

論文

[1111] 既存 RC 配水池の非破壊検査結果と耐用性評価に関する研究

白倉篤志*1・宮本文穂*2・宮根憲二*3・鈴木 勉*4

1. はじめに

神戸市水道局会下山低層配水池は、昭和4年に供用を開始したRC地下構造式タンクであり、1号池と2号池の二つのタンクからなっている。その構造諸元等は表-1に示す通りである。このように、本配水池の構造躯体は、60余年の供用に耐えてきており、内面防水・補修工がなされてきているとはいえ、鉄筋コンクリート構造物に対して一般的に考えられている耐用年数に達しつつあるといえる。

以上のような状況にある当配水池に対して、平成4年度に配水池廻りの管路更新工事および配水池機能改善工事を実施するため、両池を空の状態にした。本研究は、この機会を利用して各種実験を実施することによって、当配水池躯体の安全性および耐久性評価を試みるとともに、内面防水・補修工の効果を調査することによって耐用性の評価を行い、補修・補強の要否判定を行おうとするものである。さらに、同種配水池の基礎データを得て、将来的には管理の実状を考慮した管理基準確立を目的としている。

表-1 会下山低層配水池の構造諸元等の一覧

項目	内容
竣工年月日	昭和3年5月 (昭和4年4月供用開始)
基礎構造	直接基礎
構造形式	RC地下構造
有効容量	20,000 m ³ (10,000 m ³ × 2池)
有効水深	3.03 m HWL:55.61 m LWL:52.58 m
防水仕様	①内面防水 防水モルタル (上床版を除く) ②外面防水 ゴムアスファルト (外壁及び屋上)
補修履歴	①漏水防止工事 (昭和52～53年度) ②内面防水工事 (昭和57～58年度) 防水仕様 エポキシ樹脂系

本論文では、当配水池に対して実施した各種試験の内、主に比較的新しい非破壊検査技術であるレーダー法[1]とサーモグラフィー法[1]によって得られた結果と、その結果に基づいて検討したRC構造物の耐用性評価について述べる。

2. 調査実験のフローとその概要

上述の目的遂行に対応させて設定した調査実験の全体フローを図-1に示す。すなわち、まず最初に現地での目視調査および関連図書の調査を行うことにより、配水池躯体の安全性(耐荷力)評価を行うフローと、耐久性評価を行うフローに大別した流れを設定した。ついで、各フローそれぞれに対して必要な試験項目の確定を行い、安全性評価に対しては構造解析などを実行することにより構造安全率を指標として安全性を評価するものとした。一方、耐久性評価に対しては、躯体の寿命予測とライニングの寿命予測に分けた調査位置および箇所の確定を行った。このうち、躯体の寿命予測については中性化、鉄筋腐食などを指標に、また、ライニングの寿命予測につい

*1 神戸大学研究員 工学部建設学科コンクリート工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

*3 神戸市水道局技術部浄水課浄水係長

*4 神戸市水道局技術部浄水課

ては剥離率、ふくれ面積などを指標とした耐久性評価を行うものとした。これら安全性および耐久性両者の評価を総合することによって当配水池の耐用性を評価するものとし、さらにこの結果に基づいて補修・補強対策の検討を行うものとした。最後にこれらのデータを今後の維持管理基準の確立に役立てるものとした。

なお、表-2は、本調査実験の目的と対応させた調査項目と調査方法等をまとめて示したものである。

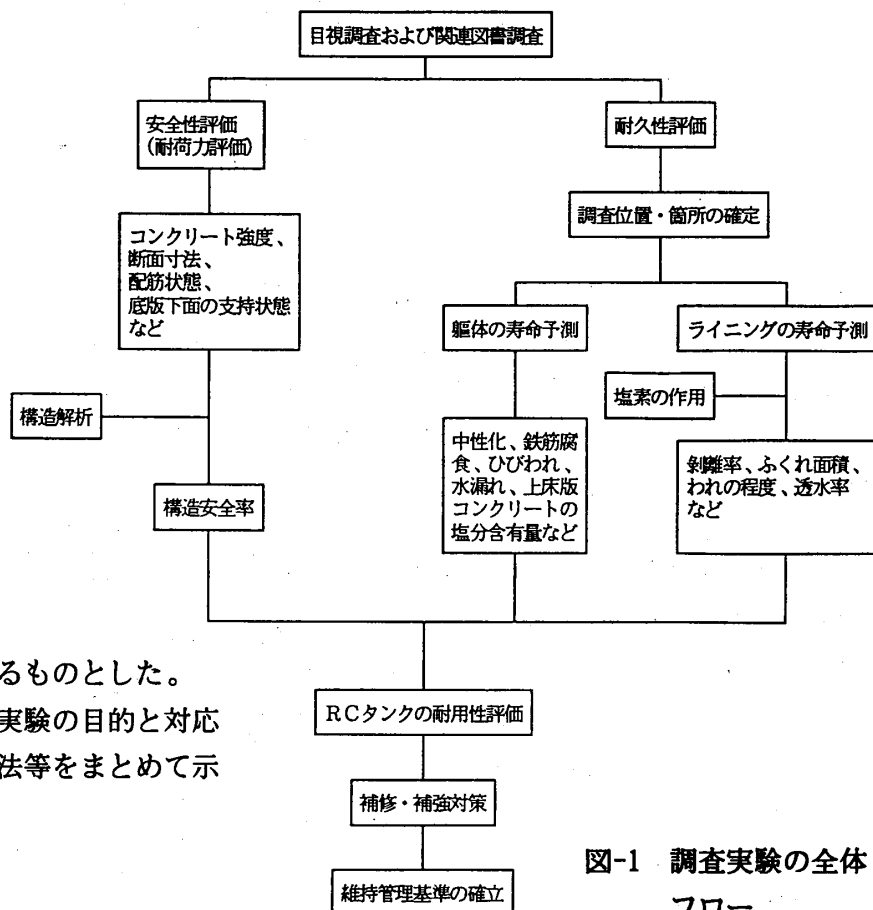


図-1 調査実験の全体フロー

表-2 調査実験の概要

	調査目的	調査項目	調査方法	得られるデータ	得られる結果	備考
安全性評価 (耐力評価)	構造解析のためのデータの獲得	コンクリート強度	コア抜き試験	コンクリートの圧縮強度 " 静弾性係数 " ポアソン比	構造安全率	コア抜き個数は必要最小限とする。 1回の調査結果でこれら3つのデータを同時に得る。 鉄筋のかぶり厚は躯体寿命評価のデータにも適用する。
		コンクリート版の断面寸法	レーダー法	コンクリート版の厚さ		
		鉄筋の配筋状態	レーダー法	鉄筋の配筋位置		
		コンクリートの内部欠陥	レーダー法	コンクリート内部の内部欠陥(空洞、ジャンカ等)の有無		
		底板下面の支持状態	レーダー法	底板下面の空洞等の有無		
耐久性評価	躯体の寿命予測	中性化深さ	コア抜き試験	中性化深さ	躯体の寿命評価	強度用コアを併用 ライニングの劣化の著しい所、数ヶ所
		ひびわれ、水漏れ	目視	ひびわれ、水漏れ発生状況(目地の水漏れ含む)		
		塩分含有量	化学分析	上床版の塩分含有量		
	ライニングの寿命予測	剥離、ふくれ、われ	目視	剥離、ふくれの分布、われの発生状況	ライニングの寿命評価	目視で検出不可な剥離、ふくれも検出可能
		剥離、ふくれ	サーモグラフィ法	剥離、ふくれの分布状況		

3. 調査結果と耐用性評価

3.1 目視調査

現地で両タンク内の目視調査を行った結果の主なものをまとめると以下ようになる：

① 1号池および2号池ともに上床版にはライニングが施されておらず、上床版に鉄筋腐食による錆汁の溶出が多く発生している。また、壁面ライニングの止端部にも鉄筋腐食による錆汁の溶出が数カ所発生している。

② 1号池および2号池ともに継目部の目地部分のシーリングが十分ではなく、底版より少し上の部分でシーリング材が途切れている。そのため、シーリング材止端部でライニングに割れが見られた。従って、この部分からの底版への漏水の可能性が考えられる。

③ 1号池に施工されたライニングは、目視の結果、なおほぼ健全な状態を保っていると見受けられるが、もし損傷が現れるとすれば、上述のライニング止端部の他に水面変動が常時発生する、乾湿繰り返し部分が最も可能性が高いと考えられる。

④ これに対し、2号池に施工されたライニングには、ふくれ現象がほぼ全域にわたって発生しており、特に水面変動が常時発生する乾湿繰り返し部分と底版と壁面の取合部分に多く発生しているように見受けられた。これらのふくれの内部は、ほとんど水が充満していた。

3. 2 非破壊試験

配水池躯体の構造安全性評価に必要なデータとしては、コンクリートおよび補強鉄筋の材料特性（強度およびヤング係数など）、躯体底版、壁面および上床版部のコンクリート厚さの推定および内部欠陥の有無、鉄筋の配筋状態（鉄筋位置、径、かぶり）および底版下面の支持状態（背面空洞の有無）を考えた。また、配水池躯体およびライニングの耐久性評価に必要なデータとしては、中性化深さ、かぶり厚分布、ライニングの剝離率およびふくれ面積等を考えた。このうち、材料特性に関しては採取試験片に対する破壊試験を実施して求めたが、鉄筋関連の諸量およびコンクリートの状態についてはレーダー法を、またライニングの剝離率（ふくれ率）の検出についてはサーモグラフィー法を適用し、定量的評価を行った。

(1) レーダー法

従来、既存コンクリート構造物に関する鉄筋関連の諸量については渦電流を利用した方法が、またコンクリートの状態（内部欠陥の有無、厚さおよび背面空洞の有無）については超音波等を利用した方法が主として用いられてきたが、データを統計的に処理するためには、可能な限り多くの測点でデータを得る必要がある。このため、本研究では従来の方法よりも簡便で迅速な作業が可能であるレーダー法の適用を試みた。図-2は、レーダー法によって得られた壁面の鉄筋ピッチおよびかぶり厚さの調査結果の一例を示したものであり、図-3および図-4は、それぞれこれらの結果を基にしてかぶり厚さおよび鉄筋ピッチの統計量を求めたものである。それぞれの図中には、得られた統計量の数値を併記している。また、図-5はレーダー法によって得られた壁面のコンクリート厚さの調査結果の一例を示したものである。データの表示形式が図-2の場合と異なっているが、これは分解能、探査可能深度を考慮し、波長の異なるアンテナおよび装置を用いているためである。図-6は、図-3および図-4と同様にしてコンクリート厚さの統計量を求めたもので

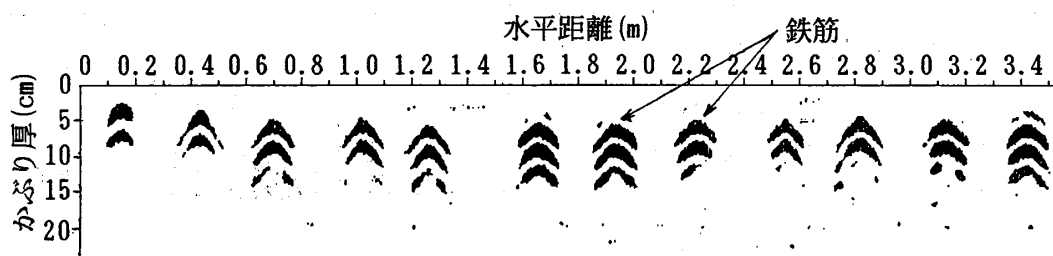


図-2 レーダー法による鉄筋ピッチおよびかぶり厚さの測定結果(導流壁)

あり、図中に得られた数値を併記している。

(2) サーモグラフィー法

サーモグラフィー法は、表面温度の差から構造物表面におけるふくれ、剝離等を判定する方法であるが、本研究で対象としたRC配水池内部では太陽光も当たらず、温度変化も緩やかであるため、ライニングの欠陥判定に必要な有為な温度差が生じない。したがって何らかの方法で躯体表面を強制加熱する必要があった。このような場合、一般的には赤外線ランプを利用したり、温水を散布する方法が取られる。これら両方法を試みたところ、赤外線ランプを利用する方法では、加熱時間がかかりすぎること、また温水を散布する方法では多量の温水を必要とするため、作業効率が悪いことが明らかとなった。

そこで、本研究では、電熱器（家庭用ホットプレート）を躯体表面から数cm離れた状態で加熱し、表面温度下降時の温度分布を経時的に観察し、データの採取を行った。ここで、ふくれ内部は、前述したようにほとんど水が充満しており、水がコンクリートに比べ熱しにくく冷めにく

いという特性から、同じ温度から冷却していく過程で、水を含む部分、すなわちふくれ部がライニング密着部に比べて高温になる状態を検出した。

今回採用した赤外線画像処理装置の1視野はおよそ50cm×80cmの大きさであり、1回の加熱で視野全体ををカバーできないため、写真-1(a)に示すように5回に分割してデータを採取した。

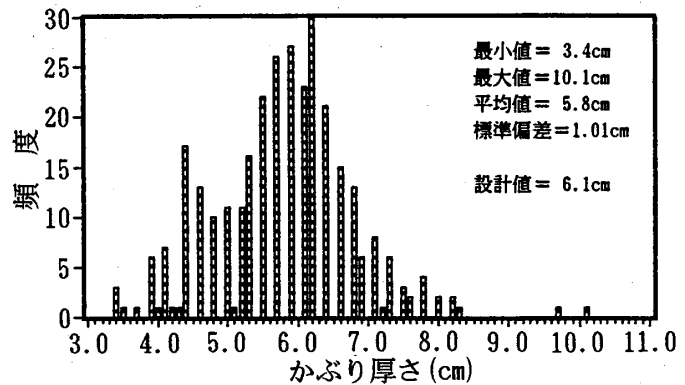


図-3 かぶり厚さの統計量(導流壁)

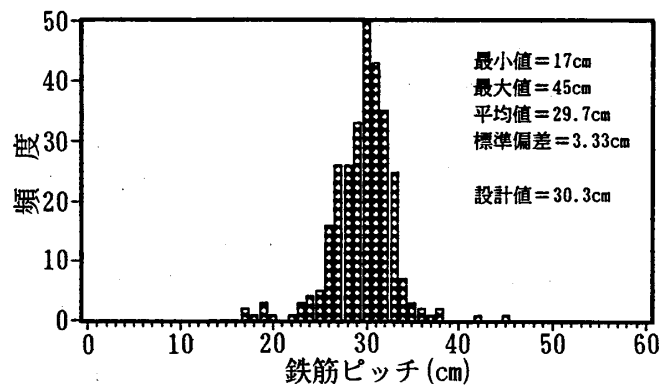


図-4 鉄筋ピッチの統計量(導流壁)

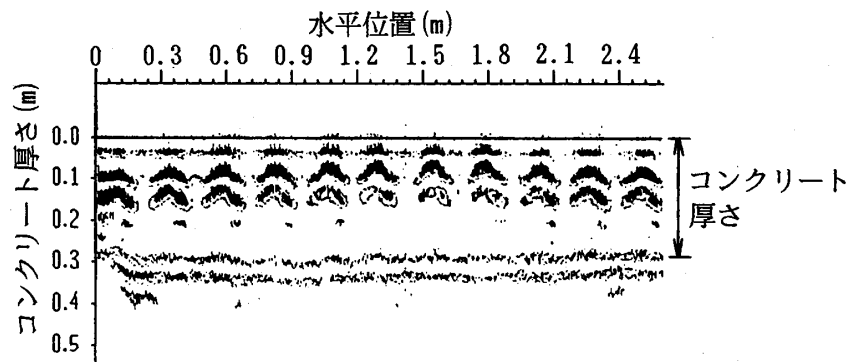


図-5 レーダー法によるコンクリート厚さの測定結果(導流壁)

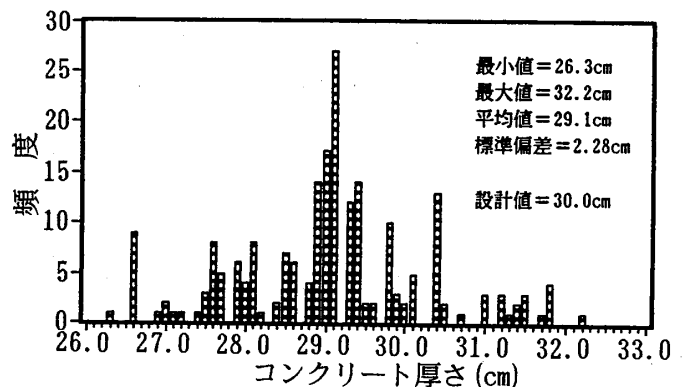


図-6 コンクリート厚さの統計量(導流壁)

写真-1 (b)は、写真-1 (a)のように得られた5分割データを合成した結果である。写真-1 (b)で斑点状に現れている高温部にふくれ等が発生しており、この高温部の面積を全体の加熱面積で除すれば、ふくれ率として定量的な評価が可能となる。写真-1 (b)の場合、ふくれ率は約16%と算定された。

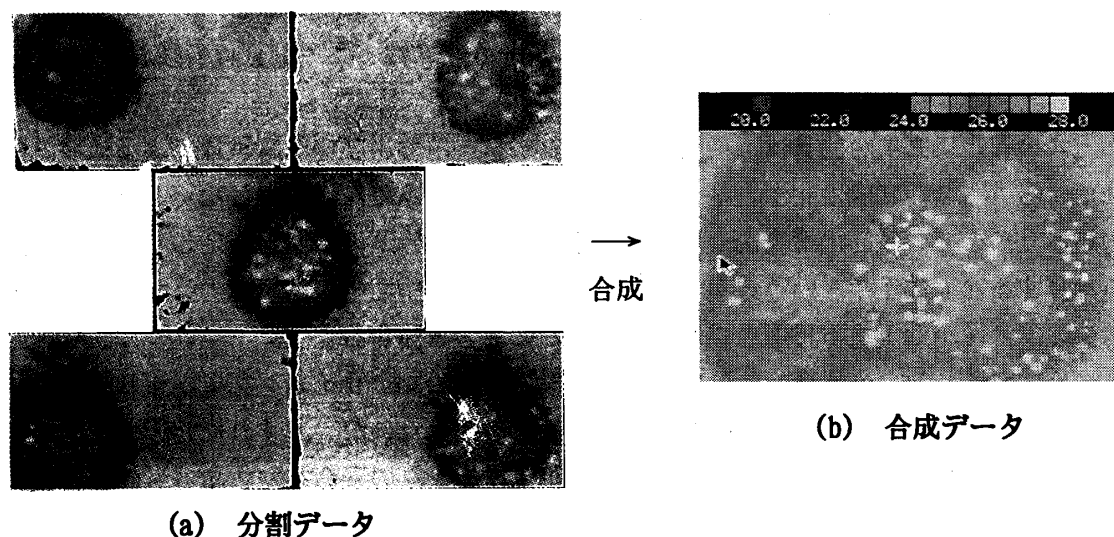


写真-1 サーモグラフィー法によるライニングのふくれ状態の測定結果

3.3 耐用性評価

(1) 躯体の安全性（耐荷力）評価

配水池躯体の安全性（耐荷力）は構造解析結果に基づき、安全率を指標として検討を行った。構造解析は、7連のラーメン構造として2次元モデル化し、現行設計法（神戸市水道局）による種々の荷重を組合せて用い、骨組解析を行って許容応力度法および限界状態設計法に基づいて安全率を算出した。解析に用いた実測データは表-3に示すとおりであり、このうち鉄筋の配置位置（かぶり厚さ、ピッチ）とコンクリート版の厚さについては、測定結果の平均値と 1.645σ （5%危険確率値）の値を用いて計算した。その結果は、躯体の安全性にはほぼ問題はないことが明らかとなった。

表-3 構造解析に用いたデータ

破壊試験によるデータ	非破壊試験(レーダー法)による統計データ				
コンクリートの圧縮強度 : 223 コンクリートの弾性係数 : 155000 コンクリートのポア率 : 0.3 鉄筋の降伏点 : D19 2823 D10 3711 *数値は全て平均値で、単位は ポア率を除き全て kgf/cm ² 。	コンクリート版の厚さ 鉄筋のかぶり厚さ 鉄筋ピッチ 内部欠陥の有無 背面空洞の有無	上床版 30.6, 1.43 4.4, 0.56 14.9, 2.26 無	側壁 6.2, 0.83 15.0, 1.70 無	導流壁 29.1, 1.19 5.8, 1.01 29.7, 3.33 無	底板 25.9, 2.28 7.9, 1.35 20.3, 3.22 無 空洞無し
	*数値の右は平均値, 左は標準偏差。単位はcm				

(2) 躯体の耐久性評価

躯体の耐久性（寿命）は、中性化深さおよび鉄筋のかぶり厚さのばらつきを考慮した鉄筋の腐食割合から評価する手法[2]を採用した。ここで、コンクリートの中性化領域が鉄筋表面に到達

すると同時に鉄筋が腐食すると仮定すると、鉄筋の腐食割合 P は次式で示される[2]。

$$P = \int_0^{\infty} f(D - Ct) d(D - Ct) \quad (1)$$

$$f(D - Ct) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (\overline{Ct}^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp \left[\frac{-\{(D - Ct) - (\overline{D} - \overline{Ct})\}^2}{2(\overline{Ct}^2 \cdot v^2 + \sigma^2)} \right] \quad (2)$$

ここで、 D ：かぶり厚さ(cm)， σ ：かぶり厚さの標準偏差(cm)，

$\overline{D}$ ：かぶり厚さの平均値(cm)， $\overline{Ct}$ ：中性化深さの平均値(cm)，

Ct ：中性化深さ(cm) $\rightarrow Ct = A\sqrt{t} \cdots A = \text{常数}$ 、 t ：調査時の経過年数(年)，

v ：中性化深さの変動係数

上式の算定に必要な諸量は、前述のようにレーダー法および採取試験片による破壊試験で得られている（ちなみに中性化深さはライニングの有無による差はほとんどなく、0.4cm～0.5cm程度であった）ので、鉄筋の腐食割合が30%に達した場合を躯体の寿命と仮定し、両式を用いて寿命を計算すると、数千年という数値が算定された。これは中性化の進行による鉄筋腐食によって、躯体の耐久性が低下する可能性はほとんどないことを意味する。

一方、ライニングの寿命についてはふくれ率で評価した。ライニングにふくれが発生することによって、すぐに躯体に直接水や空気が触れるものではないが、ふくれに起因する剝離、はがれが多数発生していることから、ふくれの発生がライニングの寿命を左右するものと考えた。ライニングのふくれは、部位によって発生面積が異なるが、サーモグラフィー法による結果からも目視調査と同様、水面変動が常時発生する乾湿繰り返し部分と底版と壁面の取合部分に多く発生していることがわかった。したがって、これらの部位のふくれ率からライニングの寿命を評価することとした。ふくれは、時間と共に直線的に増加すると仮定し、ふくれ率が50%に達した時点がライニングの寿命と考え、現時点（塗布から10年）のふくれ率の平均がおおよそ14%であるから、ライニングの寿命は塗布からおおよそ36年、すなわち余寿命は26年となる。

4. おわりに

本研究は、供用後60余年を経過しているRC配水池に対して、各種非破壊試験等を実施して耐荷性および耐久性の両面から総合的に耐用性を評価することによって、余寿命などを明らかにする手法を検討したものである。躯体の耐荷性および耐久性評価に必要な鉄筋のかぶり厚さ、ピッチおよびコンクリート厚さの測定法については、今回用いたレーダー法の有効性を確認した。また、ライニングに対してはサーモグラフィー法を適用し、加熱方法を工夫することによって、ライニングに発生しているふくれをふくれ率として定量評価できることを明らかにした。しかし、それら非破壊試験等から得られたデータを用いて寿命評価する手法については、データ数が少ないことや仮定条件が多々あり、不十分な点も多いかと思われる。今後は、本配水池に対し適当な期間経過後に、あるいは同種構造物に対して同様の実験を試みてデータを蓄積し、本手法を確立していく所存である。

参考文献

- 1) 白倉篤志・宮本文穂：コンクリート構造物の維持管理における非破壊検査の適用とその精度に関する研究、建設工学研究所報告、第34号、pp. 33-65、1992. 12
- 2) 嵩英雄・和泉意登志・池田美和：信頼性手法に基づくRC建築物の耐久性診断について、第11回セメント・コンクリート研究討論会講演要旨集、pp. 60-65、1984. 10