

乾燥収縮低減剤を用いた高耐久性コンクリートの開発と現場適用



梅本 宗宏*1

篠崎 徹*1 八十島治典*1
大内 一之*1 端 直人*2
袴谷 秀幸*1

概 要

筆者らは、建築物の長期使用に対応する高耐久性コンクリートの開発を進めるにあたり、コンクリートの長期耐久性の維持におけるひび割れ発生リスクを低減するため乾燥収縮低減剤に注目し、実験を実施してきた。本実験結果より、主成分の異なる3種類の乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートの調合は、良好な収縮低減効果を発揮し、十分なひび割れ抵抗性があることを確認した。また、中性化を抑制でき、高い耐久性を有することを確認した。

本報告では、これらの乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートの研究結果ならびに現場適用の事例について報告する。

STUDY AND APPLICATION ON SITE OF HIGH DURABLE CONCRETE USING OF DRYING SHRINKAGE REDUCING AGENT

Munehiro UMEMOTO*1 Tohru SHINOZAKI*1
Harunori YASOSHIMA*1 Kazuyuki OHUCHI*1
Naoto HASHI*2 Hideyuki HAKAMAYA*1

The authors paid attention to the drying shrinkage reducing agent, and carried out the experiments to decrease the risk of the crack occurrence in the maintenance of the concrete long-term durability before proceeding with the development of the high durability concrete which copes with use of a long time of the building. Mix proportion of the concrete which three kinds of drying shrinkage reducing agent that the chief ingredient was different were used for showed good effect on a decrease in contraction, and confirmed that it had enough crack resistance as a result of this experiment. Moreover, neutralization could be controlled, and it confirmed that it had high durability.

In this paper, it is reported the results of study of the concrete which these drying shrinkage reducing agent were used for and the case of the application on site.

*1 技術研究所 *2 建築工事技術部

*1 Technical Research Institute *2 Architectural Engineering Dept.

乾燥収縮低減剤を用いた高耐久性コンクリートの開発と現場適用

梅本 宗宏*1 篠崎 徹*1
八十島治典*1 大内 一之*1
端 直人*2 袴谷 秀幸*1

1. はじめに

近年、社会資本の長期ストック化、トンネルのコンクリートの剥落事故等を受けたコンクリート構造物の信頼性の回復、「住宅の品質確保の促進等に関する法律（品質確保促進法）」の施行などからコンクリート構造物の耐久性に関する関心・要求が増えつつある。コンクリート構造物が長期にわたって使用されるようになると、コンクリート自身の耐久性はもちろんのこと、時間あるいは環境に依存するひび割れの発生を最小限にコントロールすることが、長期にわたる耐久性の維持、美観上の要求からも大きくなることが予測される。特に、ひび割れの発生は鉄筋腐食に大きく影響を与えることが指摘されており[1]、耐久設計やLCC（ライフサイクルコスト）の算出上もひび割れの発生を抑える必要がある。

ひび割れに発生対する影響のなかで、乾燥収縮が長さ変化に与える影響が大きいことから、乾燥収縮に対する研究は古くから行われており、乾燥収縮を低減する手法として、乾燥収縮機構の毛細管張力機構に着目し、コンクリート内で持続的な表面張力を低下させる実用的な混和剤「乾燥収縮低減剤」が1980年代に開発され、研究報告[2-4]とともに実施工[5・6]での適用も報告されている。

現在市販されている乾燥収縮低減剤の多くは、アルキレンオキシド重合体(AO)をベースにした組成物で、基本的な作用形態は表面張力の低下にあり同系統といえる。しかしながら、乾燥収縮低減剤を添加したコンクリートの機構的な解明はなされておらず、十分な実験データも報告されていない。筆者らは、建築物の長期使用に対応する高耐久性コンクリートの開発を進めるにあたり、コンクリートの長期耐久性の維持におけるひび割れ発生リスクを低減するため乾燥収縮低減剤に注目し、実験を実施してきた[7・8]。

本報告では、これらの乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートの研究結果ならびに現場適用の事例について報告する。

2. 性能確認実験

2.1 実験概要

本実験では、乾燥収縮低減剤がコンクリート与える影響について把握するため、主成分の異なる3種類の乾燥収縮低減剤について比較実験を実施した。

表-1に、実験に用いた使用材料を、表-2に、実験の要因および水準を示す。実験は2シリーズ分けて実施し

た。シリーズ1では基本的な添加量の変化、シリーズ2ではセメントの種類による影響を主な実験要因とした。コンクリートの調合は、表-3に示す8つの調合を基準調合とし、表-2に示す水準で、シリーズ1では19、シリーズ2では32の合計51調合で実施した。目標スランプは21cmを基準とし、高炉セメントを用いたNo.8は8cmとした。目標空気量は4.5%とし、空気連行性のない乾燥収縮低減剤Aでは1.0%として、ワーカビリティを補正するために単位水量を+10kgおよびS/aを補正して調合修正を行った。各々の調合は、乾燥収縮低減剤の添加量に合わせて、スランプ・空気量が満足するよう、高性能AE減水剤とAE剤の添加量で調整した。

コンクリートの練り混ぜは、強制パン型ミキサーを使用し、モルタルで30秒練り混ぜた後、粗骨材を投入して60秒間練り混ぜた。コンクリート1バッチの練り量は35

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm ³ 中庸熱ポルトランドセメント： 密度 3.21g/cm ³ 高炉セメント B 種：密度 3.04g/cm ³
細骨材	君津産山砂：密度 2.58g/cm ³ 、FM2.74
粗骨材	岩瀬産碎石：密度 2.64g/cm ³ 、FM6.69
混和剤	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系) AE 減水剤、AE 剤
乾燥収縮低減剤 (DSR)	A：グリコールエーテル系 B：低級アルコールのアルキレンオキシド付加物 C：ポリエーテル系

[注] 数字はシリーズ2実施時のもの

表-2 実験要因および水準

実験要因	水準 (シリーズ1)	水準 (シリーズ2)
DSRの種類	A・B・C	A・B・C
DSRの添加量 (セメント量×%)	1~4	0.5~3
セメントの種類	N	N・M・BB
水セメント比(%)	40・45・50・55 (55は基準のみ)	40・45・50 (N・BBは45のみ)

[注] DSR : 乾燥収縮低減剤、
N : 普通ポルトランドセメント、
M : 中庸熱ポルトランドセメント、
BB : 高炉セメント B 種

*1 技術研究所 *2 建築工事技術部

表 - 3 コンクリートの基準調合

No.	調合の種類	W/C (%)	S/a (%)	単位質量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
1	SN55	55	46.0	170	309	831	979
2	SN50	50	46.0	165	330	831	977
3	SN45	45	46.0	165	367	815	961
4	SN40	40	41.0	165	413	710	1027
5	SM50	50	47.0	165	330	833	961
6	SM45	45	46.2	165	367	805	961
7	SM40	40	44.9	165	413	766	961
8	SB45	45	40.1	150	333	720	1098

[注]W/C:水セメント比、 S/a:細骨材率

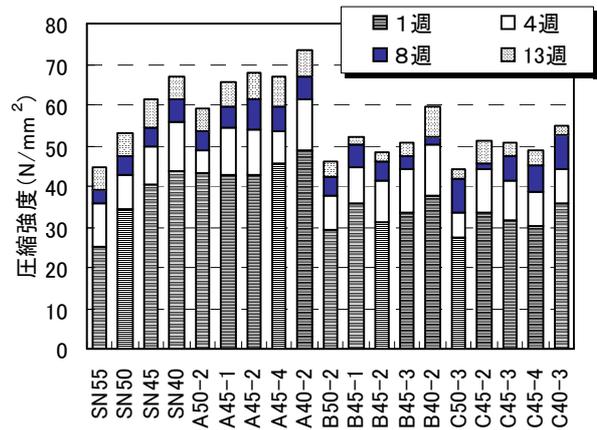


図 - 1 圧縮強度試験結果

1とし、2バッチ分を混合後、フレッシュコンクリートの試験および供試体の採取を行った。

表-4に、フレッシュおよび硬化コンクリートの試験項目を示す。試験項目のうち、促進中性化試験は、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説、付1. コンクリートの促進中性化試験方法(案) [9]」によった。凍結融解試験は、試験開始前の試験体養生の影響を比較するため、表-4に示す4種類の養生条件を設定した。

表 - 4 試験項目

試験項目		試験方法
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108: 材齢 1~26W
	長さ変化	JIS A 1129 準拠: 材齢 1~26W
	促進中性化	建築学会案
シリーズ 2のみ	凍結融解	JIS A 1148: 脱型後養生 4 種類 2W 水中、4W 水中、2W20℃封かん、1W 水中後 4W20℃気中
		ひび割れ

2.2 実験結果

(1) 圧縮強度試験結果

図-1に、圧縮強度試験結果の一例(Nセメント)を示す(図中のハイフン後の数字は添加量)。目標空気量が1%の乾燥収縮低減剤Aでは、基準調合より4~7N/mm²高く、BおよびCでは5~13N/mm²低く、強度発現がやや遅れる傾向がある。各乾燥収縮低減剤とも、添加量の違いが強度に与える影響は小さかった。

(2) 長さ変化試験結果

図-2~4に、長さ変化試験結果の一例を示す。乾燥収縮低減剤を用いた調合の長さ変化率は、材齢初期から小さく、材齢26週で5×10⁻⁴以下と、いずれの調合でも乾燥収縮低減剤の十分な効果が確認できた。基準調合に対する長さ変化率比は、図-3に示すように各乾燥収縮低減剤とも添加量の増加に対して線形に小さくなり、セメント量の3%で基準の7割程度に低減した。また、図-4に

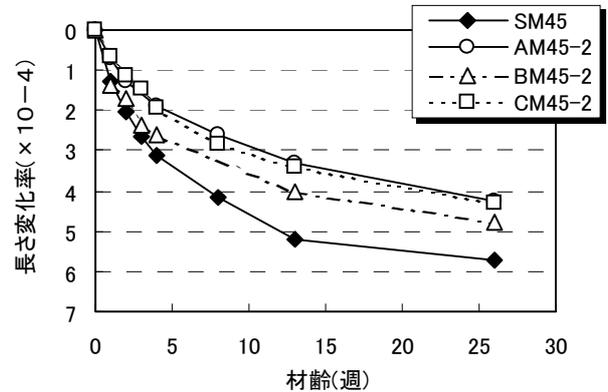


図 - 2 材齢と長さ変化率の関係(Mセメント)

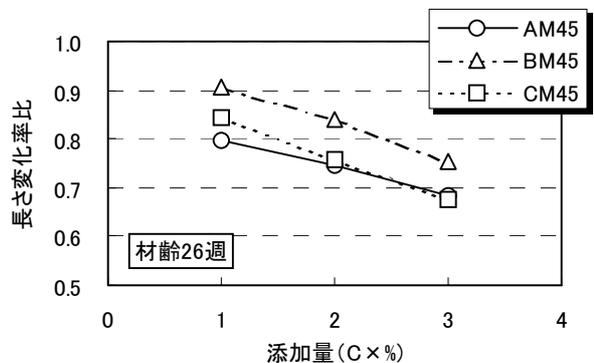


図 - 3 添加量と長さ変化率比の関係

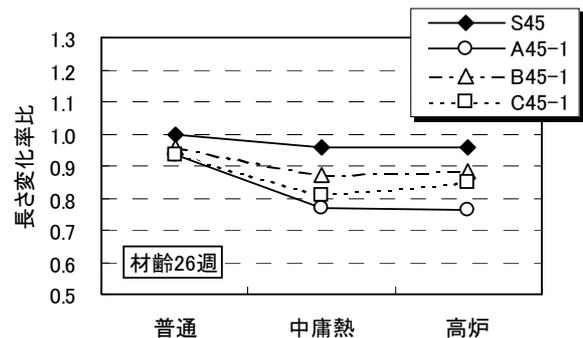


図 - 4 セメントの種類と長さ変化率比の関係

示すように、基準調合ではセメント種類による変化は小さいが、乾燥収縮低減剤の同一添加量では、普通セメントに比べて中庸熱や高炉セメントを用いた長さ変化率比の方が小さく、乾燥収縮低減剤の種類による効果の違いもみられた。

(3) 促進中性化試験結果

図-5に、水セメント比と中性化深さの関係の一例(Mセメント)を示す。各乾燥収縮低減剤とも基準調合に比べ中性化深さは小さくなり、空気連行のない乾燥収縮低減剤Aでは中性化深さが基準調合の約50%程度まで小さくなり、中性化抑制の効果があった。

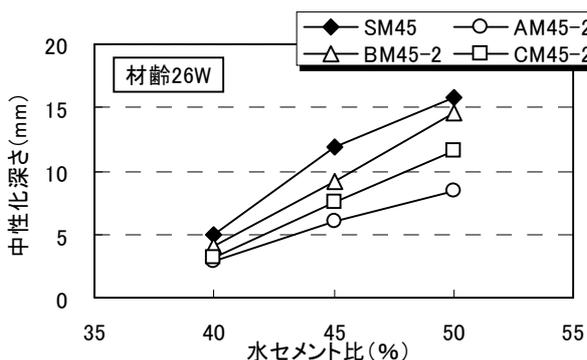


図-5 水セメント比と中性化深さの関係

(4) 凍結融解試験結果

図-6に、凍結融解試験結果の一例を示す。試験結果に試験体の養生条件が大きく影響し、1W標準水中4W気中養生後試験を開始したものは、300サイクル後の相対動弾性係数が79%となった。実構造物では乾燥期間が確保できることから、十分な凍結融解抵抗性を有しているといえる。

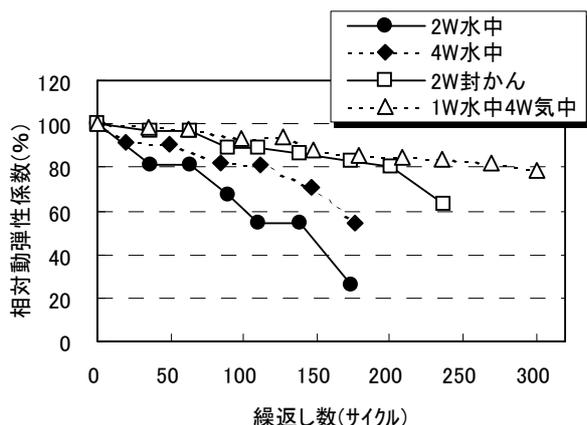


図-6 凍結融解試験結果の一例

(5) ひび割れ抵抗性試験結果

図-7に、ひび割れ抵抗性試験結果を示す。図は各調合の最初にひび割れの生じたものを表示している。水セメント比45%の基準調合では材齢19日でひび割れが生じたのに対し、乾燥収縮低減剤Bでは98日、A・Cでは材齢105日までひび割れを生じなかった。

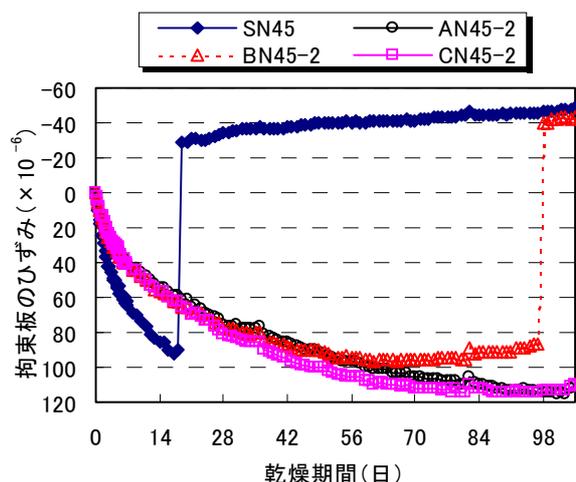


図-7 ひび割れ抵抗性試験結果

2.3 性能確認実験のまとめ

本実験より、主成分の異なる3種類の乾燥収縮低減剤を用いた調合は、良好な収縮低減効果を発揮し、十分なひび割れ抵抗性があることを確認した。また、中性化を抑制でき、高い耐久性を有することを確認した。

3. 現場適用事例

3.1 現場適用への経緯

前述した性能確認実験の結果を踏まえ、乾燥収縮低減剤の実構造物への適用性について検討を行った。なお、乾燥収縮低減剤の適用に当たっては、性能と経済性のバランスを考慮し、前述した性能確認実験の結果をもとに乾燥収縮低減剤の種類及び添加量を決定した。

3.2 建物概要

- (1) 建築面積：2,777.04m²
 - (2) 延床面積：17,271.91m²
 - (3) 構造・規模：RC及びSRC造 地下1階地上11階
 - (4) 用途：共同住宅
 - (5) 工期：平成13年2月～平成14年2月
 - (6) 適用箇所：立上り・スラブ
- なお、建物外観を写真-1に示す。



写真-1 建物外観

3.3 施工実験の概要

(1) コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-5に示す。又、コンクリートの設定条件及び調合条件を表-6および表-7に示す。

表-5 コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16g/cm ³	
細骨材	茨城県鹿島市平井産陸砂： 密度 2.58g/cm ³ 、FM2.65	
粗骨材	栃木県下都賀郡都賀町産砕石： 密度 2.68g/cm ³ 、FM6.55	
混和剤	AE 減水剤 (AE)	ナリカルボン酸系・リグニンスルホン酸系
	高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
	乾燥収縮低減剤 (DSR)	ポリエーテル系

表-6 コンクリートの設定条件

No.	設定条件			備考
	呼び強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	
AE	33	18	4.5	比較試験用
SP	33	21	4.5	現場打設用
DSR	33	21	4.5	現場打設用

[注] AE：AE 減水剤混入コンクリート
SP：高性能 AE 減水剤混入コンクリート
DSR：乾燥収縮低減剤混入コンクリート

表-7 コンクリートの調合条件

No.	調合条件									
	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE	SP	DSR	C×%
			W	C	S	G				
AE	45.5	44.9	185	407	743	949	0.3	—	—	
SP	45.5	47.7	170	374	821	936	—	1.0	—	
DSR	45.5	47.7	170	374	821	936	—	1.0	1.5	

(2) 試験項目及び試験方法

試験項目及び試験方法を表-8に示す。又、実験のフローを図-8に示す。

表-8 試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法	
フレッシュ性状	①スランプ	JIS A 1101
	②空気量	JIS A 1128
	③コンクリート温度	棒状温度計
硬化性状	④圧縮強度 ¹⁾	JIS A 1108
	⑤長さ変化	JIS A 1129
	⑥中性化	建築学会案
	⑦ひび割れ検証	JIS 原案 ²⁾ ・目視調査

[注]1)：標準水中養生強度、封緘養生強度及びコア
2)：コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法(案)、ひび割れを促進するため断面積をノッチにより20%減じた

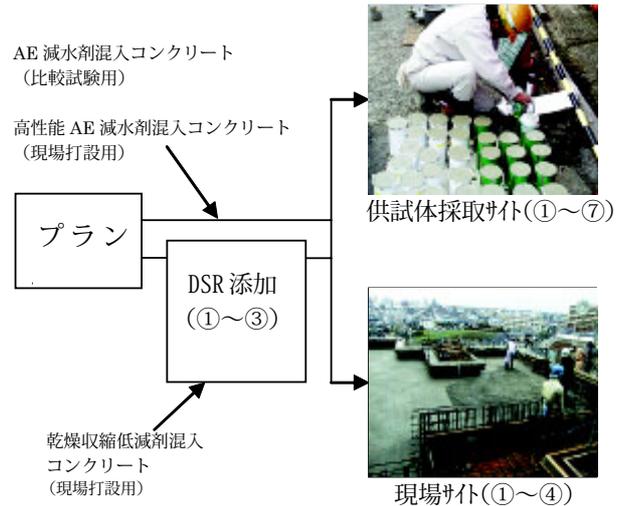


図-8 実験のフロー

3.4 実験結果

(1) フレッシュ性状

AE 減水剤、高性能 AE 減水剤および乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートのフレッシュ性状を表-9に示す。なお、フレッシュ性状の確認は、コンクリート出荷時(0分)及び供試体作成時(30分)に実施した。結果からもわかるように、コンクリートのフレッシュ性状は、混和剤の種類にかかわらず、おおむね設定条件を満足する結果が得られた。

表-9 コンクリートのフレッシュ性状

No.	経時 (min)	SL (cm)	SF (cm)	空気量 (%)	C 温度 (°C)
AE	0	20.5	37.0×37.0	4.0	18.0
	30	19.5	31.0×30.0	3.8	18.5
SP	0	22.5	43.5×41.0	4.8	20.0
	30 ¹⁾	20.5	36.0×35.0	5.0	19.0
DSR	0	21.5	37.5×34.5	4.8	20.0
	30	21.0	36.0×36.0	4.9	20.0

[注]1)：高性能 AE 減水剤を 0.05% 後添加

(2) 硬化性状

① 圧縮強度試験結果

AE 減水剤、高性能 AE 減水剤および乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートの圧縮強度試験結果を図-9に示す。なお、圧縮強度試験は、材齢 28 日及び 91 日における標準水中養生、封緘養生及び模擬壁によるコア供試体により実施した。この結果からもわかるように、乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートの圧縮強度は、養生条件にかかわらず、AE 減水剤及び高性能 AE 減水剤を混入したコンクリートよりも、1 から 5N/mm² 程度(材齢 28 日) 小さくなる傾向にある。なお、いずれの混和剤を添加したコンクリートとも、養生条件にかかわらず、所定の圧縮強度が得られている(呼び強度 33N/mm²)。

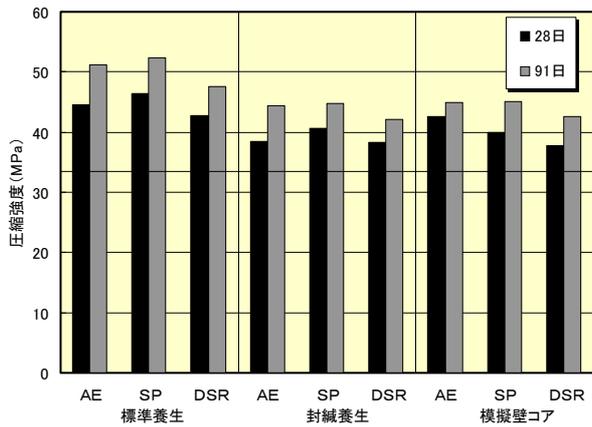


図-9 圧縮強度試験結果

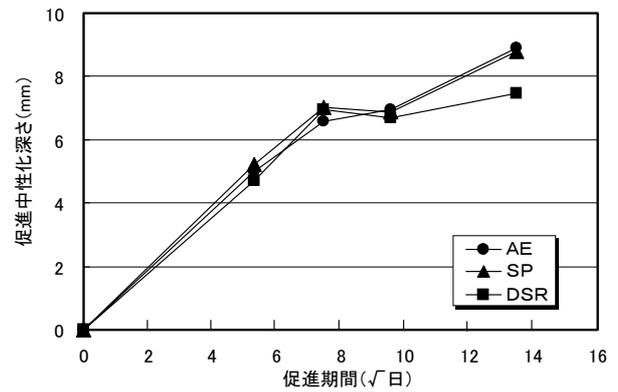


図-11 促進中性化試験結果

②長さ変化試験結果

AE減水剤、高性能AE減水剤および乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートの長さ変化試験結果を図-10に示す。乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートの長さ変化率は、AE減水剤および高性能AE減水剤を混入したコンクリートに比べ小さくなっており、乾燥収縮低減剤による効果が確認できる。なお、現場適用に際して、乾燥収縮低減剤の添加量を性能確認実験での標準スペックよりも少なく設定している。しかしながら、本実験の限りでは、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同解説」[10]による乾燥収縮率の目標値(6×10⁻⁴)を十分に満足する結果が得られている。

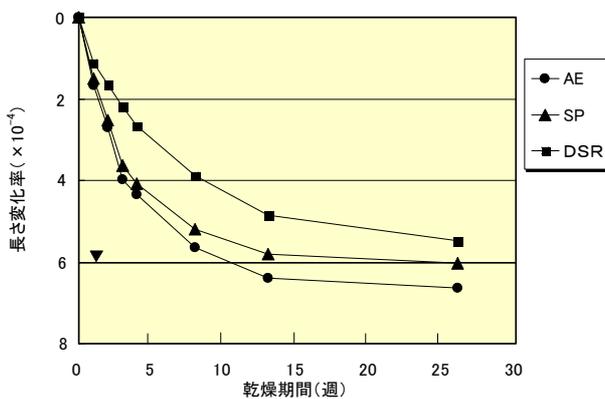


図-10 長さ変化試験結果

③中性化試験結果

AE減水剤、高性能AE減水剤および乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートの中性化試験結果を図-11に示す。乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートは、AE減水剤及び高性能AE減水剤を混入したコンクリートとほぼ同程度かやや小さい程度であり、本実験の限りでは、乾燥収縮低減剤が中性化に及ぼす影響は、性能確認実験ほど明確ではなかった。

④ひび割れ検証実験結果

AE減水剤、高性能AE減水剤および乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートのひび割れ検証実験結果を図-12に示す。ここで、この試験方法は、混和剤の種類が、ひび割れの発生状況に及ぼす影響を把握することを目的とし、早期にひび割れを発生させ、相対的な評価手法として捉えた。このような観点から考察すると、乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートは、AE減水剤および高性能AE減水剤を混入したコンクリートと比較すると、ひび割れ発生時期が2倍程度遅くなる傾向が見られる。また、ひび割れ幅についても、乾燥収縮低減剤を用いることで、0.2mm以下の試験結果となり、乾燥収縮低減剤による効果が確認できる。

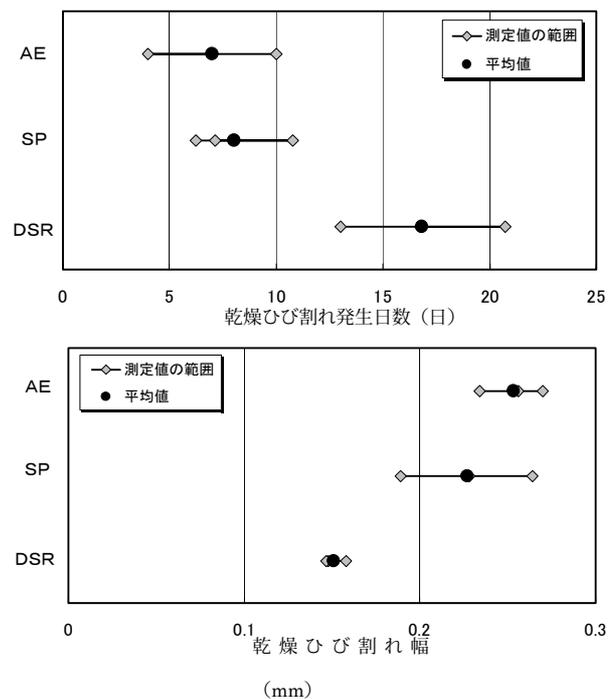


図-12 ひび割れ検証試験結果

(3)実構造物におけるひび割れ状況調査

実際の現場において、打設した高性能AE減水剤及び乾燥収縮低減剤を混入したコンクリートのひび割れ状況調査(ひび割れ発生量及びひび割れ幅)を、開口隅角部付近において、目視により実施した。なお、調査結果を表-10に示す。この結果からもわかるように、乾燥収縮低減を混入したコンクリートのひび割れ発生量は、乾燥収縮低減剤を添加しないコンクリート(高性能AE減水剤のみ)と比較し、1/5程度に低減している。また、確認されたひび割れ幅についても、0.05mmと非常に低減され、乾燥収縮低減剤の効果が顕著に認められる。

表 - 10 実構造物のひび割れ状況

No.	測定箇所	ひび割れ状況	
	開口隅角部	ひび割れ発生率 (%)	ひび割れ幅 (mm)
SP	40	25	0.1~0.25
DSR	40	5	0.05

4. まとめ

本報告では、主成分の異なる3種類の乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートの研究結果ならびに現場適用の事例について報告した。

今後、地球環境問題の解決策として、社会資本の長期ストック化に対する要求が益々多くなるとともに、コンクリートに再生材料を使用することや良質な骨材の枯渇も予想される。また、コンクリート性能に要求される耐久設計仕様も細分化するものと思われる。このようなコンクリートに対応するため、今回のような乾燥収縮低減剤などは有効な手段である。更なる混和剤の性能拡大、コストダウンとともに、標準的なコンクリートへの適用拡大を図っていくことが望まれる。

なお、本研究は西松建設・戸田建設の共同研究として実施した。

[参考文献]

- [1]柳,大野:中性化したコンクリート中の鉄筋腐食に及ぼすひび割れと水セメント比の影響,日本建築学会構造系論文報告集,第599号,pp.15-21,2002.9
- [2] Charles K. Nmai, Rokuro Tomita, Fumiaki Honda, Julie Buffenbargar : Shrinkage-reducing Admixtures, Concrete International, pp.31-37, 1998.4
- [3] S. P. Shah, M. E. Karaguler, M. Sarigaphuti : Effects of Shrinkage-Reducing Admixtures on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete, ACI Materials Journal, pp.289-295, 1992.5-6
- [4]シーエムシー:コンクリート混和剤の開発と最新技術, pp.146-163,1995.9
- [5]Terry Holland : Using shrinkage-reducing admixtures, CONCRETE CONSTRUCTION, Volume44 , number3, pp.15-18, 1999.3
- [6]江原,斎藤,柳橋:超高耐久性コンクリートを用いた建築物の施工, コンクリート工学, Vol.29, No.12, pp.43-50, 1991.12
- [7]八十島,篠崎,梅本,倉林,板谷,小島,小林:各種乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートに関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.641-642, 2000.9
- [8]八十島,篠崎,梅本,端,小島,小林:各種乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートに関する研究 その2セメントの種類による影響,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.201-202, 2001.9
- [9]日本建築学会:高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, pp.179-184, 1991.7
- [10]日本建築学会:鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・同指針, pp.57-63, 1998.5