

コンクリートの爆裂現象における 内部水分挙動の可視化

2021.1.6 中性子イメージング専門研究会

東京理科大学 理工学研究科 建築学専攻
修士2年 宮部あづさ

高強度コンクリートの爆裂現象

- 火災のような高温環境下でコンクリートの爆裂現象が生じる
 - 実構造物では、断面欠損や鉄筋の露出などによる部材の耐力低下が懸念される
- ➡ **爆裂発生のメカニズムを把握することが重要**



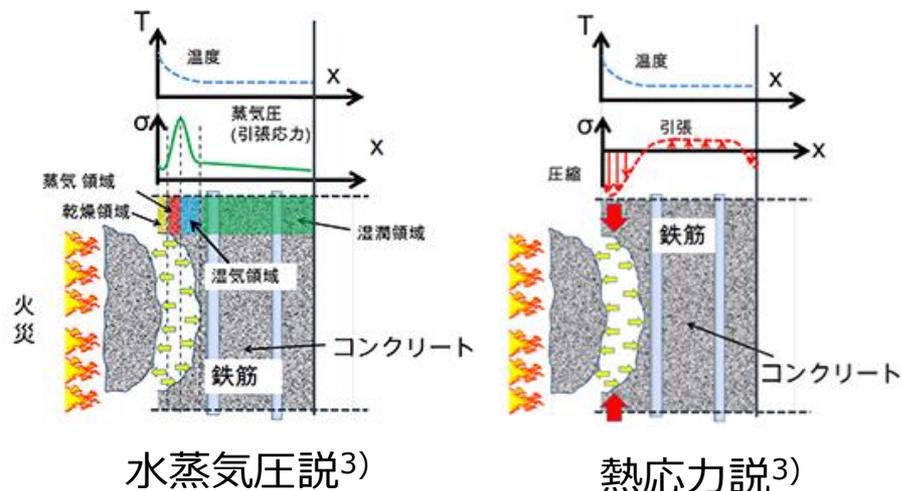
ガレージにおける爆裂事例¹⁾



加熱試験における爆裂²⁾

爆裂発生理論に関する通説¹⁾

- **水蒸気圧説** (Miller, Harmathyら)
- **熱応力説** (Bazant, 斎藤ら)
- 上記の複合説
- 完全飽和水蒸気圧説
- 沸騰液膨張蒸気爆発説
- 蒸気流との摩擦力説



材料や調合など様々な条件のコンクリートにおいて**爆裂の支配的な要因が**
解明されておらず、爆裂メカニズムの統一的な理論は確立されていない

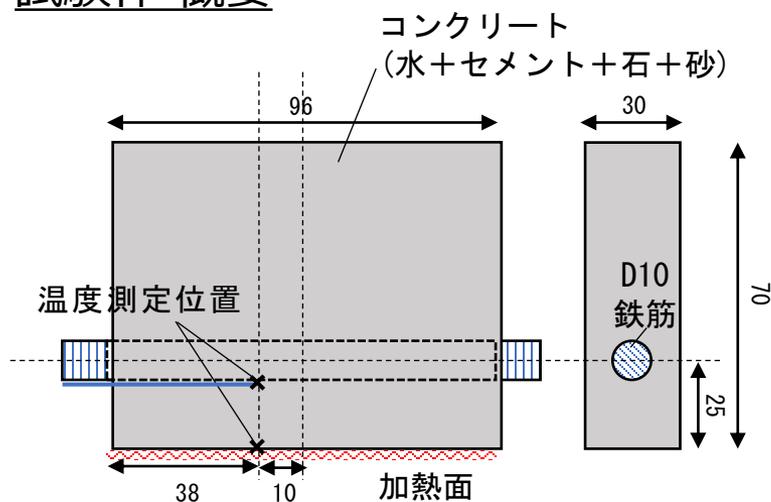


高温下のコンクリートの水蒸気圧および熱応力の挙動を捉え、
 諸条件において爆裂現象に与える影響を明らかにする

実験の実施 (KUR研究用原子炉B-4ポート)

- コンクリートを透過する中性子線の撮影により内部の水分分布を可視化・定量化
- 加熱中および爆裂時の水分分布を捉え、爆裂に寄与する水蒸気圧への影響を検討

試験体 概要



加熱試験体 概要

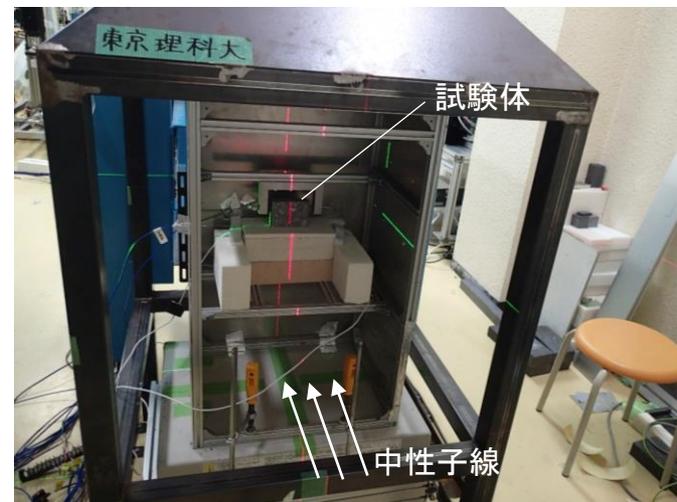
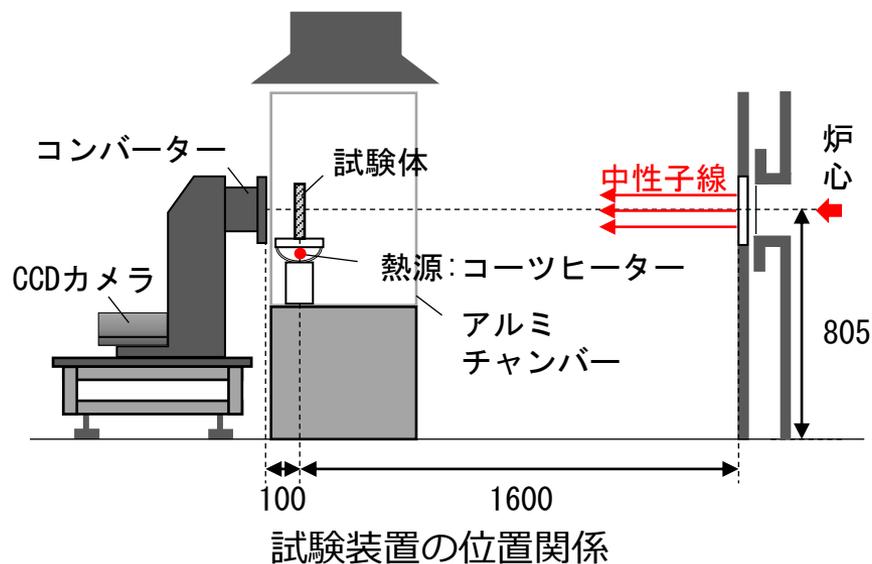
試験水準	
水セメント比	18%
含水状態	絶乾 (80℃で乾燥した状態) 気乾 (空气中で乾燥した状態) 飽水 (水中に浸漬した状態)
鉄筋	有 / 無 (拘束条件の違い)
骨材種	石灰岩

基準調合(1m³分の調合)

W/C(%)	Air(%)	絶対容積(L/m ³)					質量(kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G	W	C	SF	S	G
18	2	160	255	40	213	312	160	800	89	560	843

W : 水 C : セメント SF : シリカフューム S : 大井川産陸砂 G : 佐野産石灰岩

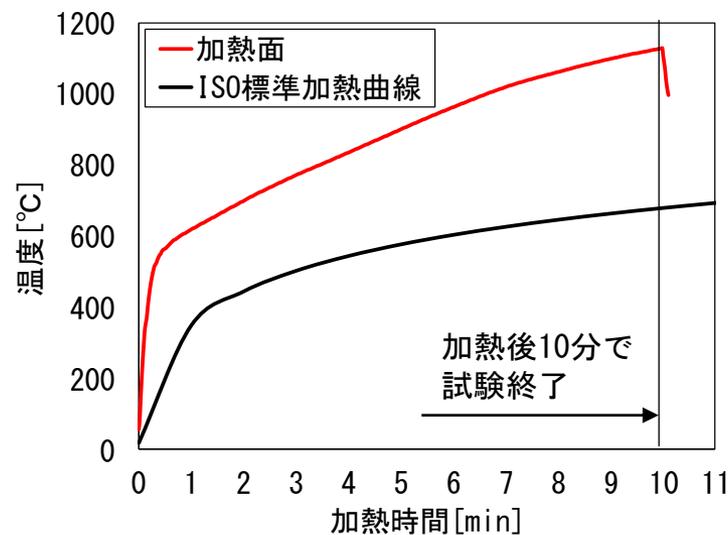
実験概要



試験体設置(KUR研究用原子炉B-4ポート)

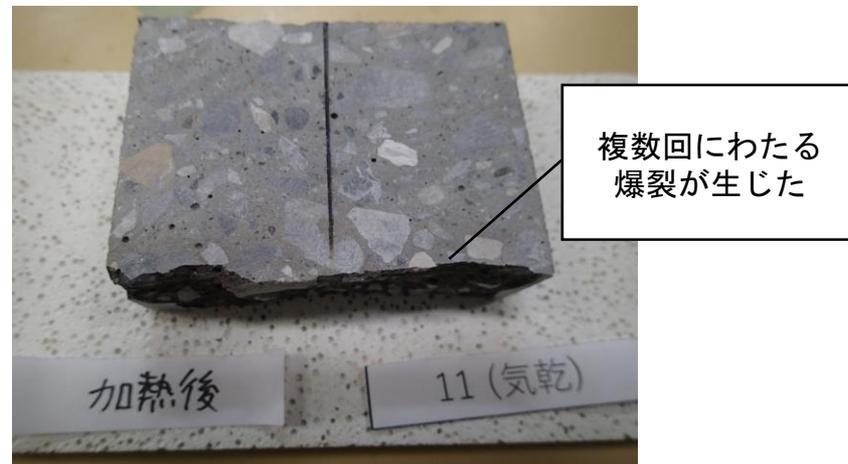
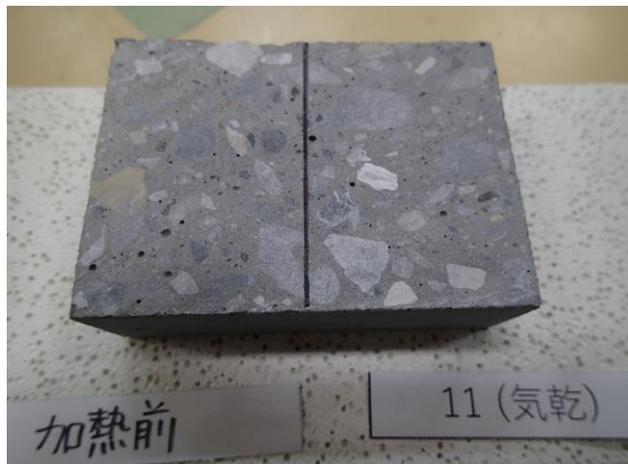
中性子イメージング 撮影条件

入射中性子束	$1 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$
空間分解能	約 $100 \mu\text{m/pixel}$
コリメーター比	約 160
CCDカメラ画角	$100 \times 100 \text{ mm}$ ($1024 \times 1024 \text{ pixel}$)
露光時間	3.0秒/枚



加熱温度条件

含水状態による爆裂性状の違い



気乾状態の試験体における爆裂



加熱面における試験水準ごとの爆裂性状

気乾状態(相対含水率78~84%)において最も大きな爆裂が生じ、絶乾状態(0%)では生じなかった。
飽水状態(100%)では、爆裂(1体のみ)と小さな剥離が見られた。

中性子透過強度の減衰率を考慮し、**水分強度分布**を取得した。

減衰率 : $P = -\ln \frac{I}{I_0}$

差分 : $\Delta P_w = -\ln \frac{I_t}{I_{t=0}}$

I : 中性子透過強度

I_0 : 入射中性子強度

$I_t, I_{t=0}$: 時刻 t における中性子透過強度

取得画像 生データ

- 透過画像 I
- Shade画像 I_0
- Dark画像

メディアンフィルタ & ダーク処理

- 透過画像 I
- Shade画像 I_0

シェーディング処理 & 対数化

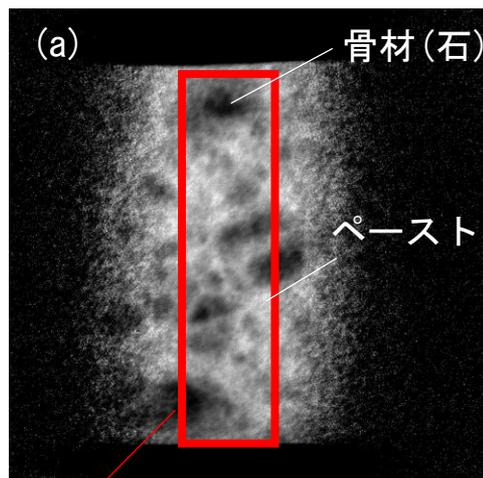
透過画像 I

$$P = -\ln \frac{I}{I_0}$$

差分水分強度の取得

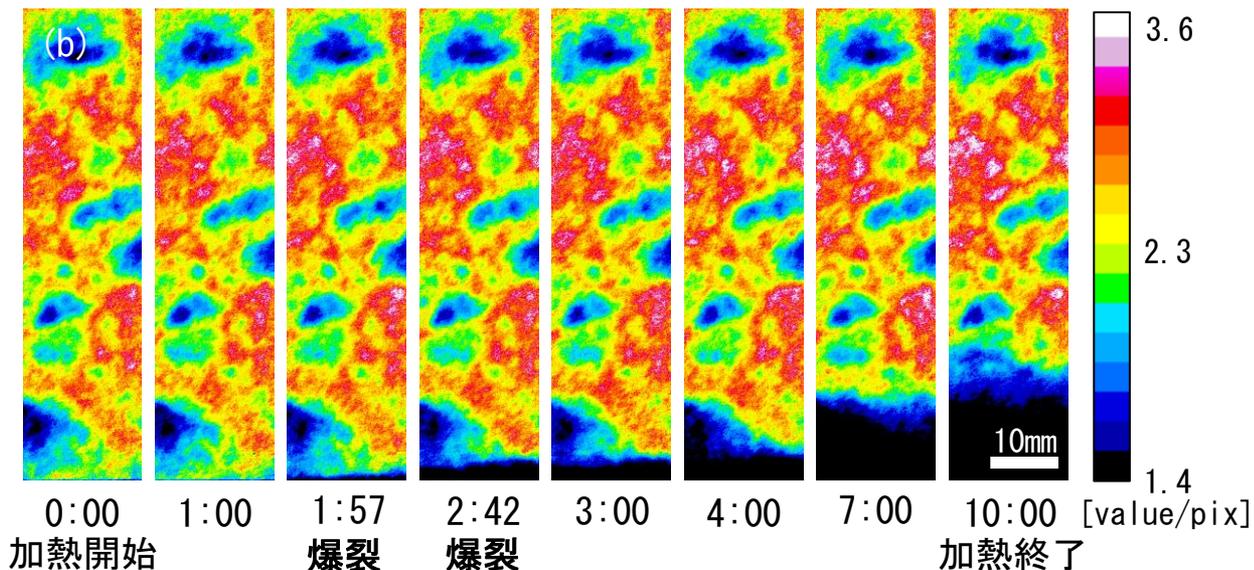
差分画像

$$\Delta P_w = -\ln \frac{I_t}{I_{t=0}}$$



解析範囲 (200 x 805pix)

(a) 水分強度画像 I



(b) 差分水分強度分布の経時変化

減衰率差分： $\Delta P_w = -\ln \frac{I_t}{I_{t=0}} = \lambda_w \rho_w \delta_c$

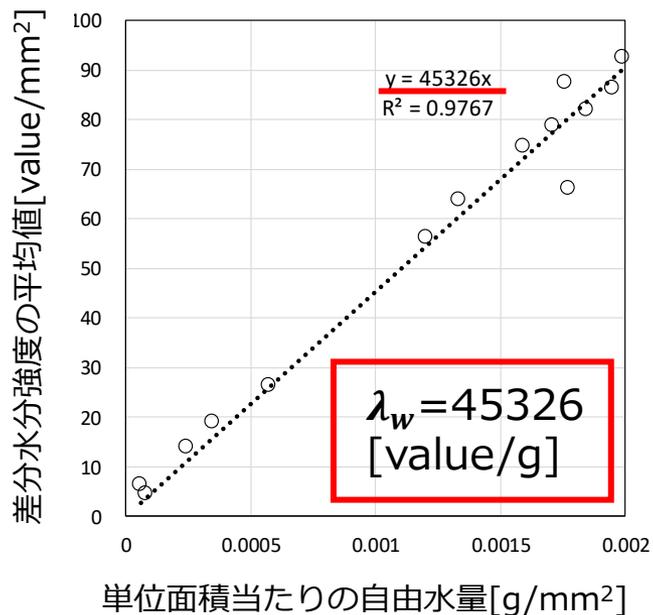
コンクリートの体積当たりの水重量は、 $\Delta W = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c}$

ペーストの体積当たりの水重量は、 $\Delta W_p = \frac{\Delta P_w}{\lambda_w \delta_c V_p}$

λ_w :水の質量吸収係数 [-]
 ρ_w :水のコンクリート中のかさ密度 [g/cm³]
 δ_c :コンクリート厚さ(=水のかさ厚さ) [cm]
 V_p :コンクリートに対するペーストの体積割合 [-]

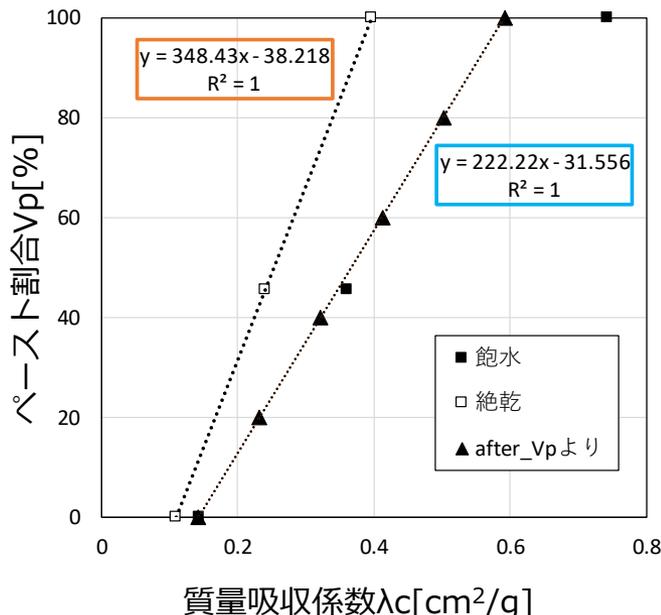
キャリブレーション試験

① λ_w :質量吸収係数の決定



水分強度と面積当たりの自由水量

② V_p :ペースト割合 算出式の決定

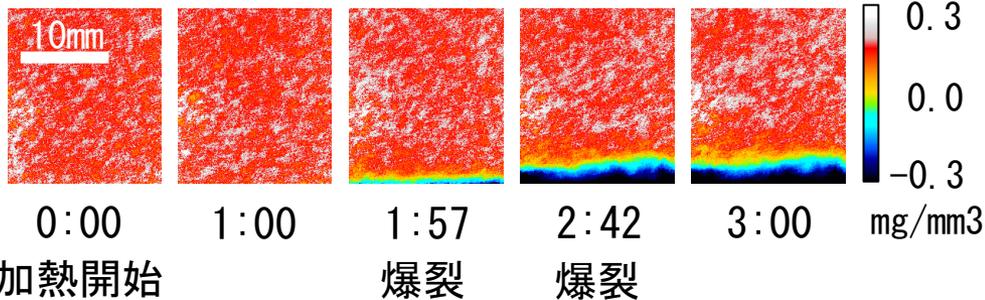


ペースト割合と質量吸収係数

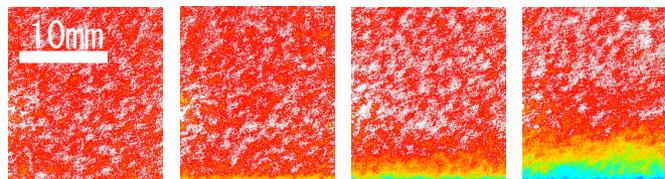
飽水、絶乾状態
 における算出式
 $V_p = a\lambda_c + b$
 をそれぞれ決定

水分量分布の経時変化

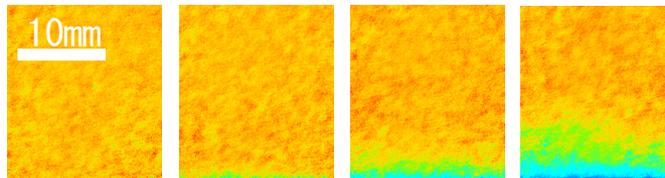
気乾試験体



飽水試験体



絶乾試験体

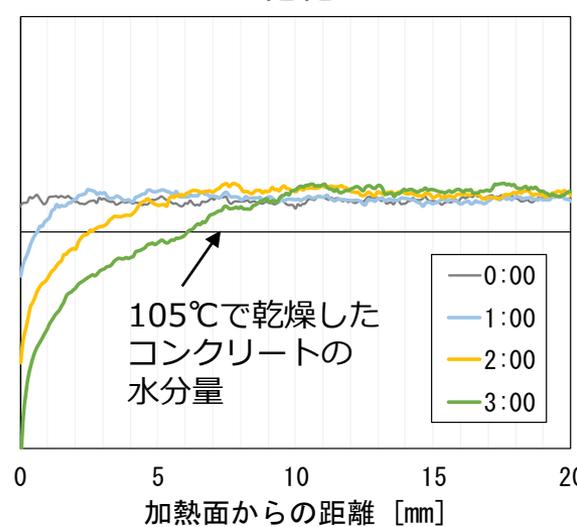
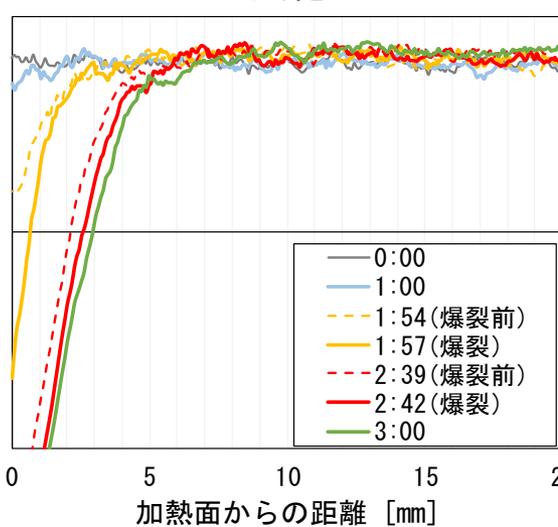
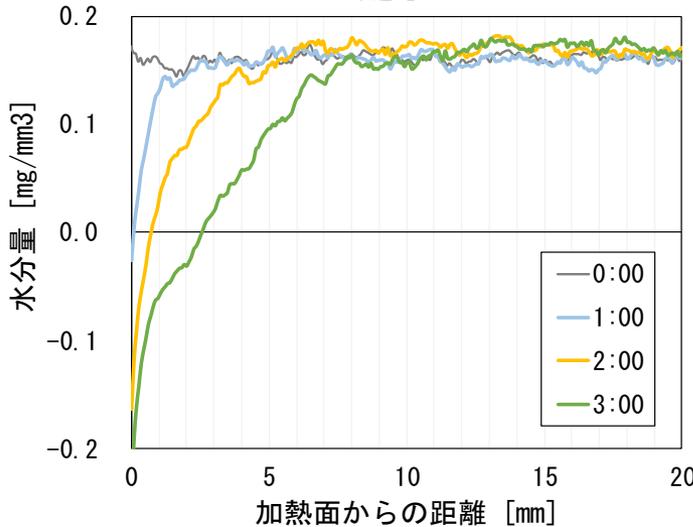


0:00 1:00 2:00 3:00

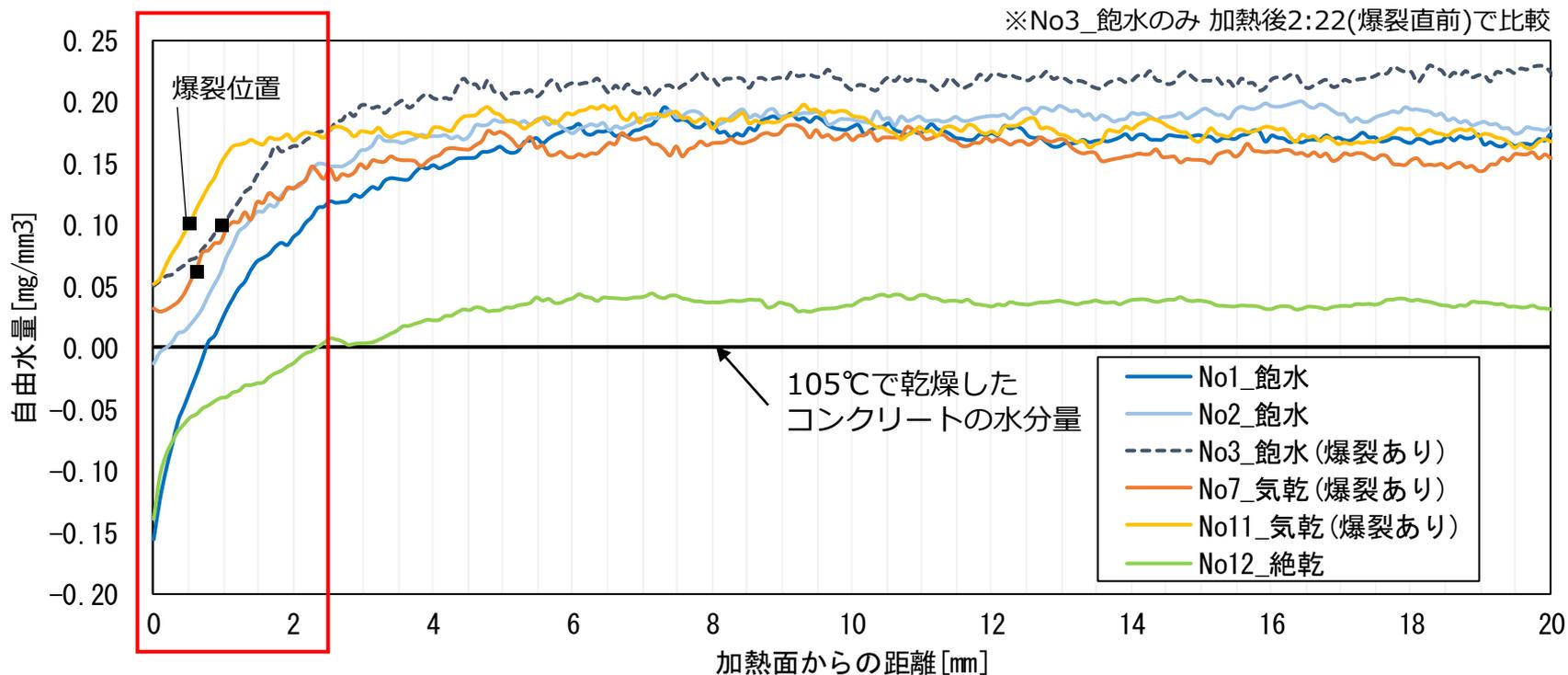
飽水

気乾

絶乾

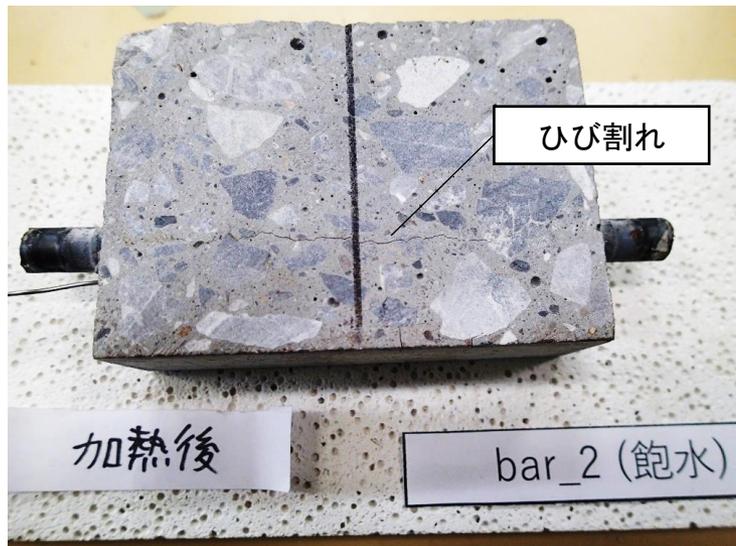


加熱時間ごとの水分量の分布

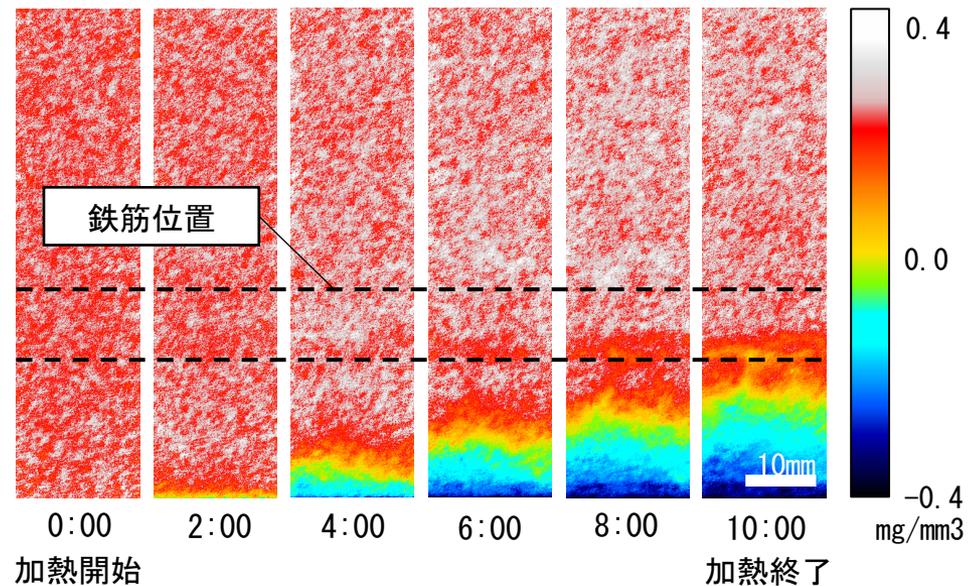


加熱から約1:55後(爆裂直前)における内部水分量分布

- 気乾試験体に比べ、飽水試験体で乾燥が早く進んでいる。
→初期水分量がほぼ同じであることから、内部温度の違いが影響している可能性
- 爆裂が生じた水準では、加熱面付近に0.03~0.05mg/mm²、爆裂位置に0.05~0.10mg/mm²の水分が存在している。
→爆裂位置付近の自由水量が水蒸気圧の発生に寄与している可能性。



鉄筋入り試験体のひび割れ



内部水分量の経時変化

- 鉄筋の有無による爆裂の程度に大きな差はなかった。
- 鉄筋位置で加熱中のコンクリートにひび割れが生じており、鉄筋による拘束の影響は確認されたが、爆裂への影響は観察されなかった。
- **生じたひび割れからの水分の逸散**が確認され、鉄筋周辺における水蒸気圧が低下した可能性が考えられる。

中性子イメージングによって得られた成果

1. コンクリートの高温加熱下における水分の挙動を可視化し、定量化した。
2. 飽水に比べて気乾状態のコンクリートは乾燥が遅く、爆裂位置において $0.05\sim 0.10\text{mg/mm}^3$ の水分が存在した。このため、**爆裂位置付近の内部水分量が爆裂の発生に関係することが示唆された。**
3. 鉄筋により生じたひび割れから水分の逸散が確認された。

今後の展望

1. 飽水と気乾状態における爆裂性状の違いを分析
→ 温度データを取得し、水分分布と合わせて水蒸気圧への影響を検討予定
2. 鉄筋の有無による熱応力への影響を検討
→ 加熱中におけるコンクリートのひずみ挙動を取得し、確認予定