

がれき残渣を活用したアップサイクルブロックの開発

(株)大林組	正会員	○川本 卓人	(一財)先端建設技術センター	正会員	加納 敏行
鹿島建設(株)	フェロー会員	五十嵐 寛昌	(株)熊谷組	非会員	吉村 丈晴
清水建設(株)	正会員	久野 達彦	大成建設(株)	正会員	長峰 春夫

1. はじめに

平成23年3月11日の東日本大震災では、東北三県（岩手県、宮城県、福島県）で、約1,600万tの災害廃棄物が発生した（写真-1）。災害廃棄物は中間処理施設で破砕・選別処理された後、コンクリートガラや鋼材などはリサイクルされ、可燃物は焼却処理される。最終的にリサイクルできない不燃混合廃棄物（以下、がれき残渣と称す）が残る。

がれき残渣は、不燃物としてそのまま最終処分場で埋立て処分せざるを得ないが、最終処分場の残余容量に余裕はない。

一方、被災三県では、復興事業に際して大量の盛土材が必要となっている。各県において、盛土材は他工事の発生土の利用や土取場からの購入によって確保する予定であるが、必要土量には地域的・時期的な偏りがあり、盛土材不足が指摘されている。

そこで、がれき残渣を有効活用して盛土材として資材化できれば、これらの問題を同時に解決できると考え、「アップサイクルブロック」（以下、UCB と称す）（写真-2）の開発に着手した。



写真-1 山積みされた災害廃棄物



写真-2 アップサイクルブロックの例
(B750×W750×H850mm)

2. 技術の概要

(1) 概要

UCB とは、がれき残渣をセメントペーストと混練してブロック化し、がれき残渣の付加価値を高めた建設資材である。

(2) 特長

① がれき残渣の最終処分量を削減できる

廃棄物であるがれき残渣を有効活用するので、最終処分場への埋め立て量を削減できる。そのため、既設最終処分場の残余容量不足を軽減するとともに、最終処分場の拡張や新設に要する時間・コストを削減することが可能となる。

② 強度・耐久性を有する

圧縮強度が 1.0N/mm^2 以上であるので盛土の中詰め材として使用可能である。

UCB に一定周期で繰り返し温度変化を与える試験を実施し、盛土の中詰め材として十分な長期耐久性を有することを確認した材料である。

③ 周辺環境に悪影響を及ぼさない

がれき残渣をセメントで固化するので、万一、重金属等が混入していても、溶出を抑制する効果を有し、周

キーワード がれき、アップサイクル、長期耐久性

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 TEL : 03-5769-1302

辺環境に悪影響を及ぼさない。

(3) 想定される用途

UCB の想定される用途は、公園や緑地（図-1）、避難高台、防潮堤などの盛土の中詰め材である。

なお、UCB の利用に際しては、以下の条件を想定している。

- ・地下水位以浅で使用する。
- ・酸性土壌地帯では使用しない。
- ・覆土を 50cm 以上行う。
- ・ブロックを含めた盛土高さは最大 10m 程度とする。

(4) 開発体制

当技術は、一般財団法人先端建設技術センター、株式会社大林組、鹿島建設株式会社、株式会社熊谷組、清水建設株式会社、大成建設株式会社の 6 者で開発を進めてきた。なお、開発の一部は、国土交通省の平成 23 年度補正予算建設技術研究開発助成制度「震災対応型技術開発公募」の助成を受けて実施した。

3. 長期耐久性の確認

(1) 長期的な劣化要因の抽出

実際の UCB 利用環境下で圧縮強度を維持するために、圧縮強度に影響を及ぼす劣化要因について考えた。2. (3) で前述した適用条件下において、通常のコンクリート構造物の劣化要因となる中性化や塩害、化学的侵食は回避することができる。また、アルカリ骨材反応については、高炉セメント B 種を使用することで回避することができる。

しかし、がれき残渣には熱膨張率の異なる様々な物質が含まれているため、気温変化に伴う地中温度変化の繰り返しによる劣化は避けられない。そこで、温度変化を繰り返し与えた UCB 供試体の一軸圧縮強度と与えない供試体の一軸圧縮強度を比較することによって、UCB の長期耐久性（圧縮強度の維持）を確認することとした。確認の手順を図-2 に示す。

(2) 供試体の作製

UCB の使用材料は、がれき残渣、セメント（高炉セメント B 種）、水である。がれき残渣は、仙台市若林区荒浜搬入場で採取されたもの（かさ密度：0.9kg/L）を使用した（写真-3、図-3）。本がれき残渣は、津波堆積土砂を分級機で 2 段階分級して、大塊のがれきと土砂分を除去したもので、粒径が 25mm～150mm に調整されている。

供試体を準備するために、W750mm×H750mm×H850mm の UCB を製造した。配合を表-1 に示す。製造した UCB からコア抜きを行い、φ100mm×H200mm の供試体を 20 本作製し、①温度変化を与えない供試体群 10 本と②与えた供試体群 10

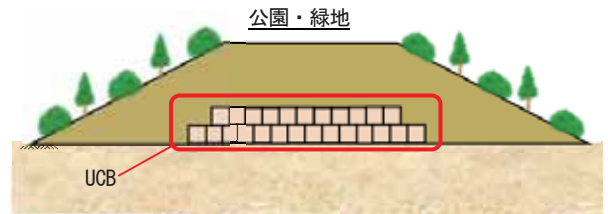


図-1 想定される用途

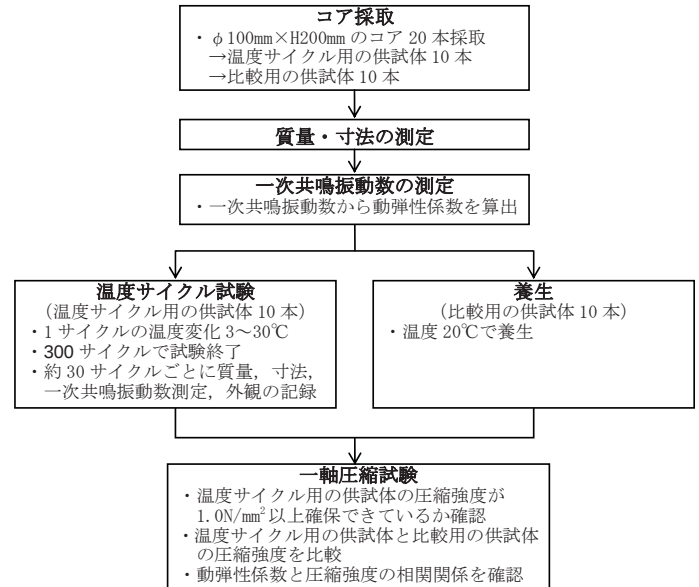


図-2 長期耐久性の確認手順



写真-3 がれき残渣
(仙台市若林区荒浜搬入場)

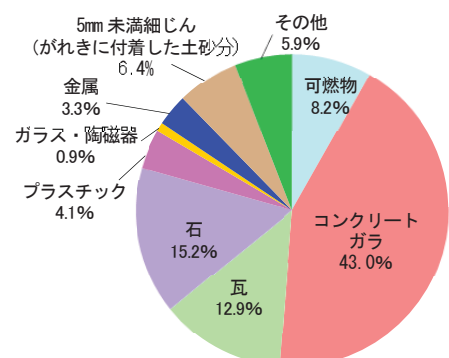


図-3 がれき残渣の組成
(仙台市若林区荒浜搬入場)

表-1 配合表

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m³)	単位量(kg/m³)	
		高炉セメント B 種	がれき残渣
60	223	372	1,381

本に仕分けた。混入するがれき残渣の密度，すなわち供試体の密度が圧縮強度に影響すると判断し，供試体仕分けの際，両供試体群間の密度の差が小さくなるよう留意した（表-2）。

（3）一次共鳴振動数の測定方法

全供試体の一次共鳴振動数の測定を行った。

本試験では，φ100 mm×H200mm の円柱供試体を用いていることから，「JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」より，供試体の劣化の度合を測定する方法として縦振動（図-4）による一次共鳴振動数の測定方法を採用した。

動弾性係数は次式により算出した。

$$E_D = 4.00 \times 10^{-3} \cdot \frac{L}{A} \cdot m \cdot f_2^2$$

ここに， E_D ：動弾性係数(N/mm²)

L ：供試体の長さ(mm)

A ：供試体の断面積(mm²)

m ：供試体の質量(kg)

f_2 ：縦振動の一次共鳴振動数(Hz)

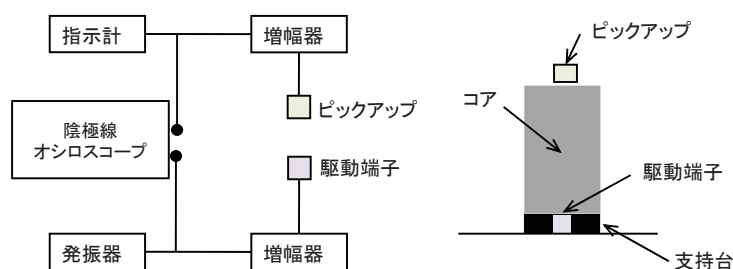


図-4 測定装置の概要

（4）温度サイクル試験の方法

温度サイクル試験とは，供試体に一定の周期で温度変化を与え，動弾性係数の低下傾向を確認する試験である。温度変化の影響でがれき残渣が膨張・収縮することにより発生する供試体内部の劣化を表わす指標として，動弾性係数に着目した。動弾性係数は非破壊で測定できるので，同一供試体に着目した経時変化を把握することができる。動弾性係数の低下傾向を把握することで，間接的に一軸圧縮強度の経時的な低下傾向を評価した。

UCB は 50cm 以上の覆土を行う。そこで，繰り返し与える温度変化は，地中の深度 50cm の年間温度変化に相当する 3～30℃と設定した。試験では，恒温恒湿器を用いて温度変化を与えた。なお，試験方法は，「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」のうち水中凍結融解試験方法（A 法）を参考とした。

温度変化を与える供試体において，温度 20℃で湿度 80%RH の条件で 24 時間以上養生した後，湿度を 80%RH 一定とした恒温恒湿器にて 30 分で 3℃から 30℃に上昇，30℃で 1 時間保持，30 分で 30℃から 3℃に降下，3℃で 1 時間保持させることを 1 サイクル（図-5）として，温度変化を 300 サイクル繰り返し与えた。

30 サイクルごとに一次共鳴振動数の測定および動弾性係数の算定を行った。測定中以外の供試体については，温度 20℃湿度 80%RH の条件で養生した。1 サイクルで 1 年間の温度変化を模擬している。一方，温度変化を与えない供試体については，温度サイクル試験が終了するまで，温度 20℃で湿度 80%RH の条件で養生した。

（5）一軸圧縮試験の結果

300 サイクル終了後，温度変化を与えた供試体と与えない供試体全てにおいて一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験における軸ひずみ速度は 1%/min とした。なお，一軸圧縮試験は「JIS A 1216 土の一軸圧縮試験」に準拠した。

表-2 供試体密度測定結果

供試体名	①温度変化を与えない供試体密度 (g/cm ³)	②温度変化を与えた供試体密度 (g/cm ³)
No.1	1.99	2.03
No.2	1.95	1.97
No.3	1.94	1.96
No.4	1.92	1.93
No.5	1.90	1.92
No.6	1.83	1.85
No.7	1.80	1.82
No.8	1.77	1.79
No.9	1.73	1.67
No.10	1.57	1.66
平均値	1.84	1.86

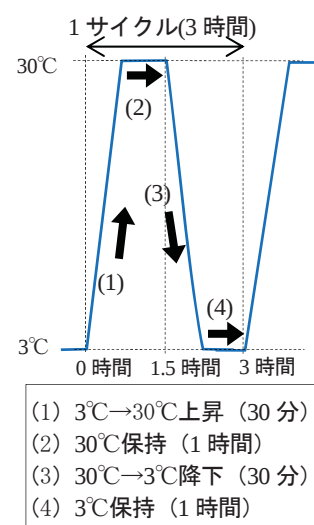


図-5 1 サイクルの考え方

温度変化を与えたことにより、供試体内のがれき残渣の熱膨張率の違いによって、表面にひび割れが生じると想定していたが、すべての供試体で外観に変化はみられなかった。

全供試体の一軸圧縮試験結果を表-3 に示す。温度変化を与えた供試体でも、一軸圧縮強度が $2.2 \sim 9.3 \text{ N/mm}^2$ で、 1.0 N/mm^2 を十分上回る結果となった。

また、温度サイクル用供試体の一軸圧縮強度の平均値は 5.58 N/mm^2 で、比較用供試体の強度の平均値 5.75 N/mm^2 と比べてわずか 0.17 N/mm^2 (3%) の差異しかない。温度サイクル用、比較用の全 20 本の平均値は 5.67 N/mm^2 、標準偏差 σ は 2.45 N/mm^2 であり、ばらつきが大きい。 0.17 N/mm^2 は標準偏差 σ のわずか 7% に過ぎず、有意な差ではないと考えられる。これより、温度サイクル試験による有意な一軸圧縮強度の低下はないことを確認できた。

一方、各供試体間には圧縮強度のばらつきがある。供試体の破壊状況を観察した結果、そのばらつきは混入するがれき残渣の物質や向き、剛性によるものであると判断する。破壊状況の代表例を写真-4、写真-5 に示す。全供試体を通して、供試体 A のように木片や金属片、プラスチックなどのがれき残渣とセメントペーストとの界面に沿って亀裂が入っているケースが多く、比較的強度が大きかった。また、供試体 B のように水平に混入した木片などの圧縮性の高いがれき残渣で圧壊しているケースでは比較的強度が小さい傾向にあった。

(6) 動弾性係数の算定結果

温度サイクル数と動弾性係数の関係を図-6 に示す。30 サイクル時において動弾性係数が減少しその後はほぼ一定であり、低下傾向はなかった。参考として、表-4 に 30 サイクル時と 300 サイクル時に測定した動弾性係数の測定結果とその変化率を示す。300 サイクル時の動弾性係数は 30 サイクル時と比べて低下しておらず、変化率の平均は 1.13 となり、若干増加している。

表-3 一軸圧縮試験結果

供試体名	①温度変化を与えない供試体 一軸圧縮強度 (N/mm^2)	②温度変化を与えた供試体 一軸圧縮強度 (N/mm^2)
No.1	5.58	7.01
No.2	7.12	9.27
No.3	8.95	5.09
No.4	10.41	8.47
No.5	5.79	5.89
No.6	2.46	4.69
No.7	7.80	2.20
No.8	3.98	4.25
No.9	2.70	4.03
No.10	2.74	4.87
平均値	5.75	5.58
標準偏差 σ	2.65	2.03

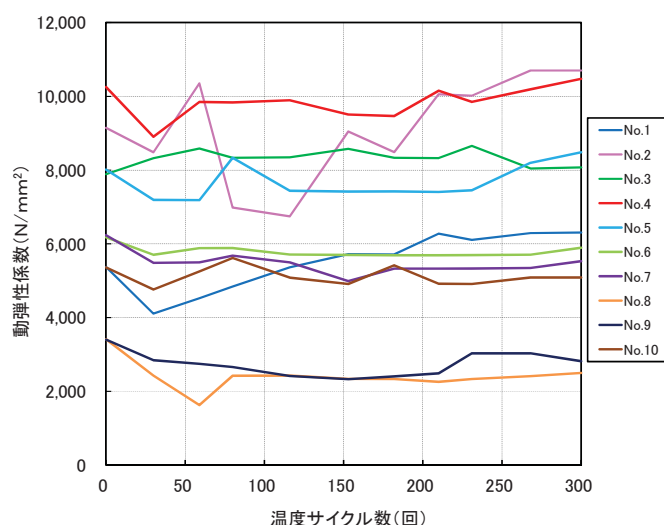


図-6 温度サイクル数と動弾性係数の関係

表-4 30 サイクルと 300 サイクルの動弾性係数測定結果とその変化率

	供試体名										平均
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	
30 サイクル (N/mm^2)	4,110	8,480	8,320	8,900	7,190	5,700	5,480	2,430	2,850	4,760	5,820
300 サイクル (N/mm^2)	6,310	10,700	8,070	10,480	8,490	5,900	5,530	2,500	2,820	5,090	6,590
変化率	1.54	1.26	0.97	1.18	1.18	1.03	1.01	1.03	0.99	1.07	1.13

一軸圧縮強度と動弾性係数の相関関係を図-7 に示す。一軸圧縮強度が大きいほど、動弾性係数が大きい傾向にあった。相関係数 R は以下のとおりで、いずれも 0.7 以上で強い相関がある。

温度サイクル用 : $R^2=0.60$ ($R=0.77$) 「強い相関がある」

比較用 : $R^2=0.58$ ($R=0.76$) 「強い相関がある」

全 20 データ : $R^2=0.58$ ($R=0.76$) 「強い相関がある」

温度変化を与えても動弾性係数に低下傾向はなく、供試体は劣化しなかったものとする。また、動弾性係数と一軸圧縮強度には強い相関があるので、間接的に一軸圧縮強度は低下しないことが確認できた。

以上より、UCB に 3~30℃ の温度変化を繰り返し与えても圧縮強度の低下は無く、UCB の長期耐久性を確認することができた。

4. 適用事例

(1) 概要

平成 25 年 7 月に UCB が宮城県亘理町の復興事業に採用された。同年 8 月から 12 月、宮城県委託の災害廃棄物処理業務で UCB を製造した。製造後のブロックは仮置き保管されている。



混合比率 (a) : (b) : (c) = 8 : 2 : 2.5

写真-6 亘理がれき

(2) 使用したガレキ残渣

亘理処理区のがれき残渣（以下、亘理がれきと称す）は、混合廃棄物選別の最終工程で 40mm 以下に破碎した混合廃棄物から可燃物等を回収した後の残渣で、3 種類のものがあつた（写真-6）。各々の発生比率に合わせてがれき残渣を混合し、UCB に利用することとした。

(3) UCB の諸元

亘理がれきを用いて製造した UCB は形状寸法 B900mm×W900mm×H900mm である（写真-7）。また、配合試験で決定した配合を表-5 に示す。本事業では、脱型までの養生期間を 1 日と設定した。養生後に吊り上げた際、ブロックに変状を与えることなく脱型可能となる配合を選定した結果、圧縮強度は材齢 1 日で 1.0N/mm² 以上、材齢 28 日で 24N/mm² となった。

(4) 製造工程

当事業では 5 か月間で、19,200 体もの UCB を製造した。現場に集積された災害廃棄物約 57 万 t から発生したがれき残渣約 19,000t を用いて、200 体/日（4,500 体/月）の製造能力を有する製造システムを構築する必要があつた。次頁図-8 に製造工程及び製造設備の写真を示す。事業所内にバッチャープラントを建設することで、短時間での練混ぜ・供給を可能とした。加えて、打設・養生ヤードを屋根付きとすることで、全天候型のヤードを構築した。さらに、脱型までの養生期間を 1 日としたことで、UCB の量産を実現した。

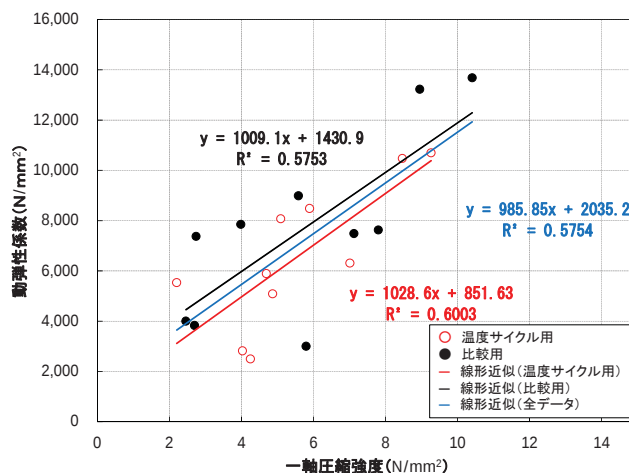


図-7 一軸圧縮強度と動弾性係数の関係



写真-7 採用された UCB
[B900×W900×H900mm]

表-5 配合表

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位量(kg/m ³)	
		高炉セメント B 種	がれき残渣
60	233	388	1,414

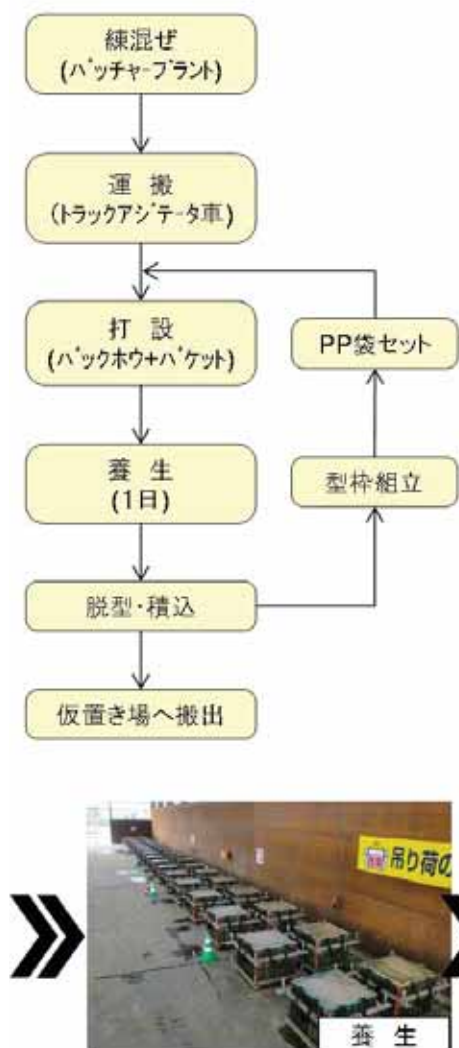


図-8 製造工程及び製造設備

(5) トレーサビリティ管理

環境省通知（平成 24 年環廃対発第 120525001 号，環境廃産発第 120525001 号）によれば，「災害廃棄物由来の再生資材の一部を復旧復興のための公共工事に活用する場合，公共工事を行う者によって，その種類・用途・活用場所が記録・保存されること」が要件となっている．そこで，互理処理区では，すべてのブロックに，管理番号と製造者，製造場所を刻印（写真-8）して，UCB の仮置き位置と据付日を記録し，トレーサビリティを確保した．



写真-8 ブロックへの刻印

(6) 活用先

製造したすべてのブロックが，互理町内に計画されている人工丘の盛土の中詰め材として活用される予定である．

5. まとめ

UCB の技術開発においては，3章で報告した“長期耐久性を有すること”の他に，“盛土の中詰め材として適用可能な圧縮強度を有すること”および“有害物質（重金属等）の溶出抑制効果があること”を確認し，平成 26 年 2 月には（一財）国土技術研究センターから建設技術審査証明（技審証第 35 号）を取得した．また，宮城県互理町での復興事業で適用され，UCB を短期間で量産することに成功した．今後は，当該技術のさらなる適用拡大に向けて，放射性物質を含んだがれきや産業廃棄物への適用性について，検討を進めてゆく所存である．