

報告 災害廃棄物を用いたブロック製品の実用化に関する検討

川西 貴士^{*1}・田島 孝敏^{*2}・山田 宏^{*3}・浜井 邦彦^{*4}

要旨：東日本大震災により発生した大量の災害廃棄物の有効な利用方法として、コンクリートの骨材代替としての使用に着目し、災害廃棄物を用いたブロック製品の適用性について検討した。災害廃棄物とモルタルを混合し、振動および加圧させながら成形する方法により製造したブロックの基礎的性状を調べた。その結果、即脱可能で有害物質の溶出を抑制可能なブロック製品が製造できることを確認した。

キーワード：東日本大震災、災害廃棄物、がれき、ブロック、溶出、パイコン、即脱

1. はじめに

東日本大震災により発生した災害廃棄物（以下、がれきと呼称）は、2,700 万 t にもおよび、その処理方法が問題となっている¹⁾。

木材、金属くず、家電などリサイクル可能ながれきは、選別・収集して再利用できるが、選別が困難ながれきは、焼却したり埋め立てることで廃棄物として処分することとなる。これらの選別が困難ながれきを有効に活用することができれば、有価な資材として、被災地の復興に役立つものと思われる。

その一つの方法として、がれきをコンクリートの粗骨材の代替材料として利用することを考案した。がれきの中には、木材や布切れなどヤング係数の小さい廃棄物が含まれていたり、海水を含んでいるため、比較的強度の小さい無筋のコンクリートブロック製品への適用を対象とした。

がれきをコンクリートブロック製品として利用する場合、がれきに含まれる有害物質が溶出しないこと、密実に充てんできること、ブロック製品として必要な所要の圧縮強度を有することなどが必要となる。そこで、本稿では、がれきを用いたブロック（以下、がれき固化体と呼称）の基礎的物性について、平成 23 年 7 月～11 月にかけて実施した実験の結果について報告する。

2. ブロック製品の製造方法と検討内容

がれきを用いたブロック製品の製造方法として、いくつかの方法が考えられる。まず最初に、一般のコンクリートと同じように、ミキサにて練り混ぜた後、型枠に流し込み、締固めを行うことにより製造する方法が考えられる。しかし、流動性を確保するために単位水量および単位セメント量が増加する傾向にある。できるだけ多量のがれきを利用する観点から、モルタル容積を低減し、がれきの充てん率を増加できる手法が望まれる。

また、がれきをあらかじめ型枠内に詰めておき、注入モルタルを充てんするプレパックド方式が考えられる。これまでに、コンクリートガラを用いたプレパックドコンクリートの研究を進めてきた²⁾が、密実に充てんするためにコンクリートガラの粒径は 10mm 以上で検討している。また、土木学会コンクリート標準示方書では、プレパックドコンクリートの最小寸法は 15mm 以上とする旨記載されている。がれきの中には、細粒分も含まれており、きちんと充てんされない可能性が懸念される。

そこで、がれきの充てん率を高めつつ、密実なブロックを製造することと、ブロック製品として大量に製造することを想定して、がれきとモルタルを混合し、振動を作用しながら加圧する方法³⁾に主眼を置いて検討した。

本稿では、3 章でがれきの物性、混合するモルタルの配合および供試体レベルの基礎物性について検討した結果、4 章で 3 章で目安のついた配合において、溶出試験を行い、有害物質が溶出しないかどうかを検討した結果をまとめた。また、5 章では、実際に二次製品工場にてブロック製品の試作を行い、適用性について検討した結果を報告する。

3. がれき固化体の基礎物性の検討

3.1 がれきの物性

多種の物質が混合されたがれきでリサイクルが困難なものを対象とし、仙台市よりがれきを入手した。実際に入手したがれきは、トロンメルにて粒径が 25mm 以上に分級されていたが、大きいものは 10cm 以上の材料が混合されていたため、粒径 40mm 以下に 1 次粉砕したがれきについても検討した。実験に使用したがれきを写真 1 に示す。

実験に使用したがれきのふるい分けを行い、粒度分布を測定した。がれきの粒度分布を図 1 に示す。80mm 以上、80mm～40mm および 40mm～20mm の粒径のもの

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部副課長 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所環境技術研究部担当課長 工修 (非会員)

*3 (株)大林組 生産技術本部土工技術部副課長 工修 (非会員)

*4 (株)大林組 生産技術本部土工技術部長 (非会員)

は、均等に含まれていた。1次粉碎したがれきは、40mm～20mm が60%近くを占めていた。また5mm以下の砂のような物質が2割近く含まれていた。粒径の大きいものには、コンクリートがら、瓦片、プラスチック、陶器、木片などが含まれており、粒度の小さいものには、木片や礫、砂などが含まれていた。

がれきの密度を JIS A 1110 に準拠し、水中重量を測定することにより算出した。実際にブロック製品として適用する場合、がれきの水分調整は行わず、気乾状態で使用することを想定して、事前に吸水せずに測定を行った。密度の小さい木片などは浮力によって浮上するため、金属蓋をがれきの上に載せて測定した。また、密度のばらつきを検討するために、1次粉碎後のがれきを密度の小さいがれきと大きいがれきの2種類に選別して、それぞれ同様に気乾密度を測定した。

がれきの気乾密度を表－1 に示す。密度の小さいものは0.66g/cm³であり、水より軽い結果であった。密度の大きいものは、2.39g/cm³であり、一般に用いられるコンクリート用の碎石に比べて軽い結果となった。非選別のままのがれきは2.11g/cm³であった。がれきの密度は、中に含まれる廃棄物によって大きなばらつきを生じることが分かった。

3.2 モルタルの配合および品質

モルタルに使用した材料として、セメントには、高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm³）、細骨材には陸砂（表乾密度 2.62g/cm³、粗粒率 2.80）、混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。

水セメント比を 30%、40%の2種類、細骨材セメント比を 0、1 および 2 の3種類について検討した。モルタルの配合および品質を表－2 に示す。モルタルの JIS フローは、施工性、即脱性およびモルタルとがれきが分離しないことを考慮して、15 打で 150mm～200mm を目安とした。

細骨材を使用しないセメントペースト（S/C=0）の配合は、W/C=30%で0.2%、W/C=40%で1.5%のブリーディングが発生した。また、混和剤を添加すると分離した。セメントペーストは、収縮量が大きいことや分散性を確保するために混和剤を添加することを考えて、細骨材セメント比は2にすることとした。

圧縮強度は、細骨材セメント比が増加するほど低下した。がれきの混入により圧縮強度が低下することを考慮して、水セメント比は30%にすることとした。

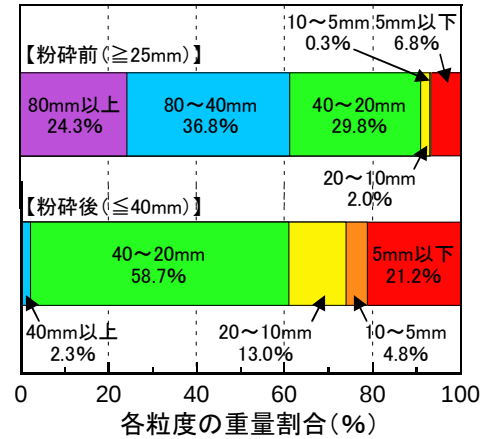
3.3 がれき固化体の基礎物性

モルタルとがれきを混合したがれき固化体の基礎物性について検討した。使用したがれきは、1次粉碎前の粒径 25mm 以上と1次粉碎後の粒径 40mm 以下の2種類とした。モルタルには、3.2 節の結果より、モルタルの配



1 次粉碎前のがれき 粒径 25mm 以上
1 次粉碎後のがれき 粒径 40mm 以下

写真－1 実験に使用したがれき



図－1 がれきの粒度分布

表－1 がれきの気乾密度

がれきの種類	気乾密度 (g/cm ³)	含まれていた物質
がれきをそのまま使用	2.11	全て使用
密度の小さいがれきを選別して使用	0.66	木片、ビニールシート、布切れなど
密度の大きいがれきを選別して使用	2.39	コンクリートがら、瓦片、陶器など

表－2 モルタルの配合および品質

モルタルの配合						モルタルの品質			
水セメント比 W/C (%)	細骨材セメント比 S/C	単位量 (kg/m ³)			混和剤 (C×%) SP	JISフロー (mm)		フリー ディング 率 (%)	圧縮 強度 (材齢28日) (N/mm ²)
		水 W	セメント C	細骨材 S		0打	15打		
30	0	477	1590	—	—	105	192	0.2	87.9
	1	297	989	989	0.5	105	202	0.0	80.4
	2	216	718	1437	0.9	102	179	0.0	65.9
40	0	549	1371	—	—	163	258	1.5	79.1
	2	268	670	1340	0.5	124	222	0.0	51.1

合は、水セメント比 30%、細骨材セメント比 2 とした。使用材料は、3.2 節と同様のものを使用した。

がれき固化体の配合として、がれきとモルタルの混合

表-3 がれき固化体の配合

がれき1tに対するモルタルの割合	がれきの種類	水セメント比 W/C (%)	細骨材セメント比 S/C	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%) SP	単位容積質量 (kg/m ³)	モルタルの容積割合 (%)	がれきの容積割合 (%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	災害廃棄物 G				
300	がれき (非選別) ^{※1}	30.0	2.0	84	279	559	1289	0.9	2211	38.9	61.1
400				99	328	657	1145		2229	45.7	54.3
500				111	369	738	1025		2244	51.4	48.6
600				120	401	802	932		2255	55.8	44.2
800				135	451	901	786		2273	62.7	37.3
600	がれき (密度大) ^{※2}			127	423	846	983		2378	58.9	41.1
	がれき (密度小) ^{※2}			132	440	880	256		1707	61.2	38.8
258	碎石			87	291	582	1576		2537	40.5	59.5

※1 がれき(非選別):がれきをそのまま使用(1次粉砕前および1次粉砕後のがれきの両者)

※2 がれき(密度大):密度の大きい廃棄物を選別したがれき、がれき(密度小):密度の小さい廃棄物を選別したがれき(1次粉砕後のがれき)

表-4 実験結果

がれき1tに対するモルタル容積(L)			300	400	500	600	800
1次粉砕前 のがれき (≥25mm)	がれき 固化体の作製 状況	表面 の状況	—				
		切断面 の状況	—				
	単位容積質量(kg/m ³)		—	1935	2131	2156	2249
	圧縮強度(N/mm ²)		—	4.5	10.4	14.4	19.2
1次粉砕後 のがれき (≤40mm)	がれき 固化体の作製 状況	表面 の状況					—
		切断面 の状況					—
	単位容積質量(kg/m ³)		1994	2158	2223	2220	—
	圧縮強度(N/mm ²)		7.8	14.7	22.9	22.5	—

割合を変えて実験を行った。がれき固化体の配合は、がれき 1t に対して、モルタルの容積を 300L, 400L, 500L, 600L および 800L と変化させた。また、比較として、碎石(最大寸法 40mm, 表乾密度 2.65g/cm³)を用いた場合、密度の大きいがれきを選別して用いた場合および密度の

小さいがれきを選別して用いた場合について、併せて検討した。がれき固化体の配合の一覧を表-3 に示す。

がれき固化体の作製方法として、まずホバート型ミキサ(公称容量 50L)を用いてモルタルの練混ぜを行った。次に、がれきを強制練り 2 軸型ミキサ(公称容量 60L)

表-5 重金属の溶出試験結果

項目		土壌 環境基準	無処理のがれき			模擬汚染のがれき		
			環告46号試験		タンクリー チング試験	環告46号試験		タンクリー チング試験
			がれき単体	がれき固化体	がれき固化体 の試験片	がれき単体	がれき固化体	がれき固化体 の試験片
pH		—	11.3	12.2	11.4	11.1	12.2	12.1
電気伝導率 EC (mS/m)		—	121	424	64.6	97.0	277	184
各重金属 の溶出量 (mg/L)	六価クロム	0.05	0.04	定量下限値未満	定量下限値未満	1.3	0.03	0.03
	砒素	0.01	0.002	定量下限値未満	定量下限値未満	0.33	定量下限値未満	定量下限値未満
	ふっ素	0.8	0.28	0.15	定量下限値未満	15	0.42	0.28
	ほう素	1	0.16	定量下限値未満	定量下限値未満	26	0.33	0.78
	鉛	0.01	定量下限値未満	0.001	定量下限値未満	0.002	0.008	0.002

の中に投入し、その後、練り上がったモルタルをミキサ内に投入し、30秒間練混ぜを行った。練り上がったがれきを混合したモルタルは、直径15cm×長さ30cmの鋼製型枠に詰め込み、ランマを用いて5分間振動締固めを行った。締固めにより分離した余剰のモルタルは、ランマの端部のプレート隙間より浮上させ、排出した。硬化後、材齢7日で供試体の単位容積質量と圧縮強度を測定した。

試験結果の一覧を表-4に示す。1次粉碎前のがれきでモルタルを500L、1次粉碎後のがれきでモルタルを400L以上混合することで、空隙の少ない密実に充てんされたがれき固化体を製造できることが確認できた。

単位容積質量の増加とともに、圧縮強度も増加する傾向が認められた。単位容積質量については、密実に充てんされた場合、2200kg/m³前後となり、概ね配合設計通りの単位容積質量となった。圧縮強度については、20N/mm²程度確保できた。

モルタルのみ、砕石を用いたコンクリートおよびがれき固化体（1次粉碎後のがれき）の圧縮強度の比較を図-2に示す。モルタルのみ、砕石、がれきの順に圧縮強度が低下した。密度の小さい廃棄物を選別したがれきを用いた場合、非選別のがれきと比較して、圧縮強度が1/3程度まで低下した。

4. 溶出の検討

4.1 実験概要

がれきをコンクリートブロック製品に適用する場合、がれきに含まれる有害物質が溶出しないかどうか確認する必要がある。そこで、がれき固化体について、環境庁告示46号⁴⁾に示されている溶出試験（以下、環告46号試験と呼称）およびタンクリーチング試験⁵⁾を行い、土壌環境基準を満足するかどうか確認した。また、がれき単体の溶出試験も併せて行った。

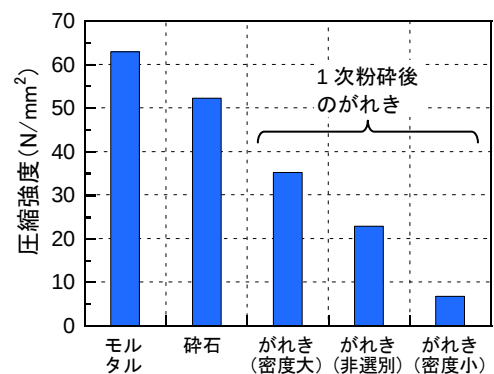


図-2 各材料における圧縮強度の比較

試験は、入手したがれきの溶出試験で溶出が認められた六価クロム、砒素、ふっ素およびほう素の4種類と、アルカリ環境下で溶出しやすい性質のある鉛を加えた5種類の重金属について行った。試験に供したのがれきは安全性の高いものであり、溶出量が土壌環境基準以下となる可能性が想定されたので、土壌環境基準の20倍程度を目安に重金属を人為的に混入したがれき（以下、模擬汚染がれきと呼称）を作製し、同様に溶出試験を行った。また、溶液中のイオン量の程度を把握するために、pHと電気伝導率も併せて測定した。

環告46号試験では、がれきを粒径2mm未満に粉碎した試料100gと、純水に塩酸を加えて水素イオン濃度指数が5.8以上6.3以下となるように調整した溶媒を、重量体積比で10%の割合で混合し、その試料液を6時間浸とうさせた後、分析に供した。試験は、材齢28日で実施した。

タンクリーチング試験は、図-3に示すように、がれき固化体の供試体から200g程度の試験片を切り出し、環告46号試験で用いた溶媒と同じ溶媒に固液比1:10の割合で浸漬した。試験は、材齢は28日で開始し、浸漬期間を28日とした。

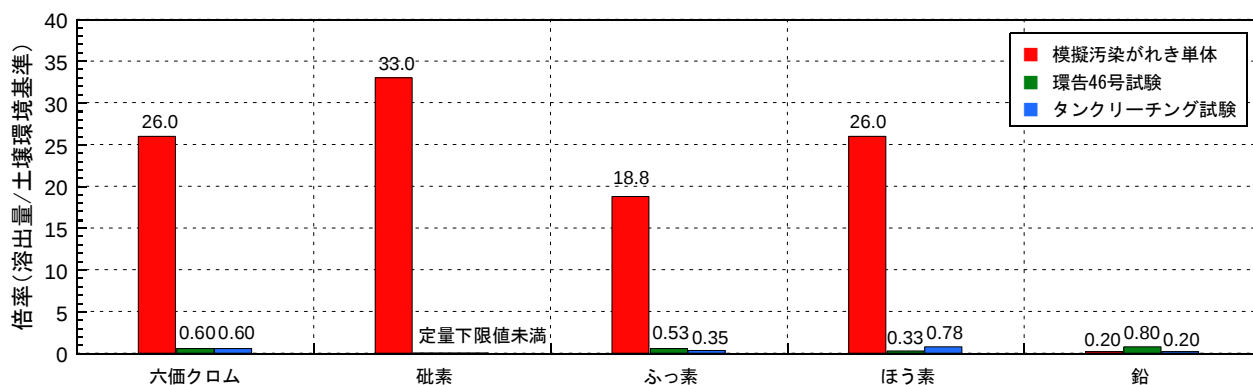


図-4 溶出試験結果（模擬汚染がれき）

4.2 実験結果

各溶出試験の結果を表-5 に示す。入手したがれき単体の溶出量は、いずれの重金属についても土壤環境基準を満足した。また、がれき固化体の環告 46 号試験およびタンクリーチング試験の溶出量は、がれき単体の溶出量よりも低く、重金属の溶出が抑制されることが確認できた。なお、環告 46 号試験の鉛の溶出量は、がれき単体に比べて高い値を示したが、これは検液の pH が 12.2 と強アルカリであり、鉛が溶出しやすい環境下であったためと考えられる。

模擬汚染がれきを用いたがれき固化体の環告 46 号試験およびタンクリーチング試験の結果を図-4 に示す。模擬汚染がれき単体の六価クロム、砒素、ふっ素およびほう素の溶出量は、土壤環境基準の 20 倍程度と高いが、がれき固化体の溶出量は、土壤環境基準を十分満足しており、溶出が抑制された。一方、鉛については、がれき単体からほとんど溶出しなかった。これは、アルカリ性の環境下で鉛が水酸化物等の溶出しにくい形態に変化したためと考えられる。がれき固化体についても、鉛の溶出量は土壤環境基準を下回った。

以上のことから、仮に、がれきに土壤環境基準を超過する重金属が混入していても、セメント固化により溶出を抑制できると考えられる。

5. 製造方法の検討

5.1 実験概要

3 章で検討したがれき固化体を用いて、実際の二次製品工場にてブロック製品の試作実験を行った。試作したブロック製品には、JIS A 5371 に記載されている道路境界ブロックのうち、地先境界ブロックの C タイプ（寸法：幅 150mm×高さ 150mm×長さ 600mm）を対象とした。

使用材料として、セメントに普通ボルトランドセメント、細骨材に陸砂（表乾密度 2.66g/cm³、粗粒率 2.68）、混和剤にポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。

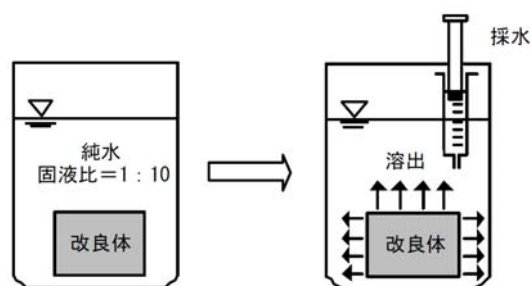


図-3 タンクリーチング試験概要⁵⁾



写真-2 溶出試験に用いたがれき
（左：粉碎前、右：2mm 未満）



写真-3 溶出試験状況
（左：環告 46 号試験、右：タンクリーチング試験）

がれきには、1 次粉碎後の粒径 40mm 以下のものを使用した。

がれき固化体の配合として、がれき 1t に対してモルタルを 500L 混合した場合（がれきとモルタルを容積比で 5:5）と 725L 混合した場合（がれきとモルタルを容積比

で 4:6) の 2 配合について検討を行った。2 章および 3 章の結果よりモルタルの水セメント比は 30%とし、細骨材セメント比は 2 とした。

製品の製造方法は、最初にパン型ミキサ（公称容量 100L）を用いてモルタルを先行して練り混ぜ、次にがれきを投入し、2 分間練混ぜを行った。その後、テーブルバイブレータに固定してある鋼製型枠に練り上がったがれきを混合したモルタルを投入し、振動を加えながら上部に設置されたプレス機械により加圧することにより成形した。写真-4 にブロックの製造状況を示す。

製造したがれき固化体のブロックは、即脱し、表面の状況を確認した。また、JIS A 5371 に準拠して曲げ強度試験を行い、曲げ強度荷重を測定した。

5.2 実験結果

即脱したがれき固化体の表面の状況を写真-5 に示す。がれき 1t に対して 500L のモルタルを混合した場合は、がれき固化体の表面に未充填部が発生した。モルタル容積を 725L に増加することで、密実に充填でき、良好に仕上げる事ができた。

モルタルを 725L 混合したがれき固化体について、曲げ強度試験を行った結果、曲げ強度荷重は、18.2kN であった。JIS A 5371 に記載されている指定の曲げ強度荷重 13kN を上回る結果であった。曲げ強度試験後の試験体の破壊面の状況を写真-6 に示す。がれき固化体内部も密実に充填されていた。

曲げ強度荷重は、がれきの品質に影響を受けられる。今後は、多数のがれきを用いて試験を行い、ばらつきを検討をしていく必要がある。

6. まとめ

東日本大震災により発生した大量のがれきの有効な利用方法として、コンクリートの骨材代替としての使用に着目し、がれきを用いたブロック製品の適用性について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 1 次破碎したがれきをそのまま使用する場合は、圧縮強度を 20N/mm^2 程度確保することが可能である。しかし、がれきの密度はばらつきが大きく、密度の小さいがれきを用いた場合は、圧縮強度も低下する。
- (2) がれきをモルタルで固化することで、有害物質の溶出を抑制することができる。
- (3) 配合を調整したモルタルとがれきを所定量混合し、振動および加圧させながら成形することにより、密実に即脱可能なブロック製品を製造できる。

以上の検討結果から、がれきを用いたブロック製品に適用できる可能性を示した。今後、品質のばらつきや品質管理手法について検討を進めていきたい。

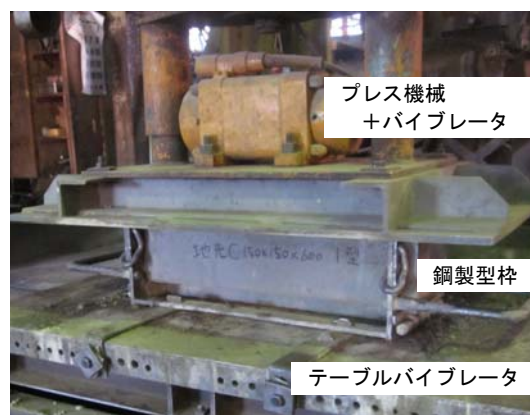


写真-4 ブロックの製造状況



写真-5 即脱後の表面の状況



写真-6 曲げ試験後の破壊面の状況

参考文献

- 1) 東日本大震災に関する東北支部合同調査委員会第二次報告会資料, 2011.7
- 2) 近松竜一他：コンクリート塊を用いた再生コンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1521-1526，2004.6
- 3) 櫻井次郎：バイコンーバサバサのコンクリートを振動で流動化して締め固めるー，東海大学出版，1998.1
- 4) 土壌の汚染に係る環境基準について，環境庁告示第 46 号，<http://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>，1991.8
- 5) 「セメント及びセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」の運用について，建設省技調発第 49 号，<http://www.mlit.go.jp/tec/kankyoku/kuromu.html>，2000.3