

特集：土木材料の信頼性向上に向けて

X線CTスキャナを用いたアスファルト混合物内部の品質評価手法の開発

谷口 聡* 西崎 到** 大谷 順***

1. はじめに

現在、X線CT(Computed Tomography)スキャナは医療用のみならず、金属、自動車、航空、電気・電子等に関わる材料や製品の非破壊検査等に使用されている。土木材料においても品質評価や破壊メカニズムの解明等を行う有効な手段として期待される。

土木研究所では熊本大学と連携してアスファルト混合物のX線CTによる評価研究を実施している。今回、アスファルト量及び混合物種類の異なるマーシャル安定度試験用供試体を用いてX線CTによる品質評価の研究を実施した。CT画像によるアスファルト混合物内の状況の把握及びCT値を用いた品質評価を実施した結果について報告する。

2. X線CT

2.1 X線CTの原理

本研究で用いた産業用X線CTスキャナ(写真-1)は医療用とは異なり、X線発生器及び検出器が固定され、供試体が回転する機構となっている(図-1)¹⁾。X線CTの原理は、様々な方向から「影絵」を測定し、PCでデジタル処理を施すことにより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)を連立方程式で解き、それを画像の濃淡で表示する。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小さい傾向があるため、CT画像の濃淡は供試体の密度の違いを表すことができる。

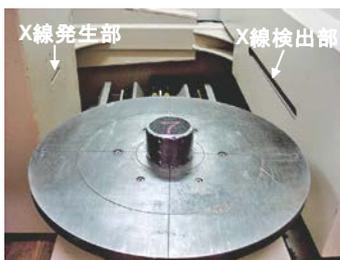


写真-1 X線CTスキャナ (熊本大学)

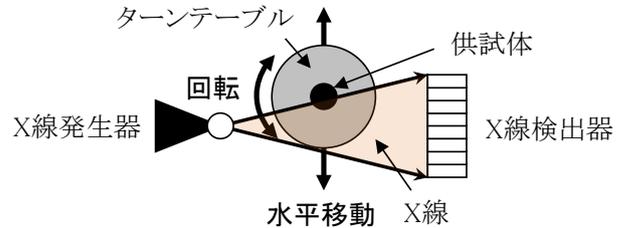


図-1 X線CTの原理

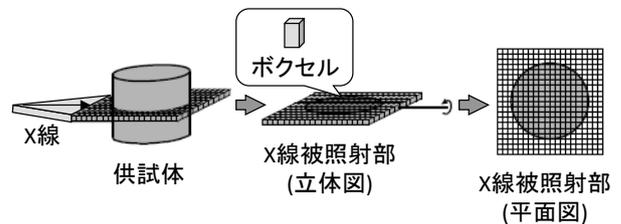


図-2 ボクセルの概念

2.2 ボクセル

図-2に示すようにCT画像を構成する最小要素は「ボクセル」と呼ばれる²⁾。これは、2次元画像におけるピクセルにX線ビーム厚を加えたものである。ボクセルはピクセルと同様、画像の濃淡等を示す情報を持っている。

2.3 CT値

式(1)で示されるCT値はボクセルが持つ画像の濃淡等の情報を数値化したものである¹⁾。CT値は密度の高い材料ほど大きく、密度の低い材料ほど小さくなる傾向がある。

$$CT値 = K \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 μ : X線吸収係数、 μ_w : 水のX線吸収係数、 K : 定数(通常、 $K=1,000$)

アスファルト混合物のCT値は、X線の吸収をもとに算出され、吸収量は骨材、アスファルト+石粉、空隙の構成比によって変化する³⁾。すなわち、骨材の量が多ければX線の吸収は大きく、CT値も大きくなり、空隙の量が多ければX線の吸収量は小さく、CT値も小さくなる。

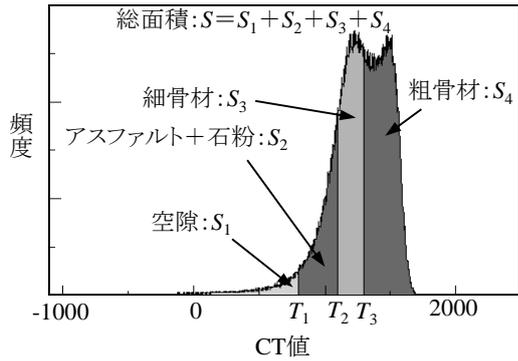


図-3 アスファルト混合物におけるPタイル法の概念

表-1 実験計画表

混合物の種類	アスファルトの種類	アスファルト量(%)				
		4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
密粒度	ストアス	①	②	③	④	⑤
粗粒度	ストアス		⑥			
ポーラス	PMA H		⑦			

①～⑦：実験番号

密粒度：密粒度アスファルト混合物

粗粒度：粗粒度アスファルト混合物

ポーラス：ポーラスアスファルト混合物

ストアス：ストレートアスファルト

PMA H：ポリマー改質アスファルトH型

2.4 しきい値

アスファルト混合物の出力画像から素材の構成を特定するためには、CT値のしきい値を設定する必要がある。今回のアスファルト混合物のX線CT撮影においては、各素材の体積率が既知であるためPタイル法⁴⁾を用いた。

図-3は典型的な密粒度アスファルト混合物のヒストグラムである。Pタイル法は図-3中の混合物の空隙、アスファルト+石粉、細骨材、粗骨材の面積比率($S_1/S \sim S_4/S$)と、撮影されたアスファルト混合物供試体の空隙、アスファルト+石粉、細骨材、粗骨材の体積比率が同じになるようにしきい値を決定する方法である。具体的な計算手法については谷口らの文献³⁾を参照されたい。

3. アスファルト混合物

今回の試験では、表-1に示す実験計画表に基づき、密粒度アスファルト混合物(以下、密粒度)、粗粒度アスファルト混合物(以下、粗粒度)、ポーラスアスファルト混合物(以下、ポーラス)について実施した。今回用いたアスファルトの性状を表-2に、混合物の空隙、アスファルト+石粉、細骨材及び粗骨材の体積率と密度を表-3に示す。

表-2 アスファルトの性状

	ストアス	PMA H
15°C密度(g/cm ³)	1.041	1.024
25°C針入度(0.1mm)	65	66
軟化点(°C)	47.6	89.2
60°C粘度(Pa·s)	1.94x10 ²	1.42x10 ⁵
180°C動粘度(mm ² /s)	71	542

表-3 アスファルト混合物の体積率と密度

No.	体積率(%)				密度(g/cm ³)
	空隙	アスファルト+石粉	細骨材	粗骨材	
①	6.5	14.1	32.2	47.2	2.349
②	5.6	15.3	32.1	47.0	2.360
③	4.0	16.6	32.2	47.2	2.388
④	3.6	18.0	32.3	47.1	2.393
⑤	1.9	19.0	32.1	47.0	2.398
⑥	4.8	15.4	19.3	60.5	2.381
⑦	18.8	13.2	7.7	60.3	2.024

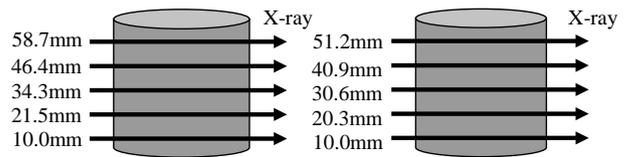


図-4 X線照射位置

4. X線CT撮影

供試体は円柱状であり、直径はマーシャル安定度試験用のものと同じ101.6mm、高さは密粒度、粗粒度が68.7mm、ポーラスが61.2mmであった。

X線CT撮影はX線管電圧300kV、ビーム厚1mm、ボクセルサイズ0.073×0.073×1mm³で実施した。また、X線照射位置は図-4のとおり設定した。

なお、供試体の撮影は初めにアスファルト量を変化させた供試体No.①～⑤について実施し、次にアスファルト量が5%のNo.②、⑥、⑦の二度に分けて実施した。

5. 結果と考察

中央断面(密粒度及び粗粒度=34.3mm, ポーラス=30.6mm)のCT画像を図-5に示す。CT画像はアスファルト混合物内部の骨材の形状や空隙の分布を鮮明に表すことができる。また、アスファルト量が増加するにしたがって空隙(色の濃い部分)が減少する様子や、混合物の種類の違いを鮮明に表すことができる。

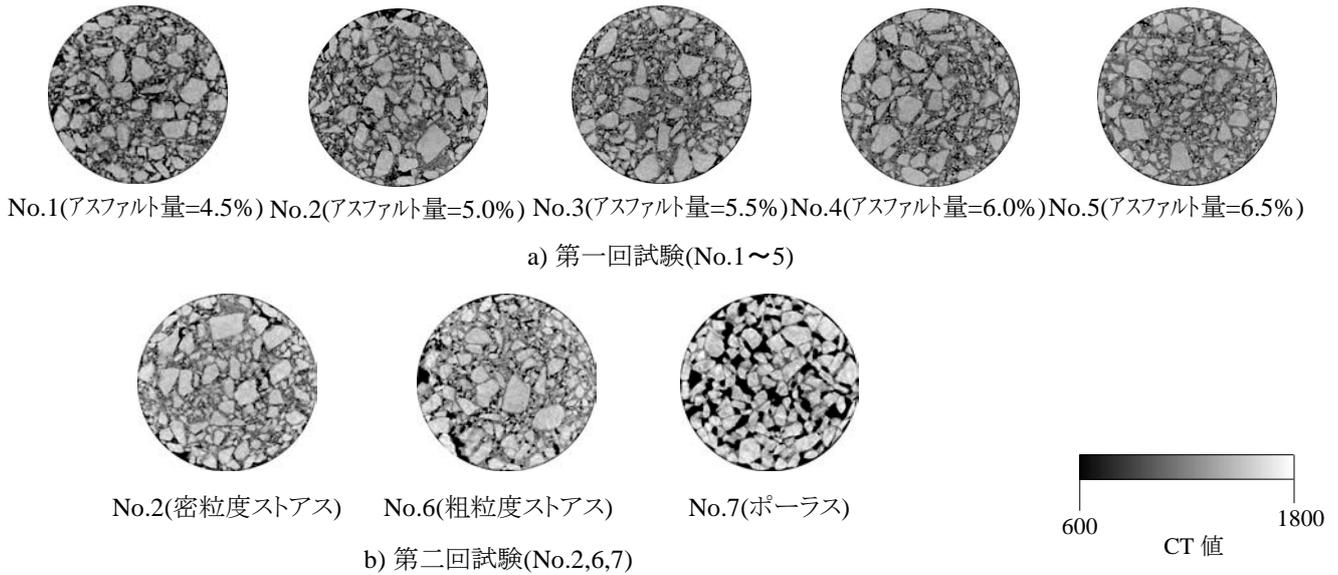


図-5 CT画像(中央断面)

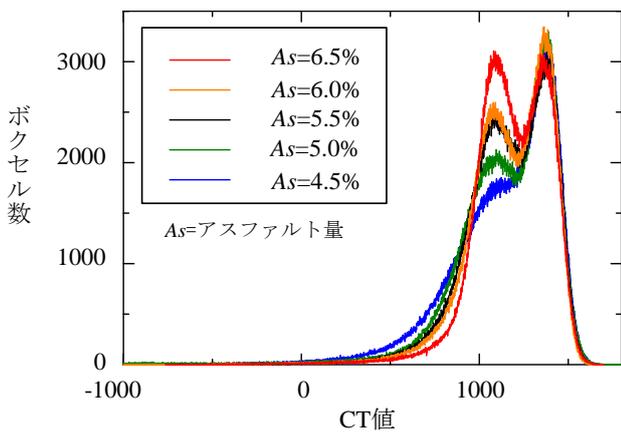


図-6 アスファルト量が増加した場合のCT値ヒストグラム(5断面平均)

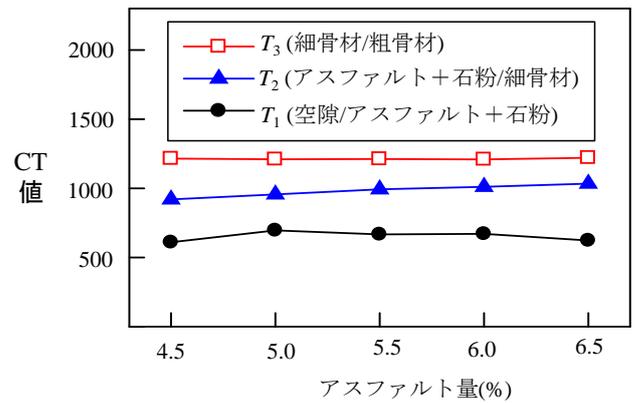


図-7 アスファルト量が増加した場合のしきい値(5断面平均)

5.1 アスファルト量の変化

アスファルト量が増加した場合の5断面平均CT値のヒストグラムを図-6に示す。これより、アスファルト量の増加に伴って双峰性が明確に現れることが確認できる。また、アスファルト量の増加に伴って、CT値が約1,000より小さい部分のボクセル数が少なく、CT値が1,000より大きい部分のボクセル数が増える傾向にある。

2.4により計算されたアスファルト量が増加した場合の5断面平均しきい値を図-7に示す。しきい値1(T_1)はアスファルト量5.0%にピークに達し、しきい値2(T_2)はアスファルト量の増加とともに増加する傾向があり、しきい値3(T_3)はアスファルト量が増加してもほとんど一定である。

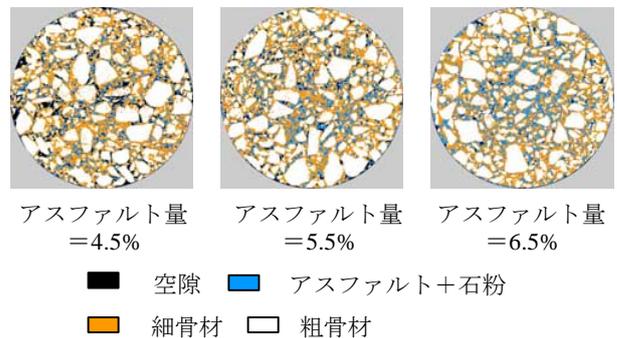


図-8 アスファルト量が増加した場合の四値化画像(中央断面)

図-8は図-7のしきい値をもとに作成した中央断面の四値化画像である。この画像から、アスファルト量の増加に伴って空隙の領域が減少し、アスファルト+石粉の領域が増加することがわかる。

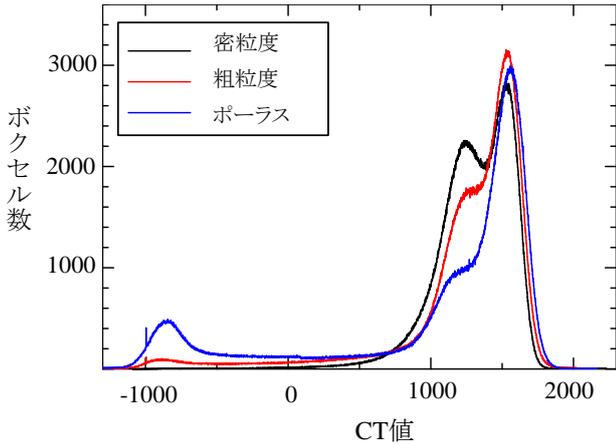


図-9 混合物の種類が変化した場合のCT値ヒストグラム

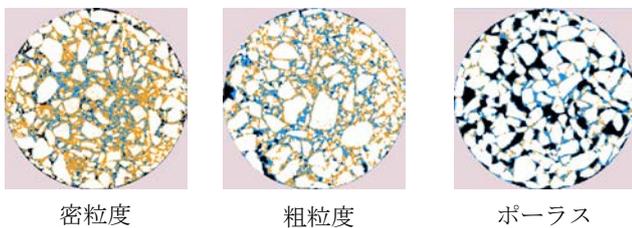


図-10 混合物の種類が変化した場合の四値化画像

5.2 混合物の種類の変化

混合物の種類が変化した場合の5断面平均CT値のヒストグラムを図-9に示す。密粒度の場合とは異なり、粗粒度、ポーラス共に-1,000~-800付近でピークが発生しており、空隙の影響が顕著に出たものと考えられる。また、密粒度にあった双峰性が、粗粒度、ポーラスに行くにしたがってCT値が1,200付近、すなわち細骨材のピークが崩れる傾向がある。

混合物の種類が変化した場合の中央断面における四値化画像を図-10に示す。密粒度は小さな空隙が点在している一方、粗粒度は所々に大きな空隙が存在している。ポーラスは細骨材がほとんどなく、粗骨材がアスファルトによって結合されている様子がわかる。

6. まとめ

X線CT撮影により得られたCT画像および四値化画像は空隙、アスファルト、骨材の分布を表現できることがわかった。また、CT値ヒストグラムは、混合物の特性を顕著に表すことができた。X線CTはアスファルト混合物の品質評価に非常に有効な手段であると考えられる。今後は、プラントコアと現場コアの比較等、現場におけるアスファルト混合物の品質評価の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 大谷順、尾原祐三、菅原勝彦、椋木俊文：地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用、土と基礎、第48巻、第2号、pp.17~20、2000.
- 2) 菊池喜昭、水谷崇亮、永留健、島俊郎：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.
- 3) 谷口聡、小川慧一郎、大谷順、西崎到：X線CTを用いたアスファルト舗装材料の定量的評価に関する研究、土木学会論文集E1（舗装工学）、第67巻、第3号、2011.
- 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

谷口 聡*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料資源研究グループ
新材料チーム 主任研究員
Satoshi TANIGUCHI

西崎 到**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所材料資源研究グループ
新材料チーム 上席研究員、
博(工)
Dr. Itaru NISHIZAKI

大谷 順***



熊本大学大学院自然科学研究科
社会環境工学専攻、Ph.D、教授
Prof. Jun OTANI