論文 35年間暴露した膨張コンクリートの諸特性

笹川幸男^{*1} 大塚哲雄^{*2} 白井健太郎^{*3} 坂井悦郎^{*4}

要旨:遊離石灰,アウインおよび遊離石膏を主要鉱物とするカルシウムサルフォア ルミネート系膨張材が開発されてから約40年が経過した。日本海沿岸地域にある 35年間経過した実構造物より試験体を採取し,同一条件下で暴露した普通コンクリ ートと比較した。35年間経過後も膨張コンクリートは,強度増進,中性化深さおよ び塩化物イオンの浸透深さ等の諸特性について耐久性を有していることが明らかと なった。

キーワード:膨張コンクリート,耐久性,カルシウムサルフォアルミネート

1. はじめに

我が国のセメント系膨張材が開発されてから 約40年が経過した。中でも膨張材の代表といえ る遊離石灰,アウインおよび遊離石膏を主要鉱 物とするカルシウムサルフォアルミネート系膨 張材は,乾燥収縮の低減,ケミカルプレストレ スの付与や自己収縮の低減を目的として多様な コンクリートに広く利用されている。

最近では,コンクリートの耐久性照査に関し て,コンクリート組織の緻密化や収縮によるひ び割れ低減を可能にする膨張材は益々その重要 性を増している¹⁾。これまで実構造物による膨 張コンクリートの耐久性については,材齢15~ 20年程度の研究報告があるものの,より長期的 な耐久性に関するデータの蓄積は十分とは言い 難い²⁾。特に超長期的な耐久性を要求されるよ うな構造物への膨張コンクリートの利用も開始 されており,膨張コンクリートの耐久性に関す るデータの蓄積は急務である。

本研究では,カルシウムサルフォアルミネー

ト系膨張材の工業生産が開始された直後,その 長期的な耐久性調査を目的に試験施工した膨張 コンクリートと普通コンクリート構造物から採 取したコアを用いて,同一条件下で35年間暴露 された膨張コンクリートの諸特性について普通 コンクリートと比較検討を行い,膨張材を混和 した膨張コンクリートの耐久性を検討した。

本研究で使用したカルシウムサルフォアルミ ネート系膨張材の水和反応は式(1)に示される もので,エトリンガイトの水和生成によってコ ンクリートやモルタルに膨張が付与されるもの である³⁾。

> $6Ca0 + 3Ca0 \cdot 3A1_{2}O_{3} \cdot CaSO_{4}$ $+ 8CaSO_{4} + 96H_{2}O$ $3(3Ca0 \cdot A1_{2}O_{3} \cdot 3CaSO_{4} \cdot 32H_{2}O)$ (1)

2. 実験方法

2.1 試験体を採取した建家の概要

試験体を採取した建家は,1964年11月~1965

*1 電気化学工業(株)青海工場 特殊混和材部 特殊混和材課 課長(正会員) *2 電気化学工業(株)青海工場 特殊混和材部 特殊混和材課 主事 *3 電気化学工業(株)青海工場 特殊混和材部 特殊混和材課 (正会員) *4 東京工業大学 助教授 大学院理工学研究科 工博(正会員)

表-2 コンクリートの配合表

コンクリートの話精	Gmax	SL	W/C	S/a	単 位 量 (kg/m³)				
	(mm)	(cm)	(%)	(%)	W	С	s	G	膨張材
普通コンクリート						350			
膨張コンクリート	25	18±2	57	43	200	304.4	805	1060	45.6

年3月の工期で,膨張コンクリートの長期的な 耐久性調査を目的として建設した広さ10.8m × 20m,高さ4.7m,軒先0.75mのコンクリート構 造の平屋試験棟であり,膨張コンクリートと普 通コンクリートを半分ずつ施工している。

表 - 1 に示す材料を用い,膨張材はカルシウ ムサルフォアルミネート系膨張材(以下 CSA 膨 張材と略す)を用いた。表 - 2 に CSA 膨張材を 混和した膨張コンクリートおよび膨張材無混和 の普通コンクリートの配合を示す。建設場所を 図 - 1 に示す。新潟県西頸城郡青海町にあり, 日本海沿岸部から内陸に約 1km に位置し,大気 中の飛来塩化物イオン量は,0.005~0.021mg/m³ 程度である。

- 2.2 試験体の採取
- (1) 試験体の採取:2001年11月,建家の屋上
 (鉄筋のかぶり厚さ 100mm,鉄筋比0.24%)
 からコアリングして試験体を採取した。試
 験体の採取場所を図-2に示す。
- (2) 測定項目と試験方法
 - 測定項目および使用した試験体を表 3 に 示す。
 - a) 圧縮強度:コアリングした供試体を
 60mm × 120mm に成型し,JIS A 1108に
 準じて測定した。
 - b) 引張強度:コアリングした供試体を
 60mm × 120mm に成型し, JIS A 1113に
 準じて測定した。
 - c) ヤング係数: JIS A 1149に準じて, 歪
 みゲージを用い, 60mm×120mmに成
 型し,試験体に静的載荷して応力-歪
 み曲線から割線弾性係数を求めた。

表 - 1 使用材料

種別	使用材料			
セメント	普通ポルトランドセメント			
	(電気化学工業社製)			
膨張材	カルシウムサルフォアルミネート			
	系膨張材(電気化学工業社製)			
混和剤	リグニンスルホン酸系減水剤			
細骨材	川砂 (新潟県姫川産)			
粗骨材	川砂利(新潟県姫川産)			



図 - 1 試験棟の建設場所



試験項目	試験方法	試験体				
圧縮強度	JIS A 1108	60mm×120mm コア供試体				
引張強度	JIS A 1113	60mm×120mm コア供試体				
ヤング係数	JIS A 1149	60mm×120mm コア供試体				
中性化深さ	フェノールフタレイン溶液による	割裂試験体の割裂面				
塩化物イオン量	コンクリート構造物の腐食・防食に関す	コア供試体の表面から深さ方向に				
	る試験法ならびに基準(案)(JCI-SC4)	20mm 間隔でスライスして調製				
細孔径分布	水銀圧入ポロシメーターによる	割裂試験体の中性化部分および未				
		中性化部分のペースト部位				
硬化体組織の観察	走査型電子顕微鏡(SEM)による	割裂試験体より分取				
水和物の分析	示差走査熱量測定 (DSC)による	割裂試験体より分取				

表-3 試験項目および試験方法

- d) 中性化深さ:フェノールフタレインの 1%エタノール溶液をコアの割裂面に噴 霧し,未変色部分の表層からの平均深 さを測定した。
- e) 塩化物イオン量:試験体の表面層から 所定の間隔でスライスした試験片を粉 砕後,電位差滴定法により全塩化物イ オン量を測定した。
- f) 細孔径分布:割裂試験体の中性化部分 および未中性化部分から分取したペー スト部分を用い,水銀圧入法で細孔径 分布を測定した。
- g) 硬化体組織の観察:割裂試験体の未中
 性化部分から分取した試験片を用い,
 走査型電子顕微鏡 (SEM) により硬化体
 組織を観察した。
- h) 水和物分析:割裂試験体の未中性化部 分から分取した試験片を用い,示差走
 査熱量測定(昇温速度:10 /min.)
 によって水和物の含有量を比較した。
- 3. 試験結果
- (1) 圧縮強度

図 - 3 に材齢7日から材齢35年にわたる膨張 コンクリートおよび普通コンクリートの圧縮強 度の推移を示した。これまでの調査で材齢22年 までは膨張コンクリートと普通コンクリートは



表 - 4 コンクリートの強度特性

	普通ンクリート	膨張コンクリート
圧縮強度 (N/mm ²)	63.9	65.2
引張強度 (N/mm ²)	5.48	5.42
ヤング係数 (N/mm ²)	3.68 × 10 ⁴	3.87 × 10 ⁴

ほぼ同様な強度であることが判明している⁴⁾。 材齢35年では膨張コンクリートが 65.2N/mm², 普通コンクリートが 63.9N/mm² とほぼ同等の圧 縮強度を示し,材齢22年時に比較して,いずれ のコンクリートも5N/mm²程度の強度増進が確認 された。このことから CSA 膨張材はコンクリー トの長期強度発現を阻害するものでないことが 確認できた。尚,いずれのコンクリ-トとも材 齢28日以降の長期材齢での強度増進が著しく大 きい原因として試験体の採取方法や採取部位等 の差異が考えられる。

(2) 引張強度およびヤング係数

表 - 4 に示すように,引張強度およびヤング 係数とも膨張コンクリートと普通コンクリート はほぼ同等であった。膨張コンクリートのヤン グ係数は圧縮強度の大きいことと関連して,普 通コンクリートより大きな値を示しており, Delayed Ettringite Formation のような長期におけ る異常膨張による微細ひび割れは生じていない と推察される⁵⁾。

(3) 中性化深さ

図 - 4 に材齢10年, 材齢22年および材齢35年 の中性化深さの変化を示す。いずれのコンクリ ートも材齢10年から材齢22年にかけて中性化の 進行が見られたが,材齢35年においては,中性 化深さが小さい傾向となった。材齢35年の膨張 コンクリートの中性化深さは3.9mm,普通コン クリートで 5.2mm とやや膨張コンクリートの方 が中性化深さは小さい傾向を示した。膨張コン クリートの方が普通コンクリートより中性化深 さが小さい原因として, CSA 膨張材の水和生成 物であるエトリンガイトによってコンクリート の硬化体組織が緻密化し,中性化の進行が遅れ ているものと推定される⁶⁾。尚,いずれのコン クリートとも,材齢22年に比べ材齢35年の方が 中性化の深さが小さくなった原因として,コア リングした試験体のバラツキや採取場所の差異 が考えられる。

(4) 塩化物イオン量

図 - 5 に塩化物イオン量を示す。20~60mmま での深さでは,普通コンクリートに比べて,膨 張コンクリートの方が塩化物イオン量は多く, 表層~20mmおよび60mm以深では,膨張コンクリ ートの方が普通コンクリートより塩化物イオン 量が同等かやや少ない傾向を示した。膨張コン クリートおよび普通コンクリートの塩化物イオ ン量の最大値はともに 0.25kg/m³程度であった。



図 - 5 塩化物イオン量の測定結果

膨張コンクリートが試験体の表面層から20~60 mmにおいて塩化物イオンを多く含有していた原 因として,飛来した塩化物イオンが膨張材ある いはその水和物との反応により,フリーデル氏 塩(3Ca0・Al₂0₃・Cl₂・10H₂0)等としてコンクリート の表面層に固定され,塩化物イオンの内部への 拡散移動が少なくなったためと推定される⁷⁾。 (5)細孔径分布

図 - 6 および図 - 7 に細孔径分布を示す。膨 張コンクリートは普通コンクリートに比べて, 100 µm以上の細孔径が減少し,0.03 µm以下 の細孔径が増加する傾向を示した。これは CSA 膨張材の膨張によって,配置された鋼材により 拘束されたコンクリート組織の緻密化が長期間 に渡っているものと推察される。また,膨張コ ンクリートおよび普通コンクリートとも,中性 化した部分は未中性化部分に比べて 0.1 ~ 5 µ m程度の細孔量が大きくなる傾向を示した。こ の原因として,中性化によって水和物が分解し

,組織がポーラスになったものと考えられる。 以上より材齢35年経過後も膨張コンクリートの 方が,普通コンクリートに比べ硬化体組織が密 実であると言える。

(6) 硬化体組織

写真 - 1 および写真 - 2 にコンクリート組織 の走査型顕微鏡写真(SEM像)を示す。普通コ ンクリートに比べて,膨張コンクリートには多 くの針状結晶が存在している⁸⁾。



写真 - 1 膨張コンクリートの SEM 條



写真 - 2 普通コンクリートの SEM 像

(7) 水和物分析

DSC 分析結果を図 - 8 に示す。膨張コンクリ



ートには,50 および80 付近にピークが見ら れるのに対し,普通コンクリートは80 付近の みピークが見られた。50 付近の吸熱ピークは CSA 膨張材によって生成した 3CaO・AI_Q-3CaSQ-32HQの脱水によるものと考えられ,また,80 付近のピークは CaSO4・2H20 に相当するものと推 定される。

以上より膨張コンクリートには35年経過後も エトリンガイトの針状結晶の骨格は崩れること なく存在していることが確認された。



4. まとめ

カルシウムサルフォアルミネート系膨張材を 混和した膨張コンクリートの耐久性に関し,材 齢35年の実構造物から試験体を採取し,普通コ ンクリートと諸特性を比較検討した結果,以下 のことが明らかとなった。

- (1) 膨張コンクリートの圧縮強度,引張強度およびヤング係数は,同一条件で暴露した膨張材を混和しない普通コンクリートとほぼ同等であり,35年経過後も膨張材の混和による影響は見られない。
- (2) 膨張コンクリートの中性化深さおよび塩化 物イオンの浸透深さは,普通コンクリート とほぼ同等か,特段不利ではないと考えら れる。

(3) 膨張コンクリートの硬化体組織は,カルシウムサルフォアルミネート系膨張材の水和 生成物であると考えられるエトリンガイトによって緻密になり,35年経過後も膨張コンクリート中のエトリンガイト結晶は残存している。

参考文献

- 1) 保利彰宏,安藤哲也,小田部裕一,鈴木康 範:初期欠陥のない高性能コンクリートの 開発,コンクリート工学,Vol.39,No.8, pp.16~21,2001
- 2) 磯貝純,中谷清一,中川晃次:カルシウム サルフォアルミネート系膨張コンクリート の耐久性,第34回セメント技術年報, pp. 323-325,1980
- 3) 五味秀明:膨張材,コンクリート工学,小 特集「最近のコンクリート用混和材/2.4」 ,vol.26, No.4,pp.32~36,1988
- 4) 中川晃次,小菅啓一,寺村悟,坂井悦郎:
 長期間暴露した膨張コンクリートの微細組
 織,セメント・コンクリート論文集,
 No.44, pp.116-121, 1990
- 5) C.D. Lawrence : MORTAR EXPANSIONS DUE TO DELAYED ETTRINGITE FORMATION. EFFECTS OF CURING PERIOD AND TEMPERATURE, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.4, pp.903-914, 1995
- 6) 盛岡実,原宏俊,坂井悦郎,大門正機:膨 張材を混和したセメントペーストの化学収 縮と自己体積変化,コンクリート工学年次 論文報告集,Vol.2,No.2,pp.163-168,1998
- 7) 坂井悦郎:コンクリート構造物の耐久性向 上の問題点とその対策,コンクリート工学 , Vol.33, No.2, pp.66-72,1995
- 8) 笹川幸男,真下昌章,福手勤,坂井悦郎: 膨張コンクリートの耐久性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.676-682,1998