

論文 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

橋高 義典^{*1}・横室 隆^{*2}・小川 洋二^{*3}・井川 秀樹^{*4}

要旨: 骨材の密度を変えた各種調合のコンクリート試験体について、X線照射装置により得られる透過画像を輝度データに変換しX線透過率の分布を求め、構成材料のX線遮蔽性能を把握するとともに平均的なX線遮蔽率を評価した。平均的なX線遮蔽率は試験体が厚くなるほど大きくなり、遮蔽の程度は線減弱係数により材料特性として評価が出来た。密度の大きな試験体ほど線減弱係数は大きくなりX線遮蔽率は高くなること明らかになった。コンクリートの密度、厚さからX線の遮蔽率の推定式を提案した。

キーワード: 放射性物質, X線, デジタル画像, 重量コンクリート, 遮蔽性能

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に渡る封じ込め処理が重要な課題となっている。低レベル放射性廃棄物処分のための浅地中トンレンチ処分、ピット処分、余裕深度処分、高レベル放射性廃棄物処分のための地層処分などについては、遮蔽性能を有するコンクリートの適用が検討されている。特に東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故により生じた放射性物質に汚染された廃棄物の、中間貯蔵施設および一時保管施設での仮置き用の格納容器として重量コンクリートが注目され適用されつつある。また、医療施設での放射性物質を扱う場合においても、コンクリートが重要な遮蔽材料として使用されている。コンクリートの放射線に対する遮蔽性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^{1,2)}。密度3.5g/cm³を超える骨材を用いることで、放射線の遮蔽材料としての利用が期待されている。

放射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³⁾。一方、コンクリートはマトリクスと骨材からなり、それぞれの構成要素の遮蔽に対する特性が異なると考えられる。従って、コンクリートの遮蔽性の特徴を把握するためには、X線の照射とともにその厚さによる透過率の分布を評価する必要があるが、それに関する研究は見られない。例えば、照射後のX線画像をデジタル処理することで、透過したX線の分布を分析することが考えられる。

本研究では、比較的低エネルギーのX線の遮蔽を対象とし、X線透過デジタル画像を用いコンクリートのX線遮蔽率に及ぼす構成要素の影響を把握するとともに、重量骨材の使用により密度を変えたコンクリートの遮蔽性能の評価を行うことを目的とする。

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。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。骨材の最大寸法は20mmとした。実験の水準を表-2に、調合条件は表-3に示す。コンクリートの目標とする密度(単位容積質量)は、2.4, 3.1, および3.6t/m³に設定した。水セメント比は、35, 45, および55%の3水準とした。単位水量は170kg/m³に統一した。重量コンクリートでは自重が大きいためスランプの替りに目標スランプフローを50±10cmに設定した。スランプフローは高性能減水剤の添加量で調整した。

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 ³
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.63%, 粗粒率2.87
	S2	酸化鉄粉表乾密度4.95g/cm ³ , 吸水率1.87%, 粗粒率2.94, 主成分, Fe ₂ O ₃ :95.8%
粗骨材	G1	砕石2005, 表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率1.10%, 粗粒率6.58
	G2	DSM骨材20-05, 表乾密度4.27g/cm ³ , 吸水率0.45%, 粗粒率6.52, 主成分, Fe ₂ O ₃ :49.7%, SiO ₂ :12.2%, CaO:10.9%
高性能減水剤	SP	コンクリート製品用ポリカルボン酸系

表-2 実験の水準

No.	記号	コンクリートの目標密度	スランプフロー	W/C	W	養生方法
		t/m ³		%	kg/m ³	
1	2.4-35	2.4	50	35	170	蒸気養生(前置き20°C-6h, 昇温20°C/h, 最高温度65°C-保持4h)
2	3.1-35	3.1				
3	2.4-45	2.4				
4	3.1-45	3.1				
5	3.6-35	3.6		35		
6	3.6-45			45		
7	3.6-55			55		

*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 足利工業大学 工学部建築学科 教授 博士(工) (正会員)

*3 日本ヒューム株式会社 技術研究所 課長 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-3 調査条件

No.	記号	コンクリートの目標密度 (t/m ³)	スランブフロー (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		高性能減水剤 SP
								S1	S2	G1	G2	
1	2.4-35	2.4	50	35	48	170	486	825		908		6.32
2	3.1-35	3.1						1559				
3	2.4-45	2.4		45	50		378	904		918		6.43
4	3.1-45	3.1						1709				
5	3.6-35	3.6		35	48		486		1559		1457	3.89
6	3.6-45			45	50		378		1709		1474	3.02
7	3.6-55			55	52		309		1833		1460	3.09

2.2 試験体の概要

コンクリートの練り混ぜは強制二軸型ミキサによって、フレッシュコンクリートの試験を実施した後、X線透過実験用の試験体(100×100×400mm)と圧縮強度試験用の供試体(100φ×200mm)を作製した。遮蔽用二次製品を想定し、硬化を促進するために常圧蒸気養生を実施した。養生条件は、前置き 20℃-6hr、昇温 20℃/hr、最高温度 65℃-保持 4hr とし、降温は実験室温まで徐冷とした。試験体は打設翌日脱型し、20℃、60%R.H.の恒温室内で所定の材齢まで静置した。

X線の透過実験に用いる試験体は100×100×400mmの硬化試験体を長手方向に5、10、20、30mmの4条件の厚さにコンクリートカッターで切断した(試験体 No.1, 2については5、10、50mmの3条件とした)。測定装置の制約から最大厚さは50mmとした。試験体の概要を図-1に示す。

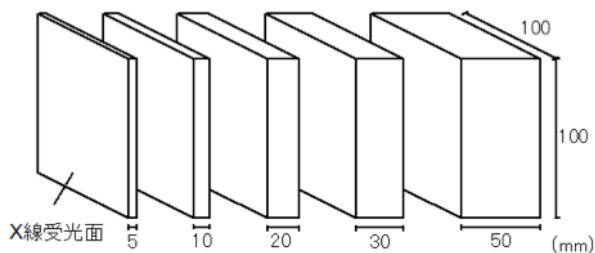


図-1 遮蔽実験に用いる試験体の概要

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X線照射装置の概要を図-2に、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線が試験体に向けて照射され、試験体を透過するX線像を8×10インチサイズの平面X線検出器(以下、FPD)により電気信号に変換する。FPDに入力された電気信号はコンピュータに255階調の2次元画像データとして取り込まれ、さらにコンピュータソフト(Photoshop)上で最大明度255で255階調のL値に変換する。画像の1ピクセルの幅は測定中央部で0.25mmとなった。本装置で使用するFPDは、X線が蛍光体に照射され電子を生成し

直接読み取り回路に導かれるため、解像度の高い画像を得ることが可能となっている。被写体によるX線の散乱を最小にするために、縦方向と横方向にスリットが設置されている。X線照射装置の最大X線管電圧は160kV、最大出力は200W、X線源サイズは0.2mmである。

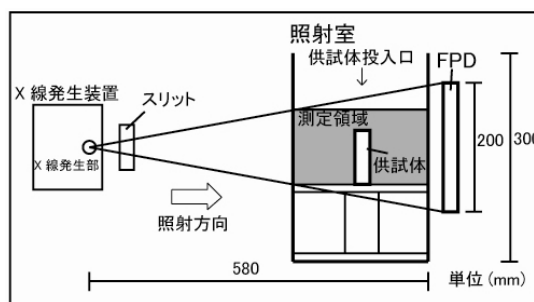


図-2 X線照射装置概要



写真-1 X線照射装置外観

(2) X線照射画像の撮影

試験体へのX線照射は、今回は電圧160kVで電流200μA、照射時間3秒とし、1体の試験体につきそれぞれ3回のX線撮影を行う。試験体のX線画像を撮影する際には、鉄の校正板を同時に撮影する。鉄校正板の厚さは1、2、3、4、5、6、8mmとし、X線の透過画像を検出後、それぞれの厚さでのL値を計測し、各厚さでの鉄の遮蔽率により、L値と遮蔽率の校正曲線を作成し、試験体のL値の測定結果から試験体の遮蔽率を求める。

2.3 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式(1)が適用できる⁴⁾。

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

ただし、 I_0 は入射光子のフルエンス率、 I 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。

本実験では、厚さの異なる試験体の X 線透過率から遮蔽率 $S(\%)$ を求めた。遮蔽率と透過率(I/I_0)との関係は下式のとおりである。さらに式(1)に当てはめ、試験体の線減弱係数 $\mu (\text{mm}^{-1})$ を求めた。

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

試験体と同時に写し込む校正鉄板の遮蔽率に関しては、文献⁵⁾より鉄の X 線管電圧 160kV での線減弱係数を求め ($=0.15\text{mm}^{-1}$)、式(1)に基づき鉄校正板各厚さ ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6, 8\text{mm}$) での遮蔽率 S_{ion} を式(3)より求めた。

$$S_{\text{ion}} = (1 - \exp(-0.15 \cdot x)) \times 100 \quad (3)$$

1 回の測定で計測した鉄校正板の厚さ毎の遮蔽率と L 値との関係の例を図-3に示す。遮蔽率の増加とともに L 値は 255 の最大値から急激に低下し徐々に変化の割合が低下し L 値が 0 で遮蔽率 100%に漸近していく。これらの関係は式(4)のロジスティック曲線で表し得た。

$$L = \frac{a}{1 + b \exp(-c(100 - S))} \quad (4)$$

図-3 中には遮蔽率と L 値の測定結果を(4)式で回帰した例を示す。ただし、 $S=0$ で $L=255$ とした。校正曲線は測定結果とよく一致しており、またすべての測定結果毎について求めた校正曲線は測定結果と高い相関が得られた。そこで、1 回の測定毎に鉄校正板の測定結果を式(4)で回帰しパラメータ(a, b, c)を求め、その校正曲線を用い、試験体の L 値の測定結果から遮蔽率を求めた。

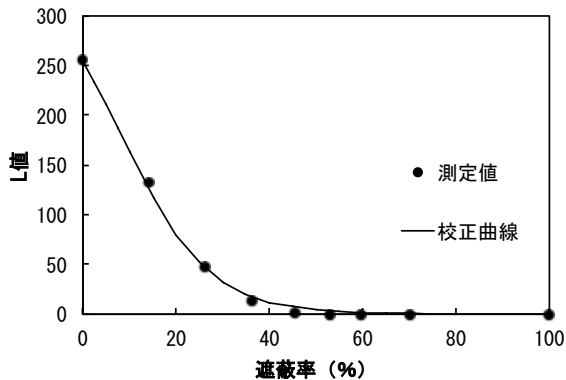


図-3 校正曲線の例

3 実験結果および考察

3.1 硬化コンクリートの性質

表-4に硬化コンクリートの性質を示す。各調合条件で設定した密度とほぼ同じ密度が得られた(以降、密度は硬化コンクリートの密度とする)。重量骨材を用いた試験体では同一水セメント比の普通骨材よりも圧縮強度が小さくなる傾向があった。

表-4 硬化コンクリートの性質

No.	記号	コンクリートの目標密度 t/m ³	W/C %	材齢28日		
				密度 g/l	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²
1	2.4-35	2.4	35	2380	58.9	30.2
2	3.1-35	3.1		3120	46.8	31.8
3	2.4-45	2.4	45	2330	42.2	25.2
4	3.1-45	3.1		3020	27.2	25.1
5	3.6-35	3.6	35	3550	42.1	36.4
6	3.6-45		45	3590	28.4	31.4
7	3.6-55		55	3680	20.4	28.8

3.2 X 線撮影結果および L 値の分布

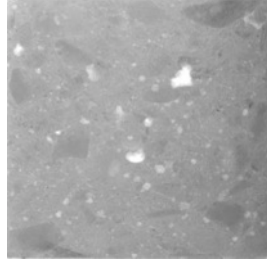
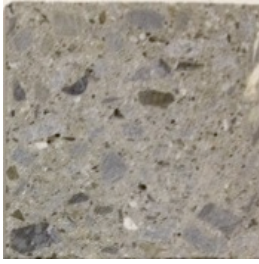
写真-2に、厚さ 10mm の試験体の X 線投影画像を L 値に換算した画像の例(右)を試験体の写真(左)と共に示す。密度 2.4 の試験体(2.4-45)では全体的に明度が高く遮蔽効果が低いことが分かる。また X 線画像の粗骨材部分はモルタル部分よりも明度が低く遮蔽性能が高い。密度 3.1 の試験体(3.1-45)では粗骨材部分の明度がモルタル部分よりも高く、モルタル部の遮蔽性能が大きい。これは細骨材に鉄粉を用いているためと考えられる。密度 3.6 の試験体(3.6-45)では粗骨材、細骨材とも重量骨材を用いているため全体の明度が低く遮蔽性能が大きい。このように、X 線透過画像を用いること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。

図-5(a)には写真-2と同じ試験体の L 値の測定結果のヒストグラムを示す。密度 2.4 の試験体(2.4-45)では L 値は一樣に高く遮蔽率が低いことを示している。また、L 値の分布には L 値が 255 と 240 付近に 2 つのピークが現れており、前者は遮蔽率の小さな粗骨材、後者はモルタル部分と考えられる。密度 3.1 の試験体(3.1-45)においても L 値が 255 にややピークが現れており、これは遮蔽率の小さい粗骨材部分を示している。また、L 値 50 前後にピークを示している部分は細骨材に鉄粉を含むモルタル部分と考えられこの部分は遮蔽率が低い。密度 3.6 の試験体(3.6-45)では、細骨材、粗骨材とも重量骨材を用いているため、L 値が 0~50 の低い領域にピークが現れており、遮蔽率が低い。

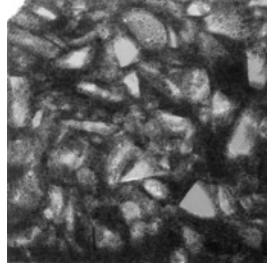
図-5(b)には密度 2.4 の同一調合(2.4-45)で、厚さの異なる試験体の L 値のヒストグラムを示した。本図より試験体の厚さが厚くなるほど L 値のピークが低い値にシフトしており、試験体が厚くなるほど遮蔽率が増加する傾向が読み取れる。

試験体の写真

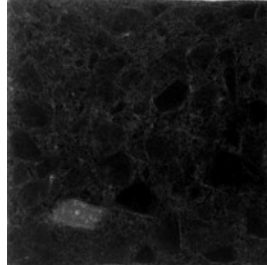
X線画像



No. 3 10mm厚 (2.4-45), 密度 2.4 - 水セメント比 45%

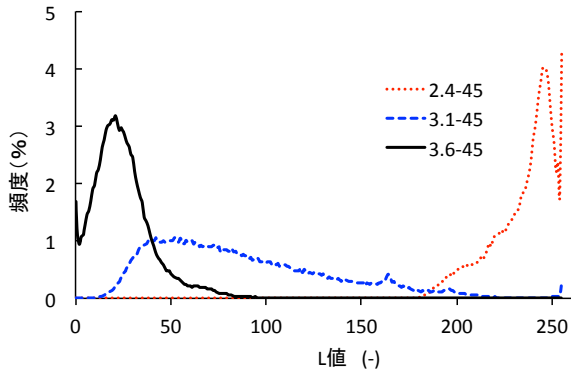


No. 4 10mm厚 (3.1-45), 密度 3.1 - 水セメント比 45%

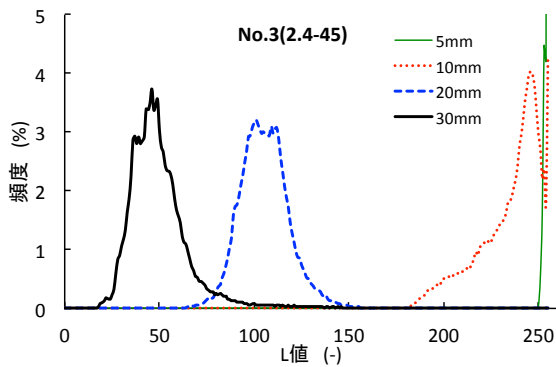


No. 6 10mm厚 (3.6-45), 密度 3.6 - 水セメント比 45%

写真-2 試験体の写真とX線画像の例



(a) 厚さ 10mm, 2.4-45, 3.1-45, 3.6-45



(b) 2.4-45, 厚さ 5, 10, 20, 30mm

図-5 L値の測定結果のヒストグラムの例

3.3 遮蔽率の測定結果

表-5に遮蔽率の測定結果をまとめて示す。各試験体のL値の測定結果の平均値から校正曲線により遮蔽率を求め、同一試験体について3回の測定結果を平均した値、ならびにその標準偏差を示した。

表-5 遮蔽率の測定結果

試料No.	記号	試料厚さ	遮蔽率	標準偏差	線減弱係数 μ
		(mm)	(%)		
1	2.4-35	5	0.133	0.037	0.0175
		10	10.21	2.061	
		50	59.18	0.617	
2	3.1-35	5	16.20	0.399	0.0277
		10	30.54	0.302	
		50	74.49	2.830	
3	2.4-45	5	0.027	0.005	0.0141
		10	6.76	2.076	
		20	23.34	1.138	
		30	37.49	0.771	
4	3.1-45	5	14.36	0.161	0.0376
		10	25.19	0.451	
		20	48.95	2.371	
		30	70.38	0.728	
5	3.6-35	5	20.12	0.321	0.0559
		10	42.50	1.017	
		20	67.05	1.335	
		30	81.57	1.414	
6	3.6-45	5	25.50	0.282	0.0649
		10	41.15	0.206	
		20	70.58	0.509	
		30	86.99	0.393	
7	3.6-55	5	29.66	0.519	0.0654
		10	45.75	2.356	
		20	72.10	0.827	
		30	86.39	2.680	

図-6に各試験体の遮蔽率を試験体の厚さ別に示す。試験体の厚さが厚くなるほど遮蔽率は大きくなる。また、試験体の密度が大きくなるほど遮蔽率は大きくなる傾向がある。W/Cの影響に関して今回の範囲では特に大きな差は見られなかった。

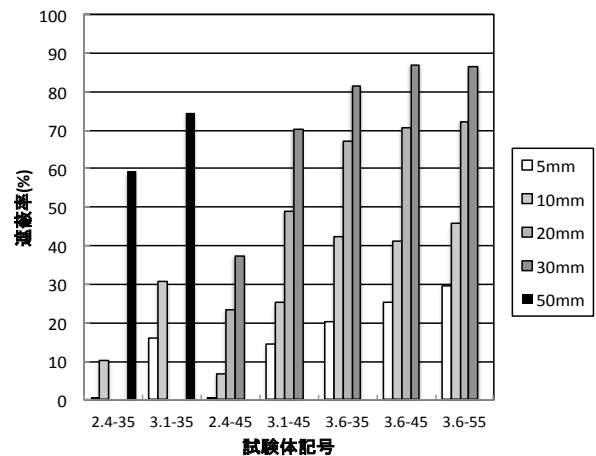
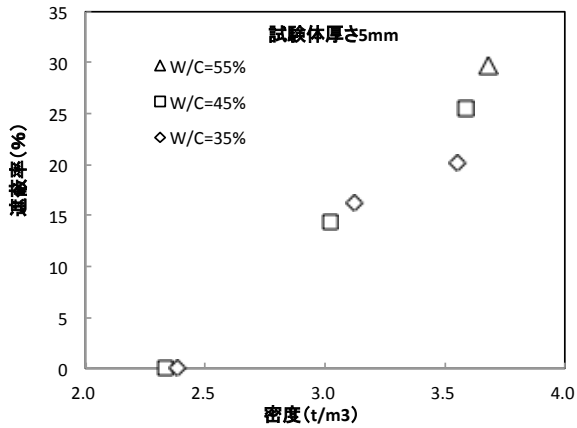
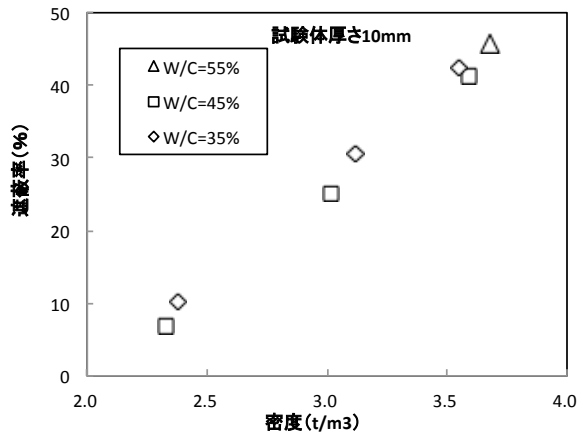


図-6 遮蔽率の測定結果



(a) 試験体厚さ 5mm



(b) 試験体厚さ 10mm

図-7 遮蔽率と密度との関係

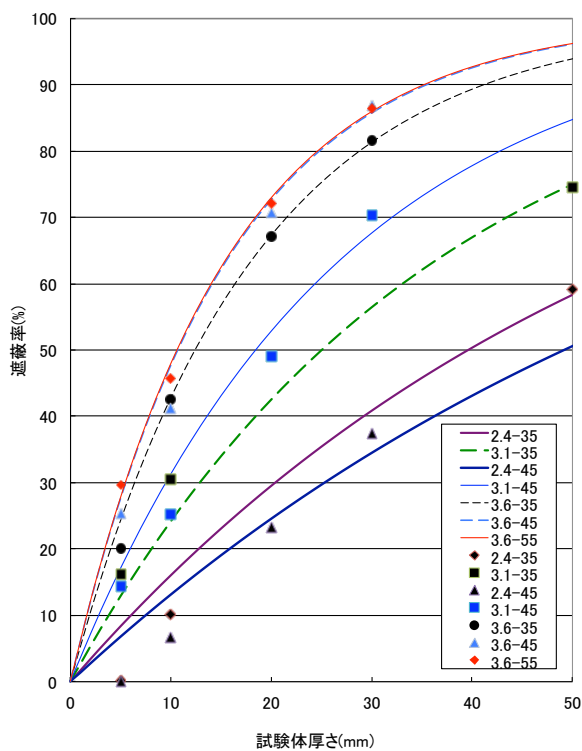


図-8 試験体厚さと遮蔽率との関係

図-7 (a), (b)に遮蔽率とコンクリートの密度との関係例を試験体の厚さ 5mm と 10mm について示した。従来から言われているように、試験体の密度が大きいほど遮蔽率は高くなり、両者にはほぼ線形の比例関係がある。

図-8 には、各試験体の厚さと遮蔽率との関係をプロットで示す。試験体の厚さが厚くなるほど遮蔽率は高くなるが、試験体の厚さの増加に対する遮蔽率の増加は、初期に大きく徐々に緩やかになる傾向がある。また、密度が大きくなるほど試験体の厚さの増加に対する遮蔽率の増加の割合が大きくなる。

3.4 線減弱係数

各試験体の厚さ別の遮蔽率の測定結果から、式(1)に基づき、線減弱係数を求めた。式(1)を変形すると式(5)が得られる。

$$\ln(I/I_0) = -\mu \cdot x \quad (5)$$

従って、測定結果について $-\ln(I/I_0)$ と厚さ x をプロットし、原点回帰線を求めれば、その傾きが μ となる。

図-9 に各試験体の $-\ln(I/I_0)$ と厚さとの関係を示した。両者はほぼ比例関係にあり、試験体の密度が大きくなるほど傾きが大きくなる。全ての試験条件において両者は高い相関で原点回帰できた。その傾きから線減弱係数 μ を求めた。各試験体の μ は表-5 にまとめて示した。

各試験体の線減弱係数を式(1)に代入し、試験体の厚さと遮蔽率の関係を算定した結果を図-8 中に曲線で示す。計算結果は測定結果とよく一致しており、各試験体の遮蔽率は試験体厚さと線減弱係数により表すことができる。

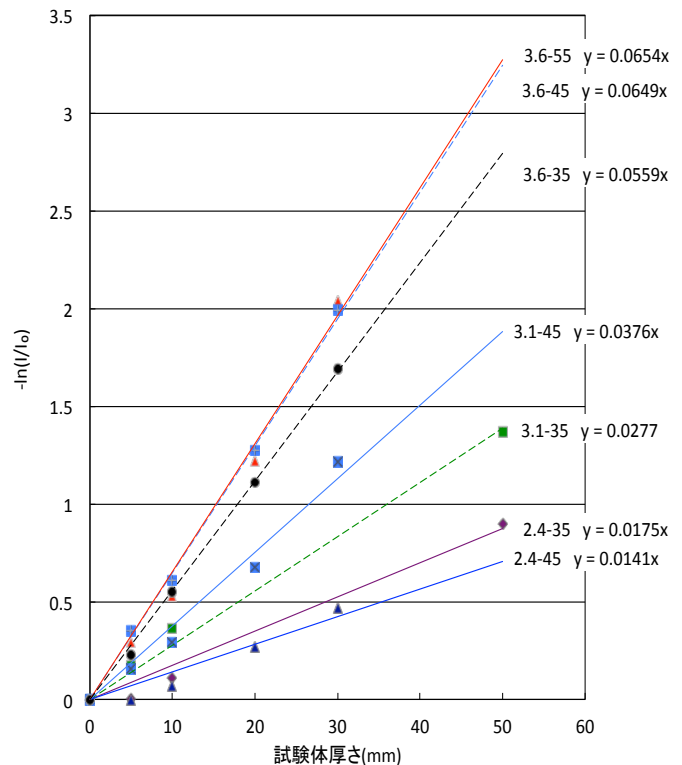


図-9 試験体の厚さと $-\ln(I/I_0)$ の回帰結果

3.5 質量吸収係数

図-10 には、各試験体の線減弱係数 μ と密度との関係を示す。線減弱係数を密度で除したものは質量吸収係数と呼ばれ、単位質量の材料の遮蔽力を表す。この結果を見ると、質量吸収係数は一様の値とはならない。しかしながら、両者はほぼ直線上にあり、直線回帰により、密度 D (t/m³) から線減弱係数 μ を推定する式(6)が得られる。

$$\mu = 0.037D - 0.0741 \quad (6)$$

図-11 に、式(6)を基に様々な密度のコンクリートについて、式(1)により厚さと遮蔽率との関係を試算した結果を示す。本図は参考として今回の実験範囲を超える厚さまでを推定して示した。本図により所要の遮蔽率を得るためのコンクリート試験体の密度ならびに厚さを推定することができる。

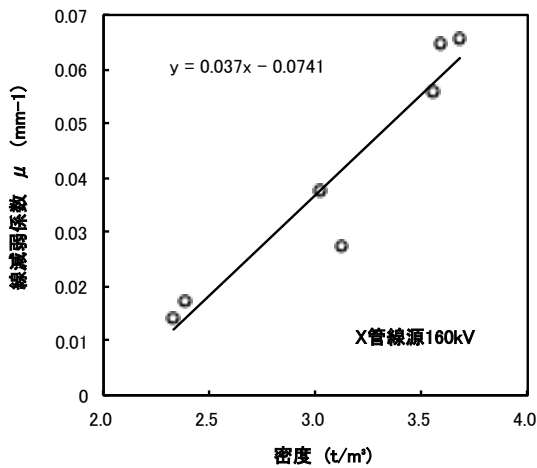


図-10 線減弱係数と密度との関係

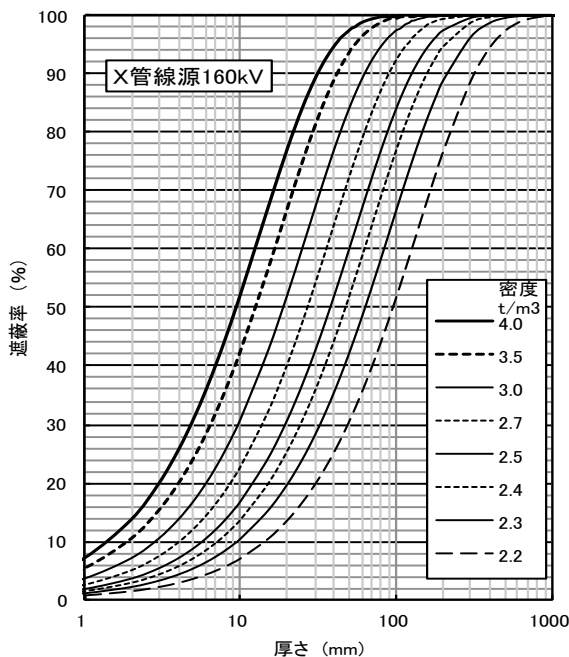


図-11 コンクリートの遮蔽率の試算例

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) 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コンクリート試験体のX線に対する遮蔽率を評価する方法を提案した。
- (2) X線透過デジタル画像から遮蔽率の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。
- (3) X線透過デジタル画像によりコンクリートの遮蔽性能を測定した結果、重量骨材など密度の大きい部分は密度の低い部分よりも遮蔽性が高くなることが明らかになった。
- (4) 様々な密度のコンクリート試験体について、X線に対する平均的な遮蔽率を求めた結果、試験体の密度が大きくなるほど、また試験体の厚さが大きくなるほど遮蔽率が大きくなることが明らかになった。
- (5) コンクリートのX線に対する遮蔽率と厚さとの関係は線減弱係数で表せ、様々な密度のコンクリートについて、X線管方式で160kVのX線に対する線減弱係数を求めた。
- (6) コンクリートの質量吸収係数を求め、各種コンクリート密度および厚さでのX線の遮蔽率の試算例を示した。

謝辞

本研究にご協力いただいた首都大学東京助教松沢晃一氏、同学部生兵庫和佳奈氏ならびに林史絵氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 白山和久：遮蔽用重量コンクリートについて，建築雑誌 72(851)，pp. 53-54，1957. 10-20
- 2) 川崎幸穂ほか：組成を異にするコンクリートのX線遮蔽効果について，日本放射線技術学会雑誌，pp. 95-101，1969. 4
- 3) 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
- 4) 西谷源展，鈴木昇一：放射線安全管理学，オーム社，p. 57，2008
- 5) 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