

論文 廃 EPS 粉砕品を用いた軽量モルタルの諸物性

福島 誠司*1・長谷川 聖史*2・伊藤 祐二*3・笠井 哲郎*4

要旨：従来の建築用外装パネル部材に使用される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ることにより行われている。再生利用を目的に、廃棄された発泡スチロール(EPS)を回収・粉砕処理し、表面に熱処理加工を施すと、密度 0.2g/cm^3 程度の球形の軽量骨材が得られる。そこで本研究は、既存の人工軽量細骨材の代替材料として、廃 EPS 軽量骨材を細骨材に用いたモルタルの基礎物性の検討を行った。このモルタルの単位容積質量は、 1.0g/cm^3 程度と非常に小さく、その力学的性質も良好であることがわかった。

キーワード：再生利用，廃 EPS 軽量骨材，軽量気泡モルタル，ビニロン繊維補強材

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、2004 年実績で 17.5 万トン (生産量は 19.4 万トン) であり、回収対象量の内、約 7.2 万トン (41.1%) が再資源化 (マテリアルリサイクル) され、5.0 万トン (28.5%) 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 7.2 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), 3)}。

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 粉砕材が得られる。この廃 EPS 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 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 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。

2. 廃 EPS 軽量骨材

2.1 製造

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% を占める空気で作成されているため、非常に軽量である。本研究で

*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 石川島建材工業(株) 技術研究所所長 工修 (正会員)

*4 東海大学教授 工学部土木工学科 (正会員)

使用する廃 EPS 粉砕材は、廃棄された EPS を回収・粉砕処理し、その表面に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 粉砕品である(写真-1)。以下、この廃 EPS 粉砕品を廃 EPS 軽量骨材、これ用いたモルタルを廃 EPS 軽量骨材モルタルと称す。

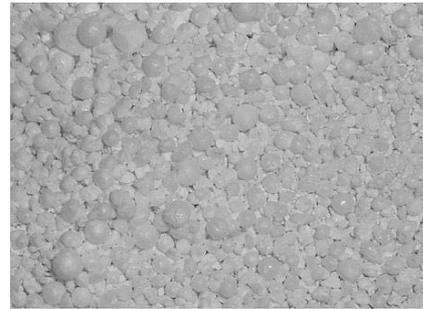


写真-1 廃 EPS 粉砕品

2.2 廃 EPS 軽量骨材の物性

廃 EPS 軽量骨材の密度および吸水率試験は JIS A 1134 に準拠して行った。また、ふるい分け試験は、JIS A 1102 に準拠して行った。このふるい分け試験では廃 EPS 軽量骨材のサンプリングによる粒度分布のばらつきを調べるため、ランダムに 12 サンプルを採取し、その変動係数も算出した。なお、ふるい分け試験に用いる試料および吸水率試験の乾燥方法は、電気炉を使用し、60℃で 48 時間乾燥させて行った(廃 EPS 軽量骨材については、この状態を絶乾状態とした)。

表-1 は、廃 EPS 軽量骨材の物性を示したものである。表より廃 EPS 軽量骨材の密度は非常に小さく、また絶乾状態の廃 EPS 軽量骨材を 24 時間吸水させた吸水率は約 30%と非常に大きい。一方、廃 EPS 軽量骨材の粗粒率は、一般的な普通細骨材(2.3~3.1)より大きい。また、変動係数が小さいことから採取位置による粒度分布のばらつきは小さい。

表-1 廃 EPS 軽量骨材の物性

材料名	種類	物性
細骨材	廃EPS粉砕材	表乾密度=0.23g/cm ³ , 吸水率 ¹⁾ =12.5% 気乾密度=0.20g/cm ³ , 含水率=0.42% 吸水率 ²⁾ =29.7% 粗粒率=3.37(変動係数=0.03)

1)表面乾燥状態時の吸水率

2)ピクノメータを用いて絶乾状態から24時間吸水させた吸水率

表-2 使用セメントの物性

材料	種類	記号	物性および主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	密度=3.16g/cm ³ 比表面積=3240cm ² /g
	早強ポルトランドセメント	EC	密度=3.14g/cm ³ 比表面積=4530cm ² /g

表-3 各シリーズの使用材料条件

	セメント	廃EPS軽量骨材
シリーズ1	普通ポルトランドセメント	気乾状態
シリーズ2	早強ポルトランドセメント	気乾状態
シリーズ3	早強ポルトランドセメント	表乾状態

表-4 モルタルの配合表

配合名	容積率(Vol.%)		
	V _w	V _c	V _s
配合1	39.8	27.4	32.8
配合2	36.8	25.4	37.8
配合3	33.9	23.3	42.8
配合4	30.9	21.3	47.8

V_w:練混ぜ水の容積率, V_c:セメントの容積率, V_s:細骨材の容積率

3. 廃 EPS 軽量骨材モルタル

3.1 実験概要

本実験では、2.2 で示した廃 EPS 軽量骨材をモルタル用細骨材として用い、廃 EPS 軽量骨材の使用時の含水状態がフレッシュ性状に及ぼす影響および廃 EPS 軽量骨材モルタルの力学的性質について検討した。

使用したセメントを表-2 に示す。細骨材は表-1 に示す含水状態の異なる 2 種類の廃 EPS 軽量骨材を用いた。使用セメントと含水状態の異なる細骨材を表-3 に示すようにシリーズ 1 ~シリーズ 3 のように組合せて使用した。モルタルの配合は、表-3 に示す各シリーズごとに

W/C=46%と一定とし、細骨材の容積率が 32.8, 37.8, 42.8, 47.8(Vol.%)となる条件とした。表-4 に配合を示す。なお化学混和剤は使用せずブレンモルタルとした。

モルタルの練混ぜにはホバート型モルタルミキサーを用い、練混ぜ方法およびモルタルのフロー試験は JIS R 5201 に準拠して行った。その後、各種強度試験用供試体(圧縮・曲げ)を作製した。強度試験用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℃)養生とした。各強

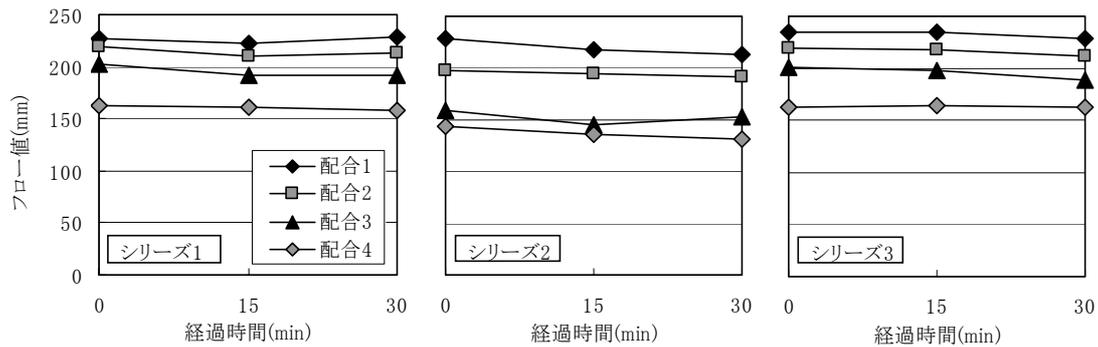


図-1 廃 EPS 軽量骨材モルタルの経過時間とフローの関係

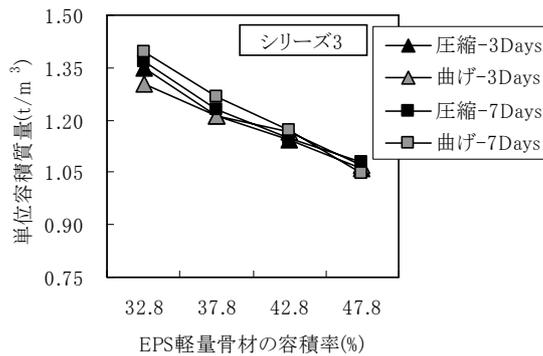


図-2 骨材容積率と単位容積質量の関係

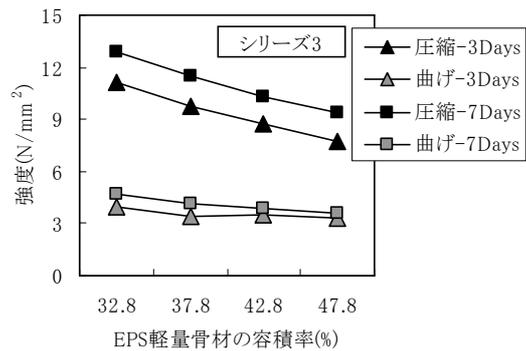


図-3 骨材容積率と強度の関係

度試験は、材齢 3 日および 7 日にて JIS に準拠して行った。

3.2 廃 EPS 軽量骨材の含水率がフローに及ぼす影響

既存の人工軽量骨材の吸水率は 10%以上程度のもものが多く、骨材貯蔵時の含水状態の管理を厳密に行わないと、練混ぜたモルタルのフレッシュ性状が大幅に変動する場合がある。一方、廃 EPS 軽量骨材は吸水率が 30%程度と非常に大きいため使用時の含水状態がモルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響が大きいと考えられる。

そこで含水状態の異なる廃 EPS 軽量骨材を用いたモルタルのフロー値の経時変化についての検討を試みた。図-1 は、廃 EPS 軽量骨材モルタルのフロー値の経過時間を示したものである。シリーズ 1 は、廃 EPS 軽量骨材を気乾状態で使用したものであるが、細骨材の容積率に関わらず、経過時間 30 分までフローロスはほとんど見られなかった。早強セメントを用いたシリーズ 2 では、僅かにフローロスが見られるが、シリーズ 1 とシリーズ 2 の差はセメントの種類によるものであると考えられる。

またシリーズ 2 と骨材を表乾状態としたシリーズ 3 を比較すると、シリーズ 3 の方がフロー値の絶対値が大きくなっているものの、フローロスが僅かに生じており、気乾状態と表乾状態の時間の経過に伴うフロー値の変化は、ほぼ同程度である。このことより、廃 EPS 軽量骨材は、吸水率が大きいにも関わらず、絶乾状態に近い気乾状態(含水率 0.42%)で使用しても、その吸水によるフローロスがほとんど生じないものと考えられる。

3.3 廃 EPS 軽量骨材モルタルの単位容積質量および力学的性質

図-2, 3 は、シリーズ 3 の廃 EPS 軽量骨材の容積率と単位容積質量および各種強度の関係を示したものである。図より、骨材容積率の増加に伴い、モルタルの単位容積質量は大幅に低下し、非常に軽量のモルタルが製造できる。一方、各種強度は骨材容積率の増加に伴い、材齢 3 日および材齢 7 日とも緩やかに低下している。

4. 廃 EPS 軽量骨材を用いた気泡モルタル

4.1 概要

非構造部材である従来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、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、軽量化のために軽量細骨材または発泡剤を使用した軽量モルタルで製造されているものが多い。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（3.5～6.5N/mm²以上）を有し、出来る限り軽量であること、および釘（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。すでに 3.3 で W/C=46%、廃 EPS 軽量骨材の容積率が 47.8(Vol.%), 材齢 7 日で 3.5N/mm² の曲げ強度を有し、単位容積質量が 1.0t/m³ 程度の軽量モルタルが作製できることを示した。しかしながら、従来のパネルの問題点は、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し、製品の歩留まりの低下や現場での据え付け作業に支障をきたすことが多い点であった。このため、伊達ら⁵⁾は金網補強の代わりにビニロンの短繊維補強材を、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、曲げ強度や耐衝撃性を大幅に向上させることに成功した。

そこで本研究では廃 EPS 軽量骨材モルタル（基本配合）に予め発泡剤により作製した気泡の添加率および繊維補強材の添加率がモルタルに及ぼす基礎物性について実験的検討を行った。

4.2 使用材料および配合条件

使用材料および配合条件を表-5, 6に示す。全ての配合において細骨材は、気乾状態の廃 EPS 軽量骨材を用い、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。混和剤の添加率は、表-6中の基本配合 B の 15 打のフロー値が 250±15mm となるように決めた。繊維補強材は伊達らと同様にビニロン繊維を使用した。添加量は、基本配合 B の容積に対し外割で 0.6, 1.0(Vol.%)添加した。モルタル中への空気泡の連行は、予め発泡剤により作製した気泡をモルタル中へ添加するプレフォーム方式を採用し、モ

表-5 廃 EPS 軽量骨材モルタルの使用材料

材料	種類	記号	物性および主成分
セメント	早強ポルトランドセメント	EC	密度=3.14g/cm ³ 比表面積=4530cm ² /g
細骨材	廃EPS粉砕材	ES	絶乾密度=0.20g/cm ³ (気乾状態の含水率=0.42%)
混和剤	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸 エーテル系化合物
	エアモルタル用起泡剤	FF	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)20倍程度
混和材	ビニロン繊維補強材	VF	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=4.0x10 ⁴ N/mm ²

表-6 廃 EPS 軽量骨材モルタルの配合条件

配合名	W/C (%)	s/c (Vol)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	SP
B	40	1.85	306	765	90	6.12
BP1	基本配合Bに外割で気泡を混入し目標 単位容積質量0.90±0.05(t/m ³)としたもの					
BP2	基本配合Bに外割で気泡を混入し目標 単位容積質量0.75±0.05(t/m ³)としたもの					
BF1	基本配合Bに外割(Vol)で繊維補強材を0.6 (%)混入したもの					
BF2	基本配合Bに外割(Vol)で繊維補強材を1.0 (%)混入したもの					
BP2F1	配合BP2に外割(Vol)で繊維補強材を0.6 (%)混入したもの					
BP2F2	配合BP2に外割(Vol)で繊維補強材を1.0 (%)混入したもの					

表-7 モルタルのフレッシュ性状および単位容積質量

配合名	15打フロー値(mm)			単位容積質量(t/m ³)		
	1次 練混ぜ	2次 練混ぜ	3次 練混ぜ	1次 練混ぜ	2次 練混ぜ	3次 練混ぜ
B	242	-	-	1.05	-	-
BP1	203	255	-	1.00	0.88	-
BP2	231	255	-	1.08	0.70	-
BF1	263	177	-	1.09	1.07	-
BF2	259	153	-	1.01	1.10	-
BP2F1	186	246	138	0.99	0.77	0.96
BP2F2	206	250	125	1.03	0.73	0.91

ルタルの練上りの単位容積質量が 0.90±0.05, 0.75±0.05t/m³程度となるよう添加した。

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。練混ぜ方法は基本配合 B の練混ぜを 1 次練混ぜ、気泡を添加または繊維補強材を添加させる練混ぜを 2 次練混ぜ、更に気泡を添加した 2 次練混ぜに繊維補強材を添加させる

ものを3次練混ぜと称し、各段階で製造されるモルタルについての各種試験を行った。1次練混ぜ～3次練混ぜまでの各練混ぜ方法は、低速で60秒間練り混ぜた。モルタルのフロー試験はJIS R 5201に従って行い、練上り密度の測定はJIS A 1116に準じて行った。各種強度試験用供試体の作製および養生、各種強度試験方法は3.1と同様とした。なお、試験材齢については3日、7日に加え14日のものについても行った。また材齢14日の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6)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または1.4mmとなるまでの荷重-変位曲線下の面積とした。

4.3 各種モルタルのフレッシュ性状

表-7にモルタルのフレッシュ性状を示す。表より、各配合の1次練混ぜのフロー値は、186～263mmとばらつきがあるものの、気泡を添加させた2次練混ぜのフロー値は、246～255mmとほぼ同程度となった。また、繊維補強材を添加させた2次練混ぜは、その添加率の増加に伴い、フロー値は低下している。一方、練上り後の単位容積質量についてはBP1、BP2は目標範囲の単位容積質量となっている。一方で、BF1、BF2のそれは、繊維補強材の添加率が大きいほど単位容積質量は若干大きくなっている。しかし、BP2F1、BP2F2の2次練混ぜから3次の練混ぜの単位容積質量は $0.2t/m^3$ 程度増加した。これは繊維を添加する3次練混ぜの際に、空気泡が破壊され空気量が減少したためであると思わ

れる。

4.4 各種モルタルの力学的性質および単位容積質量

図-4～6は、モルタルの曲げおよび圧縮強度と単位容積質量を示したものである。BF1、BF2ともに基本配合Bと同様な単位容積質量を示し、Bより圧縮および曲げ強度が大幅に増加している。またBP1、BP2ともに気泡の連行は良好で単位容積質量が $0.8t/m^3$ 程度まで軽量化が実現できた。以上のことより、空気泡の連行量が少ないまたは全く連行させなくても所要の軽量化が可能である。しかしながら、BP1、BP2ともに外装パネル板として要求される曲げ強度($3.5N/mm^2$ 以上)を下回っている。そこで軽量気泡モルタルに繊維補強材を添加させたBP2F1、BP2F2と基本配合Bと比較すると、同程度の単位容積質量でありながら、圧縮強度はBより劣るものの、曲げ強度は大幅に改善されており、繊維補強材の曲げ強度への力学的性質に及ぼす影響が大きいことがわかった。

4.5 各種モルタルの曲げ靱性の評価

図-7は、各種モルタルの曲げ靱性を示したものである。図より繊維補強材を添加したものと無添加のものを比較すると、添加したものの曲げ靱性は、どれも $800N\cdot mm$ 以上と無添加のものより大きな曲げ靱性を示している。また、繊維補強材の添加率が0.6(Vol.%)のBP2F1、BF1と、1.0(Vol.%)のBP2F2、BF2において $\delta_{b1}=0.7mm$ から $\delta_{b1}=1.4mm$ への曲げ靱性の変化率を調べると、添加率が0.6(Vol.%)は1.4～1.7倍、1.0(Vol.%)は1.8～2.0倍であり、これは添加率の高いもの

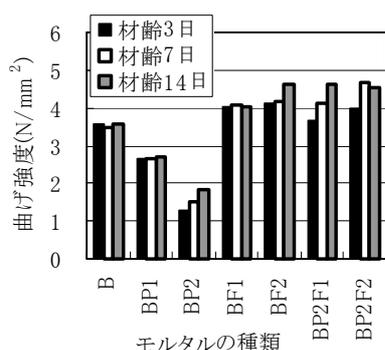


図-4 モルタルの曲げ強度

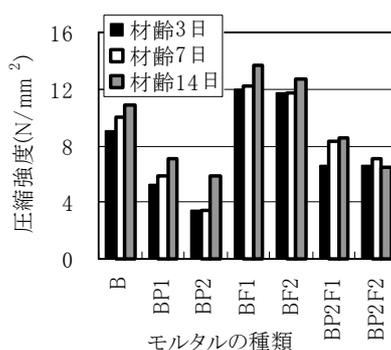


図-5 モルタルの圧縮強度

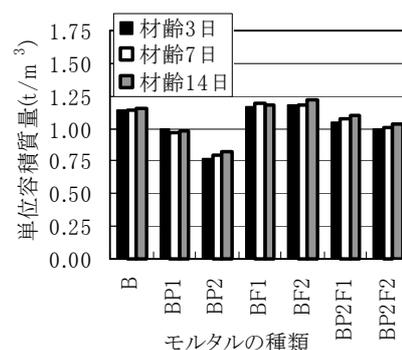


図-6 モルタルの単位容積質量

程、たわみ量に大きく影響を及ぼすことを示すものである。

図-8は、繊維補強材の添加率と曲げ靱性の関係を示したものである。図より基本配合Bに繊維補強材を添加させた配合は、添加率が高いもの程、曲げ靱性は増加しており、繊維補強材の添加率が曲げ靱性に及ぼす影響が非常に高いことを示している。また配合BP2に繊維補強材を添加させたものも基本配合Bに繊維補強材を添加させたものより曲げ靱性は劣るものの繊維補強材の添加率の増加に伴い曲げ靱性も増加している。更に配合BP2に繊維補強材を添加したものは、基本配合Bに繊維補強材を添加したものより曲げ靱性が小さい。これは軽量化を目的に気泡を添加したモルタルの空気量の増加に伴い、繊維補強材とモルタルマトリックスの付着面が減少したことか原因と考えられる。

以上のことより、繊維補強材を使用することおよびその添加率が曲げ靱性に及ぼす影響は、廃EPS軽量骨材モルタルにおいても有効であることを示すものである。

5. まとめ

廃EPS粉碎品をモルタル用軽量細骨材として用い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 $1.0t/m^3$ 程度で、曲げ強度が $3.5N/mm^2$ 以上の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に混和剤による気泡および繊維補強材の添加は、モルタルの軽量化および曲げ靱性の向上を目的とした場合、優れた性質を有することが明らかとなった。

以上のことから、再生利用を目的とした廃EPS粉碎品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、力学的性質も良好であることから従来の軽

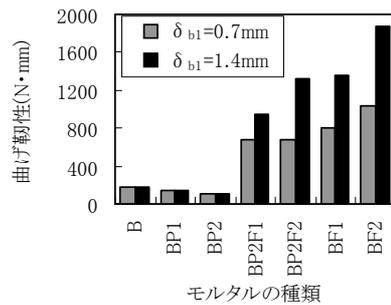


図-7 モルタルの曲げ靱性

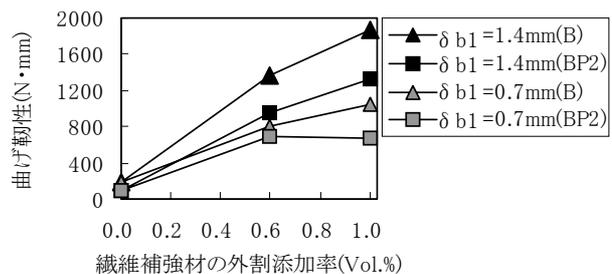


図-8 繊維補強材の添加と曲げ靱性の関係

量骨材の代替材料としての有効性を示唆するものである。

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会: JEPSRA INFORMATION 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基礎性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1305-1310, 2002
- 3) 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
- 4) 笠井芳夫編: 軽量コンクリート, 技術書院, pp.43-64, 2002
- 5) 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
- 6) 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