

論文 コンクリートの力学特性を考慮した環境負荷物質排出量と建物の環境影響評価

高巢 幸二*1・松藤 泰典*2

要旨: コンクリートの構成材料から環境負荷物質排出量を算定し、各種コンクリートの性能の比較分析を行い、コンクリートの力学特性を考慮した環境影響評価を行った。コンクリートの圧縮強度は養生条件に依存するので単位圧縮強度あたりの環境負荷物質排出量も養生条件に依存した。同強度を実現するための環境負荷物質排出量は、フライアッシュ外割混合コンクリートの方が無混合より小さくなり、フライアッシュ外割混合の有効性が確認できた。供用期間を超長期とし耐久設計基準強度のみで設計した場合の中規模集合住宅の構造躯体にフライアッシュ外割混合コンクリートを使用すると無混合に比べてCO₂排出量を削減できた。

キーワード: CO₂排出量, 性能考慮, フライアッシュ, 外割混合, 力学特性, 建物の環境影響評価

1. はじめに

現在、コンクリートは建築分野における基幹材料の一つであり、その特性を考慮すると、当面、その地位は揺らぎそうもない。2008年度の我が国のレディーミクストコンクリート生産量は1億m³を超えており、膨大な資源とエネルギーを消費している¹⁾。一概にコンクリートと言っても、一般的な普通コンクリート、高い圧縮強度を有する高強度コンクリート、高い流動性を有する高流動コンクリート、乾燥収縮・中性化抑制効果が高い高耐久性コンクリート等、様々な性能を有するコンクリートが存在する。特に建築分野では、その種類が顕著に多くなっている。近年、フライアッシュを混合したコンクリートが注目されはじめており、筆者らはフライアッシュを外割混合したコンクリートが無混合のコンクリートよりも高い強度発現性状を有することを示している²⁾。フライアッシュは火力発電所からの産業副産物であるため、その生成に関わるCO₂排出量等は、フライアッシュを使用した製品には算定されていない。従って、このような産業副産物をできるだけ大量に使用することは環境負荷低減に寄与できると考えられる。

また、社会活動の営みと共に温室効果ガスであるCO₂が排出されているが、我が国では1億m³を超えるレディーミクストコンクリートの生産に伴って膨大なCO₂が排出されている。コンクリートを使用した建築物の環境影響評価を行う場合、建築分野で使用するレディーミクストコンクリートの原単位は、1995年産業連関表から算定された値である0.246t-CO₂/m³を一律に適用する場合が多く、コンクリートの主原料であるセメントの製造に伴うCO₂排出量としては0.803t-CO₂/tを適用している場合が多い³⁾。前述した通りコンクリートの性能は様々で

あり、さらにリサイクル材料を原料にしたコンクリートに対して、その性能を考慮してCO₂排出量を算定する必要がある。また、単位物性あたりのCO₂排出量という概念は以前から存在しているが、建物のLCA指針³⁾では、設計基準強度(F_C)の違い、及び高炉セメント使用の有無に関して検討しているのみで、コンクリートの性能を考慮したCO₂排出量の算出には至っていない。

本研究はコンクリートの構成材料から環境負荷物質排出量を算定し、各種コンクリートの性能の比較分析を行い、コンクリートの力学特性を考慮した環境影響評価を行った。環境影響評価では、産業副産物であるフライアッシュ使用の効果、及び養生条件の違いについても考慮した。また、分析結果を利用して建物の構造体におけるコンクリート使用量に対するCO₂排出量を算定した。

2. 分析概要

2.1 使用データ

表-1に本分析で使用したコンクリートの調合、及び表-2に各種コンクリートの材齢28日、材齢91日の標準養生、40℃気中養生の力学特性を示す。分析に使用したデータは、参考文献⁴⁾⁵⁾⁶⁾に掲載されている北九州市立大学内で実施した実験データである。なお、40℃気中養生というコンクリートの強度発現には厳しい環境下での実験結果についても本分析に使用した。

2.2 各種コンクリート製造に伴う環境負荷物質排出量

表-3にコンクリートの構成材料の環境負荷物質原単位を示す。コンクリートの構成材料の内、普通ポルトランドセメント、砕石、砂利のCO₂排出量原単位は、横山ら⁷⁾が算定した2000年産業連関表による最新の算出結果を利用した。SO_x、NO_x排出量原単位は2000年産業連関

*1 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科 准教授 工博 (正会員)

*2 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科 教授 工博 (正会員)

表による算定結果が未だ整備されていないので 1995 年産業連関表による日本建築学会データベース³⁾を利用した。表-3 を基に、各調合に基づいて構成材料の環境負荷物質排出量を積み上げ、各種コンクリートの CO₂, SO_x, NO_x 排出量を算定し、環境影響評価を行った。なお、本分析ではフライアッシュの環境負荷物質排出量を考慮していない。これは、フライアッシュが従来産業廃棄物として処理されており環境負荷物質原単位が整備されていないからである。また、フライアッシュが有価物として流通している割合は、2007 年度実績で 0.66%であり⁸⁾、そのほとんどが産業廃棄物として処理されているので、フライアッシュの生成過程で排出される CO₂ は火力発電による電力生産に算入することが妥当であると考えられる。今後、有価物としての流通が増加した場合はフライアッシュの原単位を考慮する必要がある。実験データは海砂を使用した時の値であるが、現在海砂の原単位は整備されていない。本分析では原単位データが算定されている砂利のデータを便宜的に使用して算定した。

表-3 環境負荷物質原単位

コンクリート構成材料	環境負荷物質排出量		
	CO ₂ (kg/kg)	SO _x (g/kg)	NO _x (g/m ³)
普通ポルトランドセメント	0.684	0.189	1.390
碎石	0.008	0.013	0.047
砂利	0.012	0.016	0.057

今後、海砂のデータが整備された時には、改めて海砂のデータで再計算する予定である。また、各種コンクリートの環境負荷物質排出量を圧縮強度で除し⁹⁾材齢 28 日

表-1 調合

調合記号	W/C (%)	W/(C+F) (%)	単位質量 (kg/m ³)				
			W	C	FA	S	G
G65-65	65	65	185	285	0	837	974
G65-35		35			244	566	
G65-25		25			455	331	
G55-55	55	55	185	336	0	810	953
G55-45		45			75	727	
G55-35		35			192	596	
G55-25		25			404	361	
G45-45	45	45	185	411	0	781	920
G45-35		35			117	651	
G45-25		25			329	415	
G35-35	35	35	185	529	0	736	867
G35-25		25			211	501	
G35-20		20			396	295	
G26-26		26			0	737	
G26-22	26	22	165	631	100	626	868
G26-19		19			200	515	
G26-17		17			300	403	
G26-16		16			400	292	

表-2 各種コンクリートの力学特性

調合記号	圧縮強度 (N/mm ²)				静弾性係数 (kN/mm ²)				割裂引張強度 (N/mm ²)	
	28日標準	91日標準	28日40°C	91日40°C	28日標準	91日標準	28日40°C	91日40°C	28日標準	28日40°C
G65-65	20.5	24.6	14.7	11.9	29.1	32.2	18.6	16.5	1.9	1.5
G65-35	30.3	45.4	26.4	27.3	29.8	33.8	22.9	22.9	2.3	1.9
G65-25	44.8	64.0	37.1	40.0	29.4	34.0	23.4	23.6	3.8	2.9
G55-55	40.3	42.0	25.1	22.9	34.3	33.0	23.2	23.7	3.4	2.0
G55-45	41.4	51.5	30.2	29.7	36.6	34.6	27.5	26.8	3.1	2.4
G55-35	45.2	60.2	37.8	37.4	32.9	39.5	27.8	28.6	2.7	2.5
G55-25	58.9	68.1	51.7	49.9	33.5	35.5	29.6	29.6	3.1	3.2
G45-45	46.3	50.1	30.3	28.7	33.6	34.3	26.1	27.1	3.0	1.9
G45-35	51.7	64.3	39.9	38.8	35.7	37.5	32.2	27.4	3.9	2.9
G45-25	63.6	71.5	60.9	59.6	35.9	38.4	33.8	32.6	3.7	3.4
G35-35	63.3	66.3	48.1	46.8	37.0	36.4	31.4	29.8	3.8	3.5
G35-25	80.0	82.1	74.5	75.6	38.1	39.8	30.4	36.2	4.2	3.8
G35-20	81.0	84.4	74.4	78.6	38.3	40.7	35.5	35.7	4.0	3.5
G26-26	87.3	96.9	76.8	80.7	36.2	43.7	36.3	37.7	4.7	4.1
G26-22	89.1	119.9	98.9	104.2	43.2	45.9	39.9	37.8	5.5	4.7
G26-19	94.7	114.8	98.7	115.7	41.8	47.9	38.4	40.4	4.6	5.0
G26-17	106.7	121.3	99.4	111.0	44.3	45.4	38.9	41.1	4.2	4.2
G26-16	94.9	111.9	103.6	105.5	42.1	43.1	37.2	38.0	3.8	5.0

表-4 環境負荷物質排出量

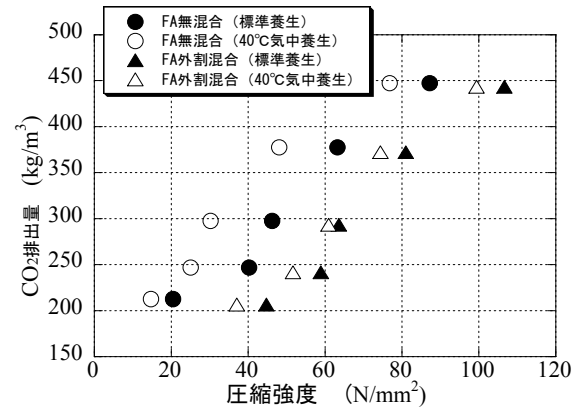
調査記号	環境負荷物質排出量		
	CO ₂ (kg/m ³)	SO _x (g/m ³)	NO _x (g/m ³)
G65-65	212.6	79.9	489.6
G65-35	209.4	75.6	474.2
G65-25	206.7	71.8	460.8
G55-55	247.0	88.9	558.0
G55-45	246.0	87.5	553.3
G55-35	244.5	85.4	545.8
G55-25	241.8	81.7	532.4
G45-45	297.7	102.1	659.0
G45-35	296.2	100.1	651.6
G45-25	293.5	96.3	638.2
G35-35	377.5	123.0	818.0
G35-25	374.8	119.3	804.6
G35-20	372.4	116.0	792.9
G26-26	447.3	142.3	959.9
G26-22	446.0	140.6	953.6
G26-19	444.7	138.8	947.2
G26-17	443.4	137.0	940.9
G26-16	442.1	135.2	934.5

における単位圧縮強度あたりの環境負荷物質排出量，材齢 91 日における単位圧縮強度あたりの環境負荷物質排出量の値を算定し，調査・養生・材齢による違いなど，コンクリートの性能とコンクリートが地球環境に与える影響の関係を検討した。

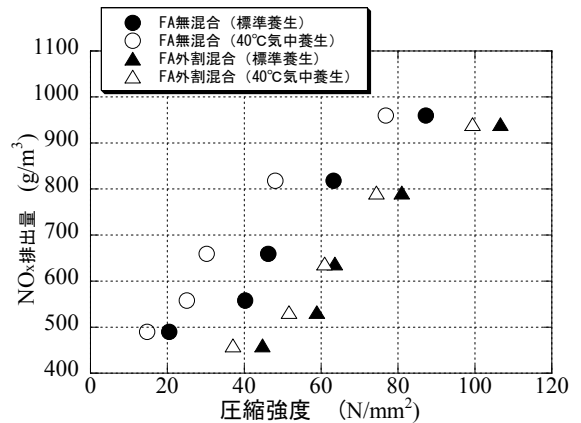
3. 分析結果及び考察

3.1 各種コンクリートの環境負荷物質排出量

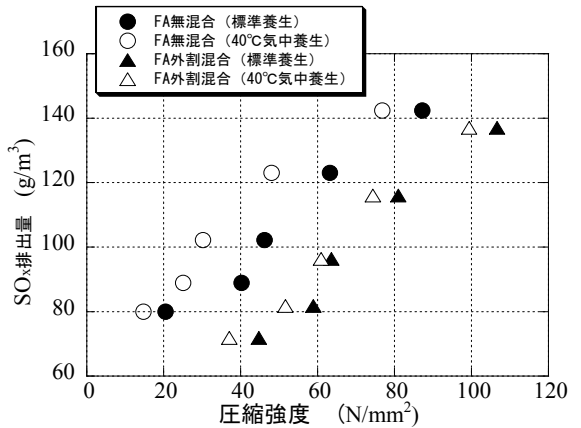
表-4 に各種コンクリートの環境負荷物質排出量の算定結果を示す。表-4 から単位フライアッシュ量一定の基で W/C が小さいほど環境負荷物質排出量は大きく，W/C 固定で W/(C+F) が大きいほど環境負荷物質排出量も大きくなっている事が分かる。これは，単位フライアッシュ量一定の基で W/C が小さいほど使用するセメント量が多くなり，W/C 固定で W/(C+F) が大きいほど使用する細骨材量が多くなるためである。図-1 に環境負荷物質排出量と 28 日圧縮強度の関係を示す。圧縮強度を普通強度域から超高強度域まで変化させると CO₂，SO_x，NO_x いずれも増大している。40℃気中養生下では標準養生より圧縮強度が小さいので同じ圧縮強度を得る場合の環境負荷物質排出量は標準養生の方が有利になる。従って，コンクリートの養生条件が環境負荷に影響を与えることが確認できた。また，フライアッシュを外割混合すると同じセメント量でも強度が増進するため，フライアッシュ無混合のものより右側にシフトした。従って，同強



(a) CO₂ 排出量



(b) NO_x 排出量



(c) SO_x 排出量

図-1 環境負荷物質排出量と 28 日圧縮強度の関係

度を実現するための環境負荷物質排出量は，フライアッシュを外割混合したコンクリートの方が無混合より有利となる。図-2 に CO₂ 排出量と 28 日静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は圧縮強度ほど単位セメント量の影響を受けないので CO₂ 排出量と 28 日静弾性係数の関係は，圧縮強度ほど正の相関が認められない。しかしながら，40℃気中養生の場合には正の相関が認められた。これは，単位セメント量の小さい調査において静弾性係数は養生条件の影響を受けるため所定の静弾性係数が確

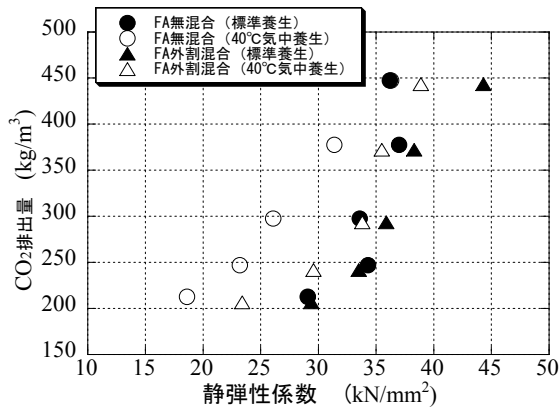


図-2 CO₂ 排出量と 28 日静弾性係数の関係

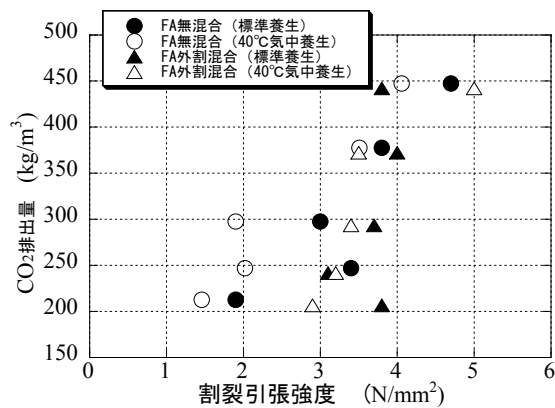


図-3 CO₂ 排出量と 28 日割裂引張強度の関係

保できないためである。フライアッシュを外割混合したコンクリートでは、40℃気中養生の厳しい環境下の養生でも、圧縮強度及び静弾性係数が確保できるのでCO₂排出量と28日静弾性係数の関係は正の相関が認められなかった。図-3にCO₂排出量と28日割裂引張強度の関係を示す。標準養生、40℃気中養生共に28日割裂引張強度が増加するとCO₂排出量が増加する傾向が認められた。従って、割裂引張強度では圧縮強度と同様に単位セメント量の影響を受けることが明らかになった。フライアッシュ外割混合コンクリートでは、無混合よりも28日割裂引張強度とCO₂排出量の関係に正の相関が認められなかった。これはフライアッシュを外割混合すると単位セメント量が小さくても割裂引張強度を大きくすることができるためである。

図-4に材齢28日における単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と圧縮強度の関係を示す。フライアッシュ無混合コンクリートは圧縮強度が大きくなるほど単位圧縮強度あたりのCO₂排出量は小さくなっている。また、40℃気中養生は水中養生に比べ、すべての圧縮強度領域において単位圧縮強度あたりのCO₂排出量が大きくなっている。この違いは圧縮強度の違いによるものであるが、このことから養生条件がコンクリートの圧縮強度に影響

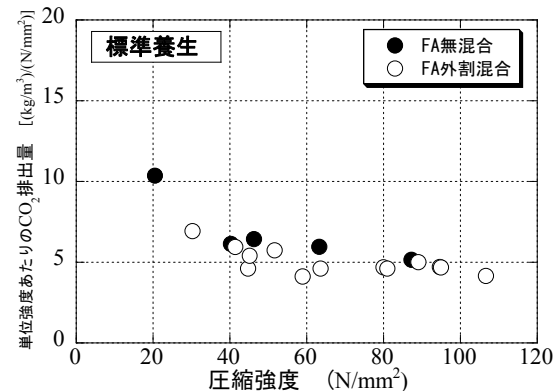
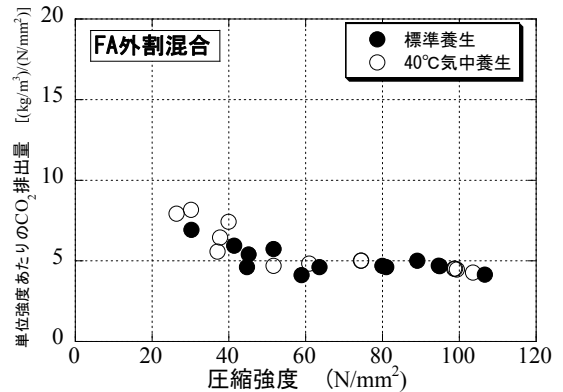
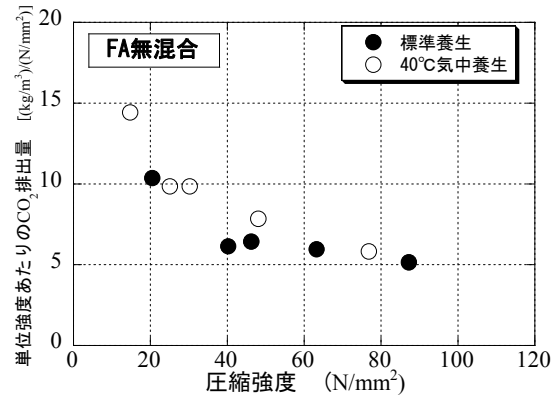


図-4 材齢 28 日における単位圧縮強度あたりの CO₂ 排出量と圧縮強度の関係

を及ぼし、結果的に単位圧縮強度あたりのCO₂排出量にも影響を与えることが確認できた。フライアッシュ外割混合コンクリートの材齢28日における単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と圧縮強度の関係は、60N/mm²付近までは、圧縮強度が大きくなるほど単位圧縮強度あたりのCO₂排出量は小さくなる傾向を示した。圧縮強度が60N/mm²以上になると単位圧縮強度あたりのCO₂排出量はほぼ一定となった。これは、単位セメント量が多い場合、フライアッシュの混合による圧縮強度の増進が小さくなるためである。また、フライアッシュ無混合の場合と比べると養生条件による変化は小さい。フライアッシュを混合すると養生条件が厳しい環境下でも強度発現性が良いので、単位圧縮強度あたりのCO₂排出量を低くすることが可能である。また、標準養生におけるフライ

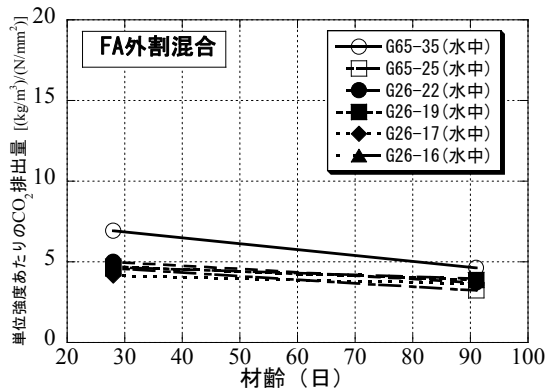
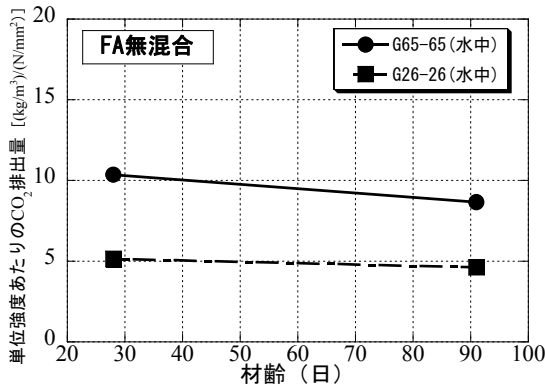


図-5 単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と経時変化

アッシュ外割混合コンクリートとフライアッシュ無混合コンクリートを比較すると、圧縮強度が小さいほど単位圧縮強度あたりのCO₂排出量に大きな差が見られ、圧縮強度が大きくなるほどその差は小さくなる。このことからフライアッシュ混合によるCO₂排出量の削減効果は圧縮強度がより小さい時ほど有効である。

3.2 材齢による影響

図-5に標準養生における単位圧縮強度あたりのCO₂排出量の経時変化を示す。どの調査においても材齢が経過してもCO₂排出量は変化しないが、圧縮強度が増加するので単位圧縮強度あたりのCO₂排出量が小さくなった。フライアッシュを混合した場合、W/C=26%では材齢の経過による単位圧縮強度あたりのCO₂排出量に大きな変化はないが、W/C=65%ではCO₂排出量が大きく削減されている。特に材齢91日のG65-25はW/C=26%のどの調査よりも単位圧縮強度あたりのCO₂排出量が小さくなった。

図-6に標準養生における材齢28日、材齢91日の単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と圧縮強度の関係を示す。同一調査、同一の養生条件でも全体として強度の高い材齢91日の方が単位圧縮強度あたりのCO₂排出量は小さくなっている。また材齢91日の方が圧縮強度60N/mm²付近で単位圧縮強度あたりのCO₂排出量が小さくなる特徴がより顕著に現れている。このことから、フライアッシュのように長期強度が期待できる混和材を使用する場合、材齢91日の方が単位圧縮強度あたりのCO₂排出

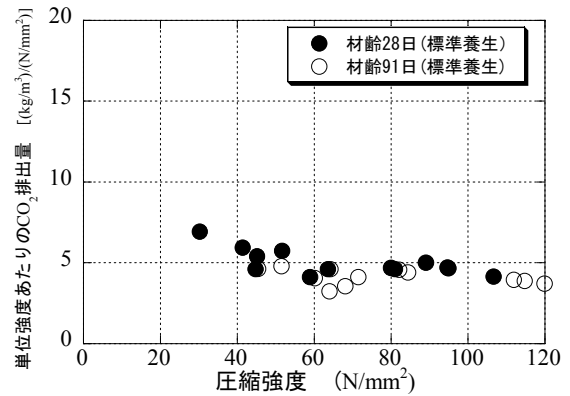


図-6 単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と圧縮強度の関係

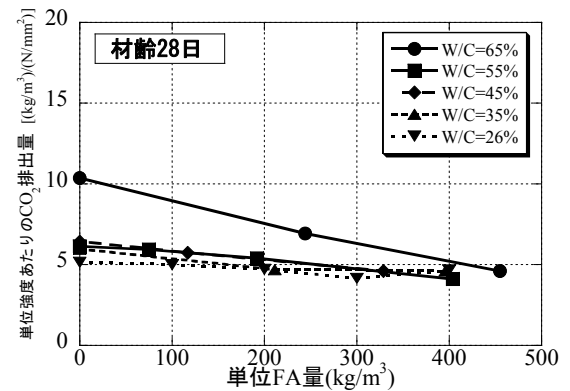


図-7 単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と単位FA量の関係

量が小さくなり、同じCO₂排出量でも圧縮強度に関するコンクリートの性能を向上できる。

3.3 単位フライアッシュ量による影響

図-7に単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と単位フライアッシュ量の関係を示す。W/C=65%の時は他の水セメント比より上側に分布しているが、単位フライアッシュ量の変化による単位圧縮強度あたりのCO₂排出量の変化量が大きくなっている。従ってW/C=65%の時は、フライアッシュの大量混合による単位圧縮強度あたりのCO₂排出量の削減に効果がある。

4. ケーススタディによる建物の環境影響評価

本分析結果を利用してフライアッシュ無混合コンクリート及びフライアッシュ外割混合コンクリートを使用した場合のRC造集合住宅のコンクリート使用量によるCO₂排出量を算定した。集合住宅のモデルは、参考文献³⁾の集合住宅評価のモデルを使用した。表-5にモデル集合住宅の概要を示す。本ケーススタディは、同程度の圧縮強度を有する調査の異なるコンクリートの使用量からCO₂排出量を比較することを目的としている。従って、表-2より標準養生における材齢28日圧縮強度が45N/mm²と同程度の圧縮強度を示したフライアッシュ無

表-5 モデル集合住宅の概要

建物用途	集合住宅	構造	RC造
階数	地上9階	住戸数	88戸
延床面積	7280.85m ²	コンクリート使用量	0.403m ³ /m ²

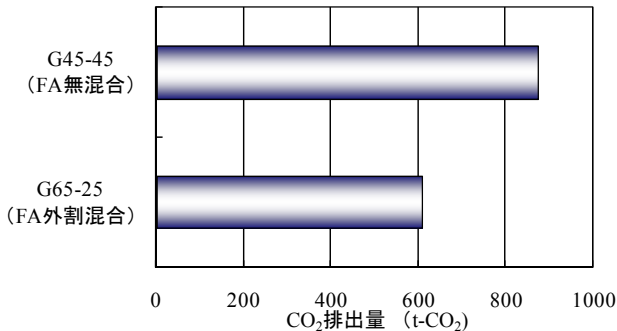


図-8 集合住宅のコンクリート使用に伴うCO₂排出量

混合の G45-45 及びフライアッシュ外割混合の G65-25 のデータを使用した。ここで、JASS5 において超長期 (200 年) の供用を考慮した耐久設計基準強度は $F_d=36 \text{ N/mm}^2$ である¹⁰⁾。このとき、JASS5 に従って、構造体強度補正値を $_{28}S_{91}=3$ 、コンクリートの強度の標準偏差を $\sigma=0.1F_m$ (F_m : 調合管理強度) としたときの調合強度を計算すると $F=45.3 \text{ N/mm}^2$ になる。従って、本ケーススタディは、供用期間を超長期とした集合住宅のコンクリート使用量におけるCO₂排出量のケーススタディと位置づけることができる。なお、一般的な集合住宅の設計基準強度は $F_c=36 \text{ N/mm}^2$ を超えることはそれほど無いので、本ケーススタディは若干高め品質管理強度を設定していることになる。図-8 にモデル集合住宅のコンクリート使用に伴うCO₂排出量を示す。供用期間を超長期とした中規模集合住宅の構造躯体にフライアッシュ外割混合コンクリートを使用すると無混合に比べてCO₂排出量を計算上約 267t-CO₂削減できた。従って、コンクリートにフライアッシュを外割混合するとCO₂排出量の削減に効果的であることが窺えた。

5. まとめ

- 現時点で廃棄物として扱われCO₂原単位を設定されていないリサイクル材料であるフライアッシュを外割混合したコンクリートに対して力学特性を考慮して環境負荷物質排出量の算定を試みた。その結果、同程度の圧縮強度を実現するための環境負荷物質排出量は、フライアッシュ外割混合コンクリートの方が無混合より小さくなり、フライアッシュ外割混合における環境負荷低減への有効性が確認できた。
- フライアッシュ外割混合コンクリートの材齢 28 日における単位圧縮強度あたりのCO₂排出量と圧縮強度の関係は、60N/mm² 付近までは圧縮強度が大きくな

るほど単位圧縮強度あたりのCO₂排出量は小さくなる傾向を示し、圧縮強度 60N/mm² 以上になると圧縮強度の増進が小さくなるため単位圧縮強度あたりのCO₂排出量はほぼ一定となった。

- 供用期間を超長期とし耐久設計基準強度のみで設計した場合の中規模集合住宅の構造躯体にフライアッシュ外割混合コンクリートを使用すると、セメント量を抑えて必要な圧縮強度を確保できるので無混合に比べてCO₂排出量を大きく削減することができた。

謝辞

本研究のデータ整理に関して本学大学院生・坂本和也君、同卒論生・植木満宏君 (現: 株式会社大林組) から協力を得た。末尾に記して謝意を表す。

参考文献

- “過去の出荷実績の推移”, ZENNAMA ホームページ, 2009-12-28, <http://www.zennama.or.jp/3-toukei/nenji/pdf/H16-20suii.pdf>, (参照 2010-1-13)
- 高巢幸二他: 40°C 気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp201-206, 2008
- 日本建築学会: 建物の LCA 指針・建築物の LCA ツール, 2006.11
- 北村利英他: 40°C 環境下における石炭灰外割混合コンクリートの強度性状に関する研究 その 2 材齢 91 日までの強度試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), A-1, pp.331-332, 2007
- 山内信英他: 40°C 環境下における石炭灰外割混合コンクリートの強度性状に関する研究 その 3 高強度領域, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), A-1, pp.655-656, 2008
- 坂本和也他: 40°C 環境下における石炭灰外割混合コンクリートの強度性状に関する研究 その 4 強度発現特性と内部組織の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), A-1, pp.885-886, 2009
- 横山計三他: 2000 年産業連関表によるエネルギー消費量・二酸化炭素排出量原単位の算出と建物評価, 日本建築学会環境系論文集, No.589, pp75-82, 2005.3
- “石炭灰の利用状況”, 財団法人石炭エネルギーセンターホームページ, 2010-3-30, <http://www.jcoal.or.jp/coalash/pdf/CoalAshH19utilization1.pdf>, (参照 2010-4-2)
- 福島敏夫他: 各種コンクリートの地球環境影響度評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), A-1, pp.1181-1182, 2009
- 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2009.3