

論文 粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートの物性評価

松尾 真心*1・武田 字浦*2・山内 和宏*3・船尾 孝好*4

要旨: 本研究では、残コン・戻りコンから製造された粒状化再生骨材、およびこの粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートの物性を実験的に評価した。試験内容は、粒状化再生骨材の物性試験、ポーラスコンクリートの物性試験および pH・六価クロム溶出量試験とした。その結果、粒状化再生骨材では付着モルタルの影響により吸水率が大きくなり、粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートでは pH・六価クロム溶出量が大きくなることが分かった。また、ポーラスコンクリートの空隙率と透水係数および圧縮強度には相関関係があり、骨材の粒径や空隙率の割合が影響を及ぼしていることが分かった。

キーワード: 粒状化再生骨材, ポーラスコンクリート, pH および六価クロム溶出量試験

1. はじめに

レディーミクストコンクリート工場では、出荷量の約 1 割弱程度の戻りコンが発生する。戻りコンのリサイクル率は低く、その多くがレディーミクストコンクリート工場では骨材やセメント分に分離され最終処分場に捨てられる。JISA5308 では戻りコン・残コン由来のスラッジ水や回収骨材の利用が認められているものの、需要家の同意をなかなか得られず、あまり普及は進んでいない。

そこで、地球環境保全や、工場側の費用負担軽減という観点から、残コン・戻りコンの再資源化が提案されており、その解決策として石粉や吸水材などの粒状化材料を使用して、戻りコンからコンクリート用の粗骨材（以降、粒状化再生骨材とする）を製造する技術が導入されている²⁾。粒状化再生骨材は再生骨材と比べ、細骨材の発生が少ないという利点がある。また、モルタルを多く含む粒状化再生骨材は、二酸化炭素を取り込み固定することが期待される。

本研究では、この粒状化再生骨材をポーラスコンクリート用骨材として利用することを提案する。ポーラスコンクリートは、水質や生物共生、生態系の保全などに優れたコンクリートであるため、自然環境保全を目的とした使用がなされている³⁾。そこで、残コン・戻りコンから粗骨材を製造する技術を利用し、ポーラスコンクリートの材料として粒状化再生骨材を使用することにより、生コン業界にとって残コン・戻りコンの問題が解消され、また、粒状化再生骨材を使用したポーラスコンクリートによる生物共生を目的とした自然環境保全が期待できる。

このような背景から、著者らは、粒状化再生骨材および粒状化再生骨材を使用したポーラスコンクリートの物理的性質を評価し、将来的に水質や漁礁における生態系

の保全といった自然環境保全を目的として粒状化再生骨材を使用したポーラスコンクリートの使用可能性について実験的検討を行った。

2. 粒状化再生骨材の物性試験

2.1 実験概要

本研究で用いた粒状化再生骨材は、アジテータ車中の生コンに粒状化材料を投入し、粒状化の状態を確認しながら攪拌し排出したものを 24 時間気中養生後、解砕して作製した。その後、粒状化再生骨材の物性を把握するために、骨材の物理的特性試験を行った。骨材試験の結果から、粒状化再生骨材を使用したポーラスコンクリートの配合を決定し、供試体を作製した。なお、ポーラスコンクリート製造時には、粒状化後 5mm ふるいに留まるものを分級したもの（以降、粒状化再生骨材）と、粒状化後分級せずに 5mm 未満の粒子を含むもの（以降、無分級粒状化再生骨材）を使用した。

2.2 骨材試験の方法

JISA 1102, JISA1104, JISA 1110 に準じて、ふるい分け試験、単位容積質量および実積率試験、密度試験および吸水率試験を行った。また、無分級粒状化再生骨材での密度試験では水中質量測定用の金網あごを微粒分が通過しないことを確認して、粗骨材に規定されている JIS 方法で密度試験を実施した。

3. 粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートの物性試験

3.1 実験の流れ

ポーラスコンクリートの物性試験として空隙率試験、透水試験、圧縮試験、pH・六価クロム溶出量試験を行い、

*1 明石工業高等専門学校建築・都市システム工学専攻（学生会員）

*2 明石工業高等専門学校都市システム工学科（正会員）

*3 灰孝小野田レミコン(株) 代表取締役（正会員）

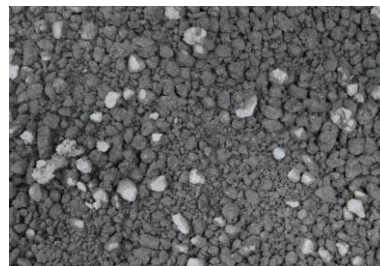
*4 大阪広域生コンクリート協同組合 技術部（正会員）

表-1 使用材料

使用材料	名称	物性
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(N)	密度: 3.16g/cm ³
	高炉セメントB種(BB)	密度: 3.04g/cm ³
粗骨材(G)	粒状化再生骨材(セルロース系)	骨材試験により求める
	粒状化再生骨材(高分子系)	
	無分級粒状化再生骨材(セルロース系)	
	5-13mm砕石	表乾密度: 2.67g/cm ³ , 絶乾密度: 2.65g/cm ³ 実績率: 58.9%, 粗粒率: 6.28
13-20mm砕石	表乾密度: 2.70g/cm ³ , 絶乾密度: 2.68g/cm ³ 実績率: 56.0%, 粗粒率: 7.04	
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物



(a) 粒状化骨材(セルロース系)



(b) 粒状化再生骨材(高分子系)

写真-1 使用骨材

表-2 配合表

粗骨材名称	セメント種類	水セメント比(W/C)	ペースト粗骨材比(P/G)	設計空隙率(%)	高性能AE減水剤(%)	単用量(kg/m ³)					
						N	W	G	BB	W	G
粒状化再生骨材(セルロース系)	N BB	0.25	0.25	30	1.0(N) 0.7(BB)	260	65	1299	259	65	1293
粒状化再生骨材(高分子系)						252	63	1260	251	63	1254
無分級粒状化再生骨材(セルロース系)						266	66	1329	265	66	1323
5-13mm砕石						287	72	1435	286	71	1428
13-20mm砕石						289	72	1447	288	72	1440

試験結果から粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートおよび粒状化骨材と細骨材を含んだポーラスコンクリートの物性の考察・評価を行った。

3.2 ポーラスコンクリートの練混ぜ

(1) 使用材料

使用材料を表-1に示す。ポーラスコンクリートの物性の変化を比較するために、普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメントB種(BB)の2種類のセメントを使用した(以降、NおよびBBとする)。また、骨材には、セルロース系、高分子系の粒状化材料を使用した粒状化再生骨材に加え、5-13mm砕石(6号砕石)と13-20mm砕石(5号砕石)を使用した(写真-1)。同様に物性を比較するために、粒状化再生骨材製造時に発生した細骨材を使用した。この時、細骨材量の調整を行わず製造された粒状化再生骨材と細骨材を混合させた状態で使用した。ペーストの流動性を調整するために、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)を用いた。なお、高性能

AE減水剤使用量は、ペーストフロー値が180±10となるように、予め試験練りを実施して決定した。

(2) 配合条件

ポーラスコンクリートの配合条件および配合を表-2に示す。配合条件は、水セメント比25%、ペースト粗骨材比25%、設計空隙率30%とした。

(3) 練混ぜ方法・供試体条件

練混ぜには、水平二軸強制練りミキサー(容量60L)を使用した。はじめにセメント、粗骨材をミキサーに入れ30秒間低速から高速による練混ぜを行い、その後、水と高性能AE減水剤を加え、高速練混ぜを60秒行った。ポーラスコンクリートの物性試験に用いる供試体はφ100mm×200mmの円柱供試体とし、突き棒で各層締めを30回行う2層詰めとした。供試体は24時間気中養生したのち脱型を行い、水中養生(水温20℃)を行った。供試体の試験材齢は28, 91日の2水準とし、供試体本数は各材5本ずつとした。

3.3 空隙率試験

本試験では、容積法により空隙率を求めた。容積法は、水中での供試体質量と 24 時間以上自然放置した供試体の気中質量との差から空隙量を求める方法である。実験手順を次に示す

- 1) 供試体の寸法(直径, 高さ)を, ノギスを用いて供試体の直径と高さをそれぞれ 2 か所測定しその平均を寸法として容積 V_1 を測定する。
- 2) 供試体を水中で飽和し, 水中質量 W_1 を測定する。
- 3) 水中から供試体を取り出し, 供試体を 24 時間以上自然放置させ, 気中質量 W_2 を測定する。
- 4) 式(1)により空隙率を算出する。

$$A_t(\%) = \left(1 - \frac{W_2(g) - W_1(g)}{\rho_w(g/cm^3) \times V_1(cm^3)}\right) \times 100 \quad (1)$$

A_t : ポーラスコンクリートの空隙率(%)

ρ_w : 水の密度(g/cm^3)

3.4 透水試験

3.2 ポーラスコンクリートの練混ぜによって作製した供試体を用いて, 供試体に水頭差が 4cm となるよう一定の水量を流し込み, コンクリート内部を流れる水量からポーラスコンクリートの透水係数を求める。また図-1に透水試験の概略図を示す。実験手順を次に示す。

- 1) 直径 0.1m, 高さ 0.2m の円柱供試体にゴムシートを装着し, 測定時の側面からの水漏れを防ぐ。
- 2) ゴムシートを装着した供試体に透水円筒を, 透水円筒上部に透水カラーを取り付ける。
- 3) 越流水槽に水を満たし, 水槽に供試体を入れ十分供試体を飽和させる。
- 4) 水頭差が常に一定となるように給水側の水位を一定に保つ。
- 5) 越流口からの越流量を 5 秒間メスシリンダーにて測定する。測定回数は 3 回以上とし, 計測値の誤差が 10% 以内に収まるように設定する。
- 6) 式(2)により透水係数を算出する。

$$K_T = \frac{H(cm)}{h(cm)} \times \frac{Q(cm^3)}{A(cm^2) \times (t_2 - t_1)(s)} \quad (2)$$

K_T : 透水係数

H : 供試体の高さ

Q : 時刻 t_1 から t_2 までの越流量(cm^3)

h : 水頭差(cm)

A : 透水円筒の断面積(cm^2)

$t_2 - t_1$: 測定時間(s)

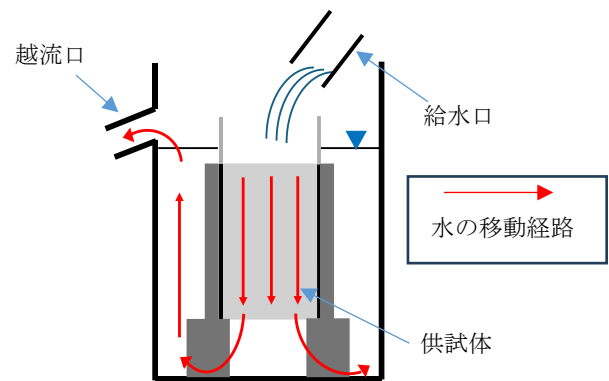


図-1 透水試験装置 概略

3.5 圧縮試験

供試体の載荷面と底面にキャッピングを行う。JIS A 1108 に則り, 圧縮試験を行い得られた最大荷重から圧縮強度を算出する。

3.6 pH および六価クロム溶出量試験

タンクリーチング試験により作製した試験溶液を用いて, pH および六価クロム溶出量を測定した。タンクリーチング試験の手順を以下に示す。

- 1) 容器に圧縮試験により破砕した供試体と蒸留水を 1:10 の比率で入れる。今回は, 供試体約 0.2kg, 蒸留水約 2kg とした。各供試体につき, 3 つずつ試験溶液を作製する。
- 2) 容器を密封し 20°C の養生室に 28 日間静置する。

以上の手順で作製した試験溶液を pH および六価クロム量測定試験の試料とし, pH 測定器および六価クロム量測定器を用いて pH, 六価クロム量をそれぞれ測定する

4. 実験結果および考察

4.1 骨材試験結果

骨材試験の結果を表-3 に示す。表-3 より, 粒状化再生骨材は 5-13mm 砕石, 13-20mm 砕石に比べ吸水率がかなり大きいことが分かる。これは, 粒状化再生骨材は, 骨材まわりにモルタルなどのセメント水和物が付着しているからであると考えられる。吸水率の増加にともない, 粒状化再生骨材の密度は小さくなることが確認できた。また, 吸水率が増加するとコンクリートにおける乾燥収縮ひずみの増加問題などが挙げられるが, 平均吸水率が高い再生骨材等では逆に乾燥収縮ひずみが傾向にあるとされている⁴⁾。よって, 本研究で使用した粒状化再生骨材においても吸水率が大きいことから, 将来的に乾燥収縮抑制に対して利用できる可能性があると言える。粗粒率や実積率, 最大骨材寸法から, 粒状化再生骨材の粒度分布は 13-20mm 砕石に近いことが分かる。また, 高分子系の粒状化材料を使用した場合には, セルロース系を使用した場合に比べて吸水率が大きくなることが分かった。

表-3 骨材試験結果

	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率	粗粒率 (%)	最大骨材寸法 (mm)
粒状化再生骨材 (セルローズ系)	2.35	2.18	7.78	1.27	58.2	7.45	25
粒状化再生骨材 (高分子系)	2.26	2.06	9.58	1.26	61.2	7.56	25
無分級粒状化再生骨材	2.42	2.27	6.61	1.42	62.3	7.56	25
5-13mm 碎石	2.67	2.65	0.74	1.56	58.9	6.28	13
13-20mm 碎石	2.70	2.68	0.61	1.50	56.0	7.04	20

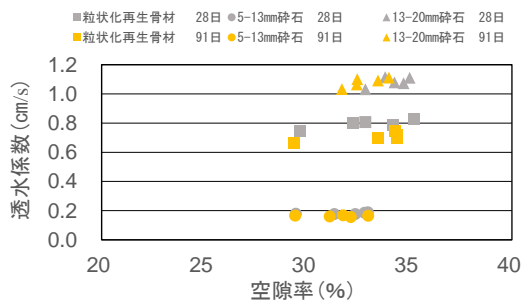


図-2 空隙率と透水係数の関係(N)

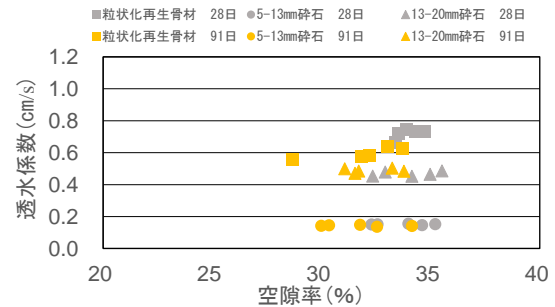


図-3 空隙率と透水係数の関係(BB)

3.2 空隙率および透水係数

ポーラスコンクリートの空隙率，透水係数の試験結果およびその相関関係について考察する。図-2，図-3，図-4，図-5 から，各骨材において材齢，セメント種類にかかわらず設計空隙率の30%を概ね満たすことができた。このことから，材齢およびセメント種類によって空隙率の変化はほとんどないと言える。しかし，図-4，図-5 による無分級粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートでは，空隙率がばらつく結果となった。本研究では，細骨材である微粒分の使用量の調整を行わず粒状化再生骨材と混合して使用したため，供試体によって含まれる微粒分の割合のばらつきが生じたことが原因であると考えられる。

透水係数においては一般的にポーラスコンクリートでは空隙率の増加に伴い透水係数も増加するといった傾向がある。図-2，図-3 では粒状化再生骨材，13-20mm 碎石がその傾向を満たしているが図-2，図-3 での5-13mm 碎石および図-4，図-5 での粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートではその傾向が見られなかった。これには，独立空隙率と連続空隙率の割合が関係していると考えられる。独立空隙率は，空隙がそれぞれ独立しており排水に時間を要すが，連続空隙率は空隙が連続しており排水が容易となる。各骨材で全空隙率が同様であっても，粒状化再生骨材および碎石に含まれる細骨材微粒分によって，独立空隙が多くなってしまったため，透水係数が小さくなってしまったと考えられる。セメント別でみると，各骨材においてBBを使用した方が透水係数が小さくなっていることが分かる。高炉セメントは水和特性によって緻密で強固な硬体組織を形成するため，BB使用したポーラスコンクリートでは水密性が大

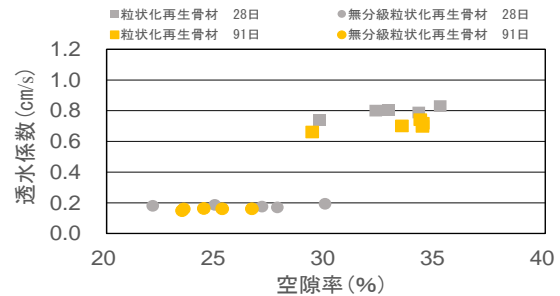


図-4 空隙率と透水係数の関係(細骨材の有無, N)

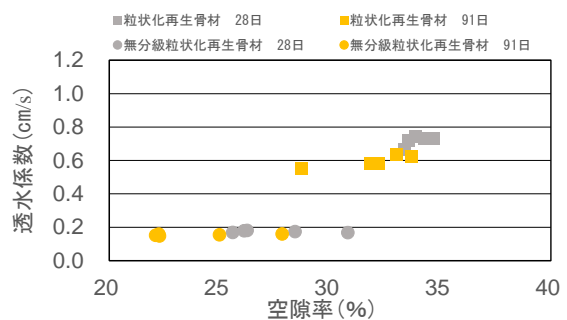


図-5 空隙率と透水係数の関係(細骨材の有無, BB)

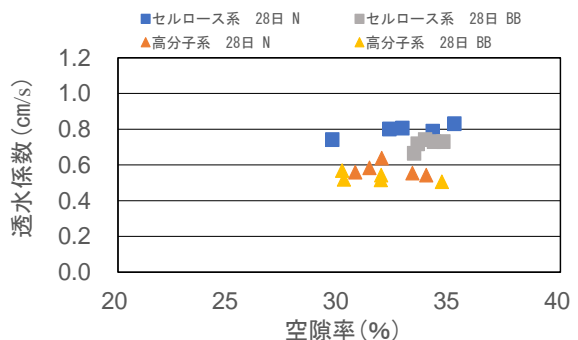


図-6 空隙率と透水係数の関係(粒状化材料比較)

きくなり、透水係数が小さくなると考えられる。

図-6 から、セルロース系と高分子系の比較では高分子系の粒状化材料を使用した方が透水係数が大きくなることが分かった。

4.3 空隙率および圧縮試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果および空隙率と圧縮強度との関係について考察する。空隙率と圧縮強度の関係として、一般的に空隙率が大きくなると圧縮強度は小さくなる。図-7, 図-8 より各骨材においてその傾向が見られた。図-7, 図-8, 図-9, 図-10 より、骨材では無分級再生骨材および 5-13mm 碎石において大きな強度発現が得られた。ポーラスコンクリートの強度発現は、ペーストによる骨材間の付着力および粒径の小さな骨材がポーラスコンクリートの空隙を充填することが影響していると考えられる。

次に、材齢 28 日と 91 日の圧縮強度を比較すると、材齢の進行に伴い強度が増加していることが分かる。そのため、粒状化再生骨材においても材齢による長期強度向上が期待できる。セメント種類による比較では、(BB)を使用した場合には材齢 28 日において (N)よりも強度が発現しないことが分かる。粒状化再生骨材では、特にその特徴が顕著である。しかし、材齢 91 日では(BB)の長所である長期強度の向上より各骨材において強度向上していることが分かった。

図-9, 図-10 から細骨材の有無では、無分級粒状化再生骨材によるポーラスコンクリートの方が強度が向上することが分かった。図-11 より、セルロース系と高分子系の粒状化材料による比較では、セルロース系に比べ、高分子系の粒状化材料を使用した方が強度が確保できることが分かった。セルロース系は植物由来の天然繊維から構成されており、それに対し、高分子系はアクリル由来の化学繊維から成っている。化学繊維は天然繊維よりも耐久性や強度が高いといった特徴を持っており、その性質により高分子系の粒状化材料を使用した方が圧縮強度が大きくなったと考えられる。

4.4 pH および六価クロム溶出量試験結果

4.4.1 pH 試験結果

表-4 に pH 試験の結果を示す。表-4 より材齢 28 日、91 日ではセメント (N), (BB) とともに粒状化再生骨材が最も大きな pH 値であることが分かった。これは骨材による影響が考えられ、粒状化再生骨材は戻りコンから製造されたものであるため骨材まわりにはモルタルが付着している。この付着モルタルにより、碎石に比べ pH 値が大きくなったといえる。

セメント (N) と (BB) を比較すると、各骨材で (N) よりも (BB) の方が pH 値が小さくなっている。これは、(BB) に含まれるアルカリ量が (N) に比べて少ないことから

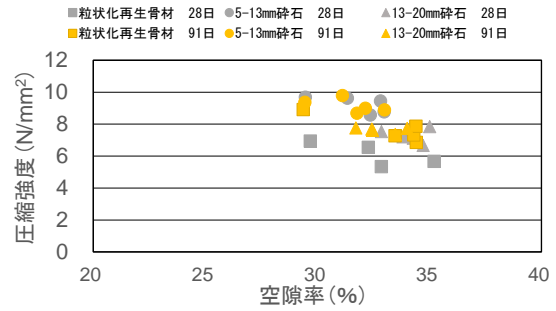


図-7 空隙率と圧縮強度の関係 (N)

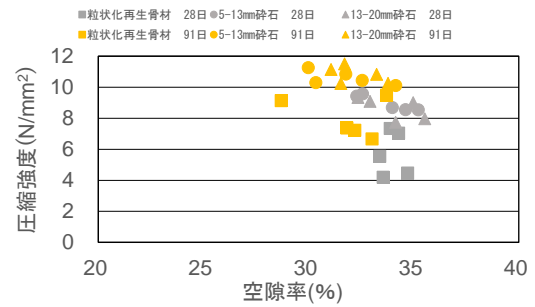


図-8 空隙率と圧縮強度の関係 (BB)

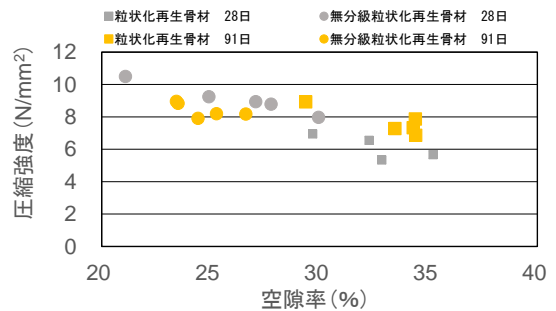


図-9 空隙率と圧縮強度の関係(細骨材の有無, N)

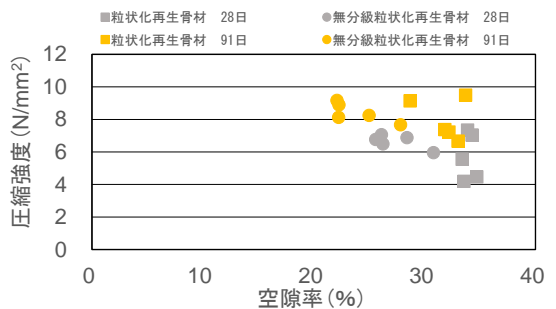


図-10 空隙率と圧縮強度の関係(細骨材の有無, BB)

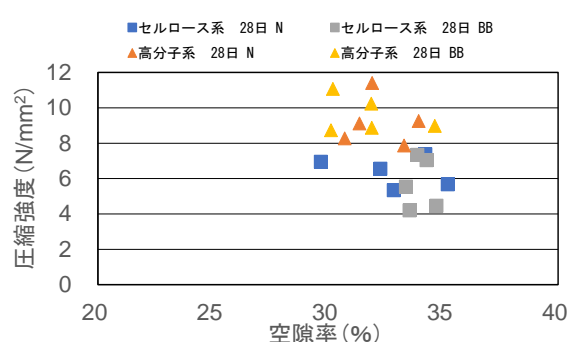


図-11 空隙率と圧縮強度の関係(粒状化材料比較)

表-4 pH 測定結果

	材齢28日		材齢91日	
	N	BB	N	BB
粒状化再生骨材 (セルローズ系)	11.2	10.9	11.0	10.9
5-13mm砕石	10.9	10.7	10.9	10.6
13-20mm砕石	10.6	10.4	10.8	10.6

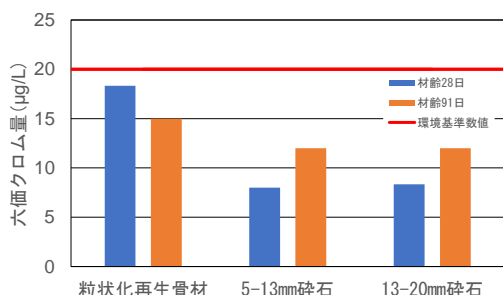


図-12 六価クロム溶出量試験結果(N)

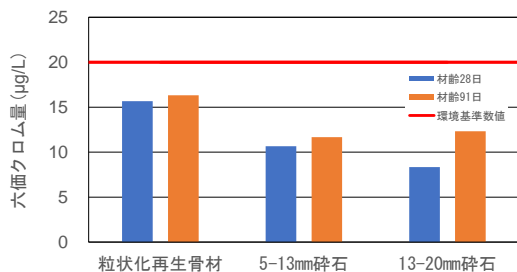


図-13 六価クロム溶出量試験結果(BB)

(BB)の方が pH 値が小さくなったと考えられる。また、材齢による pH 値を比較するとセメント(N)，(BB)ともに大きな差がないことが分かった。

4.4.2 六価クロム量測定試験

図-12，図-13 に六価クロム量測定試験の結果を示す。

図-12，図-13 よりセメント(N)，(BB)では材齢28日，91日ともに粒状化再生骨材の六価クロム量が最も大きくなることが分かった。これは3.4.1のpH試験の結果と同様となった。六価クロムはセメントから溶出される物質であり，5-13mm 砕石，13-20mm 砕石では，使用したセメントのみに六価クロム量が左右されるが，それに加え粒状化再生骨材には残コン由来の付着モルタルもあるため，六価クロム量が多く溶出したと考えられる。

材齢による比較では，材齢91日において溶出される六価クロム量が増加することが分かった。また，将来的に漁礁や沿岸海域等の公共用水域の自然環境保護を目的として粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートの利用を想定した場合，公共用水域での六価クロムの溶出量の環境基準数値は20µg/Lとされており⁵⁾，この基準を満たしていることから，公共用水域で利用できる可能性がある。

5. まとめ

セルローズ系，高分子系および無分級な粒状化再生骨

材に加え，5-13mm 砕石，13-20mm 砕石を使用したポーラスコンクリートの物性を試験を通して，比較することで評価を行った。また，粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートが将来，環境保全を目的として使用できるかの使用可能性について実験的検討を行った。以上のことを踏まえ，以下の(1)に各実験で得られた粒状化再生骨材についての知見を，(2)～(5)に粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートに関する知見を示す。

- (1) 粒状化再生骨材では付着モルタルの影響により吸水率が大きくなる。
- (2) 圧縮強度ではセメント(BB)を用いると長期強度が大きくなる性質から各骨材で材齢28日に比べ材齢91日で圧縮強度が大きくなった。
- (3) 空隙率と透水係数の関係性において一般的に空隙率が増加するにつれ透水係数が小さくなるが無分級粒状化再生骨材，5-13mm 砕石では空隙率の変化に伴い透水係数の変化が見られなかった。
- (4) 空隙率と圧縮強度の関係性において一般的に空隙率が増加するにつれ圧縮強度は低下し，各骨材でその相関関係が得られた。
- (5) タンクリーチング試験において，付着モルタルの影響により粒状化再生骨材では2つの砕石に比べpH値および六価クロム溶出量が大きくなることが得られた。しかし，溶出量が公共用水域での環境基準値を超えなかったことから，漁礁や沿岸海域等の公共用水域の自然環境保護を目的として粒状化再生骨材を用いたポーラスコンクリートの利用が今後できる可能性がある。

参考文献

- 1)大滝朋宏：残コン・戻りコン問題を考える，コンクリート工学，公益社団法人日本コンクリート工学会，58巻，8号，p.620，1995
- 2)奥山晃平：残コン・戻りコン100%の骨材を利用した舗装、生コンの粒状化で脱炭素狙う，日経 XTECH，<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02011/060600017/> (2024年3月10日閲覧)
- 3)岡本享久ら：ポーラスコンクリート，コンクリート工学，公益社団法人日本コンクリート工学会，54巻，5号，pp.542-547，2016
- 4)井上裕貴ら：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，公益社団法人日本コンクリート工学会，Vol.33，No.1，pp.473-478，2011
- 5)環境省：水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準の見直しについて，<https://www.env.go.jp/press/110052.html> (2023年2月7日閲覧)