論文　減圧攪拌を行った再生骨材コンクリートに関する研究

伊藤　康司[*1]・高橋　孝太郎[*2]・金子輝一[*1]・鈴木　一雄[*3]

要旨：再生骨材を用いたコンクリートの品質改善方法として，多孔質骨材コンクリートの品質改善に実績のある減圧攪拌技術を適用するための検討を行った。すなわち，減圧度及び復圧時間を種々に変化させて実験を行い最適な減圧条件を設定するとともに，異なる配合のコンクリートに減圧攪拌を適用して，フレッシュ性状，強度及び耐久性に関する試験を実施しその効果を検証した。これらの結果，減圧攪拌は再生骨材コンクリートの品質改善に寄与していることが明らかとなった。

キーワード：減圧，復圧，スランプ，曲げ強度，圧縮強度，耐久性

1.　はじめに

一般の破砕処理による再生骨材は，周囲に付着した多孔質なモルタル分の影響により，JIS A 5308 の附属書１の骨材品質を満足するものが少ない。このため，再生骨材を適用できる事例は極めて少なく，TR においても JIS 規格品より低い品質のコンクリートを適用範囲としているのが実状である。本研究は，資源の有効利用と製造した商品の高品質化を目的として，再生骨材を用いたコンクリートに減圧攪拌を適用し，その効果を確認するとともに，舗装用コンクリートへの適用性について検討したものである。

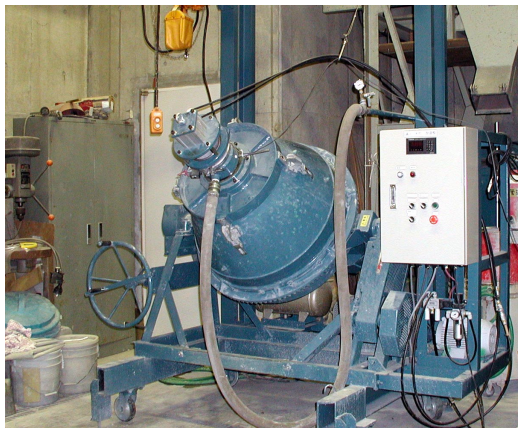
2.　減圧攪拌装置

鉄鋼スラグや噴石など，多孔質骨材を用いたコンクリートの品質向上を目的とした減圧攪拌技術の導入は，すでにその成果が報告されている[1)~3)]。減圧攪拌は，練上がったコンクリートを**図－１**に示す装置内で攪拌しながら減圧し，瞬時に真空近傍から大気圧に戻す(復圧と呼ぶ)ものである。減圧攪拌の概要を**図－２**に，圧力波形の一例を**図－３**に示す。

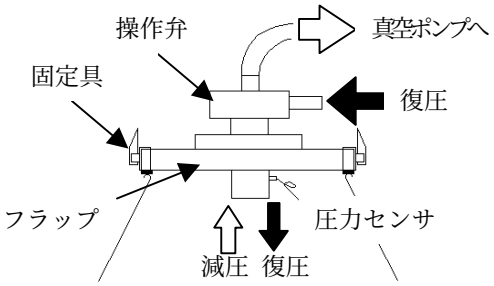
3.　実験の概要

3.1　実験条件

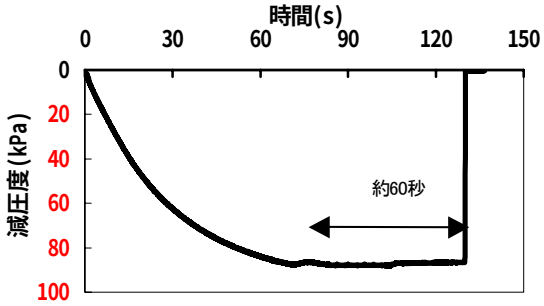
実験は，予備実験で減圧度及び復圧時間の確認を行った後，**表－１**に示す種々の配合のコン



図－１　減圧攪拌装置



図－２　減圧攪拌の概要



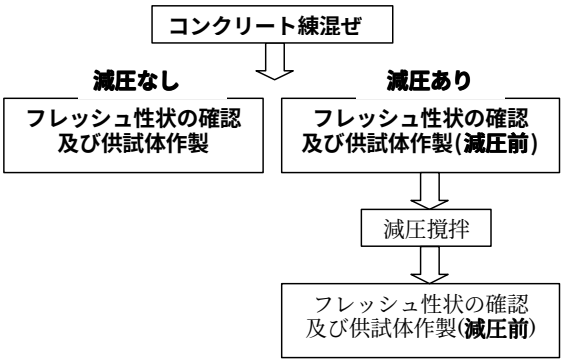
図－３　減圧時の圧力波形の一例

*1 全国生コンクリート工業組合連合会　中央技術研究所(正会員)
*2 東亜道路工業㈱
*3 全国生コンクリート工業組合連合会　中央技術研究所 所長 工博(正会員)

表－１　実験条件

種類	一般用ｺﾝｸﾘｰﾄ			舗装用ｺﾝｸﾘｰﾄ		
	36N	30N	24N	4.5N (G20)	4.5N (G40)	4.5NR※
W/C(%)	44.5	49.5	56.5	44.5	44.5	44.5
目標ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	8			2.5	2.5	8
試験項目	強度(曲げ、圧縮)、すべり抵抗性、すり減り 乾燥収縮、凍結融解抵抗性、中性化					

※表中の G20 及び G40 は粗骨材最大寸法(mm)。4.5NR はﾍﾞｰｽｺﾝｸﾘｰﾄのｽﾗﾝﾌﾟを高性能 AE 減水剤によって 8cm としたものである。



図－４　実験フロー

クリートについて品質確認の試験を行った。

試験は**図－４**に示す手順で，品質の確認を行った。

3.2　使用材料及び配合

実験に用いた材料は、セメントが普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3、比表面積 3,270 cm^2/g)、細骨材は浜岡産陸砂(密度 2.62 g/cm^3、吸水率 1.72%、粗粒率 2.52)、粗骨材は舗装用生コンクリートで構築した構造物を材齢 28 日で破砕した再生骨材(Gmax40;密度 2.39 g/cm^3、吸水率 6.22%、粗粒率 7.11、Gmax20;密度 2.37g/cm^3、吸水率 6.71%、粗粒率 6.49)、混和剤は AE 減水剤標準形および高性能 AE 減水剤(4.5NR のみ)である。また，予備実験においては再生骨材コンクリートに対する減圧撹拌効果を確認するため，全国 7 カ所で入手した再生骨材を用いた。これらの物理試験結果は**表－２**に示すようである。

表－２　予備実験で用いた再生粗骨材

産地	密度(g/cm^3)		吸水率 (%)	粗粒率
	絶乾	表乾		
A	2.22	2.37	6.71	6.89
B	2.33	2.45	4.98	6.70
C	2.20	2.36	7.40	6.69
D	2.31	2.43	5.40	6.97
E	2.23	2.38	7.01	6.97
F	2.27	2.42	6.56	6.74
G	2.27	2.42	6.28	6.73

コンクリートの配合は**表－３**に示すものである。後述するように減圧撹拌によってフレッシュ性状が変化するため、「減圧あり」の配合は単位水量を 3kg/m^3 増加し、減圧の有無におけるスランプ及び空気量が一致するよう調整した。

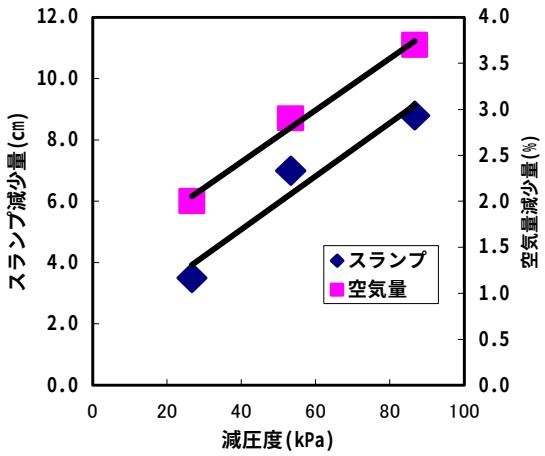
表－３　コンクリートの配合

配合	減圧の有無	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m^3)				Ad (ml)	AE (ml)
					W	C	S	G		
24N	なし	55.5	45.0	20	160	288	830	918	720	14.4
	あり	56.5			163	288	826	914	720	11.5
30N	なし	48.6	43.7		160	329	791	922	823	16.5
	あり	49.5			163	329	788	918	823	23.0
36N	なし	43.7	42.8		160	366	762	922	915	18.3
	あり	44.5			163	366	758	918	915	25.6
4.5N(G20)	なし	43.6	39.4		149	342	720	1004	855	27.4
	あり	44.5			152	342	718	998	855	30.8
4.5N(G40)	なし	43.6	40.6	40	142	326	755	1008	815	16.3
	あり	44.5			145	326	751	1004	815	19.6
4.5NR	なし	43.6	40.0	20	144	330	740	1005	3630	13.2
	あり	44.5	40.2		147	330	741	998	3630	16.5

4.　結果及び考察

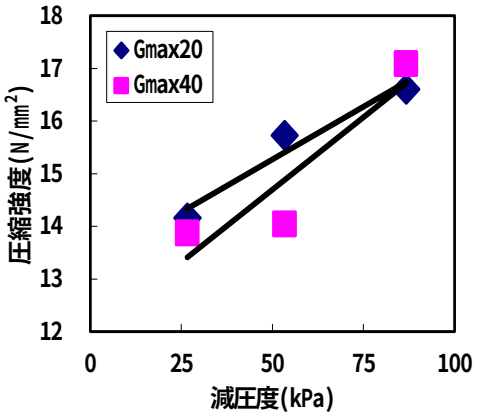
4.1　減圧条件の設定

減圧撹拌によるコンクリートの品質改善効果は，復圧による自由水の骨材内部への圧入，並びにマトリクスの骨材への圧着によるものと言

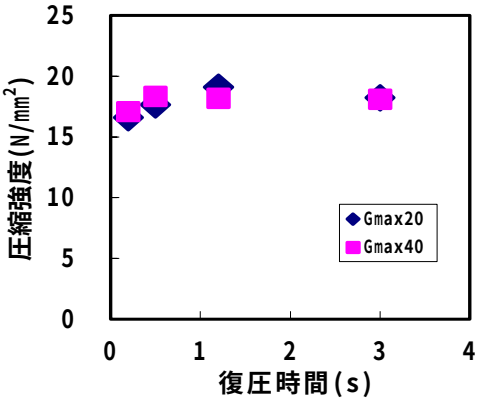


図－５　減圧度の相違がフレッシュ性状に及ぼす影響

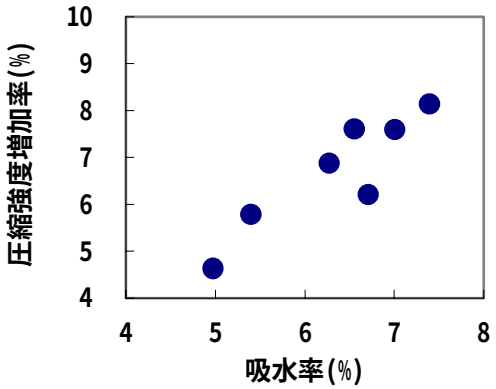
われている[1)]。　この減圧攪拌技術を再生骨材へ適用するにあたり，最適な減圧度及び復圧時間を確認した。これらの結果は，**図－５～図－８**に示すようである。**図－５**は同一配合のコンクリート(W/C 60%，目標スランプ 15cm)において，減圧度を 26.7，53.3 及び 86.7kPa に変化させて減圧攪拌した場合のフレッシュ性状の変化を示したものであり，減圧度が高いものほどスランプ並びに空気量の減少量が大きくなっている。**図－６**は減圧度と圧縮強度との関係を示したものであり，減圧度が高いものほど強度が高く，減圧効果が大きくなっており，既往の研究成果[1)~3)]と同様となっている。**図－７**は復圧時間を 0.2，0.5，1.2 及び 3.0s に変化させて減圧攪拌した場合のコンクリートの圧縮強度を示したものであり，復圧時間の相違に係わらずほぼ同等で，復圧時間が短いものほど減圧効果が高い既往の研究成果[1)~3)]と異なっている。これは



図－６　減圧度と圧縮強度との関係



図－７　復圧時間と圧縮強度との関係



図－８　吸水率と圧縮強度増加量との関係

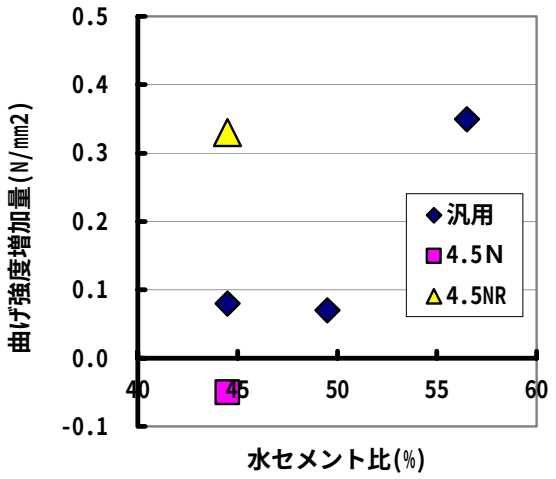
今回用いた減圧攪拌装置は，排気弁を回転式からシリンダー式に変更したことによって，弁の作動圧を調整しても，弁に作用する負圧を超えると瞬時に開放するためと思われる。したがって，減圧度は従来通り 86.7kPa，復圧時間は既往の研究(0.4s)と同等以上である 0.25s として，以降の実験を行うこととした。

図－８は，全国７カ所で入手した再生骨材の吸水率と減圧による圧縮強度増加量との関係を示したものであって，吸水率が高いものほど圧縮強度が増加する傾向が認められる。再生骨材の吸水率は，骨材に付着しているモルタル分の影響が大きく，コンクリートの品質向上にはこれを除去することが不可欠である。しかし、減圧攪拌を再生骨材コンクリートに適用する場合には再生骨材の吸水率が高いものほど減圧効果が大きいため，用途の少ない微粉が大量発生することなく再生骨材を有効利用することが可能になるものと思われる。

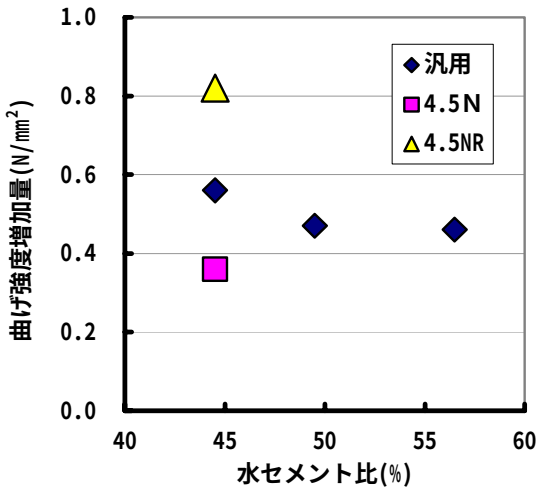
4.2　コンクリートの品質評価

(1)曲げ強度

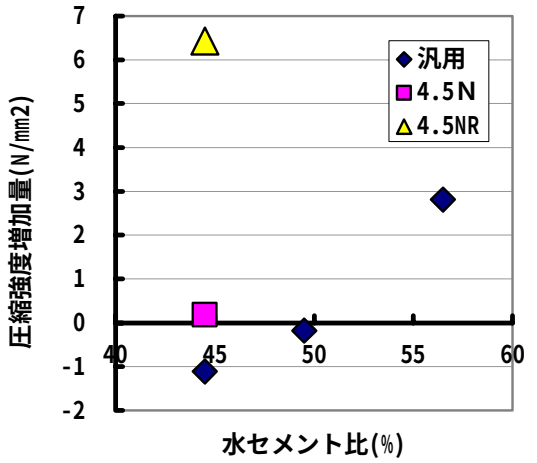
表－４において、曲げ強度はいずれの配合においても減圧前に比べ、減圧後が大となる傾向を示しており、汎用コンクリートでは最大 12%(配合名 36)、舗装用コンクリートでは最大 17%(4.5NR)強度が増加しているが、減圧の有無で比較すると汎用コンクリートでは最大 8%(24)、舗装用コンクリートでは最大 6%(4.5NR)と強度増加量は小さい傾向となっている。減圧攪拌を行ったにもかかわらず同等である原因は、減圧攪拌を行う配合は単位水量を



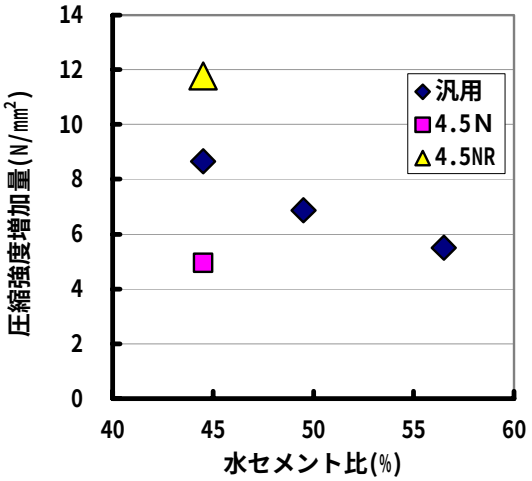
図－９　水セメント比と曲げ強度増加量との関係
（減圧あり－減圧なし）



図－１０　水セメント比と曲げ強度増加量との関係
（減圧後－減圧前）



図－１１　水セメント比と圧縮強度増加量との関係
（減圧あり－減圧なし）



図－１２　水セメント比と圧縮強度増加量との関係
（減圧後－減圧前）

一律 3kg/m^3 増加させているためである。**図－９**は水セメント比と減圧の有無における曲げ強度増加量との関係を示したものであり、4.5N 以外のコンクリートにおいては、水セメント比が高いものほど曲げ強度増加量が大となっている。**図－１０**は水セメント比と減圧前後の曲げ強度増加量との関係を示したものであり、減圧前後では水セメント比が小さいものほど減圧効果が高い結果となっている。この原因は、減圧前後(減圧配合)においては減圧後に所要の空気量を下回らないよう連行空気量を増加しており、空隙セメント比と強度との関係により空隙セメント比が小さいものほど強度が高くなるためと考えられる。

(2) 圧縮強度

減圧の有無及び減圧前後における圧縮強度は、

表－４　強度試験結果

配　合	減圧の有無		強度(N/mm^2) 曲げ	圧縮
24N	なし		4.41	30.3
	あり	前	4.30	27.7
		後	4.76	33.2
30N	なし		4.67	39.8
	あり	前	4.27	32.8
		後	4.74	39.7
36N	なし		5.21	43.8
	あり	前	4.73	34.0
		後	5.29	42.7
4.5N (G20)	なし		5.63	47.3
	あり	前	5.22	42.5
		後	5.58	47.5
4.5N (G40)	なし		5.47	46.8
	あり	前	4.66	43.4
		後	5.04	47.0
4.5NR	なし		5.42	42.8
	あり	前	4.93	37.4
		後	5.75	49.2

表－４に併記したようであって、汎用コンクリートは減圧の有無で最大 10%(配合名 24)、減圧の前後で最大 26%(配合名 36)、舗装用コンクリートは減圧の有無で最大 15%(4.5NR)、減圧の前後で最大 30%(4.5NR)強度が増加している。

図－１１は水セメント比と減圧の有無における圧縮強度増加量との関係を示したものであり、汎用コンクリートでは、水セメント比が高いものほど減圧効果が大となっており、曲げ強度の場合と同様な結果となっている。また、**図－１２**は水セメント比と減圧前後における圧縮強度増加量との関係を示したものであり、曲げ強度の場合と比べ減圧の効果が顕著に現れている。

図－１１において水セメント比 44.5%における３つの打点は効果の大きいものから順に、配合名で 4.5NR、4.5、36 となっており、これらの関係は、舗装用コンクリートでは高性能 AE 減水剤の使用の有無、舗装用コンクリート(4.5N)と汎用コンクリート(36)では砂セメント比の影響が考えられる。

すなわち、減圧効果はマトリクスの圧着や自由水の移動によって得られていると考えれば、復圧時の圧力は一定に作用するので、マトリクスの粘性が減圧効果に影響していると考えられる。

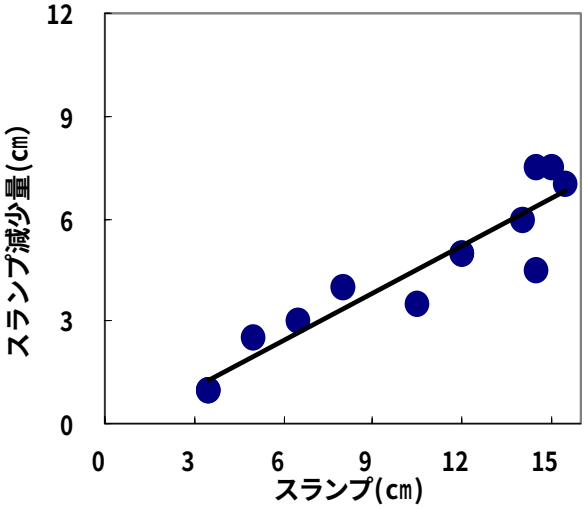
図－１３は減圧前のスランプと減圧後のスランプ減少量との関係を示したものであって、スランプの大きいコンクリートほど減圧効果が高い傾向が認められ、上記の推測を裏付けるものと考えられる。

(3)　すべり

すべり抵抗性試験結果を**表－５**に示す。**表－５**において減圧攪拌を行った再生骨材コンクリートのすべり抵抗値(BPN)は、2～20BPN 小さい結果が示されており、60BPN(日本道路公団規格 KOUDAN221)を下回る結果も見受けられる。また、高性能 AE 減水剤を使用した配合では、減圧の有無にかかわらず最も抵抗性が小さくなっている。すべり抵抗性試験は水を介した試料表面とゴム板との滑動抵抗を評価するものであるため、減圧による組織の緻密化並びに気泡組織の変化による表面性状の相違が影響要因と考えられるが、詳細は不明であり検討が必要である。

(4)　すり減り

すり減り抵抗性試験結果は**表－５**に併記した



図－１３　スランプとスランプ減少量との関係

表－５　すり減り・すべり抵抗性試験結果

配合	減圧の有無	すり減り断面積 (cm^2)	すべり抵抗値 (BPN)
24N	なし	0.77	63.1
	あり	－	53.5
30N	なし	0.36	75.4
	あり	0.27	65.1
36N	なし	0.47	75.8
	あり	0.37	66.7
4.5N	なし	0.22	75.2
	あり	0.38	54.7
4.5N (G40)	なし	0.13	65.7
	あり	－	53.9
4.5NR	なし	0.5	54.7
	あり	0.33	52.7

表－６　耐久性試験結果

配合	減圧の有無		長さ変化 ($\times 10^{-4}$)	耐久性指数	中性化深さ (mm)
24N	なし		-10.9	82	33.7
	あり		-10.7	－	－
30N	なし		-9.80	84	21.9
	あり		-10.4	87	17.9
36N	なし		-9.90	88	13.5
	あり		-9.90	92	11.5
4.5N	なし		-9.30	89	13.2
	あり	前	-9.80	83	14.3
		後	-9.70	89	10.9
4.5NR	なし		-9.60	92	9.66
	あり		-9.40	89	8.83

※長さ変化及び中性化深さの材齢は 26 週

ようであって、減圧攪拌を行った再生骨材コンクリートのすり減り断面積は、一部のデータを除いて小さくなっており、すり減り抵抗性の改善効果が認められた。

(5) 乾燥収縮

乾燥収縮による長さ変化の試験結果を**表－6**に示す。**表－6**において長さ変化は強度の低い種類のものほど大きくなっている。減圧の有無による長さ変化はほぼ同等な結果となっているが、減圧を実施したものがやや大きい傾向がある。これは前述のように、「減圧あり」の配合は単位水量を一律で 3kg/m³ 増加しているためと思われる。

(6) 凍結融解抵抗性

JIS A 1148 による凍結融解抵抗性は**表－6**に併記したように、減圧の有無に係わらず、耐久性指数が 80%以上と良好な結果が得られている。減圧の効果は一部を除き同等か、それ以上の結果が得られた。

(7) 中性化

促進中性化深さの試験結果は、**表－6**に併記したように、水セメント比が小さいものほど中性化深さが小さく、減圧による効果が認められる。

5. まとめ

再生骨材を用いたコンクリートの品質改善を行う目的で減圧攪拌技術を適用し，その効果を確認した。

本研究によって得られた成果は次の通りである。

(1)減圧攪拌を再生骨材コンクリートに適用する際の減圧度は、効果の大きさを考慮して 86.7kPa とすればよい。

(2)再生骨材の吸水率が高いものほど減圧攪拌効果が大きいことから，再生骨材製造時のモルタル分の除去による微粉の発生量を低減できる可能性がある。

(3) 減圧攪拌を実施した再生骨材コンクリートは、汎用のコンクリートで、圧縮強度の増加量が最大 10%程度増加し、品質改善効果が認められた。

(4) スランプ 2.5㎝ の舗装用コンクリートに高性能 AE 減水剤を添加し、スランプ 8㎝ としたコンクリートに減圧攪拌を適用した結果、曲げ強度で 6%（圧縮強度は 15%）増加する結果が得られた。

(5) 減圧攪拌による再生骨材コンクリートの強度増加は、復圧によるマトリクスと骨材との圧着効果によるものであって、効果を高める要因としてモルタルのモビリティの向上に寄与する高性能 AE 減水剤の使用、砂セメント比及び水セメント比が挙げられる。

(6) 減圧攪拌による再生骨材コンクリートのすり減り抵抗性は、一部のデータを除き減圧攪拌を適用しないものに比べすり減り断面積が同等又は小さくなっており、良好な結果が得られた。

(7) JIS A 1148 による凍結融解抵抗性、並びに促進中性化深さは、減圧なしに比べ同等または若干向上する結果が得られた。

以上の結果より、減圧攪拌技術は、再生骨材コンクリートの強度、すり減りの品質改善に効果があり、再生骨材コンクリートの製造に適用できる可能性が示された。

なお、本研究の一部は、経済産業省中小企業庁平成１２年度創造技術研究開発費の交付を受けて実施したものである。

参考文献

1) 村田二郎，鈴木一雄，大内千彦：減圧ミキサによって練りまぜた高炉スラグ骨材コンクリートの諸性質に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.2, No.1, pp.45-56, 1991

2) 鈴木一雄，溝田龍彦，田口茂久：低品質骨材の有効利用に関する研究，生コン技術大会研究発表論文集，Vol.8, pp.19-22, 1995.6

3) 伊藤康司，鈴木一雄，田口茂久，溝田龍彦：低品質骨材の有効利用に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集 No.52，pp.474-479, 1998.12