

論文 パルスパワー再生粗骨材を用いた再生コンクリート製品に関する研究

飯笹 真也^{*1}・重石 光弘^{*2}・浪平 隆男^{*3}・溝田 一義^{*4}

要旨: 本研究では「水中コンクリート内パルス放電法」を用いて、地先境界ブロック A を破砕し、再生粗骨材（パルス再生粗骨材）を回収した。そして、パルス再生粗骨材を用いて、粗骨材中のパルス再生粗骨材の置換率を変化させた再生コンクリート、および再生地先境界ブロック A を作製した。その結果、パルス再生粗骨材の置換率は再生コンクリートの品質に影響を与えるが強度規格、基準は十分満たせることを示した。また、再生地先境界ブロック A は JIS の認可を受けている地先境界ブロック A とほぼ同じ配合で、地先境界ブロック A と同程度の曲げ強度、圧縮強度を確保可能である事を示した。

キーワード: 再生粗骨材, コンクリート製品, 再生コンクリート, パルスパワー

1. はじめに

平成 20 年度における建設産業廃棄物は約 6 千 4 百万トンであり、その内コンクリート塊が占める割合は 3 千 2 百万トンを超えている¹⁾。よって、今後はコンクリート塊の排出量を低減していく必要がある。しかし、今後は、耐用年数を迎え、補修、補強が必要な構造物が増加するため、コンクリート塊の排出量は益々増加すると見込まれている。一方、再生粗骨材の主な使用先であった路盤材の需要が低下傾向にあるため、今後はコンクリート塊から高品質な再生粗骨材を回収し、再生骨材の利用先を充実させていく必要がある。

このような背景から高度骨材再生技術が実用化されており、再生骨材の品質規格として、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」²⁾が規定された。さらに、近年、JIS A 5308「レディミクストコンクリート」³⁾が改正され普通コンクリートおよび舗装コンクリートに再生骨材 H を使用できるようになった。このことから、今後、高品質再生骨材の需要が益々高まってくるものと考えられる。

一方、排水溝やカルバート、擁壁など工場で作製されてから運搬し、現場で組み立てられるコンクリート製品に着目すると、返品、不要品、および不良品の処理が問題となっている。これらは、出荷数の 4%~6%と言われており、処理コスト、および時間コストの問題からコンクリート製品業者で処分されずに保管されているのが現状である。

そこで、コンクリート製品の不良品や不要品から骨材を取り出し、再び骨材として再利用することを試みた。これら不要品や不良品から再生骨材を回収することで産業廃棄物量、および環境負荷の低減が期待される。また、

コンクリート製品業者としては、材料費の削減、および不要品などの処理コストの低減が図られ、環境保全への取り組みをアピールするなど多くの利点があると考えられる。現在では、グリーン調達制度において特定建設資材廃棄物等の再資源化により得られた物の利用を促進すると定められているため、再生コンクリート製品の利用が促進していくと考えられる。

本研究では「コンクリート内水中パルスパワー放電法」を用いてコンクリート製品から再生粗骨材を回収した。本技術は、熊本大学で提案しているパルスパワー技術を用いた新たな骨材再生技術であり、筆者らはその実用化を進めている⁴⁾。本研究では、「コンクリート内水中パルスパワー放電法」によって、JIS A 5371⁵⁾に規定されたコンクリート製品の地先境界ブロック A から、再生粗骨材を回収した（以下、この再生粗骨材をパルス再生粗骨材と称す）。これを用いて全粗骨材に占めるパルス再生粗骨材の体積を変化させた再生コンクリートを作製し JIS A 5371⁵⁾に規定された規格を満たすものか検討した。また、コンクリート製品業者の協力の基、パルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロック A を作製し、JIS A 5371⁵⁾に規定された規格を満たすものか評価・検討を行った。

2. コンクリート内水中パルス放電法

パルスパワー技術とは貯蔵された電気エネルギーを時空的に圧縮、重畳して、短時間に大電力を狭い空間内に集中させ、それを制御・伝送する技術である⁶⁾。

本研究で使用したパルスパワー発生装置は、マルクスバンク方式パルスパワー発生装置と呼ばれるものであ

*1 国立大学法人熊本大学 イノベーション推進機構 研究員 博(工) (正会員)

*2 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 国立大学法人熊本大学 バイオエレクトリクス研究センター准教授 博(工) (非会員)

*4 熊本不二コンクリート工業株式会社 営業部技術営業課 課長 (非会員)

る⁷⁾。コンクリート内水中パルス放電法におけるコンクリート破碎の仕組みについて図-1に示す。「コンクリート内水中パルス放電法」は、図-1に示すように水中に設置したコンクリートに高電圧電極から繰り返し放電を行い、コンクリートを破碎し再生粗骨材を回収する。放電エネルギー量（放電回数）の増加に伴い、粗骨材からのモルタルの剥離が進み再生粗骨材の品質が向上する。既往の研究成果により、本手法では、密度、吸水率の再生骨材H規格を満たす再生粗骨材が回収可能である。また、微粉末の発生量を10%未満に抑えることが可能であることが明らかとなっている⁸⁾。ここで、図-1に示す低電圧電極は5mm角開口のステンレス製半球状メッシュとなっており、パルス放電により5mm程度以下に破碎されたものは水槽の底に沈積する。本研究ではこの5mm角開口のメッシュ上に留まった破砕片をパルス再生粗骨材とした。

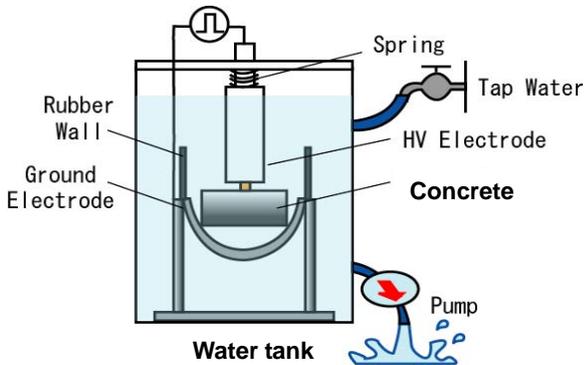


図-1 水中コンクリート内パルス放電法の原理

3. コンクリート製品からの再生粗骨材の回収

3.1 コンクリート二次製品破碎実験

本研究では、図-2に示す自動パルス再生骨材製造プラント（PULSAR-Mk I）を用いてコンクリート製品から再生粗骨材を回収した。



図-2 自動パルス再生骨材製造プラント

このプラントは本技術の実用化推進のために作製し、コンクリート塊投入から再生粗骨材の回収までを自動で行えるものである。そして、本研究では、図-3に示すJIS A5371⁹⁾に規定された地先境界ブロック A（120×120×600mm、設計基準強度（圧縮）27N/mm²）から図-2に示すプラントを用いて、パルス再生粗骨材を回収した。表-1に地先境界ブロック Aの示方配合表を示す。また、使用材料を表-2に示す。

この示方配合表は熊本不二コンクリート工業株式会社（以下、工場と称す）が作成した配合であり、JISの認可を受けている。

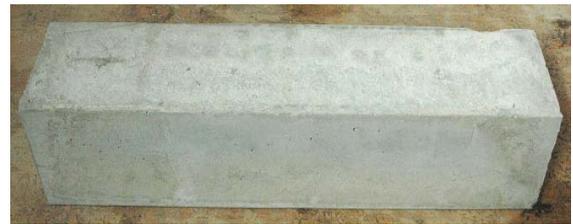


図-3 地先境界ブロック A

表-2 使用材料

材料名	使用材料
セメント	普通ポルトランドセメント 表乾密度:3.15 g/cm ³
細骨材	山砂（南関産） 粗粒率:2.74 表乾密度:2.56g/cm ³
粗骨材	斑レイ岩（山鹿産） 粗粒率:6.65 表乾密度:2.99g/cm ³
混和剤	高性能減水剤 主成分:ポリカルボン酸エーテル

自動パルス再生骨材製造プラントに4等分にした地先境界ブロック Aを投入し、放電1回あたりのエネルギー量を6.4kJに設定し、パルスパワー放電を80回、すなわち合計512kJのパルスパワー放電を繰り返し印加し、パルス再生粗骨材を回収した。

3.2 パルス再生粗骨材の品質

回収したパルス再生粗骨材の評価試験として、ふるい分け試験、密度及び吸水率試験、単位容積質量試験、微粒分量試験を行った。パルス再生粗骨材、および地先境界ブロック A作製に用いた砕石（斑レイ岩）の品質を表-3に示す。この結果より、パルス再生粗骨材は密度、

表-1 地先境界ブロック Aの示方配合

スランプの範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
5.5~10.5	1.5	47	41	176	374	724	1217	1.27

吸水率における再生粗骨材Hの品質規格を満たしていた。一方、微粒分量が基準である1%より大きな値となったため、パルス再生粗骨材を水で洗い、微細な粉末状物質を取り除いた上で使用することとした。尚、洗い後の微粒分量は0.89%であった。

表-3 パルス再生粗骨材の品質試験結果

	パルス再生粗骨材	砕石
絶乾密度(g/cm ³)	2.72	2.92
表乾密度(g/cm ³)	2.79	2.98
吸水率(%)	2.54	0.49
粗粒率	6.43	6.68
単位容積質量(kg/L)	1.62	1.71
実積率(%)	59.4	57.3
微粒分量試験(%)	1.66	0.62

ふるい分け試験結果を図-4に示す。尚、図-4には地先境界ブロックAの作製に用いた砕石(斑レイ岩)の粒度曲線も示す。ふるい分け試験結果より、パルス再生粗骨材は、細粒化が確認された。これは、砕石自体がパルス放電により破碎された、あるいは5mmのメッシュ(低電圧電極)に留まった小さなモルタル片が混入した事が要因と考えられる。

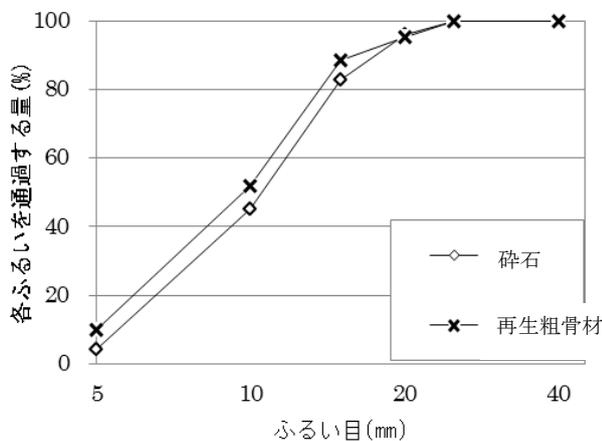


図-4 ふるいわけ試験結果

4. パルス再生粗骨材を用いた再生コンクリート

4.1 再生コンクリート用パルス再生粗骨材

本研究では、パルス再生粗骨材を用いた再生コンクリートを作製した。その際に、コンクリート中の粗骨材が占める体積を一定とし、パルス再生粗骨材の置換率を変化させた。そして、再生粗骨材の混入量が曲げ強度、および圧縮強度に及ぼす影響を調べた。

尚、パルス再生粗骨材の置換率は0%、25%、50%、75%、100%の計5種類とし、以後、置換したそれぞれの粗骨材試料をRC25、RC50、RC75、RC100と称す。尚、置換率

0%の粗骨材試料はNCと称する。各粗骨材試料の評価試験として、ふるい分け試験、密度及び吸水率試験、単位容積質量試験を行った。試験結果を表-4に示す。尚、これら粗骨材試料は、粒度の誤差の影響を小さくするために粒度調整を行った。粒度調整後の各粗骨材試料の粒度を図-5に示す。

表-4 各粗骨材試料の品質試験結果

	NC	RC25	RC50	RC75	RC100
絶乾密度(g/cm ³)	2.93	2.87	2.81	2.75	2.72
表乾密度(g/cm ³)	2.95	2.91	2.86	2.82	2.79
吸水率(%)	0.61	1.33	1.91	2.43	2.54
粗粒率	6.55	6.45	6.44	6.35	6.43
単位容積質量(kg/L)	1.66	1.74	1.69	1.65	1.62
実積率(%)	56.7	60.5	60.1	59.9	59.4

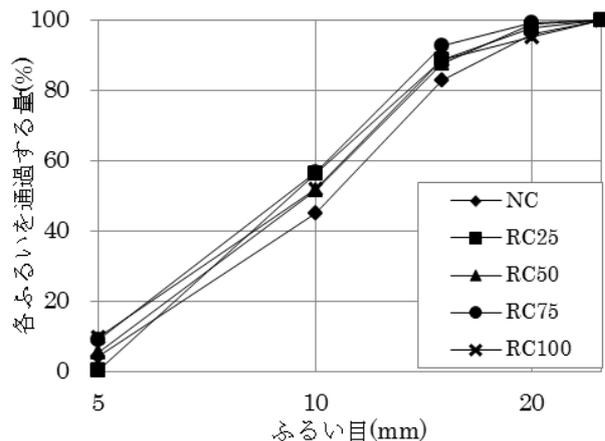


図-5 各再生粗骨材試料の粒度

表-4より、全ての粗骨材試料は再生骨材Hの品質規格を満たしており、パルス再生粗骨材の置換率が大きい粗骨材試料ほどパルス再生粗骨材の混入量が多いため、密度が低下し、吸水率が増加している。よって、今回用いた全ての粗骨材試料はコンクリート用いても問題ない品質のものであった。そこで、これらの粗骨材試料を用いて再生コンクリートの作製を行った。

4.2 再生コンクリートの品質評価

各粗骨材試料を用いた再生コンクリートでは表-1に示した地先境界ブロックAの示方配合を基準とした。そして、水、セメント、細骨材、粗骨材の占める体積はいずれも一定とし、粗骨材には粗骨材試料NC、RC25、RC50、RC75、RC100を用いた計5種類のコンクリートを作製した。示方配合を表-5に示す。

表-5 各再生粗骨材試料における再生コンクリート示方配合

	スランプ (実測値) (cm)	空気量 (実測値) (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		混和 剤
								砕石	再生粗 骨材	
NC	0.9	1.8	47	41	177	375	727	1201	0	1.27
RC25	0.9	1.8	47	41	177	375	727	888	296	1.27
RC50	0.9	2.0	47	41	177	375	727	582	582	1.27
RC75	1.1	2.1	47	41	177	375	727	287	861	1.27
RC100	1.4	2.0	47	41	177	375	727	0	1136	1.27

表-5に示す示方配合でNC, RC25, RC50, RC75, RC100の5つ場合でそれぞれ円柱供試体(φ100×200mm)を6本, 角柱供試体(100×100×400mm)を4本作製した。供試体を作製後, 恒温室(およそ20℃)での湿空養生を行い, 材齢28日後に曲げ強度試験, 圧縮強度試験を行った。図-6に曲げ試験結果, 図-7に圧縮試験結果を示す。尚, 各試験結果は供試体3本の平均である。

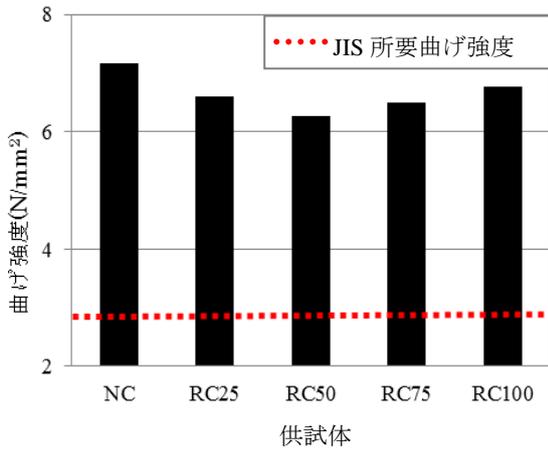


図-6 曲げ強度試験結果

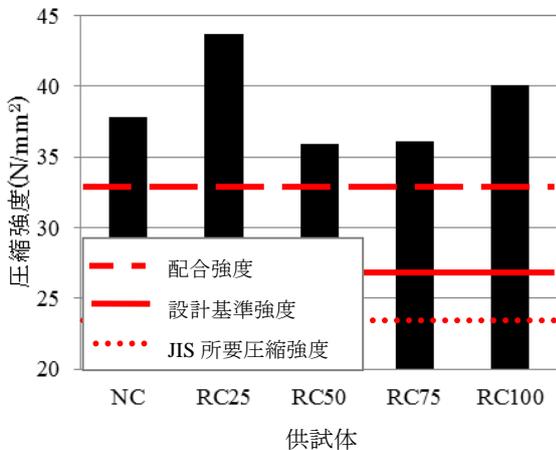


図-7 圧縮強度試験結果

まず, 図-6の曲げ試験結果より, パルス再生粗骨材を用いた供試体は若干の強度低下が確認されたが, 全置

換率において JIS A 5371 に規定された所要強度 2.26N/mm²を満たしていた。次に図-7の圧縮試験に着目すると, RC25はNCよりも高い強度を得られたが, RC50, およびRC75は若干の強度低下が見られた。しかし, パルス再生粗骨材のみを用いたRC100はNCと同程度の強度を得ることができた。そして, 全ての置換率においてJIS 所要圧縮強度 (24N/mm²), 設計基準強度 (27N/mm²), および配合強度 (33N/mm²) を満たしていた。以上の結果より, パルス再生粗骨材の置換率は再生コンクリートの曲げ強度, および圧縮強度影響を及ぼすが, 強度基準, 強度規格を満足することは可能であった。そこで, 本研究では, パルス再生粗骨材を可能な限り多く使用した再生地先境界ブロックAを作製することを目的とし, 粗骨材全てをパルス再生粗骨材に置換した再生地先境界ブロックAを作製した。

5. パルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロック A

5.1 再生地先境界ブロックの配合設計

パルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロックAの作製のため, 各材料の計量, 練混ぜ, 型枠への流し込み作業, 養生を一貫して工場にて行った。尚, パルス再生粗骨材の品質は, 熊本県建設技術センターによる骨材試験結果(表-6)を用いた。尚, 使用材料は表-2と同様のものを使用した。

表-6 パルス再生粗骨材の品質

絶乾密度(g/cm ³)	2.71
表乾密度(g/cm ³)	2.78
吸水率(%)	2.39
粗粒率	6.48
単位容積質量(kg/L)	1.62
実績率(%)	59.8

再生地先境界ブロックAの作製では, まず, パルス再生粗骨材の置換方法を, 粗骨材の単位容積を一定とし, 砕石をパルス再生粗骨材に置換した場合, すなわち, 表

−4で測定した各混合骨材の単位容積質量を考慮して重量比で行った。次に、各材料（セメント、水、細骨材、粗骨材、混和剤）の質量比は固定し砕石をパルス再生粗骨材に置換した場合の計2種類行った。尚、再生地先境界ブロックAの配合設計では、表−1に示した地先境界ブロックAの示方配合を基準とした。

まず、粗骨材の単位容積を一定とし砕石をパルス再生粗骨材に置換した場合の配合設計では、置換後のパルス再生粗骨材の体積が置換前の粗骨材体積と同一になるよう配合設計を行った。以後、この条件における再生地先境界ブロックAをRB1と称する。ただし、細骨材の表面水率が5%であったため、表面水率による単位水量の補正を行った場合と行っていない場合の2つの場合で再生地先境界ブロックAを作製した。表面水補正を行わなかった場合、水セメント比は57%となる。これは、作製中の配合水量管理において、何らかの支障が生じたことによる場合について検討するものである。尚、以後、表面水補正を行った場合をRB1-1と称し、補正を行っていない場合をRB1-2と称する。

次に、各材料（セメント、水、細骨材、粗骨材、混和剤）の質量比は固定し砕石をパルス再生粗骨材に置換した場合の配合では、各材料の質量比を変えずに粗骨材（砕石）をパルス再生粗骨材に置換した。以後、この条件における配合をRB2と称する。尚、再生地先境界ブロックA作製時において、品質比較のため砕石を用いた地先境界ブロックAも作成した。この地先境界ブロックAを以後NBと称する。それぞれの示方配合を表−7に示す。

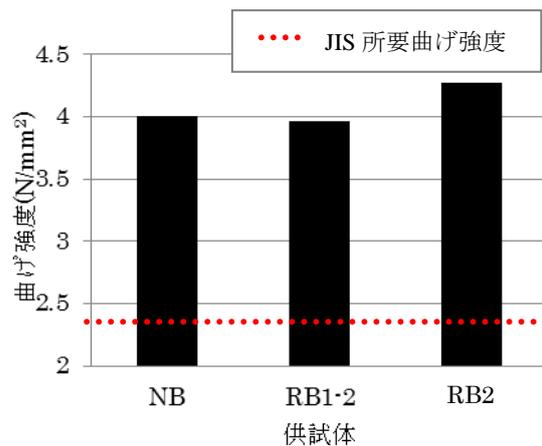
それぞれの配合において、地先境界ブロックA(120×120×600mm)3本と、円柱供試体3本を作製した。ただし、RB1-1については、パルス再生粗骨材試料が不足したため、円柱供試体のみ作製した。地先境界ブロックAは作製後、蒸気養生（2時間半、65℃を最高温度とする）の後、気中養生（外気中にて養生）を14日行った（以下、蒸気養生と称す）。これは地先境界ブロックAを作製する際と同様の養生方法である。また、円柱供試体は作製後水中養生を14日行った。ちなみに、JIS A 5371⁶⁾による地先境界ブロックAの規定では、「外観試験については目視で行い、使用上有害な傷、ひび割れ、欠け、反り、ねじれなどの有無を調べる」とされている。作製した再生地先境界ブロックは、外観上全ての供試体で問題な

かった。

5.2 再生地先境界ブロックの品質評価

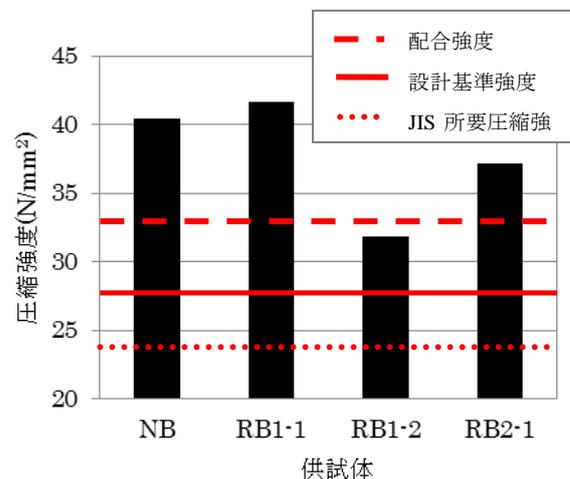
作製したそれぞれの再生地先境界ブロックA、および地先境界ブロックAは材齢14日後に曲げ強度試験、圧縮強度試験を実施した。

まず、曲げ試験結果を図−8に示す。試験結果は、各供試体3本の平均値である。曲げ強度試験結果より、RB1-2、およびRB2は共にJIS所要曲げ強度を満たしていた。さらに、RB2の曲げ強度はNBよりも高くなっていた。一方、RB2に比べるとRB1-2が曲げ強度の値が小さくなっているが、これはRB1-2の実質的な水セメント比が57%とRB2よりも10%大きいためである。



図−8 曲げ強度試験結果

次に、圧縮試験結果を図−9に示す。



図−9 圧縮強度試験結果

試験結果は、各供試体3本の平均値である。図−9より、

表−7 再生地先境界ブロックAの示方配合

	スランブ値の範囲 (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量(kg/m³)				
					水	セメント	細骨材	再生粗骨材	混和剤
RB1	5.5~10.5	1.5	47	41	176	374	724	1132	1.27
RB2	5.5~10.5	1.5	47	39	171	363	702	1180	1.23

再生コンクリートRB1-1, RB1-2, およびRB2は共にJIS 所要圧縮強度 (24N/mm²), 設計基準強度 (27N/mm²), を満たしており, 十分な圧縮強度を確保可能であった。ただし, RB1-2が他の場合と比較して値が小さくなり, 配合強度 (33N/mm²) よりも圧縮強度が小さくなった。一方, RB1-1は, NBよりも値が大きくなった。これはパルス再生粗骨材は碎石などに比べ石粉などの不純物の混入量が少なかったためと思われる。水中コンクリート内パルス放電法は, 微粉末の発生量が少ない点, および水中で再生粗骨材を回収する点から回収されたパルス再生粗骨材に混入する不純物の量が非常に少ないと考えられる。そのため, パルス再生粗骨材はコンクリート用骨材として非常に有用であると言える。以上より, パルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロックはJIS A 5371⁶⁾に規定された曲げ強度, および圧縮強規格を共に満たしていた。本研究では再生地先境界ブロックAは地先境界ブロックAの配合を基準とし, 粗骨材の体積を一定とした場合, および各材料の質量比を一定とした場合で配合した。すなわち, JIS の認可を受けている配合で作製された地先境界ブロックAから「水中コンクリート内パルス放電法」により回収されたパルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロックAは, 配合をほとんど変化させずにJIS A 5371⁶⁾の規格を満たす事が可能である。よって, 返品, 不要品, および不良品となった地先境界ブロックAからパルス再生粗骨材を回収し, 再生地先境界ブロックAを作製することで, コンクリート業者の観点から見た場合, 返品, 不要品, および不良品の処理, および粗骨材の使用量を低減が可能となり, 材料費の削減が見込まれる。また, 粗骨材試料用削減による環境負荷低減効果も期待される。

6. まとめ

本研究では, 地先境界ブロックAからパルス再生粗骨材を回収した。そして, パルス再生粗骨材を用いた再生コンクリート, および再生地先境界ブロックAの評価, 検討を行った。すなわち, 「水中コンクリート内パルス放電法」を用いて地先境界ブロックAからパルス再生粗骨材を回収し, パルス再生粗骨材の全粗骨材に占める置換率を変化させたコンクリートを作製した。その結果, パルス再生粗骨材の置換率が曲げ強度, および圧縮強度に影響を及ぼすことが確認されたが, 全ての置換率において再生コンクリートは曲げ強度, 圧縮強度共にJIS A 5371⁶⁾に規定された規格を満たすことは可能であった。そこで, 工場の協力のもと, パルス再生粗骨材を用いた再生地先境界ブロックAを, 粗骨材体積を一定としパル

ス再生粗骨材に置換した場合, および各材料の質量比を一定としてパルス再生粗骨材に置換した場合でそれぞれ作製した。これらの再生地先境界ブロックAは, 表面水調整行えば地先境界ブロックAと同程度の品質を確保可能であった。すなわち, JIS の認可を受けている地先境界ブロックAから回収されたパルス再生粗骨材を用いることで, 地先境界ブロックAの配合を変化させることなく地先境界ブロックAと同程度の品質が確保である事を示した。しかし, 本研究で用いたパルス再生粗骨材に含まれるモルタル量が不明確であった。再生粗骨材中のモルタル量は乾燥収縮や耐凍害性などに影響を及ぼすため, 今後はモルタル量を調べることも必要となる。地先境界ブロックには耐久性も必要となるため, 長期耐久性の検討を行う必要がある。また, 再生コンクリート製品の作製による環境負荷低減効果についても検討しなければならない。よって, これらの検討を行っていくことにより, 再生コンクリート製品普及への貢献を目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局: 建設廃棄物品目別排出量平成 20 年度「建設副産物実態調査結果詳細データ(建設廃棄物)」, 2010.3
- 2) 日本工業標準調査会: JIS A 5021「コンクリート用再生骨材 H」, 2005
- 3) 日本工業標準調査会: JIS A 5308「レディミクストコンクリート」, 2009
- 4) 重石光弘, 浪平隆男ほか: パルスパワーによるコンクリートからの粗骨材の分離. 回収, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp1475-1480, 2006.
- 5) 日本工業標準調査会: JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」, 2000.3
- 6) 秋山秀典: 高電圧パルスパワー工学, オーム社, pp.36-38, 2003.12
- 7) 秋山秀典: 高電圧パルスパワー工学, オーム社, p.95, 2003.12
- 8) 高木基志, 重石光弘ほか: 「廃コンクリートより粗骨材を分離回収するためのパルスパワー出力の最適化に関する研究」, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008

謝辞

本研究は独立行政法人科学技術振興機構による研究成果最適展開支援事業(育成研究), 文部科学省科学研究費補助金, および「熊本大学衝撃エネルギー工学グローバル COE」の助成を受けて実施したものである。