

繊維補強モルタルへの廃棄物とリサイクル材料の活用

芝浦工業大学 学生会員 ○平田 渉
芝浦工業大学 正会員 勝木 太

東京大学 学生会員 マイケル ヘンリー
東京大学生産技術研究所 正会員 加藤 佳孝

1. はじめに

国土が狭く資源自給率の乏しいわが国にとって、廃棄物の削減、資源節約、温暖化防止の観点から、環境に配慮した生産活動を行うことは極めて重要である。コンクリートの分野も例外ではなく、地球温暖化対策としてのセメント使用量削減、天然資源枯渇対策としての再生骨材の活用等が強く望まれている。

そこで本研究は、高置換率フライアッシュ繊維補強再生骨材コンクリートの実用可能性を検証することを最終目的と設定した。

導入段階として、リサイクル繊維と、電力施設からの産業廃棄物であるフライアッシュを大量に用いたモルタルを、異なる配合条件で作製し、その強度と耐久性を比較検討した。

まず、実験要因として、細骨材粉体比(S/B:質量比)を変化させたモルタルを作製し最適細骨材粉体比を決定し、その後、フライアッシュの置換率(FA/B:質量比)を変化させたモルタルにより、その影響を検討した。繊維については、現在広範囲で使用されているポリプロピレン繊維とリサイクル繊維を比較する事によって、繊維の種類による影響を検討した。

また、地球温暖化を引き起こす主要な温室効果ガスである CO₂ の排出量を試算し、配合条件の違いが環境に与える影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

繊維には、PET ボトルのリサイクルにより生産される再生 PET 短繊維(RF)と、近年広く使用されているポリプロピレン(PP)の2種類を用いた。既往の研究¹⁾より繊維の物理特性を表-1に示す。

本研究では、普通ポルトランドセメント(C)と、JIS A 6201 に規定されているフライアッシュⅡ種(FA)を足し合わせた物を結合材料(B)とした。

また、良好なワーカビリティを得る為、混和剤として、フライアッシュ用の AE 剤と、高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)を使用した。

モルタルの配合設計一覧を表-2に示す。

2.2 モルタルのフレッシュ性

モルタルのワーカビリティは、V 漏斗を用いた流下試験(JSCE-F512)によって材料分離抵抗性を、スランプフロー試験(JIS A 1150)によって流動性をそれぞれ評価した²⁾。目標水準として、高流動コンクリートに要求される水準を準用して、前者で4~10秒、後者で500~600mmとした。モルタルのフレッシュ試験結果一覧を表-3に示す。

表-1 繊維の物理特性

繊維種類	直径 (mm)	長さ (mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (MPa)
ポリプロピレン	0.75	32	0.91	-
リサイクル繊維	0.70	30	1.35	450

表-2 モルタルの配合設計一覧

名称	材料割合(%)			配合設計(kg/m ³)				混和剤(%×B)		繊維(%volume)	
	W/B	S/B	FA/B	W	C	FA	S	AE	SP	PP	RF
SB60	30	60	30	298	695	298	596	0.04	0.4	2.0	-
SB80		80		274	639	274	731	0.04	0.5	2.0	-
SB100		100		254	593	254	847	0.04	0.6	2.0	-
FA30-PP		80	30	274	639	274	731	0.04	0.5	2.0	-
FA50-PP			50	266	443	443	709	0.06	0.4	2.0	-
FA70-PP			70	259	259	604	691	0.08	0.4	2.0	-
FA30-RF			30	274	639	274	731	0.04	0.5	-	2.0
FA50-RF			50	266	443	443	709	0.06	0.4	-	2.0
FA70-RF			70	259	259	604	691	0.08	0.4	-	2.0

2.3 試験概要

本研究では、強度試験として圧縮強度試験、曲げタフネス試験を行い、耐久性試験として既往の研究³⁾を参考に透気試験を実施した。各条件とも、28 日水中養生とした。

圧縮試験は $\Phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体により実施し、曲げタフネス試験は JSCE-F 552-1999 に準拠して $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体により実施した。また、曲げタフネスは荷重-中央変位曲線において中央変位 2mm までの曲線下の面積より算出した。

透気試験は圧縮強度試験と同様の供試体を用いて、養生終了後、供試体を乾燥炉(40°C)にて脱水し、透気セルに圧縮空気を注入し、試験体内部を透過した空気流量が定常となったことを確認した上で、水中置換方により透気量を測定し、式(1)により透気係数を求めた。

$$K = \frac{2P_2hr}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここに、K：透気係数(cm/sec)、 P_1 ：載荷圧力(N/mm^2)、 P_2 ：大気圧(N/mm^2)、h：供試体の厚さ(cm)、Q：透気量(cm^3/sec)、A：透気面積(cm^2)、r：気体の単位体積重量(N/mm^3)

3. 実験結果と考察

3.1 細骨材粉体比の影響

細骨材粉体比を、100%、80%、60%と変化させた時の圧縮強度、曲げ強度、曲げタフネスの結果を図-1、図-2、図-3 にそれぞれ示す。

図-1 より、細骨材粉体比が高くなるにつれ、圧縮強度はわずかに減少する挙動を示すが、ほとんど差はない。逆に、曲げ強度(図-2)、曲げタフネス(図-3)は細骨材粉体比が高くなるとともに増加した。特に 60%と 80%ではその差が顕著である。従って、本研究の範囲内では、100%、80%、60%の細骨材粉体比のうち、80%が最もバランスが取れていることがわかる。

3.2 フライアッシュ置換率と繊維種類による影響

細骨材粉体比を 80%で固定し、フライアッシュ置換率と繊維の種類による影響を検討した。

フライアッシュの置換率を、70%、50%、30%と変化させた時の圧縮強度、曲げ強度、曲げタフネス、透気係数を繊維種類別に、図-4、図-5、図-6、図-7 にそれぞれ示す。強度・透気試験結果一覧を表-4 に示す。

図-4 から図-7 より、フライアッシュの置換率が高くなると、強度特性および物質移動抵抗性(透気係数は

表-3 モルタルのフレッシュ試験結果一覧

名称	スランプフロー (mm)	流下時間 (sec)	空気量 (%)
SB60	495	6.5	-
SB80	495	5.7	-
SB100	585	5.7	-
FA30-PP	600	4.7	11.6
FA50-PP	360	10.7	12.1
FA70-PP	650	4.4	9.1
FA30-RF	595	5.5	9.9
FA50-RF	415	6.7	11.6
FA70-RF	660	4.6	8.6

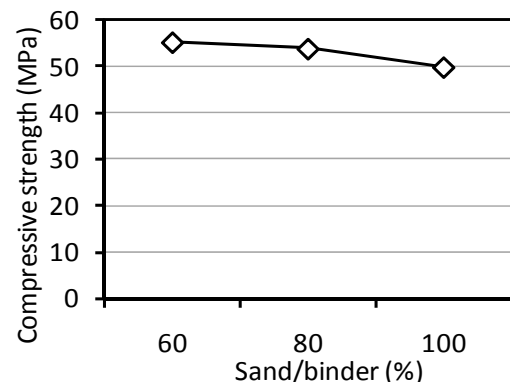


図-1 細骨材粉体比を変化させた時の圧縮強度

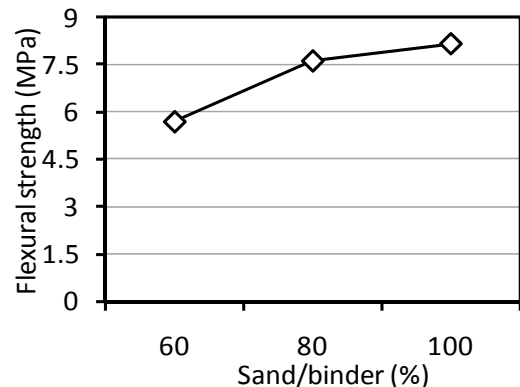


図-2 細骨材粉体比を変化させた時の曲げ強度

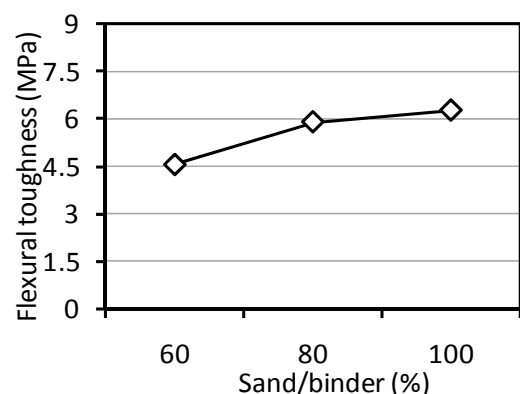


図-3 細骨材粉体比を変化させた時の曲げタフネス

増加) がともに減少する挙動を示した。圧縮強度(図-4)に関しては、置換率が増加すると線形的に減少するが、曲げ強度(図-5)、曲げタフネス(図-6)は置換率 50%と70%の間ではあまり変化は見られない。しかし、図-7においては、置換率70%の透気係数は50%の透気係数と比較し、PPで約5倍、RFで約7倍大きく、強度だけでなく物質移動抵抗性においても低下する結果が得られた。

図-4 から図-7 より、RF と PP では若干の差異は見られるが、強度特性および物質移動抵抗性はほぼ同程度であり、繊維種類による影響はほとんど無いことが確認できる。

3.3 既往の論文との比較

既往の論文⁴⁾より、プレーンモルタル(W/C=32%, S/C=134%), PPモルタル(同配合で繊維混入量 2%Vol.)と、本研究で実施したリサイクル繊維を用いたフライアッシュの置換率 30%, 70%の曲げ荷重-中央変位曲線を図-8 に示す。本研究で実施した範囲内で最も低強度の70%でさえも、既往の論文のモルタルよりも高靱性・高強度となる結果となった。

表-4 強度・透気試験結果一覧

名称	圧縮強度	曲げ強度	曲げタフネス	透気係数
	f_c (MPa)	f_b (MPa)	f_t (MPa)	$K \times 10^{-12}$ (mm/s)
SB60	55.2	5.70	4.56	-
SB80	53.8	7.61	5.91	-
SB100	49.8	8.15	6.28	-
FA30-PP	45.3	7.30	5.83	1.73
FA50-PP	33.3	4.57	3.82	1.66
FA70-PP	18.9	4.24	3.65	12.40
FA30-RF	49.1	6.94	5.15	2.90
FA50-RF	35.0	4.57	4.17	1.75
FA70-RF	19.9	4.87	3.81	8.59

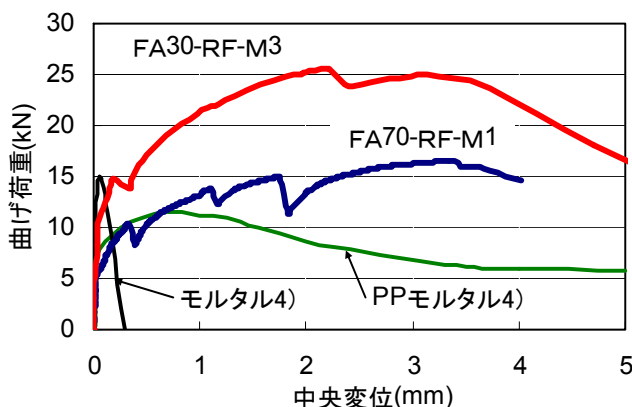


図-8 既往の論文⁴⁾と比較した曲げ荷重-中央変位曲線

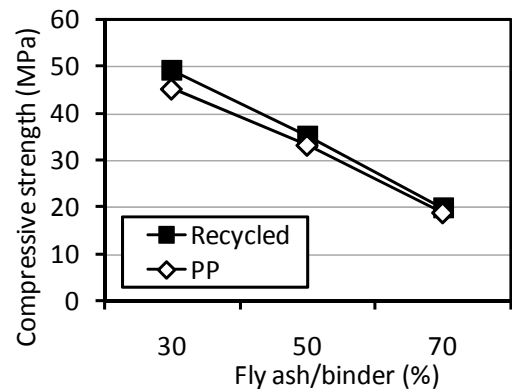


図-4 フライアッシュの置換率を変化させた時の圧縮強度

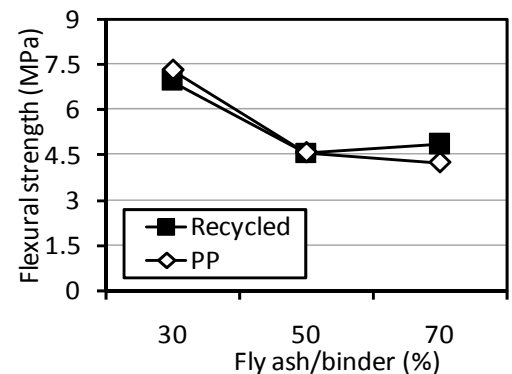


図-5 フライアッシュの置換率を変化させた時の曲げ強度

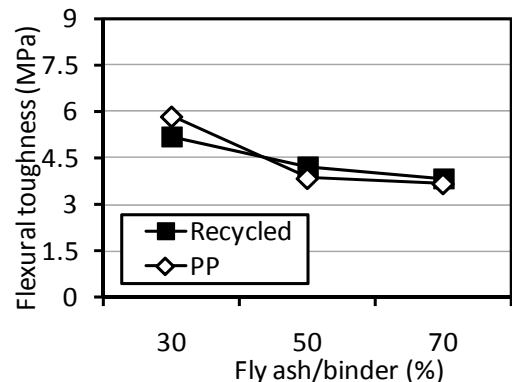


図-6 フライアッシュの置換率を変化させた時の曲げタフネス

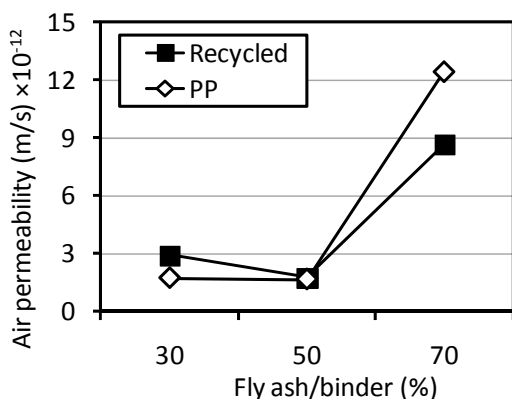


図-7 フライアッシュの置換率を変化させた時の透気係数

3.4 環境影響評価

環境影響評価として本研究では、地球温暖化を引き起こす主要な温室効果ガスである CO₂ の排出量を算出した。各ケースにおける材料使用量(t)に、資材製造原単位(表-5)⁵⁾を乗ずる事によって、CO₂ 排出量を算出した。結果を表-6、図-8 に示す。混和剤に関しては使用量が少ないため本研究では省略した。また、繊維に関しての CO₂ 排出量も既存のデータがないため、本研究では考慮しなかった。

表-5 より、普通ポルトランドセメントの環境負荷が他マトリクス材料と比較し大幅に大きい。従って、細骨材粉体比が大きいほど、またフライアッシュの置換率が高ければ高いほど CO₂ 排出量を削減できる。

本研究で対象とした配合では、特に、フライアッシュの置換率を 30%から 70%に変えた場合、CO₂ 排出量を 60%以上も削減できることが分かる。

4. まとめ

- (1)本実験では、繊維補強フライアッシュモルタルの最適細骨材粉体比は 80%であることが確認された。
- (2)フライアッシュの置換率を 30%, 50%, 70%と変化させた場合、強度は置換率の増加と共に減少するが、物質移動抵抗性は置換率 30%と 50%ではほとんど変化せず、70%のみ大幅に低下した。
- (3)本研究より、リサイクル繊維とポリプロピレン繊維の種類による影響はほとんど無い事が確認された。
- (4)最も低強度の 70%でさえも、既往の論文のモルタルよりも高靱性・高強度となる結果となった。
- (5)セメントの環境負荷が他のマトリクス材料と比較し非常に大きく、細骨材粉体比が大きいほど、フライアッシュの置換率が高ければ高いほど CO₂ 排出量を、削減できる事が確認された。

今後、再生骨材を利用した検討も行っていく予定である。また、リサイクル材料を使用した場合の環境評価方法の確立、コンクリートの基本性能（力学的特性や耐久性）と環境評価結果を総合的に評価し、適切な材料設計が可能となる枠組みの検討が必要となる。

参考文献

- 1) 守分敦郎, 羽瀧貴士, 櫛田政雄: PET ボトルのリサイクル材でつくる短繊維補強コンクリート, セメント・コンクリート, No. 694, 2004 年 12 月, pp. 20-25.
- 2) 土木学会: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127
- 3) 氏家勲, 長瀧重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集, 第 396 号/V-9, 1988 年 8 月
- 4) 川又篤, 高橋貴象, 堀越哲郎, 松岡茂: 繊維補強セメント複合材料の基礎性状に関する実験的研究
- 5) (社)日本コンクリート工学協会: 環境時代におけるコンクリートイノベーション, コンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会, 2008 年

謝辞: 本研究を行うにあたり、材料を提供して下さいった東亜建設工業株式会社 濱田洋志氏, 羽瀧貴士氏, 株式会社ブリヂストン 石関嘉一氏, ならびに東京大学生産技術研究 岸・加藤研究室の皆様へ深く感謝致します。

表-5 資材製造原単位 (kg CO₂/ton)

項目	CO ₂ 原単位
普通ポルトランドセメント	765.5
フライアッシュ	17.9
細骨材	3.4

表-6 各ケースにおける CO₂ 排出量 (kg CO₂/m³)

名称	材料別排出量			総排出量
	C	FA	S	
SB60	532.0	5.3	2.0	539.4
SB80	489.2	4.9	2.5	496.5
SB100	453.9	4.5	2.9	461.4
FA30-PP	489.2	4.9	2.5	496.5
FA50-PP	339.1	7.9	2.4	349.5
FA70-PP	198.3	10.8	2.3	211.4
FA30-RF	489.2	4.9	2.5	496.5
FA50-RF	339.1	7.9	2.4	349.5
FA70-RF	198.3	10.8	2.3	211.4

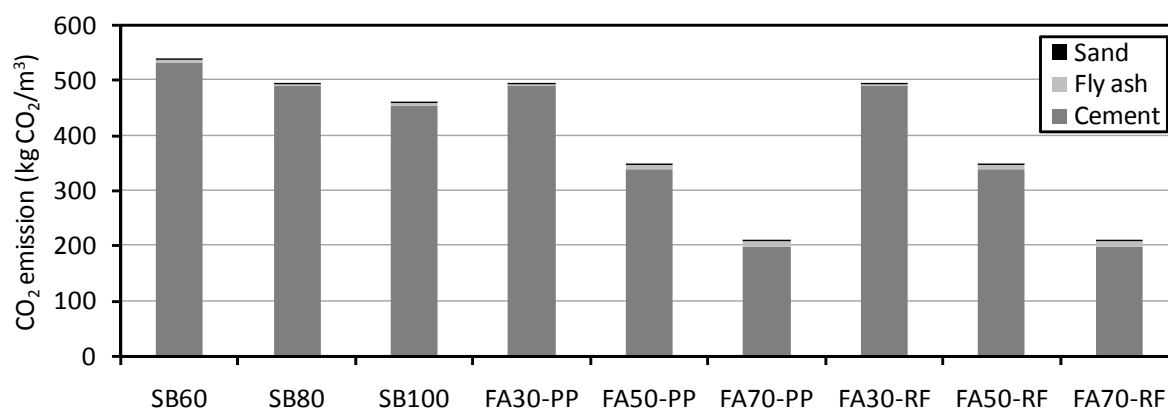


図-9 各ケースにおける単位体積二酸化炭素排出量