

論文 廃 EPS 熱処理粉砕材を用いた軽量モルタルの力学的諸物性

福島 誠司^{*1}・長谷川 聖史^{*2}・森 爵之^{*1}・笠井 哲郎^{*3}

要旨：廃 EPS を粉砕処理し熱処理加工すると、密度が 0.2g/cm^3 程度の粉砕材が得られる。本研究は、この粉砕材の密度が従来の人工軽量骨材に比べ大幅に小さいことに着目し、これを細骨材に用いた軽量モルタルの力学的性質について実験的検討を行った。この骨材を使用することにより、単位容積質量が同一である場合、従来の人工軽量骨材モルタルに比べ、曲げ靱性やくぎ引抜き抵抗性の高い軽量モルタルが製造できた。

キーワード：再生利用、廃 EPS 軽量骨材、軽量モルタル、繊維補強材、くぎ引抜き抵抗性

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) の国内流通量は、2005 年実績で 17.0 万トン (生産量は 18.7 万トン) であり、回収対象量の内、約 7.1 万トン (42.0%) が再資源化 (マテリアルリサイクル) され、5.0 万トン (29.1%) が発電付焼却 (サーマルリサイクル) 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砕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製品化されている。特に再資源化を目的に回収された 7.1 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あり、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、著者らは、碎石状に破砕したインゴット破砕材をコンクリートの軽量粗骨材として使用することに着目し、これまでに廃 EPS インゴット破砕材を用いた軽量コンクリートの各種物性について検討し、その優れた性質を示した²⁾。

一方、廃 EPS をインゴット化せずに粉砕し、熱処理加工を施すと絶乾密度が 0.2g/cm^3 程度の球形の廃 EPS 熱処理粉砕材が得られる。この粉砕材は、前述のインゴット破砕材 (絶乾密度 $0.6 \sim 1.0\text{g/cm}^3$) より更に軽量であり、これを骨材として用いることによりモルタル・コンクリートの大幅な軽量化が可能となる。

そこで本研究では、廃 EPS 熱処理粉砕材の再生利用を目的に、既存の建築用外装パネル部材の製造に使用される人工軽量細骨材の代替品としての利用を指向し、廃 EPS 熱処理粉砕材および、これを細骨材として使用した軽量モルタルの基礎物性について実験的検討を行った。

既存の建築用外装パネル部材は、一般に高い強度を必要とせず (非構造)、曲げ強度を確保するためにパネルの厚さ方向中央に金網補強している。部材モルタルの軽量化は、密度が $0.9 \sim 1.7\text{g/cm}^3$ の人工軽量細骨材の使用と、発泡剤によりモルタル中に空気泡を連行させた軽量モルタルで製造されているものが多い。また、要求される主な性能はパネルの種類によっても異なるが、所要の曲げ強度 ($3.5 \sim 6.5\text{N/mm}^2$ 以上) を有し、出来る限り軽量で、釘 (ビス) 打ちによる欠けやひび割れが発生せず、十分な釘引抜き抵抗性を有すること等である。しかし、従来

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 石川島建材工業 (株) 技術研究所技術グループ (正会員)

*3 東海大学教授 工学部土木工学科 (正会員)

のパネルは、製造・運搬および施工時に作用する様々な衝撃により隅角部の欠けやひび割れ等が発生する。

そこで伊達ら³⁾は、金網補強の代わりに錆の発生がなく、親水性に優れ、モルタルとの付着性が良好なビニロン短繊維補強材を、細骨材に市販の人工軽量細骨材を用い、更に発泡剤を併用して発泡モルタルとすることで、軽量性を確保しつつ、曲げ強度や耐衝撃性を大幅に向上できることを報告している。

これまでの研究⁴⁾で、廃 EPS 熱処理粉砕材を細骨材に用いたモルタルの力学的基礎性状の評価を行った結果、このモルタルは、大幅な軽量化が可能であり、ビニロン短繊維補強材との組合せも良好で、要求される所要の力学的性質を有することから、従来の軽量骨材の代替材料としての有効性を示した。本論文では、廃 EPS 熱処理粉砕材を既存の建築用外装パネル部材の製造に適用することを指向し、これまでの検討に加え、その曲げ靱性やくぎ引抜き抵抗性等について検討した。

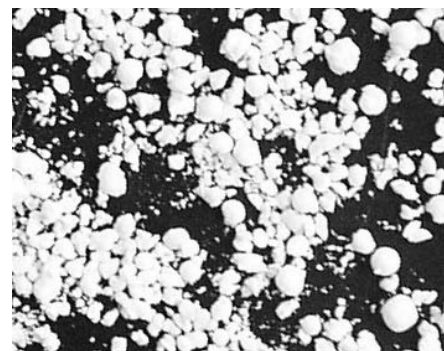
2. 廃 EPS 軽量骨材

EPS は主にポリスチレン樹脂(熱可塑性の高

分子材料)を原料とし、98%を占める空気で攻勢されているため、非常に軽量である。本研究で使用する廃 EPS 熱処理粉砕材は、廃棄された EPS を回収・粉砕処理し、その表面を赤外線により加熱処理を施し、5mm ふるいに掛けた N 社製の廃 EPS 熱処理粉砕材である(写真－1)。以下、この廃 EPS 熱処理粉砕材を廃 EPS 軽量骨材と称す。

3. 実験概要

廃 EPS 軽量骨材および人工軽量骨材を用い、単位容積質量が $0.6\sim 1.2\text{t/m}^3$ の超軽量モルタルおよび繊維補強材を添加した繊維補強超軽量モルタルについて、圧縮強度、曲げ強度、曲げ靱性およびくぎ引抜き抵抗性に関して評価検討を



写真－1 廃 EPS 熱処理粉砕材

表－1 使用材料

材料	記号	種類(記号)	物性および主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	密度=3.14g/cm ³ , 比表面積=4530cm ² /g
細骨材	S	廃EPS熱処理粉砕材 (WEC)	絶乾密度=0.20g/cm ³ , 24hr吸水率=12.5%, 粗粒率=3.37, 実積率=66.5% (気乾状態で使用:含水率=0.42%)
		人工軽量骨材 (KP)	絶乾密度=1.17g/cm ³ , 24hr吸水率=10.1%, 粗粒率=3.00, 実積率=42.1% (気乾状態で使用:含水率=0%)
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	FO	エアモルタル用起泡剤	硝酸エステル系化合物, 希釈液(10倍希釈) 発泡倍率(泡容積/希釈液量)15～20倍程度
混和材	VF	ビニロン繊維補強材	密度=1.30g/cm ³ , 繊維径=40μm, 繊維長=12mm 引張強度=1600N/mm ² , 弾性係数=4.0×10 ⁴ N/mm ²

表－2 モルタルの配合

配合名	記号	使用 細骨材	W/C (%)	s/m [*]) (Vol%)	s/c (Vol)	単位量(kg/m ³)		
						W	C	S
超軽量廃EPS骨材モルタル	EA	WEC	40	40	1.50	338	835	80
繊維補強超軽量廃EPS骨材モルタル	EF		EAに繊維補強材を1.0vol%混入したもの					
超軽量人工軽量骨材モルタル	KA	KP	40	40	1.50	338	835	515
繊維補強超軽量人工軽量骨材モルタル	KF		KAに繊維補強材を1.0vol%混入したもの					

*) 細骨材の容積 / モルタルの容積

行った。

3.1 使用材料および配合条件

使用材料を表-1に示す。廃 EPS 軽量骨材の比較として真珠岩系の人工軽量骨材を使用した。繊維補強材には、ビニロン繊維を用いた(以下、繊維と称す)。

超軽量モルタルおよび繊維補強超軽量モルタルの配合を表-2に示す。高性能 AE 減水剤および起泡剤の添加率は、超軽量モルタルの練上りの 15 打フローが $210 \pm 20 \text{mm}$ および練上りの単位容積質量が $0.6 \sim 1.2 \text{t/m}^3$ となるように定めた。超軽量モルタルは、予め起泡剤により発泡させた泡をモルタルに添加するプレフォーム方式で作製した。繊維補強超軽量モルタルは、超軽量モルタルの作製後、その容積に対し繊維を 1.0%外割添加し作製した。なお、このモルタルの単位容積質量は、 $0.6 \sim 1.6 \text{t/m}^3$ 程度となった。

3.2 モルタルの練混ぜ方法

超軽量モルタルの練混ぜには、ホバート型モルタルミキサを用いた。練混ぜ方法を図-1に示す。人工軽量骨材(KP)の使用に関しては、骨材の 24 時間吸水率(10.1%)に相当する水量を補正水として、予め練混ぜ水に加え、一方、廃 EPS 軽量骨材については、絶乾状態に近い気乾状態(含水率=0.42%)で使用しても、その吸水によるモルタルのフローロスがほとんど生じないことから⁴⁾、気乾状態で使用し、吸水率に相当する補正水を加えず、練り混ぜた。モルタルのフレッシュ性状は、練上りの単位容積質量および 15 打フローをそれぞれ JIS A 1116 および JIS R 5201 に準拠して行った。

3.3 各種供試体の作製および各種試験

ここで行った硬化モルタルの試験では、モルタルの単位容積質量が $0.6 \sim 1.2 \text{t/m}^3$ のものについて行った。各種強度試験用供試体は、圧縮試験用供試体($\phi 5 \times 10 \text{cm}$)、曲げ試験用供試体($4 \times 4 \times 16 \text{cm}$)を作製した。各供試体の養生条件は、打込みから 24 時間後に脱型し、水中(20℃)養生を材齢 7 日まで行った後、気中(20℃)養生を材齢 14 日まで行った。なお、試験材齢は 14 日と

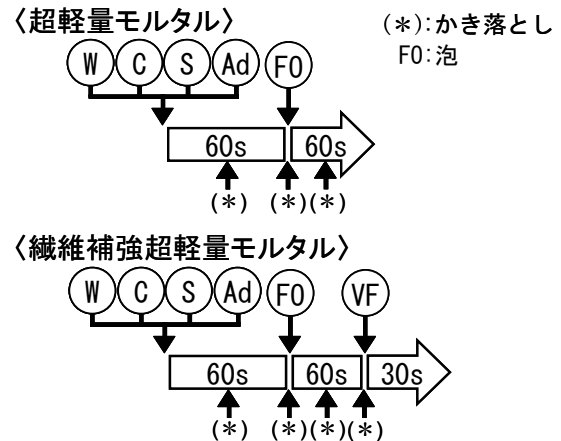


図-1 モルタルの練混ぜ方法

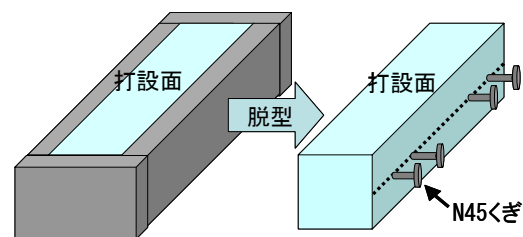


図-2 くぎ打込み位置

し、圧縮試験(JIS A 1107)、曲げ試験(JIS A 1106)、くぎ引抜き抵抗試験(JIS Z 2101)をそれぞれ JIS に準拠して行った。曲げ試験においては、スパン中央部のたわみ量を測定し、荷重-変位曲線から、曲げ靱性の評価を行った。曲げ靱性は、文献 5)の方法に従い、荷重-変位曲線における載荷点のたわみ(δ_{b1})が、0.7mm となるまでの荷重-変位曲線下の面積とした。くぎ引抜き抵抗試験については、曲げ試験供試体の強度試験後、その供試体片を用いて行った。くぎの打込み位置は、型枠側面側の中央部に 2 箇所ずつ(各配合それぞれ合計 6 本)とした(図-2 参照)。なお、1 本のくぎの打込みにおいて、2 回くぎが曲がったものを打込み失敗とし、1 配合中に、くぎの打込みが 2 箇所以上失敗したものは、評価対象から除外した。

4. 結果および考察

4.1 モルタルのフレッシュ性状

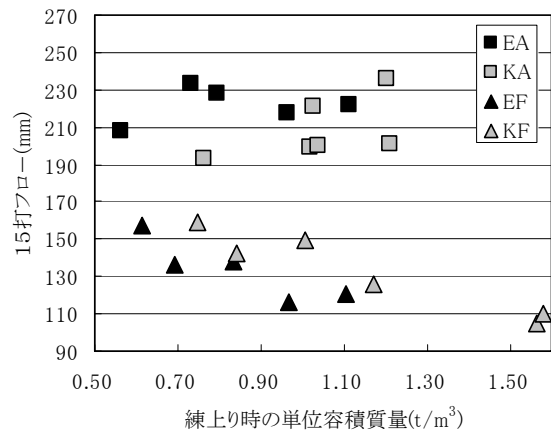
図-3 は、超軽量モルタルおよびこれに繊維を 1.0%添加した繊維補強超軽量モルタルの練上り後のフロー値とモルタルの単位容積質量を

示したものである。図より，超軽量モルタルの場合単位容積質量が $0.6\sim 1.2\text{t/m}^3$ の範囲において，高性能 AE 減水剤の添加量を調整することで単位容積質量の値に無関係にフローの目標値である $210\pm 20\text{mm}$ の範囲ではほぼ一定となった。一方，繊維補強超軽量モルタルの場合，単位容積質量が大きいほどフロー値が小さくなる傾向を示し，単位容積質量 $0.6\sim 1.6\text{t/m}^3$ の範囲において， $110\sim 160\text{mm}$ のフロー値となった。また，細骨材の種類による相違は見られなかった。

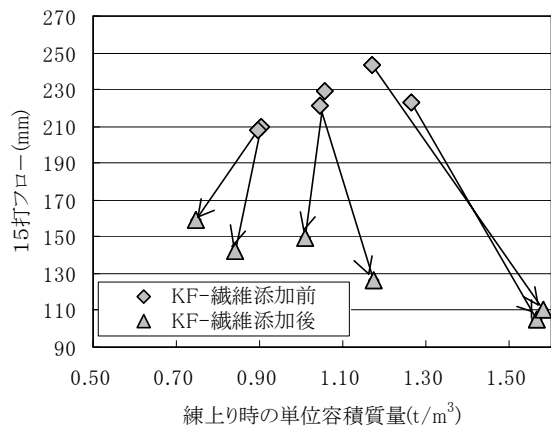
図－4 は，超軽量人工軽量骨材モルタルの繊維添加前後における，モルタルの単位容積質量とフローの関係を示したものである。図より，繊維添加前後の単位容積質量については，繊維添加前の単位容積質量が， 1.10t/m^3 より大きい場合，繊維添加後の単位容積質量は，大幅に増加している。一方，繊維添加前の単位容積質量がこの値より小さい場合，繊維添加後のそれは減少した。また，繊維添加前後のフローについては，繊維添加前の単位容積質量が大きい程，繊維添加後のフロー値の低下が大きくなった。これは，モルタル中の空気量が少ない場合，繊維添加により，モルタル中の気泡が破壊され，これに伴う単位容積質量の増加およびフローの低下が発生したと考えられる。一方，モルタル中の空気量が多い場合は逆の現象を示した。これは繊維添加により，モルタル中の気泡が破壊されるものの，練混ぜの際に繊維とモルタル中の気泡が攪拌されることで更に気泡が発泡され，消泡量より発泡量が多くなり，これに伴う単位容積質量の低下およびフロー低下が発生したと推察される。

一方，図－5 は超軽量廃 EPS 骨材モルタルの繊維添加前後における，モルタルの単位容積質量とフローの関係を示したものである。図より，繊維添加前後の単位容積質量については，繊維添加前の単位容積質量が， 0.80t/m^3 の前後で図－4 と同様の傾向を示した。

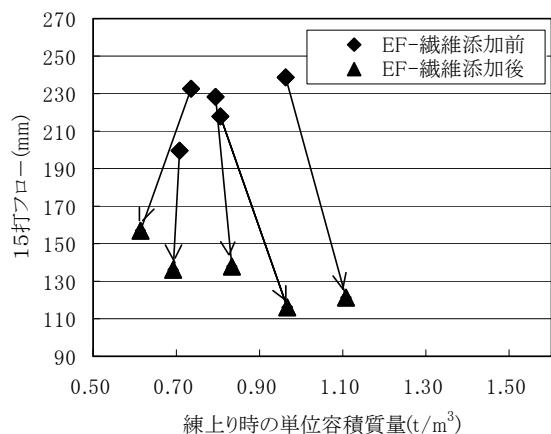
これらの特性は，繊維補強超軽量モルタルの製造において，繊維添加前後の単位容積質量の



図－3 モルタルの単位容積質量とフローの関係



図－4 KF の単位容積質量とフローの関係



図－5 EF の単位容積質量とフローの関係

変動を予測でき所要の単位容積質量のモルタルの空気量を設定する上での指標となることを示唆している。

4.2 モルタルの力学的性質

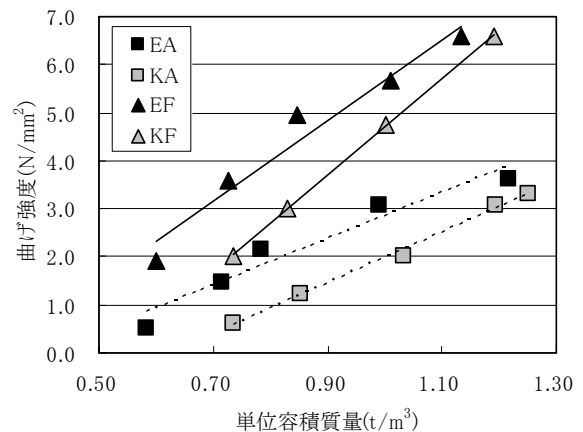
図－6 は，各種モルタルの単位容積質量と曲げ強度の関係を示したものである。図より，各種モルタルの曲げ強度は，単位容積質量の減少に伴い減少し，両者は一次比例の相関関係を示

している。また、超軽量モルタルおよび繊維補強超軽量モルタルを比較すると、繊維補強超軽量モルタルの方が超軽量モルタルより同一単位容積質量における曲げ強度は大きかった。更に、使用した細骨材について比較すると、超軽量モルタルおよび繊維補強超軽量モルタルの両者とも、廃EPS軽量骨材を用いたモルタルの方が人工軽量骨材を用いたものより同一単位容積質量における曲げ強度は大きかった。

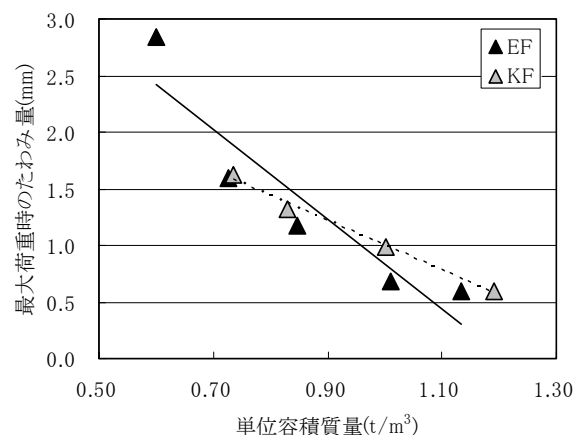
図－7は、各種繊維補強超軽量モルタルの単位容積質量と最大曲げ応力時のたわみ量の関係を示したものである。図より、最大曲げ応力時のたわみ量は、単位容積質量の減少に伴い一義的に大きくなり、使用する細骨材の種類による相違は見られなかった。

図－8は、各種繊維補強超軽量モルタルの単位容積質量と曲げ靱性の関係を示したものである。図より、各種繊維補強超軽量モルタルの曲げ靱性は、単位容積質量の減少に伴い減少し、曲げ強度と同様、一次比例の相関関係を示している。また使用した細骨材について比較すると、繊維補強廃EPS骨材モルタルの方が、人工軽量骨材を用いたものより同一単位容積質量における曲げ靱性は大きかった。

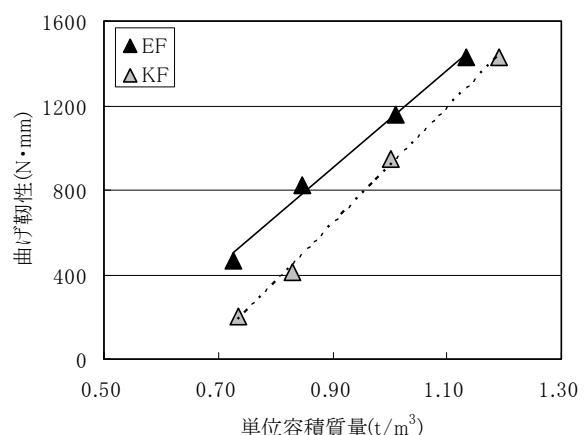
図－9は、各種モルタルの単位容積質量と圧縮強度の関係を示したものである。図より、圧縮強度は、単位容積質量の減少に伴い減少し、廃EPS軽量骨材を用いたモルタルと人工軽量骨材を用いたモルタルそれぞれについて、単位容積質量と圧縮強度の関係はほぼ直線関係となった。またその傾きは、廃EPS軽量骨材を用いたモルタルの方が小さくなった。このことは、軽量化による圧縮強度の低下が小さくなることを示すものである。また、単位容積質量 1.0t/m^3 以上の圧縮強度は、廃EPS軽量骨材を用いたモルタルの方が、人工軽量骨材を用いたモルタルより小さいが、 1.0t/m^3 以下の場合には、前者の方の圧縮強度が大きくなった。これは、人工軽量骨材を用いて軽量化する場合、廃EPS軽量骨材を用いる場合より、空気量を大幅に大きくする



図－6 単位容積質量と曲げ強度の関係



図－7 単位容積質量と最大荷重時のたわみの関係



図－8 単位容積質量と曲げ靱性の関係

必要があるためであると思われる。

4.3 モルタルのくぎ引抜き抵抗性

図－10は、各種モルタルの単位容積質量とくぎ引抜き抵抗性の関係を示したものである。図より、くぎ引抜き抵抗性は、単位容積質量の減少に伴い減少している。また使用した細骨材および繊維補強について比較すると、単位容積質量 1.2t/m^3 のKFを除いて、同一単位容積質量に

おけるくぎ引抜き抵抗値は、EF、EA、KF、KAの順に大きく、EA に関しては、繊維補強を行った KF より、くぎ引抜き抵抗値が大きい結果となった。このことは、超軽量モルタルにおいて同一の単位容積質量とした場合、廃 EPS 細骨材を用いた方が、より高いくぎ引抜き抵抗性を得られることを示している。

また、繊維の添加によりくぎ引抜き抵抗性は向上するがその影響は僅かである。

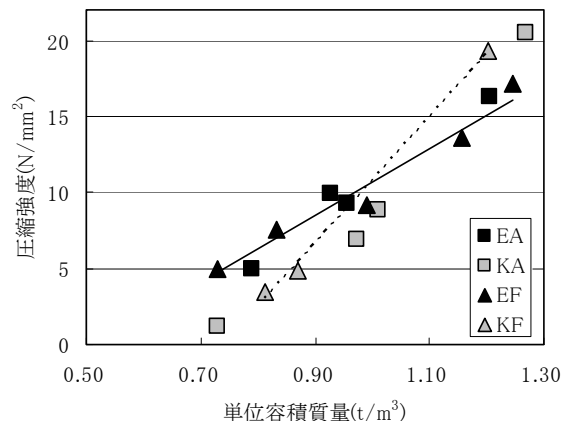
5. まとめ

廃 EPS 熱処理粉砕材をモルタル用軽量細骨材として用いた超軽量モルタル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。

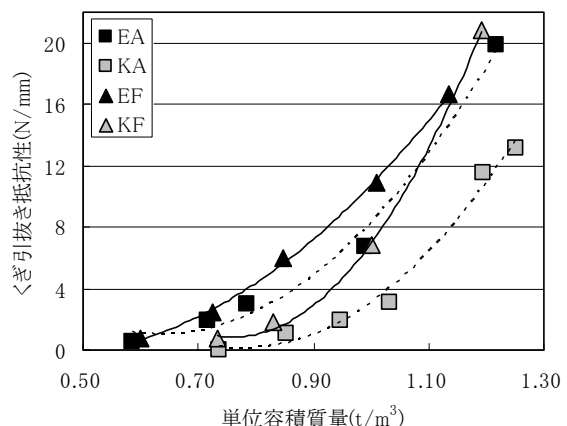
- (1) 本研究で示した廃 EPS 軽量骨材を細骨材に用いることにより、単位容積質量が 0.85t/m^3 程度で、曲げ強度が 3.5N/mm^2 以上の超軽量モルタルが製造できる。
- (2) 廃 EPS 軽量骨材を用いたモルタルは、人工軽量骨材を使用した場合に比べ、単位容積質量を同一とした条件で、曲げ強度、曲げ靱性等において優れた力学的性質を有することがわかった。
- (3) 超軽量モルタルのくぎ引抜き抵抗性は、同一の単位容積質量とした場合、人工軽量骨材を用いる場合より廃 EPS 細骨材を用いた方が、より高いくぎ引抜き抵抗性が得られ、繊維の添加の影響は僅かであることがわかった。

以上のことから、再生利用を目的とした廃 EPS 熱処理粉砕材を軽量モルタルの細骨材として用いることは、大幅な軽量化が可能であり、従来の軽量骨材の代替材料としての力学的性質も良好であることが明らかとなった。

なお、本研究の一部は、発泡スチロール再生資源協会平成 18 年度研究助成を受けて行ったものである。



図－9 単位容積質量と圧縮強度の関係



図－10 単位容積質量とくぎ引抜き抵抗性の関係

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION 2005, pp11-12
- 2) 笠井哲郎ほか：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諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1391-1396，2003
- 3) 伊達重之，長谷川聖史，前田拓郎，末森寿志，小川敦久：ビニロン繊維補強超軽量モルタルの強度に関する基礎的研究，日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工，Vol.2004，pp.1065-1066
- 4) 笠井哲郎ほか：廃 EPS 粉砕材を用いた軽量モルタルの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1583-1494，2006
- 5) 笠井哲郎：短繊維補強モルタルの曲げ靱性に及ぼす練混ぜ方法の影響，セメント・コンクリート論文集 No.51，pp.554-559，1997