

セメント粒子の自己カプセル化によるコンクリート強度の 自己回復機能に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON SELF-HEALING CAPABILITY FOR STRENGTH
DUE TO SELF-CAPSULING MECHANISM OF CEMENT PARTICLES

三橋博三*・金子佳生**・西脇智哉***

by Hirozo MIHASHII, Yoshio KANEKO, and Tomoya NISHIWAKI

1. はじめに

コンクリートは過度の引張応力、温度応力や乾燥収縮などでひび割れが発生し、その完全な防止は極めて困難である。このようなひび割れは、強度の低下や気密性の低下などの直接的な性能劣化だけでなく、微細なものであっても中性化や塩害などの劣化を促進し、鉄筋の錆を誘発することで早期劣化の原因となる。このような劣化現象に対し、使用部位などの場所や場合によっては使用期間中に補修することはおろか検査することさえ出来ない場合が考えられ¹⁾、より信頼性の高いコンクリートの開発が期待される。

一方、インテリジェント材料の開発が最近、各分野で取り上げられている^{2),3),4),5)}。これは、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。即ち、インテリジェント材料とは、「検知」する機能、その情報を処理して「判断」する機能、それに基づいて能動的に行動を「実行」する機能が与えられている材料である。

このような背景に対し、筆者らはこのインテリジェント材料の概念をコンクリートに導入し、ひび割れが発生すると自動的にコンクリートに内包されている補修剤が放出してひび割れを塞いでしまうシステムの開発により、より高性能、高耐久性、高信頼性を有するコンクリートを開発することを目指してきた。

本研究では、強度の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おける重要な基本材料特性として、コンクリート強度の自己回復現象に着目し、この自己回復機能に与えるセメント粒子径の影響度を実験的に解明する。

*東北大学教授 工学研究科都市・建築学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

**東北大学助教授 工学研究科都市・建築学専攻

***東北大学大学院生 工学研究科都市・建築学専攻 (現(株)大林組)

2. 自己回復機能

ここでいう自己回復機能とは、セメントが自ら補修剤として機能するように未水和セメント部分が「コア」となるようなカプセルを作り出し、そのカプセルがコンクリートの破壊に反応して水和セメント部分を増殖することで、強度の回復を得るという機能である。即ち、セメント粒子の水和反応が進展していく段階で、粒子の表面部分から水和が進み、水和セメント層を「殻」とする自己カプセル化が行われると考えられる。この場合、その内部にセメントの未水和部分が残されることになり、コンクリートにひび割れが発生すると、未水和セメント部分が反応し、再水和して強度を回復することが可能になると考えられる。

セメント粒子は材齢とともに水和反応が進展し、十分な水分が存在すれば、ある材齢に達した時点で粒子全体が完全に水和する。しかしながら、セメント粒子が大きくなれば、粒子全体が完全に水和することなく、自己カプセル化機構がより顕著になると考えられる。即ち、未水和セメント部分が大きい程、自己回復機能は顕著になると考えられる。そのため、本研究では粗粒ポルトランドセメントを用いて、その混入率をパラメータとした強度の自己回復機能の発現に対する効果を確認する。その実験概要を次に示す。

3. 自己カプセル化による強度回復率

3.1 実験概要

(1) 試験体

ここでは、強度の回復レベルを確認することを主目的とし、試験にはひび割れ開口変位 (CMOD: Crack Mouth Opening Displacement) によって破壊の程度を簡便に制御することが可能なノッチ付き試験体を用いた3点曲げ破壊試験を行う。1回目の試験では最大荷重を越え、CMODがある一定の値に達した段階で除荷し、試験を中断する。その後、試験体に一定期間、自己回復機能が発現するための養生を施し、その後再度同様の3点曲げ破壊試験を

行うものとする。この1回目と2回目の強度の違いを比較することにより、自己回復機能の発現レベルを確認する。

図1に試験体を示す。試験体寸法は4×4×16cmの直方体で、破壊箇所を限定してそのひび割れ幅の制御を容易にするために、中央部分に深さ2cmのノッチを入れている。なお、図中の三角形は曲げ試験時の荷重点の位置を示しており、曲げスパンは12cmとしている。

使用材料は、セメントに早強ポルトランドセメント(密度 $\rho=3.13\text{g/cm}^3$)及び粗粒ポルトランドセメント($\rho=3.15\text{g/cm}^3$)、混和材にシリカフューム($\rho=2.20\text{g/cm}^3$)、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、 $\rho=1.20\text{g/cm}^3$)、細骨材に宮城県阿武隈川産川砂($\rho=2.54\text{g/cm}^3$ 、表乾)を用いる。なお、粗粒ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントから小さいセメント粒子を除いたもので、平均粒子径は、普通ポルトランドセメントの約 $15\mu\text{m}$ や早強ポルトランドセメントの約 $10\mu\text{m}$ に対し、約 $27\mu\text{m}$ と大きい、最大粒子径は普通ポルトランドセメントと同じで約 $90\mu\text{m}$ である。

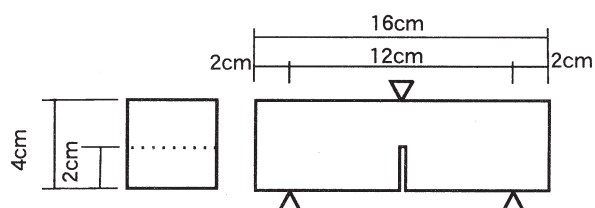


図1 試験体の形状

表1に調合を示す。表中、Wは水、Bは結合材、SFはシリカフューム、Vaは骨材体積、Vmはマトリクス体積を示し、W/Bの括弧内数字は水と高性能減水剤の値をそれぞれ示している。

ここでは、水和反応の程度に着目し、初期材齢(1回目の試験までの材齢)による自己回復機能の差異を確認するため、初期材齢を7日と28日の2種類とする。また、除荷後に試験体内部の状態を変化させない、即ち、自己回復機能を発現させないものとして1回目の試験のみで繰り返し荷重により破壊させるもの、1回目から2回目の試験までの養生期間が7日のもの、及び28日のものの3種類を扱う。

練混ぜは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、水及び減水剤を入れ3分間、最後に骨材を入れ2分間とする。型枠は鋼製のものを使用し、打設はこの型枠内に練り上がったモルタルを直接投入する。

養生は打設から24時間まで養生室(室温 20°C 、相対湿度100%)において静置後に脱型し、それぞれの所定の初期材齢となるまで養生槽にて水中養生を行う。また所定の養生の終了後、1回目の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る。

表1 調合表

	W/B[%]	SF/B[%]	Va:Vm	セメント	初期材齢
plain	40 (38+2)	10	1:1	早強 セメント	7日
4plain					28日
ex50				早強50% + 粗粒50%	7日
4ex50					28日
ex100				粗粒 セメント	7日
4ex100					28日

(2) 試験方法

変位制御型万能試験機を用いて、荷重点の変位速度を 0.05mm/min として、破壊の状態を制御する。即ち、最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。この試験を終えて破壊が発生している状態で再び所定の材齢まで養生室(室温 20°C 、相対湿度100%)にて静置することで、自己回復機能の発現を図り、養生を終えた試験体について同様の3点曲げ破壊試験を行い、強度の回復を評価する。

3.2 実験結果及び考察

図2は、曲げ試験時における荷重とCMODの関係を模式的に表したものである。

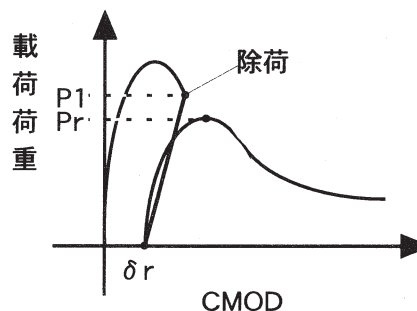


図2 載荷荷重とCMODの関係

図に示すように荷重が減少している段階で一度除荷すると、一般的には再度載荷してもその除荷時の荷重までは到達しない。即ち、再載荷時の最大荷重 P_r と除荷時の荷重 P_1 の比(P_r/P_1)は1以下の値を取る。これに対して(P_r/P_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。ここでは、(P_r/P_1)を「強度回復率」と定義する。なお、図中の δr は試験体の破壊状態を示すパラメータとして評価できる残留CMODを示す。

図3、図5、及び図7に、早強ポルトランドセメントのみを使ったplainシリーズ、早強ポルトランドセメントと粗粒ポルトランドセメントを50%ずつ使ったex50シリーズ、及び粗粒ポルトランドセメントのみを使ったex100シリーズの全荷重履歴に対する荷重—CMOD関係を示す。各図において、(a)図は、1回目の試験において繰り返し載荷により破壊させた試験結果、(b)図は1回目から2回目の試験までの養生期間を7日とした試験結果、(c)図は1回目から2回目の試験までの養生期間を28日とした試験結果をそれぞれ示している。

また、図4、図6、及び図8に、早強ポルトランドセメントのみを使ったplainシリーズと4plainシリーズ、早強ポルトランドセメントと粗粒ポルトランドセメントを50%ずつ使ったex50シリーズと4ex50シリーズ、及び粗粒ポルトランドセメントのみを使ったex100シリーズと4ex100シリーズの試験体の強度回復率の比較をそれぞれ示す。図中のプロットは各試験体の強度回復率の最大値と最小値、及び平均値を示しており、比較を明確にするため各試験体の平均値を直線で結んでいる。

まず、繰り返し載荷を行った試験体に着目すると、全ての調合及び初期材齢において、最大荷重を越えて荷重が減少している段階で除荷した後再度載荷を行っても、そこで得られる最大荷重は除荷した時点での荷重の85%~99%程度にとどまっていることが確認できる。これに対し、1回目の試験以後に養生を施した試験体の強度回復率は以下のように観察された。

plainシリーズの平均強度回復率は、1回目から2回目の試験までの養生期間を7日としたplain-1シリーズにおいて1.05、1回目から2回目の試験までの養生期間を28日としたplain-4シリーズにおいて1.08程度と観察され、繰り返し載荷試験体と比較して自己回復機能が発現されたと判断できる。これに対し、4plainシリーズの平均強度回復率は、0.93~0.97程度にとどまり、繰り返し載荷試験体と比較しても自己回復機能の発現による強度回復は認められなかった。これは初期材齢が一週の段階では確

認された「殻」と「コア」の関係が崩れ、材齢を置くことによって水和反応が進展し、未水和の状態が残っていた「コア」部分が水和してしまったため、自己回復機能が発現しなかった結果と考えられる。

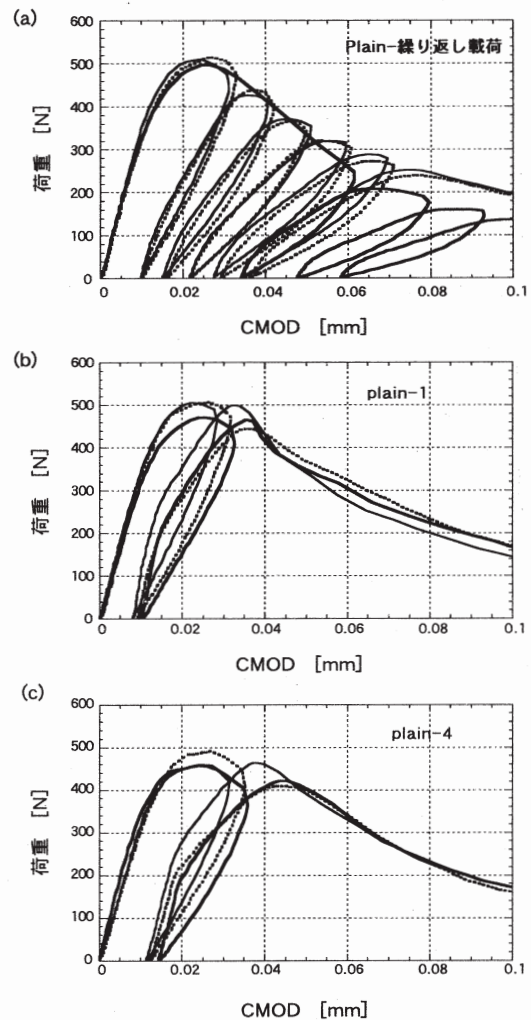


図3 plainシリーズの荷重—CMOD関係

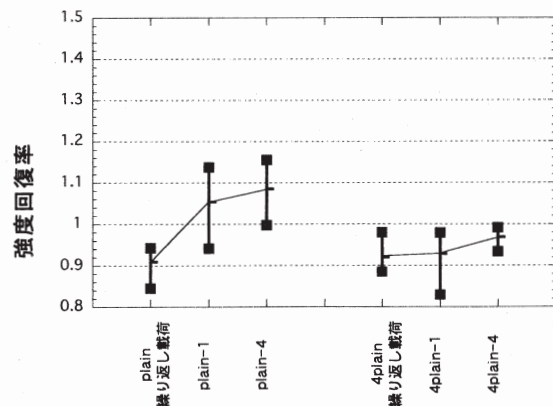


図4 plain及び4plainシリーズの強度回復率

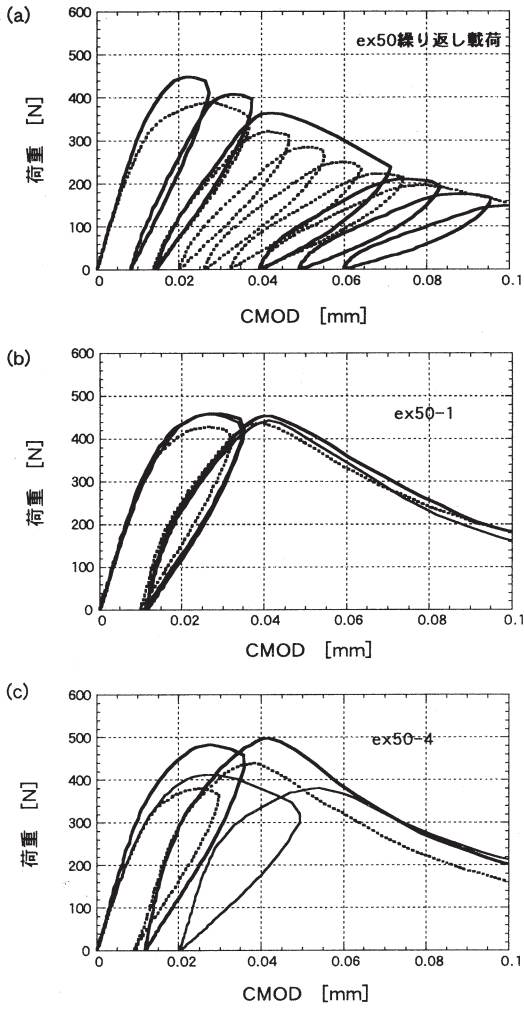


図5 ex50シリーズの荷重-CMOD関係

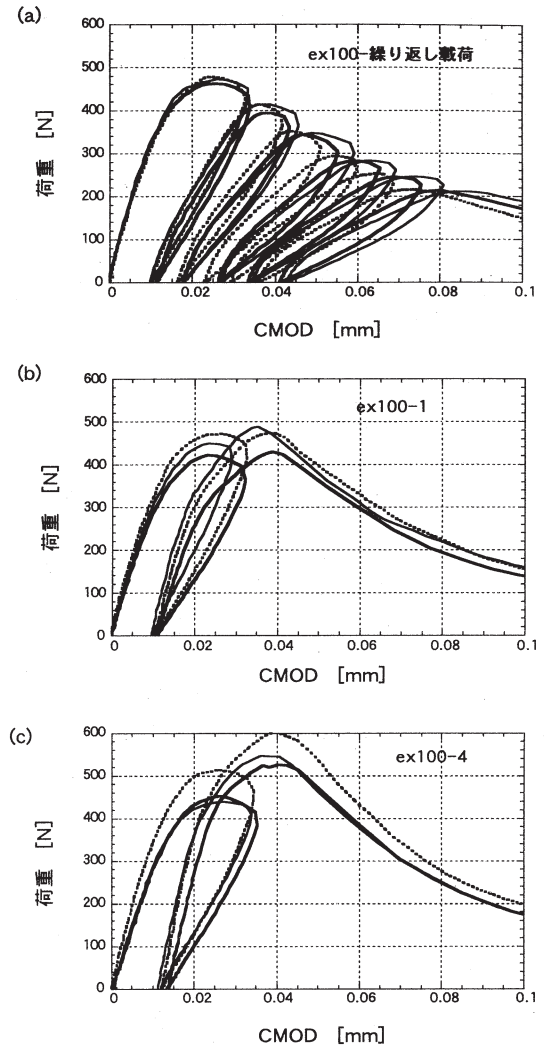


図7 ex100シリーズの荷重-CMOD関係

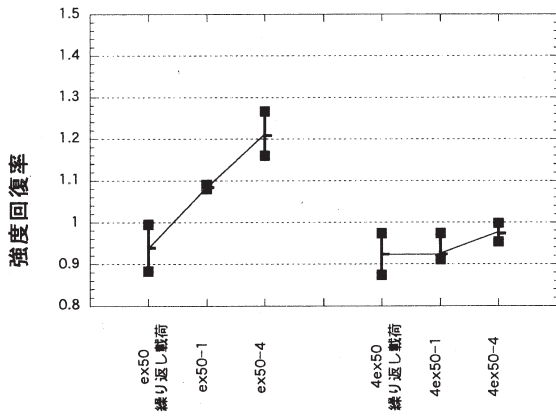


図6 ex50及び4ex50シリーズの強度回復率

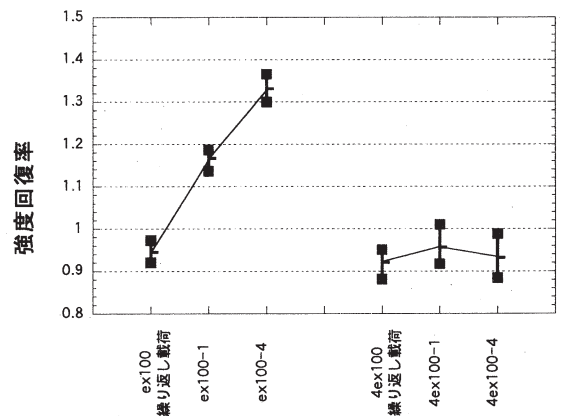


図8 ex100及び4ex100シリーズの強度回復率

ex50シリーズの平均強度回復率は、1回目から2回目の試験までの養生期間を7日としたex50-1シリーズにおいて1.09、1回目から2回目の試験までの養生期間を28日としたex50-4シリーズにおいて1.21程度と観察され、plainシリーズと比較してより大きな強度回復率が見られた。これは、粒子径の大きいセメント粒子が多く含まれるため、「コア」として未水和の状態が残っていた部分が多かった結果と考えられる。これに対し、4ex50シリーズの平均強度回復率は、0.93~0.97程度にとどまり、繰り返し载荷を行った試験体と比較しても自己回復機能の発現による強度回復は認められなかった。これは、4plainシリーズと同様、粗粒ポルトランドセメントを混入した場合でも、材齢に伴って水和反応が進展し、未水和の状態が残っていた「コア」部分が水和してしまったため、初期材齢が一週の段階では確認された「殻」と「コア」の関係が崩れ、自己回復機能が発現しなかったためと考えられる。

ex100シリーズの平均強度回復率は、1回目から2回目の試験までの養生期間を7日としたex100-1シリーズにおいて1.17、1回目から2回目の試験までの養生期間を28日としたex100-4シリーズにおいて1.34程度と観察され、plainシリーズやex50シリーズと比較してもかなり大きな強度回復率が見られた。これは、粒径の大きいセメント粒子がより多く含まれており、「コア」として未水和の状態が残っていた部分がより多かったためと考えられる。これに対し、4ex100シリーズの平均強度回復率は、0.94~0.96程度にとどまり、繰り返し载荷を行った試験体と比較しても自己回復機能の発現による強度回復は認められなかった。このことから、粗粒ポルトランドセメントのみを混入した場合でも、材齢に伴う水和反応が進展し、未水和の状態が残っていた「コア」部分が水和してしまったため、自己回復機能が発現しなかったものと考えられる。

以上の実験結果より、次のように結論付けられる。即ち、初期材齢が7日の場合は、繰り返し载荷を行った試験体と比較しても明らかに自己回復機能の発現による強度回復が確認できた。特に、粗粒ポルトランドセメントを多く用いる程、大きな強度回復率が得られている。言い換えると、セメント粒径が大きい程、セメント粒子自体が自己カプセル化する機構がより顕著となる。但し、初期材齢が28日の場合は、粗粒ポルトランドセメントを用いた場合でも自己回復機能の発現による強度回復は確認できなかった。即ち、粗粒ポルトランドセメントを用いて未水和のままの「コア」部分を大きく残そうとしても、材齢の増大に伴い水和反応が進展してしま

い、強度を回復させる程の「コア」として残らなかったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの自己回復機能に与えるセメント粒子径の影響度を実験的に明らかにした。その要約を以下に示す。

- (1)セメント粒子の自己カプセル化による自己回復機能は、短い材齢においてより明確に発現される。
- (2)普通ポルトランドセメントから小さいセメント粒子を除いた粗粒ポルトランドセメントを使用することにより、自己回復機能の発現による強度回復は顕著となる。
- (3)材齢が長くなると、粗粒ポルトランドセメントであっても、自己回復機能の発現による強度回復は見られない。

今後は更に粒子径の大きいセメントを用いるなどセメントの粒径をパラメータとした評価が必要となると考えられる。また、セメント粒子の自己カプセル化、及び自己回復現象の理論的解明に取り組み、それらに基づいて実際の構造物の使用期間を念頭においた、更に長い材齢に対する自己回復機能の発現の可能性を確認することも重要な課題といえる。

【謝辞】 本研究は平成7年度から平成9年度までの3年間に受けた科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)）（代表者：三橋博三、研究課題番号07555466）による「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」の一部である。また、粗粒ポルトランドセメントは住友大阪セメント（株）に御提供頂いた。ここに記し、心より謝意を表す。

参考文献

- 1) 大濱嘉彦・三橋博三：建設のニューフロンティア構想と先端材料，技報堂出版，（1995）
- 2) 江川幸一：超先進構造・材料としての知的材料
(1) - 知的材料とは何か - ，機械の研究，Vol. 44，No. 7，pp. 793-799，（1992）
- 3) 航空・電子等技術審議会諮問第13号に対する答申，pp.1-82，（1989）
- 4) 菊池晋一・江川幸一：超先進構造・材料としての知的材料 (22) - 非破壊検査の知能化への一提案，機械の研究，Vol. 46，No. 4，pp.407-414，（1994）
- 5) 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）

（1999年12月17日受付 2000年5月12日受理）