

# 論文 建築物に施工後 10 年を経過した再生粗骨材コンクリートの性状に関する検討

麓 隆行\*1・角掛 久雄\*2・松村 也寸志\*3・山田 優\*4

**要旨:** 実構造物に打設した再生粗骨材コンクリートの経時変化に関する知見を得るため、1933 年竣工の建物から排出されたコンクリート塊から製造した再生粗骨材 H 相当の粗骨材を使用し、2004 年に施工された擁壁や RC 構造物の 10 年目の調査を実施した。その結果、平屋建て倉庫で乾燥収縮や温度応力の繰返しが原因と考えられるひび割れが見られたこと、10 年経過した圧縮強度や静弾性係数に目立った低下は見られないこと、普通粗骨材を用いた場合と比べて、中性化深さの平均値に差はないが、中性化深さの最大値が大きくなる可能性があることなどの知見が得られた。

**キーワード:** 再生粗骨材, 再生コンクリート, 建築物, 圧縮強度, 静弾性係数, 中性化, ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリート塊の再利用用途として、路盤材だけでなく、コンクリート用骨材への利用も目指して、数多くの研究がなされてきた。その結果を受けて、再生骨材に関する JIS が 2005 年～2007 年に制定された。

2012 年度建設廃棄物実態調査結果<sup>1)</sup>では、コンクリート塊の発生量は、2008 年度と同量の約 31 百万トンで、その 99.3%が再資源化されていた。同年度の再生骨材コンクリートの利用実績は約 5.5 万トンで、その利用実績の約 95%が再生骨材 H を用いたコンクリートであった。コンクリート塊の発生量を考えると、再生骨材のコンクリートへの利用は進んでいないと言わざるをえない。

近年、建設分野での環境への配慮が指針として提案<sup>2),3)</sup>されるとともに、コンクリート塊の破碎による再資源化は二酸化炭素の固定量に関しても有用であること<sup>4)</sup>が明らかにされた。また、日本建築学会では、2014 年度に再生骨材を用いるコンクリートに関する設計・製造・施工指針(案)<sup>5)</sup>が制定された。これにより、コンクリートへの再生骨材の利用促進が進められている。

実構造物への再生骨材コンクリートの適用事例が 2004 年頃から報告されており<sup>6)</sup>、さらなる再生骨材の利用促進のためには、これら実構造物に適用した再生骨材コンクリートの性状の経時変化について調査する必要がある。著者らも、2004 年に施工された校舎の一部に再生粗骨材コンクリートを適用した事例<sup>7)</sup>に参画した。

本研究では、実構造物に適用した再生骨材コンクリートの経時変化に関する基礎資料を得るため、建築物の一部に施工した再生粗骨材を用いたコンクリートの 10 年経過後の性状について調査、検討した。

## 2. 再生粗骨材コンクリートの施工概要

再生粗骨材コンクリートの使用材料、配合ならびに施工概要を示す。再生粗骨材コンクリートの詳細は、既往の報告<sup>7)</sup>を参照して頂きたい。また、比較とした普通粗骨材コンクリートの概要も併せて示す。

### 2.1 施工場所

再生粗骨材コンクリートの施工場所は、図-1 に示す大阪市立大学総合教育棟(RC 造、地下 1 階、地上 5 階建て)の 5 階底と屋上、南第 2 倉庫(平屋建て) および経年変化観察用擁壁(以下、擁壁)である。当該箇所の施工は、主に 2004 年 3～4 月に行われた。

再生粗骨材は、総合教育棟建設のために解体した旧校舎(1933 年竣工)のコンクリート(川砂利使用、解体時の圧縮強度 22.5MPa)を破碎後、スクリー磨砕法で 3 度処理し、製造された。

### 2.2 使用されたコンクリート

#### (1) 使用材料の品質

セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)が用いられた。細骨材には中国福建省産川砂(表乾密度 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.73%)および兵庫県姫路市産砕砂(表乾密度 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.76%)が併用された。普通粗骨材コンクリートでは、粗骨材として兵庫県姫路市産碎石(表乾密度 2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.87%, 実積率 59.0%, 最大粒径 20mm)が使用された。一方、再生粗骨材コンクリート(原粗骨材は川砂利)では、粗骨材として再生粗骨材(表乾密度 2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.74%, 実積率 65.0%, 粗粒率 6.79, 最大粒径 25mm)のみが使用された。再生粗骨材の品質は、JIS A 5021 に示された再生骨材 H 相当であった。混和剤には高性能 AE 減水剤標準形 I 型が使用された。

\*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

\*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻准教授 博(工) (正会員)

\*3 (株)中研コンサルタント 大阪技術センター 構造部 学(工) (正会員)

\*4 大阪市立大学 名誉教授 工博 (正会員)

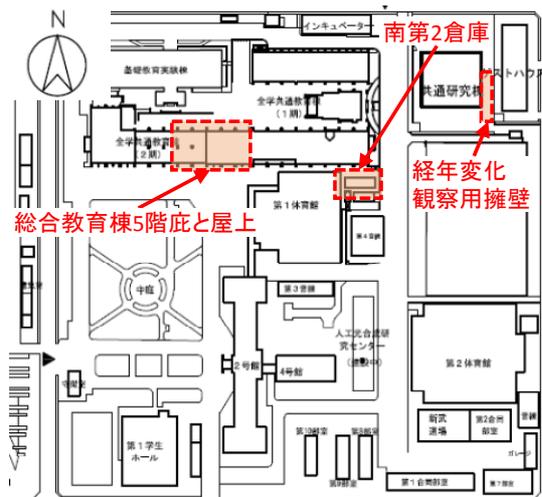


図-1 再生粗骨材コンクリートを施工した箇所



図-3 南第2倉庫(東北側)



図-4 経年変化観察用擁壁(南西側)



図-2 総合教育棟5階の底(右)と屋上(左上)(西側)

### (2) 使用された配合と施工概要

表-1 に配合を示す。配合1は、呼び強度27の普通粗骨材コンクリートで、2004年4月1日に擁壁に打設された。配合2は、呼び強度30の普通粗骨材コンクリートで、2004年3月29日に総合教育棟5階屋上・底の約半分に打設された。配合3は、呼び強度27の再生粗骨材コンクリートで、2004年3月24日に南第2倉庫および擁壁に打設された。配合4は、呼び強度30の再生粗骨材コンクリートで、2004年3月25日に総合教育棟5階屋上・底の約半分に打設された。原粗骨材が川砂利であるため、砕石に比べて再生粗骨材の粒形、実積率が良好で、再生粗骨材の配合は普通粗骨材の配合に比べて単位水量が小さく、単位粗骨材量が多くなった。

打設箇所の現状を図-2～図-4に示す。擁壁や南第2倉庫の内面は打ち放しとされ、南第2倉庫の外面は塗装、屋上は防水処理された。総合教育棟5階屋上と底は、2004年6月2日にウレタン塗膜防水が施工された。

### (3) 施工時の再生粗骨材コンクリートの性状

図-5に各配合のコンクリートの材齢7および28日の圧縮強度を示す。配合1, 3は標準養生、配合2, 4は現場水中養生での結果である。いずれも材齢7日で設計基準強度を上回った。再生粗骨材の配合は、W/Cが3%小さいが、普通粗骨材の場合よりやや強度が小さかった。

図-6に、打設した再生粗骨材コンクリートについて、室温20度、湿度60%での長さ変化試験を実施した結果を示す。保存期間182日で $7.70\sim 6.48\times 10^{-4}$ であった。

なお、塩化物量は $0.065\text{kg/m}^3$ 、再生粗骨材のアルカリ骨材反応性は無害であった。以上の項目は、再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)<sup>5)</sup>で再生骨材コンクリートHの標準に相当すると考えられる。

### 3. 調査概要

擁壁、総合教育棟5階底および南第2倉庫への外観観察により、ひび割れ調査およびたたき試験が実施された。なお、施工後1年、4年にも簡易目視調査が実施されたので、その結果も考察に加えた。

次に、擁壁、総合教育棟5階底および南第2倉庫の様々な箇所での反発度による圧縮強度推定を行った。1カ所につき有効な20点の測定値を平均し、測定反発度Rを算出した。Rに打撃時の角度による補正<sup>8)</sup>を行った基準反発度 $R_0$ を、小林・十代田<sup>9)</sup>の実構造物調査に基づく提案

表-1 普通骨材コンクリートおよび再生粗骨材コンクリートの配合とその特性

記号	粗骨材の種類	設計基準強度 (MPa)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	打設温度 (°C)	
					水	セメント	川砂	砕砂	砕石	再生粗骨材				混和剤
配合1	普通	21	54	49.3	180	333	594	254	891	—	2.91	20	5.2	14
配合2	普通	24	50	48.3	180	360	574	246	896	—	2.92	18	4.8	17
配合3	再生	21	51	40.7	170	333	498	214	—	1044	1.4	19.5	4.2	14
配合4	再生	24	47	39.9	170	362	480	206	—	1044	1.45	20.5	4.2	16

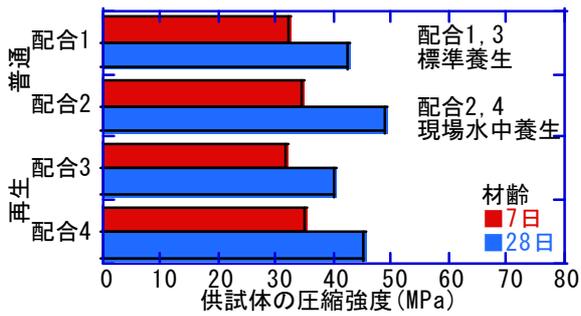


図-5 再生粗骨材コンクリートの圧縮強度

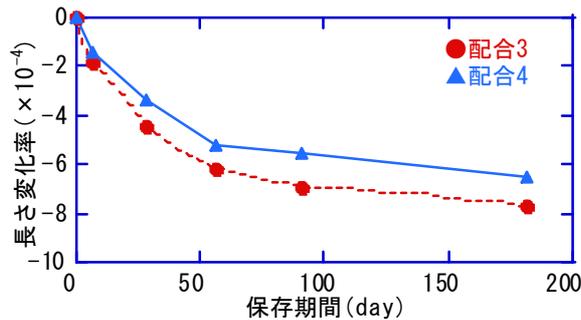


図-6 再生粗骨材コンクリートの長さ変化率

式を参考に SI 単位へと修正した式(1)に代入して、テストハンマー強度  $F_t$  (MPa)を算出した。

$$F_t = 0.54 \times (1.42R_0 - 16.0) \quad (1)$$

その後、擁壁から直径 100mm、高さ 200mm のコアを 3 本採取した。また、総合教育棟 5 階底から直径 68.6mm、高さ 100~160mm のコアを、南第 2 倉庫内の仕切り壁から直径 100mm、高さ 220mm のコアを、各 3 体採取した。コア採取は、事前に鉄筋探査機にて配筋位置や鉄筋間隔を確認して実施した。図-7 に作業の様子を、また図-8 に採取したコアの例を示す。

コア側面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、JIS A 1152 に準じて、中性化深さの平均値と最大値を計測した。ここで、中性化深さの平均値はコア断面内の平均的な中性化進行領域を示すのに対し、最大値は気泡等により生じる局所的な中性化の進行を示すと考えられる。中性化の最大値は、局所的な鉄筋腐食に関係すると考え、本研究では考察に使用した。その後、JIS A 1107 および JIS A 1149 に準じて、圧縮強度試験ならびに静弾性係数試験を実施した。なお、材齢 1 年に擁壁から採取されたコアの試験結果も比較した。



総合教育棟の5階底



南第2倉庫



経年変化観察用擁壁

図-7 各調査地点でのコア採取の様子(同地点で反発度も測定)



普通粗骨材使用

再生粗骨材使用

図-8 擁壁でのコンクリートのコアの例

#### 4. 調査結果と考察

##### 4.1 外観調査結果と考察

擁壁には目地が設置され、ひび割れは見られなかった。また、総合教育棟 5 階屋上や底は防水処理を施され、目立ったひび割れは観察されなかった。一方、南第 2 倉庫では内外面にひび割れが観察された。

南第 2 倉庫について、図-9 に倉庫内部の仕切り壁、図-10 に西側外面、図-11 に倉庫内部の梁、および図-12 に北側外面の調査結果を示す。内面では、梁下中央部に幅 0.1~0.2mm のひび割れ(図-9 および図-11 の範囲 A)が見られた。北側外面では上部から扉角に繋がる、幅 0.1~0.15mm のひび割れ(図-12 の範囲 A)が見られた。図-12 の範囲 A のひび割れは、図-13 に示すように施工後 1 年では見られなかったが、施工後 4 年で同様のひび割れが見え始めていた。1~4 年の間にひび割れが発生し、その後増加したと考えられる。

南第 2 倉庫周辺の東側は道路、南側や西側は平屋建ての倉庫や体育館であり、日当たりが良い。上記のひび割れの特徴を鑑みると、内面梁部および外面扉上部のひび割れは、乾燥収縮に加え、温度変化による屋根や側壁の変形の繰り返しが主要因だと考えられ、設計時の配慮で解決できると考えられる。

一方、西側外面での両端上部の幅 0.1~0.25mm のひび割れ(図-10 の範囲 A)、地表部でのひび割れ(図-10 や図-12 の範囲 B)や窓部の角から伸びるひび割れは、主に乾燥収縮が要因と考えられる。4 年経過時には、ひび割れが見られなかったことから、乾燥収縮によるひび割れが主に材齢 4 年以降に生じたと推測される。

普通粗骨材を用いた場合でも同様なひび割れは起こりうると考えられる。ただし、普通粗骨材を用いた同様な条件の構造物はなく、長さ変化率や引張強度が不明なため、材料特性からの比較もできなかった。

#### 4.2 擁壁のコア調査結果と考察

図-14 に擁壁の圧縮強度の推移を示す。材齢 28 日までは標準養生供試体を、材齢 1 年以降はコアを使用した。養生状態の違い等で普通粗骨材の場合に一部強度低下が見られたが、およそ材齢 28 日まで大きく増加し、材齢 1 年以降で緩やかな増加となった。材齢 10 年で、普通粗骨材の場合 43.5MPa、再生粗骨材の場合 52.5MPa となった。

図-15 に擁壁から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数との関係を示す。再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)<sup>5)</sup>による算定値と同程度だった。

図-16 に中性化深さの平均値の推移を、図-17 に中性化深さの最大値の推移を示す。中性化深さの平均値では粗骨材の違いによる差は見られず、中性化速度係数は 2.60~2.73mm/√年であった。一方、中性化深さの最大値では、再生粗骨材の場合に材齢 10 年で 15.7mm と、普通粗骨材の場合に比べて 4.4mm 大きくなった。中性化深さの最大値から算出した中性化速度係数は、再生粗骨材の場合に 4.84 mm/√年と、普通粗骨材の場合の 1.32 倍となった。つまり、中性化の進行は、再生粗骨材を用いた

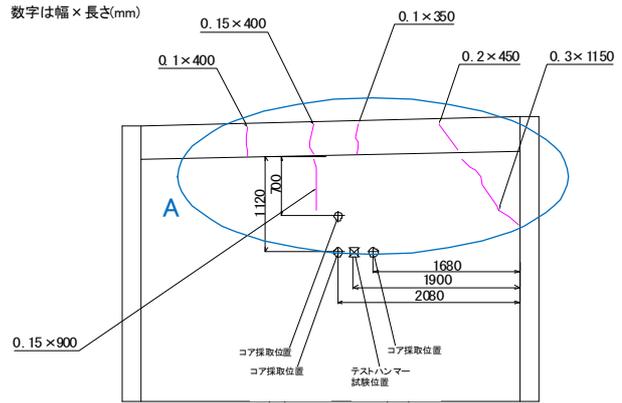


図-9 南第2倉庫内部の仕切り壁の外観調査結果(赤線:ひび割れ, 斜線:浮き, 位置:図12梁③)

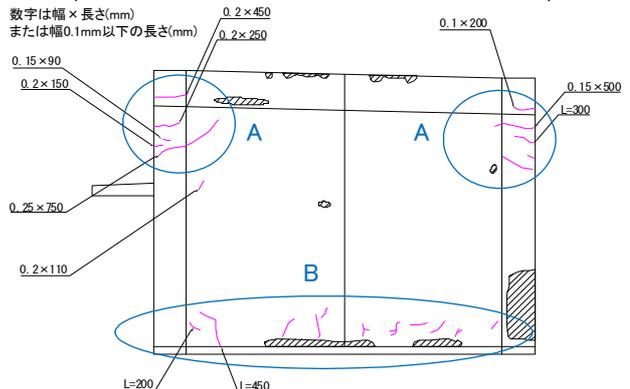


図-10 南第2倉庫の西側外面の外観調査結果(赤線:ひび割れ, 斜線:浮き)

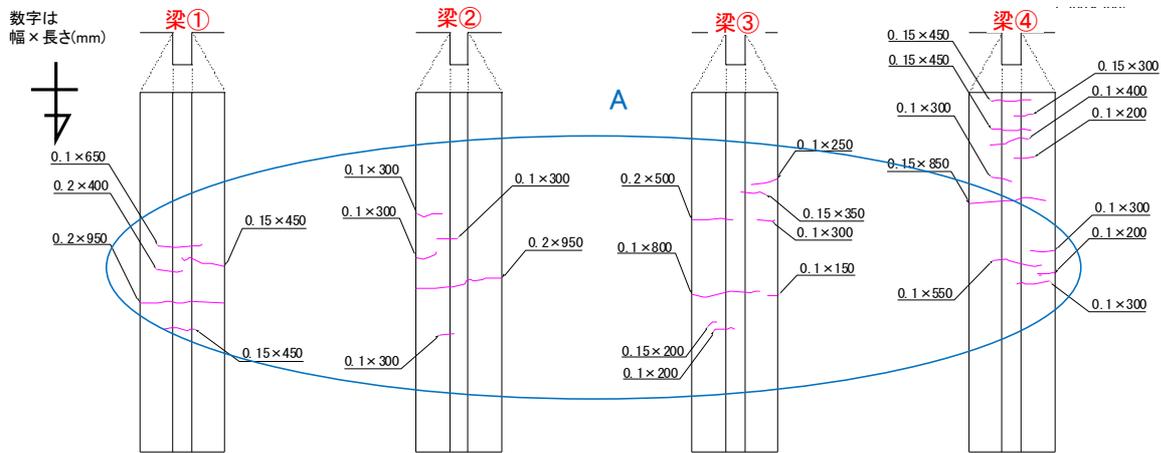


図-11 南第2倉庫内部の梁部の外観調査結果(赤線:ひび割れ, 斜線:浮き, 梁番号は図13に対応)

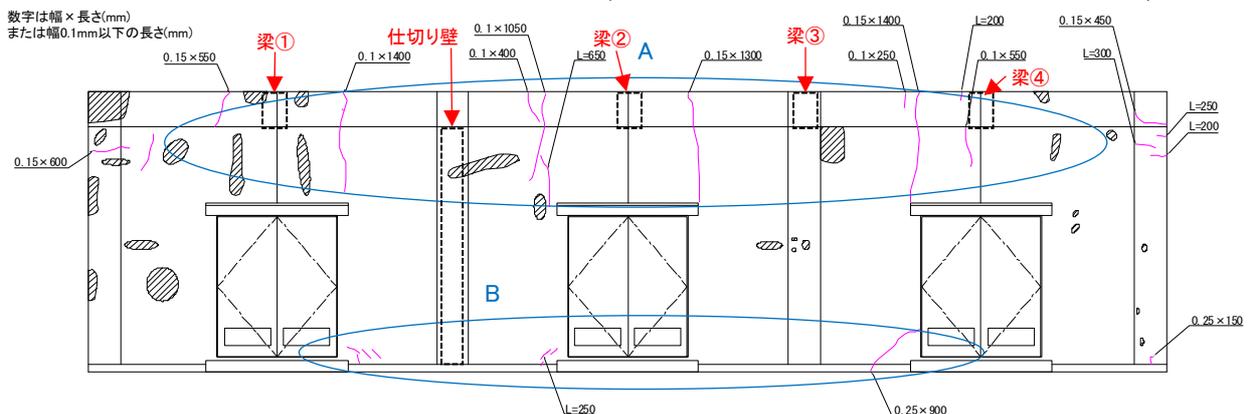


図-12 南第2倉庫の北側外面の外観調査結果(赤線:ひび割れ, 斜線:浮き)

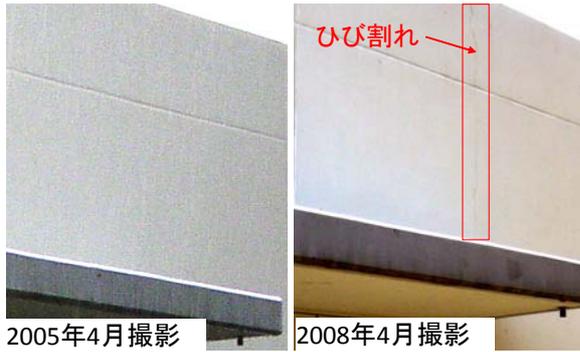


図-13 施工後1年、4年でのひび割れ観察例

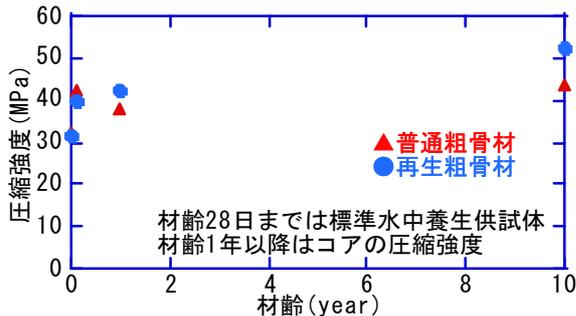


図-14 擁壁の圧縮強度の経時変化

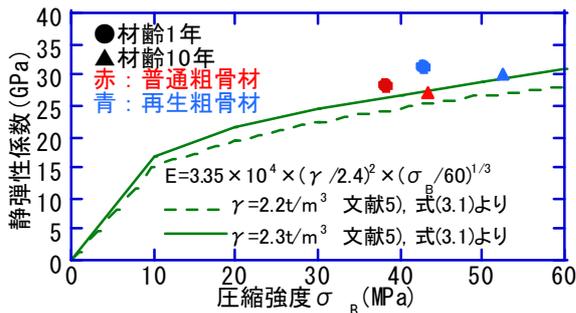


図-15 擁壁コアの圧縮強度と静弾性係数との関係

場合にばらついた。この一因に再生粗骨材に付着した旧モルタルの影響が考えられ、今後検討が必要である。

既往の打放しのコンクリートのコア調査結果から推定された圧縮強度( $F_c$ : MPa)と中性化速度係数( $A$ : mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )との関係を示す近似式として式(2)が得られている<sup>10)</sup>。

$$A = 49.7 \times (1/\sqrt{F_c} - 0.092) \quad (2)$$

式(2)で今回のコンクリートの中性化速度係数を推定すると2.29~2.96 mm/ $\sqrt{\text{year}}$ であった。すなわち、施工された再生粗骨材コンクリートの中性化深さの平均値に関する中性化速度係数は、一般的な打ち放し状態のコンクリートと同程度だった。

以上の結果から、再生粗骨材コンクリートの10年目の経年変化として、圧縮強度や静弾性係数に目立った低下はなく、中性化深さも、一般的なコンクリートと差は見られない。ただし、中性化深さの最大値に関する中性化速度係数は、普通粗骨材を用いた場合の1.32倍大きかった。今後も追跡調査し、この傾向を確認していきたい。

#### 4.3 建物のコア調査結果と考察

図-18に材齢10年でのコアの圧縮強度と、同箇所での

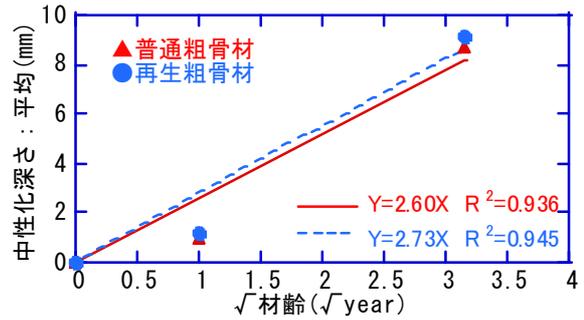


図-16 擁壁コアの中性化深さの平均値の推移

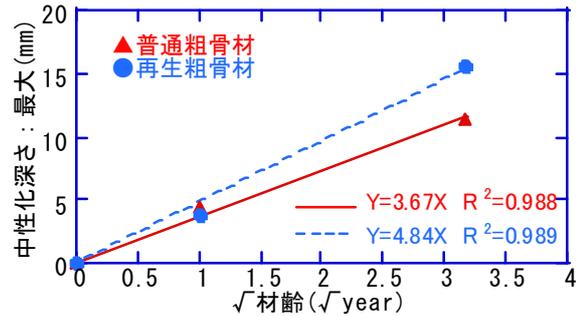


図-17 擁壁コアの中性化深さの最大値の推移

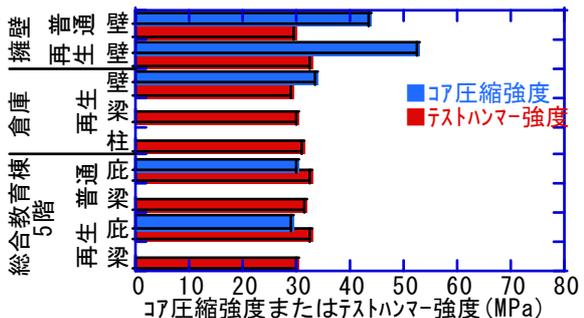


図-18 コアの圧縮強度とテストハンマー強度の比較

のテストハンマー強度を示す。コアの圧縮強度は、擁壁で、普通粗骨材の場合に43.5MPa、再生粗骨材の場合に52.5MPaであったが、総合教育棟5階底で普通粗骨材の場合に29.8MPa、再生粗骨材の場合に29.2MPa、倉庫で33.7MPaであった。この差の一因として、擁壁は1週間程度経ってから脱型した封緘状態であったこと、コア採取位置は高さ280~480mmと土壌に近く、比較的含水率が高かったことが考えられる。一方、底や倉庫の仕切り壁では気乾状態に近かったことが考えられる。ただし、いずれのコアの強度も設計基準強度を上回っていた。

テストハンマー強度では、擁壁で29.6~32.5MPaとコア強度と差が見られたが、倉庫で28.8~31.2MPa、5階底で30.0~34.6MPaとコアの強度と同程度となった。擁壁では含水状態の影響で式(1)の係数が0.54より大きくなった可能性がある。一方、構造体では、中性化、含水率および応力状態の影響もあるが、その差は9~15%に留まった。本研究の結果では、底や倉庫の仕切り壁のような気乾状態の圧縮強度は、既往の推定式<sup>9)</sup>によるテストハンマー強度で推定できる可能性があった。

図-19に、各所のコアの圧縮強度と静弾性係数との関

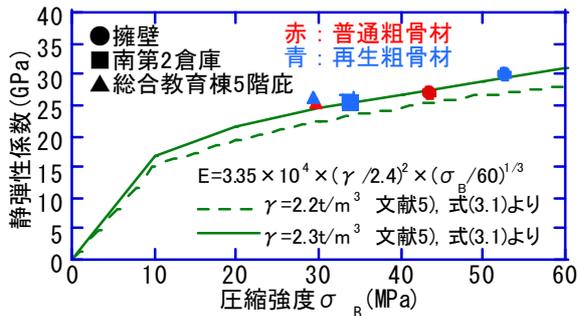


図-19 コアの圧縮強度と静弾性係数との関係

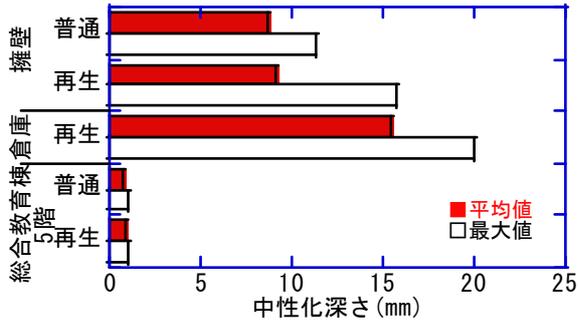


図-20 コアの中性化深さの比較

係を示す。静弾性係数は、採取箇所や W/C に関わらず、再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)<sup>9)</sup>による算定値と同程度であった。

図-20に、各所のコアの中性化深さの平均値と最大値を示す。総合教育棟5階底では、防水処理を施したため、ほとんど中性化していない。一方、倉庫では、擁壁に比べて中性化深さが平均値および最大値ともに6mmほど大きくなった。調査箇所は南第2倉庫内部の仕切り壁であり、年間を通して建物内部の温度、湿度が高かったことが要因だと推察される。

以上から、建築物に施工後、気乾状態の再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、既往の推定式によるテストハンマー強度から推定できる可能性がある。一方、環境条件により中性化深さが大きくなる可能性が有り、倉庫内では屋外の1.70倍となった。ただし、表面に塗装や防水処理等を施すことで抑制できる。

## 5. 結論

1933年に竣工された建物の解体で排出されたコンクリート塊から製造した再生粗骨材を使用した擁壁やRC構造物を調査した結果、以下のことがわかった。

- 1) 再生粗骨材コンクリートを用いた倉庫では温度応力の繰り返しによる疲労ひび割れが材齢4年までに生じ、乾燥収縮によるひび割れが材齢4年以降に生じたと考えられる。
- 2) 経年変化観察用擁壁を調査した結果、再生粗骨材コンクリートの10年目の経年変化として、圧縮強度や静弾性係数に目立った低下はなく、中性化深さの平均値も、普通粗骨材を用いた場合と差はない。た

だし、中性化深さの最大値は大きく、中性化速度係数は普通粗骨材を用いた場合の1.32倍となり、再生粗骨材に付着した旧モルタルの影響が考えられた。

- 3) 構造物から採取したコアを調査した結果、建築物に施工後、気乾状態の再生粗骨材コンクリートの圧縮強度は、既往の推定式<sup>4)</sup>によるテストハンマー強度から推定できる可能性がある。環境条件により中性化深さが大きくなる可能性が有り、倉庫内では屋外の1.70倍となった。ただし、表面に防水処理等を施すことで抑制できる可能性がある。

## 謝辞

本調査は、大阪市立大学法人運営本部 高橋保夫様、(株)中研コンサルタント技術営業部 鈴木宏信様のご協力により実施いたしました。ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土交通省: 平成24年度建設副産物実態調査結果参考資料, 2014.3
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針(案)・同解説, 2008.9
- 3) 土木学会: コンクリート構造物の補修、解体、再利用におけるCO<sub>2</sub>削減を目指して—補修における環境配慮および解体コンクリートのCO<sub>2</sub>固定化—, コンクリートライブラリー134号, 2012.5
- 4) 神田太朗, 曾根真理, 岸田弘之: コンクリートの供用および再資源化による二酸化炭素の固定に関する全国調査, コンクリート工学, Vol. 49, No. 8, pp.9-16, 2011.8
- 5) 日本建築学会: 再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)・同解説, 2014.10
- 6) 例えば, 黒田泰弘, 橋田浩, 宮地義明: 再生骨材コンクリート12500m<sup>3</sup>を建築躯体に本格採用, セメント・コンクリート, No. 685, pp.8-17, 2004.3
- 7) 丸嶋紀夫, 木村芳幹, 馬場鐵雄, 佐野匡史: 再生粗骨材コンクリートの施工について—(仮称)大阪市立大学総合教育棟建設工事への適用—, コンクリート工学, Vol. 43, No. 3, pp.46-51, 2005.3
- 8) 日本材料学会: 建設材料実験, pp. 226-228, 2011.3
- 9) 小林幸一, 十代田知三, 野崎喜嗣: 非破壊試験による構造体コンクリートの品質評価方法(その3)長期材令を経た実構造物への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概, pp.1576-1577, 1992.8
- 10) 春畑仁一, 中村隆治, 大橋正治, 永山勝: 既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計, GBRC, Vol. 36, No. 1, pp. 49-54, 2011.1