

論文

[1127] 中性化と塩水の複合作用によるシリカフェームコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究

正会員○添田政司 (福岡大学土木工学科)
 正会員 大和竹史 (福岡大学土木工学科)
 正会員 江本幸雄 (福岡大学土木工学科)

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の表面は、通常は空隙水中の高アルカリ環境下で保護酸化被膜を形成して不動態化されている。この保護膜は、pHが低下したり、または高アルカリ下でも鉄筋の表面に塩化物イオンが到達すると破壊され腐食が開始する。シリカフェームを混入したコンクリートの塩化物イオンの浸透は、普通コンクリートに比べ顕著に減少し、塩化物浸透抵抗性に優れることを多くの研究者らによっても報告されている [1]。一方、シリカフェームコンクリートの中性化に関しては、そのポゾラン反応によりCa(OH)₂の消費によってアルカリ度を低下させるため、シリカフェーム混入率が多い程、中性化速度が大きくなると報告してきた [2] が、水結合材比や試験条件等によっては中性化抑制効果があるという報告もある [3]。従って、中性化および塩化物の両者の複合作用を受ける鉄筋コンクリートに、どの程度までのシリカフェーム混入率が鉄筋腐食に関して有利なのか十分検討しておく必要がある。そこで本研究では、複合劣化試験を行ない、適切なシリカフェーム混入率を見出すとともに、その混入率や水結合材比の相違がコンクリート中の鉄筋の発錆に及ぼす影響について検討を行なったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に使用したシリカフェーム (SF) は国内産 (A) と外国産 (B) の2種類を使用した。

表-1 シリカフェームの物理的性質および化学成分

種類	物理的性質		化学的性質						
	比重	単位容積 kg/m ³	化学成分 (%)						
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O
S-A	2.24	-	89.5	0.4	0.9	1.5	0.2	-	-
S-B	2.26	350	93.1	0.7	1.2	0.8	0.2	1.0	0.57

その物理的性質と化学成分を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント (比重3.16) を用いた。モルタルの細骨材は豊浦標準砂、コンクリートに使用した骨材は、細骨材には海砂 (比重2.57、吸水率1.32%) を用い、粗骨材には角閃岩碎石 (比重2.96、吸水率1.24%、最大寸法20mm) を使用した。混和剤は、シリカフェームを使用したものと水結合材比27%には高性能減水剤 (SP) を使用し、無混入にはAE減水剤を使用した。モルタルの配合は、水セメント結合材比を55%、セメントと骨材を重量比で1:2とした。シリカフェームはセメント重量の内割で10、20および30%混入し、フロー値が一定になるように高性能減水剤で調整した。コンクリートの配合は、水セメント結合材比を27%と55%の2種類とし、その配合および諸性状を表-2に示す。

2.2 供試体および養生方法

細孔溶液抽出法に用いたモルタルの供試体はφ5X10cmを用い、コンクリートの圧縮強度試験に用いた供試体はφ10X20cmの円柱である。鉄筋の腐食を調べるために用いた供試体は10X10X40cmの角柱を用いた。鉄筋のかぶり厚さは10mmと20mmの2通りでφ6mmのみがき丸鋼をそれぞれ3本配置した。供試体の形状および鉄筋のかぶり位置を図-1に示す。養生方法は、型枠を脱形した後ただ

表-2 コンクリートの配合および諸性状

配合 記号	W/ (C+SF) %	S/a %	C kg/m ³	SF kg/m ³	SP* kg/m ³	温度 ℃	スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 kgf/cm ²		
									7日	28日	91日
CA-0	55	42	320	0	-	28	10.4	0.8	286	375	415
CA-10	55	42	288	32	3.15	25	8.5	0.8	355	507	586
CA-20	55	42	256	64	3.23	27	9.5	1.2	428	514	569
CA-30	55	42	224	96	3.29	27	9.5	1.8	449	553	578
CB-0	27	36	600	0	4.80	22	10.2	1.2	606	639	662
CB-10	27	35	540	60	5.94	21	8.2	1.8	639	725	750
CB-20	27	35	480	120	8.16	23	9.9	1.6	606	720	784
CB-30	27	35	420	180	8.40	22	8.0	1.5	585	697	755

ちに供試体の両端面をエポキシ樹脂で被覆し、材令84日まで20℃の水中で養生を行なった。

2.3 実験方法

実験方法は、劣化要因の影響を検討するため、中性化促進試験を所定期間行なった後に、塩水噴霧試験をさらに所定期間行なった。測定項目および方法を以下に示す。

(1) 中性化促進試験

供試体を水中養生終了後促進装置内に設置した。促進条件は温度40℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%とした。促進試験期間は、水結合材比27%の場合、0,1,3,5カ月とし、55%の場合は、0,1,3カ月間行なった。中性化深さの測定は、所定の材令で供試体の端部10cmを切断し、その断面に

フェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して未着色部分を中性化領域と判定し、平均中性化深さを画像解析によって求めた。なお、モルタル供試体の促進期間は0,10,20および30日間行なった。

(2) 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験はJIS Z 2371に準拠し、3%NaCl水溶液をミストマイザーを介し、噴霧塔方式によって装置内に塩水を噴霧した。なお、装置内の温度は40℃で一定とし所定期間(0,1,3カ月)連続塩水噴霧を行った。塩素イオンの浸透深さの測定は、切断した供試体表面に0.1%フルオレセインナトリウム水溶液と0.2%硝酸銀水溶液を噴霧し、発色部分の深さを画像解析によって求めた。塩素イオン濃度の測定は、供試体表面から10mm毎に深さ30mmまでドリルを用いて粉末試料をそれぞれ100g採取した。採取した試料の全塩分量を硝酸銀滴定法により測定した。

(3) pHの測定

それぞれ所定期間終了後のコンクリート中のpHの測定は、塩分量の試料採取と同様に行い10g採取し、土壤養分分析法によって行なった。モルタル供試体の場合は、高圧抽出装置を用いて、細孔溶液を抽出しデジタルpHメーター計を用いて測定した。

(4) 鉄筋の発錆試験

鉄筋の発錆試験は、塩分分析とpH測定の試料を採取した後に、供試体を解体して鉄筋の中央部20cmを取り出した。取り出した鉄筋に発錆部分をトレースした後、画像解析装置を用いて発錆面積を測定した。なお、発錆率は発錆面積を鉄筋の全面積で除して百分率で表した。

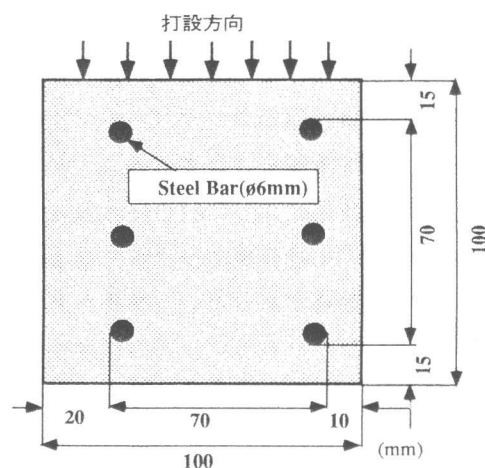


図-1 供試体の形状および配筋状況

3. 実験結果および考察

3.1 養生期間中のpHの経時変化

図-2の上段の図は、材令7、28、91日の水中養生後のコンクリート供試体から粉末試料を採取してpHの測定を行なったもので、下段の図は、モルタル供試体を高圧抽出法により採取した細孔溶液のpHの測定結果を示したものである。図よりいずれの測定方法の場合も、シリカフェーム混入率が多いほど材令の進行に伴いpHの低下傾向が顕著に認められる。これはシリカフェームがセメントの水和で生成するCa(OH)₂を消費したことによるものと思われる。測定方法の相違では、粉末試料の方が細孔溶液抽出法に比べて若干小さくなる傾向を示しているが、中性化に伴うpHの経時変化やシリカフェームコンクリート中のpHを把握する上でさほど問題はないものと考えられる。

3.2 中性化深さおよび塩素イオン浸透深さ

図-3はシリカフェーム混入率と中性化深さの関係を示したものである。中性化深さは、試験期間の経過とともに進行している。混入率の影響では、水結合材比55%の場合、混入率が10%以上になると著しく大きくなり、混入率が20%および30%では無混入に比べて1.4-1.7倍程度大きくなっている。これは、シリカフェームを混入すると図-2に示した様に、養生期間中にpHが低下したことによるものと考えられる。また、中性化深さの増加割合も、混入率0%、10%よりも20%、30%の方が大きくなる特徴を示していた。水結合材比による影響では、水結合材比27%の場合、55%に比べ著しく小さくなる傾向にあった。特に、中性化期間5カ月の混入率30%で中性化深さは5mm以下でしかなく、シリカフェームを混入した場合においてもその抑制効果が認められた。

図-4はシリカフェーム混入率と塩素イオン浸透深さの関係を示したものである。塩素イオンの浸透深さは中性化深さとは逆に混入率が多くなる程小さくなっている。例えば、水結合材比55%の無混入と混入率30%の浸透深さは、それぞれ13.6mmと6.5mmであり、塩素イオンの浸透が浸透深さにして約1/2に抑制されていることが認められる。一方、水結合材比27%では、シリカフェーム混入による塩素イオンの浸透深さの差は少なくなっている。これは、水結合材比を小さくするとセメントマトリックスが緻密化され、コンクリート強度も高強度(表-2)になるため、外部からの塩素イオンの浸透が抑制され著しく小さくなったものと考えられる。

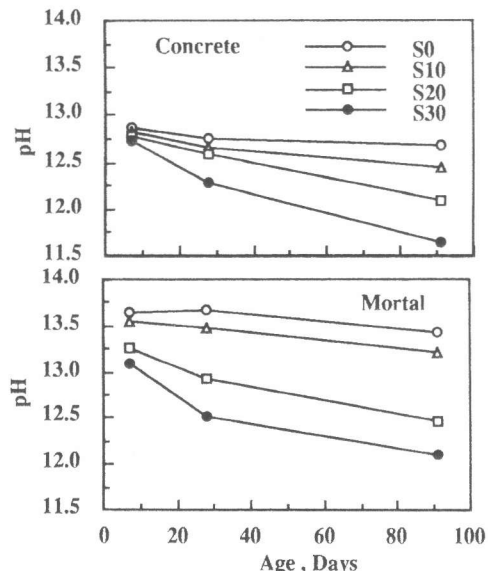


図-2 養生期間中のpHの経時変化

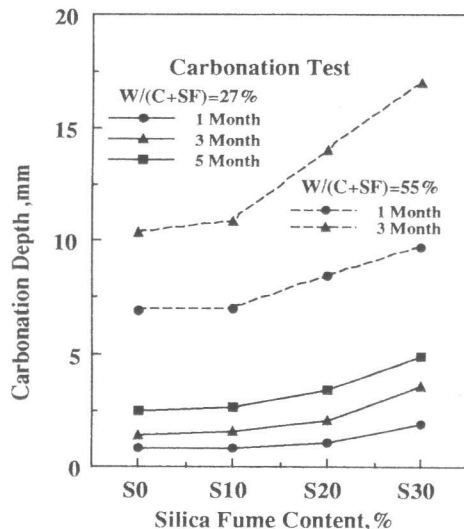


図-3 混入率と中性化深さの関係

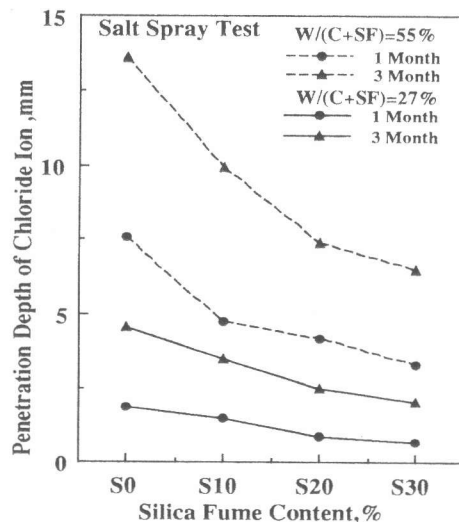


図-4 混入率と塩素イオン浸透深さの関係

3. 3 複合試験後のpH

図-5は水結合材比55%における、中性化促進試験と塩水噴霧試験後のコンクリート中のpHを供試体表面からの深さ毎に示したものの一例である。中性化促進試験開始前のコンクリート中のpHは、図-2の結果と同様に、シリカフェーム混入率が多い程pHは小さく、中性化期間の進行とともに低下し、特に混入率の多い程pHの低下が著しく大きくなっているのが認められる。深さ方向による結果では、供試体表面(0-10mm)での低下は大きいですが、中心部に向かう程pHの低下は小さく、混入率30%においても11.4程度で中性化試験前とほぼ同程度の値を示している。このことより、コンクリートの中性化は炭酸ガスによって、供試体表面から徐々に中心部に向けて進行することがこの図からも明らかになった。なお、水結合材比27%では、中性化深さが小さいため、中性化期間の進行によってもpHの著しい低下傾向は認められなかった。

図-6は中性化促進試験後の場合と、その後塩水噴霧試験を30日間行った場合のモルタル中の細孔溶液のpHを示したものである。細孔溶液のpHは、コンクリートのpHと同様に、中性化期間の進行に伴いシリカフェーム混入率が多い程低下している。

さらに、塩水噴霧試験を行なうことによってもpHが低下する傾向が認められた。これは塩水(pH5程度)の連続噴霧により炭酸水素イオン量が増加し、細孔溶液中に多量にあるOH⁻イオンと反応するため、このOH⁻イオンが減少することによってpHが低下したものと考えられる。

3. 4 複合試験後のコンクリート中の塩素イオン濃度

図-7は水結合材比55%および27%の中性化期間(X方向)と塩水噴霧期間(Y方向)終了後における、それぞれの塩素イオン濃度(Z方向)を深さ毎について示したものである。塩素イオン濃度は、水結合材比55%および27%の両者とも、塩水噴霧期間の進行に伴い増大する傾向にある。シリカフェーム混入率による影響では、いずれの場合も、塩素イオン浸透深さ(図-4)と同様に、混入率が多くなる程塩素イオン濃度は小さくなり、混入率20%および30%では無混入に比べ約1/2-1/3程度減少し、塩素イオンの抑制効果がこの図からも明らかに認められる。表面からの深さ毎の結果では、どの試験条件後においても供試体表面部の濃度が高く、10-20mmで表面部付近の約1/2、20-30mmで約1/3になり中心方向の距離に比例して小さくなっているのが顕著に認められていた。水結合材比で比較検討すると、水結合材比27%の塩素イオン濃度は、いずれの混入率の場合も水結合材比55%の約1/2程度に減少している。例えば、水結合材比55%の複合試験最終材令(中性化3カ月、塩水噴霧3カ月)での混入率0,10,20および30%のそれぞれの塩素イオン濃度は、0.37,0.25,0.21および0.19%であったが、水結合材比27%の複合試験最終材令では、それぞれ0.19,0.14,0.12および0.11%になり水結合材比の小さい

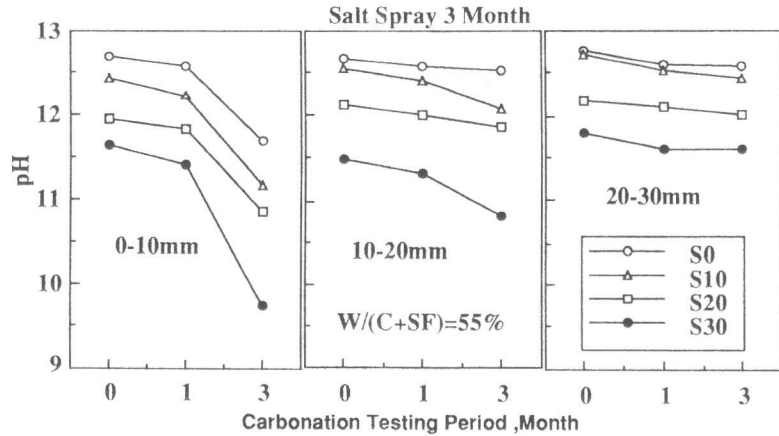


図-5 複合試験後のコンクリート中のpH

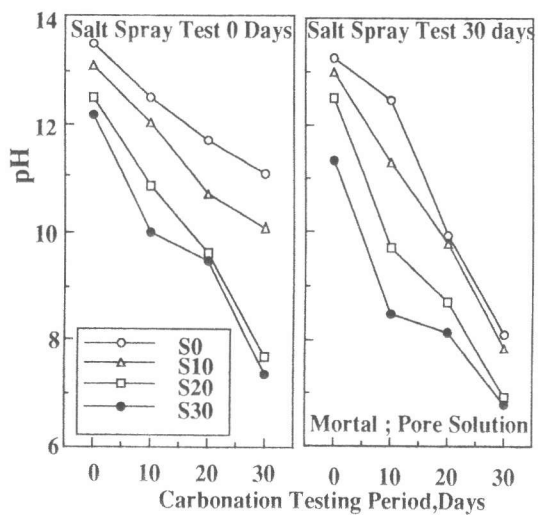
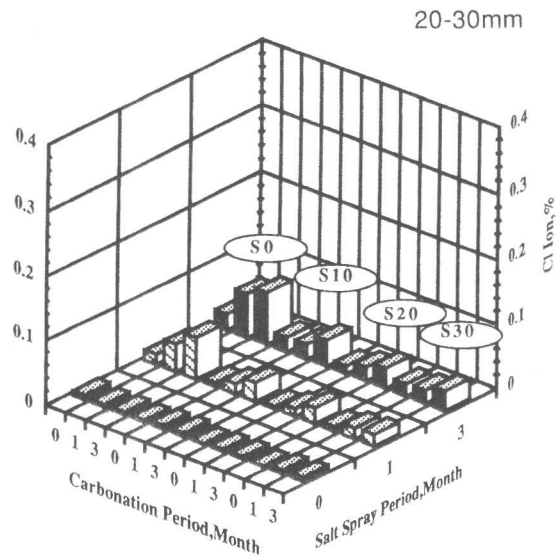
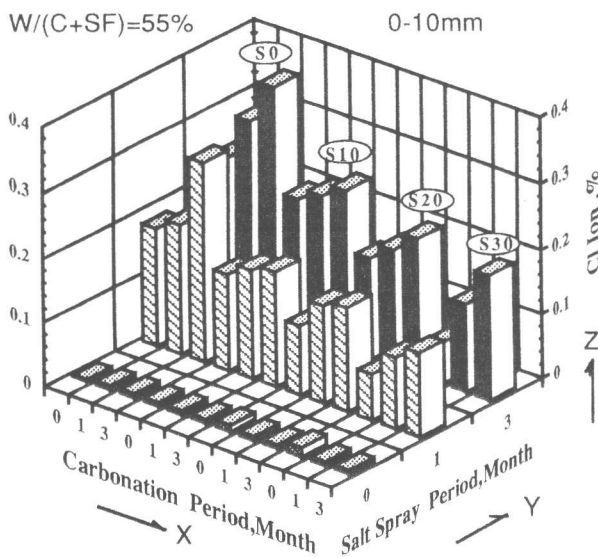


図-6 複合試験後のモルタルのpH



方が外部からの塩分の抑制に優れることがこの図からも理解できる。さらに、中性化期間の進行によっても塩素イオン濃度の増加する傾向が認められる。例えば、水結合材比55%の中性化試験を行わず塩水噴霧3カ月後の塩素イオン濃度は、混入率0,10,20および30%でそれぞれ0.24,0.18,0.16および0.06%であるが、中性化試験を3カ月行なうとそれぞれ0.37,0.25,0.21および0.19%になった。この傾向は供試体中央部ではほとんど認められず、供試体表面部の中性化した領域においてのみ生じている。これは中性化と塩水噴霧によりpHが低下(図-6)し、析出したCaCO₃が溶出[4]し始め、その分だけ多孔質になり塩素イオンが侵入しやすくなるため塩素イオン濃度が増加したのではないかと考えられる。

W/(C+SF)=27%

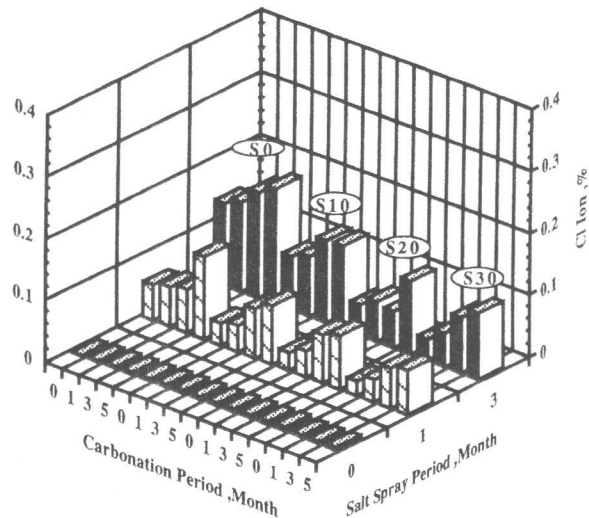


図-7 複合試験後の塩素イオン濃度

3. 5 鉄筋の発錆率

図-8は水結合材比55%と27%における中性化促進試験と塩水噴霧試験後のコンクリート中の鉄筋の発錆率をかぶり毎に示したものである。鉄筋の発錆率は、全般的にかぶりの大きい方が鉄筋の発錆は小さく、塩水噴霧期間さらに中性化期間の進行に伴い、また、シリカフェーム混入率が多いほど鉄筋の発錆率は大きくなっている。特に中性化期間の有無による相違が顕著に認められる。例えば、水結合材比55%のかぶり10mmの鉄筋発錆率についてみると、中性化期間無しの場合、塩水噴霧を3カ月行なっても鉄筋の発錆は認められないが、中性化期間が経過し3カ月になると、塩水噴霧試験を行わなくても鉄筋は発錆し、さらに塩水噴霧期間の進行によって増加した。特にシリカフェーム混入率20%および30%と混入率の多いほど発錆率は著しく大きくなる傾向にあった。一方、水結合材比27%の場合は中性化期間5カ月において、鉄筋の発錆率は最大でも5%程度しかなく、シリカフェーム混入による顕著な差も認められなかった。なお、かぶり20mmの鉄筋の発錆は全く生じていなかった。これらのことより鉄筋の発錆は、中性化期間が進み、コンクリートの中性化領域が鉄筋位置に到達し始めると、鉄筋のコンクリートによるアルカリ性保護被膜が低下して発錆が生じやすくなり、それに併せて塩素イオン濃度が上昇するため(図-7)鉄筋の発錆はさらに進行したと思われる。

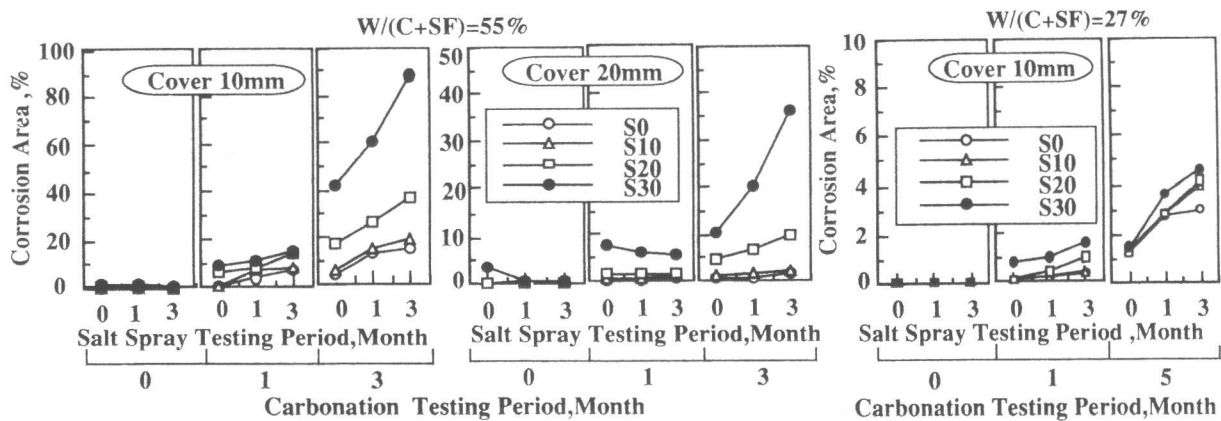


図-8 複合試験後の鉄筋の発錆率

以上の実験結果より、水結合材比55%程度では、シリカフェーム混入率が多い場合は、外部から浸透する塩分を抑制し鉄筋を防止する効果よりも、シリカフェームがセメントの水和で生成する水酸化カルシウムを消費しコンクリート中のpHを低下させる悪影響の方が大きくなるのでシリカフェームの使用量は最大10%程度にすべきと考えられる。しかしながら、水結合材比が27%と小さい場合は、細孔構造が非常に緻密化され、中性化や外部からの塩化物の進入が著しく抑制されるため、鉄筋の発錆に関するpHの低下が小さく、混入率による影響は少なくなるものと考えられる。

4. まとめ

本実験の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) コンクリート供試体から採取した粉末試料によるpHは、モルタル供試体による細孔溶液抽出法に比べやや小さくなる傾向にあった。また、養生期間中でのpHの経時変化は、長期材令になるに従い、シリカフェーム混入率が多いほど低下した。
- (2) 水結合材比55%では、中性化期間の進行に伴いシリカフェーム混入率が20%以上になると中性化深さは著しく大きくなりpHも低下したが、水結合材比27%は55%に比べ中性化深さは著しく小さくなり混入率による影響もほとんど認められなかった。
- (3) 塩素イオン浸透深さおよび塩素イオン濃度は、シリカフェーム混入率の増加に伴い小さくなり塩素イオンの抑制効果が認められた。また、中性化期間の進行に伴い塩素イオン濃度が上昇する傾向が認められた。
- (4) 鉄筋の発錆率は、中性化期間および塩水噴霧期間の進行に伴い、水結合材比55%のシリカフェーム混入率が20%以上になると発錆率は著しく増加するが、水結合材比27%では混入率による顕著な差も認められず、発錆率は最大でも5%程度であった。

参考文献

- 1) 鳥居、川村：種々のポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.489-494、1990.6
- 2) Yamato.T, Soeda.M, Emoto.Y : Chemical Resistance of Concrete Containing Condensed Silica Fume, American Concrete Institute, Publication SP114-44, Vol II, pp.897-913, 1989
- 3) Vennesland .O. and Gj ̄rv, O.E : Silica Concrete - Protection Against Corrosion of Embedded Steel, American Concrete Institute, Publication SP79-38, Vol II, pp.719-729, 1983
- 4) 小林：コンクリートの炭酸化に影響を及ぼす要因、生産研究40巻4号、pp.203-206,1988