

災害廃棄物のコンクリートがれきの再生コンクリートとしての再利用に関する検討

(株)奥村組 正会員 ○森本 克秀
(株)奥村組 正会員 三澤 孝史
(株)奥村組 正会員 廣中 哲也

1. まえがき

東日本大震災から3年以上が経過し、岩手県や宮城県では復旧から復興へと移行しており、処分された災害廃棄物の再利用が試みられている。

その一つとして震災により発生したコンクリート災害廃棄物（以下、コンクリートがれき、と記す）を、当社が開発し、実績のある再生コンクリート（リ・バースコンクリート）の骨材として再利用することを検討している。今回、港湾構造物（港湾用ブロック）に、コンクリートがれきを用いた再生コンクリートの適用を検討した。適用するに当たり、配合、施工性、出来形、および品質（強度、密度）を確認する目的で港湾構造物（ケーソン）を解体したコンクリートがれきを用いて実証実験を行った。

今回の実証実験は、国土交通省東北地方整備局が震災がれきを活用する民間技術を公募した「震災がれき等を港湾建設資材として活用する技術」に採用され、実施した。本報では、港湾構造物へ適用可能であることを検証したので報告する。

一方、福島県では震災に伴う原発事故により除染作業が優先されているため、他県に比べ復興が遅れている。今後、復興に向けて災害廃棄物の処理を進めていく過程において、除染特別区域等では放射性物質に汚染されたコンクリートが大量に発生する可能性があり、これらの処分地の確保や処分方法が課題となっている。「放射性物質汚染対処特別措置法」に基づく基本方針においては、「安全性を確保しつつ、例えば、コンクリートくずを被災地の復興のための資材として活用する等の廃棄物の再生利用を図ることとする」とされており、特に災害廃棄物の不燃物を念頭に、積極的に再生利用を図るべきことが推奨されている¹⁾。この主旨に沿って、放射性物質により汚染されたコンクリートがれきを再生コンクリートの骨材として再利用することは、復興の進捗向上に寄与すると考える。

放射性物質により汚染されたコンクリートがれきを安全に管理しながら再利用するには、再生コンクリートを製造する際の放射線量を把握しておく必要がある。そこで、再生コンクリートの製造過程における放射線量の変化を把握する目的で、除染特別区域である福島県双葉郡葛尾村において、放射性物質に汚染したコンクリート製品を原料とした再生コンクリートによりコンクリートブロックを製作する実験を行った。また、放射線量の測定結果との比較により、数値解析による放射線量の推定値の妥当性を検討した。

さらに、上記の2つの実験で得た再生コンクリートの配合や放射線量に関する知見より、被災地におけるコンクリートがれきの有効利用の実現性を検証した。

2. リ・バースコンクリートの概要

2.1 リ・バースコンクリートとは

リ・バースコンクリート（Re-birth Concrete）は、解体コンクリートが発生した現場で破砕機により破砕後、そのまま破砕物全量を骨材とし、水、セメント、混和剤とで練り混ぜて製造する現場再生コンクリートである。その特徴を活かして、東日本大震災で大量に発生した解体コンクリートを遠隔地の処分場等で処分すること

キーワード 再生コンクリート、解体、スラグ、放射性物質、放射線量、有効利用

連絡先 〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1 (株)奥村組 東日本支社 環境技術部 TEL03-5427-8536

なく、復旧・復興現場で直接、再生コンクリートとして有効活用することが考えられる。また、天然骨材を使用したコンクリートの供給が不足している地域において、復旧・復興に有効な対策となる。

本技術は 2001 年に開発されて以来、設置・撤去が簡易にできる専用製造装置を使用して、国土交通省を中心に 27 件の工事で採用され、11,800m³の製造実績がある。

2.2 製造方法

開発時およびその後の検証において、比較的大きな粒径（直径 20cm 程度）の塊で解体コンクリートを保管し、コンクリートの製造直前に 1 バッチごとに破碎することで、破碎物の含水率と粒度分布の管理が容易になるという知見を得ている^{2) 3)}。

この知見を踏まえ、リ・バースコンクリートの製造方法として、図-1 に示す製造フローを採用した。なお、この過程では天然骨材を新たに使用していない⁴⁾。

- ① 油圧ブレーカー等で 20~30cm に 1 次破碎した解体コンクリートを専用製造装置へ投入
- ② 専用装置内のクラッシャーで 40mm 以下に破碎
- ③ 破碎物内の鉄筋を磁選機で取り除きながら、ベルトコンベアで運搬
- ④ 計量ホッパーで 1 バッチごとに破碎物を計量
- ⑤ 同時にセメント、水、混和剤も計量し、ミキサーに投入
- ⑥ ミキサーで練り混ぜ
- ⑦ 運搬車両に排出して打設場所（⑧）まで運搬

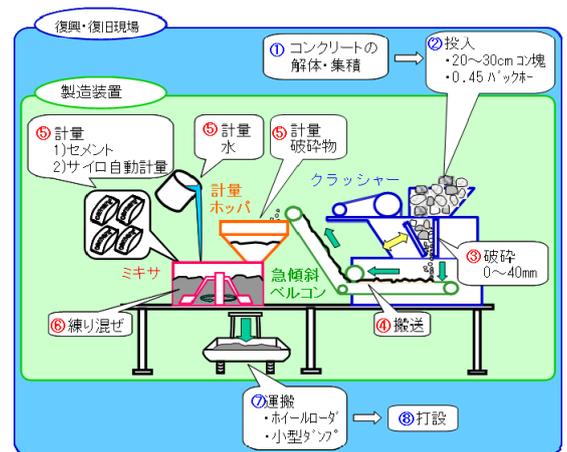


図-1 製造フロー

3. リ・バースコンクリートの港湾構造物への適用に関する実証実験

3.1 実験概要

a. 目的

リ・バースコンクリートが港湾構造物（港湾用ブロック）へ適用できることを確認するために、港湾構造物（ケーソン）を解体したコンクリートがれきと副産物細骨材を併用したリ・バースコンクリートによる、港湾構造物の製造実験を行った。本実験での港湾用ブロックに用いられるコンクリートの要求性能は、スランプ 8±2.5cm、空気量 4.5±1.5%、密度 2.3g/cm³ 以上、および圧縮強度 18N/mm² 以上である。しかし、通常の製造方法では骨材に JIS 規格のコンクリート用骨材（密度 2.5g/cm³ 以上）の代わりに、コンクリートがれき（密度 2.3g/cm³ 程度）を使用するため、リ・バースコンクリートの密度は、2.1 g/cm³ 程度と小さくなる。

そこで、コンクリートの密度 2.3 g/cm³ 以上を確保するため、密度が大きい JIS 規格のフェロニッケルスラグ細骨材、または銅スラグ細骨材をコンクリートがれきと併用することとした。

b. 実験方法

青森県八戸市河原木 2 号埠頭（八戸港内）において、専用製造装置を用いて解体コンクリートの破碎物と密度の大きい副産物細骨材（フェロニッケルスラグ細骨材、銅スラグ細骨材）を併用したリ・バースコンクリートを製造し、2t 型港湾用ブロックを製作した。要求性能を満足するために、解体コンクリート破碎物に対する副産物細骨材の置換率、単位水量、および



写真-1 材料投入状況



写真-2 打設状況

高性能 AE 減水剤の添加率を変化させて配合を選定し、実機製造したリ・バースコンクリートの品質（密度、強度など）、施工性、および港湾用ブロックの出来形を確認した。

c. 実験における製造手順

実験におけるリ・バースコンクリートの製造手順を以下に述べる。

- ① バックホーで所定量のスラグ細骨材を計量槽に投入したあと、解体コンクリートを製造装置の破砕機部に投入（写真－1 参照）
- ② 自動計量された水、混和剤をミキサーに投入すると同時に袋セメントを投入
- ③ 所定時間の練混ぜの後、製造装置下に待機するペイローダに排出後、小運搬して打設（写真－2 参照）

d. 使用材料および配合

目標密度 2.3 g/cm^3 以上を確保するため、東北地方で入手しやすく密度が大きいフェロニッケルスラグ細骨材と銅スラグ細骨材を採用した。

表－2 にリ・バースコンクリートの配合を示す。コンクリート破砕物の一部を副産物細骨材（フェロニッケルスラグ細骨材、銅スラグ細骨材）で置き換えることで、リ・バースコンクリートの密度が 2.3 g/cm^3 となるように基本配合を設計した。この基本配合をもとに、現場で実機を用いた試験練りを行い、目標スランプとなるように、単位水量、および高性能 AE 減水剤の添加率を変化させて調整し、最終配合を決定した。

3.3 実験結果

a. 使用したコンクリートがれきの物性

解体コンクリートから 2 組 8 本のコアを採取し、圧縮強度と密度を測定した結果を表－3 に示す。

試料 1 の圧縮強度は 45.9 N/mm^2 、密度は 2.37 g/cm^3 、試料 2 は 26.3 N/mm^2 と 2.45 g/cm^3 であった。今回のコンクリートがれきはケーソンを解体したものであり、港湾施設の仕様より、比較的強度の高い試料 1 はケーソン本体のコンクリート、外見より粗骨材寸法が大きく、密度も大きい試料 2 は中詰コンクリートである。

b. フレッシュコンクリートの性状

ブロック製造時に練混ぜ直後の試料を採取してスランプ試験および空気量試験を行った結果を表－4 に示す。この結果より、両配合とも空気量が平均よりも多くなったが、両配合とも所定の範囲（スランプ $8 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、空気量： $4.5 \pm 1.5\%$ ）であることを確認した。特に今回使用したフェロニッケルスラグ細骨材は微粒分を含む

表－1 使用材料の諸元

名称	産地・名称	緒元
解体コンクリート	ケーソン解体物	30cm 程度に小割
セメント	普通ポルトランドセメント	密度： 3.16 g/cm^3
フェロニッケルスラグ細骨材	青森県八戸市	成分 SiO_2, MgO , 密度： 2.94 g/cm^3 , 粗粒率： 2.68
銅スラグ細骨材	福島県いわき市	成分 FeO, SiO_2 , 密度： 3.50 g/cm^3 , 粗粒率： 3.21
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	密度 $1.04 \sim 1.06 \text{ g/cm}^3$

表－2 配合

スラグ種類 Sg	水セメント比 W/C	単位量 (kg/m^3)					
		水 W	セメント C	破砕物 RC	スラグ Sg	高性能 AE 剤 Sp	AE 剤
フェロニッケルスラグ	51.6	155	300	756	1118	1.20 C×0.4%	0
銅スラグ	50.0	150	300	1167	714		0

表－3 採取したコアの強度と密度

N o		1	2	3	4	平均
試料 1	圧縮強度 N/mm^2	47.1	47.1	43.2	46.2	45.9
	密度 g/cm^3	2.355	2.370	2.364	2.376	2.37
試料 2	圧縮強度 N/mm^2	25.0	23.7	28.4	28.0	26.3
	密度 g/cm^3	2.487	2.449	2.412	2.437	2.45

表－4 コンクリートの性状

スラグ種類	スランプ cm	空気量 %	コンクリート温度 $^{\circ}\text{C}$	外気温 $^{\circ}\text{C}$
フェロニッケルスラグ	8.0	5.5	8.0	5.0
銅スラグ	7.5	5.1	9.0	7.0
規定値	8.0 ± 2.5	4.5 ± 1.5	—	—

タイプであったため、空気の連行がやや多くなったと考えられる。

c. 出来形

打設したブロックの脱型後を目視により出来形を確認した結果、両配合ともジャンカやひび割れはなかった。

d. 硬化コンクリートの性状

ブロック打設時に製作した供試体による圧縮強度の結果を図-2に示す。圧縮強度については、フェロニッケル細骨材、および銅スラグ細骨材配合ともほぼ同等で、材齢4週で約 30N/mm^2 であり、所要の圧縮強度(18N/mm^2 以上)を満足している。

コンクリートの密度については、銅スラグ細骨材配合では 2.36g/cm^3 であり、目標密度 2.3g/cm^3 を満足したが、フェロニッケルスラグ細骨材配合では 2.25g/cm^3 となり、目標密度より 0.05g/cm^3 小さかった。

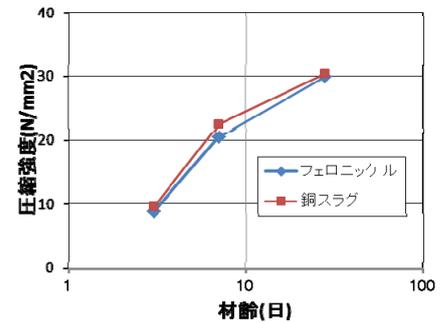


図-4 圧縮強度

3.3 まとめ

以上の実験結果より下記の知見を得た。

- ・コンクリート破砕物と2種類のスラグ細骨材を原料として製造したリ・バースコンクリートはワーカビリティに優れており、打ち込み・締固めは通常の方法で施工でき、2t型港湾用ブロックを製造できることを確認した
- ・圧縮強度は、フェロニッケル細骨材および銅スラグ細骨材配合とも材齢4週で 30N/mm^2 であり所定の強度を有している
- ・銅スラグ細骨材を配合した密度は 2.36g/cm^3 であり、目標密度 2.3g/cm^3 を満足した
- ・フェロニッケルスラグ細骨材を配合した密度は、 2.25g/cm^3 と若干小さくなったため、今後、スラグ細骨材の使用量、および空気量を調整して密度を確保する

4. 放射性物質により汚染されたコンクリートがれきを用いたリ・バースコンクリートとしての再利用実験

4.1 実験概要

a. 目的

放射性物質で汚染されたコンクリートがれきをリ・バースコンクリートとして安全に管理しながら再利用できることを確認するために本実験を行った。以下に主な実験目的を示す。

- ・放射性物質に汚染されたコンクリートがれきを用いてリ・バースコンクリートを製造する過程における放射線量の変化の把握
- ・リ・バースコンクリートで製作したコンクリートブロックの厚さとブロック表面の放射線量の関係の把握
- ・リ・バースコンクリートの放射線量の数値解析の結果と測定結果を比較することにより、数値解析結果の妥当性の確認

b. 実験方法

リ・バースコンクリートの原料としたコンクリート製品は、葛尾村内に存置していた放射性物質により汚染された側溝蓋である。使用した側溝蓋を写真-3に示す。側溝蓋の寸法は、縦 $500\times$ 横 $410\times$ 厚さ 95mm 、重量は約 45kg である。

側溝蓋表面の放射線量は、各面によって差があり、コリメータを用いたNaIシンチレーションサーベイメータによる測定値は $0.10\sim 0.27\mu\text{Sv/h}$ であった。同じく、コリメータを用いたGMサーベイメータによる測定値は約 $900\sim 2000\text{cpm}$



写真-3 側溝蓋



写真-4 小割状況

であった。放射性物質が付着している表側が最も高い線量を示し、5個のブロックの表側の平均値は $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 、1372cpm であった。

側溝蓋をブレーカーで小割（写真－4参照）した後、小型の破砕機（ジョークラッシャー）により 20mm 以下の破砕物とした。破砕物の放射線量を測定すると線量は平均で $0.18 \mu\text{Sv/h}$ 、計数率は 160cpm であった。

c. 配合

リ・バースコンクリートの配合は、実績のある、銅スラグ細骨材を混入したリ・バースコンクリートの配合（表－2）を参考に設定した。基本配合および使用材料を表－5に示す。混練にはパン型ミキサーを用いた。

表－5 配合

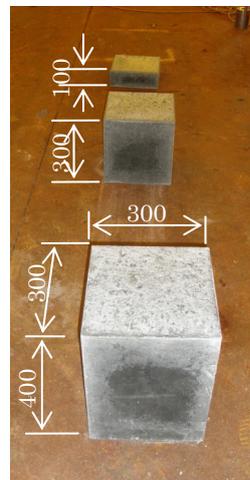
スラグ種類 Sg	水セメント比 W/C	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	コンクリート塊 RC	銅スラグ細骨材 Sg	高性能 AE減水剤 Sp
Cu	50.0	150	300	1167	714	C×0.5%

表－6 放射能濃度・測定結果（単位：Bq/kg）

側溝蓋（破砕後）			リ・バースコンクリート		
Cs-134	CS-137	合計	Cs-134	CS-137	合計
200	540	740	125	325	450

表－7 コンクリートブロック表面の放射線量

	コンクリート・ブロックの厚さ (mm)		
	100	300	400
線量 ($\mu\text{Sv/h}$)	0.08	0.08	0.08
計数率 (cpm)	99	109	104



写真－5 ブロック試験体



写真－6 放射線量の測定状況

d. 試験ケース

写真－5に示すように、縦 $0.3 \times$ 横 0.3m で厚さを 0.1 、 0.3 、 0.4m と変えた3種類のコンクリートブロックを製作した。これらのブロックについて、4週養生後、コンクリート表面の放射線量をコリメータを用い、NaI シンチレーションサーベイメータおよび GM サーベイメータで測定した。

また、打設時に別に供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) を作製し、一軸圧縮強度試験、単位体積重量測定、および Cs-134、Cs-137 の含有量を測定した。

4.2 実験結果

a. 放射能濃度

リ・バースコンクリートの原料とした側溝蓋およびリ・バースコンクリートの放射能濃度の測定結果を表－6に示す。

側溝蓋については、破砕機（ジョークラッシャー）により粒径 20mm 以下に粉砕したものを測定した。リ・バースコンクリートについては、コンクリートブロック打設時に、一軸圧縮強度試験体のモールド ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) に打設して作製したものを、硬化後に粉砕し、検体を採取して測定した。

表－6に示すように、放射能汚染されたコンクリート破砕物に、銅スラグ、セメント、水を添加してリ・バースコンクリートとすることにより、放射能濃度が約 40%低減している。

b. コンクリート厚さと放射線量の関係

厚さを変えて製作した3種類の供試体ブロックについて、表面の放射線量を測定した。測定は、供試体表面の複数個所とした（写真－6参照）。平均値を表－7に示す。

表－7より、コンクリート破砕物の放射線量は前述したように $0.18 \mu\text{Sv/h}$ であるのに対し、破砕物を骨材と

して使用したリ・バースコンクリートのブロック試験体では、 $0.08 \mu\text{Sv/h}$ と半分以下に放射線量が低減することがわかる。

また、コンクリートの厚さが $0.1\sim 0.4\text{m}$ に変わってもコンクリート表面の放射線量は変わらず、計数率もほぼ同じである。これは、リ・バースコンクリート自体が遮蔽効果を持つため、放射性物質を内在するコンクリートが厚くなっても、それに比例しては放射線量が増加しないと考えられる。

4.3 数値シミュレーション

a. 数値シミュレーションの概要

実験と比較するため、図-3の解析モデルを設定し、解析コード: Micro Shield を使用したシミュレーションを行った。Micro Shield は、米国 Grove Software 社により開発された光子/ γ 線遮蔽および被ばく線量評価コードであり、遮蔽材の設計や放射線測定結果からの線源強度の予測、人体への被ばくの最小化等の目的で、米国の新規原子炉の許可申請書等、広く使用されている。

本シミュレーションでは、コンクリート中に放射性セシウム 1000Bq/kg が一様に分布していると仮定して、測定用ブロック表面から $0\sim 2.0\text{m}$ 離れた位置における空間線量を予測した。コンクリートブロックの厚さ B は $0.1, 0.3\text{m}$ とし、リ・バースコンクリートの配合は、実験に用いた供試体と同じく銅スラグ細骨材を添加したものである。

b. シミュレーション結果

シミュレーション結果を図-4、5に示す。コンクリートブロックの厚さが3倍になっても、空間線量は僅かに増加しているのみである。また、コンクリートブロックからの距離が大きくなるほど空間線量は低下し、 0.5m 以降では距離による空間線量の低下割合は小さくなる。このことから、ブロック周辺の空間線量はブロックの厚さにほとんど影響されず、距離減衰の影響が大きいことがわかる。

c. 測定結果との比較

表-6に示したリ・バースコンクリート中の Cs-137 と Cs-134 の各々の放射能濃度と、図-4、5に示すシミュレーションより求めた単位放射能濃度当たりの空間線量（コンクリートブロック表面からの距離： 0.01m ）より、リ・バースコンクリートの空間線量を推定した。これを、表-7に示す測定値と比較した結果を表-8に示す。

推定値では、コンクリートブロックの厚さが 0.1m では $0.063 \mu\text{Sv/h}$ 、 0.3m では $0.073 \mu\text{Sv/h}$ であった。これに対し、測定値では、コンクリートブロックの厚さが 0.1m および 0.3m とも、 $0.08 \mu\text{Sv/h}$ であった。

解析による推定値は概ね、測定値と合致しているが、実験場所の空間線量が $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 程度であったため、測定にはコリメータを使用して他からの空間線量の影響

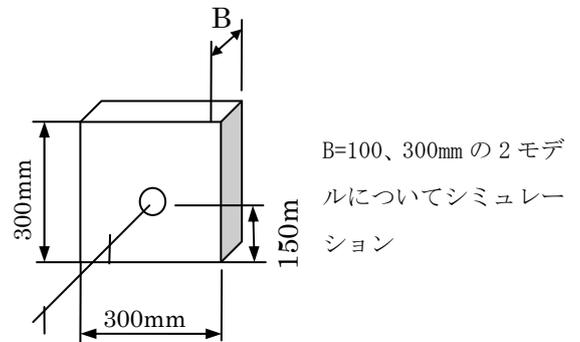


図-3 解析モデル

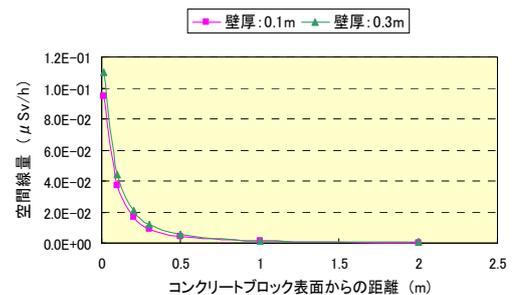


図-4 空間線量と距離の関係 (Cs-137)

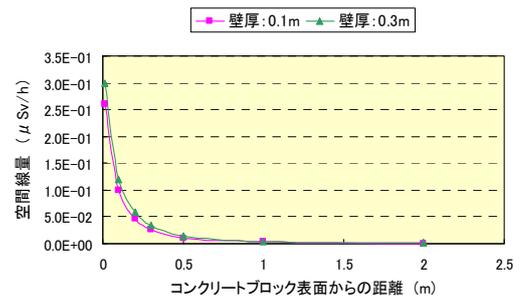


図-5 空間線量と距離の関係 (Cs-134)

表-8 放射線量の数値解析と計測結果の比較

コンクリートブロックの厚さ (mm)	空間線量 ($\mu\text{Sv/h}$) (コンクリートブロック表面からの距離 0.01m)	
	測定値	解析結果からの推定値
100	0.08	0.063
300	0.08	0.073

をできるだけ排除したが、測定値が僅かに影響を受けて若干大きくなったと思われる。

4.4 放射線量の予測

a. 目的

4.3節で述べたように、放射性物質により汚染された解体コンクリートを原料としたリ・バースコンクリートの放射線量を推定できることを確認した。そこで、放射性物質により汚染されたコンクリートがれきを原料としたリ・バースコンクリートを、防潮堤のような長大な壁構造物に適用した場合の放射線量を試算した。

b. 解析概要

図-6に示すように、防潮堤のような構造物を想定して壁の高さが3m、水平方向には無限大に延びる計算モデルを設定した。壁厚さBをパラメータとして0.3、1、2、5mと変えた。リ・バースコンクリートの配合は、今回の確認実験と同様に銅スラグ細骨材を添加した配合である。リ・バースコンクリート中に、実験に用いた側溝蓋の放射能濃度と同程度の1000Bq/kgの放射性セシウムが一樣に分布していると仮定し、壁表面からの距離0.01、1、2、5、10、20、100m位置における空間線量を計算した。

c. 解析結果

空間線量と壁表面からの距離の関係を図-7、8に示す。同図より以下のことがわかる。

- 壁厚さが0.3~5mでは空間線量に大きな差は見られず、壁が厚くなっても空間線量が壁厚さに比例して増大することはない
- 壁表面からの距離が1mでは、0.01mに比べ、Cs-137、Cs-134とも約60%に、距離が2mでは約40%に空間線量が低減し、以降は緩やかに距離が長くなるに従い漸減する。

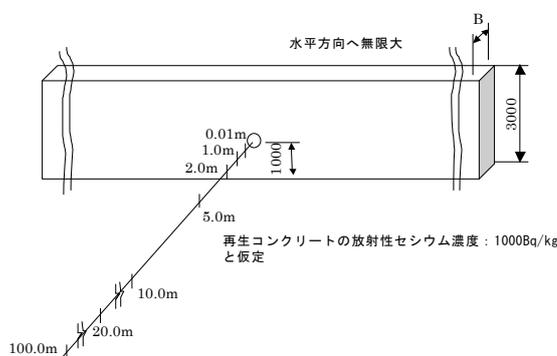


図-6 壁構造物の解析モデル

4.5 まとめ

今回の実験より得られた主な知見を以下に示す。

- 放射性物質により汚染されたコンクリートをリ・バースコンクリートの骨材として再利用することにより、原料としたコンクリート破砕物に比べ、放射能濃度が約40%低減し、放射線量は50%以下になる
- 放射線量の測定結果より、リ・バースコンクリートの厚さが0.1~0.4mの範囲では、コンクリートが厚くなってもコンクリート表面の空間線量は変わらない
- 解析コード：Micro Shieldを用いた数値シミュレーションにより、放射性物質により汚染された解体コンクリートを原料としたリ・バースコンクリートの空間線量をほぼ推定できる

上記より、放射性物質により汚染されたコンクリートがれきを骨材としてリ・バースコンクリートを製造する場合、再利用時の空間線量が予測でき、安全に管理しながら製造できると考える。

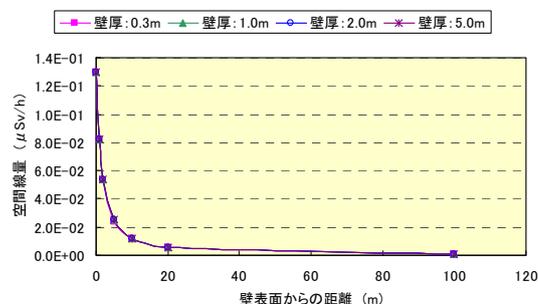


図-7 空間線量と距離の関係 (Cs-137)

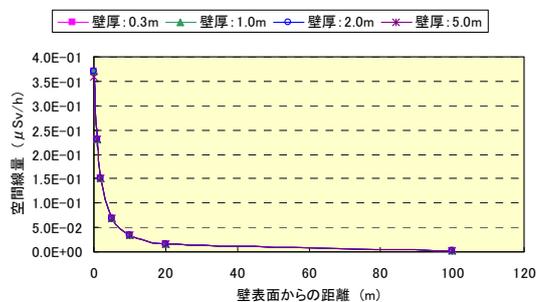


図-8 空間線量と距離の関係 (Cs-134)

5. おわりに

副産物スラグ細骨材を添加したリ・バースコンクリートの実証実験より、重量や強度などの品質面、並びに施工性を確認し、港湾構造物に適用可能な再生コンクリート製造技術であることを確認した。

これらのことから、放射性物質に汚染されたコンクリートを用いた実験では、リ・バースコンクリートにすることで放射線量が低減されること、コンクリート自身が遮蔽体となるため、コンクリートが厚くなっても放射線量の増大は小さいことを確認した。リ・バースコンクリート製造技術を用いることにより、放射線濃度が高い場合を除いて、解体コンクリートを有用な材料として、安全に管理しながら再利用できる見通しが得られた。

また、これまでのリ・バースコンクリートの実績から、クラッシャー、ミキサー、サイロ等を組み合わせることで、150～250m³/日の製造が可能であり、JIS仕様のコンクリートを使用する場合に比べ、20～30%程度のコスト削減が可能である。

最後に実験の場を提供して頂いた国土交通省東北地方整備局港湾空港事務所殿、環境省福島再生事務所殿、並びに実験材料入手にご協力頂いた葛尾村殿にお礼申し上げます。

《参考文献》

- 1) 環境省、「管理された状態での災害廃棄物（コンクリートくず等）の再生利用について」、平成23年12月27日
- 2) 廣中哲也、東 邦和、松田敦夫、「解体コンクリートを全量使用した再生コンクリートの諸特性」コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No2、2000
- 3) 廣中哲也、松田敦夫、森本克秀、「解体コンクリートを全量使用した現場再生コンクリート「リ・バースコンクリート」の開発と適用」、電力土木、2005.11
- 4) 森本克秀、「コンクリート塊を全量リサイクルするリ・バースコンクリートの現状について」、建設の施工企画、2009.4