

論文 廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を使用したコンクリート二次製品への適用に関する基礎研究

藤木 昭宏*¹・笠井 哲郎*²・尾崎 滋*³・小野 定*⁴

要旨：我が国における発泡スチロール（Expanded Poly-Styrene，以下 EPS）の年間流通量は、17.6 万トンであり、6.6 万トンが回収され再資源化されている。この 6.6 万トンのうち、中国への輸出比率は約 6 割と高く、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をクラッシャで破砕すると、密度 1g/cm^3 ，吸水率 1～3% 程度の碎石状の材料が得られる。本研究はインゴット破砕材を粗骨材として利用したコンクリート及びポラスコンクリートの二次製品への適用について検討した。その結果、軽量性、断熱性などの特性を活かし、有効利用できることを明らかにした。

キーワード：廃発泡スチロール，軽量コンクリート，ポラスコンクリート，二次製品

1. はじめに

EPS の年間流通量(リサイクル対象量)は、2001 年実績で 17.6 万トンであり、その内 6.6 万トン(全体の 37.8%)が回収され再資源化(マテリアルリサイクル)されている。EPS の再利用は、インゴット(主に熱により EPS を減容化したもの)をペレット状にして再樹脂化したり、インゴットのまま中国に輸出しているのが現状である¹⁾。特に 6.6 万トンの内、中国への輸出比率は 6 割程度と高く、今後の中国経済の状況によってはこの量が減少していく可能性もあり、早急に国内での新たな用途を開発していく必要がある。そのため、碎石状に破砕したインゴット(図 - 1)を盛土材や裏込め材として利用することが検討されている。しかし、現状のインゴット破砕材は従来の礫材料に比べてかなり高価であり、経済性の面でその利用が限定されている。破砕材の製造工程、方法の改善によるコストダウンの実施、また付加価値の高い分野への適用等を図ることで、コンクリート用軽量粗骨材として

の利用の可能性が高いと考えられる^{2), 3)}。

そこで本研究では、コンクリート二次製品への適用を想定し、インゴット破砕材を軽量骨材として使用した軽量コンクリートとさらに付加価値の高い軽量ポラスコンクリートの基礎物性を把握するとともに、その利用の可能性について検討した。また同時に、製品の角欠け防止を目的にポリプロピレン短繊維を使用し、その補強効果についても検討を行った。



図 - 1 インゴット破砕材

*1 ランデス(株) 研究所 工修 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*3 発泡スチロール再資源化協会 技術部長

*4 (株)C&R コンサルタント 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 コンクリ - トの使用材料

本実験で軽量粗骨材として使用する廃EPS熱減容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を市場内で約230で熱減容処理し、せん断式クラッシャで破砕したものである。このインゴット破砕材の基礎物性を表 - 1 に示す。

表 - 1 インゴット破砕材の基礎物性

密度 (g/cm ³)	0.94
線膨張係数 (/)	70.5×10 ⁻⁶
圧縮強度 (N/mm ²)	48.3
弾性係数 (kN/mm ²)	2.64
吸水率 (%)	1.5

また、その他の使用材料を表 - 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は砕砂を用いた。粗骨材についてはインゴット破砕材と粒度分布が等しくなるように砕石 10～5mm と 17～10mm の 2 種類を容積比 3:7 で混ぜ

て使用した。混和剤はナフタリンスルホン酸系減水剤、また短繊維は長さ 38 mm のポリプロピレンを使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリ - トの配合を表 - 3 に示す。普通コンクリ - ト(N)、ポーラスコンクリート(P)は二次製品の一般的な配合であり、これらの配合において粗骨材をインゴット破砕材で 100% 置換したものが軽量コンクリート(L)及び軽量ポーラスコンクリート(LP)である。また、これらの配合にポリプロピレン短繊維を混入したものが N-F、L-F、P-F、LP-F である。なお短繊維の混入率は、予備試験を行い決定した。

2.3 供試体の作製と養生方法

コンクリートの練混ぜ方法を表 - 4 に示す。練混ぜは、軽量ポーラスコンクリート(LP、LP-F)は容量 40 リットルのオムニミキサ - を、それ以外は容量 50 リットルのパン型ミキサ - を使用し、それぞれ 35 リットルを表に示す時間配分で

表 - 2 使用材料

材 料	記号	種 類	物 性
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度：3.16 g/cm ³ 比表面積：3280cm ² /g
細骨材	S	岡山県高梁市津川町産砕砂	表乾密度：2.56 g/cm ³ 粗粒率：2.70
粗骨材	G ₁₀	岡山県久米南町産砕石 10-5mm	表乾密度：2.67 g/cm ³ 吸水率：0.9%
	G ₁₇	岡山県久米南町産砕石 17-10mm	表乾密度：2.69 g/cm ³ 吸水率：0.8%
	E	廃EPS熱減容インゴット破砕材 20-5mm	表 - 1参照
混和剤	Ad	ナフタリンスルホン酸系減水剤	
繊維	F	ポリプロピレン短繊維	密度：0.91 g/cm ³ 長さ：38mm

表 - 3 配合

種 類	繊維	記号	W/C (%)	s/a (%)	air (%)	単 位 量 (kg/m ³)							F (vol%)
						W	C	S	G ₁₀	G ₁₇	E	Ad	
普 通 コンクリート	無	N	50	42	2.0	165	330	764	323	776		3.3	
	有	N-F				165	330	764	323	776		3.3	0.15
軽 量 コンクリート	無	L	50	42	2.0	165	330	764			388	3.3	
	有	L-F				165	330	764			388	3.3	0.15
ポ ー ラ ス コンクリート	無	P	19		25.0	70	369		1052	454		3.7	
	有	P-F				70	369		1052	454		3.7	0.1
軽量ポーラス コンクリート	無	LP	19		25.0	74	389				520	3.9	
	有	LP-F				74	389				520	3.9	0.1

練り混ぜた。その後、各試験用の供試体を作製した。また、養生は二次製品を想定した蒸気養生で、そのパターンを図 - 2 に示す。コンクリート打設後 20 ± 2 で 2 時間の前養生を行った後、蒸気養生を開始した。蒸気養生は、1.5 時間かけて 50 まで昇温、 50 ± 5 で 4 時間保持した後、20 まで自然冷却させた。その後は、試験開始まで温度 20 ± 2 、湿度 $60 \pm 5\%$ の試験室で湿布養生を行った。

表 - 4 練混ぜ方法

配合	ミキサ		練り混ぜ時間 (sec)		
	種類	容量 (リットル)	セメント 骨材	水 混和剤	繊維
N	パン型	50	30	120	
N-F			30	60	120
L			30	120	
L-F			30	60	120
P			60	180	
P-F			60	90	90
LP	オムニ	40	60	180	
LP-F			60	90	90

2.4 試験方法

表 - 5 に試験項目を示す。配合 N, N-F, L,

L-F においてはフレッシュコンクリートの試験 (スランプ, 空気量, 単位容積質量, プリ - ディング) を行った。また硬化コンクリートの試験では、圧縮強度試験を材齢 3, 7, 14 日に行い、静弾性係数, 曲げ強度, 熱伝導の試験は材齢 14 日に行った。配合 P, P-F, LP, LP-F については、硬化コンクリートの試験として圧縮強度試験を材齢 7, 14 日に行い、静弾性係数, 曲げ強度, 連続空隙率の試験は材齢 14 日に行った。

曲げ強度試験は実製品を想定し、寸法 $150 \times 50 \times 10\text{cm}$ の供試体で、3 等分点载荷でスパンを 120cm とし、スパン中央の変位を測定した。また、熱伝導試験は 20 ± 2 の試験室で $40 \times 45 \times 10\text{cm}$ の供試体の片面を 90 ± 5 で加熱し、加熱面より対面方向に 0, 2.5, 5, 7.5, 10cm の点に熱電対を設置し温度変化を測定した。

3. 試験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリートの試験

配合 N, N-F, L, L-F についてのフレッシュコンクリートの試験結果を表 - 6 に示す。

配合 N, L と N-F, L-F は粗骨材の種類が異なる以外は同じ配合であるが、インゴット破砕材

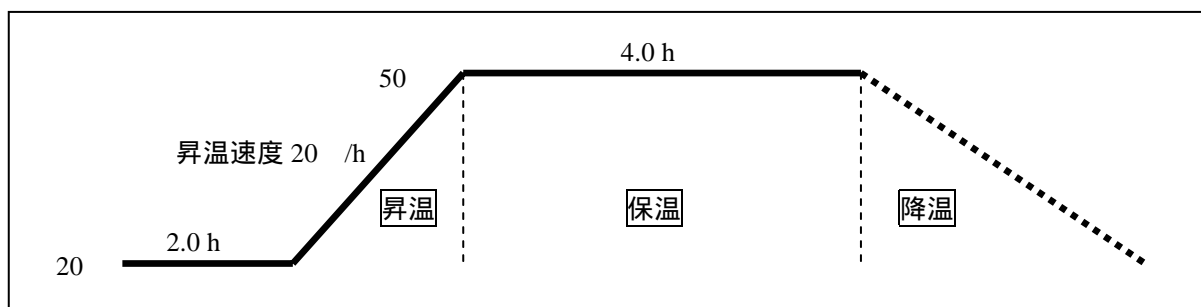


図 - 2 蒸気養生パターン

表 - 5 試験項目

配合	試験項目	試験材齢 (日)
N	スランプ [JIS A 1101] ・ 空気量 [JIS A 1128]	
N-F	単位容積質量 [JIS A 1116] ・ プリ - ディング [JIS A 1123]	
L	圧縮強度 [JIS A 1108]	3, 7, 14
L-F	静弾性係数 [JIS A 1149] ・ 曲げ強度 ・ 熱伝導	14
P	圧縮強度 [JIS A 1108]	7, 14
P-F	静弾性係数 [JIS A 1149] ・ 曲げ強度	14
LP LP-F	連続空隙率 [ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案) ⁴⁾]	14

表 - 6 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 ()	単位容積質量 (t/m ³)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	ブリーディング率 (%)
N	7.0	1.4	18	2.41	0.09	2.78
N-F	3.0	1.0	19	2.42	0.08	2.50
L	1.5	2.9	19	1.69	0.02	0.87
L-F	0.5	2.8	19	1.67	0.02	0.74

表 - 7 硬化コンクリートの試験結果 (材齢14日)

配合	見掛け密度(t/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)	曲げ強度(N/mm ²)	連続空隙率(%)
N	2.4	46.8	35.7	4.0	
N-F	2.4	48.4	34.8	3.9	
L	1.7	21.4	9.4	2.1	
L-F	1.7	22.6	8.8	2.5	
P	2.0	18.4	15.3	2.0	22.1
P-F	2.0	16.6	14.3	1.9	23.0
LP	1.0	6.1	1.6	0.7	26.4
LP-F	1.0	5.5	1.5	0.7	26.8

を用いた配合 L, L-F のスランブは, 普通骨材を用いた配合 N, N-F のそれと比較して小さい値となった。これは, コンクリートの単位容積質量が 2/3 程度と小さいことが原因の一つであるとされる。また, 短繊維を混入するとスランブは小さくなった。

空気量については, スランブが一定でないため単純に比較できないが, 軽量コンクリート(L, L-F)のほうが大きい結果となった。

ブリーディングについては, 軽量コンクリート(L, L-F)のほうが小さい結果となった。これはインゴット破砕材の密度が 0.94g/cm³ と小さいため, 粗骨材が沈降しにくく, またスランブが小さいためと考えられる。また, 繊維を混入することにより, ブリーディングは小さくなった。

3.2 硬化コンクリートの試験結果

(1) 力学特性

表 - 7 に硬化コンクリートの試験結果を, 図 - 3, 4 に各材齢におけるコンクリートの圧縮強度を示す。材齢 14 日における普通コンクリート(N, N-F)と軽量コンクリート(L, L-F)の圧縮強度及び曲げ強度を比較すると, 軽量コンクリ

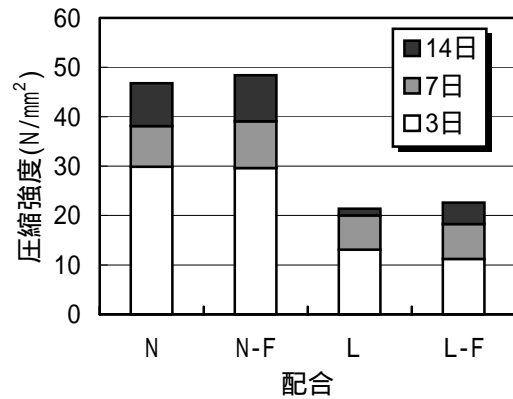


図 - 3 圧縮強度(N, N-F, L, L-F)

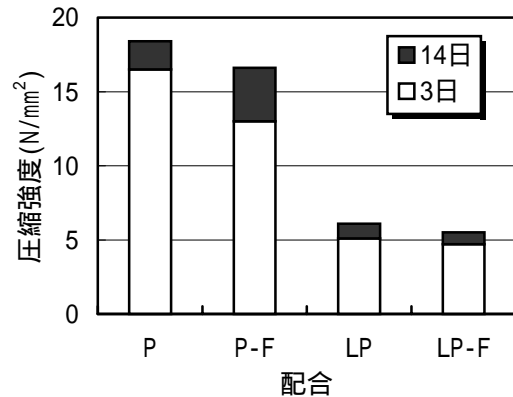


図 - 4 圧縮強度(P, P-F, LP, LP-F)

ートは 1/2 程度と低い値となった。また, 静弾性係数は 1/4 程度と非常に低い値となった。同様に, ポーラスコンクリート(P, P-F)と軽量ポーラスコンクリート(LP, LP-F)の圧縮強度及び曲げ強度を比較すると, 軽量ポーラスコンクリ

-トは 1/3 程度と低い値となった。また、静弾性係数は 1/10 程度と非常に低い値となった。これらは、インゴット破砕材自体の圧縮強度及び弾性係数が小さいことが原因であると考えられ、インゴット破砕材の単位量及び空隙が多いポーラスコンクリートの場合にその影響が顕著に現れたと考えられる。

また、軽量コンクリート(L, L-F)の静弾性係数を圧縮強度との関係からみると、コンクリート標準示方書に示されている軽量骨材コンクリートの設計値 ($f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$ のとき $E_c=13\text{kN/mm}^2$) を大きく下回っている。

ポーラスコンクリートの目標連続空隙率は 25% に設定し、数回の試し練りにより配合設計を行った。しかし、本試験ではポーラスコンクリートは 25% よりも小さい値 (P: 22.1%, P-F: 23.0%), 軽量ポーラスコンクリートは 25% よりも大きい値 (LP: 26.4%, LP-F: 26.8) となった。このことから、単位粗骨材量を調整 (P, P-F では増, LP, LP-F では減) することにより配合を修正し、連続空隙率を 25% に近づけることで、両者の圧縮強度の差は若干縮まると考えられる。

曲げ強度試験の荷重変位曲線を図 - 5, 6 に示す。インゴット破砕材を用いたコンクリート (L, L-F, LP, LP-F) は、普通骨材を用いたコンクリート (N, N-F, P, P-F) と比較して破壊荷重は小さいが変位は大きく、変形能力が高いこと

がわかる。最大荷重までの短繊維の影響はほとんどないが、軽量ポーラスコンクリートにおいてはひび割れ発生後も変位を測定することができ、繊維混入による靱性の向上が確認できた。

(2) 熱伝導性

熱伝導試験開始から 35 分経過時の結果を図 - 7 に示す。各深さにおける温度を比較すると、軽量コンクリート (L, L-F) は普通コンクリート (N, N-F) に比べて温度が低いことがわかる。したがって、インゴット破砕材を骨材として用い

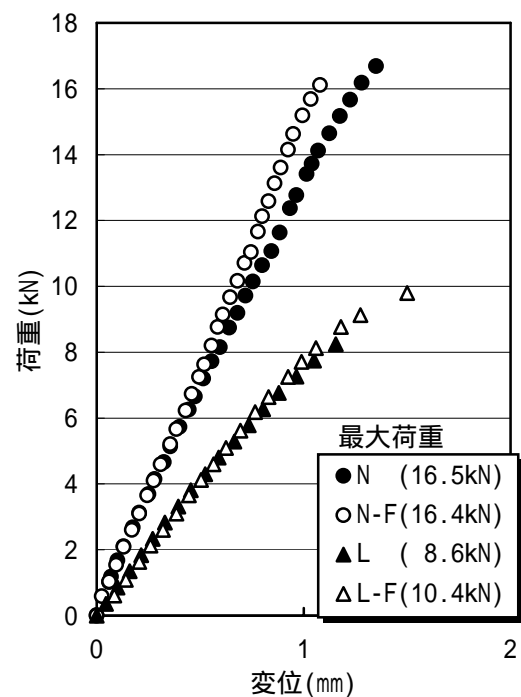


図 - 5 荷重変位曲線 (配合 N, N-F, L, L-F)

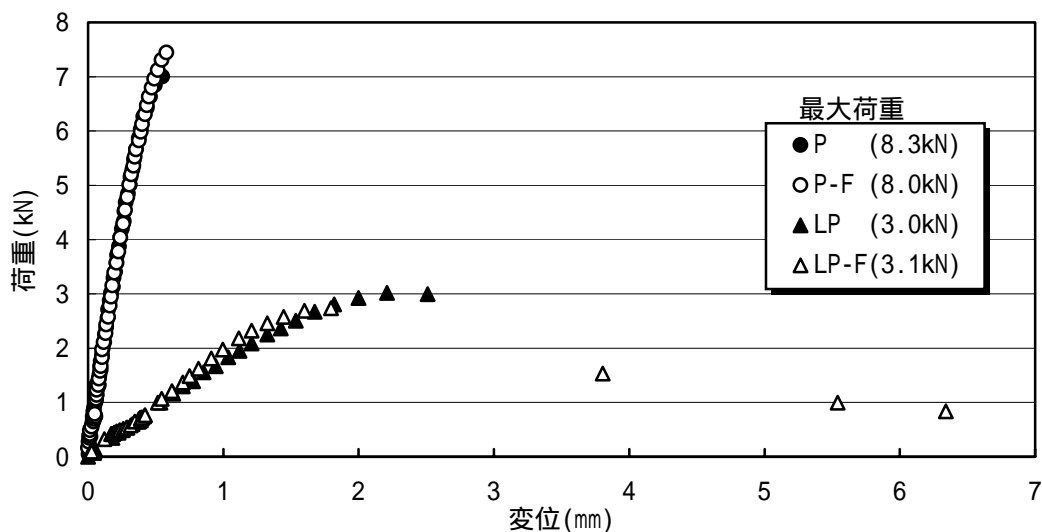


図 - 6 荷重変位曲線 (配合 P, P-F, LP, LP-F)

た場合、そのコンクリートは内部に熱が伝わりにくく、断熱性に優れていると考えられる。

また、ポリプロピレンの熱伝導率はコンクリートの1/20程度であるが、本試験における混入率が0.15vol%であることもあり、短繊維混入による大きな違いは見られなかった。

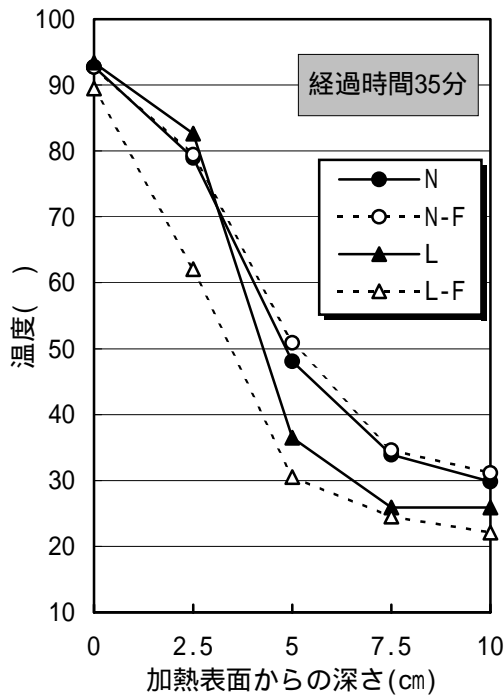


図 - 7 熱伝導試験結果

4. 二次製品への適用について

これまでの結果より、コンクリート二次製品への適用を考えると、単位容積質量が従来コンクリートの70%程度であることから、側溝の蓋など、手作業で施工・メンテナンスを行う場合などに効果的であると考えられる。また、断熱性にすぐれていることから、インゴット破砕材を用いた、屋上緑化が可能な断熱パネルなど高付加価値製品への適用も考えられる。

5. まとめ

本研究では、廃EPS熱減容インゴット破砕材を粗骨材として使用した軽量コンクリート及び軽量ポーラスコンクリートの性能について検討を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 本研究で使用したインゴット破砕材を粗骨

材として用いることにより、単位容積質量 $1.7t/m^3$ 、圧縮強度 $20N/mm^2$ 程度の軽量コンクリートの製造が可能である。

(2) 本研究で使用したインゴット破砕材を粗骨材として用いることにより、単位容積質量 $1.0t/m^3$ 、圧縮強度 $6.0N/mm^2$ 、連続空隙率25%程度の軽量ポーラスコンクリートの製造が可能である。

(3) インゴット破砕材を骨材として用いた軽量コンクリートは普通骨材を用いたコンクリートに比べて、内部に熱が伝わりにくく断熱性に優れている。

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION 2002, pp.7-8, 2002
- 2) 福島誠司・鎗田宜克・佐久間雅孝・笠井哲郎：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 3) 笠井哲郎・佐久間雅孝・鎗田宜克：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, 土木学会第55回年次学術講演会, 2000
- 4) 財団法人 先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き, pp.116-117