

# 論文 X線透過デジタル画像の2層明度分析によるコンクリート製遮蔽容器のX線遮蔽性能の評価

橘高 義典<sup>\*1</sup>・小川 洋二<sup>\*2</sup>・横室 隆<sup>\*3</sup>・井川 秀樹<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート製遮蔽容器について、X線照射装置により得られる透過画像を明度データに変換しX線の線減弱係数の分布を求めX線遮蔽性能を把握するとともに、材料条件および打込み条件による影響を明らかにした。コンクリート内部に埋込まれたX線遮蔽率が既知の鉄筋部分の明度とコンクリート部分の2層部分の明度からコンクリート部分の線減弱係数の推定方法を提案した。普通コンクリートの試験体では骨材の分離の影響で上方ほど線減弱係数は小さくなり、金属スラグ系重量骨材を用いた不分離型の重量コンクリートの試験体では線減弱係数は均一かつ大きくなった。

**キーワード:** X線, 遮蔽性, 2層明度分析, 線減弱係数, 重量コンクリート, ボックスカルバート

## 1. はじめに

放射性物質の影響を受けた廃棄物や土壌などの長期の保管には遮蔽性能の高いコンクリート製容器を用いる必要がある。放射線の中でも問題となるガンマ線（以下、X線）に対するコンクリートの遮蔽性能を高めるためには、コンクリートの密度を高める必要がある。一方で、骨材の密度が高くなることで骨材が分離し、X線の遮蔽性能の低下も想定される。従って、材料不分離性の高い重量コンクリートの適用が必要である。

X線に対する材料の遮蔽率は、たとえばX線源を用いて対象材料のX線の透過量を線量計により計測する方法がある<sup>1)</sup>。X線源として放射性物質を用いる場合は危険が伴い現場での適用が難しい。また、線量計による鉄筋コンクリートの遮蔽率の計測では、コンクリート部、鉄筋部、欠陥部など、遮蔽率の分布を正確に評価することが難しい。さらに遮蔽率を算定するためには、線源の放射線量と材料の透過後の放射線量を評価する必要があるが、それらは同時に計測できないため、通常は、線源の放射線量を照射時間等から推定するためバラツキが大きくなる。そこで遮蔽率が既知の校正板などを同時に写し込みそれとの比較で評価を行うことが有効であるが、大型の鉄筋コンクリート部材の評価では校正板の写し込みが困難という問題がある。

本研究では、光電管方式のX線源の照射装置を用い、放射線の透過を明度分布の2次元画像としてとらえることで<sup>2)</sup>、遮蔽率の分布を詳細評価する。また、実機大型試験体に対する新たな評価方法として、鉄筋とコンクリートをX線画像に同時に写し込み、遮蔽率が既知の鉄筋を校正用材料として利用し、コンクリート部分の遮蔽率

を評価する手法を提案する。さらに、本手法を用いて実大コンクリート容器のX線遮蔽率の高さ方向の分布に及ぼす材料及び打込み方法の影響を把握する。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と調合

本研究で使用したコンクリートの材料を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。密度の高い試験体の重量骨材として、細骨材には酸化鉄粉を、粗骨材には鉄分を多く含むダストと還元スラグを混合溶解し、破碎、粒度調整したものを用いた。調合条件を表-2に示す。コンクリートの目標とする密度（乾燥単位容積質量）は3.2t/m<sup>3</sup>以上とし、設計基準強度は50N/mm<sup>2</sup>とした。材料分離抵抗性を高めるとともに、物質移動抵抗性と自己治癒機能が期待できるエトリンサイト系膨張材<sup>3)</sup>を混和材としてセメントの外割で使用した。比較のため、呼び強度18N/mm<sup>2</sup>、スランブ21cmの普通コンクリート（18-21-20-N）も用いた。

表-1 使用したコンクリートの材料

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.65%, 粗粒率2.85
	S2	DSM骨材0-5, 表乾密度4.20g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.67%, 粗粒率3.83 主成分Fe2O3:49.7%, SD <sub>2</sub> :12.2%, CaO:10.9%
粗骨材	G1	砕石2005, 表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.32%, 粗粒率6.62
	G2	DSM骨材20-05, 表乾密度4.29g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.70%, 粗粒率6.52 主成分Fe2O3:49.7%, SD <sub>2</sub> :12.2%, CaO:10.9%
膨張材	EXP	エトリンサイト系, 密度3.01g/cm <sup>3</sup>
AE減水剤	SP1	リグニルスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
高性能減水剤	SP2	コンクリート製品用ポリカルボン酸系

\*1 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科教授 工博（正会員）

\*2 日本ヒューム株式会社 技術研究所 課長 博士（工）（正会員）

\*3 足利工業大学 工学部建築学科 教授 博士（工）（正会員）

\*4 日本ヒューム株式会社 技術研究所 所長（正会員）

表-2 調査条件

配合No.	スラブ・スラン プロ- cm	水粉体比 W/P %	細骨材率 s/a %	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )										
				水		セメント		細骨材		粗骨材		膨張材 EXP	混和剤	
				W	C	S1	S2	G1	G2	SP1	SP2			
1, 2	50±5.0	28.2	52.0	144	450	/	1417	/	1336	60	/	7.14		
3	21±2.5	69.4	52.5	193	278	924	/	864	/	/	3.89	/		

2.2 試験体の概要

コンクリート製容器（ボックスカルバート）の概要を図-1に示す。外殻部の長辺1800mm，短辺1500mm，奥ゆき1500mmで，頂版・底版，および側壁の版厚はいずれも150mmである。主鉄筋にはSD295A, D10を115mm間隔で，また配力鉄筋にはSD295A, D10を2段で配筋した。内容積は約2.7m<sup>3</sup>である。コンクリートは実機プラント（パン型ミキサ，容量0.75m<sup>3</sup>）で製造し，1バッチ0.45m<sup>3</sup>として2バッチ連続で混練した。練り上がったコンクリートは移動式ホップにより移送し，型枠上面からコンクリートを流し込んだ。

コンクリートは2層で打込み，1層ごとに型枠振動機（振動数5000rpm）により所定の振動を与えて締め固めた。NO.1試験体は，振動時間2分を2層にそれぞれ与えて成型した。試験体No.2では，1層目に4分，2層目に20分の振動を与え，過振動条件で成型した。No.3は下層では2分，上層では1分間，それぞれ振動を与えて成型した。打込み後は型枠全体をビニルシートで覆い3日後の脱型までシート内養生した。脱型後，実験棟内に製品を移送して静置し，室内気中養生状態を経て各種試験に供した。

硬化後側壁部からコア供試体を採取した。コアは，直

径は45mmとし，長さは直径の約2倍となるよう両端をカットして調整し，端面を平滑にしたのち，JIS A 1107に準拠して圧縮強度試験を実施した。また，プラントで採取した管理用コンクリートは，φ100×L200mmのテストピースに詰め，外圧試験時にJIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を実施した。

2.3 X線デジタル画像の撮影

(1) X線照射装置の概要

本研究で用いた携帯型のX線撮影装置（RF-200SPS）の外観を写真-1に示す。X線発生装置からコーンビーム状のX線が供試体に向けて照射され，試験体からのX線像を10×12インチサイズのイメージングプレート（以下，IP）に露光して蓄積し，それを専用の読取装置（CR-1012，以下，CR）にてレーザー光をIPに照射することでIPか



写真-1 携帯型 X線撮影装置

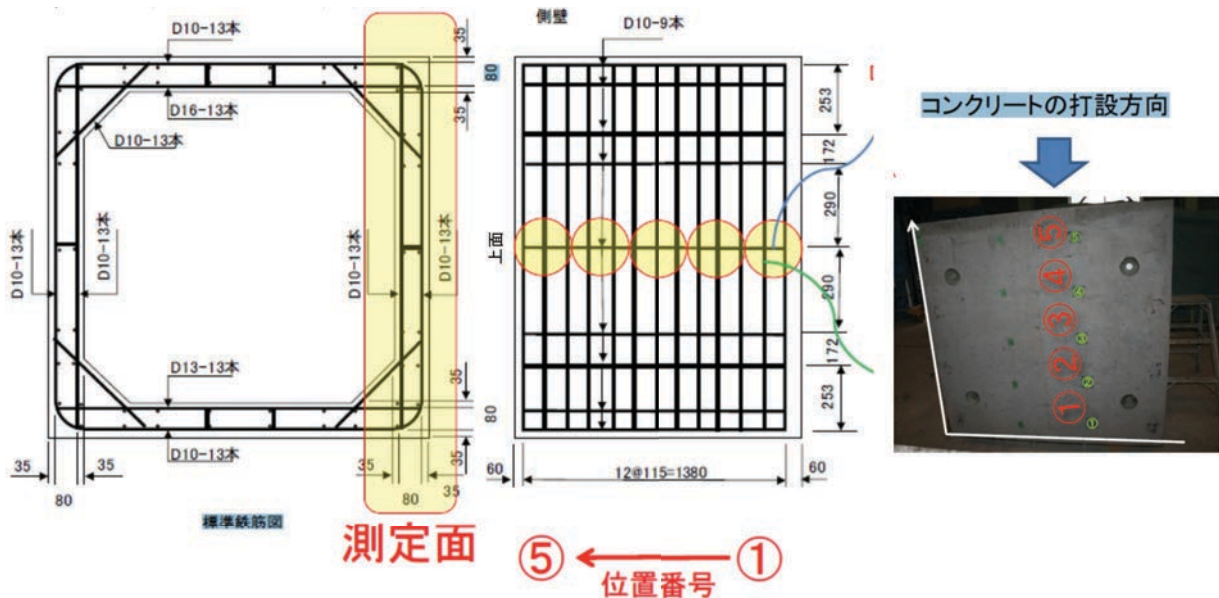


図-1 コンクリート製容器の概要

ら露光量に応じた輝尽性蛍光を発生し、その光を光電子倍增管で検出し、光変換素子を用いて電気信号に変換する。CRに入力された電気信号はコンピュータに明度 65536 階調 (16bit) の 2 次元画像データとして取り込まれる。その後 255 階調の明度  $L$  に線形変換する。被写体による X 線の後方散乱を最小にするために、IP の裏に鉛板を使用。X 線撮影装置の仕様は、最大 X 線管電圧 200kV、最大出力 600W である。

試験体への X 線照射は電圧 200kV で電流 3mA、照射時間は 18 秒とし、1 体の供試体につきそれぞれ 5 回 (18 秒×5 箇所) の X 線撮影を行う。また、画像の分解能に影響する X 線発生器の焦点寸法は 2.0mm×2.0mm である。試験体での測定位置は図-1 に示すとおりで、試験体の下端から 150mm の位置を中心に上方に 300mm 間隔で計 5 点計測した。

## 2.4 2 層明度分析によるコンクリート遮蔽率の評価方法

X 線が物質を透過したときの減衰には、狭い平行線束の単一エネルギーの光子の物質中での減衰を表す (1) 式が適用できる<sup>4)</sup>。

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_c \cdot x) \quad (1)$$

ただし、 $I_0(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  は入射光子のフルエンス率、 $I(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  は物質を通過した光子のフルエンス率、 $x(\text{mm})$  は材料の厚さ、 $\mu(\text{mm}^{-1})$  は物質の光子に対する線減弱係数である。光子フルエンスとはある場所を通過する単位面積、単位時間当たりの放射線光子数である。また、X 線の遮蔽率  $S(\%)$  は (2) 式で評価できる。

$$S = (1 - I / I_0) \times 100 \quad (2)$$

図-2 に鉄筋コンクリートなどの 2 層の材料の X 線透過の概念図を示す。

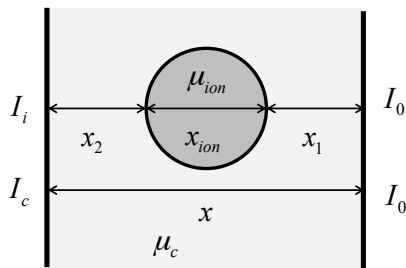


図-2 鉄筋コンクリート 2 層材料の X 線透過模式図

X 線透過に直進性を仮定すると  $I_0$  と  $I_i$  および  $I_c$  の関係は (3) 式、(4) 式ようになる。ただし、 $x_{ion}(\text{mm})$  は鉄筋の径、 $\mu_c(\text{mm}^{-1})$  はコンクリートの線減弱係数、 $\mu_{ion}(\text{mm}^{-1})$  は鉄筋の線減弱係数である。

$$I_c = I_0 \cdot \exp(-\mu_c \cdot x) \quad (3)$$

$$I_i = I_0 \cdot \exp(-\mu_{ion} \cdot x_{ion} - \mu_c \cdot (x - x_{ion})) \quad (4)$$

(3) 式、(4) 式より  $I_0$  を消去すると、(5) 式が得られる。

$$\frac{I_i}{I_c} = \exp(x_{ion}(\mu_c - \mu_{ion})) \quad (5)$$

すなわち、鉄筋の径  $x_{ion}$  および線減弱係数  $\mu_c$  が既知の場合は、コンクリート部および鉄筋コンクリート部の透過 X 線の強度の比  $I_i/I_c$  から、コンクリートの線減弱係数  $\mu_c$  が (6) 式のとおり求められる。

$$\mu_c = \mu_{ion} + \frac{1}{x_{ion}} \ln(I_i / I_c) \quad (6)$$

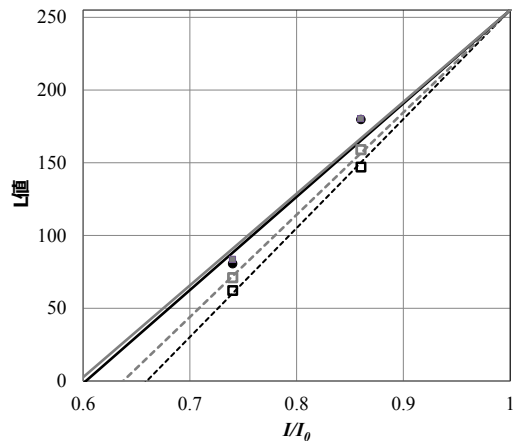


図-3 X 線の透過率  $I/I_0$  と  $L$  値との関係

今回の測定では、X 線の透過度は明度  $L$  により評価している。図-3 は既往の研究<sup>2)</sup>で求めた、鉄板 (板厚さ 2 種類  $x=1, 2, \text{mm}$ ) の X 線の遮蔽率 (X 線管電圧 180keV) と  $L$  値との関係である。 $I/I_0$  が約 0.74~1.0 の範囲で線形性があると考えられ、その範囲に対応する、 $L$  値が 100 以上で両者には線形関係があると仮定し (8) 式を得る。

$$\frac{I}{I_0} = \alpha L \quad (8)$$

今回の測定結果においても各測定時において (9) 式のとおり同様の線形性を仮定することで、X 線画像における鉄筋コンクリート部の明度  $L_i$  およびコンクリート部の明度  $L_c$  と X 線強度との関係は式 (10) となる。

$$\frac{I_c}{I_0} = \alpha L_c, \quad \frac{I_i}{I_0} = \alpha L_i \quad (9)$$

$$\frac{I_i}{I_c} = \frac{L_i}{L_c} \quad (10)$$

本式より(6)式のコンクリートの線減弱係数  $\mu_c$  は下記のとおりとなる。

$$\mu_c = \mu_{ion} + \frac{1}{x_{ion}} \ln(L_i / L_c), \quad 100 \leq L \leq 255 \quad (11)$$

従って、鉄筋コンクリート部の X 線画像から、線減弱係数が既知の鉄筋コンクリート部の明度  $L_i$  およびコンクリート部の明度  $L_c$  の 2 層の明度を式(11)に代入することで、試験体のコンクリート部の線減弱係数を求めることができる。

なお、文献<sup>5)</sup>より今回の X 線管電圧 200kV での鉄筋の線減弱係数は  $0.115\text{mm}^{-1}$  とした。また、試験体の厚さ  $x$  は 150mm、鉄筋径  $x_{ion}$  は 10mm、である。

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの性質

表-3 にフレッシュコンクリートの性質を示す。試験体 No. 1 および No. 2 が重量コンクリート、No. 3 が普通コンク

表-3 フレッシュコンクリートの性質

試験体 No.	気温 °C	コンクリート 温度 °C	スランプまたは スランプフロー (cm)	Air %	単位容積重量 g/cm <sup>3</sup>
1	17.8	29.6	42.0×44.0	1.6	3.49
2	17.6	26.6	41.5×40.0	1.0	3.51
3	20.6	27.7	19.5	3.5	2.30

表-4 圧縮強度

試験体下端からの位置 (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
	No. 1	No. 2	No. 3
150	110.6	106.6	25.8
450	—	110.2	28.9
750	112.9	106.0	30.1
1050	—	115.0	26.2
1350	105.8	113.5	26.1

表-5 見かけの密度

試験体下端からの位置 (mm)	密度 (ton/m <sup>3</sup> )		
	No. 1	No. 2	No. 3
150	3.60	3.87	2.38
450	—	3.86	2.33
750	3.61	3.67	2.23
1050	—	3.62	2.14
1350	3.49	2.85	2.05

リートである。各調合条件で設定した密度とほぼ近似する密度が得られた。表-4 にコア採取位置と圧縮強度の変化を示す。重量コンクリートでは、No. 1、No. 2 共に設計基準強度より大きな圧縮強度が得られた。高さ方向の差異は少なく過振動条件が圧縮強度に及ぼす影響は小さかった。No. 3 では、打ち込み高さにより最大 10% 程度の変動を生じており変動幅が大きくなった。

表-5 にコア採取位置と見かけ密度の変化を示す。No. 1 では採取位置による変化はほとんどない。他方、No. 2 では最表層部で顕著な見かけ密度の低下が見られた。コアの外観観察から、粗骨材の沈降分離が最表層部では顕著であった。また、No. 3 でも打ち込み面に近いほど直線的に見かけ密度は減少していた。これらの結果から、コアの圧縮強度と見かけ密度とは必ずしも一致した傾向は示さないといえる（以降、密度は硬化コンクリートの密度とする）。

#### 3.2 X 線撮影結果および L 値の分布

写真-2 に、各試験体の下端からの高さ別の X 線透過画像を示す。No. 1 および No. 2 の不分離性重量試験体では、No. 3 の普通コンクリートと比較すると全体的に明度が低い。No. 1 および No. 2 では粗骨材、細骨材とも重量骨材を用いているため遮蔽性能が高く明度が低くなったと考えられる。このように、X 線透過画像を用いることにより構成材料の遮蔽性能を視覚的に捉えることが可能である。また X 線画像に線上の鉄筋が確認できる。鉄筋は同一深さのコンクリート部分よりも遮蔽性能が高いため明度が低く撮影される。特に No. 3 ではコンクリート部分の遮蔽性が鉄筋コンクリート部よりも相対的に低いため、コンクリート部が鉄筋コンクリート部よりも明るくなり鉄筋が明確に認識できる。高さ方向には明確な傾向は見られない。No. 1 および No. 2 では全体の明度が低いものが不規則に見られる。このことは、X 線画像の明度は X 線の照射強度のバラツキにも影響されるため、画像全体の明度だけではなく、鉄筋コンクリート部との差で考察する必要があることを示唆する。

図-4 には写真-2 で得られた試験体の L 値の測定結果のヒストグラムを示す。No. 3 の試験体では No. 1 および No. 2 に比べて L 値は一樣に高く、遮蔽率が低いことがわかる。また、L 値の分布には L 値が 210 前後と 240 前後に 2 つのピークが現れており、前者は遮蔽率の小さなコンクリート部分、後者は遮蔽率の大きな鉄筋コンクリート部分と考えられる。No. 1 および No. 2 の試験体においては 2 つのピークは明確にはみられない。また L 値の標準偏差も小さくバラツキが少ない。これはコンクリート部分の遮蔽率が大きく鉄筋コンクリート部分の遮蔽率との差が小さいためである。したがって No. 1 および No. 2 の試験体では、ヒストグラムのみから鉄筋コンクリ

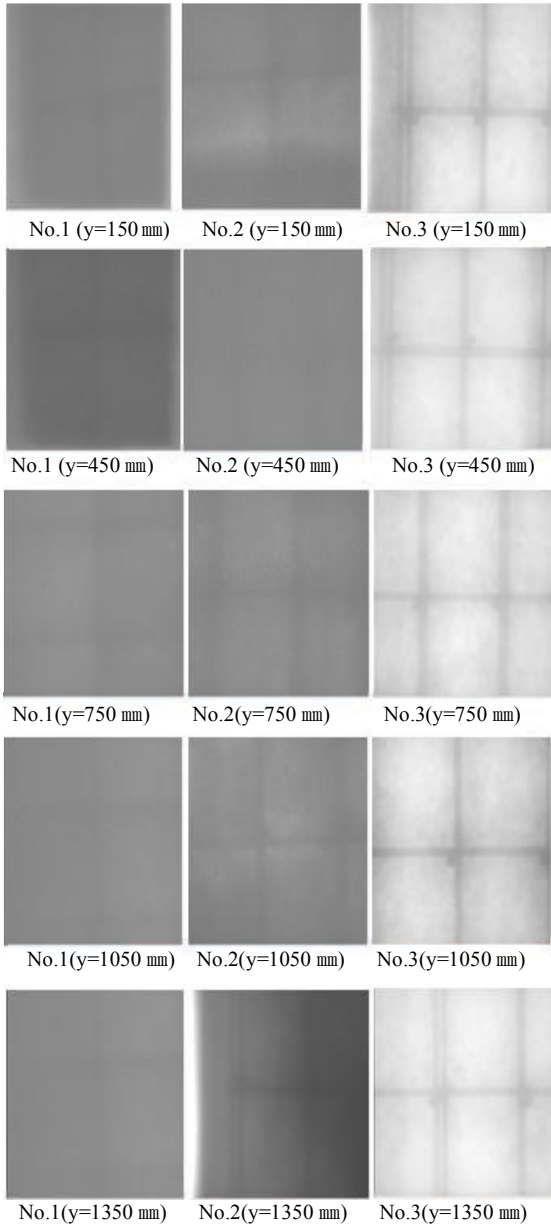


写真-2 試験体の X 線画像 (y=下端からの距離)

ト部分の  $L$  値を抽出することは難しい。下端からの距離とヒストグラムの特徴に関しては明確な傾向は見られなかった。

$L$  値の分布画像より、コンクリート部分の平均  $L$  値、鉄筋コンクリート部分中心部の平均  $L$  値を求め、式(11)に代入し、コンクリート部分の線減弱係数を求めた。なお、図-4 の  $L$  値のヒストグラムより、 $L$  値は 100 以上となっており、式(11)に示す適用範囲内であることより計算は有効となった。図-5 には、各試験体のコンクリート部分の線減弱係数の計算結果を高さ別に示す。線減弱係数は材料定数であり、この値が大きいくほど遮蔽性能が大きい。本図より、No.1 の重量コンクリート不分離型では線減弱係数の値は他よりも大きく、高さ方向での変動もあまりない。No.2 は試験体の上方ほど線減弱係数は小さ

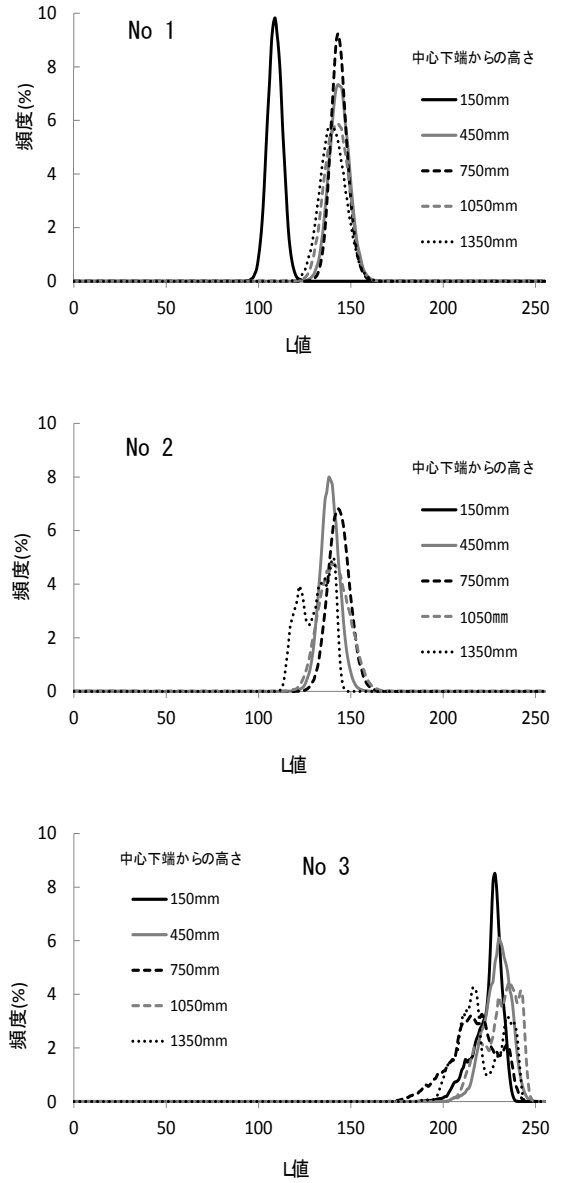


図-4  $L$  値のヒストグラム

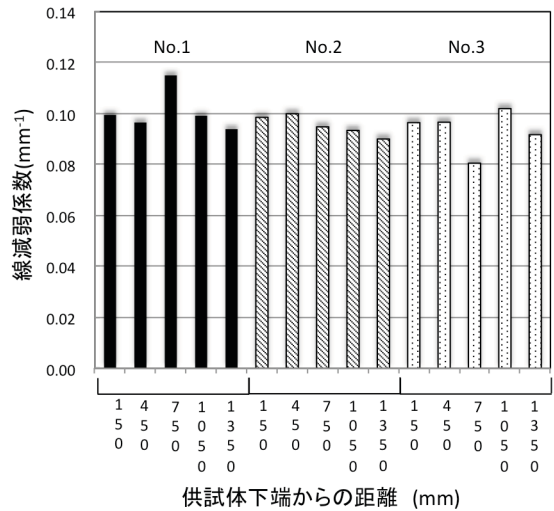


図-5 各試験体の線減弱係数の計算結果



くなり遮蔽性が低下している。このことは、No.2はNo.1と同様の重量コンクリートであるが締固め時間を長時間としているため、上方ほど材料分離の影響を受けていると考えられる。

No.3の普通コンクリートについても、試験体の上方ほど線減弱係数は小さくなり遮蔽性が低下している。通常の締固めであっても今回の試験体の高さでは骨材が分離する傾向があると考えられる。

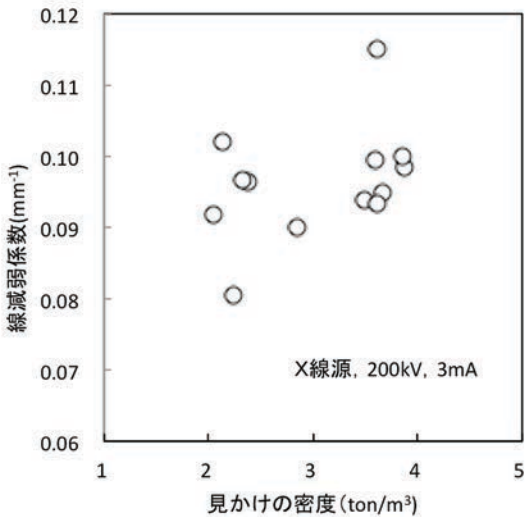


図-6 見かけの密度と線減弱係数との関係

図-6は、測定部分のコンクリートのみかけの密度と、その部分の線減弱係数との関係を表す。両者には高い相関ではないが比例関係が見られ、密度が高い部分ほど線減弱係数は高くなり遮蔽効果が上がる傾向がある。これは従来より言われていたことと同様であり、コンクリート容器等の遮蔽性能を上げるためには密度を高くするとともにその分布が均一になるような打込み方法とすることが重要である。

#### 4. まとめ

本実験の範囲で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 携帯型のX線照射装置により得られるX線透過デジタル画像から、材料のX線透過率に比例する明度の2次元分布を取得でき、試験体の構成材料のX線の遮蔽性能を詳細に把握することができる。

- (2) 携帯型のX線照射装置により得られる鉄筋コンクリート部材のX線透過デジタル画像から、鉄筋画像とコンクリート部画像の2層の明度に基づきコンクリート部の線減弱係数を推定する方法を提案した。
- (3) 重量骨材を用い不分離性を高めたコンクリート製容器は、普通コンクリートよりも遮蔽性が高くなり打込み方向の線減弱係数はほぼ同じとなった。
- (4) 重量骨材を用い不分離性を高めたコンクリート製容器において、長時間の過度の振動締固めを行うと高さ方向の遮蔽性に差異が生じ打込み高さが高い部分ほど線減弱係数が低くなる。
- (5) 普通コンクリートを用いたコンクリート製容器において、通常の振動締固めを行うと高さ方向の遮蔽性に差異が生じ打込み高さが高い部分ほど線減弱係数が低くなる。
- (6) コンクリート製容器のコア試験体から求められる見かけの密度が大きくなるほど、その部分のX線に対する線減弱係数は高くなる傾向が見られた。

#### 謝辞

本研究のデータ整理にご協力いただいた首都大学東京大学院生山本拓弥氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本工業規格 JIS Z 4501(2011), X線防護用品類の鉛当量試験方法
- 2) 橋高義典, 横室 隆, 小川洋二, 井川秀樹: X線透過デジタル画像によるコンクリートのX線遮蔽性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1507-1512, 2013
- 3) 下村哲雄, 細田 暁, 岸 利治: 低水粉体比コンクリートのひび割れ自己治癒性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 2, pp. 661-666, 2001
- 4) 医学において使用される体外線源からの電離放射線に対する防護, 日本アイソトープ協会, 1983
- 5) J. H. Hubbell and S. M. Seltzer: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients, NIST Standard Reference Database 126, Last update: July 2004