

セルロース系増粘剤を用いた高流動コンクリートの微細構造と物質透過性について

佐野 清史¹・松本 典人²・服部 篤史³・宮川 豊章⁴

¹正会員 東洋建設株式会社 美浦研究所 材料研究室長(〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1)

²正会員 東洋建設株式会社 美浦研究所 研究員(〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1)

³正会員 工修 京都大学大学院工学研究科 助手 (〒606-8317 京都府京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー会員 工博 京都大学大学院工学研究科 教授 (〒606-8317 京都府京都市左京区吉田本町)

セルロース系増粘剤を用いた高流動コンクリートの耐久性評価をおもな目的として、増粘剤の添加がセメントペーストの微細構造等に与える影響を調べた。併せて当該コンクリートの塩化物イオン浸透性や中性化進行性等の物質透過性を実験により調べ、微細構造の面から検討した。その結果、増粘剤の添加によって骨材界面に脆弱な遷移帯が見られない微細構造が形成され、毛細管空隙量が少なくなる等によって、同一水セメント比の増粘剤を添加しないコンクリートと同等以下の物質透過性を示すことがわかった。また、細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合について検討した結果、耐久性の向上効果が認められた。

Key Words: *chloride, carbonation, interfacial transition zone, pore structure, self-compacting concrete, cellulosic viscosity agent,*

1. はじめに

高流動コンクリートは、高い流動性と優れた材料分離抵抗性を併せ持つ締固め不要を目的とした自己充填型コンクリートである。しかし、当該コンクリートに関する研究はフレッシュ性状に関するものが多く、耐久性に関する研究は十分といえない。

増粘剤を用いた高流動コンクリート(以下、増粘剤系高流動コンクリートまたは増粘剤系)は、増粘剤および高性能 AE 減水剤の適量添加によって自己充填性を得るコンクリートであるため、水セメント比または水結合材比が通常のコンクリートと同等となる場合が多く^{1),2)}、これが粉体系高流動コンクリート³⁾(以下、粉体系)との大きな相違点になっている。また、増粘剤系は一般に粉体系や通常のコンクリートに比べて単位水量が多い配合となる場合が多いことや、自己充填性の向上を目的として高炉スラグ微粉末などの混和材を用いた併用系とする場合がある⁴⁾など、耐久性に関して十分な検討が必要と考えられ

る面を多々有している。

一方、コンクリート硬化体の微細構造は、強度およびイオン透過性などの硬化コンクリートの品質に影響を与えることが知られており^{5),6)}、微細構造を調べることは硬化品質を評価するうえで有用な指標となる。とりわけコンクリートを構成する骨材とセメントペーストの境界部に形成される遷移帯は、他の領域に比べて組織が疎で粗大な毛細管空隙が多量に存在し、強度に影響を与えるだけでなくコンクリート中への気体や液体、イオンなどの浸透を容易にするため、コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を与える。

本研究は、増粘剤系高流動コンクリートの耐久性評価を目的として、増粘剤の添加がコンクリート中のセメントペーストやセメントペーストと骨材界面の微細構造に与える影響を調べたうえで、硬化コンクリートの物質透過性について微細構造の面から考察したものである。

表-1 ペーストの配合

配合 No.	記号	W/C (%)	増粘剤 (W×%)	SP 剤 (C×%)
1	45VA00	45	—	—
2	45VA02	45	0.2	—
3	50VA00	50	—	—
4	50VA01	50	0.1	—
5	50VA02	50	0.2	—
6	50VA03	50	0.3	—
7	50VA10	50	1.0	—
8	50VA02SP2	50	0.2	2.0
9	55VA00	55	—	—
10	55VA02	55	0.2	—

[記号の説明]

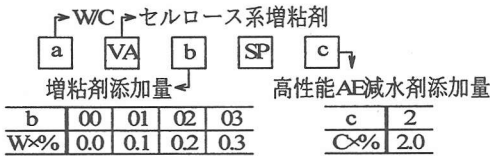


表-2 セメントペーストの基本物性に関する試験

試験名	試験方法
0 打フロー試験	JIS R 5201
強さ試験	
凝結時間試験	
J ロット試験	JSCE-F531
ブリーディング試験	JIS A 1123

2. 増粘剤を添加したセメントペーストの微細構造

増粘剤の添加量や水セメント比を変化させた種々の配合のセメントペースト(以下、ペースト)について、微小硬度和毛細管空隙分布等を測定し、増粘剤添加の有無や添加量の相違が硬化ペーストの微細構造に与える影響を評価した。

(1) 実験概要

a) 使用材料

使用材料は、水道水と普通ポルトランドセメント(比重 3.15, 比表面積 3380cm²/g)、増粘剤(セルロース系水溶性高分子)のほかに、一部の配合で高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系, SP 剤と略す)を用いた。

b) ペーストの配合

実験に用いた配合は、表-1 に示す 10 配合である。これらは、増粘剤添加の有無や増粘剤添加量の相違、水セメント比の相違を要因として設定したもので、一部に高性能 AE 減水剤添加の配合も加えた。なお、増粘剤の添加量は、増粘剤系の標準添加量が単位

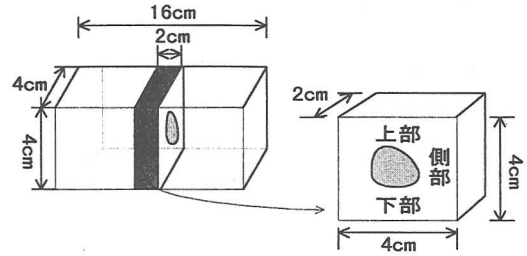


図-1 微小硬度の測定用試料の作製方法

水量(W)の 0.2~0.3% であることから、この範囲を中心に多量添加の場合を加えた 4 水準とした。また、水セメント比(W/C)は増粘剤系で実績の多い 45, 50, 55% の 3 水準とし、高性能 AE 減水剤の添加量は増粘剤系での標準添加量とした。

c) 基本物性試験

ペーストの基本物性を調べるため、表-2 に示す試験を行った。なお、試験や供試体作製は突き棒を用いた締固めを行わない条件とした。

d) 微小硬度の測定

微小硬度の測定にあたっては、予め表乾状態に調整した粗骨材(粒径 20mm 程度, 比重 2.61)を試験配合のペースト中に埋没させたのち引き上げ、同一配合のペーストを型枠(40×40×160mm)に充填し、この中央部に前述の骨材を埋め込んで供試体を作製した。測定用試料は、供試体を所定材齢まで標準養生した後、粗骨材面が表れるように 40×40×20mm 程度に切断したものとした(図-1 参照)。測定は、4 週材齢の試料をマイクロヴィッカーズ硬度計(荷重 3g)を用いて行った。なお、この測定は、試料の粗骨材上部、側部および下部の硬化ペースト部を粗骨材とペーストの境界面から 100μm までの 10μm 間隔で各位置の近傍 3 箇所で行い、3 箇所の平均値を各位置の微小硬度とした。

e) 毛細管空隙分布の測定

硬化ペースト中の空隙径 6nm~2μm の毛細管空隙を水銀圧入法によって測定した。試料には、ペーストで作製した供試体(40×40×160mm)を標準養生した後、1 週および 4 週材齢で供試体中央部から一辺が約 10mm の立方体を切り出したものを用いた。

f) 空気量および気泡径の測定

W/C が 50% の配合の硬化ペーストについて、空気量および気泡径が約 6μm~1000μm の平均気泡径を画像解析による面積比法を用いて測定した。測定には、4 週材齢まで標準養生を行なった供試体

表-3 セメントペーストのフレッシュ性状

配合	0打 フロー (cm)	J漏斗 流下時間 (sec)	ブリーディン グ率 (%)	凝結時間 (hr)	
				始発	終結
45VA00	19.7	28.5	3.2	2.8	8.6
45VA02	17.1	32.0	2.1	6.2	10.5
50VA00	22.2	15.3	5.4	3.5	9.5
50VA01	20.4	21.3	5.3	4.8	10.8
50VA02	20.3	29.5	2.9	6.3	11.2
50VA03	20.2	37.2	1.1	6.5	11.6
50VA10	26.4	1243	0.0	13.3	20.7
50VA02SP2	39.4	23.1	3.2	14.4	21.2
55VA00	25.7	8.6	6.2	4.0	10.0
55VA02	24.4	16.0	5.2	6.9	12.7

(40×40×160mm)の中央部から厚さ20mmの試料を切り出し、研磨した切断面の気泡に蛍光剤を充填したものをを用いた。

(2) 実験結果および考察

a) 増粘剤がペーストのフレッシュ性状に与える影響

表-1に示す全配合のペーストのフレッシュ性状を表-3に示す。増粘剤を添加したペースト(以下、増粘剤系ペースト)は、無添加のペーストに比べてJ漏斗流下時間が大きく、かつ添加量に応じて増大する傾向がみられる。一方、増粘剤系ペーストの0打フローは無添加のペーストよりやや小さい程度で、添加量がW×1.0%と多い場合は逆に大きくなっている。これは、セルロース系増粘剤が増粘作用のほかに潤滑作用を有している⁹⁾ためと思われる。また、高性能AE減水剤を添加したペーストは、添加しないペーストに比べてJ漏斗流下時間が小さく、0打フローも飛躍的に増大した。

凝結時間は、増粘剤添加量の増大に応じて遅くなり⁹⁾、高性能AE減水剤の添加はさらに凝結遅延を促進する傾向が認められた。ブリーディング率は増粘剤添加量の増加に伴って小さくなる傾向が見られるが、添加量が少ないW×0.1%のペーストは無添加のペーストとほぼ同等である。また、高性能AE減水剤の添加は凝結遅延を促進させることによって、ブリーディング率をわずかに大きくする傾向がみられた。

b) 増粘剤が空気量と圧縮強度に与える影響

硬化ペーストについて調べた空気量および圧縮強度を表-4に示す。これによれば、増粘剤系ペーストの圧縮強度は無添加のペーストに比べてやや小さくなる傾向が見られる。4週材齢でみると、増粘剤添加量がW×0.1~0.2%では無添加とほぼ同等であるが、添加量をやや多くしたW×0.3%で5%程度、添加量が多いW×1.0%では20%強の低下割合となっている。

表-4 セメントペーストの強度特性、空気量、平均気泡径

配合	圧縮強度 (N/mm ²)		空気量 (%)	平均気泡径 (μm)
	1週	4週		
45VA00	32.8	47.4	-	-
45VA02	29.9	46.1	-	-
50VA00	28.9	40.0	0.34	24
50VA01	25.8	40.4	0.60	44
50VA02	25.1	39.4	1.50	53
50VA03	25.8	37.7	2.43	38
50VA10	20.6	31.7	3.40	94
50VA02SP2	34.5	48.2	0.23	16
55VA00	24.0	37.7	-	-
55VA02	20.1	33.6	-	-

一方、硬化ペーストの空気量は、増粘剤系ペーストが無添加のペーストに比べて多く、かつ添加量にほぼ比例して増大する傾向がみられる。また、平均気泡径も増粘剤の添加によって大きくなっている。したがって、増粘剤の添加量に応じて圧縮強度が低下する現象は増粘剤自体の影響ではなく、増粘剤の添加によってブリーディングの発生が抑制され、ペーストの実際の水セメント比が大きくなったことや、増粘剤の添加によってペーストの粘性が高まり空気の巻き込み等によって空気量が増加したため⁹⁾と考えられる。これは、高性能AE減水剤を添加したペーストは空気量が少なく、圧縮強度は4週材齢で増粘剤無添加のペーストに比べて20%程度大きくなっていることから同様の推定ができる。高性能AE減水剤添加により強度が高くなる要因は、セメント粒子の分散作用¹⁰⁾のほかに、フレッシュ時のペーストの粘性を小さくし、巻き込み空気量を減少させることにもあると思われる。

c) 増粘剤が微小硬度に与える影響

硬化ペーストの4週材齢の微小硬度について、W/Cが50%の6配合の測定結果を図-2に示す。増粘剤無添加ペーストの遷移帯領域は約60μmで、添加量が少ないW×0.1%の増粘剤系ペーストも無添加ペーストとほぼ同等の領域を示した。これに対して、添加量がW×0.2%以上の増粘剤系ペーストは遷移帯領域が明瞭に表れない特徴がみられた。また、微小硬度の位置の相違(図-1に示す骨材の上部、下部、側部)については、いずれも骨材の下部が小さい傾向が見られるが、増粘剤系ペーストでは増粘剤添加量の増加に伴い、測定位置による微小硬度の差は小さくなった。これは、骨材界面ではブリーディング水により形成された水膜が骨材近傍での密実な水和物組織の形成を阻害し、ポーラスな領域を形成する¹¹⁾と考えられるが、とりわけブリーディング水が溜まりや

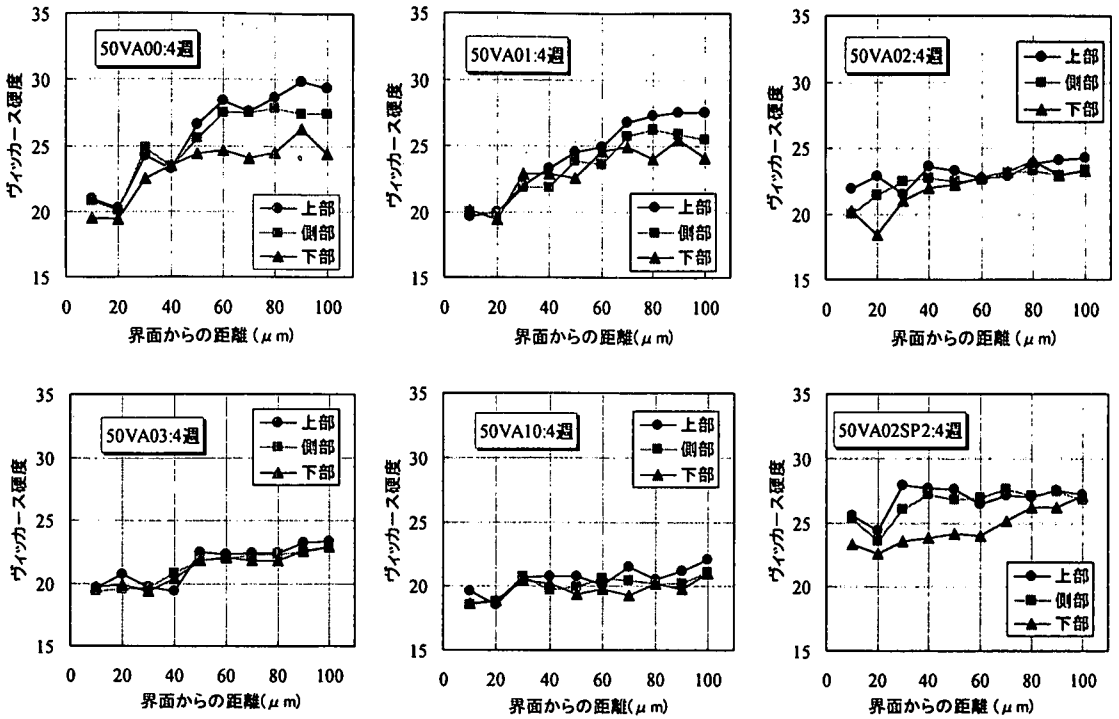


図-2 微小硬度(W/C=50%)

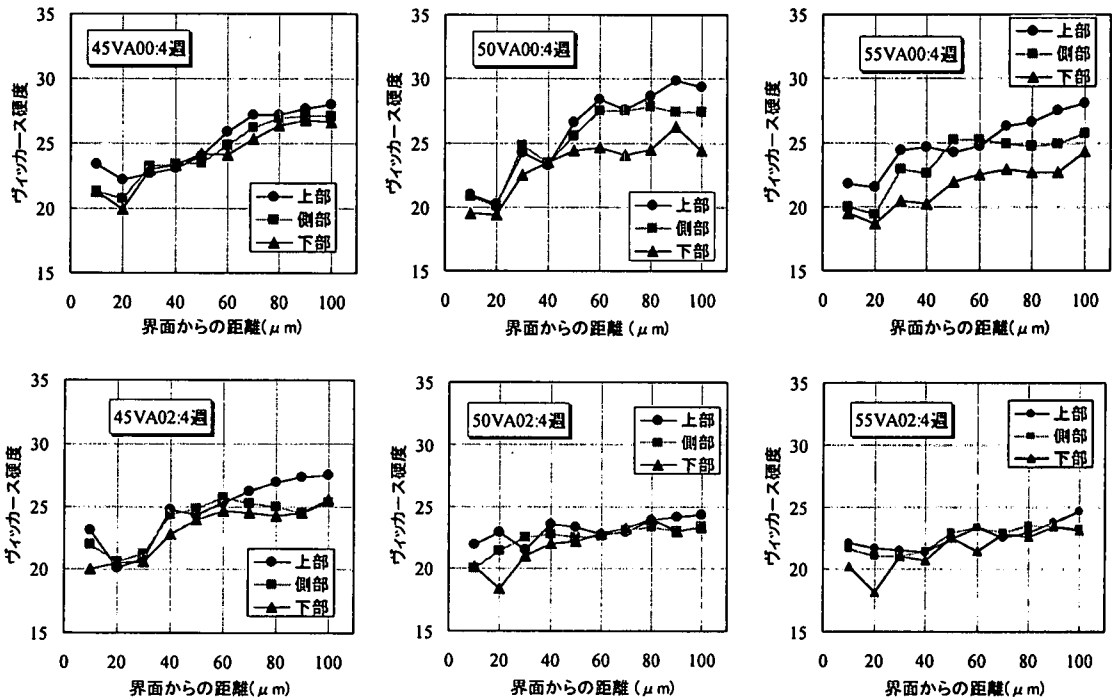


図-3 微小硬度(W/C=45,50,55%)

すい骨材下部では、実際の水セメント比が大きくなり微小硬度が小さくなったものと考えられる。一方増粘剤系ペーストは、増粘剤の添加によってブリー

ディングが抑制されるため、骨材周辺に移動する自由水が減少し、硬化ペースト中に均質な水和物組織が形成されたものと推定される。また、ヴィッカー

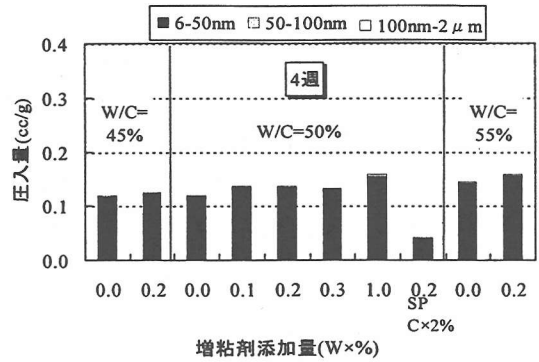
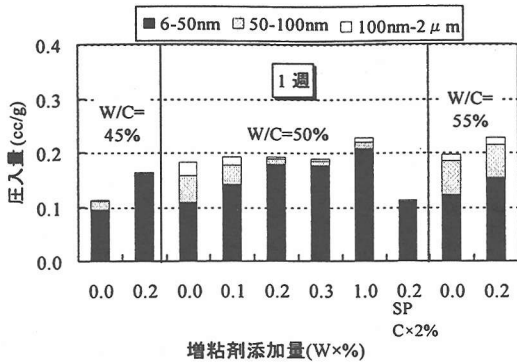


図-4 セメントペーストの毛細管空隙分布

ス硬度が均等になるバルク部(ペースト領域)の微小硬度は、増粘剤無添加のペーストに比べて増粘剤系ペーストが小さく、4週材齢では添加量に比例して小さくなる傾向が見られた。これは、増粘剤添加量の増大に伴ってブリーディングが抑制され、硬化ペースト中を移動する自由水が減少し、実際の水セメント比が大きくなった(配合上の水セメント比に近くなる)ことや、増粘剤添加によって空気量が増加したことによる影響と推定される。

一方、高性能 AE 減水剤を併用した増粘剤系ペーストは、4週材齢における骨材上部および側部の遷移帯領域の幅が増粘剤無添加のペーストに比べて小さい。これは、高性能 AE 減水剤添加によってセメントの分散性が向上し、水和組織が緻密になったためと考えられる。また、骨材下部の微小硬度は上部や側部に比べて小さい値を示している。当ペーストがやや材料分離の性状を示していたこともあり、骨材下部にブリーディングが生じて骨材表面近傍に脆弱な領域が広がったものと考えられる。

3 水準の水セメント比における増粘剤無添加ペーストと増粘剤添加量 $W \times 0.2\%$ ペーストの4週材齢の微小硬度を対比させて図-3に示す。骨材界面の脆弱な遷移帯領域は、増粘剤無添加ペーストでは骨材の上部および側部が水セメント比の相違にかかわらず $50\sim 70\mu\text{m}$ 程度の遷移帯幅であるのに対し、骨材の下部は水セメント比の増加に伴って遷移帯幅が大きくなり、不明瞭になる傾向が見られる。一方、増粘剤添加量 $W \times 0.2\%$ のペーストは、W/C が45%の配合では位置の違いに依らず遷移帯幅が約 $40\mu\text{m}$ 程度と増粘剤無添加ペーストに比べて小さく、W/C が50%と55%では明瞭な遷移帯幅が見られず、界面近傍領域の微小硬度がバルク部と同等となる傾向が見られる。

d) 増粘剤の添加が毛細管空隙量に与える影響

1週および4週材齢における硬化ペーストの毛細

管空隙量(空隙径 $6\text{nm}\sim 2\mu\text{m}$)の分布を図-4に示す。高性能 AE 減水剤を併用した配合を除く増粘剤系ペーストは、増粘剤無添加のペーストに比べて1週材齢では毛細管空隙量が多く、とりわけ増粘剤添加量の増加に伴って空隙径 50nm 以下の比較的小さい空隙領域の割合が増大する傾向を示した。これは、増粘剤添加量が増えるとペーストの凝結遅延が増大する傾向にあることから、初期の水和反応の進行が増粘剤無添加ペーストに比べて遅くなったため¹²⁾と考えられる。しかし、4週材齢では増粘剤系ペーストと無添加ペーストの毛細管空隙量の差は小さく、1週材齢に見られる毛細管空隙分布の相違も顕著に表れていない。これらのことから、増粘剤の添加がペーストの毛細管空隙量に与える影響は、増粘剤添加による凝結遅延の影響で1週材齢では空隙径 50nm 以下の空隙量が増大するが、4週材齢以後の長期の微細構造に与える影響は小さいものと考えられる。なお、高性能 AE 減水剤添加配合を除くいずれの配合も、1週材齢から4週材齢にかけて空隙径が小さい領域に移行し、空隙径 50nm 以下の毛細管空隙量が大部分を占めた。また、水セメント比の増大に伴って毛細管空隙量が増加する傾向がみられた。

一方、増粘剤と高性能 AE 減水剤を併用した配合は、増粘剤のみ添加した配合に比べて毛細管空隙量が著しく減少し、空隙径 $6\text{nm}\sim 50\text{nm}$ の領域の毛細管空隙量が大部分を占めた。この傾向は4週材齢でさらに顕著に表れている。これは、高性能 AE 減水剤のセメント分散作用によって密実なペーストが形成されたためと考えられる。

したがって、増粘剤の添加がペーストの毛細管空隙量や分布に与える影響は小さく、さらに高性能 AE 減水剤を併用した場合は毛細管空隙量が減少し、空隙径 $6\text{nm}\sim 50\text{nm}$ の小さな空隙径が大部分を占める密実な微細構造となることがわかった。

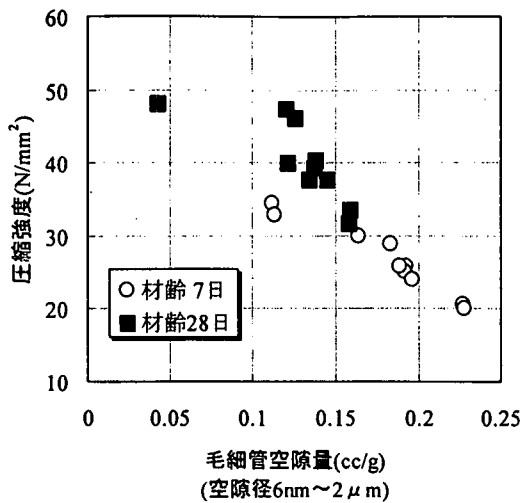


図-5 毛細管空隙量(空隙径6nm~2μm)と圧縮強度の関係

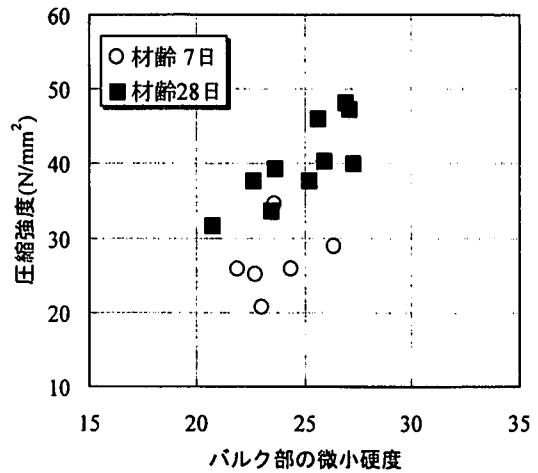


図-6 バルク部の微小硬度と圧縮強度の関係

e) 微小硬度および毛細管空隙量と圧縮強度の関係

硬化ペーストにおける毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)およびバルク部の微小硬度とペースト圧縮強度との関係を図-5, 図-6 に示す。圧縮強度と空隙径 6nm~2μm の毛細管空隙量の関係については、管谷の研究報告¹¹⁾と同様、本実験でも両者に高い相関関係が認められた。また、バルク部の微小硬度と圧縮強度の間にも比較的明瞭な相関関係が認められた。

f) まとめ

増粘剤を添加したペーストの微細構造について、得られた知見を整理すると次のようになる。

- (1) 増粘剤を添加したペーストは、無添加のペーストに比べて圧縮強度が小さくなる傾向を示す。これは、増粘剤の添加量に比例してブリーディングの発生が抑制されペーストの実際の水セメント比が大きくなり、また硬化ペースト中の空気量も増大したためと考えられる。しかし、高性能 AE 減水剤を併用すると、これの分散効果等によって空気量は減少し、圧縮強度は増粘剤無添加のペーストに比べて逆に大きくなる。
- (2) ペーストと粗骨材との界面に生じる遷移帯は、増粘剤無添加のペーストと増粘剤添加量が少ない W×0.1%のペーストがほぼ同等の領域を示すのに対して、添加量が W×0.2%以上のペーストでは明瞭な遷移帯が無くなり、バルク部の微小硬度が均一となる傾向を示す。これは、増粘剤の添加によってブリーディングが抑制され、骨材周辺に移動

する自由水が減少し、ペースト中に均質な水和物組織が形成されたためと推定される。

- (3) 増粘剤を添加したペーストは、無添加の場合に比べて空隙径 6nm~2μm の毛細管空隙量が 1 週材齢で多くなり、空隙径 50nm 以上の比較的大きな毛細管空隙が多くなるが、4 週材齢では両者の差は小さくなり、空隙径 6nm~50nm の毛細管空隙が大部分を占める。高性能 AE 減水剤を併用した場合は、空隙径 6nm~50nm の毛細管空隙が著しく減少する。
- (4) 増粘剤を添加したペーストでは、空隙量 6nm~2μm の毛細管空隙量と圧縮強度および微小硬度の間に良好な相関が認められる。

3. 増粘剤系高流動コンクリートの微細構造と硬化品質

増粘剤系高流動コンクリートを中心とした各種配合のコンクリートについて調べた圧縮強度、毛細管空隙分布および塩化物イオン浸透性等の物質透過性に関する実験結果を示すとともに、硬化品質に与える増粘剤添加の影響やコンクリート中の微粉量を高炉スラグ微粉末で増加させた場合の影響を微細構造との関係について考察する。

検討したコンクリートは、増粘剤系の標準的な配合を基本に、細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した増粘剤系の配合、この高炉スラグ微粉末置換

表-5 コンクリートの使用材料

名称	仕様
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 比重:3.15 比表面積:3380cm ² /g
高炉スラグ微粉末(Sg)	比重:2.89 比表面積:5920cm ² /g
粗骨材(G)	Gmax=20mm 比重:2.61 F.M.:6.45
細骨材(S)	海砂 比重:2.54 吸水率:2.06% F.M.:2.65 海砂:砕砂=7:3 砕砂 比重:2.53 吸水率:2.93% F.M.:3.17
(混合率)	
増粘剤	セルロース系水溶性高分子 2%水溶液, 粘度:10000mPa·s
高性能 AE 減水剤	ポリアルキルカルボン酸エーテルと架橋ポリマー複合
AE 助剤	変性アルキルカルボン酸化合物

表-7 コンクリートの基本物性に関する試験

試験名	試験方法
スランブ試験	土木学会 「高流動コンクリートの設計・施工指針」の試験方法
スランブフロー試験	
500mm フロー到達時間	
V 漏斗を用いた流下試験	
U 型充てん装置を用いた 間げき通過性試験	
空気量試験	JIS A 1128
ブリーディング試験	JIS A 1123
凝結試験	JIS A 6204 付属書 1

表-6 コンクリートの検討配合

配合名	目標 スランブ [*] フロー (cm)	設定 空気量 (%)	W/C (%)	W/P [*] (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³) ()内: 単位容積(ℓ/m ³)					増粘剤 W×%	高性能 AE 減水剤 P×%
						W	C	Sg	S	G		
高流動 A	65±5	4.5±1.5	50	50.0	51.4	185	370	—	858	835(320)	0.20	2.50
高流動 B				44.8	50.2			43(15)	819		0.20	1.50
高流動 C				40.5	49.0			87(30)	782		0.15	1.30
高流動 D				34.1	46.5			173(60)	705		—	1.20
比較 A-1	12±2.5 (スランブ [*])	4.5±1.5	50	50.0	48.0	185	370	—	801	893(342)	—	0.20
比較 A-2				50.0	51.4				858			0.30
比較 D				50.0	46.5				173(60)			705

*P: C(セメント)+Sg(高炉スラグ微粉末)

量を増やして増粘剤無添加で自己充填性を確保させた配合等の高流動コンクリート、およびこれら高流動コンクリートと比較するために類似配合で増粘剤無添加にしたり高性能 AE 減水剤添加量を減じた配合の比較用コンクリート(以下、比較コンクリート)である。増粘剤系における高炉スラグ微粉末の使用は、細骨材の一部を当混和材で置換することでコンクリート中の微粉量が増大し、自己充填性の向上に加え高性能 AE 減水剤添加量の削減効果をもたらすとの研究報告¹⁾があり、検討対象に加えた。

(1) 実験概要

a) 使用材料

使用材料を表-5 に示す。セメント、増粘剤および高性能 AE 減水剤は 2. に示した実験で用いたものと同材料である。

b) コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合は、表-6 に示す高流動コンクリートの 4 配合および比較コンクリートの 3 配合である。これら 7 配合で一定とした条件は、水セメント比、単位水量、単位セメント量および空気量であり、このうち高流動コンクリートは、単位粗骨材容積を 320ℓ/m³ とし、スランブフローが

65±5cm の自己充填性を持つ 4 配合とした。表に示す高流動 A は増粘剤系の標準的な配合、高流動 B, C, D は高流動 A の配合をもとに細骨材の一部を高炉スラグ微粉末でコンクリート単位容積当たり 15, 30, 60ℓ置換した配合である。増粘剤添加量は、高流動 B は高流動 A と同一量、高流動 C は一般に増粘剤系で所要添加量の下限値とされる量¹⁾、高流動 D は無添加とした。高流動コンクリートの材料分類²⁾では、高流動 C が併用系、高流動 D は粉体系ということになる。また、比較コンクリートは、増粘剤無添加でスランブが 12cm 程度となるようにした高流動 A および D の比較用の 3 配合である。比較 A-1 は単位粗骨材量を 342ℓ/m³ に増加させ通常のコンクリートに近づけた配合、比較 A-2 は高流動 A の配合から増粘剤を除いた配合、比較 D は粉体系の高流動 D の配合から高性能 AE 減水剤添加量を減じた自己充填性を有しない配合である。

なお、スランブフローおよびスランブが目標値を満足するよう高性能 AE 減水剤の添加量を各配合で調整した。また、空気量は AE 助剤の使用量で調整した。

c) コンクリートの基本物性試験

コンクリートの基本物性を調べるため、表-7 に示

表-8 フレッシュコンクリートの性状

配合	スランブフロー, *)スランブ		V漏斗 流下時間 (sec)	U型充填 充填高さ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	ブリーディ ング率 (%)	凝結時間	
	50cm到達時間 (sec)	スランブフロー (cm)						始発 (hr)	終結 (hr)
高流動A	8.5	66.5	9.2	35.5	5.6	22.0	0.0	14.3	17.0
高流動B	4.5	69.0	8.7	35.8	5.3	22.0	0.0	11.0	13.0
高流動C	4.9	67.5	10.6	35.7	5.2	22.0	0.0	9.5	11.7
高流動D	3.9	67.5	10.0	35.0	3.6	18.5	0.0	-	-
比較 A-1	-	9.8*)	-	-	-	20.5	3.3	4.4	6.2
比較 A-2	-	9.4*)	-	-	-	20.5	4.0	4.2	6.2
比較 D	-	10.7*)	-	-	-	20.5	1.1	4.0	6.0

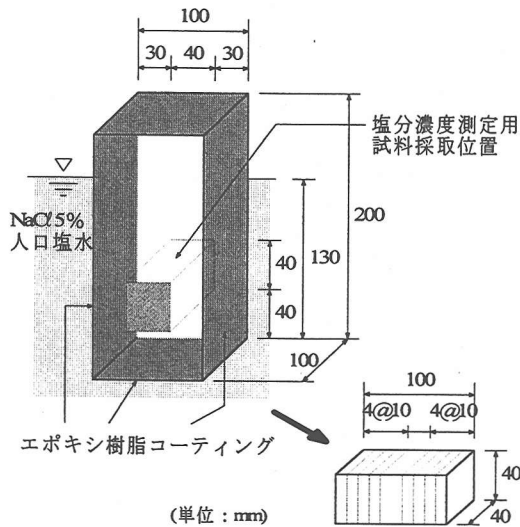


図-7 塩化物イオン浸透試験の概要

す試験を行った。なお、高流動コンクリートの供試体作製は突き棒を用いた締固めを行わない条件とした。

d) 毛細管空隙分布の測定

7 配合のコンクリートについて、それぞれのフレッシュコンクリートを 5mm ふるいでウエットスクリーニングしたモルタルで作製した角柱供試体(40×40×160mm)を 3, 12 ヶ月材齢まで 20°C水中で養生した後、一辺が約 10mm の立方体に切り出した試料を用いて毛細管空隙分布を測定した。測定は水銀圧入法による方法とし、真空デシケータ内で前処理を行った後に実施した。

e) 塩水浸漬による塩化物イオン浸透量の測定

7 配合の各々のコンクリートで作製した図-7 に示すような角柱供試体(100×100×200mm)を、4 週材齢までの 20°C水中養生とさらに 4 週間の 20°C80%雰囲気中で気中養生を行ったのち、塩化物濃度 3%の人工塩

水に長軸方向の約 2/3 を浸漬した。浸漬に際して、供試体には対称となる 2 側面からのみ塩化物イオンが浸透するように、それ以外の面をエポキシ樹脂でコーティングした。塩化物イオン浸透量の測定は、塩水浸漬期間 1, 3, 6 ヶ月および 1 年の時点で図-7 に示す測定用試料を切り出し、さらにこの試料の両端面から 10mm 単位で深さ 20mm までの試料を採取して JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じた電位差滴定法により全塩分量を測定した。

f) 促進中性化試験

高流動コンクリートの 4 配合と比較コンクリートの 2 配合(比較 A-1, 比較 D)について促進中性化試験を行った。試験は、円柱供試体(100×200mm)を高流動コンクリートは 8 ヶ月材齢まで、比較コンクリートは 6 ヶ月材齢まで 20°Cの水中養生を行ったのち、温度 30°C、湿度 60%、炭酸ガス濃度 5%の環境に 1 ヶ月間静置させる条件とした。中性化深さの測定は、供試体を長軸方向に割裂した破断面に 1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、発色しない領域の供試体暴露面からの距離を 7 箇所について測定して平均値を中性化深さとした。

(2) 実験結果および考察

a) 各種コンクリートのフレッシュ性状

7 配合のコンクリートのフレッシュ性状を表-8 に示す。高流動コンクリートの 4 配合は、スランブフロー、V 漏斗流下時間および U 型充填高さのいずれも所定の自己充填性を示すフレッシュ性状であった¹⁵⁾。また、ブリーディング率は、高流動コンクリートがいずれも 0%であったのに対し、比較コンクリートでは増粘剤系の比較用が 3~4%、高炉スラグ微粉末を多量使用した粉体系の比較用が 1%程度であった。凝結は、増粘剤の添加量が多いほど、また高性能 AE 減水剤添加量が多いほど遅延する傾向が見られたが、

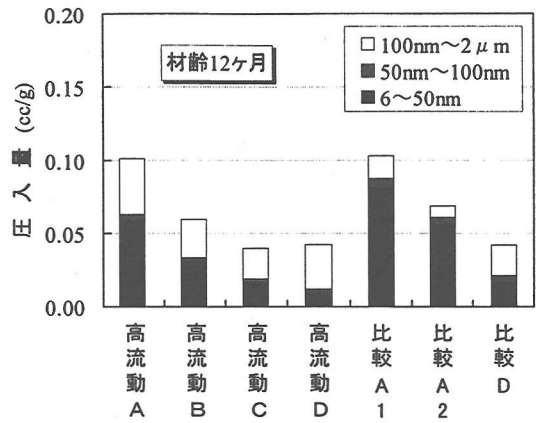
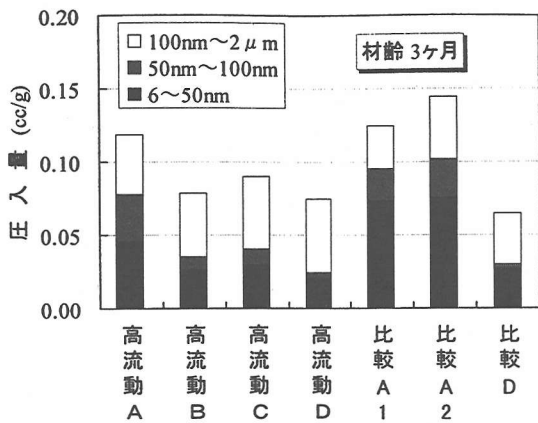


図-8 毛細管空隙分布(空隙径 6nm~2μm)

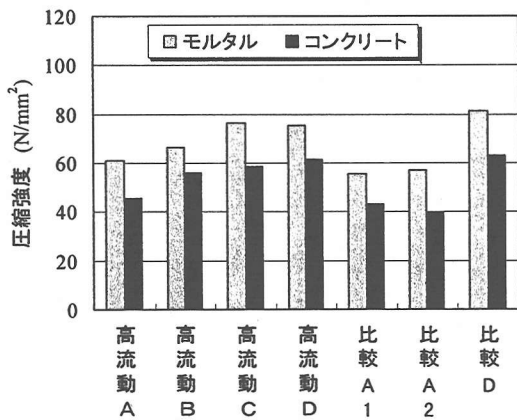


図-9 圧縮強度

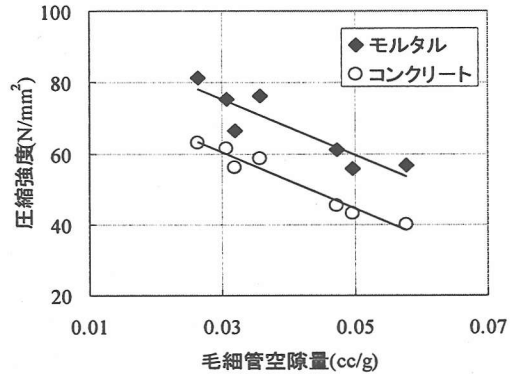


図-10 3ヶ月材齢におけるモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)と圧縮強度の関係

比較用コンクリートは高性能 AE 減水剤の添加量が少ないこともあり、凝結時間に与える影響は小さかった。

b) 毛細管空隙分布に関する検討

7配合のコンクリートについて、モルタルの3ヶ月および12ヶ月材齢における毛細管空隙量および空隙分布の測定結果を図-8に示す。図は、モルタルの毛細管空隙量および空隙分布を単位ペースト量当りに換算した値で整理している。これは、高炉スラグ微粉末の添加量が変化する配合では同一容積モルタル中のペースト量が変わるため、各種配合のコンクリートを比較するうえで有用な指標となりうると判断して用いたものである。なお、本実験では高炉スラグ微粉末を細骨材の一部置換として使用したが、当混和材が潜在水硬性を有している¹⁶⁾ことから、硬化品質の検討においてはペーストの構成材料として扱うこととした。

増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)のモルタルの毛細管空隙量は、3ヶ月材齢において、増粘剤を添

加しないコンクリート(比較 A-1, A-2)に比べてほぼ同等かやや少なく、12ヶ月材齢において、ほぼ同等か若干大きくなった。この結果は、2.で示した高性能 AE 減水剤を併用した増粘剤系ペーストの毛細管空隙量が著しく減少する傾向と異なるが、これはペーストに細骨材が混入することにより、ペーストで見られた特徴が鈍感になったものと考えられる。

毛細管空隙量の分布では、増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)は増粘剤を添加しないコンクリート(比較 A-1, A-2)に比べて50nm以上の毛細管空隙量の占める割合が高い傾向がみられる。ペーストでは増粘剤や高性能 AE 減水剤の添加にかかわらず4週材齢で空隙径6nm~50nmの毛細管空隙が大部分を占めた。モルタルではペーストと細骨材の界面に生じる遷移帯などの影響によって毛細管空隙量の分布に変化が生じたものと推定される。この点についてはさらに検討が必要と考えられる。

なお、細骨材の一部置換として高炉スラグ微粉末を添加した場合は、これを添加しない増粘剤系の標

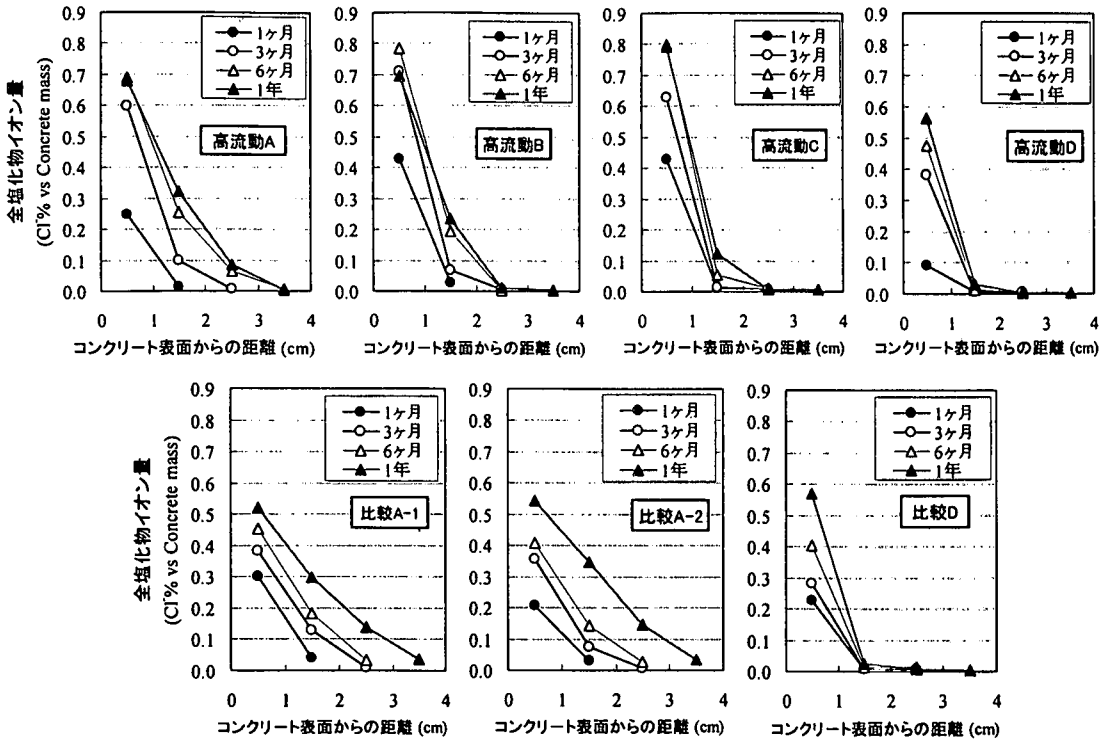


図-11 塩水浸漬による塩化物イオン浸透量

準的な配合(高流動 A)に比べて毛細管空隙量が少なく、12ヶ月材齢では高炉スラグ微粉末添加量の増加に伴って毛細管空隙量が減少する傾向がみられる。これは、高炉スラグ微粉末の添加により結合材量が増えたことや、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性がおもに長期材齢において発揮されたためと考えられる。

c) 圧縮強度に関する検討

標準養生を行った3ヶ月材齢のコンクリートおよびモルタルの圧縮強度を図-9に示す。増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)の圧縮強度は、水セメント比が同一の比較配合(比較 A-1, A-2)と同等もしくはやや大きく、この結果はペーストでの実験結果や他の研究報告⁹⁾と一致する。また、圧縮強度とモルタルの毛細管空隙量(空隙径6nm~2μm)の関係を図-10に示す。コンクリートの圧縮強度は遷移帯を代表とする50nm~2μmの毛細管空隙と相関が高いことが知られている¹⁷⁾が、本実験ではモルタルおよびコンクリートのいずれもこの両者には密接な相関が認められず、空隙径6nm~2μmの毛細管空隙量と圧縮強度において高い相関がみられた。圧縮強度が40N/mm²程度以上の高強度領域では、モルタルの毛細管空隙量(空隙径6nm~2μm)も強度を支配する要因の一つになるものと考えられる。

d) 塩化物イオン浸透性に関する検討

7配合のコンクリート中の全塩化物イオン量の経時変化を図-11に示す。標準的な配合の増粘剤系コンクリート(高流動 A)の塩化物イオン浸透性は、増粘剤を添加しない比較コンクリート(比較 A-1, A-2)に比べて表層部の塩化物イオン量は多くなるが、表面から10mm以上の内部は深部になるほど塩化物イオン量が少なく、塩化物イオン浸透抵抗性が向上する結果になっている。ここで、塩化物イオン浸透性は毛細管空隙や水和生成物などの影響を受ける¹⁷⁾といわれており、この点については増粘剤系(高流動 A)と比較コンクリート(比較 A-1, A-2)にモルタルの毛細管空隙の明瞭な相違は見られず、また配合面でも結合材の種類や単位量、水セメント比が同一であるため、水和生成物の相違による影響とは考えにくい。また粗骨材が存在するコンクリートは、粗骨材自体が塩化物イオンの移動を妨げる要因となり、コンクリート中の粗骨材体積が増加するに伴い遮塩性が向上する¹⁸⁾が、前述のように、増粘剤系(高流動 A)より増粘剤無添加で単位粗骨材量が多い比較コンクリート(比較 A-1)の遮塩性が高い結果になっていない。考えられるのがペーストと粗骨材の界面に形成される遷移帯の塩化物イオン浸透性に与える影響である。

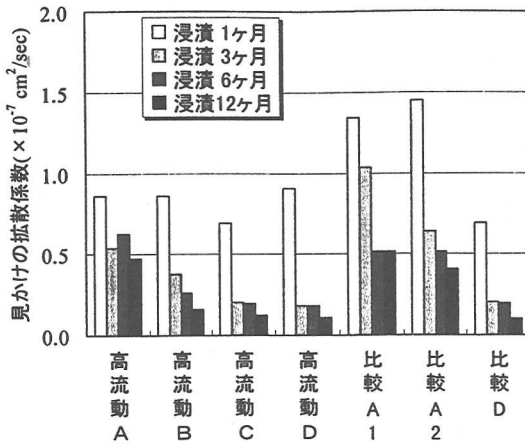


図-12 塩化物イオンの見かけの拡散係数

2.で述べたように、増粘剤系高流動コンクリートの硬化ペーストは粗骨材界面近傍に遷移帯が明瞭に存在しない微細構造を形成する。さらに高性能 AE 減水剤の適量添加によって微小硬度が大きくなる傾向も認められており、これらが塩化物イオン浸透抵抗性を向上させた理由の一つと推定される。いずれにしても、本実験の範囲では、増粘剤の添加によって塩化物イオン浸透性が大きくなることはないことが認められるが、この評価については長期に亘る検証が必要であろう。

一方、高炉スラグ微粉末を添加した3配合の高流動コンクリート(高流動 B, C, D)の塩化物イオン浸透性は、高炉スラグ微粉末添加量の増加に伴って表面から10mm以上の深部で塩化物イオン量が小さい傾向がみられた。これは、水結合材比が小さくなったこと、モルタル中の細骨材量の減少に伴いイオン透過性に寄与する空隙が多く分布する遷移帯が減少したこと¹⁸⁾、および高炉スラグ微粉末の添加によってペーストと骨材の界面が密実になった¹⁹⁾ためと考えられる。増粘剤系高流動コンクリートにおいても、細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換することは、自己充填性の向上¹³⁾に加えて遮塩性の向上効果も付加されるようである。

各浸漬期間におけるコンクリート中の全塩化物イオン浸透量の分布から、正規確率用紙を用いて得られた塩化物イオンの見かけの拡散係数²⁰⁾を図-12に示す。増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)は、増粘剤を添加しない比較コンクリート(比較 A-1, A-2)に比べて、塩水浸漬期間6ヶ月の結果を除けば概ね同程度の拡散係数を示し、いずれも経時的に拡散係数が減少する傾向が認められる。また、高炉スラグ微粉

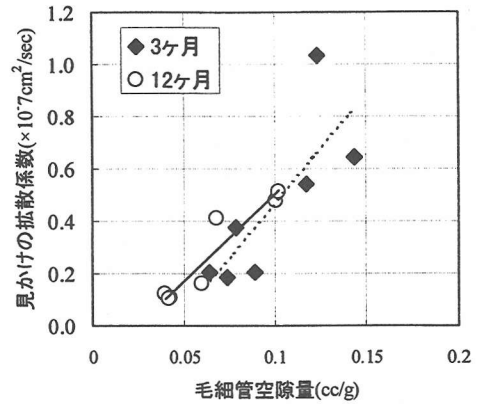


図-13 塩化物イオン見かけの拡散係数とモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)との関係

末を添加した場合は、添加量の増加に伴って拡散係数が減少する傾向がみられる。しかし、浸漬期間が十分長くない場合は供試体表層の毛細管空隙が塩化物イオンで飽和していないため、定常状態にならない。本実験結果においても、図-11にみられるように、増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)は表層部(0~10mm)の塩化物イオン量がほぼ定常状態に達しているが、増粘剤を添加しない比較コンクリート(比較 A-1, A-2)や高炉スラグ微粉末を添加したコンクリート(高流動 C, 高流動 D)は、塩水浸漬期間6ヶ月から1年の半年間においても表層部の塩化物イオン量が若干増加している。したがって、より正確な見かけの拡散係数、あるいは塩化物イオンの固定も考慮した真の拡散係数を求めるには、さらに長期的な実験による検証が必要と思われる。

塩水浸漬期間3ヶ月および1年経過時点の見かけの拡散係数とモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)との関係を図-13に示す。従来、コンクリート中のイオン透過性は、遷移帯に多く分布すると考えられる空隙径 50nm~2μm の毛細管空隙量と密接な関係にあるとされている²¹⁾が、本実験では両者の間には明瞭な相関が認められず、より小さな空隙径を含めた 6nm~2μm の毛細管空隙量との間に良好な相関関係がみられた。これは、増粘剤と高性能 AE 減水剤の添加によって粗骨材とペーストの遷移帯幅が小さくなったことや、高炉スラグ微粉末の添加により遷移帯組織が密実となったこと、およびモルタル中の細骨材量の減少に伴い遷移帯が減少したことによるものと推定される。骨材が存在しない硬化ペーストでは、全空隙量が少ないほど、また空隙径分布が小さい領域に移行するほど拡散しにくくなる

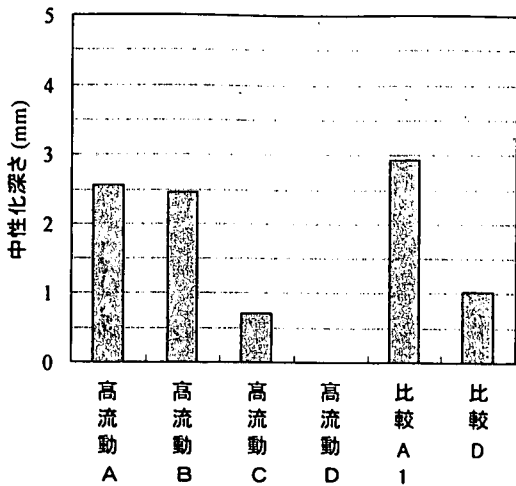


図-14 中性化深さ

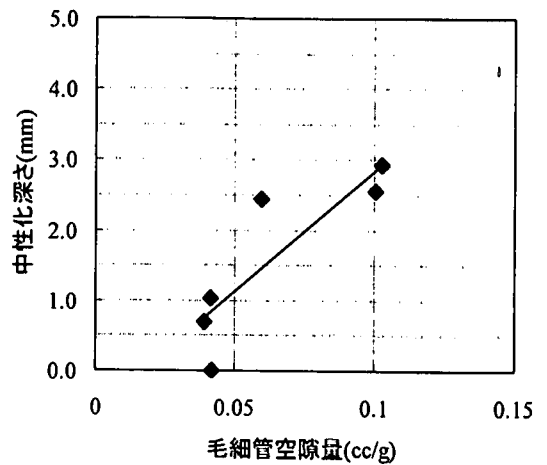


図-15 中性化深さと空隙径 6nm~2μm の毛細管空隙量との関係

されており²¹⁾、この点からも同様の推定ができる。しかし、前述した拡散係数の算出に関する長期的な検証を含め、塩化物イオン浸透性が微細構造だけでなく水和生成物の影響も受けるため、この解明には、今後のさらなる検討が必要であろう。

e) 中性化進行性に関する検討

6 配合のコンクリートの中性化促進期間 1 ヶ月における中性化深さの測定結果を図-14 に示す。いずれの配合も中性化深さが 3mm 以下と小さい値を示した。これは、いずれの配合も通常のコンクリートに比べて単位セメント量が多いこと²²⁾や、コンクリートの養生期間が長く中性化促進試験開始時に水和反応が十分に進んでいたため考えられる。

増粘剤系の標準的な配合(高流動 A)は、増粘剤無添加で単位粗骨材量を増やして通常のコンクリートに近づけた比較コンクリート(比較 A-1)とほぼ同等の中性化深さとなった。また、高炉スラグ微粉末を添加した場合は、添加量がコンクリート単位容積当たり 30ℓ以上で中性化深さが著しく小さくなる傾向がみられる。増粘剤系高流動コンクリートにおいては、細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより、中性化進行の抑制にも効果があることがわかった。

促進中性化期間 1 ヶ月の中性化深さと材齢 12 ヶ月におけるモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)との関係を図-15 に示す。従来、コンクリート中への気体の透過性は、水和生成物により閉塞されにくく連続空隙が形成されやすい空隙径 100nm 以上

の毛細管空隙量と良好な相関がある²³⁾とされており、遷移帯の形成が空隙径 100nm 以上の空隙を増加させるため、透気性が高くなり、中性化の進行も促進されると考えられている。しかし、本実験では両者の間には相関が認められず、より小さい空隙径を含めた空隙径 6nm~2μm の毛細管空隙量との間に良好な相関関係が見られた。これは、増粘剤系高流動コンクリートにおいて、中性化深さと毛細管空隙との関係を検討した研究例は少ないが、空隙径 100nm~2μm の毛細管空隙量との間には良好な相関が認められるとの報告²³⁾もあり、この評価については長期に亘る検証が必要と思われる。

f) まとめ

増粘剤系高流動コンクリートの微細構造と硬化品質について、得られた知見を整理すると次のようになる。

- (1) 標準的な配合の増粘剤系コンクリートは、増粘剤を添加しないコンクリートに比べてモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)がほぼ同等か若干少なく、毛細管空隙分布では空隙径 50nm 以上の比較的大きな毛細管空隙の占める割合が若干大きい。また、3 ヶ月材齢の圧縮強度はやや大きい傾向にある。
- (2) 塩水浸漬による塩化物イオンの浸透性試験結果によれば、標準的な配合の増粘剤系コンクリートは、増粘剤を添加しないコンクリートに比べてコンクリート内部の塩化物イオン浸透量が少なく、見かけの拡散係数はほぼ同等である。さ

らに長期的な検証が必要ではあるが、少なくとも標準的な配合の増粘剤系コンクリートは、増粘剤を添加しない比較コンクリートと同等の塩化物イオン浸透抵抗性を有していると考えられる。また、中性化の進行性についてもほぼ同様な結果が得られた。

(3) 3ヶ月材齢の圧縮強度、および全塩化物イオン量から算出した見かけの拡散係数や中性化深さは、いずれもモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)との間に良好な相関が認められた。これは、増粘剤と高性能 AE 減水剤の適量添加によるペーストと粗骨材の界面に生じる遷移帯組織の密実化が要因の一つと考えられる。

(4) 増粘剤系高流動コンクリートにおいてフレッシュ性状の改善目的で細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合は、塩化物イオン浸透抵抗性や中性化進行抵抗性等の耐久性も向上する。

なお、(4)については、土木学会「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」によれば高炉スラグ微粉末は結合材として扱われており、ポルトランドセメントの置換率が 30%未満の場合、高炉スラグ微粉末を使用した高流動化、高強度化、耐塩害性などの効果が顕著に認められないとされている²⁹⁾。実験では、高炉スラグ微粉末を細骨材の一部として位置付けたが、これを結合材として扱うと、最も高炉スラグ微粉末を添加した配合(高流動 D)の結合材置換率は 32%であり、高炉スラグ微粉末を添加した増粘剤系の配合では、高流動 B が 10%、高流動 C が 19%の置換率となる。例えば、高炉スラグ微粉末添加量が最も少ない配合(高流動 B)は、標準的な配合の増粘剤系コンクリートに比べて遮塩性や中性化進行抵抗性が向上しているものの、その程度は小さい。

4. 結論

本研究において得られた知見を整理すると次のようになる。

(1) 標準的な配合の増粘剤系高流動コンクリートの硬化ペーストは、増粘剤無添加の硬化ペーストに比べてバルク部の微小硬度はやや小さくなるものの、おもにブリーディングの抑制によって骨材界面近傍に明瞭な遷移帯が存在しなくなり、骨材の上部、側部、下部近傍の微小硬度の差が小さくなるなど、均質な硬化ペーストが形成さ

れる。また、増粘剤の添加による毛細管空隙量の顕著な変化は認められない。

- (2) 高性能 AE 減水剤を併用した適切な配合の増粘剤系ペーストはバルク部の微小硬度が大きく、骨材の上部、側部の遷移帯幅が小さくなるほか、毛細管空隙量も極めて小さくなる。したがって、増粘剤系高流動コンクリートが高性能 AE 減水剤の適量使用を前提としている点を考慮すれば、増粘剤の添加が硬化コンクリートの品質を低下させることはないものと考えられる。
- (3) 標準的な配合の増粘剤系高流動コンクリートは、増粘剤無添加のコンクリートに比べて、3、12ヶ月材齢におけるモルタルの毛細管空隙量(空隙径 6nm~2μm)がほぼ同等か若干少なくなる。また、毛細管空隙分布はペーストに比べて空隙径 50nm 以上の毛細管空隙が占める割合が大きくなる。これは、モルタルではペーストと細骨材の界面に生じる遷移帯などの影響によって、毛細管空隙量の分布に変化が生じるためと推定される。
- (4) 標準的な配合の増粘剤系高流動コンクリートは、増粘剤無添加のコンクリートに比べて圧縮強度が同等以上になる傾向を示す。これはおもに高性能 AE 減水剤のセメント分散作用等によるものと思われる。
- (5) 標準的な配合の増粘剤系高流動コンクリートは、増粘剤無添加のコンクリートに比べて内部への塩化物イオン浸透量が少ない傾向を示す。また、全塩化物イオン量から算出される見掛けの拡散係数に両者の顕著な差は認められない。
- (6) 標準的な配合の増粘剤系高流動コンクリートは、増粘剤無添加のコンクリートに比べて中性化進行性が小さい。
- (7) 増粘剤系高流動コンクリートにおいて細骨材の一部を高炉スラグ微粉末で置換すると、モルタルの毛細管空隙量(空隙量 6nm~2μm)が減少し、塩化物イオン浸透性や中性化進行抵抗性が向上する。ただし、その程度は高炉スラグ微粉末添加量に依存するようである。
- (8) 増粘剤系高流動コンクリートでは、モルタルの毛細管空隙量(空隙量 6nm~2μm)と圧縮強度、塩化物イオンの見掛けの拡散係数および中性化深さの間に良好な相関が認められる。しかし、コンクリート中へのイオン透過性および透気性は、毛細管空隙量だけでなく毛細管空隙分布や水和

組織などにも影響をうけるため、今後さらに長期的な検証が必要と思われる。

5. あとがき

現在、コンクリート構造物の設計施工に関する規準体系の仕様規定型から性能規定型への移行が鋭意進められている²³⁾。コンクリートの要求性能のうち、耐久性能の評価はコンクリート構造物の経時的なシナリオデザインにおいて非常に重要である。

その意味で、本研究では耐久性の評価が十分でない増粘剤系高流動コンクリートを取り上げ、微細構造の面から検討した。その結果、増粘剤および高性能 AE 減水剤の添加がコンクリートの強度特性、塩化物イオン浸透性および中性化特性に与える影響は、少なくとも低下させるものではないとの知見が得られ、増粘剤系高流動コンクリートの耐久性設計は、従来のコンクリートと同様の考え方で行うことができると考えられる。しかし、本研究で解明できなかった部分もあり、当該コンクリートの耐久性能のさらなる評価に向けて、長期に亘る検証も含め引き続き研究を進めてゆく所存である。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、京都大学大学院名譽教授・故藤井學先生には多くのご指導を戴きました。また、実験の遂行においては、新宮康之氏や小野賢太郎氏に多大なご助力を戴きました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 港湾の施設を対象とした高流動コンクリート・マニュアル, (財)沿岸開発技術研究センター, pp.47-48, 1997年5月.
- 2) 高流動コンクリート施工指針, 土木学会コンクリートライブラリー93, pp.76-77, 1998年7月.
- 3) 高流動コンクリート施工指針, 土木学会コンクリートライブラリー93, pp.5-8, 1998年7月.
- 4) 例えば, 末岡英二, 中村亮太, 佐野清史, 福手勤: 石膏を添加した増粘剤系高流動コンクリートの密閉空隙充填への適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.195-200, 1996.
- 5) 松本典人, 佐野清史, 宮川豊章, 藤井 学: 高流動コンクリートの塩化物イオン浸透性に関する研究(第一報), 東洋建設技術研究報告, 第21巻, pp.41-46, 1994年9月.
- 6) 松本典人, 佐野清史, 宮川豊章, 藤井 学: 増粘剤系高流動コンクリートの耐久性に関する研究(第二報), 東洋建設技術研究報告, 第23巻, pp.35-40, 1996年9月.
- 7) 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 土木学会コンクリートライブラリー74, pp.57-60, 1991.
- 8) 阿部保彦, 柿崎正義, 早川和良, 山川 勉: セルロース系分離低減剤を用いた高流動コンクリートの調合, 物性に関する研究, 第1回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.71-78, 1993年5月.
- 9) 岡田 清, 明石外世樹, 小柳 治: 新編土木材料学, 国民科学者, pp.217-220, 1998.
- 10) 高性能 AE 減水剤を用いたコンクリート施工指針(案), 土木学会コンクリートライブラリー74, pp.57-60, 1991.
- 11) 管谷秀幸: 骨材-セメントペースト界面, セメント, コンクリート, No.567, pp.46-47, 1994.
- 12) 早川和良, 山川 勉, 大即信明: 水中不分離性混和材の分布と溶出に関する基礎実験, 水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集, pp.15-20, 1990年8月.
- 13) 佐野清史, 末岡英二, 中村亮太, 宮川豊章, 藤井 学: 細骨材粒度が増粘剤系高流動コンクリートのフレッシュ性状に与える影響, 材料, Vol.45, No.9, pp.11-16, 1996年9月.
- 14) 末岡英二, 輪湖建雄, 小島郎史, 佐藤正一: 増粘剤系高流動コンクリートの各種要因による性状の違いについて, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.69-74, 1995.
- 15) 高流動コンクリート施工指針, 土木学会コンクリートライブラリー93, pp.17-19, 1998年7月.
- 16) 福林幸男, 内田清彦: 潜在水硬性, C&C エンサイクロペディア, セメント協会, pp.101-103, 1998年7月.
- 17) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物性, わかりやすいセメント科学, セメント協会, pp.78-104, 1993.
- 18) 久田 真, 大即信明, N.B.Diola, 桐山和晃: コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動に及ぼす骨材の影響, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.71-80, 1998年8月.
- 19) 小林孝一: 混和材を用いた高流動コンクリートの細孔構造と鉄筋腐食に関する研究, 京都大学博士論文, pp.33-65, 1999年1月.
- 20) 永野宏雄, 内藤隆史: 飛沫体にあるコンクリート中への塩素浸透に関する拡散理論の応用, コンクリート工学年次論文集, No.7, pp.85-88, 1985年6月.
- 21) 内川 浩: セメントペーストと骨材の界面の構造, 組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995年9月.
- 22) 船戸己知雄, 田代利明: コンクリートの耐久性と科学の基礎, セメント新聞社, pp.198-202, 1991年2月.
- 23) Matsumoto, F., Sano, K., Miyagawa, T. and Fujii, M.:

- Durability of Super Workable Concrete Containing Cellulosic Viscosity Agent, *International Conference on Engineering Materials*, No.1, pp.691-704, 1997.
- 24) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，pp.1-10，1996.
- 25) 土木学会コンクリート委員会，示方書小委員会：コンクリート標準示方書改定に関する中長期ビジョン，1999.

(1999.11.16 受付)

PROPERTIES OF MICROSTRUCTURE AND MASS TRANSPORT
IN SELF-COMPACTING CONCRETE
CONTAINING CELLULOSIC VISCOSITY AGENT

Kiyofumi SANO, Fumihito MATSUMOTO, Atsushi HATTORI
and Toyoaki MIYAGAWA

The authors investigated the effects of the addition of a cellulosic viscosity agent on the microstructure of cement paste with the aim of evaluating the durability of self-compacting concrete containing a viscosity agent. The permeability of such concrete was also investigated experimentally from the aspect of microstructure with reference to chloride ion penetration and carbonation. As a result, the addition of a viscosity agent was found to lead to formation of microstructures without weak transition zones at aggregate boundaries. This reduced the total capillary voids, causing the permeability to be equal to or lower than that of plain concrete having the same water-cement ratio. The use of ground granulated blast-furnace slag in place of part of fine aggregate in the concrete improved its durability.