

廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を用いた軽量コンクリートの循環利用

福島誠司*1・笠井哲郎*2

Circulative Use of Lightweight Concrete Using Crushed Waste-Expanded-Polystyrene Melted Ingot

by

Seiji FUKUSHIMA and Tetsuro KASAI

(Received on Sep.30, 2006 & accepted on Dec.20, 2006)

Abstract

It was found that the unit mass of concrete formed using crushed waste-expanded-polystyrene (waste EPS) melted ingot waste as coarse aggregate was approx. 1.7 to 1.8 t/m³, and that the compressive strength of the concrete was approx. 15 to 33 N/mm². In this study, reuse of this concrete was experimentally investigated. The bonding mortar of the recycled coarse aggregate manufactured from this waste EPS original concrete was weaker than that of normal aggregate concrete. Therefore, the quality deterioration of recycled coarse aggregate and concrete in circulative use was small.

Keywords: Waste EPS melted ingot, Crushed waste EPS, Lightweight aggregate, Circulative use

1. 諸 言

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 19.3 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, 4.5 万トン (25.6%) 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, これまでに著者は, 砕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実験検討を行ってきた。その結果, 単位容積質量が 1.76~1.83t/m³ で, 圧縮強度が 15~33N/mm² 程度の軽量骨材コンクリートが製造できることを示した²⁾。また, インゴット破砕材を粗骨材として用いたコンクリートの力学的性質は, インゴットの種類に無関係に, インゴットの力学的性質の影響が小さいことを明らかにした。更に, 熱的性質は, 普通骨材および人工軽量骨材の場合に比べ熱伝導率が大幅に小さいことを示した³⁾。このような優れた特徴を有する一方で, インゴット破砕材を用いたコンクリートは無機質と有機質が混在する複合材料であることから, これが廃棄された際の処理や再生利用の問題点が指摘された。

そこで本研究では, 廃 EPS 熱減容インゴット破砕材を用いたコンクリートの再生利用性についての検討を行った。

2. インゴットおよびインゴット破砕材

2.1 インゴットおよびインゴット破砕材

廃 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, 約 98% を占める空気で構成されているため, 再生利用のための運搬コストが非常に高くなる。このため, 通常, 発生場所または全国に 140 箇所の最寄りの処理拠点 (エプシー・プラザ) において直ちに熱処理により熔融および脱泡し減容化される⁴⁾。この減容化されたものがインゴットと呼ばれている。またインゴットをせん断式クラッシャ等で破砕したものがインゴット破砕材である。インゴットおよびインゴット破砕材の一例を Fig. 1, 2 に示す。インゴット破砕材の形状は普通砕石に類似しているが, 扁平なものが若干多い。また, その表面には空気泡の痕跡が目視で確認できる。

2.2 各種インゴットの物性

廃 EPS インゴットの性質は, 一般に廃棄前の EPS の用途や熱処理の際の処理装置の型式や時間当たりの処理量, 加熱温度 (120~330℃) および加熱時間等により脱泡の程度が異なる。そこで, EPS の用途や減容処理条件の異なる 7 種類のインゴットを収集し, その性能評価試験を行った。各種インゴットからダイヤモンドカッタを用い, 30×30×60mm または 25×25×50mm の供試体を切り出し, 圧縮強度試験および線膨張試験等を行った。Table 1 に廃棄前の EPS の用途およびその減容処理条件, 各種インゴットの試験結果を示す。表より, 各インゴットとも線膨張係数はバージンポリスチレンと同等の値を示しているが, 密度および圧縮強度はそれより小さい値となり, またポ

*1 東海大学工学研究科土木工学専攻

*2 東海大学工学部土木工学科教授

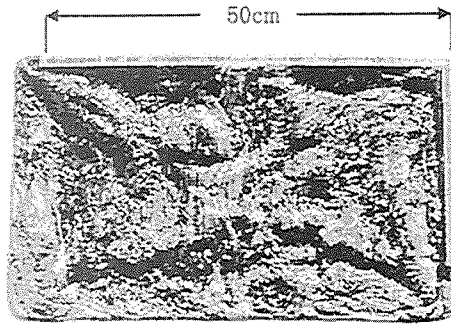


Fig.1 Ingot(IG-3)

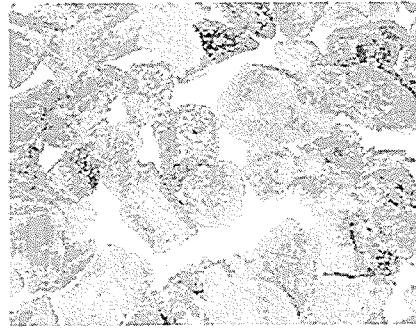


Fig.2 Crushed ingot (IGC-3)

Table 1 Kinds and properties of waste EPS

Kinds of waste EPS ingot	IG-1	IG-2	IG-3	IG-4	IG-5	IG-6	IG-7	polystyrene ⁵⁾
Use of EPS before scrapping	Form	Float	Fish box	Fish box	Fish box	Buffer board	Board for dew	non
Method of heat treatment	Steam	Steam	Melting	Fricative heat	Air	Steam	Steam	non
Temperature of treatment (°C)	300	330	250	120	230	280	330	non
Impurities content (wt %)	Nail·Wire	Shell	Paper	Paper	Paper	non	Nonflammable agent	non
Ratio of impurities	1.41	0.13	0.42	0.29	0.01	0	0	non
Apparent density (g/cm ³)	0.93	1.05	0.98	0.70	0.60	0.71	0.92	1.04~1.05
Coefficient of linear thermal expansion (×10 ⁻⁶ /°C)	71.9	71.3	71.8	72.5	71.8	71.9	73.6	50~83
Compressive strength (N/mm ²)	54.2	56.5	60.8	40.5	25.5	36.1	15.9	82.8~89.7
Compressive static modulus of elasticity (×10 ³ N/mm ²)	3.08	3.18	3.04	2.07	1.49	1.89	2.98	2.48(Tensile)
Poisson's ratio	0.36	0.37	0.39	0.36	0.35	0.39	0.41	0.34

Table 2 Properties of crushed waste EPS ingot

Kinds of crushed ingot	IGC-1	IGC-2	IGC-3	IGC-4	IGC-5	IGC-6	IGC-7	Crushed gravel
Density under saturated surface-dry state (g/cm ³)	1.00	1.06	0.99	0.82	0.68	0.74	0.94	2.66
Water absorption (%)	3.44	1.91	3.65	9.00	7.88	4.46	2.72	1.53
Percentage of solid volume (%)	47.5	49.5	48.3	48.5	48.8	47.9	50.8	57.0

Mix ratio of coarse aggregate 5~10mm:10~15mm=1:1

アソン比は大きな値となった。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存していること、および熱減容処理の際の加熱温度がポリスチレンの融点(240°C)およびガラス転移温度(85~125°C)を上回るものが多いため、ポリスチレン樹脂の高分子鎖が切断され低分子化したこと等が原因であると考えられる⁶⁾。インゴットの力学的性質は、廃EPSの種類やその減容処理条件の相違により大幅に異なり、圧縮強度および圧縮静弾性係数の最大値と最小値には、それぞれ4倍および2倍程度の差が生じた。またインゴットの弾性係数は普通骨材(3×10⁴~12×10⁴N/mm²)に比べ小さく、線膨張係数はセメントペースト(10×10⁻⁶~20×10⁻⁶/°C)および普通骨材(6×10⁻⁶~12×10⁻⁶/°C)に比べかなり大きい値である。

2.3 各種インゴットの破砕材の物理的性質

Table 1に示した各種インゴット(IG-1~7)をせん断式ジョークラッシュャで破砕し、5~15mmふるいに掛けたインゴット破砕材に対し、コンクリート用粗骨材としての評価試験として密度、吸水率および実積率試験をJISに準拠し行った。Table 2にIG-1~7それぞれを破砕したインゴット破砕材(IGC-1~7)の物理試験結果を示す。破砕材の密度に関しては、Table 1の結果の説明でも述べたように、減容処理条件により脱泡の程度が異なる

ため、最大と最小で0.4g/cm³程度の差が生じている。吸水率に関しては、廃EPSインゴットの種類により例外もあるが、密度が大きいものほど吸水率は小さい値となっている。なお、Table 1のインゴットの密度よりインゴット破砕材の密度の方が大きいのは、前者は気乾状態、後者は表乾状態で測定したためである。この内、本実験で使用したインゴットはIG-3に相当するものである。

3. 実験概要

3.1 使用材料

本実験では、廃EPSインゴット破砕材をふるいに掛け5~15mmの粒度のものをコンクリート用軽量粗骨材として用い、コンクリート用軽量粗骨材の評価試験として密度および吸水率試験、実積率試験をJISに準拠し行った。使用材料はTable 3に示した通りであり、全てのコンクリートの配合において、粗骨材以外のセメント、細骨材および混和剤は同一とした。

3.2 原コンクリートの製造および強度試験

廃EPSインゴット破砕材を用いた原コンクリートの配合条件をTable 4に示す。廃EPSインゴット破砕材を粗骨材に用いたコンクリートを以下、廃EPSインゴット骨材コンクリートと称

Table 3 Materials of concrete.

Materials	Kind	Symbol	Characteristics
Cement	Ordinary portland cement	OC	Density=3.16g/cm ³ , Specific surface=3280cm ² /g
Fine aggregate	Crushed sand	CS	Density=2.58g/cm ³ , Water absorption=2.28%, F.M.=2.85
Coarse aggregate	Original coarse aggregate (Crushed waste EPS ingot)	OA	Density=0.99g/cm ³ , Water absorption=1.90% Percentage of absolute volume=51.0%
	First recycle aggregate (W/C=35%)	R1A-35	Density=1.10g/cm ³ , Water absorption=4.38% Percentage of absolute volume=53.0%
	First recycle aggregate (W/C=50%)	R1A-50	Density=1.10g/cm ³ , Water absorption=5.26% Percentage of absolute volume=53.6%
	Second recycle aggregate (W/C=35%)	R2A-35	Density=1.12g/cm ³ , Water absorption=4.08% Percentage of absolute volume=53.6%
Chemical admixture	Air-entraining and water-reducing agent	AER	Complex poriolin and Lignin sulfonic acid compound
	Air-entraining agent(AE)	AE	Alkylarylsulfonic acid compound
	Air-entraining and high-range water-reducing agent	SP	Naphthalene type

Table 4 Properties of crushed waste EPS ingot

Kinds of concrete	Symbol	Used Coarse aggregate	Water-cement ratio(%)	Air content (%)	s/a (%)	Unit contents(kg/m ³)							
						Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate*	AER	AE	SP	
Original concrete	OC-35	OA	35	5	52	177	506	822	291	-	-	6.072	
	OC-50		50				354	887	314	0.885	0.071		
First recycle concrete	R1C-50-35	R1A-50	35				506	822	324	-	-	6.072	
	R1C-50-50		50				354	887	349	0.885	0.071		
	R1C-35-35	R1A-35	35		506		870	303	-	-	6.072		
	R1C-35-50		50		354		983	327	0.885	0.071			
Second recycle concrete	R2C-35-35-35	R2A-35-35	35		55			506	870	309	-	-	6.072

*Mixed rate of coarse aggregate 5~10mm:10~15mm=1:1(ratio of mass)

す。コンクリートの練混ぜは、容量 100l のパン型強制練りミキサーを使用し、全材料を投入後、2分 30 秒間練混ぜた後、スランプと空気量をそれぞれ JIS A 1101 および JIS A 1118 に準じて測定を行った。その後、圧縮強度試験用供試体型枠(φ100×200mm)および再生粗骨材製造用供試体(40×60×5mm)を作製した。圧縮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、水温 20℃で 27 日間水中養生した(標準養生)。再生粗骨材製造用供試体の養生条件は、再生粗骨材が主に長期材齢のコンクリートから製造されることを考慮し、脱型後、水温 20℃で 7 日間水中養生し、温水養生槽を用いて水温 50℃で 39 日間の水中養生後、更に気温 20℃で 14 日間の気中養生を行った(長期養生)。なお、この養生は積算温度から換算すると、20℃で 84 日間の養生に相当する。

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行い、圧縮強度試験時コンプレッソメータを用いて圧縮ひずみの測定を行った。

3.3 一次再生骨材

一次再生骨材(以下 R1A と記す)は、長期養生した再生骨材製造用供試体を破砕最大口径 15mm のせん断式ジョークラッシャーで破砕し、5~20mm の各ふるいに留まるものをそれぞれ密度の異なる 3 種類の溶液(溶液密度: ρ₁=1.00g/cm³, ρ₂=1.35g/cm³, ρ₃=1.47g/cm³)を使用した回収方法をそれぞれ case-1, case-2, case-3 とする)に投入し、これらの溶液に浮遊する骨材を回収した。また、R1A 中の廃 EPS インゴット原骨材部分に付着するモルタル量を測定するために、R1A を 60℃で 48 時間乾燥後(絶乾状態)、1~4 倍に希釈した塩酸に投入・攪拌し、モルタル部分

を分解した。その後、2.5 および 5mm のふるいを用いて水洗いし、これらを絶乾状態にした後、R1A の質量減少量を測定し、この値から容積比でモルタル付着率を算出した。原骨材回収率については、コンクリートの配合から求まる廃 EPS インゴット骨材量に対する R1A 中の廃 EPS インゴット原骨材部分の質量比として算出した。

3.4 一次および二次再生骨材コンクリート

一次再生骨材コンクリート(以下 R1C と記す)の使用材料および配合条件を Table 3, 4 に示す。粗骨材は、case-2 より回収した、5~15mm の R1A を使い、コンクリート用軽量粗骨材の評価試験として 3.1 と同様の評価試験を行った。その他の条件は原コンクリートと同一とし、これらのコンクリートに対し、原コンクリートと同様の試験を行った。なお、R1C-35-35 および R1C-35-50 の s/a は 55%である。

二次再生骨材コンクリート(以下 R2C と記す)の使用材料および配合条件を Table 3, 4 に示す。R2C の作製においては、粗骨材は、case-2 より回収した、5~15mm の R2A を使い、その他の使用材料は原コンクリートと同一とし、配合条件は W/C=35%, s/a=55%で行った。

3.5 二次および三次再生骨材

二次再生骨材(以下 R2A と記す)は、長期養生した R1C から 3.3 と同様な方法により作製した。これらの R2A に対し、コンクリート用軽量粗骨材の評価試験として 3.1 と同様の評価試験を行った。

三次再生骨材(以下 R3A と記す)は、長期養生した R2C から 3.3 と同様な方法により作製した。この R3A 対し、密度試験のみを行った。

4. 実験結果および考察

4.1 一次再生粗骨材の性質

Fig.3, 4は、2.5mmおよび5mmふるいに留まるR1Aのモルタル付着量の測定結果から算出した原骨材回収率と、モルタル付着率を示したものである。図より、2.5mmふるいおよび5mmふるいにおける原骨材回収率を比較すると、全ての場合において2.5mmふるいの方が5mmふるいより原骨材回収率は大きい、その差は僅かである。この差が小さい理由として、廃EPSインゴットはモルタル部分より変形性能が大きい、原コンクリートの破砕処理の際に廃EPSインゴットは破砕され難く、5mm以下の廃EPSインゴット発生が少なくなったためと考えられる。一方、モルタル付着率は2.5mmふるいの方が5mmふるいより小さいが、骨材の回収法でcase-1とcase-2では、ふるいの大きさによる差は殆ど見られない。回収方法の相違に着目すると、使用した溶液密度が大きい回収方法ほど、原骨材回収率が大きくなっているが、case-2とcase-3の差は僅かである。一方、case-3のモルタル付着率は非常に大きくなっている。これらのことより、軽量骨材としての回収方法としては、case-2が高い原骨材回収率で、低いモルタル付着率となり、その他の回収方法より優れていると評価できる。以上のことより、本研究ではcase-2を回収方法とした。原骨材回収率について、R1A-35のcase-2,3の場合、R1A-50のそれに比べ、原骨材回収率が小さくなっている。またモルタル付着率においては、R1A-35のcase-2,3の場合、R1A-50のそれに比べ、モルタル付着率が大きくなっている。これはR1A-35の原骨材に付着するモルタルの密度がR1A-50のより高いためであると考えられる。

Fig.5は、原コンクリートを破砕し、case-2 および 5mm ふるいを用いて回収した R1A の原骨材回収率およびモルタル付着率を示したものである。なお、図には、普通骨材を粗骨材に用いた普通骨材コンクリートの場合の各値についても示した⁷⁾。図より、普通骨材コンクリートに比べ、廃EPSインゴット骨材コンクリートの原骨材回収率は、62.1~71.2%と回収率が高く普通骨材コンクリートのその2倍近い値となった。また、モルタル付着率については11.4~11.6%と普通骨材コンクリートのその1/4程度と非常に低い値となった。

4.2 一次再生骨材コンクリートの力学的性質

Fig.6は、RICのW/Cと圧縮強度の関係を示したものである。図には、各原コンクリートの圧縮強度の値も示した。図より、RICの圧縮強度は、W/Cが小さいほど原コンクリートの圧縮強度に比べ高い値となった。また、RICのW/Cを原コンクリートのそれと同様にした場合、圧縮強度はほぼ同程度か高い値となっている。

Fig.7は、RICの単位容積質量と圧縮弾性係数の関係を示したものである。図には、各原コンクリートの単位容積質量と圧縮弾性係数の関係も示した。図より、単位容積質量と圧縮弾性係数は、ほぼ一次比例の相関を示し、単位容積質量が小さいほど圧縮弾性係数は小さくなっている。また、RICの単位

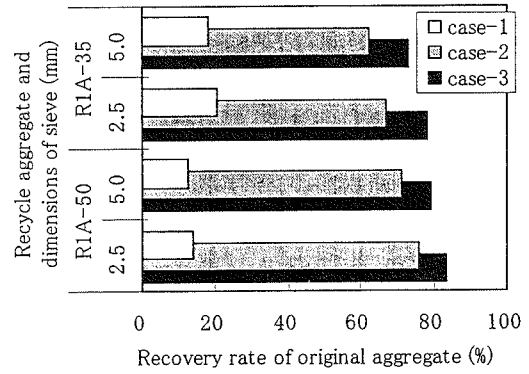


Fig.3 Recovery rate of original aggregate.

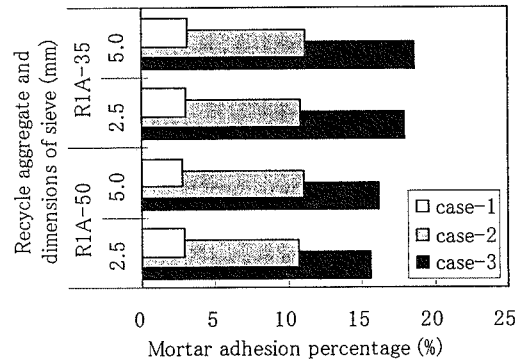


Fig.4 Mortar adhesion percentage.

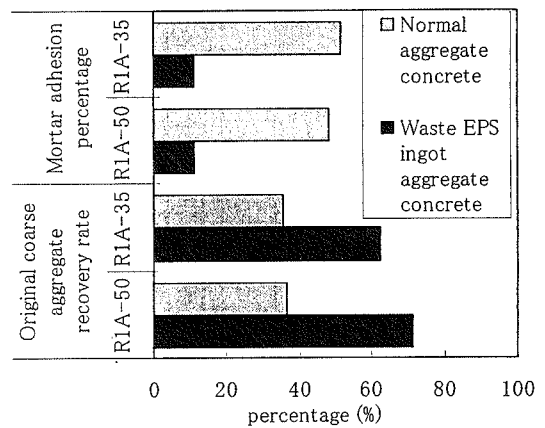


Fig.5 Comparison with normal aggregate concrete and waste EPS ingot aggregate.

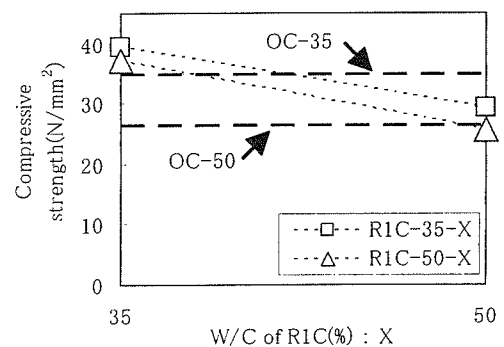


Fig.6 Compressive strength of R1C.

容積質量は各原コンクリートより僅かに大きくなり、1.82~1.93t/m³程度であった。

4.3 二次再生粗骨材の性質

Fig.8 は、原粗骨材、一次再生骨材および二次再生骨材の絶乾密度を示したものである。図より各 R1A とも絶乾密度は 1.05g/cm³ 程度となり、一次再生することで原粗骨材より、0.08g/cm³ 程度絶乾密度が大きくなる。しかし、二次再生した R2A の絶乾密度は、R2A-35-35 の場合を除いて、一次再生から二次再生することによる増加が殆どなく、二次再生骨材の絶乾密度は一次再生骨材とほぼ同程度の値を示した。R2A-35-35 については、W/C が小さいためモルタルの付着力が大きく、原粗骨材へのモルタル付着量が若干多くなったため、他と異なる傾向となったものと考えられる。そこで、R2A-35-35 より R3C-35-35-35 を作製し、3.3 と同様な方法により回収した再生骨材 R3A-35-35-35 の絶乾密度と R2A-35-35 のそれを比較した。R3A-35-35-35 の二次再生から三次再生することによる絶乾密度の変化は、R2A-35-35 より 0.02g/cm³ 程度小さくなった。

Fig.9 は、吸水率について Fig.8 と同様な関係を示したものである。図より、各骨材の吸水率についても密度の場合と同様に、一次再生することによる吸水率の増加が見られるが、一次再生から二次再生することによる吸水率の増加は僅かとなった。

以上のことより、廃 EPS インゴット骨材は、一次再生することで密度、吸水率の面で原骨材より僅かに品質が低下するが、二次再生することによる品質低下はほとんど見られない。このことは、廃 EPS インゴット骨材をコンクリート用軽量骨材として、循環利用できることを示唆するものである。

Fig.10 は、原粗骨材、一次再生骨材および二次再生骨材の実積率を示したものである。図より一次および二次再生骨材の場合とも原粗骨材より、高い実積率となった。これは付着したモルタルにより原粗骨材に含まれている扁平な形状のものが減少し、粒形が改善されたためであると考えられる。

5. 結 言

廃 EPS 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再生利用性に関し検討した結果、本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 廃 EPS インゴット骨材コンクリートを破砕して得られた再生粗骨材は、普通骨材コンクリートの場合に比べ、原骨材回収率が 2 倍程度と高く、モルタル付着率が 1/4 程度と非常に少なく、普通骨材コンクリートより再生利用性に優れている。
- (2) 廃 EPS インゴット骨材コンクリートの再生粗骨材を使用した再生骨材コンクリートは、W/C が同一の原コンクリートに比べ、単位容積質量は若干大きくなるが、圧縮強度は同程度か若干高い値を示した。
- (3) 廃 EPS インゴット骨材は、一次再生することで密度、吸水率の面で原骨材より僅かに品質が低下するが、二次再生することによる品質低下はほとんど見られなかった。

以上のことから、廃 EPS インゴット破砕材は、リサイクルによる品質低下が小さく、コンクリートの軽量骨材としての循環利用できる可能性があると思われる。

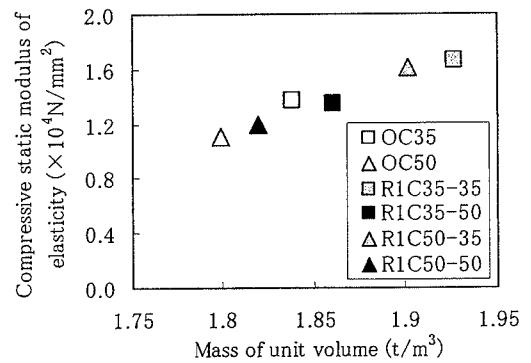


Fig.7 Relation between compressive static modulus of elasticity and mass of unit volume.

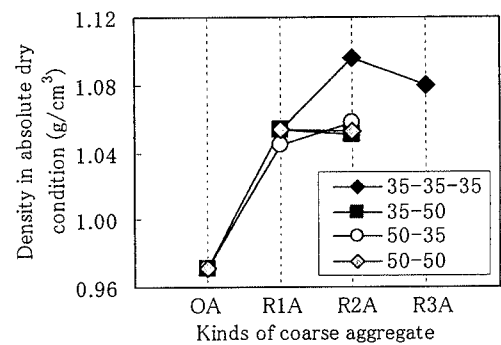


Fig.8 Density in absolute of dry condition of recycle aggregate.

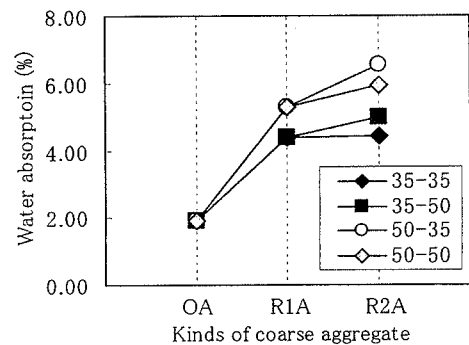


Fig.9 Water absorption of recycle aggregate

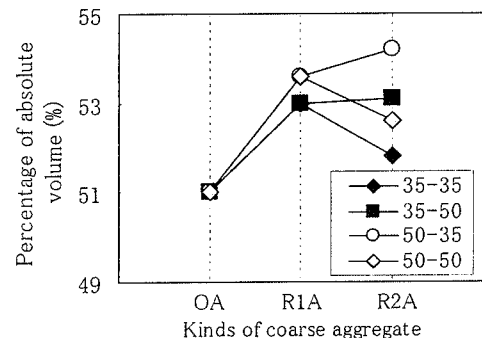


Fig.10 Percentage of absolute volume of recycle aggregate.

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION pp.11-12, 2005
- 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) 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, pp.9-118, 1999
- 6) 川村満紀：土木材料学, 森北出版株式会社, pp.121-126, 1996
- 7) 笠井哲郎ほか：原コンクリートの配合条件が再生骨材の品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1209-1214, 2002