

論文 高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの乾燥収縮と中性化

権 寧 瑾*¹・鎌田英治*²・田畑雅幸*³・金 武 漢*⁴

要 旨：高流動コンクリートに用いられる高性能AE減水剤や混和材料の使用量は、普通コンクリート場合に比較して多く、凝結の遅延や強度発現性状の遅れるため、乾燥収縮が大きく、また 高炉スラグなどを用いることにより、水酸化カルシウムが消費される場合には、 中性化の反応速度が増大することが考えられる。従って、本研究は 高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートについて乾燥収縮と中性化に及ぼす高性能AE減水剤や結合材の種類などの影響を普通コンクリートと比較・検討したものである。

キ-ワ-ド：高流動コンクリート，乾燥収縮，中性化，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

高流動コンクリートを得るには、コンクリートの変形を高めると同時に、材料分離抵抗性を高める必要がある。この二つの条件は、背反する性質といえるが、変形性を高めるための基本的な手法は、高性能AE減水剤の使用であり、材料分離抵抗性を高める手法は、高炉スラグやフライアッシュ等の使用ないし、分離低減剤(増粘剤)の使用あるいはこれらの兼用である。これらの手法により、コンクリートの変形性と材料分離抵抗性のバランスを調整することにより、締固め不要なコンクリートを得る考え方が導かれる。

しかし、材料分離抵抗性を高める目的で高炉スラグなどを使用する場合にはコンクリートの乾燥収縮と中性化の速度が増大することが考えられる¹⁾²⁾。

従って、本研究は高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートについて乾燥収縮と中性化に及ぼす高性能AE減水剤や結合材の種類などの影響を普通コンクリートと比較・検討したものである。

表-1 実験計画

コンクリートの種類	記号	結合材	高性能AE減水剤	空気量 (%)	AE助剤*	養生条件
高流動コンクリート	6P	OPC+6000級高炉スラグ微粉末	ポリカルボン酸	2.0	A1	2週水中 4週水中 4週水中 2週水中 +乾燥
	6A		アミノスルホン酸		B1	
	6N		ナフタレン		C1	
	LB	高炉B種十石灰石粉末	ポリカルボン酸	4.5	A1	
	SC	高炉B種				
普通コンクリート	55	OPC	-	2.0	D1	
				3.0		
				4.0		
				5.0		
				6.0		
高流動コンクリート	2C	高炉B種	ポリカルボン酸(試作品)	2.0	-	
	7S		アミノスルホン酸	4.5	A2	
	VE				D2	
	SF		アミノスルホン酸		B2	

* A1：専用消泡剤 B2：特殊非イオン界面活性剤
A2：専用 AE剤 C1：樹脂酸系AE剤
B1：ロジン系界面活性剤 D1, D2：アニオン系界面活性剤

表-2 使用材料の物性

	種 類	仕 様
セメント	普通ポルトランド	比重：3.16 比表面積：3320cm ² /g
	高炉セメントB種	比重：3.05 比表面積：3760cm ² /g
細骨材	陸砂	比重：2.68 FM：2.43 吸水率：1.17%
粗骨材	碎石	比重：2.64 FM：6.69 吸水率：2.82%
混和材	高炉スラグ微粉末	比重：2.90 比表面積：6080cm ² /g
	石灰石粉	比重：2.73 比表面積：5460cm ² /g
混和剤	高性能(AE)減水剤	・ポリカルボン酸系 ・アミノスルホン酸系 ・ナフタレン系 ・ポリカルボン酸系

* 1 大韓民国 双龍ENGINEERING(株) 診断・補修部門, 技術TEAM長, 工博 (正会員)
* 2 北海道大学教授 工学部建築工学科, 工博 (正会員)
* 3 北海道職業能力開発短期大学校教授 建築工学科, 工博 (正会員)
* 4 大韓民国 忠南大学校教授, 工科大学建築工学科, 工博 (正会員)

2. 実験計画および方法

本実験では結合材,高性能AE減水剤の種類を変えた5種類の高流動コンクリートと比較用の普通コンクリートで実験を行い,次に結合材を高炉セメントB種のみとし,空気量の安定化を考慮したタイプの異なる高性能AE減水剤またはAE助剤を変えた4種類の高流動コンクリートについての実験を追加した。実験計画を表-1,使用材料の物性を表-2に示す。

乾燥収縮試験はJIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」に準じて行った。10×10×40cmの試験体を利用し,脱型後材齢7日まで水中標準養生を行ったのち20℃,60%RHの恒温恒湿室に保存した。測定は,試験開始から1週, 2週, 4週, 8週, 3ヶ月, 6ヶ月, 9ヶ月と1年で長さ変化,質量変化と動弾性係数を測定した。

中性化試験では,日本建築学会の高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説の促進中性化試験方法(案)に基づき, 10×10×40cmの試験体を作製し材齢4週まで水中標準養生を行った。測定は試験開始後1週, 4週, 8週, 3ヶ月, 6ヶ月で行い,各測定時に試験体の端部から60mmの位置で割裂し,1%のフェノルフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 高炉スラグを混入した高流動コンクリートの乾燥収縮

高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートの乾燥収縮特性を,水セメント比 55%普通コンクリートと前報²⁾で検討した水セメント比 35%の混和材無混入の高強度コンクリートと比較して図-1に示す。

水セメント比 35%の高強度コンクリートの乾燥収縮率は,普通コンクリートよりも小さいのに対し,高流動コンクリートは水結合材比が35%前後であるが,高流動コンクリートの種類によりその程度は異なるものの,材令1週か

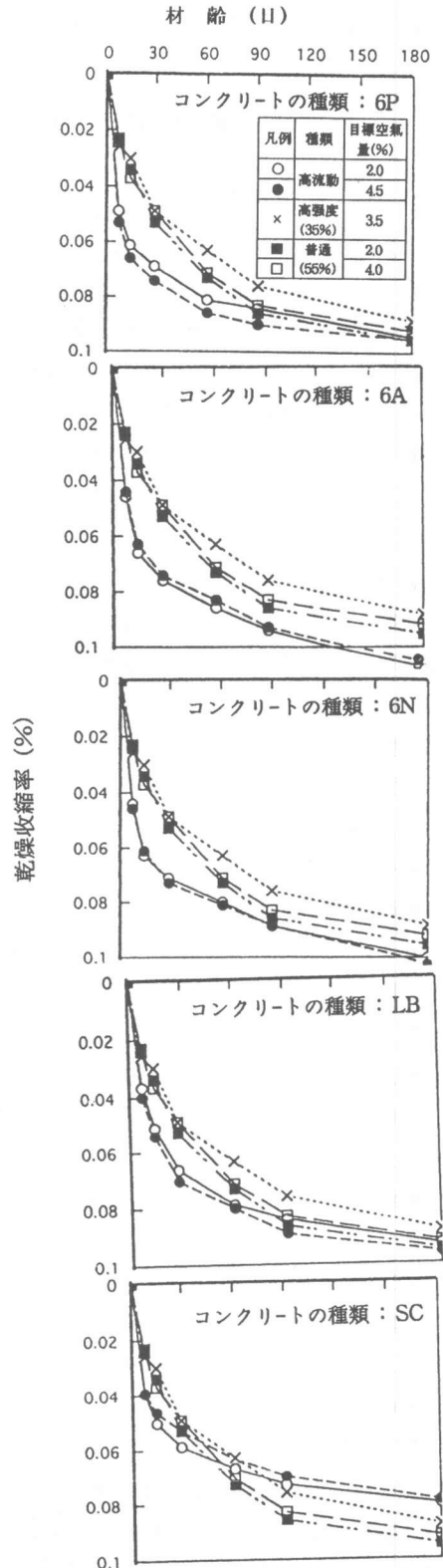


図-1 高流動コンクリート乾燥収縮率

ら2週間の初期収縮率が普通コンクリートと高強度コンクリートより幾分か大きい傾向であった。しかし、材齢6ヶ月には普通コンクリートとの収縮率の差は初期と比べて縮まる傾向であった。このことより、高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートの乾燥に伴う収縮率は、普通コンクリートより大きく、さらに材齢2週間の初期収縮率が大きいことが特徴であると思われる。

一方、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは自己収縮が大きくなるとの報告³⁾がある。本実験の乾燥収縮試験は、7日間水中養生した後に試験を開始しており、高流動コンクリートの硬化収縮も考慮した実際の収縮量はさらに大きな値となる可能性がある。今後、

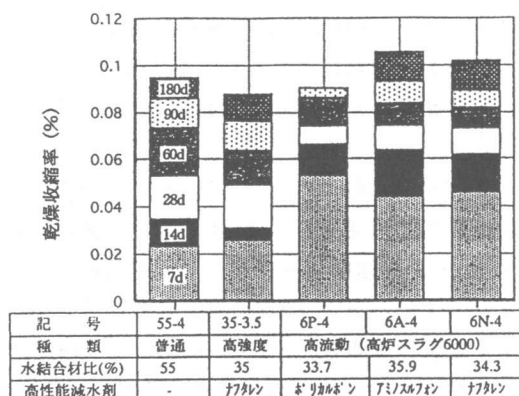


図-2 高流動コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす高性能AE減水剤の種類の影響

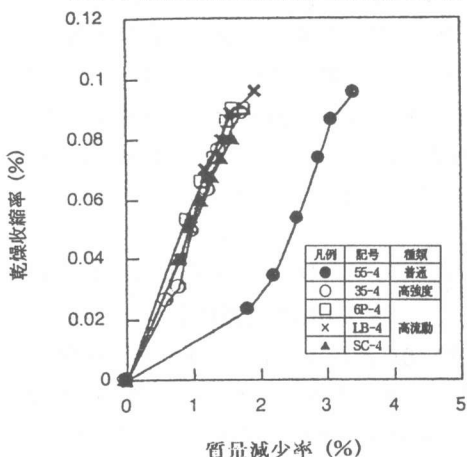


図-3 高性能AE減水剤ごとの質量減少率と乾燥収縮率の関係

これらの関係を詳しく検討する必要があると考えられる。図-1には空気量の目標値を2%とした場合と4.5%とした場合を併記しているが、いずれの高流動コンクリートでも乾燥収縮率に及ぼす空気量の影響はほとんど見られなかった。

3.1.1 高性能AE減水剤の影響

高流動コンクリートの乾燥収縮率におよぼす高性能AE減水剤の影響を調べるため、普通ポルトランドセメントに結合材として高炉スラグ(6000級)を混入した高流動コンクリートの場合について、ポリカルボン酸系(6P)、ナフタレン系(6N)およびアミノスルホン酸系(6A)の高性能AE減水剤を用いた実験を行い、その影響を比較した結果を図-2示す。高流動コンクリートでは高性能AE減水剤の種類に関係なく、混和材無混入コンクリートよりも、初期材令での収縮率が大きく、また、材齢6ヶ月においても、高流動コンクリート(6P)は普通コンクリートと同様であるが(6A)と(6N)は水セメント比55%の普通コンクリートよりも乾燥収縮率が大きくなる結果となった。一般に長さ変化率は、高性能AE減水剤の種類により同一割合、同一スランプでも異なり、高性能AE減水剤の使用量が多く、かつ凝結時間が長いものほど大きくなる傾向⁴⁾があるとされている。高流動コンクリートでは所定の流動性を得るための高性能AE減水剤の使用量は多くなることから高性能AE減水剤の種類あるいはその使用量による乾燥収縮率の差は大きくなる可能性がある。

高性能AE減水剤の異なる3種の高流動コンクリートの質量減少率と乾燥収縮率の関係を、普通コンクリートおよび高強度コンクリートと比較して図-3に示す。同一の収縮率に対する高流動コンクリートの質量減少率の値は、普通コンクリートより顕著に小さな値であり、使用した高性能AE減水剤の種類によらず水セメント比35%の高強度コンクリートと同様な傾

向であった。実験に用いた高流動コンクリートの水結合材比35%前後であり、この結果は高強度コンクリートの乾燥収縮量が同一水セメント比の高強度コンクリートとほぼ一致していることを示す

3.1.2 結合材種類の影響

本実験では、結合材として普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末(6000級)を混入したもの(6P)、高炉セメントB種に石灰石微粉末を混入したもの(LB)と高炉セメントB種のみを用いたもの(SC)としており、いずれの高流動コンクリートでもポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用している。その3種の結合材について得られた実験の結果を図-4に

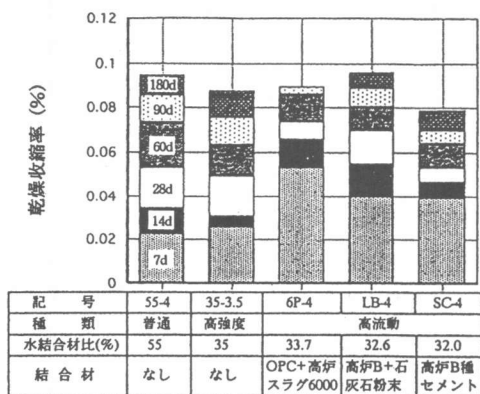


図-4 高流動コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす結合材種類の影響

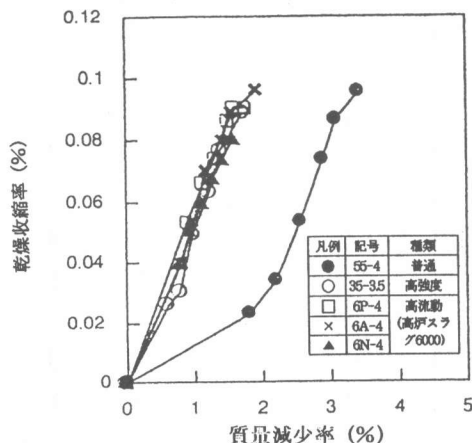


図-5 結合材ごとの重量減少率と乾燥収縮率の関係

示す。図-4によると、結合材の種類によらず、初期材令の収縮率は普通コンクリートおよび水セメント比35%の高強度コンクリートより大きく、この傾向は結合材として高炉スラグ微粉末を用いた場合にさらに大きくなるのがわかる。また、6ヶ月の収縮率では、高炉セメントB種のみを使用した(SC)の場合が(6P)と(LB)に比べ幾分低い値となった。この結果は、用いた結合材の種類により高流動コンクリートの乾燥収縮率が影響されることを示している。石灰石粉末を混入した高流動コンクリートについては、石灰石粉末の混入による収縮低減の効果も報告されているが、本実験では谷口らの結果⁵⁾と同様に、石灰石粉末を使用することにより無混入に比べ収縮率がいくぶん大きな値となり、水セメント比55%の普通コンクリートとほぼ同じ収縮率となった。石灰石粉末が水和に関与しないものと考え、その置換によりセメント量が減少し、実質の水セメント比が増大したためと思われる。

図-5に高流動コンクリートの質量減少率と乾燥収縮率の関係を、結合材ごとに普通コンクリートと高強度コンクリートとを比較して示す。高流動コンクリートの同一の収縮率に対する質量減少率は、混入した結合材の種類によらず水セメント比35%の高強度コンクリートの場合と一致し、図-4と同様な傾向であった。このことは、水セメント比55%の普通コンクリートの場合には高強度および高流動コンクリートと比較して収縮に関与しない水分逸散が多く、低水結合材比の高流動コンクリートと高強度コンクリートの場合には自己収縮がかなり含まれていることがわかる。

3.1.3 タイプの異なる高性能AE減水剤およびAE助剤の影響

図-6は高炉セメントB種のみを使用し、空気連行性があるポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を使用した高流動コンクリート(SC)に対して、空気連行性が小さいポリカルボン酸系高性能AE減水剤による高流動コンクリート

(2C)とさらにAE助剤も変えた高流動コンクリート(SF)の5種類の高流動コンクリートについて乾燥収縮率を水セメント比55%の普通コンクリートと35%の高強度コンクリートを比較した結果である。高流動コンクリート(SC)と比較して 2C, 7S, VE, SFとも収縮率は若干増大しているが、2Cと比べ7S, VEが同一水準の収縮率となり、また、全般的に収縮量は普通コンクリートよりも小さくなる傾向であった。このため、高流動コンクリートの収縮率に及ぼす AE助剤の影響は小さいものと思われる。

材令6ヶ月の段階の高流動コンクリートの乾燥収縮率と相対動弾性係数の関係を、普通コンクリートと高強度コンクリートの結果と比較して図-7示す。乾燥に伴って普通コンクリートで相対動弾性係数が20~30%程度低下しているが、高流動コンクリートでは基準値を上回っていることが認められた。特に高流動コンクリートの相対動弾性係数は、概して水セメント比35%の高強度コンクリートおよび水結合材比35%の混和材を使用した高強度コンクリートよりも高くなる傾向であり、乾燥に伴う内部組織の弱体化が小さいことが考えられる。

3.1.4 高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートの中性化

図-8に材令6ヶ月までの中性化深さを示す。9種類の高流動コンクリートと普通コンクリートについて、材令6ヶ月までの範囲で中性化が見られたのは、結合材として石灰石を使用したLB(高炉B種セメント+石灰石微粉末)と水セメント比55%の普通コンクリートの2種であった。一般にコンクリートの中性化の程度は硬化体の緻密さ、すなわち細孔構造に大きく影響されるといわれている。単位結合材量が比較的多く、水結合材比が小さい高流動コンクリートは、高炉セメント(4000)、高炉スラグ微粉末(6000)を使用した場合と水結合材比35%前後であり、中性化に対する抵抗性が大きいことがわかる。しかし、高流動コンクリートLBで軽微な中性化の進行が認められたことか

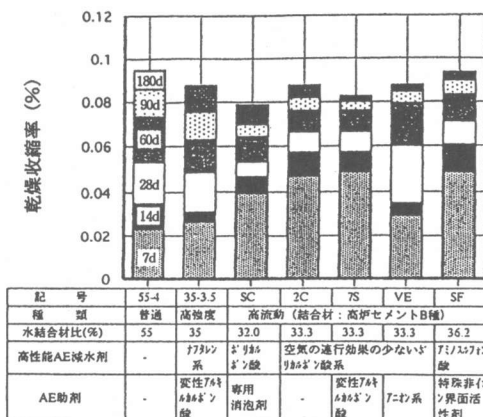


図-6 高流動コンクリートの乾燥収縮率に及ぼすAE助剤の関係

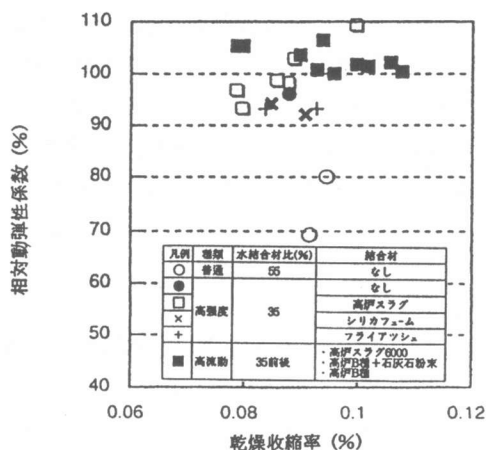


図-7 乾燥収縮率と相対動弾性係数の影響(材令6ヶ月)

ら、同一の水結合材でも高流動コンクリートの粉体を構成する成分や置換率により高流動コンクリート中性化に対する抵抗性は異なることになる。

小林ら⁶⁾は、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの場合には、硬化体の組織が普通コンクリートより緻密になることを報告し、また、渡部ら⁷⁾は、石灰石微粉末を混入した高流動コンクリートでは、石灰石微粉末は微細空隙の充填効果によりその混和量が多いほど中性化は小さくなると報告した。しかし、本実験の結果では石灰石粉末を混入することにより谷口らの結果と同様に中性化に対して不利な結果

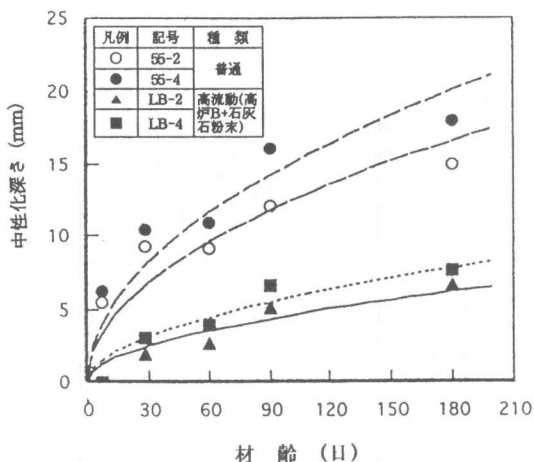


図-8 材齢と中性化深関係

となった。このような結果は前述したように、結合材として置換した石灰石微粉末結合材として水和反応に関与しないため、組織の緻密化ができず、乾燥収縮は増大し、圧縮強度と中性化に対する抵抗性が低下したと考えられる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末を置換した高流動コンクリートの乾燥収縮と中性化について得られた結果は以下にまとめられる。

(1)高炉スラグ微粉末を使用した高流動コンクリートの乾燥収縮率は、材令1週と材令2週の初期材令で水セメント比55%の普通コンクリートより幾分大きくなるが、材令6ヶ月段階では、その差が縮まる傾向となる。材令6ヶ月段階の乾燥収縮率は、高流動コンクリートが同一水セメント比の高強度コンクリートよりもいくぶん大きい傾向である。

(2)高流動コンクリートの乾燥収縮について、使用する高性能AE減水剤と結合材により差はあるが重量の減少(水分の逸散)と収縮量の関係は同一水セメント比の高炉スラグ無使用の高強度コンクリートと同じである。

(3)乾燥に伴う相対動弾性係数の変化では、水セメント比55%の普通コンクリートで20%~30%程度低下するのに対し、高流動コンクリ-

トでは低下は小さく、基準値を上回っているものが多い。

(4)水結合材比35%前後の高流動コンクリートでは、180日間の促進中性化条件(CO₂濃度5%)の範囲で、高炉セメントに石灰石粉末を加えた場合を除いて中性化の進行は見られなかった。

(5)石灰石粉末を用いた高流動コンクリートの乾燥収縮率は、他の結合材を用いた場合よりも幾分大きくなり、さらに中性化の進行も早い傾向にある。しかし、この場合においても、中性化の程度は水セメント比55%の普通コンクリートよりも大幅に小さい値であった。

参考文献

- 1) 塩見ら：高強度コンクリートの乾燥収縮特性におよぼす諸要因の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，PP. 487~492，1992
- 2) 権・鎌田ら：混和材を混入した高強度コンクリートの乾燥収縮と中性化，日本建築学会学術講演梗概集，PP.1015~1016，1993
- 3) 田沢ら：高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの自己収縮，第19回セメントコンクリート研究討論会論文集，PP.23~28，1992
- 4) 児玉ら：高強度のための高性能減水剤の開発，セメント・コンクリート，No. 546，PP.24~32，1992
- 5) 谷口ら：高炉スラグB種および石灰石粉を使用した超流動コンクリート諸性質，第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，PP.34~39，1994
- 6) 小林ら：石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの微小硬度と付着性状，日本コンクリート工学協会・第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文集，PP.149~156，1994
- 7) 渡部ら：二成分系低発熱高流動コンクリートの基礎物性について，日本コンクリート工学協会，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.57~62，1992