

劣化作用を考慮したコンクリート構造物の 長期止水性能評価手法の提案

広永道彦*・名倉健二**・遠藤孝夫***・
小野 定****・辻村捷太郎*****

地中コンクリート構造物の長期に亘る止水性能の評価法を構築するために、まずコンクリート構造物の劣化状態を表す劣化評価モデルを考え、ついでこれをもとに劣化による機能低下を見積もる機能評価モデルを作成するという手順により、コンクリート構造物の機能評価が可能になると考えた『コンクリート構造物の劣化・機能評価概念』を示した。そして、この概念に基づいて、地中コンクリート構造物の長期止水性能の評価手法を表し、例示により具体的手法を述べている。

Key Words : durability, long-term, water-tightness, model, underground structure

1. はじめに

従来のコンクリート構造物に求められた主な機能は力学的な機能、すなわち、耐荷性能や剛性の長期的保障であった。しかし、時代の進歩とともにコンクリートの使用範囲は拡大され、原子力施設では力学的な機能の他に放射線の遮蔽性や止水性といった機能の長期維持が求められるようになってきた。

一方、コンクリートの耐久性については、現在、土木学会や日本コンクリート工学協会を中心に、コンクリート構造物の耐久性に関する設計法^{1),2)}が整備されつつある。前者は劣化作用として主に塩害と凍害を考慮し、材料・設計・施工に関する項目で構成される環境指数をポイントで表し、その構造物に必要とされる耐用年数を表す耐久指数と照査して、所定の耐久性が期待できるかどうかを評価する方法である。後者は基本的には前者と同様であるが、耐久性をコンクリートのかぶり厚さで評価する点が異なっている。

これらの耐久性に関する設計法は、考慮している劣化作用下でコンクリート構造物が当初の目的に適用期間、構造物として機能するかどうかを評価するには有効である。しかし、止水性のような力学的機能以外のものの評価は考慮しておらず、また評価可能期間は50~100年程度であり、それ以上の耐久性が要求される構造物への適用は困難と思われる。さらに、保守・補修が不可能に近い地中構造物へのそのままの適用には無理があると

思われる。

そこで筆者らは、放射性廃棄物の埋設施設のように地下水の浸入に対する止水性を最も重要な機能の一つとし、しかも保守・補修が困難な地下10数mに建設される地中コンクリート構造物の長期に亘る耐久性の評価手法を考えることとした。

本論文は、地中コンクリート構造物の長期に亘る止水性能を評価するために筆者らが構築した評価手法の概念と、これに従って評価した一例を表示して、地中コンクリート構造物の長期止水性能の簡易評価手法として提案するものである。

2. コンクリート構造物の劣化・機能評価概念

コンクリート構造物の長期的な機能維持の評価法については、これまで研究例が少なく、特に定まった考え方がないと思われる。そこで、筆者らは次の手順に従えば可能になると考えた。

すなわち、①まず構造物の各部の受ける種々の複合した劣化作用を考慮し、②評価期間中における劣化程度を明らかにし、③次に劣化した部分の評価したい機能に関連する物理特性を明らかとし、④最後にこれら各部を集積した構造物全体の機能の程度を評価する、といった手順である。

ここで言う評価したい機能とは、止水性や遮蔽性、力学的性能等で、通常はこれら複数の機能(性能)が評価され、結果として経過時間の関数として表示されるものでなければならない。

しかし、考えられる劣化作用を全て網羅し、上記の手順で劣化程度と機能を評価するには、何らかの簡略化したモデル化が必要となってくる。そこで、ここでは劣化評価モデルと機能評価モデルによるコンクリート構造物の劣化・機能評価概念について説明する。劣化評価モデルは、上記の①と②に相当し、機能評価モデルは、③と

*正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所
原燃サイクルプロジェクト部
処分チーム 主査研究員
(〒270-11 我孫子市我孫子1646)
清水建設(株) 土木本部 技術第1部
**正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第1部
***正会員 工博 東北学院大学教授工学部土木工学科
****正会員 工博 清水建設(株) 土木本部技術第1部 副部長
***** 清水建設(株) 原子力本部技術部 副部長

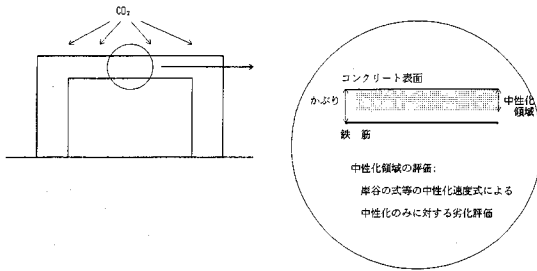


図-1 劣化評価モデルの概念

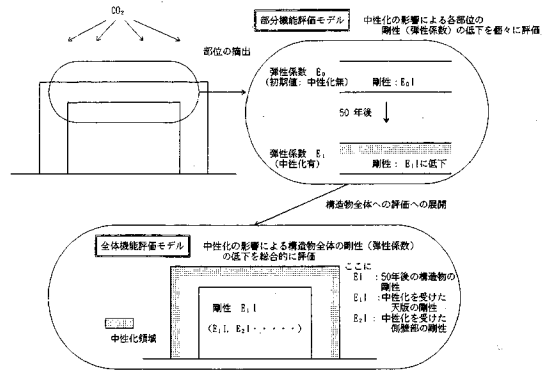


図-2 機能評価モデルの概念

④に相当するものである。

(1) 劣化評価モデル

対象となるコンクリート構造物は、建設時から時間の経過と共に何らかの劣化作用を受けて徐々に劣化が進行していく。構造物の各部位を考えると、荷重作用や劣化作用が異なるため、同一の劣化作用を考えて平均的に劣化を評価するには無理が出てくる。このため、荷重作用や劣化作用の代表的な部位をいくつか考え、建設時から劣化・機能評価時までの劣化によるダメージを考えてモデルをつくるのが合理的と考えられ、これを劣化評価モデルと名付ける。例えば、ここに評価対象とするコンクリート構造物の耐久性を著しく低下させる劣化作用として中性化があるとすると、中性化の劣化程度を表す中性化速度式が劣化評価モデルに対応するものであり、この概念は図-1に示される。このモデルは、建設時から考えることとし、厳密にはある定められたコンクリートの材料や配合、施工法、養生法による、建設から数週間あるいは数ヶ月間で完成した構造物の初期欠陥の評価から始まり、その後の劣化作用によるコンクリートのダメージを全部考えるものである。

初期欠陥は、豆板や乾燥収縮によるひびわれ、セメントの水和に起因する温度ひびわれ等を含み、その後の劣化作用によるダメージは、ひびわれの進展やコンクリート表面からの劣化進展深さで示される。これらのひびわれや劣化進展は、ひびわれの特性（ひびわれ幅、ひびわれ間隔、ひびわれ深さ）や劣化進展深さで表されるものである。

ただし、現在までのところ、種々の劣化作用が重なった場合（複合劣化）の劣化進展の予測は困難なため、このモデルの作成段階ではいくつかの仮定を設けることとする。

(2) 機能評価モデル

劣化評価モデルをもとに、要求される機能の評価するためのモデルが機能評価モデルである。機能評価モデルは、通常、部位機能評価モデルと全体機能評価モデルよりなっている。この考え方は、模式的に図-2に示される。例えば、中性化が生じたコンクリート構造物の機

能を評価する場合、中性化速度のみを評価しても、構造物全体の機能（例えば、力学的機能）を評価することはできない。構造物を評価する一つの機能として剛性が重要である場合、中性化した構造物の機能を弾性係数をパラメータとして構造物全体の機能評価を行うのが機能評価モデルである。

劣化評価モデルで明らかにされた、建設時からのある経過年数時のコンクリート構造物の部位別劣化から、要求機能に対する劣化領域の物理特性と健全部の物理特性を組み合わせることにより、対象としているコンクリート構造物の部位機能評価モデルが構築され、部位の機能が評価される。コンクリート構造物全体としての性能評価は、これらの部位機能評価モデルを組み合わせることにより可能となる。

ただし、力学的性能評価においては、部位機能評価モデルの力学的特性を評価した後、構造物全体で構造解析し、これにより構造物としての性能を評価することになる。

この機能評価モデルの作成段階でも、現時点ではいくつかの仮定を設ける必要がある。すなわち、いくつかの劣化が重なった場合の劣化領域の特性を直ちに評価することは困難であり、通常は工学的判断により、安全側の評価をせざるを得なくなる。

これまで述べたように、劣化評価モデルと機能評価モデルの二つを使ってコンクリート構造物の機能評価を行う方法を『コンクリート構造物の劣化・機能評価概念』と呼ぶことにする。

次章では、ここで述べた劣化・機能評価概念の応用として、地中コンクリート構造物の長期止水性能の評価について記述する。

3. 地中コンクリート構造物の長期止水性能評価手法

ここでは、劣化・機能評価概念を地中コンクリート構造物の長期止水性能の評価に応用するため、次のような手順を考えた。

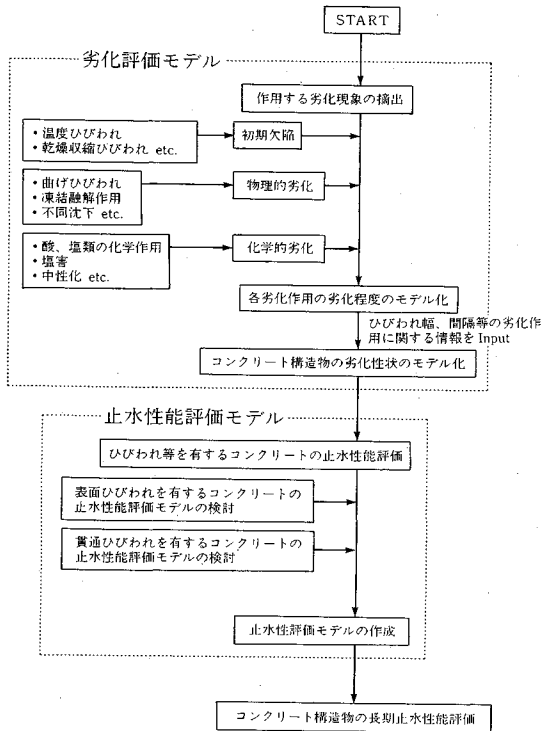


図-3 劣化作用を考慮したコンクリート構造物の止水性能評価手法構築概念図

表-1 コンクリートの示方配合

設計 基準 強度 kg/ cm ²	スラ ンプ cm	粗骨 材の 最大 寸法 mm	空気 量 %	水・ セメ ント 比 %	細骨 材率 %	単 位 量 kg/m ³				
						水 W	セメ ント C	細骨 材 S	粗骨 材 G	混和 材
250	12	25	4	55	47	153	279	887	1024	0.59

まず、①評価すべきコンクリート構造物が置かれた環境条件から、その構造物の長期に渡る止水性の維持に影響を与えると考えられる劣化作用を抽出する、次に②個々の劣化程度の評価を行い、劣化評価モデルを構築する。さらに、③各劣化作用により生じたひびわれや腐食を考慮した各部位毎のコンクリートの止水性能評価を行い、④これらの各部位を集合して全体構造物止水性を評価する。これにより、コンクリート構造物が置かれた環境下での劣化作用を考慮した長期止水性能評価手法が構築できると考えた。

筆者らのコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の概念を図-3に示す。

(1) 劣化評価モデルの構築

a) 劣化作用の抽出

本報告では、建設後5~6年で埋設され、構造物上部に約6mの覆土がされ、埋設後地下水位下になるコンクリート構造物(図-4)を対象とする。

表-2 地中コンクリートの構造物の諸元

項 目	諸 元
構造寸法 (mm)	平面 高さ 24,400×24,400×6,200 (内壁により内部を16分割)
部 材 厚 (mm)	底 版 : 600 外 壁 : 500 内 壁 : 400 頂 版 : 500
配 筋	底 版 : 下D19 @150・上D16 @150 外 壁 : 外D16 @150・内D16 @150 内 壁 : 外D16 @150・内D16 @150 頂 版 : 下D16 @150・上D16 @150

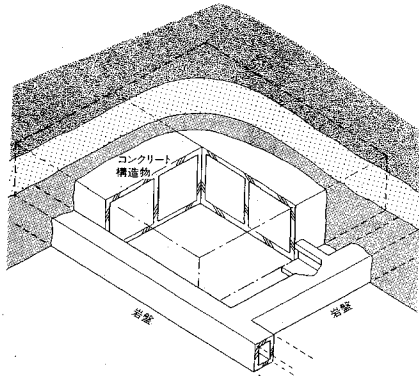


図-4 地中コンクリート構造物施設概念

また、この構造物は、比較的内陸で塩分飛散の影響がない地点に建設されるものとする。年間を通じての気温の範囲は-20~40℃と考えた。なお、水中凍結融解試験を本論文で対象としているコンクリート構造物と同様の配合の試験体で実施した結果⁹⁾、相対動弾性係数が60%を低下したのは、1300サイクルであったため、埋設されるまでの5~6年間で凍害の止水性能に与える影響は少ないと考え、これを無視できるとした。さらに、材料および施工上の要因もコンクリートの止水性能に影響を与えることが既往の研究¹⁰⁾で明らかにされているが、良質な材料を用いて入念な施工を行うという条件を仮定し、本検討ではそれらに起因する劣化作用は生じないものとした。

そのため、本論文におけるコンクリート構造物の止水性能に影響を与える劣化作用は、建設時から埋設前までの間に生じる初期欠陥として水和熱による温度ひびわれと乾燥収縮ひびわれ、埋設後の劣化作用としては土圧等による曲げひびわれと施設内の収納物に含まれることが考えられる硫酸塩による化学的腐食の4種類を考慮することとした。

通常、媒体中での物質の移動は、拡散、分散、移流等様々な形態があり、コンクリート中での水の移動も種々あるが、本論文では、止水性能を表す一つの因子として特に透水係数に着目した。

なお、評価対象としたコンクリート構造物の示方配合

とその諸元は表-1 および表-2 に示す通りである。

b) 劣化程度の定量化

劣化評価モデルを構築するためには、個々の劣化作用で生じる劣化性状を的確に数量化して、情報として後に示す止水性能評価モデルに組み込むことが必要である。

ここでは、前に選定した劣化作用を数量化するのに、最も適した方法を既往の研究の中から選定した。その結果を以下に示す。

なお、初期欠陥および物理的作用で生じたひびわれは長期に亘って自癒作用があることが指摘されているが、本論文では対象とした構造物の止水性能に対して安全側の評価ができるようにするために、この自癒効果については考慮しなかった。また、長期に亘っては、Ca, Si等の流失も考えられるが、本論文で対象としている評価期間300年よりはるかに長期に亘って、その変質が現れると考えられたため⁵⁾、本論文の中では、コンクリートの地下水等の影響による変質は考慮しないこととした。

(i) 温度ひびわれ

温度ひびわれの数量化に関する既往の研究には数多くのものであるが²⁰⁻²³⁾、止水性能を評価する上で必要となる情報は、ひびわれの幅と間隔である。この両方の特性の数量化が可能であり、かつ壁状コンクリート構造のひびわれ幅の実測値と計算値とを比較した研究⁹⁾結果で比較的適合性が良いことが示されたBS5337、小野の方法のうち、小野の方法を用いることとした。小野の方法によるひびわれ幅、間隔の算定式は次のとおりである。

$$W_{max} = K \times L \times R \times MAC \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W_{max} : 最大ひびわれ幅 (mm)

K : 定数 (1.59)

L : ブロックの長さ (m)

R : 外部拘束度

MAC : 温度ひびわれ幅に関する特性値

MAC の回帰モデルは次のとおりである。

$$MAC = -5.62 \times 10^{-4} - 2.19 \times 10^{-5} X_1 - 5.48 \times 10 X_2 - 1.77 \times 10^{-2} X_3 - 2.44 \times 10^{-2} X_4 + 1.54 \times 10^{-3} X_5 + 7.00 \times 10^{-5} X_6 + 8.13 \times 10^{-3} X_7 - 3.71 \times 10^{-3} X_8 - 6.21 \times 10^{-3} X_9 + 3.31 \times 10^{-4} X_{10} - 3.18 \times 10^{-3} X_{11}$$

ここに、 X_1 : 長辺長 L (m), X_2 : 短辺長 H (m),

X_3 : 外部拘束度 R , X_4 : 鉄筋比 p (%) ,

X_5 : スランプ (cm), X_6 : 単位セメント量 C

(kg/m^3), X_7 : 打設時期 (1: 夏 0: 夏以外),

X_8 : 打設時期 (1: 秋 0: 秋以外),

X_9 : 打設時期 (1: 冬 0: 冬以外),

X_{10} : 温度降下量 ΔTmt ($^{\circ}C$),

X_{11} : 壁厚 (リフト高) (m)

$$L_c = \frac{1000 \cdot L \cdot R \times MAC}{UCA + 1000 \cdot R \times MAC} \text{ (m)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 L_c : 平均ひびわれ間隔

L : ブロックの長さ (m)

R : 外部拘束度

MAC : 温度ひびわれ幅に関する特性値

UCA : ひびわれ面積に関する特性値

$$UCA = -44.40 - 0.52 X_1 - 19.08 X_2 - 54.72 X_3 + 3.52 X_4 + 0.17 X_5 + 0.81 X_6 - 26.30 X_7 - 18.37 X_8 + 0.82 X_9 + 1.88 X_{10} + 0.78 X_{11}$$

ここに、 X_1 : 短辺長 H (m), X_2 : 鉄筋比 p (%) ,

X_3 : コントロールジョイント (1: 有 0: 無,)

X_4 : スランプ (cm), X_5 : 打込み温度 Tp ($^{\circ}C$)

X_6 : 打設時期 (1: 夏 0: 夏以外),

X_7 : 打設時期 (1: 秋 0: 秋以外),

X_8 : 打設時期 (1: 冬 0: 冬以外),

X_9 : 表面温度上昇量の最大値 $\Delta Ts, r, \max$ ($^{\circ}C$), X_{10} : 内部温度と表面温度の差の最大値 $\Delta Ts, \max$ ($^{\circ}C$), X_{11} : 温度降下量 ΔTmt ($^{\circ}C$)

(ii) 乾燥収縮ひびわれ

乾燥収縮ひびわれによる劣化程度を劣化評価モデルへ組込むために、次のように考えた。

表-2 に示したようにコンクリート構造物の部材厚は50~60cmと比較的厚いことから、最初に水和熱による温度ひびわれが発生し、乾燥の進行にともない、ひびわれ幅の拡大や進展だけでは外的拘束と乾燥収縮によって生じる引張応力を緩和できなくなり、新たなひびわれが発生すると考えられる。ただし、構造物の部材厚が比較的厚いことから、乾燥収縮により新たなひびわれが発生する可能性は小さいと考えられる。

このようなことから、ACI207委員会や小野が提案しているように、乾燥収縮ひびわれをコンクリートの温度変化量に換算することにより、乾燥収縮の影響を考慮することとし、本論文では、小野が提案している温度ひびわれ特性モデルの温度降下量の項に乾燥収縮ひびわれの温度換算値を加算して乾燥収縮を考慮することとした。なお、乾燥収縮ひびわれの温度換算値を算定する上で必要な乾燥収縮量は、実測値との適合性が良い阪田らが提案した算定式¹⁰⁾を用いることとした。以下に阪田らの式と乾燥収縮ひびわれの温度換算式を示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{sh}(t, t_0) &= (1 - \exp(-0.108(t - t_0)^{0.56})) \cdot \varepsilon_{sh\infty} \\ \varepsilon_{sh\infty} &= -60 + 78(1 - \exp(RH/100)) + 38 \log w - 5(\log(V/S))^2 \\ &\quad + 4 \log t_0 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮予測値 ($\times 10^{-5}$)

$\varepsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮最終値 ($\times 10^{-5}$)

RH : 環境湿度 (%)

W : 単位水量 (kg/m^3), V : コンクリート体積 (cm^3)

S : 乾燥表面積 (cm^2)

t_0 : 乾燥開始材令 (日) $t_0 \geq 28$ のとき $t_0 = 28$

$t_0 \leq 7$ のとき $t_0 = 7$

t : 乾燥期間 (日)

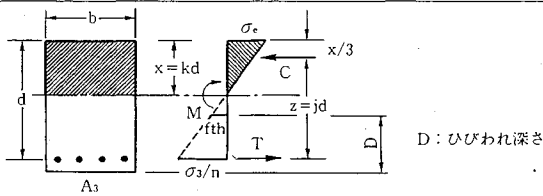


図-5 矩形断面の応力分布

$$\Delta T_{msh} = \epsilon_{sh}(t, t_0) / \alpha \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ΔT_{msh} : 任意材令 t 日における乾燥収縮ひずみの温度換算値 (°C)

α : コンクリートの線膨張係数
($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

式 (4) で求めた温度換算値を式 (1), (2) の温度降下量に加える。

(iii) 曲げひびわれ

荷重の作用による曲げひびわれの幅、間隔などの算定式については、土木学会コンクリート標準示方書、CEB/FIP CODE (1978), BSI/CP110, ACI 318 委員会、SNIP (ソ連) などで規定されている。

ここで、曲げひびわれに関する劣化程度は、各国の算定式の検討から安全側のひびわれ幅が算定できる土木学会のひびわれ算定式を用いることとした。

土木学会の算定式¹¹⁾は、ひびわれ幅がひびわれ間隔とその部分に埋め込まれた鉄筋の平均ひずみとの積に比例するとした、ひびわれ理論に基づいた算定式であり、次に示すとおりである。

なお、算定式の $4C + 0.7(C_s + \phi)$ が最大ひびわれ間隔である。

$$\omega = \kappa \{4C + 0.7(C_s + \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} \text{ または } \frac{\sigma_{pe}}{E_p} + \epsilon'_{cs} \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ω : 曲げひびわれ幅 (cm)

κ : 鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に異形鉄筋の場合に 1.0、普通丸鋼および PC 鋼材の場合に 1.3 としてよい。

C : かぶり (cm)

C_s : 鋼材の間隔 (cm)

ϵ'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひびわれ幅の増加を考慮するための数値

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (kgf/cm²)

ϕ : 鋼材径 (cm)

σ_{pe} : PC 鋼材応力の増加量 (kgf/cm²)

E_s : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm²)

E_p : PC 鋼材のヤング係数 (kgf/cm²)

曲げひびわれは、部材の高さ方向にほぼ鉛直に発生するが部材は貫通しない。なお、曲げひびわれ幅の算定式

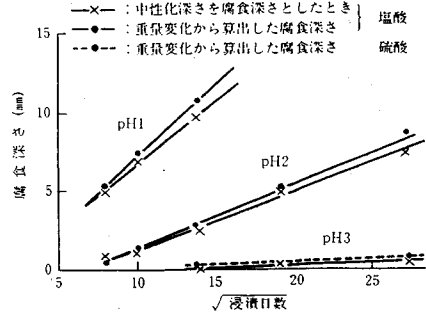


図-6 酸によるコンクリートの浸食速度¹⁵⁾

により得られるひびわれ特性は、幅、間隔であり、深さは得ることができない。このため、ひびわれ深さ特性については、図-5 に示す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みなすことにした。なお、引張強度は土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾に示された次式から求めることとした。

$$f_{tk} = 0.5f_{ck}^{2/3} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 f_{tk} : コンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

f_{ck} : 設計基準強度 (kgf/cm²)

(iv) 硫酸塩による化学的腐食

硫酸塩によるコンクリートの劣化は、Ca(OH)₂ と硫酸塩との反応により膨張性物質 (エトリンガイト) が生成されることにより生ずる。さらに、この反応の繰り返により、コンクリートのひびわれ、ポップアウト、剝離等の劣化が表層から進行していくと考えられている。

既往の研究^{12)~15)}では、硫酸塩による劣化の評価指標として強度、重量および長さの変化等で表している。コンクリートの硫酸塩による劣化に伴う止水性能評価の指標としてはこれらの指標は直接には適用しにくいと考えられる。一方、坂本¹⁶⁾は、酸と反応した部分での酸の拡散速度が反応律速になるとし、劣化速度を次式で表し、劣化深さは酸への浸漬日数の平方根に比例するとし図-6 に示すように実験でこの適合性を確認している。

$$X = k\sqrt{t} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 X : 反応部分の厚さ (cm)

k : 反応速度に関する定数

t : 浸漬時間 (日)

硫酸塩に関してもこのような関係が成立すれば、コンクリートの劣化評価の指標として適用できる。しかし、硫酸塩によるコンクリートの劣化特性をこのような観点から実験あるいは研究を行った事例がないため、今後実験等によりこの関係を求める必要があるが、本論文では坂本の式をベースにして硫酸塩による化学的腐食の検討を行うこととし、次のような仮定を設けて、劣化深さを

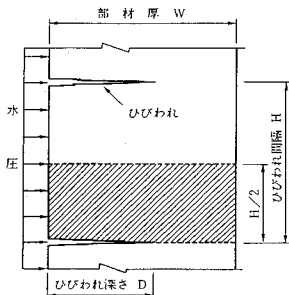


図-7 解析モデルの概念図

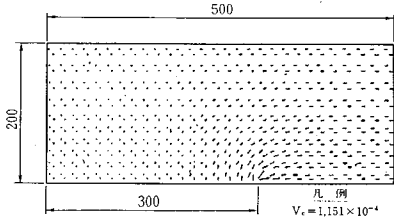


図-9 流速分布図 (ひびわれ間隔 40cm, ひびわれ深さ 30cm)

求めることとした。

仮定-1 硫酸塩によるコンクリート劣化深さは浸漬日数の平方根に比例する。

次に、腐食速度を設定することが必要である。そのため、次のような仮定を設定した。

仮定-2 RC 構造物としての機能が 50 年間続くとし、50 年後にかぶり厚さ (7.5cm) まで劣化するとした。

仮定-2 から、50 年 (50 × 365 = 18250 日) 後にかぶり厚さ (75mm) まで劣化するとし、式 (7) に代入し、

$$75 = k\sqrt{18250}$$

$$\therefore k = 0.55$$

となる。よって、劣化深さの算定式は次式とした。

$$X = 0.55\sqrt{t} \quad \text{..... (8)}$$

ここに、X: 反応部分の厚さ (cm)

t: 浸漬日数 (日)

ここまで記述した各劣化程度を部位毎に組合わせて各部位の劣化評価モデルが構築されることになる。

(2) 止水性能評価モデルの構築

コンクリート自体の水密性(止水性)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研究¹⁷⁾であり、劣化作用を考慮した研究では貫通ひびわれを有する場合の水密性の研究で、2, 3 の実験式^{18), 19)}が提案されているのみであり、貫通していないひびわれ(以降「表面ひびわれ」と記す)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。

ここでは、前に述べたコンクリート構造物に作用する劣化作用により生じた劣化に伴い、透水係数がどのような影響を受けるかを評価できる止水性能評価モデルを、

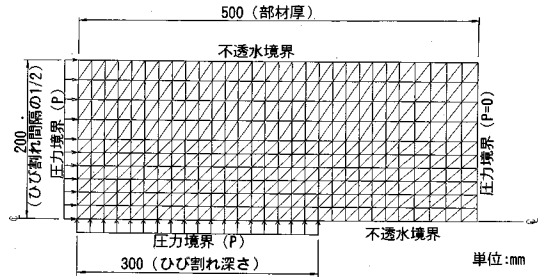


図-8 解析モデル図 (部材厚 50cm, ひびわれ間隔 40cm の場合)

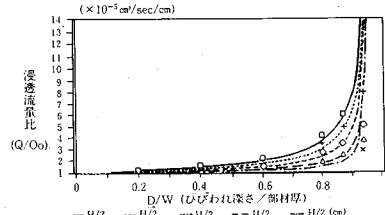


図-10 浸透流量比の双曲線近似

貫通ひびわれ状態、表面ひびわれ状態および部材厚の減少状態の 3 種類の状態について設定する。

a) 貫通ひびわれ状態の止水性能評価モデル

貫通ひびわれ状態の止水性能は、ひびわれからの漏水で評価する研究が行われている^{18)~20)}。漏水量 Q_1 の算定式は平行平板間を通る二次元・層流・非圧縮性流れの流量を求める理論式にひびわれ面の粗度、ひびわれの屈曲による流路長の増大などによる流量の減少を考慮した実験式であり、その時の透水係数 k は次式で示される¹⁹⁾。

$$Q_1 = \frac{P(\omega - \omega_0)^3}{\alpha} \quad \text{..... (9)}$$

$$k = \frac{P}{12\mu W} \quad \text{..... (10)}$$

ここに、P: 水圧 (kgf/cm²)、 ω : ひびわれ幅 (cm)

ω_0 : 漏水を生じないひびわれ幅 (cm)

α : ひびわれ定数

μ : 水の粘性係数 (kgf · s/cm²)

W: 部材厚さ (cm)

ひびわれからの漏水を見かけ上ひびわれがない健全なコンクリートからの透水によるものと仮定し、Darcy 則により得られる透水量となるような見かけ上の透水係数 K' を求めることにより貫通ひびわれを有する構造物全体の止水性能が評価できることになる。

b) 表面ひびわれ状態の止水性能評価モデル

表面ひびわれを有するコンクリートの止水性能を評価する研究はほとんど行われていないため、浸透流量に着目し、毛管ポテンシャル理論に基づく二次元有限要素法による浸透流解析を行い、浸透流量を求めることとした。この際、ひびわれがある場合の浸透流量 Q_2 をひびわ

表-3 コンクリート温度解析結果

部 位	打込み 温度 Tp (°C)	内部温度 の最大値 Tmax (°C)	内部温度 上昇量の 最大値 Tr,max (°C)	表面温度 Ts ⁽¹⁾ (°C)	表面温度 の上昇量 Ts ⁽¹⁾ , r (°C)	内部温度 と表面温 度との差 の最大値 ΔTs,max (°C)	部 材 内 平均温度 の最大値 Tm,max (°C)	短期材令 (30日) の部材内 平均温度 Tm ³⁰ (°C)	長期材令 (180日) の部材内 平均温度 Tm ¹⁸⁰ (°C)
外 壁	27.0	44.9	17.9	39.2	12.2	5.7	43.0	20.1	0.7

表-4 ひびわれ幅の計算結果

材令 部位	変数 X ₁ L (m)	X ₂ H (m)	X ₃ R	X ₄ P (%)	X ₅ スランブ (cm)	X ₆ C (kg/m)	打 設 時 期			X ₁₀ *1 ΔTm ² (°C)	X ₁₁ W (m)	MAC (mm/m)	平 均 ひびわれ幅 MAC (W) (mm)	最 大 ひびわれ幅 Wmax (mm)			
							X ₇ 夏	X ₈ 秋	X ₉ 冬								
外 壁	30 (1ヶ月)	24.4	5.0	0.48	0.530	12	279	1	0	0	0.5	0.027 (0.31)	0.31 (0.36)	0.50 (0.57)			
	180 (1ヶ月)														0.027 (0.31)	0.39 (0.47)	0.62 (0.75)
	1,800 (5年)														0.027 (66.9)	0.49 (0.48)	0.62 (0.76)

*1: ΔTm² = (Tm,max - Tm²) + ΔTmsh. ()内は環境温度60%のΔTmshを考慮した場合、()外はΔTmshを考慮しない場合。

れ間隔 H 、ひびわれ深さ D 、部材厚 W をパラメータとして求めた。

解析モデルの概念は、図-7に示すようにひびわれが発生したコンクリート部材の斜線部を取り出してモデル化した。解析モデルの一例は図-8に示すように、ひびわれ位置を中心とした上下対称の上半分をモデル化した。

解析結果の一例を図-9に示す。解析モデルの浸透幅は解析上、図-8に示したようにひびわれ間隔としているため、浸透流量に及ぼすひびわれ間隔の影響を正規化する必要がある。解析結果を正規化するために、各々の部材厚、ひびわれ深さおよびひびわれ間隔における浸透流量 Q_2 をひびわれがない場合の浸透流量 Q_0 で除して、浸透流量比 (Q_2/Q_0) を定義した。なお、 Q_0 は Darcy 則により得られる透水量である。さらに、ひびわれ深さと部材厚との比 (D/W) をとることにより、部材厚のパラメータについても正規化した。この結果、浸透流量比は、透水係数や水圧とは無関係にひびわれ深さ、ひびわれ間隔および部材厚の3つの要因で決定できる。

各ひびわれ間隔毎にひびわれ深さと部材厚との比較 (D/W) と浸透流量比 (Q_2/Q_0) との関係をも最も回帰精度がよいと判断された双曲線で近似した結果を図-10に示す。また、各々の回帰式の回帰係数は、ひびわれ間隔により一次式で回帰できた。

以上の結果から、表面ひびわれが発生している場合と発生していない場合の浸透流量比は、ひびわれ深さ、部材厚およびひびわれ間隔を変数とした以下の式で近似される。

$$Q_2/Q_0 = \frac{D/W}{(0.0793H+0.5672) - (0.0831H+0.5340)D/W + 1} \dots\dots\dots(11)$$

ここに、 Q_2 : 任意のひびわれ深さ、部材厚およびひびわ

れ間隔の単位奥行当たりの浸透流量
($\text{cm}^2/\text{sec}/\text{cm}$)

Q_0 : ひびわれが発生していない場合の単位奥行当たりの浸透流量 ($\text{cm}^2/\text{sec}/\text{cm}$)

$$Q_0 = K \frac{P}{W} A$$

D : ひびわれ深さ (cm)

W : 部材厚 (cm)

H : ひびわれ間隔 (cm)

K : コンクリートの透水係数 (cm/sec)

P : 水圧 (cm)

A : 透水面積 (cm^2/cm) ($A=H$)

c) 化学的腐食状態の止水性能評価モデル

部材が化学的腐食などの作用により厚さが d だけ浸食を受けた場合の透水量 Q_3 と、化学的腐食作用を受けない場合の透水量 Q_0 との比は、浸食部の厚さ d が減少したものと考えて Darcy 則から次式で求められる。

$$Q_3/Q_0 = W / (W - d) \dots\dots\dots(12)$$

すなわち、見かけ上の透水係数 K' が Q_3/Q_0 倍になると評価できる。

以上の検討をもとに、構造物の各部位の止水性能評価は上記の3つのモデルを基本として設定することができる。なお、貫通ひびわれあるいは表面ひびわれが発生している部材に化学的腐食が作用し、厚さが減少した場合には式(9)、(10)あるいは式(11)の部材厚の項で部材厚減少分を考慮することで評価するものとした。

4. 地中コンクリート構造物の長期止水性能

ここでは、3. で示した劣化評価モデルおよび止水性能評価モデルを、表-2に示した諸元の地中コンクリート構造物の外壁部に適用し、図-3のフローに従って温度ひびわれおよび乾燥収縮ひびわれによる初期欠陥、曲げ

表-5 ひびわれ間隔の計算結果

材令 部位	変数 H (m)	X ₂ p (m)	X ₃ C, J 有・無	X ₄ スランプ (cm)	X ₅ Tp (°C)	打設時期			X ₉ ΔTs, r max (°C)	X ₁₀ ΔTs, max (°C)	X ₁₁ ** ΔTm ²	UCA (mm ² /m ²)	L (m)	R	M/C (mm/m)	Lc (m)			
						X ₆ 夏	X ₇ 秋	X ₈ 冬											
外壁	30 (1ヶ月)	5.0	0.530	0	12	27.0	1	0	0	12.2	5.7	22.9 (34.3)	29.11 (38.00)	24.4	0.48	0.027 (0.031)	7.5 (6.9)		
	180 (1ヶ月)															42.3 (65.9)	44.24 (60.70)	0.033 (0.040)	6.4 (5.9)
	1.800 (5年)															42.3 (34.3)	44.24 (63.43)	0.033 (0.041)	6.4 (5.8)

*1: ()内は、ΔTmshを考慮した場合 ()外は、ΔTmshを考慮しない場合。

表-6 検討条件

劣化特性	平均ひびわれ幅: 0.48mm 平均ひびわれ間隔: 5.8m
水圧	1.0kgf/cm ² (水頭 10m)
漏水を生じない平均ひびわれ幅	0.04mm
ひびわれ定数	12
水の粘性係数	1.02×10 ⁻⁸ kgf・s/cm ²
壁長	24.4m×4面
壁高	5.1m
透水係数	1.0×10 ⁻⁸ cm/sec

表-7 曲げひびわれ特性

	水平方向ひびわれ (外面)	鉛直方向ひびわれ (外面)
ひびわれ間隔 (cm)	42.6	42.6
ひびわれ幅 (mm)	0.31	0.24
ひびわれ深さ (cm)	33.0	31.4

表-8 浸透流量比

	ひびわれ No.			ひびわれ 未発生領域
	①	②	③	
ひびわれ深さ D (mm)	31.4	31.4	33.0	—
部材厚 (cm) W	50	50	50	—
ひびわれ間隔 H (cm)	42.6	42.6	42.6	—
Q/Q ₀	1.45	1.45	1.53	1.0
ひびわれ領域 (m ²)	1.972	1.972	5.916	19.72
$\frac{Q}{Q_0}$	1.17			

ひびわれ、さらに化学的腐食に対する部材厚の減少を劣化評価モデルにより求め、この特性値を止水性能評価モデルに代入することにより、その長期止水性の評価を行う。

(1) 初期欠陥に伴う止水性能評価

a) 劣化評価

初期欠陥として、水和熱による温度ひびわれと乾燥収縮ひびわれを考慮した劣化特性を評価する。温度ひびわれ特性の評価に必要なコンクリート温度は、有限要素法による二次元熱伝導解析を行った結果(表-3)を用い、乾燥収縮の影響は環境湿度60%として式(3)、(4)を用いて評価した。

地中コンクリート構造物は材齢5年で埋戻しされるとして、劣化特性を式(1)～(4)を用いて評価した。その結果を表-4、5に示す。乾燥収縮を考慮した場合のひびわれ特性は、平均ひびわれ幅0.48mm、平均ひびわれ間隔は5.8mと評価された。

b) 止水性能評価

表-6に示す劣化特性および構造物諸元などの条件を式(9)に代入して壁全体の漏水量を求め、これを式(10)に代入して見かけ上の透水係数を算定した結果、温度ひびわれおよび乾燥収縮ひびわれの初期欠陥により材令5年経過した外壁部コンクリートの透水係数はK' = 7.13×10⁻⁶cm/secになった。なお、壁長24.4mに対し、平均ひびわれ間隔が5.8mであるため、壁4面で12本のひびわれが発生しているとした。

(2) 曲げひびわれに伴う止水性能評価

a) 劣化評価

外壁部には埋戻しに伴う土圧および水圧が作用すると仮定し、底版と内壁に支持された二方向版として断面力を求め、応力度を算定した。この応力度を式(7)に代入してひびわれ間隔および幅を評価し、ひびわれ深さは図-5に従って評価した。その結果を表-7に示す。ひびわれ発生状況は図-11に示す通りである。

b) 止水性能評価

曲げひびわれ特性を式(11)に代入して各ひびわれ領域ごとに浸透流量比を求め、次に底版と内壁に支持された外壁全体で加重平均して得られた浸透流量比を表-8に示すが、ひびわれが発生していることにより浸透流量は1.17倍になっている。すなわち、曲げひびわれが発生したことにより、健全なコンクリートに比べて見かけ上の透水係数が1.17倍になったと評価された。

(3) 初期欠陥と曲げひびわれに伴う止水性能評価

初期欠陥と曲げひびわれの両方が生じた場合の止水性能評価は、これらが個々に独立して評価できるため、見かけ上の透水係数を加算すればよい。初期欠陥に伴う止水性能評価で得られた透水係数は7.13×10⁻⁶cm/secであり曲げひびわれに伴う止水性能評価で得られた透水係数は、健全なコンクリートの1.17倍であるため、健全なコンクリートの透水係数を1×10⁻⁶cm/secとすると、これを1.17倍して1.17×10⁻⁶cm/secである。なお、健全なコンクリートの透水係数は村田の研究¹⁷⁾で示されている透水係数のうち大きめの値とした。初期欠陥と曲げひびわれの両方の作用がある場合の止水性能評価は、これらを加算した透水係数で評価できるが、健全な場合に比べて透水係数は10³倍大きくなっている。

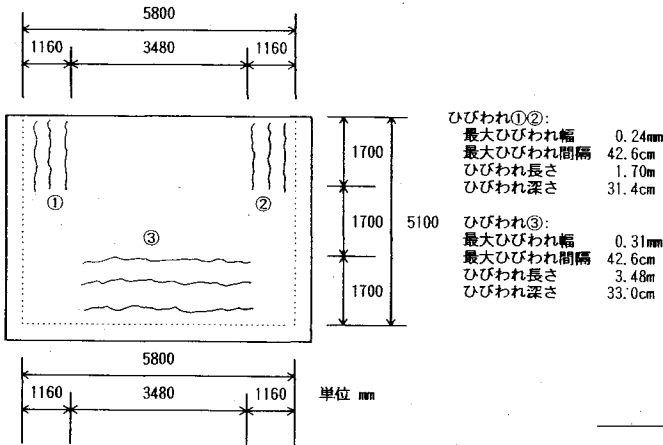


図-11 ひびわれ発生状況

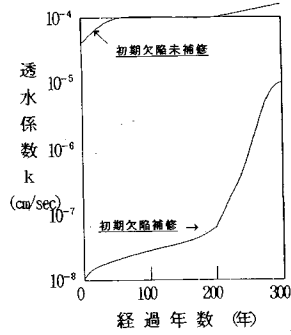


図-12 透水係数の経時変化

すなわち、ここで考えた地中コンクリート構造物の止水性能は、初期欠陥による貫通ひびわれからの漏水量に支配されることになる。

(4) 化学的腐食に伴う止水性能評価

ここでは、硫酸塩により化学的腐食を受ける構造物の止水性能を評価する。なお、評価期間は化学的腐食の作用後300年までとし、硫酸塩は構造内にあるものとし、化学的腐食は曲げひびわれ面と反対側の内壁面に作用するものとする。

また、化学的腐食により部材の有効厚さが減少する荷重の作用等が不明確であるため、本報告では物理的荷重によるひびわれの進展(ひびわれ幅、深さ等)はないとした。

化学的腐食が作用した時の浸透流量は、式(8)によって部材厚の減少を考慮して浸透流量比を求め、さらに腐食が進行して部材厚が減少し、曲げひびわれの先端まで腐食が進行したら、それまで表面ひびわれであった曲げひびわれが貫通ひびわれになるとして、式(9)、(11)を用いて漏水量を算定し、止水性能を評価することとした。

(5) 地中コンクリート構造物の長期止水性能評価

地中コンクリート構造物の外壁部を対象として止水性能を透水係数で評価した結果を図-12に示す。

初期欠陥を補修しなかった場合、温度ひびわれに伴う貫通ひびわれからの漏水により 10^{-8} (cm/sec) オーダーから 10^{-5} (cm/sec) オーダーまで飛躍的に増大する。すなわち、コンクリート自体の透水係数が小さい場合には、止水性能は貫通ひびわれからの漏水量に支配される。

一方、初期欠陥(温度ひびわれ)を補修し、図-11に示したような曲げひびわれに伴う表面ひびわれと化学的腐食に伴う透水係数の変化は、2つの劣化作用による部材厚の減少により、透水係数は300年後に 10^{-5} (cm/

sec) オーダーまで増大するが、劣化作用を受けない健全部分の止水性能が保持されているため、透水係数の増大量は小さい。

温度ひびわれに伴う貫通ひびわれは、構造物の供用前に補修が可能であるため、これを補修し、この部分の止水性能が健全なコンクリートの透水係数まで回復したと考えた場合、外壁部の透水係数は200年程度までは 10^{-7} (cm/sec) オーダーに漸近し、200年以降急激に増大し、 10^{-5} (cm/sec) オーダーになる。これは温度ひびわれに伴う貫通ひびわれを補修しているため、劣化作用は曲げ荷重によるひびわれと化学的腐食による部材厚の減少であり、200年程度まではコンクリート健全部分が支配的となり止水性能を保持しているが、200年以降は劣化の進展により表面ひびわれ位置の健全部分が少なくなることと、最終的に貫通ひびわれになることにより、止水性能が急激に低下したためと考えられる。

5. 結論

本論文では、コンクリート構造物の長期止水性能評価法の構築を念頭において、まずコンクリート構造物の劣化・機能評価概念を考え、次いでコンクリート構造物の長期止水性能評価の考え方を示し、例として地中構造物の透水係数の経時変化を評価した。この考え方によれば、地中に埋設されたコンクリート構造物の止水性能は300年経過してもそれほど低下しないことが示された。

また、本論文では特にひびわれに対して自癒効果を考慮していないため、この効果を本評価手法に定量的に導入できれば、対象とした地中コンクリート構造物はさらに長期に亘って、その止水性能が維持できると考えられる。

筆者らが提案した評価手法は、個々の劣化作用に対するモデルの検討では既往の研究を利用し、止水性能モデルの検討では解析により、浸透流量の比という形で表した。そのため、未だ実データに基づく評価手法の検証等は実施しておらず、概念構築の範疇を出ないかもしれない

い。しかし、今後益々多種多様に利用されるコンクリート構造物の機能評価のための手法になりうると考えられる。

6. おわりに

今後、ここで構築した評価法の精度を向上させるためには、止水性能評価に重要な影響を及ぼす次の項目について、実験・調査を実施する必要がある。

- ① 実験に基づくひびわれ性状（特に深さとその方向）の検討・評価
- ② 破壊力学を利用したひびわれの伸展試験・解析
- ③ 実験に基づく硫酸塩の化学的腐食速度式の提案
- ④ 表面ひびわれを有するコンクリートの透水試験とその結果に基づく止水性能モデルの検証

なお、これらの検討は実施中であり、結果がまとまった段階で公表したいと考えている。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、多くの御協力と御鞭撻を頂いた（財）電力中央研究所原燃サイクル部長駒田広也博士、大沼博志博士、河西基グループリーダーに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐久設計指針（試案）コンクリート・ライブラリー 第65号。
- 2) 日本コンクリート工学協会（鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会）：鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，JCI-C24, 1991. 5.
- 3) 広永道彦他：水中凍結水中融解試験でのコンクリートの長期的挙動について，土木学会第46回年次学術講演会，pp. 398-399, 1991. 9.
- 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, 1989. 10.
- 5) A. Atkinson：THE TIME DEPENDENCE OF pH WITHIN A RE DOSITORY FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, April 1985, HL85/1402.
- 6) Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Reported by ACI Committee 207, Journal of ACI, July 1973.
- 7) BS5337：design and construction of reinforced and prestressed concrete structure for the storage of water and other aqueous liquids.
- 8) 小野定他：マスコンクリートの温度ひびわれ特性の数量化に関する検討，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JCIコロキウム論文集，1990. 8.
- 9) 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JCIコロキウム論文集，1990. 8.
- 10) 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, 1989.
- 11) 土木学会：昭和61年度制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，1986年10月。
- 12) 池永博威：種類と濃度の異なる酸および塩の溶液に浸漬したコンクリートの劣化，セメント技術年報37, 1983.
- 13) 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3 浸漬溶液の種類及び濃度を変えた場合），日本建築学会大会学術講演梗概集，1983年9月。
- 14) 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1984年10月。
- 15) 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研究，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，1985.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) 石川廣三：ひびわれからの雨漏りと外壁の雨仕舞，施工，No. 258, 1987. 4.

(1993. 7. 28 受付)

THE ESTABLISHMENT OF A METHOD FOR EVALUATING THE LONG-TERM WATER-TIGHTNESS DURABILITY OF UNDERGROUND CONCRETE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT OF SOME DETERIORATIONS

Michihiko HIRONAGA, Kenji NAGURA, Takao ENDO, Sadamu ONO
and Syotaro TUJIMURA

To establish a method for evaluating the long-term water-tightness durability of underground concrete structures, the authors firstly studied a deterioration evaluation model to express the deterioration condition of concrete structures and constructed, on the basis of this model, a function evaluation model to estimate the lowering of functions due to deterioration, consequently indicating a "concept for evaluating the deterioration and functions of concrete structures" which will make it possible to perform the functional evaluation of concrete structures.

Based on this concept, the authors then discuss a technique for evaluating the long-term water-tightness durability of underground concrete structures, specifically indicating the technique by means of illustrations.