

論文 遮蔽コンクリートの損傷度と性能劣化の定量化に関する基礎的研究

鈴木 裕介^{*1}・木村 健一^{*2}・PAREEK Sanjay^{*3}・荒木 慶一^{*4}

要旨: 本研究は、遮蔽コンクリートが損傷を受けた際の損傷度と γ 線遮蔽性能劣化の関係についての定量化を目指した基礎研究として、自然ひび割れを最も単純にモデル化した3種類のスリットを有した遮蔽板を用いた遮蔽実験及びモンテカルロ法によるシミュレーション解析を通し、スリットの平均粗さが γ 線透過率に及ぼす影響について検討した。その結果、実験では平均粗さに従って γ 線透過率が減衰するといった想定通りの結果が得られた。解析においては、実験の傾向をとらえることができたものの、スリット幅や平均粗さが極小さいレベルにおいては、多くの実験結果との比較の積重ねによる精度向上が求められる結果に至った。
キーワード: 遮蔽コンクリート, 損傷度, スリット, 平均粗さ, γ 線透過率

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、原発事故）で飛散した放射性物質（主に放射性セシウム）によって汚染された土砂等の処理は、深刻な課題として未だ残されている。現在では、膨大な放射能汚染物（以下、汚染物）を安全に管理・保管するため中間貯蔵施設の建設や最終処分場の計画が進められている^{1,2}など。いずれの施設においても、放射線遮蔽にとって費用対効果が優れるコンクリートが遮蔽体として用いられ、空間線量や地下水などのモニタリングが随時実施されると考えられる。しかし、コンクリートは何らかの内的外的影響による損傷（ひび割れ）の発生が避けられないものであるため、損傷部からの放射線透過による遮蔽性能劣化といったリスクを、（モニタリングされたデータを基に）定量的に評価可能なデータベースを構築することが求められる。

筆者らはこれまで、放射線（主に、 γ 線）遮蔽性能及び汚染物格納後の容器可搬性向上を意図した高密度モルタル（最大で 5.0g/cm³）を開発するとともに、格納すべき汚染物の放射能濃度や量などに応じ遮蔽容器の最適な壁厚や密度を選択するためのシミュレーションシステムの基礎を構築した^{3,4}。並びに、箱形容器の1面に1本のひび割れ（または、1本のスリット）を有する遮蔽体を用いた遮蔽実験を行い、ひび割れ幅と γ 線遮蔽性能劣化の関係について検討した⁵。しかし、図-1に示すように、測定上理想化された損傷（ひび割れ）であるスリットに対する γ 線の透過率は、シミュレーションによって精度よく模擬できるものの、実際のひび割れに対する透過率に関しては、表-1に示すようなひび割れの深さ（遮蔽厚）方向の形状（角度や表面粗さ）が γ 線透過量に影響するため、シミュレーションを実施する際の実験体系の忠実なモデル化が極めて困難である。

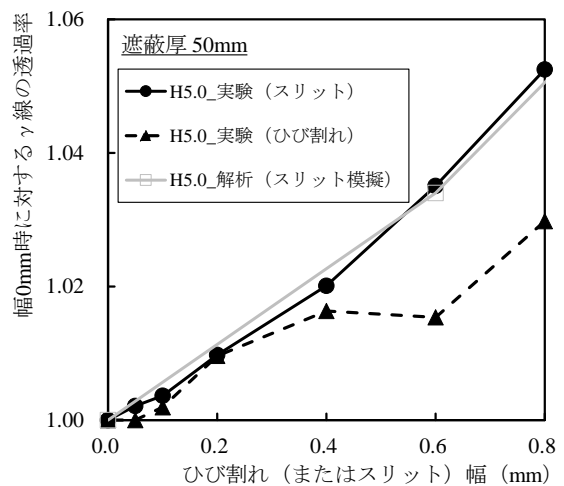


図-1 密度 5.0g/cm³ のモルタル遮蔽板による損傷度と γ 線透過率の関係

表-1 γ 線透過率への影響が予想されるひび割れ深さ方向形状

角度: 45°, 60°, ...	表面粗さ: V形, W形, ...

*1 東北大学災害科学国際研究所 助教 博士 (工学) (正会員)

*2 株式会社フジタ技術センター 博士 (工学) (正会員)

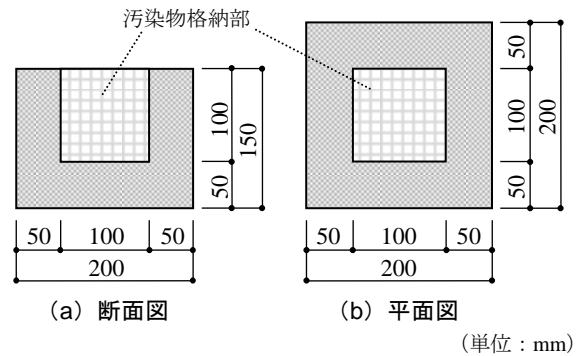
*3 日本大学工学部建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

表一２ モルタルの使用材料及び調合表

	練混ぜ水	普通ポルトランドセメント	珪砂	混和剤	W/C (%)
密度 (g/cm ³)	1.00	3.15	2.63	—	
単位量 (kg/m ³)	285	490	1470	4.9	58.2

本研究では、 γ 線の透過に対して損傷部（ひび割れ深さ方向）の表面粗さが及ぼす影響について着目し、ひび割れ面粗さとして、最も単純な形状と考えられるV形、W形に直線形のスリットを加えた3パターン（表一1参照）で作製した遮蔽モルタル供試体を用い、 γ 線遮蔽実験及びモンテカルロ法による遮蔽解析を実施する。両結果の比較を通し、ひび割れ表面の平均粗さが γ 線遮蔽性能劣化に及ぼす影響評価手法について検討する。



図一２ 高密度モルタル遮蔽容器形状



写真一１ 高密度モルタル遮蔽容器

2. 実験概要

本章では、実験に用いた遮蔽体の使用材料、試験体概要、及び遮蔽実験時の測定方法詳細について述べる。

2.1 モルタルの使用材料及び材料特性

表一２に、後述する遮蔽容器本体及び容器盖板（遮蔽板）の作製に使用したモルタルの使用材料と調合表を示す。作製したモルタルの調合は、一般的な1:3（＝結合材：細骨材）モルタルとし、水セメント比 W/C=60%程度とした。練混ぜ水には水道水を、結合材には普通ポルトランドセメントを、細骨材には最大粒径 0.59mm の珪砂を使用した。また、混和剤にはポリカルボン酸系の AE 減水剤を使用した。フレッシュ時の性状として、モルタルフロー値 (JIS R 5201) が 185mm、空気量 (JIS A 1171) が 8.7%、及び単位容積質量は 2.02 g/cm³であった。空気量が比較的高めであるが、概ね一般的な品質である。作製したモルタルを用いて、後述する各形状の遮蔽板を1体ずつ、並びに、密度測定及び各強度試験実施のためのφ50x100 mm 供試体を、各試験に対し3体ずつをそれぞれ作製し、打設面をラッピングして恒温恒湿室 [20℃, 60%(RH)] 内で封緘養生を行った。1日養生後、すべての供試体の脱型を行い、供試体全体をラッピングした後、同室内で28日間養生した。

モルタルの各物性として、材齢28日における密度は 2.01g/cm³であった。また、材齢28日における圧縮強度及び割裂引張強度試験を、JIS A 1108 及び JIS A 1113 にそれぞれ準じて測定した。その結果、圧縮強度が 19.1MPa (3体の標準偏差: 0.3MPa)、割裂引張強度が 2.2MPa (標準偏差: 0.3MPa) であった。また、圧縮強度試験時に測定したひずみ度を用いて算出したヤング係数は 27.6GPa であった。

2.2 遮蔽容器形状

(1) 容器本体

図一２及び写真一１に本実験に用いた遮蔽容器本体概要を示す。容器本体は既報の実験⁶⁾で使用したものと同一で、容積1Lの汚染物格納部を設けた箱形容器である。容器作製には、密度 5.0 g/cm³ の高密度モルタルを使用した。高密度モルタルの使用材料、調合及び各物性の詳細については文献⁶⁾を参照されたい。

(2) 容器盖板（遮蔽板）

図一３に容器本体（図一２及び写真一１）の盖板となる遮蔽板形状を示す。スリット形状は3パターンとし、これが本実験の変動因子である。各形状の詳細として、Iスリットは直線形、Wスリット及びVスリットに関しては板の表面に対し45度の角度で凹凸を形成するように作製した。それぞれをその形状からIスリット、Wスリット及びVスリットと称す。図一４に示すように、ひび割れ深さ（板厚）方向の形状を凹凸面とみなし算出した、遮蔽板それぞれの算術平均粗さは、Vスリットが 12.5mm、Wスリットが 6.25mm 及びIスリットが 0mm となる。なお、本論文では、Vスリットの算術平均粗さ 12.5mm に

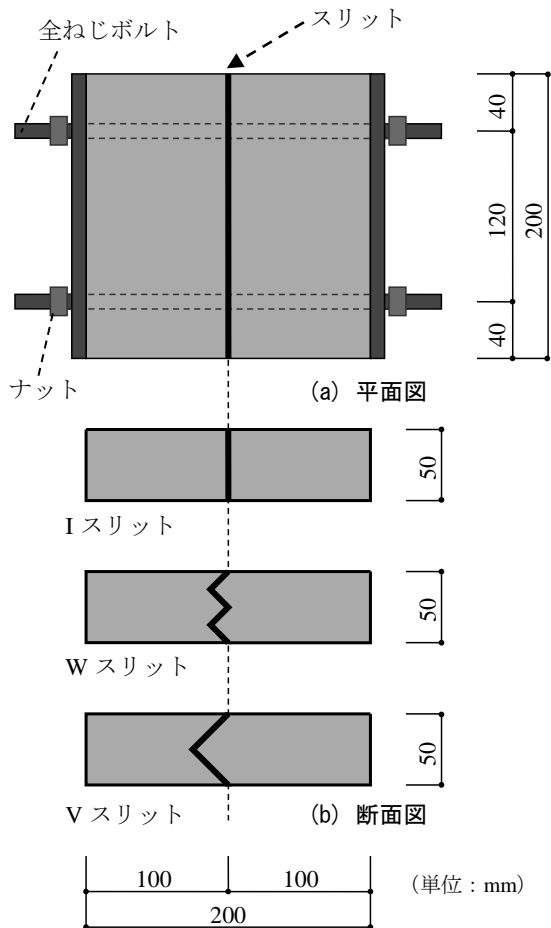


図-3 容器蓋板（遮蔽板）形状

対する比を「平均粗さ指標」として定義する。平均粗さ指標は、Vスリットが1.0、Wスリットが0.5、及びIスリットが0となる。なお、本論におけるγ線遮蔽性能劣化の検討は、この平均粗さ指標のみに対して比較することとする。

また、いずれの遮蔽板についても図-3(a)に示すように遮蔽板内にあらかじめアンボンド処理を施した丸鋼を2本配し、モルタル硬化後にその丸鋼を引抜いた。丸鋼を引抜いた2つの孔それぞれに全ネジボルトを配し、それぞれの両端にナット（計4つ）を取付けた。測定時には、このナットを開閉することによってスリットの幅を制御した。

2.3 線源（放射能汚染物）概要

実験線源用の放射能汚染物のサンプリングとして、福島県内における放射能汚染土を採取した。それを放射能濃度が可能な限り一様になるよう攪拌し、攪拌後に円筒形プラスチック容器に詰め、これを本測定における（体積）線源として使用した。汚染土の質量は、540gであった。なお、攪拌後の汚染土から25gずつ3サンプルを採取し、ゲルマニウム検出器を用いてそれらの放射能濃度を測定した結果、放射能濃度は ^{134}Cs ：116.1Bq/g、 ^{137}Cs ：279.6Bq/g（放射性セシウム全体で395.7Bq/g）であった。

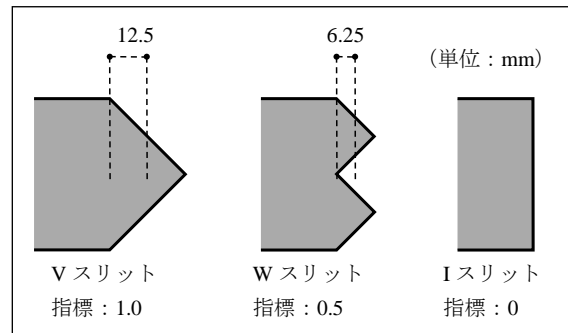


図-4 各スリットの平均粗さ

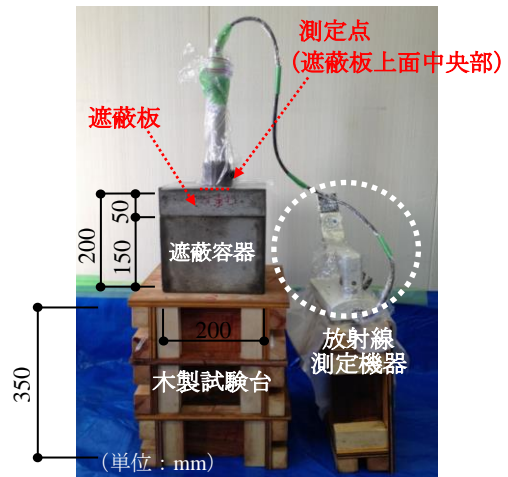


写真-2 γ線遮蔽性能実験状況



写真-3 γ線遮蔽性能実験状況

2.4 測定状況及び方法

写真-2 にγ線遮蔽実験状況を示す。詳細として、プラスチック容器に詰めた汚染土（体積線源）を、木製試験台の上に静置した遮蔽容器の汚染物格納部に格納し、各スリットを有したモルタル遮蔽板で蓋をし、蓋板の上面中央部において汚染土から放出されるγ線を、直径1インチの検出器を有する、放射線測定機器（NaIシンチレーションサーベイメータ：NHC7）を用いて測定した。測定条件は、遮蔽板形状（I、W及びVスリットの3パターン）及びスリット幅（0、1、3、5、7及び10mmの6パターン）の計18パターンである。スリット幅の検討範囲を0～10mmと、一般的なひび割れとしては大きく設定しているが、鉄筋コンクリートを用いた実際の格納状況における（鉄筋破断といった）極めて過大な損傷についても想定し評価範囲を拡張している。遮蔽板形状を変更する際は容器蓋板（遮蔽板）を取替えるのみとし、

測定精度に影響が出ないように配慮した。スリット幅の制御は、クラックスケールを用いて幅を測定しながら（写真-3）、遮蔽板両側面に取り付けた4つのナット（図-3(a))を開閉することで実施した。測定方法として、写真-2の状態ですり1分間（時定数：30秒間）計測しその間に検出される γ 線の積算値を記録した。測定回数は5回とし、測定におけるばらつき程度を評価した。また、本測定は福島県内における実験場で行ったため、バックグラウンドからの放射線量（以下、BG値）が存在する。よって、線源からの γ 線のみを的確に評価するため、測定器の検出部分に10mm厚の鉛のコリメータを配置するとともに、文献3)と同様の測定手法を採用しBG値の影響を極力取り除いた。詳細として、事前に、遮蔽容器内に線源（汚染土）を格納していない状態でI、W及びVスリット遮蔽板それぞれを設置した時の放射線量を計測し記録する。計測回数は同様5回とし、線源がない場合のばらつきについても評価する。その上で、同一遮蔽板を用いている時の汚染土がある場合の測定結果から汚染土が無い場合の測定結果を差し引いた。以上のようにして、BGの影響を極力取除くように工夫した。また、誤差伝搬則を用いて両者（汚染土有と無）の誤差を測定結果に反映させた。

3. 実験結果

本章では、遮蔽実験によって測定された各遮蔽板の γ 線遮蔽性能劣化について検討及び考察する。

図-5に実験結果として、各遮蔽板の線量率（実効線量当量）とスリット幅の関係を示す。なお、マーク（●、▲及び■）で示す各結果は、測定回数5回における平均値であり、同図内に、それぞれの測定誤差（標準偏差）をエラーバーで併記する。

いずれの試験体においても、スリットの幅が拡大するにつれ線量率が增大するといった、想定通りの結果が得られた。詳細として、Iスリットは幅0mm時の21.23 nSv/min.であった線量率が、幅10mm時には25.76nSv/minに増加した。同様に、Wスリットは22.58から26.76 nSv/min.、Vスリットは21.72から24.05nSv/min.に増大した。以上のように増加した線量率は、5nSv/min.（0.3 μ Sv/h）未満で絶対量としてはあまり大きなものではないが、本測定体系の体積線源が、1L程度とあまり大きなものではないこと、及び、1本のスリットからの透過量を評価していることに起因する。中間貯蔵施設などでのコンクリートによる汚染物格納及び放射線遮蔽の状況としては、汚染物の量が膨大であること、及び遮蔽体（モルタル）に損傷が生じる際は相当量のひび割れ本数が顕在化するため、透過する線量率（絶対量）が大きくなる。このような状況による遮蔽性能劣化評価への適用を目指

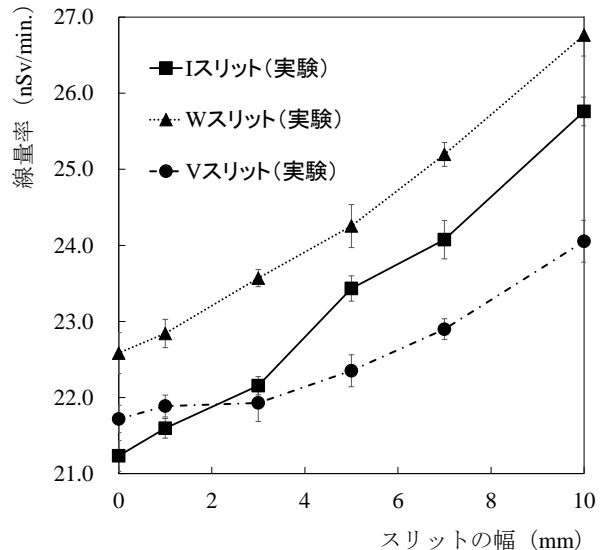


図-5 線量率（ γ 線）とスリットの幅の関係

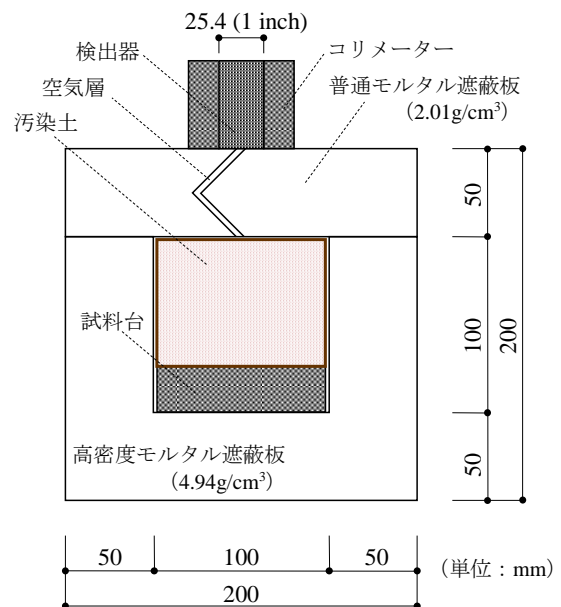


図-6 解析モデル

すためには、まず、本モデル実験のような最も単純な体系での評価が重要になると考えられる。

次に、それぞれの遮蔽板の違いから実験結果を比較すると、スリットの平均粗さ指標が小さい順（図-4）に線量率が高くなると想定されたが、いずれのスリット幅時の線量率においてもWスリットの値が最も高い値を示しており、 γ 線が最も透過しやすいと考えられたIスリットの結果との差は、計測回数5回における測定誤差の範囲を上回っている。各試験体とも同調合及び同バッチで練り混ぜを実施しているため、打設時における試験体個別の差が表れたものと考えられる。よって、次章に記すモンテカルロ法によるシミュレーション解析との比較においては、遮蔽板それぞれにおけるスリット幅0mm時の線量率（実効線量当量）に対する各スリット幅時の線量率の比をとり、相対値で比較するものとする。

4. モンテカルロ法を用いた遮蔽解析による検討

4.1 解析概要

(1) 解析モデル

図-6にVスリット遮蔽板を用いた時を例とした、解析モデルを示す。測定器の検出部分及びコリメータも含め、可能な限り実験体系を忠実にモデル化した。また、各材料は均一であると仮定して、それぞれの密度については実験時に測定した値を用いた。線源（汚染土）は、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能濃度測定値を基に実験と同等の体積線源として模擬した。

(2) 解析手法

解析手法として3次元モンテカルロ法 (Monte Carlo N-Particle Transport Code System 以下、MCNP) ⁷⁾の放射線解析コードを用いて遮蔽解析を行った。光子断面積はMCNPLIB02⁸⁾を使用し、線量換算係数は日本原子力学会標準 (AESJ-SC-R002:2010⁹⁾)を用い、エスティメーターは面タリー¹⁰⁾を使用した。MCNP計算においては、線源における光子発生回数(計算試行回数)により測定点(評価点)での統計的誤差が変動する。本解析では、既報の検討において実験結果を精度よく模擬した文献3), 4)に従い、誤差が3%以下となる試行回数で計算を実施した。

4.2 実験結果との比較による解析結果の検討

図-7に実験結果と解析結果の比較として、各遮蔽板の γ 線透過率とスリット幅の関係を示す。ここで、 γ 線透過率は、先に述べたように、各遮蔽板におけるスリット幅0mm時の線量率に対する各スリット幅時の線量率の比(相対値)をとった値である。

まず、前章において線量率(絶対量)で比較した、実験値のみを再度確認すると、スリット幅1mmから遮蔽板形状による差が見られ、Iスリット、Wスリット、Vスリットと平均粗さが小さい順に γ 線透過率が高くなるといった、想定通りの結果が得られた。

実験値と解析値を比較すると、解析結果にも同様の傾向が見られた。スリット幅3mm以上から平均粗さによる差が明確にみられ、Iスリットが最も高い γ 線透過率を示した。しかし、それぞれの γ 線透過率には、実験と解析において若干の差が見られた。また、1mm未満のスリット幅における γ 線透過率では、スリットの形状に関わらずばらつきが見られた。今後、シミュレーション精度向上のため、解析モデルや計算試行回数など、より詳細な検討が必要と考えられる。並びに、本研究で実施した実験は、それぞれの遮蔽板に対し1体ずつのみでの検討であったため、実験個体数(遮蔽板)や、遮蔽板の密度や厚さなどのパラメータを増加させ、数多くの実験データを収集し整備する必要があると考えられる。

4.3 γ 線透過率とスリット平均粗さの関係

前節において、解析によってスリット幅1mm以上に

おける実験結果の傾向はとらえることができた。本節では、解析によるスリット幅1~10mmまでの詳細検討として、図-8に γ 線透過率とスリット深さ方向の平均粗さの関係を示す。図中の横軸は平均粗さ指標とし、Vスリットの平均粗さを1.0とした時の各遮蔽板の粗さの比率を示している。なお、図中には、Iスリット(平均粗さ指標:0)、Wスリット(0.50)及びVスリット(1.00)に加え、図-9に示すように、Wスリットから更に粗さ

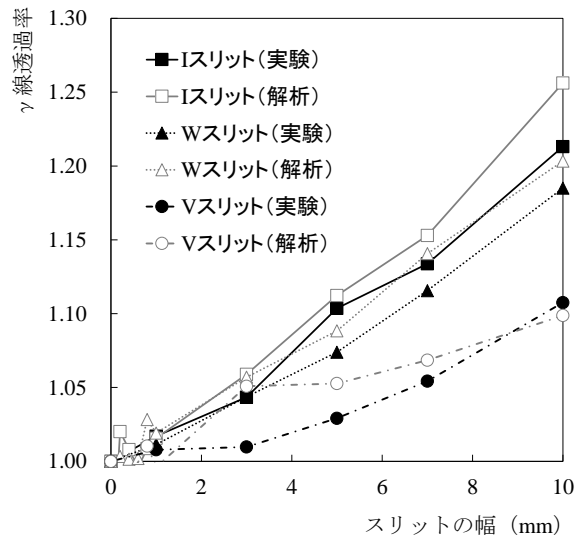


図-7 γ 線透過率とスリットの幅の関係

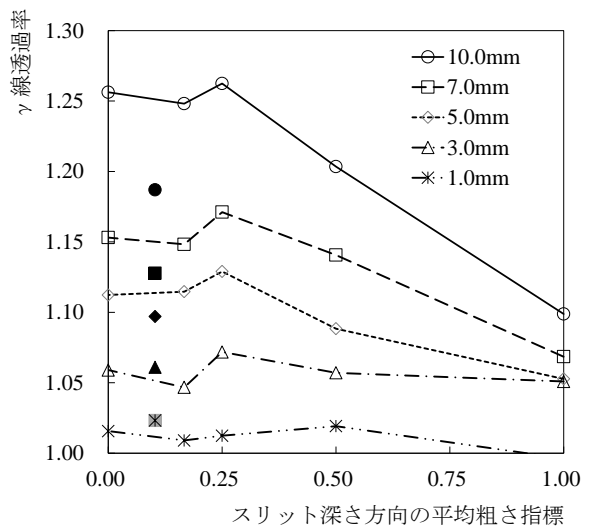


図-8 γ 線透過率と平均粗さの関係

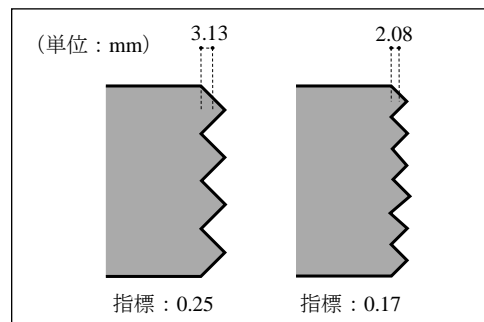


図-9 検討に追加したスリットの平均粗さ指標

を細かくした2パターンの結果を併記している。並びに、既往の研究⁵⁾で報告した、1本の自然なひび割れを有した遮蔽板（モルタルの調査及び遮蔽板寸法は本実験と同様であるが詳細については文献5)を参照されたい）による実験結果を用いて算出した γ 線透過率を黒塗りマーク（マークの形がスリット幅に対応）で示している。なお、文献5)の実験は、本実験とは測定時期及び線源の種類（放射能汚染レベル）が異なるが、 γ 線透過率といった相対値で比較するため、同図内で検討するものとした。また、自然なひび割れの平均粗さに関しては3Dマイクروسコープを用いて観測し、その粗さは1.28mm（平均粗さ指標：0.10）であった。

図に示す結果より、いずれのスリット幅の結果においても平均粗さ指標が0から0.25程度までは大差なく推移するが、それ以上になると γ 線透過率が一様に減少する傾向が見られた。また、既往の実験との比較では、スリット幅が小さいものは同等の値であるが、幅が大きくなると、解析値が実験値を過大に評価する傾向が見られた。自然なひび割れに関しては、表-1で示したような損傷の角度も γ 線透過率に影響するため、概ね妥当な結果であると考えられるが、シミュレーションの信頼性向上のため、実験データの蓄積が必要である。

5. まとめ

遮蔽コンクリートのひび割れ粗さと γ 線遮蔽性能劣化の関係を定量的に評価するための基礎検討として、粗さを極めて単純にモデル化したI、W及びVスリットを有するモルタル遮蔽板を用い、 γ 線遮蔽実験及び解析結果を比較検討した。その結果、以下に記す知見が得られた。

- (1) 実験における各遮蔽板の線量率（絶対量）の比較では、いずれも幅拡大につれ線量率が上昇したものの、平均粗さが0mmのIスリットに比して、Wスリットの線量率が一様に高く推移した。 γ 線透過率（相対値）で比較すると、Iスリットが最も高いといった想定通りの結果に至った。
- (2) 本モデル及び手法による遮蔽解析は実験結果の傾向を概ね模擬することができた。しかし、それぞれの値において若干の差が見られた。特に、スリット幅が小さい範囲での精度向上は、解析モデルや計算試行回数の詳細検討が必要である。
- (3) 本解析結果から得た γ 線透過率と、既往の実験結果（本研究とは線源の放射能汚染レベルが異なる）である自然なひび割れからの γ 線透過率を比較すると、解析の透過率が上回っている。よって、自然なひび割れによる遮蔽性能劣化の評価には、平均粗さ以外の評価軸である、ひび割れ角度、測定範囲内における見かけの密度及びひび割れ（スリット）幅見

付け面積なども考慮し検討を加える必要がある。

- (4) 解析モデルにおけるスリット表面粗さを小さくし、自然なひび割れの表面粗さに近づけていくことでひび割れを有した遮蔽板の γ 線透過率を評価した。本解析は実験の傾向をとらえることができたが、幅及び粗さともにより小さい範囲での差が大きい。今後、実験個体数やパラメータを増加し実験データを整備するとともに、シミュレーションにおいても実験結果との比較の積み重ね、精度及び信頼性向上を図る必要がある。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手（B）（課題番号25820265）、並びに、平成26年度東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究【拠点研究】研究種目Bによる助成の下で実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省：除染情報サイト (http://josen.env.go.jp/soil/interim_storage_facility.html)
- 2) 日本コンクリート工学会：放射性物質の封じ込めとコンクリート材料の安全利用調査研究委員会報告書、2014.6
- 3) 鈴木 裕介、ほか：放射性セシウム汚染土体積線源を用いた円筒コンクリート容器の γ 線遮蔽性能評価、コンクリート工学論文集、第24巻、第2号、pp.43-52、2013.5
- 4) 木村 健一、ほか：汚染及び設置状況に応じた遮蔽コンクリート最適設計システムの開発、第2回コンクリート技術大会（仙台）講演会発表論文集、pp.133-140、2012.11
- 5) Sanjay PAREEK、ほか：様々な遮蔽条件に対する高密度モルタルの γ 線遮蔽性能評価に関する実験的研究 その1及びその2、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.199-202、2014.9
- 6) 鈴木 裕介、ほか：鉄粒粉骨材を用いた高密度モルタルの基礎物性と γ 線遮蔽性能評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.1762-1767、2014.7
- 7) Los Alamos National Laboratory: MCNP4C Monte Carlo N-Particle Transport Code System, CCC-700.
- 8) H. G. Hughes, Information on the photo library MCNPLIB02, LANL X-6: HGH-93-77, 1993
- 9) Radiation dose conversion coefficients for radiation shielding calculations:2010, Atomic Energy Society of Japan, 2010.
- 10) 小佐古 敏荘、笹本 宣雄：原子力教科書「放射線遮蔽」、オーム社、2010.3