

論文 環境負荷低減に対する高強度混和材の効果

山本賢司*1・盛岡実*1・渡邊芳春*2・坂井悦郎*3

要旨：高耐久性が要求される箇所にコンクリートを打設する場合、普通コンクリートで複数回の施工を行うよりも、耐用年数の長い高強度コンクリートで打設した方が環境負荷低減に対して有効であることが LCA 評価により明らかになった。また、エトリンガイト生成系高強度混和材を使用して高強度コンクリートを作製することにより、設計強度を満足するための単位セメント量を低減することができ、さらに環境負荷低減となることが判った。また、この高強度コンクリートは単位セメント量が少ないため、破碎しても微粉の発生を少なく抑えることができ、全量を骨材として再利用できる可能性のあることも判った。

キーワード：高強度混和材, CO₂原単位, 単位セメント量, 環境負荷低減, 再生骨材

1. はじめに

近年、環境問題が広く取り上げられ、'97年12月に京都で開催された地球温暖化防止国際会議において、CO₂削減に向けて具体的な数値目標が示されたことは記憶に新しい。セメント・コンクリート産業は全 CO₂ 排出量に占める比率が大きく、CO₂削減に関して社会からこの分野に大きな期待が寄せられている。

材料レベルでこの問題に取り組むべき課題は多いが、環境負荷の小さい材料を選定することや、コンクリートのリサイクルシステムを構築することが有効であると思われる。前者については、高炉スラグやフライアッシュ等の産業廃棄物や石灰石微粉末等の利用が挙げられる。今日まで、これらの材料を使用して耐久的な構造物や機能性を有するコンクリートを設計するために、基礎的な研究が数多く行われている^{1)~5)}。また、①コンクリートの品質に悪影響を与えず、②新たな環境汚染を起こすこともなく、③経済的であり、④安定した需給体制を確立できる、環境負荷低減型コンクリートのための材料評価システムも提案されている⁶⁾⁷⁾。

近年、コンクリートに要求される性能は多様化している。そのひとつとして高強度コンクリートが挙げられ、その需要は今後益々高まっていくであろうと予想される。一般的に高強度コンクリートは単位セメント量が高く、コンクリート配合から算出される CO₂ 排出量は普通コンクリートと比較して大きくなる。一方、高強度コンクリートは普通コンクリートと比較して耐用年数が長いことや、構造物の部材厚を薄くすることができ、コンクリート使用量を減じることが可能となるため、一義的にコンクリート配合のみから環境負荷を評価することはできない。

環境負荷を評価する有効な手段としては、LCA (=Life Cycle Assessment) 手法を用いた CO₂ 排出量の定量化が考えられている⁸⁾。LCA とはある材料やエネルギー等がその全生涯において環境にどのような負荷を与えているかを比較・評価するものであり、今後環境負荷低減に果たす役割は大きい。本研究では LCA の観点から環境負荷低減に対する高強度混和材の効果について検討し、また、この混和材を用

*1 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所 工修 (正会員)

*2 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特混研究所リーダー (正会員)

*3 東京工業大学助教授 工学部無機材料工学科 工博 (正会員)

いた高強度コンクリートのリサイクルについても検討した。

2. 実験

2.1 使用材料

表-1 に本研究で使用した材料と性質を示す。エトリンナイト生成系高強度混和材(以下, Add. と表記)は無水石膏をベースとし, 粉末状の高性能減水剤を含有しており, セメントに対して外割 15%添加して使用した。

表-1 使用材料の性質

使用材料	性 質
セメント	普通セメント, 比重 3.16, ブレン比表面積 3300cm ² /g
細骨材	新潟県姫川産川砂, 比重 2.62, FM : 2.71
粗骨材	新潟県姫川産川砂利, 比重 2.64, FM : 6.73, G _{max} : 25mm
混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤 ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
石灰石微粉末 (LSP)	比重 2.70, ブレン比表面積 3500cm ² /g
高強度混和材 (Add.)	比重 2.40, ブレン比表面積 6100cm ² /g

2.2 実験項目

以下の項目について実験を行った。

(1) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠した。

(2) 引張強度試験

JIS A 1113 に準拠した。

(3) 曲げ強度試験

JIS A 1106 に準拠した。

(4) 断熱温度上昇試験

φ150×200mm の鋼製容器にコンクリートを密閉し, 空気循環式の断熱温度上昇測定装置を用いて行った。尚, 練上がり温度を 20℃とし, 測定を 4 日まで行った。

2.3 コンクリート配合と CO₂ 原単位

表-2 にコンクリートの配合を示す。配合 No. 1 及び 2 は普通コンクリートであり, 配合 No. 3 及び 4 は高強度コンクリートである。このうち, 配合 No. 2 と 4 は単位セメント量を減じて高強度混和材を使用した。また, 配合 No. 1 と 3 ではそれぞれリグニン系 AE 減水剤, ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を添加してスランプの調整を行った。

表-3 に土木学会地球環境委員会 LCA 研究小委員会が推奨する各材料の CO₂ 原単位⁹⁾を示す。但し, 高強度混和材については当方で試算を行った。これらの値を用いてコンクリート 1m³当たりの CO₂ 原単位を算出した。

表-3 CO₂ 排出量の原単位⁹⁾

材 料	CO ₂ 原単位 [kgC/kg]
ポルトランドセメント	0.228
砂・砂利	0.00154
Add.	0.014

表-2 コンクリート配合

配合 No.	記 号	SL (cm)	air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
						W	C	S	G	LSP	混和剤	Add.
1	N280	5	3	65	48	182	280	880	960	—	1.68	—
2	N200-Add.	5	3	70	48	162	200	875	955	100	—	30
3	N430-PC	8	3	41	46	178	430	791	935	—	0.86	—
4	N300-Add.	8	3	42	46	145	300	857	1014	—	—	45

2.4 高強度混和材を混和した

コンクリートのリサイクルに関する検討

高強度コンクリートを構造物としての寿命を終えた後に解体し、骨材としてリサイクルして次の構造物に利用するカスケードリサイクルについての検討を行った。Add. を用いた高強度コンクリートについて、材齢 28 日で圧縮強度を確認した後、ジョークラッシャーで破砕して再生骨材を調製した。JIS A 1104 及び 1110 に基づき、調製した再生骨材の試験を行い、JIS A 1102 により粒度分布を調べた。

表-4 の配合で、得られた再生骨材の全量を用いてコンクリートを作製した。配合 No. 1 及び 2 はリグニン系 AE 減水剤を用いた普通コンクリートであり、配合 No. 3 は高強度混和材を使用した高強度コンクリートである。このうち、配合 No. 1 では再生骨材の代わりに川砂利（以下、バージン骨材と表記）を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 単位セメント量の低減

図-1 に圧縮強度の測定結果を示す。普通コンクリートは共に 35N/mm² 程度であり、高強度コンクリートでは共に 70 N/mm² を超えている。高強度混和材の使用の有無で比較すると、コンクリートの種類によらず、材齢 7 日では高強度混和材を使用した方が低くなっているが、材齢 7 日から材齢 28 日にかけての強度の増進が大きく、材齢 28 日では逆に高い値を示している。以上の強度結果と表-2 のコンクリート配合より、同一の設計強度を満足するために必要な単位セメント量を比較すると、高強度混和

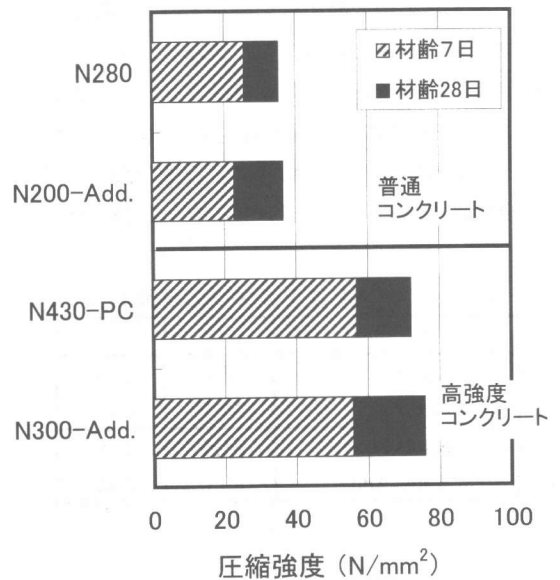


図-1 コンクリートの種類と圧縮強度

材を使用することにより、普通コンクリートで 80kg/m³ 程度、高強度コンクリートで 130kg/m³ 程度単位セメント量を低減することが可能であることが判った。単位セメント量を低減できることにより、同一強度に対する温度上昇量を小さくできることが予想されたため、断熱温度上昇試験を行った。一般に断熱温度上昇曲線は下に示す式(1)で近似される。

$$\Delta T = K(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

ここで

ΔT : 断熱温度上昇量(°C)

K : 最高温度上昇量(°C)

a : 実験定数

t : 材齢

表-4 コンクリート配合

配合 No.	骨材種別	SL (cm)	air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						W	C	S	G	混和剤	Add.
1	バージン	5	4	58	46	175	300	831	984	1.5	—
2	再生	5	4	58	46	175	300	831	924	1.5	—
3	再生	12	3	46	48	160	300	876	898	—	45

表-5に本実験の結果から求めた K 及び a の値を示す。高強度混和材を添加することにより単位セメント量を低減でき、普通コンクリートの場合には約 8℃、高強度コンクリートの場合には約 13℃温度上昇量を小さくすることができる。これにより、水和熱によるひび割れの発生を低減することが可能となることが判った。

表-5 断熱温度上昇式中の定数 K, a

コンクリートの種類	K(℃)	a
N280	38.4	0.86
N200-Add.	30.3	0.72
N430-PC	53.5	1.10
N300-Add.	40.1	0.89

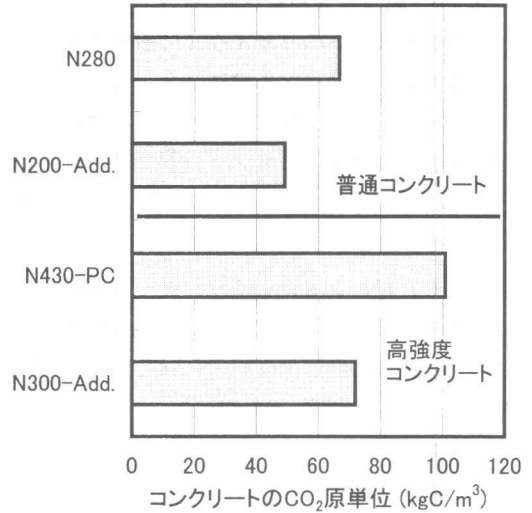


図-2 コンクリートの種類とCO₂原単位

3.2 環境負荷評価

図-2 に表-2 及び表-3 をもとに算出した各コンクリート 1m³ 当たりの CO₂ 原単位を示した。高強度混和材を使用することによって、普通コンクリートで 17.7kgC/m³ (26.5%)、高強度コンクリートで 28.8kgC/m³ (28.6%) の環境負荷低減となった。高強度コンクリートは単位セメント量が高く、コンクリート配合から算出される CO₂ 原単位は普通コンクリートと比較して大きくなる。しかし、流水や砂礫によって激しい摩耗作用を受ける水力ダムの堰堤等、高耐久性が要求される箇所にコンクリートを打設する場合には事情が異なってくる。図-3 に各地の水力ダムで打設されたコンクリートの圧縮強度と、一定期間を経てコンクリートが摩耗した時点で当方で調査を行った平均摩耗深さの関係を示す。圧縮強度が高くなるほど平均摩耗深さは指数関数的に減少しており、本実験で得られた圧縮強度 75N/mm² の高強度コンクリートの耐用年数は、強度 35N/mm² の普通コンクリートの約 5 倍であることが判る。

ここで、高強度コンクリートと普通コンクリートの LCA 評価を行うため、例として以下のような設定をした。ダム堰堤に 5000 m³ のコ

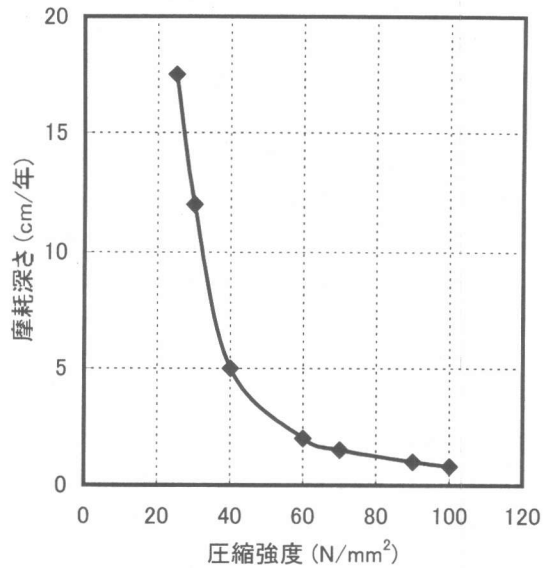


図-3 圧縮強度と摩耗深さの関係

ンクリートを打設し、同一経過年数に対して、普通コンクリートを使用した場合には、少なくとも 3 回の補修工事を行ったものと仮定する。1 回の補修工事につき、1000 m³ (全体の 20%) のコンクリートを新たに打設したとして環境負荷評価を行った。表-6 にその結果を示す。富配合の高強度コンクリートの場合、コンクリートの CO₂ 原単位は 100.7kgC/m³ であり、経

表-6 環境負荷評価結果

コンクリートの種類	コンクリートのCO ₂ 原単位(kgC/m ³)	経過年数に対する打設量(m ³)	経過年数に対するCO ₂ 排出量(kgC)
N430-PC	100.7	5000	503,500
N280	66.7	8000	533,600
N300-Add.	71.9	5000	359,500

経過年数に対する打設量は5000 m³であるので、503,500 kgCとなる。一方、普通コンクリートのCO₂原単位は66.7 kgC/m³であり、経過年数に対する打設量は8000 m³であるので、533,600 kgCとなる。また、高強度混和材を用いた高強度コンクリートのCO₂原単位は71.9 kgC/m³であり、経過年数に対する打設量は5000 m³であるので、359,500 kgCとなる。従って、LCAによる環境負荷評価では、高強度コンクリートの方が環境負荷低減型コンクリートといえる。また、高強度混和材を用いて高強度コンクリートを作成した場合には、さらに環境負荷低減となることが判った。

なお、上記の値は材料レベルで求められるCO₂排出量であり、重機の作業や材料運搬等、施工時に発生するCO₂排出量については考慮されていない。従って、普通コンクリートを使用し、複数回の施工を行う場合には、さらに大きな環境負荷増加となる。

3.3 高強度混和材を混和した

コンクリートのリサイクルに関する検討

表-7に圧縮強度75N/mm²前後のコンクリートを破碎して得られた再生骨材の物理的性質を示す。吸水率が6%と大きいのが、砂利の周囲に付着したモルタル(付着モルタルという)の吸水によるものと思われる。また、図-4に5mm下を除いた粗骨材に分類される部分の粒度と、5mm下の細骨材に分類される部分の粒度分布を示す。破碎に供した高強度コンクリートはセメント量が小さいため、微粉の発生が少なく、再生骨材に占める細骨材部分は約20%であった。粗骨材部分は1回の破碎で土木学会

表-7 再生骨材の物理的性質

表乾比重	容積重量(kg/l)	実績率(vol. %)	吸水率(wt. %)
2.48	1.4	59.8	6.1

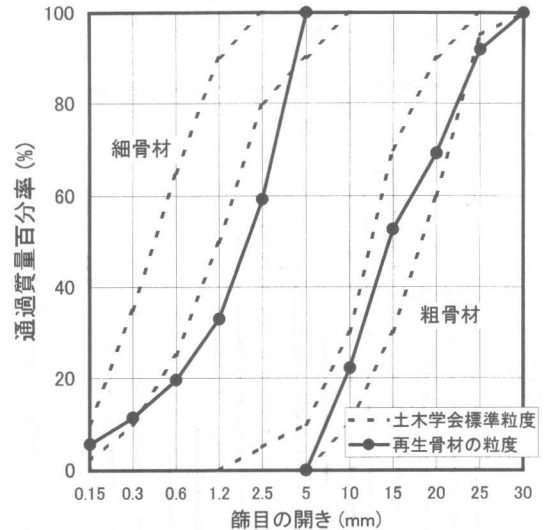


図-4 再生骨材の粒度分布

の標準粒度範囲内にはほぼ収まったが、細骨材部分は粗い側へ外れていた。しかし、細骨材の一部として使用するのに支障ないと思われたので、再生骨材の全量を用いて5mm下の部分を細骨材とみなし、表-4の示方配合から単位細骨材量を補正した。尚、高強度コンクリートの粉碎性については、ジョークラッシャー等の破碎機を通して強制的に破碎を行う場合には、普通コンクリートと大差ないと思われる。

図-5 に再生骨材を使用したコンクリートの材齢 28 日の強度を、バージン骨材を使用したものと併せて示す。再生骨材を使用した普通コンクリートでは、バージン骨材を使用した普通コンクリートとほぼ同等の強度が得られた。また、高強度混和材を使用することで 65N/mm^2 程度の強度が得られ、再生骨材を高強度コンクリートの骨材としても利用できることが判った。また、曲げ、及び引張強度においても強度が増加しており、高強度混和材を使用することでモルタル部分の強度が増加したためと考えられる。耐久性等の検討に関しては、今後の課題である。

尚、本実験は、未来開拓学術研究推進事業「ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発」(代表長瀧重義)の一環として実施したものである。

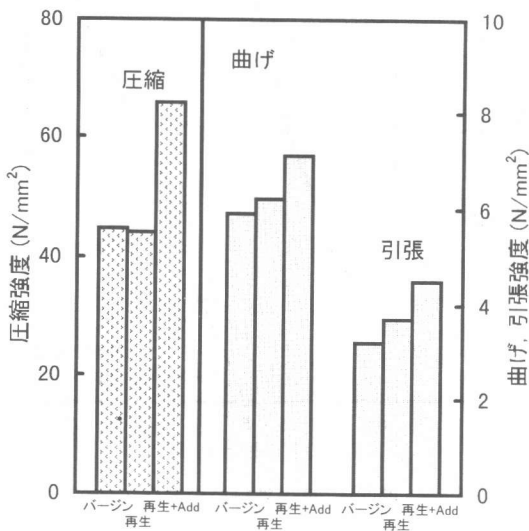


図-5 再生骨材を使用したコンクリートの性状

4. まとめ

1) 高耐久性が要求される場合には、複数回の打設を必要とする汎用コンクリートより、高強度コンクリートを使用した方が LCA の観点から有効である。また、高強度混和材を使用することで、単位セメント量を減じることができ、環境負荷低減となり、セメントの水和熱に伴う温度ひび割れの発生を低減することも可能とな

る。

2) 高強度混和材を用いた高強度コンクリートのリサイクルについて検討したところ、破碎して全量を再生骨材として利用できる可能性を見いだすことができた。

参考文献

- 1) 坂井悦郎・大門正機・鯉淵清・近田孝夫：化学組成や粉末度の異なる高炉セメント硬化体の炭酸化、コンクリート工学年次論文報告集, vol. 18, No. 1, pp. 735~740, 1996
- 2) 大賀宏行・國府勝郎・坂井悦郎・大門正機：フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性、コンクリート工学年次論文報告集, vol. 18, No. 1, pp. 339~344, 1996
- 3) 星野清一・大場陽子・坂井悦郎・大門正機：石灰石微粉末添加によるセメントペーストのレオロジー特性変化の解析、セメント・コンクリート論文集, No. 49, pp. 414~419, 1995
- 4) 星野清一・大場陽子・坂井悦郎・大門正機：無機粉体の粒子特性とセメントペーストのレオロジー、セメント・コンクリート論文集, No. 50, pp. 186~191, 1996
- 5) 坂井悦郎・中村明則・大場陽子・大門正機：カルシウムアルミネートの水和におよぼす石灰石微粉末の影響、無機マテリアル, vol. 4, pp. 121~126, 1997
- 6) 三木浩司・小澤一雅：環境負荷低減型コンクリートのための材料評価システム、コンクリート工学年次論文報告集, vol. 19, No. 1, pp. 1111~1116, 1997
- 7) 岡村甫：環境負荷低減型コンクリートの提案、ダム技術, No. 141, pp. 4~7, 1998.6
- 8) 鴨志田隼司：廃棄物の資源化による循環型社会の構築をめざして、セメント・コンクリート, No. 617, pp. 1~7, 1998.7
- 9) 土木学会地球環境委員会環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会、土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会講演要旨集, 1997