と、杭鉄筋の外側に円形かご形で立体格子状に組んだ補修液供給用管路網を装着させる場合が考えられ、共に地震時に被害を受けた杭頭部にひび割れが生じた場合に、補修液が流出してひび割れを自ら塞ぐこととなる。

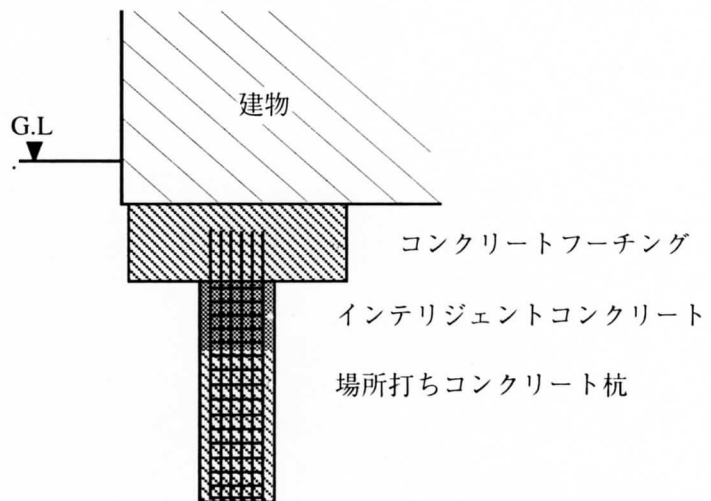


図2 インテリジェントコンクリートの杭頭への使用

4. インテリジェントコンクリートに 応用可能な先行技術

4.1 多機能性はく離剤

1. はじめに

ここでいう「多機能性はく離剤」とは、はく離剤として利用した化合物が、コンクリート打込みと同時にその表層部に含浸し、コンクリート表層部を改善するものである。

本研究では、特に、コンクリート用多機能性はく離剤開発の基礎研究として、シリコン化合物を主成分として調製した多機能性はく離剤を鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に塗布してモルタルを成形し、多機能性はく離剤中のシリコン化合物のモルタル表層部への浸透深さに及ぼす各種要因について検討している。又、成形したモルタルの吸水、塩化物イオン浸透及び中性化試験を行い、多機能性はく離剤によるモルタル表層部の改質効果を検討する。

2. 使用材料

2.1 セメント及び骨材

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを、骨材としては、旧JIS R 5201に規定する豊浦標準砂を使用した。

2.2 多機能性はく離剤用原料

多機能性はく離剤用原料としては、シリコン化合物としてのシリコン油 (略称; SO), アルキルアルコキシシランの水性エマルジョン (略称; AS) 及びアルキルアルコキシシラン (略称; AAS) 並びに、アミノアルコール誘導体 (略称; AM) を使用した。又、比較のため、JIS K 2001 (工業用潤滑油粘度分類) に規定されるISO VG 150のマシン油 (略称; Oil) を使用した。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

SO:AM=75:25及び50:50 (質量比) として多機能性はく離剤を調製すると共に、SO, AS及びAASのみを多機能性はく離剤として使用して、次の手順で供試体を作製した。鋼製型枠 (40×40×160mm) については、その両側面に、多機能性はく離剤及びOilを塗布量20, 30及び40g/m²で塗布した。又、日本農林規格に規定されるコンクリート型枠用合板 (寸法, 40×160×12mm) に、塗布量80, 100及び120g/m²で多機能性はく離剤及びOilを塗布し、寸法40×40×160mmの鋼製型枠の1側面に取り付けられた。その後、JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて、セメント:標準砂=1:3 (質量比), 水セメント比76%及びフロー値171のモルタルを練り混ぜて、型枠内に打込み、成形した。モルタルの成形は二層打ちとし、各層、外部振動機を用いて、振動数9000rpmで10秒間締固めた。成形後、2日湿空 [20℃, 80%(RH)] 養生して脱型し、更に、5日間乾燥 [20℃, 50%(RH)] 養生して供試体とした。なお、シリコン化合物の浸透深さ検用として、コンクリート型枠用合板に上述の手順で、SOを塗布しながら、4回まで再使用して成形した供試体及び、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布した後、20℃, 50%(RH)の条件下に1, 3及び7日間静置した後にモルタルを打込んだ供試体も作製した。

3.2 シリコン化合物の浸透深さの測定

養生材齢7日の供試体を四分割してから、その断面に水を噴霧し、鋼製型枠の両側面及びコンクリート型枠用合板に接していた面から、はっ水した部分の深さをシリコン化合物の浸透深さとし、各断面3箇所計9箇所について、ノギスを用いて測定し、それらの平均値を求めた。

3.3 吸水試験

SO及びSOとAMを多機能性はく離剤として作製した養生材齢7日の供試体について、鋼製型枠側面に接していなかった4面並びに、コンクリート型枠用合板に接していなかった5面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、JIS A 6203 (セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂) に準じて、20℃の水中に7日間浸漬して、吸水試験を行い、吸水率を求めた。

3.4 塩化物イオン浸透試験

SO及びSOとAMを多機能性はく離剤として作製した養生材齢7日の供試体について、鋼製型枠側面に接していなかった4面並びに、コンクリート型枠用合板に接していなかった5面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、2.5%塩化ナトリウム溶液中(20℃)に7日間浸漬して、塩化物イオン浸透試験を行った。浸漬後の供試体を四分割してから、UNI 7928 (Concrete-Determination of the Ion Chloride Penetration) に準じて、鋼製型枠の両側面及びコンクリート型枠用合板に接していた面からの塩化物イオン浸透深さを、鋼製型枠を使用したものについては、各断面6箇所、計18箇所、コンクリート型枠用合板を使用したものについては、各断面3箇所、計9箇所について、ノギスを用いて測定し、それらの平均値を求めた。

3.5 促進中性化試験

SO及びSOとAMを多機能性はく離剤として作製した養生材齢7日の供試体について、鋼製型枠側面に接していなかった4面並びに、コンクリート型枠用合板に接していなかった5面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、促進中性化試験装置 [30℃, 60%(RH), CO₂濃度5%] 内に7日間静置して、促進中性化試験を行った。中性化後の供試体を四分割してから、その断面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し、鋼製型枠の両側面及びコンクリート型枠用合板に接していた面から中性化深さを、塩化物イオン浸透試験と同様の箇所について、ノギスを用いて測定し、それらの平均値を求めた。

4. 試験結果及び考察

図-1には、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布した直後にモルタルを打込んだ場合の多機能性はく離剤中のシリコン化合物のモルタル表層部への浸透深さを示す。

鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板を使用した場合とも、多機能性はく離剤の種類にかかわらず、その塗布量の増加に伴い、シリコン化合物の浸透深さが若干増大する。しかしながら、その含浸深さは、多機能性はく離剤の種類及び型枠の材質によって異なり、鋼製型枠を使用した場合、AASが0.6-0.8mm、ASが0.7-1.0mm、SOが1.4-1.8mm、コンクリート型枠用合板を使用した場合、AASが0.4-0.5mm、ASが0.6-0.8mm、SOが1.4-1.6mmである。又、SOとAMを混合して調製した多機能性はく離剤をコンクリート型枠用合板に塗布して使用した場合のシリコン化合物の含浸深さは、0.7-1.0mmであり、多機能性はく離剤中のSO量の多いものが浸透深さが若干大きい。鋼製型枠を使用した場合、多機能性はく離剤の塗布量が相当少ないにもかかわらず、コンクリート型枠用合板を使用した場合に比べて、いずれのシリコン化合物においてもその含浸深さが大きい傾向にある。これは、コンクリート型枠用合板が多機能性はく離剤を吸着するためと推察される。なお、本研究においては、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板を垂直に設置して多機能性はく離剤を塗布した場合に、だれが生じない最大塗布量を検討した上で、それぞれの塗布量を決定している。

図-2には、コンクリート型枠用合板を再使用し、多機能性はく離剤としてSOを塗布した直後にモルタルを打込んだ場合のSOのモルタル表層部への浸透深さとコンクリート型枠用合板の再使用回数との関係を示す。

再使用回数にかかわらず、多機能性はく離剤としてのSO塗布量の多いものほど、その浸透深さは大きい傾向にある。一方、いずれの塗布量においても、コンクリート型枠用合板の再使用回数が増加すると、多機能性はく離剤としてのSOのモルタル表層部への浸透深さが大きくなり、1回目の使用時に比べて、2回目においては、SOの浸透深さは1.0mm程度増大する。更に、4回目の使用時には、1回目の使用時の約2倍の浸透深さが得られ、SOの浸透深さは、2.8-3.2mmに達する。このように、コンクリート型枠用合板の再使用回数の増加に伴いSOの浸透深さが増加するのは、多機能性はく離剤としてのSOのコンクリート型枠用合板への吸着が、それ以前に塗布したシリコン化合物の残存によって妨げられるためと考える。従って、前述した結果も含めて推察すれば、コンクリート型枠用合板に何らかの処理を施すことにより、多機能性はく離剤中のシリコン化合物のモルタル表面への浸透深さを増加させることができるものと考えられる。

図-3には、多機能性はく離剤としてSOを塗布した鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板を0, 1, 3及び7日間静置した後にモルタルを打込んだ場合のSOのモルタル表層部への浸透深さを示す。

コンクリート型枠用合板を使用した場合、SOを塗布した後、1日静置して使用すると、モルタル表層部へのSOの浸透深さは、塗布直後にモルタルを打込んだ場合のその2/3から1/2程度まで減少して1.0mm以下になると共に、静置期間が長くなると、SOの浸透深さは若干減少する傾向にある。又、コンクリート型枠用合板を再使用し、SO塗布直後にモルタルを打込むことによって増加したSOの浸透深さも、SO塗布後に静置

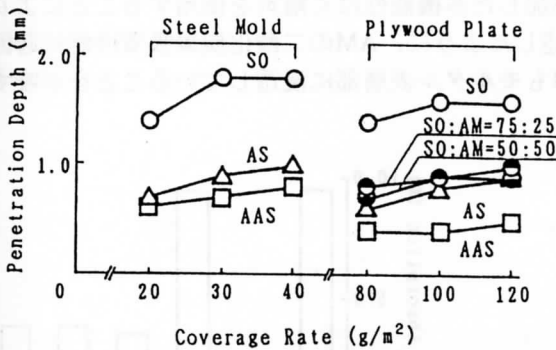


図-1 型枠への多機能性はく離剤塗布直後にモルタルを打込んだ場合のシリコン化合物の浸透深さ

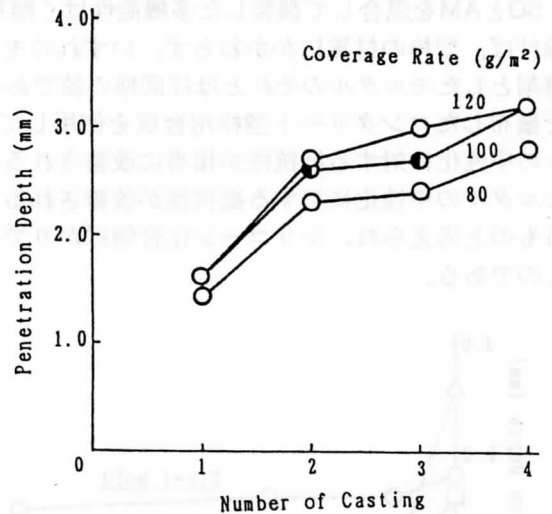


図-2 コンクリート型枠用合板へのSO塗布直後にモルタルを打込んだ場合のコンクリート型枠用合板再使用回数とSOの浸透深さ

して使用した場合には、未使用のものに塗布して静置した場合とほとんど差がない。一方、鋼製型枠を使用した場合には、SO塗布後に7日間静置して使用した場合でも、SOのモルタル表層部への浸透深さは、SO塗布直後にモルタルを打込んだ場合のそれとほとんど変わらない。このことから、鋼製型枠表面からのSOの揮発はほとんどないものと推察される。従って、SOを塗布したコンクリート型枠用合板を静置してから使用した場合のモルタル表層部へのSOの浸透深さの減少は、コンクリート型枠用合板の材質がSOの性能に何らかの影響を及ぼしているか又は、SO塗布後の静置期間中にコンクリート型枠用合板がSOを吸着してしまうためと考える。

図-4には、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布した直後に打込んで成形したモルタルの水中浸漬7日後の吸水率を示す。

型枠の材質にかかわらず、Oilのみをはく離剤として使用したモルタルの吸水率が9.6%であるのに比べ、鋼製型枠に多機能性はく離剤としてSOを塗布して成形したモルタルの吸水率は2.0%である。又、コンクリート型枠用合板へのSO塗布量の増加に伴ってモルタルの吸水率は減少する傾向にあり、その吸水率は3.2-4.6%である。このように、多機能性はく離剤の使用によってモルタルの吸水率が減少するのは、モルタル表層部に浸透したSOのはっ水性に起因するものとの考える。一方、SOとAMを混合して調製した多機能性はく離剤を使用して成形したモルタルの吸水率は約3.5%であり、SOのみを多機能性はく離剤としたものに比べて、その浸透深さは浅いにもかかわらず、ほぼ同様の吸水率である。

図-5には、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布した直後に打込んで成形したモルタルの2.5%塩化ナトリウム溶液に7日間浸漬後の塩化物イオン浸透深さを示す。Oilのみをはく離剤として使用したモルタルの塩化物イオン浸透深さは鋼製型枠を使用したもので20mm以上（供試体40×40×160mm両側面から浸透）、コンクリート型枠用合板を使用したもので28mm以上（供試体40×28×160mm片面からの浸透）である。それに比べて、型枠の材質にかかわらず、多機能性はく離剤を使用して成形したモルタルの塩化物イオン浸透深さは著しく小さく、一部のものを除けば、3-4mmである。このように、多機能性はく離剤を使用して成形したモルタルが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に優れるのは、吸水における場合と同様、モルタル表層部に浸透したシリコン化合物のはっ水性に起因するものとの考える。又、一般に、AMをコンクリート及びモルタルに添加した場合、コンクリート及びモルタル中に拡散する塩化物イオン及び二酸化炭素を吸着するといわれる。しかしながら、塩化物イオン浸透に対する抑制効果に関して、本研究の限りでは、SOとAMを混合して使用した場合でも、AMを併用しない多機能性はく離剤に対する有意性は認められない。

図-6には、鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布した直後に打込んで成形したモルタルの中性化深さを示す。

SOとAMを混合して調製した多機能性はく離剤を塗布したコンクリート型枠用合板を使用したモルタルを除けば、型枠の材質にかかわらず、いずれのモルタルの中性化深さとも17.0-18.0mmであり、Oilのみをはく離剤としたモルタルのそれとほぼ同様の値である。しかし、SOとAMを混合して調製した多機能性はく離剤を塗布したコンクリート型枠用合板を使用して成形したモルタルの中性化深さはその約1/2であり、モルタルの中性化に対する抵抗性が相当に改善される。AMを添加した多機能性はく離剤を使用することにより、モルタルの中性化に対する抵抗性が改善されるのは、上述したように、AMの二酸化炭素吸着性能に起因するものと考えられ、シリコン化合物ばかりでなく、AMもモルタル表層部に浸透していることを示唆するものである。

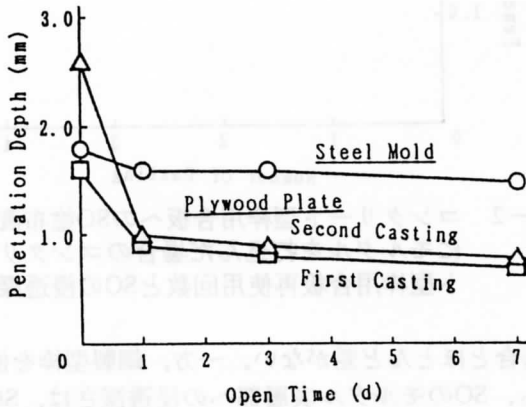


図-3 SOを塗布した鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板を0,1,3及び7日間静置した後にモルタルを打込んだ場合のSOの浸透深さ

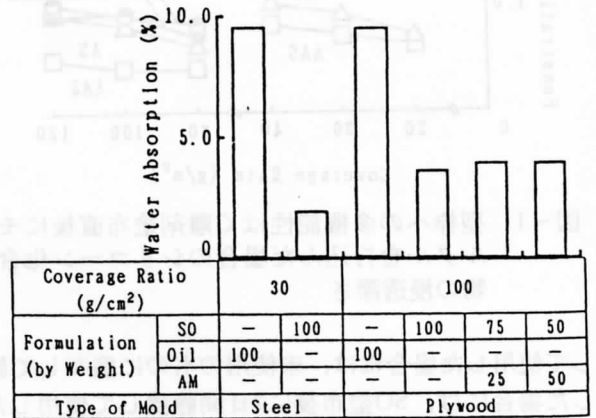


図-4 鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布直後に打込んで成形したモルタルの吸水率

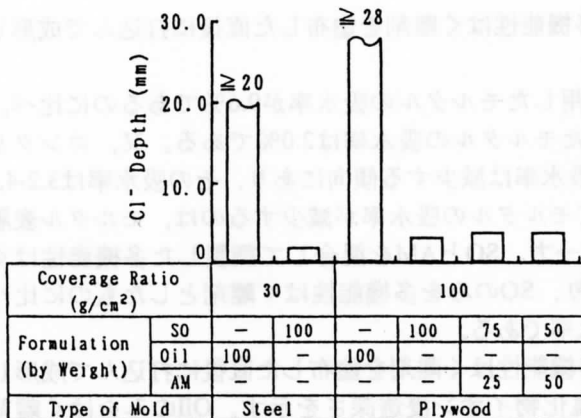


図-5 鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布直後に打込んで成形したモルタルの塩化物イオン浸透深さ

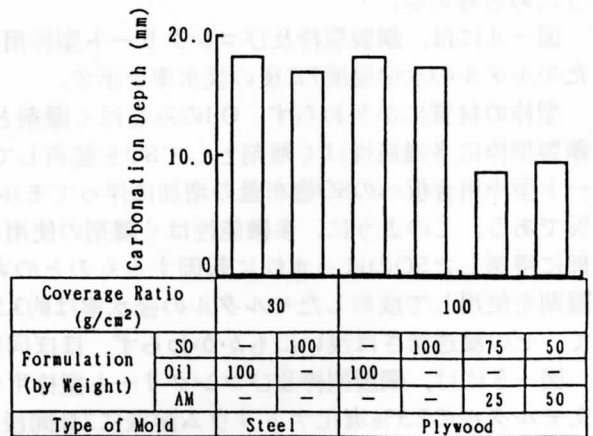


図-6 鋼製型枠及びコンクリート型枠用合板に多機能性はく離剤を塗布直後に打込んで成形したモルタルの中性化深さ

5. まとめ

以上の試験結果から推察すれば、シリコン化合物を主成分とする多機能性はく離剤を使用することによって、コンクリート及びモルタル打込み時に、それらの表層部には水層が形成されると共に、吸水及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性を有する表層部が得られる。又、アミノアルコール誘導体を併用した多機能性はく離剤の使用により、それらの表層部には、中性化に対する抵抗性を付与することが可能であると考えられる。しかしながら、これらの改質効果は、型枠に塗布した多機能性はく離剤がコンクリート及びモルタル表層部へ浸透することに起因するものであり、その浸透性能は、型枠の材質及び多機能性はく離剤の種類に大きく影響される。

4. 2 高性能各種コンクリート補修材

1. はじめに

コンクリートのひび割れや中性化、鉄筋の腐食に対して現在、種々の補修方法が試みられ、補修材も多数使用されている。

また、コンクリートの表面より侵入する水や炭酸ガス、海水等を防ぐ目的で、表面保護の塗料や防食方法が採用されている。

2. 高性能各種コンクリート補修材

表-1はこれらコンクリートの防食保護材として使用されている材料を成分別に分類したものである。新しいコンクリートの表面に表-1の様な材料を予め塗布しておけば、劣化促進を抑えられる訳であるが、現実には劣化してから補修することが多いと考えられる。

表-2はコンクリートの劣化箇所別に適応材料を分類したものである。

コンクリートの亀裂補修には、エポキシ樹脂の様な熱硬化性合成樹脂が長い間使用されている。

また、コンクリートの撥水、保護、防汚にはシリコン系の撥水材が多く使用されている。

3. まとめ

以上の様な補修はすべて人の手でを行うか、人が機械を使って行うかのどちらかであり、コンクリート自体が補修機能を有する様な機構があれば、経済的にも非常にメリットがでることになる。

インテリジェントコンクリート自体が、表にある様な材料を含有して、放出しつつ補修していく方法が確立されることが、今後のコンクリートの課題といえる。

参考文献

大濱嘉彦、”鉄筋コンクリート構造物の耐久性改善と補修へのポリマーの利用”
日本接着協会誌、Vol 24 no. 8、P 23～31、1998

森実敏倫、”多孔質材料の改質剤、改質方法および改質された材料”
特許第1991554号、1995. 2

田中邦彦・山田耕作、”最新シリコン応用展開”、シーエムシー、1991. 11

日本規格協会、”最新プラスチック材料選択のポイント”、P 278～291、1976. 4. 1

表-1 コンクリートの防食塗装材料 (主成分による分類)

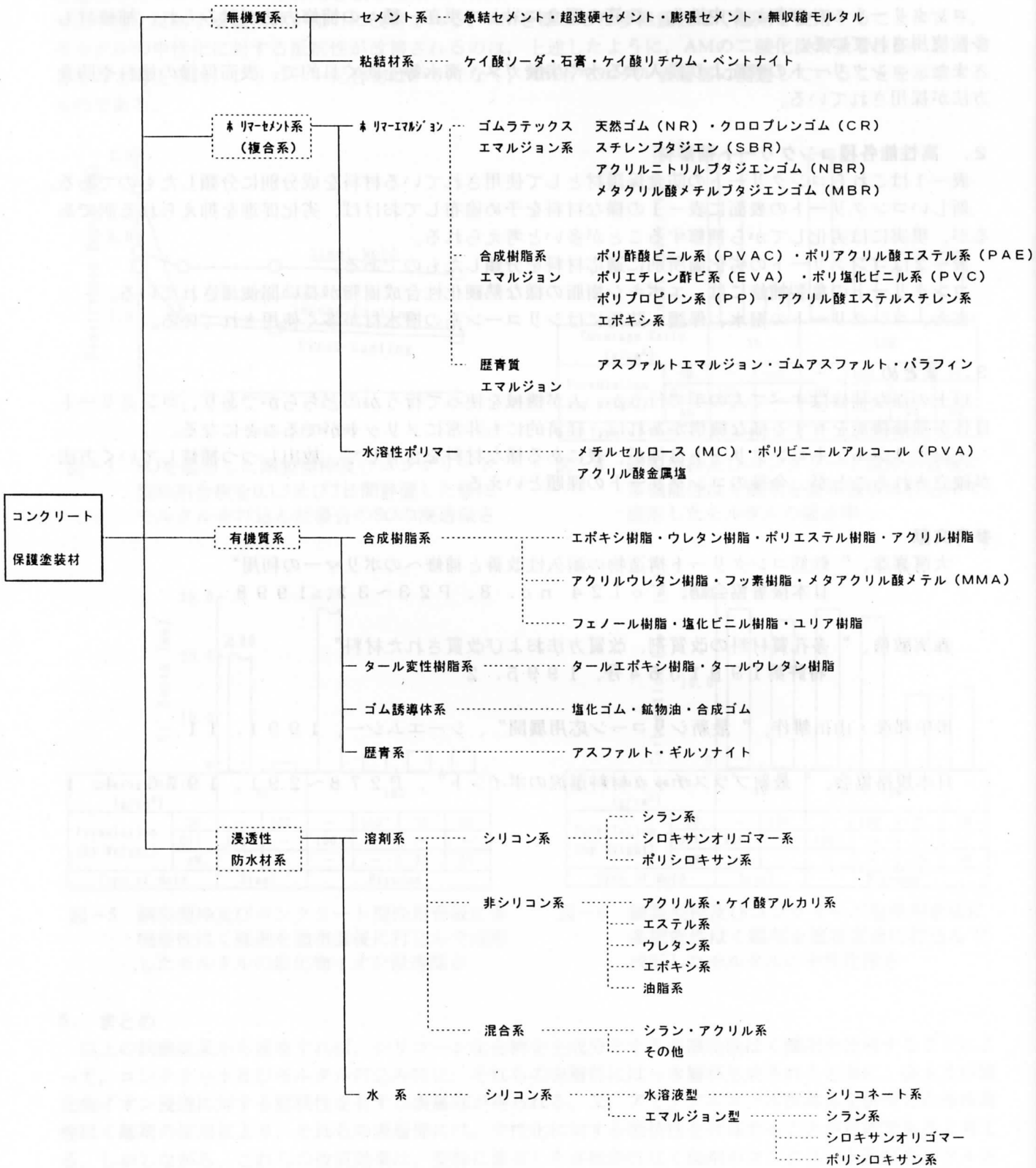
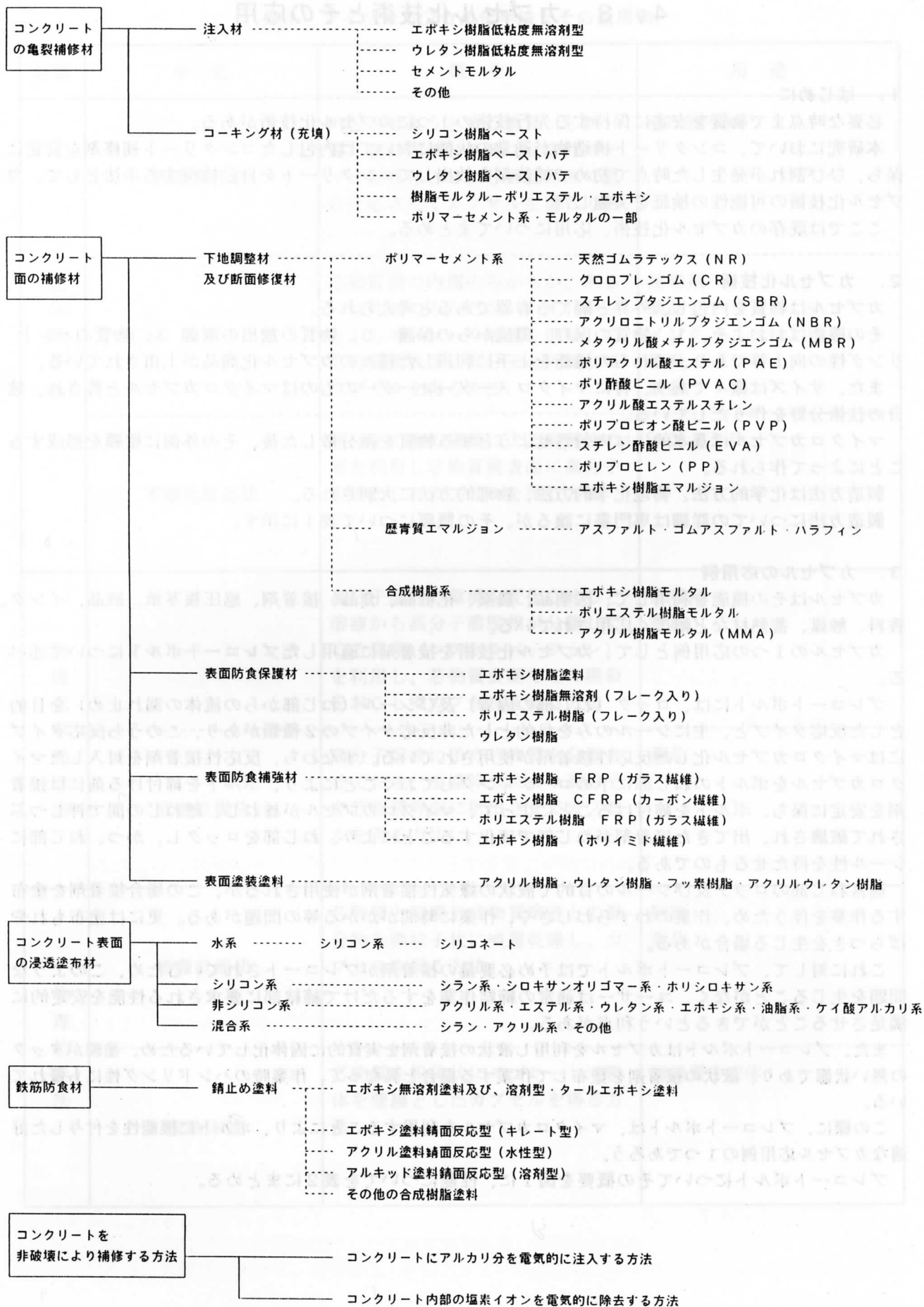


表-2 コンクリート補修箇所と適用材料の分類



4. 3 カプセル化技術とその応用

1. はじめに

必要な時点まで物質を安定に保持する先行技術の1つにカプセル化技術がある。

本研究において、コンクリート構造物が通常の状態においては内包したコンクリート補修剤を安定に保ち、ひび割れが発生した時点で初めて補修剤を放出してコンクリートを自己修復する手法として、カプセル化技術の可能性の検証を実施した。

ここでは既存のカプセル化技術、応用についてまとめる。

2. カプセル化技術

カプセルは物質を内包し、外界と隔てる容器であると考えられる。

その機能はおおよそ、1. 物質の保存 環境からの保護 2. 物質の放出の制御 3. 物質のハンドリング性の向上等であり、これらの機能を上手に利用した種々のカプセル化商品が上市されている。

また、サイズは様々であり、特にマイクロメーターオーダーのものはマイクロカプセルと称され、独自の技術分野を作りだしている。

マイクロカプセルは基本的には内包させようとする物質を微分散した後、その外側に壁膜を形成することによって作られる。

製造方法は化学的方法、物理化学的方法、物理的方法に大別される。

製造方法についての詳細は専門書に譲るが、その概要について表1に示す。

3. カプセルの応用例

カプセルはその機能を利用して、医薬品、農薬、化粧品、食品、接着剤、感圧複写紙、液晶、インク、香料、触媒、蓄熱材など幅広く応用されている。

カプセルの1つの応用例として、カプセル化技術を接着剤に適用したプレコートボルトについて述べる。

プレコートボルトには、ロック（ねじ部の固着）及びシール（ねじ部からの流体の漏れ止め）を目的とした反応タイプと、主にシールのみを目的とした非反応タイプの2種類があり、このうち反応タイプにはマイクロカプセル化した反応性接着剤が使用されている。すなわち、反応性接着剤を封入したマイクロカプセルをボルトのねじ部に予めコーティングしておくことにより、ボルトを締付ける前には接着剤を安定に保ち、ボルトを締付けることによって、マイクロカプセルが雄ねじ、雌ねじの間で押しつぶされて破壊され、出てきた接着剤がねじ部で硬化することにより、ねじ部をロックし、かつ、ねじ部にシール性を持たせるものである。

通常ねじ部のロック及びシールの目的で液状の嫌気性接着剤が使用されるが、この場合接着剤を塗布する作業を伴うため、作業のわずらわしさや、作業に時間がかかる等の問題がある。更には塗布もれやばらつきを生じる場合がある。

これに対して、プレコートボルトでは予め必要量の接着剤がプレコートされているため、このような問題を生じることがなく、ユーザーは通常の締結作業をするだけで締結部に要求される性能を安定的に満足させることができるという利点がある。

また、プレコートボルトはカプセルを利用し液状の接着剤を実質的に固体化しているため、塗膜がタックの無い状態であり、液状の接着剤を塗布して作業する場合と異なって、作業時のハンドリング性にも優れている。

この様に、プレコートボルトは、マイクロカプセルを利用することにより、ボルトに機能性を付与した好適なカプセル応用例の1つであろう。

プレコートボルトについてその概要を図1に、性能についてを表2にまとめる。

表1 マイクロカプセル化手法とその適用例

分類	手法	概要	用途
化学的手法	界面重合法	内包させようとする物質（芯物質）滴の内側と外側に反応性モノマーを存在させ、芯物質界面で重合反応させてカプセルを得る方法	感圧複写紙
	in situ法	芯物質滴の内側のみからか、あるいは外側のみからか、いずれか一方からモノマーや触媒を供給して芯物質滴表面に高分子を析出してカプセルを得る方法	接着剤 薬品 インク 香料 液晶
	不溶化反応法	高分子の塩の種類による溶解性の差を利用し芯物質滴表面に高分子を析出してカプセルを得る方法	人工イクラ
物理化学的手法	コアセルベーション法	高分子溶液の環境を変化させると溶液から高分子濃厚相が分離してくる現象（コアセルベーション）を利用し、芯物質表面でこの現象をおこしてカプセルを得る方法	接着剤 香料
	液中乾燥法	高分子溶液に予め芯物質を分散させておき、溶媒除去により高分子を芯物質界面に析出させてカプセルを得る方法	薬品
物理的手法	噴霧乾燥法	芯物質と壁膜形成物質溶液との混合物を微粒子状に噴霧乾燥し、カプセルを得る方法	飼料 薬品
	流動床法	芯物質を粉体状にスプレーして粉体を壁膜としたカプセルを得る方法	無機質中空体

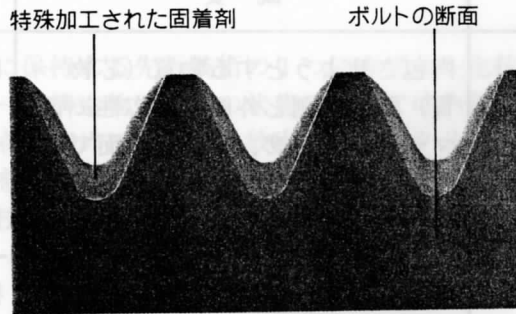


図1 プレコートボルトの概要

表2 プレコートボルトの性能

分類	種類	色調	固着力 Kg-cm	耐熱限界温度℃		硬化時間 (最終まで)	主な特徴
				シール	ロック		
低強度	2411	緑	350~400	150	80	6時間	取り外し容易
	2451	緑	300~380	150	80	6時間	かすが少ない
中強度	2403	赤	400~450	150	90	6時間	低締付抵抗
	2405	緑	400~450	150	80	6時間	小ねじ用
	2406	緑	400~450	150	80	6時間	小ねじ用
	2415	黄	350~450	170	150	6時間	耐熱性良好
高強度	2430	青	380~550	170	90	48時間	小ねじ対応
	2440	橙	480~640	170	150	72時間	耐熱性良好
	2471	青	450~520	170	130	6時間	かすが少ない

固着力はJIS2級M10×1.5軟鋼ボルトナットで試験 初期締付力300Kg-cm 硬化温度25℃

4. まとめ

以上のように、カプセル化技術は、コンクリート構造物が通常の状態においては内包した補修剤を安定に保ち、コンクリートのひび割れに伴って発生する外力によってカプセルが破壊され、内包した補修剤を放出してそのひび割れを補修するという目的に対して有望であると思われる。

参考文献

近藤保、小石真澄、“マイクロカプセル”三共出版、214p.、1987

4. 4 X線技術

1. はじめに

コンクリートのひびわれや内部欠陥を非破壊的に検査する方法としてのX線透過撮影は従来より用いられている。しかし、通常のX線透過撮影ではコンクリート内部の微細なひびわれを検出することはできない。

本技術は、造影剤をコンクリート中に設けた細い孔に注入し、X線透過撮影を行い、微細なひびわれの発生、成長を連続的に検出することができるものである。

2. X線造影撮影法に用いられるシステム

X線造影撮影法は、あらかじめコンクリート表面に造影剤を浸透させ供試体にX線を当てることにより表面および表面付近に発生する微細なひびわれを検出する方法である。その検出システムは、図-1に示すとおりである。

2. 1 フィルムモード

供試体中央よりX線発生装置を50cm程度離し、X線を電圧100kV、電流2mA、照射時間50秒の条件で照射し、供試体に直接密着させた工業用X線フィルムに供試体内部のひびわれ発生状況を直接撮影するものである。撮影したフィルムを現像し焼き付けることにより、ひびわれの発生ならびに性状を調べることができる。

2. 2 TVモード

供試体中央よりX線発生装置を50cm程度、イメージアンプリファイアを25cm程度離し、X線を電圧60kV程度、電流を2mAの条件で連続的に照射し、画面処理の施された画面をX線TVモニターを通して、供試体内のひびわれ発生状況を確認しながら、VTRで画面を記録しておき後でもう一度画面処理を施すものである。

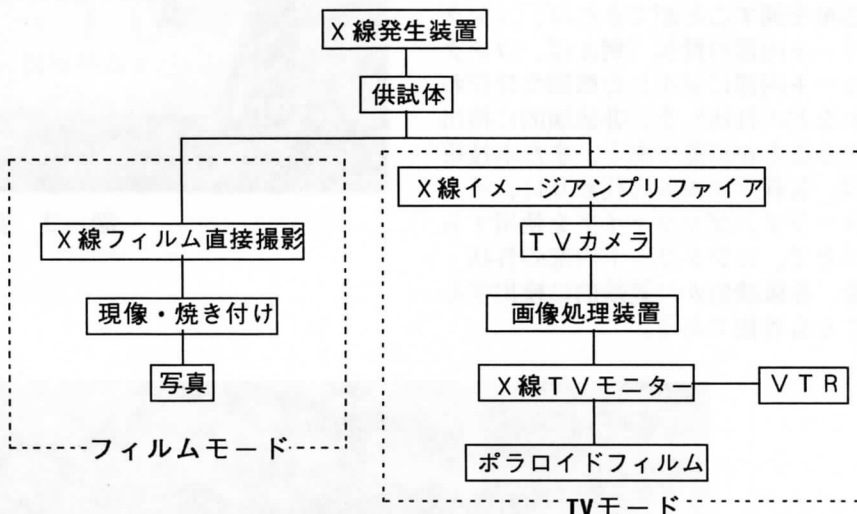


図-1 X線造影撮影法によるひびわれ検出システム

3. 本技術適用の具体例

3. 1 実験供試体

実験供試体は、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートを使用した。実験供試体形状を図-2に示す。供試体は、350×350×80mmのコンパクトテンション型供試体で、供試体の一辺には幅5mmのノッチを有している。また造影剤を注入するために、図-2に示すような間隔で、コンクリート中に細い孔（以降、造影剤注入孔とする）を設けた。

3. 2 実験方法

実験の状況図を、図-3に示す。載荷方法は、実験供試体に引張力を与え、ノッチ先端からひびわれが発生するようにした。発生したひびわれは、造影剤注入孔を貫通することで、造影剤が浸透するようになっている。ひびわれに造影剤が浸透した状態でX線造影撮影を行うことで、X線照射裏面に張りつけたX線フィルムに、コンクリート内部のひびわれ状態が検出されるようになっている。

写真-1は、X線フィルムを焼き付けたX線写真であり、左側の白くなっている部分はノッチであり、途中に見える黒い直線状の部分は、造影剤注入孔に入っている造影剤、中央部に写っている黒く絡み合った

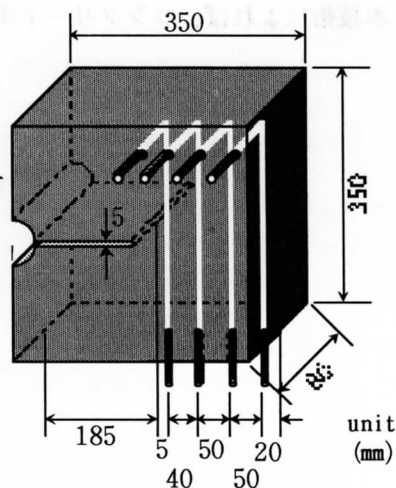


図-2 実験供試体概要

網目状のものが、検出されたひびわれである。ここで、写真における造影剤注入孔の第1孔（最も左側の造影剤注入孔）が、他の孔と比べて白くなっていることから、コンクリート内部に発生したひびわれは、この孔を貫通し、発生したひびわれに造影剤が浸透して、ひびわれが検出されていることが分かった。

このように本技術は、コンクリート中に細孔を設置し、その細孔に造影剤を通すことができれば、コンクリート内部の性状（例えば、コンクリート内部に発生した微細なひびわれなどの性状）を、非破壊的に検出することが可能である。また本技術は、X線フィルムの代わりに、イメージアンプリファイアを使用することで、コンクリート内部の性状を、非破壊的かつ連続的に検出することも可能である。

検査装置 X A . A

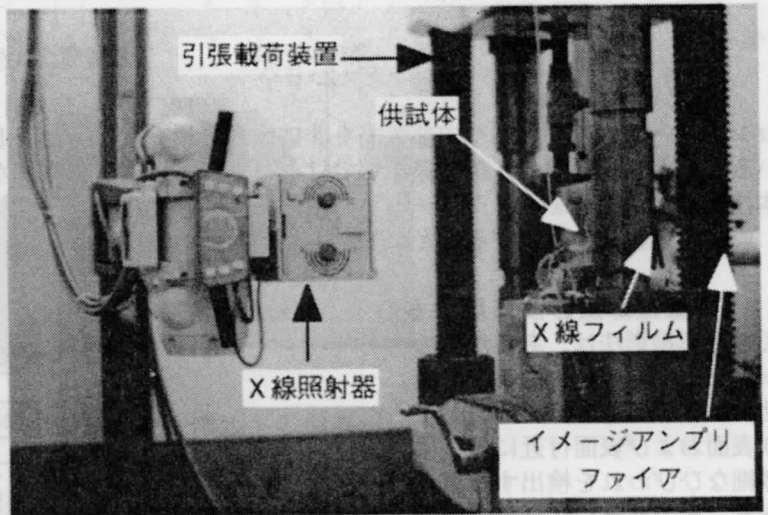


図-3 実験状況

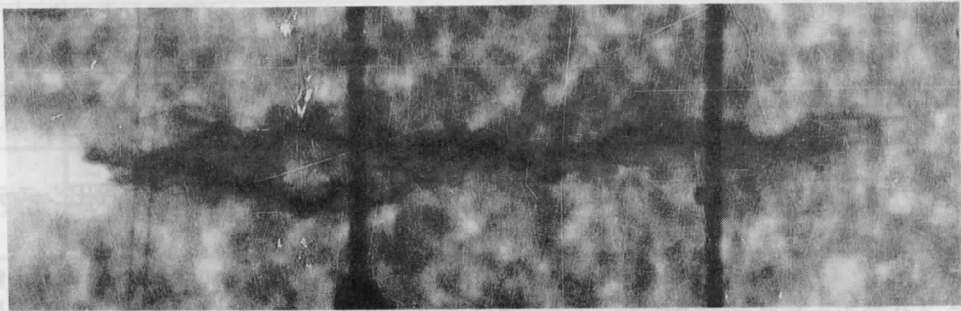


写真-1 X線造影撮影法によって検出されたひびわれ

4. あとがき

本技術によれば、コンクリート中に発生した微細なひびわれを非破壊的、かつ連続的に検出できる。

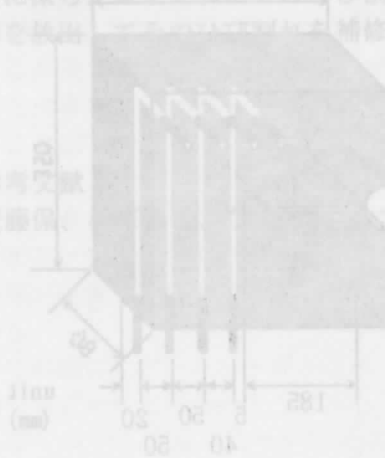


図-5 実験装置の概略図

5. コンクリートのインテリジェント化のための 基礎実験

5.1 ひび割れ幅の制御及び補修効果との関係

本節ではインテリジェント材料の概念である検知、判断、実行のプロセスを、「殻」によって保護される補修剤という「コア」が、母材であるコンクリートの破壊を能動的に検知し、補修を行うことで自己修復を行うと置き換え、実際にコンクリートに対してインテリジェント機能の付加が可能であることを実験によって確認する。本節では特にマイクロカプセルとガラス管を「殻」として用いて実験を行う。それぞれで想定している自己修復のプロセスについては、前者を図1(a)に、後者を図1(b)に示す。そして、ひび割れの発生により、「コア」である補修剤がどのように挙動するかを検討する。

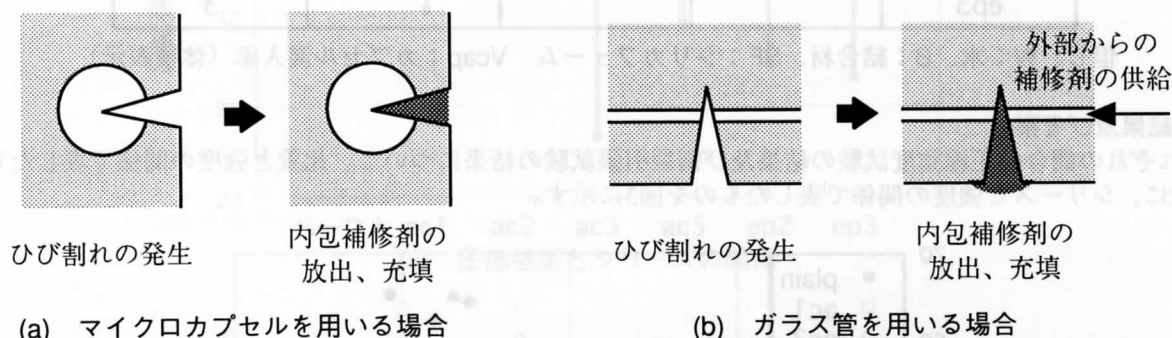


図1 本節において提案するインテリジェント化の手法

1. 補修剤封入カプセル

ここで用いるインテリジェント化の手法としては先に提案されたように、補修剤が封入されているマイクロカプセルをコンクリート中に混入する。このことにより、コンクリート中に発生したひび割れ等の破壊に反応してマイクロカプセル自身も破壊、その内部に持っている補修剤が放出されて、そのひび割れを補修するという機構が期待される。すなわちこれは、クラックがコンクリート中に発生すると、その中に混入されている補修剤封入マイクロカプセルも破壊（すなわちクラックの発生を検知）し、内包する補修用樹脂を放出（すなわち補修を行うことを判断）し、クラックにその樹脂を浸透させてを塞ぐ（すなわち補修を実行する）ものである。この機構が働くことで、材料自体の判断の下に、能動的に自己修復を行うことが可能になるものと考えられる。

ここで行う実験では、この提案された機構が十分に働くことを確認することを目的とし、また、カプセルの混入による力学的特性への影響もあわせて確認する。

1.1 実験概要

ここでは補修剤が封入されているマイクロカプセルを混入した試験体を破壊し、その破面を実体顕微鏡により観察することで、カプセルがマトリクス部分の破壊に反応することが可能であるか、すなわち破壊を検知することが可能であるかどうかを確認する。試験は圧縮強度試験ならびに割裂引張強度試験を行い、破壊した試験体の破断面上に見えるカプセルを観察する。カプセルがマトリクス部分の破壊に反応することが可能ならば、破断面上のカプセルも破壊し、内包している補修剤の放出が観察されるはずである。

圧縮試験体及び引張試験体は $\phi 5 \times 10$ [cm] の円柱状のものとする。使用材料はセメントに早強ポルトランドセメント ($\rho = 3.13$)、混和材にシリカフェーム ($\rho = 2.20$) を用い、またエポキシ樹脂封入カプセル ($\rho = 1.00$ / 殻物質：尿素ホルマリン / 粒径： $20 \sim 70 \mu\text{m}$)、アクリル樹脂封入カプセル ($\rho = 1.00$ / 殻物質：ゼラチン / 粒径： $125 \sim 297 \mu\text{m}$) の2種類のカプセルを用意する。

調査はカプセルの混入率をパラメータとして取り上げ、全体を網羅するために必要なカプセル量を確認する。細骨材は観察の際にカプセルとの判別が困難なため、その他で用いている試験体とは異なり、モルタルではなくペーストを用いる。表1に調査表を示す。

練り混ぜにはモルタルミキサーを使用し、粉体のみで空練りを1分間、その後水を入れて3分間、カプセルを入れて2分間練り混ぜた後に、練り上がったペーストをスチール製の型枠に直接投入し打設した。

そして、打設後24時間まで養生室 (20°C / 相対湿度100%) に静置した後脱型し、その後は材令7日間まで水中養生とした。

圧縮試験はJIS A 1108に基づいて、割裂引張試験についてはJIS A 1113に基づいて行った。それぞれの試験

により破壊した試験体から適当な破面を持つものを選び、それを実体顕微鏡により観察した。

表1 調合表

	W/B [%]	SF/B [%]	使用カプセル	Vcap [Vol.%]
plain	40	10	-	-
ac1			アクリル	1
ac2				2
ac3				3
ac5				5
ep2				エポキシ
ep3			3	

但し、W：水、B：結合材、SF：シリカフューム、Vcap：カプセル混入率（体積表示）

1.2 結果及び考察

それぞれの調合の圧縮強度試験の結果及び割裂引張試験の結果について、比重と強度の関係で表したものを図2に、シリーズと強度の関係で表したものを図3に示す。

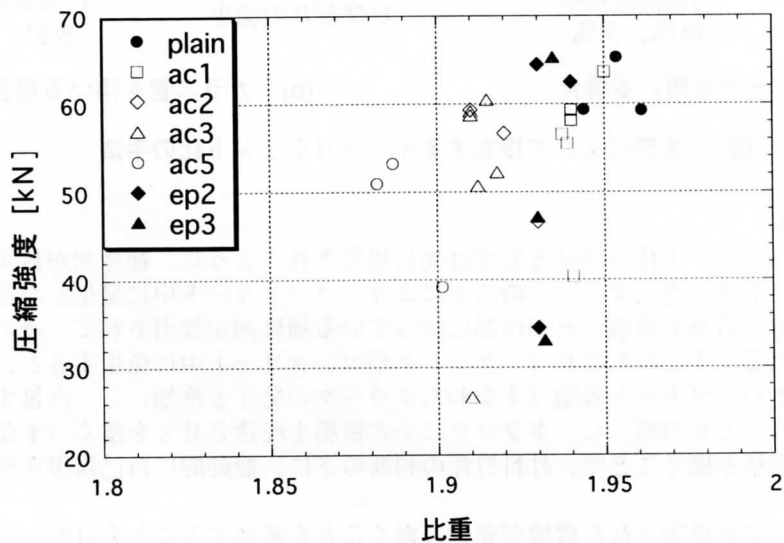


図2(a) 比重と強度の関係・圧縮試験結果

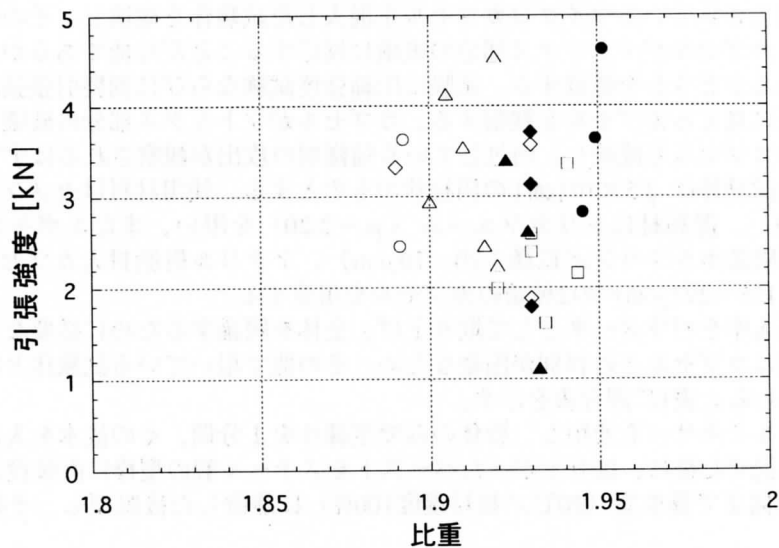


図2(b) 比重と強度の関係・引張試験結果

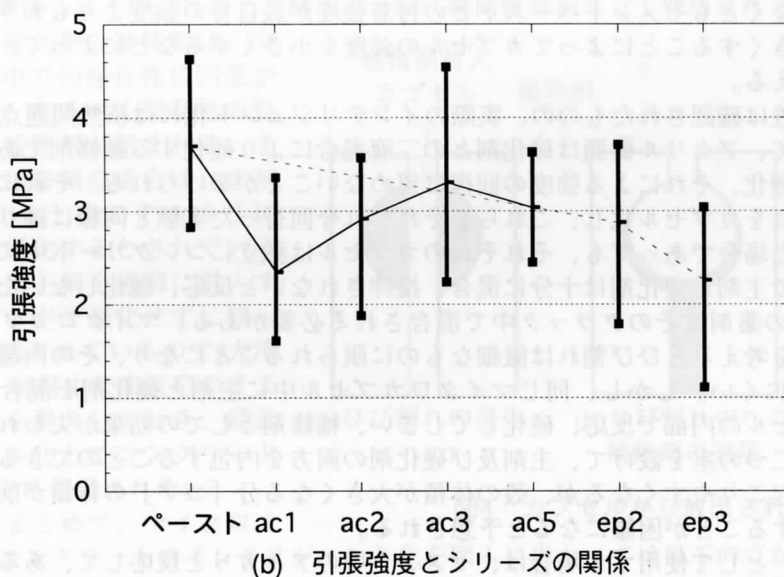
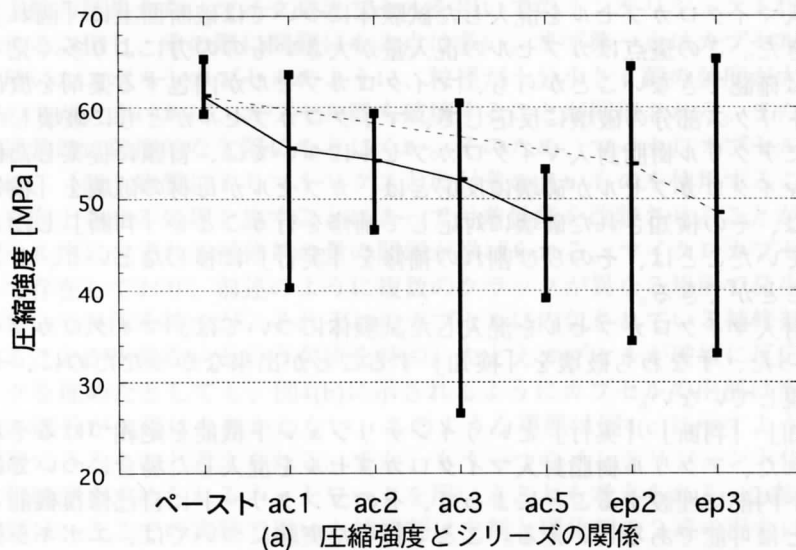


図3 強度とシリーズの関係

<力学的な特性への影響>

図2および図3に示されるようにアクリル樹脂封入カプセル、エポキシ樹脂封入カプセルのどちらのカプセルを混入した場合も、その混入量が大きくなるほど圧縮強度及び引張強度はともに小さくなる傾向にある。またどちらのカプセルを混入した場合でも、同じ混入率では同程度の強度低下が見られる。インテリジェント材料は、より高い性能、信頼性を得るための手法であるため、このように强度的な欠点になってはならない。このことを改善するために、より粒径の小さいマイクロカプセルの使用や、マイクロカプセルとセメントペーストとの付着性能の改善などが求められる。

<インテリジェント化の可能性>

エポキシ樹脂封入マイクロカプセルを混入した試験体については、マイクロカプセルは破壊せずに、そのままの状態で破断面上に存在していることが確認できた。尿素ホルマリンという材料を用いて形成されるマイクロカプセルの「殻」は、「殻」とセメントペーストとの付着強度が「殻」自体の強度を下回っていたために、マトリクス破壊にマイクロカプセルが反応できなかったためと考えられる。このことに加えて、「殻」自体の強度が大きいことも理由として挙げられる。このようにマイクロカプセル自体の破壊、すなわ

ち「検知」にあたる機能が発現していないため、内包していたエポキシ樹脂も破断面上に放出されることはなかった。

一方でアクリル樹脂封入マイクロカプセルを混入した試験体については破断面上に「濡れ」と考えられる斑状のものが多数確認できた。この斑点はカプセルの混入量が多いものの方により多く見られることと、plainシリーズの試験体には確認できないことから、マイクロカプセルが内包する薬剤を放出しているものと考えられる。つまりマトリクス部分の破壊に反応して、マイクロカプセルがともに破壊したといえる。

これらのことから、特にアクリル樹脂封入マイクロカプセルについては、冒頭に提案した機構が働いたと考えられる。すなわち、マイクロカプセルが破壊に反応とは、カプセルが母材の破壊を「検知」し、また内包していた樹脂を放出とは、その検知された破壊に対応して補修を行うことを「判断」したと考えられる。最後に破断面上に広がっていたことは、そのひび割れの補修を「実行」に移したという、インテリジェント機能を発現したと考えることができる。

しかし、エポキシ樹脂封入マイクロカプセルを混入した試験体については、マイクロカプセルがマトリクスの破壊に反応できなかった、すなわち破壊を「検知」することが出来なかったために、それ以後の「判断」「実行」の機能も発現していない。

以上のことから、「検知」「判断」「実行」というインテリジェント機能を定義づけるそれぞれの機構が実行されたことを確認された、アクリル樹脂封入マイクロカプセルを混入した場合については、このマイクロカプセルをコンクリート内部に埋設することによって、そのコンクリートに自己修復機能というインテリジェント機能を与えることは可能であるといえる。ここで行った実験については、エポキシ樹脂封入マイクロカプセルではこれら一連の機構が確認できなかったが、殻を尿素ホルマリンよりもマトリクス部分との付着が十分によいもの、少なくともセメントペーストとの付着強度が殻自身の強度よりも大きい材料に変更する、または粒径を十分大きくすることによってカプセルの強度を小さくするなどによって、この機構に対応できる可能性があるといえる。

ただし、これらの可能性は確認されたものの、実際のインテリジェント化には依然問題点が残る。

まず第一の問題点として、アクリル樹脂は硬化剤との二液混合により硬化する補修剤であるため、今回のように単体で使用しても硬化、それによる強度の回復は望めないことが挙げられる。それに加えて、例えば主剤及び硬化剤のそれぞれをカプセル化し、これらをそれぞれ今回行った実験と同様に練り混ぜ時に混入してコンクリートを作製した場合であっても、それぞれのカプセルは独立にコンクリート中にランダムに配置されることになる。ここで主剤と硬化剤は十分に混合、攪拌されないと反応、硬化しないために、クラック中に放出されたそれぞれの薬剤はそのクラック中で混合される必要がある。マイクロカプセルの大きさから、内包される薬剤の量を考えるとひび割れは微細なものに限られることになり、その内部でこれらの混合が行われることは期待しにくい。しかし、同じマイクロカプセル中に主剤と硬化剤を混合して封入してしまえば、マイクロカプセルの内部で反応、硬化してしまい、補修剤としての効果が失われてしまう。一つのマイクロカプセル中に二つの室を設けて、主剤及び硬化剤の両方を内包することのできるカプセルであれば、双方の薬剤の接触が起こりやすくなるが、殻の体積が大きくなる分「コア」の体積が削られるために、必要な補修剤の量を確保することが困難になると予想される。

エポキシ樹脂を「コア」として使用する場合は、セメント中のアルカリと反応して、ある程度硬化することが確認されているため硬化剤がなくともその効果の発現が期待される[大濱嘉彦他、1995]が、ここで用いたマイクロカプセルはマトリクスの破壊に反応しないため、「殻」に使用する物質もしくは粒径の変更等を行う必要がある。

ここでマイクロカプセルの粒径と強度の関係について述べる。マイクロカプセルは、はじめに内包させる樹脂を水中に微分散させ、その周囲に殻となる物質をコーティングすることによって作製される。その際に、コアとなる樹脂の回りに付着する殻となる物質は、そのコアの大きさによらず一定の量が付着することが知られている[花田南、1995]。そのため、殻に使用する物質が同じものであった場合、「コア」の粒径が大きくなるほどその表面積も大きくなるために殻は薄く、また逆に「コア」の粒径が小さくなるほど殻は厚くなる。そのため、一般に粒径のより小さいマイクロカプセルの方がその強度は大きくなる。

ここで行った実験のように、マイクロカプセルをコンクリート中に埋設してインテリジェント化を図る場合、粒径の小さいものの方が破壊の発生していない通常時では強度的な欠点になりにくい。しかし、粒径が小さい上に殻がより厚くなるために、十分なコア物質の量を確保しにくくなる。また、殻とマトリクス部分の付着が十分でない場合、殻の強度が大きくなるとマトリクスの破壊に反応しにくくなるという欠点を持つ。一方で粒径が大きいカプセルを使用した場合、「コア」となる物質を多く含有させることが可能となり、マトリクスの破壊にも敏感になることが予想されるが、通常時に強度的な欠陥になりやすい。

本実験で用いた尿素ホルマリンを殻とするエポキシ樹脂封入マイクロカプセルと、ゼラチンを殻とするア

クリル樹脂封入マイクロカプセルについても、それぞれについて上述のような長所及び短所が見受けられた。そのため、そのそれぞれの特長を得られるような殻物質及び粒径を見いだすことが必要となる。

ここで行った実験の結果から、マイクロカプセルを用いてのインテリジェント化の可能性それ自体は確認されたと考えられる。但し、その際に問題になる点が多い。まず第一点はカプセル殻の強度と付着性能が挙げられる。今回用いたエポキシカプセルのように、粒径が十分小さく殻の強度が大きくても、マトリクス部分との付着強度の方が大きければ、カプセル殻も破壊することが期待される。またカプセル自身の強度は、より大きい方が通常時に強度的な欠陥になりにくい。そのため、マイクロカプセルとマトリクスの付着をより良くするために、「殻」物質によりマトリクスとの付着の良いものを使用することや、その表面にマトリクスとの親和性を向上させる処理を施すことによって付着性能を改善させることが望まれる。

第二点はカプセル内に含まれる補修剤の量の問題が挙げられる。マイクロカプセルはコンクリート中で一粒一粒が独立して存在しており、前述のように複数のクラックが異なる場所で発生した場合でもそのそれぞれに対応できるという長所を持つが、それぞれのカプセルに内包されている補修剤の量は微量であり、外部から供給も受けることが出来ないという欠点を持つ。たとえカプセルが破壊に反応し、内包補修剤を放出した場合にクラックを埋めたとしても、図4(b)に示されるようにカプセルの内部は空になってしまい、この空となったカプセル部分が欠陥になりかねない。このような事態は図4(c)に示すように、内包する補修剤に膨張性があれば回避できるものと考えられる。また、もう一つのインテリジェント化に対する提案である、ガラス管のように供給源を求められるネットワークを用いることも考えられる(2参照)。

第三点目の問題は、ここでの実験で用いた補修剤は主剤と硬化剤の2液の混合により硬化するということである。前述のように共にカプセル化し、コンクリート中に埋設されていても、クラック中でこの2液が混合されることは期待しにくい。しかし、例えば一般に瞬間接着剤として使用されているシアノアクリレート

系のような一液硬化型の補修剤は、マイクロカプセル中での保存性に問題がある。そのため、なるべく保存性の良い一液硬化型の補修剤が望まれる。またエポキシ樹脂補修剤の場合は、主剤のみでコンクリート中のアルカリによってある程度硬化するとされているが、逆に打設時に主剤を過剰に混入すればコンクリート中で硬化せずに残っていることが確認されているので[大濱嘉彦他、1995]、母材中に未反応のまま残るように主剤を混入しておき、硬化剤のみをカプセル化してコンクリート中に混入することも提案される。

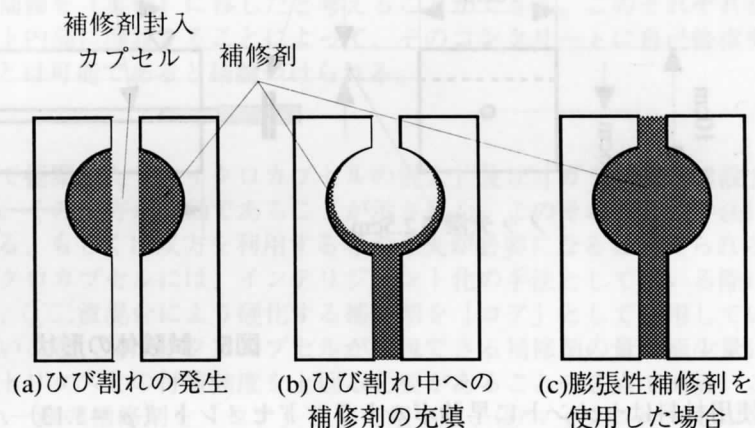


図4 カプセルから放出される補修剤

以上のことをまとめて、マイクロカプセルを用いてコンクリートのインテリジェント化を図るに当たっては以下の点が提案される。

1. 保存性の良い一液硬化補修剤をコアとしたカプセル。もしくはエポキシ樹脂を用いる場合は、主剤はコンクリート打設時に混入しておき、硬化剤のみをカプセル化して混入。
2. 膨張性のコアによる包含量の解決。
3. より付着の良い殻物質の使用。

2 ガラス管の埋設

本節では、このインテリジェント機能の付与のために用いる手法として、補修剤を内包したガラス管をコンクリート中に配置することを提案する(図1(b))。このことにより、コンクリート中に発生したクラックに反応して、ガラス管が内部に持っている補修剤を放出し、そのクラックを補修するという機構が期待される。すなわちこれは、クラックがコンクリート中に発生すると、その中に配置されたガラス管も破壊(すなわちクラックの発生を検知)し、内包していた補修用樹脂を放出(すなわち補修を行うことを判断)し、クラックにその樹脂を浸透させてを塞ぐ(すなわち補修を実行する)ものである。この機構が働くことで、材料自体の判断の下に、能動的に自己修復を行うことが可能になるものと考えられる。

本項で行う実験では、この提案された機構が十分に働くかどうかを確認することを目的としている。そのために、ここではX線を用いて破壊試験中の試験体内部の様子を観察する。この観察方法を採用することにより、破壊試験が進展する最中の試験体の内部の様子が観察できる。ここではより詳細に観察するために、ガ

ラス管には補修剤ではなくX線造影剤を内包させ、試験体の破壊の進展に応じて、このX線造影剤がどのような挙動を示すか、すなわち補修剤がどのような挙動を示すかをX線により観察する。

もしここで提案した機構が働くならば、X線造影剤を内包したガラス管は破壊試験によって試験体に発生するクラックに反応し、その内包しているX線造影剤を放出、クラック部分にこのX線造影剤が浸透していく様子が段階的に観察されることが期待される。

2.1 実験概要

ここで行う実験は、破壊試験中の試験体内部の様子をX線により観察することで、その試験体内部に仕掛けられたインテリジェント機能が発現可能であることを確認するものである。

試験は破壊箇所が限定できるために観察の行い易い、試験中の破壊の程度の制御が簡便なノッチを付けた試験体を用いた3点曲げ破壊試験を採用した。

試験体は図5に示すように、寸法は $10 \times 10 \times 34$ [cm]で、破壊箇所を限定するために中央に深さ 2.5 [cm]のノッチを入れている。中にはガラス管が埋設されており、破壊に応じて十分な量のX線造影剤がこのガラス管からクラック中に浸透可能なように、外部にタンクを設けてX線造影剤を引き入れている。X線造影剤はその自重によって発生するクラック内に浸透する。また、図中に示される三角形は、曲げ試験時の載荷点の位置を示している。

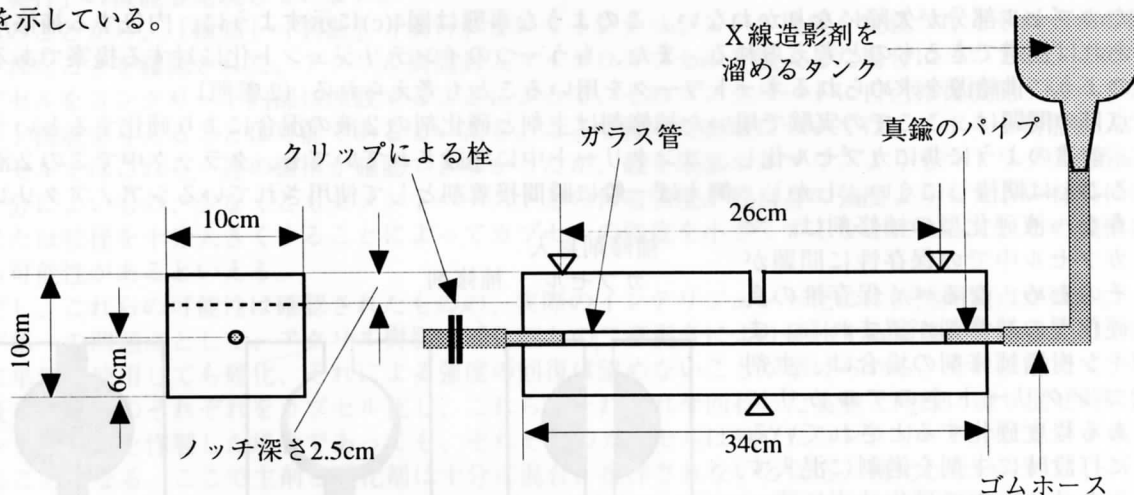


図5 試験体の形状

使用材料はセメントに早強ポルトランドセメント ($\rho = 3.13$)、混和材にシリカフェーム ($\rho = 2.20$)、混和剤にナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤 (空気非連行性) ($\rho = 1.20$)、骨材に宮城県阿武隈川産川砂 ($\rho = 2.54$; 表乾) を用い、繊維はポリプロピレン繊維 [ppC] ($\rho = 0.91 / \phi 0.018 \times 12$ mm) を使用した。またガラス管は外径 2 mm、内径 0.8 mmで、主成分が炭酸セシウムであるX線造影剤を使用する。

調査については、曲げ破壊試験によって試験体が脆性的に破壊してしまえば、試験体内部に発生、進展するクラックや、そこに浸透していくX線造影剤の様子が十分に観察できないため、繊維混入率 $V_f = 0.5$ [%] とし脆性破壊を抑え、クラック幅を制御する。試験体中に埋設されるガラス管は型枠内には予め設置されており、これを破損してしまうことなく打設が可能となるように、モルタルマトリクスは十分な流動性を得られるように留意して、 $W/C = 40(38+2)$ [%] とした。また、 $SF/B = 10$ [%]、 $V_a : V_m = 1 : 1$ である。但し、 W : 水、 B : 結合材、 SF : シリカフェーム、 V_a : 骨材体積、 V_m : マトリクス体積、 V_f : 繊維混入率 (体積表示)、 W/B の括弧内は (水+高性能減水剤) である。

練り混ぜには強制練りミキサーを使用し、粉体のみで空練りを1分間、その後水・減水剤を入れ3分間、そして繊維を入れ1分間、最後に骨材を入れ2分間とした。打設の際には、型枠中にあらかじめガラス管を配置しておき、そこにモルタルを詰める方法を採用した。ガラス管は後の作業が容易になるように、モルタル部分からの引き出し部分を真鍮パイプを用いて補強している。ここで用いているガラス管は非常に脆いため、打設中に破損しないように細心の注意を払う必要がある。また調合の段階ではなるべく流動性の高いものにするよう配慮したが、実際の打設では失敗も多かった。

養生は打設してから24時間養生室にて静置した後に脱型、養生室にて材令7日まで湿空養生を行った。

破壊試験は、X線造影剤の漏れや、クラックが上に進展するのに対してX線造影剤が上に上がりにくいという点を考慮して、上部2点支持による3点曲げ試験、すなわち図5に示したものを採用した。但しこの図

中の三角形は載荷点の位置を示している。ノッチ部分にはクリップゲージを取り付け、開口変位 (CMOD) を測定するとともに、このCMODの変化速度によって載荷点の変位を制御している。この試験の最中にX線造影撮影法により試験体内部の状態を観察する。

但し、CMODとは「Crack Mouth Opening Displacement」の略で、ひび割れの開口部分の変位を指す。

< X線造影撮影法 >

X線造影撮影法は、載荷前の試験体の内部にX線造影剤を封入させておき、載荷中に連続的、あるいは荷重のある段階毎にX線透過撮影を行うものである。ここでは試験体内に予め埋設されているガラス管内にX線造影剤を注入している。ひび割れを検出するシステムには、X線イメージング用増感材で受けて行う「TVモード」を用いた。TVモードではX線発生装置と試験体の距離を15[cm]とし、管電圧は100[mV]程度、電流は2[mA]とした。載荷中は、連続的にリアルタイムで画像処理した映像をTVモニターで観察すると同時にVTRで録画しておき、必要な箇所はコンピュータを経由してハードコピーを得た。TVモードはリアルタイムでひび割れを検出できること、VTRを利用して急な破壊でも後から1コマずつ分解して観察できることなどの利点があるが、得られた画像の画質がフィルムモードよりもやや劣ること、受像領域(直径180[mm]の円)が限られることなどの欠点がある[大塚浩司、1992]。

2.3 結果及び考察

図6及び図7、そして図8及び図9において、曲げ試験によってモルタルマトリクス部分の破壊が発生することに反応してガラス管も破壊し、内包していたX線造影剤を発生したひび割れ中へと放出している様子を段階的にとらえることが可能であった。ここで観察されたガラス管が破壊に反応するという事は、ガラス管が母材であるモルタルの破壊を「検知」したと考えられる。また内包していたX線造影剤を放出とは、その検知された破壊に対応して補修を行うことを「判断」したと考えられる。最後に発生したひび割れ中にX線造影剤が浸透するとは、そのひび割れの補修を「実行」に移したと考えることができる。このそれぞれが確認されたために、ガラス管をコンクリート内部に埋設することによって、そのコンクリートに自己修復機能というインテリジェント機能を与えることは可能であると結論づけられる。

3 まとめ

以上の実験から明らかなように、本節で提案した「マイクロカプセルの混入」及び「ガラス管の埋設」という2つのインテリジェント化の手法は、その双方が有効であることが示された。このそれぞれの手法には一長一短があり、場合に応じて使い分ける、もしくは双方を利用する等の工夫が必要になると考えられる。

前述のように、今回実験で用いたマイクロカプセルには、インテリジェント化の手法として用いる際に問題となる点が3点挙げられる。すなわち、①二液混合により硬化する補修剤を「コア」として使用しているために、硬化の反応が引き起こされにくいこと、②マイクロカプセルが内包できる補修剤の量が極少量に限られること、③カプセル自身の強度がマトリクスとの付着強度を上回る必要があることの3点である。これらに対応するためには、①保存性の良い一液の補修剤を「コア」として用いる、②マイクロカプセルの粒径を十分に大きくする、③「殻」に用いる物質を変更する、もしくはこの表面に付着性能を改善させるような処理を施す、などが挙げられる。

これに対してガラス管をその手法として採用する場合に、最も大きな問題点となるのは打設の際などに、ガラス管の扱いが困難になることである。このことは、実験室レベルでの試験体作製を行うのなら、打設の際に十分な注意を払えば解決されるものと考えられるが、例えば実際の建設現場で大きな量を打設するなどという状況であれば非常に大きな問題となる。逆に利点としては、外部のタンクから「コア」である補修剤を引き入れているために、マイクロカプセルを使用する場合とは異なり、このタンクに入れる薬剤を変えるだけで、「コア」部分の変更も非常に簡便に行える、補修剤を未反応のままある程度の量を保存できることなどが挙げられる。

本節のインテリジェント化の手法により実際に補修剤を用いて実験を行った結果が、6.1、6.3に記載されている。

参考文献

- 大濱嘉彦、出村克宣、内川浩、“硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメント系におけるエポキシ樹脂とセメント水和物の相互作用”、セメント・コンクリート論文集、No.49、pp.252-25、1995
- 大塚浩司、“X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひび割れ検出に関する研究”、土木学会論文集、No.451、V-17、pp.169-178、1992
- 花田南、“マイクロカプセルの特徴”、インテリジェントコンクリート研究委員会資料、1995

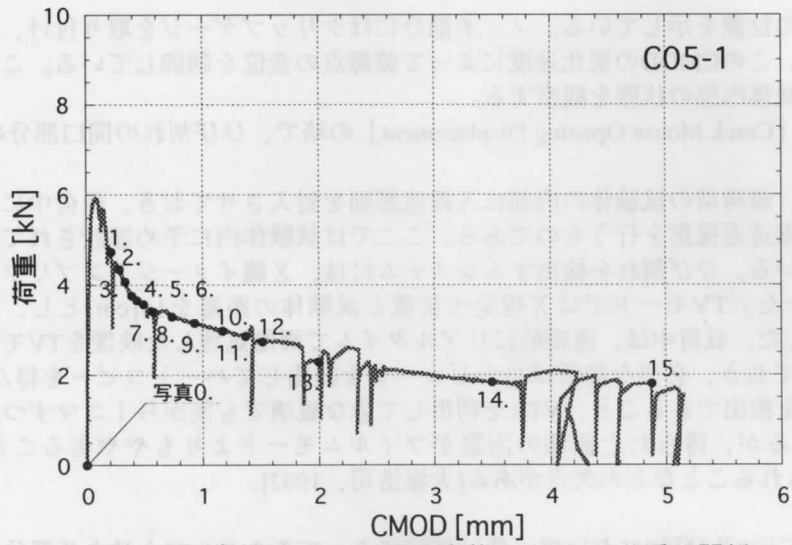


図6 曲げ試験における開口変位(CMOD)と荷重の関係

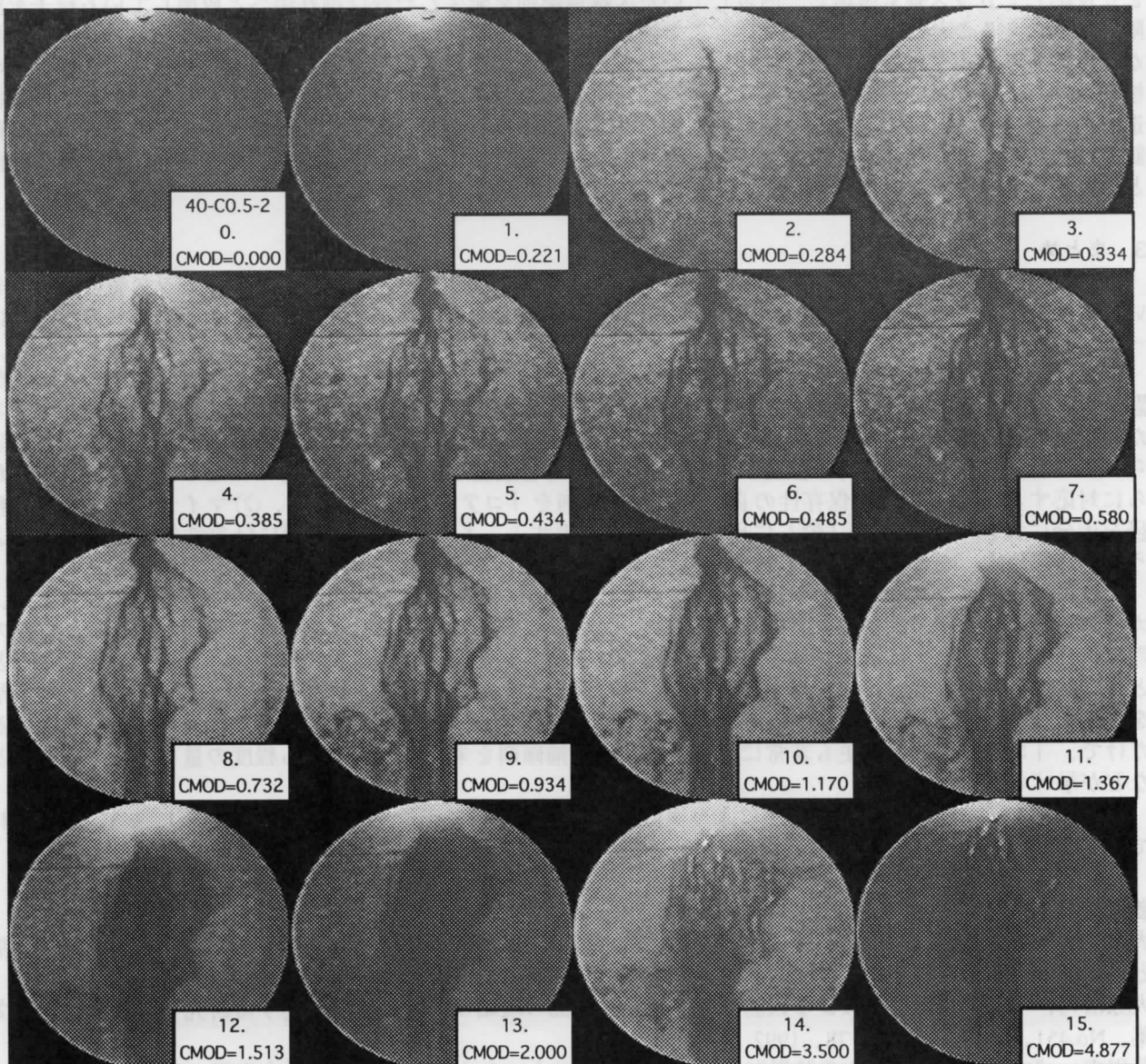


図7 TVモードからのX線観察写真
(写真中の数字と図6中のプロット数字は対応している)

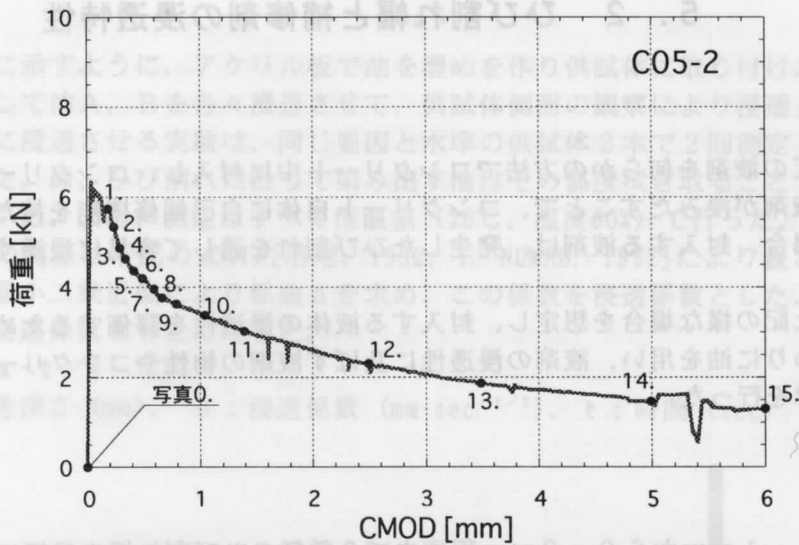


図8 曲げ試験における開口変位(CMOD)と荷重の関係

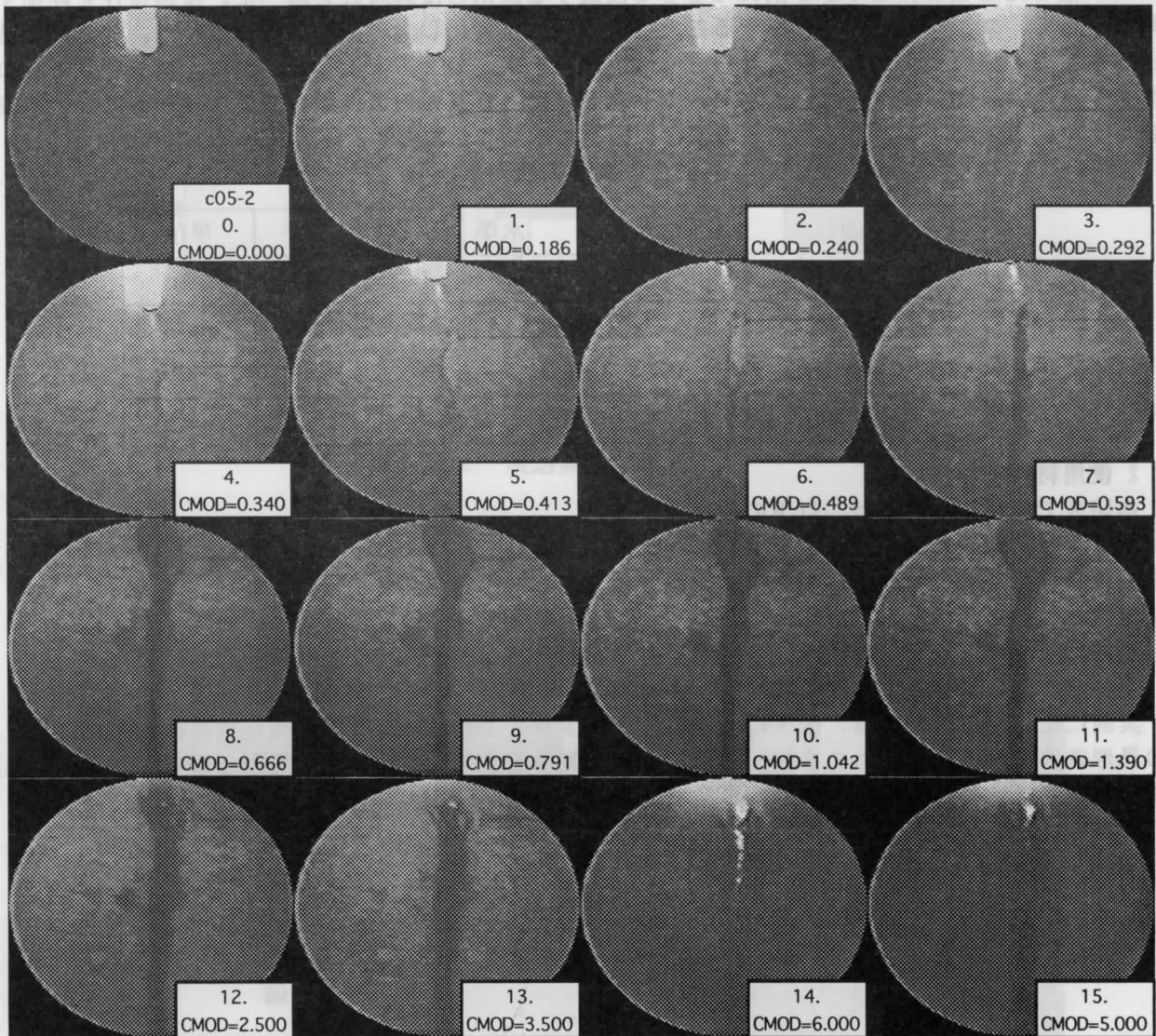


図9 TVモードからのX線観察写真
(写真中の数字と図8中のプロット数字は対応している)

5. 2 ひび割れ幅と補修剤の浸透特性

1. はじめに

各種補修剤などの液剤を何らかの方法でコンクリート中に封入し、コンクリートにひび割れが発生した時点でこの液剤が浸みだすことで、コンクリート自体に自己補修機能を持たせることが考えられる。このような場合、封入する液剤は、発生したひび割れを通して容易に浸透する性質を持つことが求められる。

この節では、上記の様な場合を想定し、封入する液体の浸透性を評価するための基礎的な研究として、補修剤の代わりに油を用い、液剤の浸透性に及ぼす液剤の物性やコンクリートのひび割れ幅の影響を実験的に検討を行った。

2. 実験方法

2.1 要因と水準

本実験では、0.1 mmから0.8 mm程度まで3種類のひび割れ幅を目標に、コンクリートにひび割れ幅を発生させ、このひび割れにそって浸透する液剤の浸透特性を調べた。浸透特性を評価する対象として、コンクリートと反応することにより物性が変化しない様に油を使用した。油は、低粘性と高粘性の2種類をまた、浸透させる方向は、鉛直と水平の2方向とした。更に、コンクリートの水セメント比の影響も調べるため、水セメント比30%と60%の2種類のコンクリートについて実験を行った。表1には、これらをまとめて、要因と水準で表したものを示している。

表1 実験の要因と水準

要因	水準	単位
ひび割れ幅	0.1, 0.5, 0.8	mm
浸透材料	油A (低粘性油), 油B (高粘性油)	—
水セメント比	30, 60	%
浸透方向	鉛直, 水平	—

2.2 使用材料及び供試体

本研究で使用した材料は、以下の通りである。

セメント：普通ポルトランドセメント（比重 3.15）

細骨材：岩瀬産粉砕砂／鬼怒川産天然砂＝3／7（比重 2.56, FM 2.29）

粗骨材：岩瀬産砕石 5号／6号＝55／45（比重 2.68, FM 6.79）

浸透材料：油A－サラダオイル（表面張力 32.0dyn/cm, 粘度 44.8 MPa·s, 比重 0.9）

油B－DTEオイル（表面張力 36.0dyn/cm, 粘度 468 MPa·s, 比重 0.91）

実験に使用した供試体は、図1に示すように、10×10×40 cmの角柱供試体の中心にD16の異形鉄筋を埋め込んだものを使用した。4週間気中養生後、鉄筋の両側を引っ張ることにより供試体にひび割れを発生させた。ひび割れ幅は、ひび割れゲージにより各面3カ所ずつ全周を測定し、その平均をひび割れ幅とした。

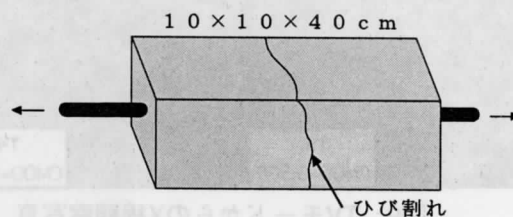


図1 供試体の概要

2.3 浸透測定方法

図2及び写真1に示すように、アクリル板で油を溜めを作り供試体に取り付けた。浸透方向を鉛直と水平の2方向として油A、Bを各々浸透させて、供試体側面の観察により浸透長さと時間の関係を求めた。鉛直方向に浸透させる実験は、同じ要因と水準の供試体2本で2回測定し、水平方向は1体で1回の測定とした。尚、ひび割れに沿って染み出す油はその都度拭き取ることで、側面を伝って流れる影響は取り除いた。また、測定はすべて恒温室（20℃、湿度60%）で行った。

浸透深さと時間の関係は下記の式(1) [沼尾、1992, T. NUMAO, 1992]により表されるものとして、実験結果をもとに最小二乗近似により係数 a を求め、この係数を浸透係数とした。ここでは、実験結果の評価を、この浸透係数をもとに行った。

$$l = a \cdot t^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 l : 浸透深さ (mm)、 a : 浸透係数 ($\text{mm} \cdot \text{sec}^{-1/2}$)、 t : 時間 (sec) である。

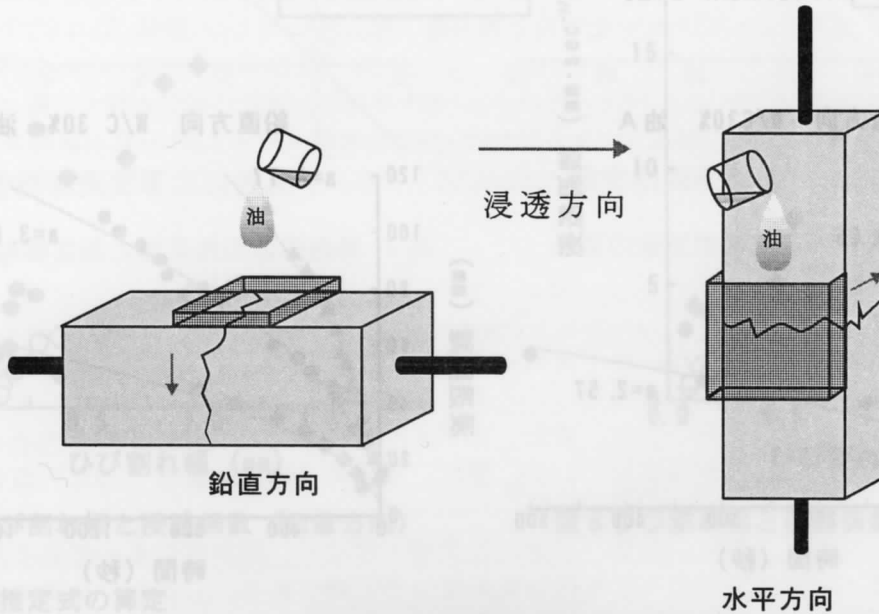
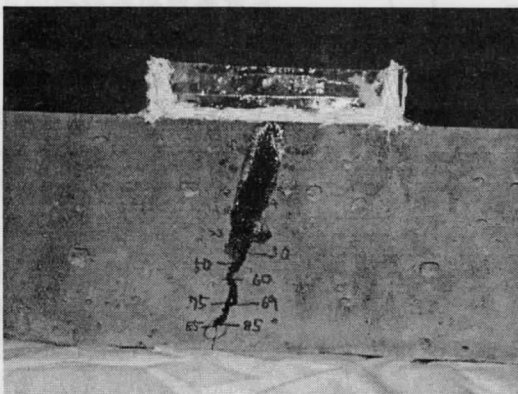
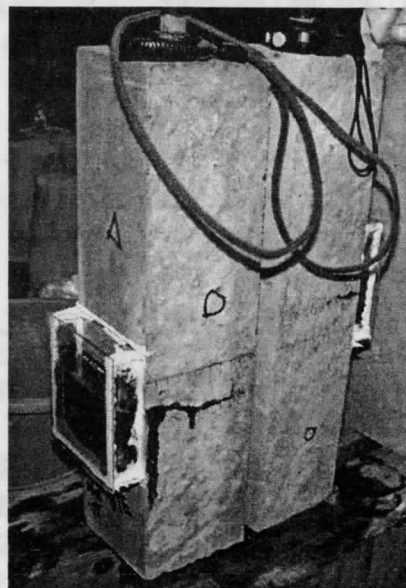


図2 浸透実験の概要



鉛直方向



水平方向

写真1 浸透試験状況

3. 結果及び考察

実験結果の一例として、図3に水セメント比30%の供試体の場合について、浸透距離と時間の関係を、鉛直、水平方向及び油A、B各々について示す。更に、この図には、前記の式(1)を基に、最小二乗近似により求められた浸透係数とその曲線を併せて表示している。また、水セメント比60%の場合も、浸透係数の値は異なるが、ほぼ同様の傾向を示した。

この図より、浸透は開始直後で速く、時間が経過するに従って遅くなってゆく傾向が分かる。また、鉛直方向の浸透は、重力の影響により水平方向より早く明らかに差があることや、浸透深さと時間の関係は、式(1)により良く表現できることが示されている。

尚、ひび割れ幅が小さい供試体に浸透させたものの中には、浸透距離が5cmほどで止まってしまったものが見られた。これは、ひび割れ形状が大きく変化する箇所では、油が流れやすい方へ進むため、結果として、観察箇所へ浸透しなくなってしまったためと考えられる。この傾向は、粘性の大きな油Bのみに観ら、油Aでは現れなかった。

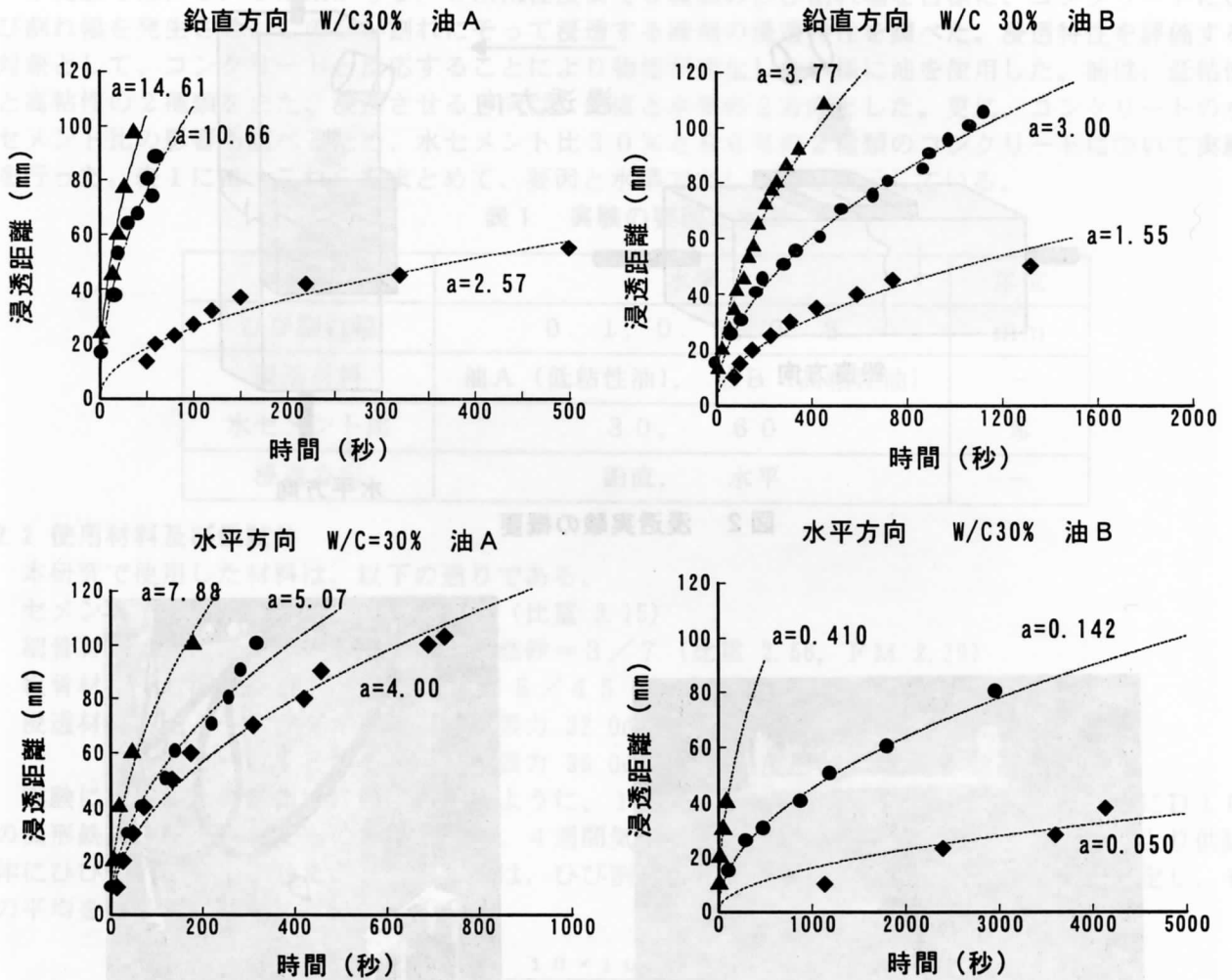


図3 経過時間と浸透距離の関係 (W/C : 30%)

次に、図4、5には、図3に示すように求められた浸透係数を、ひび割れ幅との関係で示したものである。図4は鉛直方向を、図5には水平方向の浸透について示している。これらの図より、ひび割れ幅が大きくなるほど浸透係数が大きくなるが示されている。また、低粘性の油Aを鉛直方向に浸透させる場合においては、水セメント比60%の供試体の場合の方が、30%の場合に比べ浸透係数が大きくなる傾向を示している。

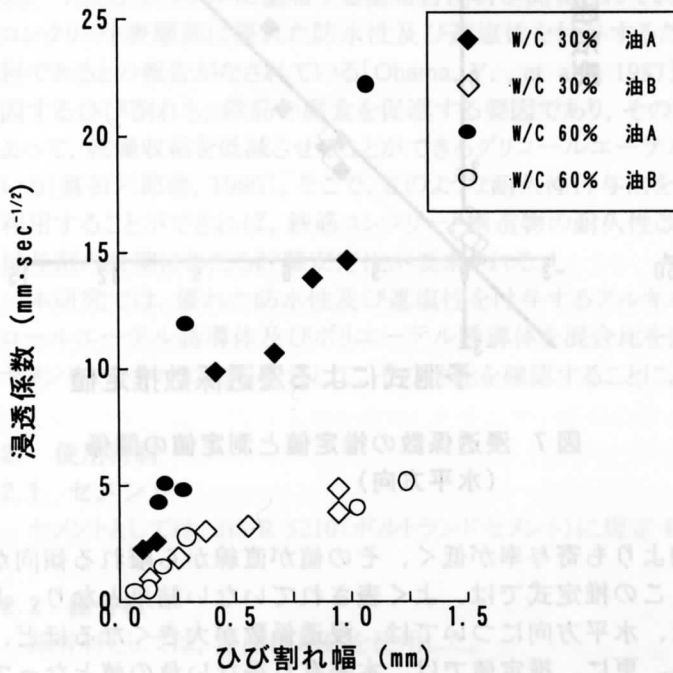


図4 ひび割れ幅と浸透係数（鉛直方向）

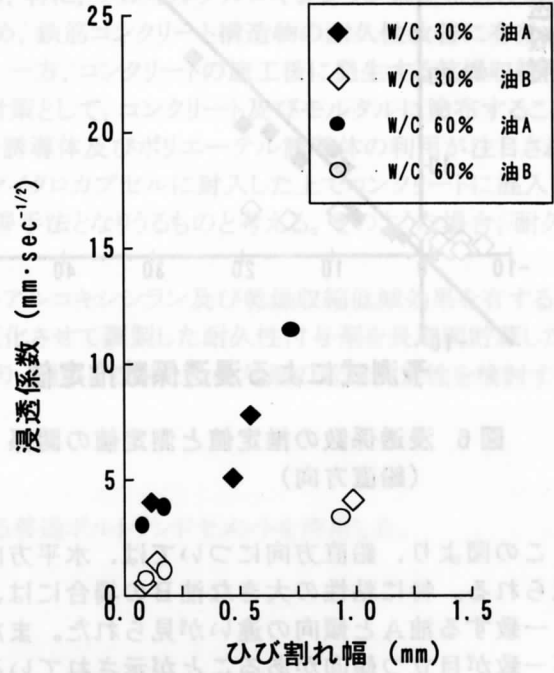


図5 ひび割れ幅と浸透係数（水平方向）

4. 浸透係数推定式の算定

ここでは、統計解析の手法を用いて、浸透特性とひび割れ幅及び液剤の物性値との関係を定量的に把握することを試みた。即ち、上述した測定結果から得られた浸透係数 a を目的変数とし、ひび割れ幅、油の物性（表面張力、粘性、比重）、水セメント比を説明変数として重回帰分析を行い、浸透係数 a ($\text{mm}\cdot\text{sec}^{-1/2}$) の予測式を算定した。その結果得られた推定式を以下に示す。

(1) 鉛直方向の浸透係数推定式

$$a = 30.0 \times C + (-0.75) \times \eta + 0.13 \times W/C + 20.5$$

C : ひび割れ幅 (mm)、 η : 粘度 (dyn/cm)、 W/C : 水セメント比 (%)

算定された回帰式は、分散分析の結果危険率1%で有意となり、寄与率は0.72であった。

(2) 水平方向の浸透係数推定式

$$a = 5.54 \times C + (-0.34) \times \eta + 0.01 \times W/C + 14.3$$

C : ひび割れ幅 (mm)、 η : 粘度 (dyn/cm)、 W/C : 水セメント比 (%)

算定された回帰式は、分散分析の結果危険率1%で有意となり、寄与率は0.79であった。

重回帰分析により取り上げられた説明変数は、鉛直、水平方向ともに、ひび割れ幅、粘度、水セメント比であった。各係数の符号より、ひび割れ幅と水セメント比が大きいほど浸透係数は大きくなり、粘度が大きいほど小さくなるが示された。鉛直方向の浸透に関しては、各説明変数の絶対値は水平方向より大きく、各々の要因の影響が大きくなる傾向があることが分かった。

液剤の物性の影響は、粘度のみが取り入れられる結果となった。これは、粘度と表面張力の間に強い相関があると判定されたために、表面張力が選択されず上記の結果となった。

図6、7には、推定式より求められる浸透係数の値と、実験結果より得られた値との関係を鉛直、水平方向各々について示している。

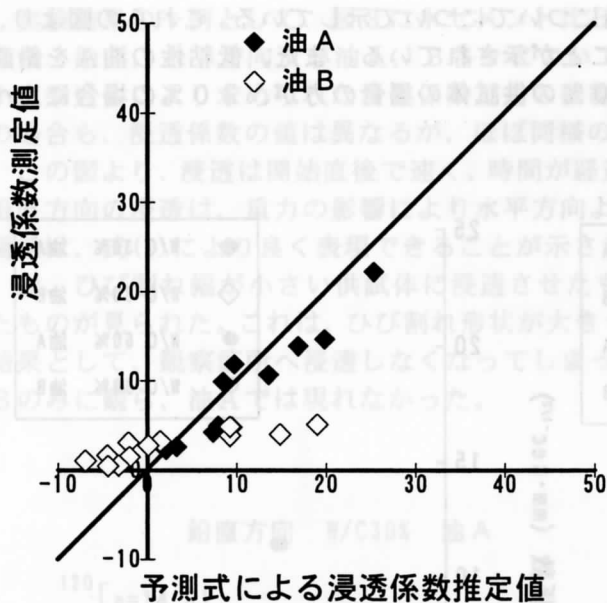


図6 浸透係数の推定値と測定値の関係
(鉛直方向)

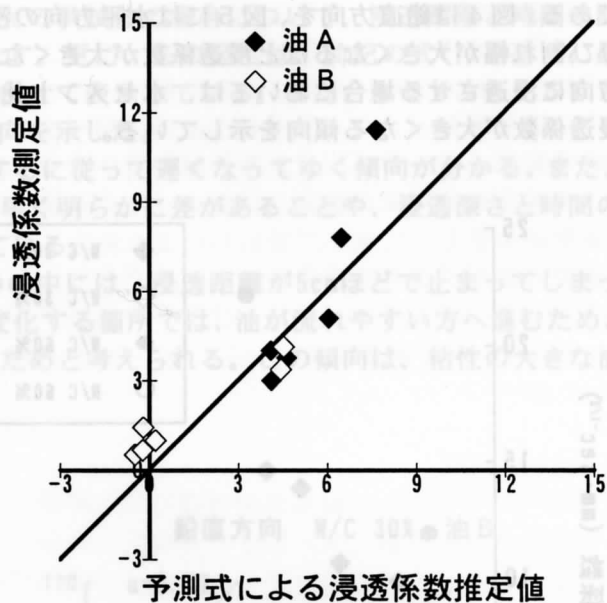


図7 浸透係数の推定値と測定値の関係
(水平方向)

この図より、鉛直方向については、水平方向よりも寄与率が低く、その値が直線から離れる傾向が見られる。特に粘性の大きな油Bの場合には、この推定式では、よく表されていない結果となり、よく一致する油Aと傾向の違いが見られた。また、水平方向については、浸透係数が大きくなるほど、不一致が目立つ傾向があることが示されている。更に、推定値では、本来有り得ない負の値となってしまった。

これらの原因としては、各要因の影響が線形的な関係ではなく、指数的なものである可能性もあるが、詳細については、より多くのデータを積み重ねていく必要がある。しかし、全体的に見て、ここで求められた推定式により、ひび割れ幅や液剤の物性により、ひび割れ内部を浸透していく特性が表現できるものと思われる。

5. まとめ

本研究では、封入する液体の浸透性を評価するための基礎的なデータを得るために、浸透係数を定義して、この係数に対する液剤の物性やコンクリートのひび割れ幅の影響の検討を行った。その結果、重回帰分析により求められた推定式により、ひび割れ幅や液剤の物性値が分かれば、ひび割れ内部を浸透していく特性が表現できることが分かった。この結果を基に、封入される補修材などの液剤の選定や、封入量による、ひび割れへの浸透深さの推定ができることになる。更に、コンクリートや固化剤との反応による液剤の物性変化を考慮することにより、一カ所に封入する量やその間隔を決定することに利用できるものと思われる。

参考文献

- 沼尾達弥、福沢公夫、陳總宇、含浸塗料の物性がモルタルへの含浸性に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No. 46, pp. 404-409, 1992
- T. NUMAO, K. FUKUZAWA, S. CHEN, S. HORIBE, Relation Between Pore Size Distribution and Water Permeation Properties of Hardened Cement Mortar, Trans. of JCI, vol. 14, pp. 49-56, 1992

5.3 耐久性付与剤の貯蔵安定性

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート構造物の耐久性改善には、鉄筋の腐食要因である塩化物イオン、二酸化炭素、水分、酸素などのコンクリート表面からの浸透を遮断することが重要である。最近、これらの劣化要因を遮断する目的で、コンクリート及びモルタルに塗布する塗布含浸材が開発されており、特に、アルキルアルコキシシラン系塗布含浸材は、コンクリート表層部に優れた防水性及び遮塩性を付与するため、鉄筋コンクリート構造物の耐久性改善に有効な材料であるとの報告がなされている[Ohama, Y., et al., 1987]。一方、コンクリートの施工後に発生する乾燥収縮に起因するひび割れも、鉄筋の腐食を促進する要因であり、その対策として、コンクリート及びモルタルに塗布することによって、乾燥収縮を低減させることができるグリコールエーテル誘導体及びポリエーテル誘導体の利用が注目されている[富田六郎他, 1986]。そこで、このような耐久性付与剤をマイクロカプセルに封入した上でコンクリートに混入して利用することができれば、鉄筋コンクリート構造物の耐久性改善手法となりうるものと考えられる。そのような場合、耐久性付与剤の長期にわたる貯蔵安定性が要求される。

本研究では、優れた防水性及び遮塩性を付与するアルキルアルコキシシラン及び乾燥収縮低減効果を有するグリコールエーテル誘導体及びポリエーテル誘導体を混合比を変化させて調製した耐久性付与剤を長期間貯蔵した後、セメントモルタルに塗布含浸して、その性能を確認することにより、調製した耐久性付与剤の貯蔵安定性を検討する。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210(ポルトランドセメント)に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。

2.2 細骨材

細骨材としては、豊浦標準砂を使用した。

2.3 耐久性付与剤の調製用原料

耐久性付与剤の調製用原料としては、アルキルアルコキシシラン(AAS)、グリコールエーテル誘導体(GE)及びポリエーテル誘導体(PE)を使用した。なお、耐久性付与剤の調製用原料の化学式を表-1に示す。

3. 試験方法

3.1 耐久性付与剤の調製及貯蔵

表-2に示す配合で、耐久性付与剤を調製し、それぞれ、試薬びんに500ml入れて密封した後、20℃の暗室に7, 28, 91及び1095日(3年)間貯蔵した。

3.2 供試モルタルの調製

セメント:豊浦標準砂=1:3(質量比)のモルタルを、そのフロー値が170±5となるように水セメント比を調整し、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)に従って練混ぜ、供試モルタルを調製した。

表-1 高耐久性付与剤の化学式

Ingredient for Barrier Penetrant	Chemical Formula
Alkyl Alkoxy Silane (AAS)	$C_6H_{13}Si(OCH_3)_3$
Glycol Ether Derivative (GE)	$A: \text{C}_6\text{H}_5\text{-O-(CH}_2\text{-CH(CH}_3\text{)-O)}_n\text{-H}$ $B: \text{C}_6\text{H}_5\text{-O-(CH(CH}_3\text{)-CH}_2\text{-O)}_m\text{-H}$ Mixture of A and B $n=2-7, m=2-7$
Polyether Derivative (PE)	$CH_3\text{-CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O-}[(\text{CH}_2\text{CHO(CH}_3\text{)})_n(\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{O})_m]\text{-H}$

表-2 高耐久性付与剤の配合

Type of Barrier Penetrant	Formulations by Mass		
	AAS	GE	PE
A	10	0	0
AG	7	3	0
AP	7	0	3

3.3 耐久性付与剤の粘度の測定

JIS A 6203(セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂)に従って、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤の粘度を測定した。

3.4 耐久性付与剤の浸透深さ及びはっ水深さの測定

供試モルタルを寸法40x40x160mmに成形し、1日湿空[20℃, 80%(RH)], 6日水中(20℃), 7日乾燥[20℃, 50(RH)]養生を行った。養生後、供試モルタルの型枠に接する二側面(40x160mm)に、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤を塗布量400g/m²で塗布して、供試体を作製した。その後、供試体を二分割し、ぬれ色を呈する部分を耐久性付与剤浸透域として、耐久性付与剤浸透深さをノギスを用いて測定した。又、二分割した供試体を、20℃, 50%(RH)の条件下に7日間静置し、更に、それぞれ二分割して、その断面に水を吹きかけ、はっ水深さをノギスを用いて測定した。

3.5 吸水試験

供試モルタルを寸法40x40x160mmに成形し、1日湿空、6日水中、7日乾燥養生を行った。養生後、供試モルタル全面に、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤を塗布量400g/m²で塗布し、更に、7日乾燥[20℃, 50%(RH)]養生を行い、供試体を作製した。その後、乾燥機(80℃)中で恒量になるまで乾燥し、水中(20℃)に168時間浸漬して、吸水試験を行い、供試体の吸水率を求めた。

3.6 塩化物イオン浸透深さ試験

供試モルタルを寸法40x40x160mmに成形し、1日湿空、6日水中、7日乾燥養生を行った。養生後、供試モルタルの型枠に接する二側面(40x160mm)に、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤を塗布量400g/m²で塗布し、7日乾燥養生を行い供試体を作製した。乾燥養生後、耐久性付与剤を塗布していない四面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、7日間、2.5%の塩化ナトリウム溶液(20℃)中に浸漬した。その後、供試体を四分割し、その断面に0.1%フルオレセインナトリウム溶液及び0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、蛍光を発する部分を塩化物イオン浸透域として、供試体の塩化物イオン浸透深さをノギスを用いて測定した。

3.7 促進中性化試験

供試モルタルを寸法40x40x160mmに成形し、1日湿空、6日水中、7日乾燥養生を行った。養生後、供試モルタルの型枠に接する二側面(40x160mm)に、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤を塗布量400g/m²で塗布し、7日乾燥養生を行い供試体を作製した。乾燥養生後、耐久性付与剤を塗布していない四面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、14日間促進中性化装置[30℃, 60%(RH), CO₂濃度5.0%]内に静置した。その後、供試体を四分割し、その断面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し、赤色に変化しない部分を中性化域として、供試体の中性化深さをノギスを用いて測定した。

3.8 乾燥収縮試験

供試モルタルを寸法40x40x160mmに成形し、1日湿空養生後脱型して、乳白ガラス取付面を除く五面をエポキシ樹脂塗料でシールした。その後、1日湿空、5日水中、7日乾燥養生を行い、養生後、乳白ガラス取付面に、所定の貯蔵期間を経た耐久性付与剤を塗布量400g/m²で塗布した。耐久性付与剤塗布前を基長とし、以後、乾燥[20℃, 50(RH)]を行い、JIS A 1129(モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法)のコンパレーター法に従って、塗布後の乾燥材齢1,3,5,7,14,28及び42日における供試体の乾燥収縮を測定した。

4. 試験結果及び考察

図-1には耐久性付与剤の粘度と貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤の粘度は、貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

図-2には、モルタル表層部への耐久性付与剤の浸透深さと貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤の貯蔵期間にかかわらず耐久性付与剤のモルタル表層部への浸透深さは1.8-3.2mmである。

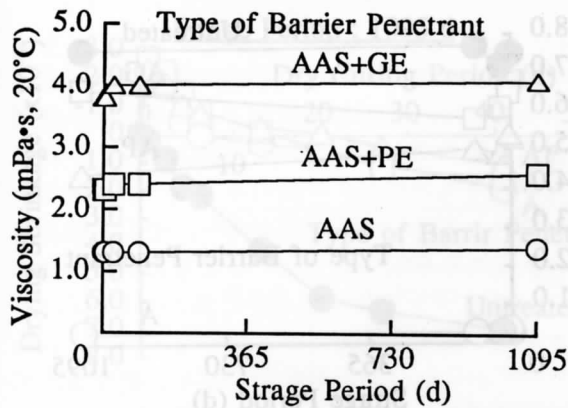


図-1 耐久性付与剤の粘度と貯蔵期間の関係

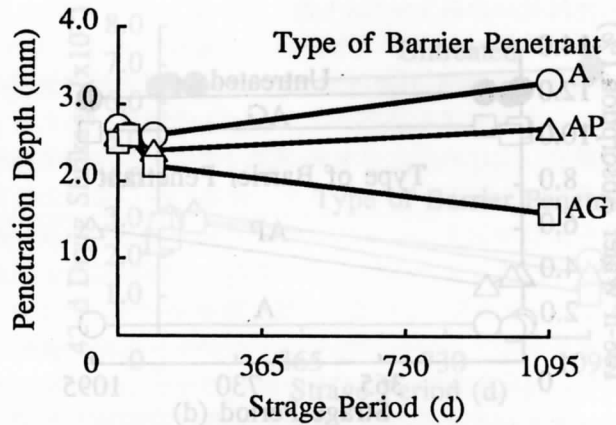


図-2 モルタル表層部への耐久性付与剤の浸透深さと貯蔵期間の関係

図-3には、耐久性付与剤を塗布したモルタルのはっ水深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。貯蔵期間にかかわらず耐久性付与剤を塗布したモルタル断面のはっ水深さは2.0-4.0mmである。耐久性付与剤の浸透深さに比べて、はっ水深さが若干深いのは、浸透深さ測定後7日経た後にはっ水深さを測定しているためと考える。

図-4には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの吸水率と水中浸漬時間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの吸水率は、水中浸漬時間の経過に伴って増大する傾向にあるが、その吸水率は、無塗布のものに比べて小さい傾向にあり、その傾向は、アルキルアルコキシシランを塗布したものにおいて顕著である。

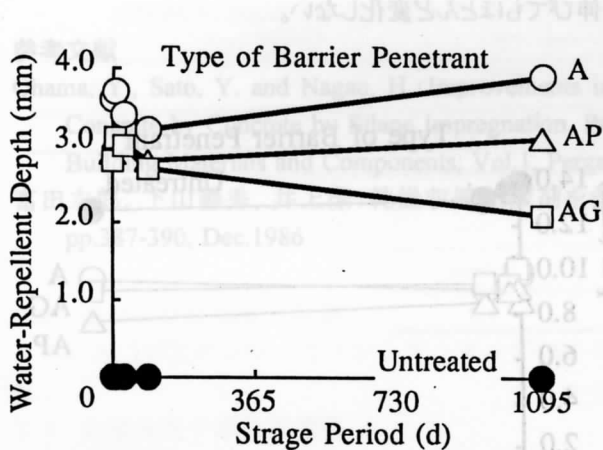


図-3 耐久性付与剤を塗布したモルタルのはっ水深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

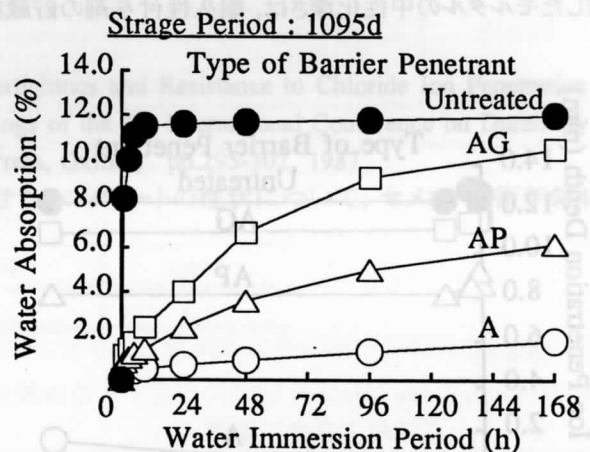


図-4 耐久性付与剤を塗布したモルタルの吸水率と水中浸漬時間の関係

図-5には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの水中浸漬168時間後の吸水率と耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの吸水率は耐久性付与剤の貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

図-6には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの2.5%塩化ナトリウム溶液に7日間浸漬した後の質量変化率と、耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの質量変化率は無塗布のものに比べて小さい傾向にある。又、耐久性付与剤を塗布したモルタルの質量変化率は耐久性付与剤の貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

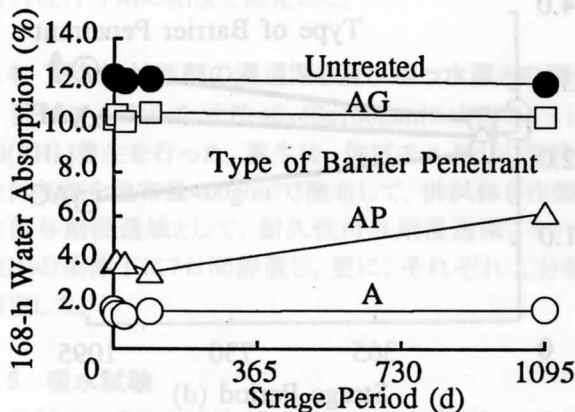


図-5 耐久性付与剤を塗布したモルタルの水中浸漬168時間後の吸水率と耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

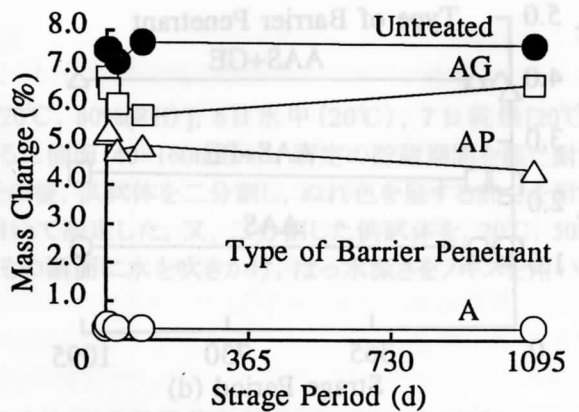


図-6 耐久性付与剤を塗布したモルタルの2.5%塩化ナトリウム溶液に7日間浸漬した後の質量変化率と、耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

図-7には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの塩化物イオン浸透深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの塩化物イオン浸透深さは、無塗布のものそれと比べて浅い傾向にある。又、耐久性付与剤を塗布したモルタルの塩化物イオン浸透深さは、耐久性付与剤の貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

図-8には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの中性化深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの中性化深さは、無塗布のものそれと比べて浅い傾向にある。又、耐久性付与剤を塗布したモルタルの中性化深さは、耐久性付与剤の貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

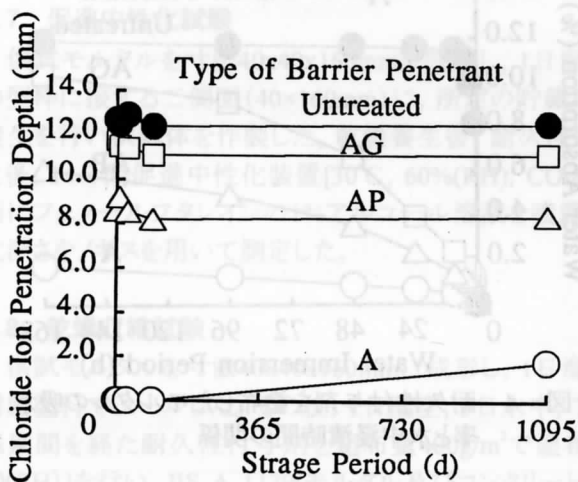


図-7 耐久性付与剤を塗布したモルタルの塩化物イオン浸透深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

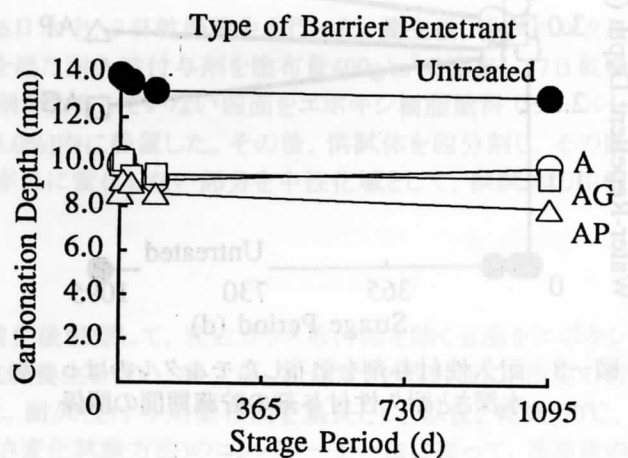


図-8 耐久性付与剤を塗布したモルタルの中性化深さと耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

図-9には、3年間貯蔵した耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥収縮と乾燥養生材齢の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥収縮は、乾燥材齢の経過に伴って増加する傾向にあるが、無塗布のものそれと比較して、著しく小さい。又、図-10には、耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥材齢42日における乾燥収縮と耐

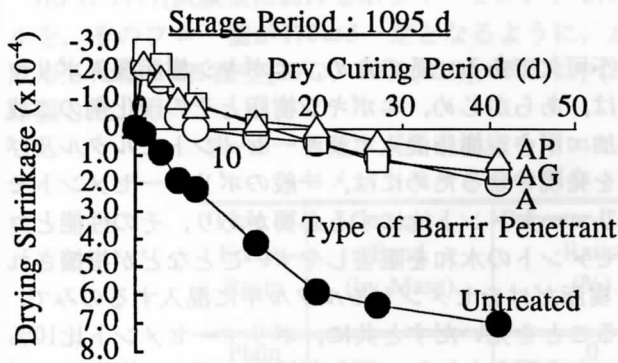


図-9 3年間貯蔵した耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥収縮と乾燥養生材齢の関係

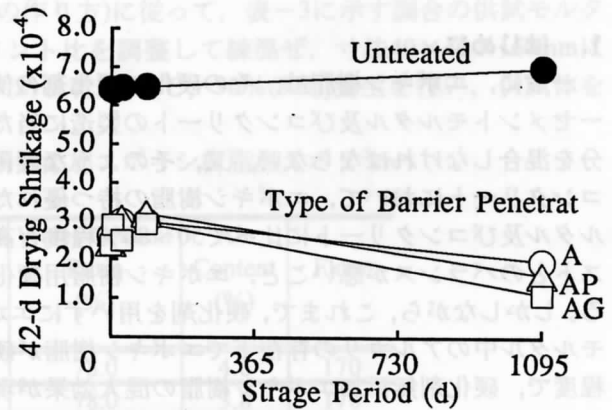


図-10 耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥材齢42日における乾燥収縮と耐久性付与剤の貯蔵期間の関係

耐久性付与剤の貯蔵期間の関係を示す。耐久性付与剤を塗布したモルタルの乾燥収縮は、耐久性付与剤の貯蔵期間が伸びてもほとんど変化しない。

5. まとめ

本研究で調製した耐久性付与剤は、モルタルの防水性、塩化物イオン浸透及び中性化に対する抵抗性を改善すると共に、その乾燥収縮を低減する効果を有し、これらの性能は、3年間の貯蔵後においても維持される。

参考文献

Ohama, Y., Sato, Y. and Nagao, H.: Improvements in Watertightness and Resistance to Chloride Ion Penetration of Concrete by Concrete by Silane Impregnation, Proceedings of the 4th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Vol.1, Pergamon Press, Oxford, pp.295-302, 1987

富田六郎, 下山善秀, 井上潔: 乾燥収縮低減剤を含浸させたコンクリートの性状について, セメント技術年報40, pp.387-390, Dec.1986

5.4 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入モルタルの強さ性状

1. はじめに

一般に、エポキシ樹脂は、その硬化に硬化剤の使用が不可欠である。そのため、エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル及びコンクリートの製造に当たっては、あらかじめ、エポキシ樹脂とその硬化剤の二成分を混合しなければならない。又、そのような硬化剤添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル及びコンクリートにおいて、エポキシ樹脂の持つ優れた性質を発現させるためには、一般のポリマーセメントモルタル及びコンクリートに比べて50~80%程度と高いポリマーセメント比にする必要があり、その性能とコストとのバランスが悪いこと、エポキシ樹脂用硬化剤がセメントの水和を阻害しやすいことなどが指摘される。しかしながら、これまで、硬化剤を用いずにエポキシ樹脂だけをセメントモルタル中に混入するのみで、モルタル中のアルカリの存在下でエポキシ樹脂が硬化することを見いだすと共に、ポリマーセメント比10%程度で、硬化剤無添加エポキシ樹脂の混入効果が現れることを明らかにし、硬化剤添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの有する問題点を解決した硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル及びコンクリートを開発している。

そこで、本研究では、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの強さに及ぼすエポキシ樹脂の種類の影響について検討している。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210(ポルトランドセメント)に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。なお、セメントの物理的性質及び化学成分を表-1に示す。

表-1 普通ポルトランドセメントの物理的性質及び化学成分

Density (g/cm ³)	Blaine's Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3300	2-18	3-12	15.0	25.5	43.3

Chemical Composition (%)		
MgO	SO ₃	ig.loss
1.5	2.0	1.4

2.2 細骨材

細骨材としては、旧JIS R 5201に規定する豊浦標準砂を使用した。

2.3 セメント混和用エポキシ樹脂

セメント混和用エポキシ樹脂としては、表-2に示す6種類のエポキシ樹脂を使用した。なお、EP-Aは、ビスフェノールA型エポキシ樹脂を、EP-FはビスフェノールF型エポキシ樹脂を表している。

表-2 各種エポキシ樹脂の性質

Type of Epoxy Resin	Epoxide Equivalent	Molecular Weight	Hue (Gardner)	Density (g/cm ³)	Viscosity (mPa·s, 20°C)
EP-A1	185-194	380	0.2-0.4	1.17	13100
EP-A2	188-208	376-416	1	1.12	900-1400
EP-A3	180-190	360-380	1	1.1-1.3	1500-2000
EP-A4	185-190	375-380	3	1.13	500-800
EP-F1	160-175	320-350	3	1.20	3000-4500
EP-F2	160-170	320-350	3	1.20	1500-2500

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

JIS A 1171(試験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方)に従って、表-3に示す調合の供試モルタルを、そのフロー値が 170 ± 5 一定となるように、水セメント比を調整して練混ぜ、寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ に成形した後、2日湿空[20°C , 80%(RH)], 5日水中(20°C), 21日乾燥[20°C , 50%(RH)]養生を行い、供試体を作製した。

表-3 各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの調合

Type of Epoxy Resin	Cement : Sand (by Mass)	Polymer-Cement Ratio (%)	Water-Cement Ratio (%)	Air Content (%)	Flow
Plain	1 : 3	0	78.0	4.6	170
EP-A1		5	78.0	3.8	170
		10	78.0	3.8	172
		15	78.0	3.6	173
		20	78.0	2.9	171
		40	78.0	2.6	172
EP-A2		10	74.0	6.8	172
		20	70.0	7.4	168
EP-A3		5	75.0	6.8	165
		10	75.0	7.2	175
		20	74.0	6.2	175
		40	70.0	7.4	174
EP-A4		5	75.0	7.2	165
		10	75.0	6.4	168
		20	74.0	6.4	174
		40	69.0	5.8	175
EP-F1		10	77.0	6.2	173
		20	77.0	5.3	175
EP-F2		10	77.5	7.0	170
		20	73.0	7.4	174

3.2 曲げ及び圧縮強さ試験

JIS A 1172(ポリマーセメントモルタルの強さ試験方法)に従って、供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

3.3 走査型電子顕微鏡観察

供試体を約 $5 \times 5 \times 50\text{mm}$ に切り出し、それをペンチで 10mm 程度の長さに折り、その断面を被観察面として試料を作製した。3%塩酸(HCl)に5時間浸漬し、更に、47%ふっ化水素(HF)に1時間浸漬させてエッチングした。エッチング処理後は、十分に水洗いを行って酸を除いた後、乾燥させた。試料に導電性を与えるために、真空蒸着装置(日立製作所製)にかけ、その断面に金(Au)を蒸着した。その後、走査型電子顕微鏡(日立製作所製)を用いて、試料の断面を被観察面として観察を行い、3000倍の倍率で写真撮影した。

4. 試験結果及び考察

図-1及び図-2には、各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さとポリマーセメント比の関係を示す。エポキシ樹脂の種類にかかわらず、各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さは、ポリマーセメント比10%で最大値に達し、普通セメントモルタル(ポリマーセメント比, 0%)のそれらよりも大きい。しかしながら、硬化剤無添加エポキシ樹脂の混入によるポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さの改

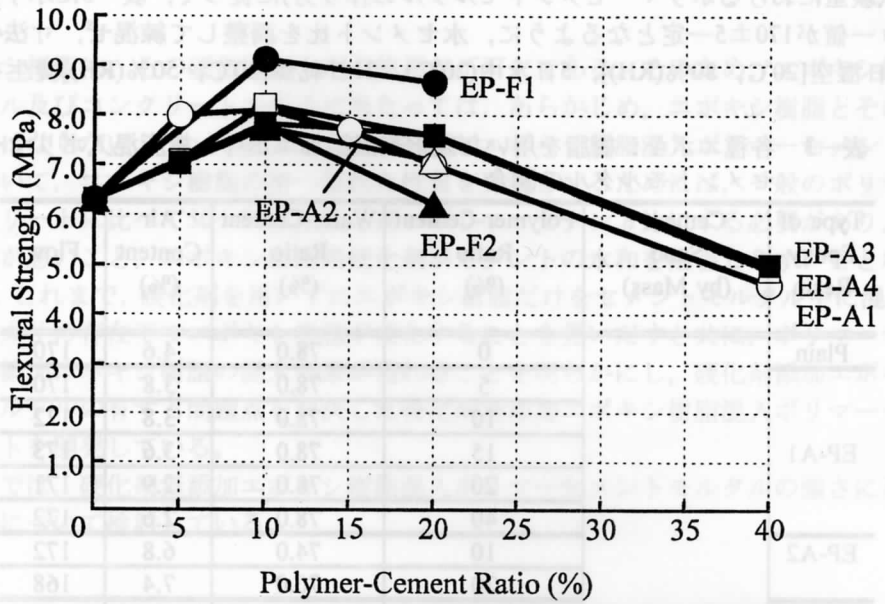


図-1 各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ強さとポリマーセメント比の関係

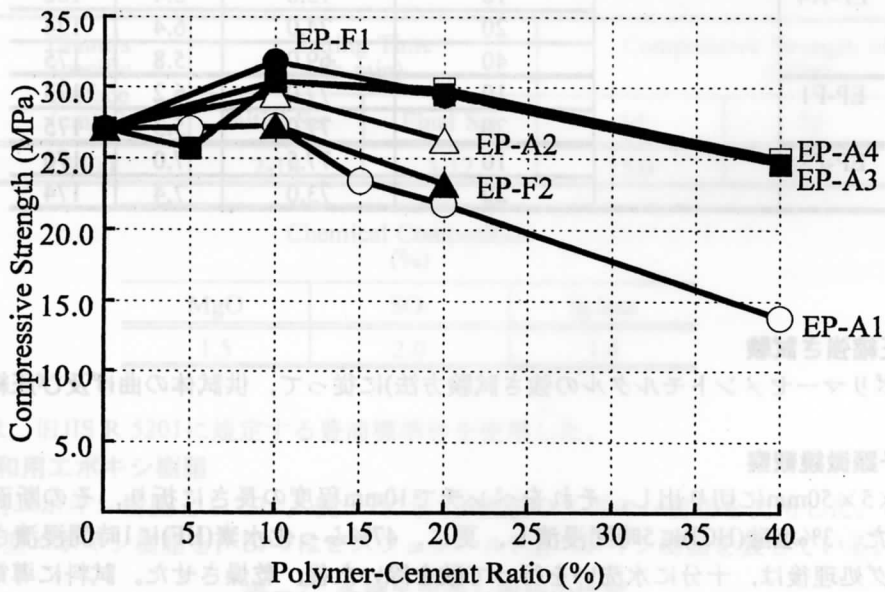


図-2 各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの圧縮強さとポリマーセメント比の関係

善効果は、エポキシ樹脂の種類に影響される。

写真-1には、ポリマーセメント比10%とした硬化剤無添加EP-A1エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中で硬化したエポキシ樹脂の3000倍の走査型電子顕微鏡写真を示す。硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中で、エポキシ樹脂は硬化し連続したフィルム状ポリマー相が形成されているのが観察できる。従って、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中においては、セメント水和物とエポキシ樹脂からなるcomatrix相が形成されるため、その曲げ及び圧縮強さが改善される。しかしながら、ポリマーセメント比10%以上では、ポリマーセメント比の増加に伴い、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さは減少する傾向にある。これは、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中のエポキシ樹脂の硬化度が、ポリマーセメント比の増加に伴い減少するためと推察される [趙 榮國,1995]。

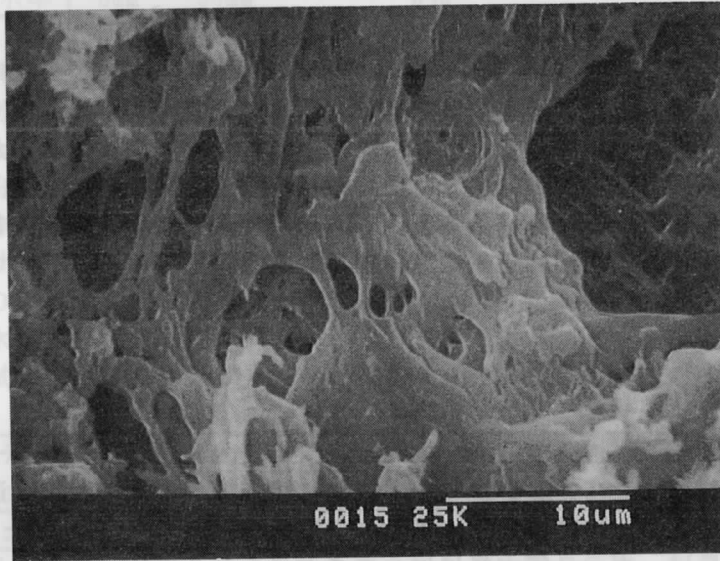


写真-1 ポリマーセメント比10%とした硬化剤無添加EP-A1エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中で硬化したエポキシ樹脂の電子顕微鏡写真(×3000)

5. まとめ

エポキシ樹脂の種類によって若干の差異があるが、各種エポキシ樹脂を用いた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さは、ポリマーセメント比10%で最大値に達し、普通セメントモルタル(ポリマーセメント比, 0%)のそれらよりも大きい。このような強さの改善効果は、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中でのセメント水和物とエポキシ樹脂からなるcomatrix相の形成によるものである。

参考文献

趙 榮國, "硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル及びコンクリートの開発", pp.16-27, 日本大学博士学位論文, Mar.1995

5. 5 カットガラスを用いたカプセル化の基礎実験

1. はじめに

本節では、コンクリート材料に自己診断・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カット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かどうかの基礎的データを得ることを目的に行った実験結果を報告する。即ち、カットガラス管を混入した供試体に破壊直前まで荷重を加えてコンクリートにひび割れを発生させ、カットガラス管に封入した液体がコンクリート表面へ流出する性状を実験的に調べた。更に、水ガラス系補修剤を同様の方法によりコンクリート中に混入することによる補修効果についても検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、以下の2種類の実験を行った。

1) ひび割れ診断実験

コンクリート中に混入したカットガラス管に封入された液剤が、コンクリートのひび割れを通してコンクリート表面に流出することにより、ひび割れを黙視観察できるかを調べる。

2) 自己補修効果確認実験

カットガラス管に水ガラス系補修剤を封入し、破壊直前まで圧縮荷重を繰り返し载荷することにより、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。

3. ひび割れ診断実験

3.1 実験方法

3.1.1 要因と水準

本実験では、コンクリートに混入するカットガラス管の径と長さ、コンクリートへの混入量、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1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。

表1 要因と水準

要因	水準	単位
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: 浸透剤	油A (低粘性油), 油B (高粘性油)	—

3.1.2 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て行った。使用した直交配列表を表2に示す。この表のように決めた1から8の実験を各3体ずつ、全部で32体の供試体を用いて実験を行った。実験によって得られた測定値をもとに分散分析等を行い、統計的に各要因の影響評価を行った。

ここで、要因Aは、表1に示すようにガラス管外径、Bはガラス管長、Cはガラス管混入率、Dは液剤の種類である。また、交互作用としてA×B, A×C, B×Cを取り上げた。尚、各水準の記号は表中に示すとおりである。

表2 実験に使用した直交配列表

実験No.	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の水準	5mm	20mm		5%			油 a
②の水準	3mm	30mm		3%			油 b

3.1.3 使用材料及び供試体配合

本研究で使用した材料は、以下の通りである。

セメント：普通ポルトランドセメント（比重 3.15）

細骨材：岩瀬産粉砕砂／鬼怒川産天然砂＝3／7（比重 2.56, FM 2.29）

粗骨材：岩瀬産碎石 5号／6号＝55／45（比重 2.68, FM 6.79）

浸透材料：油A－サラダオイル（表面張力 32.0dyn/cm, 粘度 44.8 MPa・s, 比重 0.9）

油B－DTEオイル（表面張力 36.0dyn/cm, 粘度 468 MPa・s, 比重 0.91）

混和剤：AE減水剤及びAE助剤

また、表3に、供試体に用いるコンクリートの配合を示す。

表3 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (g/m ³)	AE助剤 (g/m ³)
				W	C	S	G		
20	8±2	30	40.1	156	520	646	1010	2210	260

3.1.4 カットガラス管への浸透剤封入方法

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、浸透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、浸透剤を封入した。

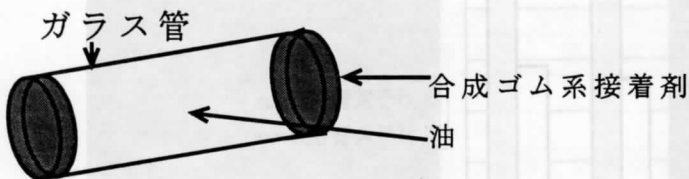


図1 浸透剤封入方法



図2 ガラス管混入供試体

3.1.5 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浸透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2参照）。尚、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、2週間水中養生をした後実験に使用した。

3.1.6 測定項目

本実験では、カットガラス管を混入したことによる、コンクリートの圧縮強度への影響を見るために、圧縮試験を行った。更に、ひび割れ部の目視観察として、圧縮試験後の供試体に発生したひび割れから浸透剤が流出する様子を観察し、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浸透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、最大荷重に達した直後に徐荷した。

3.2 結果と考察

圧縮試験結果を図3に示す。また図4には、ガラス管を混入しないコンクリートの圧縮強度との比を示している。これらの図より、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いという傾向が得られた。

尚、図4に示されている様に、ガラス管を混入したものの一部が、無混入より強度が高くなる結果を示している。これは、ガラス管を混入していないものの強度にばらつきが見られたためであり、全体として、ガラス管を混入すると強度が低下する傾向を示した。

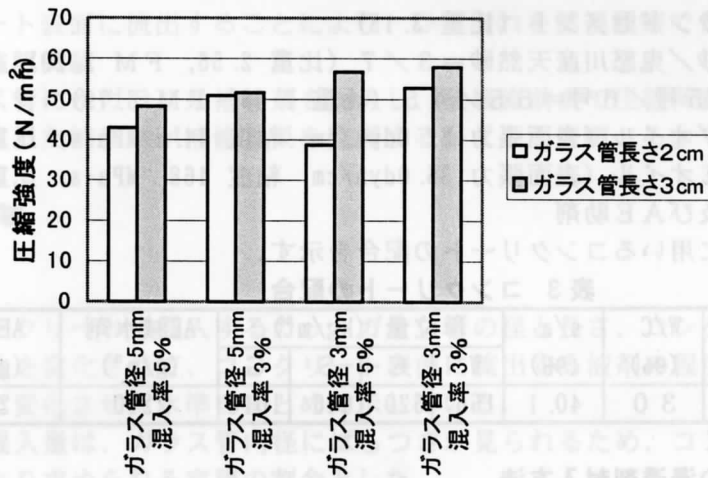


図3 圧縮強度試験結果

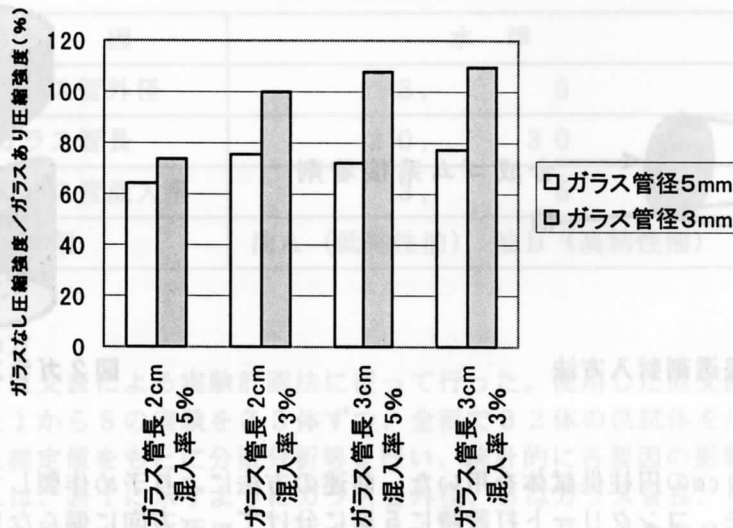
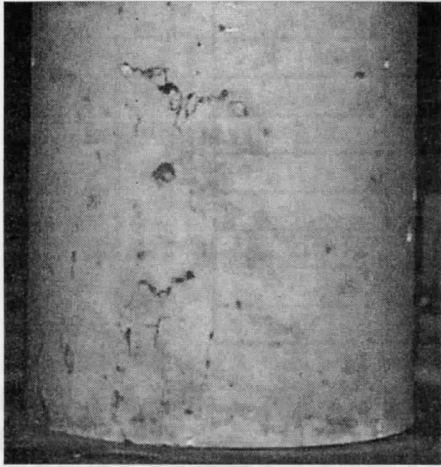


図4 ガラス管の有無による圧縮強度の影響

次に、写真1には、圧縮強度試験直後の供試体と、その後放置して供試体表面のひび割れより浸透剤の流出を確認した状況の比較を示している。実験1から8までの全ての供試体で、この写真と同様に油の流出が確認された。このことにより、液体を封入したガラス管を混入することで、コンクリートにひび割れの自己診断機能を付加させることが可能であると確認できた。

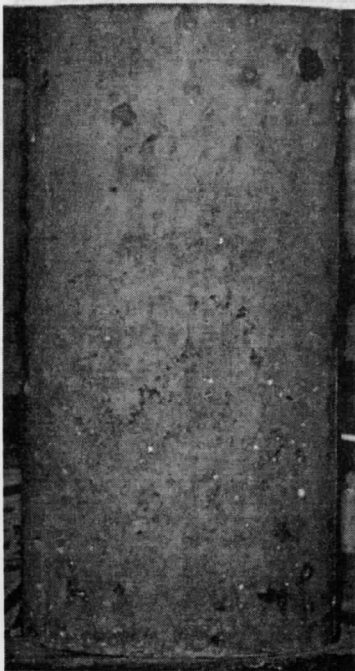


a) 破壊直後

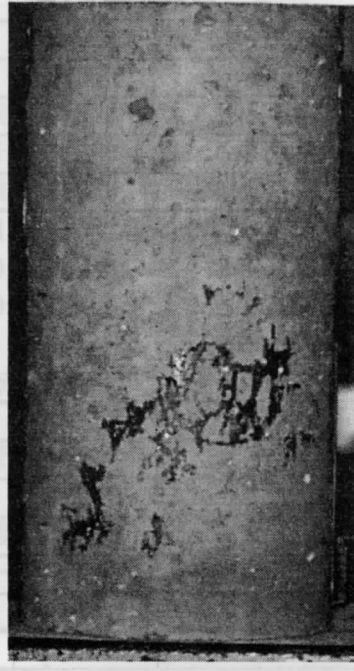


b) 4時間経過後

(実験番号4-3供試体)



c) 破壊直後



d) 24時間経過後

(実験番号5-3供試体)

写真1 ひび割れ観察の例

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時間後に流出面積を測定した。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4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、各実験の平均を、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。

表4 分散分析に用いた実験結果

実験番号	強度比	流出面積	流出時間
1	0.64	117.2	1
2	0.76	26.0	3
3	0.72	48.5	5
4	0.77	59.5	1
5	0.74	23.2	3
6	1.00	23.4	1
7	1.08	59.5	1
8	1.10	16.2	10

次に、表4の結果を基に、強度比、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5、6、7に示す。これらの表には、分散分析の結果有意と判定された要因と、その推定値を注記として示している。

表5 分散分析表（強度比）

要因	平方和	自由度	分散	F0	危険確率
A	0.133	1	0.133	23.21*	0.017
B	0.035	1	0.035	6.14	0.089
C	0.025	1	0.025	4.43	0.126
AB	0.015	1	0.015	2.68	0.200
誤差	0.017	3	0.006		
計	0.225	7			

注) 要因A (ガラス管径) が危険率5%で有意
 ガラス管径5mmの推定値 0.722 信頼区間 下限 0.602 上限 0.843
 ガラス管径3mmの推定値 0.980 信頼区間 下限 0.860 上限 1.100

表6 分散分析表（流出面積）

要因	平方和	自由度	分散	F0	危険確率
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
AB	518.5	1	518.5	2.55	0.209
誤差	610.1	3	203.3		
計	7755.6	7			

注) 要因A (ガラス管径)、要因D (含浸剤) が危険率5%で有意
 ガラス管径5mmの場合の推定値 62.805 信頼区間 下限 40.113 上限 85.496
 ガラス管径3mmの場合の推定値 30.575 信頼区間 下限 7.885 上限 53.267
 油Aの場合の推定値 64.902 信頼区間 下限 42.210 上限 87.593
 油Bの場合の推定値 28.478 信頼区間 下限 7.883 上限 53.267

表7 分散分析表（流出時間）

要因	平方和	自由度	分散	F0	危険確率
A	3.12	1	3.12	1.00	0.391
B	10.12	1	10.12	3.24	0.170
D	36.12	1	36.12	11.56*	0.042
AC	10.12	1	10.12	3.24	0.170
誤差	9.37	3	3.12		
計	68.87	7			

注) 要因D (含浸剤) が危険率5%で有意

油Aの場合の推定値 1.000 信頼区間 下限 -1.813 上限 3.813

油Bの場合の推定値 5.250 信頼区間 下限 2.437 上限 8.063

上記の分散分析結果により、強度に影響を与えるガラス管の要因は、ガラス管外径のみが危険率5%で有意となり、ガラス管長さや混入率については有意差は示されなかった。ガラス管外径が5mmの場合ガラス管を混入しない物の72%、3mmの場合98%の圧縮強度が得られると推定された。また、流出面積に影響を与える要因は、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%で有意であった。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、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、つまり液体の量が多いほど流出面積も大きくなる。

これら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、ひび割れの確認のためには液体の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。

4. 自己補修効果確認実験

4.1 実験方法

本実験では、一液性の補修剤を、前述のひび割れ診断実験と同様にガラス管に封入してコンクリート供試体に混入した。この供試体に荷重を加え圧縮強度を測定した。尚、この圧縮試験においても、破壊に至る直前に徐荷した。その後、常温で14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。

4.1.1 使用材料と供試体

使用材料は、3.1.3に示したものと同様である。ただし、浸透剤として、油の代わりに水ガラス系補修剤を水で50%希釈したものを使用した。供試体寸法とコンクリートの配合も3.1.3と同様のものとした。

表8には、補修剤封入のために使用したカットガラス管の水準と作製した供試体数を示している。

表8 ガラス管の水準と供試体数

ガラス管水準	作製本数
ガラス管なし	6本
管径5mm、長さ3cm、混入率5%	4本
管径3mm、長さ2cm、混入率5%	4本

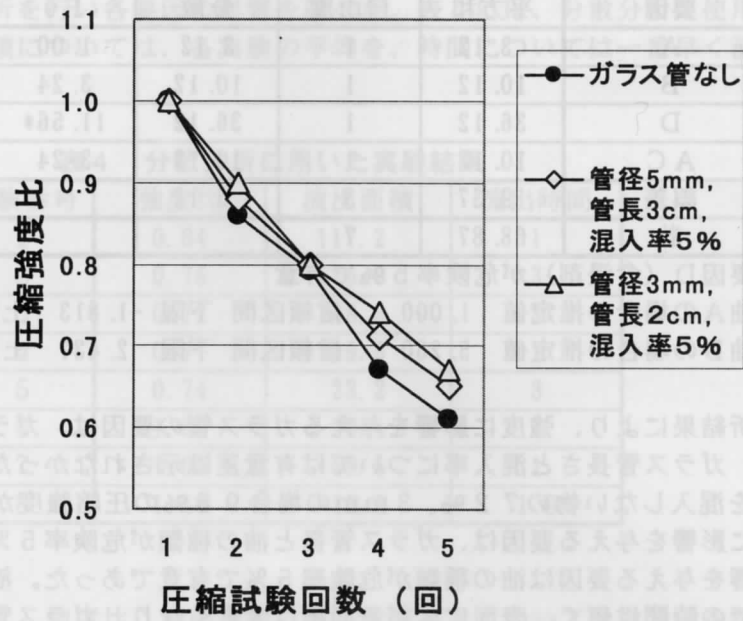


図5 圧縮試験回数と圧縮強度比の関係



補修剤無し

圧縮強度比 0.56



補修剤有り

(ガラス管径5mm, 長さ3cm, 混入率5%)

圧縮強度比 0.73

写真2 供試体表面のひび割れ状況 (圧縮試験 5回目)

4.2 結果と考察

実験結果として、図5に圧縮強度比の変化過程を各圧縮試験回数ごとに示している。この圧縮強度比は、1回目の圧縮強度と2回目以降の圧縮強度の比をとり、供試体の種類ごとの平均値として求められたものである。この結果より、圧縮試験3回目以降は、ガラス管を混入しなかった供試体に比べ、ガラス管を混入した供試体の方が圧縮強度比が高くなる傾向を示し、強度の低下が小さいことを表している。3種類の供試体の差が小さいので断定はできないが、補修効果が現れていると思われる。

また、圧縮強度については、ガラス管外径3mmを使用した供試体の方が高い値を示しており、ひび割れ診断実験と同様の傾向を得た。また、ひび割れからの液体の流出は確認できないものが多く、確認できたものについてもすぐに乾いてしまい見えなくなった。

更に、写真2には、補修剤を混入していないコンクリートと補修剤を混入しているものとのひび割れ状況を示している。補修剤混入のない供試体に表面剥離が多く観察された。また、供試体内部のまだ割れていないカットガラス管を取り出して見たところ、液剤は封入されたままになっており、打ち込みや養生過程での流出はないことが確認できた。

これらの結果より、補修液や封入方法をより効果的なものに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ている。

5. 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り、ひび割れ診断及び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、ひび割れの発生を目視により観察できることが示された。また、封入する液剤を、補修剤とすることで、強度低下を抑制できる可能性が示された。

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。

試料	ひび割れ	液剤	補修剤
①	あり	あり	あり
②	あり	あり	なし
③	あり	なし	あり
④	あり	なし	なし

5.6 人工軽量骨材を用いたカプセル化の基礎実験

1. はじめに

5.1においてインテリジェント化の手法の1つとして、マイクロカプセルを用いた実験を行った。本節では、このマイクロカプセルという「殻」を人工軽量骨材に置き換え、その可能性について考察する。

2. 人工軽量骨材への補修剤含浸

本節で用いる人工軽量骨材とは、内部に大きな空隙が存在し、 $\rho=0.52$ (絶乾)、粒径は10~15mmの骨材である。特に本項では、粘度が異なる2種類の補修剤(表1)を用意し、実際に補修剤の含浸を試みる。

2.1 実験概要

図1のように真空器を用い、一度器具内を真空にした後、補修剤を人工軽量骨材に流し込む。このことにより、一度真空にされた人工軽量骨材中の空隙に補修剤が含浸されるはずである。この一連のプロセスを想定し実験を行う。補修剤含浸量、また含浸後の人工軽量骨材からの補修剤流出量は補修剤の粘度により大きく異なることが予想される。よって、表1に示した粘度の大きい補修剤A(エポキシ系樹脂)と、粘度が小さくセメント系材料と反応しガラス質の析出物を生成する性質を持つ補修剤Bとで比較する。

人工軽量骨材の使用量は50gとし、含浸直後骨材表面についている補修剤をふき取り、重量を測定する。その後は恒温室内で保管し、補修剤が人工軽量骨材から流出するかどうかを確認する。また比較方法としては補修剤の含浸量を重量比で表し、人工軽量骨材中の補修剤の割合を比較検討する。

2.2 実験結果及び考察

実験結果を表2に示す。

補修剤Aと補修剤Bとでは、人工軽量骨材への含浸量に大きな差が認められる。これは補修剤の粘度の差により生じた結果であると予想できる。よってある程度の粘度を有する補修剤であれば、人工軽量骨材への含浸が可能であるといえる。しかし、現段階ではその含浸量は十分であるとは言えない。また、骨材の破壊と同時に補修剤が吹き出すという状態までは至っていない。今後はひび割れを補修するのに十分な量の補修剤を含浸させ、その補修剤を人工軽量骨材の破壊と同時に吹き出すという性質を持たせられるような技術が必要であろう。

さらには時間の経過と共に、人工軽量骨材表面に補修剤の流出が確認できた。確かにその量は微量ではあったが、インテリジェント化の一手法としてこれを用いるためには、数年後にも内部の補修剤が健全なまま存在していなければならない。よって、補修剤含浸後、人工軽量骨材の表面をコーティングし、補修剤がひび割れ発生前に流出するのを防ぐ必要がある。

表1 補修剤の性質

	比重	粘度(mPas,20℃)
補修剤A	1.20	3000~4500
補修剤B	1.20	水と同等

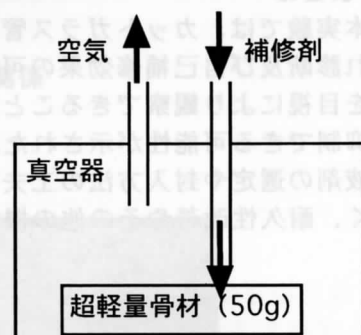


図1 実験方法

表2 補修剤の含浸量

補修剤	A (高粘性)		B (低粘性)		A		B	
	直後		1		24			
経過時間 [h]	直後		1		24			
重量 [g]	73.0	56.4	72.9	56.2	72.9	56.0		
含浸補修剤量 [g]	23.0	6.4	22.9	6.2	22.9	6.0		
補修剤重量比 [%]	31.5	11.3	31.4	11.0	31.4	10.7		

3. 補修剤を含浸させた人工軽量骨材の埋設

ここでは2.で作製した、補修剤を含浸させた人工軽量骨材を実際に埋設する。また補修剤Bは含浸量がそれほど期待できないという2.の結果より、特に補修剤Aを用いて実験を行う。

3.1 実験概要

圧縮試験体は $5\phi \times 10[\text{cm}]$ の円柱状、曲げ試験体は $4 \times 4 \times 16[\text{cm}]$ の直方体のものとする。

使用材料を表3、調合表を表4に示す。但し、調合表中の骨材とは補修剤含浸前の人工軽量骨材を指す。練り混ぜには容量6ℓのオムニミキサーを使用し、粉体のみで空練りを1分、その後水、減水剤を入れて3分、そして繊維を混入して1分、最後に骨材を入れて2分とする。打設後24時間まで養生室（20℃／相対湿度100%）において静置し脱型。所定の期間水中養生を施す。

また曲げ試験前にはコンクリートカッターで1cmのノッチを入れる。

比較のためのシリーズは、圧縮試験、曲げ試験それぞれ水中養生期間を1週間施したもの（DC5 ϕ 1、DC1）と4週間施したもの（DC5 ϕ 4、DC4）を用意する（表5）。

表3 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント ($\rho=3.14$)
混和材	シリカフューム ($\rho=2.20$ 、平均粒径:0.15 μm)
混和剤	ナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤 ($\rho=1.20$ /空気非連行性)
繊維	ポリプロピレン繊維 ($\rho=0.91$ 、 $\phi=0.018 \times 12\text{mm}$)
骨材	人工軽量粗骨材 ($\rho=0.52$ (絶乾)、粒径:10-15mm)
補修剤	エポキシ樹脂 ($\rho=1.20$ 、粘度:3000-4500(mPas,20℃))

表4 調合表

W/(C+SF)	SF/(C+SF)	Va	Vf	減水剤
40 [wt.%]	10 [wt.%]	35 [vol.%]	2 [vol.%]	2 [wt.%]

但し、W：水、SF：シリカフューム、Va：骨材体積、Vf：繊維混入率である。

表5 供試体シリーズ

養生期間	1週	4週
圧縮試験用供試体	DC5 ϕ 1	DC5 ϕ 4
曲げ試験用供試体	DC1	DC4

3.2 実験結果及び考察

本項では補修剤を含浸させた人工軽量骨材の埋設を実験的に行うことを目的としているため、強度に関する結果は表記しない。

2.において補修剤の人工軽量骨材からの流出を指摘した。本項において実際に埋設した場合でも、このことが確認できた。図2のように試験体表面に斑点が見える。これは練り混ぜ時に攪拌されることによって補修剤が流出した証拠であろう。

また、曲げ試験を行い試験体を破壊した時の破壊面を図3に示す。先に述べたように、補修剤は人工軽量骨材の表面に流出している。このことにより骨材の表面に膜が形成される。これが原因で骨材が破壊される前に、骨材とマトリクスとの間に剥離破壊が起こったことがこの図から確認できる。補修剤はセメント水合物と反応する性質を持つが、本項では硬化剤を用いず実験を行ったため反応が促進されず、液体のまま骨材表面に存在していたためと考えられる。このことがDC1の方に顕著に見られる。DC4においては、養生期間を4週施してある分、流出した補修剤がある程度固化し、DC1ほど顕著ではなかったと考えられる。しかし骨材とマトリクスが完全に一体であるとは言い切れない。人工軽量骨材からの補修剤の放出がある程度確認できたが、骨材とマトリクスが完全に一体になっていなければ、骨材から破壊し、補修剤が放出されるといふインテリジェント機能は十分に機能しない。一方、圧縮試験についてはDC5 ϕ 1、DC5 ϕ 4共に、骨材が破壊し補修剤が放出されたことが確認できた。確かに骨材とマトリクスの境界面が欠点になっているものの、骨材は強度が低いため破壊されたと考えられる。今後、実際に補修剤が放出されたことで、破壊部分を確実に補修するかどうかを確認する必要がある。

4. まとめ

以上のように人工軽量骨材を用いたカプセル化には、様々な問題点を残している。確実にインテリジェン

ト機能がはたらくようにするには、補修に十分な量の補修剤の含浸、補修剤の健全なまでの保存、骨材とマトリクスとの一体化が今後の課題として挙げられる。

図2 圧縮試験体表面

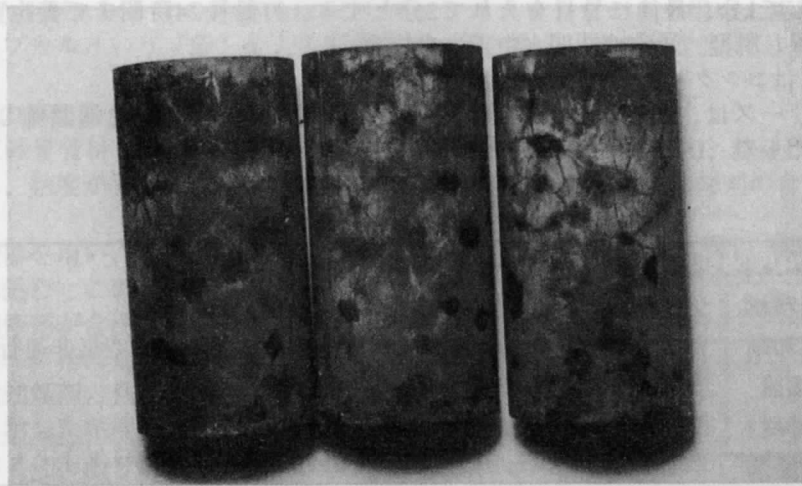


図3(a) DC1の破壊面

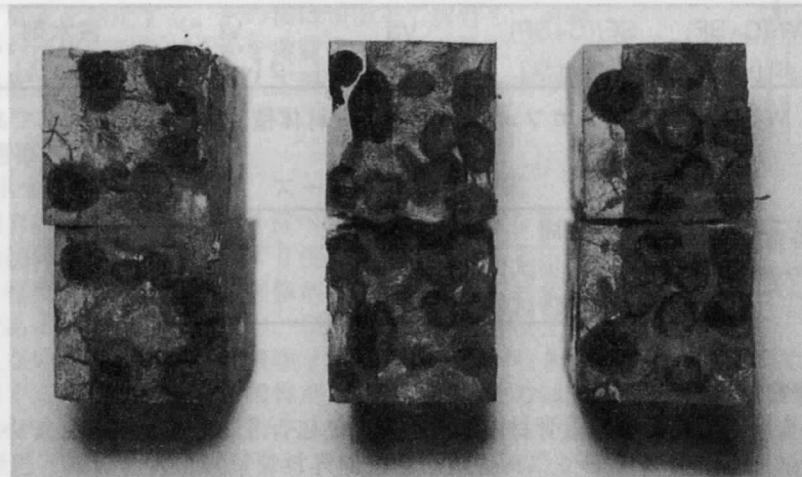
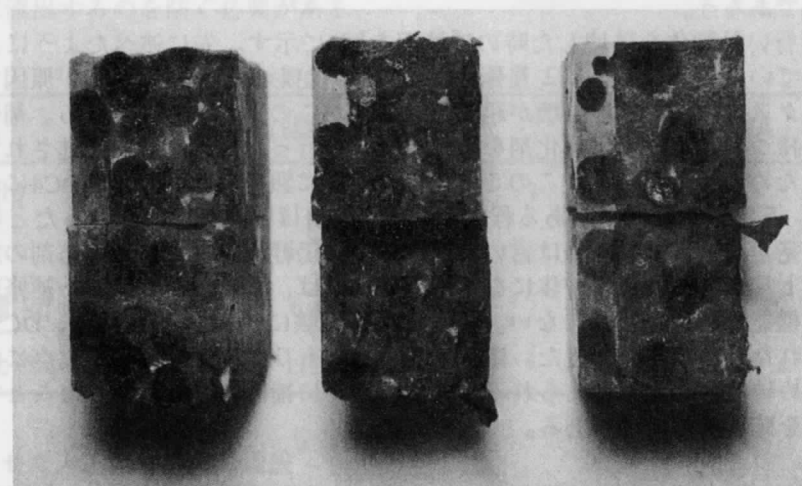


図3(b) DC4の破壊面



圧縮圧 (MPa, 20°C)
3000 (4500)
水と同様



5.7 機能性カプセルの作製

1. はじめに

コンクリート構造物が通常の状態においてはコンクリート補修剤を安定に保ち、ひび割れが発生した時点で初めて補修剤を放出してコンクリートを自己修復するインテリジェントコンクリートの試作にあたって、コンクリート補修剤をカプセルする検討を実施した。

すなわち、カプセル壁膜によってコンクリート補修剤を外部環境から安定に保ち、ひび割れによる外力でカプセル壁膜が破壊され補修剤が放出されてコンクリートを補修する。

コンクリートに自己修復の機能を付加することがカプセル作製の目的である。

2. 実験

2.1 使用材料

(1) コンクリート補修剤

コンクリート補修剤としては、水ガラス系補修剤及びエポキシ樹脂を使用した。なお、エポキシ樹脂はアミン等の硬化剤を配合しなくともコンクリート中で硬化することに着目し、エポキシ樹脂本剤のみ、具体的にはビスフェノールA型エポキシ樹脂（エポキシ等量184～194）を使用した。

(2) カプセル材

カプセルのタイプとしては、コンクリート構造物の強度低下を招くことが少ないよう、小さなサイズのものに着目し、薬に使用されているゼラチンハードカプセル及びマイクロカプセルの2種類を検討した。

2.2 カプセルの作製

2.2.1 ゼラチンハードカプセルを用いた水ガラス系補修剤封入カプセルの作製

(1) 未コーティングカプセルへの封入

#00, #0, #1の3種類のサイズの日本薬局方ゼラチンハードカプセルに水ガラス系補修剤の原液を封入した。

水ガラス系補修材封入カプセルを常温下に保存したところ、2週間でカプセルが変形、破壊した。この水ガラス系補修剤はアルカリ水溶液であり、ゼラチンの耐アルカリ水性不良が原因であると考えられる。

(2) エポキシ樹脂コーティングカプセルへの封入

上述の結果より、ゼラチンカプセルの耐アルカリ水性を向上させるために、カプセルの内外面にエポキシ樹脂をコーティングする方法でカプセルの処理を行った。カプセルを分解して、溶剤系エポキシ樹脂塗料に2～3分間浸漬して、取り出し、常温下に7日間放置した。更に、60℃の恒温槽中に2時間放置して、エポキシ樹脂塗料を十分に硬化させた。

エポキシ樹脂で表面処理したカプセルに水ガラス系補修剤を封入し、常温下に保存した。その結果、カプセルのアルカリ水溶液に対する安定性は、未処理のものと比較して相当に向上したが、2箇月でカプセルの変形、収縮が生じたため、約70日目で保存を中止した。

(3) シリケート系コーティング剤で処理したカプセルへの封入

エポキシ樹脂塗料に変えて、無機系コーティング剤としてシリケート系コーティング剤（ヒートレスガラス）を用いてカプセルの内外面をコーティングし、同様のカプセルを作製したが、約1箇月でカプセルの変形、破壊が生じた。

2.2.2 マイクロカプセルを用いたエポキシ樹脂封入カプセルの作製

(1) エポキシ樹脂封入カプセル

マイクロカプセルを使用する場合、コンクリート構造物にクラックが生じた時にカプセルが破壊されるようにするためには、カプセルの粒径をある程度大きくし、外力に対して破壊されやすくする必要があると考えた。そこで、マイクロカプセル化手法として比較的大きな粒径でカプセルが得られる

コアセルベーション法を適用して、エポキシ樹脂をカプセル化した。得られたカプセルの平均粒径は約100 μm であった。なお、カプセル化に用いた壁膜材はゼラチンである。

(2) エポキシ樹脂封入カプセルのコーティング

カプセルの耐水性向上を目的に、コーティング剤として、瞬間接着剤として知られている α -シアノアクリレートを使用した。カプセルを水中に分散し、 α -シアノアクリレートの反応をコントロールしながら滴下して、カプセル表面で α -シアノアクリレートを重合しコーティングした。コーティングしたエポキシ樹脂封入カプセルのSEM(走査型電子顕微鏡)像を写真-1に示す。

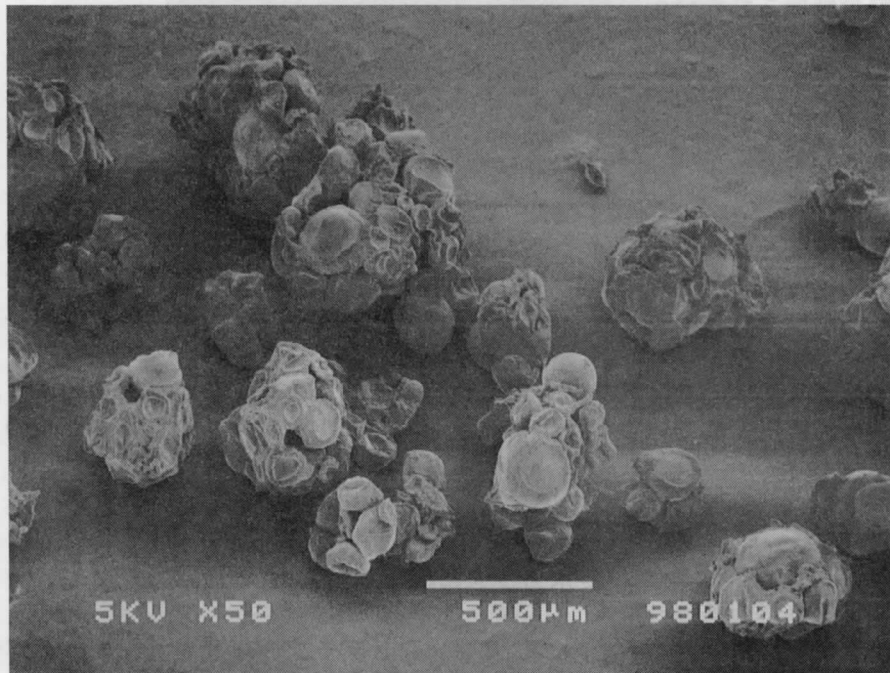


写真-1 コーティング処理したエポキシ樹脂封入カプセルのSEM像

3. エポキシ樹脂封入カプセルのセメントモルタルへの混入実験

セメント：砂=1:2(質量比)及び水セメント比65%とし、エポキシ樹脂封入カプセル中のエポキシ樹脂量がセメント質量に対して5,10及び20%となるようにエポキシ樹脂封入カプセルを混入したセメントモルタルを調製した。その結果、コーティング処理を施さないエポキシ樹脂封入カプセルを混入した場合には、カプセル混入量が5%であっても、セメントモルタルのワーカビリティが不良となり、その硬化も著しく遅延した。これは、カプセルの壁膜がゼラチンであるため吸水性が高く、その一部が練混ぜ水に溶解して、セメントの水和反応に影響を及ぼしたためと考えられる。

一方、コーティング処理したエポキシ樹脂封入カプセルを混入した場合には、その混入率が5%であれば、セメントモルタルのワーカビリティ及び硬化にはほとんど影響を及ぼさない。このことから、 α -シアノアクリレートによる処理は、マイクロカプセルのゼラチン壁膜の耐水性改善に効果があるものとする。しかしながら、10%以上の混入率では、セメントモルタルの硬化不良が認められた。

4. まとめ

ゼラチンハードカプセルを用いた水ガラス系補修剤封入カプセルは、それ自体の保存安定性が不良であり、セメントモルタルに配合するまでには至らなかった。又、エポキシ樹脂封入マイクロカプセルについては、 α -シアノアクリレートによる処理は、マイクロカプセルのゼラチン壁膜の耐水性改善に効果があるが、セメントモルタルへの配合量が制限され、自己修復効果を確認することはできなかった。

しかしながら、今後、適切な材質、また適切なサイズのカプセルが作製できれば本手法の可能性が検証できると考える。

6. インテリジェントコンクリートの試作

6.1 自己止水コンクリート

1 はじめに

一口にコンクリートのインテリジェント化といっても対象とする機能は様々存在する。そしてこれらを一括に実現するのは困難である。ここでは、特にひび割れを発生したコンクリートからの漏水を自動的に防ぐ自己止水コンクリートの開発を目的とした各種実験について述べる。

2 インテリジェント化の手法

ここではガラス管を用いてコンクリートのインテリジェント化を図る。つまり、コンクリートにひび割れが生じるとガラス管が破断し、ガラス管を通っている補修剤が破断部から流れ、クラックに補修剤を浸透させて塞ぐというプロセスを想定している(図1)。

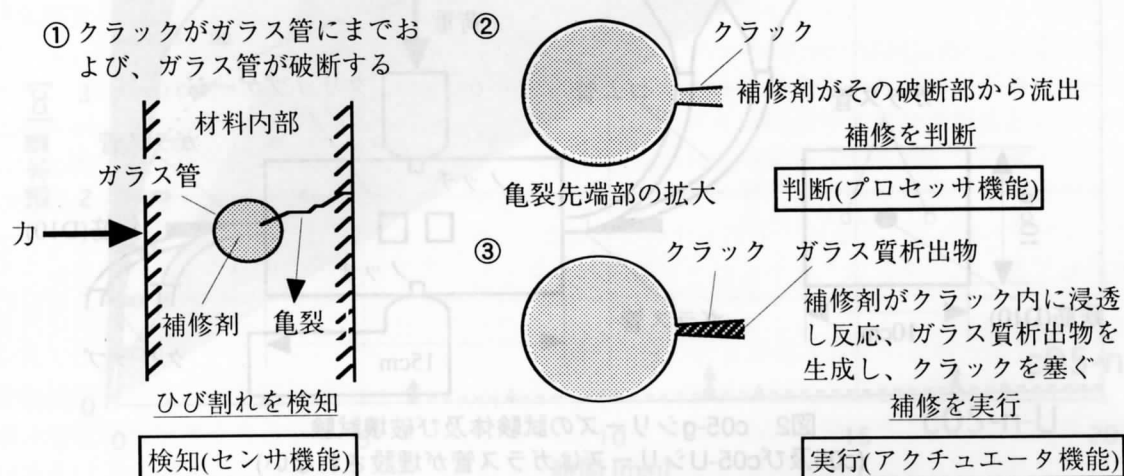


図1 本節でのインテリジェント化の手法の概念

ガラス管を使用することの利点は、ひび割れという損傷に対し敏感に反応すること、補修剤を未反応のまま比較的少量に保存できることにある。但し、ここで用いる補修剤は粘性が低くクラック幅が大きくなると、ひび割れを塞ぐために放出されているはずの補修剤がひび割れの補修をする前に外部に流れ出てしまうことが考えられる。そのため補強繊維を混入するなどして、クラック幅を微細な範囲で制御することによって補修剤がより有効に機能することが求められる。

これらは重要な点である。コンクリート中のひび割れをいち早く検知しなければ、補修を実行する前にクラック幅が補修の効かないほど大きくなってしまったり、人間の手による非破壊検査がそれよりも早く損傷を発見したのであったら、このコンクリートはインテリジェンスが微塵もないことになる。また、補修剤が流れ出すのはひび割れが発生したときである。そのひび割れが発生するのが数年または数十年先であったとしても、そのコンクリートの持つインテリジェンスが発揮されなければならない。よって補修剤がひび割れ発生時に既に反応済みで、クラックに流れ出さないということはあってはならない。更には、ひび割れを完全に充填するためには補修剤の量が十分になければならない。これらのことより、ひび割れに敏感に反応できること、健在なままで補修剤を十分に収容できることが必要不可欠となる。

3. 実験概要

2.のインテリジェント化の手法の有用性を確かめるために、表1に示すシリーズで一連の実験を行う。破壊試験の有無と補修剤の表面塗布の有無によりその補修の程度を比較する。

使用材料はセメントに早強ポルトランドセメント($\rho=3.13$)、混和材にシリカフューム($\rho=2.2$)、混和剤にナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤($\rho=1.20$ /空気非連行性)、骨材に宮城県阿武隈川産川砂($\rho=2.54$ (表乾))とする。また補強材としてポリプロピレン繊維($\rho=0.91, l=12\text{mm}$)、異形鉄筋(D10)を用いる。調合は、W/B=40%、SF/B=10%、繊維混入率は0.5%とした。但し、W:水、SF:シリカフューム、B:粉体を示す。

試験体の作製方法は、練り混ぜにオムニミキサーを使用し、空練り1分、その後に水・減水剤を加え3分、更に、繊維を加え1分、骨材を加え2分とした。養生方法は打設してから24時間後に脱型、蒸気養生(昇温速度 10°C/h , 80°C で5時間保持の後自然冷却)を行った。後に恒温室にて材令3日まで静置し、破壊試験及び止水

処理を行う。そして補修剤の養生のため3日間恒温室で静置した後透水試験を行う。また試験体の形状及び破壊試験方法を図2に、透水試験方法を図3に、c05-gシリーズの静置方法を図4に各々示す。

表1 各試験体の破壊試験と補修剤表面塗布の有無(有:○,無:-)

series	破壊試験	表面塗布
c05-U	○	○
c05	○	-
c05-n-U	-	○
c05-n	-	-
c05-g	○	ガラス管からの放出

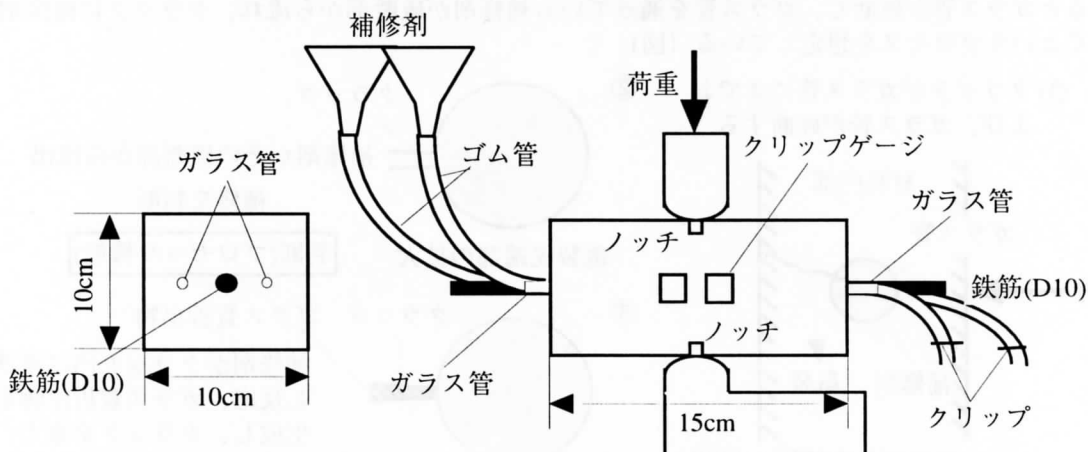


図2 c05-gシリーズの試験体及び破壊試験
(c05及びc05-Uシリーズはガラス管が埋設されない)

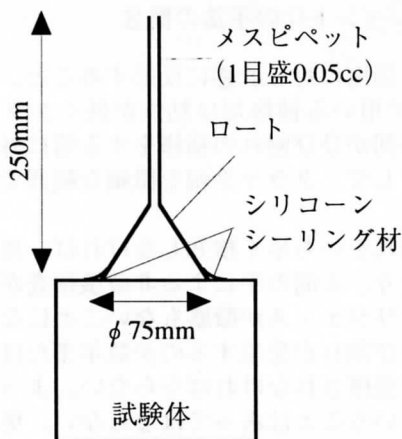


図3 透水試験方法

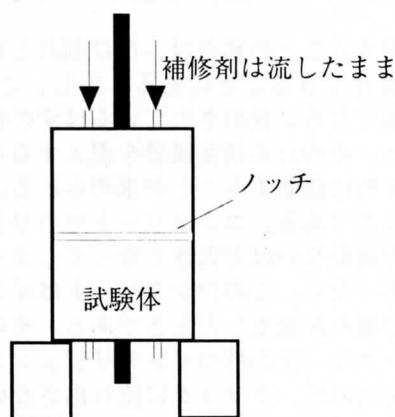


図4 c05-gシリーズの静置方法

4. 実験結果及び考察

図5に全シリーズの時間と透水量の関係を示す。各シリーズ毎で比較すると、割裂試験を行った中で、c05シリーズとc05-Uシリーズとでは大きな差がないのに対し、c05-gシリーズが他のシリーズと比べ単位時間に対する透水量が少ないことを確認できる。すなわち、試験体にガラス管を埋設することにより止水機能の自己回復が可能となったと見て良いだろう。

しかしながら、割裂破壊試験によって発生した残留CMOD（割裂破壊試験除荷後試験体に残った開口変位）にはある程度の幅があり、それにより透水時間の差が生じたと考えられる。図6に残留CMODと透水試験の関係を示す。

まずc05とc05-Uを比較する。すると、グラフからも明らかのように傾きの方法が逆であることに気付

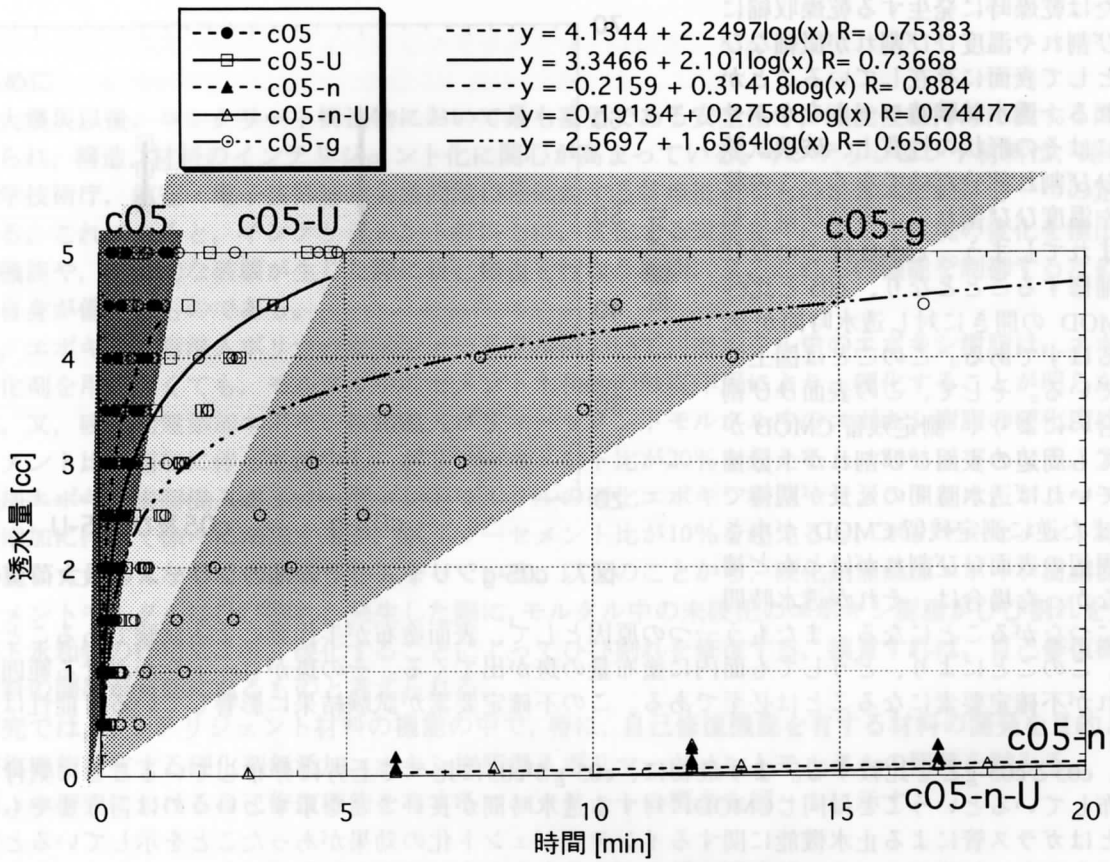


図5 各試験体の時間と透水量の関係

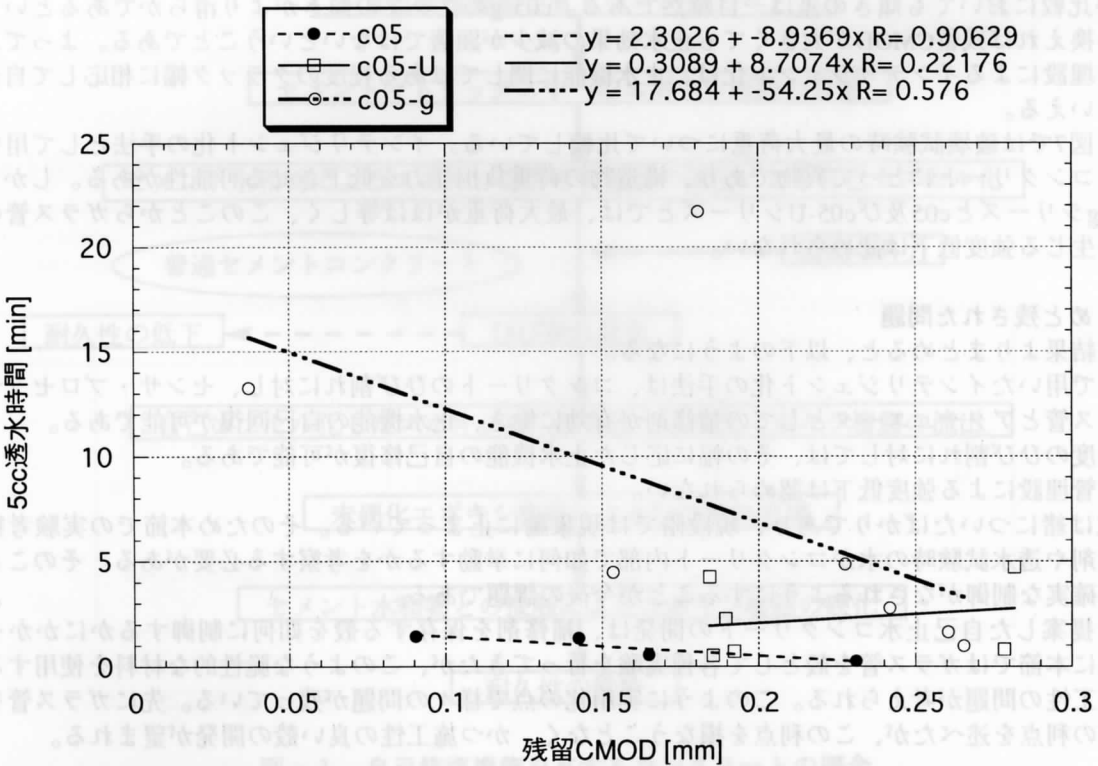


図6 各シリーズの残留CMODと透水時間の関係

く。この原因として、コンクリートの養生時または乾燥時に発生する乾燥収縮によるひび割れや温度ひび割れが微細なひび割れとして表面に存在していることが挙げられる。透水試験時ロートをかぶせる範囲にはその形状の性質上、破壊試験によるひび割れ部分だけでなく、この乾燥収縮や温度ひび割れによるひび割れ部分も含まれてしまう。c05-Uはこのひび割れも補修することとなり、c05と比べ残留CMODの開きに対し透水時間が大きくなるはずである。このことは図上でも表れている。そして、この表面ひび割れの度合いにより、測定残留CMODが大きくても周辺の表面ひび割れが十分補修されていれば透水時間の延長が期待できる。また逆に測定残留CMODが小さくても周辺の表面ひび割れがほとんど補修されなかった場合は、それが透水時間の短縮につながることになる。またもう一つの原因として、表面塗布が手作業による試験であることが挙げられる。このことにより、どうしても面内に塗布量の斑が出てくる。その斑がロートをかぶせる範囲内であればそれが不確定要素になることは必至である。この不確定要素が試験結果に影響している可能性は否定できない。

次に、c05とc05-gとを比較する。まず最初に、c05-gがc05に比べて上方に分布していることに気付く。上方に分布しているということは同じCMODに対する透水時間が長いことを示すというのは言うまでもない。このことはガラス管による止水機能に関するインテリジェント化の効果があつたことを示しているといっても良いであろう。勿論グラフ上の散布図の散らばり具合からも、確実な制御ができていないとはいえない。だが、シリーズの傾向として論じるとすれば明らかに止水機能の自己回復がなされたといえるであろう。更に、この比較においても傾きの差は一目瞭然である。c05-gのグラフの傾きがより滑らかであるということは、言い換えれば残留CMODが大きくても止水効果の減少が顕著ではないということである。よって、このガラス管埋設によるインテリジェント化は、止水機能に関してはある程度のクラック幅に相応して自己修復をするといえる。

また、図7では破壊試験時の最大荷重について比較している。インテリジェント化の手法として用いたガラス管はコンクリートにとって異物であり、構造物の荷重負担能力を低下させる可能性がある。しかしながら、c05-gシリーズとc05及びc05-Uシリーズとでは、最大荷重がほぼ等しく、このことからガラス管の埋設によって生じる強度低下は認められない。

5. まとめと残された問題

以上の結果よりまとめると、以下ようになる。

- ①本研究で用いたインテリジェント化の手法は、コンクリートのひび割れに対し、センサ・プロセッサとしてのガラス管とアクチュエータとしての補修剤が有効に働き、止水機能の自己回復が可能である。
- ②ある程度のひび割れに対しては、その幅に応じた止水機能の自己修復が可能である。
- ③ガラス管埋設による強度低下は認められない。

本研究は緒についたばかりであり、現段階では現象論に止まっている。そのため本節での実験考察に加え、補修剤や透水試験時の水がコンクリート内部で如何に挙動するかを考察する必要がある。そのことにより、より確実な制御がなされるようにすることが今後の課題である。

本節で提案した自己止水コンクリートの開発は、補修剤を保存する殻を如何に制御するかにかかっている。特に本節ではガラス管を殻として各種実験を行ってきたが、このような脆性的な材料を使用するに当たり、施工性の問題が考えられる。このように実用化の点で様々の問題が残っている。先にガラス管を使用することの利点を述べたが、この利点を損なうことなく、かつ施工性の良い殻の開発が望まれる。

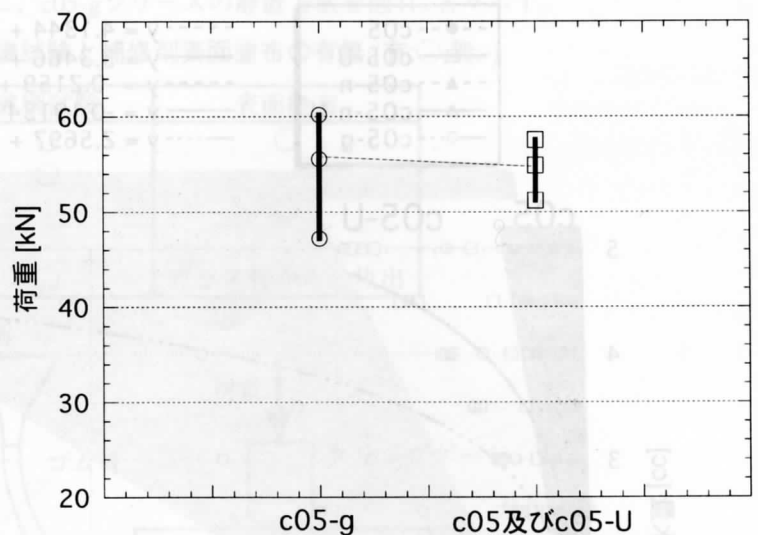


図7 c05-gシリーズとその他のシリーズの最大荷重の比較

6.2 自己カプセル化による自己修復コンクリート

1. はじめに

阪神大震災以後、コンクリート構造物において最も重要である安全性や、機能性維持等に関する問題が取り上げられ、構造、材料のインテリジェント化に関心が高まっている。インテリジェント材料は、昭和62年7月の科学技術庁、航空・電子技術審議会諮問第13号に対する答申によるものが日本における一つの定義とされている。これによると、インテリジェント材料とは、変化する環境条件に応じて環境の変化を検出する自己診断機能や、部分的な破壊が生じた際に自己修復を行なう機能、又、これらの機能を制御するための機能を材料自身が備えたものである。

一方、エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいて、モルタル中のエポキシ樹脂は、エポキシ樹脂用硬化剤を用いなくても、モルタル中のセメント水和物の触媒作用により、硬化することが明らかとされている。又、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中のエポキシ樹脂の硬化度は、ポリマーセメント比の増加に伴って減少し、ポリマーセメント比が20%を超えると、50%以下となる。又、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの硬化エポキシ樹脂-セメント比は、ポリマーセメント比の増加に伴って徐々に増加するが、ポリマーセメント比が10%を超えると、ポリマーセメント比との差異が、著しく大きくなることが明らかになっている。以上のことから、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにひび割れが発生した際に、モルタル中の未硬化のエポキシ樹脂がひび割れを充填し、セメント水和物の作用により、硬化することによってひび割れを修復する、換言すれば、自己修復機能を有する材料の開発が可能になるものと考えられる。

本研究では、インテリジェント材料の機能の中で、特に、自己修復機能を有する材料の開発を目的として、自己修復機能を有する硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの開発を試みる。

なお、本研究における自己修復機能を有するコンクリートの概念を図-1に示す。

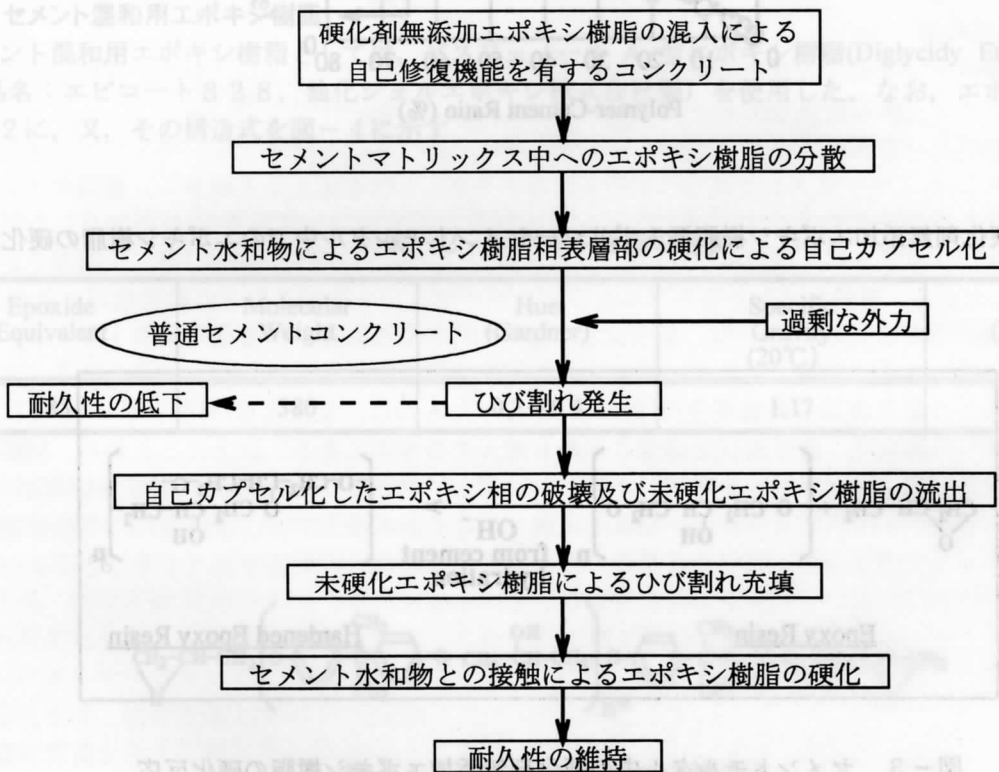


図-1 自己修復機能を有するコンクリートの概念

2. 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの自己修復機能の検討

2.1 概説

前述したように、エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいて、モルタル中のエポキシ樹脂は、エポキシ樹脂用硬化剤を用いなくても硬化し、その硬化度は、ポリマーセメント比20%を超えると、50%以下となることが明らかになっている。図-2には、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中のエポキシ樹脂の硬化度を、図-3には、エポキシ樹脂のセメントマトリックス中での硬化反応を示す[趙 榮國,1995]。このことより、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにひび割れが生じた際に、モルタル中の未硬化のエポキシ樹脂が、セメント水和物との相互作用により硬化することにより、自己修復を行うことが可能であると考えられる。

本章では、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルに強制的にひび割れを発生させ、更に乾燥養生を行った後に、曲げ及び圧縮強さ試験を行い、その自己修復機能について検討する。

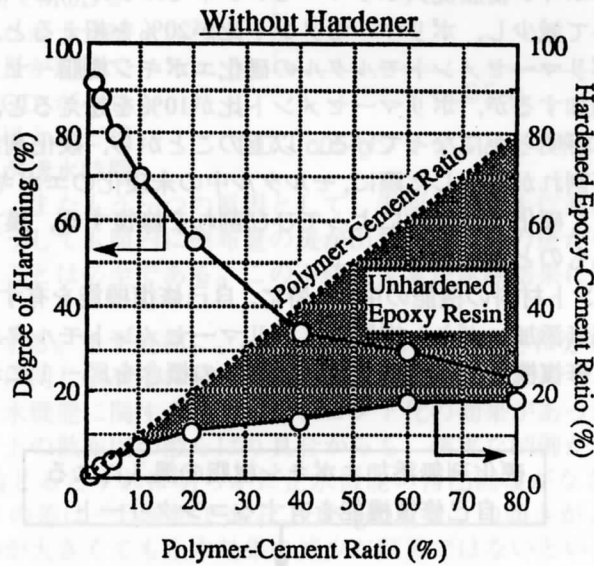


図-2 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル中でのエポキシ樹脂の硬化度

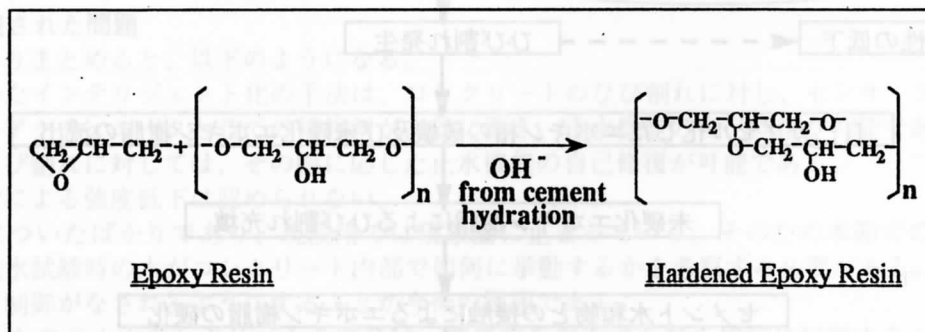


図-3 セメントモルタル中の硬化剤無添加エポキシ樹脂の硬化反応

2.2 使用材料

2.2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210(ポルトランドセメント)に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。なお、セメントの物理的性質及び化学成分を表-1に示す。

表-1 セメントの物理的性質及び化学成分

Density (g/cm ³)	Blaine's Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3300	2-18	3-12	15.0	25.5	43.3

Chemical Composition
(%)

MgO	SO ₃	ig.loss
1.5	2.0	1.4

2.2.2 細骨材

細骨材としては、旧JIS R 5201に規定する豊浦標準砂を使用した。

2.2.3 セメント混和用エポキシ樹脂

セメント混和用エポキシ樹脂としては、ビスフェノール A 型エポキシ樹脂(Diglycidyl Ether of Bisphenol A)(商品名:エピコート 828, 油化シェルエポキシ株式会社製)を使用した。なお、エポキシ樹脂の性質を表-2に、又、その構造式を図-4に示す

表-2 エポキシ樹脂の性質

Epoxide Equivalent	Molecular Weight	Hue (Gardner)	Specific Gravity (20°C)	Viscosity (mPa.s, 20°C)
185	380	0.2-0.4	1.17	13100

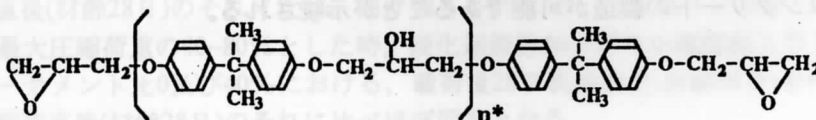


図-4 エポキシ樹脂の化学構造式

2.3 試験方法

2.3.1 供試体の作製

JIS A 1171(試験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方)に従って、表-3に示す調合の供試モルタルを、そのフロー値が 170 ± 5 となるように、水セメント比を調整して練混ぜ、寸法 $40 \times 40 \times 160$ mmに成形した後、2日湿空[$20^\circ\text{C}, 80\%(\text{RH})$]、5日水中(20°C)、21日乾燥[$20^\circ\text{C}, 50\%(\text{RH})$]養生を行って、供試体を作製した。

表-3 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの調合

Cement:Sand (By Mass)	Polymer-Cement Ratio (%)	Water-Cement Ratio (%)	Flow
1 : 3	0	78	172
	10		172
	40		175
	60		174
	80		173

2.3.2 曲げ及び圧縮強さ試験

(1) 未載荷供試体の曲げ及び圧縮強さ試験

乾燥養生後の供試体について、乾燥養生を0及び28日間継続して行い、各材齢において、JIS A 1172(ポリマーセメントモルタルの強さ試験方法)に従って、曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

(2) 供試体への載荷及びその後の曲げ及び圧縮強さ試験

乾燥養生後の供試体の長手方向に、その最大圧縮荷重の40,60及び80%を載荷した後、更に、乾燥養生を0及び28日間継続して行い、各材齢において、JIS A 1172に従って、供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

2.4 試験結果及び考察

図-5には、載荷及び未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さとポリマーセメント比の関係を示す。

硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さは、ポリマーセメント比の増加に伴って増大し、ポリマーセメント比10%で最大に達するが、10%を超えると減少し、普通セメントモルタルのそれを下まわる傾向にある。ポリマーセメント比10%の載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の供試体の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれと比べ、曲げ強さが約0.7倍、圧縮強さがほぼ同等となる。しかしながら、普通セメントモルタル及びポリマーセメント比40%以上の載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれに比べ、普通セメントモルタル及びポリマーセメント比40%ではほぼ同等、ポリマーセメント比60及び80%でそれぞれ約1.3~1.4倍となる。又、ポリマーセメント比60%の載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行ったものは、載荷直後(材齢28日)のものに比べ、最大圧縮荷重の80%の載荷で、曲げ及び圧縮強さが最も増大する傾向にある。以上のことから、材齢28日において最大圧縮荷重の40、60及び80%を載荷した後においても、曲げ及び圧縮強さが増加する傾向にあり、これは、載荷時に未硬化エポキシ樹脂がひび割れを充填し、その後の養生中に、ひび割れの自己修復が行われることによるものと推察される。このことより、硬化剤無添加エポキシ樹脂を混入することによって、自己修復機能を備えるコンクリートの製造が可能であることが示唆される。

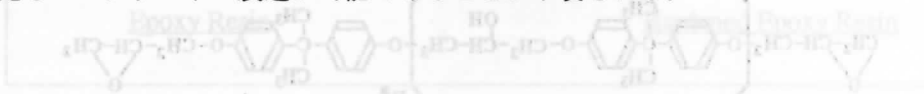


図-5 エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さとポリマーセメント比の関係

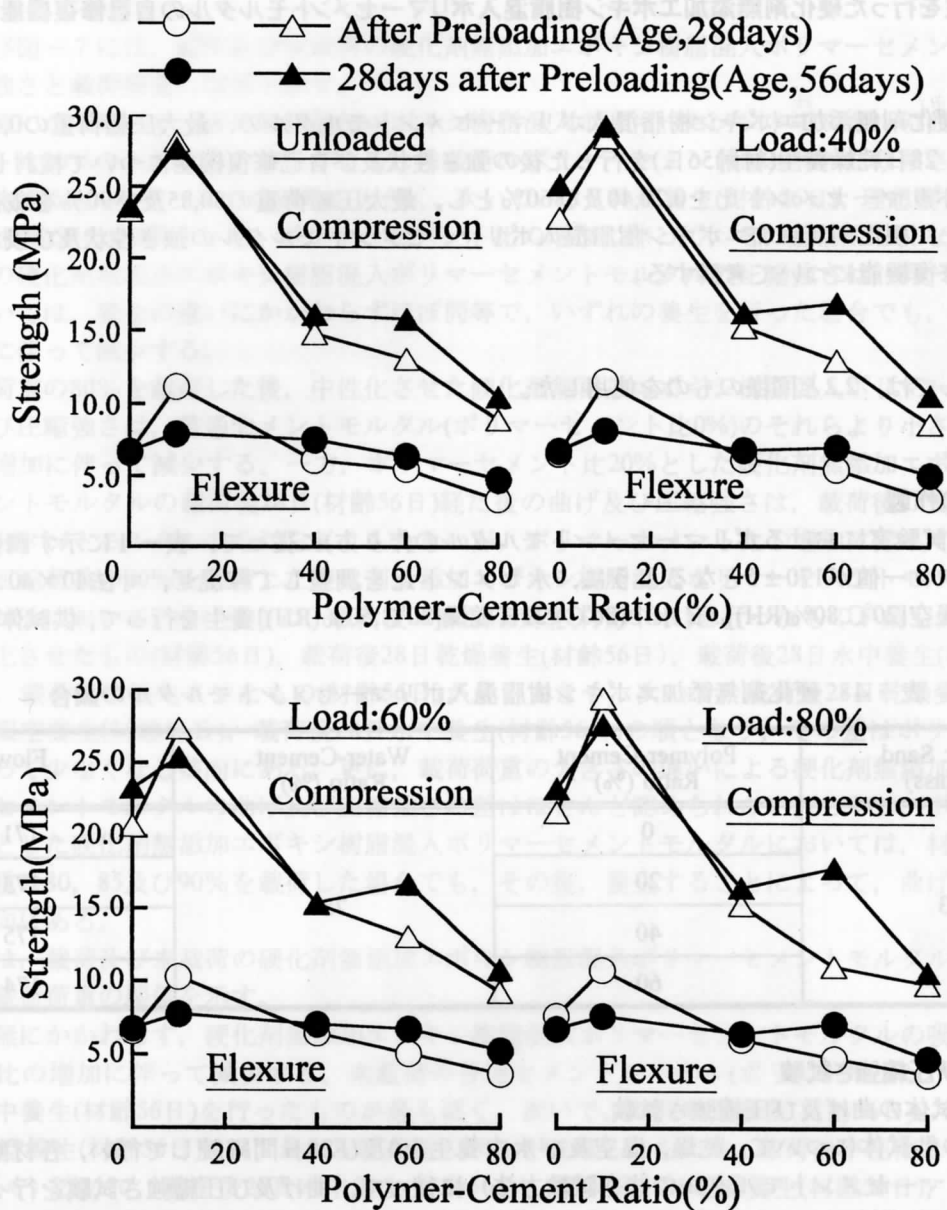


図-5 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さとポリマーセメント比の関係

2.5 結語

以上の試験結果を要約すれば、次の通りである。

- (1) 載荷荷重を最大圧縮荷重の40~80%とした時、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比10%における、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれに比べ、曲げ強さが約0.7倍、圧縮強さがほぼ同等となる。
- (2) 載荷荷重を最大圧縮荷重の40~80%とした時、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比0及び40%における、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれに比べほぼ同等となる。
- (3) 載荷荷重を最大圧縮荷重の40~80%とした時、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比60及び80%における、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれに比べ約1.3~1.4倍となる。このことより、硬化剤無添加エポキシ樹脂を混入することによって、自己修復機能を備えるコンクリートの製造が可能であることが示唆される。

3. 異なる養生を行った硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの自己修復機能の検討

3.1 概説

前項では、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの、最大圧縮荷重の0,40,60及び80%を載荷した後、28日乾燥養生(材齢56日)を行った後の強さ性状及び自己修復機能について検討した。

ここでは、ポリマーセメント比を0,20,40及び60%とし、最大圧縮荷重の80,85及び90%を載荷した後、異なる養生を行い、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの強さ性状及び吸水率を検討して、その自己修復機能について考察する。

3.2 使用材料

使用材料としては、2.2と同様のものを使用した。

3.3 試験方法

3.3.1 供試体の作製

JIS A 1171(試験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方)に従って、表-4に示す調合の供試モルタルを、そのフロー値が 170 ± 5 となるように、水セメント比を調整して練混ぜ、寸法 $40 \times 40 \times 160$ mmに成形した後、2日湿空[20°C ,80%(RH)],5日水中(20°C),21日乾燥[20°C ,50%(RH)]養生を行って、供試体を作製した。

表-4 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの調合

Cement : Sand (By Mass)	Polymer-Cement Ratio (%)	Water-Cement Ratio (%)	Flow
1 : 3	0	78	171
	20		173
	40		175
	60		174

3.3.2 曲げ及び圧縮強さ試験

(1) 未載荷供試体の曲げ及び圧縮強さ試験

乾燥養生後の供試体について、乾燥、湿空及び水中養生を0及び28日間継続して行い、各材齢において、JIS A 1172(ポリマーセメントモルタルの強さ試験方法)に従って、曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

(2) 供試体への載荷及びその後の曲げ及び圧縮強さ試験

乾燥養生後の供試体の長手方向に、その最大圧縮荷重の80,85及び90%を載荷し、載荷荷重80%のものについては乾燥、湿空及び水中養生並びに、促進中性化[30°C ,60(RH), CO_2 濃度5.0%]を、載荷荷重85及び90%のものについては乾燥養生を28日継続して行った後、JIS A 1172に従って、供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

3.3.3 吸水試験

JIS A 6203(セメント混和用ポリマーディスパーション及び再乳化形粉末樹脂)に従って、曲げ強さ試験後の供試体折片を、 20°C の水中に浸漬し、水中浸漬時間1,3,5,9,12,24及び48時間において供試体の質量を測定し、次式により吸水率を求めた。

$$\text{吸水率 (\%)} = [(W_t - W_o) / W_o] \times 100$$

ここに、 W_o : 水中浸漬前の供試体の質量 (g)

W_t : 各水中浸漬時間における供試体の質量 (g)

3.4 試験結果及び考察

図-6及び図-7には、載荷及び未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さと載荷荷重の関係を示す。

載荷の有無にかかわらず、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは、ポリマーセメント比20%のものが最大値を与える。未載荷のポリマーセメント比20%の曲げ強さにおいては、28日湿空養生(材齢56日)を行ったものが最も大きく、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、28日水中養生(材齢56日)の順となり、ポリマーセメント比の増加に伴って、その差は少なくなる傾向にある。又、未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの圧縮強さは、同一のポリマーセメント比においては、養生の違いにかかわらずほぼ同等で、いずれの養生を行った場合でも、ポリマーセメント比の増加に伴って減少する。

最大圧縮荷重の80%を載荷した後、中性化させた硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さは、普通セメントモルタル(ポリマーセメント比0%)のそれらより小さく、ポリマーセメント比の増加に伴って減少する。一方、ポリマーセメント比20%とした硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの載荷後28日(材齢56日)経た後の曲げ及び圧縮強さは、載荷後の養生方法にかかわらず、普通セメントモルタルのそれらよりも大きい、ポリマーセメント比の増加に伴って減少する傾向にある。最大圧縮荷重の80%を載荷した硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比20%において、曲げ強さは、載荷後28日湿空養生(材齢56日)を行ったものが最も大きく、次いで、載荷後中性化させたもの(材齢56日)、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日水中養生(材齢56日)、又、圧縮強さは、載荷後中性化させたもの(材齢56日)が最も大きく、次いで、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日湿空養生(材齢56日)、載荷後28日水中養生(材齢56日)の順となり、その差はポリマーセメント比の増加に伴って少なくなる傾向にある。更に、載荷荷重の大きさの違いによる硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さの差はほとんど認められない。しかし、ポリマーセメント比40%以上とした硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいては、材齢28日において最大圧縮荷重の80、85及び90%を載荷した場合でも、その後、養生することによって、曲げ及び圧縮強さが増加する傾向にある。

図-8には、載荷及び未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水48時間後の吸水率と載荷荷重の関係を示す。

載荷の有無にかかわらず、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水率は、ポリマーセメント比の増加に伴って減少する。未載荷の普通セメントモルタル(ポリマーセメント比0%)の吸水率は、28日水中養生(材齢56日)を行ったものが最も低く、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、28日湿空養生(材齢56日)、又、最大圧縮荷重の80%を載荷したものは、載荷後中性化させたもの(材齢56日)が最も低く、次いで、載荷後28日水中養生(材齢56日)、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日湿空養生(材齢56日)の順となる。又、未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比20%以上における吸水率は、一部を除いては、28日水中養生(材齢56日)を行ったものが最も低く、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、28日湿空養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、又、最大圧縮荷重の80%を載荷したものは、載荷後28日水中養生(材齢56日)を行ったものが最も低く、次いで、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日湿空養生(材齢56日)、載荷後中性化させたもの(材齢56日)の順となる。更に、載荷後の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水率は、未載荷のものに比べ、ほぼ同等か又は小さく、載荷荷重が増大すると減少する傾向にある。なお、ポリマーセメント比40%以上とした硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいては、材齢28日において最大圧縮荷重の80、85及び90%を載荷した場合でも、その後、養生をすることによって、吸水率が減少する傾向にある。又、それらの吸水率は、材齢28日における吸水率よりも小さい傾向にある。

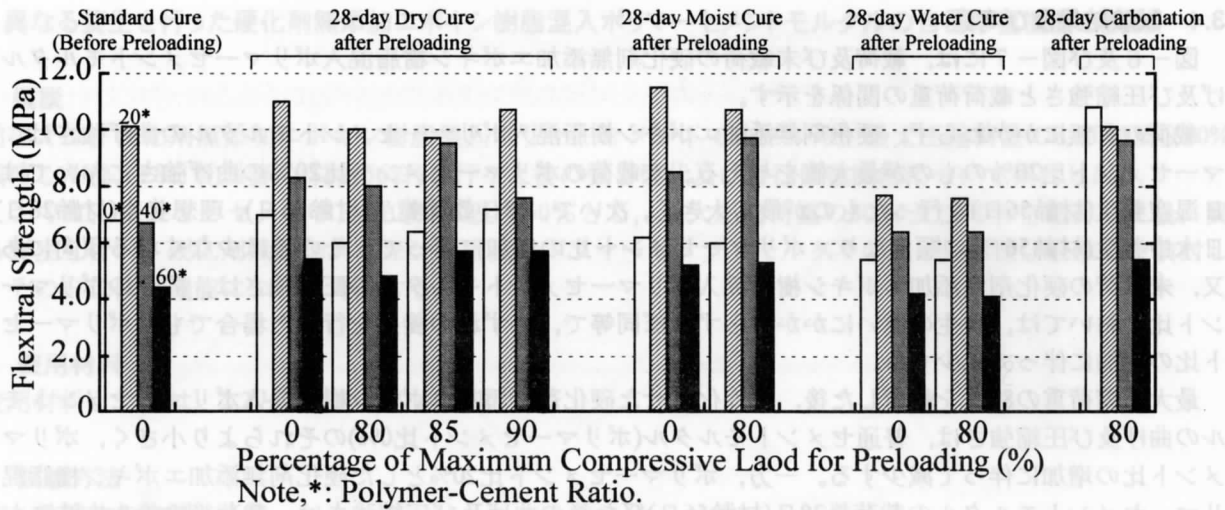


図-6 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ強さと載荷荷重の関係

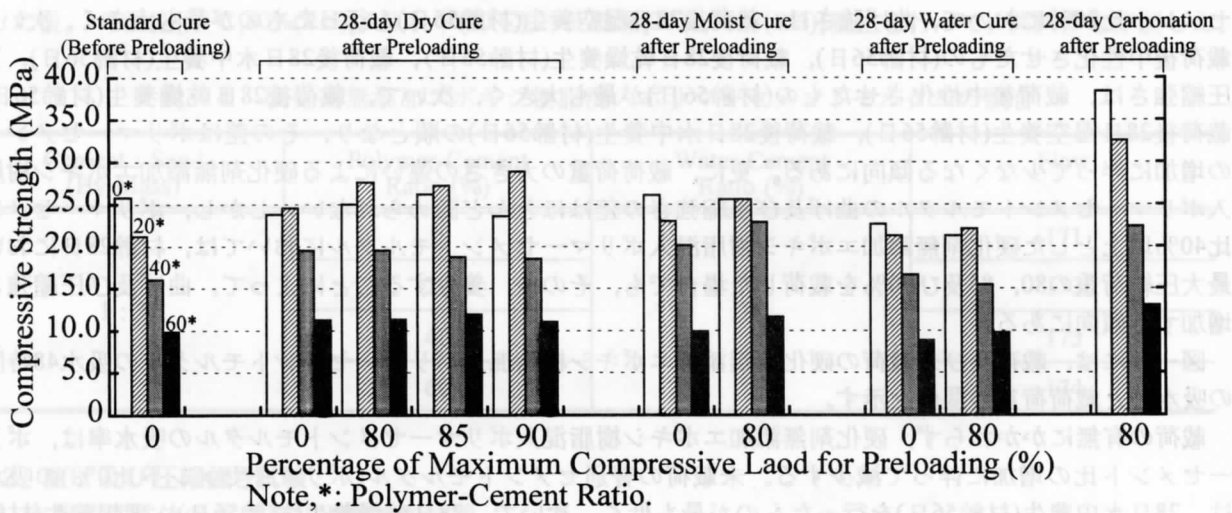


図-7 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの圧縮強さと載荷荷重の関係

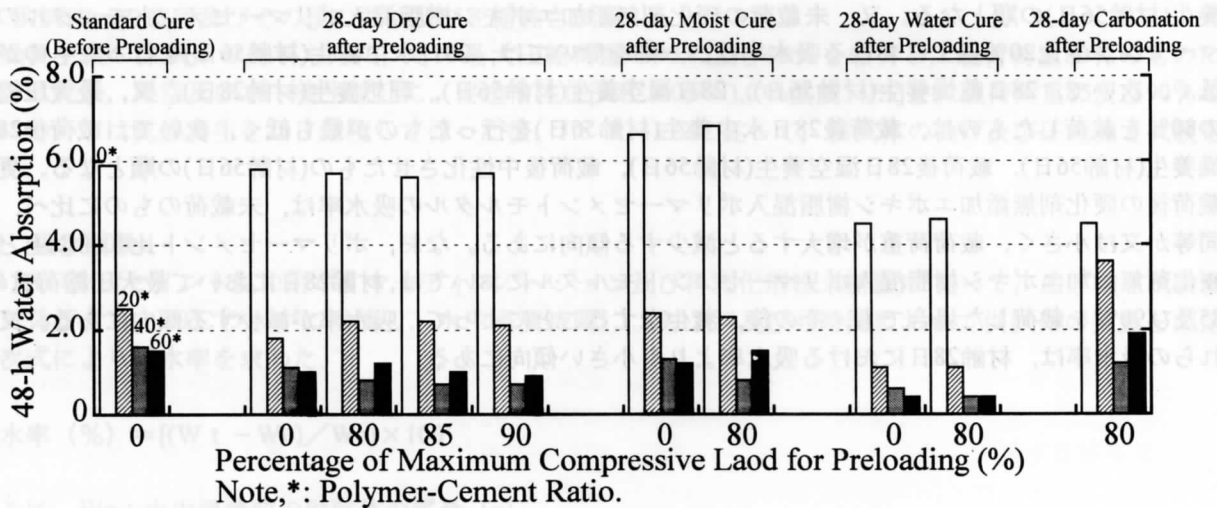


図-8 硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの水中浸漬48時間後の吸水率と載荷荷重の関係

3.5 結語

以上の試験結果を要約すれば、次の通りである。

- (1) 未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ強さは、ポリマーセメント比20%において、28日湿空養生(材齢56日)を行ったものが最も大きく、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、28日水中養生(材齢56日)の順となり、圧縮強さは、養生の違いにかかわらずほぼ同等である。
- (2) 最大圧縮荷重の80%を載荷した後、28日養生を行った硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルは、ポリマーセメント比20%において、曲げ強さは、載荷後28日湿空養生(材齢56日)を行ったものが最も大きく、次いで、載荷後中性化させたもの(材齢56日)、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日水中養生(材齢56日)の順となり、圧縮強さは、載荷後中性化させたもの(材齢56日)が最も大きく、次いで、載荷後28日乾燥養生(材齢56日)、載荷後28日湿空養生(材齢56日)、載荷後28日水中養生(材齢56日)の順となる。
- (3) 載荷荷重の大きさの違いによる、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ強さの差は、ほとんど認められない。
- (4) 未載荷の普通セメントモルタル(ポリマーセメント比0%)の吸水率は、28日水中養生(材齢56日)を行ったものが最も低く、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、28日湿空養生(材齢56日)、又、最大圧縮荷重の80%を載荷したものは、載荷後中性化させたもの(材齢56日)が最も高くなる。
- (5) 未載荷の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比20%以上における吸水率は、28日水中養生(材齢56日)を行ったものが最も低く、次いで、28日乾燥養生(材齢56日)、28日湿空養生(材齢56日)、理想養生(材齢28日)、又、最大圧縮荷重の80%を載荷したものは、載荷後中性化させたもの(材齢56日)が最も高くなる。
- (6) 載荷後の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水率は、未載荷のものに比べ、ほぼ同等か又は小さく、載荷荷重が増大すると減少する傾向にある。
- (7) 本研究の限りでは、ポリマーセメント比40%以上とした硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいては、材齢28日において最大圧縮荷重の80、85及び90%を載荷した場合でも、その後、養生を行うことによって、曲げ及び圧縮強さが増加すると共に吸水率が減少する傾向にある。又、それらの吸水率は、材齢28日における吸水率よりも小さい傾向にある。

4. まとめ

本研究において得られた結果をまとめれば、次の通りである。

- (1) 載荷後の養生の違いにかかわらず、ポリマーセメント比10及び20%の硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルを、載荷後28日養生(材齢56日)した後の曲げ及び圧縮強さは、載荷直後(材齢28日)のそれらよりも小さい傾向にある。
- (2) 載荷の有無にかかわらず、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルのポリマーセメント比40%以上における曲げ及び圧縮強さは、養生を継続することによって増大し、材齢28日後更に湿空養生(材齢56日)を行うことで、最も増大する傾向にある。
- (3) 載荷荷重の違いによる硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さの差はほとんどない。
- (4) 載荷の有無にかかわらず、硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水率は、ポリマーセメント比の増加に伴って減少する。
- (5) 載荷後28日(材齢56日)経た硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルの吸水率は、ポリマーセメント比40%とした場合、未載荷のものよりも若干小さくなる。
- (6) 以上のことより、ポリマーセメント比40%以上とした硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおいては、材齢28日において最大圧縮荷重の40~90%載荷した後においても、その後の養生中に、ひび割れの自己修復が行われ、その曲げ及び圧縮強さが増加すると共に、その吸水率が減少する傾向にある。このことより、硬化剤無添加エポキシ樹脂を混入することによって、自己修復機能を備えるコンクリートの製造が可能であることが示唆される。

参考文献

- 趙 榮國, "硬化剤無添加エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタル及びコンクリートの開発", pp.16-27, 日本大学博士学位論文, Mar.1995

6.3 ガラス管を用いた自己強度回復コンクリート

1 はじめに

ここでは、強度を自己回復するインテリジェント機能を有するコンクリート試験体を作製し、そこに付与された機能の有効性を確認するために実験を行う。

ここで用いるインテリジェント化の手法としては、6.1での止水効果の自己回復を与えるために用いた手法と同様に、補修剤を内包したガラス管を試験体内部に埋設するという方法を採用する。

2 実験概要

図1のように、ノッチを付けた試験体を用いて3点曲げ試験を行う。

試験体はガラス管を内包しており、寸法は4×4×13[cm]の直方体で、破壊箇所を限定してそのクラック幅の制御を容易にするために中央部分に深さ2[cm]のノッチを入れている。但し、図中の三角形は曲げ試験時の載荷点の位置を示しており、曲げスパンは12[cm]としている。また、エポキシ樹脂を補修剤として用いるものについては、主剤と硬化剤の2液が必要になるために、図1(a)に示すように試験体中にガラス管を2本埋設してある。ガラス管を埋設しないシリーズは、図1のガラス管を取り除いた形状である。

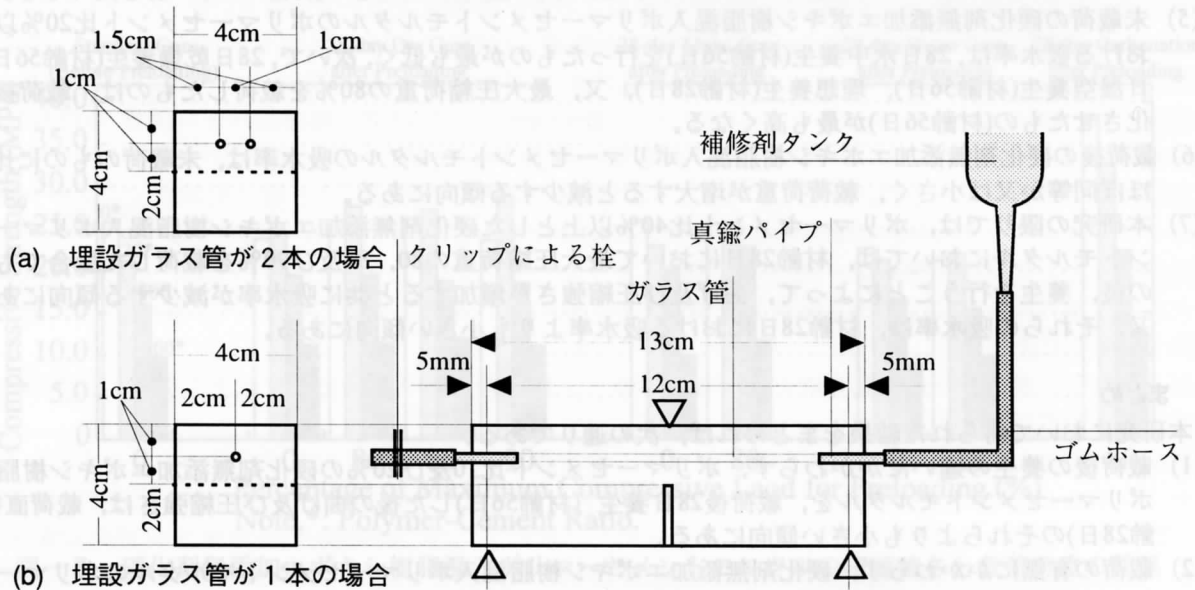


図1 試験体の形状

使用材料はセメントに早強ポルトランドセメント($\rho=3.13$)、混和材にシリカフューム($\rho=2.2$)、混和剤にナフタリンスルホン酸塩系高性能減水剤($\rho=1.20$ /空気非連行性)、骨材に宮城県阿武隈川産川砂($\rho=2.54$ (表乾))とする。また補強材としてポリプロピレン繊維($\rho=0.91, l=12\text{mm}$)、補修剤として補修剤B(珪酸アルカリを主成分とする水ガラス/希釈溶液)、補修剤B'(珪酸アルカリを主成分とする水ガラス/原液)、補修剤C(2液混合エポキシ/低粘度型)の3種類を用意する。さらに、ガラス管は外径2mm、内径0.8mmのものを使用する。

調合についてはモルタル部分の調合を基準調合の1種類のみとし、補修剤の違いによる自己修復機能への影響を確認する。補修剤の補修材令の違いによる強度回復への影響も確認する。調合表を表1に示す。

試験体の作製方法は、練り混ぜにオムニミキサーを使用し、粉体のみで1分間空練りを行った後、水・減水剤を入れ3分間、そして繊維を入れ1分間、最後に骨材を入れ2分間とした。打設は練り上がったモルタルを、予めガラス管が配置されている型枠内に直接投入した。

また所定の養生の終了後、1回目試験の前にコンクリートカッターによってノッチを入れた。

養生は打設から24時間まで養生室(20℃/相対湿度100%)において静置後に脱型し、初期材令となる7日間まで養生室にて湿空養生を行った。

変位制御型万能試験機を用いて図1に示すような3点曲げ破壊試験を行い、試験体に任意のひび割れを発生させる。載荷点の変位速度は0.05[mm/min]であり、破壊の状態はこれによって制御する。具体的には、最

表1 調合表

	W/B[%]	SF/B[%]	Va:Vm	Vf[%]	補修剤	補修材齢	補修剤使用方法
a.g.1週	40 (38+2)	10	1:1	0.5		7日	使用せず
a.g.4週						28日	
c05-B1					補修剤B	7日	直接、ひび割れ 発生部分に塗布
c05-B4						28日	
c05-B'1					補修剤B'	7日	
c05-B'4						28日	
c05-C1					補修剤C	7日	
c05-C4						28日	
c05-g-B1					補修剤B	7日	ガラス管を用いる
c05-g-B4						28日	
c05-g-B'1					補修剤B'	7日	
c05-g-B'4						28日	
c05-g-C1					補修剤C	7日	
c05-g-C4						28日	

但し、W：水、B：結合材、SF：シリカフェーム、Va：骨材体積、Vm：マトリクス体積、Vf：繊維混入率（体積表示）、補修材令：1回目試験から2回目試験を行うまでの養生期間、W/Bの括弧内は（水+高性能減水剤）

大荷重を超えて荷重が下がり始めてから一定のひび割れ幅を持ったところで除荷し、完全に破断する前に1回目の試験を終える。この除荷のタイミングは、基本的に樹脂の浸透が確認されたところとしている。このひび割れを発生させた試験体に対して所定の材令まで養生を行い、自己修復機能の発現を図る。この養生を終えた試験体について、同じ3点曲げ試験を行い、強度の回復を見る。

ひび割れを発生させた試験体は、内包するガラス管の破壊に伴って補修剤がひび割れ中に放出されているものと考えられる。この補修剤をひび割れ中に十分に充填させるために、補修養生中は試験体を立てた状態で、養生室（20℃/相対湿度100%）にて静置した。

またひび割れ部分に直接補修剤を充填するシリーズや、autogeneous機能（破壊の発生により水和セメント層が割れて、その部分から進入する水分と未水和部分が再水和を行い、この箇所の修復が可能になるもの）を見たシリーズについても、所定の補修材令まで養生室にて静置した。

3 結果及び考察

ここではautogeneous機能を見たもの、補修材料を直接ひび割れ部分に充填し補修したものと強度回復率を比較することで、本節で提案している補修材料を内包するガラス管をコンクリート中に埋設するという手法により、自己修復機能というインテリジェント機能がどの程度有効に機能するのかを確認する。

但し、強度回復率とは1回目の試験の除荷荷重に対する2回目試験の最大荷重の割合と定義する。補修材令を設けずに、繰り返し載荷すると強度回復率はほぼ100%で、100%より小さい傾向にあることが知られている。図2は、曲げ試験時におけるCMODと荷重の関係を模式的に表したものである。この図にあるように荷重が減少している段階で一度除荷すると、再度載荷してもその除荷時の荷重までは到達しない。すなわち図に示すように、この除荷時の荷重を σ_1 、再載荷時の最大荷重を σ_r とすると、 (σ_r/σ_1) は1以下の値を取る。これに対して (σ_r/σ_1) の値が1を越えていれば、強度が回復したと考えられる。そこでこの除荷時の荷重における再載荷時の最大荷重の割合、すなわち $(\sigma_r/\sigma_1) \times 100$ を「強度回復率」と定義し、この値が大きければ大きいほど補修がなされたとして良いと考えた。

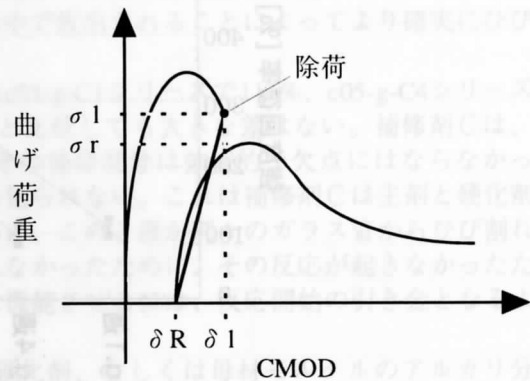


図2 CMODと曲げ荷重の関係（模式図）

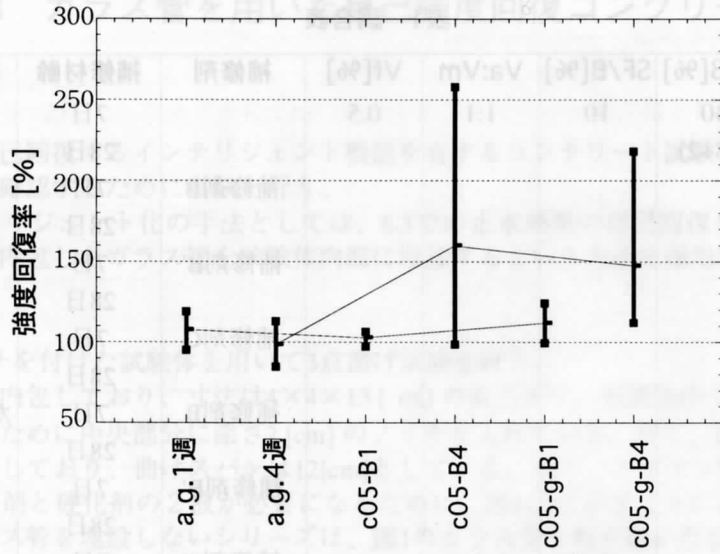


図3 c05-g-Bシリーズの強度の回復率

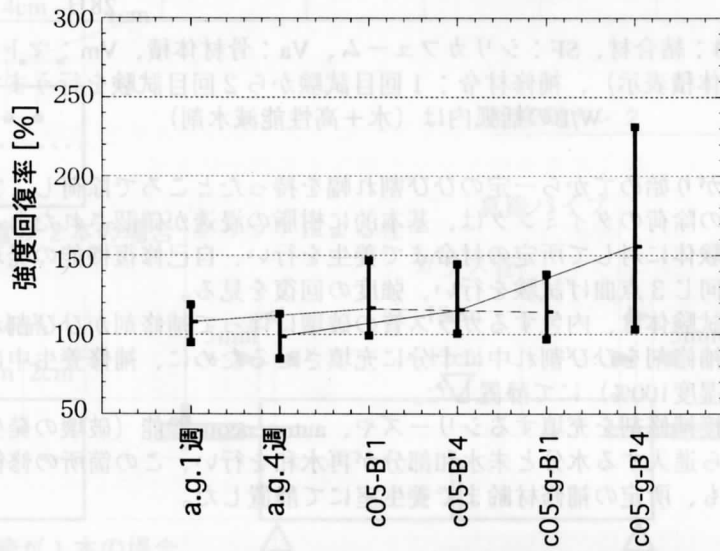


図4 c05-g-B'シリーズの強度の回復率

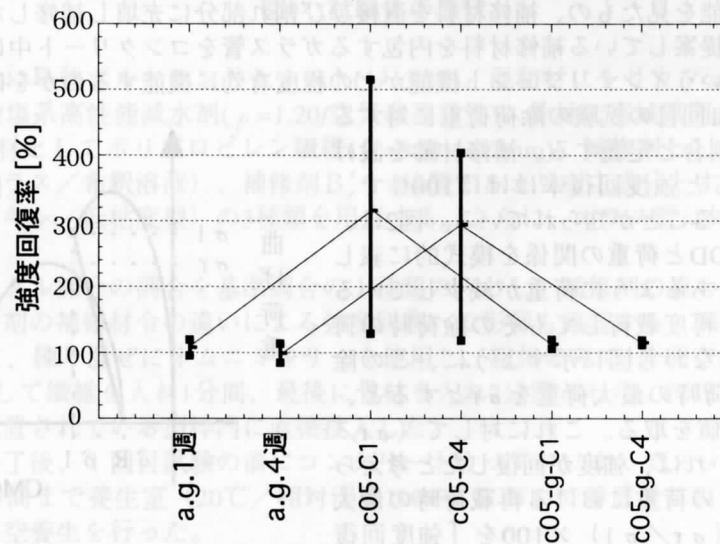


図5 c05-g-Cシリーズの強度の回復率

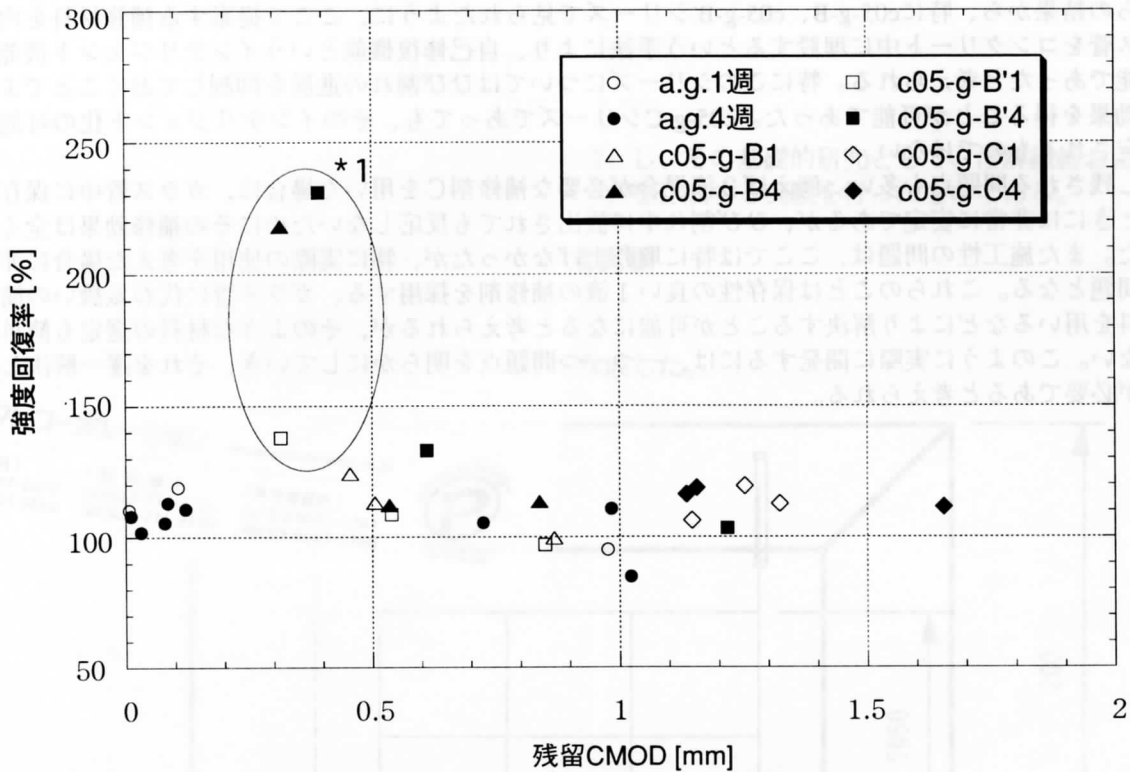


図6 各シリーズの残留CMODと強度回復率の関係

まずは試験を行った各シリーズごとに考察を行う。

・c05-g-B1/c05-g-B4：図3に示されるように、平均回復率はc05-g-B1シリーズで112%、c05-g-B4シリーズで148%程度となっている。両シリーズともノッチ部分から直接ひび割れに補修剤をひび割れ部分に浸透させたものと同程度の強度の回復が可能であった。この時と同様に、特にc05-g-B4シリーズにおいて、図6中に*1で示されるようなある範囲内でひび割れ幅を抑えたものについての回復率が大きい。この様に、外部から補修剤を浸透させて補修を行ったものと同様に、ここで提案するインテリジェント化の手法によってひび割れを補修するという自己修復機能の発現が可能であったものと考えられる。

・c05-g-B'1/c05-g-B'4：図4に示されるように、平均回復率はc05-g-B'1シリーズで115%、c05-g-B'4シリーズで156%程度となっている。このシリーズについても補修剤Bを使用したc05-g-Bシリーズでの傾向と同様に、ノッチ部分から直接ひび割れに補修剤をひび割れ部分に浸透させたものと同程度の強度の回復が可能であった。またこのことも、図6中に*1で示されるようなある範囲内でひび割れ幅を抑えたものについての回復率が大きいことが確認される。特に、c05-g-B'4シリーズではノッチ部分から直接ひび割れに補修を行ったものよりも大きな補修効果を得ている。このことは、補修剤B'はある程度粘性が高いために、ひび割れの外部からでは十分な浸透が行えなかったものが、ひび割れ中で放出されることによってより確実にひび割れ中に配置されることが可能になったためと考えられる。

・c05-g-C1/c05-g-C4：図5に示されるように、平均回復率はc05-g-C1シリーズで113%、c05-g-C4シリーズで115%程度となっており、これはautogeneous機能のみのものと比較しても大きな差はない。補修剤Cは、直接外部から補修を行う実験では破壊部分を完全に補修し、その補修部分は強度的な欠点にはならなかったが、ガラス管を埋設したシリーズではそのような補修効果は見られない。これは補修剤Cは主剤と硬化剤の2液を混合することにより反応、硬化する補修剤であるために、この2液が別々のガラス管からひび割れ中に放出された場合、接触することはあっても混合、攪拌されなかったために、その反応が起きなかったためであると考えられる。この補修剤を用いて自己修復を十分に機能させるには、反応開始の引き金となるようなファクターを取り入れる必要があると考えられる。

c05-g-C4の方が若干高い回復率を得ているため、主剤が硬化剤、もしくは母材モルタルのアルカリ分と徐々に反応していると考えられるが、このことによる強度回復の効果は非常に小さい。

2. 1. 3 埋設した繊維のネットワークについて

埋設した繊維のネットワークについては、前頁に示すネットワークの他に、図-3に示すような、ネットワークを組んで、実験を行った。

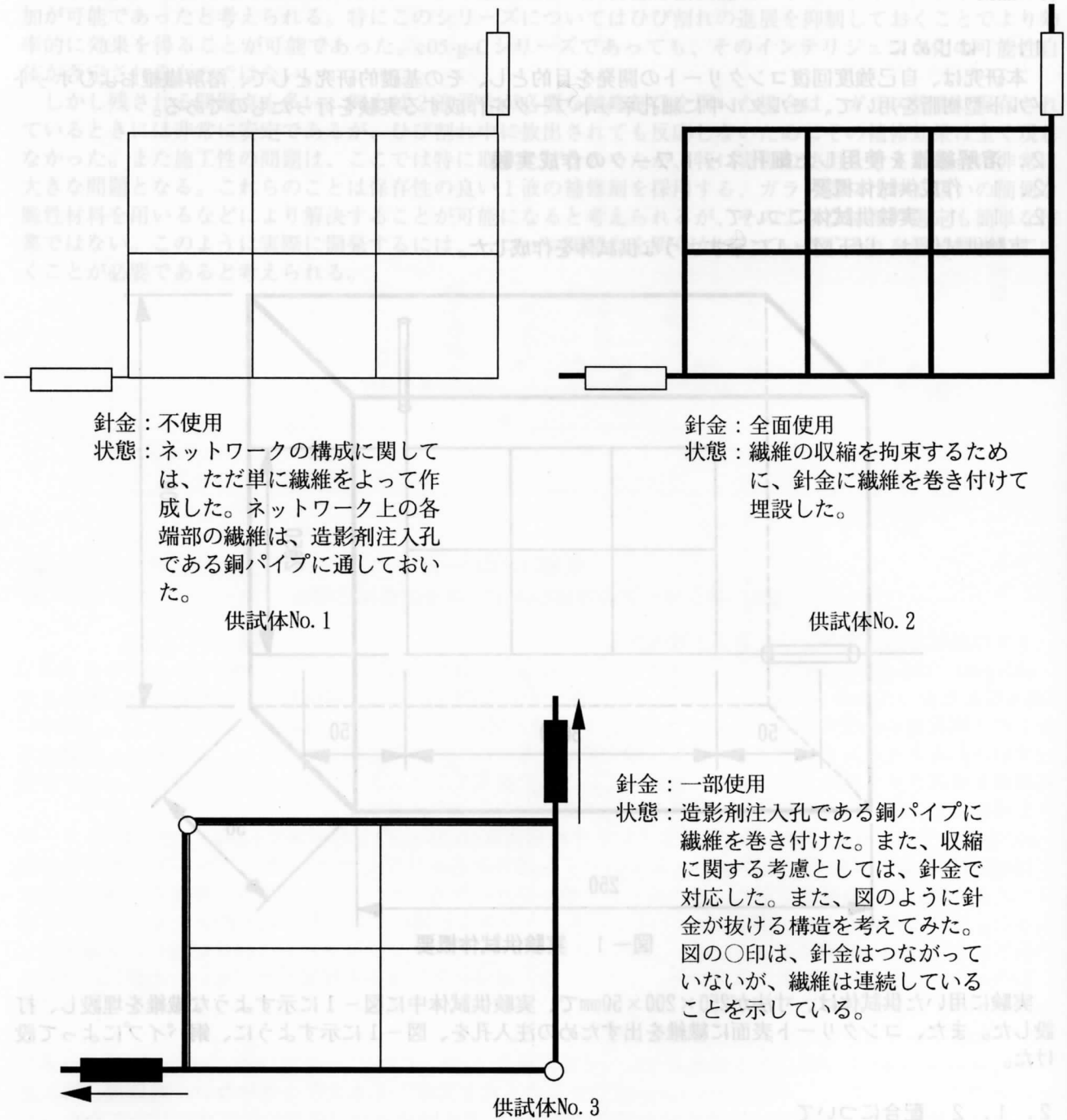


図-3 ネットワーク構成図

2. 1. 4 繊維について

実験供試体に用いた繊維は、(株)ニチビ製のソルブロン基布GF×400、およびソルブロン基布GF×5788を用いた。

2. 2 使用繊維溶解性状

2. 2. 1 使用繊維収縮実験

使用繊維に水分を吸収させた場合、どの程度繊維が収縮するのか、それを調べるために簡易的な実験を行った。

写真-1は、使用繊維GF×400の水分供与前の写真である。そこに、水分を供与し、約1分後撮影した写真が、写真-2である。

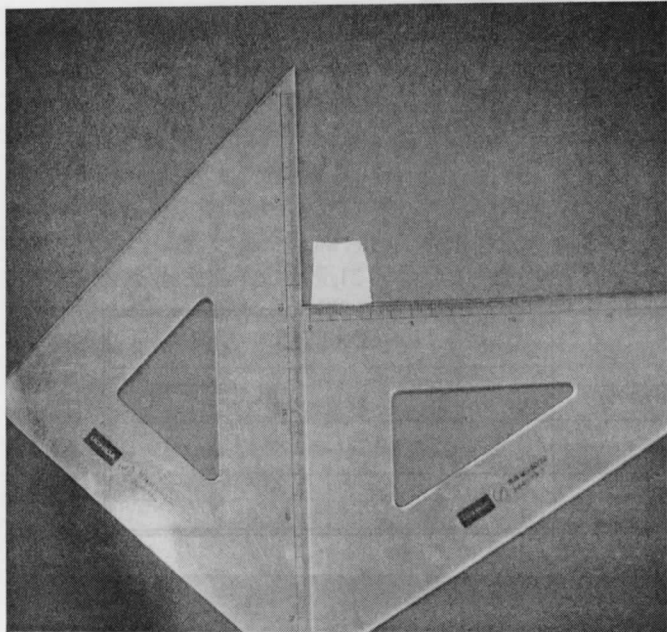


写真-1 水分供与前の繊維

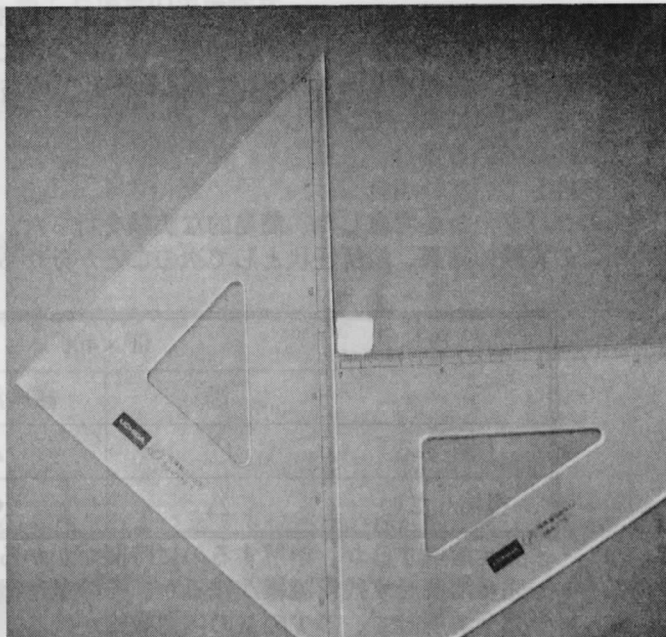


写真-2 水分供与後の繊維

2枚の写真を比較すると、水分供与前の面積は約4.14cm²で、水分供与後は約1.56cm²になっている。従って、この布の収縮率は、面積比でおよそ62.3%である。

また、GF×5788においても同様の実験を行った結果、水分供与前の面積は約4.00cm²で、水分供与後は約1.69cm²となった。従って、この布の収縮率は、面積比でおよそ58.8%である。

2. 2. 2 3×3cmの繊維の溶解性状

繊維の溶解性状として、3×3cmの繊維を

- ・あらかじめ繊維を溶解していない60～70℃のお湯につけた場合
- ・あらかじめ繊維を9cm²溶かしている60～70℃のお湯につけた場合

- の2ケースにおいて、
- ・攪拌している場合
- ・攪拌していない場合

の2パターンを考慮した、簡易的な実験を行った。

この実験の結果、溶解性状として次のことが分かった。

	GF×400		GF×5788	
	湯	繊維溶解湯	湯	繊維溶解湯
攪拌する	◎	△	△	▲
攪拌しない	○	▲	▲	◆

◎・・・瞬時に完全溶解する

○・・・完全溶解するが、溶解するのに時間がかかる

△・・・完全溶解せず残留繊維が残るが、その量は微小

- ▲・・・完全溶解せず、多少の量の残留繊維が残る
- ◆・・・完全溶解せず、多少の量の残留繊維が残り溶解に時間がかかる

表-1 3×3cmの繊維の溶解性状

2. 2. 3 3×3cmの繊維をよった場合の溶解性状

繊維の溶解性状として、あらかじめよっておいた3×3cmの繊維を

- ・あらかじめ繊維を溶解していない60～70℃のお湯につけた場合
 - ・あらかじめ繊維を9cm²溶かしている60～70℃のお湯につけた場合
- の2ケースにおいて、
- ・攪拌している場合
 - ・攪拌していない場合

の2パターンを考慮した、簡易的な実験を行った。

この実験の結果、溶解性状として次のことが分かった。

	GF×400		GF×5788	
	湯	繊維溶解湯	湯	繊維溶解湯
攪拌する	○	▲	△	▲
攪拌しない	△	◆	▲	◆

- ・・・完全溶解するが、溶解するのに時間がかかる
- △・・・完全溶解せず残留繊維が残るが、その量は微小
- ▲・・・完全溶解せず、多少の量の残留繊維が残る
- ◆・・・完全溶解せず、多少の量の残留繊維が残り溶解に時間がかかる

表-2 3×3cmの繊維をよった場合の溶解性状

2. 2. 4 あらかじめぬらして収縮後乾燥させた繊維と乾いている繊維の溶解性状の相違

同じ大きさに切断した2枚の繊維を、片方は常温の水に浸し十分に浸透させ、収縮後十分に乾燥させたものをお湯につけ、片方はそのままの繊維をお湯につける実験を行った。尚、この実験は、双方攪拌をし、繊維等を溶かしていないお湯にて実験を行った。結果は、表-3の様になった。

	GF×400		GF×5788	
	処理を行った布	処理を行わなかった布	処理を行った布	処理を行わなかった布
攪拌する	◆	◎	◆	△

- ◎・・・瞬時に完全溶解する
- △・・・完全溶解せず残留繊維が残るが、その量は微小
- ◆・・・完全溶解せず、多少の量の残留繊維が残り溶解に時間がかかる

表-3 あらかじめぬらして収縮後乾燥させた繊維と乾いている繊維の溶解性状の相違

2. 2. 5 繊維を蒸気に当てた場合の溶解性状

この実験は、やかんに水を入れて沸騰させ、やかんの口から出てきた温度約80℃の蒸気に繊維を当てるといふ実験である。

結果は、表-4のようになった。

	GF×400	GF×5788
蒸気	×	×

×・・・溶解しない

表-4 繊維を蒸気に当てた場合の溶解性状

2. 2. 6 溶解性状の総合評価

この繊維の性状を調査した結果、上図の様な実験結果となった。従ってこの繊維は、以下の事が言える。

- ・流動性があるほど、溶解しやすい。
- ・繊維をよると、溶解しにくい。
- ・繊維がとけた湯ほど、溶解しにくい。
- ・繊維の状態が、一度ぬらして乾燥させたものは、溶解しにくい。
- ・繊維を温度80℃の蒸気にさらしても、溶解しない。
- ・ソルブロン基布GF×400とGF×5788を比較した結果、GF×400の方が溶解しやすい。

2. 3 溶解繊維埋設供試体に関する実験

2. 3. 1 供試体No.1に関する実験

(1) 繊維埋設状況

以下に、GF×400を使用した繊維ネットの埋設状況の写真、およびネットワークの構成図を示す。

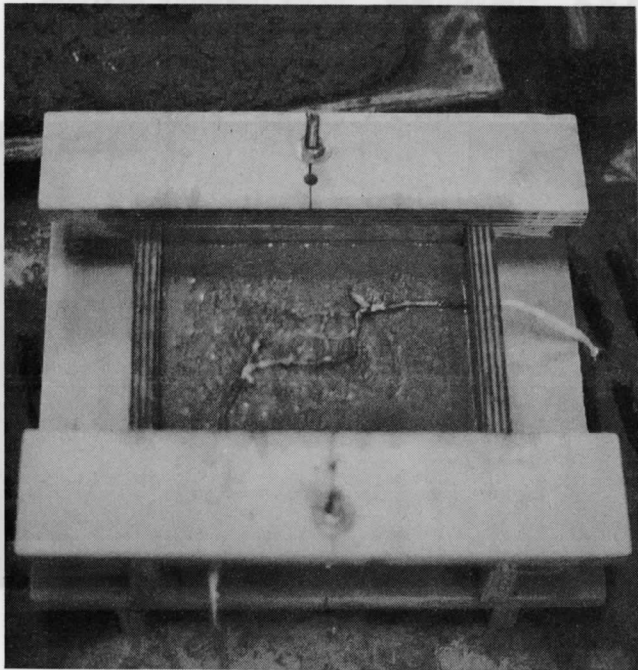


写真-3

供試体No.1繊維埋設状況 (設置2分後)

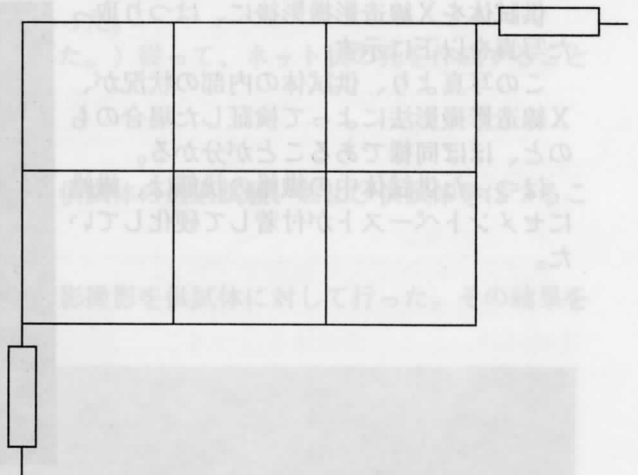


図-4

ネットワークの構成図

供試体No.1の実験において、繊維のかなりの収縮が見られた。

(2) 乾燥炉によって加熱させた場合の供試体中の繊維の性状

繊維を埋設したコンクリートを、材令1日で脱型し水中養生3日後、乾燥炉によって70度程度に保って24時間養生したが、コンクリート中に埋設した繊維は、全く溶解しなかった。従って、この方法では、乾燥炉において加熱させた供試体中に、ネット状の孔を作成することが出来なかった。

(3) 沸騰したお湯に供試体を入れた場合の供試体中の繊維の性状

繊維を埋設したコンクリートを材令1日で脱型し水中養生3日後、沸騰したお湯約100℃の中に供試体を入れ3時間加熱を続けたが、繊維は、注入孔から出ている部分のみ溶解し、内部までは溶解しなかった。(この時の溶解方法として、注入孔からのお湯の注入をも試みた。)従って、この方法でも、ネット状の孔を作成することは出来なかった。

(4) (2)および(3)の検証

供試体の内部状況を確認するために、X線造影撮影法による供試体の透過試験、および供試体をはつることの2つの手法を利用して、その内部状況を確認した。

・X線造影撮影法による内部の検証

(2)および(3)処置を実施後、供試体の内部を検証するために、X線造影撮影を供試体に対して行った。その結果を以下に示す。

写真-4における上部および左部に見えるのが造影剤注入孔であり、その部分までは造影剤が浸透していることが分かる。また、中央部に見える濃く黒い部分は、供試体中に埋設した繊維であり、造影剤が浸透していないことから、繊維が供試体中に溶解せずに残留している様子が見える。

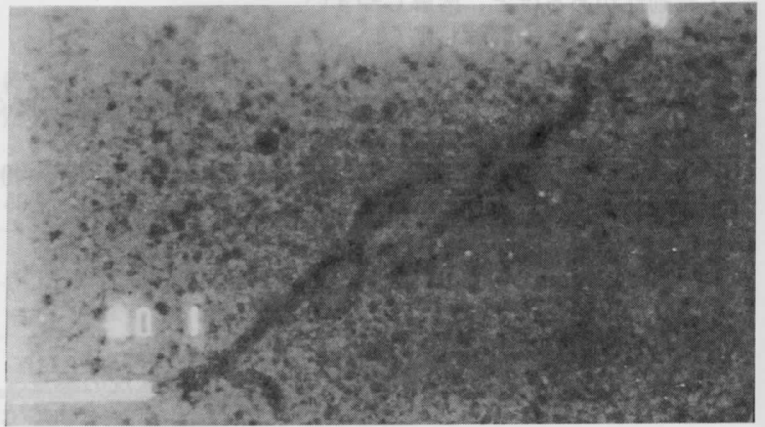


写真-4 X線造影撮影法による供試体No.1の内部状況
(X線フィルムより)

・供試体のはつり取りによる内部状況の検証

供試体をX線造影撮影後に、はつり取った写真を以下に示す。

この写真より、供試体の内部の状況が、X線造影撮影法によって検証した場合のもの、ほぼ同様であることが分かる。

はつった供試体中の繊維の状態は、繊維にセメントペーストが付着して硬化していた。

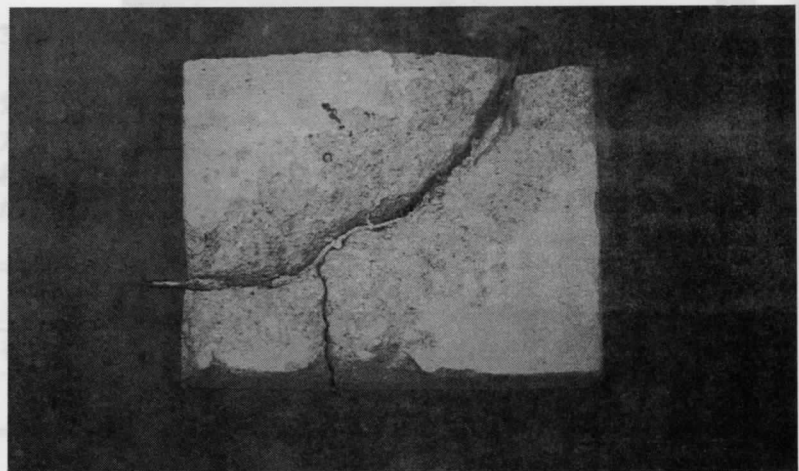


写真-5 はつった供試体No.1の内部状況

(5) セメントペーストを含んだ繊維の溶解性状に関する簡易的な実験

供試体をはつり内部状況を確認した後、セメントペーストが付着した繊維を溶解する実験を行った。実験は、あらかじめ繊維を溶かしていないお湯で攪拌しながら行い、60～70℃のお湯で溶解性状を調査した。

その結果、1時間経過しても繊維は溶解する傾向が見られなかった。

2. 3. 2 供試体No.2に関する実験

(1) 繊維埋設状況

以下に、GF×400を使用した繊維ネットの埋設状況の写真、およびネットワークの構成図を示す。

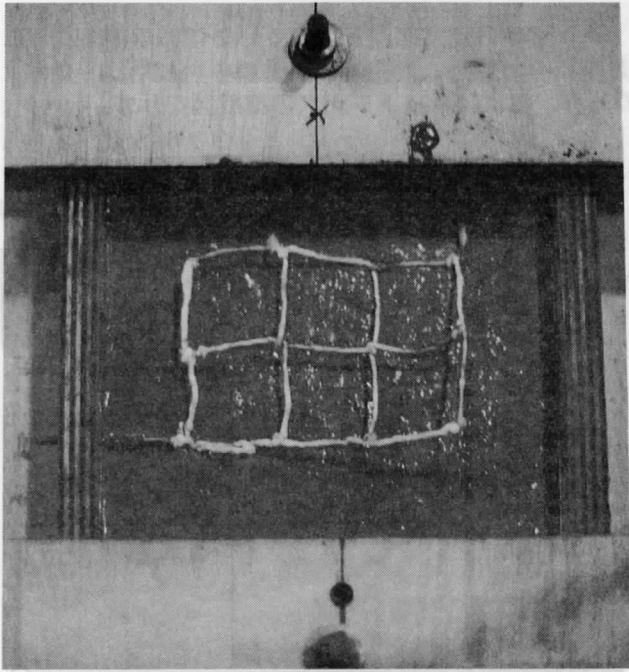


写真-6
供試体No.2繊維埋設状況（設置2分後）

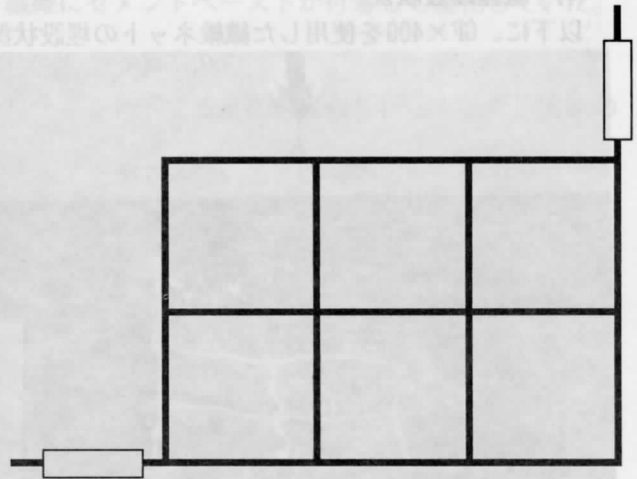


図-5
ネットワークの構成図

供試体No. 2の実験において、繊維の収縮は、あまり見られなかった。

(2) 沸騰したお湯に供試体を入れた場合の供試体中の繊維の性状

繊維を埋設したコンクリートを材令1日で脱型し水中養生3日後、沸騰したお湯約100℃の中に供試体を入れ3時間加熱を続けたが、供試体内部の繊維は、溶解しなかった。
(この時の溶解方法として、注入孔からのお湯の注入をも試みた。)従って、ネット状の孔を作成することは出来なかった。

(3) (2)の検証

供試体の内部状況を確認するために、X線造影撮影法による供試体の透過試験、および供試体をはつることの2つの手法を利用して、その内部状況を確認した。

・X線造影撮影法による内部の検証

(2)の処置を実施後、供試体の内部を検証するために、X線造影撮影を供試体に対して行った。その結果を以下に示す。

写真-4における上部および左部に見えるのが造影剤注入孔であり、その部分までは造影剤が浸透していることが分かる。また写真上の白く薄い線は、針金である。

針金の周りに濃く黒い部分が見えるが、これは供試体中に残留した繊維である。

・供試体のはつり取りによる内部状況の検証

はつった供試体中の繊維の状態は、供試体No. 1同様、繊維にセメントペーストが附着して硬化していた。

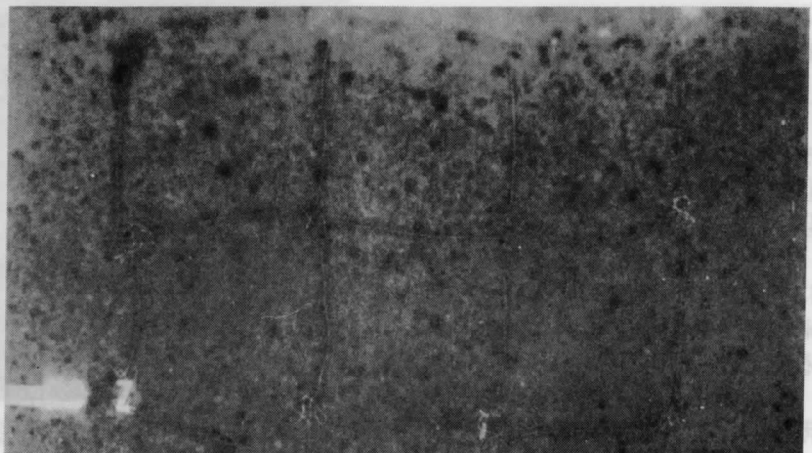


写真-7 X線造影撮影法による供試体No.2の内部状況
(X線フィルムより)

2. 3. 3 供試体No.3に関する実験

(1) 繊維埋設状況

以下に、GF×400を使用した繊維ネットの埋設状況の写真、およびネットワークの構成図を示す。

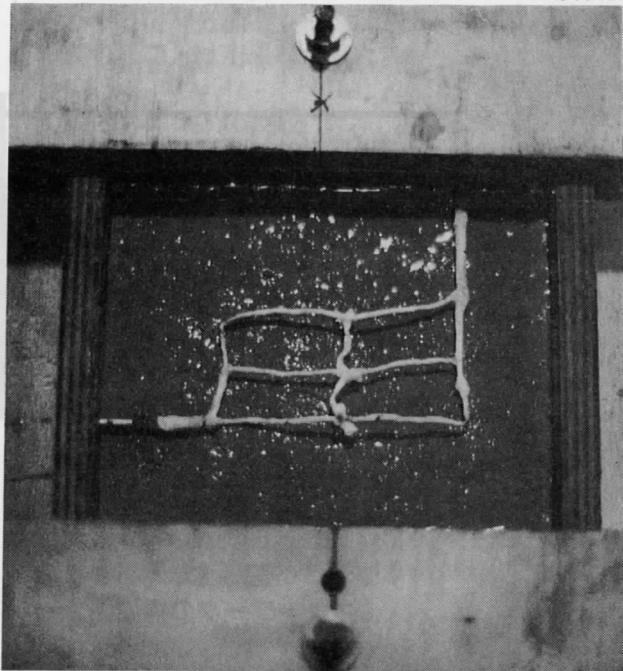


写真-8

供試体No.3繊維埋設状況（設置2分後）

供試体No.2の実験において、繊維の収縮は、あまり見られなかった。

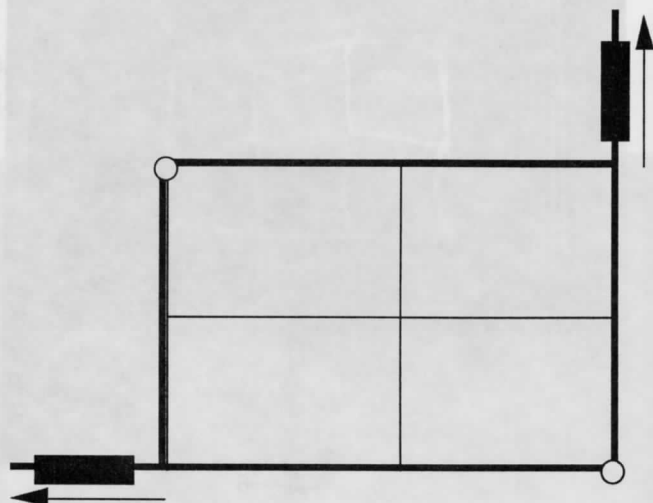


図-6

ネットワークの構成図

(2) 沸騰したお湯に供試体を入れた場合の供試体中の繊維の性状

繊維を埋設したコンクリートを材令1日で脱型し水中養生3日後、埋設した針金を引き抜いてから、沸騰したお湯約100℃の中に供試体を入れ3時間加熱を続けたが、供試体内部の繊維は、溶解しなかった。（この時の溶解方法として、注入孔からのお湯の注入をも試みた。）従って、ネット状の孔を作成することは出来なかった。

(3) (2)の検証

供試体の内部状況を確認するために、X線造影撮影法による供試体の透過試験、および供試体をはつことの2つの手法を利用して、その内部状況を確認した。

・ X線造影撮影法による内部の検証
(2)の処置を実施後、供試体の内部を検証するために、X線造影撮影を供試体に対して行った。その結果を以下に示す。

写真-5における上部および左部に見えるのが造影剤注入孔であり、その部分までは造影剤が浸透していることが分かる。

写真の中央部に濃く黒い部分が見えるが、これは供試体中に残留した繊維である。

また、造影剤注入孔からの造影剤の圧入を行った結果、上部の造影剤注入孔付近に、少量ではあるが造影剤が注入した形跡が見られた。

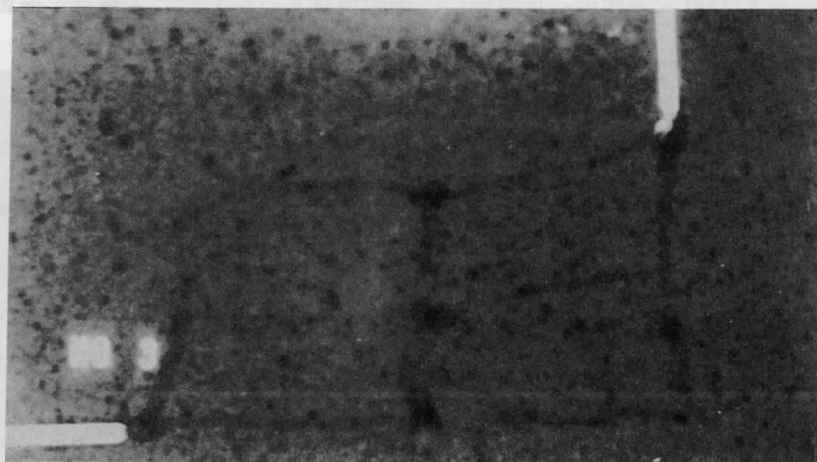


写真-9 X線造影撮影法による供試体No.3の内部状況
(X線フィルムより)

・供試体のはつり取りによる内部状況の検証

はつった供試体中の繊維の状態は、供試体No. 1同様、繊維にセメントペーストが付着して硬化していた。

2. 4 まとめ

水に溶解する繊維を用いて、モルタル中に細孔ネットワークを作成する基礎的実験を行った結果、実験の範囲内で以下のことがいえる。

この繊維では、モルタル中に細孔ネットワークを作成することができないことが分かった。理由として、この繊維は非常に吸水性が高く、モルタルへの設置時にネットワークの形状を保つことができないこと、モルタル中に設置された繊維は、モルタル自体に熱を与えても溶解しにくいこと等が挙げられる。

3. 溶解樹脂を使用した細孔ネットワークの作成実験

3. 1 作成供試体概要

3. 1. 1 実験供試体について

実験供試体は、図-1に示すような供試体を作成した。

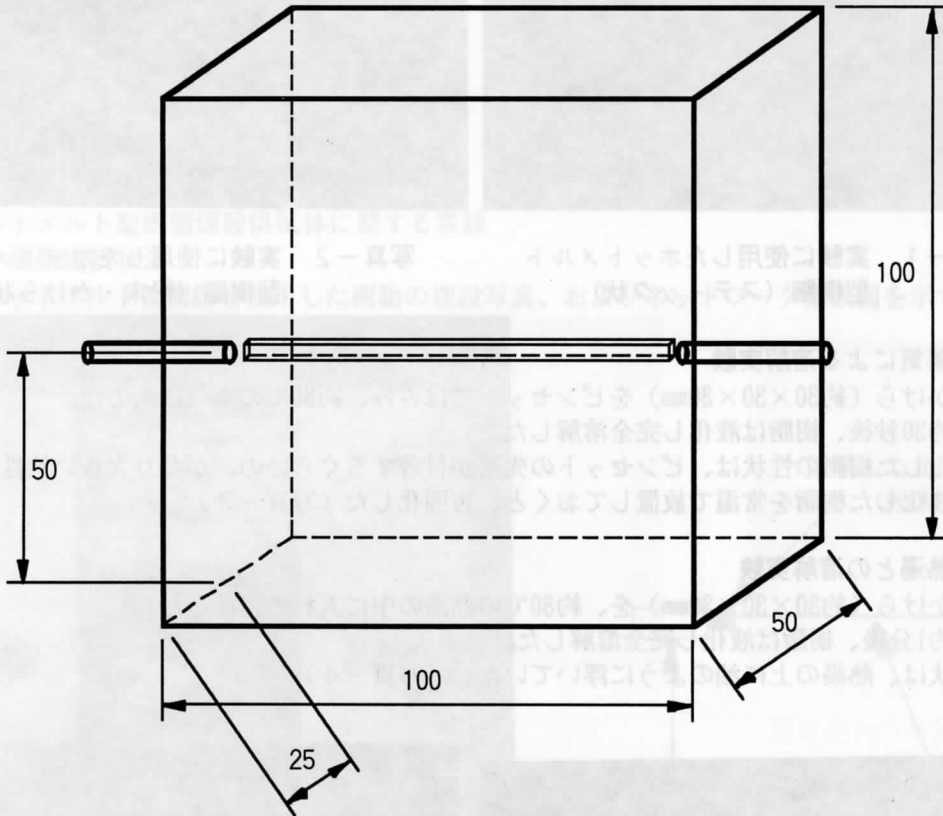


図-1 実験供試体概要

実験に用いた供試体は、寸法が100×100×50mmで、実験供試体中に図に示すようなホットメルト型樹脂をスティック状にしたものを埋設し、打設した。

3. 1. 2 配合について

配合は、モルタルでW/C=0.5のものを用いた。養生期間は3日間とし、供試体は水中養生後実験に用いた。

水セメント比W/C(%)	水 (比率)	セメント (比率)	細骨材 (比率)
50	4	8	23

表-1 配合表

3. 2 使用樹脂溶解性状

3. 2. 1 使用樹脂

埋設したホットメルト型樹脂（写真-1、以下樹脂と略す）について、簡易的な実験を行った。その結果を以下に示す。

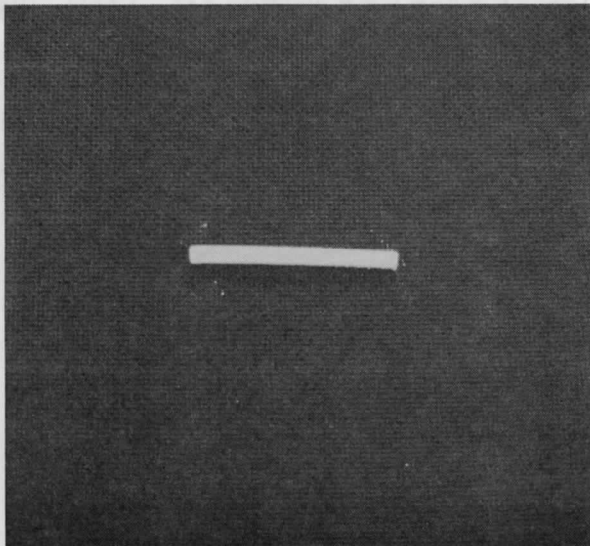


写真-1 実験に使用したホットメルト型樹脂（スティック状）

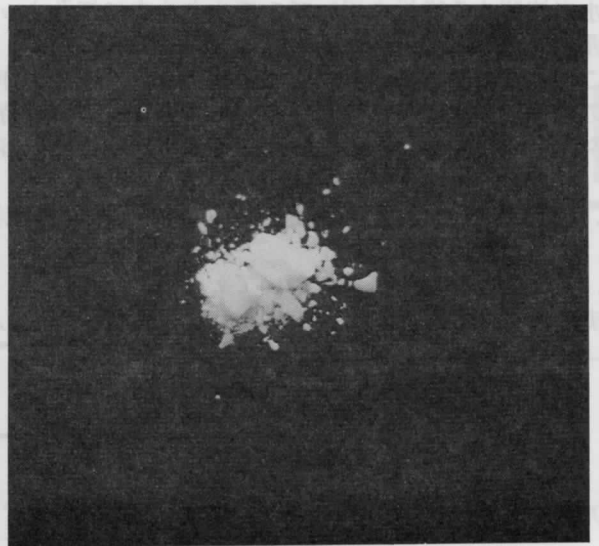


写真-2 実験に使用したホットメルト型樹脂（粉末・かけら状）

3. 2. 2 蒸気による溶解実験

この樹脂のかけら（約 $30 \times 30 \times 30$ mm）をピンセットではさみ、約 80°C の蒸気にあてた。

その結果、約30秒後、樹脂は液化し完全溶解した。

溶解後の液化した樹脂の性状は、ピンセットの先端が付着するぐらいの、かなり大きい粘性を持っていた。その後、液化した樹脂を常温で放置しておく、と、再固化した（写真-3）。

3. 2. 3 熱湯との溶解実験

この樹脂のかけら（約 $30 \times 30 \times 30$ mm）を、約 80°C の熱湯の中に入れて攪拌した。

その結果、約1分後、樹脂は液化し完全溶解した。

その溶解性状は、熱湯の上に油のように浮いていた。（写真-4）

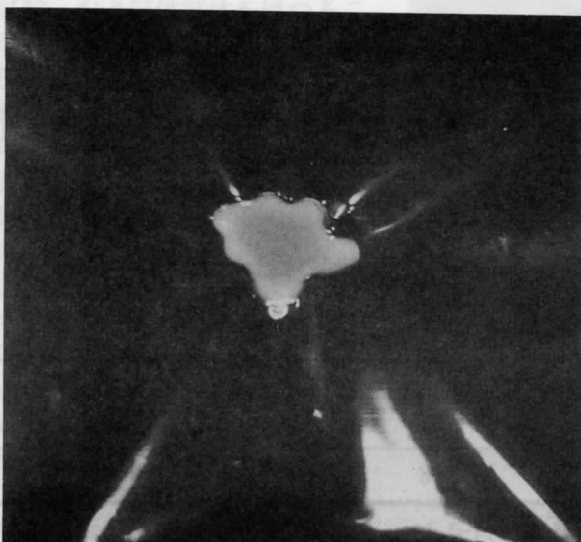


写真-3 再固化した樹脂



写真-4 熱湯に入れた場合の樹脂の溶解性状

3. 2. 4 水との溶解実験

この樹脂のかけら（約30×30×30mm）を、約15℃の水の中に入れて攪拌した。

その結果、この樹脂は水に浮いて完全溶解しなかった（写真-5）。

3. 2. 5 溶解性状の総合評価

この樹脂の性状を調査した結果、この調査の範囲内で次のことがいえる。

- ・この樹脂は、温度上昇により液化する。
- ・温度上昇によって液化した樹脂は、かなりの粘性を持つ。
- ・温度上昇によって液化した樹脂は、その温度を常温まで降下させてやると、再固化する。
- ・この樹脂は、吸水性がほとんどない。



写真-5 水に入れた場合の樹脂の溶解性状

3. 3 ホットメルト型樹脂埋設供試体に関する実験

3. 3. 1 樹脂埋設状況

以下に、ホットメルト型樹脂を使用した樹脂の埋設写真、およびネットワーク構成図を示す。

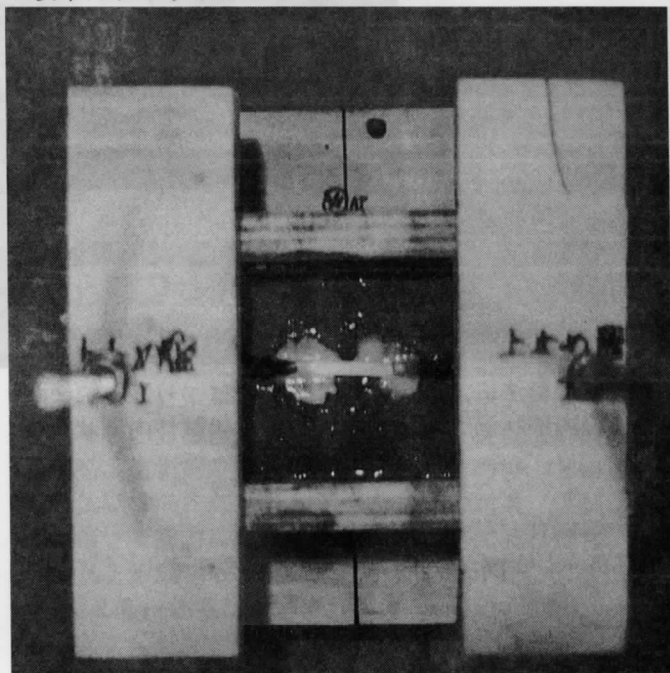


写真-6
供試体No.1樹脂埋設状況（設置2分後）

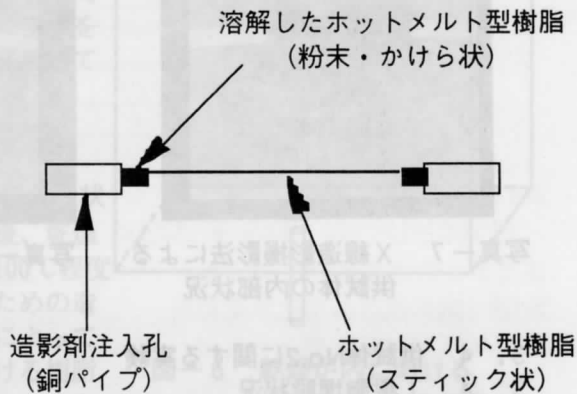


図-3
ネットワークの構成図

供試体No.1の実験において、モルタルを深さ半分の所まで打設後、樹脂をその上においた。その時の樹脂の状態は、収縮せずにスティックの状態を保ったままであった。その後、銅パイプと樹脂の隙間をなくすために、粉末・かけら状の樹脂をホットプレートにより溶解した液体を、銅パイプと樹脂の隙間にかけた。その結果、スティック状の樹脂の先端は、温度により変形・溶解したが、隙間は埋めることができた（写真-6）。隙間を埋めた後、余分な樹脂を、熱したカッターで切り取り、余剰部分を排除した。

3. 3. 2 乾燥炉によって加熱させた場合の供試体中の樹脂の性状

樹脂を埋設した供試体を、材令1日で脱型し水中養生3日後、乾燥炉によって70℃程度に保って1日養生を行った。

養生後、X線造影撮影法を行うための造影剤を、造影剤注入孔に注入した。(しかし、造影剤は造影剤注入孔に入っていかなかった。)その後、X線造影撮影法によってこの供試体の内部状態を調べた。

その結果、樹脂は供試体内に残留していた(写真-7)。従って、この方法では、モルタル内に一方向の細孔を形成することができなかった。

3. 3. 3 熱湯に供試体を入れた場合の供試体中の樹脂の性状

樹脂を埋設した供試体を、材令1日で脱型し水中養生3日後、約100℃の熱湯に供試体を入れて、3時間加熱を続けた。

加熱後、X線造影撮影法を行うための造影剤を、造影剤注入孔に注入した。(しかし、造影剤は造影剤注入孔に入っていかなかった。)その後、X線造影撮影法によってこの供試体の内部状態を調べた。

その結果、この方法でも樹脂は供試体内に残留していた(写真-7)。従って、この方法でも、モルタル内に一方向の細孔を形成することができなかった。

3. 3. 4 はつり取りによる内部の検証

実験後供試体をはつり、供試体の内部を実際に見てみた。その結果、樹脂は、供試体中に残っていた。

写真-9より、樹脂がモルタル内部で折れてしまったため、モルタル内に一方向の細孔を形成することが出来なかったということが分かった。

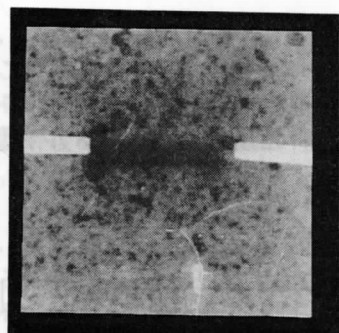


写真-7 X線造影撮影法による
供試体の内部状況

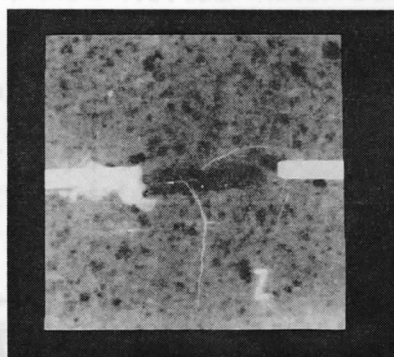


写真-8 X線造影撮影法による
供試体の内部状況

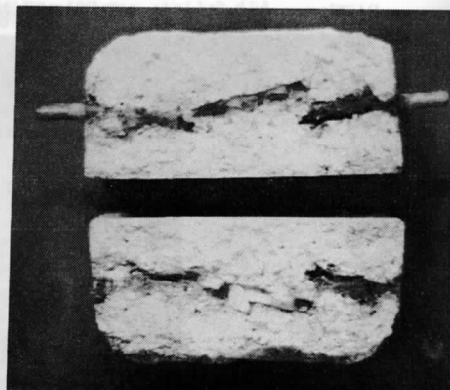


写真-9 はつり取りによる
供試体内部状況

3. 4 供試体No.2に関する実験

3. 4. 1 樹脂埋設状況

以下に、ホットメルト型樹脂を使用した樹脂の埋設写真、およびネットワーク構成図を示す。

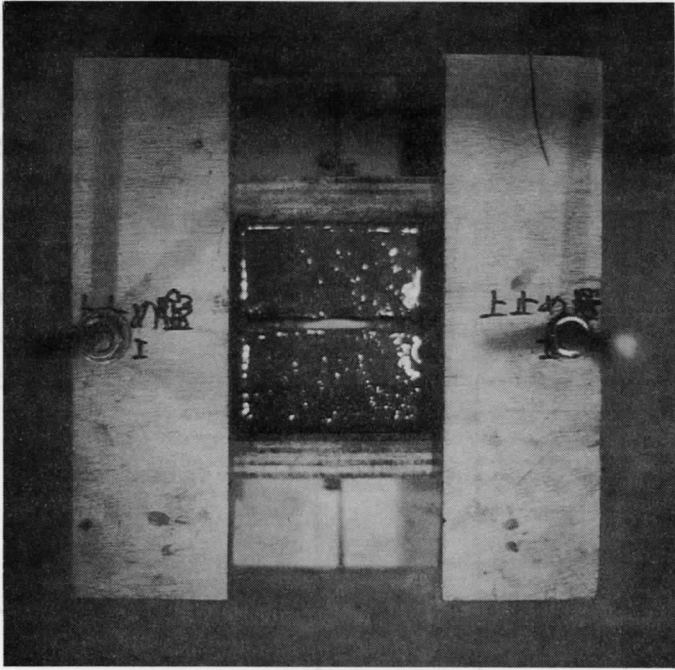


写真-10
供試体No.2樹脂埋設状況（設置2分後）

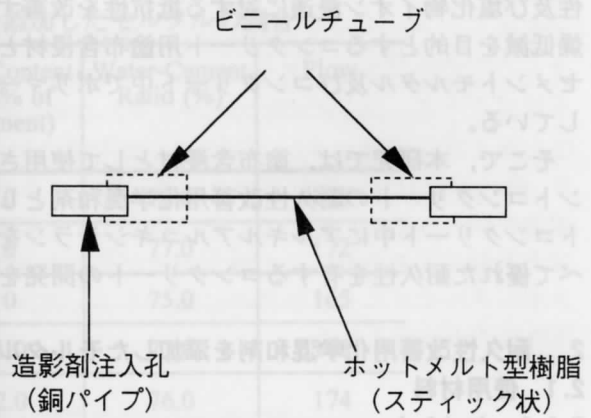


図-5
ネットワークの構成図

供試体No. 1の実験において、モルタルを深さ半分の所まで打設後、樹脂をその上においた。その時の樹脂の状態は、収縮せずにスティックの状態を保ったままであった。樹脂と銅パイプとの隙間は、図-5に示すように、樹脂の端部と銅パイプの端部にビニールチューブを設置することで対応した。（隙間の部分に溶解した樹脂をかけると、周りに樹脂が流れ出す。それをそのまま打設すると、余計な所に空隙を作成することになる。それを防止するためこのような方法を採用してみた。）

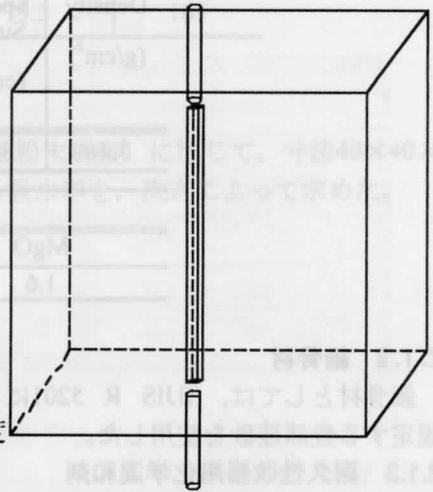


図-6 乾燥炉内における
供試体No. 2の状況

3. 4. 2 乾燥炉によって加熱させた場合の供試体中の樹脂の性状
樹脂を埋設した供試体を、材令1日で脱型し水中養生3日後、乾燥炉で図-6に示すように、銅パイプを下方に向けて、温度を100°C程度に保って1日養生を行った。養生後、X線造影撮影法を行うための造影剤を、造影剤注入孔に注入した。その後、X線造影撮影法によってこの供試体の内部状態を調べた。その結果、供試体内部における樹脂は、溶けて重力により乾燥炉内で下方に流れ落ち、供試体内に一方方向の細孔を形成することに成功した。以下に、X線造影撮影法による供試体No. 2の内部性状を示す。

3. 5 まとめ

ホットメルト型を用いて、モルタル中に細孔ネットワークを作成する基礎的実験を行った結果、実験の範囲内で以下のことがいえる。

この樹脂によって、モルタル中に一本の直線状細孔を作成することができた。しかし、この樹脂が脆いこと、溶解後の樹脂のもつ粘性が非常に高いこと等から、この材料でモルタル中に複雑な細孔ネットワークを作成することはかなり困難であると考えられる。

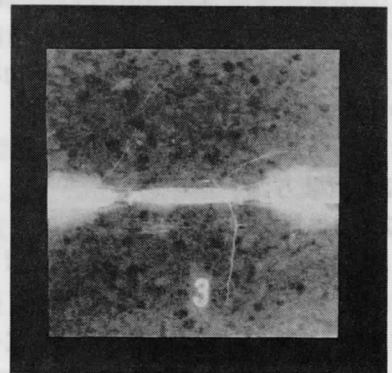


写真-11 X線造影撮影法による
供試体の内部状況

6.5 高耐久性コンクリート

1. はじめに

一般に、アルキルアルコキシシラン系塗布含浸材は、コンクリート表層部に塗布することによって、防水性及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性を改善する。又、グリコールエーテル誘導体は、コンクリートの乾燥低減を目的とするコンクリート用塗布含浸材として使用されている。一方、セメント混和用ポリマーは、セメントモルタル及びコンクリート中でポリマーフィルムを形成して、それらの耐久性を改善する性能を有している。

そこで、本研究では、塗布含浸材として使用されているこれらの材料及びアミノアルコール誘導体をセメントコンクリートの耐久性改善用化学混和剤として使用した場合の性能を把握すると共に、ポリマーセメントコンクリート中にアルキルアルコキシシランを添加することによって、従来のセメントコンクリートに比べて優れた耐久性を有するコンクリートの開発を試みる。

2. 耐久性改善用化学混和剤を添加したモルタルの性質

2.1 使用材料

2.1.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの物理的性質及び化学成分を表-1に示す。

表-1 セメントの物理的性質及び化学成分

Density (g/cm ³)	Blaine's Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3250	2-30	3-32	14.8	25.0	40.4
Chemical Compositions (%)						
MgO		SO ₃		ig. loss		
1.6		1.6		1.0		

2.1.2 細骨材

細骨材としては、旧JIS R 5201に規定する豊浦硅砂を使用した。

2.1.3 耐久性改善用化学混和剤

耐久性化学混和剤としては、アルキルアルコキシシラン(AAS)、アミノアルコール誘導体(AM)及びグリコールエーテル誘導体(GE)を使用した。なお、耐久性改善用化学混和剤の化学式を表-2に示す。

表-2 耐久性改善用化学混和剤の化学式

Ingredient for Barrier Penetrant	Chemical Formula
Alkyl Alkoxy Silane (AAS)	$C_6H_{13}Si(OCH_3)_3$
Amino Alcohol Derivative (AM)	$CH_3N(CH_2CH_2OH)_2$
Glycol Ether Derivative (GE)	A: $\text{C}_6\text{H}_5\text{-O-(CH}_2\text{-CH(OCH}_3\text{))}_n\text{-H}$ B: $\text{C}_6\text{H}_5\text{-O-(CH}_2\text{-CH}_2\text{-O)}_m\text{-H}$ Mixture of A and B

2.2 試験方法

2.2.1 供試体の作製

JIS A 1171 (試験室におけるポリマーセメントモルタルの作り方) に従って、表-3に示す調査の供試モルタルを練混ぜ、寸法40×40×160mm及び40×40×80mmに成形し、2日湿空[20℃,80%(RH)], 5日水中(20℃), 21日乾燥[20℃,50%(RH)]養生を行って、供試体を作製した。

2.2.2 強さ試験

JIS A 1172 (ポリマーセメントモルタルの強さ試験方法) に従って、寸法40×40×160mmの供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

表-3 耐久性改善用化学混和剤を添加したモルタルの調合

Cement : Sand (by Mass)	AAS Content (wt% of Cement)	AM Content (wt% of Cement)	GE Content (wt% of Cement)	Water-Cement Ratio (%)	Flow
1 : 3	0	0	0	78.0	170
	0	1.0	0	77.0	172
		2.0	0	75.0	165
		0	1.0	77.0	168
		0	2.0	76.0	174
	0.5	0	0	70.0	175
		1.0	0	69.0	172
		2.0	0	71.0	165
		1.0	0	73.5	166
		2.0	0	75.5	165

2.2.3 吸水試験

JIS A 6203 (セメント混和用ポリマーディスパージョン及び再乳化形粉末樹脂) に準じて、寸法40×40×160mmの供試体を20℃の水中(20℃)に浸漬し、水中浸漬48時間における吸水率を、次式によって求めた。

$$\text{吸水率(\%)} = \frac{W_i - W_0}{W_0} \times 100$$

ここに、 W_0 : 水中浸漬前の供試体質量(g)

W_i : 水中浸漬後の供試体質量(g)

2.2.4 塩化物イオン浸透深さ試験

寸法40×40×80mmの供試体の型枠に接していた二側面を除く他の四面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、7日間、2.5%の塩化ナトリウム溶液(20℃)中に浸漬した。その後、供試体を四分分割し、その断面に0.1%フルオレセインナトリウム溶液及び0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、蛍光を発する部分を塩化物イオン浸透域として、供試体の塩化物イオン浸透深さをノギスを用いて測定した。

2.2.5 促進中性化試験

寸法40×40×80mmの供試体の型枠に接していた二側面を除く他の四面をエポキシ樹脂塗料でシールした後、14日間促進中性化装置[30℃, 60%(RH), CO₂濃度5.0%]内に静置した。その後、供試体を四分分割し、その断面にフェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し、赤色に変化しない部分を中性化域として、供試体の中性化深さをノギスを用いて測定した。

2.3 試験結果及び考察

表-4には、耐久性改善用化学混和剤を添加したモルタルの曲げ及び圧縮強さ、吸水率、塩化物イオン浸透及び中性化深さを示す。AAS添加率の増加に伴って、耐久性改善用化学混和剤を添加したモルタルの曲げ

及び圧縮強さは減少し、中性化深さは増大する傾向にある。しかしながら、吸水率及び塩化物イオン浸透深さは、AASを添加することにより著しく減少し、AAS添加率0.5%以上におけるそれらは、普通セメントモルタルのそれらの1/2から1/5及び、1/12となる。AAS添加率0.5%におけるAAS添加モルタルの曲げ及び圧縮強さは、普通セメントモルタルのそれらと比べ、それぞれ約10%及び20%であり、強さ性状を考慮すれば、AAS添加率としては0.5%が推奨される。普通セメントモルタルと比較して、AMを添加することによって、モルタルの圧縮強さは若干増大し、その吸水性はほとんど改善されないものの、塩化物イオン浸透及び中性化深さは減少する。又、AM添加モルタルの塩化物浸透深さは、AAS添加モルタルのそれより大きいのが、その中性化深さは、普通セメントモルタルのそれの約1/2である。GEを添加することによって、モルタルの圧縮強さ、吸水率及び塩化物浸透深さは若干減少するが、普通セメントモルタルと比べ、中性化深さは減少し、AM添加モルタルに次いで小さい値を与える。AAS及びAMを同時に添加したモルタルの曲げ及び圧縮強さは減少する傾向にあるが、その吸水率及び塩化物浸透深さは、AAS及びAMの添加率にかかわらず、普通セメントモルタルのそれらより相当に減少する。又、AAS及びAMを同時に添加したモルタルの中性化に対する抵抗性は若干改善される。

表-4 耐久性改善用化学混和剤を添加したモルタルの性質

AAS Content (wt% of Cement)	AM Content (wt% of Cement)	GE Content (wt% of Cement)	Strength (MPa)		Water Absorption (%)	Cl ⁻ Penetration Depth (mm)	Carbonation Depth (mm)
			Flexural Strength	Compressive Strength			
0	0	0	6.1	26.7	12.0	16.7	14.4
0	1.0	0	7.3	26.1	11.3	10.6	6.9
	2.0	0	7.3	25.1	11.1	9.4	6.4
	0	1.0	6.1	25.1	11.9	14.6	10.8
	0	2.0	6.3	24.2	10.7	13.7	9.2
0.5	0	0	5.1	21.5	5.4	1.3	15.4
	1.0	0	5.2	19.6	4.3	2.0	11.2
	2.0	0	5.3	20.0	4.4	2.4	10.6
1.0	0	0	5.3	20.3	2.8	1.3	16.6
2.0	0	0	5.5	17.1	2.2	1.4	17.8

3. アルキルアルコキシシランを添加したポリマーセメントコンクリートの性質

3.1 使用材料

3.1.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。セメントの物理的性質及び化学成分を表-5に示す。

表-5 セメントの物理的性質及び化学成分

Density (g/cm ³)	Blaine's Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3270	2-09	3-03	26.5	41.2	59.8
Chemical Compositions (%)						
MgO		SO ₃		ig. loss		
1.5		1.9		1.5		

3.1.2 骨材

骨材としては、福島県阿武隈川産川砂（粒径、2.5mm以下）及び福島県阿武隈川産川砂利（粒径、5-20mm）を使用した。骨材の性質を表-6に示す。

表-6 骨材の性質

Type of Aggregate	Maximum Size (mm)	Fineness Modulus	Unit Weight (kg/l)	Specific Gravity (20°C)	Water Absorption (%)	Organic Impurities
Coarse Aggregate	20	6.77	1.57	2.59	1.54	Nil
Fine Aggregate	2.5	2.47	1.59	2.62	1.83	Nil

3.1.3 混和材料

(1) 化学混和剤

化学混和剤としては、2.1.3と同様のアルキルアルコキシシラン(AAS)を使用した。

(2) セメント混和用ポリマーディスパージョン

セメント混和用ポリマーディスパージョンとしては、次に示す3種類の市販品を使用した。表-7には、ポリマーディスパージョンの性質を示す。

- 1) スチレンブタジエンゴム(SBR)ラテックス
- 2) エチレン酢酸ビニル(EVA)エマルジョン
- 3) ポリアクリル酸エステル(PAE)エマルジョン

表-7 ポリマーディスパージョンの性質

Type of Polymer Dispersion	Specific Gravity (20°C)	pH (20°C)	Viscosity (20°C, mPa·s)	Total Solids (%)
SBR	1.020	9.7	64.0	45.0
EVA	1.060	4.9	2370.0	44.9
PAE	1.026	8.9	121.0	44.9

(3) 消泡剤

消泡剤としては、シリコーンエマルジョン系のもの(有効シリコーン分30%)を使用し、ポリマーディスパージョンの全固形分に対して、その有効シリコーン分として、0.7%添加した。

(4) ノニオン界面活性剤

ポリマーディスパージョンの安定剤として、HLB(Hydrophile-Lipophile Balance)が5.7のポリオキシエチレンノニルフェノールエーテル系非イオン界面活性剤を使用した。

3.2 試験方法

3.2.1 供試体の作製

JIS A 6204(コンクリート用化学混和剤)に従って、表-8に示す調査の供試コンクリートを練混ぜ、寸法φ10×20cm, 10×10×10cm及び10×10×40cmに成形した後、乾燥収縮試験用の寸法10×10×40cmの供試コンクリートを除く、他の寸法の供試コンクリートについて、2日湿空[20°C, 80%(RH)], 5日水中(20°C), 21日乾燥[20°C, 50%(RH)]養生を行った。湿空養生後、JCI-SE4[温水法(70°C)によるコンクリートの促進強度試験方法]に準ずる1日温水(70°C), 7日乾燥[20°C, 50%(RH)]養生又は、5日水中(20°C), 21日乾燥[20°C, 50%(RH)]養生を行って、供試体とした。なお、養生後、寸法10×10×10cmの型枠に接していた二側面を除く他の四面は、エポキシ樹脂塗料でシールした。

3.2.2 圧縮強度試験

JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に従って、寸法φ10×20cmの供試体の圧縮強度試験を行った。

表-8 コンクリートの調査

Type of Concrete	Water-Cement Ratio (%)	Sand-Aggregate Ratio (%)	AAS Content (wt% of Cement)	Nonionic Surfactant Content (wt% of Cement)	Polymer-Cement Ratio* (%)	Unit Water Content (kg/m ³)	Mix Proportions by Mass (kg/m ³)			Air Content (%)	Slump (cm)
							Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate		
Un-modified	65.0	46.0	0	0	0	182	280	854	1001	1.0	8.0
SBR-modified	55.5	46.0	0.5	0.5	5	155	280	854	1001	3.5	7.5
EVA-modified	53.0	46.0	0.5	1.5	5	148	280	854	1001	3.5	7.5
PAE-modified	50.0	46.0	0.5	0.5	5	140	280	854	1001	6.5	8.0

Note, *: Calculated on the basis of total solids in polymer dispersions.

3.2.3 塩化物イオン浸透深さ試験

寸法10×10×10cmの供試体を28日間、20℃の2.5%塩化ナトリウム溶液中に浸漬して、2.2.4と同様に塩化物イオン浸透深さ試験を行った。

3.2.4 促進中性化試験

寸法10×10×10cmの供試体を、28日間促進中性化試験装置内に静置して、2.2.5と同様に促進中性化試験を行った。

3.2.5 乾燥収縮試験

寸法10×10×40cmに成形した供試コンクリートを2日湿空[20℃, 80%(RH)], 5日水中(20℃)養生した直後、その基長を測定した。以後、乾燥[20℃, 50%(RH)]養生を行い、JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ試験方法) に従って、材齢28日におけるその乾燥収縮を測定した。

3.3 試験結果及び考察

図-1から図-4には、ポリマーディスパージョン及びAASを同時に練混ぜたAAS添加ポリマーセメントコ

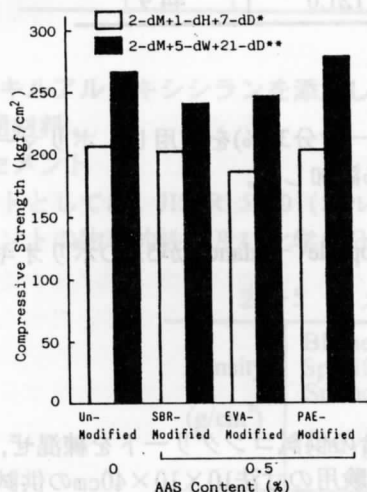


図-1 AAS添加ポリマーセメントコンクリートの圧縮強度

Notes;*: 2-day moist plus 1-day hot water plus 7-day dry cure

** : 2-day moist plus 5-day water plus 21-day dry cure

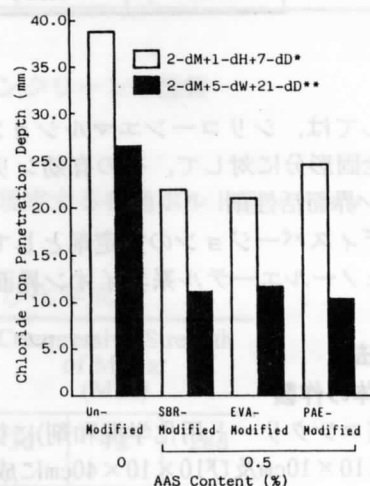


図-2 AAS添加ポリマーセメントコンクリートの塩化物イオン浸透深さ

Notes;*: 2-day moist plus 1-day hot water plus 7-day dry cure

** : 2-day moist plus 5-day water plus 21-day dry cure

ンクリートの基礎的な性質を示す。ポリマーの種類及び養生条件にかかわらず、AAS添加ポリマーセメントコンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートのそれとほとんど同じである。養生条件にかかわらず、AAS添加ポリマーセメントコンクリートの塩化物イオン浸透深さは、普通コンクリートのその約1/2である。これは、ポリマーディスページョンの混入によるポリマーフィルム形成とアルキルアルコキシシランの添加による水性付与の相乗作用によるものと考えられる。又、ポリマーディスページョンとAASから成る耐久性改善用混和剤の添加によって、普通コンクリートの中酸化に対する抵抗性は改善される。これも、コンクリート内部に形成されるポリマーフィルムによって、コンクリート表面からの二酸化炭素の拡散が抑制されるためと推察される。乾燥材齢28日におけるAAS添加ポリマーセメントコンクリートの乾燥収縮は、普通コンクリートのその約2/3となる。これは、ポリマーディスページョン中の界面活性剤及びポリマーディスページョンの安定剤として添加した界面活性剤によって、セメントマトリックス自体の保水性が向上すると共に、コンクリート内部に形成されるポリマーフィルムによって、コンクリートの保水性が著しく向上するためであると考えられる。

以上のことから、コンクリートにポリマーディスページョンとAASから成る耐久性改善用混和剤を混和することによって、優れた耐久性を有する高耐久性コンクリートの製造が可能である。

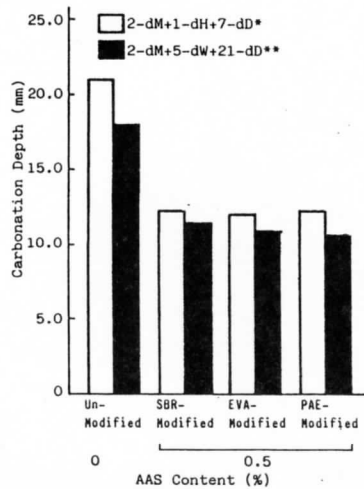


図-3 AAS添加ポリマーセメントコンクリートの中酸化深さ

Notes;*: 2-day moist plus 1-day hot water plus 7-day dry cure

** : 2-day moist plus 5-day water plus 21-day dry cure

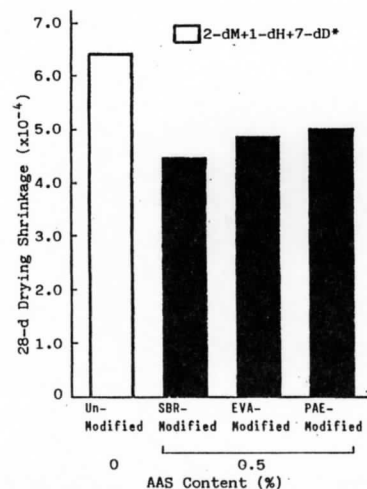


図-4 AAS添加ポリマーセメントコンクリートの乾燥材齢28日における乾燥収縮

Notes;*: 2-day moist plus 1-day hot water plus 7-day dry cure

4. まとめ

本研究で使用したアルキルアルコキシシラン、アミノアルコール誘導体及びグリコールエーテル誘導体は、高耐久性コンクリート製造のための耐久性改善用化学混和剤として利用できるものと考えられる。又、セメントコンクリートにセメント混和用ポリマーを混入すると共に、アルキルアルコキシシランを添加することによって、従来のセメントコンクリートの耐久性を改善した高耐久性コンクリートの製造が可能である。なお、本研究で使用した混和材料の基本的な機能は、次のように考えることができる。

- アルキルアルコキシシラン (AAS) :
コンクリート内部の細孔へのは水性付与による水及び塩化物イオン浸透の抑制。
- アミノアルコール誘導体 (AM) :
コンクリート内部での二酸化炭素及び塩化物イオンの吸着によるそれらの浸透抑制。
- グリコールエーテル誘導体 (GE) :
空気量の減少に伴うコンクリート内部の細孔の減少による二酸化炭素、酸素、水及び塩化物イオン浸透の抑制。
- セメント混和用ポリマー (SBRラテックス、EVA及びPAEエマルジョン) :
コンクリート内部に形成されるポリマーフィルムによる二酸化炭素、酸素、水及び塩化物イオン浸透の抑制。

7. 結び

7. 結び

本研究はコンクリートに自己修復機能を付与することの可能性を検討したものである。コンクリート構造物に起こる代表的な劣化現象には、ひび割れの発生に起因するものと化学的変化に起因するものがあり、多くの場合相互作用を及ぼしながら劣化の度合いを進展させる。もし、これらの劣化状態が発生すると同時に何らかの修復がなされれば、大幅な劣化損傷やそれに伴う大規模な修復工事を施す必要もなくなるものと考えられる。

インテリジェントコンクリートの実用化までには、未だ克服すべき課題は山積している。しかしながら、今後この技術の開発過程において、コンクリート材料全体を高強度化、高耐久性化するだけでなく、必要な部分に適切な仕掛を施すことによって、より高性能なコンクリート構造物の実現が可能となる数々のアイデアが生まれてくるものと期待される。