

特集 21世紀の新技术を展望する



コンクリートのリサイクル技術

北海道立北方建築総合研究所 生産技術部
松村 宇

1. はじめに

コンクリートは社会資本を構成する基本材料の一つとして、現在に至るまで地域を問わず広く使用されています。普及した理由の一つとして耐久性に優れている点が挙げられますが、どのような土木・建築構造物であっても寿命はあり、いずれは解体され廃棄されます。

現在、コンクリートのリサイクル率は9割を超えています*1。中間処理施設に持ち込まれたコンクリート廃材は夾雑物を取り除き、破碎、分級の過程を経て再生砕石(再生クラッシュラン)となります。これらは再度コンクリート用の原材料として使用されることはなく、路盤材などに再利用されています。

2. 今後のコンクリート廃材発生量

これから北海道のコンクリート廃材発生量はどのように推移していくのか、建築に係るコンクリート廃材発生量について将来予測を行いました。図-1に予測手法のフロー図を示します。

材料使用原単位(建築物の単位床面積当りの材料使用量)は道内建築物を対象とした調査の結果に基づき木造、RC造及び鉄骨造の各々について算定しました。その他の構造(CB造、SRC造等)はRC造に含めています。建築物の着工面積は、着工統計資料から構造種別毎に把握しました。

建築物の寿命推計は建築時の竣工年次別の残存床面積から建設後の経過年数と滅失確率の関係を捉え、これを最も良く説明する確率分布関数(ワイブル分布)を用いて、建築物の構造種別及び建物寿命

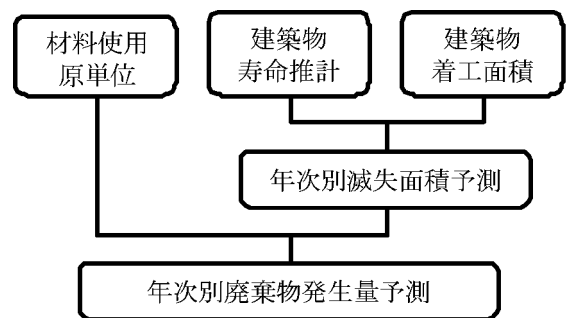


図-1 コンクリート廃材発生量予測フロー

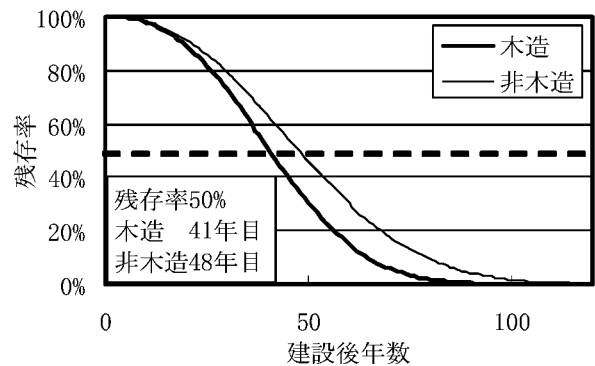


図-2 建築物の建設後年数と残存率

毎に滅失確率を推計し、また、建築物の寿命は図-2の滅失確率により決定される建築物の残存率が50%となるまでの年数としました。

これら着工統計資料と建築物の寿命推計より建築物の滅失面積を予測し、更にこの滅失面積と材料使用原単位を乗じることにより廃棄物発生量を予測する事ができます。

図-3に全道でのコンクリート廃材発生量予測結果を示します。これによればコンクリート廃材発生量は2050年頃にピークを迎え、その発生量は現在の

約2.2倍となることが示されています。

都市別のコンクリート廃材発生量予測結果（2001年から2050年までの発生量累計）を図-4に示します。建築に係るコンクリート廃材は都市規模によって増減し、道内では特に札幌市での発生量が多いことがわかります。

今後、路盤材としての需要増加が期待できないことやコンクリート廃材が都市部で多く発生することを勘案すると、コンクリート廃材を再度コンクリート用骨材として使用することが必要と考えられます。

3. コンクリート用再生骨材の現状と問題

コンクリートを破砕し、再度コンクリート用骨材とする試みは以前より行われてきました。破砕方法は再生砕石と同様、ジョークラッシャーなどによるものですが、破砕処理回数を増やすことでコンクリート用骨材としての品質向上が図られます。図-5に示すとおり再生粗骨材の吸水率はJIS A 5021（コンクリート用再生骨材H）の規定（3.0%以下）を満たすものもありますが、その多くは約4.0～

8.0%の間にあります。また、図-6に示すとおり再生細骨材の吸水率は再生粗骨材より広範囲に及び、JIS A 5021の規定を満たすものはありません。再生粗骨材の吸水率は処理回数3回で約3%程度となります（図-7）。しかし、図-8の収率（コンクリート廃材に対する再生骨材の割合）と処理回数の関係によれば処理回数3回での収率は約30%となり残りは硬化セメント微粉と骨材片が混在した残渣となることが報告されています*2。

このように、コンクリート廃材を単純に破砕した

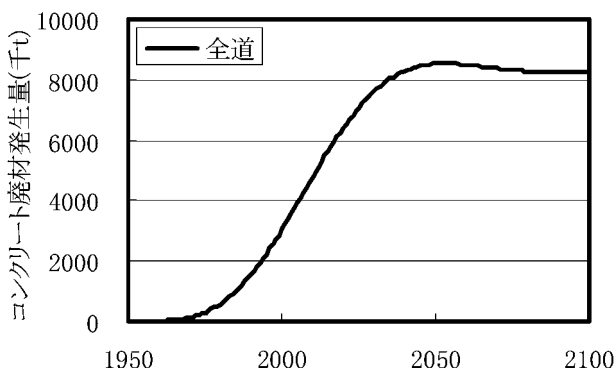


図-3 コンクリート廃材発生量予測（全道）

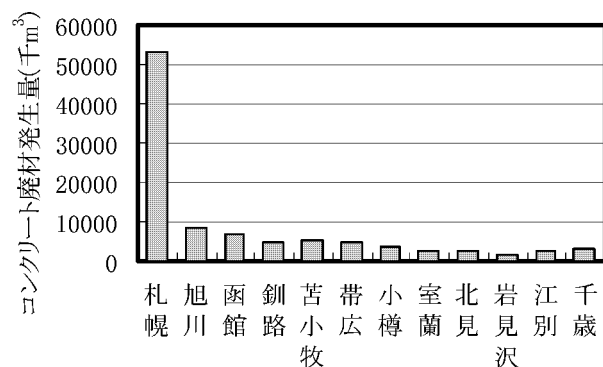


図-4 都市別コンクリート廃材発生量予測

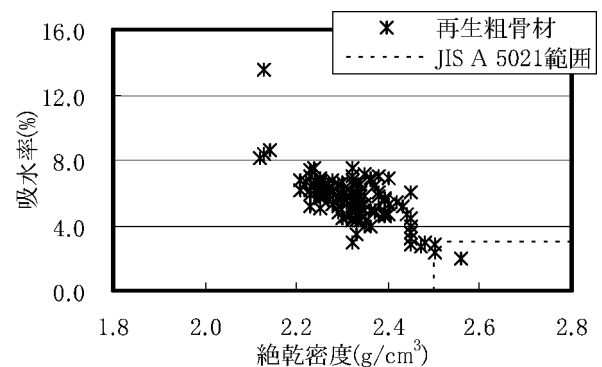


図-5 絶乾密度と吸水率の関係（再生粗骨材）

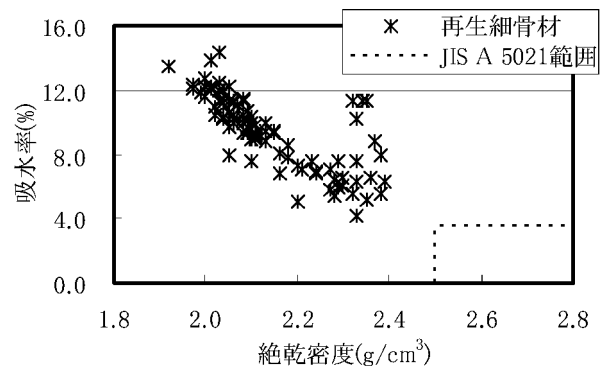


図-6 絶乾密度と吸水率の関係（再生細骨材）

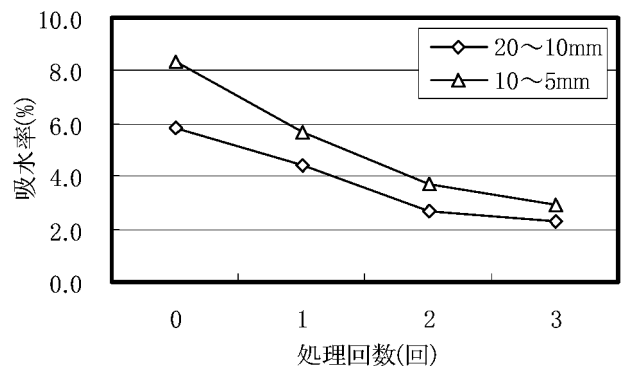


図-7 処理回数と吸水率の関係

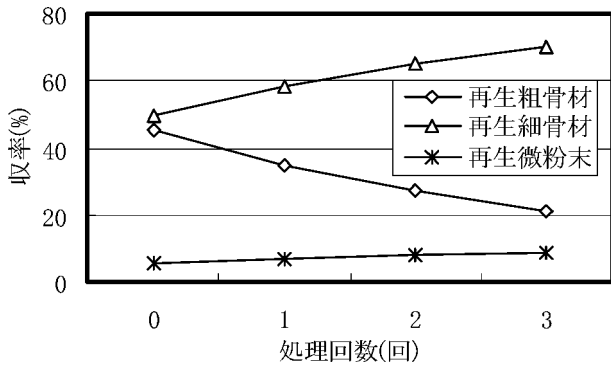


図-8 処理回数と収率の関係

だけの再生骨材は硬化セメント分の付着により吸水率が高く、また、品質を向上させるために破碎回数を増加させると再生粗骨材の品質は向上しますが、歩留まりが低下し骨材破片と硬化セメント分の混在した微粉末が多量に発生する点が問題となっています。

4. 高品質再生骨材製造技術

このことから、コンクリート塊から原骨材を壊すことなく取り出す技術が検討試行され、現場での施工が行われている例があります。以下にいくつかの例を示します。

(1) 加熱すりもみ方式

コンクリート廃材を300℃まで加熱することで付着する硬化セメント部分を脆弱化させ、更に骨材にすりもみ作用を与えることで原骨材に付着する硬化セメント分を剝離し、原骨材を取り出します(写真-1*)。再生粗骨材、再生細骨材共にJIS範囲を満たすものが得られます。

(2) 機械すりもみ方式

偏心回転する内筒部と外筒部の間で生じるすりもみ作用により骨材表面に付着するモルタル分を引き剥がす方法です(写真-2)。JISを満たす再生粗骨材を製造可能とされています。

(3) スクリュー磨砕方式

中間部と排出部にコーンを装備する一軸スクリーワーを持ち、主に骨材同士の摩擦により骨材表面に付着するモルタルを除去します(写真-3)。処理回数を重ねることでJISを満たすことができるとされています。

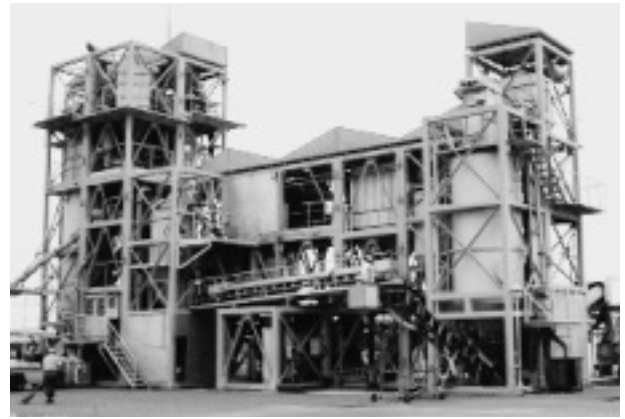


写真-1 加熱すりもみ法製造設備*



写真-2 機械すりもみ法製造設備
(竹中工務店HPより)



写真-3 スクリュー磨砕方式製造設備
(太平洋セメントパンフレットより)

以上の方式にて製造された再生粗骨材はJIS A 5021に規定される密度及び吸水率を満たすことが可能ですが、再生細骨材は加熱すりもみ法のみが再生粗骨材と同様に密度及び吸水率を満たすことが可能です。

5. コンクリート廃材の全量リサイクル技術

平成14年度から平成16年度の3年間、北海道立北方建築総合研究所、アグロ技術(株)、日鐵セメント

(株)、九州大学の産官学共同研究により「コンクリート廃材の全量リサイクル技術に関する研究」を行いました。本研究では再生骨材の製造だけではなく、副産する硬化セメント微粉（再生微粉末）にも着目し、①コンクリート廃材から高品質再生骨材と再生微粉末を取り出す湿式選別法の開発、②再生微粉末のセメント原料化の検討、③製造された再生骨材を用いた再生コンクリートの検討、を行いそれらを組み合わせることでコンクリート廃材のゼロエミッション化を図ることを目的に検討を行いました（図-9）。

(1) 湿式選別法による再生骨材及び再生微粉末の製造

湿式選別法は高品質な再生粗骨材及び再生細骨材と同時にセメント成分に富んだ再生微粉末を取り出すことができます。本方式の特徴は比重による分級を行い、一定の品質に満たない骨材は再度処理を行うリターンプロセスを持つことで一定品質以上の再生骨材を製造します。また、比重による分級は解体の際に混入する木片やプラスチックなどの夾雑物の除去にも有効です。

湿式選別法はアトリションミル、ジグ、ハイドロサイクロンの3種類の機器からなり、まず、アトリションミルにより原骨材と硬化セメント分を剥離させます。しかし、そのままの状態では原骨材と硬化セメント分は混在した状態にあるため、ジグとハイドロサイクロンを用いて分離します。これらにより、硬化セメント分の付着の少ない高品質な再生粗骨材と再生細骨材及び骨材片の少ない硬化セメント分（再生微粉末）が回収されます。回収された再生骨材は天然骨材と同等の品質を持ち、再生微粉末は分級過程を経ることでCaOを多く含むこととなり、セメントの原材料として使用できます。このことは石灰岩等の天然原料使用量を削減可能であり、天然資源の保護と同時にセメント製造時に発生するCO₂の削減が可能となります。

湿式選別法実証プラント（写真-4）による再生骨材及び再生微粉末の製造実験結果を以下に示します。

実験フローを図-10に示します。再生碎石をアト

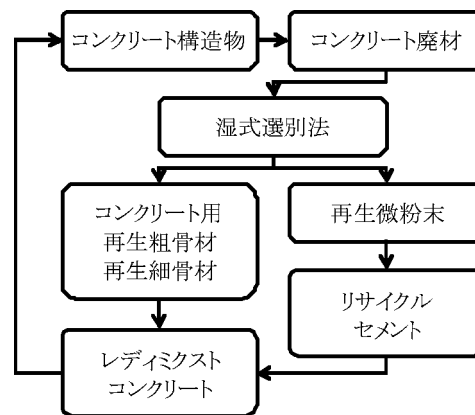


図-9 全量リサイクル概念図



写真-4 湿式選別法実証プラント

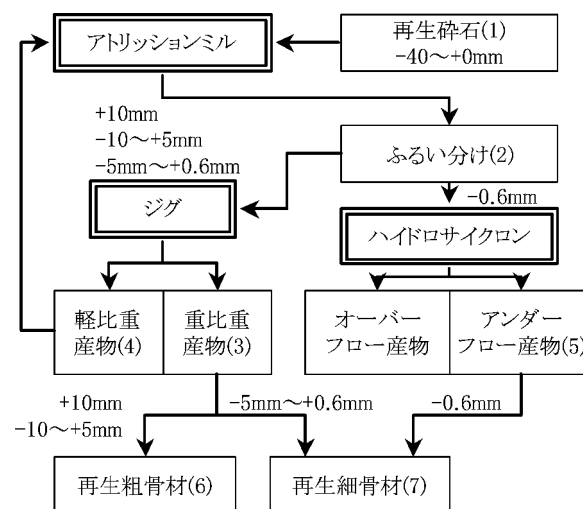


図-10 実験フロー

リションミルにより剥離処理を行った後、ジグによる選別処理を行いました。ジグ処理では比重で2.5をしきい値とした選別を行い、各試料を重比重産物及び軽比重産物として回収しました。骨材と硬

化セメント分の剥離が不十分な軽比重産物は再度アトリッションミルによる剥離処理を行った後、再度ジグ処理を行いました。また、アトリッションミル処理後の粒径0.6mm未満の試料は、4インチハイドロサイクロンにて処理を行い、アンダーフロー産物を再生細骨材として回収しました。

フロー各段階での吸水率を粒径別に図-11に示します。図中処理過程の番号及び以下文中括弧の数字は図-10の実験フロー中の番号に対応しています。

アトリッションミル処理直後の粒径0.6mm以上の全試料はJIS A 5308に規定する吸水率を満たしました。更にジグによる処理を行った結果、粒径10mm以上の重比重産物(3)及び粒径10mm未満～5mm以上の重比重産物(3)の吸水率は大幅に低下しましたが、粒径5mm未満～0.6mm以上の重比重産物(3)の吸水率の低下は僅かでした。

ジグ処理後の軽比重産物(4)と重比重産物(3)の吸水率は各試料共異なります。また、重比重産物は投入前試料(2)と比較し吸水率が低下していることから、ジグによる選別の効果がわかります。また、軽比重産物にはモルタル塊や木片等夾雑物の混入が見られますが、重比重産物にはほとんど見られませんでした。

ジグによる比重をしきい値とした選別は粒径0.6mm以上の骨材全量に検査を行うことに等しく、骨材品質の確保、夾雑物等の混入防止に有効であると考えられます。

粒径の小さな細骨材に当たる4インチハイドロサイクロンアンダーフロー産物(5)の吸水率試験結果はJIS A 5021基準外でした。

得られた骨材はそのままではコンクリート用骨材の標準粒度範囲を満たさないため、標準粒度範囲を満たすよう粒度調整を行い、それぞれ再生粗骨材(6)、再生細骨材(7)としました。図-12に示すとおり再生粗骨材(6)及び再生細骨材(7)はJIS A 5021(コンクリート用再生骨材H)に規定される密度及び吸水率

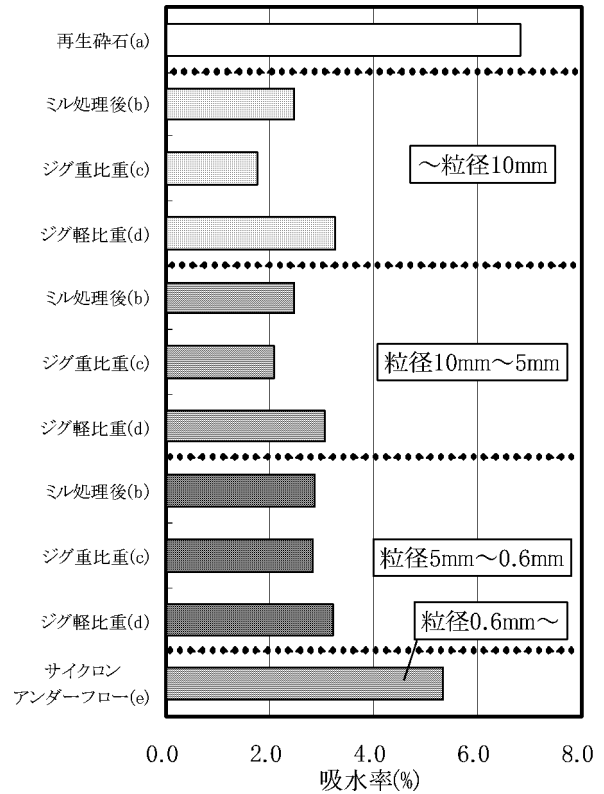


図-11 処理フロー毎の吸水率

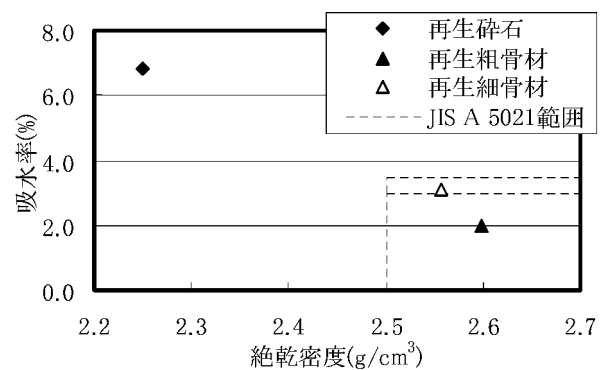


図-12 再生粗骨材及び再生細骨材の吸水率

を満たしました。

(2) 再生微粉末のセメント原料化

図-10の実験フローで得られた4インチハイドロサイクロンオーバーフローを更に2インチハイドロサイクロンで処理し再生微粉末としました。

表-1に得られた再生微粉末の化学組成を、表-2にクリンカーの調合割合を示します。実証プラン

表-1 再生微粉末の化学組成 (%)

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
19.02	41.35	10.00	4.96	20.56	2.63	0.50	0.79	0.77	1.24	0.85	0.0194

表-2 クリンカーの調合 (%)

調合	石灰石	珪石	スラグ	鉄さい	微粉末
Base	72.65	5.71	17.02	4.61	—
リサイクル	72.19	—	1.87	1.22	24.72

トの運転条件を再生骨材品質を重視した条件とした結果、セメント分 (CaO) の割合が少なく、クリンカーの調合原料中に混和できる再生微粉末の量は25%程度でした。

表-3 に焼成したクリンカーの化学組成を示します。再生微粉末をセメント原料中に25%程度用いてもクリンカーの鉱物組成は基準クリンカーと同程度の化学組成でした。

図-13 に基準セメント及びリサイクルセメントを用いたモルタル圧縮強さを示します。リサイクルセメントのモルタル圧縮強さは基準セメントとほぼ同等でした。

(3) 湿式選別法により製造された再生骨材を使用した再生コンクリート

実証プラントにて製造した再生粗骨材及び再生細骨材を使用し、再生コンクリートを製作しました。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-14 に示します。圧縮強度と静弾性係数の関係は、建築学会式、NewRC式、土木学会式とほぼ一致します。このことから湿式選別法による再生コンクリートの圧縮強度

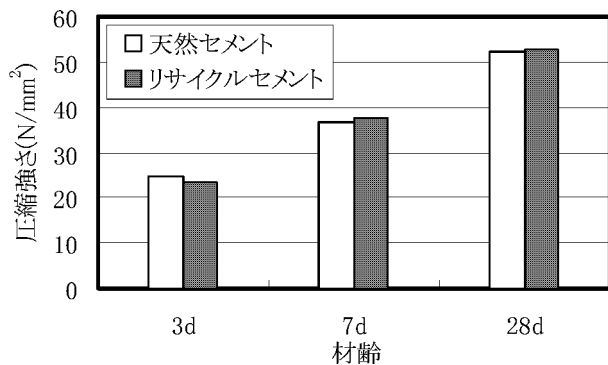


図-13 モルタル圧縮強さ試験結果

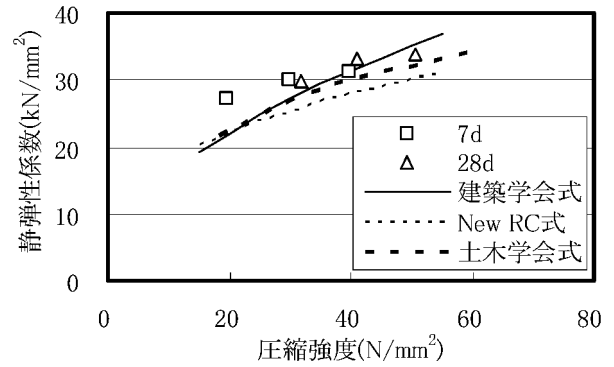


図-14 圧縮強度と静弾性係数の関係

と静弾性係数の関係は天然骨材を用いたコンクリートと同様であると考えられます。

凍結融解抵抗性試験結果のうち、相対動弾性係数とサイクル数の関係を図-15 に示します。いずれの水セメント比であっても凍結融解300サイクル終了後の相対動弾性係数は60%以上でした。このことから連行空気が導入されたものでは十分な凍結融解抵抗性を持つと考えられます。

6. まとめ

コンクリートのリサイクル技術として、これからのコンクリート廃材発生量の予測と新たな再生骨材製造技術について述べました。今年3月に JIS A 5021 コンクリート用再生骨材Hとして高品質再生骨材の品質規格が制定され、今後、土木・建築構造

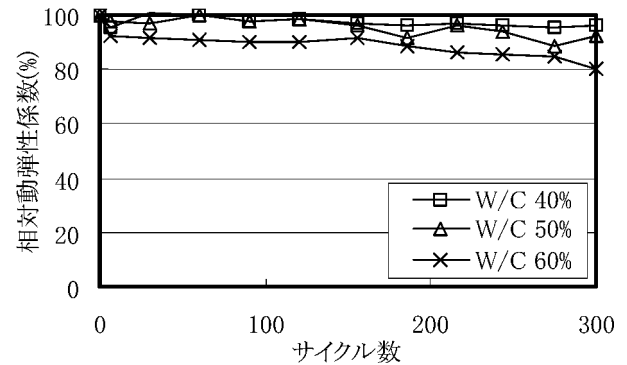


図-15 相対動弾性係数測定結果

表-3 クリンカーの化学組成 (%)

調合	Ig.loss	f-CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ Oeq	Cl
Base	0.19	0.29	22.00	5.20	2.95	64.95	3.05	0.17	0.33	0.28	0.13	0.25	—
リサイクル	0.22	0.38	21.97	5.65	2.88	64.83	2.65	0.08	0.31	0.26	0.11	0.70	—

物への再生骨材コンクリートの利用普及が進むと考えられます。一方、再生骨材の高品質化だけでなく中、低品質再生骨材の利用検討も進められており、将来、再生砕石だけではなく、用途や地域性に合わせたコンクリートリサイクルの方法が選択可能となると考えられます。

参考文献

- *1 平成14年度北海道地方建設副産物実態調査(建設廃棄物)結果
- *2 (財)国土開発技術センター：再生コンクリート利用技術の開発 平成5年度報告書、1994.3
- *3 早川光敬他：製造方法の異なる再生骨材を用いたコンクリートの調合と特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、2003