

論文 再生骨材コンクリートの塩化物イオン量に関する検討

道正 泰弘^{*1}・金子 雄一^{*2}・小田部 裕一^{*3}・菊池 雅史^{*4}

要旨 : NaCl を含む再生骨材からの塩化物イオンの溶出量ならびにそれを用いた再生骨材コンクリート中の塩化物イオン量の塩分計による測定結果に基づき, 再生骨材中に固定される, あるいは未溶出の塩化物イオン量について検討した。その結果, 塩分計では溶出した塩化物イオン量が測定されているものの, 測定値と全塩化物イオン量には比較的明確な関係が認められた。この関係に基づき, 受入検査の判定基準として全塩化物イオン量 0.30kg/m^3 に相当する再生骨材コンクリート中の塩化物イオン量の塩分計測定による規制値を提案した。

キーワード : 再生骨材, 再生骨材コンクリート, 塩化物イオン, 受入検査

1. はじめに

再生骨材コンクリートでは, 再生骨材の原モルタルに含まれている塩化物イオン(以下, 塩分という)が溶出する。その際, 再生骨材中では, セメントの水和等により固定された塩化物イオン(以下, 固定塩分という)と可溶性の塩化物イオン(以下, 可溶性塩分という)が混在しており, 可溶性塩分の一部が溶出する。したがって, 一般的なモル法によるレディーミクストコンクリート(生コン)の塩分含有量測定器(以下, 塩分計という)による受入検査では, 練混ぜから検査までに溶出した塩分と, 他の材料から供給された塩分が測定される。一方, JIS A 5308 では, 固定塩分と可溶性塩分を合わせた全塩化物イオン(以下, 全塩分という)として塩分の総量が規制されており, 再生骨材コンクリートでは, 測定された塩分量から全塩分量を推定し, 検査の可否を判定する必要がある。

本検討では, 練混ぜ時に NaCl を添加した原コンクリートを破碎して製造した再生骨材から溶出する塩分量について検討した。また, この再生骨材を用いたコンクリートの塩分量を測定し, 測定される塩分量と全塩分量の関係について考察を加え, 受入検査における塩分量の判定基準

を提案した。

2. 実験の概要

2.1 原コンクリートおよび再生骨材の製造

原コンクリートの調合を表-1に示す。また, 原コンクリートの骨材および製造した再生骨材の密度および吸水率を表-2に示す。再生骨材は, オープンセットを粗骨材の最大寸法 20mm に設定したジョークラッシャーにより破碎した後, 直ちにふるい分け, 各々再生粗骨材(5-20mm)および再生細骨材(0-5mm)として製造した。

2.2 再生骨材中の塩分量

ここで用いた再生骨材では, 原コンクリートに, 表-1に示す所定量の NaCl が, 練混ぜ時に添加されている。原コンクリートに混入した塩分は, 原モルタル中に含有され, 原骨材中への浸透量は無視できる。したがって, (1)式に示す再生骨材中の原モルタル混入率¹⁾から, 再生骨材中の塩分量を算定した。

$$O_m = \frac{G_\rho - RA_\rho}{G_\rho - M_\rho} \quad (1)$$

ここで, O_m : 原モルタル混入率(容積比), G_ρ : 原骨材の表乾密度(g/cm^3), RA_ρ : 再生骨材の表

*1 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター スペシャリスト 博士(工学) (正会員)

*2 東電設計(株) 土木本部 火力・原子力土木部 工修 (正会員)

*3 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 博士(工学) (正会員)

*4 明治大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

表－1 原コンクリートの調合

記号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	絶対容積(L/m ³)			単位量(kg/m ³)					NaCl (kg/m ³)
				C	S	G	C	S	G	AE 減水剤*	空気量調整剤**	
55GA	55	45	175	101	306	373	318	829	981	0.875	0.025	0
55GB												1.15
55GC												2.30
55GD												4.60

*リグニンスルホン酸系, **樹脂酸塩系空気連行補助剤

表－2 本検討に用いた骨材の密度および吸水率

物性		砕石* G	再生粗骨材				砂** S	再生細骨材			
			55RGA	55RGB	55RGC	55RGD		55RSA	55RSB	55RSC	55RSD
密度 (g/cm ³)	表乾	2.63	2.44	2.38	2.43	2.39	2.71	2.30	2.31	2.30	2.29
	絶乾	2.61	2.33	2.25	2.31	2.26	2.66	2.12	2.10	2.10	2.09
吸水率 (%)		1.00	5.06	5.87	5.26	5.64	2.03	8.47	9.73	9.50	9.60

*硬質砂岩砕石(青梅産), **陸砂(多摩川水系産)

乾密度(g/cm³), M_ρ : 原コンクリート中の空気量を含む原モルタルの密度(g/cm³)で(2)式により算定した。

$$M_\rho = \frac{C_w + W_w + S_w}{M_v} \quad (2)$$

ここで, C_w : 原コンクリートの単位セメント量(kg/m³), W_w : 原コンクリートの単位水量(kg/m³), S_w : 原コンクリートの単位細骨材量(kg/m³), M_v : 原コンクリート中の空気量を含むモルタルの容積(L)で(3)式とした。

$$M_v = 1000 - G_v \quad (3)$$

ここで, G_v : 原コンクリート中の粗骨材(原骨材)の絶対容積(L)である。

再生骨材中の塩分量は, 以下の仮定に基づいて算定した。

- 1) NaCl は原骨材中には浸透しない。
- 2) セメントの水和反応により固定化される塩分量は, 単位セメント量の 0.4% とする。
- 3) 練混ぜ時に添加した NaCl とセメント中に含まれる塩分を合計したものを全塩分量とし, これから固定塩分量を差し引いたものを, 可溶性塩分量とする。
- 4) セメント中に含まれる塩分は, 塩化物イオンで単位セメント量の 0.01% とする。
これらの仮定により算定した再生骨材中の原

モルタル混入率, 塩分量を表－3に示す。なお, 55RGA, 55RGB では, 添加した塩分が全量固定される結果となっている。実際には, 添加した塩分の全てが固定化されることはないが, 可溶性塩分はごく少ない状態であると考えられる。

2.3 試験方法および結果

試験は, 再生骨材を水に浸せきし, 水中に溶出する塩分の経時変化を塩分計により測定した。また, 再生骨材の置換率を変化させた再生骨材コンクリートを練混ぜ, 練上がり直後, 1 時間後および 2 時間後のコンクリート中の塩分量を塩分計により測定した。

(1) 再生骨材からの塩分溶出量

再生骨材を水に浸せきした時の, 経過時間と骨材 1kg から溶出した塩分量の関係を図－1に示す。図中には, 55RGC, 55RGD, 55RSC および 55RSD の結果を示すが, これ以外の再生骨材では, 塩分計の検出限界以下であった。

溶出している塩分は水で抽出していることから可溶性である。先に示した骨材中の可溶性塩分量と試験結果の関係を, 経過時間 1 時間および 24 時間について表－4に示す。

可溶性塩分量が比較的少ない 55RGC, 55RSC では, 経過時間 1 時間, 24 時間とも, 計算値より大きい溶出量が測定された。これは, 添加した塩分量が少ないため実際に固定化される塩分

表-3 再生骨材の原モルタル混入率および塩分量

記号	原モルタル混入率 (%)	全塩分(CI)		可溶性塩分(CI)		備考
		混入量 (kg/m ³)	骨材中* (g/kg)	混入量** (kg/m ³)	骨材中*** (g/kg)	
再生粗骨材	55RGA	36.4	0.032	0.008	—	塩分の混入量は、練混ぜ時に添加した NaCl とセメントに含まれる塩分を考慮
	55RGB	47.9	0.729	0.234	—	
	55RGC	38.3	1.427	0.359	0.155	
	55RGD	46.0	2.822	0.867	1.550	
再生細骨材	55RSA	63.3	0.032	0.014	—	
	55RSB	61.4	0.729	0.309	—	
	55RSC	63.3	1.427	0.626	0.155	
	55RSD	65.2	2.822	1.281	1.550	

* : 混入量(kg/m³)×(原モルタル混入率/M_v×10)/再生骨材の表乾密度(g/cm³) として算定

** : 全塩分の混入量(kg/m³)－固定塩分量 として算定

*** : 骨材中全塩分量(g/kg)×可溶性塩分の混入量/全塩分の混入量 として算定

量も少なくなるのに対し、計算では単位セメント量の 0.4% が固定されると仮定しており、可溶性塩分の計算値が過少評価されていると考えられる。塩分量の比較的多い 55RGD, 55RSD では、経過時間 1 時間で計算された可溶性塩分の 21, 43% が、24 時間では 40, 67% がそれぞれ溶出した。

これより、再生粗骨材に比べて再生細骨材は塩分が溶出しやすいこと、また、原モルタルに含まれる塩分は、可溶性であっても数時間から 24 時間程度では完全には溶出しないことが、明らかとなった。

(2) 再生骨材コンクリート中の塩分量

製造した再生骨材のうち、塩分量が比較的多い 55RGD, 55RSC, 55RSD を用いて再生骨材コンクリートを作製し、塩分濃度を測定した。調査を表-5 に示す。再生粗骨材を用いたコンクリート(以下、再生粗骨材コンクリートという)では、再生粗骨材の置換率を 15, 30, 50, 100%, 一方、再生細骨材を用いたコンクリート(以下、再生細骨材コンクリートという)では 15, 30% とした。いずれのコンクリートも水セメント比 55%, 細骨材率 44% で一定とした。単位水量は、再生粗骨材コンクリートでは 180kg/m³, 再生細骨材コンクリートでは 185kg/m³ とし、スランプ、空気量は、各々 18±2.5cm, 4.5±1.5% を目標とし、混和剤で調整した。

塩分量は、練上がり直後、1 時間後および 2 時

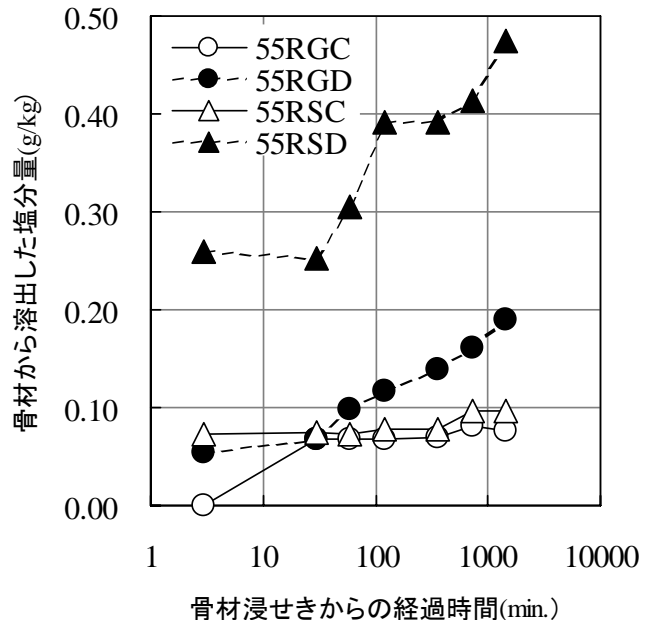


図-1 骨材から溶出した塩分量の経時変化

表-4 再生骨材中の塩分量とその溶出量

記号	可溶性塩分量(g/kg)				
	①* 計算値	溶出量		②/①	③/①
		② 60min.	③ 1440min.		
55RGC	0.039	0.067	0.077	1.72	1.97
55RGD	0.476	0.099	0.190	0.21	0.40
55RSC	0.068	0.074	0.097	1.09	1.43
55RSD	0.704	0.306	0.475	0.43	0.67

*骨材中

間後に測定を行った。塩分量の測定結果を図-2 に示す。練上がり直後に比べ、1 時間後ではいずれのコンクリートも測定される塩分量は増加しているものの、1 時間後と 2 時間後では、増加が緩和される傾向にあり、再生骨材からの塩

表-5 再生骨材コンクリートの調合

記号	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	絶対容積(L/m ³)					単位量(kg/m ³)							
				C	S	RS* ¹	G	RG* ²	C	S	RS* ¹	G	RG* ²	AE 減水剤* ³	空気量調整剤* ⁴	
55RSC-15	55	44	185	106	248	44	372	0	336	638	101	977	0	0.093	0.024	
55RSC-30					204	88				525	202					
55RSD-15					248	44				638	101					
55RSD-30					204	88				525	202					
55RGD-15			180	104	295	0	320	56	327	759	0	841	138	0.900		0.023
55RGD-30							263	113				692	276			
55RGD-50							188	188				494	459			
55RGD-100							0	376				0	919			

*1 55RSC-15,55RSC-30:55RSC, 55RSD-15,55RSD-30:55RSD, *2 55RGD, *3 リグニンスルホン酸系, *4 樹脂酸塩系空気連行補助剤

分の溶出は、練上がりから 1 時間程度の中に生じ、それ以降は比較的緩やかに溶出すると考えられる。

3. 塩分量の受入検査に関する検討

3.1 塩分量の管理値の設定

ここでは、塩分計を用いて塩分量の受入検査を実施する場合を想定し、そこで測定される塩分量と、再生骨材コンクリート中の全塩分量の関係を検討した。これまでの適用実績²⁾との比較を行うために、検討は再生粗骨材コンクリートについて実施した。

再生粗骨材コンクリート中の塩分は、再生粗骨材、セメントから供給されるとし、表-3に示した再生粗骨材中の塩分量、セメントの塩化物イオン(0.01%)に基づき算定した。なお、セメントから供給される塩分は全て可溶性として計算した。

測定値には、通常生コンにおいて、練上がりから塩分量測定までの時間は、概ね 1 時間程度であることから、1 時間後のデータを用いた。

算定した全塩分量、可溶性塩分量および練上がりから 1 時間後におけるコンクリート中の塩分量の測定値を表-6に示す。再生粗骨材を用いたコンクリート中の全塩分量の計算値に対する測定値の割合は、全塩分量の増加にともない減少する傾向にあり、ここで測定した範囲では、全塩分量の 8~25%が測定されることとなる。

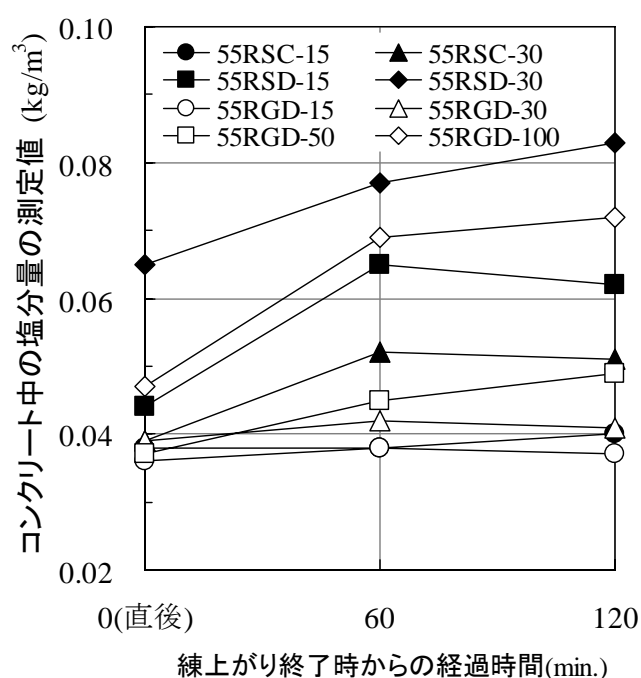


図-2 経過時間と塩分量の測定値の関係

再生粗骨材コンクリート中の全塩分量(計算値)と、それに対する測定値の割合の関係を図-3に示す。本図より、コンクリート中の全塩分量とそれに対する塩分計の測定値の割合の間には明確な関係が認められ、その関係は、全塩分量が 0.1~0.9(kg/m³)程度の範囲において、図中に示す回帰式で表すことができる。0.30kg/m³の全塩分に相当する測定値は、回帰式から、0.042 kg/m³と算定される。これより、受入検査において、塩分量がこの値以下の場合には、そのコンクリート中の全塩分量は規制値の 0.30 kg/m³を超えず、全塩分としての規制値を満足すること

となる。なお、ここでの検討は、練混ぜ時に 4.6kg/m^3 の NaCl を混入した原コンクリート (55GD) から製造した再生粗骨材を用いた試験結果に基づいているため、再生粗骨材中の固定塩分が多い条件となっており、 0.042kg/m^3 という管理値は安全側の値であると考えられる。

3.2 管理データの実績に基づく実用性の検証

(1) 塩分計の適用性

再生骨材コンクリート中の全塩分量と、練上がり後 1 時間で塩分計により測定した塩分量の関係については、全塩分量が多くなるとそれに対する測定値の割合が小さくなる傾向にある。そのため、全塩分量が多い範囲では、測定値の全塩分量に対する感度がやや鈍くなるが、コンクリート中の全塩分の規制値である 0.30 kg/m^3 以下の範囲では、全塩分量とそれに対する測定値の割合の間には比較的明確な関係が認められていることから、精度が確認された市販の塩分計による測定値から全塩分量の推定が可能である。例えば、カンタブのような市販の塩分計は、標準品と低濃度用の 2 種類があり、これらの最小目盛はそれぞれ単位水量の 0.008, 0.0012% に対応している。一般的な構造用コンクリートの単位水量は $150\sim 180\text{kg/m}^3$ 程度であることから、これらの最小目盛に相当するコンクリート中の塩分量は、それぞれ $0.01, 0.002\text{ kg/m}^3$ 程度となる。したがって、測定値の 0.042 kg/m^3 を管理値とした場合では、十分な感度を有している。

(2) 適用した実構造物の検査結果に基づく検証

提案した判定基準と実測結果を照らし合わせた結果を表-7 に示す。なお、実測結果は置換率 30% とした再生粗骨材コンクリートを建築構造物^{注 1)} に約 1000m^3 打設した際の製品検査および受入検査に該当するものである²⁾。本検討の結果をもとに制限値を 0.04 kg/m^3 と設定した場合、 0.04 kg/m^3 を超える試験結果^{注 2)} も幾つかみられる。但し、本検討の条件は、再生粗骨材中の固定塩分が比較的多い場合を設定しており、安全側の設定であることを考慮すると、実際にはこれを上回る場合でも塩分総量としては規制値を

表-6 コンクリート中の塩分量の計算値と測定値

記号	塩分量 (kg/m^3)				
	計算値		③ 測定値 (60min.)	③/①	③/②
	① 全塩 分量	② 可溶性 塩分量			
55RGD-15	0.153	0.100	0.038	0.25	0.38
55RGD-30	0.274	0.168	0.042	0.15	0.25
55RGD-50	0.434	0.258	0.045	0.10	0.17
55RGD-100	0.836	0.484	0.069	0.08	0.14

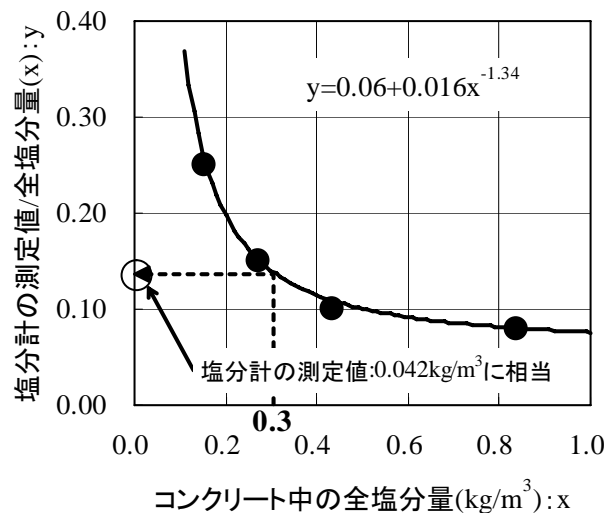


図-3 全塩分量とそれに対する塩分計の測定値の割合の関係

満足する場合もある。したがって、制限値 A を超える場合においては、JIS A 5023(再生骨材 L を用いたコンクリート) に準拠した制限値 B に基づく管理を実施することとした。

4. まとめ

NaCl を添加して練混ぜた原コンクリートから製造した塩分を含む再生骨材を用い、塩分の溶出、ならびにそれを用いたコンクリート中の全塩分量とそれを塩分計により測定した時の測定値の関係について検討した。

得られた結果は、次のようである。

- 1) 再生骨材を水中浸せきさせた時の塩分溶出量は、再生粗骨材に比べて再生細骨材の方が多く、再生骨材の原モルタルに含まれた塩分は可溶性であっても数時間から 24 時間程度では完全に溶出しないことが分かった。

表-7 再生粗骨材コンクリートの受入検査における塩分量の判定基準（案）

製品名 (呼び方)	再生 粗骨材 置換率 (%)	W/C (%)	打設量 (m ³)	全塩分の 規制値 (kg/m ³)	塩分計の測定値に対する管理値*1 (kg/m ³)			試験結果 (塩分計の実測値)	
					A: 判定基準 (案) *2	B: JIS A 5023 準拠	実績*3	製品 検査 (出荷時)	受入 検査 (荷卸時)
27-18-20-N	30	53.0	28	0.30 以下	0.04 以下	0.102 以下	0.25 以下*4	0.03	0.03
			185					0.03	0.03
			35					0.03	0.02
			70					0.04	0.05
			58					0.05	0.05
			17.5					0.04	0.05
			0.05					0.07	
27-15-20-N	53.0	258.5	0.101 以下	0.04	0.04				
27-15-20-L	58.0	187	0.085 以下	0.03	0.03				
36-15-20-L	40.0	213.5	0.090 以下	0.03	0.02				
				0.03	0.02				

*1：検査頻度は1回/日かつ1回/150m³とした。

*2：制限値 A をこえる場合，制限値 B にて判定を行う。

*3：国土交通大臣認定(MCON-0979)に基づく判定値^{注2)}。

*4：原コンクリート中の塩分量の最大値を 0.30kg/m³とし，置換率 50%で再生粗骨材を用いた場合の再生粗骨材中の原モルタルに含まれる塩分量を 0.05kg/m³と仮定して設定した。

2) 再生骨材コンクリート中の全塩分の規制値である 0.30 kg/m³以下の範囲では，全塩分量とそれに対する測定値の割合の間に明確な関係が認められることから，塩分計による測定値から全塩分量の推定が可能である。

3) 本検討で得られた関係式から，再生粗骨材コンクリートの全塩分量 0.30 kg/m³に相当する測定値は 0.042 kg/m³と算定される。この値に対して，市販の塩分計は十分な感度を有していることから，普通コンクリート同様，受入検査に用いることが可能である。

4) 実測の検査結果を基に塩分計の測定値に対する管理値の検証を行った結果，再生粗骨材コンクリートにおいても，2段階の制限値を設定することで，JIS A 5308 に基づく管理が適用できる。

含有量は，JIS A 5308 9.6 により荷卸し地点で試験を行い，市販の塩分計の測定値で 0.25 kg/m³以下として管理を行った。

謝辞

本検討の実施にあたり，(財)日本建築総合試験所 村上利憲博士に懇切なご指導を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 道正泰弘，菊池雅史，増田 彰，小山明男，三浦隆広：再生細骨材を用いたコンクリートの構造用コンクリートへの適用—原モルタルの性質が再生細骨材および再生コンクリートの品質に及ぼす影響—，日本建築学会構造系論文集 第 502 号，pp.15-22，1997.12
- 2) 道正泰弘，植 友宏，金子雄一，小田部裕一：骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの建築構造物への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1493-1498，2006.7

注記

注 1) 既報²⁾における P2 を示す。

注 2) P2 では，国土交通大臣認定(MCON-0979，2004.9.15)に基づき，コンクリート中の塩化物