

論文 高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）を使用したコンクリートの諸特性と収縮低減作用

小泉 信一*1・井元 晴丈*2・菅俣 匠*3・太田 晃*4

要旨: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ低減対策の一手法として、収縮低減タイプの高性能 AE 減水剤 (SRSP) を開発し、コンクリートに適用した場合の性能および細孔組織に着目した SRSP の収縮低減作用について検討を行った。SRSP を使用したコンクリートは従来の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートと同様のフレッシュ性状および硬化性状を示し、且つ、10~15%の収縮低減効果が得られた。収縮低減成分を使用した場合には、N₂ ガス吸着法で測定した 10nm 以下の細孔量の減少に伴い BET 比表面積が小さくなり、毛細管張力を受ける細孔の表面積が減少することで収縮挙動が緩和される可能性が示唆された。

キーワード: 乾燥収縮, 収縮低減剤, 高性能 AE 減水剤, 細孔組織, 水銀圧入法, ガス吸着法, 比表面積

1. はじめに

コンクリート構造物の収縮ひび割れの抑制は、従来からの大きなテーマである。特に最近では、2000 年の「住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）」の施行後、鉄筋コンクリート造建物のひび割れの問題が社会的にも注目を集め、ひび割れ防止の対策が改めて重要視されるようになった。これを受けて、建築・土木両学会においても収縮ひび割れについて具体的な設計値が設けられ、日本建築学会からは設計基準強度が 36N/mm² 以下の普通コンクリートを対象として、乾燥収縮率は特記によるか、特記がない場合は、計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートでは 800×10⁻⁶ 以下を標準とすること^{1),2)}、土木学会からは設計時に想定する最大の収縮ひび割れを 1200×10⁻⁶ とすることが明記された³⁾。このような流れから、現在、全国的に生コンクリートの乾燥収縮ひび割れの確認や、使用骨材を変更することでコンクリートの乾燥収縮ひび割れの低減を図る動きが見られるようになってきている⁴⁾。

コンクリートの乾燥収縮ひび割れを低減する一手法として、日本建築学会では収縮低減剤の使用を挙げている¹⁾。しかしながら、現時点では JIS、学会の規格が整備されておらず、収縮低減剤を生コンクリート工場で添加したコンクリートを汎用的に JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」として扱うことが困難であることや、使用するにあたっていくつかの留意事項が指摘されており⁵⁾、未だ広く普及するには至っていない。

このような状況の中、著者らは生コンクリート工場より出荷されるコンクリートの乾燥収縮ひび割れを容易に低減できる一手法として、従来の高性能 AE 減水剤 (SP)

の規格を満足し、且つ、コンクリートの乾燥収縮ひび割れを 5~15%低減することが可能な収縮低減タイプの高性能 AE 減水剤 (SRSP) を開発した。

本研究では、1) SRSP をコンクリートに使用した場合の性能、および、2) 細孔組織に着目した SRSP の収縮低減作用について検討を行った。

2. 高性能 AE 減水剤（収縮低減タイプ）について

SRSP 中に配合された収縮低減成分 (SR-N) は、従来の収縮低減剤 (SR-C) と同様に下記 (1) 式に示した構造に属するものであり、コンクリートの物性への悪影響が小さく、且つ、高性能 AE 減水剤の主成分であるポリカルボン酸系ポリマーと一液にした時の溶液安定性が良好となる様に R₁、R₂ および m の組合せを選択した。



ここに、AO : アルキレンオキシサイド

R₁, R₂ : 炭化水素基

m : アルキレンオキシサイドの付加モル数

3. 試験概要

3.1 SRSP を使用したコンクリートの性能評価試験

乾燥収縮ひび割れが懸念される水セメント比（以下、W/C と称す）40.0、47.5 および 55.0%の普通コンクリートを対象に、従来の SP を対比に用いて、フレッシュ性状および硬化性状の比較を行った。

使用材料の種類および物理的性質を表-1 に、コンクリートの配（調）合を表-2 に示す。コンクリートの配（調）

*1 BASF ポゾリス(株) 技術センター (正会員)

*2 BASF ポゾリス(株) 開発センター 博士(工学) (正会員)

*3 BASF ポゾリス(株) 技術センター マネージャー 博士(工学) (正会員)

*4 BASF ポゾリス(株) 開発センター センター長・ゼネラルマネージャー 博士(工学) (正会員)

合は、SRSP の使用量変化による収縮低減効果を比較する為、SRSPの標準使用量であるC×1.5%の他にC×1.0、2.0%とし、同等のスランプが得られるようにSRSPの使用量に応じて単位水量を±5kg/m³増減した。なお、試験は環境温度20℃で実施した。

コンクリートは、容量55リットルのパン形強制練りミキサを用いて、材料を一括で90秒間練り混ぜた。また、空気量の調整の為、空気量調整剤を別途添加した。練上り後、直ちにフレッシュ性状を確認し、供試体の作製を行った。フレッシュ性状および硬化性状の測定項目および測定方法は表-3に示す通りである。

3.2 SRSPの収縮低減作用に関する検討

SR-N、SR-Cの収縮低減作用について、各々を添加した希釈水の表面張力の比較およびSPにSR-N、SR-Cを併用したコンクリートの細孔組織の比較を行った。

3.2.1 表面張力の測定

W/C=47.5%の配(調)合条件を想定し、SR-CおよびSR-Nの使用量を変化させた希釈水(練混ぜ水)の表面張力を測定した。測定には英弘精機(株)製の動的表面張力計SITA t60を用いて、気泡周波数を10~0.01Hzの範囲で変化させた時の表面張力を測定し、表面張力が平衡状態に達したと考えられる0.01Hz時の値を静的な表面張力とみなした。なお、表面張力は液中に発生させた気泡にかかる最大の圧力から表面張力を算出する最大泡圧法⁹⁾により求めた。

3.2.2 細孔組織評価試験

W/C=47.5%の配(調)合条件で、SP単味を対比としてSPにSR-CをC×2.0%およびSR-NをC×1.0%、C×4.0%併用した計4水準のコンクリートの細孔組織を比較した。なお、使用材料、コンクリートの練混ぜ方法等は3.1と同様である。フレッシュ性状および硬化性状の測定項目を表-4に示す。

(1) 試料の調整方法

材齢28日経過後に、φ10×20cmの供試体の中心部5cmをカッターで切り出し、粗粉碎後、粗骨材を除いたモルタル部分を2.5~5.0mmに調整し、真空凍結乾燥装置で14日間乾燥して測定用試料とした。

(2) 水銀圧入(MIP)法

Quantachrome社製水銀圧入式ポロシメータPore Master 60を用いて、加圧条件下で測定を行い、直径:3nm~160μmの範囲の総細孔容積を求めた。

(3) ガス吸着法

日本ベル(株)製高精度比表面積・細孔分布測定装置BELSORP-maxを用いて、BJH法により直径:1.6nm~100nmの範囲の総細孔容積および各細孔の表面積を表す微分細孔容積分布を、BET法により比表面積を求めた。なお、吸着質にはN₂を用いた。

表-1 使用材料の種類および物理的性質

材料	記号	種類および物理的性質
セメント	C	普通ポルトランドセメント
		密度=3.16g/cm ³ , 比表面積=3300cm ² /g
細骨材	S	大井川水系陸砂
		表乾密度=2.57g/cm ³ , 吸水率=2.46% F.M.=2.73
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石
		表乾密度=2.65g/cm ³ , 吸水率=0.62% 実積率=61.3%, M.S.=20mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤
		ポリカルボン酸エーテル系化合物
	SRSP	収縮低減型高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系化合物と ポリグリコール誘導体の複合体

表-2 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤	
		W	C	S	G	種類	使用量 (C×%)
55.0	48.9	165	300	874	941	SP	1.0
	48.3	170	309	854		SRSP	1.0
	49.5	160	291	894			2.0
47.5	48.0	170	358	829	926	SP	1.0
	47.3	175	368	810		SRSP	1.0
	48.6	165	347	853			2.0
40.0	47.3	170	425	792	909	SP	1.0
	46.5	175	438	770		SRSP	1.0
	48.0	165	413	816			2.0

表-3 測定項目および測定方法(性能評価試験)

測定項目	測定方法
スランプ	JIS A 1101:2005
スランプフロー	JIS A 1150:2007
空気量	JIS A 1128:2005
凝結時間	JIS A 1147:2007
圧縮強度	JIS A 1108:2006 (φ10×20cm, 標準養生:材齢7, 28日)
乾燥収縮	JIS A 1129-3:2001 (基長:7日, 測定期間:6ヶ月)
拘束ひび割れ	JIS A 1151:2002 (湿潤養生:7日, 型枠脱型後:20℃, 60%RH)
凍結融解	JIS A 1148:2001(A法) (水中養生:28日, サイクル数:300)

表-4 測定項目(細孔組織評価試験)

区分	測定項目
フレッシュ性状	スランプ, スランプフロー, 空気量
硬化性状	圧縮強度(7, 28日), 乾燥収縮, 凍結融解 細孔組織(水銀圧入法, N ₂ ガス吸着法)

4. 試験結果および考察

4.1 SRSP を使用したコンクリートの性能評価試験結果

(1) フレッシュ特性

フレッシュ性状の測定結果を表-5 に示す。いずれの W/C および使用量においても従来の SP と同様の流動性および空気量が得られた。

(2) 凝結特性

凝結時間の測定結果を図-1 に示す。いずれの W/C においても SRSP を標準用量用いた場合の凝結時間は従来の SP を使用したコンクリートと同等であった。また、C×1.0~2.0%の使用量の増減に応じたコンクリートの凝結時間の変化は15~30分程度であった。

(3) 強度発現性

圧縮強度の測定結果を図-2 に示す。いずれの W/C においても SRSP を使用したコンクリートの圧縮強度は、使用量によらず従来の SP を使用したコンクリートと同等であった。

(4) 収縮特性

長さ変化率の測定結果を図-3 に示す。いずれの W/C においても従来の SP を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは材齢6ヶ月で 750×10^{-6} 程度であった。これに対して、SRSP を標準量 (C×1.5%) 使用した場合、乾燥収縮ひずみは 650×10^{-6} 程度で、約 100×10^{-6} の収縮低減効果が得られた。また、SRSP の C×1.0~2.0%の使用量の増減に応じて、約 60×10^{-6} の変化を示した。

SRSP の使用量と従来の SP を使用したコンクリートに対する収縮低減率の関係を図-4 に示す。いずれの W/C および使用量においても材齢の経過で収縮低減率が低下する傾向にあり、SRSP を標準量 (C×1.5%) 使用した場合の収縮低減率は、材齢4週で15~20%程度、材齢26週で10~15%であった。また、C×1.0%使用した場合においても、材齢26週で10%程度の収縮低減効果が得られた。

「収縮ひび割れ指針案」¹⁾によれば、収縮低減剤を標準量使用した場合、15~30%の乾燥収縮ひずみの低減が期待できるとされているが、上述のように著者らが開発した SRSP の収縮低減効果はやや小さい結果であった。

表-5 フレッシュ性状の測定結果

W/C (%)	W (kg/m ³)	混和剤		スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)
		種類	使用量 (C×%)			
55.0	165	SP	1.0	18.0	30.5	4.8
		SRSP	1.5	18.5	30.5	4.5
	170		SRSP	1.0	18.5	31.0
		2.0		18.0	30.0	4.4
47.5	170	SP	1.0	20.0	35.0	4.6
		SRSP	1.5	20.0	35.5	4.7
	175		SRSP	1.0	20.5	36.0
		165		SRSP	2.0	19.5
40.0	170	SP	1.0		21.5	38.0
		SRSP	1.5	21.5	37.5	4.6
	175		SRSP	1.0	21.5	38.0
		165		SRSP	2.0	20.5

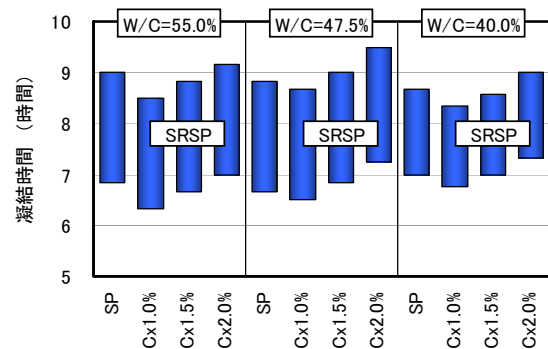


図-1 凝結時間測定結果

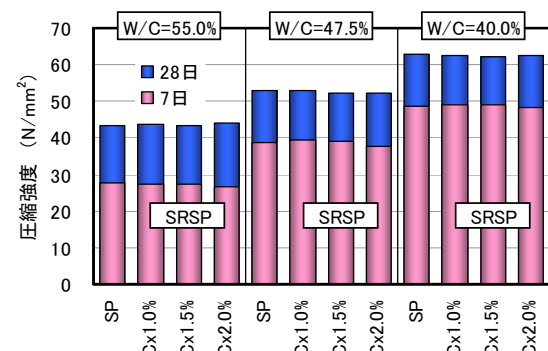


図-2 圧縮強度測定結果

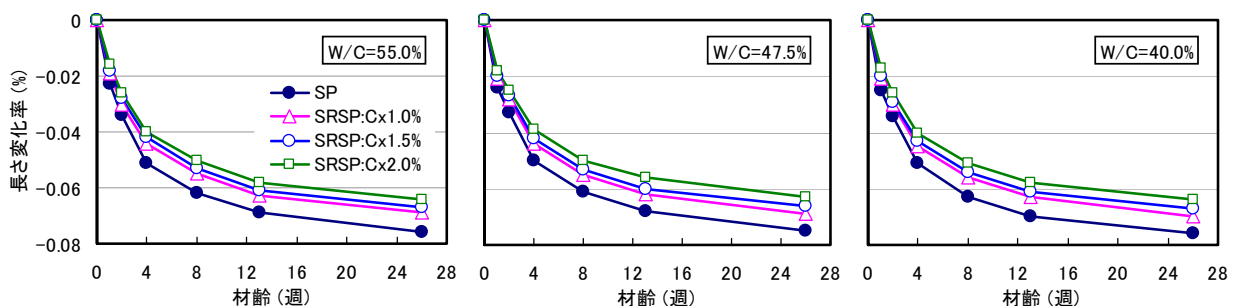


図-3 長さ変化率測定結果

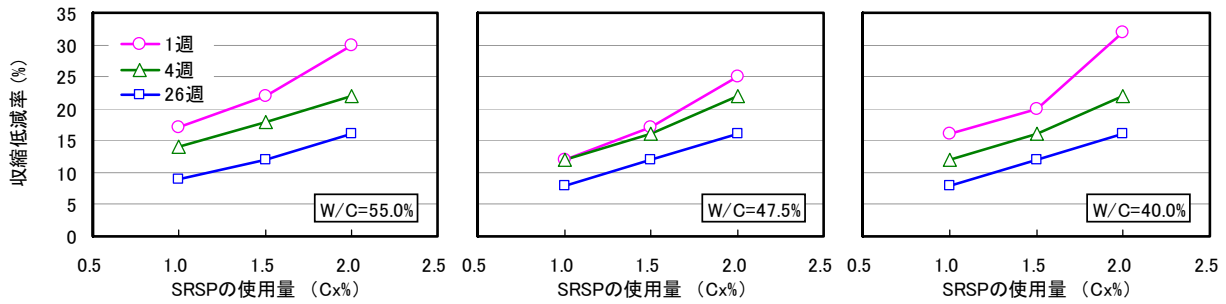


図-4 SRSP の使用量と従来の SP を使用したコンクリートに対する収縮低減率の関係

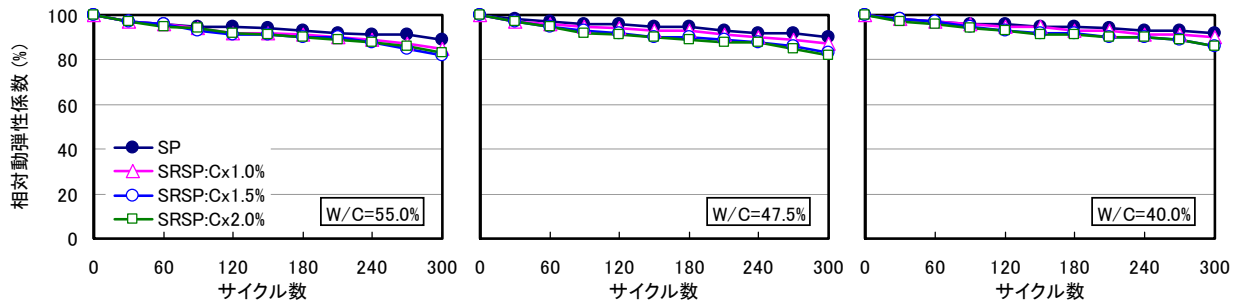


図-6 相対動弾性係数の測定結果

このことから、乾燥収縮ひずみの目標値を計画供用期間の級が長期および超長期のコンクリートの設計値である 800×10^{-6} 以下とした場合、SRSP のみの使用であれば 900×10^{-6} 程度までの乾燥収縮ひずみを有するコンクリートに対しての適用が効果的であると考えられた。

(5) ひび割れ抵抗性

W/C=47.5%における外部拘束時の乾燥収縮ひび割れ試験結果を図-5 に示す。ひび割れ発生日数は、拘束鋼筋に貼り付けたワイヤストレインゲージにより測定されたひずみの急変点から判定した。従来の SP を使用したコンクリートが材齢 34 日にひび割れが発生したのに対し、SRSP では材齢 3 ヶ月経過後でもひび割れの発生が認められず、高いひび割れ抵抗性があることが確認された。

(6) 耐凍害性

相対動弾性係数の測定結果を図-6 に示す。従来の SP を使用したコンクリートと同様に 80%以上の耐久性指数 (300 サイクル時の相対動弾性係数) が得られた。

以上の結果から、SRSP を使用したコンクリートは従来の SP を使用したコンクリートに対して 10~15%の収縮低減効果を示し、且つ、フレッシュ性状および硬化性状への悪影響が無いことが確認された。

4.2 SRSP の収縮低減作用に関する考察

4.2.1 表面張力測定結果

収縮低減剤使用量と表面張力の関係を図-7 に示す。いずれの使用量においても SR-C に比べて SR-N の表面張力は高く、SR-C が C×2.0%使用時で 43.7mN/m であった

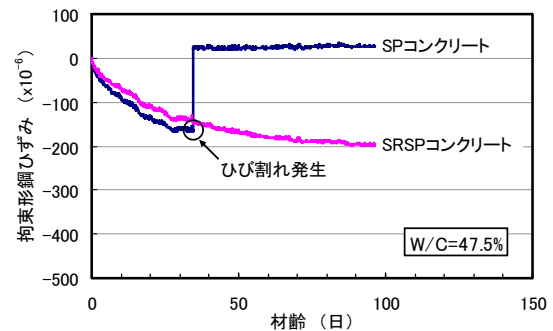


図-5 外部拘束時の乾燥収縮ひび割れ試験結果

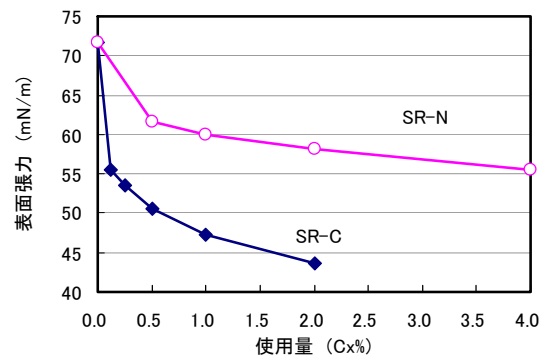


図-7 収縮低減剤使用量と表面張力の関係

のに対して、SR-N は倍量の C×4.0%使用した場合でも 55.6mN/m であり、SR-C に比べて表面張力の低減能力が非常に小さい結果となった。但し、その一方で、図-4 に示したように SR-N を配合した SRSP は 10~15%の収縮低減効果が得られている。一般的に収縮低減剤の作用機

表-6 フレッシュ性状および硬化性状測定結果 (W/C=47.5%)

SP 使用量 (C×%)	収縮低減剤		スランブ (cm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	圧縮 強度比 (4週) (%)	長さ 変化比 (4週) (%)	長さ 変化比 (26週) (%)	耐久性 指数 (%)	総細孔容積 ($\times 10^{-2} \text{cm}^3/\text{g}$)		BET 比表面積 (m^2/g)
	種類	使用量 (C×%)								MIP法	BJH法	
0.85	-	-	20.5	33.0	4.1	100	100	100	95	7.90	4.44	24.4
	SR-C	2.0	21.0	34.5	4.4	97	58	61	5	7.49	4.04	15.0
	SR-N	1.0	21.0	33.5	4.0	99	80	85	76	8.09	4.05	15.4
		4.0	21.5	33.5	4.8	82	56	59	27	8.12	4.07	13.4

構は、間隙水の表面張力を低減させることで、収縮の駆動力となる毛細管張力を緩和し、乾燥収縮の低減を可能とするとされている⁷⁾が、SR-NとSR-Cの表面張力の相違を考慮すると、表面張力の低下に因らない他の作用が収縮低減に貢献しているものと推察された。

富田らは、収縮低減剤の添加量が多い場合の作用機構に関して、表面張力低下の効果に加えて、水分の逸散を防止する効果が累加されるとしている⁸⁾。また、西らは、収縮低減剤が細孔中水分に残存することで、細孔中水分の飽和蒸気圧が低下し、これにより収縮応力が緩和されるため、収縮ひずみが抑制されると報告しており⁹⁾、いずれも細孔溶液中の収縮低減成分が表面張力の低下以外の作用を示していると考察している。

他方、今本らは、W/Cや使用する骨材の違いによる収縮特性を比表面積と関連付けて検討を行い、比表面積と乾燥収縮ひずみは高い相関があるとしている^{10), 11)}。

そこで次項では、細孔組織の観点から乾燥収縮ひずみに及ぼす収縮低減成分の影響について考察した。

4.2.2 細孔組織評価結果

フレッシュ性状および硬化性状の測定結果を表-6に示す。SP単味に対してSR-C：C×2.0%およびSR-N：C×1.0%を併用した系では圧縮強度の低下は認められなかったが、SR-N：C×4.0%併用系では圧縮強度比が82%に低下した。

長さ変化比は、SR-Nの使用量の増加に応じて低下し、C×1.0%併用系では4週：80%、26週：85%となり、また、C×4.0%併用系では4週：56%、26週：59%で、SR-C：C×2.0%併用系の4週：58%、26週：61%とほぼ同様であった。

耐凍害性は、SR-C：C×2.0%併用系では著しく劣り、また、SR-Nの使用量をC×4.0%まで増加すると劣る傾向にあった。

各サンプルのMIP法およびBJH法による総細孔容積を図-8に、BET比表面積を図-9に示す。いずれの測定方法においても、総細孔容積に明確な差は認められなかったが、BET比表面積は、SP単味に比べてSR-C、SR-Nを併用した場合の方が小さく、且つ、SR-Nの使用量の増加でさらに減少する傾向にあった。

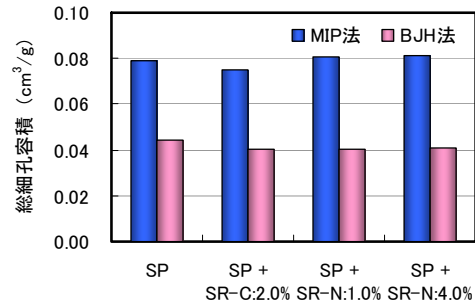


図-8 各サンプルの総細孔容積 (MIP法, BJH法)

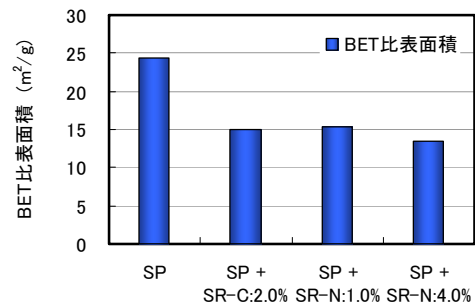


図-9 各サンプルのBET比表面積

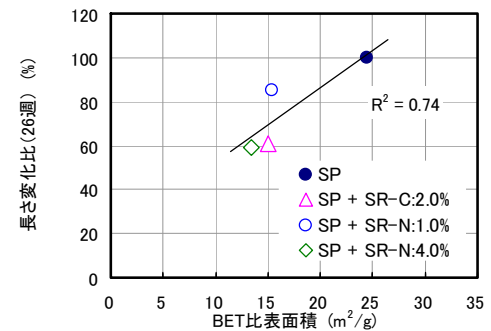


図-10 BET比表面積と長さ変化比(26週)の関係

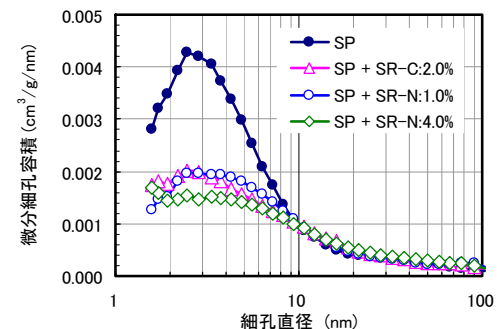


図-11 各サンプルのBJH法による微分細孔容積分布

BET 比表面積と長さ変化比 (26 週) の関係を図-10 に示す。BET 比表面積が小さくなる程, SP 単味に対する長さ変化比は小さくなる傾向が認められた。この傾向は, 前述した今本らの知見と同様であり, 収縮低減剤を使用した本研究のような場合でも同様な相関が得られた。

各サンプルの BJH 法による微分細孔容積分布を図-11 に示す。SP 単味に対して SR-C, SR-N を併用した場合には 10nm 以下の表面積が減少する傾向にあった。また, SR-C : C×2.0%併用系と SR-N : C×1.0%併用系は概ね同様な分布を示したが, SR-N : C×4.0%併用系ではさらに表面積が減少する挙動を示した。よって, この 10nm 以下の表面積の相違が前述した BET 比表面積に反映されたものと考えられ, 毛細管張力を受ける細孔の表面積を減少させる作用により収縮挙動が緩和される可能性が示唆された。なお, Korpa et al.は, 乾燥方法の違いが細孔径分布に及ぼす影響について検討を行い, Freeze-drying > Dry-ice-drying (水蒸気圧 : 5×10^{-4} mmHg 下で乾燥) > Perchlorate-drying (水蒸気圧 : 8×10^{-3} mmHg 下で乾燥) > Oven-drying の順に 10nm 以下のピークが大きくなることを報告している¹²⁾。このように, 乾燥条件の相違によっても 10nm を下回るような極めて微細な細孔組織が変化する可能性も指摘されているため, 該細孔径の違いを議論する事は慎重に行う必要があると考えられる。今後, 乾燥条件を変更した場合での分析等から妥当性を検証する予定である。

また, 収縮低減成分によるコンクリートの収縮低減作用は, 今回検討した細孔溶液の表面張力の低下や細孔組織の変化の他に, 環境条件の変化等に伴うコンクリート内部の相対湿度の影響も考えられるため, その他の要因を考慮した複合的な検討を行う予定である。

5. まとめ

コンクリートの乾燥収縮ひび割れ対策の一手法として収縮低減タイプの高性能 AE 減水剤 (SRSP) を開発し, コンクリートに使用した場合の性能および細孔組織に着目した SRSP の収縮低減作用について検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) SRSP を使用したコンクリートは従来の高性能 AE 減水剤 (SP) を使用したコンクリートと同様のフレッシュ性状, 凝結特性, 強度発現性および耐凍害性を示し, 且つ, SP に対して 10~15%の収縮低減効果が得られた。
- (2) N₂ ガス吸着法による細孔組織の比較から, 収縮低減成分を使用したコンクリートは微分細孔容積分布で

示した 10nm 以下の表面積が減少し, それに伴い BET 比表面積が小さくなる挙動を示した。よって, このような毛細管張力を受ける細孔の表面積を減少させる作用により収縮挙動が緩和される可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, p.106, 2006.2
- 2) 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 年版 (案), p.10, 2008.5
- 3) 土木学会 : 2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, pp.45-49, 2008.3
- 4) 吉兼 亨 : 乾燥収縮ひび割れの規制へのレディーミクス トコンクリート業界の対応, コンクリート工学, Vol.46, No.11, pp.3-8, 2008.11
- 5) 富田 六郎 : 収縮低減剤, コンクリート工学, Vol.26, No.3, pp.55-60, 1988
- 6) 懸橋 理枝 : 動的表面張力測定装置, 科学と工業, Vol.74(12), pp.569-572, 2000
- 7) 佐藤 健, 後藤 孝治, 酒井 公武 : セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構, セメント・コンクリート論文集, Vol.37, pp.65-68, 1983
- 8) 富田 六郎 : 有機系収縮低減剤の作用機構に関する考察, 土木学会論文集, No.433, V-15, pp.197-205, 1991.8
- 9) 西 祐宜, 名和 豊春 : 収縮低減剤がモルタルの乾燥収縮および凍結融解挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1173-1178, 2007
- 10) 今本 啓一 : 比表面積と細孔量に基づくセメント系材料の収縮挙動に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.603-608, 2007
- 11) 今本 啓一, 荒井 正直 : 比表面積の観点から見た骨材の収縮特性, セメント・コンクリート, No.729, pp.64-69, 2007.11
- 12) A. Korpa, R. Trettin: The influence of different drying methods on cement paste microstructures as reflected by gas adsorption: Comparison between freeze-drying (F-drying), D-drying, P-drying and oven-drying methods, Concrete and Concrete Research, 36, pp.634-649, 2006