

再生骨材のプレキャスト無筋コンクリートへの適用に関する検討

寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○下谷 裕司
吉田 行
田口 史雄

再生骨材は、現在路盤材として利用されているが、近い将来その需要が低下することが懸念されており、コンクリート構造物への適用を含めた利用範囲の拡大が求められている。本研究では、特に再生骨材のプレキャスト無筋コンクリートへの適用性について検討するため、再生骨材を用いたコンクリート縁石の試験施工を行い、その強度・耐久性に関する追跡調査を実施した。この結果、再生骨材を使用した縁石は、併せて施工した普通骨材を使用した縁石と同等の強度・耐久性を保持しており、再生骨材のプレキャスト無筋コンクリートへの適用性の一端が示された。

キーワード：リサイクル、再生骨材、工場製品、試験施工

1. 研究の背景

現在、再生骨材は主に路盤材などの道路用骨材として利用されており、その再資源化率は高い水準を保っている。しかしながら、近い将来、この道路用骨材の需要が低下することが予測されており、現状のままでは再生骨材が余剰状態となることが懸念される。このため、再生骨材のコンクリート構造物への適用を含めた利用範囲の拡大が求められている。

当研究チームでは、これまで積雪寒冷地における再生骨材を使用したコンクリート（以下、「再生骨材コンクリート」と記す）の利用拡大を目指し、特に再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性に重点をおいた研究を行ってきた¹⁾。この研究成果は、平成14年4月に（社）日本コンクリート工学協会北海道支部リサイクル研究委員会より発行された「プレキャスト無筋コンクリート用再生粗骨材の品質規格（案）」²⁾および「再生粗骨材を用いたプレキャスト無筋コンクリート及びその材料と製造に関する規格（案）」²⁾（以下、これらをまとめて「規格案」と記す）に反映されている。

一方、積雪寒冷地における再生骨材のコンクリート構造物への適用事例はほとんどなく、今後利用を促進していくためには、実環境下における再生骨材コンクリートの強度や耐久性に関して検証する必要がある。

そこでリサイクル研究委員会の支援の下、札幌開発建設部管内において、規格案に準拠して作製された再生骨材を使用したコンクリート縁石（以下、「再生縁石」と記す）の試験施工が行われ、当研究チームでは再生縁石

の初期性能（強度・凍結融解抵抗性）試験および施工後1・3・5年目において追跡調査を行ってきた。このうち再生縁石の初期性能及び施工後3年目までの追跡調査の結果については既報の論文³⁾で報告している。

本稿では、追跡調査の最終年である設置後5年目において回収した再生縁石の調査結果をふまえ、再生骨材のプレキャスト無筋コンクリートへの適用性について検討した結果を報告する。

2. 試験施工の概要³⁾

本試験施工は、北海道開発局札幌開発建設部の試験フィールド事業として実施されたものであり、平成14年に再生縁石の作製および試験施工が行われた。施工箇所は、札幌開発建設部 岩見沢道路事務所管内の一般国道12号であり、再生縁石は、歩道境界縁石の一部として適用された。

なお、北海道地区では、冬期に行われる塩化物系凍結防止剤の散布によってコンクリート中に侵入した塩化物イオンが、凍結融解による劣化を促進させる複合劣化現象を引き起こすことが懸念されている。このため、本試験施工においては、凍結防止剤の散布量の違いが、再生縁石の塩化物イオンの蓄積量や劣化性状に及ぼす影響について検証することを目的として、凍結防止剤の散布量が比較的多いとみられる市街地の交差点付近（以下、「区分Ⅰ」と記す）と散布量が比較的小さいとみられる郊外の直線部分（以下、「区分Ⅱ」と記す）の2つの環境区分に作製した縁石を設置した。

なお、設置延長は各区分につき、12mとした。

3. 縁石の作製

(1) 再生粗骨材の製造

規格案では、再生粗骨材の品質として表-1に示す規格値が規定されており、高い耐久性が要求される場合は、使用骨材の吸水率を3.0%以下にすることが定められている。なお、使用骨材の品質を改善するため、再生骨材と普通骨材を混合使用することが認められている。本試験で使用する再生粗骨材は、再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するため、高い耐久性が要求される場合の規格値に準拠して製造した。

再生骨材の製造は、ジョークラッシャーによって製造された路盤材用再生骨材(粒径0~40mm)を原料とし、図-1に示す処理装置によって、湿式の摩砕処理および比重選別を行った。摩砕処理には、骨材粒子を羽根の回転によってはじき飛ばし、原骨材に付着した旧構造物のモルタル分を除去する装置であるアトリッションミルを使用した。比重選別には、脈動する水を通わせることで骨材を比重毎に成層させる装置であるジグを使用した。

本試験施工においては、再生骨材単体で品質規格値を満たすケースと、普通骨材と混合し、品質規格値を満たすケースについて比較検討を行うため、比重選別終了後、ジグ内の低層部の比重が高い再生骨材(以下、再生Aと記す)と、ジグ内の上層部の比較的比重が低い再生骨材(以下、再生Bと記す)の2種類を採集した。

(2) 使用骨材の品質

表-2に使用骨材の品質を示す。粗骨材には、上述のとおり分別採集した2種類の再生粗骨材に加え、比較用

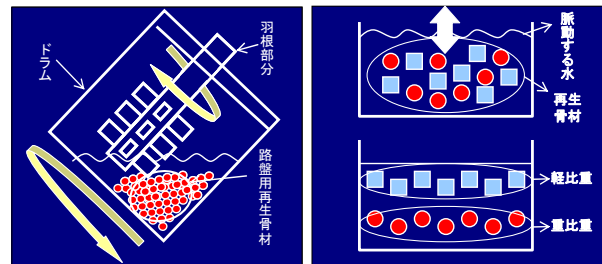
として砂利(普通骨材)を使用した。再生Aの吸水率は表-1に示した吸水率の規格値を満足していたため、再生骨材単体で使用した。再生Bの吸水率は規格値を上回っていたため、砂利と骨材質量比1:1の割合で混合して使用した。なお規格案では、湿式で再生骨材を製造する場合、微粒分量は規格値を満足するため、特に検討を行う必要がないことが示されていることから、ここでは試験を省略した。細骨材には沙流川産の川砂を使用した。

(3) コンクリートの配合および練混ぜ

表-3にコンクリートの配合を示す。規格案においては、凍結融解抵抗性が要求される場合、骨材品質の規定に加えてコンクリートの水セメント比を50%以下、空気量を5.0±2.0%とすることが定められていることから、水セメント比は50%、目標空気量は5.0±1.5%とした。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、目標スラ

表-1 再生粗骨材の品質規格値

項目	規格(案)	
	一般の場合	高い耐久性が要求される場合
吸水率 %	7.0以下	3.0以下
微粒分量 %	2.0以下	2.0以下



左:アトリッションミル 右:ジグ

図-1 処理装置の概要

表-2 使用骨材の品質

品質	骨材	細骨材		粗骨材			
		川砂	再生A	混合骨材			砂利(常呂川産)
				再生B	砂利(日高産)	混合骨材	
表乾密度 (g/cm ³)		2.68	2.66	2.56	2.78	2.65	2.59
絶乾密度 (g/cm ³)		2.63	2.60	2.47	2.74	2.59	2.54
吸水率 (%)		1.96	2.27	3.46	1.42	2.40	2.34

表-3 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 (%)	単位体積質量(kg/m ³)						実測スランプ (cm)	実測空気量 (%)	
		セメント	水	粗骨材						細骨材
				再生A	混合骨材		砂利(常呂川産)			
					再生B	砂利(日高産)				
A-50	50	310	155	1056	—	—	—	804	10.5	5.5
B-50				—	528	528	—		8.5	4.6
C-50				—	—	—	1028		10.0	4.5

ンプは $8 \pm 2.5\text{cm}$ とした。

本試験施工では、粗骨材の種類が縁石の強度および耐久性に及ぼす影響について検討するため、再生Aを使用した A-50、再生Bと砂利を混合使用した B-50、砂利を単体で使用した C-50 の3配合の縁石を作製した（以下、これらをまとめて「縁石」と記す）。

コンクリートの練混ぜは、コンクリート製品工場で実施し、容量 500 リットルの二軸強制練りミキサーを用いて全材料投入後 120 秒間練混ぜを行った。

(4) 再生縁石および供試体の作製

図- 2に縁石の寸法を示す。形状は I 型縁石とし、コンクリートを2層に分けて打ち込み、棒状バイブレータを用いて締固めを行った。

養生は蒸気養生とし、打設 2 時間後 15°C から蒸気養生を開始し、2.5 時間かけて 65°C まで上昇させ、さらに 2 時間保持した後 12 時間かけて 15°C に戻した。

4. 試験計画および試験方法

試験施工後、経年的に現場より回収した縁石について、以下に示す試験を実施し、実環境下における縁石の強度・耐久性の経年変化を評価した。

(1) 外観調査

施工後 1・3・5 年目に現場より回収した縁石について外観調査を行い、劣化・変状の有無を確認した。

(2) 圧縮強度試験

現場施工した縁石の強度の経年変化を調べるため、施工後 1・3・5 年目に現場より回収した縁石から $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コアを採取し、圧縮強度試験を実施した。試験は JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。

(3) 塩化物量測定

現場施工した縁石が凍結防止剤の散布による影響を受けているか確認するため、施工後 1・3・5 年目に現場より回収した縁石から圧縮強度試験と同様の方法でコアを採取し、JCI-SC4「硬化コンクリート中の塩分の分析方法」⁴⁾に準拠した塩化物量測定を実施した。

なお、施工後 1 年目には市街地の交差点部である多い区分 I のみで測定を実施し、縁石のコアを表面から深さ 40mm まで 20mm 間隔に切断し、分析を行った。また、施工後 3・5 年目で回収した縁石については、区分 I・区分 II それぞれに施工した縁石のコアを表面から深さ 60mm まで 20mm 間隔に切断し、分析を行った。

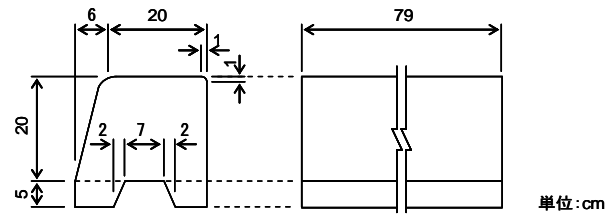


図- 2 縁石の寸法

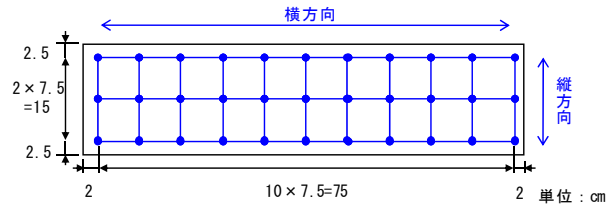


図- 3 超音波伝播速度測定位置（上面・道路側側面共通）

(4) 超音波伝播速度測定

施工後 3 年目までの追跡調査の結果、現場施工した縁石コアの圧縮強度が経年的に低下している傾向があり、また室内凍結融解試験結果からも、縁石の劣化の可能性が示されていたことから、縁石内部の劣化状況の評価が課題となっていた。

このため、5 年目の調査においては、現場より回収した縁石と、現場設置した縁石と同一配合で、凍結融解による劣化を受けない室内（温度 20°C ・湿度 60%）において 5 年間保管した縁石に対し、表面走査法による超音波伝播速度の測定を行い、その結果を比較することで内部の劣化状況の評価した。

図- 3に超音波伝播速度の測定位置を示す。試験面は、現場施工時の露出面である縁石上面および道路側の側面とし、試験面を $7.5 \times 7.5\text{cm}$ のマスに区切り、その交点に 7.5cm 間隔で端子を当て、横方向 30 点、縦方向 22 点で測定を行った。

5. 試験結果

(1) 外観調査

図- 4～図- 6に 5 年経過時点で回収した縁石の外観を示す。既報の 3 年経過時までの外観調査では、1 年経過時点では一部の縁石に、3 年経過時点では、回収した全ての縁石の上面角部に、凍結融解が主要因とみられる劣化が生じていた³⁾が、5 年経過した縁石の全体的な傾向は、3 年経過時点で回収した縁石と同様であり、いずれの縁石にも上面角部に、スケーリングやポップアウトによるとみられる表層部の剥離（図- 4上①②、下①②、図- 5上①②、下①②、図- 6上①②③、下①②③）が生じていた。

3 年目から 5 年目にかけての劣化状況を区分別に比較すると、区分 I に設置した縁石は、いずれも 3 年経

過時と比較して、劣化程度や劣化部位に大きな違いは確認されなかった。一方、区分Ⅱに設置した縁石は、A-50およびB-50では、3年経過時と比較して、劣化程度や劣化部位に大きな違いは確認されなかったものの、C-50で新たに劣化している部位(図-6下②)が確認された。

5年経過した縁石の劣化状況を詳細に見ると、A-50およびB-50においては、区分Ⅰに施工した縁石は上面の隅角部を含む角部全面に劣化(図-4上①②、図-5上①②)が生じていたが、区分Ⅱに施工した縁石は劣化が上面の隅角部のみに留まっており(図-4下①②、図-5下①②)、区分Ⅰの方が劣化範囲が広がった。また、C-50については、いずれの区分に施工した縁石についても、上面の隅角部を含む角部全面に劣化が生じていたが、隅角部を除く角部(図-6上②、下②)の劣化程度を比較すると、区分Ⅰに施工した縁石の方が劣化が広範囲に及んでいた。これら設置区分の違いによる劣化程度の差は、既報³⁾でも述べた様に、凍結防止剤による塩化物イオンの影響を受けているものと考えられ、市街地の交差点部である区分Ⅰの方が劣化程度が大きくなったと考えられる。

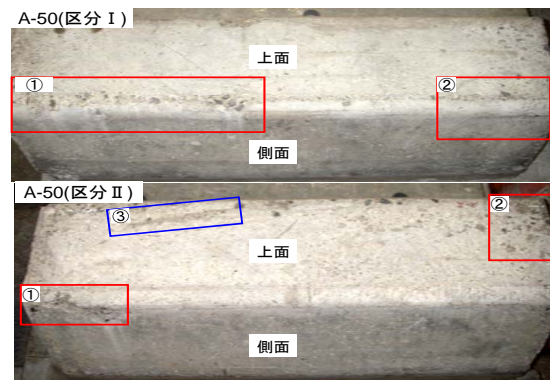
なお、5年経過時点で回収した一部の縁石上面には、角部以外にも表層部の剥離(図-4下③、図-5下③)が見られたが、この剥離は斜め方向に直線的に生じていたことから、除雪機械のブレード等が触れ、物理的に損傷した部分だと考えられる。

(2) 圧縮強度試験

図-7に現場施工した縁石コアの圧縮強度の経年変化を示す。

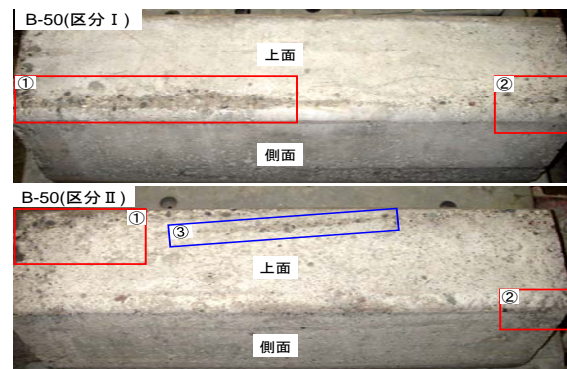
施工後3年目の圧縮強度は、いずれの縁石においても施工後1年目に比べて低下する傾向が見られた。一方、施工後5年目の圧縮強度を見ると、いずれの縁石においても施工後3年目の圧縮強度よりも大きく、さらに1年目の圧縮強度よりも大きかった。現場設置した場合、雨水や融雪水の浸透により、水和反応が進行され、強度が増進することが考えられるが、3年目で強度が低下し、その後強度が増加したことについては説明がつかず、さらに3年目以降大幅に水和反応が進行したとは考えにくい。他方、圧縮強度は試験体の含水状態によっても変化するが、今回の試験においては、いずれの調査年においても、水中浸漬などの乾湿条件の調整を行っていないため、コアの含水状態が調査年毎に異なっていた可能性もあることから、強度が増減した原因について今後詳細に検討する必要がある。

しかしながら、現場施工後の縁石の強度は、いずれの配合においても極端な低下を生じておらず、また、JIS A 5371「プレキャスト無筋コンクリート製品」付属書2(規定)舗装・境界ブロック類で定められている製品納入時の圧縮強度の規制値である24N/mm²を上回



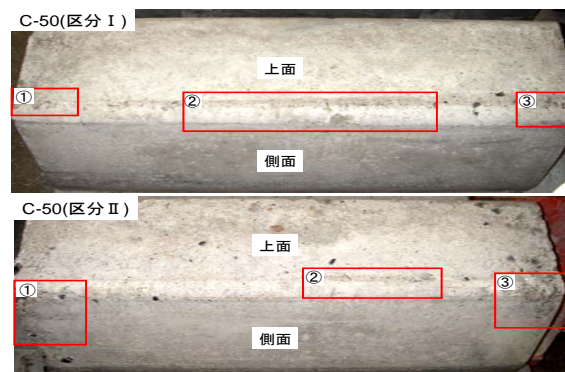
上: 区分Ⅰ 下: 区分Ⅱ

図-4 外観調査結果(A-50)



上: 区分Ⅰ 下: 区分Ⅱ

図-5 外観調査結果(B-50)



上: 区分Ⅰ 下: 区分Ⅱ

図-6 外観調査結果(C-50)

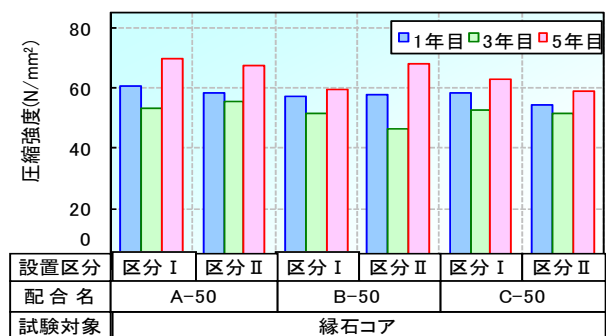


図-7 圧縮強度試験結果

っていることから、現場施工した縁石は5年経過時点においては、実用上問題ない強度を保持していると言

える。

次に、5年目に回収した縁石コアの配合別の圧縮強度を比較すると、区分Ⅰに施工した縁石においては、普通骨材を使用したC-50に比べ、A-50では強度が若干大きくなっていった。またB-50ではC-50に比べ、若干強度が小さくなっているものの、その差はA-50とC-50の強度差と比べても小さかった。また、区分Ⅱに施工した縁石では、C-50に比べ、A-50、B-50のいずれの縁石の強度も若干大きくなっていった。以上の結果より、施工後5年経過時点では、再生縁石であっても普通骨材を使用した縁石とほぼ同等の強度を保持しているものと考えられる。

また、施工後5年目における設置区別の圧縮強度を比較すると、A-50およびC-50においては区分Ⅰに設置した縁石の圧縮強度が、区分Ⅱに設置した縁石に比べ、若干大きくなっていったが、B-50においては、逆に区分Ⅰに設置した縁石の圧縮強度が、区分Ⅱに設置した縁石に比べて小さくなっており、一貫した傾向は見られなかった。

(3) 塩化物量測定

図-8に区分Ⅰに施工した縁石の塩分量の経年変化を、図-9に区分Ⅱに施工した縁石の塩分量の経年変化をそれぞれ示す。

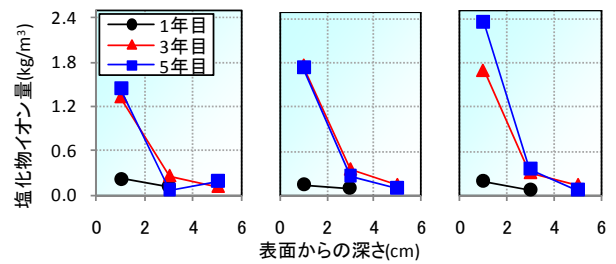
塩化物イオン量の経年変化を見ると、表層部（深さ0~20mm）においては、区分Ⅰに設置したB-50を除き、全体的に塩化物イオン量が増加している傾向が見られた。これは、塩化物系凍結防止剤の散布により、徐々に塩化物イオンが縁石内部に蓄積された結果だと考えられる。また、深さ20~60mm部分の塩化物イオン量をみると、深さ40mm以降は塩分の増加がほとんど見られなかったものの、20~40mm部分では、若干増加している傾向が見られた。しかし、その変化量は、表層部に比べて小さいことから、縁石内部への塩化物イオンの拡散は、施工後5年経過時点においてはあまり進行していないものと考えられる。

次に、5年経過時の環境区別の塩化物イオン量を比較すると、表層部（深さ0~20mm）においては、いずれの配合でも、市街地の交差点部である区分Ⅰの方が塩化物イオン量が若干多くなっていった。これは、凍結防止剤の散布量の違いが影響したものと考えられる。

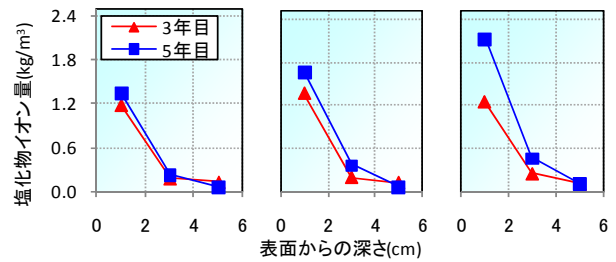
(4) 超音波伝播速度測定

図-10にA-50の超音波伝播速度の測定結果を、図-11にB-50の超音波伝播速度の測定結果を、図-12にC-50の超音波伝播速度の測定結果をそれぞれ示す。

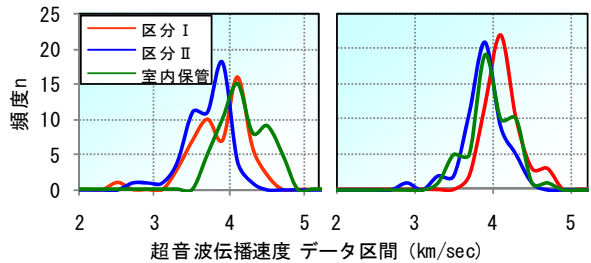
A-50の縁石上面および側面の超音波伝播速度のピーク値は、いずれの設置区分でも3.9~4.1km/secであり、ほぼ同等の値であった。また、超音波伝播速度の分布は、側面においては、いずれの設置区分でもほぼ同じ



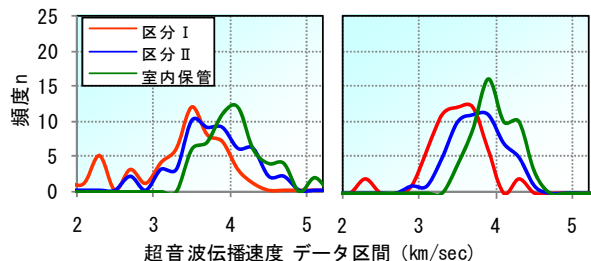
左：A-50 中：B-50 右：C-50
図-8 塩化物量測定結果（区分Ⅰ）



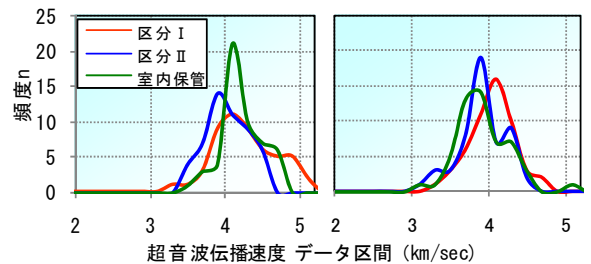
左：A-50 中：B-50 右：C-50
図-9 塩化物量測定結果（区分Ⅱ）



左：上面 右：側面
図-10 超音波伝播速度測定結果（A-50）



左：上面 右：側面
図-11 超音波伝播速度測定結果（B-50）



左：上面 右：側面
図-12 超音波伝播速度測定結果（C-50）

分布だったが、縁石上面においては、区分Ⅱが室内保管に比べ、全体的に遅くなる傾向が見られた。同縁石の表層部の劣化状況を見ると、側面に比べ上面の方が劣化が進行していることから、超音波伝播速度の分

布には、この表層部の劣化状況の違いが影響しているものと考えられる。

次に B-50 の縁石上面における超音波伝播速度のピーク値は、室内保管で 4.1km/sec、現場施工で 3.5km/sec であり、現場施工の超音波伝播速度が室内保管に比べ、若干遅くなっており、超音波伝播速度の分布も、現場施工の方が室内保管に比べ、全体的に遅くなる傾向が見られた。また、縁石側面における超音波伝播速度のピーク値は、いずれの設置区分でも 3.7~3.9km/sec であり、ほぼ同等の値であったが、上面と同様に現場施工の超音波伝播速度の分布が、室内保管に比べ全体的に遅くなる傾向が見られた。

次に C-50 の縁石上面および側面における超音波伝播速度のピーク値は、いずれの設置区分でも、3.9~4.1km/sec であり、ほぼ同等の値であった。また、超音波伝播速度の分布は、側面においてはいずれの設置区分でもほぼ同等の分布を示していたが、縁石上面においては区分Ⅱが室内保管に比べ全体的に遅くなる傾向が見られた。同縁石の表層部の劣化状況をみると、側面に比べ上面の方が劣化が進行していたことから、超音波伝播速度の分布には、この表層部の劣化状況の違いが影響しているものと考えられる。

また、超音波伝播速度と圧縮強度の結果を比較すると、A-50 および C-50 の超音波伝播速度の分布は、いずれの測定面においても、区分Ⅱに比べ区分Ⅰの方が全体的に速くなっており、同縁石の圧縮強度も、区分Ⅱに比べ区分Ⅰの方が大きくなっていった。また、B-50 の超音波伝播速度の分布は、いずれの測定面においても、区分Ⅰに比べ区分Ⅱの方が全体的に速くなっており、同縁石の圧縮強度も、区分Ⅰに比べ区分Ⅱの方が大きくなっていった。これらの結果より、いずれの配合においても、超音波伝播速度と圧縮強度に相関関係があることが確認された。

以上の結果より、A-50 および C-50 の超音波伝播速度は、縁石表層部の劣化状態に影響される傾向が見られたが、全体的に見ると、現場施工した縁石と室内保管した縁石ではほぼ同じピーク値および分布を示しており、また、超音波伝播速度と相関のある圧縮強度の結果をみても劣化の兆候は見られないことから、縁石内部においては、外観調査でみられたような凍結融解による劣化等は進行していないものと考えられる。

一方、B-50 において、現場施工した縁石の超音波伝播速度は、室内保管した縁石に比べ若干遅くなっており、この結果から判断する限りでは縁石内部にも劣化が生じていることが考えられる。しかしながら、超音波伝播速度と相関のある圧縮強度試験の結果では劣化の兆候は見られておらず、超音波伝播速度は、試験体の含水率の影響も受けることから、今後これらに関する詳細な検討を行うとともに、現地に残っている縁石の経過観察を行う必要がある。

6. まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなことがいえる。

- (1) 外観調査の結果、いずれの縁石も、上面の隅角部を含む角部に、凍結融解や凍結融解と塩害の複合作用が主要因とみられる劣化が生じていたが、その程度はいずれの軽微だった。また、配合別の縁石の劣化状況には、大きな差は確認されなかった。
- (2) 現場設置後 5 年目の再生縁石の圧縮強度は、普通骨材を使用した縁石と同等の強度を保持していた。
- (3) 現場設置した縁石の表層部の塩化物イオン量は経年的に増加する傾向があり、また凍結融解による劣化を促進させる傾向が見られた。
- (4) 現場設置した縁石の超音波伝播速度は、室内保管した縁石に比べ、再生骨材と普通骨材を混合使用した配合において低下していたため、今後注意して経過観察を行う必要がある。
- (5) 本試験施工により、再生縁石の現場適用性の一端が示された。

7. あとがき

施工後 5 年目までの追跡調査の結果、再生縁石は、普通骨材を使用した縁石とほぼ同等の強度を保持していた。また、いずれの縁石にも表層部に凍結融解や複合劣化が主要因とみられる部分的な剥離が生じているものの、使用上問題ない強度を保持していた。

以上の結果より、再生骨材コンクリートであっても、使用骨材の吸水率の低減や、水セメント比・空気量等の適切な設定により、プレキャスト無筋コンクリートへ適用できる可能性があることが明らかとなった。

今後は試験施工した再生縁石の経過観察を行うとともに、再生骨材の縁石以外のプレキャスト無筋コンクリートへの適用について検討を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、佐々木慎一、田口史雄、嶋田久俊：再生粗骨材を用いたコンクリートの諸性質、第 45 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集、pp.121~126、2001
- 2) (社)日本コンクリート工学協会北海道支部：リサイクル研究委員会報告書、pp.25~34、2002
- 3) 例えば、下谷裕司、吉田行、田口史雄：再生骨材を使用したプレキャスト無筋コンクリートの試験施工、寒地土木研究所月報 No.649、pp.52~60、2007
- 4) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)、p.17-37、1991