

論文 オートクレーブ養生した再生コンクリートのカーテンウォールへの適用

竹内 毅典^{*1}・寺西 浩司^{*2}・佐々木 仁^{*3}・中込 昭^{*4}

要旨：筆者らは、低品質な再生骨材を用いた再生コンクリートの乾燥収縮が大きいという技術的課題を解決するために、これまで、オートクレーブ養生を活用する方法について検討してきた。本研究では、実際に、再生コンクリートを用いた PCa カーテンウォールをオートクレーブ養生により製作し、PCa 工場における製造上の問題点などを抽出した。また、製作した PCa カーテンウォールの各種品質を調査した。

キーワード：リサイクル, 再生骨材, オートクレーブ養生, プレキャストコンクリート

1. まえがき

再生コンクリートの製造コストを現実的な範囲に抑制するためには、低品質な再生骨材の使用が有効であるが、乾燥収縮が大きくなることが品質上の問題となる。そこで、筆者らは、既報¹⁾において、再生コンクリートの PCa 部材への適用を前提としたうえで、乾燥収縮抑制を目的としてオートクレーブ養生を行う方法を提案し、その有効性を確認した。また、そのようにして製造した再生コンクリートの強度特性、中性化、耐凍害性などについても検討した²⁾。

本研究は、この一連の研究に継続するものであり、筆者らの提案する方法により実際に PCa 部材を製造した場合の製造上の課題などを抽出するために、PCa 工場において再生コンクリートを用いた PCa カーテンウォールの製作実験を行った。本報では、その結果を取りまとめて報告する。

2. 製作実験の概要

2.1 PCa カーテンウォールの概略

本実験では、再生コンクリートにおける再生骨材の置換率を 50 および 100% に変化させて、2 種類の PCa カーテンウォール試験体を製作した

(記号：R50, R100)。試験体は、**図-1**に概略を示すように、片面タイル貼りの無開口の平板とし、その寸法は 2,395×3,995×160mm とした。また、配筋は、縦横筋ともに D10@150mm (SD295A) のダブル配筋とした。

2.2 製作実験の流れ

図-2に製作実験のフローを示す。本実験では、PCa カーテンウォールの製作に先立ち、まず、再生コンクリートの調合を定めるための試し練りを行った。次に、カーテンウォールを実際に製作し、同時に、強度試験および乾燥収縮

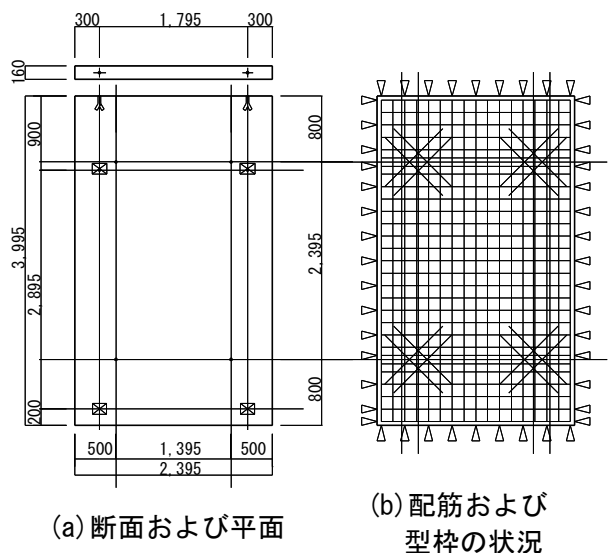


図-1 PCa カーテンウォール試験体

*1 名城大学 大学院理工学研究科修士課程建築学専攻 (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

*3 (株)フジタ 技術センター 主任研究員 工博 (正会員)

*4 前田建設工業 (株) 技術研究所 副部長 工修 (正会員)

試験のための供試体を作製した。その後、各種の試験・調査を行い、不具合の生じた事項についてはその原因を検討した。

2.3 試験項目および方法

表-1に試験項目を示す。本実験では、大別して、フレッシュコンクリート試験、PCaカーテンウォール試験体に対する試験、強度試験および乾燥収縮試験を実施した。PCaカーテンウォール試験体に対しては、ひび割れ、破損、汚れ状況の目視調査や寸法精度の測定を行った。また、建研式接着力試験によりタイルの接着力を測定した。

3. コンクリートの試し練りおよび調合の設定

本実験では、再生コンクリートの調合強度を36N/mm²、脱型強度を15N/mm²と定め、PCaカーテンウォール試験体の調合を設定するための試し練りを行った。

3.1 コンクリートの使用材料

表-2に骨材の品質を示し、また、表-3に再生粗骨材の不純物含有率を示す。実験に使用した再生骨材は、原セメントペーストが多く付着している低品質なものである。また、表-4に骨材以外の使用材料を示す。

3.2 試し練り

試し練りは、置換率50および100%の再生コンクリートに対して、それぞれ水セメント比を3水準に変化させて実施した。図-3に、その結果から得られた圧縮強度とセメント水比の関係を示す。

3.3 調合の設定

図-3から所要の調合強度および脱砕強度に

対するセメント水比を求めたところ、いずれの置換率の場合も、脱型強度より調合強度に対するセメント水比の方が大きくなった（すなわち、水セメント比が低くなった）。また、調合強度に

表-1 試験項目および方法

試験区分	試験項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	単位容積質量	JIS A 1116
	温度	棒状温度計による
	塩化物量	JIS A 1144
PCaカーテンウォール試験体	外観	ひび割れ、破損、汚れの目視調査
	寸法精度	辺長、板厚などの測定
	タイル接着力	建研式接着力試験
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
	引張強度	JIS A 1113
	ヤング係数	ASTM C 469
	ポアソン比	ASTM C 470
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3

表-2 使用骨材

項目	普通骨材		再生骨材		
	細骨材*	粗骨材	細骨材	粗骨材	
産地・仕様	鹿島産 陸砂	笠間産 砕砂	笠間産 砕石	再生砂 再生 砕石	
岩種	-	硬質 砂岩	硬質 砂岩	-	
最大寸法(mm)	5	5	20	5	
粗粒率	2.55	2.99	6.60	2.91	
密度 (g/cm ³)	表乾	2.65	2.68	2.66	2.27
	絶乾	2.62	2.66	2.64	2.05
吸水率(%)	0.99	0.82	0.50	11.05	
単位容積質量 (kg/L)	-	-	-	1.44	
実積率(%)	-	-	-	70.3	
粒形判定 実積率(%)	-	55.3	59.8	-	
400kN 破砕値(%)	-	-	-	-	
10%破砕荷重(kN)	-	-	-	-	
原セメントペースト付着率(%)	-	-	-	29.8	

* 陸砂：砕砂=2：3(体積比)で使用

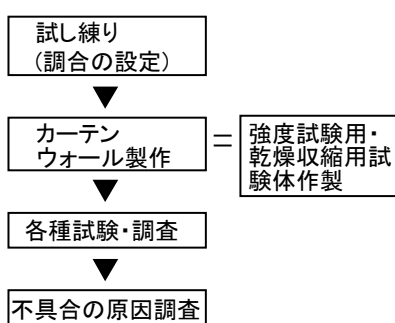


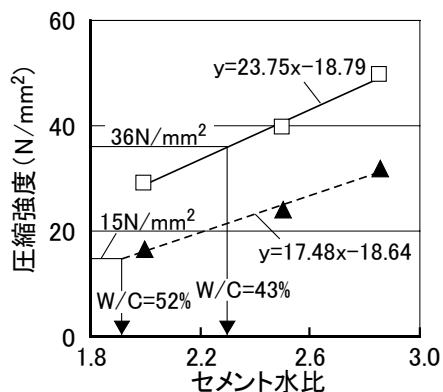
図-2 製作実験の流れ

表-3 再生粗骨材の不純物含有率

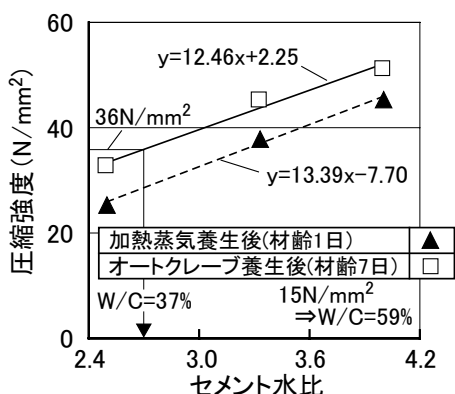
不純物の種別	質量比率(%)
レンガ	0.272
タイル	0.016
ガラス	0.015
金属	0.008
木材・布	0.002
アスファルト	0.293
ゴム	0.023
ビニル・プラスチック	0.007
合計	0.637

表-4 コンクリートの使用材料(骨材以外)

材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm ³ , K ₂₈ ：65.8N/mm ²)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
空気連行剤	アルキルエーテル系



(a) 置換率 50%の場合



(b) 置換率 100%の場合

図-3 圧縮強度とセメント水比の関係



写真-1 PCa カーテンウォール試験体の製作状況

表-5 再生コンクリートの調合

調合	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	再生骨材の置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積 (l/m³)				A E 高性能減水剤 (g/m³)	
							セメント	細骨材		粗骨材		
								普通	再生	普通		再生
R50	8±2.5	3±1.5	43	50	41.1	155	115	144	144	206	206	2703
R100	21±1.5		37	100	47.6	175	150	-	307	-	338	5203

対応する水セメント比は、置換率 50%では 43%、置換率 100%では 37%となった。

表-5 に、以上の結果に基づいて設定した再生コンクリートの調合を示す。なお、この調合において、R50 の場合はスランプを 8±2.5cm としたが、R100 の場合は、コンクリートの粘性が高く、また、スランプロスが大きいことから、スランプを 21±1.5cm に設定した。

4. PCa カーテンウォールの製作

4.1 コンクリートの打設

写真-1 に、PCa カーテンウォールの製作状況を示す。本実験では、実際の PCa 工場におい

て、型枠底面に先付けタイル (45 二丁掛け) を敷き詰めて、配筋した後に、振動締固めを行いながら再生コンクリートを打設した。表-6 に、フレッシュコンクリートの試験結果を示す。スランプおよび空気量は、R50, R100 のいずれの場合も設定値を満足し、ワーカビリティは良好であった。また、打設も速やかに完了した。

4.2 養生

図-4 に養生日程を示す。本実験では、コンクリートを打設した日の夜間に加熱蒸気養生を行った。また、打設翌日に型枠を脱型し、タイル面の清掃を行った。その後は、材齢 7 日まで気中養生し、オートクレープ養生設備を有する

表-6 フレッシュ試験の結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	塩分含有量 (g/m ³)	温度 (°C)
R50	9.5	4.3	38	27.5
R100	22.5	2.8	38	27.5

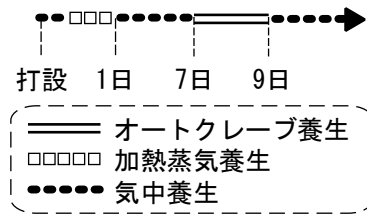


図-4 養生日程



写真-2 PCa カーテンウォール試験体の外観（タイル面）

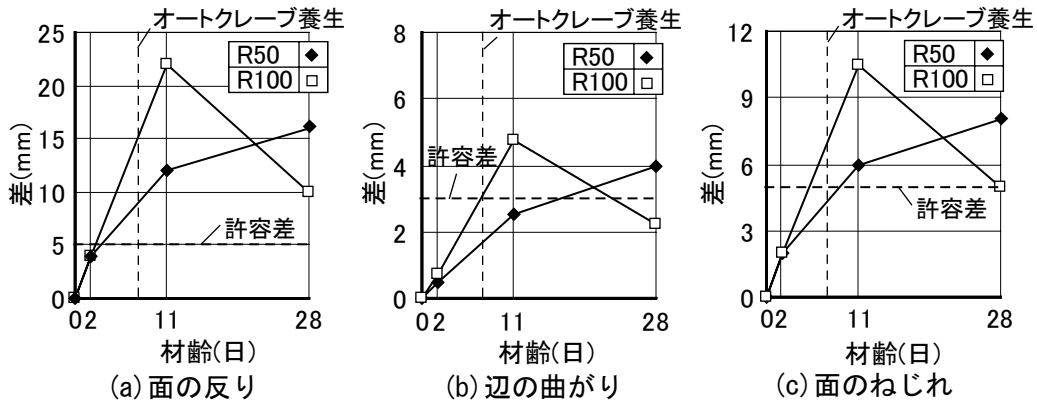


図-5 寸法精度の測定結果

別のPCa工場へ試験体を搬送してオートクレーブ養生を行った。

加熱蒸気養生では、15°C/hの速度で加熱して、40°Cの一定温度を2時間保持した後に室温まで自然冷却した。また、オートクレーブ養生では、15°C/hの速度で180°C、10気圧まで昇温・昇圧し、その状態を3時間保持した後に15°C/hで冷却した。なお、オートクレーブ養生では、写真-1に示したように、内径3mのオートクレーブ釜に試験体を2段に積み重ね、タイル面を下にして養生した。

5. PCa カーテンウォールの製作結果

5.1 外観

本実験では、加熱蒸気養生後（材齢2日）およびオートクレーブ養生後（材齢11日）に、PCaカーテンウォール試験体の外観を調査した。写真-2に、オートクレーブ養生後の状況を示す。この調査によると、加熱蒸気養生後の段階では、特に問題となるようなひび割れや汚れなどは見られなかった。しかし、オートクレーブ養生後の試験体には、次のような汚れ、欠陥などが認められた。

a. 暗褐色の局所的な汚れ

b. 白色の水玉状の汚れ

c. コンクリート表面のコーン状の剥離（ポップアウト）

このうちのaおよびcは、試験体裏面に多く見られ、その原因は、再生骨材に含まれる不純物であると推測される（詳細は6章にて検討）。また、bは試験体のタイル面に認められた。これは、オートクレーブ養生中に、コンクリート中の水酸化カルシウムが水蒸気中に溶出し、それが水滴として試験体に付着して乾燥した跡であると推測される。なお、以上の不具合は、再生骨材の混入量の多いR100の方がR50よりも多く発生していた。

5.2 寸法精度

本実験では、外観調査と同時期（材齢2、11日）および材齢28日に、PCaカーテンウォール試験体の寸法精度を測定した。図-5に測定結果の一部を示す。同図からわかるように、曲がり、ねじれ、反りなどは、加熱蒸気養生後の時点では、JASS 14に規定される寸法許容差の範囲内に収まっていた。しかし、オートクレーブ養生後は、いずれの寸法精度も許容差を上回った。これは、PCaカーテンウォールの片面にタイルが張られていたため、オートクレーブ養生時に、

非タイル面からのみ水分が逸散し、乾燥収縮による変形が生じたことが原因であると考えられる。

5.3 タイルの接着性

図-6にタイルの接着強度を示す。同図からわかるように、R50、R100のいずれの試験体においても、全ての測定位置（試験体ごとに6ヶ所）でタイルの接着強度は規定値（ $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ ）を満足した。このことから、再生コンクリートの使用やオートクレーブ養生が先付けタイルの接着性に悪影響を及ぼすことはないものと判断できる。

5.4 強度特性

図-7~10に、コンクリートの強度試験結果を示す。圧縮強度は、R50、R100のいずれの場合も加熱蒸気養生後に本実験で設定した脱型強度を上回った。また、オートクレーブ養生後には調合強度に近い値に達し、それ以降はほぼ一定値であった。

ヤング係数および引張強度は、置換率100%の方が置換率50%の場合よりも小さくなった。すなわち、圧縮強度が同一であっても、置換率が高いほどヤング係数および引張強度は低下する

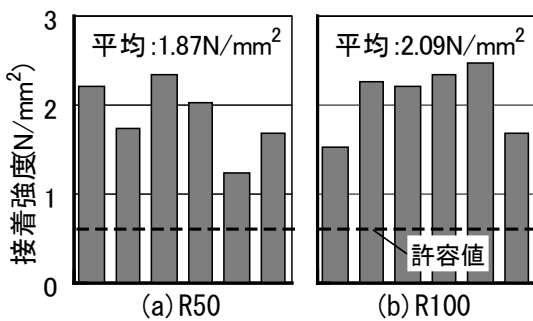


図-6 タイルの接着強度

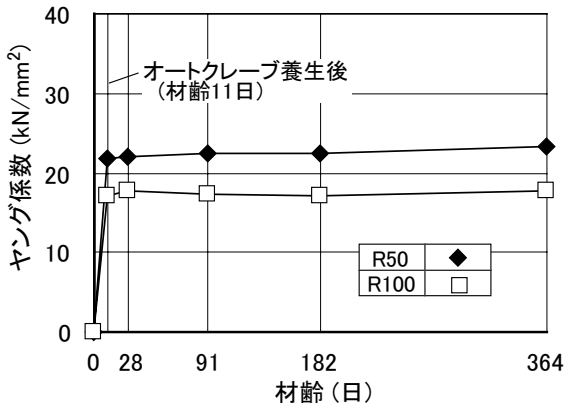


図-8 ヤング係数

結果となった。また、ポアソン比は、置換率に関わらずに0.17程度になった。

5.5 乾燥収縮

図-11に、乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ここで、図中の乾燥収縮ひずみは、脱型直後（材齢1日）を基長として計算したものであり、材齢7日を基長として計算した通常の試験値よりも大きな値として表示されている。同図によると、乾燥収縮ひずみはオートクレーブ養生後に $500\sim 700\times 10^{-6}$ 程度となり、それ以降はほとんど変動していない。これらの結果は、筆者らの既往の研究¹⁾と同様である。

6. PCa カーテンウォールに生じた不具合の原因調査

5.1節に前述したPCaカーテンウォールの不具合aおよびcの原因を検討するために、不具合の生じる可能性の高い3種類の不純物をコンクリート供試体（ $10\times 5\times 40\text{cm}$ ）に混入し（質量比で0.1~2%の範囲）、オートクレーブ養生してその状況を観察した。

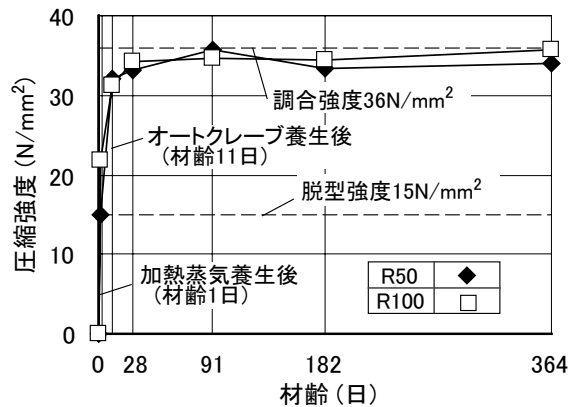


図-7 圧縮強度

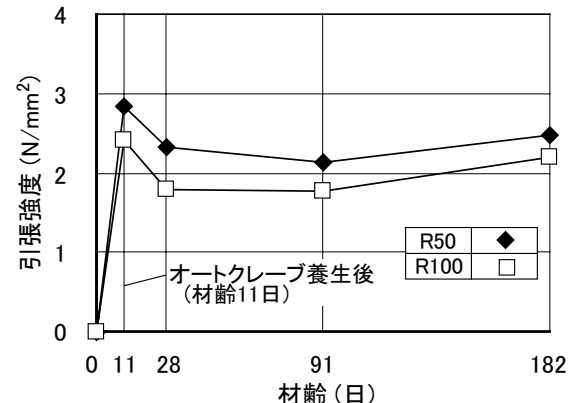


図-9 引張強度

写真-3に、供試体のオートクレーブ養生後の表面および断面を示す。これらの写真からわかるように、床仕上げ用のP タイル片を混入した場合には、それがオートクレーブ養生時に膨張し、ポップアウトが生じた。それに対して、木片を混入した場合は、供試体の表層近くにある木片が焼けこげてはいたが、ポップアウトは観察されなかった。これらのことから、PCa カーテンウォール試験体におけるポップアウトの原因は、P タイル片であったと推定される。また、アスファルトを混入した場合は、オートクレーブ養生によって熔融したアスファルトがコンクリート表面に析出している様子が観察された。また、その状況は、PCa カーテンウォールにおける暗褐色の汚れの状況と一致した。

以上のことから、再生骨材にP タイルやアスファルトが混入していた場合には、それが微量であってもポップアウトや汚れの原因になることがわかった。したがって、本方法によりPCa 部材を製作する場合には、これらの不純物に十分に注意する必要があるものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、低品質な再生骨材を用いた再生コンクリートをオートクレーブ養生してPCa 部材に適用する方法の実用化を目的として、実大規模のPCa カーテンウォールをPCa 工場で作した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本研究で想定した方法により、PCa カーテンウォールを製作することは可能である。また、その場合の再生コンクリートの調合は、一般的な調合設計法により設定できる。
- (2) 先付け工法によってPCa 部材の片面をタイル張りとする場合には、オートクレーブ養生時の変形を抑制する工夫が必要である。
- (3) 再生骨材中に不純物が混入していると、その種類によっては、PCa カーテンウォールの美観の低下や欠陥の原因となるので、注意する必要がある。

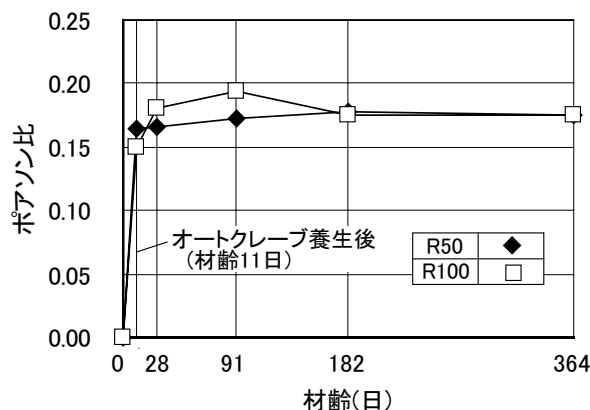


図-10 ポアソン比

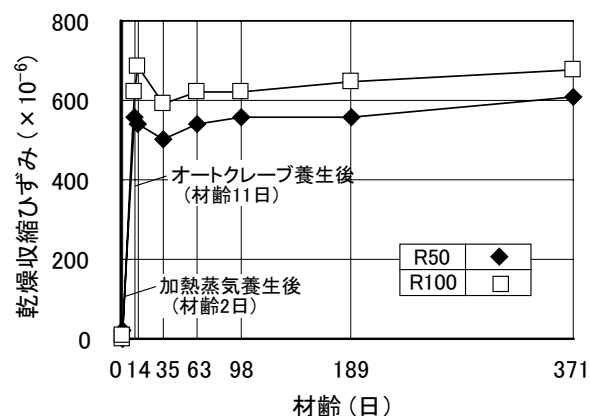


図-11 乾燥収縮ひずみ



写真-3 不純物混入試験の結果

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・水野貴文君、宮崎尚樹君の助力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 竹内毅典, 寺西浩司: オートクレーブ養生した再生コンクリートの品質, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1509-1514, 2004.7
- 2) 竹内毅典, 寺西浩司, 江口清: オートクレーブ養生した再生コンクリートの品質に関する研究 (その3. 中性化および耐凍害性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.339-340, 2004.8