

高性能放射線遮蔽コンクリート容器の開発と実証実験

藤 倉 裕 介 木 村 健 一 *¹
ハリーク サンジエイ *² 鈴 木 裕 介 *³
李 有 震 *³ 荒 木 慶 一 *³

概 要

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本に大きな惨状をもたらした。またその後、福島県で発生した原発事故は、現在でも多くの問題を引き起こしている。そのような中、福島県内の住民の安全・安心な暮らしと直接関わる放射線汚染土砂の問題に対して、「建築学」、「土木工学」、「コンクリート工学」、「原子力工学」の立場から対策を検討する目的で、著者らは一般社団法人構造技術研究会・遮蔽コンクリートポッド研究委員会を 2011 年 7 月に立ち上げ活動を行ってきた。本稿では、超高密度コンクリートおよび再生コンクリートを用いて新たに開発した 2 種類のコンクリート遮蔽容器の概要について紹介するとともに現地土砂の汚染程度の評価および容器の遮蔽性能の実証実験の結果について報告する。

Development of high performance radiation shielding containers for contaminated soil in Fukushima

Abstract

The Tohoku-Pacific Ocean Earthquake of March 11, 2011 brought catastrophic damage to East Japan. Following the earthquake a nuclear accident occurred in Fukushima Prefecture, which has caused further, still ongoing problems. Under these circumstances, to ensure the safety and security of residents living in Fukushima in the presence of radioactively contaminated soils, we have discussed measures in a research committee that has been launched by experts on "Architecture", "Civil Engineering", "Concrete Materials" and "Nuclear Engineering". This report presents an overview of the two types of concrete shielding containers developed using very high density concrete and recycled concrete, and experiments to verify the shielding performance of the containers with the local contaminated soil.

キーワード： 遮蔽コンクリート、放射性セシウム、
汚染土砂、超高密度コンクリート、
再生コンクリート

*1 K-Tech（兼（株）フジタ）
*2 日本大学工学部建築学科
*3 京都大学工学研究科建築学専攻

§1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本に大きな惨状をもたらした。またその後、福島県で発生した原子力発電所事故は、現在でも多くの問題を引き起こしている。その中でも、原発事故で飛散した放射性物質により汚染された土砂の処理は非常に深刻な問題である。現在、高圧洗浄機を用いた放射性物質の洗い流しや表面土砂の剥取り、汚染土砂の地中埋設や仮置きなどの除染作業が進められているが、非常に大きな課題を残しているのが現状である。

そのような中、福島県内の汚染土問題について、「建築学」、「土木工学」、「コンクリート工学」、「原子力工学」の立場から対策を検討する目的で、著者らは一般社団法人構造技術研究会・遮蔽コンクリートポッド研究委員会を 2011 年 7 月に立ち上げ活動を行ってきた。2011 年 10 月には福島県郡山市の日本大学工学部においてシンポジウムを開催し、コンクリート製容器を活用するアイデアを紹介するとともに地域住民とのディスカッションを実施した¹⁾。その後、現地土砂の汚染程度の評価を行い、汚染土砂を格納するために 2 種類のコンクリート製の放射線遮蔽容器を開発し、現地の汚染土砂を用いた実証実験を行い遮蔽性能の評価を実施した。そして、土砂や廃棄物の汚染程度に応じた最適な容器の材料や形状を選択するとともに放射線量の低減効果に関するシミュレーションシステム(K.POD)を開発した²⁾。本稿では、コンクリート製の遮蔽容器の開発および実証実験の概要について報告するものである。

§2. 遮蔽コンクリートに関する既往の研究

コンクリートは、現地で型枠を組み立てれば、どのような形状の構造体でも製作が可能であり、かつ比較的安価に供給可能であるため、放射線を遮蔽するための材料としてもこれまでに多く活用されてきた。コンクリートによる放射線遮蔽に関する既往の研究としては、原子力発電所で使用されるコンクリートあるいは原子力発電所から排出される放射性廃棄物処理容器に使われる材料を主な対象とされてきた。例えば、構造物又は放射性廃棄物処理用容器に使用するコンクリートの耐久性評価^{3)~5)}、遮蔽性能を高めるための高密度化の検討⁶⁾といった報告があり、遮蔽コンクリートの設計手法は確立され、実用化も進んでいるといえる。また、放射線に曝されるとコンクリート自体が放射化し放射性廃棄物となってしまうが、これを構成材料の段階で防ぐことが可能な低放射化コンクリート^{4) 7)}についての技術開発なども挙げられる。しかし、これらの研究における遮蔽検討では、放射性核種として放射性コバルト(以下、⁶⁰Co)を使用することが

ほとんどであり、今回の原発事故で問題となっている放射性セシウム(¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs)を使用し、それを線源としたコンクリートの遮蔽実験及び遮蔽解析の報告例は著者らの知るところでは無い。また、原発事故に伴って発生した汚染土や除染物に含まれる放射性物質を定量的に分析した上で、現地の汚染土を直接用いてコンクリートによる放射線遮蔽効果を科学的に実証した研究例はほとんど存在しない。そのため、検証実験の実施、得られた実験データの公表やデータベースの構築は、学術的意義および実用性の両面から見て非常に価値が高いものと位置づけられる。

§3. 汚染土砂の評価とサンプリング

汚染土砂を格納する容器の設計および容器を作製後に行う実験に使用するため、現地汚染土砂のサンプリングを行った。サンプリングは福島県内の異なる 4 ヶ所において 20kg 程度ずつ土砂を採取し、ハンディータイプの小型放射線線量計を用いてそれぞれの土砂から発するおおよその放射線量を測定した。測定結果から、汚染濃度の高低により土砂を 2 種類に分け、γ 線放出量が一樣になるよう攪拌を行った。その後、2 種類の汚染土砂から 50g ずつ、72 サンプルをそれぞれプラスチック製の専用容器に採取し、ゲルマニウム検出器を用いて汚染土砂に付着する主要な放射性核種である ¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs による放射能汚染濃度を測定した。現地土砂のサンプリングは 2011 年 12 月に実施しており、半減期が約 2 年の ¹³⁴Cs では、3 月 11 日当初より減衰した値を示すこととなる。測定の結果、土砂の汚染濃度は、¹³⁴Cs で 31.4Bq/g、¹³⁷Cs で 48.0Bq/g であり、この値を用いてコンクリート容器の設計と遮蔽実験の評価を行った。

§4. コンクリート製遮蔽容器の製作

4.1 遮蔽コンクリートの材料、配合

本研究では、以下の 2 種類のコンクリートを用いて遮蔽容器の作製を行った。一般に、遮蔽体の密度が高いほど、放射線に対して高い遮蔽性能を有することが知られている。そこで、1 つの容器については可能な限り高密度なコンクリートを用いることを目的とした。重量コンクリートに関する既往の研究では、密度が 4.0~6.5(g/cm³)程度のものが報告されているが⁸⁾、プレパクト工法で適用されているものも多い。本検討では、密度が 5.0(g/cm³)程度で型枠に打込みが可能で、材料分離が少なく良好なフレッシュ性状を有する配合を検討した。高密度コンクリートの配合については、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、収縮ひび割れ対策として膨張材を使用した。骨材としては粒径の異なる 2 種

類の市販されている鉄球を組み合わせ使用した。写真 1 に骨材として使用した鉄球を示す。打込み時のフレッシュ性状としてセメントペーストと密度の大きい鉄球との分離が生じないよう、十分な単位セメント量を確保するとともに高性能減水剤を使用して単位水量を低減し、ペーストに十分な粘性を有するようにした。練混ぜ直後の密度(単位体積重量)は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円筒容器を使用して計測し、 $4.7 (\text{g}/\text{cm}^3)$ であることを確認した。

もう一方のコンクリートについては、普通コンクリートと同等の密度($2.1 \sim 2.3 (\text{g}/\text{cm}^3)$)を有するものとし、今回の震災で発生したガレキ、コンクリートガラから採取した再生骨材を用い、再生コンクリートとすることを特徴とした。再生コンクリートの配合については、結合材に普通ポルトランドセメントおよびフライアッシュを使用した。細骨材としては上山市産の砕砂を使用し、粗骨材としてはコンクリートガラから再生した再生骨材を使用した。写真 2 に再生骨材を示す。コンクリートガラは震災により宮城県内で発生したものから再利用したものであり、事前にゲルマニウム検出器を用いて測定し、放射性物質による汚染がないことを確認した上で使用している。



写真 1 骨材として使用した鉄球



写真 2 再生骨材

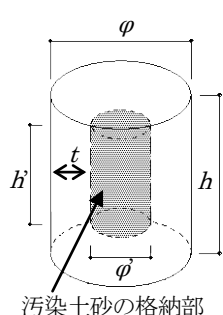
4.2 コンクリート容器の作製

前章で評価した現地汚染土砂の放射線量に基づき、検証実験用の容器を製作した。検証実験は福島県内のバックグラウンドの放射線量の比較的低い室内で実施することとし、容器の運搬が可能で、かつ容器内にある程度の量の汚染土砂を格納可能な大きさとなるように容器の大きさを検討した。表 1 に容器の形状および寸法を示す。容器の形状は、容器本体及び容器上部を閉塞するための蓋板で構成された円筒型とし、容器の中央部には汚染土を格納するための円筒型の空洞($\phi 300\text{mm} \times \text{高さ } H400, V=0.028\text{m}^3$)を設けるようにしてある。

写真 3 に 2 種類の円筒容器の外観を示す。容器本体と蓋板の接合面は段差が設けられ茶筒形状となっており、接合面における γ 線の漏えいやバックグラウンドの影響を防止した構造としている。2 種類の容器はともに同様の大きさの空洞を有するものとし、遮蔽計算の結果から、超高密度コンクリートでは壁厚を全方向 100mm とし、再生コンクリートでは壁厚を 200mm としている。超高密度コンクリート容器は、体積が 0.12m^3 (汚染土格納部分を含む)、質量が 420kg である。再生コンクリート容器は、体積が 0.31m^3 、質量が 600kg である。汚染土砂を格納する空洞が同一の場合、容器の形状によっても異なるが、密度が大きな超高密度コンクリートを使用した際の方が、容器の重量を大幅に低減できることになる。

表 1 格納容器寸法

寸法	超高密度 コンクリート	再生 コンクリート
t	100	200
φ	500	700
h	600	800
φ'	300	
h'	400	



汚染土砂の格納部

(単位:mm)

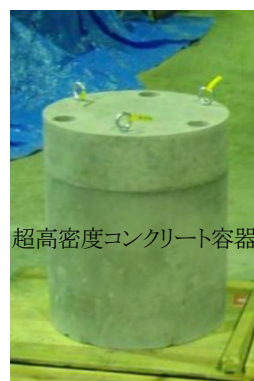


写真 3 コンクリート製格納容器概要

§5. 実証実験の概要

5.1 実験の方法

実証実験のセッティングの概要を図1に示す。容器内の空洞の大きさと同様の直径 30cm 高さ 40cm の薄いプラスチック製容器に汚染土を入れ、まず汚染土のみについて図1の要領で汚染土表面からの距離 L を変化させながら放射線量を計測した。次に写真 3 に示す二種類のコンクリ容器内部に格納し、同様に距離 L を変化させて放射線量を測定し、遮蔽容器の遮蔽性能を評価した。測定にあたり、いずれのパターンにおいても地上 (GL) から汚染土の高さ方向中心点までの距離を一定 (本研究ではその距離 450mm) に保つようにし、木製パレットや調整用の木材を用いて高さの調整を行った。放射線量の計測については、放射線測定機器 (Survey Instrument Model 5000) を用いて測定した。測定時間は、すべての測定点とも 1 回 3 分間とし、その間の放射線量の積算値を記録した。測定回数は、測定結果のばらつきを評価するため計 8 回程度とした 1 時間 (h) あたりの放射線量として換算した。なお、バックグラウンドの放射線量の影響については、各測定点のすべてにおいて、汚染土を容器に格納していない状態の放射線量を別途同様に測定し、それを汚染土砂の無い状態として実験結果に反映させることで評価を行った。

遮蔽容器内部に入れた土砂の重量は 22.5kg であり、3章で示したように事前に採取した汚染土砂の放射線測定結果より、容器内の汚染土砂にはセシウム 134 (^{134}Cs) が $31.4\text{Bq/g} \times 22500\text{g} = 706500\text{Bq}$ 、セシウム 137 (^{137}Cs) が $48\text{Bq/g} \times 22500\text{g} = 1080000\text{Bq}$ のガンマ線量が含まれることとなる。なお、放射線量の測定は 2012 年 3 月上旬に行った。検証実験を行った室内 (福島県内の PC 工場倉

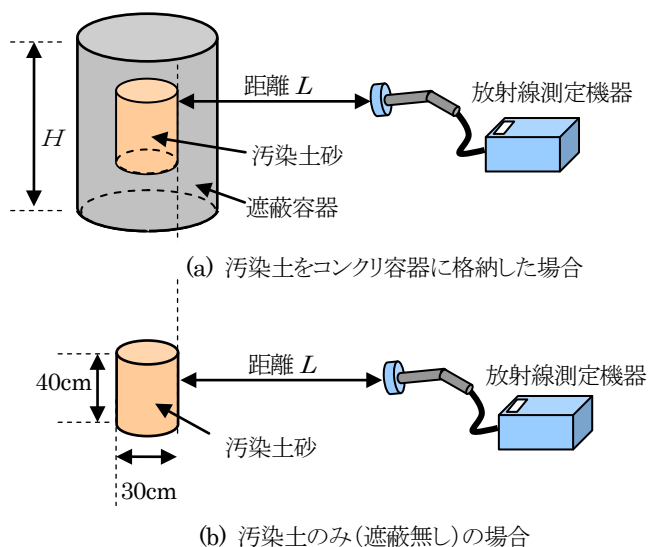


図1 実証実験の概要

庫) におけるバックグラウンドの放射線量は $0.5\mu\text{Sv/h}$ 程度であった。

検証実験の際の汚染土砂の格納状況を写真 4 に示し、放射線測定機器を用いた測定状況を写真 5、6 に示す。写真 5 には汚染土砂のみを評価した際の状況を示し、写真 6 にはコンクリート容器を用いた場合の測定の状況を示す。

5.2 実証実験の結果と評価

測定結果を表 2 に示す。測定結果より、超重量コンクリ容器 (直径 $\phi=50\text{cm}$ 、高さ $H=60\text{cm}$ 、厚さ $t=10\text{cm}$ 、重さ 420kg) に土砂を格納することにより容器表面 (汚染土表



写真4 汚染土砂の格納状況



写真5 測定状況(汚染土のみの測定の場合)



写真6 測定状況(コンクリート内に格納した場合)

表 2 実験での放射線量の実測結果(平均値を記載)

単位: $\mu\text{Sv/h}$

汚染土からの距離 $L(\text{cm})$	10	20	30
汚染土のみ(遮蔽無し)	<u>3.15</u>	<u>1.71</u>	1.07
超重量コンクリ容器(厚さ $t=10\text{cm}$)	<u>0.18</u>	0.14	0.07
再生コンクリ容器(厚さ $t=20\text{cm}$)	—	<u>0.15</u>	0.09

面からの距離 L が 10cm)において $1/17$ に放射線量が減少、再生コンクリ容器(直径 $\phi=70\text{cm}$ 、高さ $H=80\text{cm}$ 、厚さ $t=20\text{cm}$ 、重さ 600kg)では同様に容器表面(汚染土表面からの距離 L が 20cm)において $1/11$ に放射線量が減少していることが分かる。超重量コンクリートでは、再生コンクリートと比較して厚さが $1/2$ であるが、遮蔽性能が非常に高いことが分かる。図 2 には汚染土からの距離と放射線量の関係として表 2 をまとめたものを示す。このように汚染土砂から離れることで空間の線量も低減するが、コンクリート容器で囲み遮蔽することで大幅に放射線を遮蔽できることが分かる。

次に、ガンマ線遮蔽の理論的な計算を行い実証実験との整合性を検証した。理論計算には MCNP と呼ばれるモンテカルロ法の放射線解析コードを用いた。図 2 および図 3 に解析結果を示す。実験における実測値との比較では、再生コンクリートの表面や遮蔽無しの場合の 20、30cm(汚染土表面からの距離 L)あたりは、比較的良好一致するが、線源に近づくにつれて解析値の方が低くなることが分かる。また、遮蔽がない汚染土のみの場合との比較で考えると、概ね一致(理論計算と実測の誤差が 1 割程度)していることが分かる。また、再生コンクリートの厚さを 10、30、40、50、60cm、超重量コンクリで 20、30cm まで計算した結果も示す(側面方向及び鉛直方向でそれぞれ汚染土表面からの距離)。この結果から、超重量コンクリートは再生コンクリートに比べて厚さが 20cm の場合は 27 倍、30cm の場合は 120 倍の遮蔽能力があることが分かる。今後、密度の異なるコンクリート容器での検討、放射線量の異なる汚染土砂を用いた実験を行い、データベースを構築することでより精度の高いシミュレーションシステムが構築できるものと考えられる。また、土砂や廃棄物の汚染状態に応じて、最適な容器の材料や厚さを選択することが可能となり、コンクリートで格納する際の設計・施工支援の手法が確立できるものと考えられる。

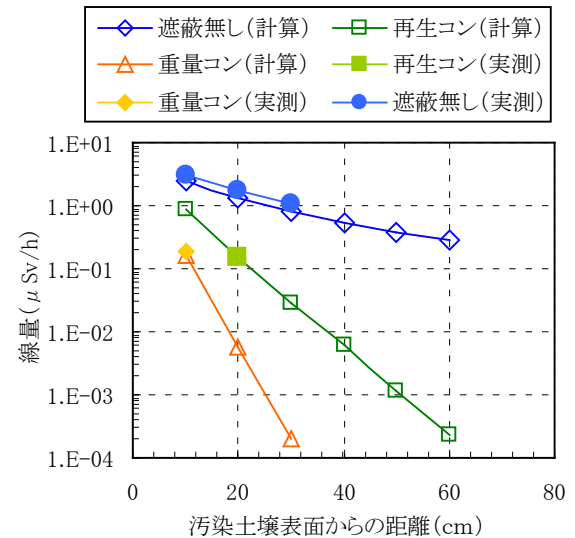


図 2 距離と線量の関係

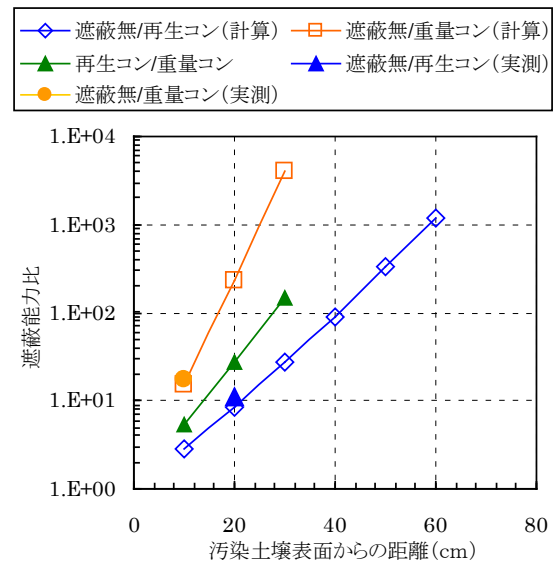


図 3 距離と遮蔽能力比の関係

§6. おわりに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本に大きな惨状をもたらした。またその後、福島県で発生した原発事故は、現在でも多くの問題を引き起こしている。そのような中、福島県内の住民の安全・安心な暮らしと直接関わる放射線汚染土砂の問題に対して、「建築学」、「土木工学」、「コンクリート工学」、「原子力工学」の立場から対策を検討する目的で、著者らは一般社団法人構造技術研究会・遮蔽コンクリートポッド研究委員会を 2011 年 7 月に立ち上げ活動を行ってきた。また、2 種類のコンクリート遮蔽容器を開発し、現地土砂の汚染程度の評価から、容器の遮蔽性能の実証実験を実施し、その概要を報告した。今回、コンクリート容器に使用した再生コンクリートは東日本大震災で大量発生したガレキの中でも大きなウエイトを占めるコンクリートガラ再利用技術として期待できるものと考えられる。また、通常の 2 倍以上の比重を持つ超重量コンクリートはコスト面での検討は必要であるが、従来の普通コンクリートと比較して非常に高い遮蔽性能を有し、壁厚を薄くできるため大幅な省スペース化と重量低減を実現できるものである。このような現地汚染土砂を用いた実証実験、シミュレーションシステムの開発は国内外で初の試みであり、学術的意義と実用性の両面から見て非常に価値が高いものと考ええる。

このような研究活動は事業に迅速に結びつくものではないが、実データと検証による学術的な足固めと捉えることが必要であり、現地の放射線対策の際の重要なデータベースとなるものである。今後、より精度の高い評価手法の構築を検討するとともに、原子力工学、建築・土木技術とコラボレーションすることで、安全・安心な街づくりのための提案技術として確立できればと考える。

参考文献

- 1) Pareek Sanjey、荒木慶一、藤倉裕介：公開シンポジウム、「郡山から大震災と原発災害の今後を考える」報告書、日本大学工学部、2011.10
- 2) セメント新聞社編集部：放射能汚染物保管用に K.POD システムを開発、一京都大学、超重量コンクリートポッドなども開発し性能実証一、月刊コンクリートテクノ、Vol.31、No.6、pp.69-73、2012
- 3) 谷口 幸秀、長尾 和明、川本 啓介、関根 範雄、宮住 勝彦、真井 邦晃、黒岩 秀介：遮蔽コンクリートの乾燥単位容積質量試験方法に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、材料施工、pp.791-792、2010.7
- 4) 藤倉 裕介、西田 浩和、片寄 哲務、木村 健一：混和剤を用いた低放射化コンクリートの耐久性に関する検討、コ

ンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.1、2008.6

- 5) 白山 和久、田中 五郎、菊池通：遮蔽用コンクリートおよびモルタルの性能(材料・施工)、日本建築学会論文報告集、第 57 号、第 1 巻、pp.113-116、1957.7
- 6) 白山 和久：遮蔽用重量コンクリートについて、建築雑誌、第 72 巻、第 851 号、pp.53-54、1957.10
- 7) 西田 浩和、金野 正晴、木村 健一、片寄 哲務、藤倉 裕介：超低放射化重量コンクリートの基礎的検討、日本建築学会学術講演梗概集、A-1、材料施工、pp.269-270、2006.7

ひとこと

東日本大震災後、多くの技術者は言い知れぬ無力感を感じたかと思います。自分の専門を生かしながらも何か貢献できないかと考える中、パリーク先生と荒木先生の呼びかけで始まったのがこの活動でした。今後もコンクリート分野において、実データに基づく学術的足固めをしっかり行っていきたいと考えます。



藤倉 裕介