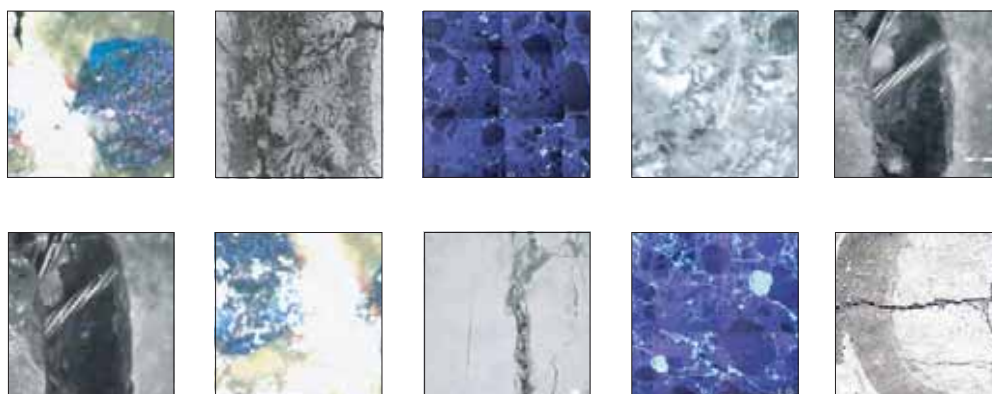


JCI年次大会08福岡大会 研究集会

# ここまでできたコンクリートの自己修復



平成20年7月10日（木）



社団法人 日本コンクリート工学協会

JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性とその利用法研究委員会



## はじめに

コンクリートなどのセメント系材料中に存在する未水和セメントが、ひび割れ等の発生により改めて水分と接触して再水和する、いわゆる”自己修復”という現象は古くから認識されている。特に、高強度コンクリートの使用が普及している今日においては、コンクリート中に多量に未水和セメントが残存していると考えられ、それらの再水和にともなう自己修復の発生やこれにともなう物性の変化に興味が持たれている。一方、単にひび割れ部での受動的な挙動を扱うだけでなく、事前にコンクリート内に配合上の工夫を施しておいたり、人工的なセンサーおよびアクチュエータ等を配置しておくことによって、修復機能を能動的機構として組み込むことも国内外で積極的に試みられている。さらには従来の電着工法なども一種の自己修復機能とみなすなど、コンクリートの自己修復に関する概念や取り組みは大きく変化しつつある。しかし、現時点では、いずれも実用化あるいは設計段階で予め考慮できるほどのデータの蓄積が十分になされているとは言い難く、コンクリートの定量的な物性改善評価には至っていない。その一方で、LOHAS (Lifestyles Of Health And Sustainability) が時代を紐解くキーワードであるとされる今日、コンクリートの長寿命化に直接結び付く自己修復機構のポテンシャルを明確にすることは、コンクリート工学や技術に対する時代の要請であるといってもよいであろう。

本研究専門委員会は、自己修復機能に関する国内外の既往の研究と最先端の研究動向を再整理するとともに、セメント系材料の自己修復機能の定量的な評価手法の提案を行うことを目的としている。さらには、マルチスケールな観点から自己修復機能を理解し、それをもとに自己修復機能を兼ね備えた高機能セメント系材料の開発に資する情報発信を行いたいと考えている。本委員会は、平成 19～20 年度の 2 年間を活動期間として土木、建築、材料各分野から集まった 12 名の委員により構成されている。現在その活動の折り返し地点を過ぎたところであり、コンクリート工学年次大会初の試みである研究集会にて、活動報告を行う機会を与えられたことに心から謝意を表したい。

本研究集会のタイトルである「ここまできたコンクリートの自己修復」は、従来の自己修復の考え方と現状は大きく異なりつつあるということを強くアピールしていきたいという、委員会の総意と受け取ってもらえればと思う。本研究集会では委員からの報告に加えて、パネルディスカッションも企画されている。本研究集会の内容が、出席していただいた皆様の耳目を集めるだけでなく、今後、自己修復に対して新たな認識を持つ端緒となることを強く願う次第である。

最後に、突然のお願いにもかかわらずパネルディスカッションにおけるパネリストをご快諾いただいた東北大学三橋博三先生、京都大学宮川豊章先生、東京大学岸利治先生、太平洋セメント山田一夫博士にここで改めて御礼申し上げるとともに、出席の皆様といっしょに研究集会開催のチャイムを待ちたいと思う。

2008 年 7 月 10 日

セメント系材料の自己修復性とその利用法研究委員会(JCI-TC075B)  
委員長 五十嵐心一(金沢大学)

JCI 年次大会 08 福岡大会 研究集会

## ここまでできたコンクリートの自己修復

(JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性とその利用法研究委員会)

### 目 次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| コンクリートの自己修復の再整理 (国枝 稔)        | 1  |
| 委員からの最新情報 <自然治癒系> (濱田 秀則)     | 7  |
| <自律治癒系> (佐川 孝広)               | 9  |
| <自律治癒系> (安 台浩)                | 11 |
| <自律治癒系> (細田 暁)                | 16 |
| <自動修復系> (西脇 智哉)               | 21 |
| パネルディスカッション話題提供(三橋 博三・東北大学教授) | 25 |

### 研究集会スケジュール

開催日時:平成 20 年 7 月 10 日(木) 9:00~12:00

場 所:福岡国際会議場 4 階 404-406 室 (JCI 年次大会 会場内)

司会 丸山 一平

|             |                   |                       |
|-------------|-------------------|-----------------------|
| 9:00-9:05   | 委員会趣旨説明, 概要など     | 五十嵐 心一                |
| 9:05-9:35   | コンクリートの自己修復の再整理   | 国枝 稔                  |
| 9:35-10:50  | 委員からの最新情報 <自然治癒系> | 濱田 秀則                 |
|             | <自律治癒系>           | 佐川 孝広                 |
|             |                   | 安 台浩                  |
|             |                   | 細田 暁                  |
|             | <自動修復系>           | 西脇 智哉                 |
| 11:00-12:00 | パネルディスカッション       |                       |
|             | [コーディネーター]        | 三橋 博三 東北大学教授          |
|             | [パネリスト]           | 岸 利治 東京大学准教授          |
|             |                   | 宮川 豊章 京都大学教授          |
|             |                   | 山田 一夫 太平洋セメント(株)中央研究所 |

## コンクリートの自己修復の再整理（国枝 稔）

平成20年7月10日  
JCI自己修復委員会研究集会  
名古屋大 国枝 稔

### コンクリートの自己修復の再整理

研究委員会での議論を中心として・・・

#### 内容

- 自己修復とは？ 自己修復に求めるもの？
- なぜ今自己修復か？
- セメント系材料の自己修復とは？
- 自己修復の可能性と今後の課題

コンクリートの自己修復に補修効果は期待できるか？  
できないとすれば何が問題なのか・・・

### 他分野での自己修復

セラミックス  
自動車塗料  
航空機  
プラスチック



傷を修復する自己修復塗料  
(日産自動車HPより)

### 期待される自己修復

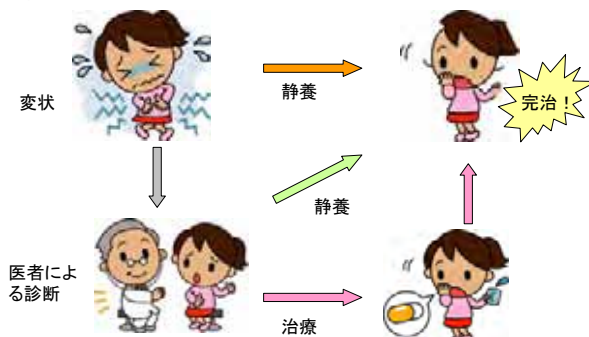


(2008年3月24日)

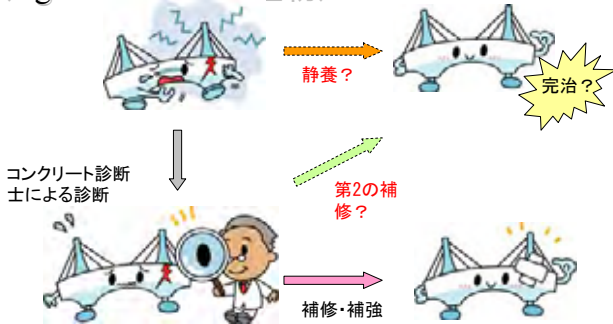
### 期待される自己修復



### 自己修復とは？ 自己修復に求めるもの？ (e.g.人体の場合)



## 自己修復とは？自己修復に求めるもの？ (e.g.コンクリート構造物)



## セメント系材料の自己修復

Properties of Concrete  
(A.M. Neville 1973)



Strength of Concrete 261

Concrete is a composite of two or more components, the strength of which is the result of the interaction of the strength of the components and the nature of the interface between them. The strength of concrete is therefore a function of the strength of the components and the nature of the interface between them. The strength of concrete is therefore a function of the strength of the components and the nature of the interface between them.

Concrete is a composite of two or more components, the strength of which is the result of the interaction of the strength of the components and the nature of the interface between them. The strength of concrete is therefore a function of the strength of the components and the nature of the interface between them. The strength of concrete is therefore a function of the strength of the components and the nature of the interface between them.

未水和セメントの再水和、炭酸塩化作用による助長

## セメント系材料の自己修復

村田二郎 セメントペーストの  
癒着について  
(土木学会誌 1952)

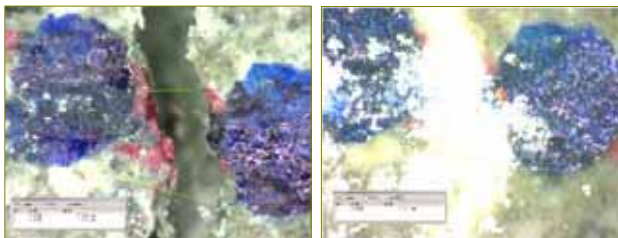


H.G. Gilkey(???), L. Turner  
(1937)の研究が引用

## なぜ今自己修復か？

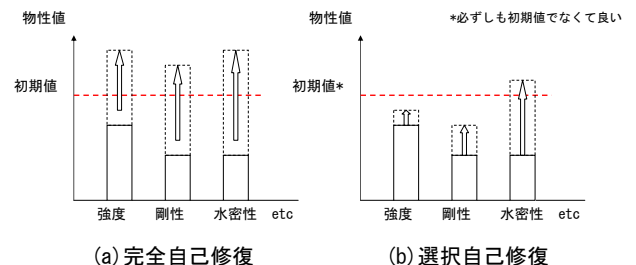
1. 見る技術の進歩
2. 性能照査型の設計
3. 耐久性も重視
4. 自己修復技術の進歩

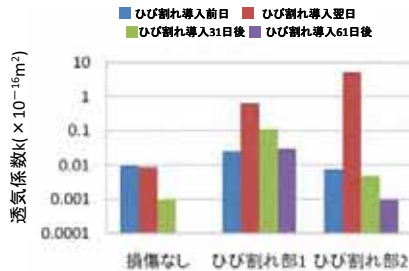
### 1. 見る技術の進歩



細田委員提供

### 2.性能照査型の設計





3. 耐久性も重視
4. 自己修復技術の進歩

<コンクリート工学に掲載されている概説等>

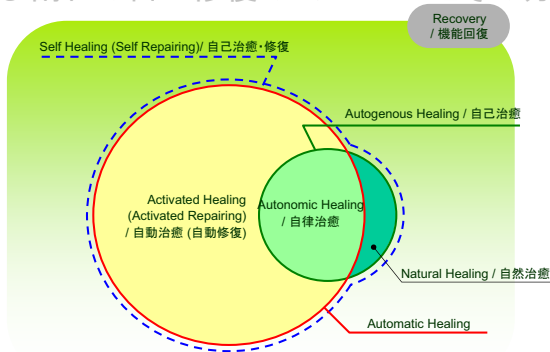
2006年1月 自己修復型コンクリート実現の夢  
(三橋博三)

2007年8月 第1回自己治癒材料に関する国際会議の様子と最新技術動向—First International Conference on Self Healing Materials—  
(細田暁・安台浩)

2007年10月 ひび割れを対象とした自己修復コンクリート  
(文献調査委員会 西脇智哉)

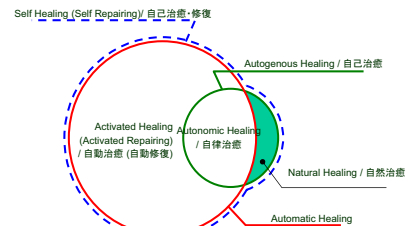
2007年11月 ひび割れ自己治癒コンクリートの国内外の研究動向  
(細田暁・岸利治)

## ひび割れの自己修復のメカニズムとその分類



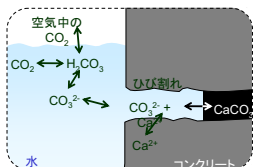
## Natural Healing / 自然治癒

製造時点では自己治癒・修復を期待していないが、内部の未水和セメントの量や再水和のための環境条件などにより、結果として治癒すること



## 水理構造物でのひび割れの閉塞

15年間の暴露を経て、幅の小さなひび割れ(0.5mm以下程度)はほとんどが自然治癒。ひび割れに充填されている物質はおもにエトリンガイト(針状結晶の)と水酸化マグネシウム

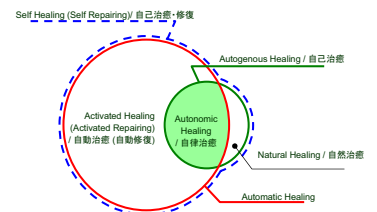


ひび割れを導入し15年間干満帯に暴露されたコンクリート供試体  
(濱田委員提供)

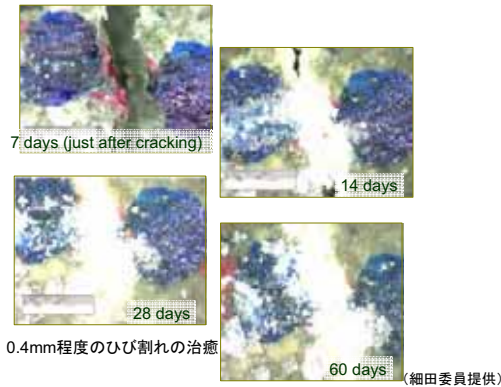
## Autonomic Healing / 自律治癒

自己治癒・修復を目的とし、従来では要求されないような要素の追加によって治癒すること

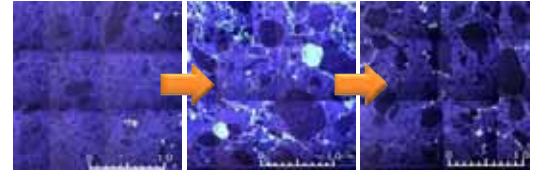
- ・ 自己治癒・修復に最適化された膨張材やフライアッシュ、未硬化エポキシ樹脂等の混和材(剤)の混入
- ・ ひび割れ幅を抑制した繊維補強セメント系材料
- ・ バクテリア



### 膨張材を利用した自律治癒コンクリート



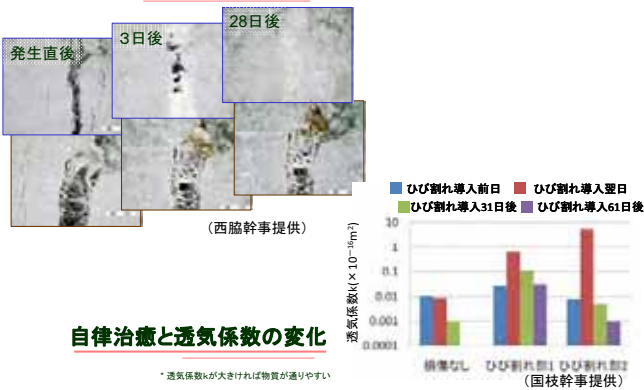
### フライアッシュを用いたマイクロクラックの自律治癒



フライアッシュの反応の遅さを積極的に利用し、コンクリートが受けた損傷を長期間継続するボザラン反応により自己修復する効果を付与  
長期材齢での凍結融解抵抗性を低下させない置換率を設定  
(水セメント比50-55%でFA置換率10-15%)

(濱ほか, 建築学会梗概集, 2006)

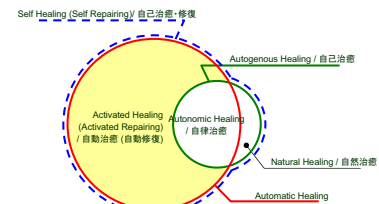
### FRCのひび割れ幅と自律治癒



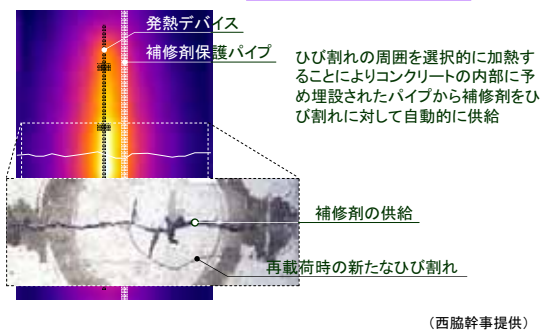
### Activated Healing (Activated Repairing) / 自動治癒 (自動修復)

人為的なものも含めた特定のトリガーによって、自動的に修復作業を開始し、治癒すること

- 発熱デバイスや補修剤内包カプセルなどの埋設



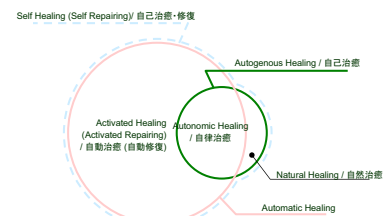
### 発熱デバイスを利用した自動治癒コンクリート



### Autogenous Healing / 自己治癒

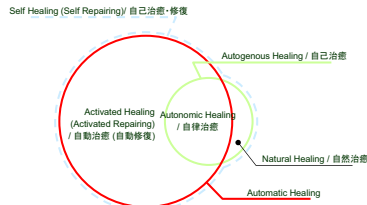
混和材等、内在物をもって治癒する材料。自律治癒および自然治癒を包含する。

特別なデバイスは用いない



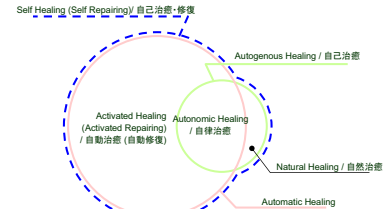
## Automatic Healing

所定の治癒を得るために、追加デバイスや混和材等を利用し治癒する材料。自動治癒および自律治癒を包含する。



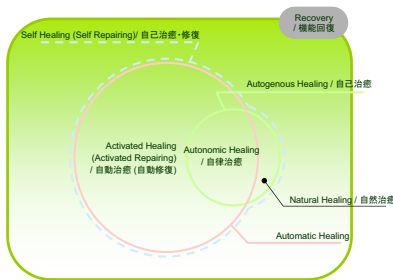
## Self Healing (Self Repairing)/ 自己治癒・修復

変状が生じた後に、従来の補修や補強の作業を必要とせずに、治癒する材料。自動治癒、自律治癒および自然治癒を包含する。



## Recovery / 性能回復

手段を問わず、コンクリートの性能が回復される事象全般



## ひび割れ自己修復の可能性と課題 (補修・補強工法として利用するために)

- ①完全自己修復or選択自己修復
- ②ひび割れ力学の克服
- ③設計のための指標と試験方法
- ④再現回数と修復履歴のトレース
- ⑤コスト
- ⑥安心感

### ①完全自己修復or選択自己修復

ひび割れ発生によってもたらされる力学特性(強度, 剛性)や耐久性の低下のうち, **最低限1つの低下が抑制もしくは元の状態まで回復すること**

### ②ひび割れ力学の克服

(若材齢時も含めて)ひび割れが“いつ”, “どこに”, “どのよう(幅, 長さ)”発生するか, 予測することが難しい

**自己修復の設計において, デメリットであり, 逆にメリットでもある!**

### ③設計のための指標と試験方法

適切な指標, 試験方法を選ぶ

強度(圧縮, 引張, 曲げ), 剛性, 物質透過(水, 空気, 塩化物イオンなど)

適切な試験条件を選ぶ

材料の種類, 環境条件, 試験材齢, 試験体寸法

④再現回数と修復履歴のトレース

何回修復可能か？今回回目の修復か？

⑤コスト

いくら費用がかかる？

⑥安心感

本当に修復できたの？

本委員会の活動



TC SHC: Self-healing phenomena in cement-based materials (Chair: Prof. Schlangen, TU-Delft) 2005-2009

と情報共有→世界へ情報発信

本委員会の報告書目次案

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 第1章  | 序論                      |
| 第2章  | 自己治癒／修復現象と定義            |
| 第3章  | 自己治癒／修復機構と技術の現状         |
| 第4章  | 自己治癒／修復の材料科学的モデル        |
| 第5章  | 自己治癒／修復効果の実験的評価         |
| 第6章  | 自己治癒／修復機能の設計への取り込みと適用事例 |
| 第7章  | 他分野における自己修復現象の取扱い       |
| 第8章  | セラミックス材料の自己修復現象（寄稿）     |
| 第9章  | JCI 研究集会 in 福岡          |
| 第10章 | 結論                      |

コンクリートの自己修復に補修効果は期待できるか？

できないとすれば何が問題なのか・・・

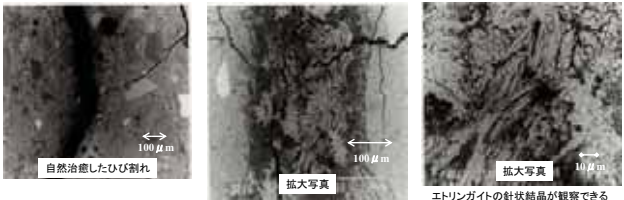
おわり

委員からの最新情報＜自然治癒系＞（濱田 秀則）

海洋環境に暴露されたコンクリートで観察されたひび割れなどの自然治癒について

九州大学大学院  
濱田 秀則

コンクリートのひび割れ部に生成されている物質  
（海洋環境 ・ 15年）

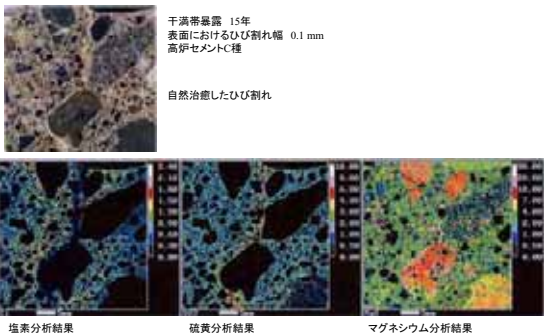


ひび割れ面に生成したエトリンガイトの針状結晶  
（海洋環境 ・ 15年）

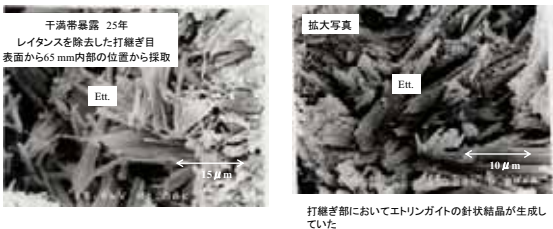


ひび割れ面に生成されたエトリンガイトの針状結晶

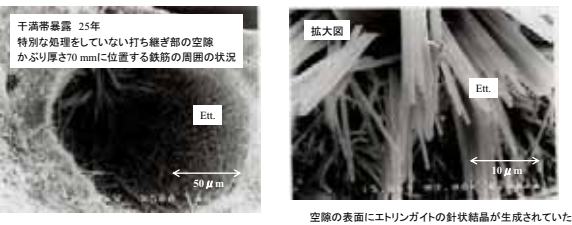
自然治癒されているひび割れ部のSEM観察結果



打継ぎ目に堆積した物質のSEM写真



鉄筋と打継ぎ面が交わる部分のSEM写真の一例



自然治癒されたひび割れ部の鉄筋の表面状態  
(海洋環境 ・ 15年)

|                              |      |      |     |
|------------------------------|------|------|-----|
| ひび割れ幅 (mm)                   | 0.3  | 0.1  | 5.0 |
| 可溶性塩化物含有量<br>(% v.s. セメント質量) | 0.45 | 0.41 | 3.2 |

鋼材表面の白色の塩化物

左: 本、自己治癒されたひび割れ部分の鉄筋

右: 自己治癒されないひび割れ部分の鉄筋

局所的な集中腐食

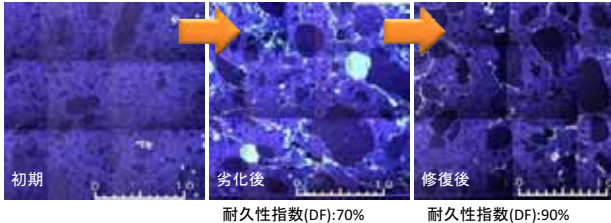
ひび割れの自己治癒が腐食状況に及ぼす影響から厚さ : 45.5mm

ま と め

- 海洋環境下に比較的長期間暴露されたコンクリートにおいては、ひび割れ、空隙、界面などにある種の物質が充填される傾向にある。
- この充填されている物質には、エトリンガイトが存在する。
- この物質の生成・充填が確認された場合、内部鉄筋の腐食が抑制されるなど、耐久性上好ましい結果が得られている。
- 環境条件とのバランスで、この充填作用が生じていることから、「自己治癒」ではなく、敢えて「自然治癒」とここでは名付けている。

委員からの最新情報＜自律治癒系＞（佐川 孝広）

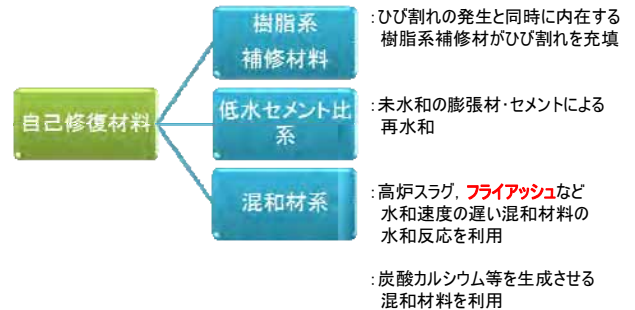
## フライアッシュを用いた自己修復コンクリート （自律治癒）



北海道立北方建築総合研究所, 北海道大学,  
室蘭工業大学, 北海道電力総合研究所, 日鐵セメント(株)  
報告者 佐川孝広(日鐵セメント)

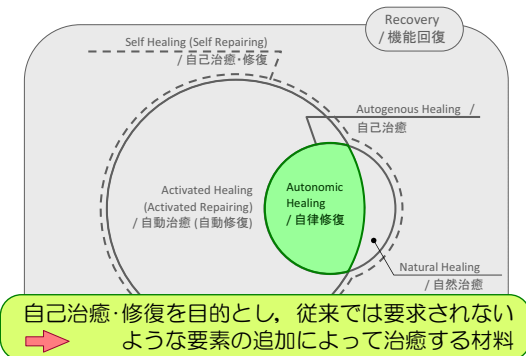
JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会 研究集会 2008/7/10

## 自己修復材料の分類



2

## Autonomic Healing / 自律治癒



## フライアッシュを用いた自己修復コンクリート

### コンセプト

フライアッシュの反応の遅さを積極的に利用し、コンクリートが受けた損傷を長期間継続するポゾラン反応により自己修復する

### 想定する劣化形態

凍害や乾燥収縮により生じた微細ひび割れ(マイクロクラック)を修復  
→マイクロクラックの成長によりコンクリートの劣化が促進される

### フライアッシュの使用方法

外割細骨材置換とし、自己修復性能を発揮しながらも、長期材齢での凍結融解抵抗性の低下を配慮してフライアッシュセメントの水和反応モデルから、置換率の範囲を定めた  
(水セメント比50-55%でFA置換率10-15%)

4

## フライアッシュを用いた自己修復コンクリートの配合設計法



5

## フライアッシュを用いた自己修復コンクリート

フライアッシュは外割細骨材置換とし、自己修復性能を発揮し、凍結融解抵抗性を低下させないフライアッシュの置換率は水セメント比50-55%でFA置換率10-15%(ポルトランドセメントに対する割合)となった

結果として、フライアッシュセメントB種を用いたコンクリートと変わらないが

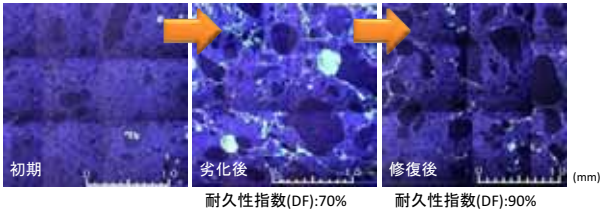
### フライアッシュセメントB種を用いたコンクリート

- ・長期強度の増進
- ・水密性の向上
- ・水和発熱、アルカリ骨材反応の抑制

といった従来いわれる性能に加え、コンクリートの自己修復性能を明らかにしたものである

6

## フライアッシュを用いた自己修復コンクリート(マイクロクラックの修復)



コンクリート表面のひび割れ観察

濱ほか、  
建築学会梗概集、2006

### 凍結融解作用により発生したひび割れ

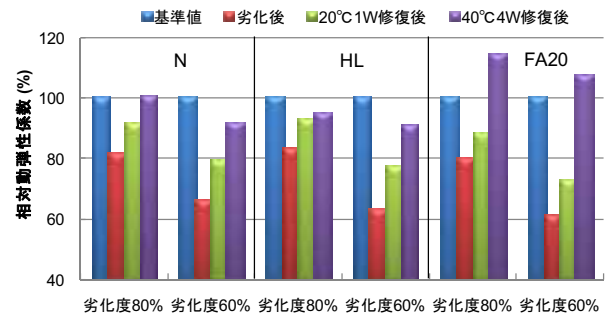
劣化後：骨材界面のひび割れが連結

修復後：骨材界面を結ぶマトリクス内のひび割れが閉塞

修復養生：  
30℃RH60%環境下にて  
コンクリート上面に水を3ヶ月間  
滞留

7

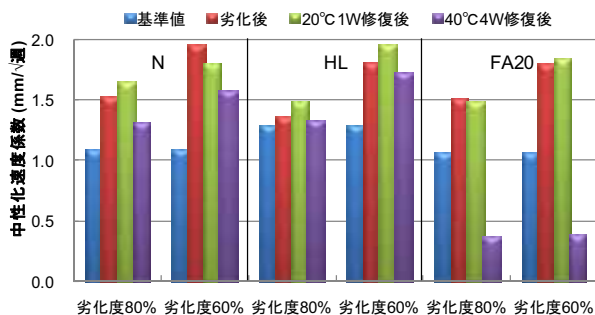
## モルタルの自己修復性能の評価(相対動弾性係数)



N: 普通セメント HL: 早強・低熱混合セメント FA20: HL+FA20%

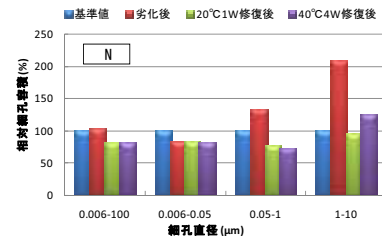
8

## モルタルの自己修復性能の評価(中性化速度係数)

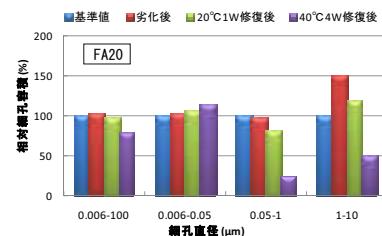


N: 普通セメント HL: 早強・低熱混合セメント FA20: HL+FA20%

9



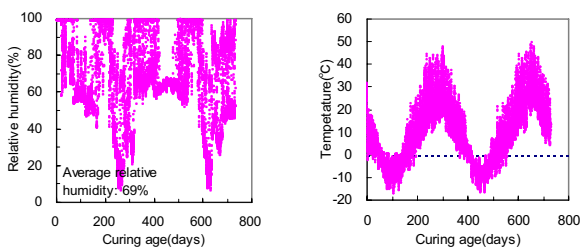
劣化前後での細孔範囲ごとの  
相対細孔容積の変化



10

## 暴露コンクリート内部の温湿度測定

旭川市 スラブ深さ2mm 打ち込み後～材齢約2年まで



フライアッシュの水和反応モデルから求めた【一夏の】修復養生は、  
・20℃水中養生換算で約4週  
・40℃水中養生換算で約1週 と推定される

詳細は暴露コンクリートの水和反応解析、コア強度測定にて検討予定

11

## まとめと今後の課題

フライアッシュを外割置換した自己修復コンクリート(モルタル)の  
高い自己修復ポテンシャルが確認された

- ・自己修復作用に及ぼす環境条件、部材条件の影響
- ・自己修復性能を検証する促進試験方法の開発

が今後の課題となる



※江別市、旭川市、室蘭市にて  
自己修復コンクリートの大型試験体の  
暴露試験中

12

委員からの最新情報＜自律治癒系＞（安 台浩）

平成20年7月10日JCI自己修復委員会

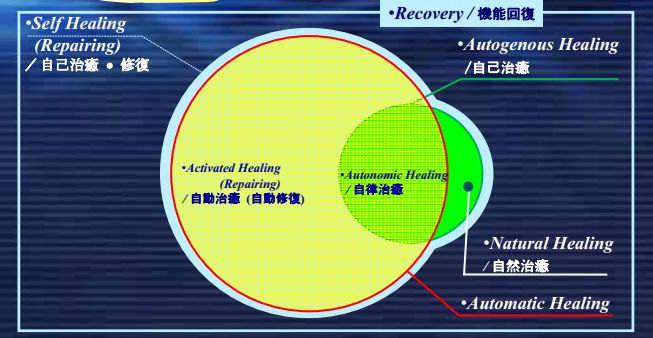
## 能動的なひび割れ自己治癒機能を有するコンクリートの開発（自律治癒）

東京大学 生産技術研究所  
安 台浩, 岸 利治  
特任助教, 准教授

横浜国立大学  
JR東日本 フロンティアサービス研究所



## ひび割れ自分治癒の分類(自律治癒)



•Autogenous Healing / 自己治癒

•Natural Healing / 自然治癒

•Automatic Healing

•Activated Healing (Repairing) / 自動治癒 (自動修復)

•Self Healing (Repairing) / 自己治癒・修復

•Recovery / 機能回復

•Autonomic Healing / 自律治癒

The concrete that has special elements for the objective of self-healing compare to the conventional concrete

Special admixtures such as optimized expansive agent, flyash and unhydrated epoxy for the self-healing

Fiber reinforced cementitious materials

## 研究の背景

Underground-Water Leaks and Underground Railway Station.

Rain-Water Leaks a Concrete Viaduct. (to inside Station Under the Viaduct)



Under Viaduct Station

Underground Station



Execution situation of a waterproofing (A yellow part is a sheet waterproofing.)



Leaked water by a ceiling part



Drain for leaked water

## 漏水に起因する構造物の劣化事例



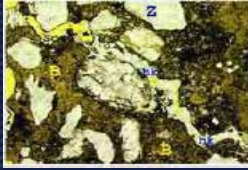
## ひび割れ自己治癒現象

18<sup>th</sup> Century bridge in Amsterdam

Existing Structure

Logically speaking, these centuries-old constructions should have crumbled and collapsed ages ago. So why didn't they?

Solutions !! ==> Self healing of Cracks



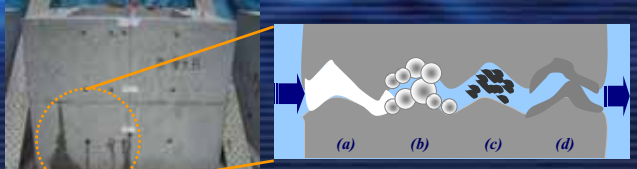
The porosity of the bricks leads to the precipitation of dissolved calcite in cracks

"The answer is chalk, calcium. The mortar used in these ancient bridges contains a lot of chalk compared to modern standards. Whenever a crack appears the water they're standing in is sucked inside. In modern concrete that's the beginning of the end, but in these old brick bridges the water will dissolve the chalk in the mortar, the chalk will flow into the cracks, and then set again. Hey Presto! Natural self-healing. Chalk can fulfill exactly the same function in ultra-modern self-healing concrete"

The chalk has more than 60% CaCO<sub>3</sub>

REF) Microlab, Delf University of Technology

## 代表的な自己治癒メカニズム



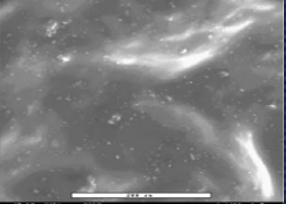
• Possible causes of self healing

(a) Formation of calcium carbonate or calcium hydroxide

(b) Continued hydration of cement particles

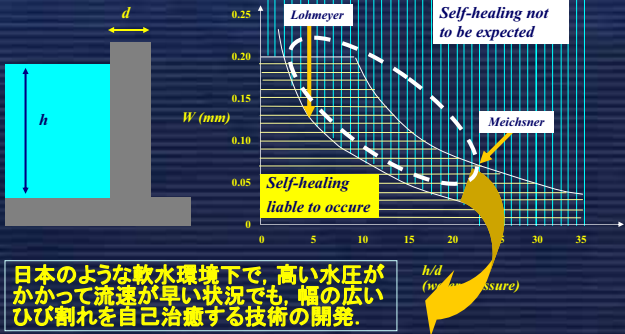
(c) Sedimentation of particles

(d) Swelling of the cement matrix or Expansion of the cement matrix (mineral admixture)



### 自己治癒限界ひび割れ幅の拡張 (日本のような軟水環境下での自己治癒性能の発現に向けて)

一方、アメリカやヨーロッパの硬水環境下では、普通のコンクリートでも、ひび割れの自己治癒をある程度期待できる。



### 通常のW/Cでの自己治癒の困難さ (W/C=45%, ひび割れ導入後、28日水中養生)

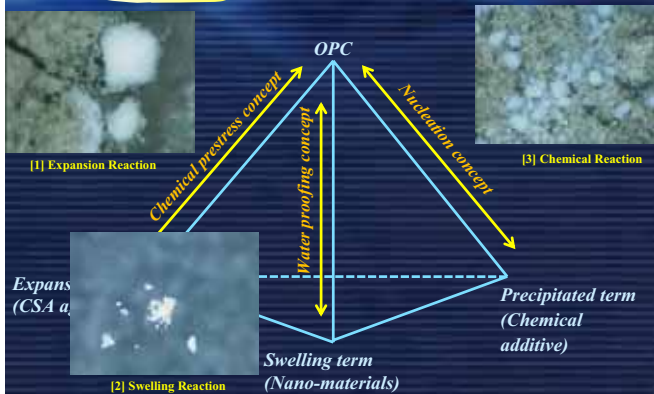


- Ordinary Portland Cement (OPC)
- OPC 90% + Expansive agent 10%

Microscopy images of OPC paste and OPC paste incorporating expansive agent at normal water/binder ratio (0.45). [Under water supply until 28 days]

The sufficient hydration by surplus water for normal water to binder concretes  
→ The reduction of its self-healing capability

### 種々の化合物を利用した新しい自己治癒材料の設計概念



### 厳しい条件設定による自己治癒性能評価 (軟水環境下、通常のW/C、長期材齢で有効な技術の開発)

W/B = 0.45%, Chemical Admixtures [SPI, SPII, SPIII]

Properties of workability according to chemical admixtures [Mini Slump Test]

Basic Design

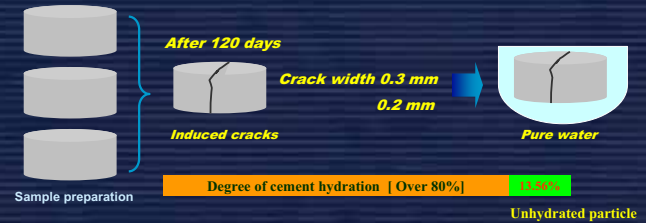
Upgrade Design I

Upgrade Design II

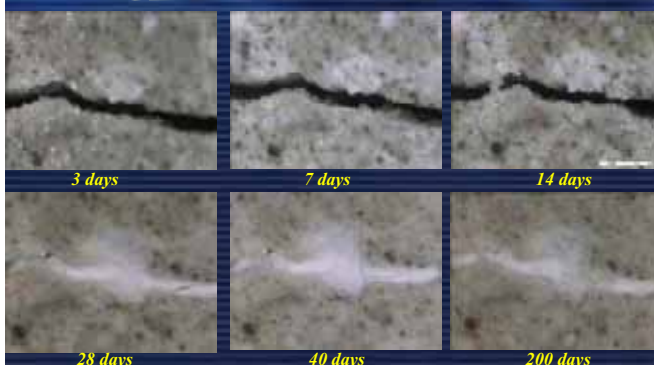
Investigation of Hydration products

1day, 3days, 7days, 28days, 90days

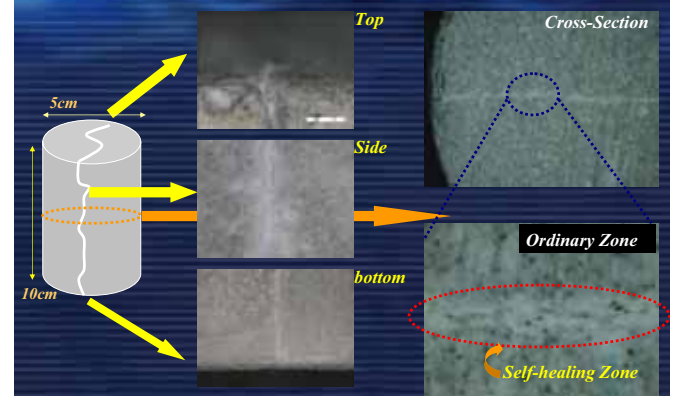
XRD, SEM-EDS



### プロトタイプの自己治癒性能 (軟水、通常W/C、長期材齢で発現するが、自己治癒速度が遅い)

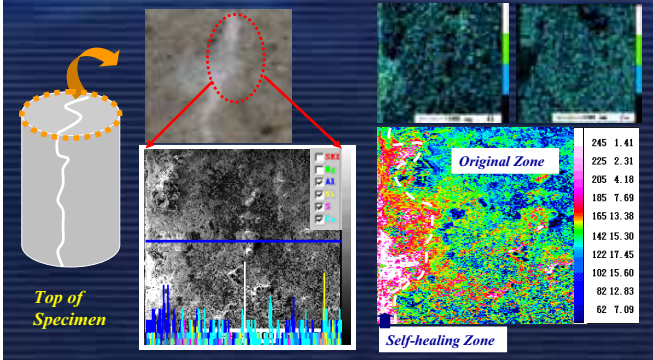


### ひび割れでの自己閉塞状況 (プロトタイプ)



## ひび割れ部への アルミナ-シリケートイオンの拡散

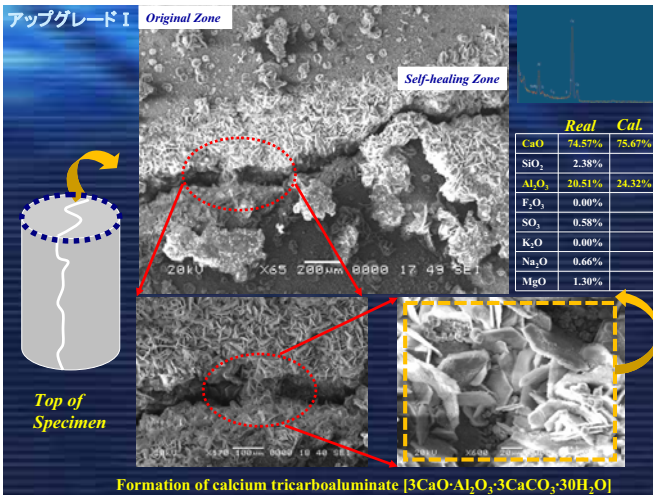
(プロトタイプ)



## ひび割れ自己治癒速度を増加させた 自己治癒組成物 (アップグレードⅠ)



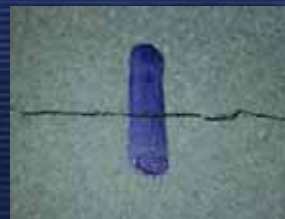
Acceleration of self-healing ability using mineral admixtures



## 自己治癒速度と化学的安全性を 両立させた新たな自己治癒組成物

アップグレードⅡ

• Self-Healing Behavior [High Potential]



• Induced Crack after 120 days



• Under Water Supply until 3 days

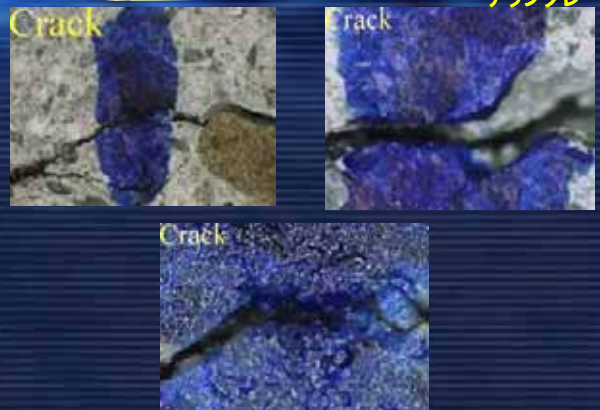
## 化学的安全性と自己治癒速度を 増加させた 自己治癒組成物 (拡大写真)

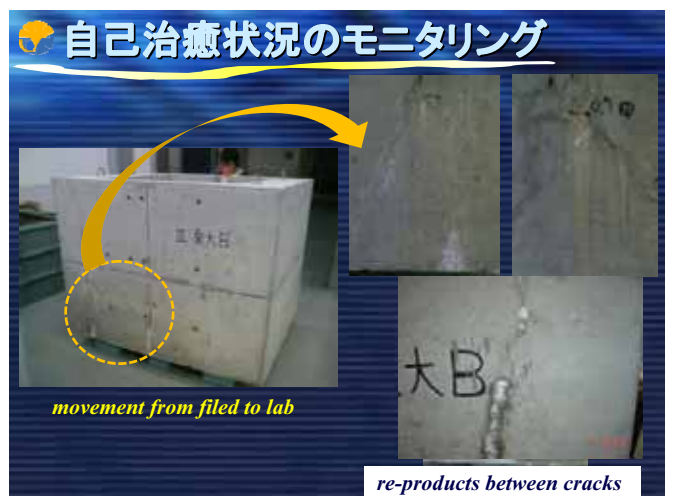
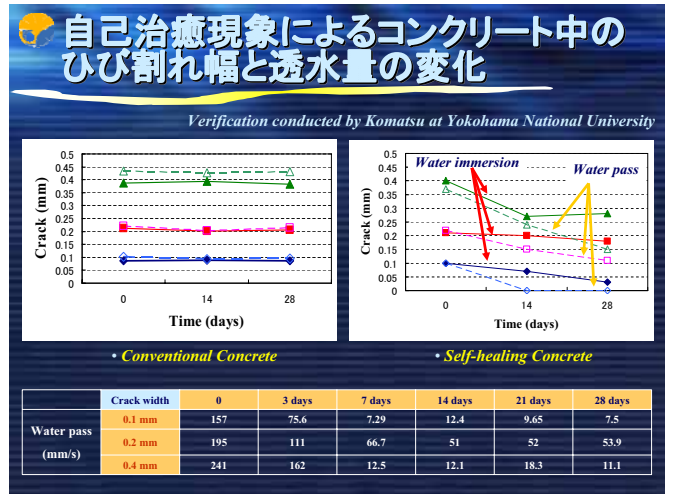
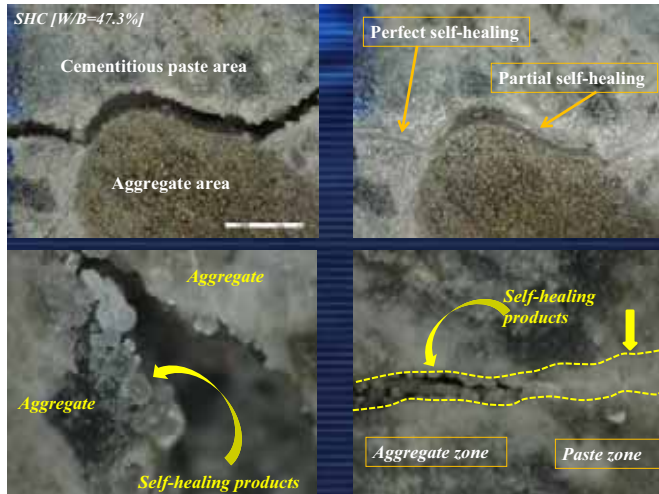
アップグレードⅡ



## 自己治癒組成物のコンクリートへの適用

アップグレードⅡ





## 期待される自己治癒コンクリートの適用先と漏水の現状



## トンネルの背面防水工と漏水状況



## News media & Patent pending



委員からの最新情報＜自律治癒系＞（細田 暁）

混和材を添加した  
ひび割れ自己治癒コンクリート

横浜国立大学  
細田 暁

本日お話する内容

自己治癒コンクリートを取り巻く国内外の状況  
第1回Self Healing Materials国際会議  
  
混和材による自己治癒コンクリートの研究について  
プロトタイプ（自己充填コンクリート+膨張材）  
ひび割れ間の析出物をメインとする自己治癒コンクリート  
自己治癒コンクリートの実環境下での性能、耐久性  
実構造物での試験施工  
ひび割れ間を常に水が流れる状態での治癒性能

第1回の国際会議の概要

2007. 4/18-20, Noordwijk, Netherland  
14カ国, 196人, 12招待講演, 75口頭発表, 50以上のポスターセッション  
(Victor Li教授の招待講演, 12のセメント系材料の口頭発表, うち3件が岸・細田・JRグループ)

| 主要研究分野(10分類)                               | 学術委員会 (Scientific Committee)                                                                                                             |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Asphaltic materials                        | DSM Research, The Netherlands                                                                                                            |
| Bio-inspired technical materials           | University of Bristol, UK                                                                                                                |
| Cementitious materials                     | Institut National Polytechnique de Grenoble, France                                                                                      |
| Composites and hybrids                     | MPI of Colloids and Interfaces, Germany                                                                                                  |
| Metals                                     | Air Force Office of Scientific Research, USA                                                                                             |
| Paints and other coatings                  | University of Michigan, USA                                                                                                              |
| Structural polymers                        | Shanghai Jiao Tong University, China                                                                                                     |
| Biological systems                         | CSIRO, Australia                                                                                                                         |
| Theoretical models related to self healing | Eindhoven University of Technology, The Netherlands                                                                                      |
| Characterization of self healing behavior  | University of Illinois, USA<br>University of North Carolina, USA<br>University of California, USA<br>Federal Highway Administration, USA |

セメント系材料口頭発表の概要

"Is there a market for self-healing cement-based systems in the building industry?"  
(Prof. Breugel)

"Microbial calcification enhances concrete self-healing properties"  
(TU Delft)

"Improvement of concrete durability with the aid of bacteria"  
(Ghent University)

"Computer simulation study of concrete's self-healing capacity due to unhydrated cement nuclei in interfacial transition zones"  
(TU Delft)

"Self-healing of early age cracks in concrete"  
(TU Delft)

東大・横国・JR東日本から3件

"Self-healing in concrete materials"  
(Prof. Victor Li)

ECCでひび割れを細かく制御、ひび割れ治癒(強度回復)、フライアッシュの活用

次回国際会議は2009年、米国イリノイで

TU Delft Microlab  
Dr. Schlangen  
Prof. Breugel

RILEM TC-SHCの委員長  
岸先生

Delft Center for Materialsは、現在自己治癒分野に対する国家的な支援を受けながら、研究を集中的に行っている。総額は4年間で15億円程度で、Civil Engineeringの分野はその内の約1/4を分担し、年間1億円程度

自己治癒コンクリートのプロトタイプ

自己充填コンクリート

workability  
uniform  
high strength  
high durability

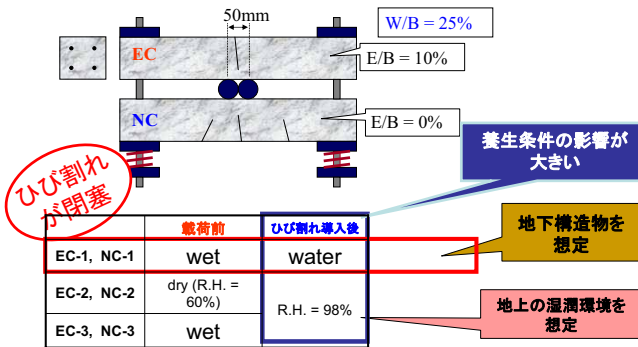
緻密な細孔組織の形成  
low water/binder ratio  
hydration heat  
autogenous shrinkage  
ひび割れ  
唯一の欠陥部  
膨張材の使用  
収縮の補償  
(prototype of SCC, 岡村ら)

Large amount of Expansive Additive  
(more than compensation for shrinkage)  
→ chemical prestress

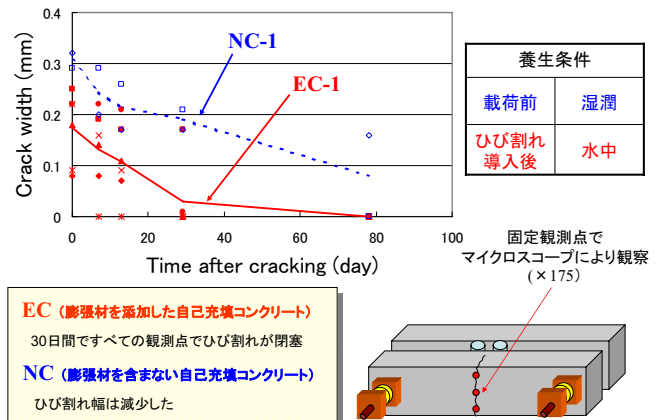
Tensile Force (Steel Bar)  
Compressive Force as Reaction Force  
Chemical Prestress

### 膨張材を添加した自己充填コンクリートの自己治癒効果 (2001)

持続荷重が作用する状態でひび割れ幅保持



### 水中養生開始後のひび割れ幅の変化 (2001)

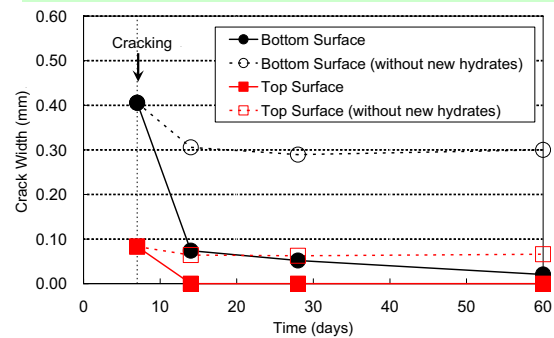


### ひび割れの治癒機構 (Expansive Concrete, in water)



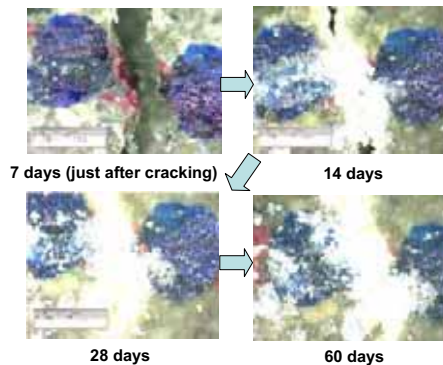
### ひび割れ間への析出をメインとした自己治癒コンクリート(JR東日本, 2004)

(W/B=45%, E=50kg/m<sup>3</sup>,  
Cementitious Crystalline Material = 4kg/m<sup>3</sup>)



### ひび割れ間への析出をメインとした自己治癒コンクリート(JR東日本, 2004)

治癒機構は、主としてCaCO<sub>3</sub>の析出



水分供給条件や膨張作用の有無が  
ひび割れ自己治癒効果に及ぼす影響

Effects of curing conditions and expansion  
in Crack Self Healing Concrete



2007/02/15

複合構造研究室  
05GC120 平野勝彦  
指導教員 細田暁助教授

## 実構造物が受けるような温度履歴後の自己治癒確認

与えた温度履歴について

地下構造物の壁面(幅100cm)を想定  
脱型14日、環境温度20℃と設定

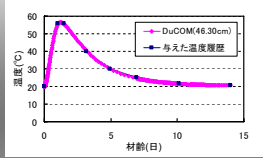
DuCOM(数値解析ソフト)より得た壁厚方向  
の中央部の温度履歴を与えた

温度履歴シリーズひび割れ閉塞状況

ひび割れ導入後  
0日

14日

28日



ひび割れ幅の閉塞機構

解析結果と実際に与えた温度履歴

ひび割れ近傍のコンクリートの追加膨張はなく、新水和析出物の析出のみ

新水和析出物の析出時期

新水和析出物の析出が早く、28日の段階でほぼ全体が閉塞

実構造物が置かれる厳しい環境を想定したコンクリートに関わらず  
膨張作用の有無シリーズよりも優れた治癒性能を示した

## 施工時の材料分離を想定した自己治癒確認

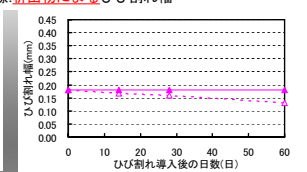
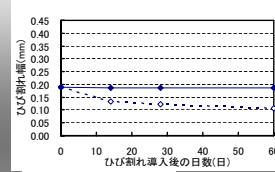
膨張材+ $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (W/P=60%)

消石灰+ $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (W/P=60%)

養生方法:水中養生

実線:元のひび割れ幅

点線:析出物によるひび割れ幅



新水和析出物の析出時期

新水和析出物の析出がW/P=50%よりも早く、ひび割れ導入後0～14日の減少量が大きい

膨張作用の有無シリーズ

温度履歴シリーズ

硬化体組織が比較的粗

W/P=60%シリーズ

既往の研究における自己治癒機構(W/P=25～45%)

未反応分の追加膨張が主要因

未反応の粉体を意図的に残す

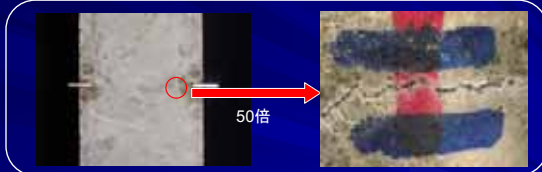
本研究における自己治癒機構(W/P=50, 60%)

新水和析出物の析出が主要因

硬化体組織が比較的粗である方が治癒性能が高い

## ひび割れ自己治癒コンクリート における膨張の拘束の影響

Effects of restraining reinforcement for expansion on crack Self-Healing of Concrete



複合構造研究室

0343005 石渡大嗣

指導教員 細田 暁 助教授

## 既往の研究②(ひび割れ固定方法の既往の研究)

山田ら(水粉体比45%での自己治癒)の試験体

鋼製外枠



1体当たり50万円程度

ひび割れを導入し、鋼製の外枠で荷重  
をかけたままひび割れ幅を保持

問題点

取り扱いが困難

1体当たりのコストが高くなる

## 本研究の目的



より簡易な方法を用いて自己治癒の試験体を作製



新水和物の析出に関し、膨張の拘束の影響を調べる

## 本研究の実験概要

試験体作製(W/P=50%)

拘束条件

・D16で拘束された供試体

・D11で拘束された供試体

・無筋供試体

配合条件

・膨張材量20kg+炭酸リチウム

・膨張材量20kg+重曹

・膨張材量30kg+炭酸リチウム

・石灰量14kg+炭酸リチウム

養生中の自己治癒を  
顕微鏡で  
経時的に観察

60日後、漏水試験によって  
ひび割れ内部の治癒状況確認

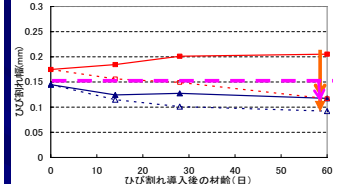
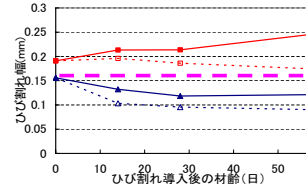


拘束供試体のひび割れ導入・固定方法



無筋供試体のひび割れ導入固定方法

## 観測した表面ひび割れ幅の経時変化



膨張材20kg/m<sup>3</sup> + 重曹

石灰量14kg/m<sup>3</sup> + 炭酸リチウム

無筋 (元のひび割れ幅)

無筋 (析出物によるひび割れ幅)

D16拘束 (元のひび割れ幅)

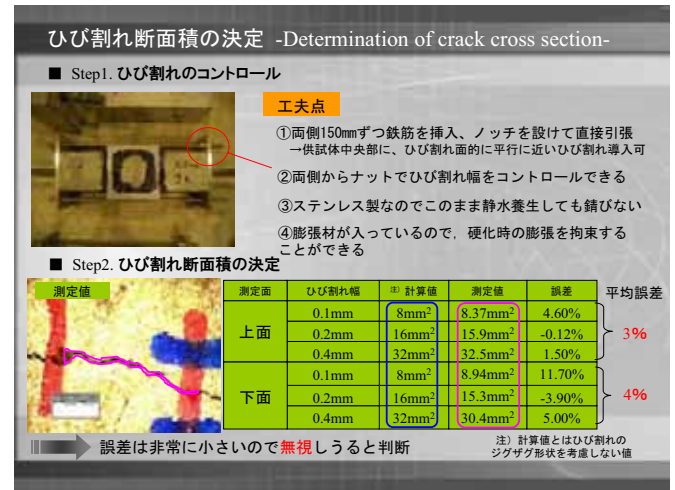
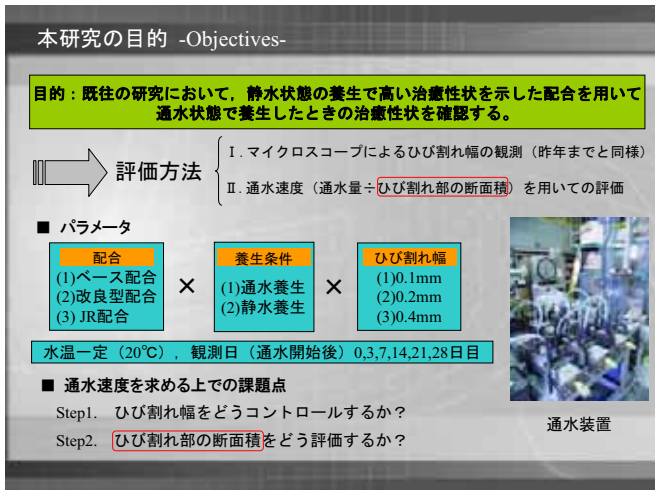
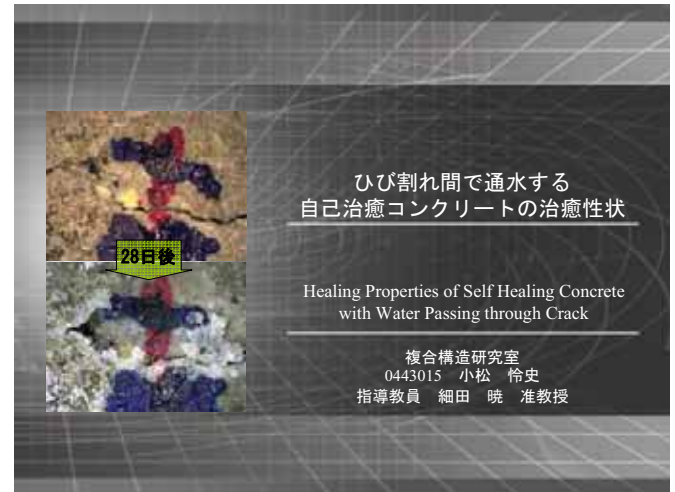
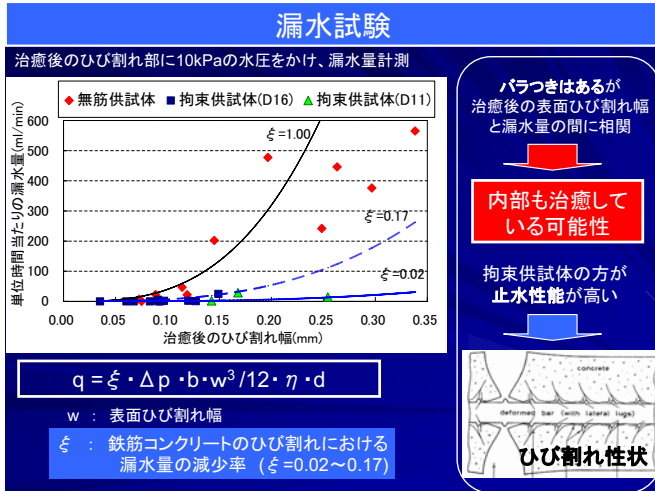
D16拘束 (析出物によるひび割れ幅)

拘束供試体において 追加膨張を確認

無筋供試体の方が 新水和物の析出量が多い

空隙構造が比較的粗の方が 新水和物の析出が多い可能性

膨張材30kg/m<sup>3</sup> + 炭酸リチウム



### コンクリート配合 -Concrete mix-

■ 示法配合

| No. | セメント<br>種類 | 水粉体比<br>W/P<br>% | 水<br>W<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | セメント<br>C<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 膨張材<br>E<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 混和材<br>Z1 Z2<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 細骨材<br>S<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 粗骨材<br>G<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 混和剤<br>A<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----|------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| (1) | N          | 47               | 175                            | 370                               | 0                                | 0                                    | 809                              | 920                              | 1.48                             |
| (2) | N          | 47               | 175                            | 333                               | 14.8                             | 22.2                                 | 809                              | 920                              | 7.4                              |
| (3) | L          | 45               | 170                            | 328                               | 50                               | 0                                    | 839                              | 950                              | 1.51                             |

Memo

主たる治癒機構

CO<sub>2</sub>の供給源

- ・ 空気中のCO<sub>2</sub>
- ・ 混和材から

Ca<sup>2+</sup>の供給源

- ・ コンクリート中
- ・ 混和材から

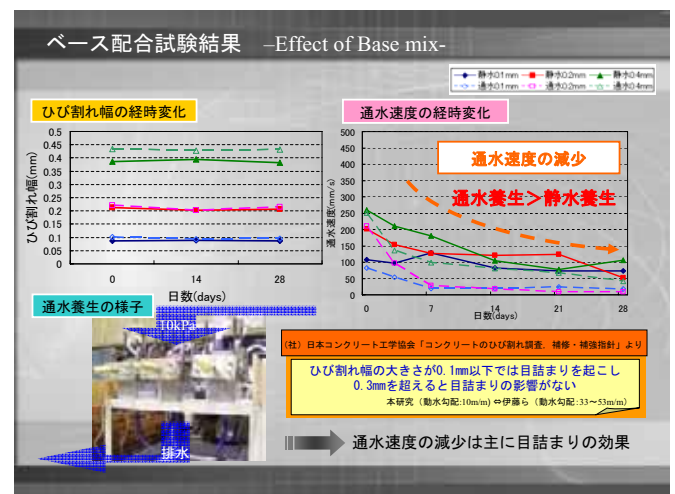
配合 (2) 改良型配合

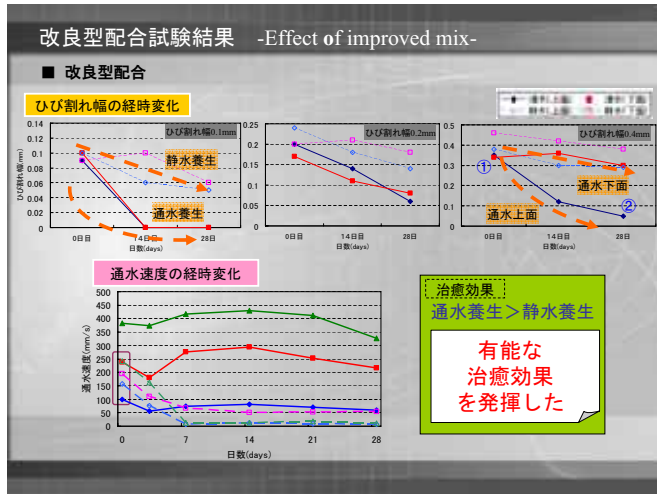
1. 炭酸カルシウムだけでなく  
複数の析出物による閉塞
2. 膨張材の膨張作用 etc...

配合 (3) JR配合

炭酸イオン・カルシウムイオン供給による  
炭酸カルシウムの析出

コンクリートの耐久性 セメント協会 EDWARDSONより



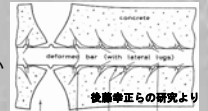


# 結論 -Conclusion-

- 通水状態で養生した供試体でも治癒効果は確認された。
- 通水状態の供試体のほうが治癒効果は大きい。
- 治癒限界初期通水の範囲以上でも治癒性状が見られた。
- 通水速度の減少は、**コンクリートの目詰まり**＋治癒成分の析出効果

## 課題 -Suggestions-

- 目詰まりの影響を正しく評価
  - 目詰まりが内部でどのように起っているか
  - 不明な析出物は共同研究先で分析中
- 鉄筋が入った場合など、ひび割れ幅が変わったときの析出物による治癒効果の検証
- 析出物とpHの関係を正しく把握



委員からの最新情報＜自動修復系＞（西脇 智哉）



Activated Repairing / 自動修復

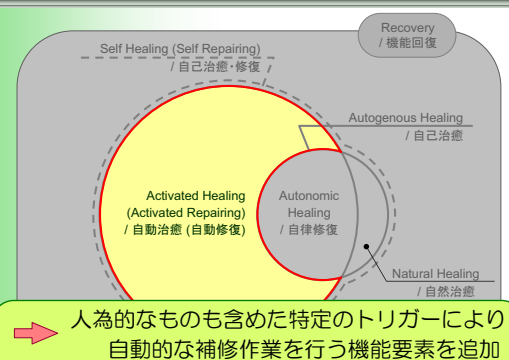
山形大学 地域教育文化学部  
西脇 智哉

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #1



Activated Repairing / 自動修復



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #2



自己修復機能の付与

**「パッシブな」自己修復機能**

- ✓外部からの入力を必要としない自己修復
- ✓ガラスパイプやマイクロカプセルの利用

**「アクティブな」自己修復機能**

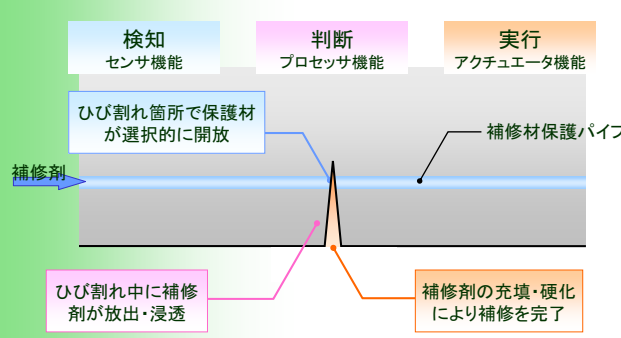
- ✓外部からの入力を併用し、より確実に自己修復を機能させる
- ✓発熱デバイスの利用

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #3



「パッシブな」自己修復機能

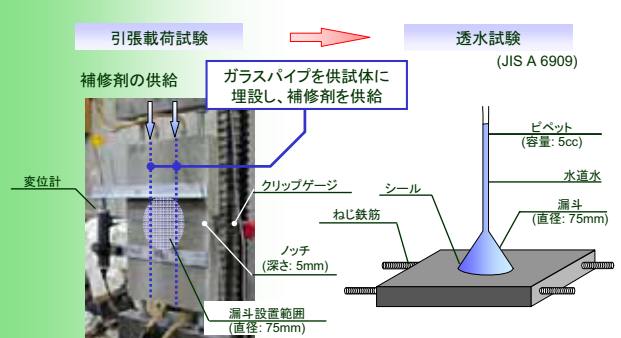


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #4



実験概要

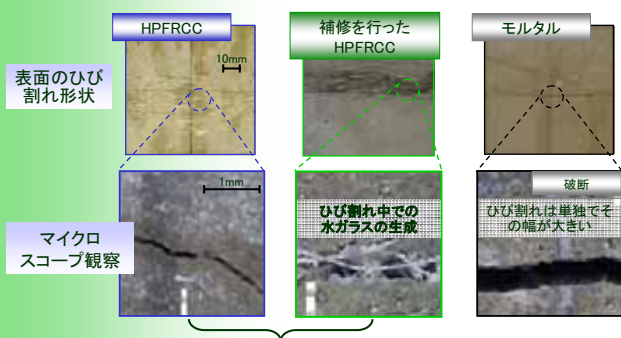


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #5



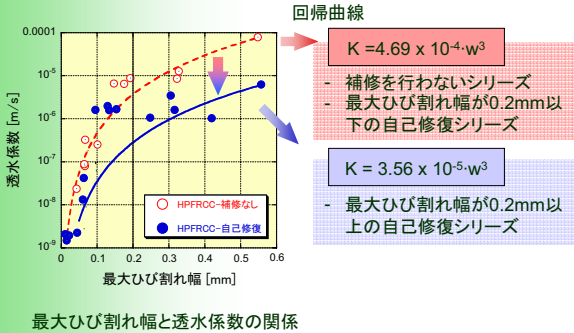
実験結果 ー引張試験



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #6

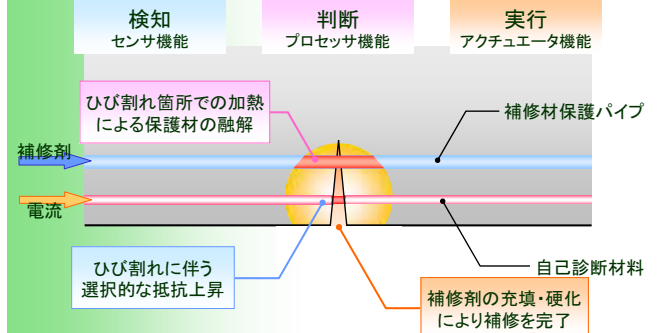
## 実験結果 ー 透水試験



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 97

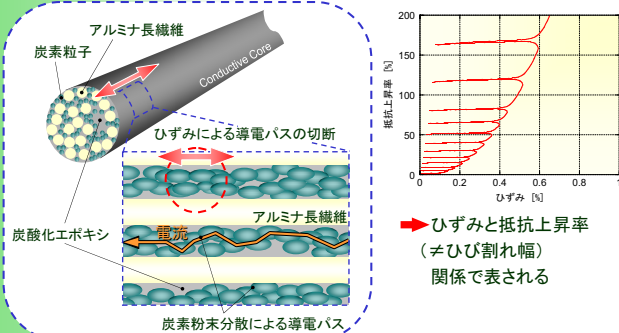
## 「アクティブな」自己修復機能



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 98

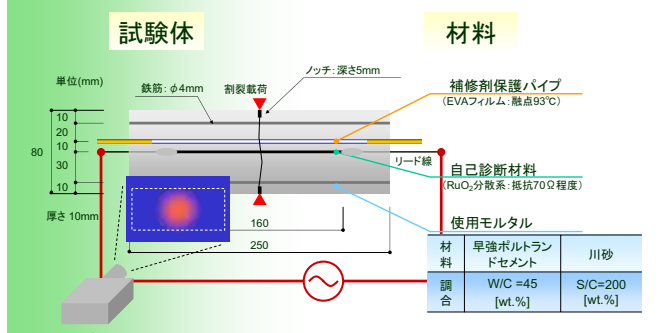
## 自己診断材料(発熱デバイス)



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 99

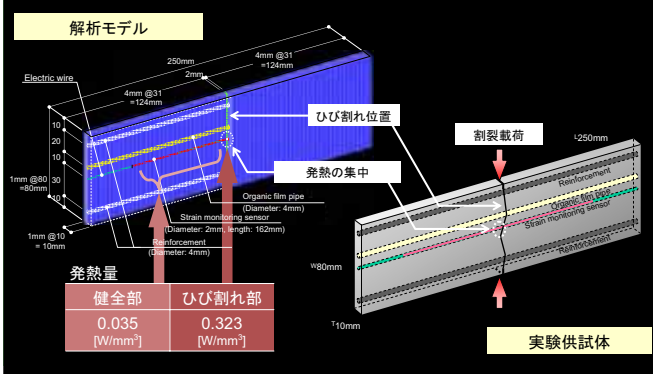
## 実験概要



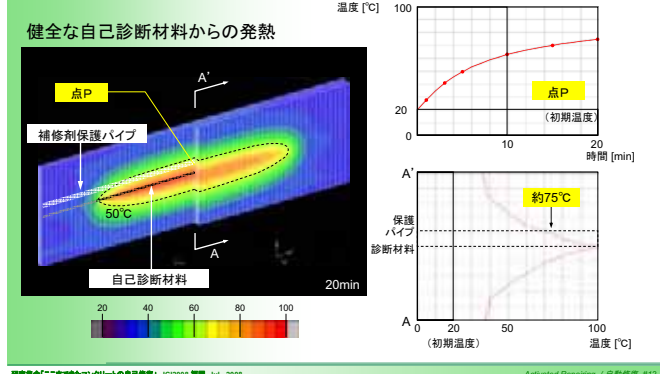
研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 100

## 熱伝導解析による検討



## 解析結果

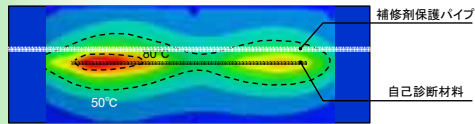


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

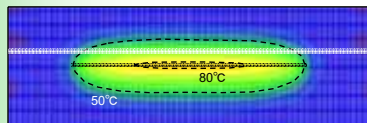
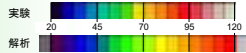
Activated Repairing / 自動修復 102

## 実験および解析結果

Yamagata University



通電開始 20min



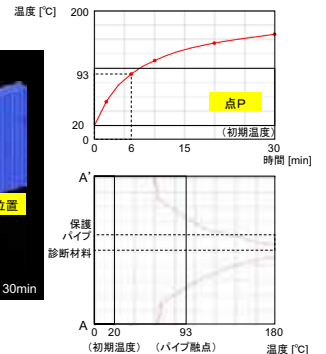
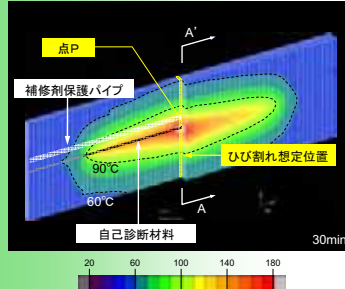
研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #13

## 解析結果

Yamagata University

ひび割れ箇所での選択的な発熱

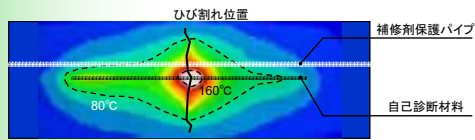


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

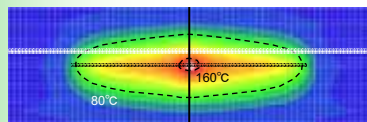
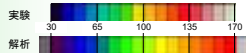
Activated Repairing / 自動修復 #14

## 実験および解析結果

Yamagata University



通電開始 30min



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #15

## 補修剤の放出と硬化

Yamagata University

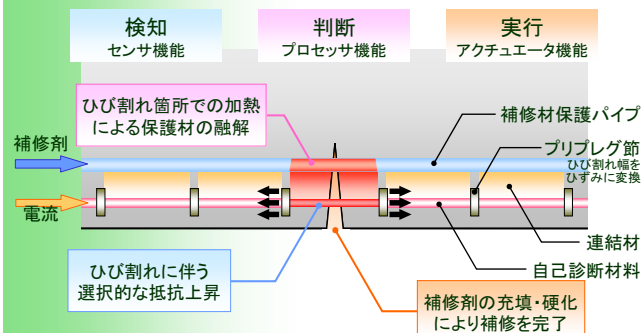


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #16

## 自己修復ユニットの改良

Yamagata University



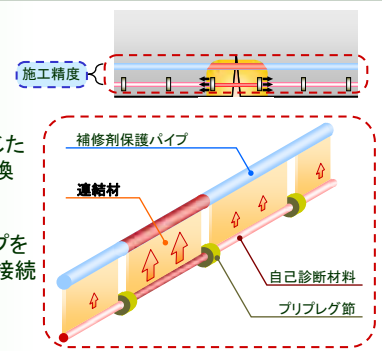
研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #17

## 連結材ユニット

Yamagata University

- プリプレグ節を介して、生じたひび割れ幅をひずみに変換
- 自己診断材料と保護パイプを熱伝導に優れる連結材で接続

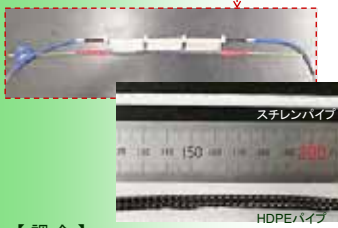


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡, Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #18

## 供試体

### 【連結材ユニット】



### 【調合】

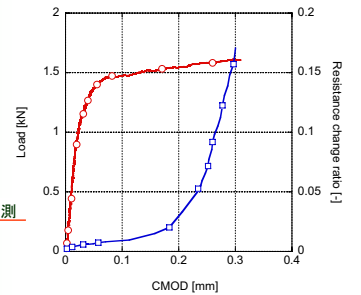
| W/B | SP/B | SF/B | S/B | Vf      |
|-----|------|------|-----|---------|
| 45% | 0.9% | 15%  | 45% | 0.5vol% |

※ B: 結合材 (C+SF), C: 普通ポルトランドセメント, SF: シリカフューム, SP: 高性能減水剤, S: 5号珪砂, Vf: ポリエチレン短繊維 (長さ6mm) の混入体積比

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #19

## 引張载荷試験

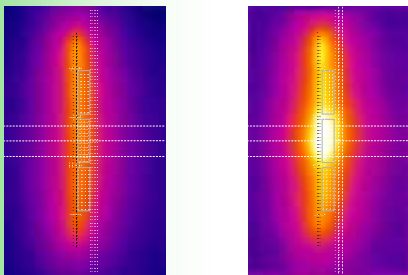


開口変位(CMOD)と荷重および抵抗変化率の関係

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #20

## 通電試験



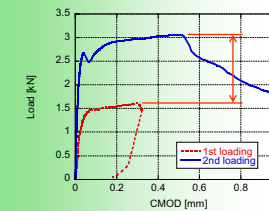
ひび割れ導入前  
(40V, 20分間)

ひび割れ導入後  
(50V, 20分間)

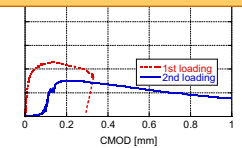
研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #21

## 引張強度の回復

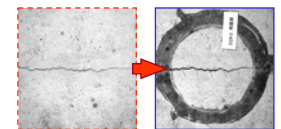
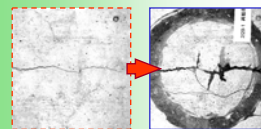


強度回復率 =  $\frac{\text{再載荷時最大荷重}}{\text{初回載荷時最大荷重}}$



補修剤の放出あり ⇒ 強度回復率: 84~190%

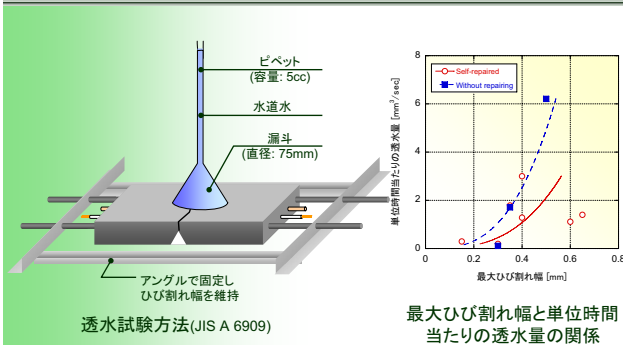
補修剤の放出なし ⇒ 強度回復率: 60~86%



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #22

## 透水試験



透水試験方法 (JIS A 6909)

最大ひび割れ幅と単位時間  
当たりの透水量の関係

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #23

## まとめ

### 「パッシブな」自己修復機能

- ✓ 脆性パイプを利用し、簡易な形で自己修復機能の付与が可能である

### 「アクティブな」自己修復機能

- ✓ ひび割れ部への選択的な加熱と補修剤の放出・重点が可能である

### 今後の課題

- ✓ 「スパゲッティ症候群」に陥らない手法は？
- ✓ 継続的な機能発現のためには？

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

Activated Repairing / 自動修復 #24

## パネルディスカッション話題提供（三橋 博三・東北大学教授）



パネルディスカッション話題提供

---

### 自己修復型コンクリート実現の夢

---

東北大学大学院 三橋博三

研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 81



### 話題提供

---

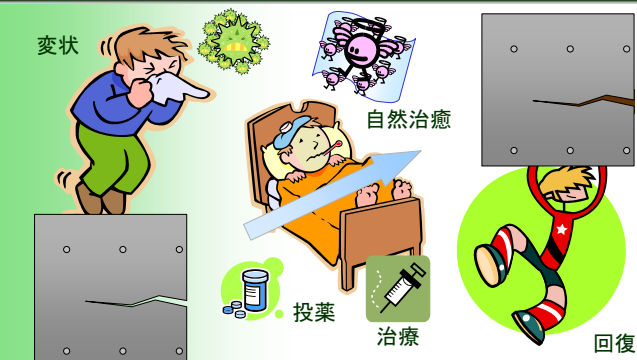
- 自然から学ぶ自己修復
- インテリジェント材料・自己修復材料
- 求められる自己修復とは
- リスクの回避
- 夢をあきらめない！

研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 82



### 自然から学ぶ自己治癒・自己修復

---



研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 83



### 生命体と工業材料

新谷紀雄, 武田邦彦: 生命体から学ぶ工業材料の自己修復  
 「ここまで来た自己修復材料」, pp.13-50, 本書編纂会, 2003

|       | 生命体の例                                      | 工業材料の例                                                         | 関連する修復                                             |
|-------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 微小な損傷 | ■ 臓器上皮の修復<br>⇒ 細胞の分裂・増殖に伴って、接着性糖タンパクが結合    | ■ 耐熱鋼のクリープボイド焼結<br>⇒ 高温下で溶質原子が拡散しボイド内に流入                       | 【生命体】<br>角膜や粘膜<br>【工業材料】<br>高分子劣化等                 |
| 表面の損傷 | ■ 傷口の止血<br>⇒ 破れた血管からの血小板が傷口で凝血し、乾くとかさばとなる  | ■ セラミックス表面の修復<br>⇒ 表面のSiCが高温下で酸化されSiO <sub>2</sub> となり、クラックを修復 | 【生命体】<br>骨のモデリング<br>【工業材料】<br>不動態被膜の修復<br>金属表面での析出 |
| 大きい損傷 | ■ 創傷の修復<br>⇒ 繊維芽細胞の欠損部への遊走とコラーゲン産生により肉芽を形成 | ■ 高分子のクラックの修復<br>⇒ 分散させたカプセルが破損し、中の接着剤がクラックを充填                 | 【生命体】<br>骨折や肝臓の修復<br>【工業材料】<br>コンクリートや複合材料         |

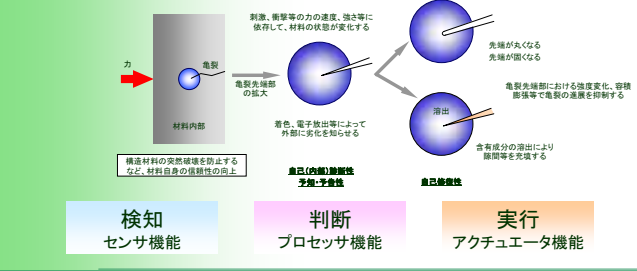
研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 84



### インテリジェント材料

---

科学技術庁『航空・電子等技術審議会諮問第13号に対する答申』より  
 劣化、損傷などが生じた場合、機能発現の状況や材料自身の寿命を判断し、音や電子放出などで警報を発したり、その進展の抑制あるいは自己修復するような航空・宇宙・原子力用先端材料

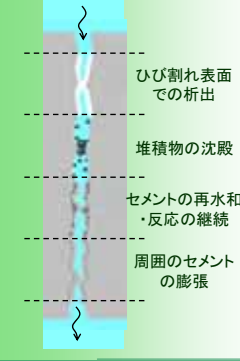


研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 85



### コンクリートへの適用

---



【適用例】

- 未水和セメントの水和による癒着
- ひび割れ表面での析出
- 電気化学手法(析出の促進)
- 繊維補強によるひび割れの微細化
- 粗粒セメント・フライアッシュの利用
- 未硬化エポキシの利用
- 膨張剤の利用
- バクテリアの利用
- 追加デバイスの利用

研究集会「ここまで来たコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008
自己修復型コンクリート実現の夢 86

## 自己治癒・自己修復

～ 広辞苑より  
 【治癒】病氣やけががなおること  
 【修復】建造物などを繕い直すこと

### 自己治癒 autogenous healing



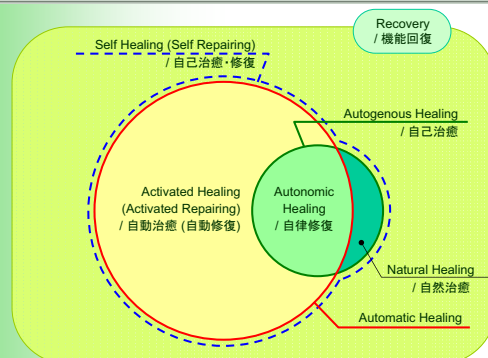
未水和セメントの水和による癒着  
 ひび割れ表面での析出  
 電気化学手法(析出の促進)  
 繊維補強によるひび割れの微細化  
 粗粒セメント・フライアッシュの利用  
 未硬化エポキシの利用  
 膨張剤の利用  
 バクテリアの利用  
 追加デバイスの利用

### 自己修復 self-repairing

研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #7

## 自己治癒？自己修復？



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #8

## シーズ と ニーズ

適用できる場所は？  
 適用すべき場所は？



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #9

## 求められる自己修復とは？



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #10

## リスクの回避

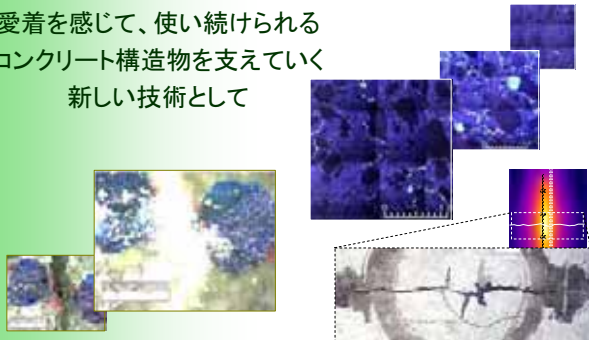


研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #11

## 夢をあきらめない！

愛着を感じて、使い続けられる  
 コンクリート構造物を支えていく  
 新しい技術として



研究集会「ここまできたコンクリートの自己修復」 JCI2008 福岡 Jul., 2008

自己修復型コンクリート実現の夢 #12

JCI-TC075B セメント系材料の自己修復性とその利用法研究委員会

委員名簿

|     |                        |            |
|-----|------------------------|------------|
| 委員長 | 五十嵐 心一                 | 金沢大学       |
| 幹事  | 国枝 稔                   | 名古屋大学      |
| 幹事  | 西脇 智哉                  | 山形大学       |
| 委員  | 浅野 幸男                  | 岐阜大学       |
| 委員  | 安 台浩                   | 東京大学       |
| 委員  | 稲田 裕                   | 清水建設(株)    |
| 委員  | 閑田 徹志                  | 鹿島建設(株)    |
| 委員  | 佐川 孝広                  | 日鐵セメント(株)  |
| 委員  | 白坂 徳彦<br>(2008 年 4 月～) | 太平洋セメント(株) |
| 委員  | 濱田 秀則                  | 九州大学       |
| 委員  | 平尾 宙<br>(～2008 年 4 月)  | 太平洋セメント(株) |
| 委員  | 細田 暁                   | 横浜国立大学     |
| 委員  | 丸山 一平                  | 名古屋大学      |