

論文 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

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

要旨: 本研究では、原発事故汚染物の減容化より発生する高線量汚染物の遮蔽容器への適用として、強度、長期的な耐久性に留意した、鉄粒粉骨材を用いた高密度モルタルを試作し、その基礎的な物性評価とγ線遮蔽性能評価について実験的な検討を行った。その結果、鉄粒粉の粒径や混入量を最適化し調合することで、密度 5.0g/cm³ を有し、高強度かつ極めて高い耐中性化性能を持つ高密度モルタルの作製が可能であることを示した。並びに、γ線遮蔽実験によって密度及び板厚が異なる高密度モルタルの遮蔽率、及び、モルタルにひび割れが発生した際に懸念されるγ線遮蔽性能劣化について評価した。

キーワード: 高密度モルタル, 鉄粒粉, 放射性セシウム, 体積線源, γ線遮蔽性能

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）で発生した放射能汚染物処理問題に対し、除染活動や放射能汚染物の減容化（汚染物中の放射性物質を濃縮し汚染物の体積を減らす）などの技術開発が活発に実施されている。しかし、減容化などによって高レベルで汚染された放射能汚染物、つまりは高い放射線（主にガンマ線）を放出する汚染物が多量に発生するため、これらを別途処理・処分する技術開発の進捗が求められている。

上記に対し筆者らはこれまで、ガンマ（以下、γ）線遮蔽性能及び汚染物格納後の容器可搬性の向上を意図した高密度コンクリート（4.57 g/cm³）円筒形容器を試作し、原発事故汚染土を線源に用いた遮蔽実験を通し、開発容器が汚染物からのγ線を90%以上遮蔽でき、かつ、2倍の壁厚（1.5倍の重量）を持つ普通コンクリート容器に比して優れた遮蔽性能を有することを実証した。更には、遮蔽実験の体系を忠実にモデル化した遮蔽解析を通し、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^{1),2)}。

γ線の遮蔽率は遮蔽体の密度の大きさに比例するため、放射線（主にγ線）遮蔽用として高密度コンクリート（モルタル）の開発が国内外で行われている³⁾⁻⁵⁾など。しかし、密度 4~5 g/cm³ の超高密度コンクリートについては、施工性や耐久性に関する評価を行った研究報告は国際的にみても見当たらない。従来の遮蔽コンクリートに関する研究は原子力関連施設などのマッシュ断面を有するコンクリートを対象としている。高密度コンクリート（モルタル）を遮蔽容器として活用するには、保管時の省スペース化や運搬時の軽量化を考慮し壁厚を薄く成型し、かつ、容器の設置場所や状況にもよるが屋外暴露や

地地下への埋設なども考慮し、強度及び超長期的な耐久性にも留意した開発が課題となる。

本研究では、既往の研究^{1),2)}とは異なる密度 5.0 及び 4.0 g/cm³ を目標値とした高密度モルタルを試作し、これらの基礎的な施工性、力学特性及び耐久性について普通モルタル（密度 2.0 g/cm³）と比較・検討する。また、高レベルに放射能汚染された焼却灰を線源（体積線源）とした遮蔽実験を通し、様々な密度及び板厚を持つ高密度モルタルのγ線遮蔽性能について検討する。

2. 高密度モルタルの試作

2.1 使用材料

表-1 に密度 5.0 及び 4.0 g/cm³ を目標値とした2種類の高密度モルタル（以下、H5.0 及び H4.0）及び比較用である普通密度モルタル（以下、N2.0）計3種のモルタルの使用材料を示す。各モルタルを作製するにあたり、練

表-1 各モルタルの使用材料

モルタルの種類	使用材料			
	結合水	結合材		細骨材
H5.0	水道水	普通	膨張材	鉄粒粉
H4.0		ポルトランド		
N2.0		セメント	—	



写真-1 細骨材として使用した鉄粒粉

*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-2 高密度モルタル及び普通密度モルタルの調査表

	練混ぜ水	結合材		細骨材		混和剤	W/C (%)	
		セメント	膨張材	鉄粒粉				珪砂
				700 μ m	150 μ m			
密度 (g/cm ³)	1.00	3.15	2.94	7.80		2.63	—	
H5.0	単位量 (kg/m ³)	215	750	46	2955	1188	—	19.7
H4.0		301	1050	65	1915	770	—	
N2.0		285	490	—	—		1470	4.9

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、及び H5.0, H4.0 作製時のみに収縮ひび割れ防止のためエトリンナイト系の膨張材を使用した。細骨材について、H5.0 及び H4.0 を作製する場合は一般的な骨材の代替として粒径 0.5 mm 以下の鉄粒粉 (写真-1) を、N2.0 を作製する場合は最大粒径 0.59 mm の珪砂を使用した。また、いずれのモルタルについても、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 調査設計

表-2 に各モルタルの調査表を示す。高密度モルタル H5.0 及び H4.0 の調査において、セメントペーストと密度が大きい鉄粒粉との分離が生じないように留意するため、単位水量を低減し、かつ十分なセメント量を確保することによって粘性を保持させるとともに、高性能 AE 減水剤を適宜加え打設不良が起きないように目標モルタルフロー値 200 mm 程度とした流動性を与えた。また、事前検討として、使用する鉄粒粉の径や混入量をパラメータとした試し練りを繰返し実施し、表中に示す 2 種の鉄粒粉の径 (700 μ m 及び 150 μ m) と混入量を決定した。また、強度及び耐久性向上を図るため水セメント比 W/C = 30 % 以下に抑えるよう計画した。以上から作製した高密度モルタルのモルタルフロー値 (JIS R 5201) 及び空気量はそれぞれ、H5.0 が 210mm 及び 3.3%, H4.0 が 180mm 及び 2.8% であった。また、 ϕ 50 x 100 mm の軽量型枠を用いて測定したフレッシュ時の単位容積質量はそれぞれ、H5.0 が 5.00 g/cm³ (3 体の標準偏差 0.02 g/cm³), H4.0 が 4.03 g/cm³ (0.06 g/cm³) であった。

普通モルタル N2.0 については、一般的な 1 : 3 モルタルとして作製し、水セメント比 W/C = 60 % 程度に作製し、フレッシュ時の単位容積質量は 2.02 g/cm³ であった。

以上 3 種のモルタルを用いて、後述する各供試体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 $^{\circ}$ C, 80%(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、同室内で所定の期間 (7 日または 28 日間) 養生した。材

齢 28 日における各モルタルの密度は、H5.0 が 4.94g/cm³, H4.0 が 3.97g/cm³, N2.0 が 1.97g/cm³ であった。

3. 高密度モルタルの基礎的物性及び耐久性評価

3.1 硬化後供試体の骨材分離確認試験

高密度モルタルの硬化過程時に骨材として使用した鉄粒粉が供試体底面に沈降せず、全断面にわたって一様に分布されていることを確認する必要がある。よって、 ϕ 50 x 200 mm 供試体を用いて骨材分離の有無を確認する試験を行った。図-1 に試験方法概要を示す。はじめに、材齢 7 日時における供試体の密度を計測した。次に、図に示すように供試体長辺方向を供試体の打設面から試験片 A~D の 4 つ (各 ϕ 50 x 50 mm) に切断し、それぞれ

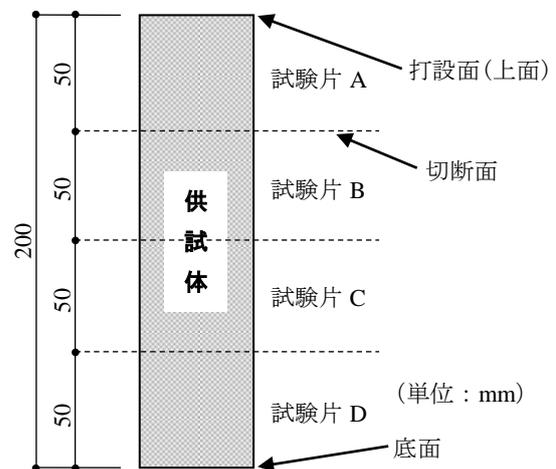


図-1 骨材分離試験方法概要

表-3 骨材分離試験供試体の密度測定結果

試験片種類	密度 (g/cm ³)			
	比重 5.0		比重 4.0	
切断前	4.95		4.03	
試験片 A	4.96	平均 : 4.95	3.96	平均 : 3.99
試験片 B	4.90		4.01	
試験片 C	5.01	標準偏差 : 0.05	3.98	標準偏差 : 0.03
試験片 D	4.92		4.02	

の寸法及び重量を計測することで密度を算出した。得られた密度のばらつきから鉄粒粉の分離の有無を評価した。

表-3 に骨材分離試験結果として、各供試体の密度測定結果を示す。H5.0の供試体において、切断前の密度4.95 g/cm³に対し、切断された4つの試験片A~Dの密度の平均値も4.95 g/cm³で同値である。加えて、標準偏差0.05 g/cm³と試験片A~Dのばらつきも1%程度と小さい。よって、本実験で普通骨材の代替として使用した鉄粒粉は、モルタル中に一様に分散され、硬化過程における骨材分離は生じなかったと判断できる。H4.0の供試体も同様に、骨材分離は生じていないと評価できる。

3.2 力学特性

高密度モルタルの力学的特性を把握するため、φ 50 x 100 mm 供試体を用い、材齢7及び28日における圧縮強度をJIS A 1108に準じ、材齢28日における割裂引張強度をJIS A 1113に準じて測定した。

表-4に材齢7及び28日における各モルタル供試体の圧縮強度及び割裂引張試験結果一覧を示す。供試体数は、材齢7及び28日時ともに3体とし、表中には3体の平均値及び標準偏差を示している。高密度モルタルの圧縮強度は、材齢7日におけるH5.0の平均値が44.4 MPa、H4.0の平均値が50.5 MPaであり、個別別のばらつきが10%以上と比較的大きいものの、ほぼ同等の強度を示した。材齢28日におけるH5.0の平均値が71.5 MPa、H4.0供試体の平均値が71.0 MPaであり、材齢7日に比べ差が小さく、個別別のばらつきも10%以下となったため、材齢28日でセメント水和反応が安定したと推察できる。また、H5.0及びH4.0のW/Cはいずれも27.0%で同値であるため、圧縮強度は一般的な普通モルタル同様水セメント比に依存し、モルタル中における鉄粒粉単位量の影響はほとんど見られない。比較用として作製した比重2.0のモルタル供試体は、材齢7及び28日の圧縮強度がそれぞれ、10.3及び19.1 MPaであった。また、材齢28日供試体のみひずみ度を測定しヤング係数を算出した。3体の平均でH5.0の供試体が51.8 GPa、H4.0の供試体が39.6 GPa及びH2.0が27.6 GPaであった。H5.0とH4.0を比較すると、ヤング係数にはモルタル中の鉄粒粉単位量の影響が表れている。各モルタルの割裂引張強度については、密度に比例し強度が増進する傾向が見られる。また、H5.0の割裂試験後の割裂断面を目視により観察したところ、鉄粒粉（写真中の微細な黒い粒）が全断面にわたって配置されていたため、割裂引張試験後の供試体からも、前節で記した骨材分離の発生が無いことを確認した。

3.3 吸水率試験

各モルタルの吸水率を比較するため、寸法40x40x160 mmの供試体を用いて水中浸漬試験を行った。供試体数は各モルタルとも3体ずつとした。はじめに、28日養生

表-4 高密度モルタルの圧縮、割裂引張強度

試験種別	材齢	H5.0	H4.0	N2.0
圧縮強度 (MPa)	7日	44.4 (7.5)	50.5 (8.2)	10.3 (0.2)
	28日	71.5 (3.3)	71.0 (6.1)	19.1 (0.3)
割裂引張強度 (MPa)	28日	5.1 (1.0)	4.0 (0.7)	2.2 (0.3)

※ () 内は標準偏差

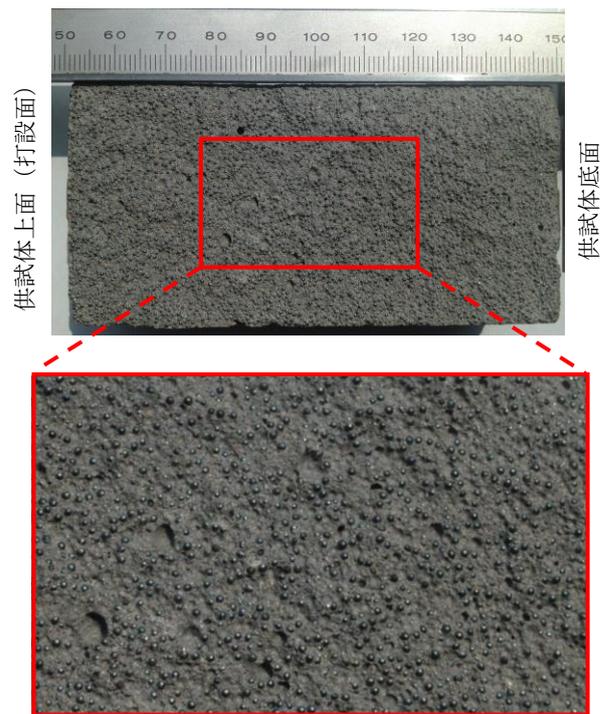


写真-2 割裂引張試験後の割裂断面 (H5.0)

後の供試体を絶乾状態になるまで100℃乾燥器内で乾燥させた。乾燥後、20℃の水中に浸漬し、1時間 (h)、3h、6h、12h、24h後、及び2~7日後の吸水率を測定した。

図-2に吸水率試験結果を示す。モルタルの種類にかかわらず、浸漬期間1日以内に吸水率はほぼ頭打ちとなった。高密度モルタルであるH5.0及びH4.0は1日以降の吸水率がほとんど増加しないことに対し、普通モルタルN2.0は浸漬期間7日目まで徐々に増加した。また、7日時におけるそれぞれの値を比較すると、N2.0の8.44%に対し、H5.0が1/3以下である2.50%、及びH4.0が約1/2である4.32%程度にとどまった。

3.4 促進中性化試験

高密度モルタルには細骨材として鉄粒粉を多量に使用しているため、容器が屋外暴露されることによってその鉄粒粉に錆が発生し、発錆部の体積膨張によるひび割れの発生及び幅拡大が危惧される。遮蔽容器にひび割れが発生した場合、ひび割れ部からγ線が漏洩するため、鉄

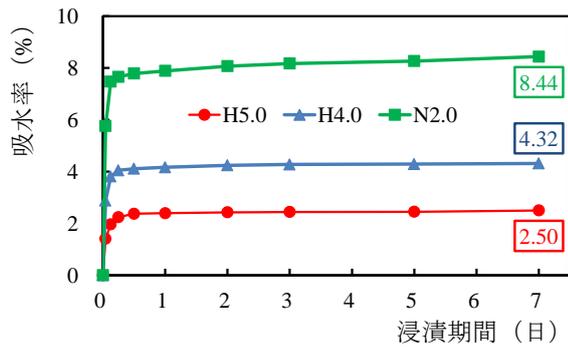


図 - 2 吸水率試験結果

粒粉の発錆に対する耐久性評価を実施する必要がある。そこで、寸法 40 x 40 x 160mm の供試体を用いて各モルタルの促進中性化試験を行い、中性化深さ測定及び高密度モルタル表面及び内部の鉄粒粉の発錆について確認した。実験詳細として、JIS A 1153 に準じ 28 日養生後の供試体の打設面、底面及び両端面をシーリング材でコーティングした後、温度 20 °C、相対湿度 60 %、CO₂濃度 5 % の条件で各モルタルの中性化を促進させた。試験開始後、促進材齢 1、2、4 及び 8 週時において、供試体の長手方向に直交して端部から約 25mm の位置で切断し、切断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し中性化深さを測定した。なお、各測定後の供試体切断面をシーリング材でコーティングし次測定時まで促進中性化試験を継続した。

図-3 に各供試体の中性化深さ測定結果を示す。促進材齢 1 週目からそれぞれの差が明確に表れている。N2.0 の中性化深さは、1 週で 6.3 mm に至り、8 週目では約 16 mm まで達し断面の中心部付近まで中性化が進行した。これに対し、高密度モルタルは H5.0 及び H4.0 いずれにおいても 8 週目まで 0 mm であり、中性化の進展は全く見られず、高い抵抗性が確認された。また、高密度モルタルにおける供試体表面及び切断面における鉄粒粉の錆及び供試体のひび割れの発生は観察されなかった。

4. γ線遮蔽性能実験

モルタル（コンクリート）を用いたγ線遮蔽実験に関する既往の研究では、線源の材料としては比較的扱いやすい密閉された放射性コバルトを点等方線源、線線源といった体系で使用しており^{6)~8)}など、実際の実体系をモデル化した体系的な実験はほとんどない。本章では、現地の汚染物を採取し作製した体積を有する線源（体積線源）を用い、各モルタルのγ線遮蔽性能試験方法及び結果について述べる。

4.1 線源のサンプリング

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廃棄物の焼却処理後に発生した灰を採取した。それを放射能濃度が可能な限り一様になるよう攪拌した。攪拌した汚染灰を円筒形プラスチック

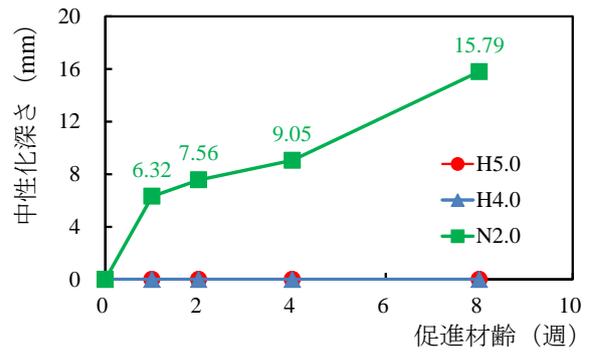


図 - 3 中性化深さ測定結果

容器 (φ 100 x 100mm : 容積 785mL) に詰め、これを本測定における線源として使用した。汚染灰の質量は、237g であった。なお、攪拌後の汚染灰から 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 ¹³⁴Cs : 127.6 ± 2.4Bq/g, ¹³⁷Cs : 247.5 ± 2.0Bq/kg (放射性セシウム全体で 375.1 ± 4.4Bq/g) であった。

4.2 遮蔽容器概要及び測定方法

図-4 及び写真-3 に遮蔽用容器概要を示す。本実験では、図に示す遮蔽容器を H5.0 で 1 体のみ作製し、この容器の蓋板となる遮蔽板を、H5.0、H4.0 及び N2.0 それぞれのモルタルを用い、平面 200 x 200 mm で板厚 50 または 100mm となる各 1 体ずつ計 6 体作製した。

写真-4 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灰を、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、各モルタルで作製した遮蔽板で蓋をし、蓋板の上面中央部において汚染灰から放出されるγ線を、放射線測定機器 (NaI シンチレーションサーベイメーター：富士通 NHC7) を用い

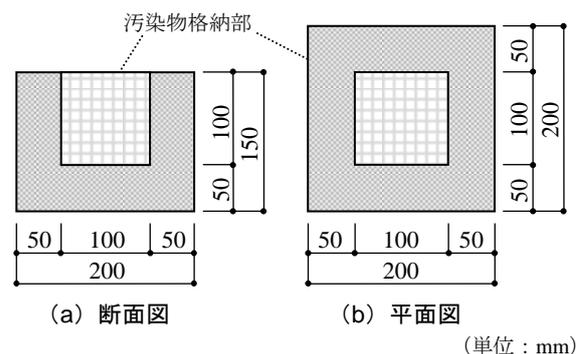


図-4 高密度モルタル容器形状 (単位：mm)



写真-3 高密度モルタル容器

て測定した。遮蔽条件を変更する際は、容器盖板（遮蔽板）のみを取替えて同様に測定した。遮蔽条件は、遮蔽板の密度3パターン（4.94、3.97及び1.97 g/cm³）及び板厚2パターン（50及び100 mm）による計6パターン、並びに、遮蔽無し3パターン（0、50及び100 mm）の計9パターンである。なお、遮蔽無し0 mmとは、遮蔽板を置かず、遮蔽容器内のプラスチック容器上面に測定機器を直接置いて計測したものであり、50及び100 mmは、遮蔽板の代わりに50及び100 mm厚の発泡スチロール板を載せて計測した。各パターンにおける測定回数は10回とし、 γ 線の測定におけるばらつきを評価している。測定時間は1回1分間とし、その間における放射線量積算値を記録した。測定時の留意点として、本測定は福島県内における実験場で行ったため、バッググラウンドからの放射線量（以下、BG値）が存在する。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10 mm厚の鉛のコリメーターを配置するとともに、文献1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。本手法の詳細は文献1を参照されたい。

4.3 実験結果

表-5に実験結果一覧を示し、図-5に γ 線の遮蔽率と遮蔽板の厚さの関係を示す。表中の値は測定回数10回の平均値（及び標準偏差）でBG値の影響を取り除いた後の結果であり、図中の遮蔽率は表中に示す値から得た結果である。各遮蔽板が持つ遮蔽効果の詳細として、H5.0遮蔽板において、板厚50 mmでは遮蔽無し時の γ 線14.5 nSv/min.が4.17 nSv/min.まで低下し遮蔽率は71.2%であった。板厚100 mmでは遮蔽無し時の7.30 nSv/min.が0.66 nSv/min.まで低下し91.0%の γ 線遮蔽率が確認された。H4.0遮蔽板においても板厚50 mmで62.1%、100 mmでは85.8%と高い遮蔽率が確認された。N2.0遮蔽板は、板厚50 mmで34.6%、100 mmで55.9%の遮蔽率がそれぞれ確認された。また、2種類の高密度モルタル遮蔽板と普通モルタル遮蔽板の γ 線遮蔽率を比較すると、その比は1.54~2.06倍であった。既往の研究では、密度4.57 g/cm³の高密度モルタル円筒容器に放射能汚染土を格納した際の γ 線遮蔽率が94.3%（図-5中の*）であり、本実験におけるH5.0（密度4.94 g/cm³）遮蔽板の遮蔽率を上回っている。格納する汚染物の形状、量、汚染レベル、加えて遮蔽容器の形状（箱形、円筒形など）のパラメータとした実験を実施し、体積線源からの γ 線遮蔽率を適切に評価することが今後の課題である。

5. ひび割れ発生による遮蔽性能劣化の検討

高密度モルタル（コンクリート）を遮蔽容器に利用する際、壁（板）厚を薄く成型することが求められると考えられるため、何らかの内の（水和収縮など）、外的（運

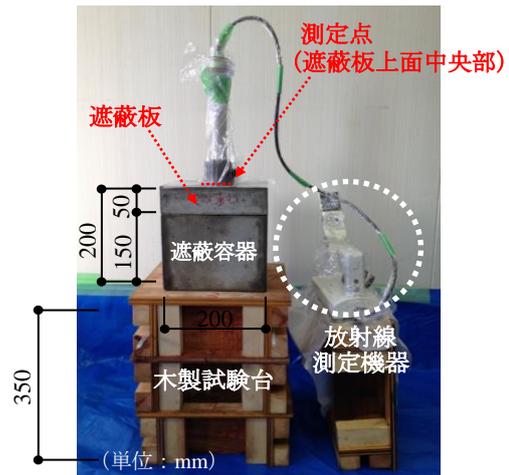


写真-4 γ 線遮蔽性能実験状況

表-5 測定結果一覧

遮蔽厚 mm	遮蔽無し nSv/min.	H5.0 nSv/min.	H4.0 nSv/min.	N2.0 nSv/min.
0	45.7 (0.34)	—	—	—
50	14.5 (0.14)	4.17 (0.08)	5.50 (0.12)	9.47 (0.09)
100	7.30 (0.12)	0.66 (0.06)	1.03 (0.05)	3.22 (0.08)

※（ ）内は標準偏差

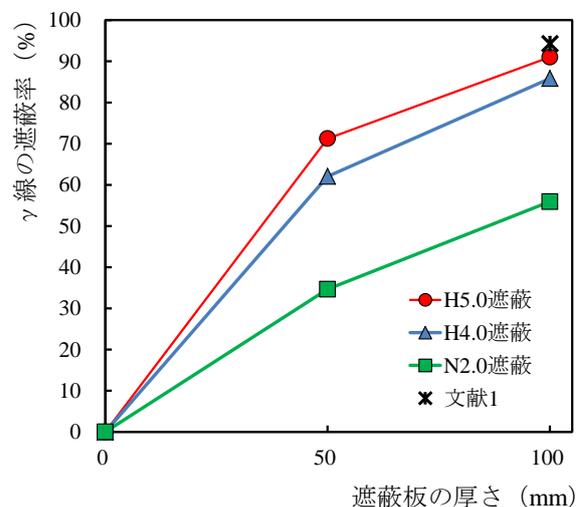


図-5 γ 線の遮蔽率と遮蔽板の厚さの関係

搬時の衝撃など）作用によるひび割れの発生、及び、そのひび割れ部から γ 線が漏れいすることが懸念される。本章では、H5.0で作製したひび割れを持つ遮蔽板を作製し、ひび割れ幅と遮蔽率低下の関係について検討する。

5.1 ひび割れ遮蔽板概要及び実験方法

図-6にH5.0で作製したひび割れ遮蔽板（板厚50 mm）概要を示す。ひび割れの作製方法として、図に示すようひび割れを発生させる方向に切欠きを設け、両切り欠き

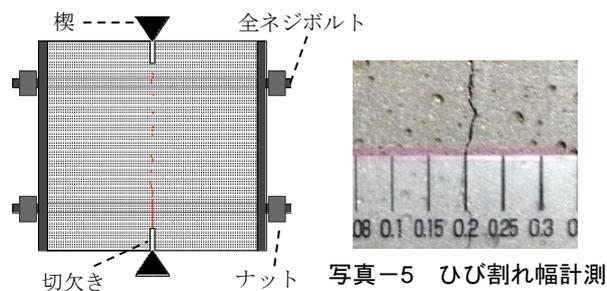


図-6 ひび割れ遮蔽板概要

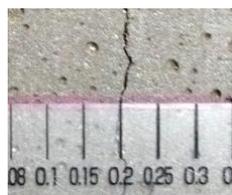


写真-5 ひび割れ幅計測 (遮蔽板中央部)

部に楔を当て圧縮力を加えることで、遮蔽板中央に1本のひび割れを誘発させた。また、モルタル遮蔽板内あらかじめアンボンド処理を施した全ネジボルトを配し、その両端に取付けた4つのナットを開閉することでひび割れ幅を制御した。なお、写真-5に示すようひび割れ幅の計測にはクラックスケールを使用した。

γ 線の測定は前章で記した実験方法と同様である。

5.2 実験結果

図-7に測定結果から得た遮蔽板のひび割れ幅と γ 線遮蔽率の関係を示す。なお、本章に記す遮蔽板は、前章のもの(H5.0)と同調合で作製した別の遮蔽板であるため、ひび割れ作製前の遮蔽率が70.9%で前章の値(71.2%)とわずかに異なる。しかし、これは図-7中のエラーバーのとおり γ 線の測定誤差範囲と認められる。

ひび割れ幅0~1.0mmの範囲(図中の拡大部分)において、遮蔽率の低下にばらつきがみられるものの、幅0mmからの低下幅が比較的大きくなった。ひび割れ幅1mm以降では、遮蔽率が直線的に低下した。幅2mm程度までのひび割れによる遮蔽性能の低下率は5%と大きくないが、実寸大の遮蔽容器では線源の体積が大きくなりそれに連れ線量率も高くなる。よって、微細なひび割れに対しても γ 線の漏えい量としては大きい可能性が危惧される。今後より定量的な評価が必要である。

6. まとめ

モルタルの細骨材として代替した鉄粒粉の粒径や混入量を最適化し調査することで、密度5.0g/cm³を有し、通常の打設工法が可能な流動性を持ちながら骨材分離も生じず、高強度かつ極めて高い耐中性化性能を持つ高密度モルタルの作製が可能である。遮蔽実験によって本研究で作製した高密度モルタルの遮蔽率とひび割れた際の遮蔽率低下を示したが、実験パラメータの拡大とともにより定量的な検討を加える必要がある。

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25年度笹川科学研究助成金による助成の下で実施した。ここに記して謝意を表す。

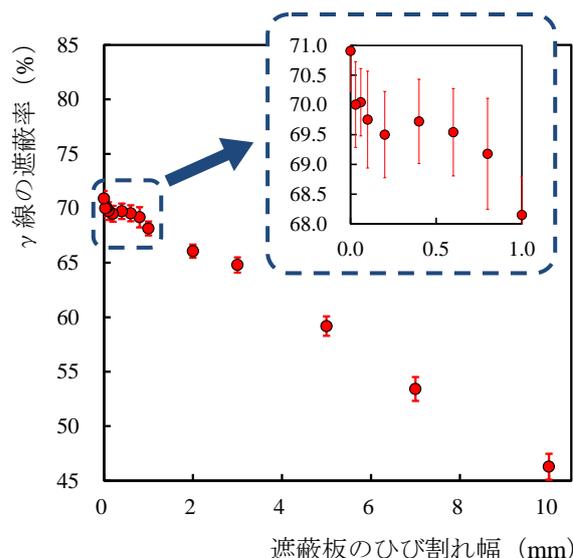


図-7 ひび割れ幅と γ 線遮蔽率の関係

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) Peng, Y. C. and Hwang, C. L.: Development of High Performance and High Strength Heavy Concrete for Radiation Shielding Structures, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, Vol.18 No.1, pp.89-93, Feb. 2011.
- 4) Mortazavi, S. M. J., et al.: High-Performance Heavy Concrete as a Multi-Purpose Shield, Radiation Protection Dosimetry, Vol.142, No.2-4, pp.120-124, Oct. 2010.
- 5) 中根 淳, ほか: 原子力施設用重量コンクリートに関する研究(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, 構造I, pp.1605-1608, 1992.1
- 6) 瀧口 克己, ほか: ひび割れが生じたコンクリート板のガンマ線遮蔽能力に関する実験研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp.1119-1124, 2009.7
- 7) Shirayama, K.: Properties of Radiation Shielding Concrete, American Concrete Institute, Journal Proceedings, Vol.60, No.2, pp.261-280, Feb. 1963.
- 8) 竹村 立史, ほか: 重量コンクリートの施工と遮蔽に関する実験, 日本建築学会論文報告集, 第66巻, 第1号, pp.153-156, 1960.1