



遅延エトリンガイト生成の 鉄筋コンクリートへの力学的影響

名古屋大学大学院

三浦泰人

遅延エトリンタイト生成 : Delayed Ettringite Formation (DEF)

RC橋梁



橋脚



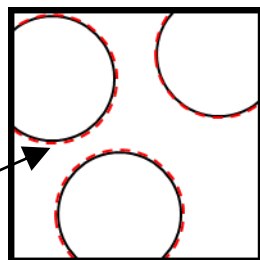
DEFはコンクリートの内部膨脹劣化の一つで、**養生初期に70℃以上の高温**に曝されると、水和過程で生成されるエトリンタイトが分解されて硫酸イオンを放出し、供用過程でこの硫酸イオンとアルミニウムイオンが反応することで、エトリンタイトを再度生成させることで膨張圧を発生させる現象。



遅延エトリンライト生成による影響：ひび割れ & 力学特性低下

ひび割れパターン

剥離ひび割れ

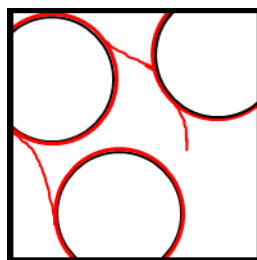


0.12%

膨脹:
圧縮強度:
弾性係数:

90%

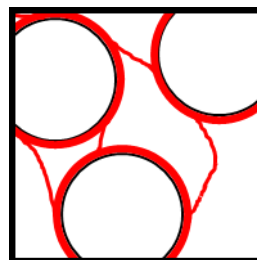
50%



0.30%

60%

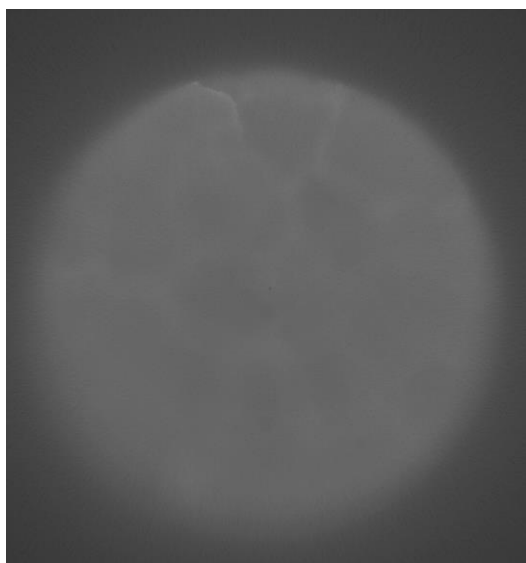
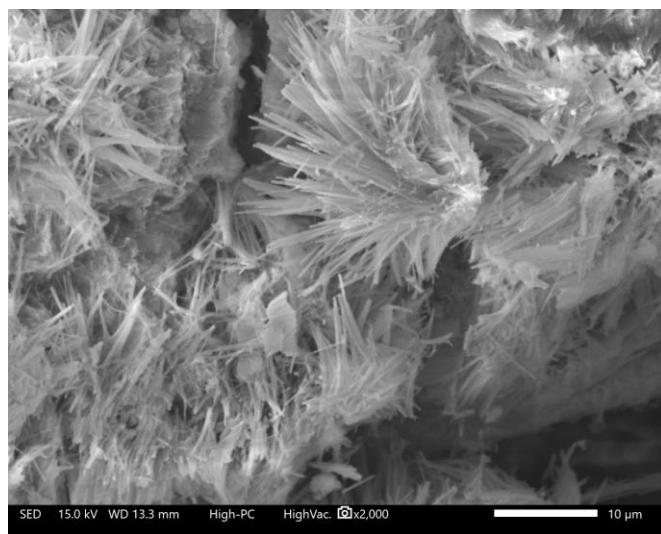
40%



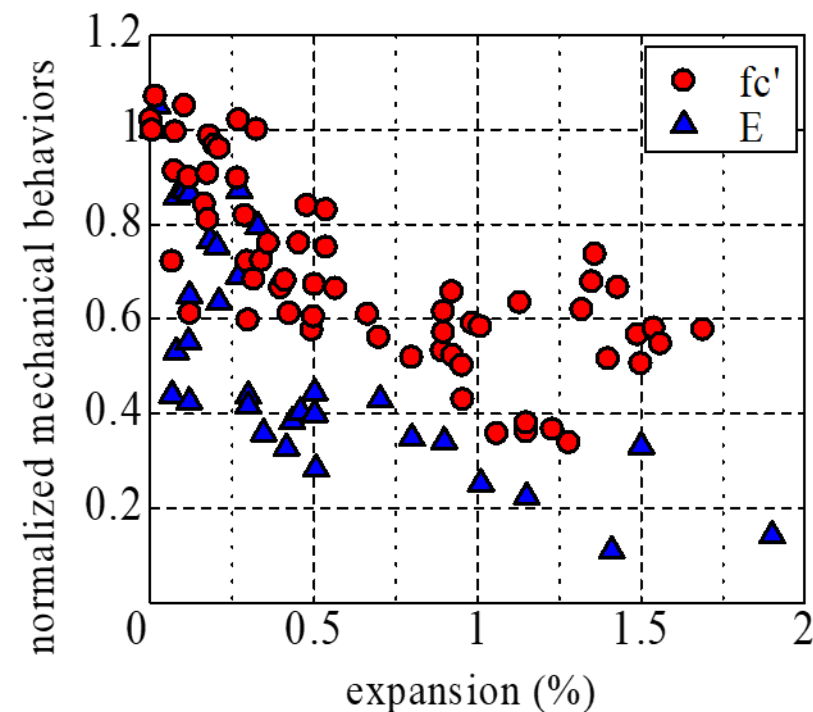
> 0.50%

50%

15%



力学特性低下



膨脹相: セメントペースト



DEFが鉄筋コンクリートに及ぼす影響の現状の理解と課題

破壊力学的観点から見たDEF膨張問題(4つのボトルネック)

ボトルネック①

DEFの発生条件(材料的・環境的)が未解明



???

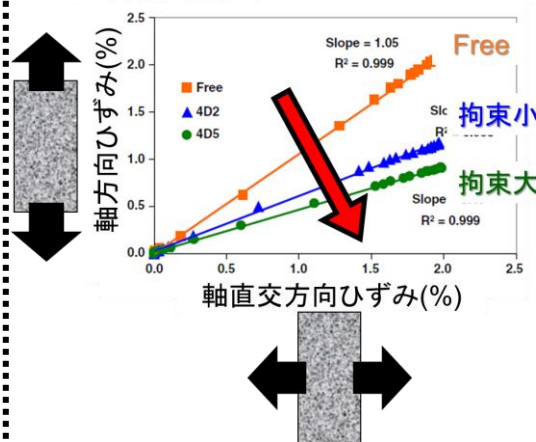
日本

- ✓ フランスでは生じるが日本では事例がほとんどない
- ✓ セメント, 環境条件??

ボトルネック②

拘束下の膨張異方性のメカニズムが未解明

DEFの膨張異方性 (Bouzabata et al. 2012)



- ✓ 膨張異方性のメカニズムの解明とそのモデル化
- ✓ 時間依存性を考慮した膨張圧発現モデル

ボトルネック③

膨張量ベースの力学特性低下の整理では本質的な低下メカニズムの議論ができない



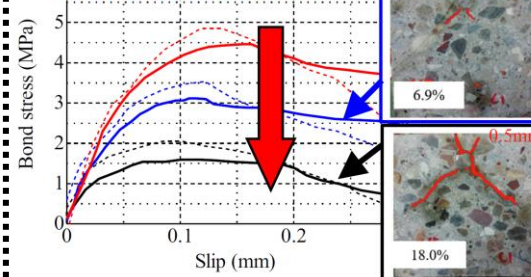
- ✓ DEF膨張による力学特性低下メカニズムの解明
- ✓ ひび割れに基づく指標による力学特性低下モデル

ボトルネック④

鉄筋付着性状の変化に関する実験データがない

鉄筋腐食による付着劣化 (Yang et al. 2020)
腐食ひび割れに伴って付着劣化が生じる

⇔ 内部膨張反応は???

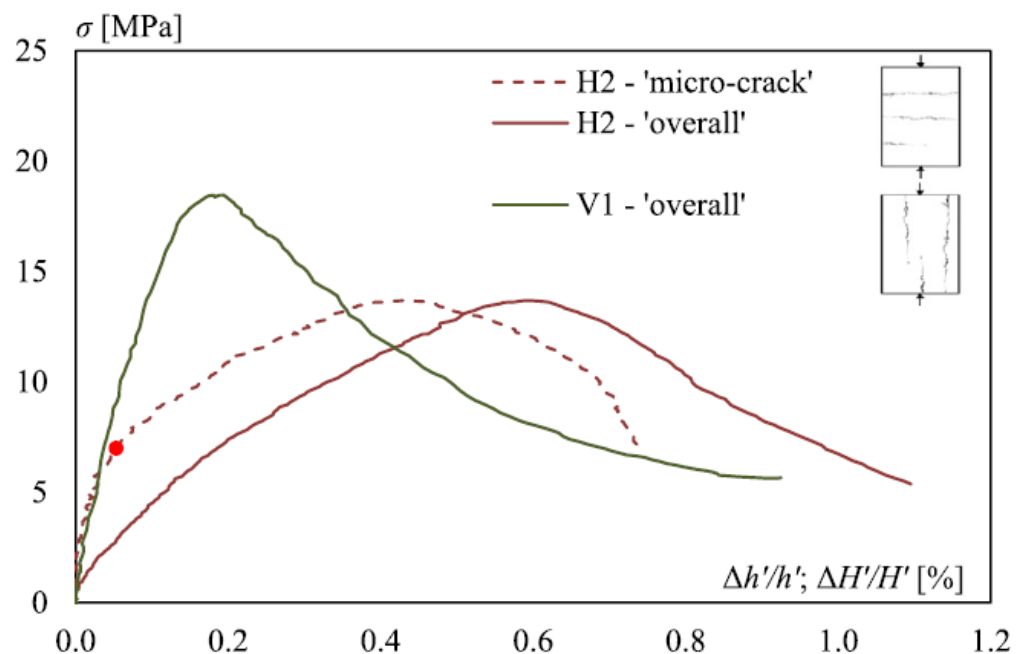


- ✓ DEF膨張による鉄筋付着劣化メカニズムの解明
- ✓ ひび割れに基づく指標による付着劣化モデル



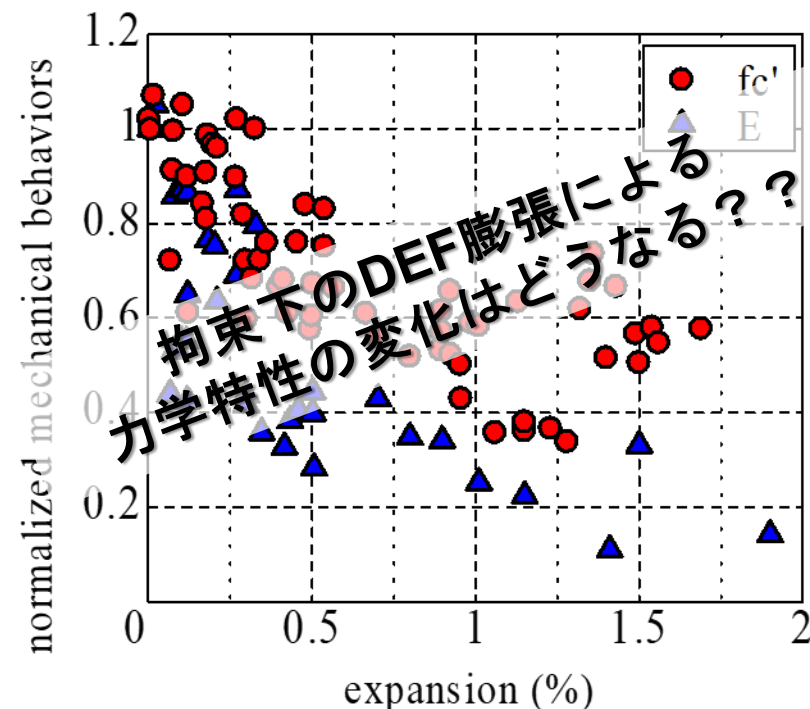
DEFが鉄筋コンクリートに及ぼす影響の現状の理解と課題

ボトルネック③: 膨張量ベースの力学特性低下の整理では本質的な低下メカニズムの議論ができない



Problem...

拘束下ではひび割れの方角性が生じるため、DEF膨張においても力学特性変化に方向性が生じる可能性がある。しかも、ASR膨張の場合、主応力直交方向のひび割れが生じた場合の方が強度低下が大きいデータが出ており、現行の強度低下モデルでは考慮できていない。





DEFが鉄筋コンクリートに及ぼす影響の現状の理解と課題

ボトルネック④: 鉄筋付着性状の変化に関する実験データがない

鉄筋付着性状の低下要因

鉄筋腐食に関する既往の研究 (Yang et al., 2020)

✓ 鉄筋の節による機械的な抵抗力



鉄筋とコンクリートの
界面の状態が変化

✓ コンクリートの抵抗力



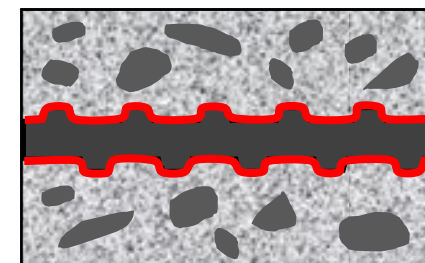
腐食ひび割れにより
コンクリートの拘束力が低下



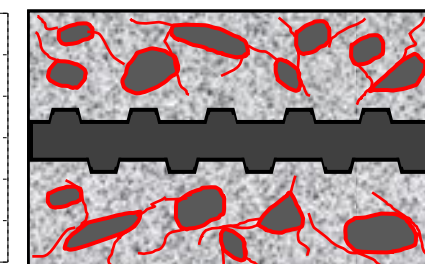
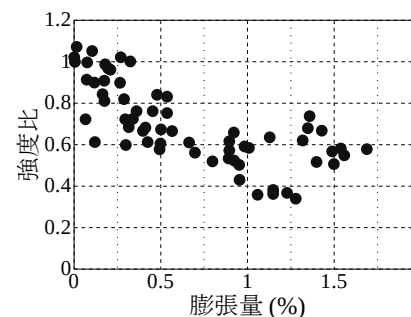
鉄筋の引抜きに対する
抵抗力が低下

DEF膨張では...

- ✓ 骨材界面のひび割れが発生
⇒ 鉄筋界面にひび割れが生じる可能性



- ✓ コンクリートの力学特性が低下



➡ 鉄筋コンクリート試験体をDEF膨張させた後、付着試験を行うことで、膨張過程および鉄筋引抜き過程における鉄筋付着性状の変化を評価



DEFが鉄筋コンクリートに及ぼす影響の現状の理解と課題

問題点の整理

✓DEFの発生要因が未解明

- 材料的・環境的要因が関与していると思われるが良く分からない.
- 過度な温度規制によるリスク管理をせざるを得ない

✓拘束下の膨張異方性のメカニズムが未解明

- 少なくともASR膨脹とは挙動が異なるので、何らかのモデル化が必要だが、メカニズムが分からないので体系的なモデル開発が難しい

✓力学特性低下のメカニズムが未解明

- 力学的な要因で生じたひび割れによる強度低下とは真逆の傾向となるため、構成則上での膨脹ひび割れの取り扱いができない

✓鉄筋付着性状に関する実験データがない

- ASR膨脹では定着部が適切に考慮されていれば付着低下が生じないというデータはある(整理されていないが). DEF膨脹の場合、骨材界面の剥離ひび割れが生じるので、付着劣化が生じる可能性がある.



目次

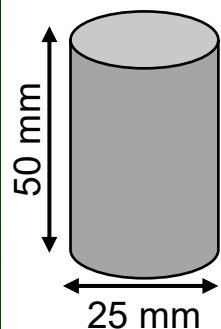
1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究
 - 1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験
 - 1.2 膨脹ひび割れによる力学特性低下メカニズム
2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化
 - 2.1 付着試験の概要
 - 2.2 膨脹中の鉄筋コンクリートの挙動
 - 2.3 片引き試験中の鉄筋コンクリートの挙動



1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究

1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験

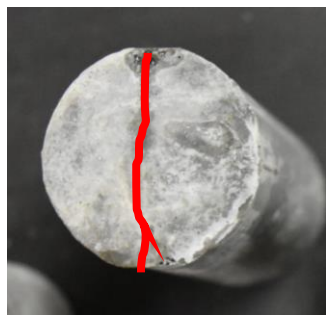
人工骨材



人工骨材
✓ f_c' : 58.5 MPa
✓ E : 48.9 GPa

電気炉酸化スラグを用いて密度を向上させることで、弾性係数を増加

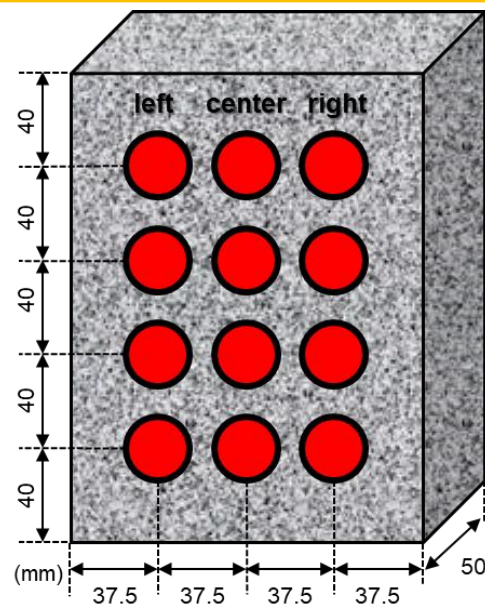
ASR & DEF crack



Crack angle



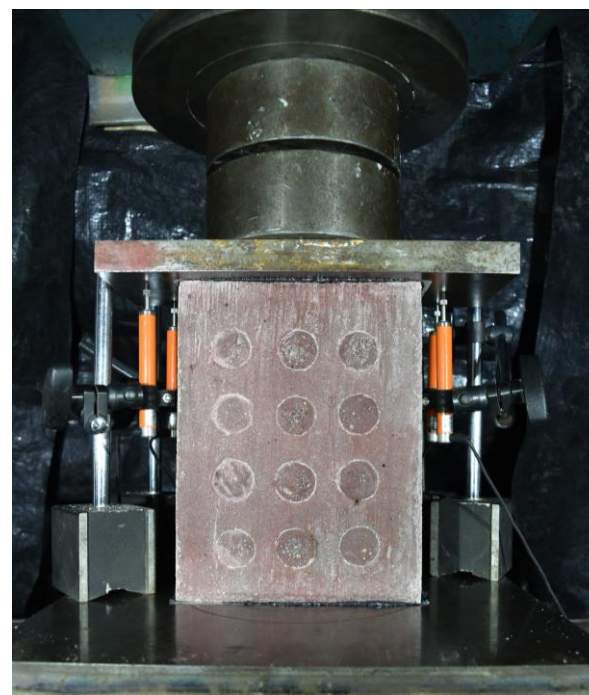
モデルコンクリート



母材モルタル

✓ f_c' : 51.7 MPa
✓ E : 25.3 GPa

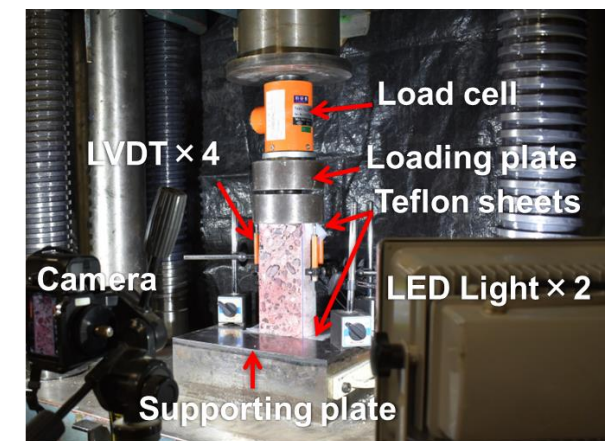
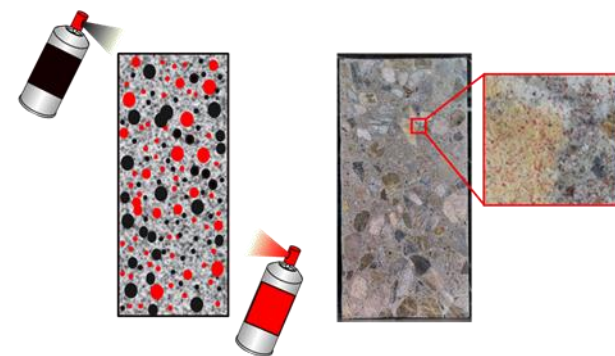
圧縮試験



力学特性

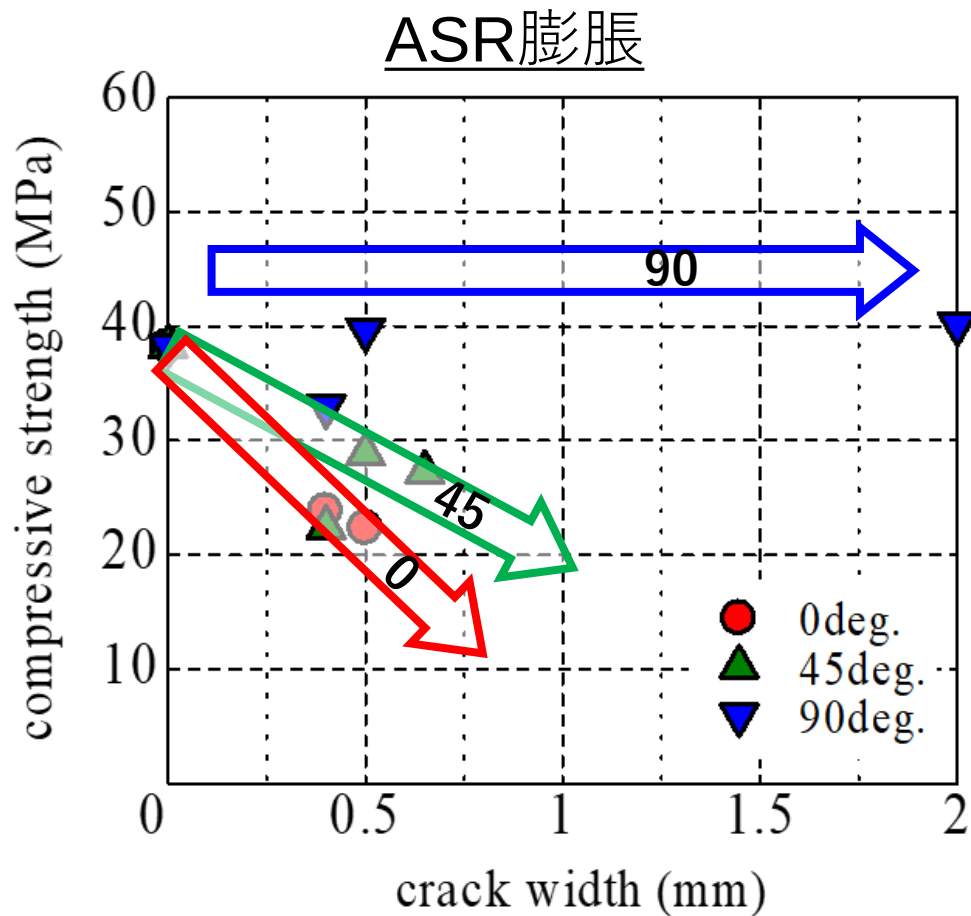
- ✓ 応力ひずみ
- ✓ 剛性変化
- ✓ 圧縮強度
- ✓ 弾性係数

画像相関法

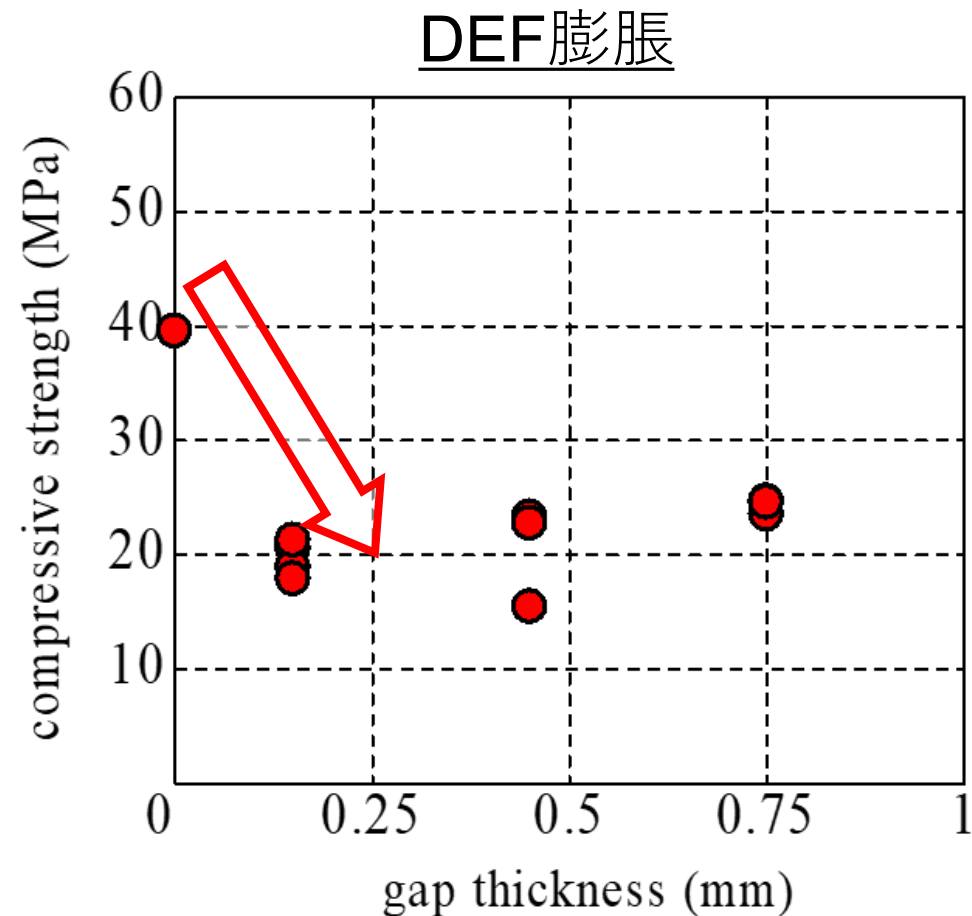


GOM Correlate

1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験

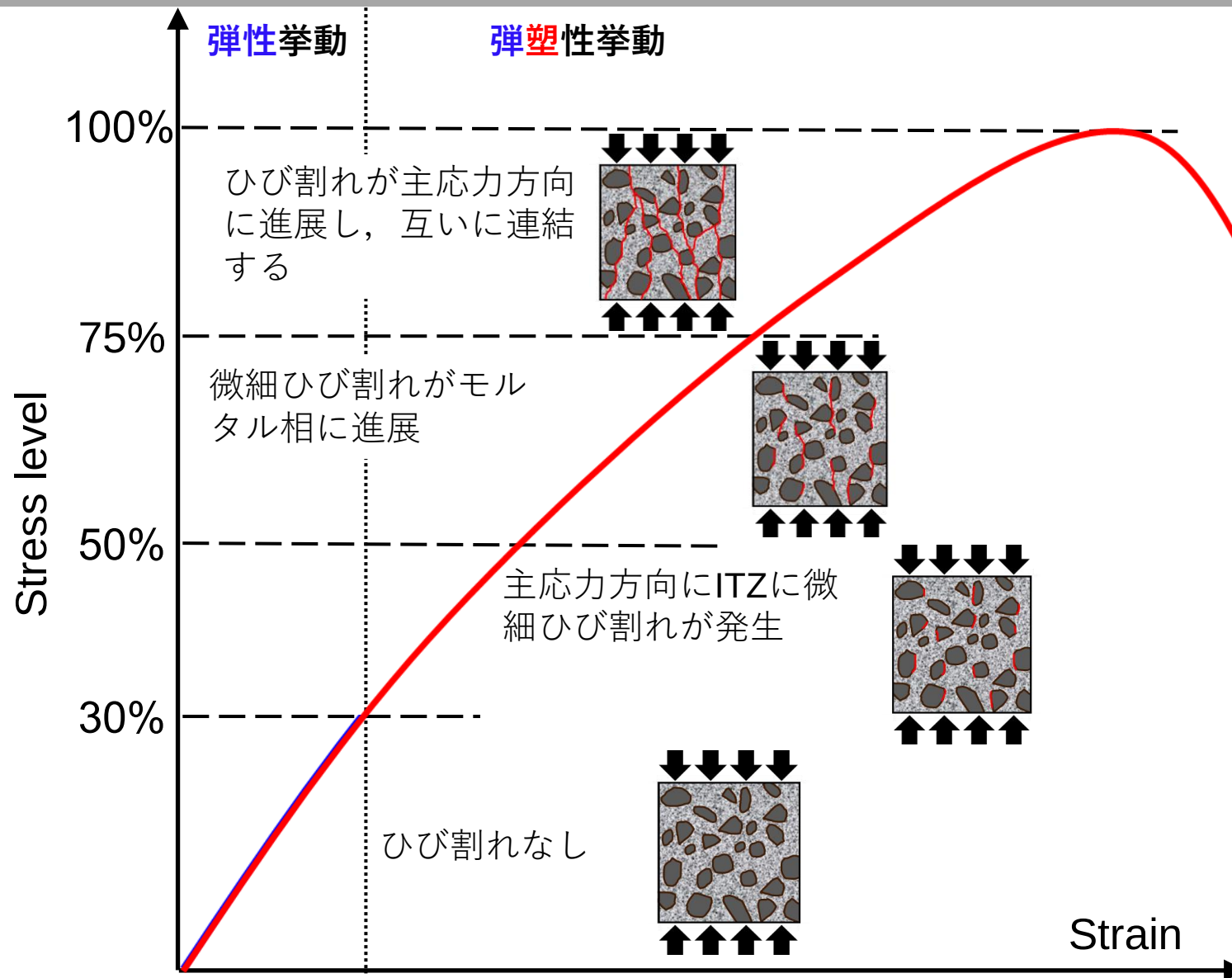


vertical crack (90):	No reduction
Horizontal crack (0):	Reduction
inclined crack (45):	Reduction



Gap thickness: Reduction

1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験

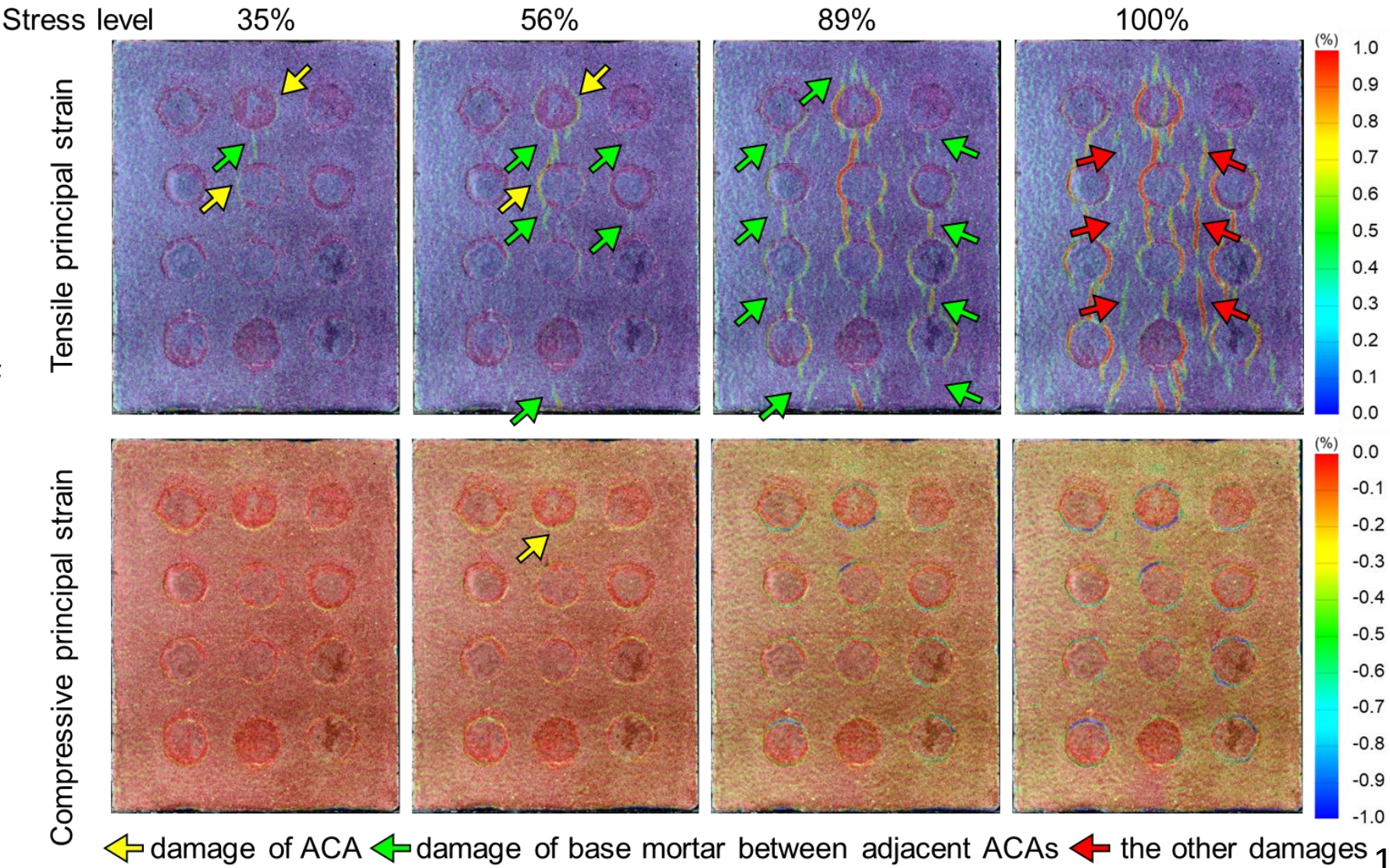


1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験

ひび割れなし

ひび割れ進展プロセス

1. ITZからひび割れが進展 (黄色)
2. ひび割れが載荷方向に進展 (緑色)
3. 新しいひび割れがモルタル相に発生 (赤色)





1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究

1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験

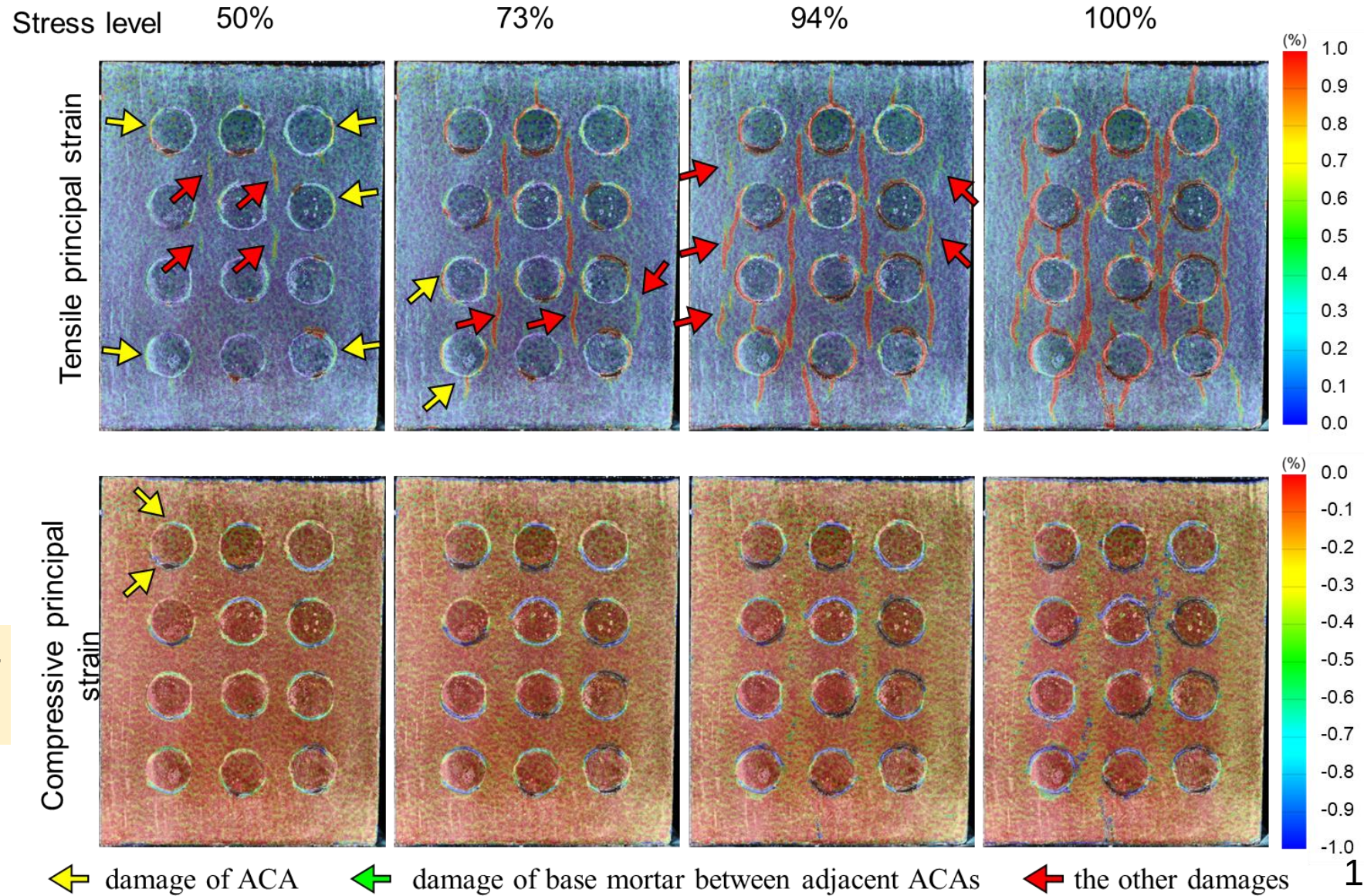
剥離ひび割れ

ひび割れ進展プロセス

1. 骨材界面のひび割れが荷重方向では閉じ、荷重直交方向では開くとともに(黄色), 新しいひび割れがモルタル相に発生(赤色)
2. 新しいひび割れとITZのひび割れが荷重方向に発生・進展する(赤色 & 黄色)

骨材界面の剥離ひび割れを起点として、終局時に発生した新しいひび割れ(赤色)が早期に生じる

圧縮強度と弾性係数が低下



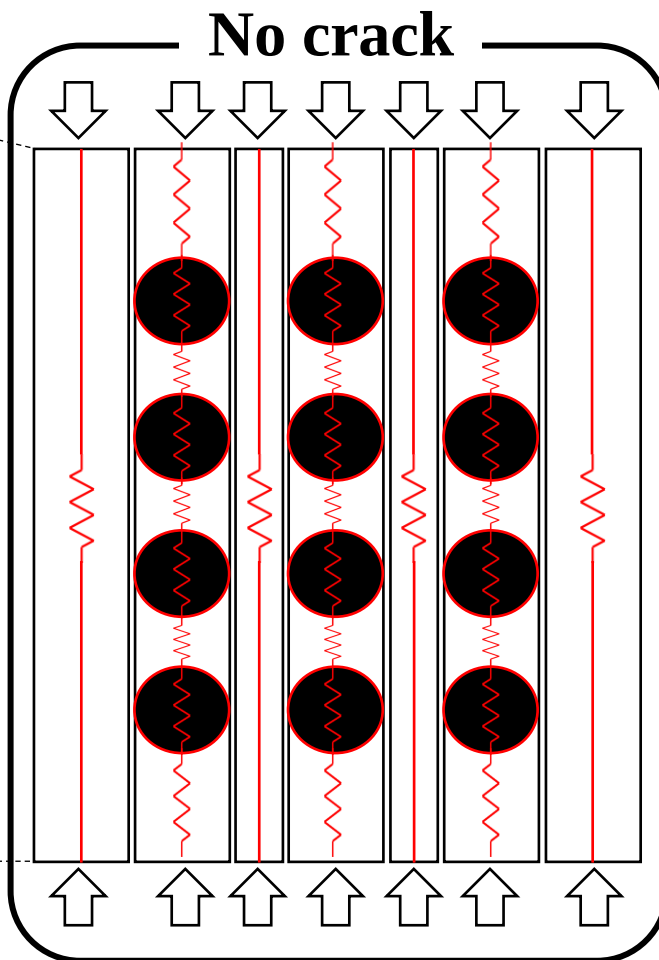
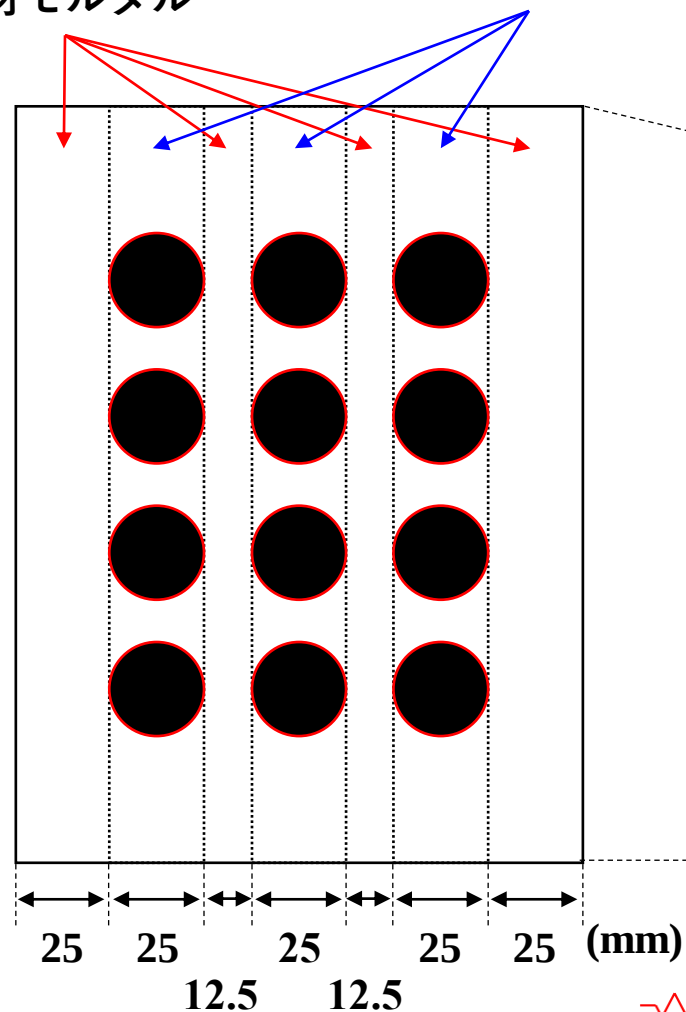


1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究

1.2 膨脹ひび割れによる力学特性低下メカニズム

力学特性低下メカニズム

母材モルタル 人工骨材を含む領域



弾性バネ



せん断バネ

並列モデルによる力学バネ系を考える

載荷方向の圧縮応力の伝達経路を考えると、母材モルタルと人工骨材を含む領域で圧縮応力を負担していると考えることができる

この圧縮応力伝達経路が多いほど、断面内の各領域で小さい応力で外力を負担できる。

応力伝達経路がひび割れによって阻害されると、他の領域の応力負担を増やさないと同じ外力に釣り合わなくなる。

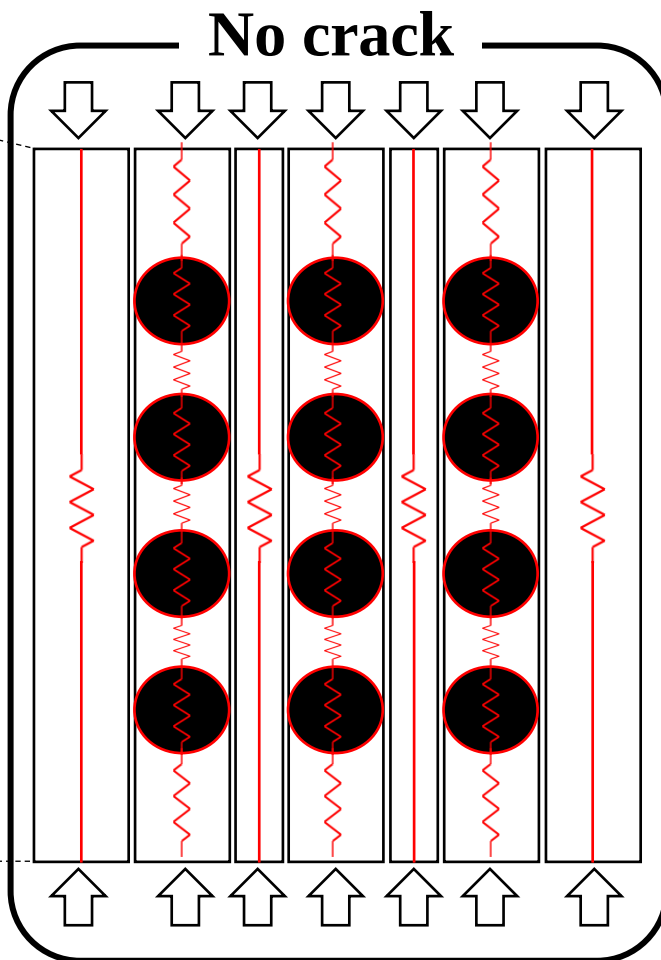
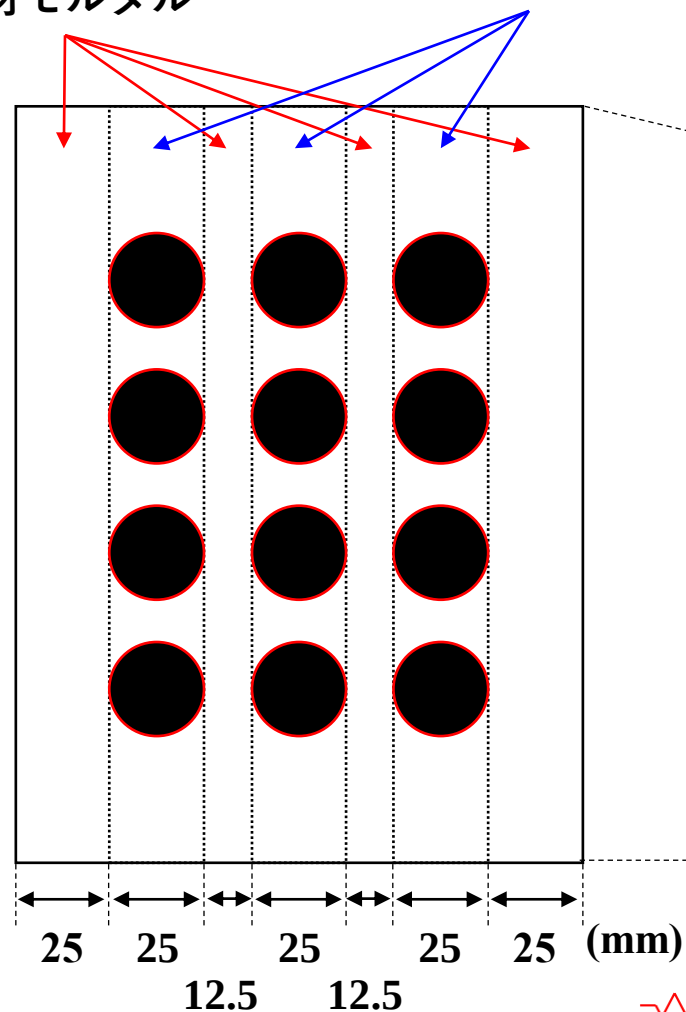


1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究

1.2 膨脹ひび割れによる力学特性低下メカニズム

力学特性低下メカニズム

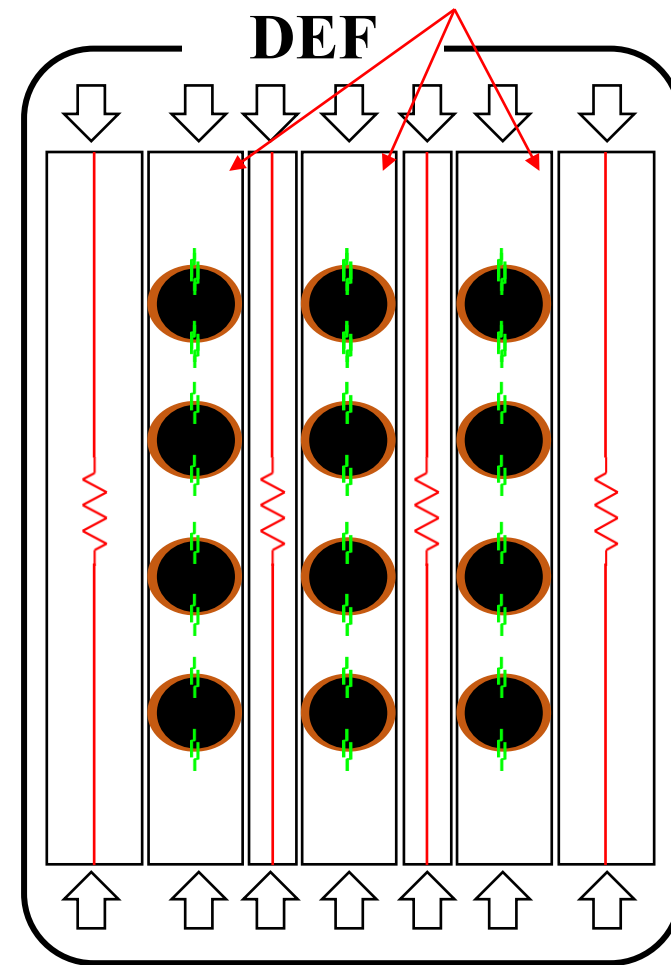
母材モルタル 人工骨材を含む領域



弾性バネ

せん断バネ

骨材界面が切れているので、圧縮応力を負担する領域がかなり制限される



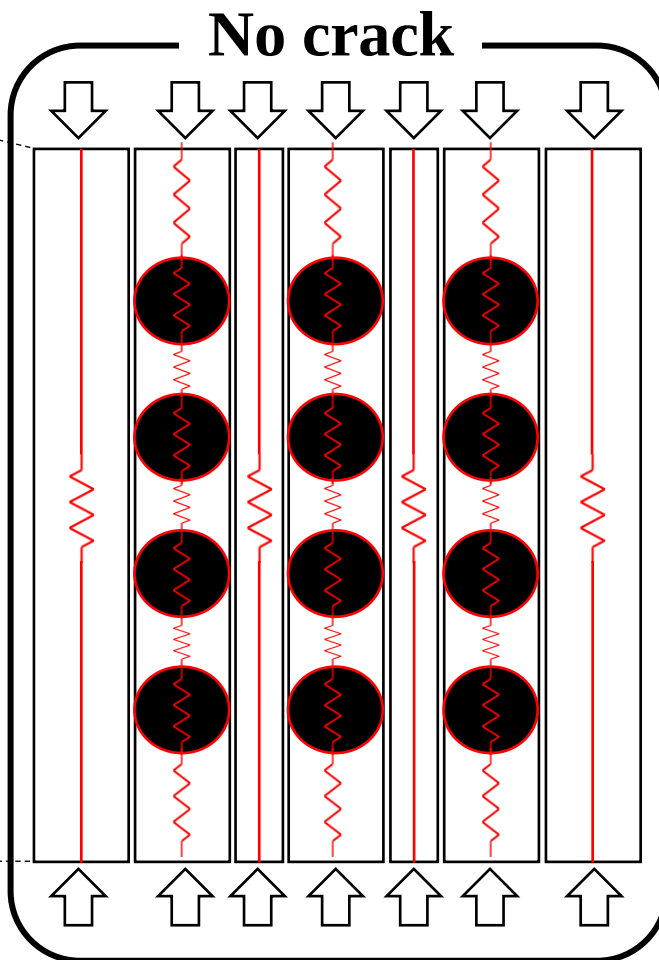
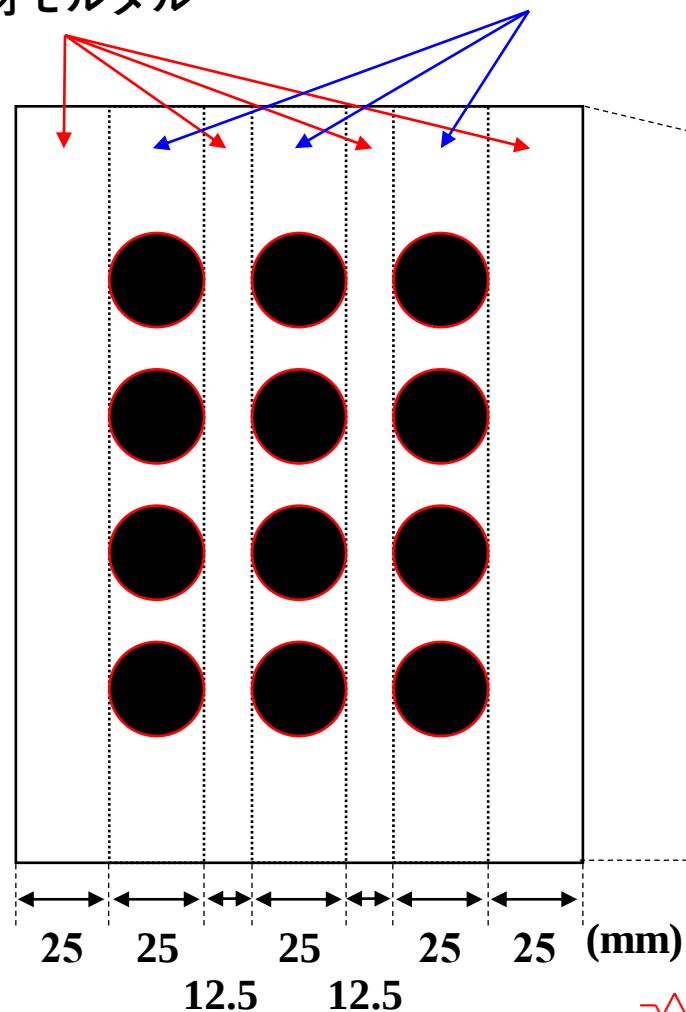


1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究

1.2 膨脹ひび割れによる力学特性低下メカニズム

力学特性低下メカニズム

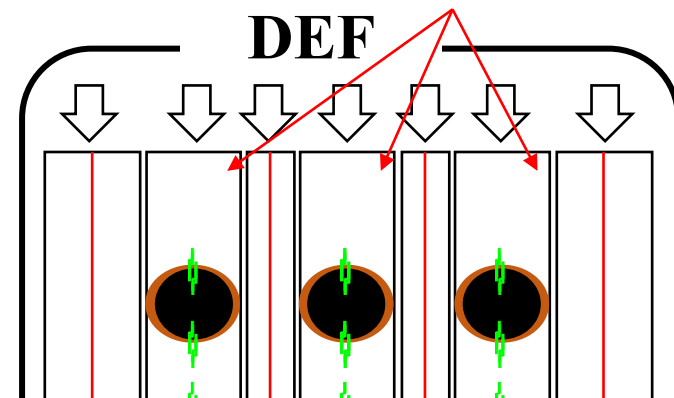
母材モルタル 人工骨材を含む領域



弾性バネ

せん断バネ

骨材界面が切れているので、圧縮応力を負担する領域がかなり制限される



人工骨材を含む領域の応力負担ができないので、他の母材モルタルの領域が頑張って外力を負担しなければならない。

- ✓ ある外力に対して少ない弾性領域が大きい応力を負担しなければならないので弾性係数は小さくなる
- ✓ その領域が終局になると見かけ上も終局になるので圧縮強度も低下する

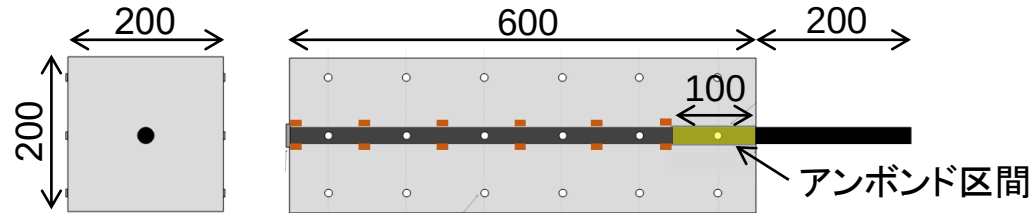


目次

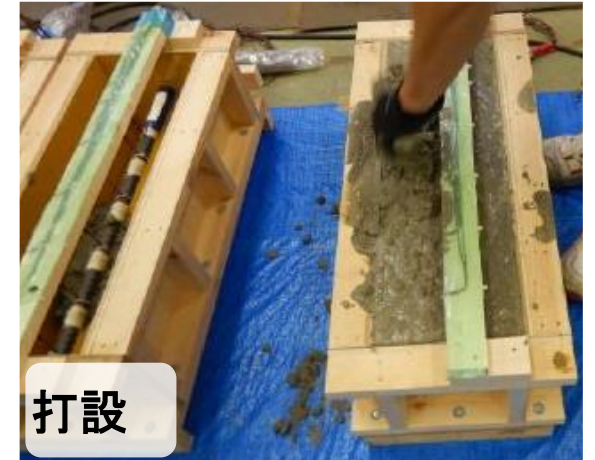
1. DEF膨脹によるコンクリートの力学特性の低下に関する研究
 - 1.1 モデルコンクリートによる模擬膨脹ひび割れの実験
 - 1.2 膨脹ひび割れによる力学特性低下メカニズム
2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化
 - 2.1 付着試験の概要
 - 2.2 膨脹中の鉄筋コンクリートの挙動
 - 2.3 片引き試験中の鉄筋コンクリートの挙動
 - 2.4 DEF膨脹による鉄筋付着性状の低下要因

2.1 付着試験の概要

- ✓ 鉄筋埋め込み長さの大きい付着試験体と円柱試験体を打設
→ 付着長の変化など付着性状を詳細に評価



単位量 (kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	K ₂ SO ₄
175	343	825	918	15.236



打設



高温養生

打設

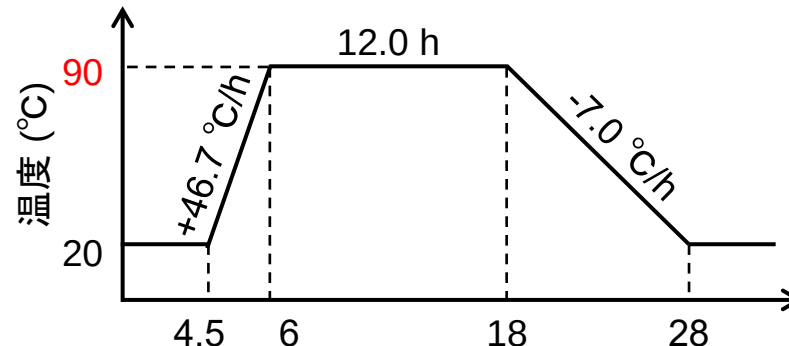
高温養生

封緘養生

膨張促進試験

付着試験

- ✓ DEF膨張を発生させるために高温養生を実施





2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

2.1 付着試験の概要

打設

高温養生

封緘養生

膨張促進試験

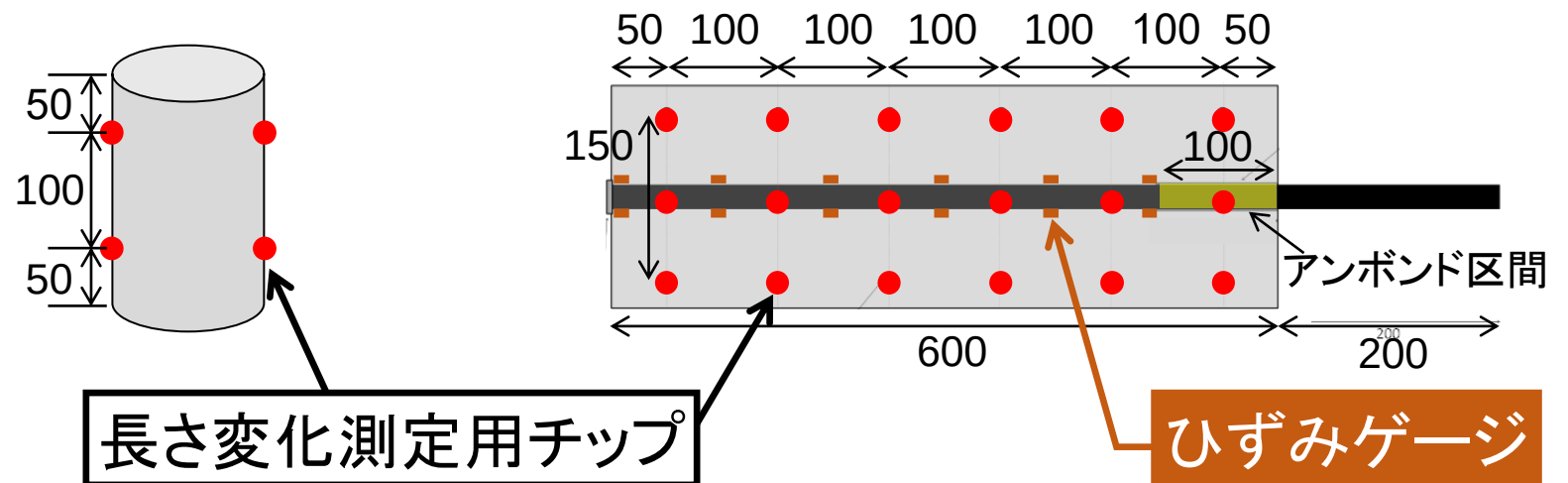
付着試験

- ✓ 試験体を水に浸漬して膨張促進試験を開始

[定期測定項目]

- 膨張量
円柱・付着試験体(鉄筋軸方向・横方向)
- 鉄筋のひずみ

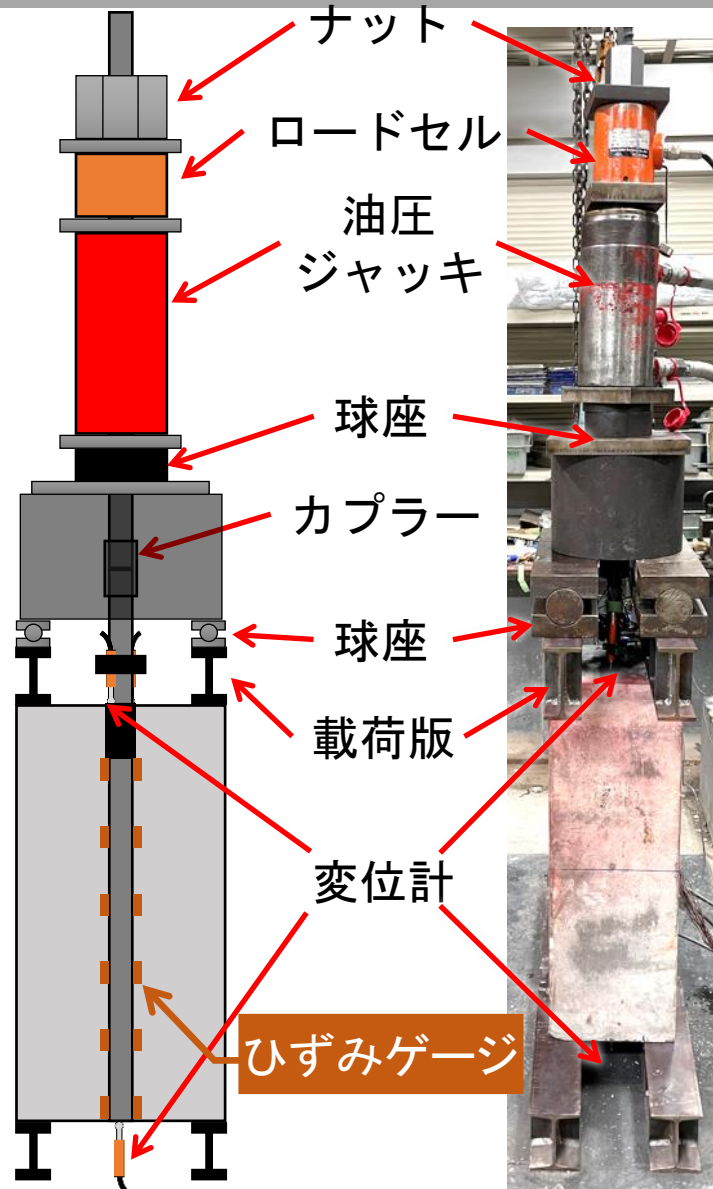
➡ DEF膨張過程の付着挙動を評価





2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

2.1 付着試験の概要



[測定項目]

- ・試験体上下端の変位計
- ・鉄筋のひずみゲージ



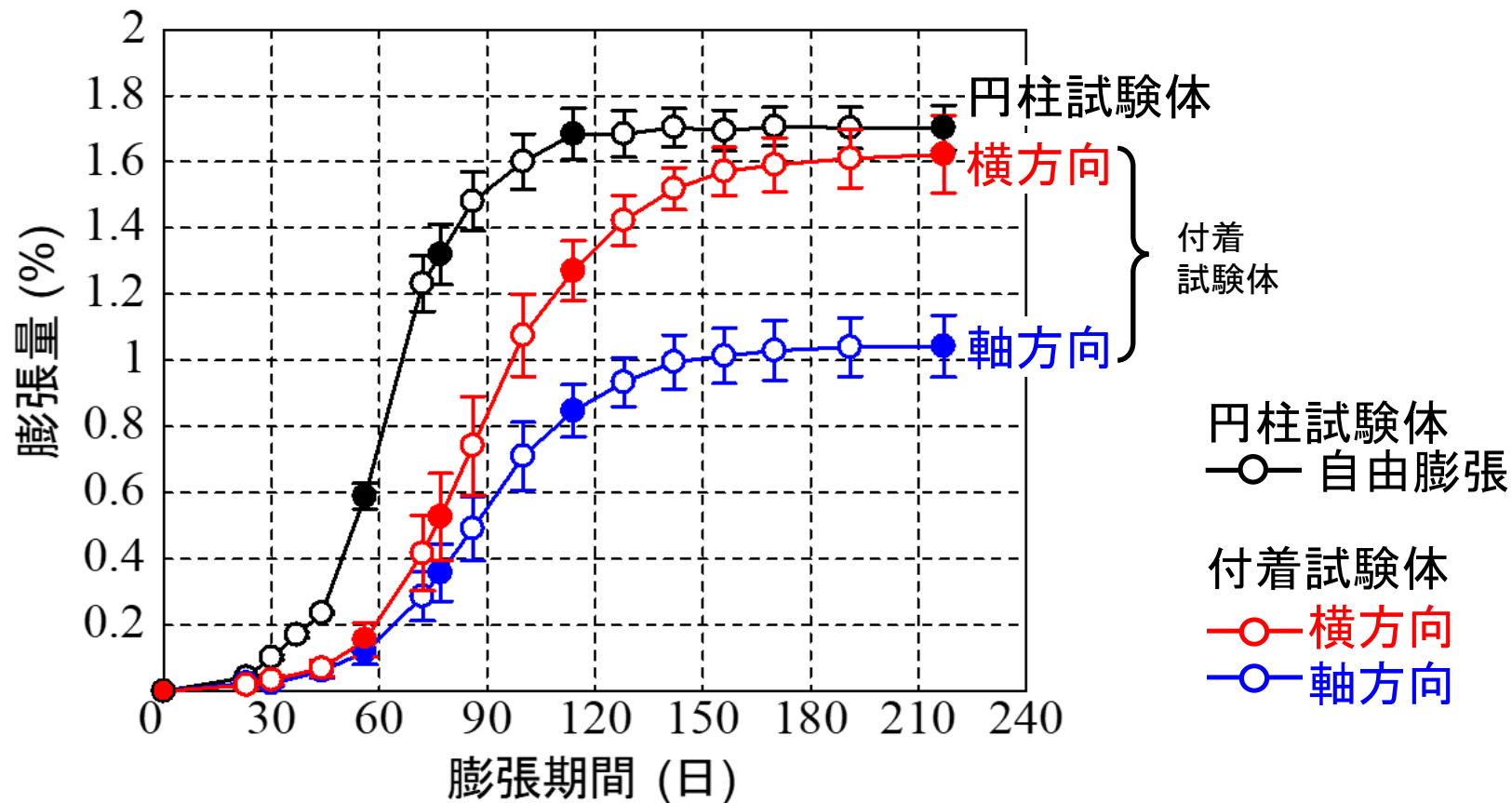
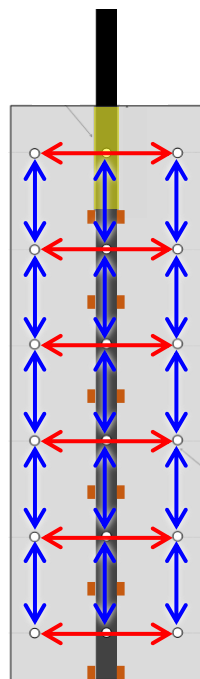
鉄筋引抜き過程の
付着挙動を評価



2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化



2.2 膨脹中の鉄筋コンクリートの挙動



- ✓ 横方向の膨張量変化は円柱試験体と同様の傾向
- ✓ 鉄筋の拘束により軸方向膨張が抑制

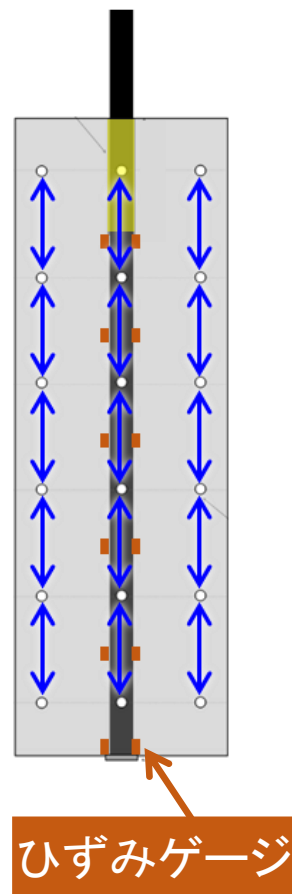
➡ 鉄筋の拘束を受けにくい横方向の膨張量によって実験結果を整理



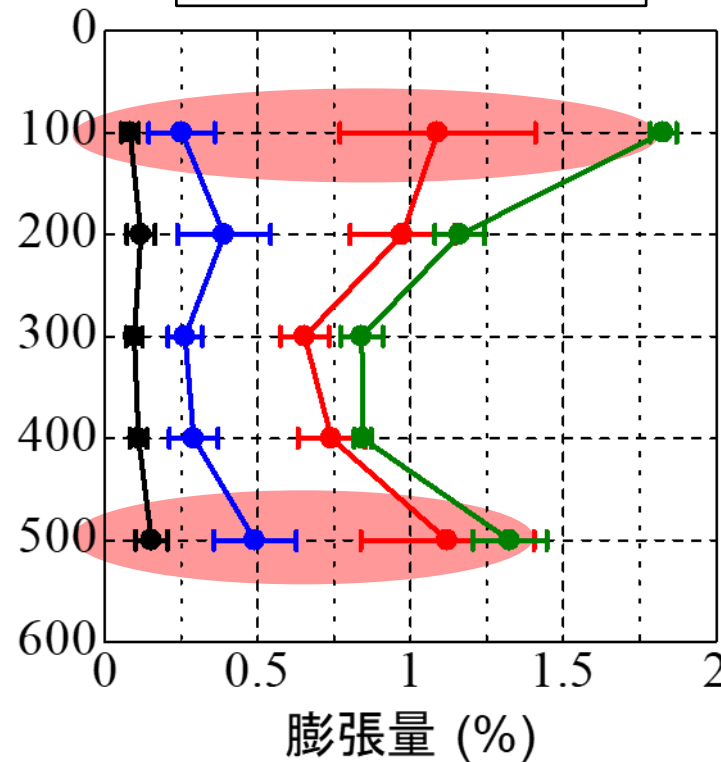
2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化



2.2 膨脹中の鉄筋コンクリートの挙動



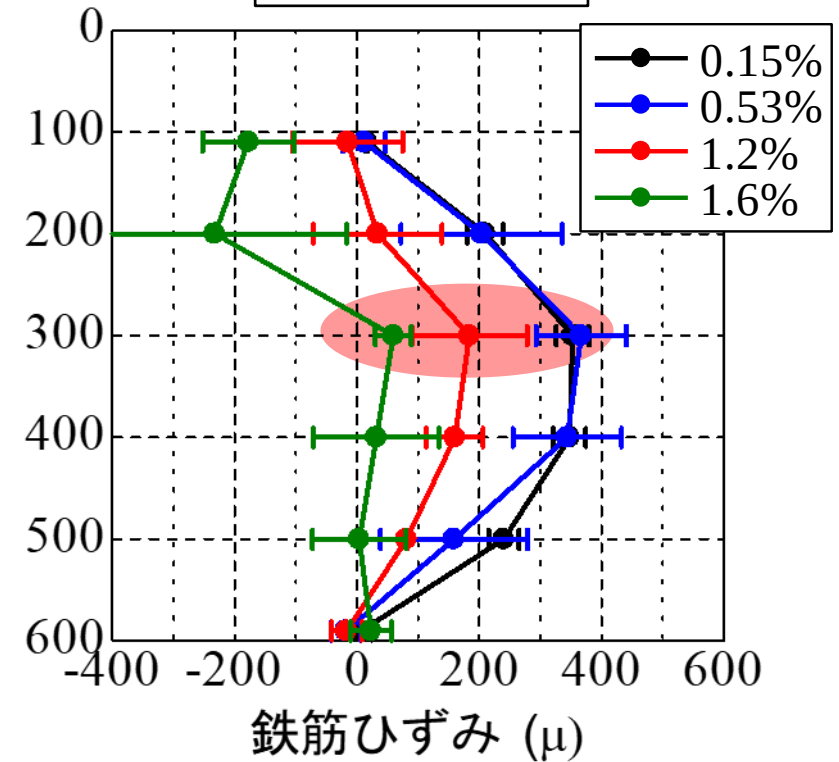
膨張量(軸方向)



中央部で最小
端部で最大

反対の傾向

鉄筋ひずみ



中央部で最大
端部で最小

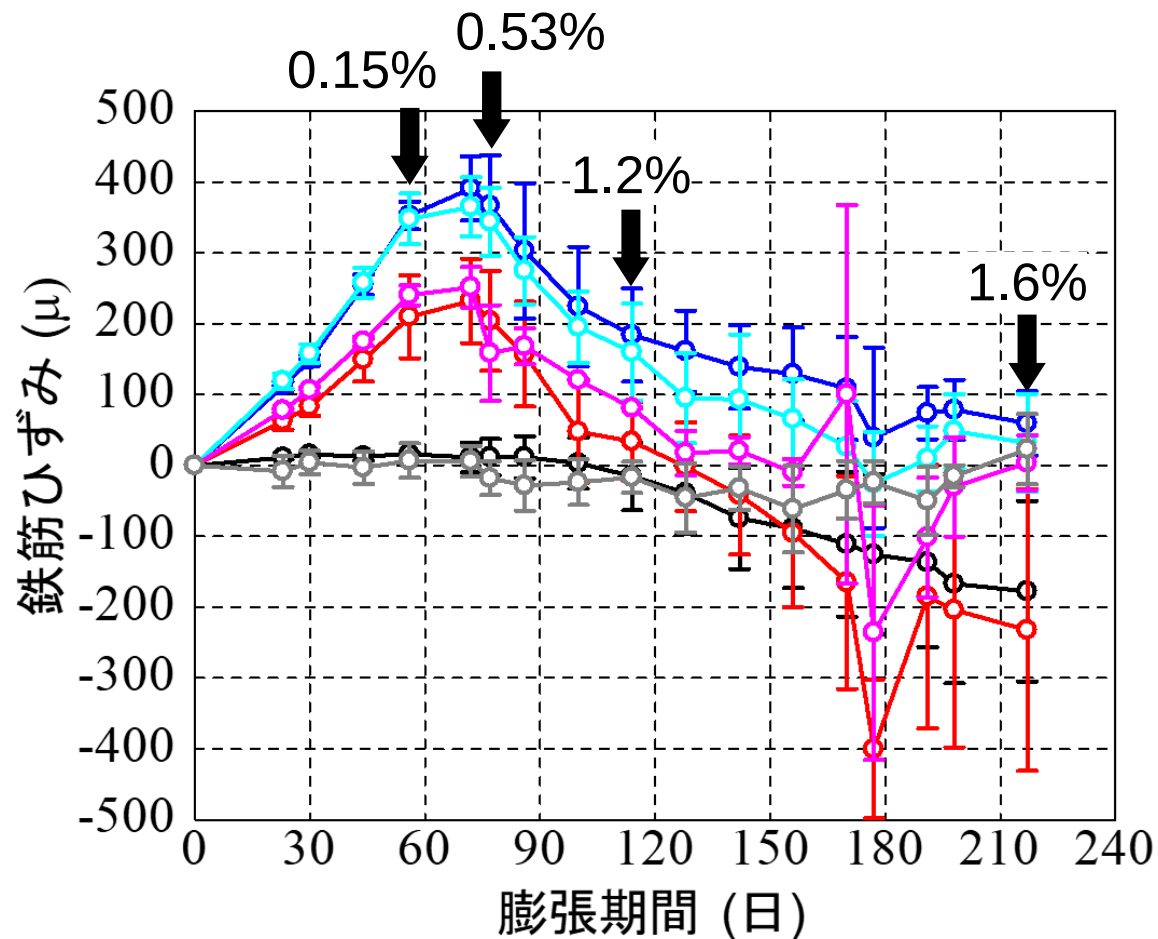
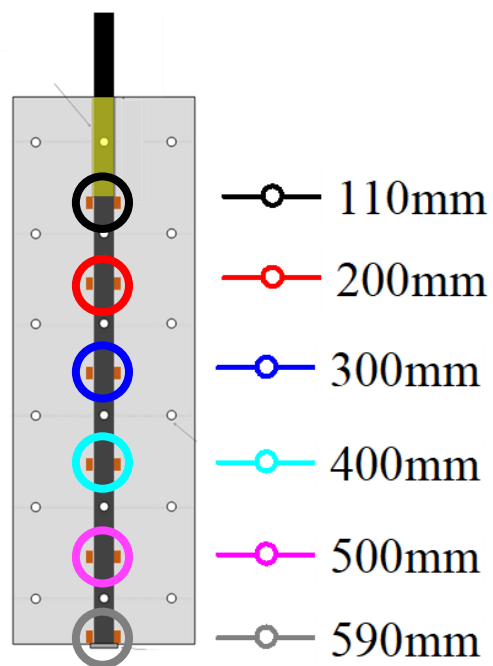
中央部で鉄筋がコンクリートの軸方向膨張を拘束 ← **付着の影響**

➡ DEF膨脹過程でも鉄筋とコンクリートには応力伝達があり, 鉄筋中央部で最大



2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

2.3 片引き試験中の鉄筋コンクリートの挙動



✓ 増加傾向

→ 鉄筋とコンクリートの界面に**付着**があることで、コンクリートの膨張により鉄筋に引張ひずみが発生

✓ 減少傾向

→ 鉄筋とコンクリートの**界面にひび割れが発生**し、付着が低下した可能性

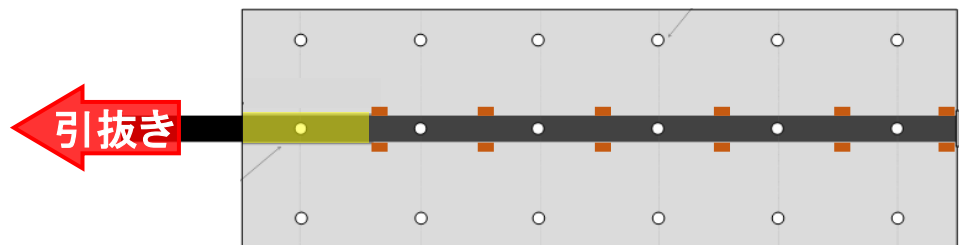


2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

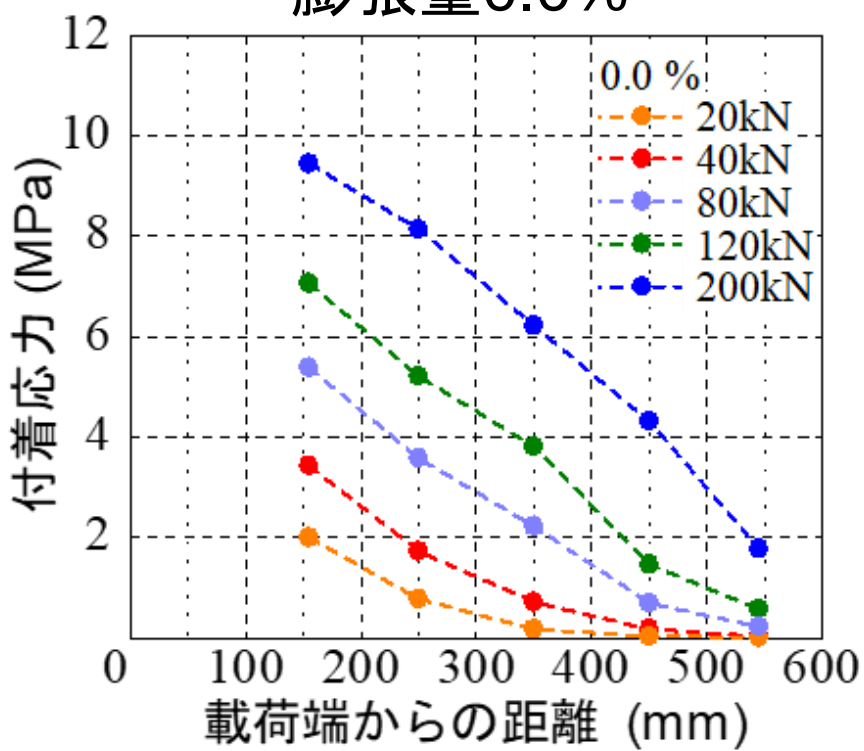


2.3 片引き試験中の鉄筋コンクリートの挙動

付着応力分布



膨張量0.0%



付着応力

$$\tau = \frac{E_s D}{4} \cdot \frac{d\varepsilon_s}{dx}$$

E_s : 鉄筋の弾性係数(=205GPa)

D : 鉄筋径(=22mm)

$\frac{d\varepsilon_s}{dx}$: 鉄筋ひずみの勾配

上端が最大・下端が最小の分布



鉄筋の引抜き力に抵抗して、
上部から下部に付着応力が伝達

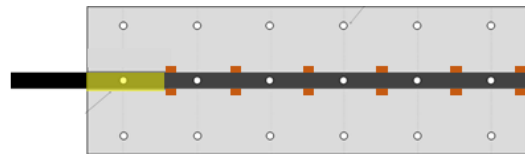
【一般的な付着性状】



2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

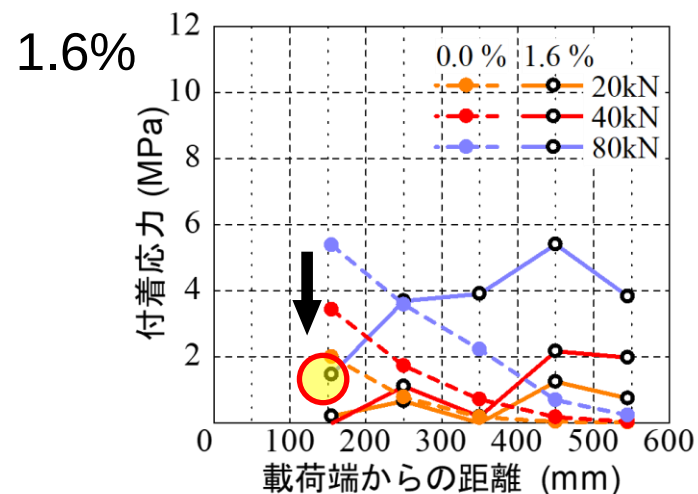
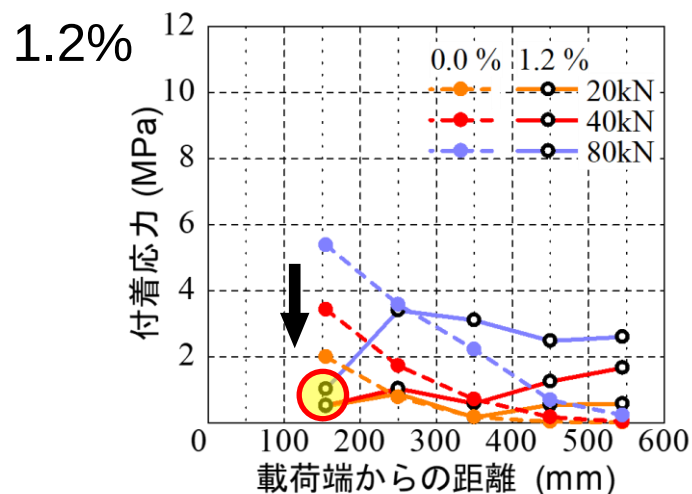
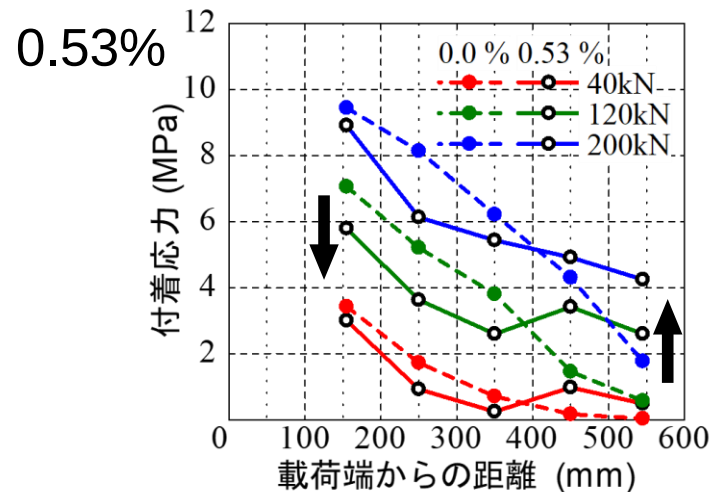
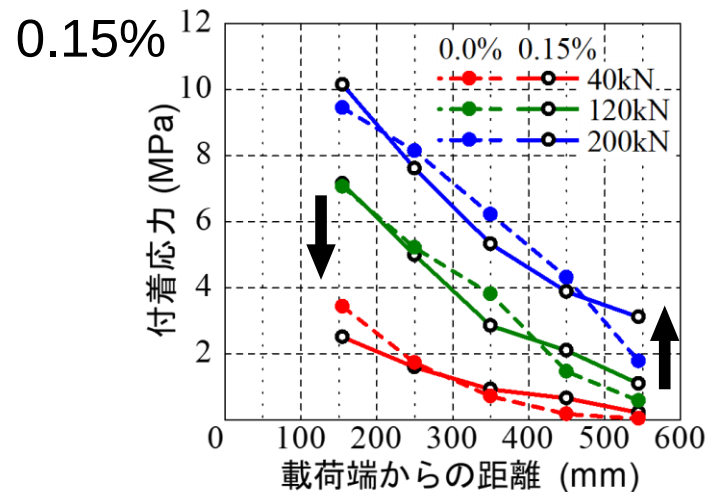


2.3 片引き試験中の鉄筋コンクリートの挙動



付着応力分布

* 膨張量0.0%(破線)と比較



- ✓ 上部の付着応力は減少
- ✓ 下部の付着応力は増加

DEF膨張によって付着性状が低下したことで、上部だけでは外力に抵抗できず、下部まで付着応力が伝達

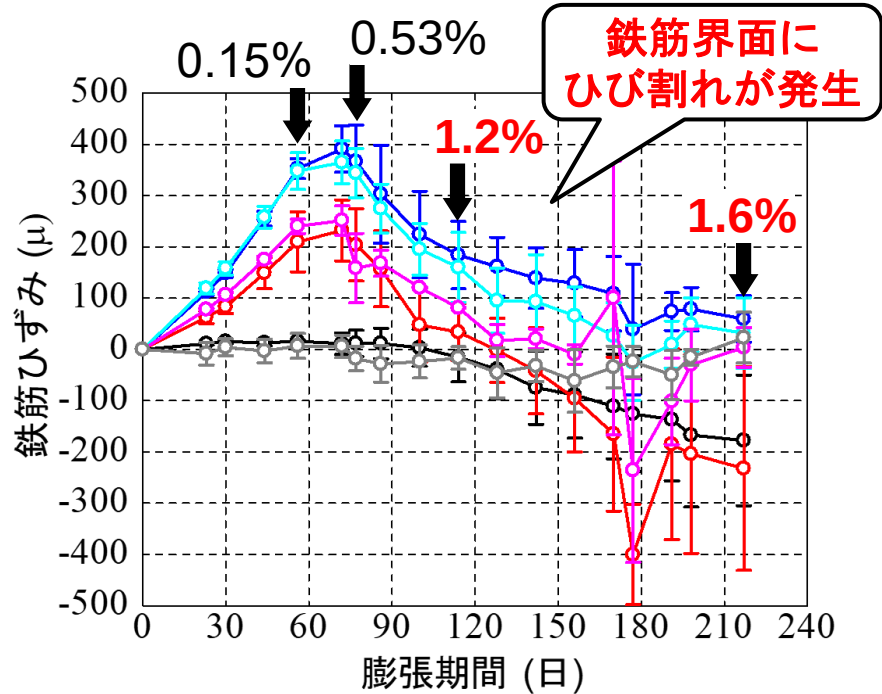
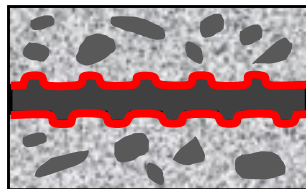
- ✓ 鉄筋上端では付着応力がほぼ発生しない



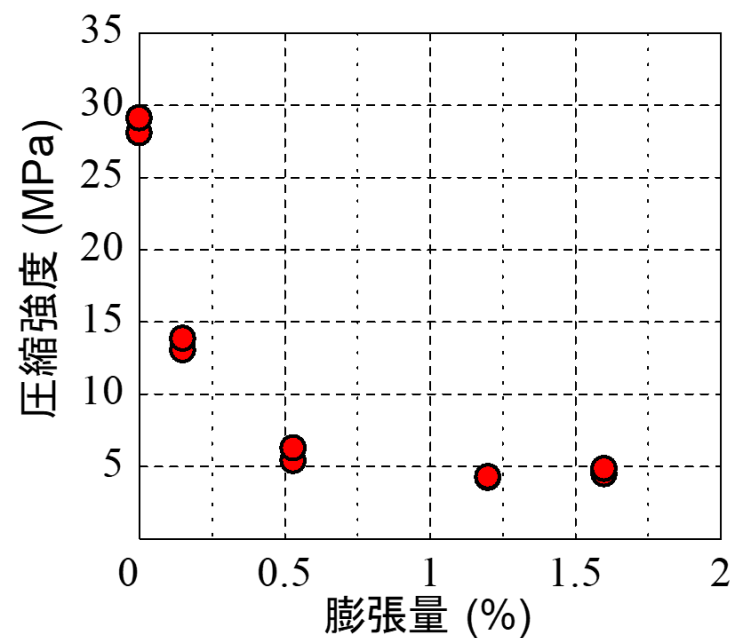
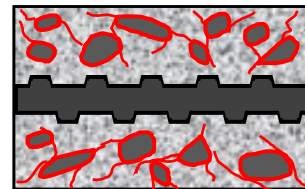
2. DEF膨脹による鉄筋付着性状の変化

2.4 DEF膨脹による鉄筋付着性状の低下要因

✓ 鉄筋界面の状態の変化



✓ コンクリートの抵抗力の低下



DEF膨張により付着性状が著しく低下

問題点の整理

✓DEFの発生要因が未解明

- 材料的・環境的要因が関与していると思われるが良く分からない.
- 過度な温度規制によるリスク管理をせざるを得ない

✓拘束下の膨張異方性のメカニズムが未解明

- 少なくともASR膨脹とは挙動が異なるので、何らかのモデル化が必要だが、メカニズムが分からないので体系的なモデル開発が難しい

✓力学特性低下のメカニズムが未解明

- 力学的な要因で生じたひび割れによる強度低下とは真逆の傾向となるため、構成則上での膨脹ひび割れの取り扱いができない

✓鉄筋付着性状に関する実験データがない

- ASR膨脹では定着部が適切に関与されていれば付着低下が生じないというデータはある(整理されていないが). DEF膨脹の場合、骨材界面の剥離ひび割れが生じるので、付着劣化が生じる可能性がある.



**ご視聴いただき
ありがとうございました。**