

[14] 上水道におけるコンクリート構造物の経年劣化と調査方法

三瀬 貞 (大阪市立大学工学部)
 正会員 眞嶋光保 (大阪市立大学工学部)
 正会員 ○野田純嗣 (大阪市水道局)

1. まえがき

近年、明治以降建設された多くの都市施設は、ここに至って老朽化や機能の旧式化といった諸問題に直面しており、性能向上のために補修・改良が行なわれたり、新しく造り替えられる場合もある。大阪市水道局においても未だ創設期の施設が現存しており、21世紀に向けて施設を更新し機能の充実・向上を図る必要に迫られている。このため、既存施設に対する適確な技術的・経済的評価法および更新方法の確立が急務である。そこで、本研究では、経年コンクリート構造物の更新にあたっての技術的評価法の基礎資料を得ることを目的とし、コンクリートの諸性質の変化およびひびわれ幅と鉄筋の腐食の関係を実験的に調べたので、ここにその結果を報告し、併せて過去における水道施設の調査報告も行なう。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験は、水道施設における特殊環境の一つである塩素水に常時接していることに鑑み、(1)塩素水の環境下における各種コンクリートの諸性質(圧縮強度、中性化など)の変化、(2)塩素水中でのコンクリートのひびわれ幅と鉄筋の腐食の関係について行なったもので、両者とも塩素水中への浸漬による実験である。各実験における要因とその水準は、表-1に示すとおりである。

表-1 実験計画

(1) 塩素水によるコンクリートの諸性質の変化に関する実験

要 因	水 準
浸漬日数 (日)	30, 60, 90, 120
浸漬水の残留塩素濃度 (ppm)	0, 50, 100, 200
セメントの種類	P, K, F, Si
混和剤	無(P), 有(AE減水剤: AE)

(2) 塩素水中におけるひびわれ幅と鉄筋の腐食に関する実験

要 因	水 準
浸漬日数 (日)	30, 60, 90
ひびわれ幅 (mm)	1.0, 0.8, 0.6 0.3, 0.2, 0.1
鉄筋のかぶり厚 (cm)	3.0, 5.0

2.2 使用材料およびコンクリートの配合
 セメントは普通ポルトランドセメント(P)(AE)、高炉セメントB種(K)、フライアッシュセメントB種(F)およびシリカセメントA種(Si)を使用し、粗骨材は碎石(最大寸法15mm、比重2.67、粗粒率6.38)、細骨材は海砂(比重2.60、粗粒率2.51)を使用した。コンクリートの配合は、表-2に示すとおりである。

表-2 コンクリートの配合

種 類	粗骨材 最大寸 法 mm	空気量 %	W/C %	s/a %	スラン プ cm	単 位 量 (kg/m ³)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	AE剤
P	15	2.0	55	47	8.0	351	193	813	956	—
AE	15	4.5	48	47	8.0	351	168	813	956	140 ^{cc}
K	15	2.0	55	47	8.0	360	198	798	939	—
F	15	2.0	55	47	8.0	351	193	802	944	—
Si	15	2.0	55	47	8.0	351	193	809	951	—

2.3 実験方法

(1) 塩素水による各種コンクリートの諸性質の変化に関する実験

供試体はφ10×20 cmを使用し、コンクリート打設後28日間恒温で養生した後、残留塩素濃度0, 50, 100, 200 ppmの各水槽に浸漬し、浸漬日数 30, 60, 90, 120 日後に圧縮強度、中性化深さ、超音波伝播速度および反発硬度を測定した。中性化深さについては、圧縮強度試験を終了した供試体を割裂し

乾燥させた後、割裂面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹き付け、赤く変色しない部分を中性化部分とみなし測定した。また、残留塩素の影響を調べるため供試体を表層部、中間部および中心部に分けて、浸漬120日後の供試体(0および200ppm)および恒温槽(20℃、60% RH)中に養生していた供試体について化学分析を実施した。分析方法は、JIS R 5202(ポルトランドセメントの化学分析方法)に準じて定量分析を行なった。なお、参考資料として残留塩素濃度1000ppmの水槽に60日間浸漬した供試体についても化学分析を行なった。

(2) 塩素水中におけるひびわれ幅と鉄筋の腐食に関する実験

供試体は図-1に示すように15×15×53cmの角柱を用い、鉄筋のかぶり厚さを3cmおよび5cmとした。人工ひびわれは、薄い銅板を鉄筋まで達するまで挿入することにより作成した。コンクリート打設後一週間恒温槽で養生した後、残留塩素濃度0.2ppm、水深35cmの水槽に浸漬し、浸漬日数30,60,90日後に鉄筋の腐食状態を調べた。測定方法としては、非破壊的に測定する自然電極電位法を採用しこの調査法の水道施設への適応性を調べるためにかぶりコンクリートをはつきり取って目視による調査を併せて行なった。

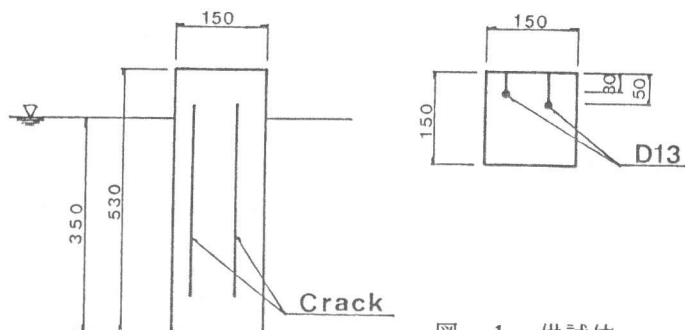


図-1 供試体

3. 実験結果と考察

3.1 塩素水による各種コンクリートの諸性質の変化に関する実験

(1) 伝播速度について

伝播速度と浸漬日数の関係として、FとSiについてそれぞれ図-2、3に示す。図のとおり伝播速度は、セメントの種類には関係なく浸漬日数に応じて増加する傾向にあるが、増加率ではFおよびKが高く、Siが低くなっている。また、残留塩素濃度との関係は、どのセメントの種類においても浸漬120日後の伝播速度は、残留塩素濃度200ppmの供試体が一番高い値を示している。これは、後でも述べるとおり中性化の進行度合いが200ppmの場合最も大きいいため、中性化したコンクリートは強度が大きくなり、伝播速度も早くなるものと考えられる。

(2) 中性化深さについて

中性化深さと浸漬日数の関係をSiとAEについてそれぞれ図-4、5に示す。図のとおり中性化深さは浸漬日数に応じて増加しており、また残留塩素濃度が高くなればなるほど中性化深さの増加は著しい。空気中におけるコンクリートの中性化については、混合セメントを使用すると中性化が早くなると言われているが、本結果から、塩素水中においても混合セメントとポルトランドセメントを使用した場合を比較すると、混合セメントの方が中性化が早くなる傾向にある。すなわち、水道施設のように常時塩素水に接している構造物では中性化について言えば、

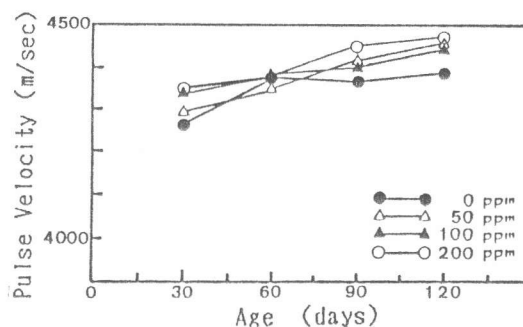


図-2 伝播速度と浸漬日数の関係(F)

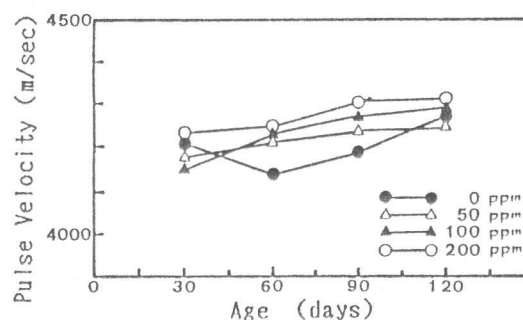


図-3 伝播速度と浸漬日数の関係(Si)

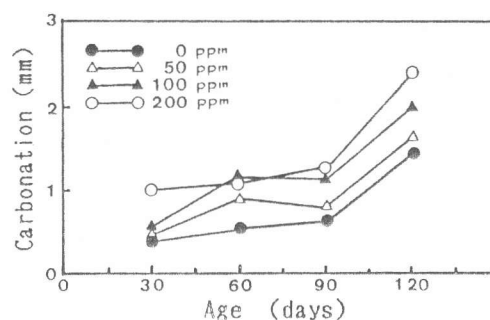


図-4 中性化深さと浸漬日数の関係(Si)

混合セメントよりもポルトランドセメントを使用の方が良く、さらにAEコンクリートとして用いれば、中性化対策に関しては、一層改善されると考えられる。

(3) 圧縮強度について

圧縮強度と浸漬日数の関係をFについて図-6に示す。図のとおり圧縮強度は浸漬日数に応じて徐々に増加する傾向にある。また、残留塩素濃度による圧縮強度の変化はあまり見られないが、どのセメントの種類においても残留塩素濃度0ppmの供試体が一番低い値を示している。これは、先にも述べたように残留塩素濃度0ppmの場合の中性化進行度合いが小さいことも原因の一つと考えられる。又セメントの種類による差異は、Fの圧縮強度増加率が高く、その他はほぼ同程度であった。

(4) 反発硬度について

反発硬度と浸漬日数の関係をPについて図-7に示す。反発硬度も上記測定項目と同様の傾向にあり中性化厚および圧縮強度の増加に対応したものと考えられる。ただ、本結果は供試体を24時間乾燥させた状態で測定したもので、湿潤状態では測定不能もしくは非常に低い測定値であった。

(5) 化学分析結果

化学分析結果をPについて表-3に示す。この結果から以下のことが考えられる。

a. $Al_2O_3 - MgO$ について、いずれの試料においても差異は認められず、水中への溶出、溶離はなかったものと考えられる。

b. Na_2O および K_2O は「空」試料の表面では多くなっているが、 $[0.200, 1000]$ の試料では特に差異は認められず、これは水中への溶出が主な原因と考えられる。

c. Cl は $[200, 1000]$ の試料で、中間部まで侵入しており、中性化深さの結果からみるとコンクリートの中性化の影響因子の一つとして Cl を考えることができる。

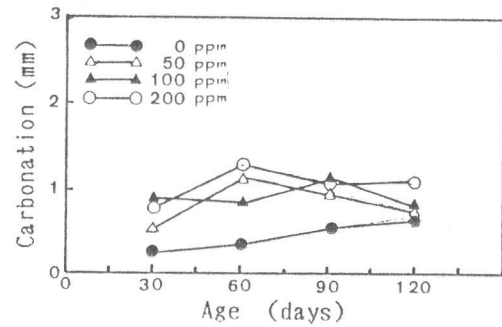


図-5 中性化深さと浸漬日数の関係 (AE)

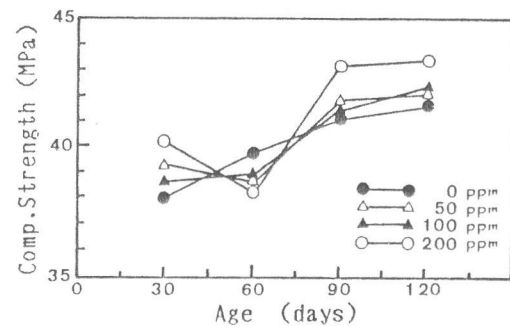


図-6 圧縮強度と浸漬日数の関係 (F)

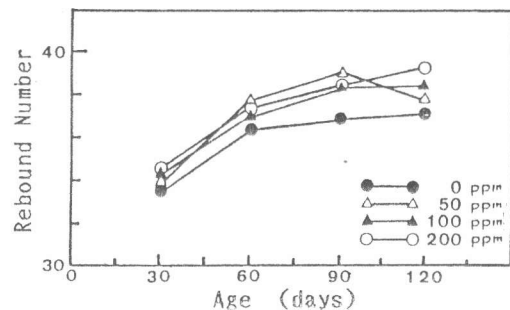


図-7 反発硬度と浸漬日数の関係 (P)

表-3 化学分析結果

試 料			化 学 成 分 (%)											
種類	塩素濃度	試料採取位置	550℃ ig. loss	1000℃ ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	Cl	CO ₂
P	空	表層部	6.5	16.6	48.0	2.7	2.1	27.8	0.9	0.34	0.36	0.09	0.05	10.0
		中間部	6.8	12.0	51.1	3.2	2.2	28.1	0.9	0.16	0.17	0.09	0.04	5.2
		中心部	6.5	11.8	52.1	2.8	2.3	27.5	1.0	0.17	0.16	0.10	0.04	5.3
	0 ppm	表層部	6.3	15.9	48.8	3.1	2.0	26.9	0.9	0.18	0.14	0.09	0.10	9.5
		中間部	7.2	12.5	52.3	2.9	2.5	27.5	1.0	0.16	0.16	0.09	0.07	5.2
		中心部	6.4	11.3	53.4	2.7	2.5	27.3	1.0	0.18	0.18	0.09	0.09	4.8
	200 ppm	表層部	6.8	16.4	48.9	2.8	2.4	22.0	1.0	0.16	0.16	0.09	0.30	9.3
		中間部	6.3	11.4	53.2	2.9	2.5	27.2	1.0	0.18	0.17	0.09	0.12	5.0
		中心部	7.1	12.0	54.4	2.6	2.5	26.0	1.0	0.19	0.15	0.09	0.05	4.8
	1000 ppm	表層部	7.1	16.2	47.7	3.0	2.2	28.1	1.0	0.16	0.13	0.09	0.51	8.6
		中間部	6.7	11.4	55.1	2.9	2.4	25.5	1.0	0.12	0.16	0.09	0.34	4.4
		中心部	6.1	11.9	54.4	2.8	2.3	26.7	1.0	0.16	0.17	0.09	0.05	5.8

3. 2 塩素水中におけるひびわれ幅と鉄筋の腐食に関する実験

実験結果を表-4に示す。本結果から、ひび果われ幅が大きいほど、また鉄筋のかぶり厚さが小さ

いほど腐食しやすい傾向にあり、水中部と水面付近では酸素量の違いで後者が腐食しやすいと考えられる。また、供試体を割裂した後、目視による鉄筋の腐食状況を調査した結果、ひびわれ幅0.2mm よりも小さいひびわれでは、鉄筋の腐食は進行しておらず、水道施設としての鉄筋の腐食に対する許容ひびわれ幅としては、0.1mm 程度になると考えられる。次に電位差の測定値をひびわれ幅0.6、0.1mm について図-8に示す。

図-8から明らかなようにひびわれ幅0.6mm での電位分布は目視による鉄筋の腐食状態とよく対応しており、電位差が大きな箇所での腐食が認められた。しかし、ひびわれ幅0.6mm と0.1mm を比較するとひびわれ幅0.1mm においても電位差の大きな箇所がみられるが見られるが鉄筋は腐食していない。これはコンクリートの含水比および測定時の温度などの影響が考えられる。

4. 水道施設の構造調査結果

現在まで大阪市水道では、数回既設構造物の調査を実施している。これらの調査報告のうち主な結果を表-5に示す。本結果から、本市水道における経年コンクリートの圧縮強度は低下しておらず、現在の設計基準強度を十分満足する値であり、またシュミットハンマーによる圧縮強度の推定値は湿潤状態にあった壁部および下床にあった壁部および下床版が低い値となっており、これらは本実験での結果と一致している。中性化については、一般に水分を多く含んだコンクリートの方が透気性が小さくなるため、中性化が遅いと言われている。しかし、本調査結果では、含水量の小さい上床版よりも含水量の多い塩素水中にある壁部および下床版で中性化深さが大きくなっている。この原因の一つとして、残留塩素イオンおよび水流によるコンクリート中のアルカリ分の塩素水中への溶出が考えられる。

5. 結論

本実験によって得られた結果をとりまとめて以下に示す。

- (1) コンクリートの圧縮強度は塩素水中においても浸漬日数とともに増加する。
- (2) 水道施設におけるコンクリートの中性化の影響因子の一つとしてClがあり、Clの影響のある構造物では、中性化対策としてボルトランドセメントを使用する方が良い。
- (3) 水道施設構造物での鉄筋腐食に対する許容ひびわれ幅は、0.1mm 程度になる。
- (4) 湿潤状態にある水道施設の調査方法として、超音波測定法、シュミットハンマー法および自然電極電位法等の非破壊試験法は、測定条件・方法を十分考慮すれば有効な調査方法となる。
- (5) 今後の水道施設の調査内容としては、亀裂、鉄筋の腐食および中性化深さを重点的に行なう方が良いと考えられる。

参考文献：1)大阪市水道局 昭和51、52年度施設構造物調査報告書

表-4 実験結果

かぶり厚さ (mm)	測定位置	ひびわれ幅 (mm)					
		1.0	0.8	0.6	0.3	0.2	0.1
50	水中部	△	△	△	△	△	○
	水面付近	△	●	●	△	△	○
30	水中部	△	△	△	△	△	○
	水面付近	●	△	●	●	●	△

注) ○ : 腐食 (なし)
△ : 腐食 (小)
● : 腐食 (大)

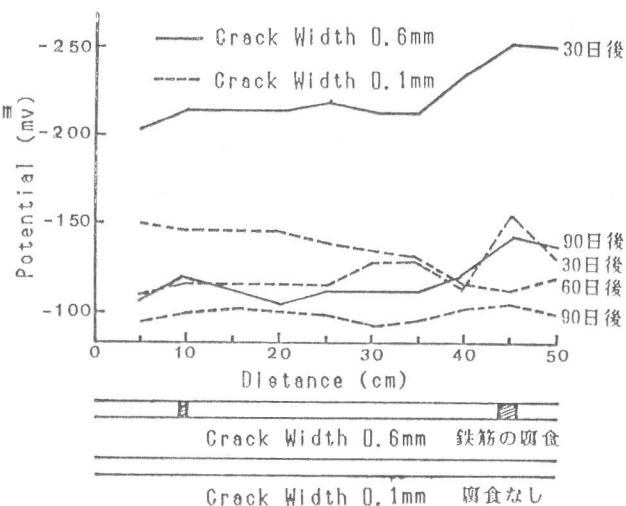


図-8 電位分布図

表-5 構造調査結果¹⁾

調査項目	調査箇所	1-4号配水池	5-6号配水池	7-10号配水池	11号配水池
圧縮強度 (kg/cm ²)	上床版	230-282	197-281	215-293	40-335
	壁部	179-365	110-251	145-309	141-440
	下床版	42-217	117-186	134-176	199-286
中性化深さ (mm)	上床版	0.6-4.9	4.5-8.0	0.4-1.4	5.0-16.7
	壁部	6.3-14.8	9.7-35.7	0.6-9.2	6.2-37.2
	柱部	—	—	0.8-5.6	2.7-46.2
	下床版	6.6-28.7	18.5-30.2	2.1-5.2	23.0-40.0
供用年数		62年	55年	39年	27年

*測定値は、最低-最高をしめす。
*7-10号配水池の圧縮強度および他の配水池の上床版と下床版の圧縮強度は、すべてシュミットハンマーによる推定値である。