

論文 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再生利用

福島 誠司^{*1}・大野 浩継^{*2}・上宮 晃一^{*2}・笠井 哲郎^{*3}

要旨：廃 EPS の中間処理材であるインゴット破砕材を軽量骨材として用いると、単位容積質量が $1.76\sim 1.83\text{t/m}^3$ で、圧縮強度が $15\sim 33\text{N/mm}^2$ 程度の軽量骨材コンクリートが製造できる。本研究は、このコンクリートの再生利用について実験的検討を行ったものである。インゴット破砕材とモルタルとの付着力が小さいため、原コンクリートを破砕して得られる再生粗骨材は普通骨材コンクリートの場合に比較して付着モルタルが少なく、循環利用による再生粗骨材および再生骨材コンクリートの品質低下が小さくなった。

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

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、2003 年実績で 17.3 万トン (生産量は 19.3 万トン) であり、回収対象量の内、約 6.8 万トン (39.3%) が再資源化 (マテリアルリサイクル) され、4.6 万トン (26.3%) 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資源化されている。特に再資源化を目的に回収された 6.8 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、これまでに著者らは、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 $1.76\sim 1.83\text{t/m}^3$ 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

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 150 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

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東海大学 工学部土木工学科

*3 東海大学教授 工学部土木工学科 (正会員)

に熱処理により溶融・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碎したものがインゴット破碎材である。インゴットの物性は、一般に熱処理時の際の加熱温度(120℃～330℃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。インゴットおよびインゴット破碎材の一例を写真-1, 2に、主なインゴットおよびインゴット破碎材の物性を表-1, 2に示す。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。

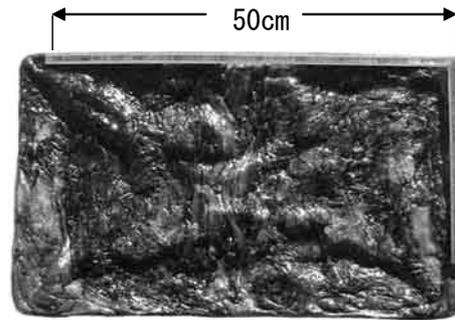


写真-1 インゴット(IG-3)

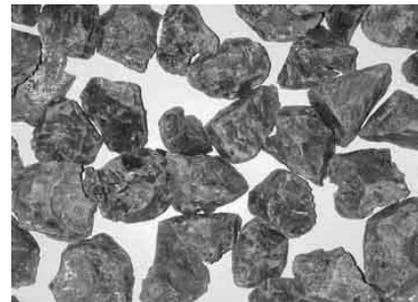


写真-2 インゴット破碎材(IG-3)

3. 実験概要

3.1 使用材料

廃 EPS インゴットを以下 IG と称す。本実験では、IG 破碎材をふるいに掛け 5～15mm の粒

表-1 廃 EPS インゴットの種類と基礎物性

| 廃EPSインゴットの種類 項目 | IG-1 | IG-2 | IG-3 | IG-4 | IG-5 | IG-6 | IG-7 | ポリスチレン ⁵⁾ |
|--|------|------|-------|-------|-------|------|------|----------------------|
| EPSの用途 | 化粧型枠 | ブイ | 魚箱 | 魚箱 | 魚箱 | 緩衝材 | 露受け材 | — |
| 処理方法 | 蒸気温風 | 蒸気温風 | 溶融脱法 | 摩擦熱 | 熱風 | 蒸気温風 | 蒸気温風 | — |
| 減容処理温度(℃) | 300 | 330 | ～250 | 120 | 230 | 280 | 330 | — |
| 不純物質 | 釘・針金 | 貝殻 | 紙・ラベル | 紙・ラベル | 紙・ラベル | なし | 難燃剤 | — |
| 不純物混入率*(%) | 1.41 | 0.13 | 0.42 | 0.29 | 0.01 | 0 | 0 | — |
| 見掛密度(g/cm ³) | 0.93 | 1.05 | 0.98 | 0.70 | 0.60 | 0.71 | 0.92 | 1.04～1.06 |
| 線膨張係数(x10 ⁻⁶ /℃) | 71.9 | 71.3 | 71.8 | 72.5 | 71.8 | 71.9 | 73.6 | 60～80 |
| 圧縮強度(N/mm ²) | 54.2 | 56.5 | 60.8 | 40.5 | 25.5 | 36.1 | 15.9 | 100 |
| 圧縮静弾性係数(x10 ³ N/mm ²) | 3.08 | 3.18 | 3.04 | 2.07 | 1.49 | 1.89 | 2.98 | 2.48(引張) |

*質量比

表-2 廃 EPS インゴット破碎材の物性

| インゴットの種類 | IG-1 | IG-2 | IG-3 | IG-4 | IG-5 | IG-6 | IG-7 | 碎石 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 密度(g/cm ³) | 1.00 | 1.06 | 0.99 | 0.82 | 0.68 | 0.74 | 0.94 | 2.66 |
| 吸水率(%) | 3.44 | 1.91 | 3.65 | 9.00 | 7.88 | 4.46 | 2.72 | 1.53 |
| 実積率(%) | 47.5 | 49.5 | 48.3 | 48.5 | 48.8 | 47.9 | 50.8 | 57.0 |

表-3 コンクリートの使用材料

| 使用材料 | 記号 | 種類 | 物性 |
|------|--------|------------------|--|
| セメント | OC | 普通ポルトランドセメント | 密度=3.16g/cm ³ , 比表面積=3280cm ² /g |
| 細骨材 | CS | 大井川砕砂 | 表乾密度=2.58g/cm ³ , 吸水率=2.28%, 粗粒率=2.85 |
| 粗骨材 | IG | 廃EPSインゴット粗骨材 | 表乾密度=0.99g/cm ³ , 吸水率=1.90%, 実積率=51.0% |
| | R1A-35 | 一次再生粗骨材(W/C=35%) | 表乾密度=1.10g/cm ³ , 吸水率=4.38%, 実積率=53.0% |
| | R1A-50 | 一次再生粗骨材(W/C=50%) | 表乾密度=1.10g/cm ³ , 吸水率=5.26%, 実積率=53.6% |
| 混和剤 | AER | AE減水剤 | リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体 |
| | AE | AE剤 | アルキルアリルスルホン酸化合物 |
| | SP | 高性能AE減水剤 | ナフタリン系 |

表-4 コンクリートの配合

| コンクリートの種類 | 記号 | 使用粗骨材 | Gmax (mm) | W/C (%) | s/a (%) | Air (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | |
|--------------|-----------|--------|-----------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | W | C | S | G* | AER | AE | SP | |
| 原コンクリート | 原コン-35 | IG | 15 | 35 | 52 | 5 | 177 | 506 | 822 | 291 | - | - | 0.061 | |
| | 原コン-50 | | | 50 | | | | 354 | 887 | 314 | 0.885 | 0.053 | - | |
| 一次再生骨材コンクリート | R1C-50-35 | R1A-50 | | 35 | | | | 55 | 506 | 822 | 324 | - | - | 0.061 |
| | R1C-50-50 | | | 50 | | | | | 354 | 887 | 349 | 0.885 | 0.053 | - |
| | R1C-35-35 | R1A-35 | | 35 | 506 | | | 870 | 303 | - | - | 0.061 | | |
| | R1C-35-50 | | | 50 | 354 | | | 938 | 327 | 0.885 | 0.053 | - | | |

*5~10mm:10~15mm=1:1の合計

度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。使用材料は表-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表-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(φ100x200mm)および再生粗骨材製造用供試体(40x60x5mm)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: $\rho_1=1.00\text{g/cm}^3$, $\rho_2=1.35\text{g/cm}^3$, $\rho_3=1.47\text{g/cm}^3$ を使用した回収方法をそれぞれ方法-1, 方法-2, 方法-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IG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IG骨材量に対するR1A中のIG原骨材部分の質量比として算出した。

3.4 一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表-3, 4に示す。粗骨材は、方法-2より回収した、5~15mmのR1Aを用い、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、R1C35-35およびR1C35-50のs/aは55%である。

3.5 二次再生骨材

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。

4. 実験結果および考察

4.1 一次再生粗骨材の性質

図-1, 2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、IGはモルタル部分より変形性能が大きい。そのため、原コンクリートの破碎処理の際にIGは破碎され難く、5mm以下のIG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、骨材の回収方法で方法-1と方法-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、原粗骨材回収率が大きくなっているが、方法-2と方法-3の差は僅かである。一方、方法-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、方法-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、本研究では方法-2を回収方法とした。原骨材回収率について、R1A-35の方法-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の方法-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。

図-3は、原コンクリートを破碎し、方法-2および5mmふるいを用いて回収したR1Aの原

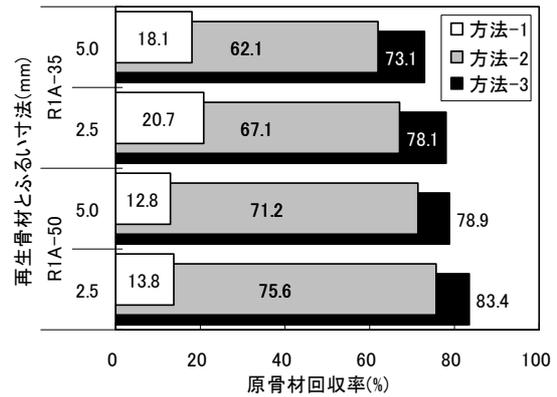


図-1 原骨材回収率

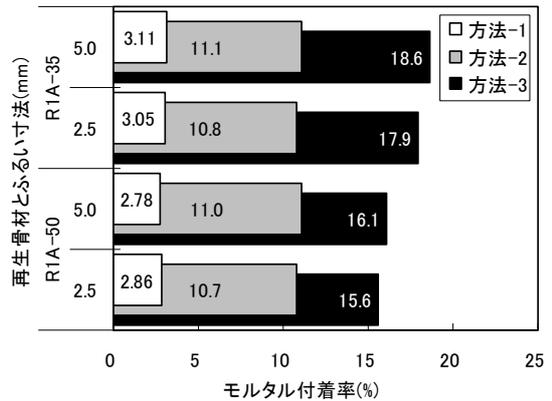


図-2 モルタル付着率

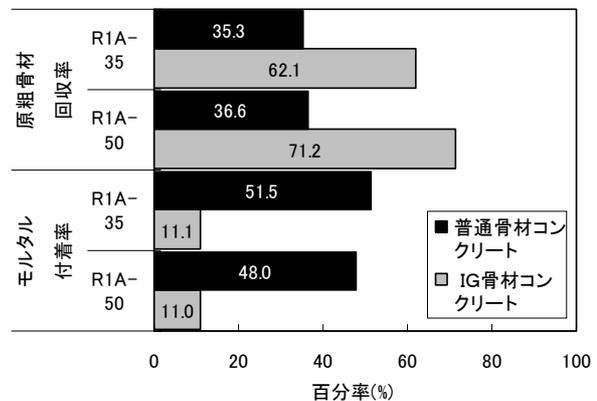


図-3 原骨材回収率およびモルタル付着率の普通骨材コンクリートとの比較

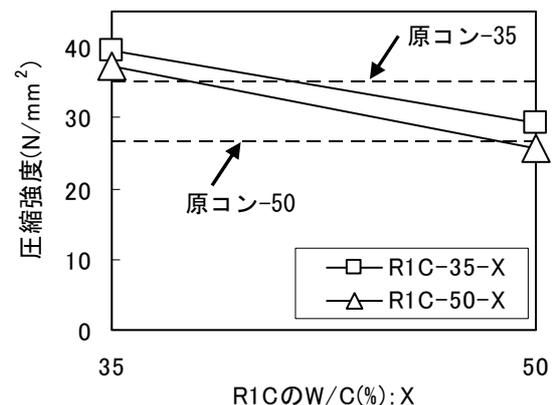


図-4 R1Aの圧縮強度の関係

粗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⁶⁾。図より、普通骨材コンクリートに比べ、IG骨材コンクリートの原粗骨材回収率は、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

図-4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。

図-5は、RICの単位容積質量とヤング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ヤング係数の関係も示した。図より、単位容積質量とヤング係数は、ほぼ一次比例の相関を示し、単位容積質量が小さいほどヤング係数は小さくなっている。また、RICの単位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

図-6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

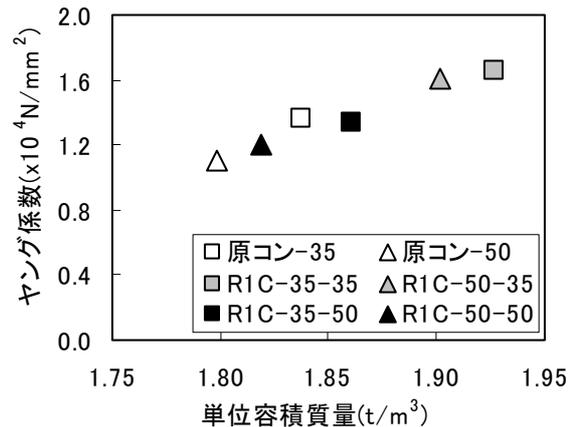


図-5 RICの単位容積質量とヤング係数の関係

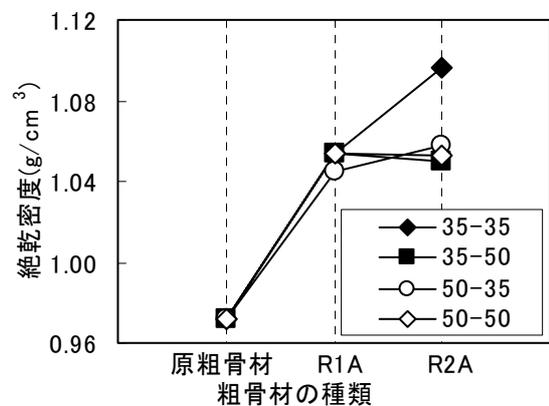


図-6 再生骨材の絶乾密度の変化

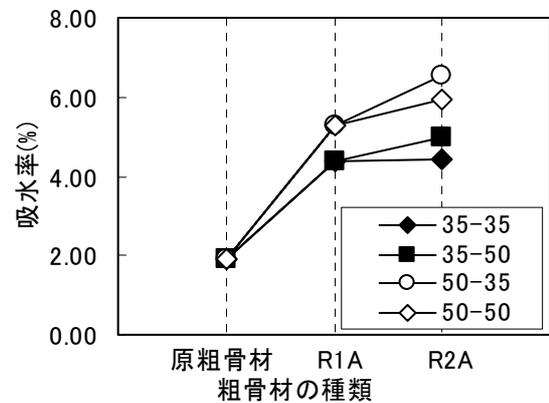


図-7 再生骨材の吸水率の変化

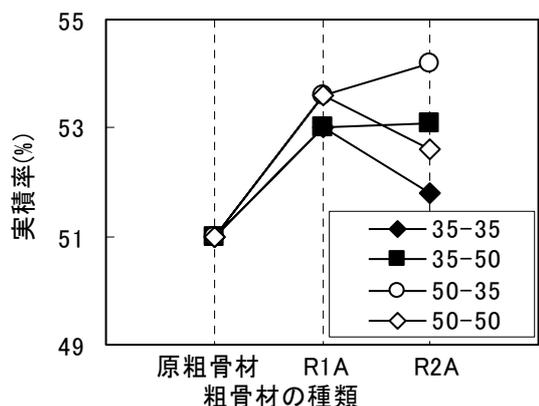


図-8 再生骨材の実積率の変化

となったものと考えられる。

図-7は、吸水率について図-6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。

図-8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. まとめ

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。

参考文献

- 1) 発泡スチロール再資源化協会：JEPSRA INFORMATION 2004
- 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，1999
- 6) 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