

再生アスファルト混合物の曲げ疲労試験における劣化挙動の微視的観察

中嶋 響¹・肥後 陽介²・江城 静順¹・瀬尾 彰²・青木 政樹³

¹ 学生会員 京都大学大学院（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂）

E-mail: nakajima.hibiki.47c@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

² 正会員 京都大学経営管理大学院（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

E-mail: higo.yohsuke.5z@kyoto-u.ac.jp

¹ 学生会員 京都大学大学院（〒615-8530 京都市西京区京都大学桂）

E-mail: eshiro.shizuka.72m@st.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学経営管理大学院（〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町）

E-mail: seo.akira.3k@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 大成ロテック（株）技術本部技術研究所（〒365-0027 埼玉県鴻巣市上谷 1456）

E-mail: masashige_aoki@taiseirotec.co.jp

現在のアスファルト舗装の維持修繕では、損傷程度に応じて事後保全を実施しているが、アスファルト混合物の物性や、ひび割れ等の劣化メカニズムについて明らかでないことが多く存在する。本研究では、アスファルト混合物における亀裂の発生および進展メカニズムの解明を目的として、新規および再生アスファルト混合物供試体に対して曲げ疲労試験と X 線マイクロ CT 撮影を実施し、得られた CT 画像について画像処理を行い、アスファルト混合物供試体の亀裂を微視的に観察した。その結果、試験後の新規および再生アスファルト混合物供試体には、3 種の箇所で亀裂の発生が生じたことが確認され、そのうち骨材周りの亀裂の生じ方に差異がみられた。微視的観察結果に基づきアスファルト混合物の劣化挙動について、その要因やメカニズムについて論じた。

Key Words: Pavement, Recycled pavement, X-ray micro-CT, Image analysis, Fatigue crack

1. はじめに

近年、高度経済成長期に集中的に整備された道路施設の老朽化が進行しており、道路舗装の効率的な維持管理システムの確立が強く求められている。アスファルト舗装の損傷補修には定期的な点検が不可欠であるが、現行の点検基準¹⁾は点検項目と損傷、劣化要因との関連が乏しく、コスト負担も大きい。したがって、効率的な維持修繕や新材料開発のためには、アスファルト舗装の劣化挙動を詳細に理解することが重要である。

供用後の老朽化舗装の大部分は、撤去後に破碎・分級を経て再生利用している。現行の設計要領²⁾では、アスファルト混合物を均一かつ一体の材料として取り扱っており、これは再生骨材や旧アスファルトを含む再生アスファルト混合物についても同様である。すなわち、再生

アスファルト混合物は、再生用添加剤の添加によって再生骨材表面の旧アスファルトが完全に溶解し、新規材料と均一に混合すると仮定されている。しかし、新規混合物と再生混合物が実際にどのような劣化挙動を示すかについては未だ十分に明らかにされていない。現行の設計要領を見直すためには、新規および再生アスファルト混合物におけるひび割れ等の劣化挙動を比較することが不可欠である。また、アスファルト混合物の劣化挙動を詳細に把握するためには、内部構造を非破壊で可視化できる X 線マイクロ CT が有効である。

以上の背景を踏まえ、本研究では新規混合物および再生混合物を対象に曲げ疲労試験を実施し、試験前後の供試体について X 線マイクロ CT による微視的亀裂観察を行うことで、アスファルト混合物における亀裂の発生および進展メカニズムの違いを明らかにすることを目的と

する。以下では、2章において既往研究の概要と本研究の位置づけを示し、3章で供試体作製を含む研究方法を述べる。さらに、4章で微視的観察のための画像処理方法を説明し、5章でその観察結果について考察する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

アスファルト混合物の疲労、特にひび割れに関する研究はこれまで数多く実施されている。高速道路を対象とした開削調査³⁾では、舗装表面の観察に加えて断面観察を行うことにより、下層路盤の変形状況やアスファルト基層底面からのひび割れ発生が確認されている。しかし、表面および側面からの観察に依拠する手法では、アスファルト混合物内部の劣化挙動を十分に評価しているとは言い難い。

アスファルト混合物内部の劣化挙動を詳細に把握するためには、構成素材間の界面に着目した微視的計測が有効である。その観察手法として、X線マイクロCTの活用が注目されている。大型放射光施設 SPring-8 を用いた既往研究⁴⁾では、促進劣化試験を実施した新規混合物供試体に対してX線マイクロCTを用いた微視的計測が行われ、界面におけるひび割れの発生位置や発生要因が考察された。図-1に示すように、X線CT画像によって、骨材、アスファルト、空隙を微視的に識別することが可能である。この研究は新規混合物を対象としたものであるため、再生混合物に対しても同様の検討を行うことが求められる。両者を比較することにより、亀裂の発生・進展メカニズムの相違を明確にできるとともに、劣化試験前後の供試体を比較することでひび割れ発生箇所の把握精度を高められる可能性がある。さらに、既往研究においても指摘されているように、再生混合物における再生骨材表面の旧アスファルトと、新規に加えたアスファルトや骨材等との界面状態についても、微視的観察を通して理解を深めることができると考えられる。

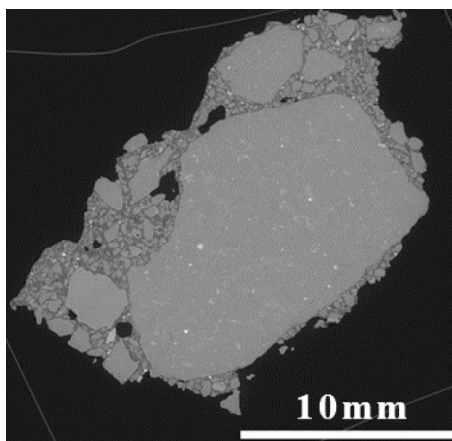


図-1 供試体のX線CT画像⁴⁾

本研究では、新規混合物および再生混合物のそれぞれ3本の供試体に対して曲げ疲労試験を実施した。さらに、曲げ疲労試験の前後において実験室レベルのX線マイクロCT装置を用いて供試体を撮影し、得られたCT画像に対して画像処理を行った。これにより、亀裂の微視的観察を通じて、新規混合物および再生混合物における亀裂の発生箇所やその要因、破壊の要因について議論した。また、本研究で適用した試験手法ならびに画像処理手法について、その有効性を論じた。

3. 研究手法

本研究では、新規および再生アスファルト混合物供試体を作製し、各供試体に対して曲げ疲労試験を実施し、曲げ疲労試験の前後にX線CT撮影を行った。各手法について説明する。

(1) 供試体作製

本研究では、新規骨材を用いた密粒度アスファルト混合物(13)(以下、新規混合物)と、再生骨材を50%配合した密粒度アスファルト混合物(13)(以下、再生混合物)の2種類を対象とし、それぞれ3本ずつ供試体を作製した。作製した供試体の外観を図-2に示す。図中、上段3本が新規混合物(N1, N2, N3)、下段3本が再生混合物(R1, R2, R3)で、供試体の寸法は4cm×4cm×40cmである。両混合物の骨材配合率を表-1および表-2に、アスファルト配合率を表-3に、供試体のマーシャル特性値等は表-4に示す。なお、供試体作製に使用した新アスファルトにはストレートアスファルト60/80を用いた。再生用添加剤については、既往の研究⁵⁾において飽和分系よりも新規混合物により近い性状まで回復するとされる芳香族系の添加剤を選択した。旧アスファルトの針入度は15であったため、圧裂係数による配合設計を行い再生用添加剤の添加量は旧アスファルト量に対して9.2%とした。



図-2 作製した6本の供試体

表-1 新規混合物の骨材配合率

骨材の種類	材質	配合率%(骨材のみ)
6号碎石	硬質砂岩	36.5
7号碎石	硬質砂岩	19.5
砕砂	硬質砂岩	30.5
細砂	川砂	7.5
石粉	粉碎石灰石	6.0
合計		100.0

表-2 再生混合物の骨材配合率

骨材の種類	材質	配合率% (骨材のみ)	配合率% (旧アスファルト含む)
6号碎石	硬質砂岩	18.0	18.0
7号碎石	硬質砂岩	7.5	7.5
砕砂	硬質砂岩	15.0	15.0
細砂	川砂	7.5	7.5
石粉	粉碎石灰石	2.0	2.0
再生碎石(13-5)	再生骨材	30.1	31.1
再生碎石(5-0)	再生骨材	19.9	21.1
合計		100.0	102.2

表-3 新規および再生混合物のアスファルト配合率

アスファルト・添加剤配合率		内割 %	外割 %
新規混合物	新アスファルト量 (ストレートアスファルト 60/80)	5.9	6.3
	旧アスファルト量	2.1	2.2
再生混合物	再生用添加剤量	0.2	0.2
	新アスファルト量 (ストレートアスファルト 60/80)	3.1	3.3

表-4 供試体のマーシャル特性値等

	新規混合物	再生混合物
アスファルト量(%)	5.9	5.4
密度(g/cm ³)	2.396	2.417
空隙率(%)	3.9	3.6
飽和度(%)	77.7	77.8
安定度(kN)	8.83	11.65
フロー値(1/100cm)	30	26
混合物締固め温度(°C)	141	145

(2) X線CT撮影

本研究では、前節で作製したアスファルト混合物供試体 6 本を対象として、KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μ hdk, 東芝 IT コントロールシステム社製) ⁹⁾を用いた X 線マイクロ CT 画像を取得した。装置の外観を図-3 に、撮影条件を表-5 に示す。本研究で使用した X 線はコーンビーム方式であり、X 線源から円錐状に照射された X 線が供試体を透過し、Flat Panel Detector (FPD) により減衰後のエネルギーを測定する仕組みである。供試体は移動・回転・昇降機能を備えたワークテーブルに設置され、鉛直方向に固定した後、360° 回転させることで撮

影を行った。供試体の固定にはアルミ製二つ割りモールドを用い、供試体を内部に設置した後、モールド外周および底面を養生テープで補強した。

撮影条件は、X 線源焦点から FPD までの距離 (FDD)、X 線源焦点から供試体回転中心までの距離 (FCD)、管電圧 (最大 225 kV)、管電流 (最大 888 μ A) を調整し、200 W 以内の範囲で設定した。これにより、供試体の大きさや観察目的に応じた撮影領域 (FOV) と分解能を決定した。ボクセルサイズの xy 方向の長さは水平断面画像の分解能を示し、z 方向の長さはスライス厚に一致する。本研究では、曲げ疲労試験前後の供試体内部を比較するため、同一条件下で試験前後各 1 回、計 2 回の撮影を行った。表-5 に示すマトリクスサイズは水平断面画像の画素数、ビュー数はワークテーブル 1 回転あたりの撮影方向数、積算枚数は 1 撮影方向あたりの撮影回数を表す。なお、本研究では亀裂発生が予想される供試体中央付近 57.5mm を対象に撮影を実施した。

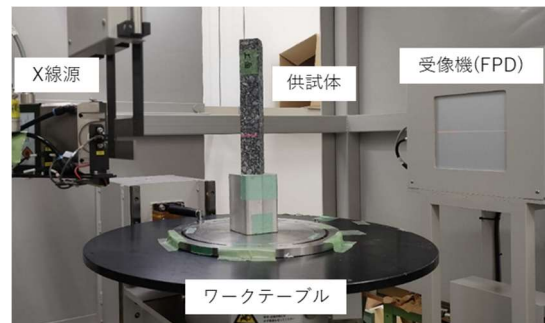


図-3 X線CT装置の外観

表-5 X線CT撮影の条件

管電圧 (kV)	180
管電流 (μ A)	150
スライス厚 (mm)	0.063
スライス枚数	913
ボクセルサイズ (μ m ³)	5736 $\times$ 63.00
マトリクスサイズ	1024 ²
FOV (mm)	58.705
積算枚数	10
ビュー数	2595
FCD (mm)	3243
FDD (mm)	1050

(3) 曲げ疲労試験

本研究で行った曲げ疲労試験 (B018T) ⁷⁾について、試験方法、条件とその結果を述べる。本試験では、アスファルト混合物供試体 6 本に対して 4 点支持による繰返し曲げひずみを加え、疲労破壊に至るまでの回数を測定した。曲げ疲労試験の制御方式はひずみ制御方式を、供試体の養生には空冷方式を採用した。曲げ疲労試験機の例を図-4 に、曲げ疲労試験の载荷条件を表-6 に示す。

本研究では、曲げ疲労試験後の供試体の中で、供試体

中央付近に比較的明確に亀裂が確認できた N2, R2 を選び、微視的観察の対象とした。N2, R2 の供試体中央付近の供試体外側面の写真を図-5および図-6に示す。なお、図-5および図-6における上面とは、供試体を曲げ疲労試験装置に設置した際の上側の面のことである。また、各供試体の曲げ疲労試験における応力と载荷回数との関係を図-7に示す。舗装調査・試験法便覧（平成 31 年版）⁷⁾に準じ、応力の変化が小さい部分と変化が大きい部分の接線を引き、その交点の载荷回数を破壊回数とした。N2, R2 の破壊回数はそれぞれ 12,200 回、17,000 回であった。これらの結果から、R2 の方が N2 よりも曲げ疲労試験初期の 100 回～3000 回にかけての傾き、破壊回数が大きいことが確認できた。なお、再生用添加剤を添加した再生混合物は、新規混合物よりも破壊回数が大きくなる可能性が既往研究で示唆されている⁸⁾。

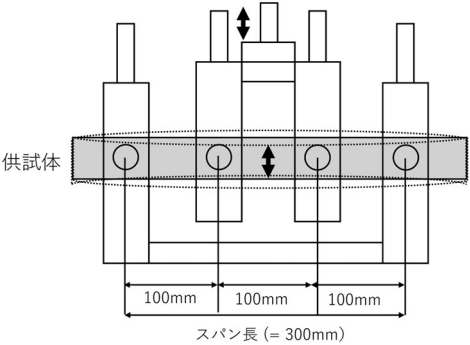


図-4 曲げ疲労試験機の例

表-6 曲げ疲労試験の载荷条件

载荷方法	両端固定 2点载荷	試験温度	5℃
供試体寸法	4×4×40cm	载荷周波数	5Hz
スパン	30cm	载荷波形	正弦波
試験方法	ひずみ制御	ひずみ	400μ

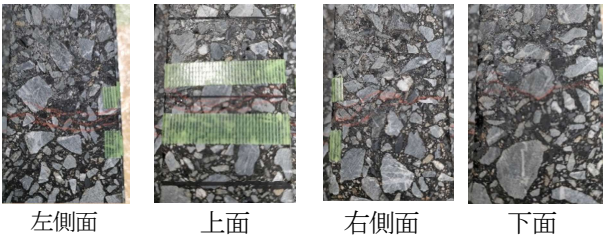


図-5 供試体中央付近の写真 N2

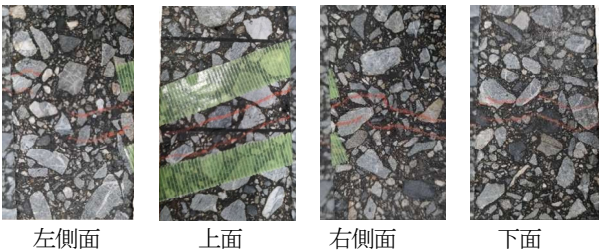


図-6 供試体中央付近の写真 R2

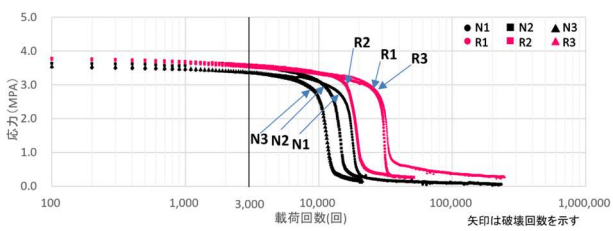


図-7 応力と载荷回数の関係

4. 画像処理

本研究では、曲げ疲労試験により生じた亀裂を抽出するために CT 画像の位置合わせ、重複箇所の抽出、シェーディングアーチファクト補正、二値化を行い、差画像を作成した。本章では CT 画像について述べたのち、各処理の詳細について述べる。

(1) CT 画像

CT 画像とは、voxel（ボクセル）という厚さをもつ三次元画素の集まりであり、各ボクセルに素材ごとの X 線吸収係数（CT 値）が格納されている。CT 画像は X 線マイクロ CT 装置により得られる断面画像であり、複数の水平断面を鉛直方向に生成し、画像処理ソフトを用いて三次元的画像として表すことで、鉛直断面や任意の断面を得ることができる。

(2) 位置合わせと重複箇所の抽出

本研究における X 線 CT 撮影では、供試体の設置を手動で行ったため、曲げ疲労試験前後の CT 画像内で供試体の位置にわずかに差異が生じた。この位置ずれを補正するため、本研究では画像処理手法の一つである affine 変換を用いた。affine 変換とは、画像の拡大縮小・平行移動・せん断・回転を一度に行う写像変換であり、以下の式(1)で表される。このときの行列 A を affine 行列という。

$$x = Ax_0 \tag{1}$$

ここで、 x_0 は曲げ疲労試験前の CT 画像の座標ベクトル、 x は x_0 に対応する曲げ疲労試験後の CT 画像の座標ベクトルである。異なる特徴点を 4 点選定し、式(1)に代入することで affine 行列を求めた。特徴点は、周囲よりも CT 値が高く、CT 画像において明瞭に白色として観察される部分を抽出して選定した。affine 行列を各座標ベクトルに適用することで、画像の位置ずれを 3 次元において補正することが可能となる。すなわち、曲げ疲労試験後の CT 画像における供試体の位置を試験前の位置に一致させることができる。この際、各画像の端の部分には撮影領域が重ならない箇所が存在するが、画像間の比較に寄与しないためここで除去した。R2 の位置合わせと重

複箇所の抽出を行った後の画像を図-8 a)に示す。なお、図-8 の画像はすべて撮影領域上端から 24.0 mm の位置の供試体断面を示す。

(3) シェーディングアーチファクト補正

連続X線が被検体を透過する際、低エネルギー成分ほど吸収されやすく、透過する物体の厚さが増加するにつれて、透過後のX線は高エネルギー成分の割合が高くなる傾向を示す。この現象をX線ビームハードニングと呼び、その影響によりシェーディングアーチファクトが発生する。その結果、図-8 a)に示すように、供試体中心付近が暗く、輪郭付近が明るく表現される CT 画像が得られる。本研究では、CT 画像の各水平断面（各スライス）において、同一水平座標上に存在するボクセルに格納された CT 値の平均を算出し、作成した平均値画像を元画像から差し引くことでアーチファクトの影響を低減・除去した⁹⁾。この処理をシェーディングアーチファクト補正と呼ぶ。図-8 b)に R2 供試体に対して本補正を適用した結果を示す。

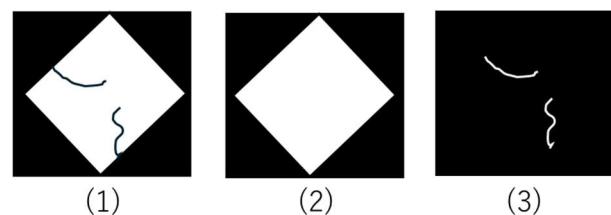
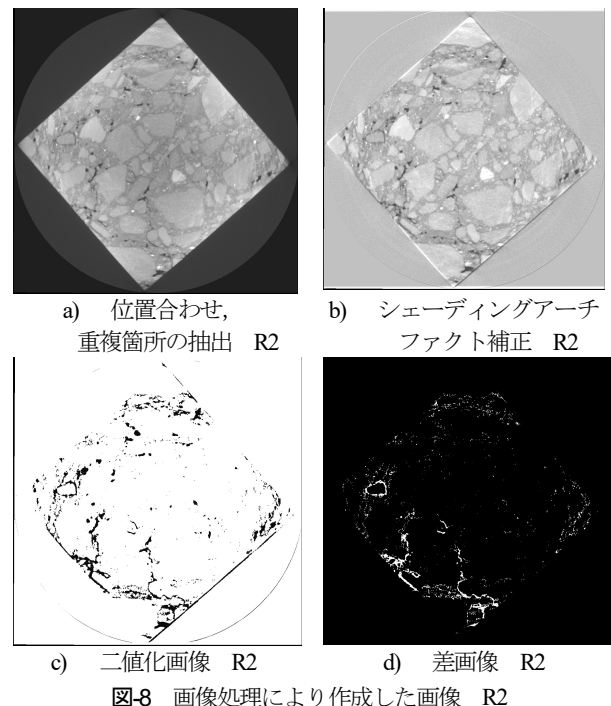
(4) 二値化

(2)および(3)の前処理を施した画像に対し、空隙相と、骨材およびアスファルトを含む相の2相に分割する二値化処理を行った。二値化には Kido et al. (2020)⁹⁾を参考に、Region growing 法を適用した。具体的には、まず CT 画像から空隙相および骨材・アスファルト相の CT 値を複数箇所において部分的にサンプリングし、各相の CT 値の平均値と標準偏差を算出した。その結果を基に許容値を設定し、対象となるボクセルと隣接するボクセルの CT 値がこの範囲内にある場合、同一相の領域として抽出した。上記の通り、Region growing 法は連続性を有する相を取り出せることが特徴である。アスファルト混合物の場合、空隙相は必ずしも連続ではないが、一方、骨材とアスファルトは連続した相と考えられる。よって、本研究では骨材・アスファルト相に Region growing 法を適用した後に、骨材・アスファルト相として抽出した領域以外を空隙相とした。なお、実際の Region growing の許容値は、サンプリングした骨材・アスファルト相の CT 値の標準偏差を参考値としながら、目視で表面に観察されている亀裂が明確に二値化で確認できるように決定した。以上の処理により、空隙相を黒色、骨材およびアスファルト相を白色として表示する二値化画像を得た。R2 の二値化結果を図-8 c)に示す。

(5) 差画像

(4)で得られた二値化画像に対し、供試体外部を黒色に変換する処理を施し、空隙の抽出に影響を及ぼさないようにした（図-9 (1)）。次に、図-9 (1)に対し同回数の

dilation 処理と erosion 処理を適用することで、供試体内部の空隙相を充填した画像を得た（図-9 (2)）。さらに、図-9 (1)と図-9 (2)の差分を算出することにより、空隙のみを抽出した画像が得られる（図-9 (3)）。この空隙抽出画像（図-9 (3)）について、曲げ疲労試験前後の差分を算出することで、空隙相と骨材・アスファルト相の二相における変化を識別できる。すなわち、曲げ疲労試験によって発生した亀裂を抽出することができる。以後、本研究ではこの差分画像を「差画像」と呼ぶ。R2 の差画像を図-8 d)に示す。差画像は曲げ疲労試験によって発生した空隙が抽出されるため、連続した空隙として亀裂の抽出が可能である。



5. アスファルト混合物の劣化挙動の微視的観察

(1) 亀裂が生じた箇所とその要因

曲げ疲労試験前後の N2 と R2 の CT 画像の一部を図-10 および図-11 に示す。新規混合物 N2（図-10）の曲げ疲労試験前後の画像の比較より、右側の赤色の楕円で囲んだ部分は骨材とアスファルトの境界に、左側の緑色の楕円で囲んだ部分はアスファルトモルタルの内部に、中心

の黄色の楕円で囲んだ部分は骨材の内部にそれぞれ亀裂が生じたと考えられる。再生混合物 R2 における曲げ疲労試験前後の CT 画像の比較 (図-11) においても, N2 と同様に三種の亀裂の生じ方が確認できた。図-11 における亀裂の種類と楕円の色は図-10 におけるものと対応している。

次にこれらの亀裂の生じた要因を考察する。既往研究では, アスファルト混合物の破壊および損傷の起点として, 第1に粗骨材表面からアスファルトが剥離する箇所, 第2にアスファルトが凝集破壊することで間隙が生じる箇所, 第3に粗骨材同士が接触もしくはアスファルト被膜が極めて薄い箇所 (瀬尾ら, 2024, p.8) ⁴⁾ の3様態が指摘された。以下, 本研究結果と既往研究で示された知見との整合性を議論する。三種の亀裂が生じた箇所のうち, 骨材とアスファルトの境界, アスファルトモルタル内部の亀裂について, 亀裂面の両側の素材状況の合致性から, それぞれ瀬尾ら (2024) で示唆された第1様態, 第2様態と合致すると考えられる。つまり, 骨材とアスファルトの境界は骨材からのアスファルトの剥離, アスファルトモルタル内部の亀裂はアスファルトモルタルが内部で凝集破壊したと考えられる。N2 の骨材内部に生じた亀裂について, 図-10 の曲げ疲労試験前の CT 画像で骨材の内部に筋が確認でき, R2 の骨材内部に生じた亀裂についても, 図-11 下段の曲げ疲労試験前の CT 画像で骨材内部に筋が確認できた。N2, R2 とともに骨材内部の筋が確認できた位置に亀裂が生じたことから, 微細なひび割れが生じていた箇所に曲げ疲労試験による応力が集中し, 亀裂が生じた可能性が考えられる。また, N2, R2 とともに, 骨材内部の亀裂の中には, 曲げ疲労試験前の CT 画像では対応する筋が確認できなかったものも存在する。このような微細なひび割れがない箇所においても, 骨材形状や配向からその部分に応力が集中したことにより骨材が破壊に至ったと考えられる。なお, 瀬尾ら (2024) で示唆された第3様態について本研究では確認できなかった。以上の考察から, アスファルト混合物に亀裂が生じる要因が, アスファルトの骨材からの剥離, アスファルトモルタル内部の破壊, 骨材内部の微細なひび割れにおける応力集中, 骨材形状や配向による応力集中であることが, 実験室レベルの X 線 CT を用いた検証においても確認できたと考える。

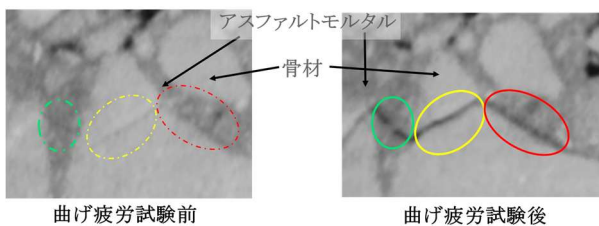


図-10 三次元 CT 画像の一部 N2

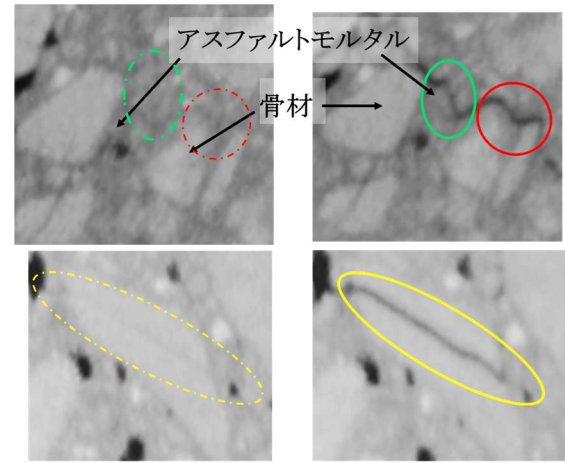


図-11 三次元 CT 画像の一部 R2

(2) 亀裂発生と応力低下から推察する材料劣化メカニズム

4. (5) で作成した N2, R2 の亀裂の差画像と曲げ疲労試験後の各供試体の撮影範囲全体における CT 画像を三次元表示した画像を図-12 に示す。なお, N2, R2 の亀裂の三次元画像において供試体中央付近以外にも白色で示される空隙の点が散見される理由として, 位置合わせや二値化における誤差, ノイズの影響が考えられる。図-12 の N2, R2 の亀裂の三次元画像では, R2 のほうが N2 よりも供試体中央付近に亀裂が集中して現れていることが確認できる。すなわち, 新規混合物よりも再生混合物のほうが明確に面状の亀裂が確認できた。

図-7 に示す応力と载荷回数との関係より, 再生混合物は新規混合物に比べて応力低下に至るまでの回数が多く, 破壊前の漸減具合が大きな挙動, つまり延性的な挙動を示す。一方で, 一度応力が顕著に低下し始めると両者の曲線は相似的で, 低下の度合いもほぼ同じであり, 新規と再生の挙動は類似している。このことは, 応力が顕著に低下する過程における亀裂発生の度合いは新規混合物と再生混合物で大きな差はなく, 顕著な応力低下の要因は亀裂の発生およびアスファルトの塑性変形など新規と再生で共通であることを示唆している。すなわち, 新規と再生の亀裂発生の度合いの差はこの顕著な応力低下よりも前に生じているのであり, 再生混合物では顕著な応力低下に先立って新規混合物と比べてより明確に亀裂が発生し, これが剛性低下を引き起こした結果, 延性的な挙動を示したと考えられる。一方, 新規混合物では亀裂の発生が少なく剛性が維持されやすいため, より脆性的な挙動を示したと考えられる。

表-7 に示す繰り返し载荷回数 100 回から 3000 回までの応力低下量は, 新規混合物の N2 で 0.068 MPa であったのに対して, 再生混合物の R2 は 0.199 MPa と低下量が多い。このことは, 再生混合物のほうが新規混合物に比べ

て剛性が低下していることを裏付けている．なお，N2の応力低下量が他の新規混合物と比較して小さい原因は，曲げ疲労試験の初期において治具による供試体の締め付けが緩んでおり，1000回時点で再度締め付けを行ったため載荷荷重が大きくなったと考えられる．しかし，表-7より，N2以外の供試体においても新規混合物よりも再生混合物のほうが100回～3000回の応力低下量大きいことが確認できるため，この現象は本論文の主張に影響を及ぼさないと考えられる．

また，以上の考察を踏まえると，新規混合物と再生混合物の破壊の要因に関して以下のような考察ができる．新規混合物の破壊は，骨材からのアスファルト剥離，ならびに骨材そのものの破壊が起点になると考えられる．すなわち，新規混合物の破壊は，骨材とアスファルトの接着の弱い箇所がどこか剥離することで他所に応力が集中し，そこが剥離することを連鎖的に繰り返し，連続した空隙やひび割れに至ると考えられる．一方，再生混合物の破壊は，剥離や骨材のひび割れも起点となり得るが，それに加え，再生骨材周囲の空隙や面状の空隙の形成が主要因であるとする．特に再生骨材の空隙は，再生骨材が再生用添加剤と接触する界面に相当する可能性があるとする．

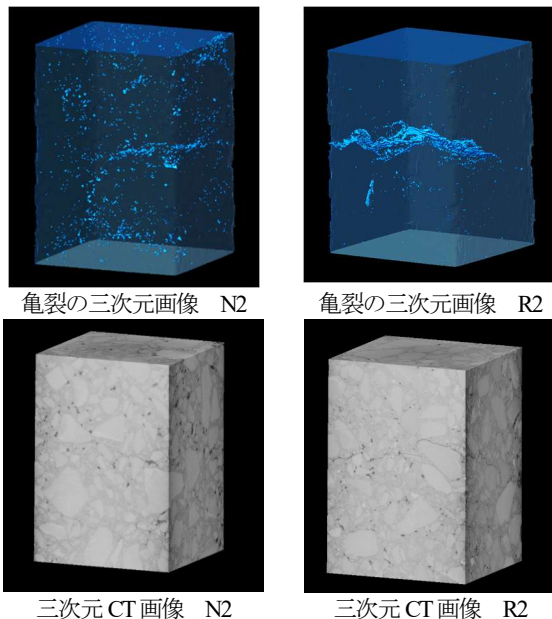


図-12 三次元表示した画像 N2, R2

表-7 繰返し載荷回数 100 から 3000 回での応力低下量

新規混合物 (MPa)		再生混合物 (MPa)	
N1	0.160	R1	0.224
N2	0.068	R2	0.199
N3	0.178	R3	0.230

(3) 再生混合物における骨材周辺に発生した亀裂

亀裂の微視的観察において，N2 には確認されず，R2

においてのみ特有の挙動が観察された．図-13にはR2の差画像および曲げ疲労試験後の CT 画像を示す．両画像を比較した結果，骨材を取り囲むように進展する亀裂が一箇所だけ確認された．このような現象が R2 のみに認められた要因として，当該骨材が再生骨材であり，再生骨材表面に残存する旧アスファルトの影響により，周囲の新アスファルトとの付着が弱化した可能性が考えられる．ただし，本研究で用いた CT 画像からは，旧アスファルトと新アスファルトを明確に識別することはできなかった．そのため，新旧アスファルトの識別には，供試体作製時点で造影剤を混合するなどの工夫を施す必要があると考える．

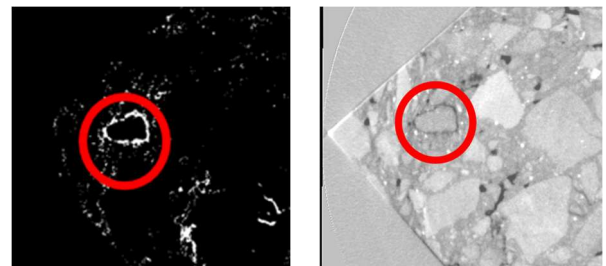


図-13 差画像と曲げ疲労試験後の CT 画像 R2

図-13 差画像と曲げ疲労試験後の CT 画像 R2

6. おわりに

本研究では，新規および再生アスファルト混合物の亀裂の発生，進展メカニズムの解明を目的とし，アスファルト混合物供試体に対して曲げ疲労試験と X線マイクロ CT 撮影を実施し，画像処理により得られた差画像や三次元画像を用いて亀裂の微視的観察を行った．その結果，新規混合物と再生混合物では，曲げ疲労試験においてひび割れの発生メカニズムが以下のように異なることが分かった．なお実際の供用条件とは異なり，水浸入や酸素，紫外線の影響をほとんど受けていない，室内で作製した限られた供試体の観測だけで一般的な結論を導くことはできないが，少なくとも本観測に関する限り以下のような考察を得ることができる．

- ・ 三種の亀裂の生じた箇所が確認でき，それらの要因を考察した．なお，新規および再生混合物ではともに，アスファルトモルタルの内部，骨材の内部，アスファルトと骨材の境界において亀裂が確認された．
- ・ 再生混合物は，繰返し載荷初期からの亀裂発生に伴う剛性低下により延性的に応力が低下するのに対し，新規混合物は亀裂発生が少なく剛性低下しにくいいため脆性的に応力が低下する可能性が示唆された．

- ・ 再生骨材の周囲に付着した旧アスファルトにより、周囲のアスファルトとの接着が弱まっている可能性のある個所が観察された。
- ・ 新規混合物と再生混合物の破壊起点の要因における違いを考察した。なお、前者は剥離や骨材のひび割れ、後者はそれに加え再生骨材周囲の空隙や面状の空隙の形成が要因であると考察した。
- ・ アスファルト混合物の亀裂の微視的観察に、本研究で提案した、位置合わせ、アーチファクト補正を施したX線CT画像による差画像が有効であることを示した。

本研究では、従来の混合物の違いによる劣化挙動の差に関する知見を微視的な観点から裏付けることができたと言える。しかし、新規混合物と再生混合物の劣化および破壊のプロセスや要因、つまりアスファルト混合物の劣化メカニズムまでを明らかにするには至らなかった。

本研究で用いたCT画像では新旧アスファルトの識別は困難であり、造影剤の混合などの供試体作製時の工夫に加え、高解像度画像の取得が必要であることが示された。また、本研究で使用したCT画像の分解能は約 $60\mu\text{m}$ であったが、疲労試験により発生した亀裂はそれよりも微細であり、二値化によって空隙相として抽出することは困難であった。より正確な亀裂抽出には、 $1\mu\text{m}$ 程度の分解能を有する大型放射光施設SPRING-8を利用した高解像度撮影が有効であると考えられる。さらに、画像処理における位置合わせや二値化には一定の誤差が含まれており、今後の精度向上にはフィルタ処理の適用や高解像度画像の活用が望まれる。本研究では破壊前後の供試体のみを撮影したが、亀裂発生・進展メカニズムをより詳細に解明するためには、載荷途中の段階的な撮影が有効である。今後は段階載荷試験とX線CT観察を組み合わせることで、亀裂進展挙動の理解をさらに深めたい。また、再生混合物においては亀裂進展に再生骨材表面の旧アスファルトが影響している可能性が示唆されたが、あくまで今回確認された骨材の周囲を取り囲む亀裂は一箇所のみであり、この仮説を立証するのは今後の課題とする。位置合わせ、差画像などの画像処理は長時間を要するものであり本検討ではケースを絞る必要があったが、今後他のケースの画像解析を実施し、本検討との比較をすることでより有用な結果を得ることができると考える。

本研究で得られた知見に基づくと、再生混合物の亀裂発生、進展を抑止するためには、アスファルトと再生骨材の周囲に付着した旧アスファルトの界面における剥離を抑制することが重要と考えられる。新材料開発の可能性として、使用アスファルトとの化学的結合の強い骨材表面のコーティング剤、旧アスファルトと新アスファルトの混合がより均一となる再生用添加剤の開発が期待される。最後に、本研究は室内作製の供試体観察にとどま

ったが、将来的には実際に供用されたアスファルト舗装を対象としたX線CT撮影を行い、現状と照合することで、実務的課題に即した研究の発展が期待される。

謝辞：本研究を行うにあたり、大成ロテック（株）相川宗様をはじめとする、大成ロテック（株）各位には供試体の作製および曲げ疲労試験の実施をしていただいた。ここに感謝の意を表する。

REFERENCES

- 1) 国土交通省：舗装点検要領, p.6, 2017. [Ministry of Land, Infrastructure and Transport : *Hosotenkenyoryo*, p.6, 2017]
- 2) 日本道路協会：舗装再生便覧 令和 6 年版, pp.7-43, 2024. [Japan Road Association : *Hososaiseibinran Reiwa 6nenban*, pp.7-43, 2024]
- 3) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集 E1, Vol. 71, No. 3, I_93-I_101, 2015. [Takahashi, T. Ono, Y. Sato, M. : Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers E1*, Vol. 71, No.3, I_93-I_101, 2015.]
- 4) 瀬尾彰, 上杉健太郎, 竹末直樹, 小林潔司：大型放射光施設SPRING-8を用いたX線CT像によるアスファルト混合物の微視的計測および損傷メカニズムの考察, 土木学会論文集, Vol. 80, No.21, 2024. [Seo, A. Uesugi, K. Takesue, N. Kobayashi, K. : Elucidation of degradation mechanisms of asphalt mixtures through physical property measurements by using Spring-8 X-ray CT, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.80, No.21, 2024.]
- 5) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人日本アスファルト合材協会：アスファルト混合物の持続的循環を目指した再生利用に関する共同研究, 共同研究報告書 第 590 号, 2024. [Public Works Research Institute (PWRI). & Japan Asphalt Pavement Industry Association (JAPIA) : Collaborative Research Report on Sustainable Recycling Aimed at the Continuous Circulation of Asphalt Mixture (Joint Research Report No. 590), 2024.]
- 6) Kido, R. Higo, Y. Takamura, F. Morishita, R. Khaddour, G. and Salager, S. : Morphological transitions for pore water and pore air during drying and wetting processes in partially saturated sand, *Acta Geotechnica* Vol. 15, pp. 1745–1761, 2020.
- 7) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧（平成 31 年版）, Vol. 3, pp. 168-179, 2019. [Japan Road Association : *Hoso Chosa & Shiken-ho Binran (Heisei 31nenban)*, Vol. 3, pp. 168-179, 2019.]
- 8) 末原俊史, 安藤政浩, 川上篤史, 川島陽子, 亀山修一：再生骨材の低針入度を踏まえた再生アスファルト混合物の新たな評価方法と品質向上対策に関する研究, 道路建設 (787), pp.96-102, 2021. [Suchara, T. Ando, M. Kawakami, A. Kawashima, Y. Kameyama, S. : Evaluation and Quality Enhancement of Recycled Asphalt Mixtures Considering the Low Penetration of Recycled

MICROSCOPIC OBSERVATION OF DEGRADATION BEHAVIOR IN RECYCLED ASPHALT MIXTURES UNDER BENDING FATIGUE TESTING

Hibiki NAKAJIMA, Yosuke HIGO, Shizuka ESHIRO, Akira SEO and Masashige AOKI

In contemporary asphalt pavement maintenance, corrective interventions are generally undertaken after the progression of damage, with the extent of deterioration determining the timing and type of repair. Nevertheless, the fundamental mechanical properties of asphalt mixtures and the underlying mechanisms of degradation, particularly cracking, remain insufficiently understood. The present study aims to elucidate the mechanisms governing crack initiation and propagation in asphalt mixtures. To achieve this, bending fatigue tests in combination with X-ray micro-computed tomography (micro-CT) imaging were performed on specimens of both virgin and recycled asphalt mixtures. The CT datasets were subsequently subjected to image processing techniques, allowing for detailed microscopic observation of crack development within the mixture specimens. The experimental results demonstrated that cracks emerged in three characteristic locations in both virgin and recycled mixtures following fatigue loading. Moreover, distinct differences were identified in the patterns of crack formation surrounding aggregate particles, indicating a potential influence of material composition on fracture behavior. This paper provides an interpretation of the factors and mechanisms underlying these microscopic observations and further discusses the validity and effectiveness of the applied image-processing methodology for analyzing microstructural damage in asphalt mixtures.