

建設材料の新しい劣化評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平23～平26

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、新田弘之

【要旨】

本研究は、建設材料の劣化を評価する新たな手法として、近年産業用として各方面で導入が進んでいるX線CTを取り上げ、アスファルト混合物およびFRPへの適用性について検討を行った。その結果、アスファルト混合物の場合、X線CTにより素材の構成、アスファルト量、空隙率など基本的な項目が分かるばかりでなく、載荷試験と組み合わせることにより、アスファルト混合物が破損していく際の骨材の動きが評価でき、破損の解明に有用であることが分かった。また、FRPの場合、劣化に伴うFRP内部の空隙の増加が観察できるほか、負荷を与えた状態でのX線CTの撮影の実施によりFRP内部の繊維のはく離も観察でき、FRPでも破損の解明に有用であることが分かった。

キーワード：X線CT、アスファルト混合物、FRP、劣化評価

1. はじめに

建設材料は、いずれも長期の耐久性が求められるものであるが、材料の性能は供用と共に劣化が起こることにより低下していく。そこで、劣化の診断や劣化の予測が必要になっていく。これまで、劣化の評価は、強度の低下や柔軟性の低下など機能面からの評価だけでなく、材料の内部構造の物理的な劣化、化学変化による劣化など機能低下の原因からの評価など非常に多岐に渡り、常により高度な評価あるいは簡便な評価を求めて研究が行われてきた。

一方、これまで医療での利用が進んでいるX線CTは、近年では産業用のものが市販されるようになり、非破壊でもものの内部が観察できるため、電子回路基板や半導体などの製品内部の確認に利用されたり、素材や薬剤などの試料内部の観察に利用されたりするなど活用が進んでいる。建設材料においては、これまで地盤材料やコンクリートの研究例^{1)~3)}がある。より高出力、高解像度のX線CTが市販されるようになり、大きな試料にも対応できるものもあることから、建設材料での活用がますます期待されている。

そこで、本研究では、近年建設材料への導入が図られているX線CTを用いて新しい劣化評価手法について研究を行った。特に骨材や空隙の分布や移動が可視化されることによる効果が、より高いと考えられる以下の2つの材料について検討を行った。

①X線CTのアスファルト混合物への適用

②X線CTのFRPへの適用

2. X線CTの原理

X線CTのCTとはComputed Tomographyの略であり、コンピュータ断層画像法などと訳される。様々な方向からX線映像を撮影し、PCで再構成処理を施すことにより、内部構造を得る。原理としては、360°方向から数千枚のX線影像をPC処理して、供試体内部の各点のX線吸収係数(単位長さあたりのX線吸収量)を求め、それを画像の濃淡で表示する。X線CTの撮影方法及び立体画像を構成する最小要素であるボクセル(voxel)の概念を図-1に示す。

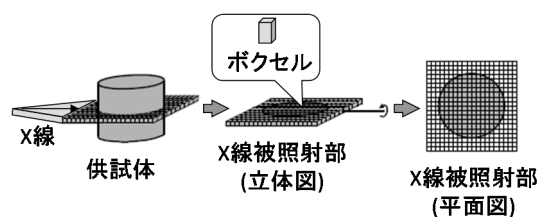


図-1 X線CTの撮影方法及びボクセルの概念

一般に、X線は供試体を通過する際に強度が減衰し、供試体通過前のX線強度を I_0 、減衰したX線の強度を I 、X線の供試体透過長を W 、X線吸収係数を μ とすると、式(1)が成立する。

$$I = I_0 \exp(-\mu W) \quad (1)$$

X線吸収量の算出原理を図-2に示す。X線吸収量は、検出器があらゆる方向から受けたX線透過量をPCで

演算することによって求めることができる³⁾。X線吸収係数は密度の高い材料ほど大きく、密度の低い材料ほど低い傾向がある。これを数値化した指標としてCT値が用いられる。ボクセル(voxel、立体画像を構成する最小要素)のCT値は式(2)で表すことができる。

$$CT値 = K \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (2)$$

ここに、

μ_w : 水のX線吸収係数

K : 定数(通常K=1,000)

CT値は、密度が大きいほど大きく、密度が小さいほど小さくなることから、材料を評価するうえで有力な評価指標となりうる。

アスファルト混合物であれば、CT値は、骨材、アスファルト+石粉、空隙の構成比によって変化し、骨材の量が多ければX線の減衰は大きく、CT値も大きくなり、空隙の量が多ければX線の減衰量は小さく、CT値も小さくなる。

X線CTの出力画像は、ボクセルが持つCT値等といった情報から、通常、256階調のグレイスケールとして変換される。一般に、CT値の高い領域(高密度領域)では白く、低い領域(低密度領域)では黒く表示される。

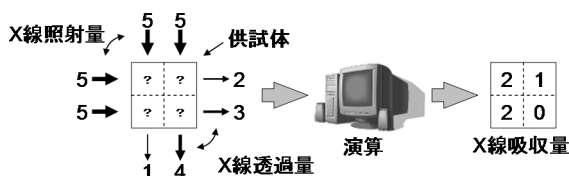


図-2 X線CTの算出原理

3. X線CTのアスファルト混合物への適用

3. 1 研究概要

X線CTのアスファルト混合物への適用においては、新しい品質、劣化評価手法の提案を目的に以下の2つの検討を行った。

①X線CTによる構成材料の定量化の検討

②ホイールトラッキング試験による骨材挙動分析

3. 2 研究方法

(1)X線CTによる構成材料の定量化の検討

①供試体

本研究では、構成材料の異なるアスファルト混合物として、表-1に示す骨材粒度の異なる密粒度アス

ファルト混合物(以下、密粒度)、ポーラスアスファルト混合物(以下、ポーラス)及び粗粒度アスファルト混合物(以下、粗粒度)の3種類を用いた。使用したアスファルトを表-2に示す。粗粒度はストレートアスファルト(以下、ストアス)、密粒度はストアスとポリマー改質アスファルトII型(以下、改質II)、ポーラスはポリマー改質アスファルトH型(以下、改質H)を使用した。密粒度及び粗粒度の供試体のサイズは直径101.6mm、高さ68.7mm、ポーラスは101.6mm、高さ61.2mmとした。

表-1 各アスファルト混合物の配合と密度

| 混合物の種類 | アスファルト | 骨材配合 | | | アスファルト量 | 空隙率 | 混合物密度 g/cm ³ |
|--------|----------|-------|-------|------|---------|-------|-------------------------|
| | | 粗骨材 | 細骨材 | 石粉 | | | |
| 密粒度 | ストアス改質II | 56.5% | 38.5% | 5.0% | 5.0% | 5.6% | 2.360 |
| | | | | | | 5.1% | 2.366 |
| 粗粒度 | ストアス | 72.0% | 23.0% | 5.0% | 5.0% | 4.8% | 2.381 |
| ポーラス | 改質H | 84.0% | 11.0% | 5.0% | 5.0% | 18.8% | 2.024 |

表-2 使用したアスファルト

| アスファルト種類 | 密度 g/cm ³ |
|-----------------|----------------------|
| ストレートアスファルト | 1.041 |
| ポリマー改質アスファルトII型 | 1.029 |
| ポリマー改質アスファルトH型 | 1.031 |

②撮影条件

図-3に使用したX線CTスキャナを示す。また、表-3にX線CT撮影条件を示す。X線CT撮影は図-4に示すように5断面で行った。



図-3 X線CTスキャナ(熊本大学)

表-3 撮影条件

| | |
|------------|--------------------------------|
| 管電圧 | 300kV |
| スライス厚 | 1.0mm |
| 撮影領域 | φ150mm |
| 画像構成マトリクス数 | 2048×2048 |
| ボクセルサイズ | 0.073×0.073×1.0mm ³ |

$$CT_{ave} = \frac{\sum i \times n_i}{N} \quad (3)$$

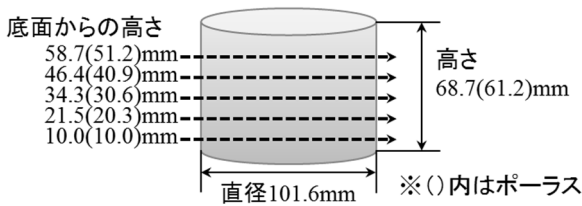


図-4 X線照射位置

③材料構成の定量化方法

アスファルト混合物の品質や劣化を評価するためには、骨材の形状、アスファルト及び空隙の分布についても把握しなければならない。出力画像から素材の構成を定量化するためには、CT値のしきい値を設定する必要がある。本研究においてはPタイル法(Percentile method)⁴⁾を用いた。

図-5にPタイル法概念を示す。この方法では、はじめに対象物の面積 S_0 と対象物以外の面積 S_1 から、画像全体の面積 S と面積比率 P を求める。次に、CT値の低い方または高い方から頻度値を積算していき、対象物の面積が画像全体の面積に対して P の割合となるところのCT値よりしきい値 T を得る。この手法は、本研究のように体積率が既知のものについて非常に有効である。

本研究においては空隙、アスファルト+石粉、細骨材、粗骨材の4種類に区分するため、3つのCT値のしきい値を求め、4値化を行った。なお、ストアス+石粉としたのは、石粉は約80%が0.075mm以下の粒子であり、X線CT画像の空間分解能(0.073×0.073×2.0mm³)では粒子として判断できないためである。

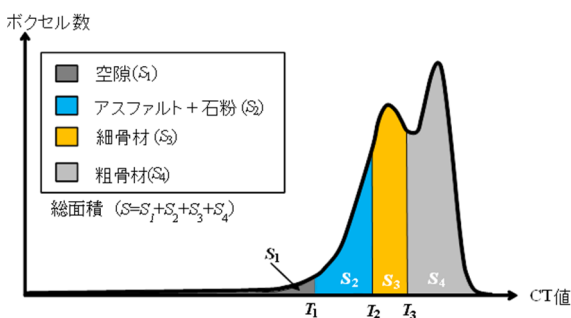


図-5 Pタイル法概念

④断面平均CT値の計算

CT値が i の時の頻度を n_i 、総ボクセル数を N とした場合、照射された断面の断面平均CT値(CT_{ave})は式(3)で表される。

(2)ホイールトラッキング試験による骨材挙動の分析

①供試体

本研究ではホイールトラッキング試験前後の骨材の挙動を解析するために行った。X線CTの撮影をしやすいするために、ホイールトラッキング供試体は通常の半分の大きさである幅150mm×奥行き300mm×高さ50mmとした。アスファルト混合物の種類はポーラスアスファルト混合物を用いた。

②撮影方法

荷重を行っていない(以下、initial)供試体のX線CT撮影を実施した。その後、試験温度は60°Cで輪荷重49kNの繰返し(往復移動)荷重を600回(以下、600pass)載荷し、initialと同じ撮影条件及び撮影断面でX線CT撮影を行った。X線撮影条件は表-3と同じとし、撮影断面は図-6のようにした。

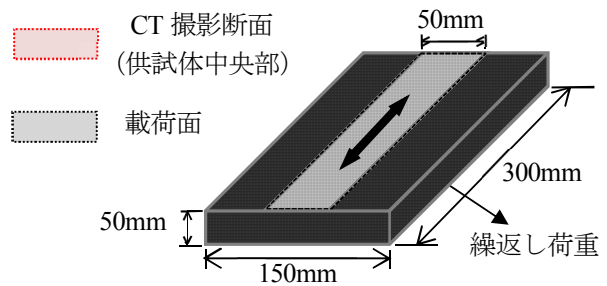


図-6 撮影断面及び載荷面

③解析方法

X線CT撮影より得られた各CT画像から粗骨材を抽出するための2値化処理を行った。2値化処理を行う上で必要となる粗骨材と粗骨材以外の構成材料のしきい値はpタイル法³⁾によって決定した。2値化処理を施しても連結して表示される粗骨材がいくつか確認されたため、Watershed法⁵⁾により骨材の分割を行った。以上の画像処理を行って得られた2値化画像をもとに、initial及び600passそれぞれの平面画像中の粗骨材重心座標を求め、WT試験前後の粒子の同定により粗骨材の移動量を求めた。

3. 3 研究結果

(1) X線CTによる構成材料の定量化の検討

① アスファルトの種類の違いに伴うCT値ヒストグラムの形状変化

アスファルトの種類が異なる混合物の中央断面におけるX線CT撮影結果を図-7に、5断面平均のヒストグラムを図-8に示す。改質IIはストアスに比べ、CT値が500～1,000および1,600以上の部分でボクセル数が若干多く、1,000～1,600の部分でボクセル数が少なくなっている。これは表-2に示したように、アスファルトの密度が改質IIの方が低いことによるものであると考えられる。しかし、ヒストグラム自体はストアスと改質IIはほぼ同様の傾向を示している。

図-5の方法によって算出したストアスおよびPMA-IIのしきい値を図-9に示す。密度と体積率の関係から若干の差は見られるものの、大きな差はないと考えられる。

ストアスと改質IIの4値化画像を図-10に示す。これらの混合物はアスファルトが違う以外大きな違いがなく各素材の体積率がほぼ同じであることから、各素材の分布は両者で大きな差がないといえる。

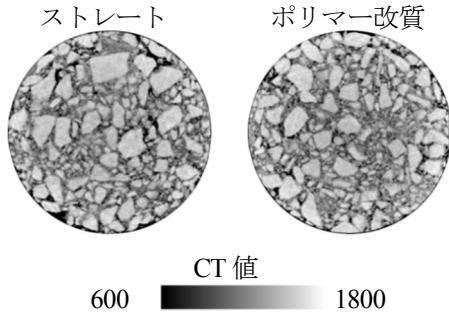


図-7 アスファルトの種類の変化による CT 画像

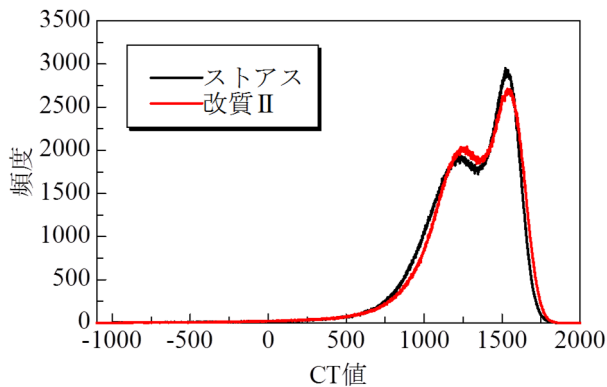


図-8 CT 値ヒストグラム (アスファルトの種類の変化)

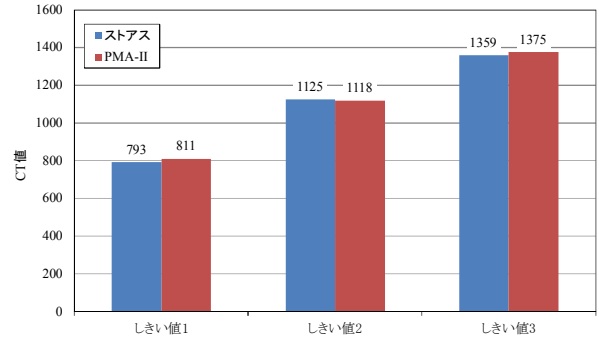
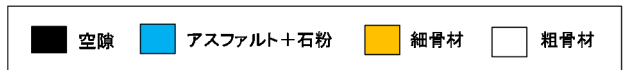
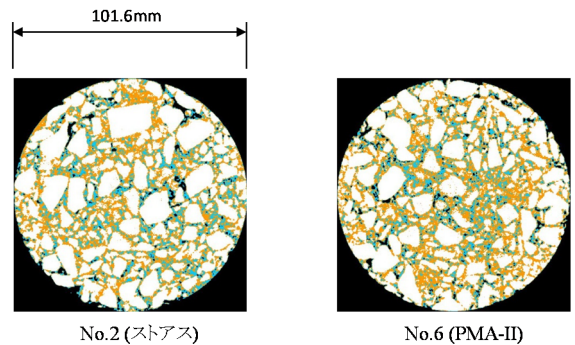


図-9 ストアスおよび改質IIのしきい値



※撮影高さ=34.3mm

図-10 ストアスおよび改質IIの4値化画像

② 混合物の種類の違いに伴うCT値ヒストグラムの形状変化

骨材配合率が異なる混合物のX線CT撮影結果を図-11に示す。密粒度ストアス、粗粒度、ポーラスの順に空隙（黒い部分）が多くなり、アスファルト+石粉および細骨材（濃いグレーの部分）が少なくなっていることがわかる。

骨材配合率の違いによる5断面平均のヒストグラムを図-12に示す。ここで、CT値を-500以下、-500～700、700～1,300、1,300以上の4つに区分してCT値分布の傾向を見ることとする。

CT値が-500以下のボクセルは、密粒度ストアスはほとんど存在しなかったのに対し、粗粒度はCT値-900付近で約60ボクセル、ポーラスはCT値-850付近で約500のボクセルが存在している。

CT値が-500～700の間では、密粒度ストアス、粗粒度がCT値の増加とともに徐々に増加しているのに対し、ポーラスは概ね100ボクセル以上の値となっている。これは、ポーラスのほとんどが粗骨材と空

隙で占められており、細骨材やアスファルト等、空隙を充填する材料が少ないため、と考えられる。CT値が700~1,300の間では、密粒度ストアスでピークの発生があるのに対し、粗粒度、ポーラスの順にピークが崩れる現象が見られた。これは、密粒度、粗粒度、ポーラスの順に細骨材の体積率が少なくなるために発生したものと考えられる。CT値が1,300以上では、いずれの混合物においても粗骨材の影響とみられるピークの発生が見られた。

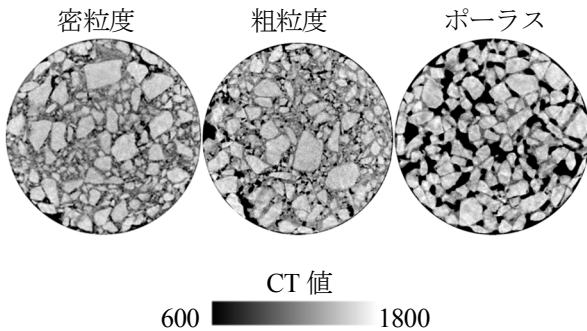


図-11 混合物の種類の変化によるCT画像

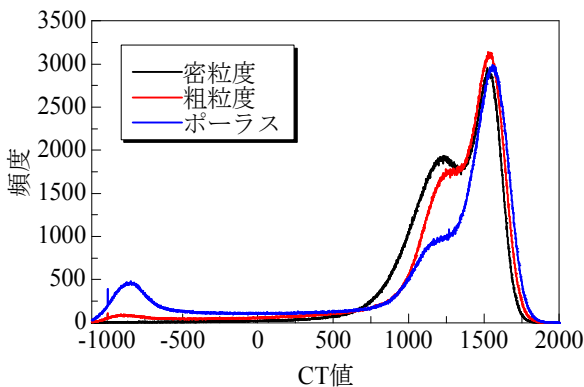


図-12 CT値ヒストグラム(混合物の種類の変化)

図-5の方法によって算出した密粒度ストアス、粗粒度およびポーラスのしきい値を図-13に示す。

しきい値1は、粗粒度、ポーラス、密粒度の順に大きくなった。空隙率が粗粒度の方がポーラスに比べて小さいにもかかわらずしきい値が小さくなったのは、空隙そのもののボクセル数が少なくなるとともに、p-タイル法の面積率が小さくなり、CT値のしきい値が低下したものと考えられる。

しきい値2は、混合物の種類による差は見られなかった。これは、空隙を除いた骨材の体積比率が密粒度ストアスで83.8%、粗粒度で83.6%、ポーラスで83.8%とほとんど変わらなかったためであると考えられる。

しきい値3は、ポーラス、粗粒度、密粒度の順に大きくなっている。これは、ポーラスが粗骨材の周囲の細骨材やアスファルトが少なくなっているのに対し、密粒度は粗骨材の周囲の細骨材やアスファルトが多くなっていることが起因していると考えられる。

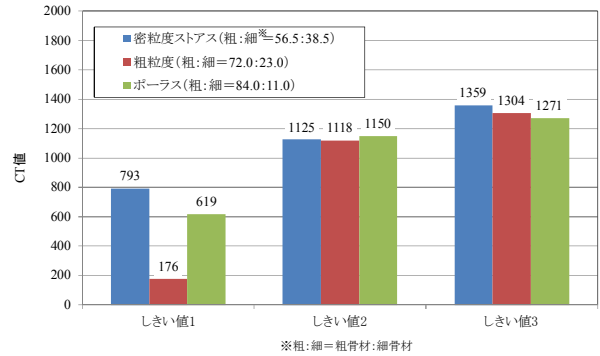


図-13 密粒度、粗粒度およびポーラスのしきい値

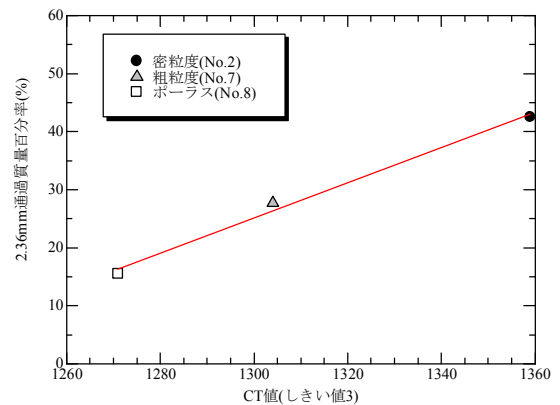


図-14 しきい値3と2.36mm通過質量百分率の関係

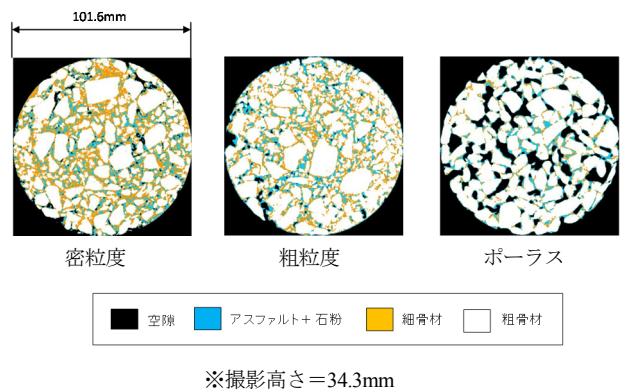


図-15 密粒度ストアス、粗粒度およびポーラスの4値化画像

ここで、粗骨材と細骨材の境界としての意味を持つCT値であるしきい値3を説明変数、2.36mmふるい通過質量百分率を目的変数として線形回帰分析を行

う。これは2.36mmふるい通過質量百分率が大きければ細骨材の量が多くなり、しきい値3を押し上げる効果があると考えられるからである。回帰式は式(3)のとおりとなり、相関係数は0.996となった(図-14)。これより、しきい値3より2.36mmふるい通過質量百分率を予測できる可能性があることが確認された。

$$p_{2.36} = 0.303(T_3 - 1,217) \quad (1,271 \leq T_3 \leq 1,359) \quad (3)$$

ここに、

$p_{2.36}$: 2.36mmふるい通過質量百分率
 T_3 : しきい値3

密粒度ストアス、粗粒度およびポーラスの中央断面の4値化画像を図-15に示す。これにより、密粒度ストアス、粗粒度、ポーラスの順に空隙が大きくなるとともに、細骨材やアスファルトが少なくなることが確認できる。

(2)ホイールトラッキング試験による骨材挙動の分析

図-16はinitial及び600passの供試体中央断面におけるCT画像を図-17にCT画像に2値化処理を施した2値化画像を示す。図-18はinitialから600passのWT試験を行った際の移動した距離をベクトル表示したものを示す。図-18より、荷重直下部を中心に放射上に骨材が移動していることを確認することができる。また、載荷面上ではあまり変化がなくても、内部では荷重直下部付近での粗骨材は最大の変位が側方方向に生じていることが確認できる。以上の検討の結果、X線CTを用いて、非破壊でアスファルト混合物内部の粗骨材を追跡する粒子追跡法は有用であると考えられる。

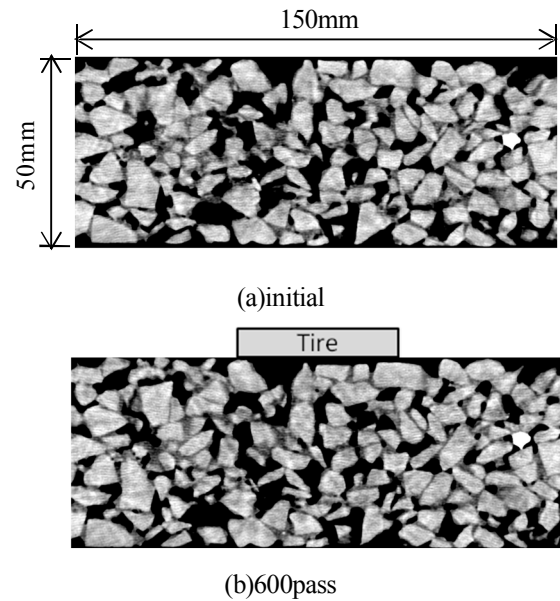


図-16 供試体中央断面のCT画像

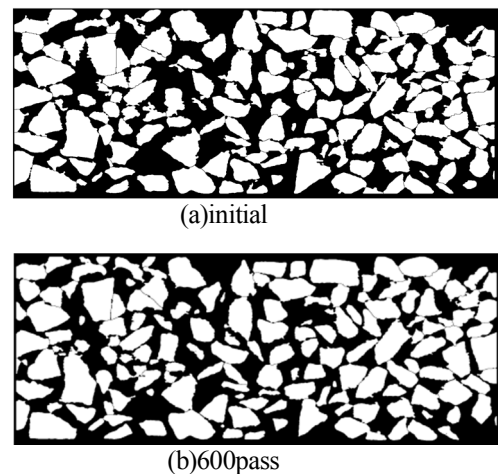


図-17 供試体中央断面の2値化

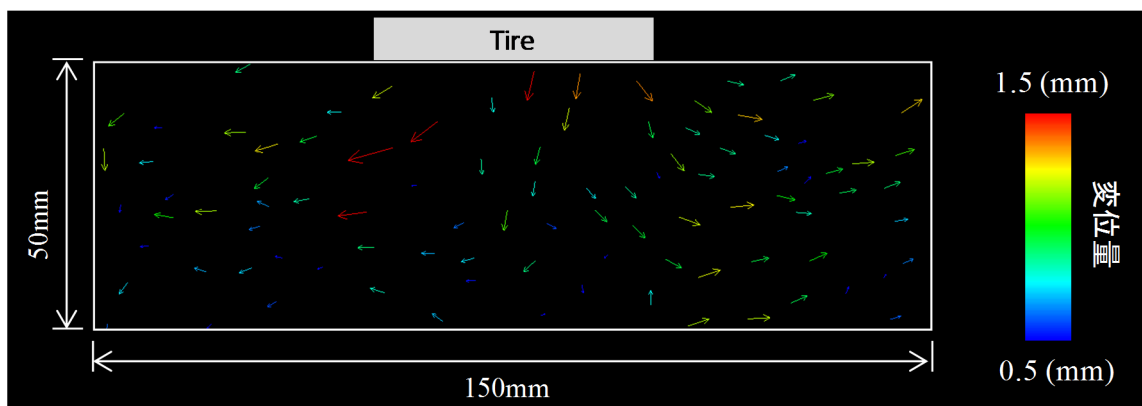


図-18 粒子追跡法によって得られた粗骨材の2次元変位ベクトル図

4. X線CTのFRPへの適用

4. 1 研究概要

X線CTのFRPへの適用としては、以下のものの検討を行い、劣化や荷重などの負荷を与えた場合のFRP内部の損傷を評価できるか検討した。また、様々な材料への対応も検討した

- ①コンクリート補強用連続繊維シートへの適用
- ②FRPでの曲げ試験への適用
- ③素材の異なる繊維補強材料への適用

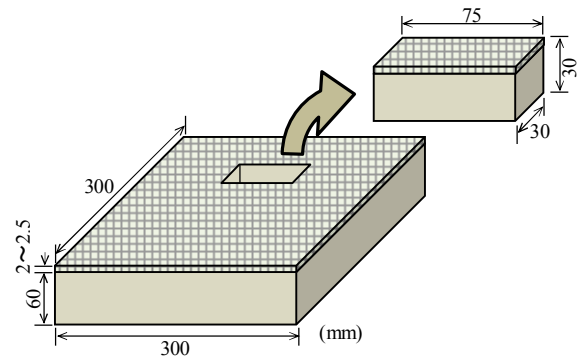


図-19 供試体の成型

4. 2 研究方法

(1)コンクリート補強用連続繊維シートへの適用

コンクリート平板に、異なる条件で繊維シートを接着した後、促進劣化のための冷熱繰り返しによる負荷を与え、各段階でX線CT撮影をして、気泡の発生などの内部の変化を観察した。

①繊維シート接着供試体

コンクリート平板上に表-4, 5に示す繊維と樹脂を用いて繊維シート接着供試体を作製した。供試体の作製条件は表-6に示す。作製温度では、用いた樹脂の施工温度範囲の25℃と、施工温度範囲を下回る5℃の2条件とし、表面水分はそれぞれの温度で、適切な表面水分、表面水分の多い状態、表面水分が逸脱して多い状態の3状態とした。プライマー塗布後に繊維シートを接着した。繊維シートは同じ繊維方向で2枚積層した。



図-20 供試体の例(No.n-1)

表-4 使用した繊維シートの基本性状

| 繊維種類 | 繊維目付 g/m ² | 設計厚さ mm | 引張強度 N/mm ² | 引張弾性率 N/mm ² |
|---------------|--------------------------|------------|---------------------------|----------------------------|
| 炭素繊維 (中弾性) | 300 | 0.165 | 2,900 | 3.9×10 ⁵ |

表-5 使用した樹脂の基本性状

| 材質 | 引張強度* N/mm ² | 曲げ強度* N/mm ² | 使用温度* |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--------|
| エポキシ樹脂 (2液混合・無溶剤) | 30以上 | 40以上 | 10~25℃ |

※カタログ値

表-6 供試体の作製条件

| 供試体No. | 作製温度 | 表面水分 |
|--------|------|-------|
| n-1 | 25℃ | 4.6% |
| n-2 | 25℃ | 11.2% |
| n-3 | 25℃ | Full* |
| c-1 | 5℃ | 4.7% |
| c-2 | 5℃ | 11.0% |
| c-3 | 5℃ | Full* |

※Full：水中に浸漬しておいたものを取り出し、表面を拭いた後に施工したもの

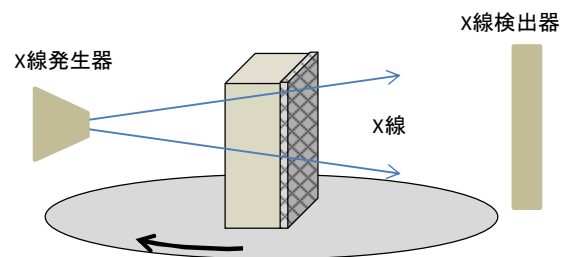


図-21 X線CT撮影の概要

本研究では、精細に撮影できることに主眼を置いたため、X線の透過量が著しく異なる状態を避け、図-19に示すような正四角柱に切り出して試験に供することにした。供試体の例を図-20に示す。

②冷熱繰り返し試験

繊維シート接着供試体を促進劣化させるため、冷熱繰り返し試験を行った。試験条件は、60℃で24時間水中養生し、続けて20℃で24時間水中養生した。48時間を1サイクルとし、10サイクルまで試験を行った。途中、内部の破損等を観察するために、X線CT撮影を行った。

③X線CT撮影

本研究では、微細な観察に適したマイクロフォーカスCTスキャナーを用いた。本機は管電圧320kVと225kVが選択できるが、今回は225kVを使用した。撮影の概要を図-21に示す。撮影領域20mm×20mm、焦点サイズ20μm、表示画素数1024×1024ピクセルの条件で撮影した。

(2)FRPの曲げ試験への適用

①供試体

FRPは、水門に用いられるFRPと同じ構成のものとした。FRPの構成を表-7に示す。チョップドストランドマットおよびロービングマットにはガラス繊維を用いている。積層用樹脂マトリックスは水門扉などで通常使用されるオルソフタ酸系の不飽和ポリエステル樹脂を使用した。

FRPの作製に当たっては、通常通りの作製を行った通常品（以下、通常品）と、故意に繊維を蛇行させて不良箇所を設けた欠陥品（以下、欠陥品）を作製した。

表-7 FRPの構成

| 積層構成 | 積層数 |
|---------------|-----------|
| ゲルコート | 1(500 μm) |
| チョップドストランドマット | 1 |
| ロービングクロス | 15 |
| チョップドストランドマット | 1 |
| ゲルコート | 1(500 μm) |

②曲げ試験

曲げ試験は、JIS K7017に従って行った。供試体は厚さ8mm×幅15mm×長さ240mmとした。

X線CT撮影用には、別に切り出した8mm×幅8mm×長さ240mmの供試体を使用した。

③X線CT撮影

FRPを曲げた状態にしてX線CT撮影を行った。管電圧225kV、表示画素数1024×1024ピクセルで撮影した。

(3)様々な繊維補強材料への適用

①供試体

繊維の種類によっては、撮影のしやすさが異なる可能性があったため、各種の繊維補強材料を撮影した。

表-8 撮影した繊維補強材料

| 材料名 | 繊維 |
|-------|--------|
| GFRP | ガラス繊維 |
| CFRP | カーボン繊維 |
| AFRP | アラミド繊維 |
| ゴム引き布 | ナイロン |

②X線CT撮影

FRPを曲げた状態にしてX線CT撮影を行った。管電圧225kV、表示画素数1024×1024ピクセルで撮影した。

4.3 研究結果

(1)コンクリート補強用連続繊維シートへの適用

①繊維シートの観察

劣化の観察をする前に、樹脂内にある繊維シートの観察を行った。図-22に断面の映像を示す。樹脂層内に縞模様が見えており、やや薄い2本のすじが繊維である。今回、繊維シートには炭素繊維を用いており、炭素繊維の密度が2g/cm³付近、エポキシ樹脂の密度が1.2g/cm³付近であり、密度の差が小さかったことと、約2mmの樹脂層の中を撮影したため、鮮明に繊維を映し出すことができなかったが、繊維の位置を確認することはできた。

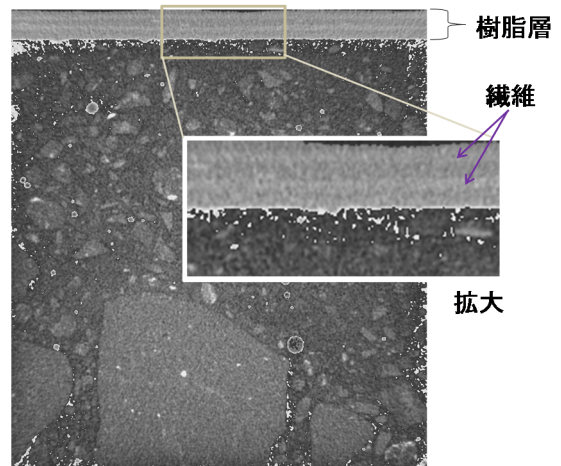


図-22 繊維の観察

②接着面の横からの映像の観察

CT撮影は、立体的に撮影されているので、解析に当たっては、任意の断面での映像が観察できる。まず、接着面を真横からみた断面の観察を行った。概ね2劣化サイクル毎に撮影は行ったが、図-23にはこの中から劣化1サイクル後、劣化6サイクル後、劣化10サイクル後のできるだけ同じ箇所の映像を示

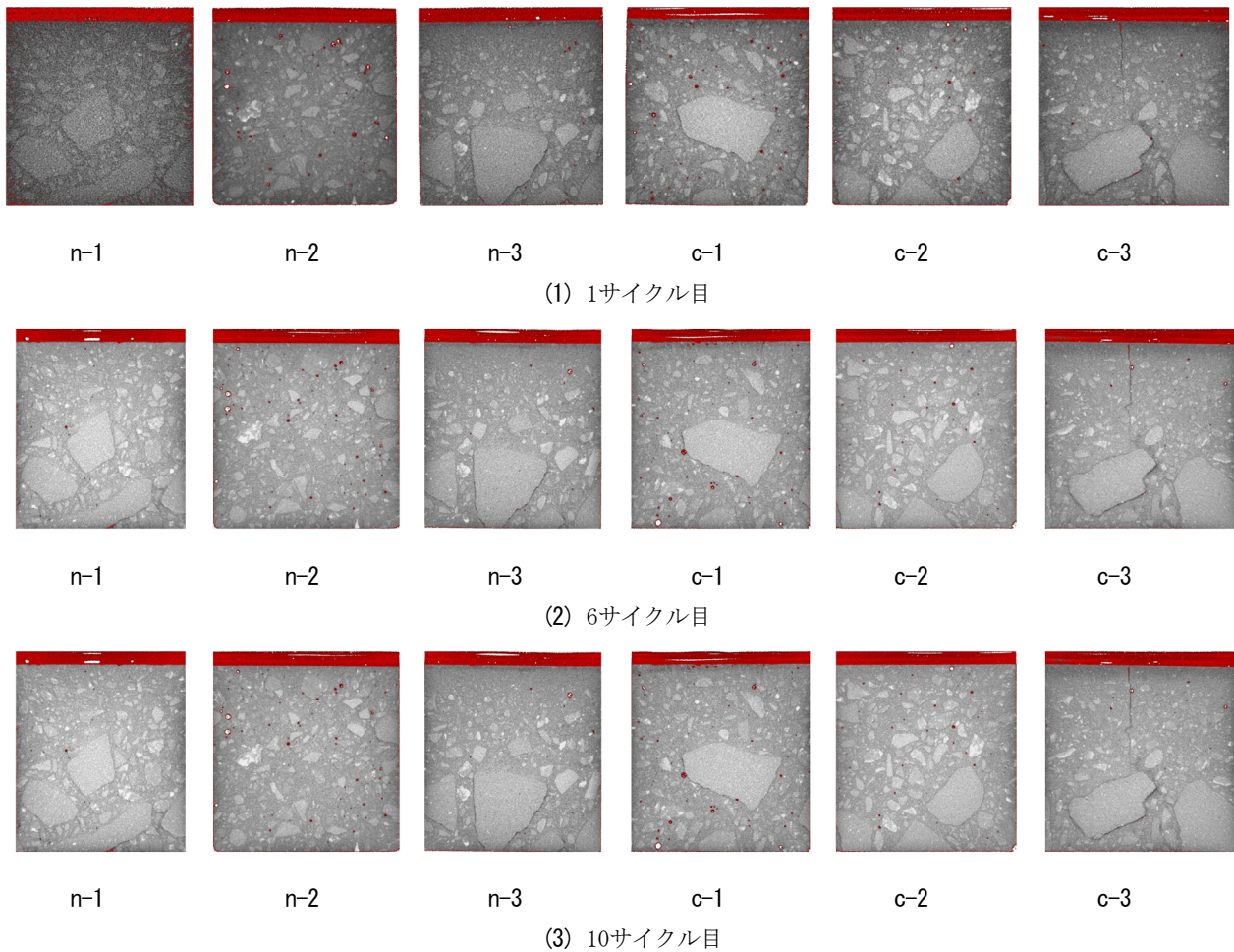


図-23 接着面を横から見た画像

す。CT映像は密度によって濃淡が付くため、画像解析により樹脂の密度に相当する領域には分かりやすいように着色を行った。実際のCT画像は白黒でありカラーで撮影できるわけではない。また、コンクリートの内部に赤色に着色された箇所があるが、空隙のまわりなどで、偶然樹脂と近い密度になった場合に誤認識されて着色されてしまったものであり、この部分には樹脂はない。

今回、10サイクルまでの劣化回数であったが、どの供試体も目立った損傷はなかった。接着面を真横から見た場合、どの映像でも、際だった剥離などは観察できなかった。断面はできるだけ同じ箇所をとるようにはしているが、本研究で用いた装置は0.01mm間隔でしか位置を調整できないため、完全に同じ箇所にはできなかった。その影響もあり、今回の横からの観察では、劣化による微小な変化を捉えることが困難であった。

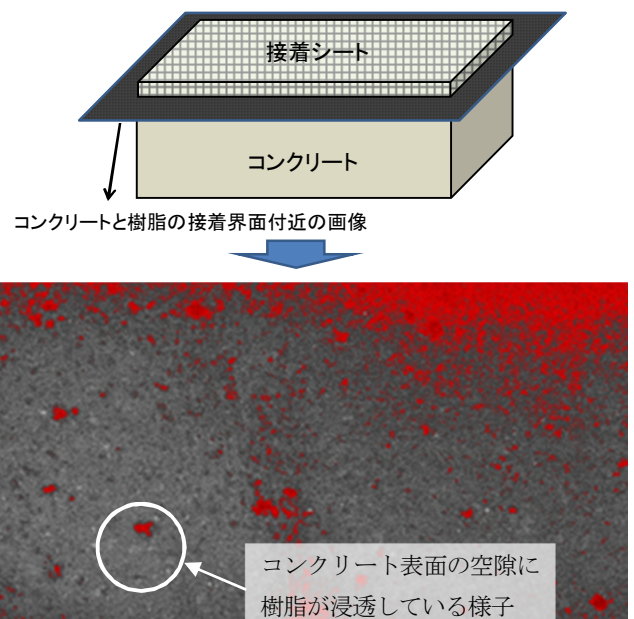


図-24 接着界面の観察例 (No.n-1)

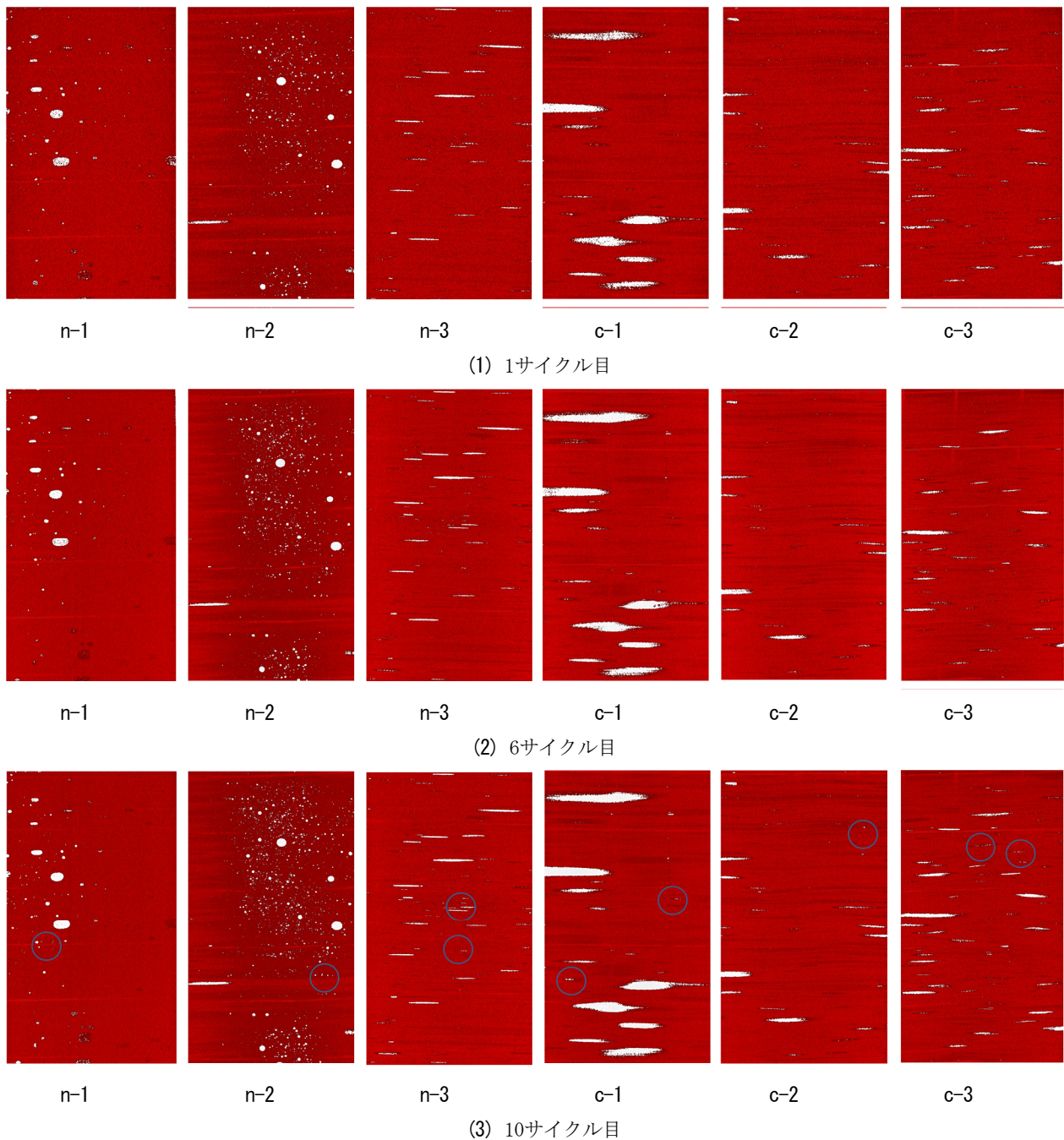


図-25 樹脂内部の気泡の変化

③接着面の上からの映像の観察

CT画像では、任意の断面が見られるので、コンクリートと樹脂の界面等も観察できる。接着界面を取り出した例を図-24に示す。このように接着面の様子を破壊せずに、試験の途中でも観察できる。今回、劣化10サイクルでも接着面の剥がれなどが生じなかったため、施工条件による接着面の変化の様子は観察することはできなかった。

続いて、樹脂内部に発生した気泡などの変化を観察

した。接着面より樹脂の内部寄りに気泡が観察された。今回の撮影では、繊維は横方向に入っており、気泡が繊維の方向に沿ってできたため、気泡は横に長くなった。各供試体の特徴的な気泡が見られた箇所を選び出し、劣化サイクル毎に図-25に示す。特に劣化10サイクル目になると気泡が増えてきており、画像からも判別できた部分については、図中に○で囲った。かなり小さな変化であるため、判別はかなり難しい状況であった。

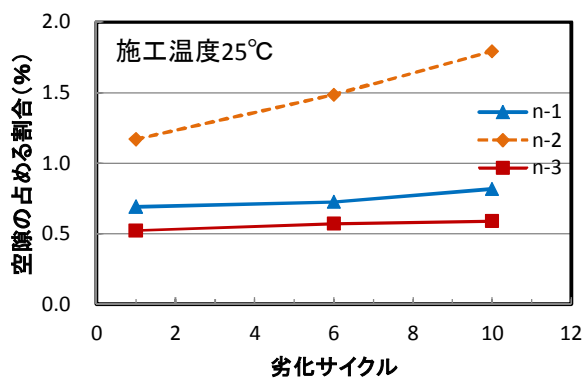


図-26 樹脂内部の気泡の増加 (25°C作製)

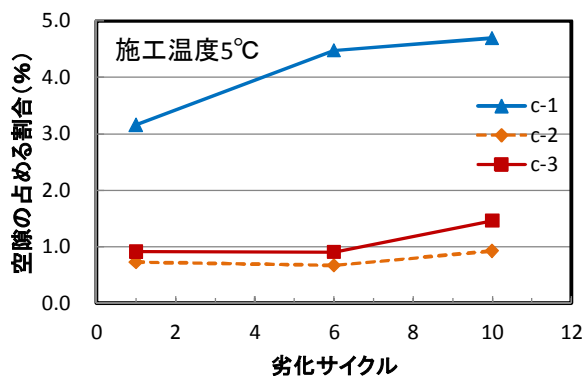


図-27 樹脂内部の気泡の増加 (5°C作製)

そこで、より定量的に気泡の変化を追うために、画像解析により、気泡の増減を追うことを試みた。具体的には、画像から気泡の面積を割り出し、気泡の占める割合を求めるようにした。結果を図-26、27に示す。画像からは判別は難しかったが、画像解析によれば、劣化サイクルの数が増えるにつれ気泡が増加していることが把握できた。

(2)FRPの曲げ試験への適用

ガラス繊維を用いたFRPの正常品と故意に繊維を蛇行させて作製した欠陥品において、曲げ試験による挙動の違いについて検討した。図-28にそれぞれの曲げ試験の結果を示す。正常品も欠陥品も同程度のひずみで破壊が起こっているが、曲げ強度は欠陥品の方が小さい。

これらの材料と同じものを用いて試料を曲げた状態でX線CT撮影を行った。なお、X線CTでは試料を360°回転させて何枚ものX線撮影を行うので、動いているものは撮影できない。従って、本撮影は、一定のひずみを与えた状態で固定して撮影した。撮影画像を図-29に示す。図-28の(a)(b)(c)と図-29の

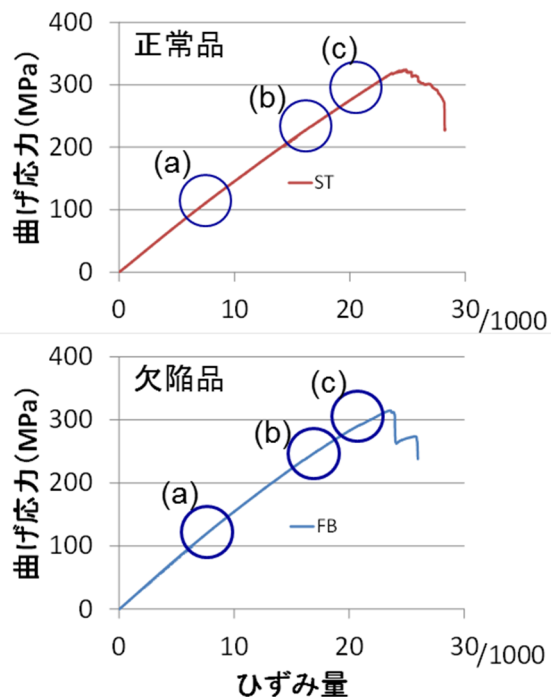
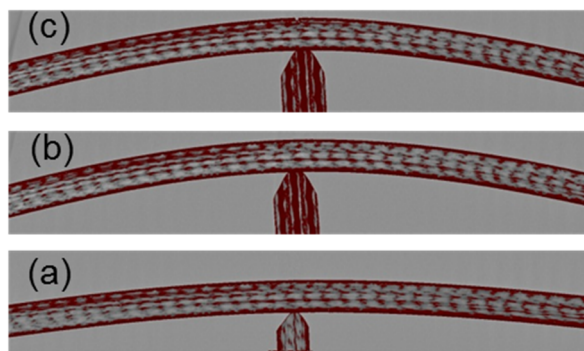
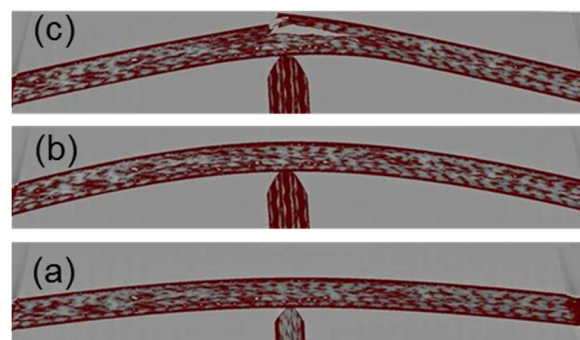


図-28 曲げ試験の結果



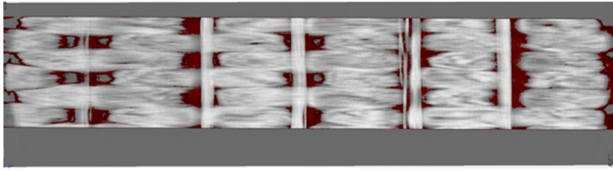
(1)正常品



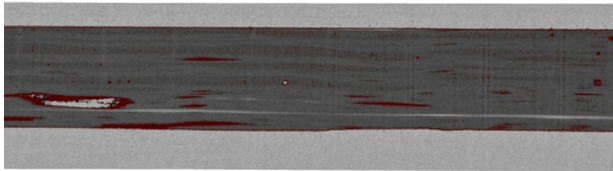
(2)欠陥品

図-29 曲げた状態でのX線CT画像

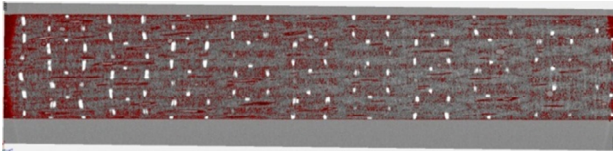
(a)(b)(c)はほぼ同じひずみの状態である。破損を起こすひずみ量において、正常品では表面に亀裂が出始めているのに対し、欠陥品ではFRP内部にはく離が



(1)GFRP



(2)CFRP



(3)AFRP

図-30 様々なFRPのX線CT画像

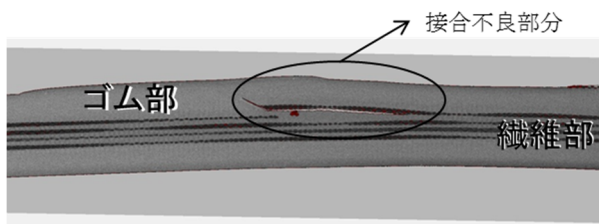


図-31 ゴム引き布のX線CT画像

生じていることが分かった。

(3)様々な繊維補強材料への適用

様々なFRPのX線CT画像を図-30に示す。(1)~(3)ではマトリックス樹脂が分かり易いように画像処理で赤く着色している。まずGFRPでは、繊維が明確に確認できる。これは樹脂と比べてガラス繊維の密度が大きいためである。これに対し、CFRP、AFRPでは繊維は確認できるもののGFRPと比べると鮮明ではなかった。これは、カーボン繊維、アラミド繊維は、マトリックス樹脂と比べて密度の差が小さく、コントラストが付きにくかったためである。

また、ゴム堰に用いられるゴム引き布のX線CT画像を図-31に示す。ゴム引き布では、ナイロン繊維が確認できた。また、撮影に用いたゴム引き布は、引き布と引き布の継ぎ目部分であり、接合不良のある部分であったが、接着していない部分が観察でき、不良箇所の検出もできることが分かった。

5. まとめ

本研究では、近年建設材料への導入が図られているX線CTを用いてアスファルト混合物およびFRPの新しい劣化評価手法について研究を行った。

アスファルト混合物への適用の検討において以下のことが分かった。

- (1) 粒径が大きく多孔性の粗骨材については、CT値ヒストグラムの分布に双峰性が見られた一方、粒径が小さく密な構造の細骨材および石粉については、CT値ヒストグラムの分布に単峰性が見られたことから、粒径によるCT値分布特性を明らかにすることができた。
- (2) アスファルトの種類を変化させてもCT値の分布に大きな変化がなかった。
- (3) 4値化画像により、骨材の形状、ならびに骨材、アスファルトおよび空隙の分布状況を把握することができた。
- (4) 断面平均CT値とアスファルト混合物の密度、アスファルト+石粉の平均CT値とアスファルト量、ならびにしきい値3と2.36mmふるい通過百分率との間の相関係数が大きいことから、CT値の各指標からアスファルト混合物の密度、アスファルト量、2.36mmふるい通過百分率を定量化できる可能性があることがわかった。
- (5) 粒子追跡手法はアスファルト混合物内部の粗骨材を追跡する上で有用であることが確認できた。

また、FRPへの適用において、以下のことが分かった。

- (6) X線CTスキャナーにより、樹脂層内の繊維シートの位置が確認できた。
- (7) 接着面を真横から観察した結果、剥離が大きく進行していないことが観察できた。しかし、観察位置の厳密な位置合わせが難しく、劣化等の微小な変化を把握することは難しかった。
- (8) 接着面を面的に観察した場合、コンクリート表面の空隙に樹脂が浸透している様子が把握できた。
- (9) 樹脂層内部にある気泡の劣化による成長を観察した結果、映像からも気泡が増えてくる様子が観察できた。しかし、微細なものも多く、今回の劣化では視覚的にとらえるのがやや難しかった。
- (10) 樹脂層内部の気泡の占める割合を求めた結果、劣化が進につれ気泡は増えている様子が把握でき、視覚的にはとらえることが難しかったものでも、

画像処理などで数値化することにより、変化をより明確に把握できるようなることが分かった。

- (11) 曲げ試験に適用した結果、欠陥のある製品と正常な製品では、破壊の形態が異なる様子を可視化することができた。
- (12) 様々な繊維補強材料でX線CT撮影を行うと、繊維とマトリックス材料との密度差が大きければ、鮮明な画像を取得できるが、差が小さい場合はやや不鮮明になる。
- (13) ゴム引き布を撮影した場合、繊維は比較的良好に観察できることが確認され、内部の欠陥部分も観察できることが分かった。

参考文献

- 1) 大谷順, 椋木俊文, 菊池喜昭 : X線CT用を用いた気泡混合処理土の物性評価, 土木学会論文集 C, No.652, pp.269-278, 2000.
- 2) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三 : X線CT法によるコンクリート供試体の非破壊検査, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.1, pp.1643-1648, 2003.
- 3) 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 畠俊郎 : マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料第1125号, 2006
- 4) 高木幹雄, 下田陽久 : 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2001
- 5) Soille,P. : Morphological Image Analysis:Principles and Applications, Springer-Vellag Berlin Heidelberg New York, 2002.

NEW EVALIATION METHOD OF DETERIORATION OF CUNSTRUCTION MATERIALS

Budged : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Material and Geotechnical Engineering
Research Group (Advanced Materials)

Author : NISHIZAKI Itaru, NITTA Hiroyuki

Abstract:

This research was studied to develop the new method to estimate degradation of the construction material using X-ray computed tomography. Asphalt mixture and fiber reinforced plastic were chosen from the construction materials. As the result, in an analysis of asphalt mixture, the ratio of the aggregates blend and the air void were calculated by X-ray CT. Movement of the coarse aggregate was observed, when asphalt mixture was flowing. In an analysis of fiber reinforced plastics, An increased air bubble as well as degradation were observed. When breaking by a bend, stripping inside FRP was also observed.

Keywords: X-ray CT, materials for asphalt pavement, fiber reinforced plastics, evaluation of deterioration