

論文

[1014] エトリンガイト系混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの性質

渡邊芳春*¹・友澤史紀*²・川瀬清孝*³・坂井悦郎*⁴

1. はじめに

従来、エトリンガイトの生成を利用した高強度コンクリートの製造に関しては、エトリンガイトの生成時期のコントロールが重要であり、そしてエトリンガイトの空隙充填能力が大きいことと、それ自身の結晶強度が高いことにより硬化体の密実化と微細構造の強化を促し、これによって高強度が得られるとされている[1][2][3]。更に、エトリンガイトを生成させた高強度コンクリートの特徴として(1)気乾養生強度が高くなること(2)温度依存性が小さいこと(3)凍結融解抵抗性の改善に有効であること等も示され[4]、このようなエトリンガイトの作用効果を最大限に利用した高強度技術としては、既に、常圧蒸気養生を行うパイル等の高強度PC製品等に実用化されている[5]。

本報告は、エトリンガイトの生成を利用した高強度化技術を『現場打ち高強度コンクリート』への適用を目的に、作業性の改善も含めて新たに開発した『現場打ち用のエトリンガイト系混和材』を用いた高強度コンクリートの基本物性と硬化体の微細構造を、混和材を用いない系と比較して調べたものである。

尚、本研究は建設省New RCプロジェクトの一環として、建築研究振興協会内に『シグマ研究会』を設立して、指導を受け実施した。

2. 実験概要

普通セメントポルトランド(OPCと略す)、新潟県姫川産川砂及び砕石、エトリンガイト系混和材(Ett.と略す)、高性能A/E減水剤(β -NS系、WRAと略す)を用い、混和材を添加した系と無添加の場合について、水・結合材比を変えて、以下の項目について比較実験を行った。

- フレッシュコンクリートの性質としてスランプの経時変化、凝結試験、断熱上昇温度の測定。
- 硬化コンクリートの性質として圧縮強度、静弾性係数、曲げ、割裂引張強度の測定。
- 模擬部材(模擬部材は900L×500W×300Hの寸法の900L×300Hの側面だけを解放し、他の5面を20cmの厚さの発泡スチロールで断熱した)による熱履歴とコアによる圧縮強度の測定。
- モルタルによる空隙量と圧縮強度の測定及びSEMによる水和生成物の結晶形態の観察。

実験を進めるに当たり、コンクリートの練混ぜは遊星型強制練りミキサー(容量100ℓ)を使用し、断熱温度上昇量は雰囲気温度追従型の試験機を用いて測定した。空隙測定には水銀圧入式(半径18Å~7.5μm)のポロシメーターを用いた。

供試体の成型は棒状パイプレーターを使用し、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数はφ10×20cm、曲げ強度は10×10×40cm、割裂引張強度はφ15×15cm、コア強度はφ10×20cm寸法の供試体を用いて測定した。なお、モルタルによる試験では4×4×16cmの供試体を用いた。

試験方法は、いずれもJIS及びASTM、その他の関連試験方法に準じた。

-
- *1 電気化学工業(株)青海工場 特殊混和材部 研究室研究リーダー(正会員)
 - *2 東京大学教授 工学部 建築学科、工博(正会員)
 - *3 新潟大学教授 工学部 建設学科、工博(正会員)
 - *4 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 技術課課長、工博(正会員)

表-1、2にエトリンガイト系混和材の化学成分とコンクリート調合条件を示す。混和材は減水剤を含有し、その減水性も改善していることから、Ig. lossが多く、結合材量が少なくなっている。

表-1 Ett. の化学成分

Ig. loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
12.2	0.2	27.5	6.4	1.0	30.6	3.1	17.7	0.75	0.20	99.65

3. 実験結果

3-1. フレッシュコンクリートの性質

(1) スランプの経時変化

図-1にスランプの経時変化を示す。混和材を添加すると、水・結合材比が低くなるほどスランプの経時変化も小さくなる傾向を示している。この理由はスランプ保持性能を有する混和材の単位量が多くなる事によるものと思われる。

(2) 凝結試験結果

図-2にウェットスクリーニングしたモルタルのプロクター貫入による凝結試験結果を示す。

混和材を添加した系の凝結時間は、20℃において同一水・結合材比の無添加の場合と比較すると約4時間程度遅延しているが、水・結合材比が小さくなるほど短くなる傾向を示している。

(3) 断熱温度上昇

a. 断熱温度上昇曲線

図-3に水・結合材比30%の断熱温度上昇曲線を示す。混和材を添加した場合は無添加と比べて同様な温度上昇曲線を示すが、発熱開始時間は約8時間遅れ、また、最高到達温度は約13℃低い値を示した。なお、発熱曲線は次式[6]に近似する。

●混和材系： $\Delta T = 44.9(1 - \text{Exp}[-0.06t^{2.50}])$

●無添加： $\Delta T = 56.3(1 - \text{Exp}[-0.01t^{2.32}])$

表-2 コンクリート調合条件

最大骨材寸法等	※W/B (%)	Ett. 添加(kg/m ³)		無添加(kg/m ³)			
		s/a(%)	OPC	Ett.	s/a(%)	OPC	WRA
	40	48	300	60	—	—	—
Gmax25mm	35	48	333	66	43	506	10.36
SL21±2cm	30	45	375	75	42	596	11.92
air3±1%	25	38	520	104	※W/B=W/OPC+Ett. or W+WRA/OPC		
	20	38	600	120			

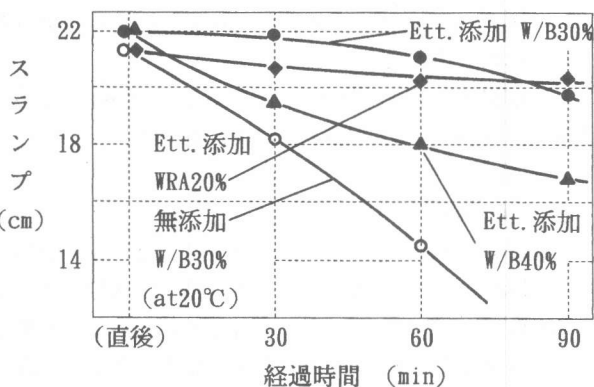


図-1 スランプの経時変化

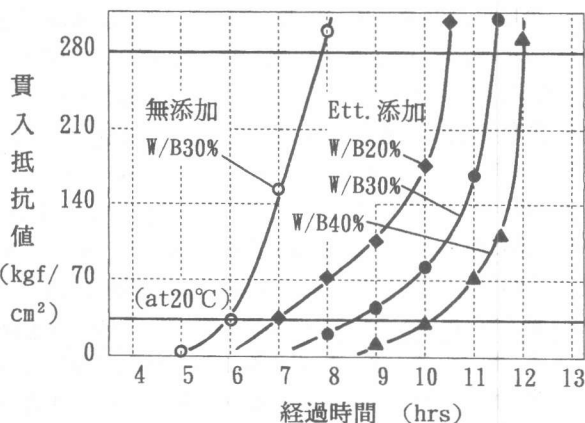


図-2 凝結試験結果

b. 単位結合材量と断熱温度上昇量の関係

図-4に単位結合材量と断熱温度上昇量の関係を示す。単位結合材量と断熱上昇温度量には直線関係が認められ、混和材を添加した系では同一結合材量の無添加の場合よりも、約4℃低い結果が得られた。

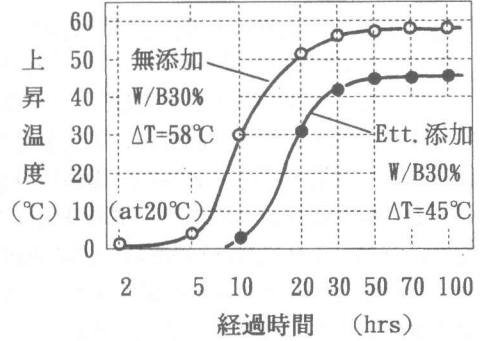


図-3 断熱温度上昇曲線

3-2. 硬化コンクリートの性質

(1) 圧縮強度

a. 標準養生における圧縮強度

図-5に強度発現性状、図-6に圧縮強度と結合材・水比の関係を示す。

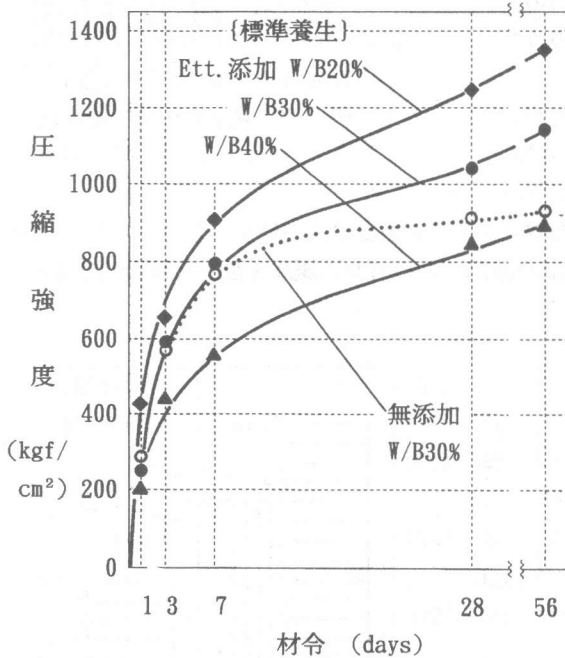


図-5 圧縮強度の発現性状

図-5に示すように、混和材を添加した系の圧縮強度の発現性は無添加と比較して、特に、材令7日以降の強度の伸びが大きく、材令が長くなるほど両者の強度差はさらに大きくなる傾向を示した。また、図-6の、結合材・水比と圧縮強度の関係では、混和材を添加した系の方が無添加の場合よりも、標準養生において約150 kgf/cm²高い値が得られている。

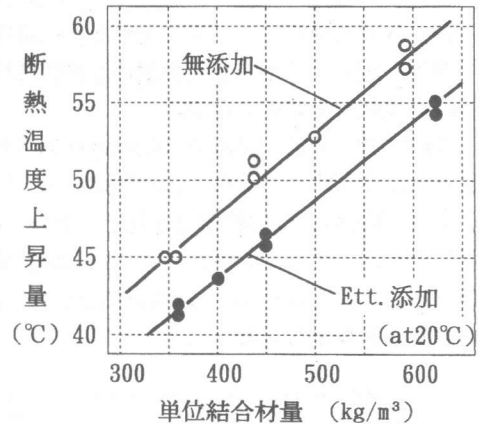


図-4 単位結合材量と断熱温度上昇量の関係

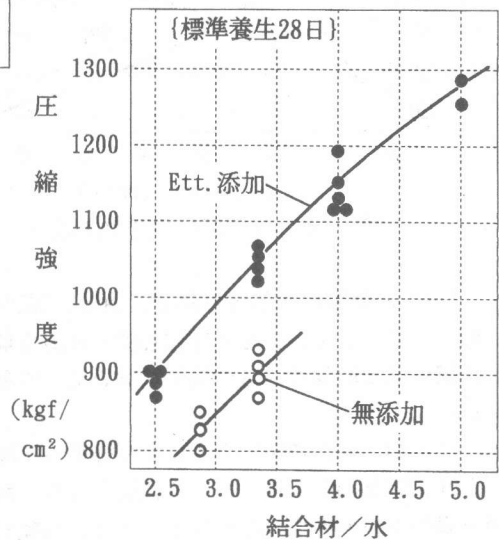


図-6 結合材・水比と圧縮強度の関係

b. 圧縮強度に及ぼす養生方法の影響

図-7に、混和材を添加した系の水・結合材比を変えて、さらに養生方法を標準養生、20℃室内での封緘養生、並びに、4日脱型後、気乾養生(20℃, RH 60%)とした場合の材令28日の圧縮強度の比較を示す。混和材を添加した系では、標準養生よりも気乾養生の方が、50 kgf/cm²程度高い強度を示し、封緘養生した場合は、その中間の強度となり、乾燥状態で強度が高くなり易い傾向を示している。

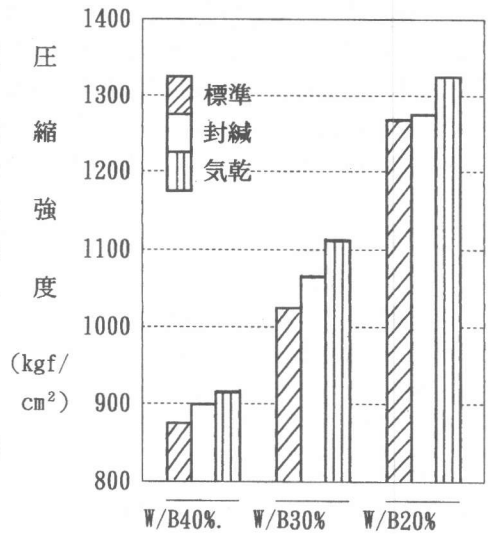


図-7 養生方法別圧縮強度 (Ett. 添加、材令28日)

c. 熱履歴を受けたコンクリートの圧縮強度

図-8に発泡スチロールで断熱した模擬部材の発熱曲線、図-9に標準養生供試体と模擬部材のコア強度の比較をそれぞれ示す。

模擬部材の最高到達温度は混和材添加系の方が、無添加に比べ約19℃低く、コア強度は約200 kgf/cm²、標準養生供試体強度では約150 kgf/cm²程度高い値を示している。また、いずれも供試体強度よりもコア強度が高い値を示しているが、混和材添加では約100 kgf/cm²高い値となり、混和材添加の系の方が熱履歴を受けた際の強度増加が著しい結果となった。

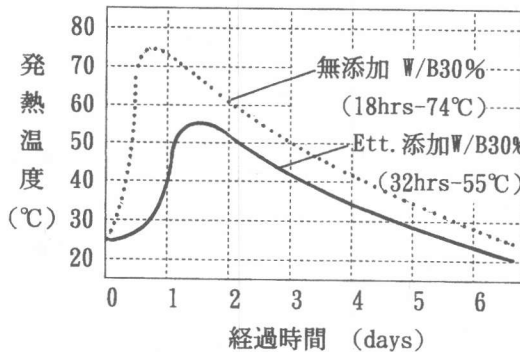


図-8 模擬部材の発熱曲線

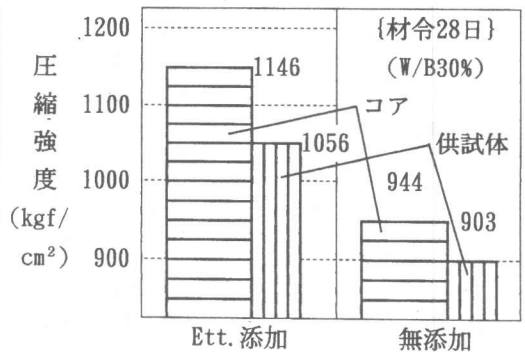


図-9 熱履歴を受けたコア強度の比較

(2) 圧縮強度と静弾性係数、曲げ、割裂引張強度の関係

図-10, 11, 12に圧縮強度と静弾性係数、曲げ、割裂引張強度の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係において、混和材の添加の有無や養生方法による影響は認められない。

また、図-11に示すように曲げ強度の圧縮強度に対する比率は、標準養生と封緘養生では1/10、気乾養生では1/13程度となり、図-12の割裂引張強度の圧縮強度に対する比率は標準養生と封緘養生の場合は1/14、気乾養生では1/18程度となった。

そして、いずれの場合も混和材の添加の有無による差は認められない。

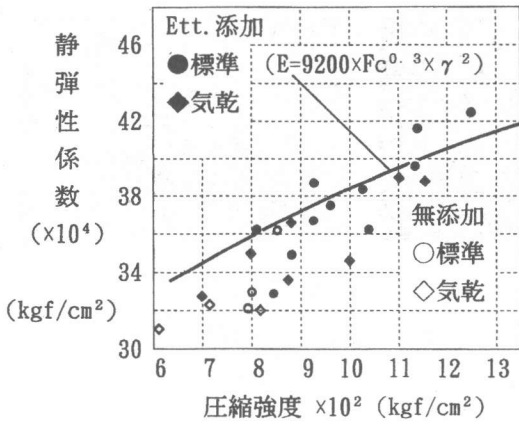


図-10 圧縮強度と静弾性係数の関係

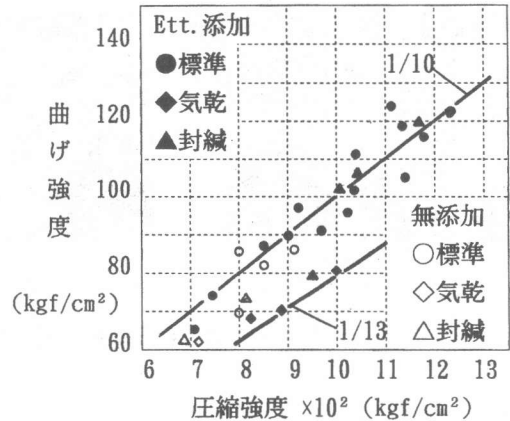


図-11 圧縮強度と曲げ強度の関係

(3) モルタル硬化体の微細構造

a. 空隙量と強度の関係

図-13にウェットスクリーニングしたモルタルの半径 $18\text{\AA} \sim 7.5\mu$ の範囲の空隙量と圧縮強度の関係を示す。

空隙量が少なくなるほど強度は高くなるが、混和材を添加した系では、空隙量に対する圧縮強度の傾きが大きくなる傾向を示している。このことは、混和材添加によって、微細構造が通常の場合と変化しているためと考えられる。

また、これは、材令7日以降の強度の伸びが大きい理由と思われる。

b. SEMによる水和生成物の観察

写真-1(a), (b), (c)に、水和物の形態を示す。

混和材添加の系では空隙中にエトリンライトが集中して生成し、C-S-Hでは針状のType Iが観察され、無添加のC-S-HはType IIの蜂の巣状であることが観察される。

混和材を添加した系は水和物が針状の結晶で構成され、また、空隙量が少なくなって密実化するほど針状結晶同志の絡み合いの程度が大きくなることにより構造的に強化されているものと思われる。この点についてはさらに詳細な検討が必要である。

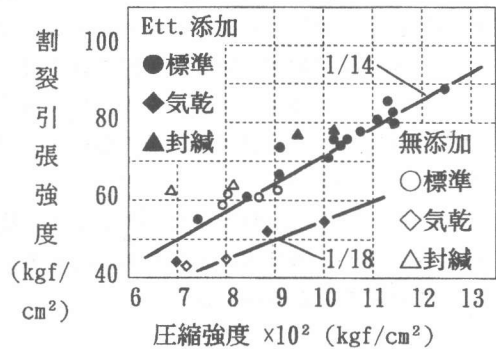


図-12 圧縮強度と割裂引張強度

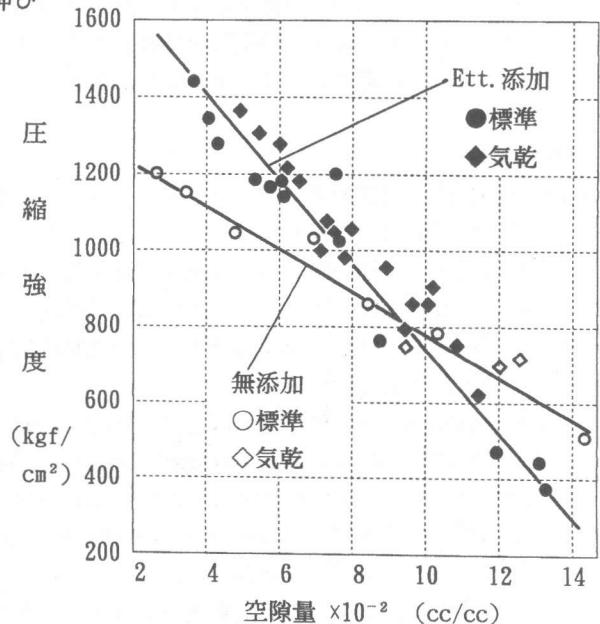
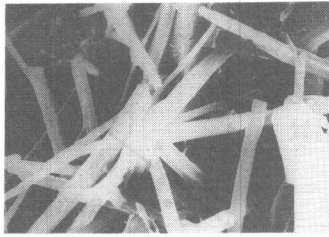
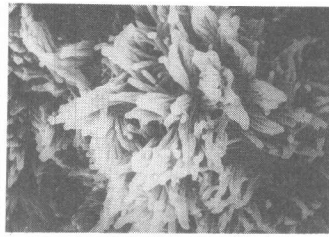


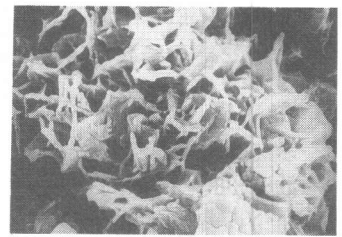
図-13 空隙量とモルタル強度の関係



(a)エトリンガイト



(b)C-S-H



(c)C-S-H

写真-1 水和物の結晶形態 {混和材を添加した系 (a), (b)、無添加 (c)}

4. まとめ

- エトリンガイトの生成を利用した混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの性質として、
- 1) 凝結は若干遅延するもののスランプの経時変化が小さく、断熱温度上昇量は同一単位結合材量の無添加と比較して4℃、同一水・結合材比では約1.3℃低い結果が得られた。また、標準養生における圧縮強度は同一水・結合材比の無添加の場合よりも約150 kgf/cm²高く、気乾養生された場合や熱履歴を受けると、更に、高くなる傾向を示すことが明らかとなった。
 - 2) 圧縮強度に対する静弾性係数や曲げ、割裂引張強度の関係は、混和材の添加の有無による影響は認められない。
 - 3) モルタル強度と空隙量の関係において、空隙量に対する強度の勾配が大きく、長期強度の伸びの良いことと微細構造が強化されていることが示唆され、水和物の構成は針状結晶が主体となっていることが判明した。

謝辞

エトリンガイト系混和材の開発とその物性等の評価に当たり、『シグマ研究会』の委員の東京理科大学清水先生、建設省建築研究所榎田室長、同 阿部室長、同 安田研究員、建築研究振興協会村田氏にご指導戴いたことを深謝致します。

参考文献

- [1] 中川晃次・渡邊芳春：セメント・コンクリートの高強度化、セラミックス、第17巻、第7号、pp. 502-07、1982. 7
- [2] 松永嘉久・渡邊芳春・中川晃次・坂井悦郎：エトリンガイト系混和材料の作用と多孔性制御、石膏と石灰、NO. 240、pp. 38-44、1992. 9
- [3] 内川浩・槻山興一：超速硬セメントの水和硬化体ペースト組織と強さ、窯業協会誌、83、[6]、pp. 38-43、1975. 6.
- [4] Nakagawa, K. and Watanabe, Y., et al: Adoption of Electrofusd Calcium Sulfoaluminate Clinker for Ultra High Strength Concrete, The V International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, Sp. III-1, 5, Sep. 1974
- [5] 影山博・中川晃次・永淵強：特殊混和材を用いた高強度コンクリート、材料、別冊、vol. 29、No. 318、pp. 220-225、1980. 3.
- [6] 山川秀治：暑中に打設した富配合なマスコンクリートの温度上昇特性に関する一考察、第36回土木学会年次講演会、NO. 5/V-21、pp41~42、1981