

海岸環境下における RC 構造物の経年変化調査

－112mRC 造煙突における調査事例－

竹内 博幸* 高橋 祐一*
吉田 孝光** 加藤 俊之***

要 旨

築 37 年の高さ 112m の RC 造煙突を対象として、海岸環境下における構造物の鉄筋およびコンクリートの劣化進行状況を把握し、最終的には耐用期間の延長年数に応じた補修方法に反映することを目的として、自然電位、コンクリート中の全塩分量、コア圧縮強度試験、反発度試験および中性化試験等の調査を行った。

調査の結果、鉄筋の腐食は一定範囲に止まり、コンクリート強度も確保されているものの、外表コンクリート中の全塩分量が全体的に高く、また、煙突内部の中性化が経年に対してかなり速く進行していることから、全体的に耐久性状は不安定な状態であると推察された。

補修方法を決定するにあたり、これらの調査結果から耐用年数を予測し、劣化状態の程度に応じて手法および範囲について検討を行った。

1. はじめに

高さ 112mRC 造煙突について、経年および海岸環境下における構造物の劣化進行状況を把握することを第一の目的として、① 自然電位、② コンクリート中の全塩分量、の測定を行い、劣化進行の指標となる鉄筋の腐食状態、コンクリート中の塩分量を確認した。また、コア圧縮強度試験値の妥当性を相対的に確認するために、コア供試体採取と近接した箇所につき、リバウンドハンマーによる反発度を測定し、コア圧縮強度試験の結果と照合した。

以上の各測定結果と、コア供試体による各種試験結果を合わせて比較考察し、今回の補修方法の適合性について検討した。

2. 実施方法

今回実施した耐久性に関する試験・測定項目を表 1 に示す。

2.1 自然電位

煙突躯体における鉄筋の劣化進行状況を把握することを目的として、図 1 に示す各箇所につき、劣化コンクリート撤

去部分付近の自然電位測定を行った。測定は、現地にて照合電極(硫酸銅)と電位差計を用いて行った。

2.2 全塩分試験

外部環境における構造体コンクリートの耐久性状の基本的な指標である塩化物量を把握するために、JIS A 1154(「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」:2003 年)により、コア供試体における全塩化物量を測定した。具体的には、中性化試験を終えたコア供試体を破碎・磨耗することにより 0.15 mm 以下の粉体状とし、チオシアン酸水銀(Ⅱ)吸光度法により試料中の塩化物の全量を測定した。

2.3 反発度試験

コア圧縮強度は、供試体の採取状況により試験値に偏差を生じる可能性があるため、コア供試体を採取した近傍につき、リバウンドハンマー試験によりコンクリートの反発度を測定し、コア供試体により測定した圧縮強度試験結果と照合した。なお、リバウンドハンマーで試験するにあたっては、試験箇所は、あばた・気泡などを避けて、平滑なコンクリート面を選んで実施した。

表 1 試験・測定項目

試験項目	摘 要	試験方法	備 考
自然電位	電位差計	銅硫酸銅電極	劣化部撤去箇所近傍
塩化物量	0.15 mm 以下に微粉砕	JIS A 1154 [チオシアン酸水銀(Ⅱ) 吸光度法]	不溶出分を含む 塩化物の全量
反発度	リバウンドハンマー	JIS A 1155	各箇所9測点以上
中性化深さ	フェノールフタレン溶液	JIS A 1132	コア外表・割裂面

*建築本部 建築エンジニアリング部

**四国支店 建築部

***建築営業本部 営業部

2. 4 中性化試験

中性化深さは、2回にわたって測定した。1回目は、断面直交方向にコア(φ50)を採取し、その外表にフェノールフタレン溶液を噴霧し、変色の有無により確認した。2回目は、内側からの中性化深さを確認するために、断面直交方向に採取したコアの内側端部を割裂し、割裂面にフェノールフタレン溶液を噴霧し、割裂面深さ方向の中性化深さを6点につき測定した。

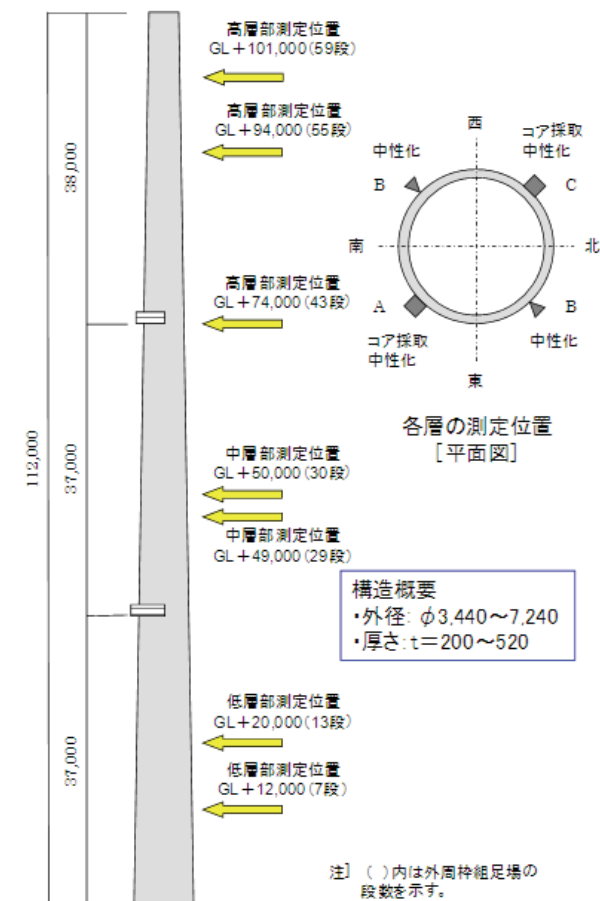


図-1 測定箇所

3. 測定結果

3. 1 自然電位

表-2に、劣化コンクリート撤去部付近の自然電位の測定結果を示す。中低層部に比較して高い位置の測点で若干電位が卑側に移行している傾向が見られるが、全般的には、電位が卑側に大きく移行している箇所は見られず、腐食により急激に強度低下を生じるような鉄筋は、測定時点ではないものと推察される。

3. 2 塩化物量

塩化物量については、煙突躯体の外部かぶり部分の解体

片を微粉碎した試料により JIS A 1154 に準じて未溶出分も含めた全塩分量について測定した。コンクリート中の塩化物全量測定値を表-3に示す。推定割合(W/C=55%、W=185kg/m³、密度:2,303kg/m³)から算定される塩化物量は、いずれも規定値である 0.30kg/m³を上回り、限界値とされる 1.2kg/m³をも大きく上回る。当該構造物は、海岸から約 300mの距離に位置しているが、塩分による劣化は、今回の調査結果を見る限りでは、極めて著しい。ただし、海岸付近の構造物に適用される海岸からの距離と塩化物量の関係(表-4)からは、表面で 3.0kg/m³程度は元来存在するようであり、これより経年で予測されるかぶり位置(d=50mm)での塩分量は式(1)、(2)により 2.50kg/m³となり、予測値と供試体2の測定値はほぼ一致する。

$$\log D = [4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7) \quad \text{式(1)}$$

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) + C_i \quad \text{式(2)}$$

ここに、

$C(x,t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (年)における

塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_i : 塩化物イオン濃度 (kg/m³)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/年)

erf : 誤差関数(表-5)

W/C : 水セメント比

なお、表-3の下欄に、30段、43段で採取したコアにより煙突内側部分について、全塩分について再試験を行った結果を示す。これより、煙突断面内側では、外側かぶり部分に比較して塩化物量は少なく、30段位置では規定値の 0.30kg/m³より小さい試験値であったが、上部43段では緩和規定値である 0.60kg/m³を超えていた。

3. 3 反発硬度

表-6に、各位置におけるコア圧縮強度とリバウンドハンマーによる反発度と関係式により換算した推定強度を示す。また、図-2には、コア圧縮強度と反発度による各推定値を比較したものを示す。各位置におけるコア圧縮強度は、ばらつきはあるものの、得られた測定値は 24.0~38.0 N/mm²であり、設計基準強度 18N/mm²を十分満足していた。また、強度発現状況も特定の傾向は見られず、反発度を関係式により換算した推定強度は、いずれも設計基準強度を大きく超えていた。

圧縮強度に関する両試験の結果により、構造物コンクリート性能は、所要の品質を満足していることが明らかになった。

表-2 自然電位測定結果

記号	場所	電位 (mV)			電位度数分布 (%)					判定
		平均	最大	最小	>0mV	0 ≥ >-200	-200 ≥ >350	-350 ≥ >-500	≤-500	
07-01	7段目	22	39	-14	98.0	2.0	0	0	0	◎
07-02	"	-50	-9	-195	0	100.0	0	0	0	○
07-03	"	-99	-63	-229	0	99.5	0.5	0	0	○
13-01	13段目	1	87	-78	50.8	49.2	0	0	0	◎
13-02	"	3	68	-53	49.9	50.1	0	0	0	○
13-03	"	-2	92	-107	49.7	50.	0	0	0	○
13-04	"	-55	58	-190	15.4	84.6	0	0	0	○
29-01	29段目	-266	-146	-395	0	18.8	65.8	15.4	0	△
29-02	"	20	92	-43	76.2	23.8	0	0	0	◎
30-01	30段目	-202	-29	-292	0	38.8	61.2	0	0	△
43-01	43段目	-152	-19	-268	0	76.4	23.6	0	0	○
55-01	55段目	-313	-273	-366	0	0	95	5.0	0	△
59-01	59段目	-205	-141	-493	0	46.7	51.7	1.6	0	△

※◎: E >0mV ⇒ 腐食なし

○: 0mV ≥ E > -200mV ⇒ 90%以上の確率で腐食なし

△: -200mV ≥ E > -350mV ⇒ 不確定

×: -350mV ≥ E > -500mV ⇒ 90%以上の確率で腐食あり

3.4 中性化深さ

表-7に、コア供試体により中性化深さを測定した結果を示す。外側の中性化深さは、平均値では3.4~18.2 mmと経年から想定される範囲である。一方、内側の中性化深さは、上部において内側部分が折れて欠損したこともあり、全長からの推定値ではあるが、下部を除き、100 mmをはるかに超え、平均値の最大は254 mmとなっている。それに対し、下部の内側の中性化深さは、20.0~23.5 mmであり、概ね経年から想定される範囲である。上部の内側の測定値が現状を正確に捉えているとした場合、既に中性化域が鉄筋に及んでいることになり、非常に危険な状態と考えられる。しかし、下部の内側の中性化深さは、ほぼ想定範囲内の値を示していることから、中段以高で急激に中性化の進行が著しくなるとは考え難い。したがって、内側の中性化深さについては、再度試験を行い定量的な範囲を確認する必要がある。なお、その際には、コアを最後まで抜ききらずに、かぶり寸法より少し入り込んだ位置で折り、採取したコアを縦方向に割裂してその断面の中性化深さを3~5点測定するようにする。なお、外側の中性化深さの最大値24.0 mmが37年での経年変化と考えると、設計かぶり厚さ50 mmに対し、中性化残り10 mmで鉄筋が発錆する可能性があるとした場合、中性化深さが \sqrt{t} 則(t: 供用期間)に従うと仮定すると、発錆までの年数tは、式(3)より求めることができ、供用後最早では、103年で発錆する可能性があると考えられる。

$$\sqrt{t} = \frac{C}{C_{t_0}} \sqrt{t_0} \quad \text{式(3)}$$

表-3 コンクリート中の塩化物全量測定値

供試体番号	塩化物量		測定方法	備考
	Cl (%)	Cl (kg/m ³) [*]		
1	0.07	1.61	JIS A 1154 チオシアン酸	既定値 ≤0.30kg/m ³
2	0.11	2.53		
30段内側	0.002	0.046	水銀(II) 吸光光度法	再試験
43段内側	0.028	0.640		

注] *: 測定結果と推定割合により単位質量に換算

表-4 表面における塩化物イオン濃度 C₀ (kg/m³)

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

表-5 erf (誤差関数) 数値表

z	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
erf(z)	0.00	0.11	0.22	0.33	0.43	0.52	0.60	0.68	0.74	0.80	0.84

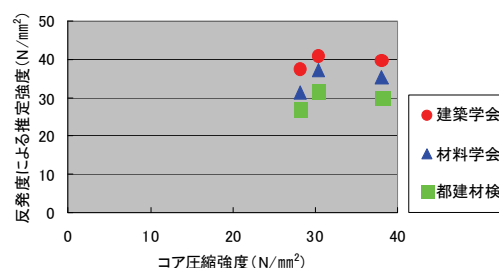


図-2 コア圧縮強度と反発度推定強度の関係

表-6 コア強度および反発度による推定値

コア採取		コア供試体			測定値および推定値				備考
記号 ¹⁾	位置	寸法(平均:mm)		圧縮強度 ²⁾ (N/mm ²)	反発度 (R)	建築学会 ³⁾ (N/mm ²)	材料学会 ⁴⁾ (N/mm ²)	都建材検 ⁵⁾ (N/mm ²)	
		径	高さ						
GL20-A	13 段南東	43.6	86.0	24.0	—	—	—	—	—
GL20-C	13 段北西	43.7	78.1	28.1	38.7	37.5	31.2	27.2	横向き
GL50-A	30 段南東	43.7	86.3	26.7	—	—	—	—	—
GL50-C	30 段北西	43.8	87.0	30.4	43.4	40.8	37.1	31.7	横向き
GL74-A	43 段南東	43.8	87.2	27.5	—	—	—	—	—
GL74-C	43 段北西	43.8	86.0	38.0	41.9	39.8	35.2	30.2	横向き

注] 1) 図-1「測定箇所」を参照、2) 補正した後の圧縮強度
 3) 日本建築学会式: $F=7.3R+9.8(N/mm^2)$
 4) 日本材料学会式: $F=1.27R-18.0(N/mm^2)$
 5) 東京都建築材料検査局式: $F=0.98R-10.8(N/mm^2)$

表-7 中性化深さ測定結果(1回目)

供試体 番号	採取 場所	測定 位置	中性化深さ(mm)							平均	最大
			1	2	3	4	5	6			
GL20-A	13 段 南東	外側	20.0	12.0	9.0	12.0	7.0	7.0	11.0	20.0	
		内側	26.0	23.0	23.0	21.5	25.5	25.5	23.8	26.0	
GL20-C	13 段 北西	外側	10.0	8.0	6.5	6.0	5.0	6.5	7.0	10.0	
		内側	21.0	19.0	18.0	15.5	18.0	20.0	18.5	21.0	
GL50-A	30 段 南東	外側	12.0	12.0	12.0	9.5	9.5	10.0	10.8	12.0	
		内側*	256	254	253	253	253	257	254.3	257	
GL50-C	30 段 北西	外側	7.0	0.0	0.0	4.0	4.5	5.0	3.4	7.0	
		内側*	200	143	147	144	150	146	146.7	200	
GL74-A	43 段 南東	外側	21.0	21.0	0.5	0.0	0.0	0.0	7.1	21.0	
		内側*	181	165	159	163	166	179	168.8	181	
GL74-C	43 段 北西	外側	24.0	19.0	21.0	13.0	15.0	17.0	18.2	24.0	
		内側*	217	210	215.5	214	214	214	214.1	217	

注]※ 採取コアの内側部分が折れて欠損したため、中性化位置はコア全長からの推定値を示す。

ここに、

t : 発生までの年数

C : かぶり厚さ(mm)

C_{t_0} : t_0 年における中性化深さ(mm)

したがって、中性化のみを劣化要因と考えた場合、今回の測定範囲では、最低 103 年 - 37 年 ≒ 66 年の耐用年数と推定することができる。また、内側の中性化深さの最大値 257 mm が真と仮定し 37 年での経年変化と考えると、同様の設定条件とした場合、式(1)により、供用後最早で、0.90 年で発錆していた可能性が考えられる。

なお、表-8に、30 段、43 段で採取したコアにより、煙突内側部分について、中性化深さの再試験を行った結果を示す。これより、中段の 30 段で 250 mm 前後、上段の 43 段で 200 mm 前後の中性化深さが見られ、1回目で測定された中段以上の

内側部分について見られた 200 mm 前後の中性化深さは、ほぼ現状を直接示す値であることが判明した。

4. 調査および試験結果

今回の一連の試験・調査による結果をまとめると以下のようになる。

① 鉄筋腐食

自然電位による腐食状態は、一部に進行の可能性が認められるが、全般的には鉄筋自体の耐力に影響を及ぼすような状態にはないものと考えられる。

② 塩化物量

外部については、海岸から近いこともあり、限界値 1.20kg/m³ を超える塩分量が侵入している状態にあるが、環境条件からは予測の範囲内である。内部については、中段以下は、現

表一8 再試験による中性化深さ測定結果

供試体 番号	採取 場所	算定 方法	中性化深さ(mm)							
			1	2	3	4	5	6	平均	最大
GL50-N	30段 北	測定値 ¹⁾	150	156	163	174	175	174	165.3	150
		推定値 ²⁾	250	244	237	226	225	226	234.7	250
GL50-SE	30段 南東	測定値 ¹⁾	153	150	149	153	151	150	151.0	149
		推定値 ²⁾	247	250	251	247	249	250	249.0	251
GL50-NW	30段 北西	測定値 ¹⁾	160	161	159	154	155	153	157.0	153
		推定値 ²⁾	240	239	241	246	245	247	243.0	247
GL74-N	43段 北	測定値 ¹⁾	92	92	94	96	100	100	95.7	92
		推定値 ²⁾	218	218	216	216	210	210	214.3	218
GL74-SE	43段 南東	測定値 ¹⁾	161	162	160	158	157	158	159.3	157
		推定値 ²⁾	149	148	150	152	153	152	151.7	153
GL74-NW	43段 北西	測定値 ¹⁾	140	140	140	140	140	140	140	140
		推定値 ²⁾	170	170	170	170	170	170	170	170

注] 1) 外側表面から内側の中性化深さまでの距離を測定

2) 推定値は、壁厚さ推定値(30段:400mm、43段:310mm)より、1)を引いた内側からの中性化深さ

の許容値 0.30kg/m^3 以下であるが、上部は塩分の上方からの回り込みによる影響もあり、緩和規定値 0.60kg/m^3 近傍の塩分量が認められる。

③ コンクリート強度

コア強度も含めて、コンクリート強度は全面にわたり健全に保持されているものと考えられる。

④ 中性化

外部については、ほぼ通常の推定範囲の状態にあり、今後の供用は特に問題ないが、内部については既に 200 mm前後の進行が見られることから、内側の鉄筋については既に腐食進行状態にあるものと推察される。

以上より、コンクリートの強度は確保されているものの、中性化、塩分による劣化進行は、全般的にかなり危険な状態にあると推察される。劣化進行の状態は、中段以上の上部は内部からの中性化により、外部からは塩分により、それぞれ耐久性上の危険性が高まっている。一方で、鉄筋の腐食状態は、まだ進行期の段階にあり、鉄筋に対するかぶりを 50 mmと仮定すると、式(4)~(6)より、鉄筋自体は現時点より 10 年以上腐食によるひび割れは生じないと現状から推察される。

[塩分進入に伴う鉄筋腐食状態の進行予測]

・鉄筋の腐食速度に関する提案式

(JASS5・24 節「海水の作用を受けるコンクリート」¹⁾)

$$q = q_1 \times q_2 / q_2' \quad \text{式(4)}$$

$$q_1 = d / c^2 \left[-0.51 + 44.97(W/C)^2 \right] \quad \text{式(5)}$$

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O + 0.14TH + 0.51TO + 60.8HO \quad \text{式(6)}$$

ここに、

q : 鉄筋の腐食速度 ($\times 10^{-4}\text{g/cm}^2/\text{年}$)

d : 鉄筋径 (mm) $\Rightarrow 15.9\text{mm}$

c : かぶり厚さ (mm) $\Rightarrow 50\text{mm}$

W/C : 水セメント比 (%/100) $\Rightarrow 58\%$ (推定)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$) $\Rightarrow 15.0^{\circ}\text{C}$ (年平均気温)

H : 湿度の関する項 [$H = (RH - 45) / 100$]

RH : 相対湿度 (%) $\Rightarrow 65\%$ (仮定)

O : 酸素濃度 (%/100) $\Rightarrow 20\%$ (仮定)

また、ひび割れが発生する時点での限界腐食減量は、鉄筋径とかぶり厚さに応じて式(7)のようになる。

(JASS5・24 節「海水の作用を受けるコンクリート」²⁾)

$$Q_{cr} = 0.602(1 + 2c/d)^{0.85} d \quad \text{式(7)}$$

ここに、

Q_{cr} : 鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが発生する時点での鉄筋腐食量 ($\times 10^{-4}\text{g/cm}^2$)

ただし、実際には Q_{cr} の 1/5 を超える程度でひび割れが発生する事例が多いとの報告があることから、 Q_{cr} の 1/5 をひび割れが発生する時点での腐食減量とし、それを腐食速度 q で除したものが耐用年数と考えられる。したがって、式(8)より、ひび割れ発生までの残余年数 t_r は 16.4 年と推測される。

$$(Q_{cr}/5)/q - 37 = (51.79/5)/0.194 - 37 \approx 16.4 \quad \text{式(8)}$$

しかし、中性化、塩分による劣化が現状のまま進行したならば、鉄筋の腐食状態は一般的な予測よりも進行が速まるもの

と推察されることから、外部からの塩分の侵入および内部からの中性化の進行に対しては、何らかの対策が必要と考えられる。(ただし、中性化は、鉄筋の不動態皮膜を破損するだけで、即時に発錆状態になるわけではないので、対策としては前者が優先される。)

5. 補修方法の検討

基本的な補修方法は、躯体劣化部の除去、鉄筋の防錆処理、吹付けモルタルによる充填、炭素繊維補強シートの貼付による補修方法とするが、要求性能を耐用年数で表した場合、これまでの検討結果より以下の2通りの方法が考えられる。

(1) 耐用年数5年(劣化部の除去+炭素繊維シート貼付)

基本的には、現行施工の躯体劣化部の除去、鉄筋の防錆処理、吹付けモルタルによる充填、炭素繊維補強シートの貼付による補修方法とする。基本的な補修方法は、今回の調査前の段階で計画されていた方法とほぼ同一だが、補修範囲が大幅に拡大した。耐用年数の設定は、「4. 調査および試験結果」に示した鉄筋腐食状態の進行予測による、ひび割れ発生までの残余年数16年余の1/3程度とした。調査・試験結果より、鉄筋の腐食状態がまだ進行段階であり、塩分や中性化による劣化がかなり進行しているものの、鉄筋腐食が加速し、構造体としての機能に影響を及ぼす段階までには到っていないこと、炭素繊維補強シートの被覆により外部からの塩分・二酸化炭素の浸入を低減できること、などがその根拠となる。

(2) 耐用年数20年(炭素繊維シート貼付+電気防食+再アルカリ化)

現状では、外側鉄筋の状態とコンクリートの劣化状況から類推し、内側鉄筋の腐食状態は外側とそれほど変わらないものと推察しているため、ここでは内側鉄筋の自然電位測定による腐食状態を確認した上で、(1)の補修方法に加えて以下の項目を実施する。

- ① 内側鉄筋の腐食状態が加速段階以上にある場合は、内側鉄筋に対し、電気防食を施す。
- ② 内側鉄筋の防錆処理ないし中段以上の内側コンクリートの再アルカリ化を行う。

ただし、内側鉄筋の防錆処理は、同鉄筋の裏側まではつり込む必要があるため、現実的には難しい。また、再アルカリ化も、外側から行わざるを得ないので、アルカリ溶液が躯体内側のどこまで浸透するか、判断は難しい。実施に際しては、あらかじめ試験施工を行い、その効果を確認した上で、本施工に移行する。また、外部からの塩分・二酸化炭素の浸入に対しては、繊維補強シートにより低減できるものと判断する。

6. まとめ

海岸環境下における築37年の高さ112mのRC造煙突を対象として、自然電位、コンクリート中の全塩分量、反発度試験および中性化試験等の調査を行い、構造物の経年変化および鉄筋の劣化進行状況を把握し、耐用期間の延長年数に応じた補修方法を検討した。

(1) 一連の調査の結果、コンクリートの強度は確保されているものの、中性化、塩分による劣化進行は、全般的にかなり危険な状態であると推察された。劣化進行の状態は、中段以上の上部は内部からの中性化により、外部からは塩分により、それぞれ耐久性上の危険性が高まっていると推察された。

(2) 鉄筋の腐食状態は、まだ進行期の段階にあり、鉄筋に対するかぶりを50mmと仮定すると、鉄筋自体は、測定時点より約16年間は腐食によるひび割れは生じないと推察される。

(3) 調査結果の検討により、補修方法については、要求性能を耐用年数で表した場合、以下の2通りの方法が考えられる。

① 劣化部の除去、鉄筋防錆処理、吹付けモルタル充填、炭素繊維シート貼付による耐用年数5年に対応する補修方法。なお、耐用年数は、鉄筋腐食による耐用残余年数16年の1/3程度と設定した。

② 内側鉄筋・コンクリートの状態により①に追加し、電気防食、再アルカリ化を実施する耐用年数20年対応の補修方法。

【参考文献】

- 1) 森永繁他: 腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測、コンクリート工学論文集第1巻第1号、1990.1
- 2) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究、東京大学学位論文、1986.11