

報 告

[1124] コンクリートの止水性能評価モデルの検討

正会員○広永道彦（電力中央研究所）

正会員 遠藤孝夫（電力中央研究所）

正会員 小野 定（清水建設土木本部）

正会員 名倉健二（清水建設土木本部）

1. はじめに

昨今、コンクリート構造物は海洋および地下と幅広い分野で建設され、その使用環境および要求される機能も非常に厳しいものとなってきた。例えば、放射性廃棄物の埋設施設のように、建設後の保守・補修が困難で、しかも長期に亘り耐久性が期待されるようなコンクリート構造物もある。そのような構造物に要求される機能の一つに水密性と耐久性があり、これらの性能を維持することは、その機能性、安全性および経済性の上からも非常に重要な課題である。

しかし、コンクリートの水密性および耐久性の評価と一口にいても、その構造物が置かれる環境によって、その水密性や耐久性に影響を与える劣化現象は様々であるため、評価対象となる構造物の環境条件を考慮して、適切に評価することが必要である。

コンクリート自体の水密性に関する研究については、古くから多くの研究者によって検討されている。しかし、そのほとんどが、健全なコンクリートに関する水密性の研究〔1〕で、劣化現象が作用したコンクリートの水密性の研究では、貫通ひびわれを有するコンクリートの水密性の研究で2、3の実験式が提案されているのみであり〔2〕〔3〕、初期欠陥および物理的な作用で発生した表面ひびわれを有するコンクリートの水密性に関する研究はほとんど見受けられないのが現状である。一方で、表面ひびわれに関する研究は、乾燥収縮および温度応力ひびわれなどのように、そのひびわれ性状（幅、間隔等）を数量化し、様々な構造物の評価に適用されている研究成果もある。

本報告は、初期欠陥および物理的劣化で発生する表面ひびわれを有するコンクリートの止水性能を評価できる手法を確立するために、既往のひびわれ性状等の数量化式に基づいて、地下10m以浅の地下構造物の止水性能を評価するモデル構築を試みたものである。

2. 止水性能評価モデルの構築概念

コンクリート自体は、良質な材料を使用し、入念に施工すればかなりの止水性を維持できる。しかし、実際にはコンクリート構造物には、温度応力ひびわれ、乾燥収縮等に代表される初期欠陥や荷重作用による曲げひびわれ等が発生し、構造物として止水性能がどの程度あるのかを評価するのは非常に困難である。そこで、筆者らは、このようなひびわれなどが発生しても、次のような手順で止水性能が評価できるのではないかと考えた。まず、①コンクリート構造物が置かれた環境条件から、その構造物に作用する劣化作用を抽出する、次に②個々の劣化作用によるコンクリートの劣化程度の数量化を行う、さらに③個々の劣化作用によるコンクリートの劣化程度の数量化を総合化して評価すべきコンクリート構造物の表面ひびわれの止水性能評価を行う。この評価モデル構築に沿って筆者らが構築した止水性能評価モデル構築までの検討手順を図-1に示す。

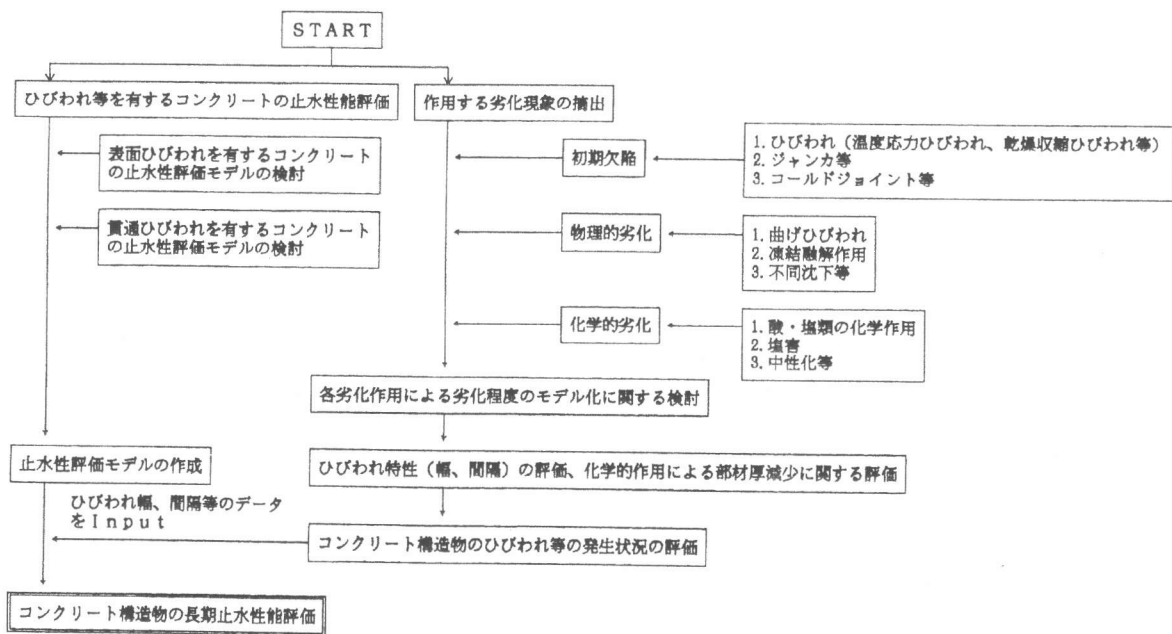


図-1 表面ひびわれを有するコンクリート構造物の止水性能評価モデル構築概念図

3. 止水性能評価モデルの概要

上記に示したように、本報告における止水性能評価モデルの構築にあたっては、各劣化作用による劣化程度をモデル化するために、ひびわれ性状等の数量化が必要であるが、個々の劣化作用については、古くから多くの研究者によって、その検討がなされている。そのため、その研究成果の中から、本報告の目的である地下構造物の止水性能評価に適合するものを抽出し、止水性能評価モデルとして組み入れた。以下にその概念を記す。

3.1 考慮する劣化作用

本報告で評価対象とするコンクリート構造物は、建設後5～6年で埋設され、構造物上部に6mの覆土がされると想定した。そのため、この構造物は、建設時から埋設前までの間に生ずる初期欠陥として、温度応力ひびわれと乾燥収縮、埋設後の劣化作用として、土圧等による曲げひびわれと地下水等に含まれている硫酸塩等による化学的腐食の4種類とした。なお、コンクリートの止水性能に影響を及ぼす特性要因としては、設計上の要因、施工上の要因、配合上の要因、環境上の要因および強度上の要因というものが既に明らかになっているが〔4〕、本検討では、良質な材料を用い入念な施工がされるという条件を仮定し、配合、施工設計に起因する劣化作用は生じないものとした。

3.2 既往の研究における各劣化作用による劣化程度の数量化の選定

(1) 初期欠陥

温度応力ひびわれの数量化に関する既往の研究には、ACI 207委員会、BS 5337、小野の方法など多くのものがある。コンクリートの止水性能を評価する上で必要となるひびわれ特性は、幅と間隔である。この特性を求めることができるのは、ACIの方法、BS 5337の方法、小野および長瀧らの方法であるが、壁状コンクリート構造物のひびわれ幅の実測値と計算値とを比較した研究〔5〕結果で、比較的適合性の良い小野の方法を用いることとした。

また、乾燥収縮によるひびわれの幅、間隔などの特性を評価する手法については、小柳、山崎らの研究および乾燥収縮をコンクリートの温度変化量に換算するACI 207委員会、小野の方法と曲げひびわれ幅算定式の中で乾燥収縮ひずみを曲げひずみに加算する土木学会標準示方書などがあるが、石橋らによって実測値と比較的よい適合性が示された阪田らが提案している乾燥収縮算定式〔6〕を用いることとした。

(2) 物理的劣化

物理的劣化として考慮する曲げひびわれの幅、間隔などの算定式については、土木学会標準示方書〔7〕、CEB/FIP MODEL、BSI/CO110、ACI 318委員会、SNIPなどの報告がある。これらの算定式の中で、土木学会の式は、各国の算定式を考慮していること、また、ひびわれ幅が大きめの値を示すことから、ここでは土木学会のひびわれ算定式を採用することとした。

(3) 化学的劣化

化学的劣化については、上記に示した初期欠陥、物理的劣化のようにひびわれ幅、間隔でコンクリートの止水性能への影響を評価せず、「腐食による部材厚の減少による止水性能への影響」という考え方で評価することとした。しかし、化学的腐食に関する既往の研究は、劣化程度の評価指標として、強度比、長さ変化および重量変化等で表したものが多く〔8〕〔9〕、止水性能を評価する指標としては適当でない。一方、坂本は、酸と反応した部分で拡散速度が律速になるとし、劣化深さは浸漬日数の平方根に比例するとして、図-2に示すように実験でこの適合性を確認している〔10〕。硫酸塩に関してもこのような関係が成立するとすれば、コンクリートの止水性能を評価する指標として適用できる。そのため本報告の中では、化学的腐食については坂本の式を用い、部材厚の減少として止水性能を評価するのが妥当と考えた。

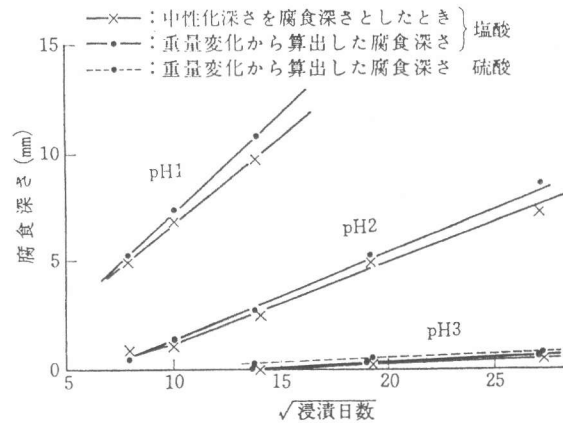


図-2 酸によるコンクリートの浸食速度〔10〕

3. 3 止水性能評価モデルの概要

図-1に示したような手順で行った劣化作用の抽出と個々の劣化程度の数量化に基づいて、図-3に示すような止水性能評価モデル構築フローを作成した。この止水性能評価モデルは、2つの大きな要素で構成されている。一つは評価対象構造物に作用することが考えられる個々の劣化現象を明らかにした上で、その結果生じるひびわれ等の劣化性状（幅、間隔等）を数量化し、個々の劣化現象をモデル化する。二つめは、ひびわれ（表面、貫通）を有するコンクリートの水密性を評価するためのモデルの検討である。これは、劣化作用によってひびわれが発生した場合のコンクリートの透水係数を算定するモデルの検討である。この両者の検討を併せて行った後、一つめの劣化作用のモデルの検討で数量化した個々の劣化で生じるひびわれ性状等を、二つめのコンクリートの透水係数算定モデルのひびわれ部分のモデルにインプットし、コンクリートの止水性能を評価するという方法をとった。これらの検討で作成したひびわれを有するコンクリートの止水性能評価モデルの一例を図-4に示す。

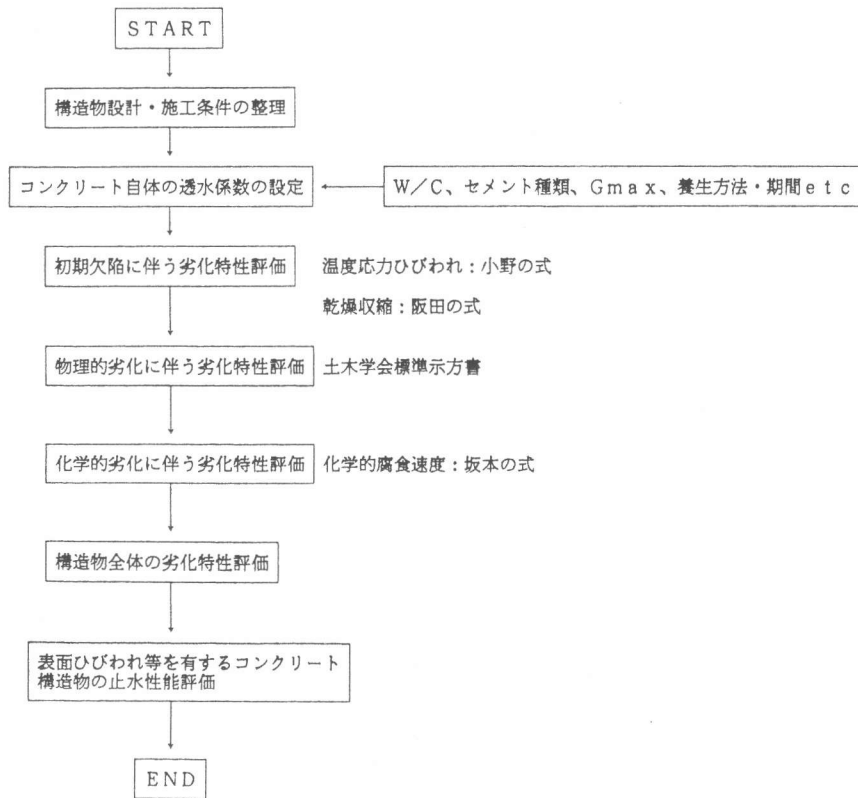
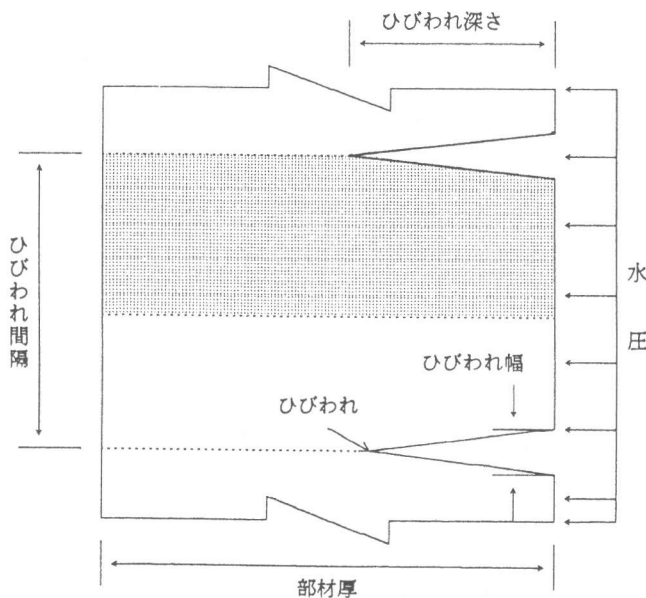


図-3 止水性能評価モデルの構築フロー



- ひびわれ性状の算定方法
- (1)初期欠陥 (温度応力ひびわれ、乾燥収縮)
 - 1)温度応力ひびわれに関するひびわれ性状
 - ①最大ひびわれ幅 W_{max}
 $W_{max} = K \times L \times R \times MAC$ (小野の式)
 - ②平均ひびわれ間隔 L_c

$$L_c = \frac{1000 \cdot L \cdot R \times MAC}{UCA + 1000 \cdot R \times MAC} \quad (m)$$
 - 2)乾燥収縮

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = (1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})) \cdot \epsilon_{sh\infty}$$

$$\epsilon_{sh\infty} = -60 + 78(1 - \exp(RH/100)) + 38 \log eW - 5(\log e(V/S))^2$$
 - (2)物理的劣化
 - 最大ひびわれ幅

$$\omega = \kappa \{4C + 0.7(C_s - \phi)\}$$

$$\times \left[\frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left[\text{or } \frac{\sigma_{ps}}{E_p} \right] + \epsilon'_{cs} \right]$$
 - (3)坂本の式
 劣化速度
 $X = k \sqrt{t}$

図-4 コンクリートの表面ひびわれを考慮した止水性能評価モデル

4. 評価結果

4.1 劣化特性値の算定

評価に当たって、本報告で考慮することとした温度応力、乾燥収縮および曲げ荷重によるひびわれ幅、間隔および化学的劣化による腐食領域を算定した。算定に当たっては、温度応力ひびわ

れ、乾燥収縮ひびわれ、曲げ荷重ひびわれの幅と間隔は既往の評価式で算定し、そのひびわれの深さについては曲げ荷重が作用した時の矩形断面の応力分布において、中立軸から下の引張領域のうちコンクリートの引張強度よりも大きな応力が作用する位置までをひびわれ深さとする仮定条件を設けた。また、化学的劣化については、約50年後に構造物のかぶり厚さ(8cm)まで腐食が進行するという仮定条件を設けて、浸食速度を算定した。このような、条件に従って設定した各劣化の算定値を図-5に示す。

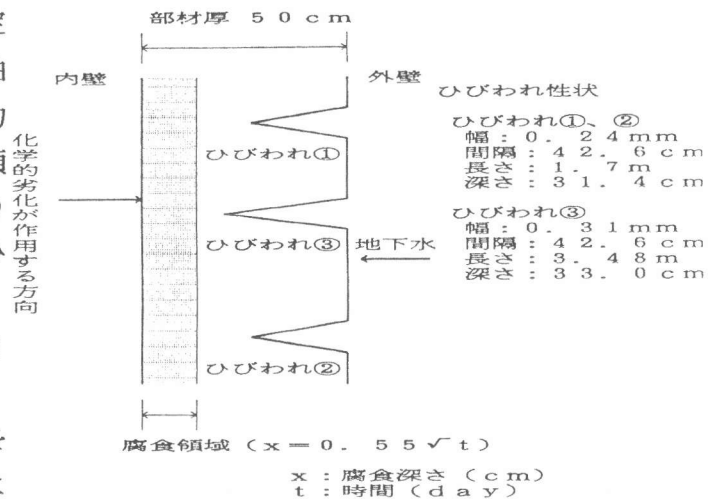


図-5 各劣化の算定値

なお、ひびわれの長期に渡る伸展については、考慮していない。

4.2 評価結果

図-5に示した劣化特性を有するコンクリート構造物について、その透水係数の300年までの長期的な経時変化を解析によって評価した。その結果を図-6に示す。

この図で、200年頃に透水係数が大幅な増加を示している理由は、温度応力、乾燥収縮および曲げひびわれで発生したひびわれの先端まで化学的劣化により、部材厚が減少し、ひびわれが貫通したことによる。

この結果をみると、コンクリート構造物は良質な材料を使用し、入念な施工およびきちんとした設計を行えば、かなり長期の止水性が期待できると考えられる。しかし、本評価では既往の研究でも明確になっていない、ひびわれ深さと化学的劣化の浸食速度に対して安全側の仮定条件を設けているため、この点を今後詳細に研究することによって、さらに精度のよい評価手法の開発が可能と考えられる。

5. まとめ

本報告は、既往の研究に基づいてコンクリート構造物の止水性能評価モデルの構築の可能性を検討したものである。しかし、本評価モデルは実測データに基づいた検証がなされていないため、今後は表面ひびわれを有するコンクリートの透水試験から得られたデータでモデルを検証する予定である。

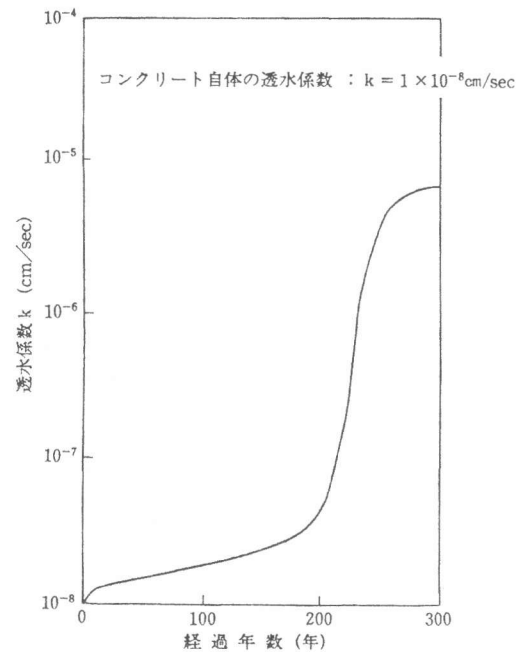


図-6 透水係数の経時変化

また、評価モデル構築上重要な個々の劣化作用のうち、初期欠陥、物理的劣化については発生するひびわれの幅、間隔は既往の研究で数量化できるものの、ひびわれの深さ、方向については未解明な部分が多々ある。さらに、化学的劣化についても、浸食速度が未だ不明な点が多いため今後、実験等によってその特性を明確にし、本評価手法の実用化を図る予定である。

参考文献

- 1) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究、土木学会論文集第77号、PP. 69-103、1961. 11
- 2) 渡部直人：発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートピットの水密性に関する研究－ひびわれ部および継目部の透水性評価－、電力中央研究所報告・研究報告、1987. 9
- 3) 伊藤忠彦他：ひびわれを有するコンクリートの高水圧下における漏水量について、土木学会第44回年次学術講演会、PP. 412-413、1984. 10
- 4) 小池迪夫他：コンクリートの水密性と建築防水、セメント・コンクリートNo. 512 PP. 1-8 1989. 10
- 5) 小野定他：マスコンクリートの温度ひびわれに関する既往の研究、コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関する J C I コロキウム論文集、1990. 8
- 6) 阪田憲次他：コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案、セメント・コンクリート論文集No. 43、PP. 244-249 1989
- 7) 土木学会：コンクリート・ライブラリー第61号コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料、1986. 10
- 8) 依田彰彦他：コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究（その4 10%Na₂SO₄ 溶液に浸漬したコンクリートの性質）、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP. 549-550 1984
- 9) 松下博通他：硫酸塩によるコンクリートの劣化に関する基礎的研究、コンクリート工学年次講演会論文集、PP. 65-68、1985
- 10) 坂本浩之：セメントモルタルの耐酸性に関する実験、土木技術資料14-8、1972