

道路メンテナンスの大切さを考える講演会 @茨城県庁

Ibaraki University

物理シミュレーションによるひび割れの再現と可視化

車谷 麻緒
(茨城大学 工学部 都市システム工学科)

Ibaraki University

2017/ 02/ 02 Thu.

コンクリートのひび割れについて考えよう

コンクリート

- ・引張に弱い
- ・アルカリ性
- ・鉄に比べて軽い
- ・安価

鉄筋

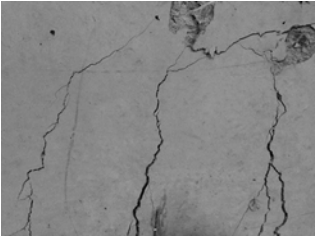
- ・引張に強い
- ・腐食する(酸に弱い)
- ・重い
- ・コンクリートに比べて高価

友好関係に が生じると・・・

CO_2 Cl^- H_2O

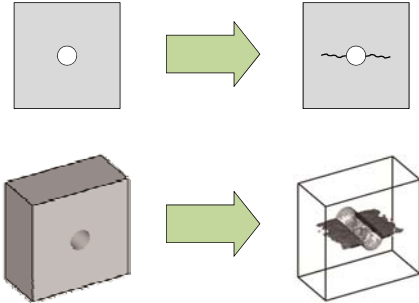
コンクリートのひび割れについて考えよう

質問 ひび割れの数を、数えてみてください。



3本?
4本?
数えられない?

コンクリートのひび割れについて考えよう

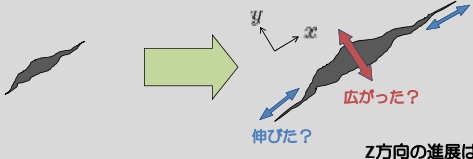


2本?
2枚?

(実際には、ひび割れは3次元だと言いたい)

コンクリートのひび割れについて考えよう

何を測れば、何が分かる?
なぜ、ひび割れ幅を測る?



広がった?
伸びた?

Z方向の進展は?
(ひび割れは3次元)

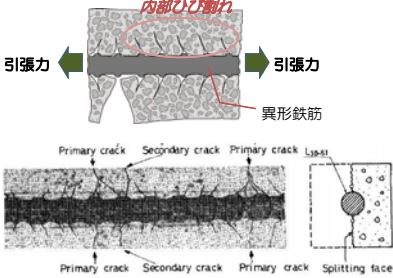
構造物の内部で、ひび割れは??

コンクリートのひび割れについて考えよう

内部ひび割れ

引張力

異形鉄筋



Primary crack Secondary crack Primary crack Splitting face

Y. Goto 1971

(実験により存在が確かめられている)

異形鉄筋まわりには内部ひび割れと呼ばれる見えないひび割れが存在する

7 コンクリートのひび割れについて考えよう



コンクリートには、大小様々なひび割れが発生する。

たとえ、目に見えない**微細なひび割れ**であっても、**水やイオンの通り道**となり、鉄筋を腐食させる場合がある。



部材表面から生じるひび割れ

内部ひび割れ
部材表面に現れず、鉄筋まわりに発生するひび割れ（表面よりも先に発生する）

異形鉄筋

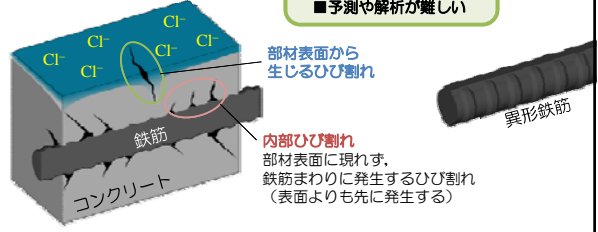
8 コンクリートのひび割れについて考えよう



ひび割れは、コンクリートの劣化や損傷を知るための重要な**手掛かり**となる。

にもかかわらず、

- 表面しか見えない
- 表面しか測れない
- 理解や解析が難しい
- 予測や解析が難しい



部材表面から生じるひび割れ

内部ひび割れ
部材表面に現れず、鉄筋まわりに発生するひび割れ（表面よりも先に発生する）

異形鉄筋

9 コンクリートのひび割れについて考えよう



コンピューターを使って、ひび割れの**再現**を試みる研究やデジタルカメラを使って、ひび割れの**計測**を試みる研究が近年盛んに行われている。






部材表面から生じるひび割れ


内部ひび割れ
部材表面に現れず、鉄筋まわりに発生するひび割れ（表面よりも先に発生する）

異形鉄筋

10 研究室での取り組み（研究テーマ）

- ①ひび割れの3次元幾何形状の再現と可視化
 

数値モデル（数学と物理）を用いて、コンクリートのひび割れを3次元で再現し、可視化する。
- ②デジタル画像によるひび割れの計測
 

載荷試験中の供試体をデジタルカメラで撮影することにより、ひび割れを計測し、可視化する。
- ③デジタル画像解析によるひび割れの自動抽出
 

ひび割れを含むデジタル画像から、ひび割れ幅の大小を考慮して、ひび割れのみを自動抽出する。

11 鉄筋に対する物理モデル

RC部材の**詳細な破壊挙動**を**3次元で定量的**に再現するには、

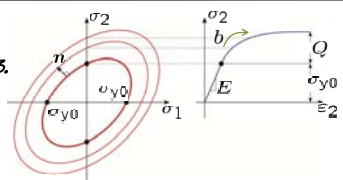
- ① 鉄筋の数理モデル化
- ② コンクリートのひび割れの数理モデル化
- ③ RC部材の幾何形状のモデル化




異形鉄筋

12 鉄筋の数理モデル


非線形等方硬化則に基づく **von-Mises塑性モデル**を採用する。



- ひずみの加算分解：
 $\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$
- 弾性応力：
 $\sigma = c : \epsilon^e = c : (\epsilon - \epsilon^p)$
- 降伏関数：
 $f = \sigma_v - \sigma_{y0} - Q(1 - e^{-bp})$
硬化応力
- 関連流れ則：
 $d\epsilon^p = dp \frac{\partial f}{\partial \sigma} = dp m$

σ_v : von-Mises相当応力
 p : 相当塑性ひずみ

異形鉄筋の幾何形状を考慮した有限要素モデルを作成する。



13 コンクリート（ひび割れ）の数理モデル

■損傷モデルの構成式：

$$\sigma_e = [1 - D(\epsilon_e)] E \epsilon_e = \left[1 - \left\{ 1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_e} \exp\left(-\frac{E \epsilon_0 h_c}{G_f} (\epsilon_e - \epsilon_0)\right) \right\} \right] E \epsilon_e$$

■相当ひずみと修正von-Mises破壊基準：

$$\epsilon_e = \frac{m-1}{2m(1-2\nu)} J_1 + \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{m-1}{1-2\nu} J_1\right)^2 + \frac{12m}{(1+\nu)^2} J_2}$$

Fracture mechanics for concrete:

Principal strain 2 vs Principal strain 1 plot showing m=1 and m=2 regions.

14 3次元破壊シミュレーション

① モデル作成 ② 物理シミュレーション ③ 結果の可視化

RC部材に生じる複雑なひび割れ進展挙動を3次元で詳細に再現できる。

異形鉄筋

15 3Dプリンターによる立体可視化

解析結果 → 3Dプリンター → 立体可視化

3Dプリンターを使って、ひび割れの3次元幾何形状を立体可視化する

16 内部ひび割れの再現 in 3D

部材表面から生じるひび割れ

鉄筋

内部ひび割れ
部材表面に現れず、鉄筋まわりに発生するひび割れ（表面よりも先に発生する）

Primary crack, Secondary crack, Primary crack, Splitting face

Y. Goto 1971

RC部材の内部ひび割れを3次元で再現し、物質移動を解析した例はない

17 内部ひび割れの再現 in 3D

部材表面から生じるひび割れ

鉄筋

内部ひび割れ
部材表面に現れず、鉄筋まわりに発生するひび割れ（表面よりも先に発生する）

3D 異形鉄筋

内部ひび割れの3次元形状はコーン状（お椀形）となる。（実際に、見た人はいない）

18 内部ひび割れの再現 in 3D

シミュレーションの手順：

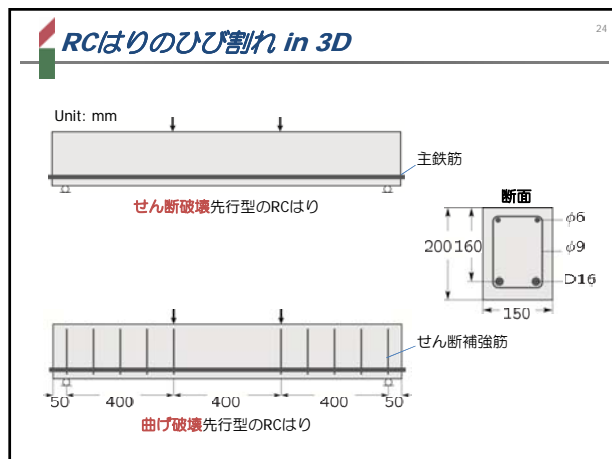
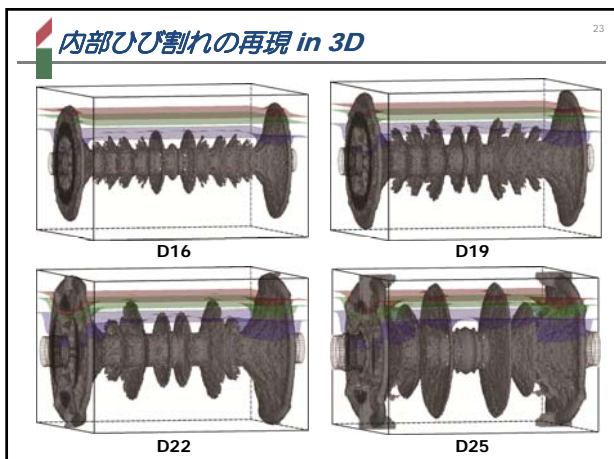
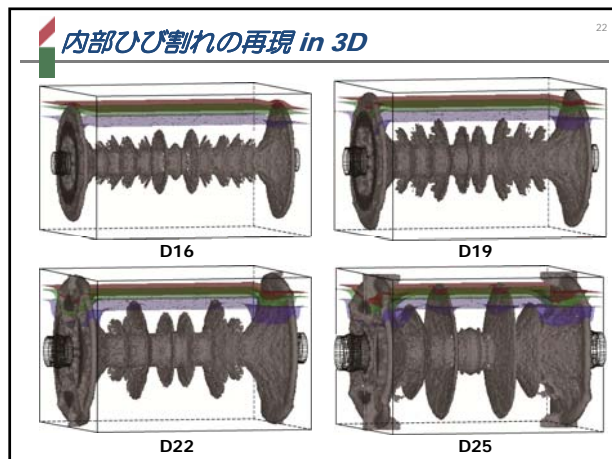
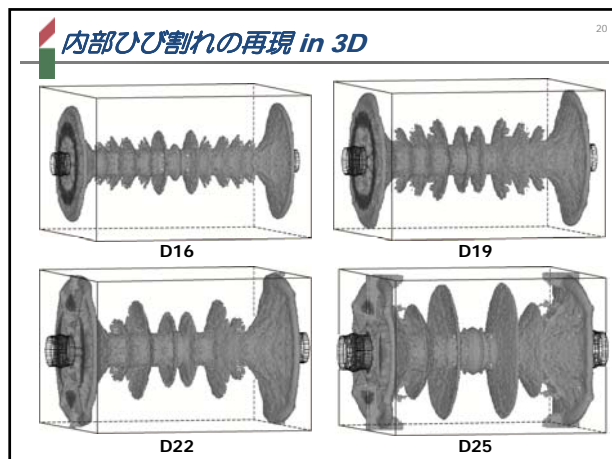
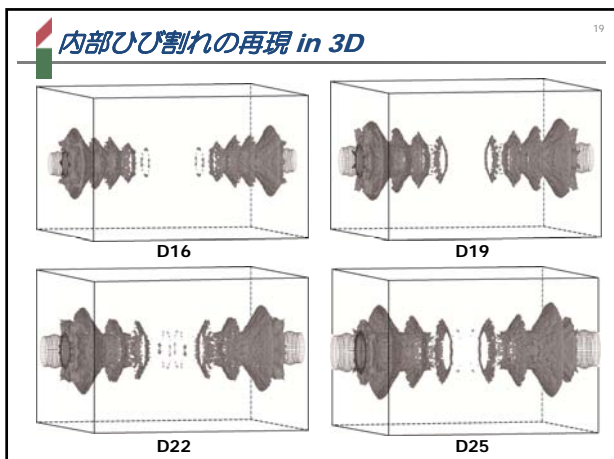
- ① 径の異なる鉄筋を引張り、内部ひび割れを発生させる。
- ② 上面から塩化物イオンを浸入させる。

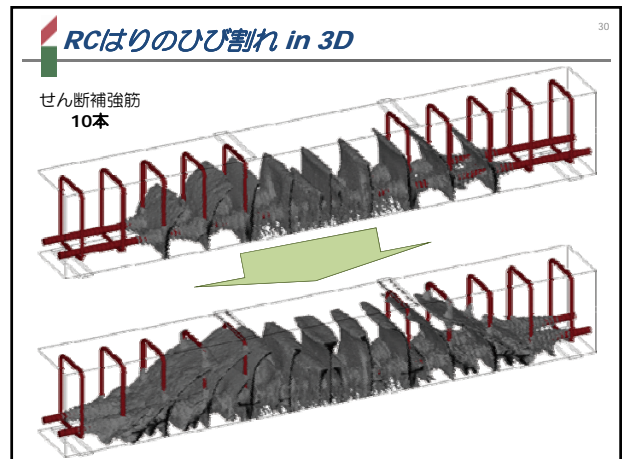
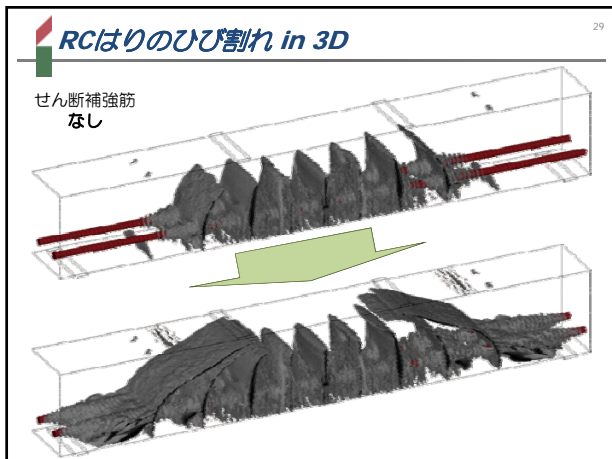
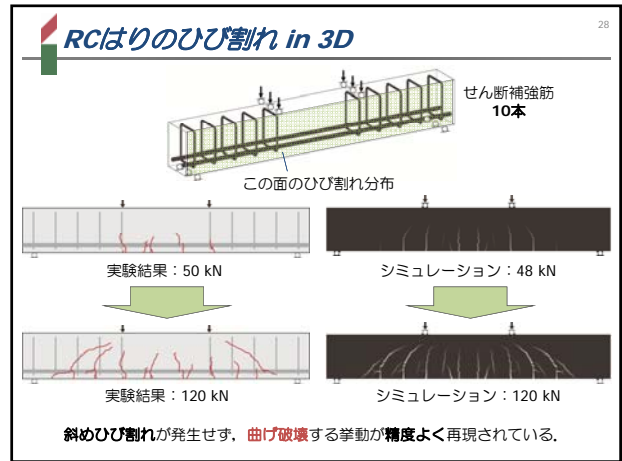
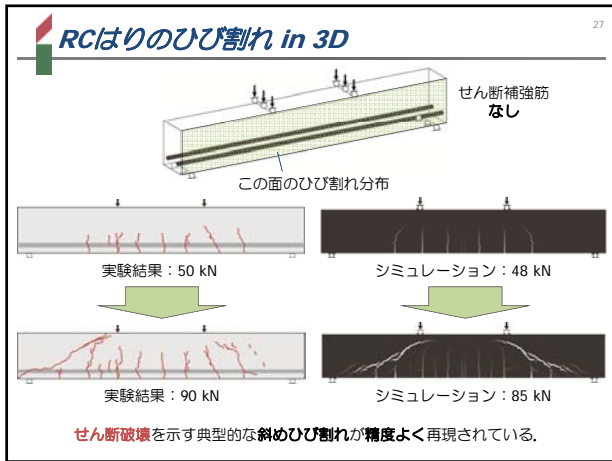
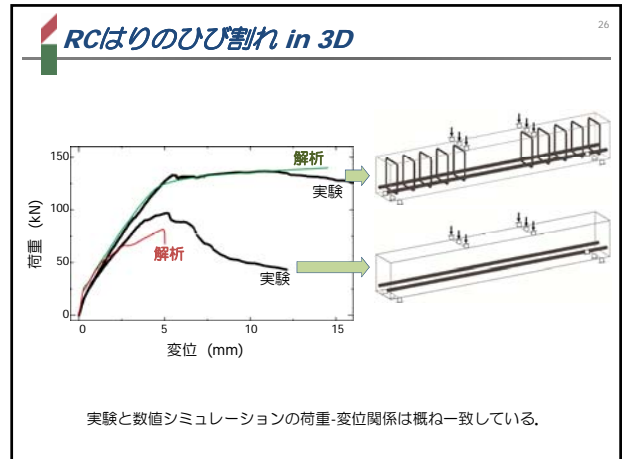
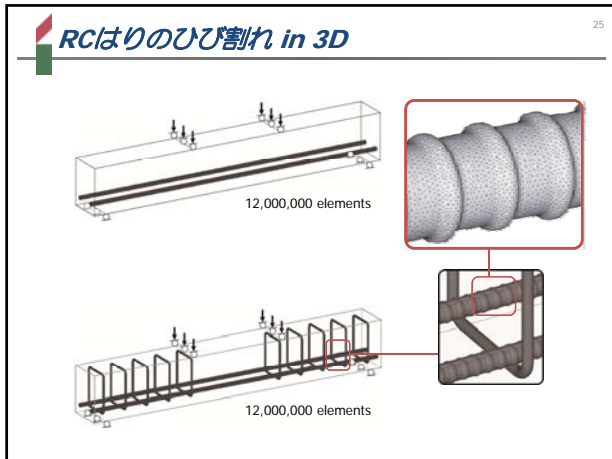
約400万要素

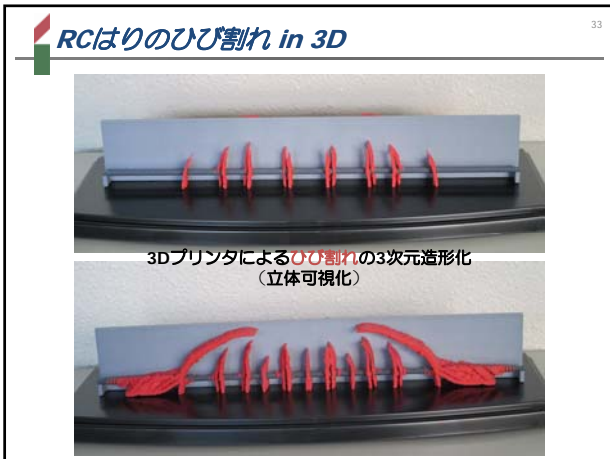
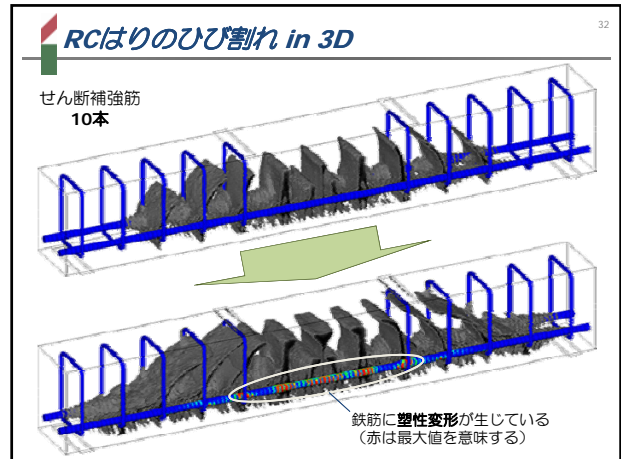
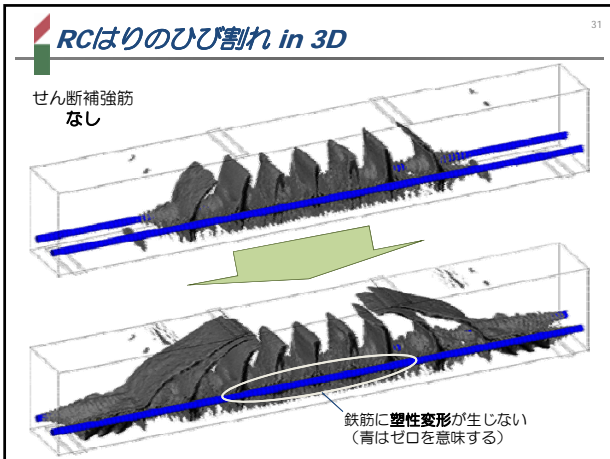
40 mm, 300 MPa, 150 mm, 150 mm, D16, D19, D22, D25

コンクリートの材料定数（損傷）

ヤング率	35 GPa
ポアソン比	0.2
圧縮引張強度比	10
破壊発生ひずみ	0.00017
破壊エネルギー	0.1 N/mm







研究室での取り組み (研究テーマ) 35

①ひび割れの3次元幾何形状の再現と可視化 

数値モデル (数学と物理) を用いて、
コンクリートのひび割れを3次元で再現し、可視化する。

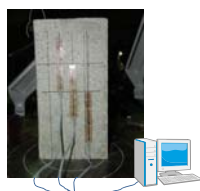
②デジタル画像によるひび割れの計測 

載荷試験中の供試体をデジタルカメラで
撮影することにより、ひび割れを計測し、可視化する。

③デジタル画像解析によるひび割れの自動抽出 

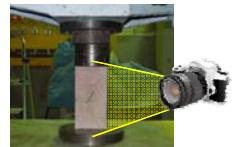
ひび割れを含むデジタル画像から、
ひび割れ幅の大小を考慮して、ひび割れのみを自動抽出する。

デジタル画像相関法とひずみゲージ 36



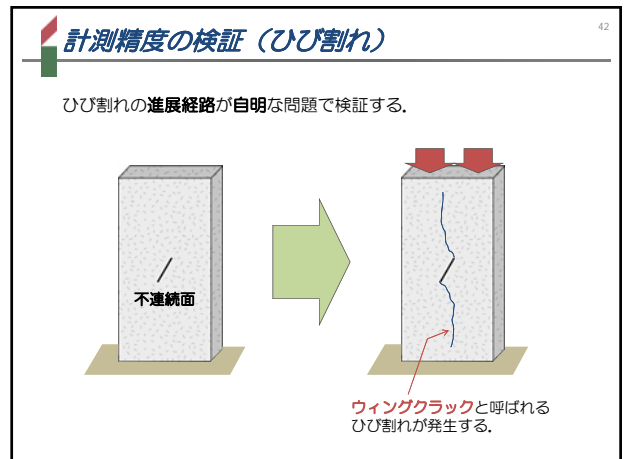
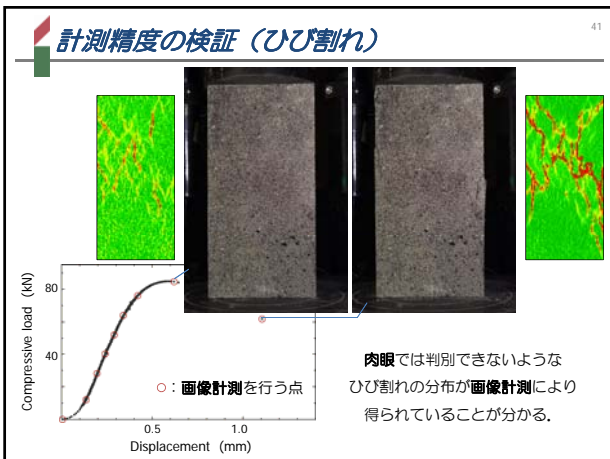
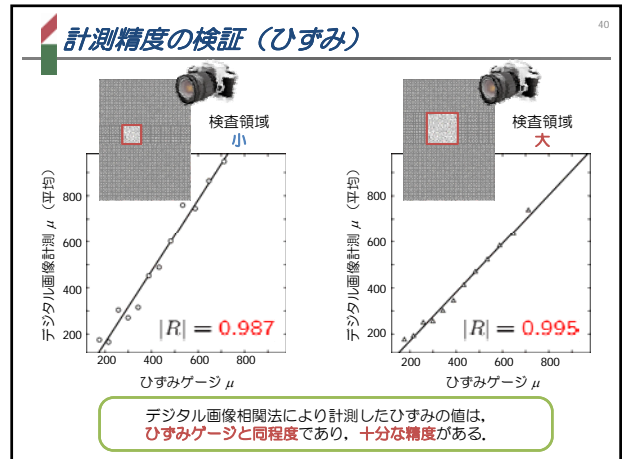
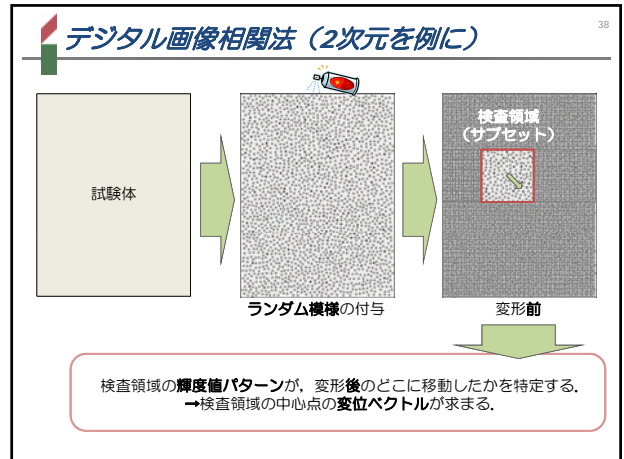
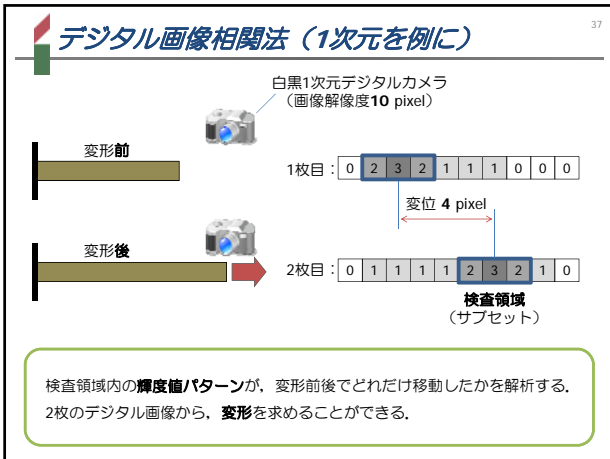
ひずみゲージによる方法：

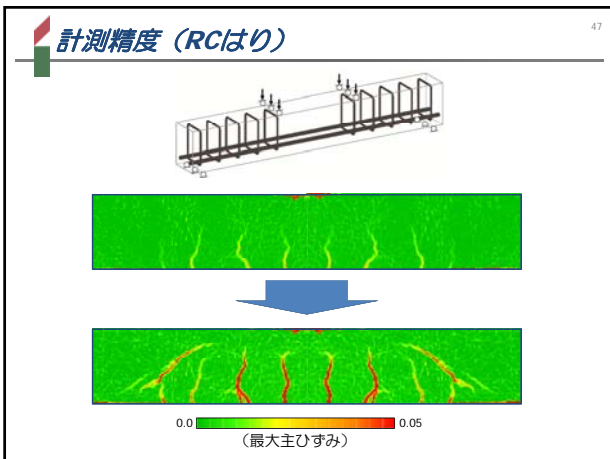
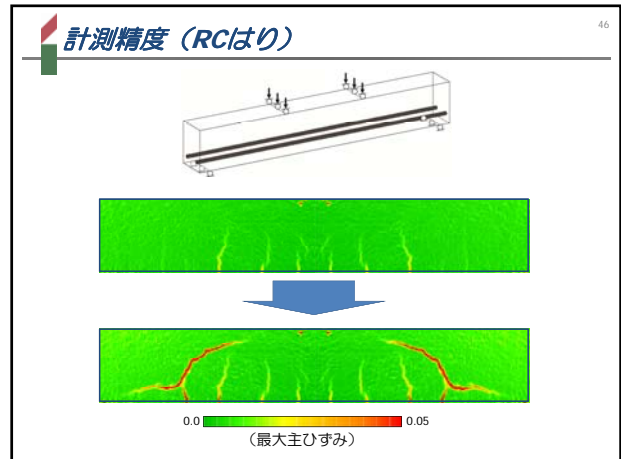
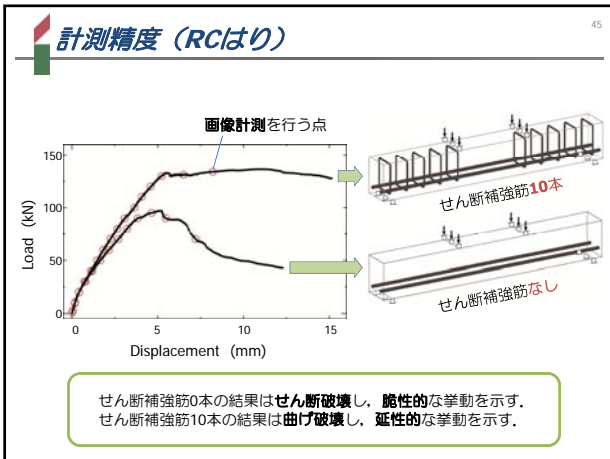
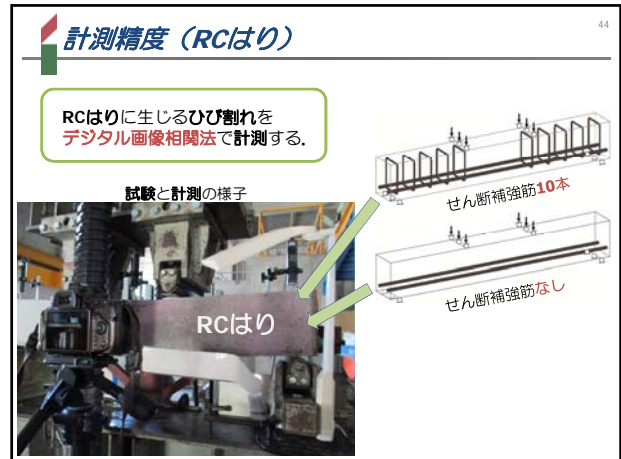
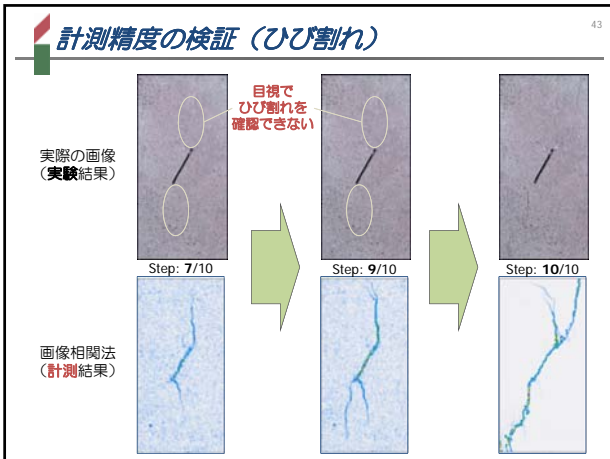
- 接触式の計測である
- 適切な条件のもと信頼性の高い計測が可能
- ゲージ貼付箇所での一点方向のひずみ
- ひび割れ発生箇所を予測して貼付できない



デジタル画像を利用した方法：

- 非接触で全視野での計測が可能
- 変形前後のデジタル画像を撮影するだけ
- 多方向のひずみを計測可能
- ひび割れ発生後も計測可能





研究室での取り組み (研究テーマ)

48

- ①ひび割れの3次元幾何形状の再現と可視化
 数値モデル (数学と物理) を用いて、コンクリートのひび割れを3次元で再現し、可視化する。
- ②デジタル画像によるひび割れの計測
 載荷試験中の供試体をデジタルカメラで撮影することにより、ひび割れを計測し、可視化する。
- ③デジタル画像解析によるひび割れの自動抽出
 ひび割れを含むデジタル画像から、ひび割れ幅の大小を考慮して、ひび割れのみを自動抽出する。

ひび割れと点検

鉄筋腐食 アルカリ骨材反応

問題点：

- 人がやると、手間も時間もかかる。
- 点検する人によって、差が生じる。
- 人が近づけない場所もある。

ひび割れと点検

鉄筋腐食 デジタルカメラ アルカリ骨材反応

デジタルカメラやドローンを使って
インフラ点検を効率化したい

ひび割れを
定量化する

画像解析
フィルタ処理

ひび割れと点検

クラックスケール スケッチ

2017年2月 2日

撮影 解析 評価

Max
Min

様々な条件のひび割れ

汚れ、落書き 漏水、気泡

影、明暗 多数のひび割れ

ひび割れ抽出の手順

撮影画像 背景画像

メディアンフィルター

二値化

ひび割れ判定

引き算

影や明暗差を取り除く

ひび割れ抽出の手順

メディアンフィルター

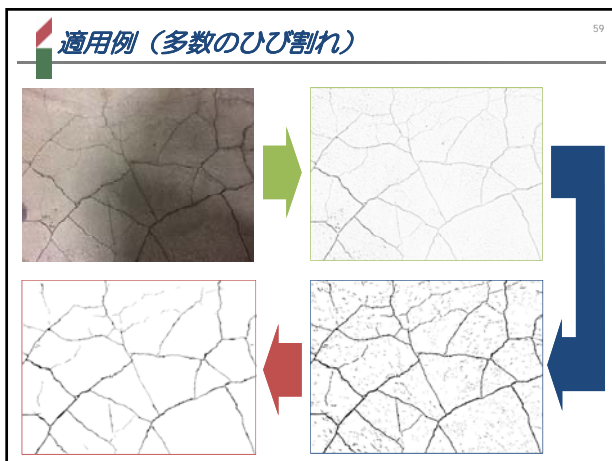
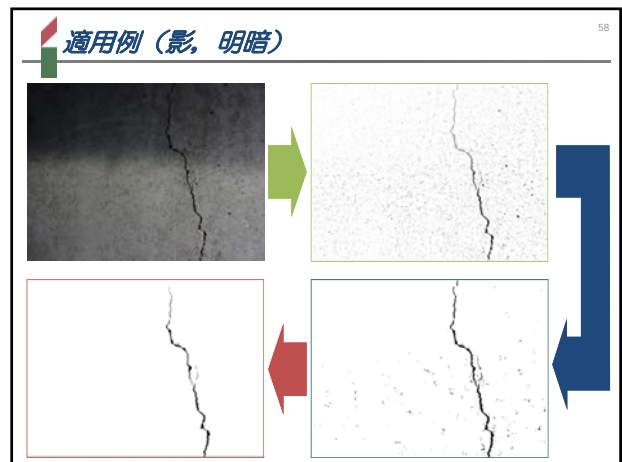
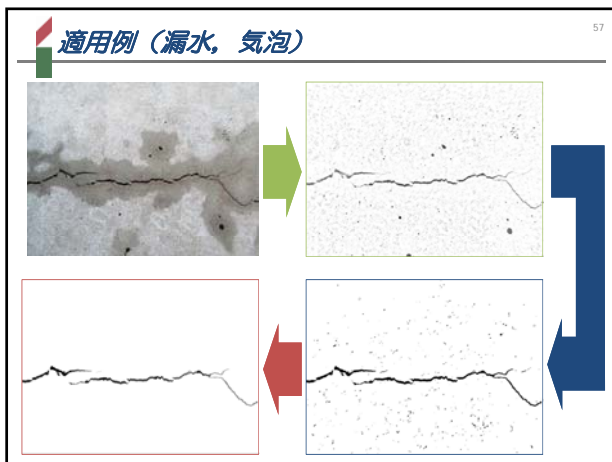
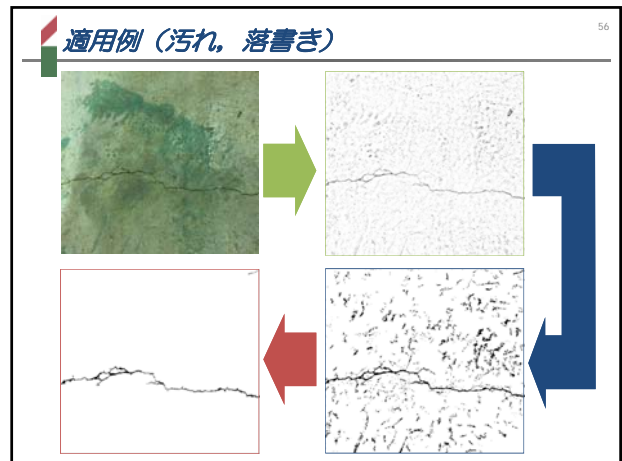
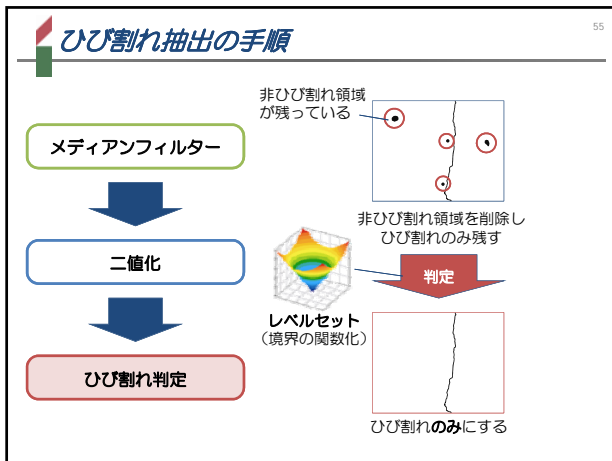
二値化

ひび割れ判定

場所によって濃度が異なる

二値化の精度を上げるために小領域に分割する

二値化



まとめ

60

- ①ひび割れの3次元幾何形状の再現と可視化
 数理モデル (数学と物理) を用いて、コンクリートのひび割れを3次元で再現した。
- ②デジタル画像によるひび割れの計測
 載荷試験中の供試体をデジタルカメラで撮影することにより、ひび割れを計測した。
- ③デジタル画像解析によるひび割れの自動抽出
 ひび割れを含むデジタル画像から、ひび割れのみを自動抽出した。