

論文

[1111] 高性能AE減水剤によるコンクリートの耐久性向上に関する研究

正会員○飛坂基夫（建材試験センター）

正会員 笠井芳夫（日本大学生産工学部）

飯塚正則（花王株式会社）

水沼達也（花王株式会社）

1. はじめに

コンクリートの配（調）合設計の方法には、大別して ①必要な強度が得られるように定める場合と ②必要な耐久性が得られるように定める場合の2つの方法がある。しかし、実際の配（調）合設計は、必要な強度を求める方法で行われる場合がほとんどである。

近年、コンクリートの中性化・塩害並びにASRによるコンクリート構造物の早期劣化が大きな社会問題となっている。中性化及び塩害による構造物の早期劣化の原因としては、施工精度や材料の選定などの他にコンクリートの配（調）合設計時に耐久性に関する品質が十分配慮されていないこともその一つと考えられる。

配（調）合設計時に耐久性に関する品質が考慮されない原因としては、多様な用途に対応した耐久性のコンクリートを作る技術が確立されていないこと、及び耐久性に基づいて配（調）合設計を行う場合の指針が十分でないことによる。

筆者らは、高性能減水剤を用いたコンクリートの耐久性に関する一連の実験研究〔1～5〕を行い、広範囲の水セメント比のコンクリートの耐久性に関する品質を明らかにしてきた。最近、スランプロス低減形の新しい高性能AE減水剤が開発され、高層共同住宅などに多用されているが、これらの混和剤を用いたコンクリートの耐久性に関する系統的な研究は少ない。

本研究は、スランプロス低減形の高性能AE減水剤を用いた広範囲の水セメント比のコンクリートについて各種耐久性試験を実施し、これらの混和剤を用いて耐久性に優れたコンクリートを製造することが可能なことを明らかにすることにより、耐久性からコンクリートの配（調）合設計を行う場合の基礎的資料を得ることを目的とした。

2. 研究の概要

(1) 試験内容

試験実施項目と水セメント比及び試験内容の関係を表-1に示す。

(2) 使用材料

コンクリートの製造には、普通ポルトランドセメント（市販品3銘柄等量混合）青梅産の硬質

表-1 試験内容

試験項目	水セメント比 %									備考
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	
圧縮強度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	材令 1, 3, 7, 28, 91, 365 日 1000サイクル 促進期間 1, 3, 6ヶ月 浸せき期間 1ヶ月 40℃, 20℃, 60%で1, 3ヶ月乾燥 乾燥期間 1年 24~75000 Åの細孔量
凍結融解	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
中性化	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
塩素イオン浸透性	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
水密性	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
乾燥収縮	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ポロシチー	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

表-2 試験方法

試験項目	試験内容
圧縮強度 凍結融解 中性化	JIS A 1108に従い、材令2日で脱型後試験日まで20℃の水中で養生 JIS A 6204付属書2に準じて1000サイクルまで実施 10×10×40cmの供試体を材令28日まで20℃水中で養生した後、20℃、60%RHの試験室で1週間乾燥させた。その後、上下面をエポキシ樹脂でシールし、30℃、60%RH、CO ₂ 5%の促進中性化試験室に保存した。所定期間保存した後、端部から5cmの所を切断し、その切断面にフェノールフタレン溶液を噴霧した時の呈色反応により中性化の判別を行った。なお中性化深さの測定は、供試体側面で測定した。
塩素イオン浸透性	10×10×40cmの供試体を材令28日まで20℃の水中で養生した後、10×10×10cmに切断した。その後、40℃の乾燥器中で定量となるまで乾燥させてから上下面をエポキシ樹脂でシールし、3.5%濃度の塩水中に1ヶ月間浸せきした。この供試体の端部から1cmごとに5cmまで切断し、乾燥した後粉碎して塩分測定用試料とした。塩分含有量は、イオンクロマトグラフィーによって測定した。
水密性	Φ10×20cmの供試体を材令28日まで20℃の水中で養生した後、Φ10×10cmに切断し、所定の条件で乾燥した。この供試体に5kgf/cm ² の水圧を24～72時間加えた時の水の浸透深さを測定し、次式で拡散係数を求めた。 $\beta_i^2 = \alpha (D_m^2 / 4 t \xi^2)$ 、 β_i^2 : 拡散係数、 D_m^2 : 平均浸透深さcm、 t : 水圧を加えた時間sec、 $\alpha = t^{(3/7)}$ 、 $\xi : 0.905$
乾燥収縮	10×10×40cmの供試体を材令7日まで20℃の水中で養生した後、JIS A 1129に従って、20℃、60%RHの恒温室内に保存し、その時の乾燥収縮量を1年まで測定した。
ポロシチー	材令28日まで20℃の水中で養生したΦ10×20cmの供試体から採取したモルタル試料を用いて、水銀圧入法により細孔量を測定した。

砂岩碎石2005A、富士川産川砂、イオン交換水及び化学混和剤を用いた。化学混和剤は、W/C=25～40%にはナフタリン系のスランプロス低減形高性能A E減水剤「WH」、W/C=45～60%には同「S」、W/C=65%には市販のリグニン系A E減水剤を使用した。

(3) 試験方法

コンクリートの製造は、関連JISに従って実施した。硬化コンクリートについて実施した項目別の試験方法を表-2に示す。

3. 試験結果及び考察

コンクリートの配(調)合結果並びに圧縮強度試験結果を表-3に、セメント水比及び総細孔量と材令28日の圧縮強度の関係を図-1～2に示す。W/C=30～65%ではセメント水比と圧縮強度の関係は、

表-3 コンクリートの配(調)合及び圧縮強度試験結果

水セメント比 %		25	30	35	40	45	50	55	60	65
混和剤の 使用量	WH kg/m ³	21.6	10.4	7.6	4.9		5.5	4.9	4.6	4.2
	S kg/m ³									2.7
スランブ		19.5	18.0	19.0	18.5	18.5	17.5	19.5	18.5	18.5
細骨材率		34.9	39.8	41.2	42.9	44.1	45.2	45.3	46.0	46.0
単位量 kg/m ³	水	154	160	165	165	165	164	169	169	174
	セメント	618	533	472	412	367	328	307	282	268
	細骨材	555	657	698	747	784	812	823	844	845
	粗骨材	1039	1000	1002	1000	1000	995	999	999	1000
単位容積質量		2366	2350	2337	2324	2316	2299	2298	2294	2287
空気量 %	重量法	4.8	4.5	4.4	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	4.5
	圧力法	4.8	4.7	4.5	4.5	4.7	5.0	4.5	4.6	4.5
圧縮強度 kgf/cm ²	1日	110	203	149	108	84	55	42	32	34
	3日	564	509	402	321	255	195	161	132	110
	7日	776	671	569	466	383	318	269	224	192
	28日	951	865	731	613	534	450	396	350	307
	91日	1026	948	857	709	621	521	459	417	363
	365日	1099	1033	868	755	670	561	509	426	386

ほぼ直線となるが、W/C=25%になるとこの直線が折れる傾向が認められた。また、総細孔量と圧縮強度の関係は、曲線となるが、良い相関関係にあることが認められた。

3.1 水セメント比と耐久性の関係

(1)凍結融解性

水セメント比と相対動弾性係数並びに供試体の質量減少率の関係を図-3及び図-4に示す。300サイクル後の相対動弾性係数は、すべて95%以上となっているが、1000サイクル後の相対動弾性係数は、

水セメント比によって異なる傾向が顕著に認められ、W/C=35%以下では100%前後の値を示したが、W/C=40%以上では水セメント比の増加と共に小さくなる傾向が認められた。サイクル数を長くした場合の相対動弾性係数が、水セメント比によって大きく影響を受ける理由については、別に詳しい実験検討を行うことが必要であると考えられるが、水セメント比の小さいコンクリートでは、凍結可能な自由水が少ないため、凍結・融解作用中における長さ変化量が少なくなることが一因として挙げられる。この点について一部実験研究を行ったことがあり、その結果によると水セメント比の小さいコンクリートの凍結融解試験中における長さ変化は、主に温度の変化に伴う膨張収縮量とほぼ同じ値であり、このことが前述した理由の根拠である。このことから考えると、非常に厳しい凍結融解作用を受ける部分に用いられるコンクリートには、空気を連行するとともに水セメント比を低くすることが必要と考えられる。質量減少率は、水セメント比の増加と共に大きくなる傾向が認められたが、W/C=65%はW/C=60%より質量減少率が小さくなっている。この原因は、混和剤の違いによるコンクリート中の気泡組織の相違が関係しているものと考えられる。

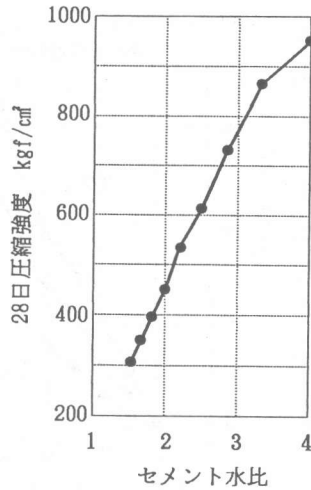


図-1 セメント水比と圧縮強度の関係

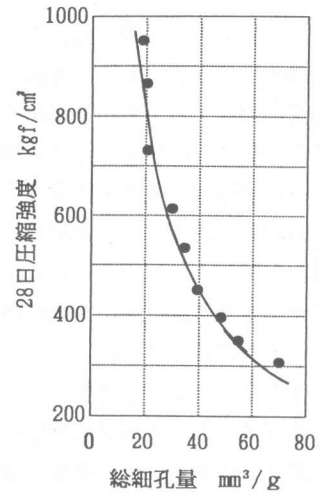


図-2 総細孔量と圧縮強度の関係

水セメント比によって異なる傾向が顕著に認められ、W/C=35%以下では100%前後の値を示したが、W/C=40%以上では水セメント比の増加と共に小さくなる傾向が認められた。サイクル数を長くした場合の相対動弾性係数が、水セメント比によって大きく影響を受ける理由については、別に詳しい実験検討を行うことが必要であると考えられるが、水セメント比の小さいコンクリートでは、凍結可能な自由水が少ないため、凍結・融解作用中における長さ変化量が少なくなることが一因として挙げられる。この点について一部実験研究を行ったことがあり、その結果によると水セメント比の小さいコンクリートの凍結融解試験中における長さ変化は、主に温度の変化に伴う膨張収縮量とほぼ同じ値であり、このことが前述した理由の根拠である。このことから考えると、非常に厳しい凍結融解作用を受ける部分に用いられるコンクリートには、空気を連行するとともに水セメント比を低くすることが必要と考えられる。質量減少率は、水セメント比の増加と共に大きくなる傾向が認められたが、W/C=65%はW/C=60%より質量減少率が小さくなっている。この原因は、混和剤の違いによるコンクリート中の気泡組織の相違が関係しているものと考えられる。

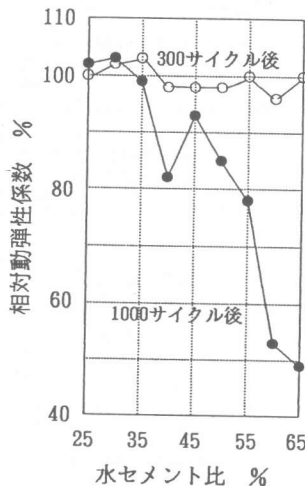


図-3 水セメント比と相対動弾性係数の関係

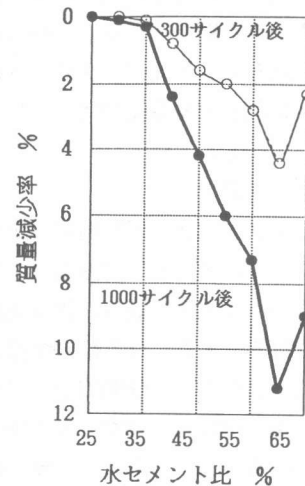


図-4 水セメント比と質量減少率の関係

(2) 中性化

水セメント比と中性化深さの関係を図-5に示す。W/C=35%以下では、促進期間6ヶ月でも中性化が認められないが、W/C=40%以上では水セメント比の増加と共に中性化深さがほぼ直線的に増加することが認められ、低水セメント比化することにより中性化に対する抵抗性が大幅に増大することが確認された。

(3) 塩素イオンの浸透性

水セメント比と塩分含有量の関係を図-6に示す。塩分量は、コンクリート表面からの深さが大きくなるに従って減少し、また水セメント比の低下と共に減少する傾向が顕著に認められた。表面から1cmまでの塩分量は、ばらつきが大きく水セメント比による差は明確でないが、表面からの深さが1~4cmでは水セメント比による影響が顕著に認められる。低水セメント比では、1~2cmで塩分含有量が大幅低下し、水セメント比が大きくなるほど表面から深い部分まで塩分が浸透する傾向が認められた。

(4) 水密性

水セメント比と拡散係数の関係を図-7に示す。拡散係数は、水セメント比の増加に伴って大きくなり、その傾向は水セメント比が大きくなるほど顕著で、特にW/C=45%以上で大きくなる。20℃、60%RHで乾燥した供試体の拡散係数は、供試体の乾燥が進むほど大きくなり、また乾燥に伴う拡散係数の増加は水セメント比が大きいほど顕著である。このことは、低水セメント比コンクリートほど乾燥による影響を受けにくいことを示している。

(5) 乾燥収縮

水セメント比と乾燥収縮率の関係を図-8に示す。W/C=35%以下のコンクリートの乾燥収縮は、乾燥期間1週では若干大きくなる傾向が認められる。しかし、乾燥期間1年では明確な傾向は認められず、本実験の範囲では水セメント比による違いはないものと考えられる。

3.2 総細孔量と耐久性の関係

モルタルの総細孔量の測定結果を

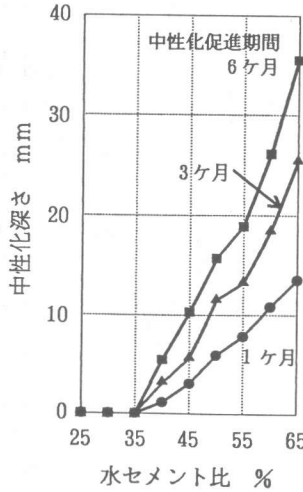


図-5 水セメント比と中性化深さの関係

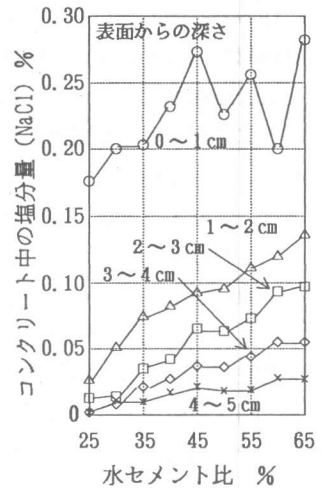


図-6 水セメント比と塩分含有量の関係

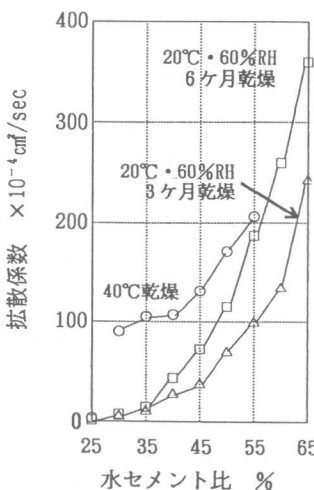


図-7 水セメント比と拡散係数の関係

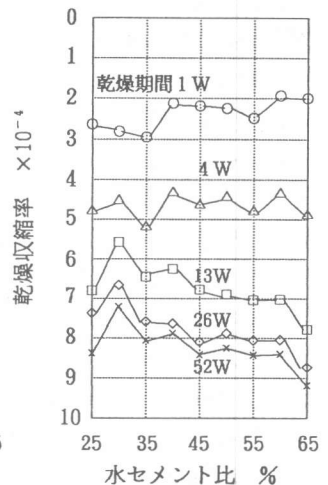


図-8 水セメント比と乾燥収縮率の関係

表一4に示す。総細孔量は、水セメント比の低下と共に少なくなり、低水セメント比化することによりペースト組織がち密になっていることを示している。コンクリートの耐久性は、ペースト組織の影響を大きく受けることが考えられることから、総細孔量と耐久性の関係について検討を行った結果を以下に示す。

(1)耐凍害性

総細孔量と相対動弾性係数並びに供試体の質量減少率の関係を図一9及び図一10に示す。1000サイクル後の相対動弾性係数は、総細孔量の増加に伴って減少する傾向を示しており、供試体の質量減少率も総細孔量の増加に伴って大きくなるが、その傾向は1000サイクル後の方が顕著である。

(2)中性化

総細孔量と中性化深さの関係を図一11に示す。総細孔量が $20\text{mm}^3/\text{g}$ 以下では中性化が認められないが、促進期間6ヶ月では総細孔量が $20\text{mm}^3/\text{g}$ を超えると総細孔量の増加と共に直線的に大きくなる傾向が認められ、総細孔量の少ないコンクリートを作ることが中性化を遅くすることに有効であることが明らかとなった。

(3)塩素イオンの浸透性

総細孔量と塩分含有量の関係を図一12に示す。表面からの深さが1～2cmの部分の塩分含有量は、総細孔量が $20\text{mm}^3/\text{g}$ を超える場合には総細孔量の増加と共に直線的に増加する傾向が認められ中性化と同様総細孔量の少ないコンクリートを作ることが塩素イオンの浸透を抑制するために有効であることが明らかとなった。

(4)水密性

総細孔量と拡散係数の関係を図一13に示す。 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ の条件で6ヶ月間乾燥させた供試体の拡散係数は、総細孔量の増加と共に直線的に大きくなる傾向が顕著に認められ、総細孔量が $20\text{mm}^3/\text{g}$ 以下では拡散係数の値は非常に小さくなる。総細孔量を少なくすることは、水密性の向上に顕著な効果がある。

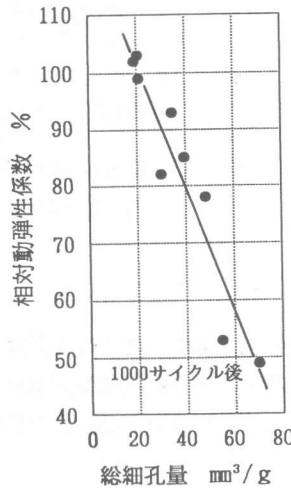
4. まとめ

本研究の結果、明らかになったことをまとめると以下のとおりである。

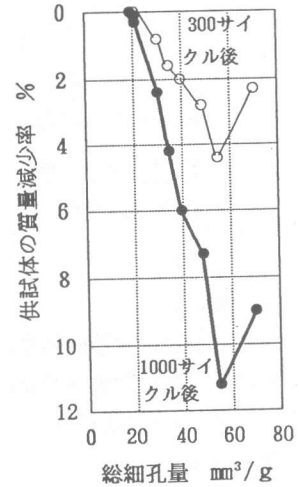
- ①水セメント比の低下に伴って、耐凍結融解性、中性化、塩素イオンの浸透に対する抵抗性、水密性などコンクリートの耐久性に関する品質が大幅に向上する。
- ②乾燥収縮率は、水セメント比にかかわらずほぼ一定であるが、乾燥初期における収縮率は $W/C=35\%$ 以下の場合大きくなる傾向が認められた。
- ③水セメント比の低下に伴って、総細孔量が少なくなり、ペースト組織がち密になっていること

表一4 ポロシチー測定結果

W/C %	総細孔量 mm^3/g
2.5	18.95
3.0	20.49
3.5	20.94
4.0	30.07
4.5	34.71
5.0	39.60
5.5	48.43
6.0	54.89
6.5	70.04



図一9 総細孔量と相対動弾性係数の関係



図一10 総細孔量と質量減少率の関係

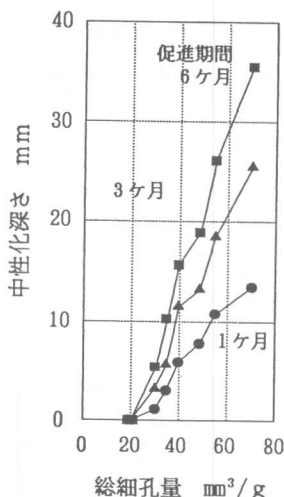


図-11 総細孔量と中性化深さの関係

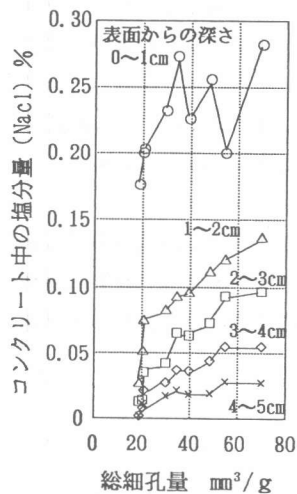


図-12 総細孔量と塩含有量の関係

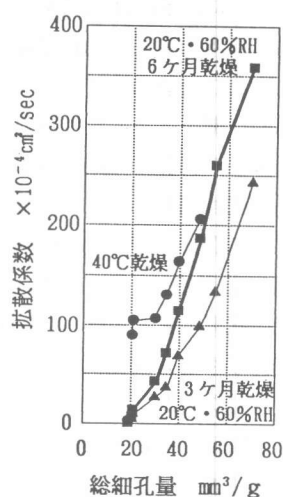


図-13 総細孔量と拡散係数の関係

が推測される。

- ④総細孔量と耐凍結融解性、中性化、塩素イオンの浸透に対する抵抗性、水密性などコンクリートの耐久性に関する性能との間には良い相関関係が認められた。従って、総細孔量の少ないコンクリートを製造することが、コンクリートの耐久性を向上させる上で重要であることが明らかとなった。

以上述べたように高性能AE減水剤を用いて低水セメント比としたコンクリートは、組織がち密になり、耐久性に関する品質を大幅に向上させることが可能である。また、コンクリートの耐久性に関する品質と総細孔量との間には良い相関関係が認められ、総細孔量を指標とすることによりコンクリートの耐久性の評価を行うことが可能と考えられる。今後は、養生条件などを変化させたコンクリートについても同様の実験研究を実施し、養生条件の影響も含めた総細孔量と耐久性の関係についても検討を行い、所要の耐久性を得るためのコンクリートの配(調)合設計を行うために必要な基礎的データの蓄積を進めたい。なお、本研究と同じコンクリートを用いた供試体により、透気性、走査顕微鏡による観察並びにX線解析なども実施中であり、これらを含めた検討を別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 服部健一, 岡田英三郎, 飛坂基夫, 柳啓: 高性能減水剤を使用した高強度コンクリートの耐凍結融解性, セメント技術年報34, 1980, pp 329~332.
- 2) 飛坂基夫: 高性能減水剤を使用した低水セメント比コンクリートの中性化, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984, pp 193~196
- 3) 飛坂基夫, 真野孝次: 低水セメント比コンクリートの乾燥収縮性状, 昭和59年度日本大学理工学部学術講演会論文集, 1984, pp 152~153.
- 4) 服部健一, 岡田英三郎, 飛坂基夫: 高性能減水剤を用いた低水セメント比コンクリートの透水性, セメント技術年報39, 1985, pp 205~208.
- 5) 飛坂基夫, 柳啓: 硬化コンクリート中への塩素イオンの浸透性に関する2, 3の検討, 第9回コンクリート工学年次講演会論文集, 1987, pp 439~442.