

# 論文 異なる条件で改質させた再生骨材がコンクリートの強度性状に及ぼす影響

松田 信広\*1・伊代田 岳史\*2

**要旨:** 本研究は、低品質再生粗骨材に強制炭酸化および屋外曝露による CO<sub>2</sub> 吸着を行い、改質効果を確認し、その改質再生骨材がコンクリートの強度性状に及ぼす影響を確認した。その結果、強制炭酸化および屋外曝露を行った再生粗骨材は、密度・吸水率が改善した。その中でも強制炭酸化を行ったものの方が改質効果は大きかった。屋外曝露による改質効果は、曝露期間を長くすることで向上した。それら改質再生骨材を用いたコンクリートの割裂引張強度は、改質を行っていないものと比較して改善した。強制炭酸化および屋外曝露による改質を行うことで、遷移帯の改質に影響を与えている可能性があることが示唆された。

**キーワード:** 低品質再生骨材, 再生骨材コンクリート, 炭酸化, 改質, 透気係数, 中性化速度係数

## 1. はじめに

低品質再生骨材は、中・高品質再生骨材と比較してエネルギーやコストをかけずに製造することができ、副産微粉末の発生が少ない。しかし、その反面、一般的には骨材自体の品質が劣り、これら骨材を用いたコンクリートは、高い強度・耐久性が要求される部材または部位に使用することは困難である。そこで、再生骨材コンクリートの普及を見据えた場合、特殊な製造設備を必要としない低品質再生骨材の改質技術が求められると考える。

筆者らは、低品質再生骨材の改質を目的として、CO<sub>2</sub> ガスの強制炭酸化による低エネルギー・低コスト型の再生骨材製造方法を提案<sup>1)</sup>している。この技術は、コンクリートの炭酸化メカニズムに着目し、再生骨材にCO<sub>2</sub> ガスを吹き付けることで骨材に付着または混入しているモルタルやセメントペースト（以下、混入モルタル）部分を炭酸化させ、再生骨材自体の改質を図るものである。これまでに行った研究<sup>2)</sup>では、混入モルタル部分の割合が大きい再生骨材は改質の効果が大きく、これら改質再生骨材を用いたコンクリートの強度および長さ変化率は、改質を行っていないものと比較して改善することを確認した。また、その中でも原コンクリートに戻りコンクリートを使用したものは改善が顕著であることを確認した。

一方、これまで改質方法として行っていた強制炭酸化の方法は、促進中性化装置を用いている。しかし、実用化を考えた場合、大掛かりな設備を有することとなる。そこで既報<sup>3)</sup>では、屋外曝露でCO<sub>2</sub> 吸着を行った再生粗骨材の改質効果についても確認を行ったが、強制炭酸化を行ったものに対して大きな改善は認められなかった。

そこで本研究では、これまでの結果と、更に追加実験

を行い、低品質再生粗骨材に強制炭酸化および屋外曝露によるCO<sub>2</sub> 吸着を行い、改質効果を確認するとともに、その改質再生骨材がコンクリートの強度性状に及ぼす影響について確認することを目的とした。

## 2. 改質技術および方法

### 2.1 改質技術

コンクリートの炭酸化は、大気中のCO<sub>2</sub>がコンクリートに浸透することで、コンクリート中の水和生成物である水酸化カルシウムと化合し、炭酸カルシウムに変化する現象であることが知られている。これらは、コンクリート中の細孔溶液のpHを低下させて不動態皮膜を破壊し、鉄筋腐食を引き起こす劣化現象として中性化と呼ばれている。しかし、コンクリートのみに着目した場合、炭酸化により水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化すると、両者の分子量と密度から体積は約12%増加すると計算され、一般的には細孔量が減少し、強度が増加することが知られている<sup>4),5)</sup>。そこで、再生骨材の混入モルタル部分を炭酸化することによって緻密化することができれば、再生骨材自体を改質することができ、その結果として、再生骨材コンクリートの欠点である強度や耐久性を向上することができると考えている。

### 2.2 改質方法

本研究では、改質方法として強制炭酸化および屋外曝露による改質を行った。強制炭酸化による改質では、促進中性化装置（温度 20℃、相対湿度 60%、CO<sub>2</sub> 濃度 5% の環境下）で 1 週間実施した。このとき、2 日に 1 回の割合で試料をかき混ぜ、骨材全体にCO<sub>2</sub>がいき渡るようにした。屋外曝露による改質では、降雨や日照の影響を

\*1 (株) 東京テクノ 工場長 (正会員)

\*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

受ける場所において、10週間もしくは26週間の曝露を行った。このとき、2週間に1回の割合で試料をかき混ぜ、骨材全体にCO<sub>2</sub>がいき渡るようにした。

### 3. 再生骨材の改質

#### 3.1 検討概要

本研究で使用した再生骨材は、粗骨材のみとした。原コンクリートは、これまでの検討から改質の効果が大きかった戻りコンクリートを用いた。戻りコンクリートの使用材料を表-1に、配合および基礎性状を表-2および表-3に示す。戻りコンクリートは、工場内に広げ20日間硬化させた後、原コンクリートとして使用した。また、原コンクリートは、戻りコンクリートの呼び強度が18N/mm<sup>2</sup>（以下、18N）のもの24N/mm<sup>2</sup>（以下、24N）のものを用いた。再生粗骨材の製造は、再生骨材プラント（以下、当該工場）において行った。当該工場では、通常、Mクラスの再生粗骨材を製造している。製造フローを図-1に示す。当該工場における再生粗骨材Mの製造方法は、大きく破砕処理と磨砕処理の工程を行う。破砕処理から得られる再生粗骨材の品質は概ねLクラスであり、磨砕処理を経てMクラスになる。本研究で使用した再生粗骨材は、破砕処理のみを行い、分級したものを使用した。したがって、再生粗骨材Mの製造時と比較して磨砕処理を省いた分、低エネルギー・低コストで骨材を製造することができている。そこで得られた再生粗骨材は、上記に示す強制炭酸化および屋外曝露を行い、その改質効果について検討を行った。なお、屋外曝露は、18Nのみ10週間実施したものと26週間実施したものを用いて、曝露期間の違いによる影響について検討した。

#### 3.2 再生骨材の改質

強制炭酸化および屋外曝露を行った再生粗骨材にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。その着色状況を写真-1に示す。強制炭酸化および屋外曝露を行った再生粗骨材は、CO<sub>2</sub>吸着を行っていないものと比較して着色が少なく、外観からはCO<sub>2</sub>を吸着し炭酸化したことが確認できる。既往の研究<sup>6)</sup>では、強制炭酸化と同一条件で炭酸化した場合の中性化深さはおおよそ5~10mm程度である。したがって、再生粗骨材中の混入モルタル部分も同程度の厚さであることから、強制炭酸化によって概ね混入モルタル部分はCO<sub>2</sub>を吸着し炭酸化したものと推測する。再生粗骨材の物性および密度・吸水率を表-4および図-2に示す。強制炭酸化および屋外曝露を行ったものは、全ての種類で密度・吸水率が改善した。中でも、強制炭酸化を行った18RGCと24RGCは、いずれもクラスアップしていることが確認できる。また、改質を行っていないものに対する吸水率の改善率は、18RGCは15.7%、24RGCは16.2%となり、原コンクリートの呼

表-1 戻りコンクリートの使用材料

名称	記号	銘柄・産地	物性
セメント	C	普通セメント	密度：3.15g/cm <sup>3</sup>
水	W	地下水	—
普通細骨材 <sup>*1</sup>	S1	砕砂： 東京都八王子産	絶乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率：1.08%
	S2	山砂： 千葉県富津産	絶乾密度：2.54g/cm <sup>3</sup> 吸水率：1.63%
普通粗骨材	JG	硬質砂岩砕石： 東京都八王子産	絶乾密度：2.63g/cm <sup>3</sup> 吸水率：0.75%
混和剤	Ad	AE減水剤（ポリカルボン酸ポリエーテル系）	

\*1 混合率：S1：S2=70：30

表-2 戻りコンクリートの配合

原コン強度 <sup>*1</sup>	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			C	W	S1/S2	JG
18N	66.5	46.0	242	161	610/255	1029
24N	57.0	45.4	277	158	594/250	1029

\*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

※ 目標スランプ：8cm, 目標空気量：4.5%

表-3 戻りコンクリートの基礎性状

原コン強度 <sup>*1</sup>	スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢28日 標準養生 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢20日 <sup>*2</sup> 封かん養生 (N/mm <sup>2</sup> )
18N	10.0	4.5	21.9	21.1
24N	8.0	4.3	33.2	32.8

\*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

\*2 骨材製造時の材齢

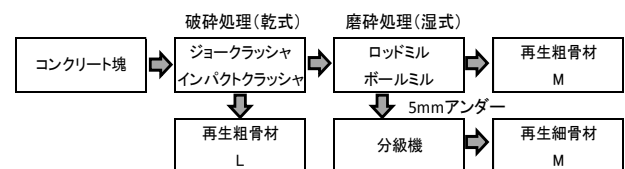


図-1 再生骨材製造フロー



写真-1 フェノールフタレイン溶液による着色状況

び強度が高いほうが改善の傾向は大きかった。屋外曝露を行ったものについて、10週間曝露を行った18RGOおよび24RGOは、いずれも密度・吸水率は改善されているもののクラスアップは確認されなかった。また、改質

表-4 再生粗骨材の物性

骨材名称	原コン強度 <sup>*1</sup>	改質方法	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	破砕値 (%)	モルタル混入率 (%)
JG <sup>*2</sup>	—	—	2.63	0.75	6.65	61.7	4.8	—
18RG <sup>*3</sup>	18N	改質なし	2.29	5.78	6.71	62.7	13.4	35.8
18RGC		強制炭酸化	2.32	4.87			12.4	
18RGO (10W <sup>*4</sup> )		屋外曝露	2.32	5.24			12.7	
18RGO (26W <sup>*4</sup> )			2.32	4.97			13.8	
24RG <sup>*3</sup>	24N	改質なし	2.29	5.72	6.72	62.3	13.0	36.5
24RGC		強制炭酸化	2.33	4.79			10.8	
24RGO (10W <sup>*4</sup> )		屋外曝露	2.32	5.11			13.4	

\*1 原コンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

\*2 コンクリート製造時に用いた普通粗骨材

\*3 骨材製造時の値

\*4 屋外曝露を実施した期間 (10W : 10 週間, 26W : 26 週間)

※ 絶乾密度および吸水率, 破砕値は 3 回の試験結果の平均値を示す

を行っていないものに対する吸水率の改善率は、18RGO は 9.4%、24RGO は 10.6% となり、強制炭酸化と同様に、原コンクリートの強度が高いほうが改善の傾向は大きかった。中性化の進行は、一般的には水セメント比が大きなものほど早いことから、原コンクリートの強度が 18N シリーズのほうが改質効果は大きいと予測していた。しかし、18N シリーズのモルタル混入率は、24N シリーズよりも小さい。これは、原コンクリートの強度が低いことで、骨材製造時にモルタル部の剥離がし易くなったものと推測するが、破砕値の差から考えると、その影響は僅かである。一方で、屋外曝露を実施した時期は、24N シリーズは 7~10 月であり、18N シリーズは 10~6 月である。1 年を通じて 7~10 月は 10~6 月と比較して気温が高く、これら環境条件の影響によって、炭酸化の進行、ひいては吸水率の改善率に影響を及ぼしたもの考える。強制炭酸化と屋外曝露を 10 週間行ったものの改質効果の差を比較すると強制炭酸化を行ったものの方が改質効果は大きかった。一方、屋外曝露を 26 週間行ったものはクラスアップが確認された。また、吸水率の改善率は 14.1% であり、暴露期間が長いことで改質効果も向上した。しかし、強制炭酸化を行ったものの改善率には及ばなかった。桐山らの研究<sup>7)</sup>によると、角柱供試体を用いて強制炭酸化と同一条件で促進中性化試験を行った場合、屋外自然曝露の約 35 倍の促進となり、促進期間 1.5 週が屋外自然曝露の 1 年に相当すると報告されている。また、中性化の進行は、環境条件等の様々な要因が関係することから、一概には結論できないが、今回のケースにおいては、屋外曝露の期間が 26 週間では、強制炭酸化と同等の効果は得られなかった。

破砕値試験は、高橋らの方法<sup>8)</sup>を参考に行った。18RG と 24RG を比較すると 18RG の方が僅かに大きい値とな

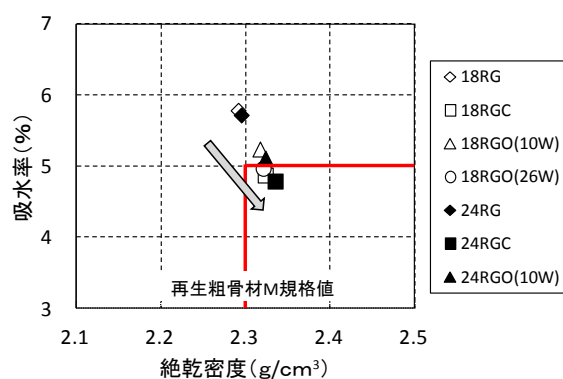


図-2 再生粗骨材の密度・吸水率

った。これは、原コンクリートの強度が関係しているものの、その影響は僅かであった。18N シリーズで比較すると、強制炭酸化および屋外曝露を行ったものは破砕値が小さくなった。これは、炭酸化によって骨材が改質され、骨材自体が強くなったことが考えられる。しかし、暴露期間を 26 週間行ったものは、10 週間のものと比較して大きくなった。24N シリーズでは、強制炭酸化を行ったものは破砕値が小さくなり、屋外曝露を行ったものは改善しなかった。これらは、密度・吸水率の改善傾向と相違する。その要因は、破砕値は骨材の圧縮荷重に対する抵抗性を示しているものと考えられ、混入モルタル部分の割合や品質、骨材と旧モルタルとの間の旧遷移帯の影響を受けるものと考えられる。したがって、屋外曝露による炭酸化では、そこまで深く改質されておらず、逆に強制炭酸化ではその位置まで改質されていると推測する。

再生粗骨材の FM 凍害指数を図-3 に示す。18RG と 24RG を比較すると、ほぼ同等の値であった。再生粗骨材の FM 凍害指数は、原コンクリートの強度による影響はないものといえる。一方、強制炭酸化および屋外曝露

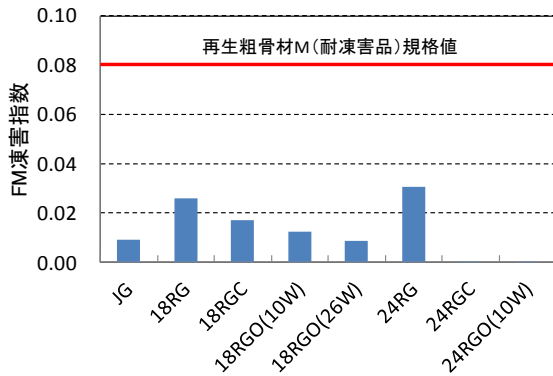


図-3 再生粗骨材の FM 凍害指数

を行うことで FM 凍害指数は改善した。また、暴露期間を 26 週間行ったものは、10 週間行ったものに対して改善した。この傾向は、密度・吸水率と同様であった。これらは、改質によって再生粗骨材中の混入モルタル部分の凍結水量が小さくなったことが影響しているものと考えられる。

#### 4. 再生骨材コンクリートの実験概要

##### 4.1 使用材料

本研究に使用した材料を表-5 に示す。セメントおよび再生粗骨材以外は、原コンクリートで使用した材料と同一のものである。なお、18N シリーズの屋外暴露を行ったものは、暴露期間が 26 週間行ったものを用いた。

##### 4.2 再生骨材コンクリートの配合とフレッシュ性状

本研究における再生骨材コンクリートの配合を表-6 に示す。全配合において W/C50% および s/a46% は同一条件とした。スランブおよび空気量の目標値は、10±2.5cm および 4.5±1.5% とした。混和剤の添加量は全て C×0.8% であり、空気量の調整に AE 剤（ロジン系）を用いた。再生骨材コンクリートのフレッシュ性状を表-7 に示す。なお、18N シリーズと 24N シリーズは検討の時期が相違するため、比較のため普通コンクリートである JG 配合はそれぞれ行っている。全配合ともスランブおよび空気量の目標値を満足した。また、強制炭酸化および屋外暴露による改質再生骨材を用いたもののフレッシュ性状への影響はみられなかった。

##### 4.3 試験項目および試験方法

本研究における再生骨材コンクリートの試験項目は、強度性状として圧縮強度（JIS A1108）および割裂引張強度（JIS A 1113）を実施した。材齢は 28 日とし、いずれも標準養生とした。

#### 5. 試験結果および考察

##### 5.1 圧縮強度および割裂引張強度試験結果

圧縮強度および割裂引張強度試験結果を表-8 に示す。

表-5 使用材料

名称	記号	銘柄・産地	物性
セメント	C	高炉セメント B 種	密度：3.04g/cm <sup>3</sup>
水	W	地下水	—
普通細骨材*1	S1	砕砂： 東京都八王子産	絶乾密度：2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率：1.08%
	S2	山砂： 千葉県富津産	絶乾密度：2.54g/cm <sup>3</sup> 吸水率：1.63%
普通粗骨材	JG	硬質砂岩碎石： 東京都八王子産	表-4 参照
再生粗骨材	18RG	改質なし	
	18RGC	強制炭酸化	
	18RGO	屋外暴露 (26W)	
	24RG	改質なし	
	24RGC	強制炭酸化	
	24RGO	屋外暴露 (10W)	
混和剤	Ad	AE 減水剤 (ポリカルボン酸ポリエーテル系)	

\*1 混合率：S1：S2=70：30

表-6 再生骨材コンクリートの配合

配合名	原コン強度*1	改質方法	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			C	W	S1/S2	G
JG	—	—	—	—	—	988
18RG	18N	改質なし	320	160	584/245	903
18RGC		強制炭酸化				910
18RGO		屋外暴露				
24RG	24N	改質なし	320	160	584/245	906
24RGC		強制炭酸化				914
24RGO		屋外暴露				

\*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

表-7 再生骨材コンクリートのフレッシュ性状

配合名	原コン強度*1	改質方法	スランブ (cm)	空気量 (%)
JG	—	—	10.5/8.5*2	4.5/5.2*2
18RG	18N	改質なし	10.5	5.9
18RGC		強制炭酸化	10.0	5.5
18RGO		屋外暴露	8.5	5.5
24RG	24N	改質なし	11.5	5.6
24RGC		強制炭酸化	10.0	5.3
24RGO		屋外暴露	10.0	4.8

\*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

\*2 18N 実施時/24N 実施時の結果

表-8 圧縮強度および割裂引張強度試験結果

配合名	原コン強度*1	改質方法	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
JG	—	—	41.5/40.0*2	3.52/3.32*2
18RG	18N	改質なし	35.7	2.83
18RGC		強制炭酸化	38.1	3.13
18RGO		屋外暴露	37.1	3.19
24RG	24N	改質なし	35.8	2.81
24RGC		強制炭酸化	40.2	3.21
24RGO		屋外暴露	36.7	3.08

\*1 戻りコンクリートの呼び強度 (N/mm<sup>2</sup>)

\*2 18N 実施時/24N 実施時の結果

また、18N および 24N シリーズは、比較のためそれぞれの JG 配合である普通コンクリートの圧縮強度および割裂引張強度に対する比率として図-4 および図-5 に示

した。圧縮強度について、強制炭酸化および屋外曝露によって改質を行ったものは、改質を行っていないものに対して改善した。18Nと24Nシリーズを比較すると、すべてのもので24Nのほうが強度は高くなった。これは、原コンクリートの強度が影響している。JG配合である普通コンクリートと比較すると、改質を行っていないものは10%以上低下する結果となった。強制炭酸化のものは、18Nは8%程度低下したが24Nのものは低下しなかった。屋外曝露のものはいずれも低下した。また、18Nのものは、曝露期間が長く、吸水率の改善率では24N（曝露期間10W）よりも大きかったものの圧縮強度は低下した。これらは、破砕値と同様の傾向であることから、骨材自体の強さもしくは混入モルタル部分の品質や骨材と旧モルタルとの間の旧遷移帯が改善しなかったことが関係していると考えられる。

割裂引張強度について、強制炭酸化および屋外曝露によって改質を行ったものは、改質を行っていないものに対して改善した。18Nと24Nシリーズを比較すると、すべてのもので24Nのほうが強度は高くなった。これは、圧縮強度と同様に原コンクリートの強度が影響している。JG配合である普通コンクリートと比較すると、改質を行っていないものは15%以上低下し、18Nは20%程度低下した。この傾向は圧縮強度よりも大きかった。これは、再生骨材コンクリートは、再生粗骨材と新モルタルとの間の遷移帯による影響を受け、割裂引張強度はその影響が顕著に表れたものと考えられる。強制炭酸化を行ったものは、いずれも圧縮強度の傾向よりも低下した。屋外曝露を行ったものについても普通コンクリートよりも低下はしているものの、圧縮強度と比較してそれほど低下はみられなかった。また、強制炭酸化および屋外曝露を行ったものは、改質を行っていないものと比較し改善の傾向は大きかった。更に、18Nシリーズでは、強制炭酸化のものより屋外暴露による改質を行ったもののほうが改善の傾向は大きかった。圧縮強度では、骨材の破砕値が関係していると推測したが割裂引張強度ではその影響がみられない。強制炭酸化および屋外曝露をおこなったものは写真-1からわかる通り骨材表面は確実に炭酸化している。このことから、強制炭酸化および屋外暴露による改質再生骨材を用いたコンクリートは、遷移帯の改質や再生粗骨材と新モルタルとの結合もしくは付着強度の改質にも影響を及ぼしている可能性が考えられる。

## 5.2 遷移帯の改質

遷移帯は、骨材相とペースト相の間に連続した空隙を形成することで耐久性に影響を及ぼすといわれている<sup>9)</sup>。そこで、遷移帯の改質が行われていれば、物質移動抵抗性に寄与すると考え、透気試験および促進中性化試験（JIS A 1153）を行った。透気試験には、強度試験に用い

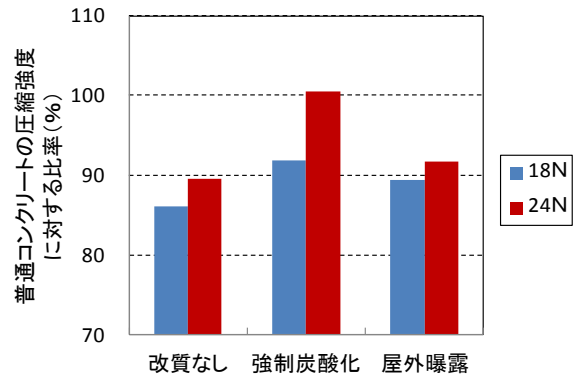


図-4 普通コンクリートの圧縮強度に対する比率

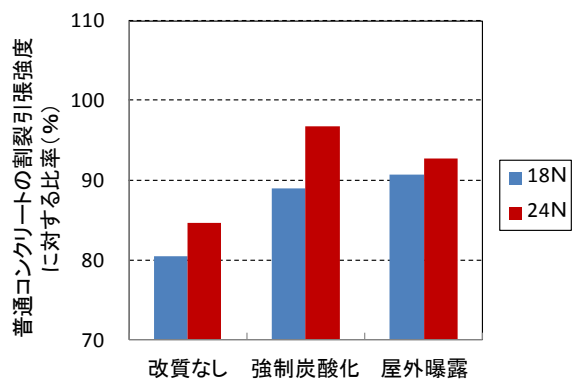


図-5 普通コンクリートの割裂引張強度に対する比率



写真-2 透気試験装置

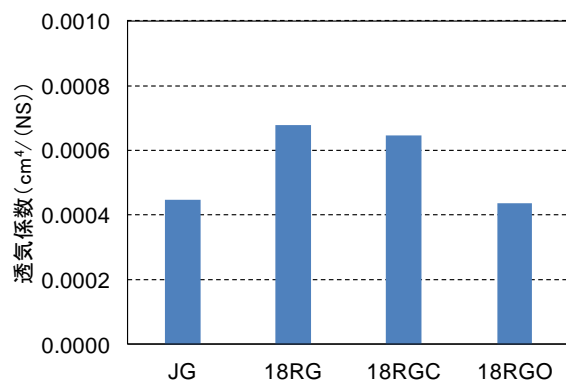


図-6 透気試験結果

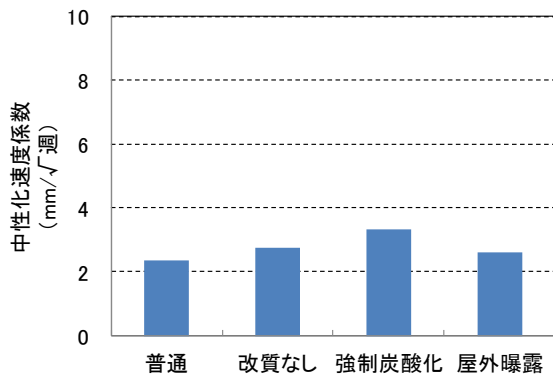


図-7 中性化速度係数

た円柱供試体を 5cm に切断したものをを用いた。試験方法は既往の文献<sup>10)</sup>を参考に、写真-2 に示す装置を使用した。なお、ここでは 18N シリーズのみの検討とした。透気試験結果を図-6 に示す。強制炭酸化および屋外曝露によって改質を行ったものは、改質を行っていないものに対して透気係数は小さくなった。また、屋外曝露を行ったものは、強制炭酸化を行ったものより小さい。この傾向は、割裂引張強度の傾向と同等であった。材齢 26 週における中性化速度係数を図-7 に示す。屋外曝露を行ったものの中性化速度係数は、強制炭酸化を行ったものより小さいが、何れも大きな差はみられなかった。したがって、透気試験結果のみの考察ではあるが、強制炭酸化および屋外曝露による改質再生骨材を用いることによって、物質移動抵抗性は改善し、遷移帯の改質に影響を与えている可能性があることが示唆された。しかし、これらについては再生粗骨材と新モルタルとの結合もしくはは付着強度の改質等を含め、更に検討を重ねる必要があると考える。

## 6. まとめ

本研究の範囲において以下の知見を得た。

- (1) 強制炭酸化および屋外曝露を行った再生粗骨材は、密度・吸水率が改善した。強制炭酸化と屋外曝露を行ったものの改質効果の差を比較すると強制炭酸化を行ったものの方が改質効果は大きかった。屋外曝露による改質効果は、曝露期間を長くすることで向上した。しかし、曝露期間を長くしても強制炭酸化と同等の効果は得られなかった。FM 凍害指数は、強制炭酸化および屋外曝露を行うことで改善した。
- (2) 圧縮強度および割裂引張強度は、原コンクリートの強度に影響した。
- (3) 強制炭酸化および屋外曝露による改質再生骨材を用いたコンクリートの圧縮強度および割裂引張強度は、改質を行っていないものと比較し改善した。
- (4) 割裂引張強度は、遷移帯による影響を受け、強制炭

酸化および屋外曝露による改質を行うことで強度が改善し、遷移帯の改質に影響を与えている可能性があることが示唆された。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、芝浦工業大学大学院生の末木博氏、田籠滉貴氏にご協力を頂きました。また、再生骨材の製造について、武蔵野土木工業(株)の各位にご協力を頂きました。ここに付記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 松田信広, 亀山敬宏, 松田美奈, 伊代田岳史: CO<sub>2</sub> ガスの強制吸着による低エネルギー型再生骨材製造方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1732-1737, 2014.7
- 2) 松田信広, 伊代田岳史: 低品質再生骨材の CO<sub>2</sub> 吸着による改質が再生骨材コンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1417-1422, 2015.7
- 3) 松田信広, 鈴木創太, 伊代田岳史: 改質再生骨材を用いた骨材置換法でのコンクリートの強度および耐久性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1791-1796, 2016.7
- 4) 長嶋正久, 飛内圭之: 二酸化炭素の作用と硬化コンクリートの変化, セメント・コンクリート, No.465, pp.27-33, 1985.11
- 5) 横関康祐・渡邊賢三・安田和弘・坂田 昇: 炭酸化養生によるコンクリートの高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.555-560, 2002.7
- 6) 伊代田岳史, 井ノ口公寛: 簡易な真空吸水試験を用いた中性化進行予測手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.748-753, 2012.7
- 7) 桐山和也, 渡邊義則, 星野 実, 梅原秀哲: 48 年経過したコンクリートの中性化と同コンクリートを用いた促進中性化, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.631-636, 2005.7
- 8) 高橋祐一, 黒田 満, 榊田佳寛, 竹内博幸: 再生骨材中の混入モルタル量の品質管理方法および評価基準の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1453-1458, 2013.7
- 9) 内川 浩: セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, pp.5-17, 1995
- 10) 河野俊一, 氏家 勲: 乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.847-852, 1999.7