

論文 廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を粗骨材として用いた軽量コンクリートの基礎性状

福島 誠司^{*1}・鎗田 宜克^{*2}・佐久間 雅孝^{*3}・笠井 哲郎^{*3}

要旨：我が国における廃発泡スチロール（以下廃 EPS と称す）の年間流通量は、約 18.3 万トンであり、約 6.4 万トン(35%)が回収され再資源化されているが、この 6.4 万トンの内、中国への輸出の依存度は 6 割以上と非常に高く、国内での新たな用途開発が望まれている。廃 EPS の回収・再資源化過程の中間処理材である熱減容インゴット塊をクラッシャで破砕すると、密度 1g/cm^3 、吸水率 2%程度の碎石状の破砕材が得られる。本研究はこのインゴット破砕材のコンクリート用軽量粗骨材として利用の可能性について検討した。この骨材を使用することにより、単位容積質量が $1.69\sim 1.83\text{ t/m}^3$ で、圧縮強度が $15\sim 33\text{N/mm}^2$ 程度の軽量コンクリートが製造できた。

キーワード：再生利用，廃発砲スチロール，インゴット，軽量骨材，軽量骨材コンクリート

1. はじめに

我が国における発泡スチロール（Expanded Polystyrene, 以下 EPS と称す）の年間流通量は、2000 年実績で 18.3 万トン（生産量は 20.9 万トン）であり、その内約 6.4 万トン（34.9%）が回収され再資源化（マテリアルリサイクル）されている¹⁾。廃 EPS の再利用の実態は、主に加熱処理により EPS を熔融減容化し常温で固化させたインゴット塊をペレット状に粉碎して再樹脂化したり、インゴット塊のまま中国に輸出され再資源化されている。特に 6.4 万トンの内、中国への輸出の依存度は 6 割以上と非常に高い。しかし、今後予想される廃棄物の越境問題や急激な発展を遂げる中国経済の状況の変化によっては、この輸出量が大幅に減少していく可能性も有り、国内での新たな用途を早急に開発していく必要がある。このような現状を踏まえ、単一材料を大量に使用する土木・建築分野への用途展開が有望であると考えられ、碎石状に破砕したインゴット破砕材を盛土材や裏込め材として利用する検討が行われている^{2),3)}。しかし、イン

ゴット破砕材は従来の礫材料に比べ高価であり、経済性の面でその使用が限定されるため、更に付加価値の高い分野への用途開発が望まれる。

そこで、本研究はインゴット破砕材の性質の内、密度が約 1g/cm^3 、吸水率が 1~2%程度であることからより付加価値の高いコンクリート用軽量骨材としての利用に着目し、インゴット破砕材を粗骨材として使用した軽量骨材コンクリートのフレッシュ性状、力学的基礎物性等を実験的アプローチにより明らかにした。

2. インゴット及びインゴット破砕材

2.1 製造

廃 EPS は主にポリスチレン樹脂と約 98%を占める空気で構成されており、再生利用のための運搬コストが非常に高くなるため、通常、発生場所または全国に 147 箇所以上点在する最寄りの処理拠点（エプシー・プラザ）において直ちに熱処理により熔融・脱泡し減容化される⁴⁾。この減容化されたものをインゴットと呼ぶ。インゴットをせん断式クラッシャ等で破砕したも

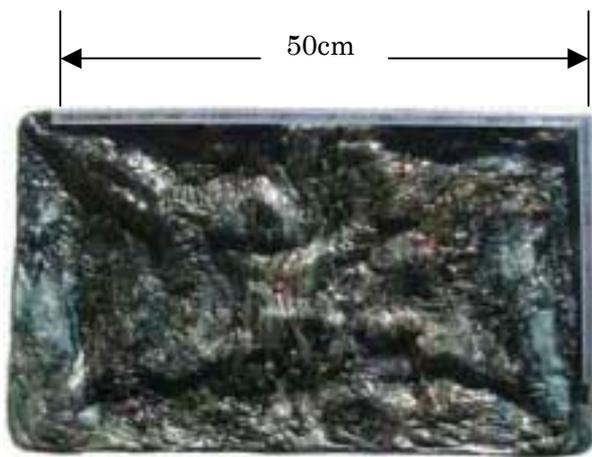
*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 千葉市建設局 土木部（正会員）

*3 東海大学助教授 工学部土木工学科（正会員）

のがインゴット破砕材である。インゴットの物性は、熱処理時の際の加熱温度（150℃～250℃程度）や加熱時間等により脱泡の程度が異なるため、処理装置の型式や時間当たりの処理量によって異なる。

本実験に用いたインゴット及びインゴット破砕材は、東京築地卸売市場で魚箱として用いられていた廃 EPS で、これを市場内で熱減容処理によりインゴットとし、せん断式クラッシャで破砕したものである。熱減容時の加熱温度は、約 230℃である。インゴット及びインゴット破砕材を写真－1，2に示す。



写真－1 インゴット



写真－2 インゴット破砕材

2.2 物性

本インゴットからダイヤモンドカッタを用い、30x30x60mm の供試体を切り出し圧縮強度試験

表－1 インゴットの基礎物性

項目	インゴット (築地)	ポリスチレン樹脂
密度(g/cm ³)	0.94	1.04～1.06
線膨張係数 (/°C)	70.5x10 ⁻⁶	60～80x10 ⁻⁶
圧縮強度 (N/mm ²)	48.3	100
圧縮弾性係数 (N/mm ²)	2.64x10 ³	2.48x10 ³ (引張)

及び線膨張係数試験を行った結果を表－1に示す。表には、EPS 用ポリスチレン樹脂の一般的値も示した⁵⁾。表より、インゴットの密度および圧縮強度ともバージンポリスチレンより小さい。これは、目視でも確認できるが、インゴットは減容処理において完全には脱泡されておらず、かなりの空気泡が残っていることが分かる。また、インゴットの弾性係数は普通骨材（3～12x10⁴N/mm²）に比べ桁小さく、線膨張係数はセメントペースト（10～20x10⁻⁶/°C）、普通骨材（6～12x10⁻⁶/°C）に比べ大きい。

3. 実験概要

3.1 使用材料及びコンクリートの配合

本実験では、2.1 で示したインゴット破砕材をフルイに掛け5mm～20mmの粒度のものをコンクリート用軽量粗骨材として用いた。以下、これをプラスチック骨材（PA）と称す。

使用材料は全てのコンクリートの配合において、セメント、細骨材および混和剤は同一とし、粗骨材にプラスチック骨材、普通骨材（CA）および市販の人工軽量骨材（AL）を用いた。使用材料の基礎物性を表－2に示す。

各種粗骨材を用いたコンクリートの配合を表－3に示すが、これらの配合は s/a を変化させて粗骨材容積比がほぼ同程度となるように決定したものである。

3.2 供試体の製造及び試験方法

コンクリートの練混ぜは、容量 100l のパン型

表－2 使用材料

使用材料	種 類	記号	物 性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3280cm ² /g
細骨材	富士川産砕砂	S	密度：2.67g/cm ³ ，吸水率：1.25%，粗粒率：3.02
粗骨材	プラスチック骨材	PA	密度：1.04g/cm ³ ，吸水率：1.47%，G _{max} ：20mm
	富士川産砕石	CA	密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：0.98%，G _{max} ：20mm
	人工軽量骨材	AL	密度：1.38g/cm ³ ，吸水率：9.80%，G _{max} ：20mm
混和剤	AE 減水剤	Ad	ヒドロキシ系複合体

表－3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
プラスチック骨材コンクリート	20	35	47	177	506	769	338	1.518
		50	50	177	354	882	344	1.062
		65	53	177	272	972	336	0.816
普通骨材コンクリート	20	35	47	177	506	769	877	1.518
		50	50	177	354	882	892	1.062
		65	53	177	272	972	872	0.816
人工軽量骨材コンクリート	20	35	43	168	480	723	496	1.440
		50	46	168	336	830	504	1.008
		65	49	168	258	916	493	0.774

強制練りミキサーを使用し、全材料を投入後、3分間練混ぜて行った。その後、各種強度試験用供試体（圧縮・曲げ・引張）及び乾燥収縮試験用を作製した。強度試験用供試体の養生条件は、打ち込みから24時間後に脱型し、27日間水中（20℃）養生とした（養生－1）。更に圧縮試験用供試体については、養生－1終了後14日間気中（20℃）養生としたもの（養生－2）についても行った。また、プラスチック骨材コンクリートの場合、プラスチック骨材とセメント硬化体（モルタル部）では線膨張係数が1桁異なるため（2.2参照）、硬化後の低・高温の繰り返しによってモルタル部とプラスチック粗骨材界面が劣化し、供試体強度が低下することが考えられる。そこで、養生－2終了後更に恒温恒湿器を用い20～50℃の温度繰り返しを12回行う条件（養生－3）についても行った。

各強度試験は、上記の養生条件の供試体についてJISに準拠して行った。また、乾燥収縮の

表－4 フレッシュコンクリートの試験結果

コンクリートの種類	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
プラスチック骨材コンクリート	35	3.5	3.5
	50	6.5	4.4
	65	2.5	4.4
普通骨材コンクリート	35	3.0	2.8
	50	12.5	4.0
	65	9.5	2.9
人工軽量骨材コンクリート	35	5.5	3.6
	50	11.5	6.0
	65	10.5	4.7

測定は7日間水中養生後、恒温室で長さ測定器（ダイヤルゲージ法）を用いて行った。

4. 実験結果及び考察

4.1 フレッシュコンクリートの試験結果

表－4に各コンクリートのスランプおよび空気量試験の結果を示す。プラスチック骨材コンクリートと普通骨材コンクリートの配合は、各

W/C ごと単位粗骨材量，AE 減水剤添加量及びその他の材料の単位量は同一であるが，プラスチック骨材コンクリートのスランプは，普通骨材コンクリートのそれに比べ，小さくなる傾向にある。これは，コンクリートの単位容積質量が小さいためであると考えられる。一方，空気量については，プラスチック骨材コンクリートの方が若干大きくなる傾向となった。

4.2 コンクリートの単位容積質量

表-5に各コンクリートの各養生終了後の単位容積質量を示す。プラスチック骨材を粗骨材として用いることで，単位容積質量 1.8 t/m^3 程度の軽量コンクリートの製造が可能であることがわかる。

4.3 力学特性

図-1は各コンクリートの各種養生条件における C/W と圧縮強度の関係を示したものである。また，図には参考文献6)から引用した密度 0.91 g/cm^3 の人工軽量骨材を用いたコンクリートの C/W と圧縮強度の関係も同時に示した。プラスチック骨材コンクリートと普通骨材コンクリートを比較すると，圧縮強度はどの C/W においても前者の方が小さく，また C/W の増加に対する圧縮強度の増加割合も小さくなっている。これは，普通骨材に比べプラスチック骨材の強度が大幅に小さいことに起因するものであると考えられる。しかし，骨材密度の値に近い参考文献6)から引用した人工軽量骨材コンクリートの場合と比較すると，同一 C/W における圧縮強度はプラスチック骨材コンクリートの方が若干小さいものの，C/W の増加に対する圧縮強度の増加割合はほぼ同程度となっている。養生条件の影響は，プラスチック骨材コンクリートと普通骨材コンクリートとも載荷時に気乾状態とする養生-2の場合が養生-1の場合より圧縮強度が大きくなった。また，高-低の温度繰り返しを行う養生-3の場合，養生-2の場合と比較して，普通骨材コンクリートでは若干の強度低下が生じているが，プラスチック骨材コンク

表-5 コンクリートの単位容積質量

コンクリートの種類	W/C (%)	単位容積質量(t/m^3)		
		養生-1	養生-2	養生-3
プラスチック骨材コンクリート	35	1.83	1.82	1.80
	50	1.81	1.77	1.76
	65	1.82	1.76	1.76
普通骨材コンクリート	35	2.43	2.41	2.41
	50	2.39	2.35	2.33
	65	2.37	2.32	2.31
人工軽量骨材コンクリート	35	2.06	1.99	1.98
	50	1.99	1.89	1.86
	65	2.01	1.90	1.87

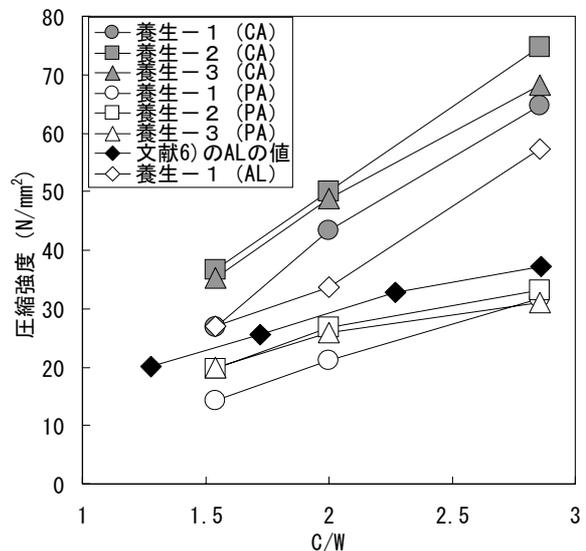


図-1 C/Wと圧縮強度の関係

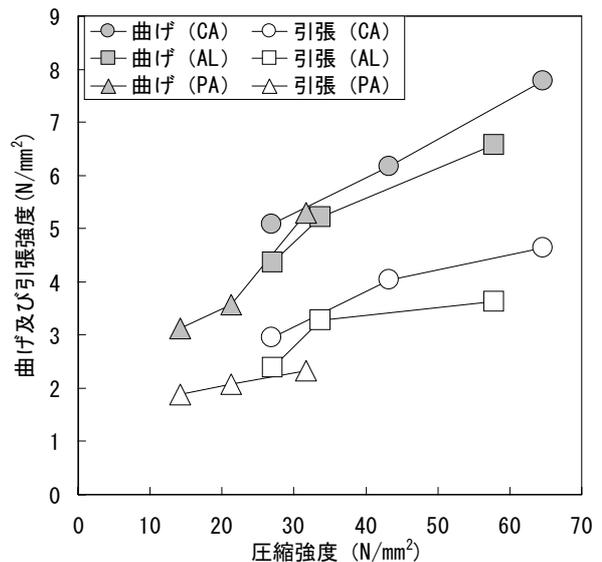


図-2 28日水中養生後の強度の関係

リートでは低下はほとんど生じていない。この理由は定かではないが、プラスチック骨材の弾性係数が非常に小さいことがその一要因であると思われる。

図-2は養生-1における各コンクリートの圧縮強度と曲げおよび引張強度の関係を示したものである。圧縮強度と曲げ強度との比および圧縮強度と引張強度との比(脆度係数)は、普通骨材コンクリートの場合それぞれ5~8, 9~14, プラスチック骨材コンクリートの場合それぞれ4.5~6, 7.5~13.5で、プラスチック骨材コンクリートの方が若干小さい結果となった。

図-3は、各コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係を示したものである。また、ヤング係数を圧縮強度およびコンクリートの気乾単位容積質量(ρ)から求める RC 規準式および New RC 式を用いて、 $\rho=2.35t/m^3$, $\rho=1.80t/m^3$ の場合について算出した値を同図に示した。なお、New RC 式における骨材、混和材に関する係数 k_1 , k_2 は 1.0 とした。普通骨材コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係は計算値とほぼ一致するが、プラスチック骨材コンクリートの場合は計算値より小さくなっていることから、一般的な軽量骨材コンクリートより圧縮強度に対しヤング係数が小さいことがわかる。これは、2.2 で示したようにインゴットの弾性係数が普通骨材に比べ大幅に小さいためであると考えられる。

4.4 乾燥収縮性状

図-4, 5は乾燥材齢と質量変化率および収縮ひずみの関係を示したものである。図-4より質量変化率は、各 W/C ごとに比較すると人工軽量骨材コンクリート、プラスチック骨材コンクリート、普通骨材コンクリートの順に大きい。この順序は使用粗骨材の吸水率の大きさと一致しており、骨材の吸水率が大きいほど常温で乾燥可能なコンクリート中の自由水が多くなるためであると考えられる。

一方、図-5より乾燥材齢 100 日までの収縮ひずみは、質量変化率(水の逸散)が最も大き

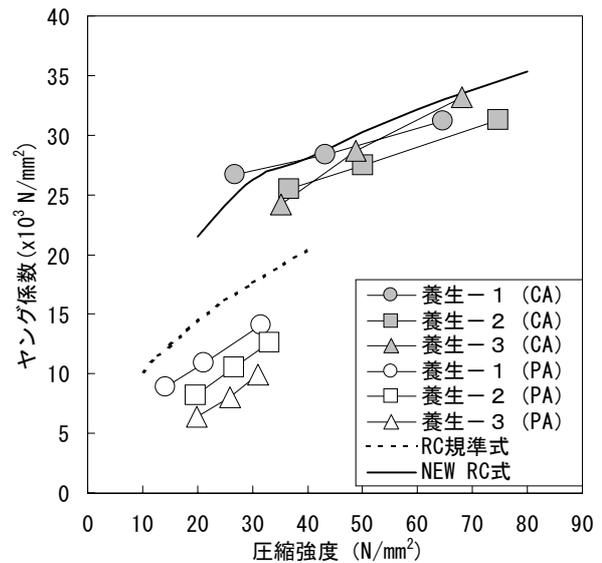


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

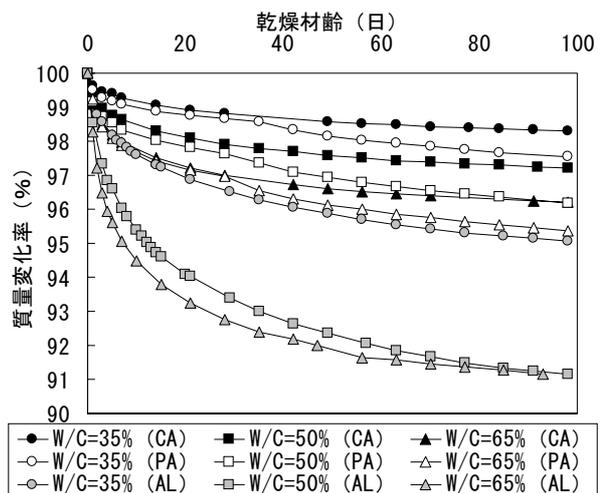


図-4 乾燥材齢と質量変化の関係

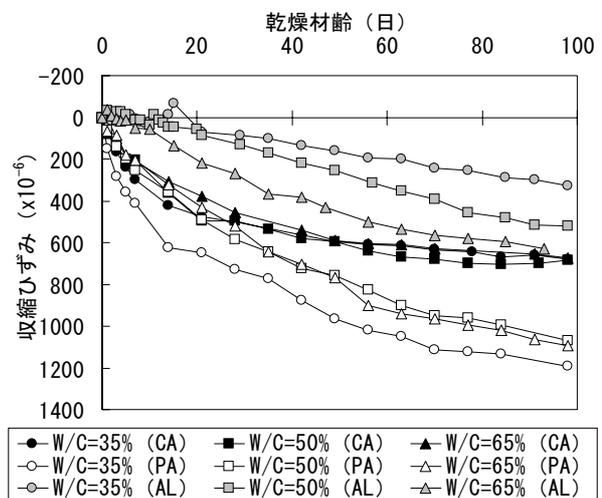


図-5 乾燥材齢と収縮ひずみの関係

い人工軽量骨材コンクリートが最も小さく、プラスチック骨材コンクリートが最も大きく、乾燥材齢 100 日では普通骨材コンクリートの 2 倍程度の収縮ひずみを示している。これは、プラスチック骨材の弾性係数が小さいことが主な原因であると考えられる。図-6 は、質量変化率と収縮ひずみの関係を示したものである。人工軽量骨材コンクリートではこの関係が上に凸となっているが、これは乾燥過程で骨材中の含水量がセメントペースト相に溶出するため、骨材中の含水量が存在する期間はコンクリートの質量変化が生じてセメントペースト相の乾燥が緩和されるためであると考えられる⁷⁾。一方、プラスチック骨材コンクリートでは、骨材の吸水率（含水量）が小さいため、上記のような傾向は見られず、W/C ごと普通骨材コンクリートとほぼ同様な関係（傾き）を示した。

5. まとめ

廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を粗骨材として用いた軽量骨材コンクリートの基礎物性について実験的検討を行った結果、本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 本研究で示したプラスチック骨材を粗骨材として用いることにより、単位容積質量が 1.76~1.83 t/m³ で、圧縮強度が 15~33N/mm² 程度の軽量コンクリートが製造できる。
- (2) プラスチック骨材コンクリートは通常の軽量骨材コンクリートに比べ、同一圧縮強度におけるヤング係数が小さい。
- (3) プラスチック骨材コンクリートの乾燥収縮は普通骨材コンクリートより大きいが、質量変化率と収縮ひずみの関係は普通骨材コンクリートの場合と同様な傾向を示す。

謝辞

本研究の遂行にあたり、インゴット破砕材の提供並びに数々の助言を下された発泡スチロール再資源化協会・尾崎 滋氏、長山敏樹氏、大滝恒雄氏に深く感謝致します。

なお、本研究の一部は、平成 13 年度文部科学

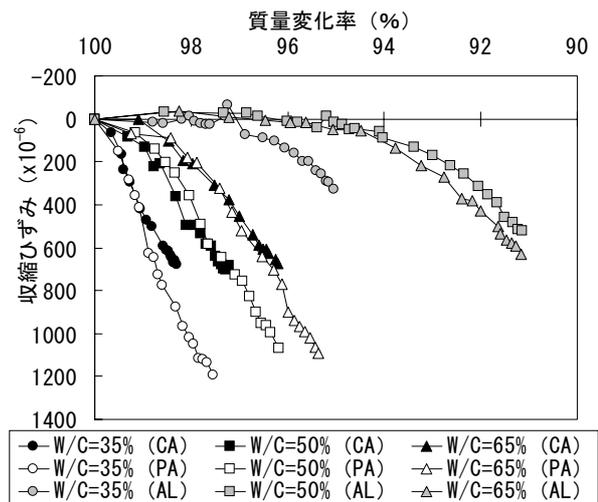


図-6 質量変化率と収縮ひずみの関係

省科学研究費補助金（基盤研究(C)）を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION 2001, pp.7-8, 2001
- 2) 末次大輔, 落合英俊ほか：廃棄 EPS インゴット破砕材の混入による地盤材料の軽量化と強度の改善, 第 33 回地盤工学研究発表会, pp.2451-2452, 1998
- 3) 白子博明, 大滝恒雄ほか：発泡スチロール減容材の土木材量への適用生, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 3 部門, 1999
- 4) 発泡スチロール再資源化協会：発泡スチロール減容品の用途開発事業報告書, pp.8-9, 1998.8
- 5) 旭化成アミダス(株), プラスチック編集部：プラスチックデータブック, 工業調査会, 1999
- 6) 中村達夫ほか：低吸水性を有する軽量骨材を用いたコンクリートの強度特性と耐凍害性, 東海大学紀要工学部, Vol.38, No.2, pp.133-143, 1998.3
- 7) 中村達夫ほか：軽量骨材コンクリートの収縮特性に及ぼす骨材含水状態および養生条件の影響, 東海大学紀要工学部, Vol.40, No.1, pp.101-106, 2000.9