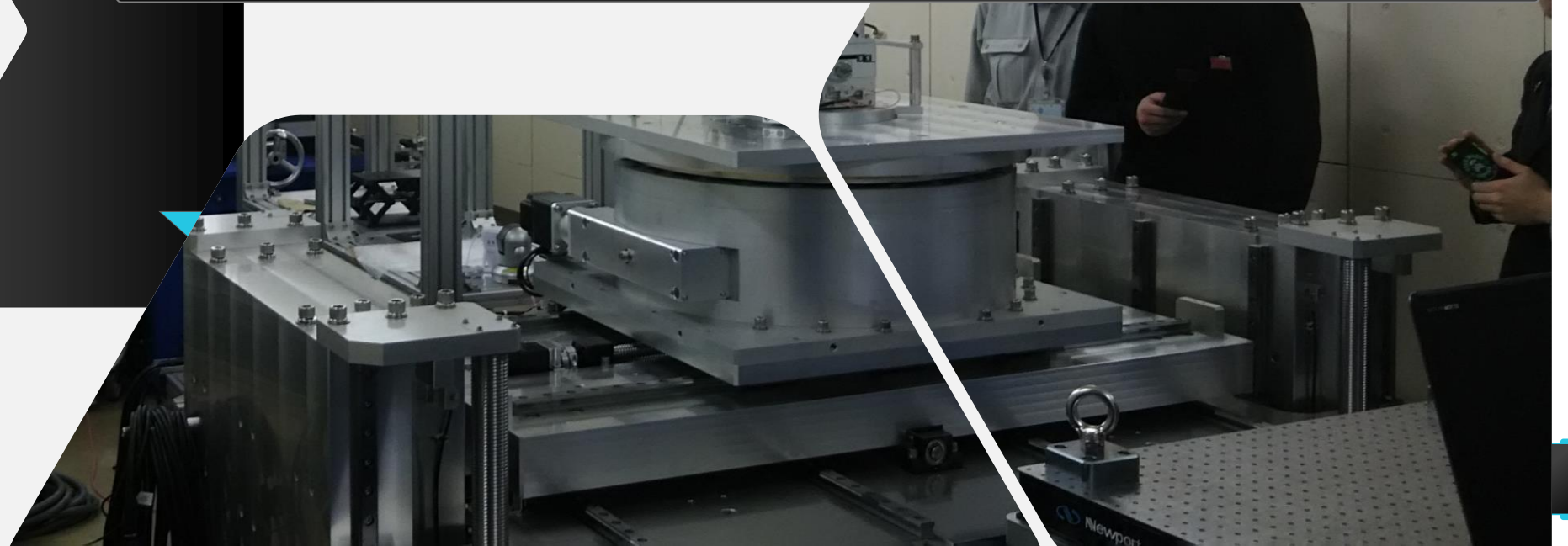


コンクリートの爆裂イメージング(仮)

東京理科大学 理工学部 建築学科 兼松 学



建設分野・コンクリート工学分野におけるキーワード

高性能・高機能化
高耐久化

高強度化(高層化)

環境配慮性能の向上(副産物利用)

維持管理・高経年化

情報化(BIM他)

新技術(ドローン・3Dプリンティング・ジオポリマー)



高経年化対策への対応・維持保全技術の高度化・レジリエンス

維持保全投資は10兆円程度で推移しているが、建設投資に占める割合は増加傾向

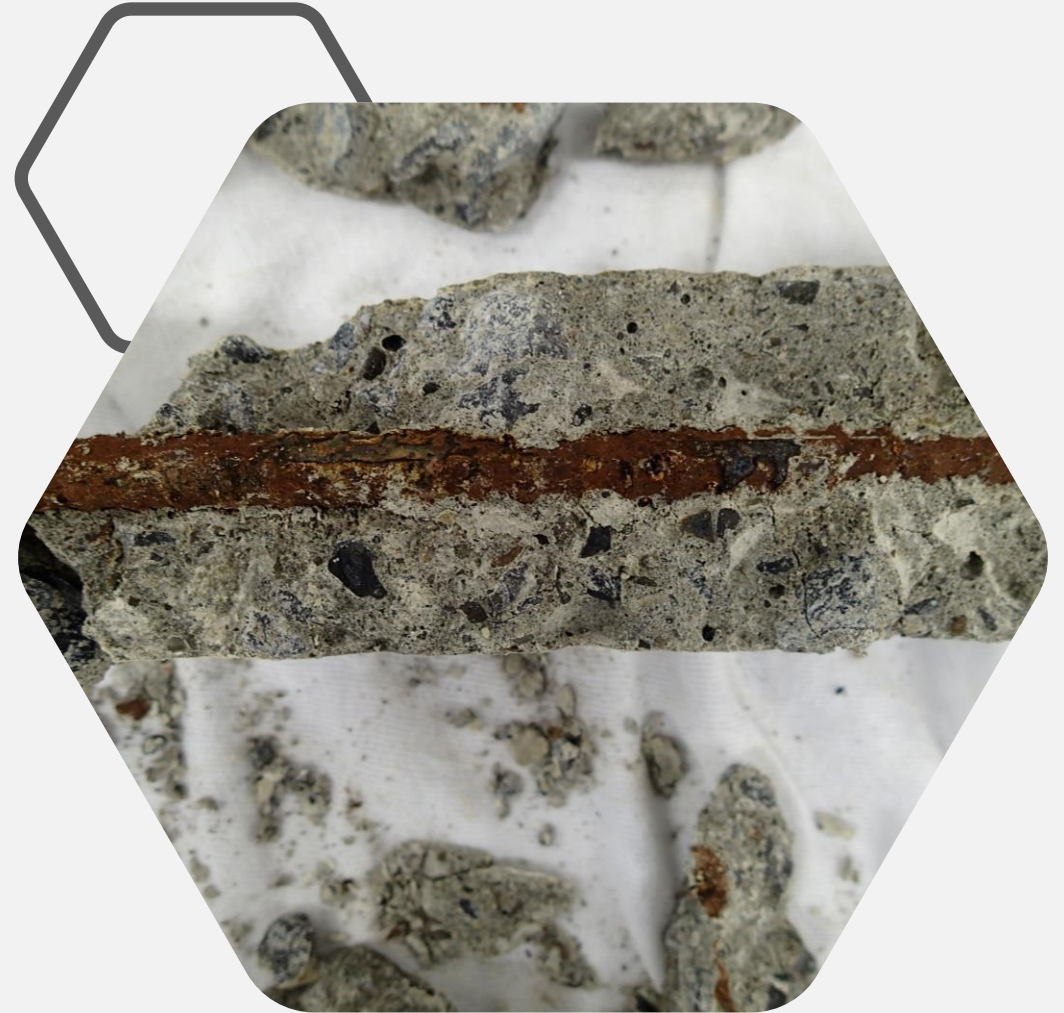
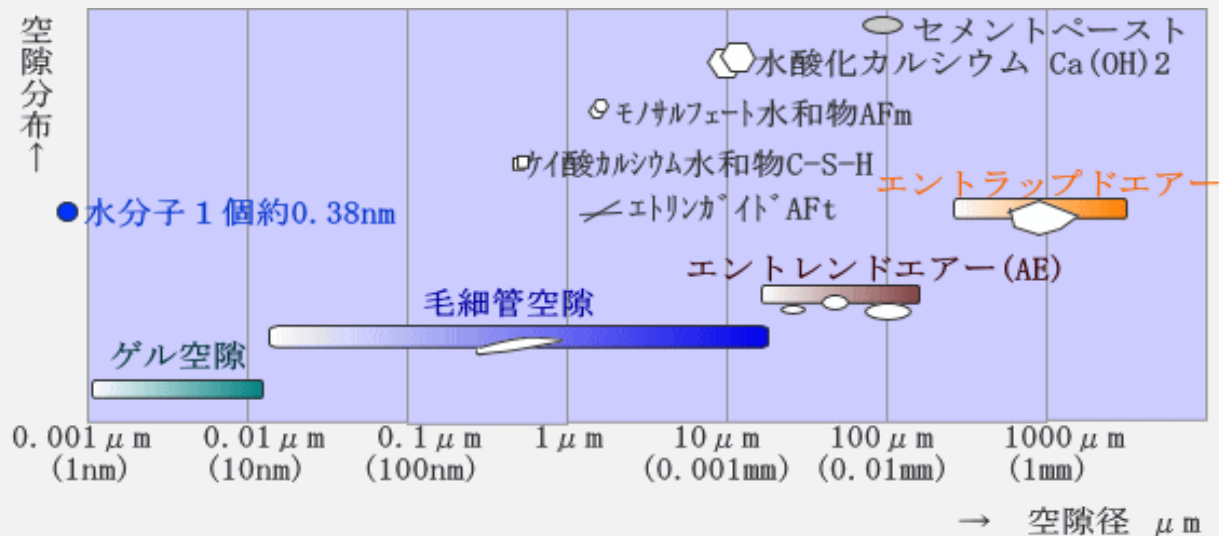
- 高経年した価値の高い建築物：国立西洋美術館、軍艦島ほか近代遺産
- 高経年しても壊せない建築物：超高層建築物、分譲マンション、原子力施設

コンクリートとは？

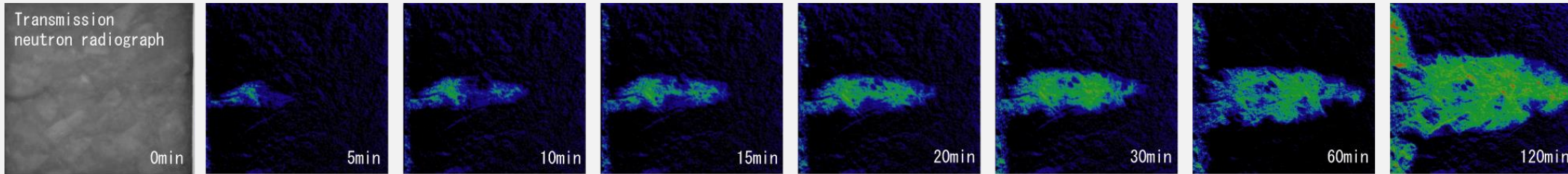
一般に、砂利・砂などの粒状体（骨材）を、水硬性のセメントと水とからなる結合材と混合して練り、硬化結合させた複合材料

セメント硬化体について

体積の約50%はCSHと呼ばれる物質からなり、ほかに水酸化カルシウム、エトリンガイト、モノサルフェートといった鉱物と空隙から成る多孔体。



中性子イメージング技術のコンクリートへの適用

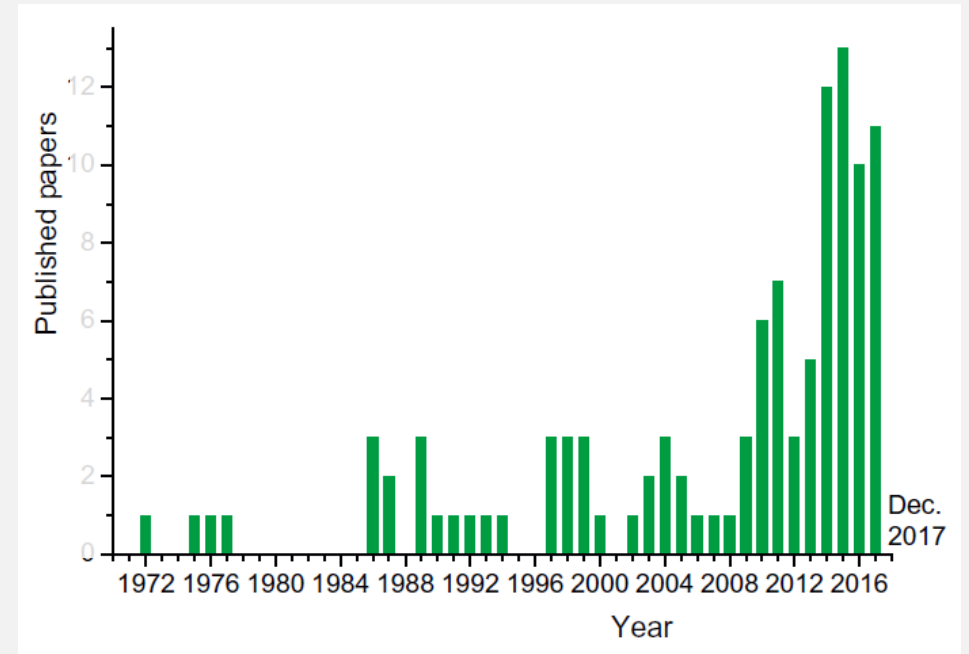


2006年～

- ✓ ひび割れ近傍の水分挙動を測定可能に
- ✓ 定量的分析手法を可能に
- ✓ セメントペーストあたりの水分量を測定
- ✓ ボルツマン変換による拡散解析のツールとして確立

その後

- ✓ コンクリート中の水分挙動の可視化ツールとして広く認知される
- ✓ 高温下挙動の解析、局所水分挙動(自己養生)の定量、ASRの可視化等
- ✓ RANSの開発に伴う土木分野のニーズの掘り起こしが進む



セメント・コンクリート分野における論文数
Peng Zhang et al. CCR, 2018

中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関するFS検討会 日本コンクリート工学会

- 土木・建築分野における中性子線を利用した研究については、これまでに日本建築学会 若手奨励特別研究委員会(主査：兼松学)「中性子利用技術の建築への展開」が2010年に建築材料全般を対象として中性子利用技術全般の適用事例に関する調査および共通実験の報告[1]をしており、2018年にはコンクリート分野を対象とした海外の中性子イメージングの適用事例についてはPeng Zhangらが広範な文献調査[2]を行っている。
- 本委員会では、測定対象別に九つのカテゴリーに分類し、各カテゴリーにおいて研究・実施されている概要をまとめている。
- 以下、**欠陥探査**、**単位水量測定**、**応力測定**、**水分移動測定**、**塩化物イオン(即発ガンマ線分析)**、**セメントペースト・土壌**、**変形測定**のカテゴリーについて研究の概要を記す。

RANSの利用を念頭に、コンクリート分野の中性子利用が土木分野を中心に再活発化

水分状態の確認、乾燥、水分移動、即発 γ 線分析など

中性子線を用いたコンクリートの検査・診断に関する FS委員会

報告書

- 1章 はじめに
- 2章 ニーズ調査
- 3章 中性子線計測技術の実用化に向けた開発の現状
- 4章 文献調査
- 5章 まとめ

2019年1月

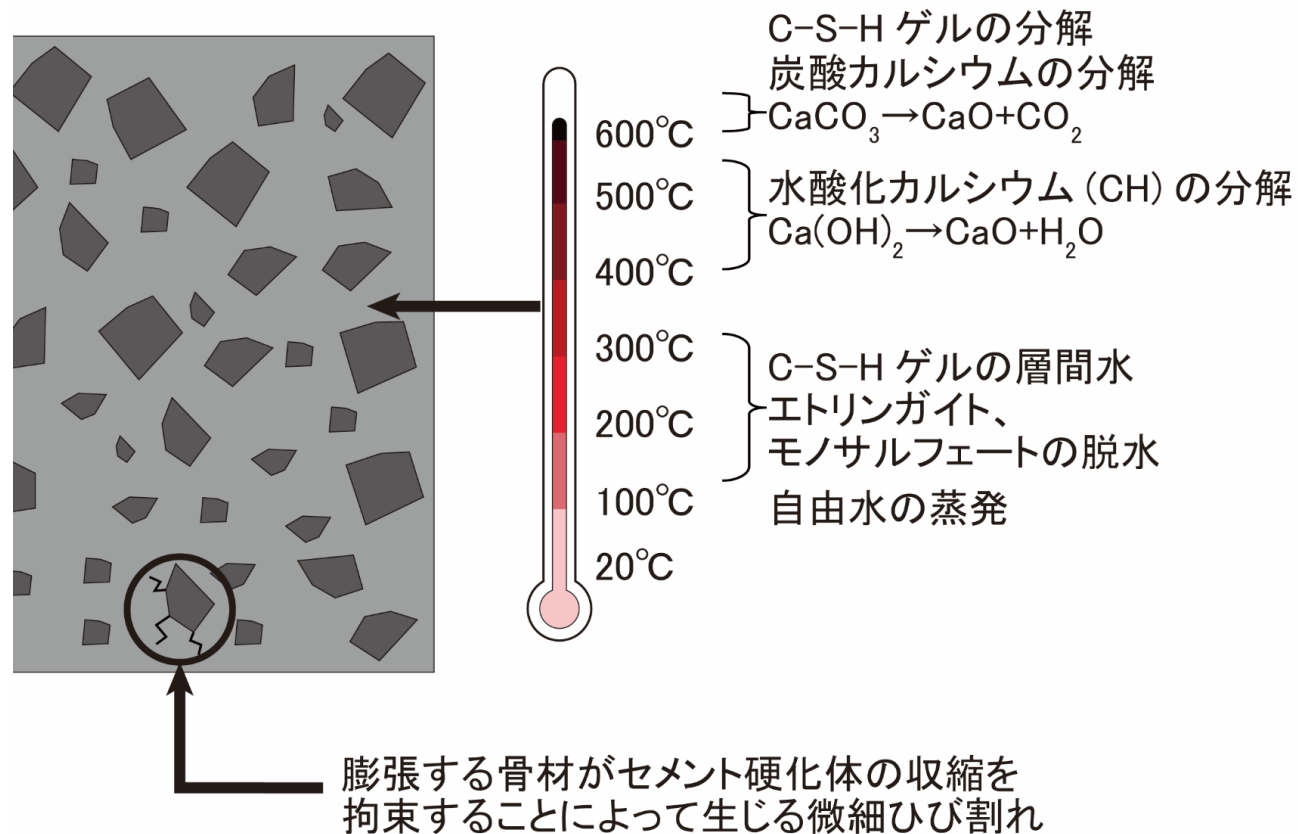
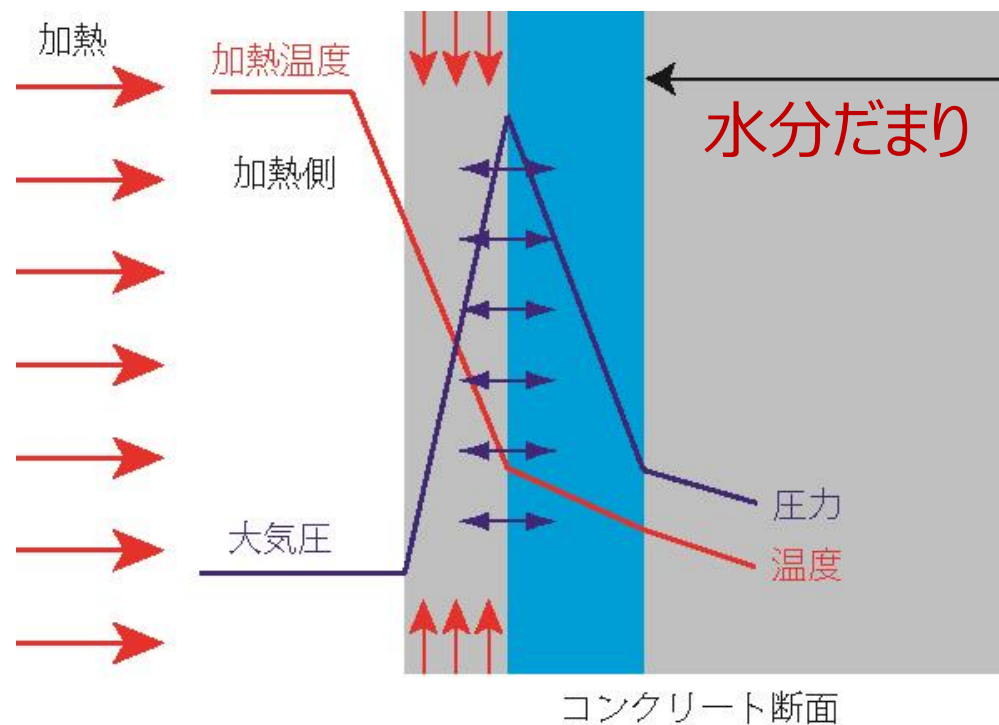
公益社団法人 日本コンクリート工学会



コンクリート分野への適用事例(KUR)

高強度コンクリートの爆裂現象の評価

様々な目で見える高強度コンクリートの爆裂現象



高強度コンクリートの爆裂現象の観察

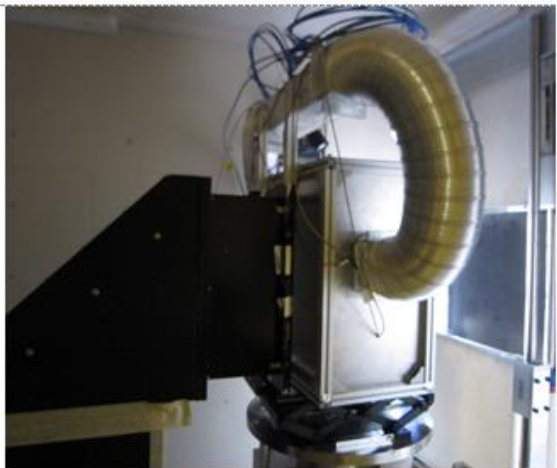


Photo.1 Experimental setup
with heating chamber



Photo.2 Inside view
of heating experiment

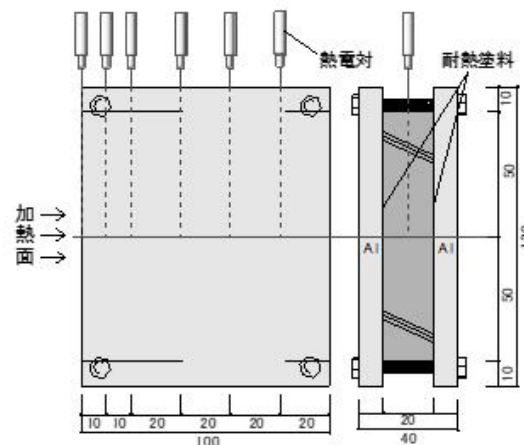


Fig.6 Specimen specifications

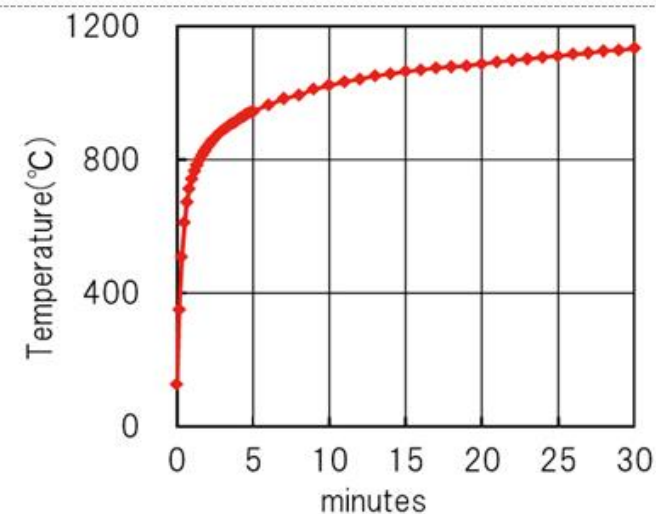


Fig.7 heating curve

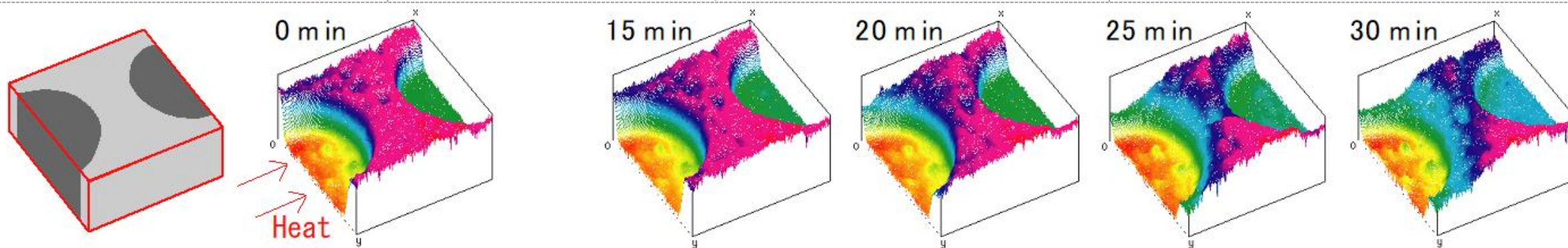
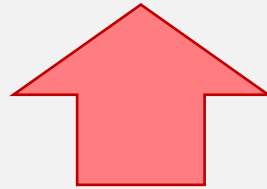
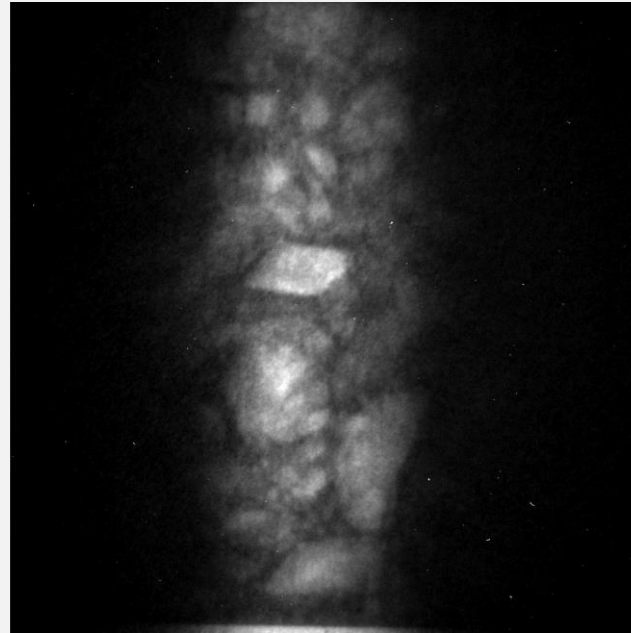


Fig.8 Moisture transfer around a artificial cylindrical aggregate under high temperature

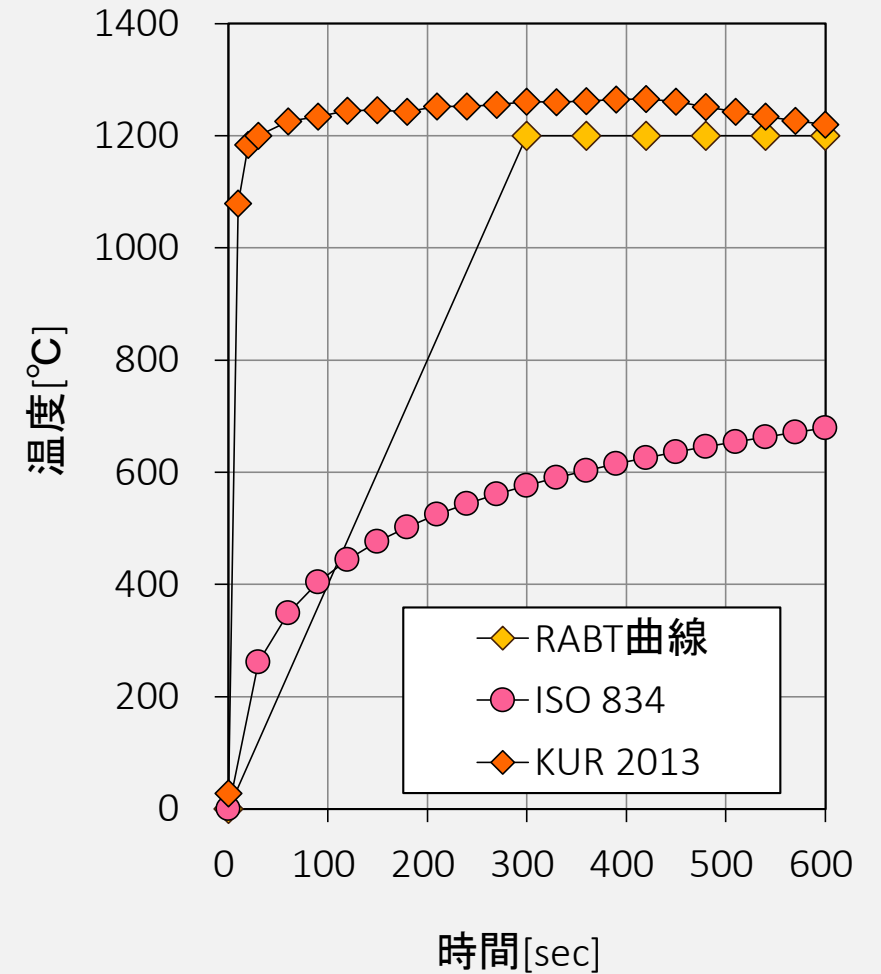
高強度コンクリートの爆裂現象の観察

2011年 KUR



加熱方向

中性子ラジオグラフィによる測定



加熱曲線

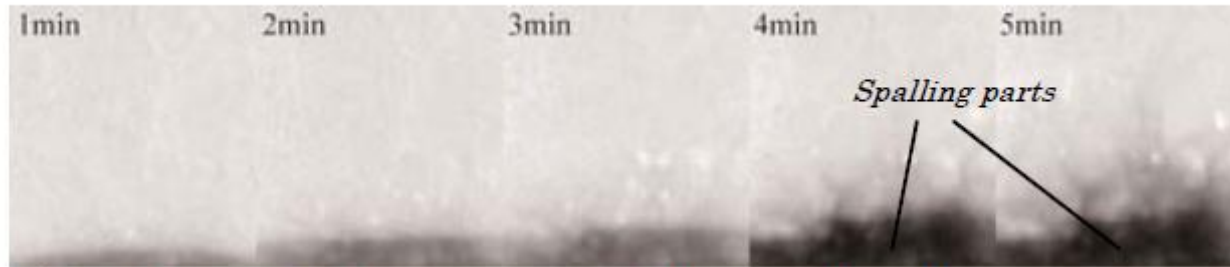
様々な目で見える高強度コンクリートの爆裂現象



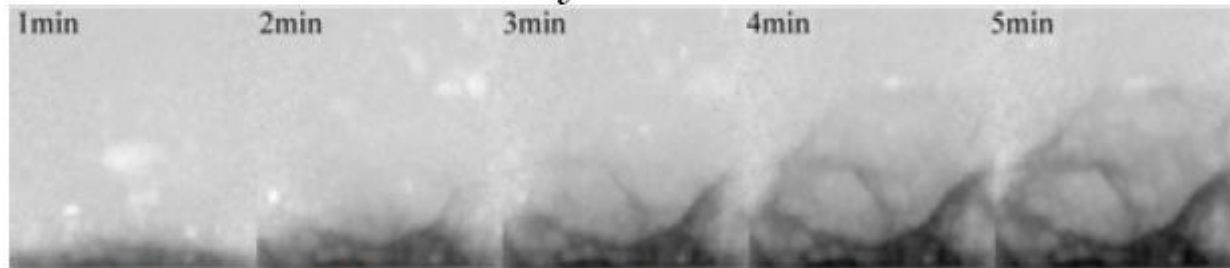
高強度コンクリートの爆裂現象の観察

爆裂現象の可視化を確認

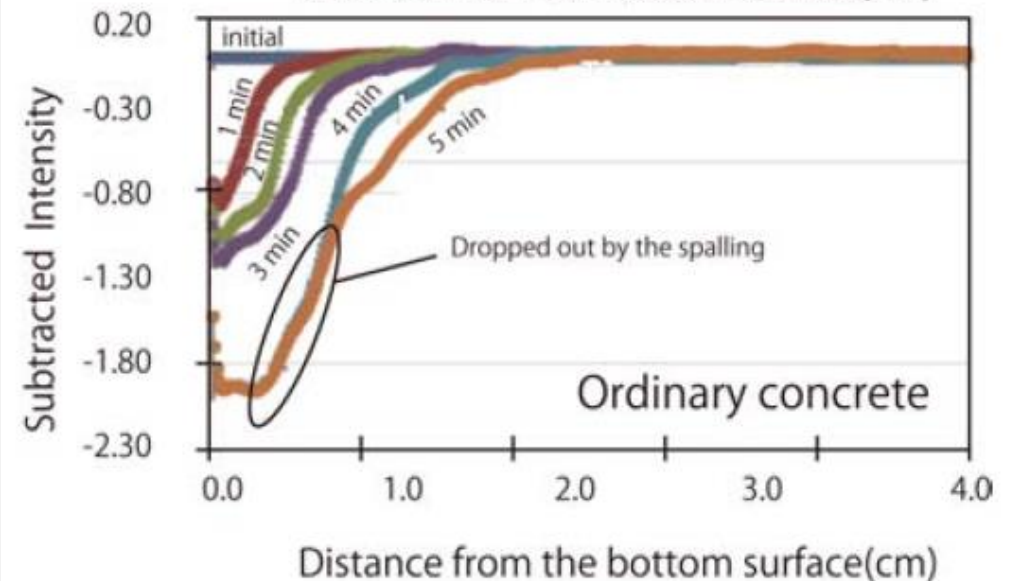
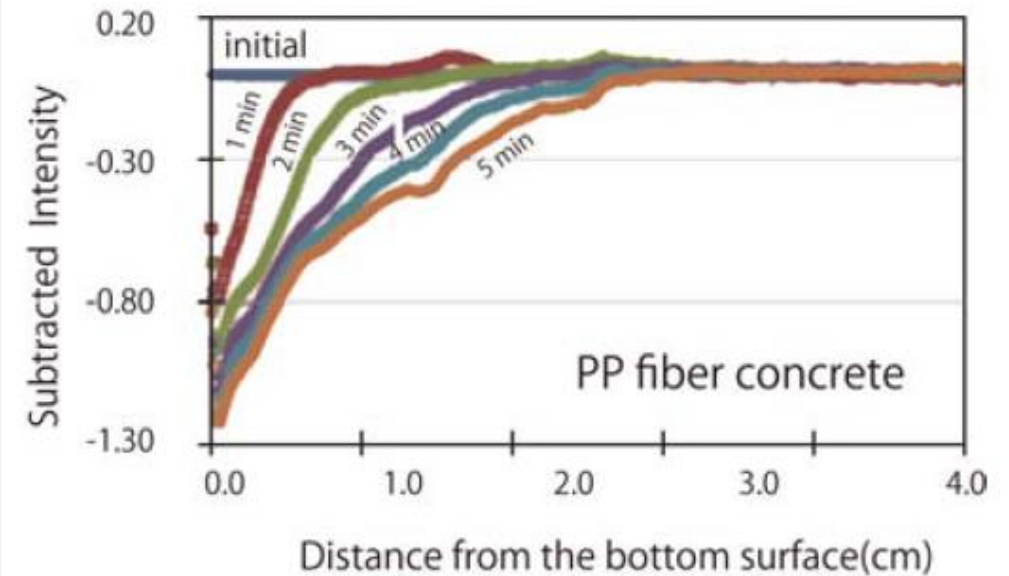
一般的な爆裂対策であるPPの効果について確認した



a) Subtracted intensity of the ordinal concrete



b) Subtracted intensity of the PP fiber concrete



高強度コンクリートの爆裂現象の観察

爆裂現象の可視化を確認

→ 高温下の状態観察への適用

測定施設 京都大学研究用原子炉(KUR)
ビーム照射孔 (B-4)

画僧種類 : 静止画(連続撮影)

L/D : 約20

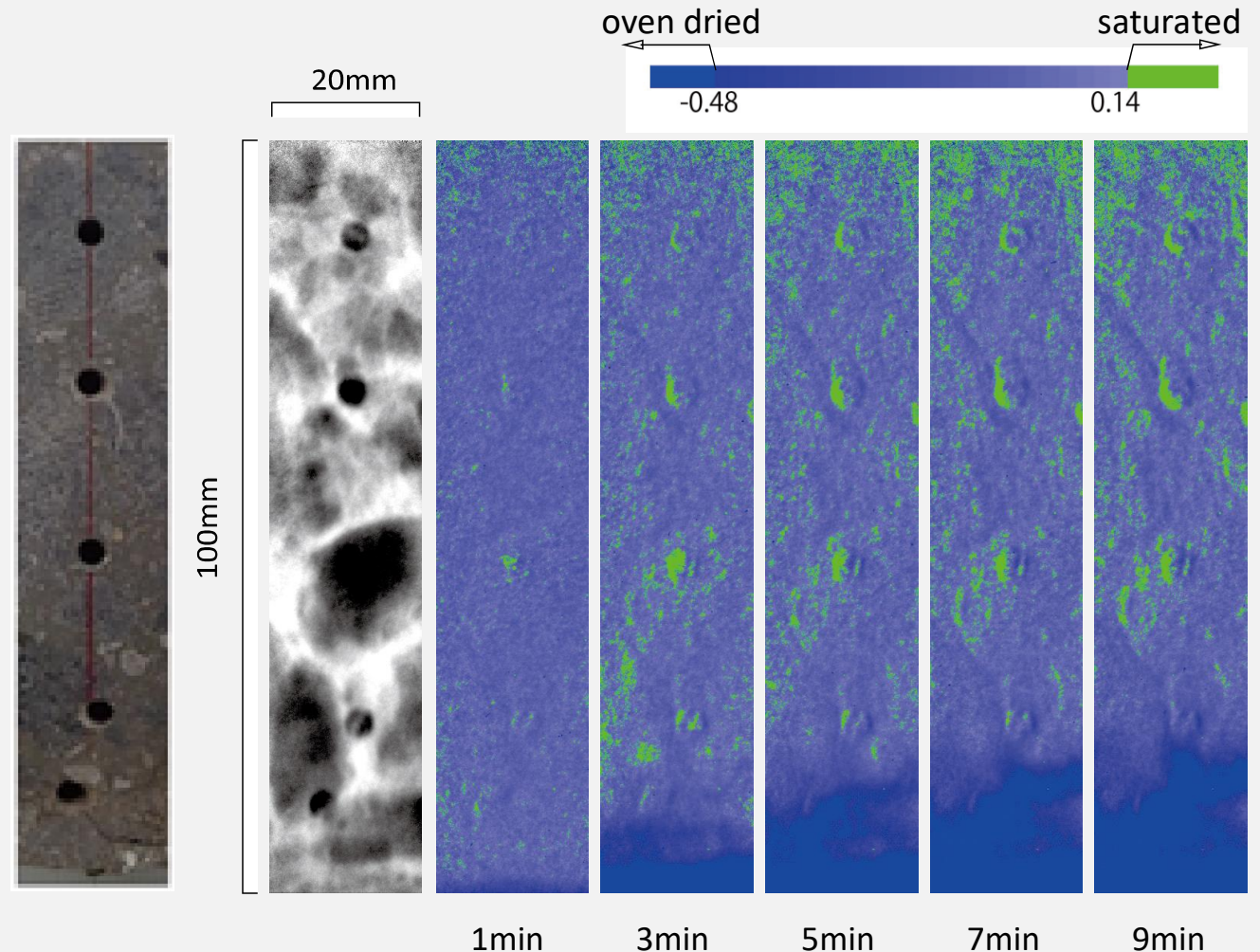
測定方法 : C-CCDカメラ(1024×1024)、
LiF:ZnS (Ag)

測定時間 : 5.5秒(データ転送時間含む)

ピクセルサイズ : 約100 μ m/pixel

画角 : 約100×100mm²
(撮像範囲は20×100mm²程度)

想定中性子束 : 1×10⁷n/sec/cm² (1MeV運転時)

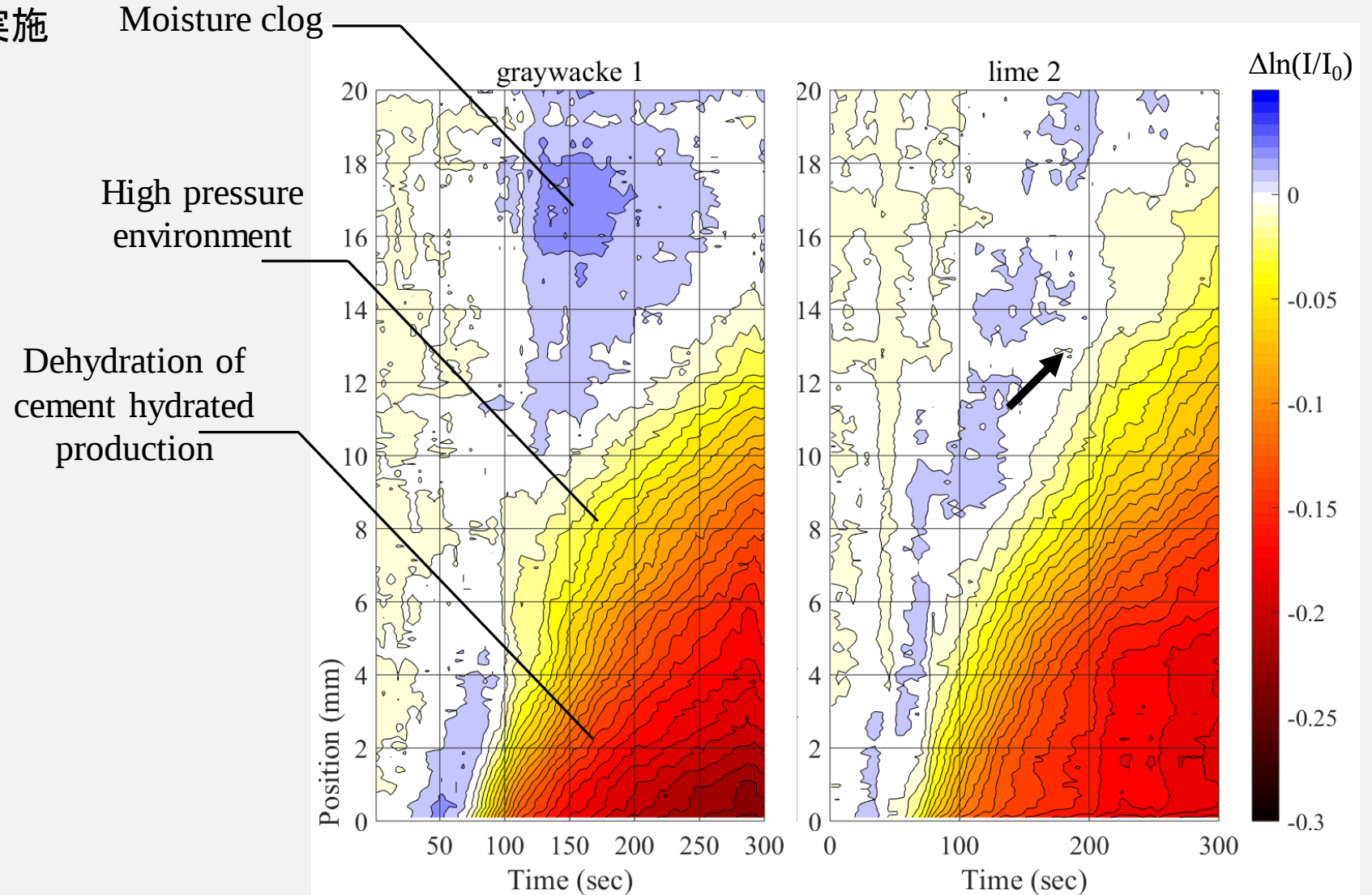


高温加熱下におけるコンクリートの中性子イメージング

左：工学画像、左から2番目： $\ln(I/I_0)$ 画像、以右： $\ln(I/I_0)$ 時間差分画像
(画像下側よりブンゼンバーナーにより加熱し、下面より乾燥が進む様子を捉えた)

高強度コンクリートの爆裂現象の観察

温度測定を加えた分析を実施



高強度コンクリートの爆裂現象の観察

温度測定を加えた分析を実施

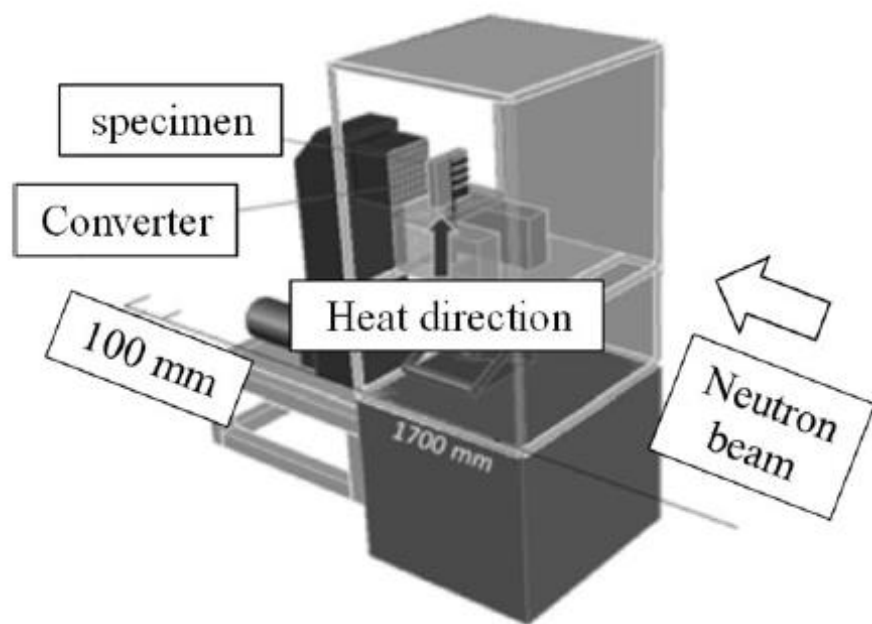


Fig. 1 Experimental set up.

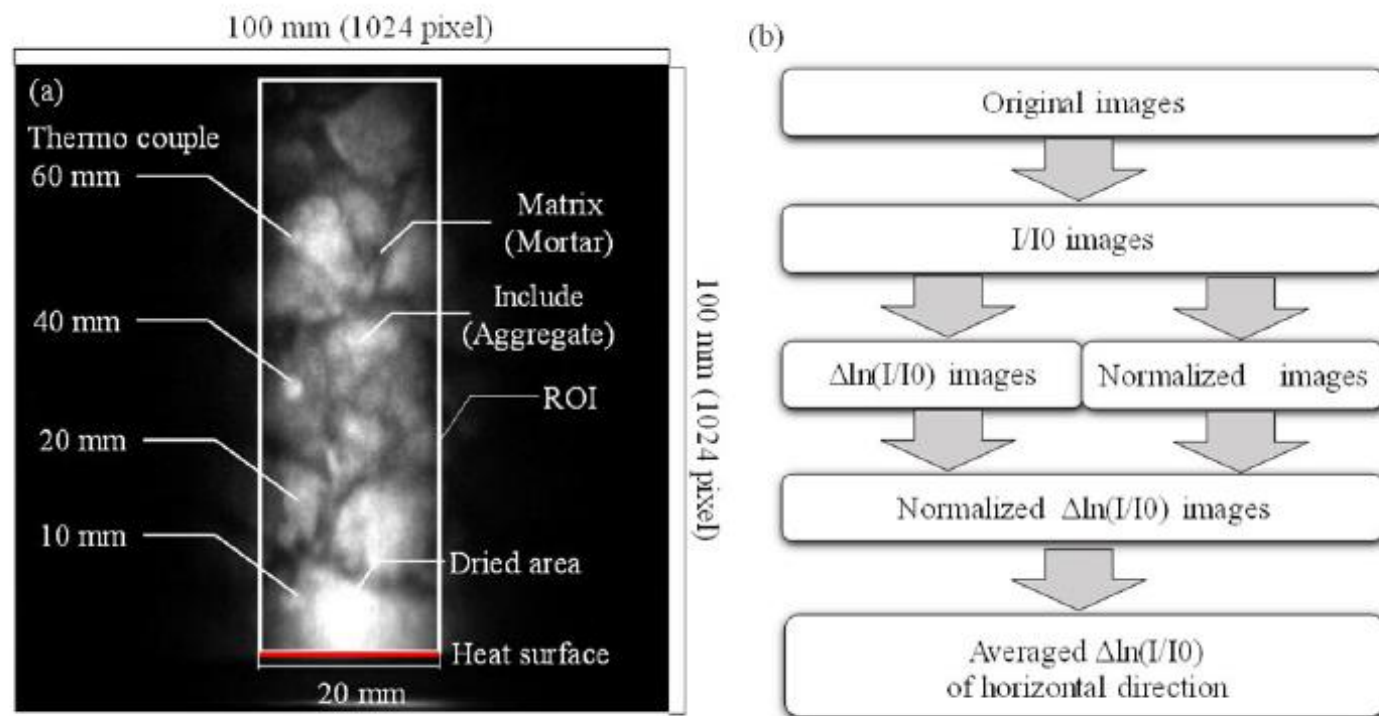


Fig. 2 (a) Transmission image of specimen
(b) and analytical procedure.

高強度コンクリートの爆裂現象の観察

非定常熱移動解析(差分法)により温度データが再現できることを確認

$$T_n = \theta_x(T_{n+1} - T_{n-1}) + (1 - 2\theta_x)T_n$$

$$\theta_x = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$$

T : 温度, n : 要素数, α : 熱拡散係数,

Δt : 時間幅, Δx : 要素幅

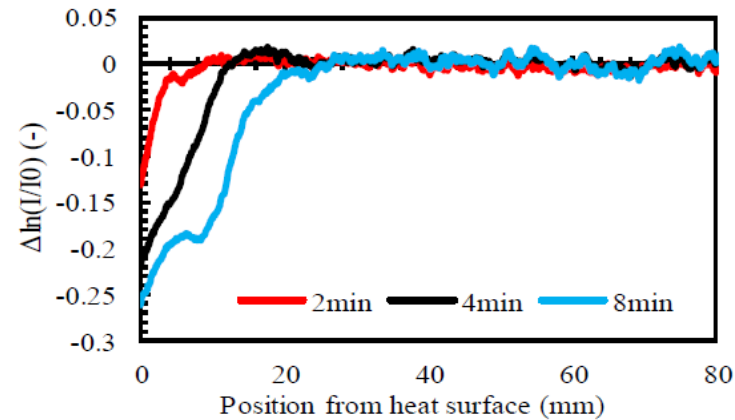


Fig. 3 Position from heat surface vs amount of substance per matrix.

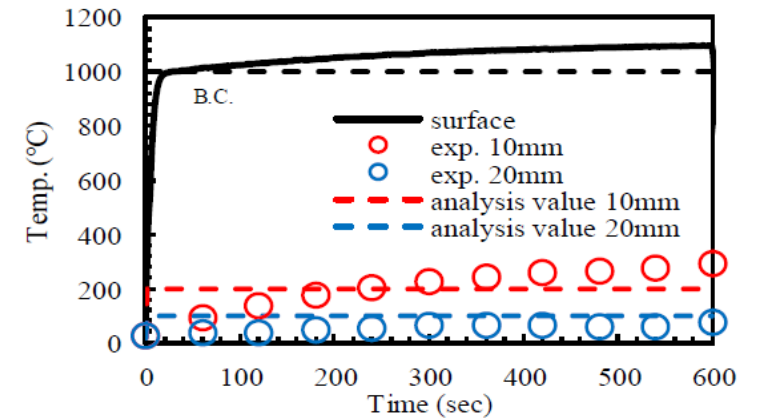


Fig. 4 History of internal temperature of specimen.
Full line show experimental data.
Broken line and plot which circle show analysis data.

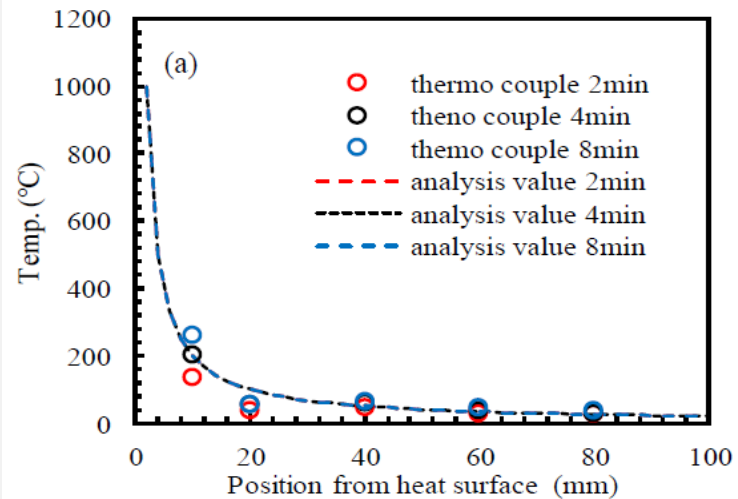
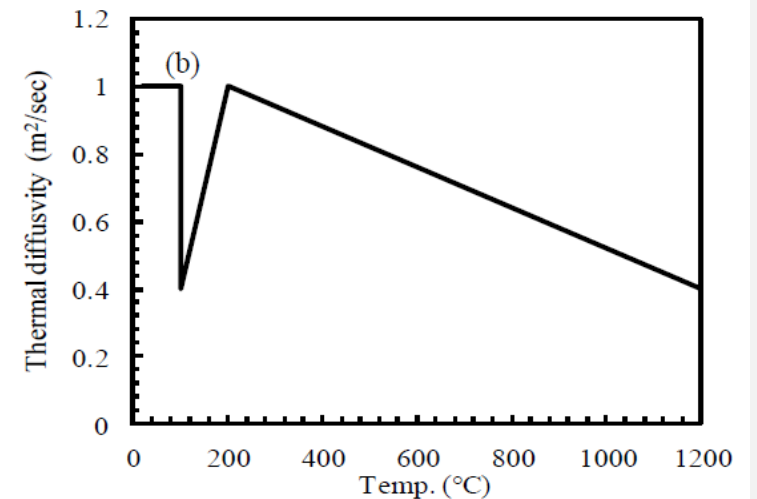


Fig. 5 (a) Temperature field of specimen.
Broken line show experimental data. Plot which circle show analysis data.
(b) Thermal diffusivity depended temperature.



高強度コンクリートの爆裂現象の観察

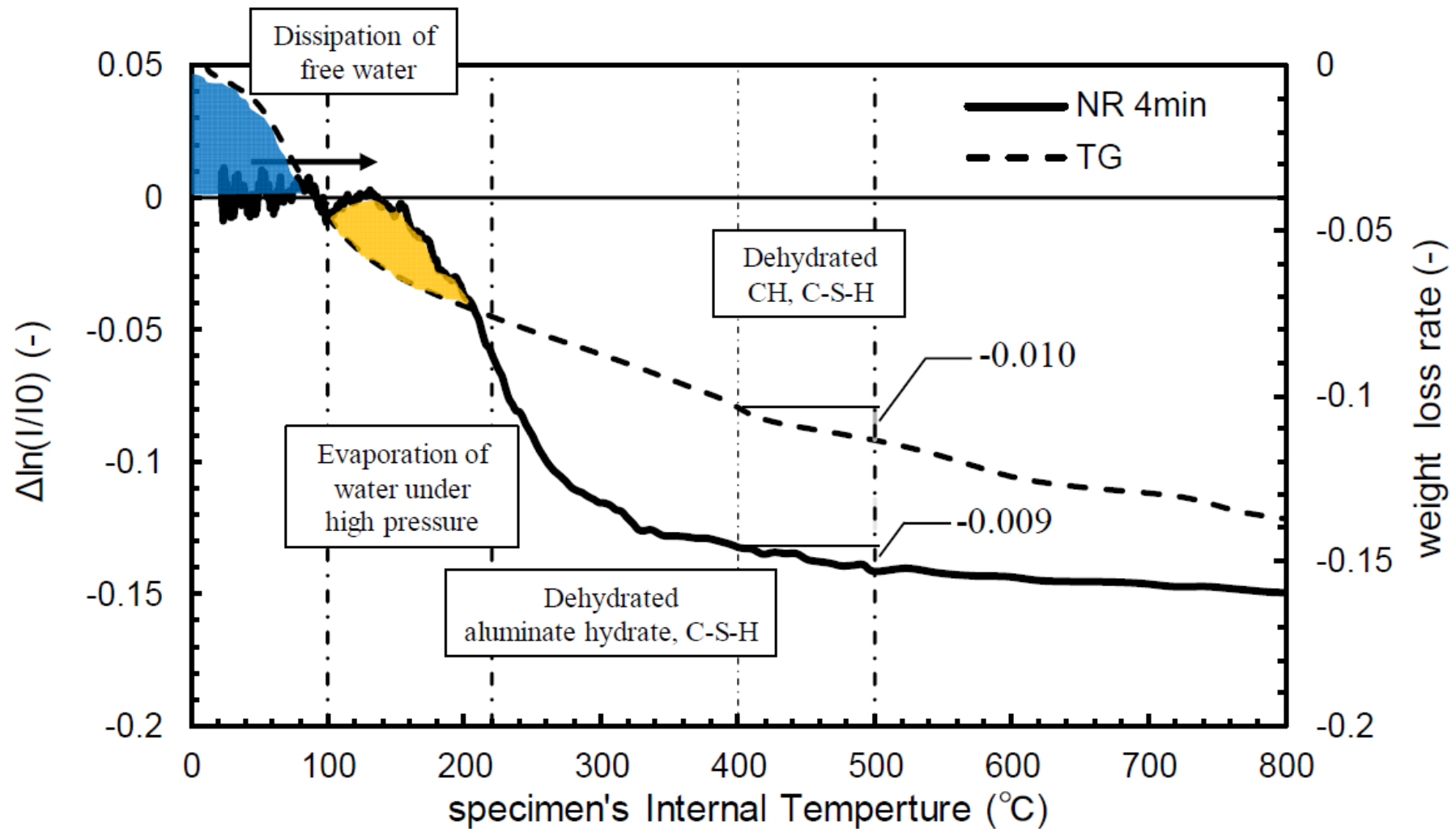
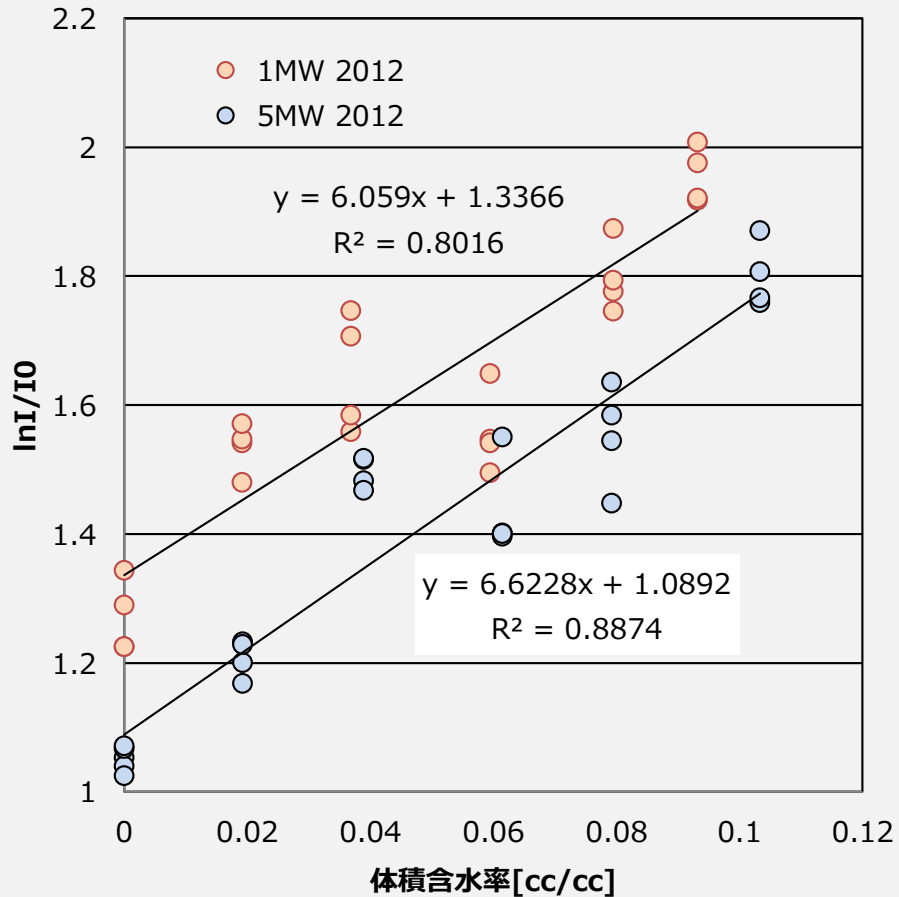


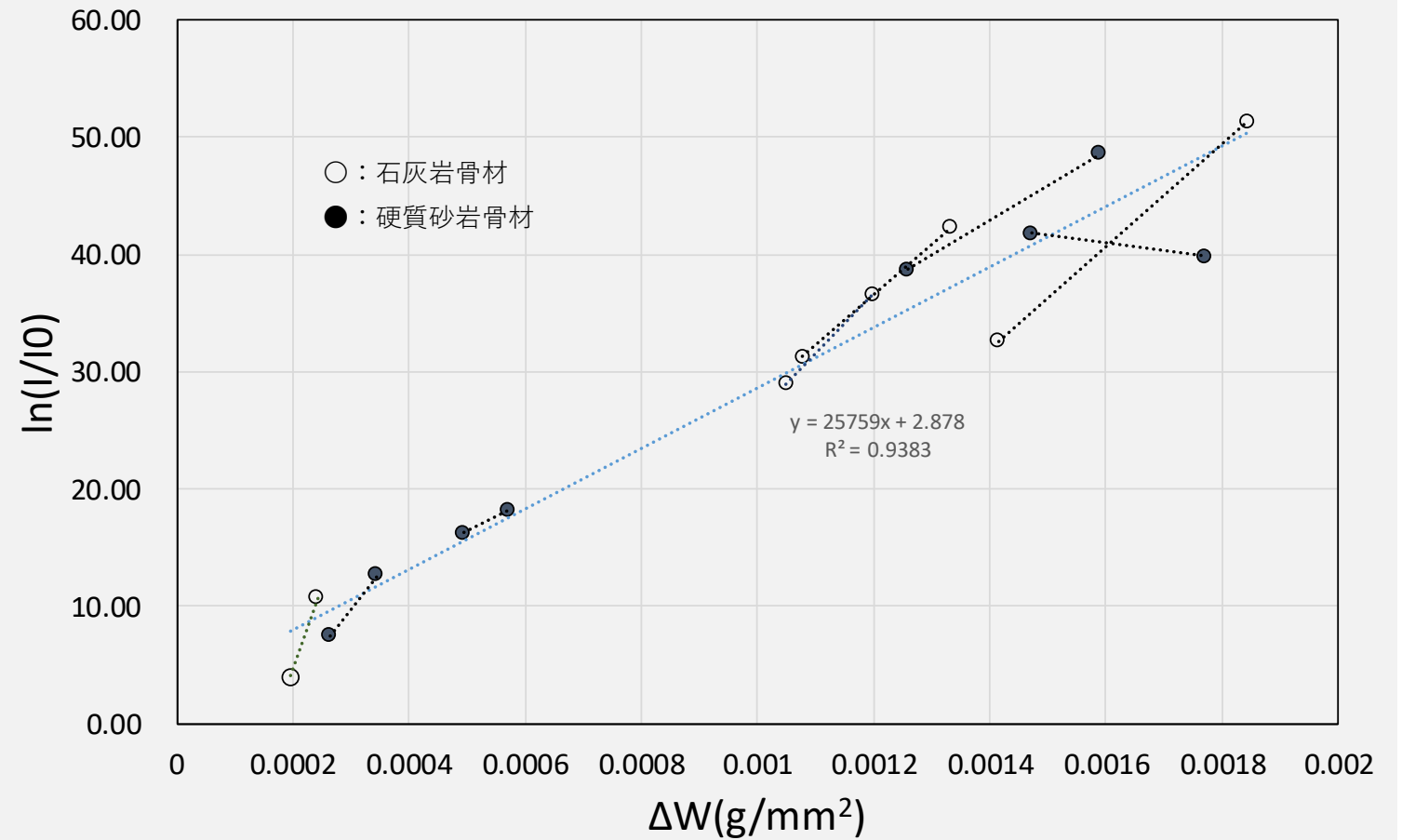
Fig.6 Analysis data of specimen's internal temperature vs amount of substance per matrix at 4min to heat start.
Broken line show weight loss rate that measured cement paste (W/B=0.18) by TG.

高強度コンクリートの爆裂現象の観察



KUR2012

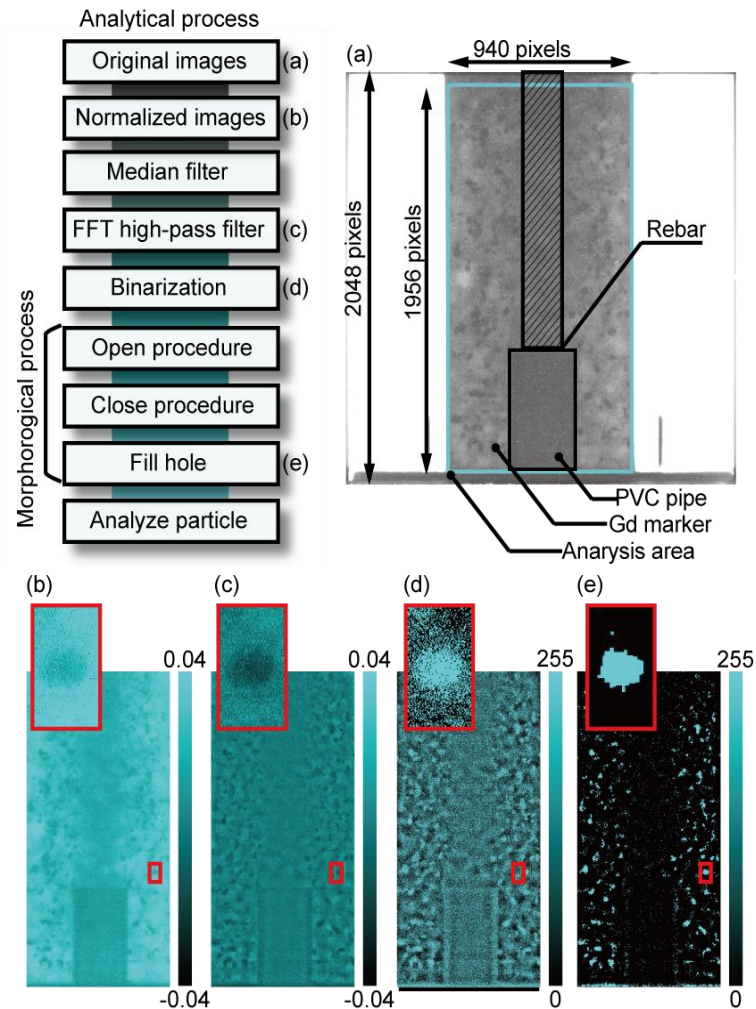
同一試験体比較



KUR2019 (1MW)

様々な目で見える高強度コンクリートの爆裂現象

画像解析によるコンクリートのひずみ分析



爆裂挙動

実画像

表層部温度

赤外線画像

鉄筋応力(高温／破壊部)

FBGデータ／中性子回折法

物質移動

中性子イメージ

コンクリートのひずみ

画像相関

実証実験

鉄筋コンクリート造構造体の高温環境下における挙動の包括的観測技術の開発

高強度コンクリートの爆裂現象の観察

鉄筋拘束下における爆裂挙動の観察

使用試験体 70x100x30 mm PP繊維入り鉄筋コンクリート 2体 (X線1体、中性子1体)
100x100x20 mm PP繊維鉄筋無しコンクリート 2体 (X線1体、中性子1体)

加熱中のひび割れ発生プロセス

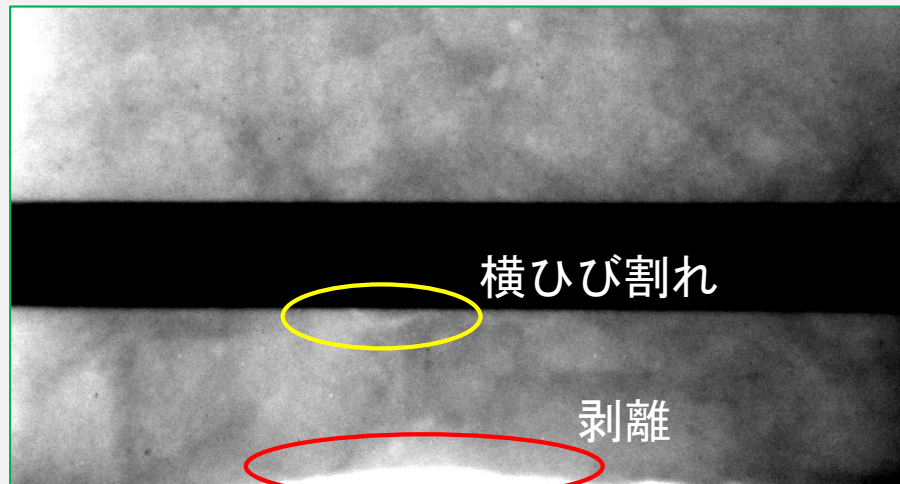
初期 鉄筋近傍軸方向にひび割れ発生

→鉄筋とコンクリートの熱膨張の差が原因と推測される

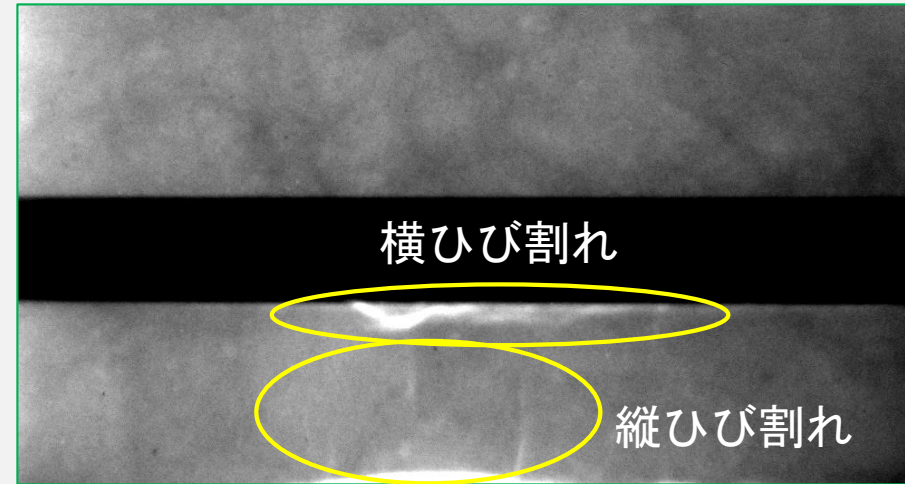
終期 加熱面に対して直交方向にひび割れが発生

→水和物の脱水による収縮を鉄筋が拘束することによると推測される

2017年KUR



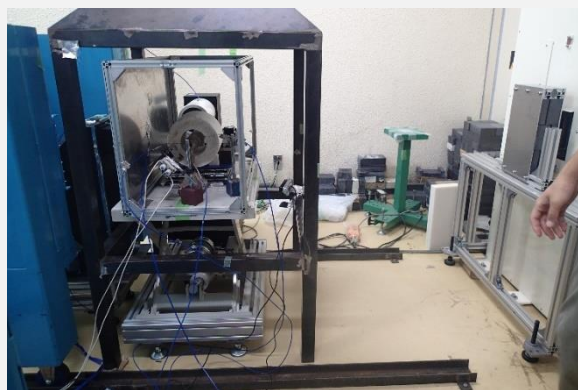
加熱2分



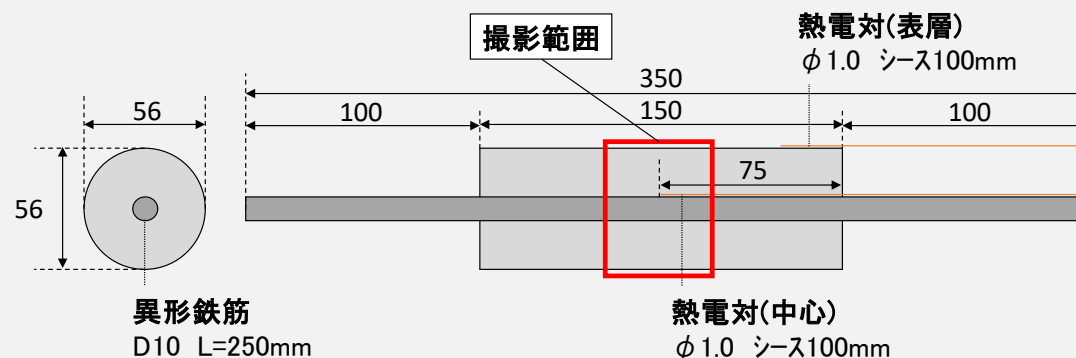
加熱10分

高強度コンクリートの爆裂現象の観察

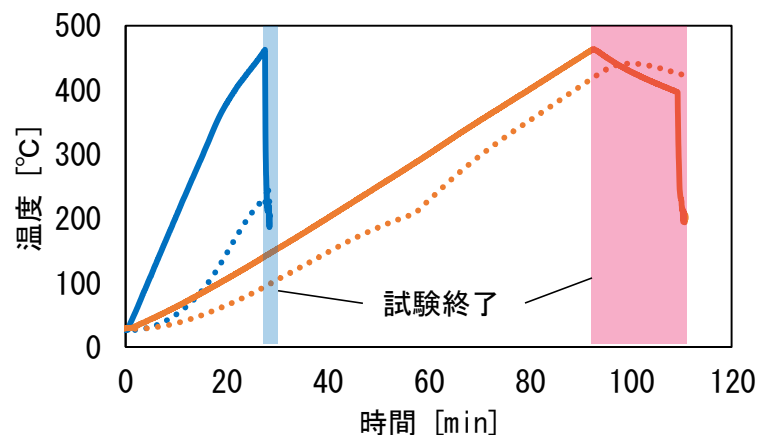
高温下における鉄筋コンクリート内部の水分移動について、昇温速度が与える影響を明らかにするため、中性子ラジオグラフィを行った。昇温速度は5, 20°C/minの2水準とし、各1体ずつの試験を行った。



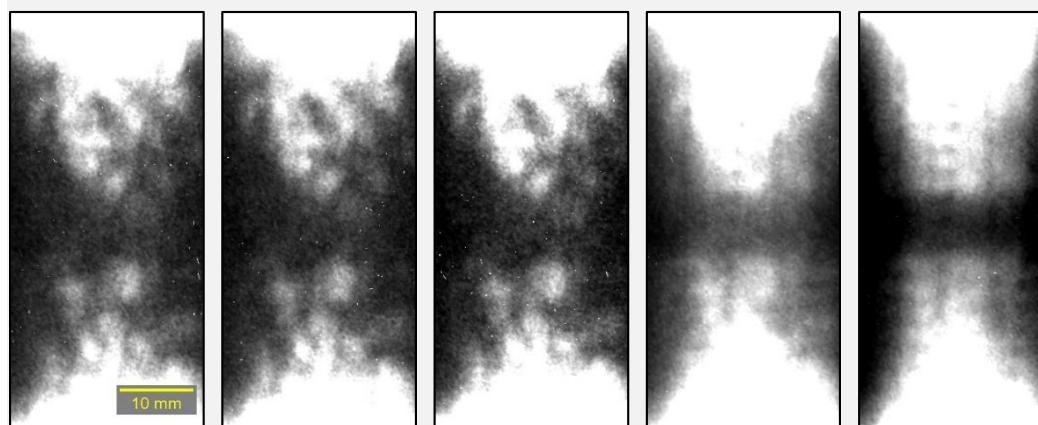
試験装置



試験体概要

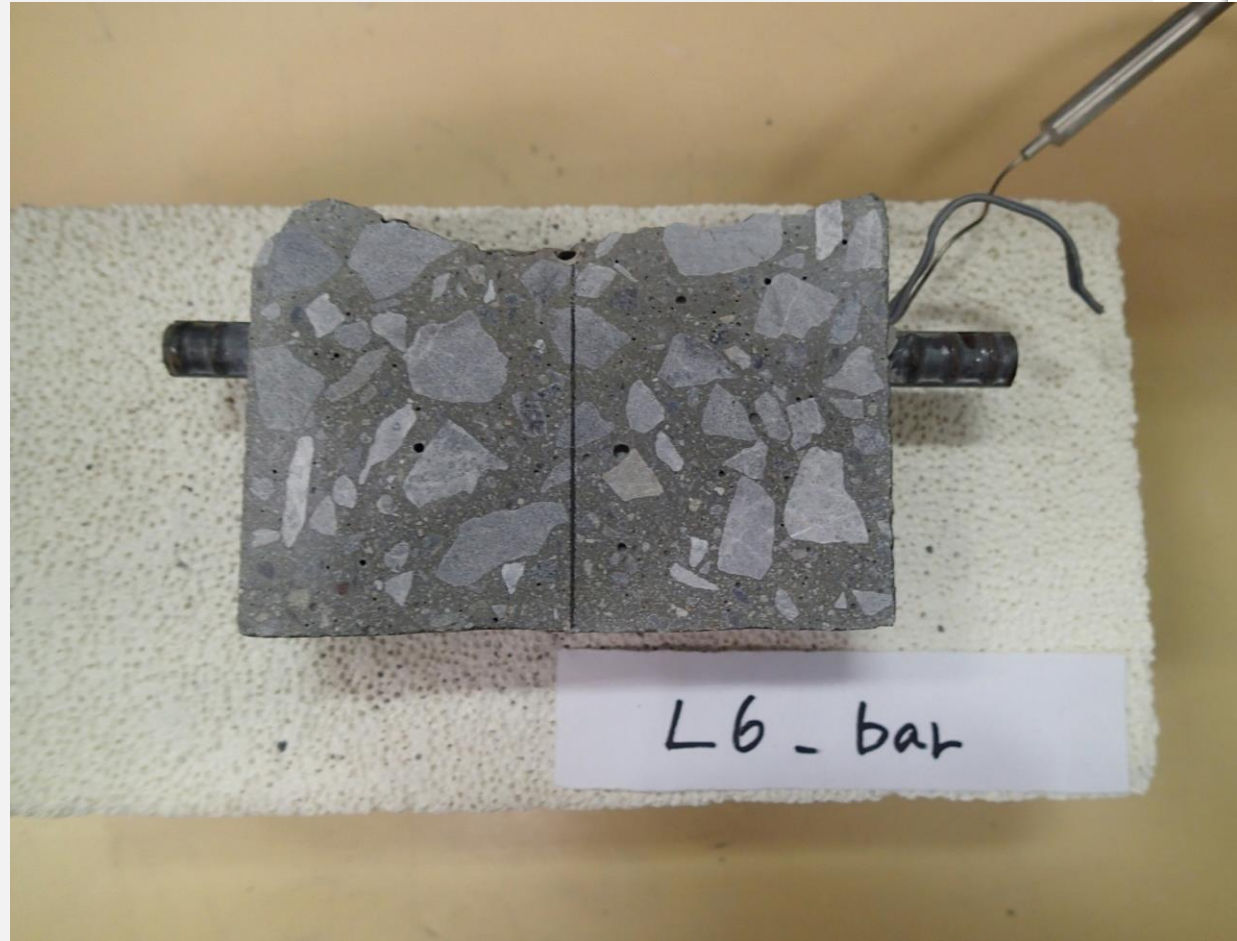
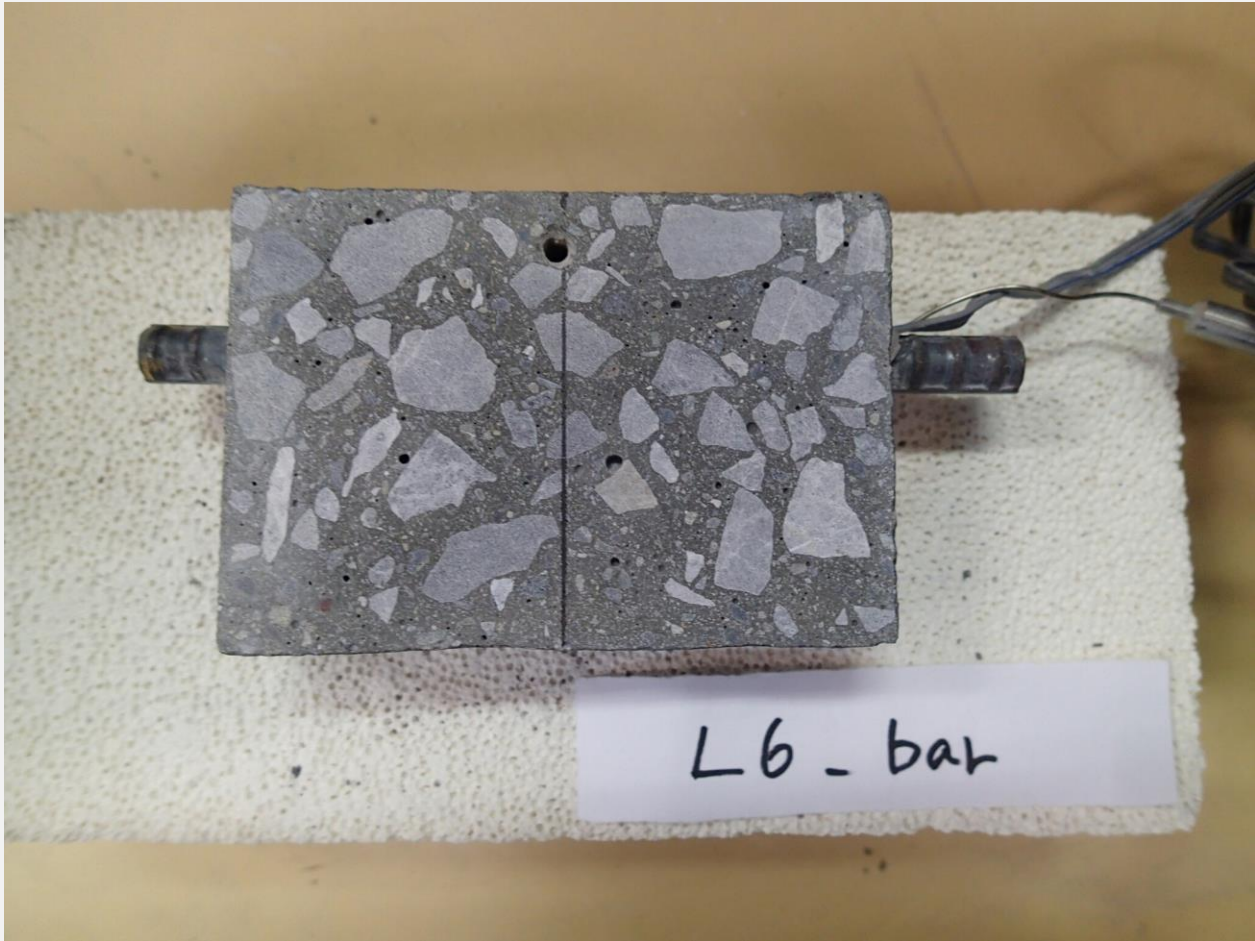


加熱温度履歴



0min 10min 30min 60min 92min
加熱開始 加熱終了

中性子透過画像 (5°C/min)



高強度コンクリートの爆裂現象の観察

- 高温下の水分挙動が見れる状況を確認できた(2012)
- 現象の再現性・爆裂の制御に苦労(中性子イメージングの問題ではない)。
- 水分だまりを確認できたのはひとつの成果。多角的に検証し再現性も確認できた。
- ただし、爆裂における役割を十分に検証するのに苦労している(拘束をどうするか？爆裂箇所 の 把握？骨材の不均一性の影響？)。
- 鉄筋拘束下における挙動の把握が最終目標。
他の測定との相互理解がポイント。

The background is a collage of several photographs showing the interior and exterior of a severely damaged, multi-story concrete building. The images depict debris, broken windows, and structural damage, suggesting a scene of destruction or abandonment. The collage is composed of various sized and oriented rectangular and polygonal images.

ありがとうございました

東京理科大学 兼松 学

+81-4-7122-9470

manabu@rs.noda.tus.ac.jp