

耐久性設計の手法に基づいた鉄筋コンクリート部材の 表面処理効果の評価

EVALUATION OF SURFACE TREATMENT EFFECTS FOR REINFORCED CONCRETE MEMBERS BASED ON DURABILITY DESIGN APPROACH

小林和夫*・宮川豊章**・久米生泰***

By Kazuo KOBAYASHI, Toyoki MIYAGAWA and Takahiro KUME

Permeability performance of surface treated concrete using synthetic resin is examined experimentally. Transmission rates of oxygen, liquid phase water and vapor phase water through surface treatment-concrete system are measured. And fundamental concept of durability design against reinforcement corrosion is discussed. The conclusions in this paper are summarized as follows; (1) Transmission abilities decrease with increasing surface treatment thickness and decreasing water cement ratio. (2) While, epoxy lining or MMA impregnation is a water proofing system, silan impregnation, silan with polymer cement mortar coating or urethane lining is a water phobic system. (3) Concrete surface treatment can't elongate the service life of chloride damaged reinforced concrete member, unless chloride contaminated cover concrete is removed.

Keywords: surface treatment, reinforced concrete member, durability design, diffusion of oxygen, diffusion of water, chloride corrosion, synthetic resin, repair

1. まえがき

わが国では、昭和30年代の高度成長期以降高層ビル、高速道路、水力発電用ダムなどの大規模コンクリート構造物が数多く建設されてきた。しかし、島国で国土が狭いことに起因して、骨材となる川砂、川砂利の供給が不十分となり使用実績の少ない海砂、砕石骨材の使用が増大するとともに、沿岸、湾岸などの海洋環境に構造物を建設する機会が多くなってきた。これらが原因となり、本来コンクリート中のアルカリ雰囲気によって腐食しないはずの鉄筋が腐食したり、あるいはアルカリ骨材反応などによりコンクリートに膨張ひびわれが生じたりする早期劣化の事例が多く報告されてきている。この結果、既設構造物で被害が出ているもの、その可能性の高いものに対して補修・補強を必要とする状況に至る例が多くなっている。

このような状況の中から、設計段階において耐荷力に与えられている重要性和同程度のものを耐久性に対しても与えるべきであるとする耐久性設計の考え方が生まれ

てきた。耐久性設計とは材料性能の経時変化と構造特性に及ぼすその影響度を考慮し、設計、施工、維持、管理、補修、補強、解体からなる総合システムによって構造物の機能のある信頼性をもって保証しようとするものと考えられる。一般に、耐久性設計には構造物の建設時に行われるものと、建設後、構造物の寿命を延ばすために補修時に行われるものの2種類がある。たとえば、一般にコンクリート中鋼材の劣化過程は図-1のように示されるが¹⁾、図-1における t_1 、 t_2 を推定、または所要の t_1 、 t_2 を確保するように構造物を設計することが、建設時における耐久性設計に対応する。ここに、 t_1 は腐食発生までの時間であり、 t_2 は許容限界腐食量に達するまでの腐食時間である。また補修時におけるものは、図-2に示すように、ある程度劣化し、性能の低下した構造物の寿命を所要の寿命にまで延長するための²⁾、補修の

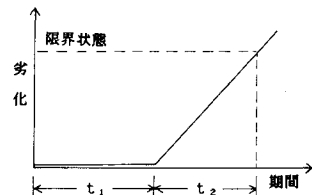


図-1 鋼材腐食による劣化

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 工修 村本建設(株)

(〒543 大阪市天王寺区四天王寺 1-5-43)

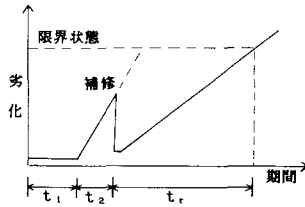


図-2 補修の概念

時期，方法を確定することに対応する。なおここに， t_r は補修後の余命を示す。

耐久性設計を行うにあたっては，コンクリート構造およびその補修仕様に関する特性やマクロあるいはミクロな環境条件を正確に定量化することが必要である。しかし，コンクリート自体が複合材料であるうえに耐久性に関わる要因は数多く，実際の耐久性の評価には長い年月が必要である。そのため，要求性能の基本単位への分解を試みるとともに，耐用年数を支配する主要因を確認し，それらをまとめて総合的な耐久性解析モデルを開発し，耐久性性能の定量化を図る必要がある。

本研究では，現在，コンクリート構造物の補修などによく用いられている合成樹脂材料によるコンクリートの表面処理を取り上げ，材料を含む仕様，膜厚などの処理量，環境湿度の違いなどによる酸素，水の透過性の相違を明らかにするとともに，鋼材腐食に関する耐久性設計を例として，コンクリート構造物の耐久性設計の基本的フローについて若干の検討を行うことを目的とした。

2. コンクリート・表面処理系の物質透過性

表面処理の仕様によって，透気性，透水性，透塩化物性は大きく異なるため，耐久性設計において表面処理を用いる場合は，想定される劣化反応に必要な物質の透過性の低い系を採用しなければならない。一般に鋼材腐食を律速するのは酸素の透過性であり，アルカリ骨材反応は水の存在に多大な影響を受けるといわれている。また表面処理仕様の中には，コンクリート中の水分を外部へ逸散させることを目的とする透湿性のものであるので，併せてそれらについての検討も行うべきであろう。表面処理にかかわる要因としては主として次の3種を取り上げた。

① 母材コンクリートの水セメント比：コンクリートの密実性の相違による影響を検討するために，30%，40%，50%，60%の4種を用いた。それぞれの示方配合を表-1に示す。なお，セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。

② 表面処理仕様：現在一般によく用いられているものを中心として，ライニング剤としての実績が多いエポキシ系（ビスフェノールA系：伸度10%），ひびわれ追従性が期待されているウレタン系（ポリブタジェン系：伸度400%），含浸剤として米国での実績が多いMMA系，アルカリ膨張抑制効果が期待されるシラン系（オリゴマー），耐候性および中性化防止の観点からシランの上にPCM（アクリル系ポリマーセメントモルタル：水セメント比63%，ポリマーセメント比113%，セメント珪砂比1：1.5）を併せ用いる系の5種を用いた。なお，一般には前3者は表面処理層を通しての水分の浸入・逸散が小さな遮水系に，後2者は水分の浸入は小さいが逸散は大きな発水系に分類される。

③ 処理量など：エポキシ系，ウレタン系については膜厚による透気性の影響を調べるために，「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」および現在の補修工事の実績をもとに120 μ m，240 μ m，500 μ m，1000 μ mの4種を用いた。MMAは500g/m²と1000g/m²の2種，シランは130g/m²の1種，PCMは0.5mmと1.2mmの2種を用いた。

(1) 酸素の透過性

a) 酸素の拡散

鋼材腐食のカソード反応に伴う，酸素のコンクリート中への浸入，拡散を考えるうえでは，鋼材腐食が電気化学的な反応であることを念頭に置かなければならない。電極|電解液系で，電子の流れを伴う場合の反応過程は，図-3³⁾に示すような電荷移動反応，物質移動過程が存在すると考えられている。鋼材腐食においてはアノード，カソードの両反応が電荷移動反応に，水や酸素の浸入，拡散が物質移動過程に対応する。物質移動過程の中の拡散過程は電気化学反応の進行上必要不可欠であり，反応の律速過程である場合が多く，コンクリート中の鋼材腐

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	スランパの範囲 (c.m)	空気量 (%)	S/A (%)	最大粗骨材寸法 (c.m)	単 位 量 (kg/m ³)				混 和 剤 (g/m ³)
					セメント	水	細骨材	粗骨材	
3.0			3.5		600	180	531	1024	5800(高性能減水剤)
4.0	7~10	4±1	5.5	15	360	144	992	843	7000(高性能減水剤)
					360	180	942	799	1440(空気量調整剤)
5.0			5.5		360	216	890	757	1800(AE減水剤)
6.0			5.5		360	216	890	757	1440(空気量調整剤)

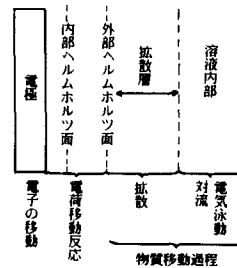


図-3 電極反応

食反応においては酸素の拡散が律速過程になっているといわれている。

拡散の基本式としては Fick の法則が知られている。これによると、式 (1) に示すように、位置 x における単位平面を単位時間に通過する物質質量 dQ/dt はこの面における濃度勾配 dC/dX に比例する。

$$-dQ/dt = D(dC/dX) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 D : 拡散係数

ここで dC/dX は近似的には次式で表わすことができる。

$$dC/dX = (C_0 - C_s) / \delta \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 C_0 : 溶液内部の濃度

C_s : 電極反応面 (外部ヘルムホルツ面での濃度)

δ : 拡散層の厚さ

ここで、酸素の拡散が腐食反応の律速段階であれば、鋼材表面に到達した酸素はすべて消費されるため、 $C_s = 0$ と考えられる。したがって式 (1) は

$$-dQ/dt = D(C_0 / \delta) \dots \dots \dots (3)$$

と変形することができる。この拡散層の厚さは時間 t とともに変化しその変化は

$$\delta(t) = \sqrt{\pi D t} \dots \dots \dots (4)$$

で表わされる³⁾。しかし、 δ は無制限に拡大することはなく、溶液内部の対流に影響され、一般的には 0.5 mm 程度までしか成長しないとされている³⁾。したがって、鋼材腐食における真の拡散層はかぶりコンクリートではなく、鋼材付近の薄い層を考えるべきであろう。

しかし、この考え方によれば、かぶりコンクリート中における酸素の濃度勾配が考慮されず、しかも、腐食反応上最も重要な水中での溶存酸素と気相での酸素の区別が明確ではない。したがって、かぶりコンクリート、特にその厚さが酸素の拡散に全く影響を与えないモデルになってしまう。

小林⁴⁾、宮川⁵⁾らの報告によると、コンクリートの含水率等は透気性に大きな影響を与えることが知られており、かぶりコンクリート中ではコンクリート中の孔隙およびその含水状態による濃度勾配もあるものと推定される。コンクリート表面が濡れていず、酸素の補給が十分に行われると考えられる場合には、コンクリート中の孔隙分布は一様であると仮定しても、コンクリートの水分逸散を考慮すればコンクリート表面に近づくほど含水率は小さくなるものと考えられる。さらにこのほかにも、溶液内部の対流により拡散層が広がることや、含水率にはばらつきがあることを考慮に入れる必要もあろう。しかし、拡散層などの距離を確定することは実験上困難であるので、便宜上、見掛けの濃度勾配を直線と仮定することとする。コンクリート構造物としては、この見掛け

の濃度勾配を用いた見掛けの拡散によって整理することにより、酸素の拡散現象を簡略化して考えることができる。

b) 測定方法

酸素の透過性の測定には、圧力法、等圧法、電気化学的測定法などがあるが、Feldman⁶⁾によると圧力をかけた状態ではコンクリートの孔隙が拡大、連続してしまうため、本来の状態とは異なるため、腐食の検討にあたっては不相当であると考えられる。また、等圧法では、コンクリートの孔隙は変化しないものの、鋼材腐食に関与するのかどうかなどを検討することが困難であるとともに、気中で測定が行われるため直接腐食に関与する溶存酸素の挙動をとらえることは困難である場合も多い。これらの方法に対して、電気化学的測定法は酸素還元反応を利用しているため、鋼材腐食における酸素の透過量と同等のものを測定することができると考えられ、本研究ではこの方法を採用することとした。

図-4 に示すような供試体を用い、鋼板は容器底面にエポキシ樹脂により接着させ、コンクリートと容器の間から水や空気を浸入させないために、容器側面にも打ち継ぎ用として同樹脂を塗布した。コンクリートの養生は密封養生とし、4 週以上行った。MMA、シランのような含浸型の場合は、表面処理材が含浸して白金線のまわりに付着し、白金線の参照電極としての機能に影響を与える場合があるので、これらを表面処理する供試体については、表面処理前に打設面と白金線の接合部分にエポキシ樹脂をごく少量塗布した。

供試体は、1 つの要因について 2 個ずつ作製し、20°C RH 85 ± 5 % の恒温室内に静置した。供試体中の溶存酸素が腐食反応により陰極還元されるような場合には、陰極反応は拡散律速的になり、分極曲線は電位軸に平行な限界電流を示す。

まず、自動分極装置により供試体を -500 mV ~ -1 500 mV の範囲で、-0.08 mV/s の速度で分極試験を行い、限界電流密度 i_{lim} を与える電位 E_{lim} を求め、ポテンショスタットにより供試体内試料極を電位 E_{lim} に保持した。電流は、無抵抗電流計を用いて対極とポテ

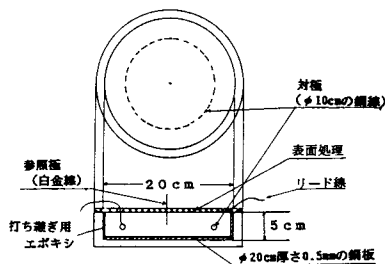


図-4 透気性試験供試体

ンシヨスタットの間に測定した。試験期間は7日とし、定常値を限界電流として求めた。なお、定常とならない場合については、7日間の最小電流値を限界電流とした。

酸素の透過量と電荷の流れである電流密度 (i/A) の関係は、電極で消費される酸素量が透過すると仮定すれば、ファラデーの法則により、

$$-dQ/dt = i/(nAF) \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。したがって式(1)~(5)により式(6)が得られる。

$$J_0 = i/(nAF), D_0 = J_0 \delta / C_0 \dots\dots\dots (6)$$

- ここに、 J_0 ：見掛けの酸素拡散率
- D_0 ：見掛けの酸素拡散係数
- i ：限界電流
- A ：電極面積
- n ：原子価 ($n=4$)
- F ：ファラデー定数 (96 500)
- δ ：かぶり厚さ (5 cm)
- C_0 ：かぶりコンクリート表面に接する気中酸素濃度 ($8.93 \times 10^{-6} \text{ mol O}_2/\text{cm}^3$)

c) 試験結果

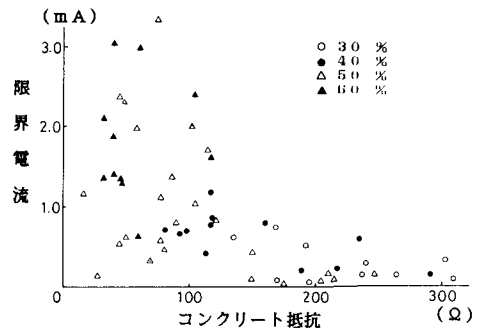
表—2 透気量および見掛けの酸素の拡散係数

W/C (%)	処理仕様	処理量	見掛けの酸素拡散率 $J_0 \times 10^{-12}$ (mol O ₂ /cm ² ·sec)	見掛けの拡散係数 $D_0 \times 10^{-4}$ (cm ² /sec)
50	エポキシ	120 μm	6.4	0.4
		240 μm	20.6	1.2
		500 μm	10.6	0.6
		1000 μm	9.7	0.6
	ウレタン	120 μm	90.9	5.1
		240 μm	122	6.9
		500 μm	70.1	3.9
		1000 μm	52.9	3.0
	MMA	500 g/m ²	54.2	3.0
		1000 g/m ²	31.7	1.8
	シラン	130 g/m ²	12.2	0.7
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	150	8.4
シラン + PCM	130g/m ² +1.2mm	114	6.4	
なし		194	10.9	
30	エポキシ	240 μm	7.4	0.4
	ウレタン	240 μm	27.1	1.5
	MMA	500 g/m ²	4.2	0.2
	シラン	130 g/m ²	27.5	1.5
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	18.6	1.0
	なし		57.4	3.2
40	エポキシ	240 μm	17.2	1.0
	ウレタン	240 μm	33.6	1.9
	MMA	500 g/m ²	59.5	3.3
	シラン	130 g/m ²	85.8	4.8
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	67.5	3.8
	なし		46.1	2.6
60	エポキシ	240 μm	111	6.2
	ウレタン	240 μm	136	7.6
	MMA	500 g/m ²	223	12.5
	シラン	130 g/m ²	149	8.4
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	167	9.4
	なし		213	11.9

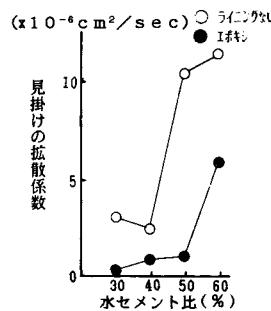
供試体2個の平均値より求めた見掛けの酸素拡散率および拡散係数を表—2に示す。ここで求められた表面処理なしの拡散係数は $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にあり、別途求めた含水率は70~80%であったが、小林ら⁴⁾の等圧法により求めた拡散係数より若干小さな値となっているようである。

透気性試験終了時における限界電流とコンクリート抵抗の関係を図—5に示す。一般に水セメント比が大きくなるほど、コンクリート抵抗は小さく、また限界電流は大きなことが明確に認められる。岡田ら⁴⁾の報告によるとコンクリートを非常に長期乾燥させた場合には、水セメント比が大きな場合の方がコンクリート抵抗は大となるとしている。これは、水セメント比が大であれば、十二分に水分の逸散した後では、その多量の孔隙が電気抵抗増大に寄与するものと考えられるためである。しかし、今回は水セメント比が大の方が抵抗は小さくなっており通常の乾湿繰り返しを受ける構造物におけるコンクリートに近い状態であると考えられる。したがって、酸素の拡散量についても現実に近い状態とみなしてよいものと考えられる。

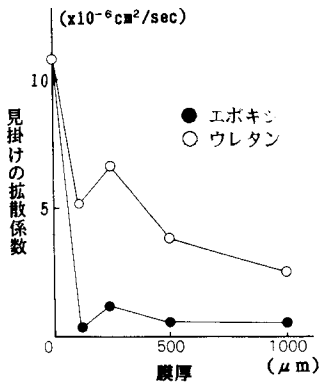
コンクリートの水セメント比が酸素の見掛けの拡散係数に与える影響を表面処理なし、およびエポキシについて図—6に示す。その他の表面処理においても、多少ばらつきはあるが同様の傾向を示しており、表面処理を施



図—5 限界電流とコンクリート抵抗との関係



図—6 酸素の見掛けの拡散係数に与える水セメント比の影響



図一七 見掛けの拡散係数に与えるライニング膜厚の影響

していないものでは水セメント比の増大に伴って拡散係数は大きくなり、特に50%以上で顕著である。表面処理系では、ばらつきはあるものの、一般には水セメント比の増大に伴って酸素の透過、拡散量も増大し特に水セメント比60%では顕著である。

表面処理を施した場合、酸素の拡散は表面処理層で律速され、母材コンクリートの性質には影響されないのではないかと当初は考えられたが、そうではない結果が得られた。これは本試験法がフリー・フィルムを用いての理想的な試験ではなく実際にコンクリートに施した、より現実に近い供試体を用いてのものであるため、孔隙の多い水セメント比の大きなコンクリートにあつては表面処理層にピンホールが生じやすく、これを通しての酸素の拡散が生じたものと考えられる。現実の構造物においても、表面処理を施さずればどのようなコンクリートを用いても酸素を遮断するうえでは十分ということではなく、やはり水セメント比の小さな密実なコンクリートを用いることが重要であると考えられる。

エポキシ、ウレタン系のライニングについて、ライニングの膜厚が拡散係数に与える影響を図一七に示す。膜厚の増大に伴って酸素の拡散を抑制する能力は大きくなるものの、その増大の程度はあまり大きくなく、膜厚を大きくさえすれば防食上は十分であるとは必ずしもいえないようである。

また、表面処理の各仕様間で、酸素拡散抑制効果の大小関係は一般に、エポキシ>ウレタン>MMA>シラン≒シラン+PCM>なし、として得られた。

(2) 水の透過性

a) 水の浸透、拡散

コンクリート中への水の浸透、拡散の要因としては、コンクリート中の飽水していない孔隙の存在および水分の逸散による乾燥などに起因する水の濃度差による拡散が最も大きなものと考えられる。このほかの要因として、未水和セメントの水和に伴う水の移動、アルカ

リ骨材反応生成物の水の吸収など種々のものが考えられる。

まず、セメントの水和に関する影響については、コンクリート構造物の耐久性を検討するような長期材令においては、セメントの水和の主要な部分はほぼ完了していると考えられるので、コンクリート中への水の浸透に与える影響は非常に小さいと考えられる。次に、水圧に関しては、セメントの水和と異なり、水の浸透に大きな影響を与えるものと考えられる。しかし、コンクリート構造物が耐久性上問題になり、また表面処理による補修が一般に行われているのは、水圧のかかる水中ではなく、波しぶきのかかる飛沫帯や大気中であり、コンクリートに浸透する水の水圧は、ほとんど0に近い状態であると考えるよい。

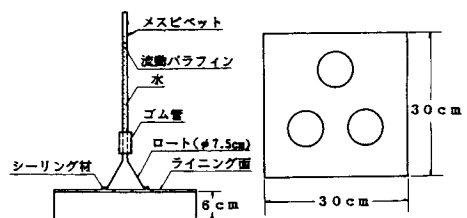
b) 測定方法

供試体は、JIS A 6910「複層仕上塗材」の透水試験を参考にし、図一八に示すようなコンクリート平板供試体を4週以上密封養生を行った後用いた。打設底面(表面処理面)を上にして水平に静置し、その上にロートを逆さにしてシーリング材で固定する。ロート内に蒸留水を満たし、ロート内の空気を完全に追い出した後に、ゴム管を用いてメスピペット(5ml)を接続した。供試体面からの高さが35~40cmになるまで蒸留水を注入し、その上に水の蒸散を防ぐため流動パラフィンを少量注入した。なお、環境条件は透気試験と同じとした。

透水量は水頭の変化により測定し、測定は原則として7日ごとに10週間行い、水頭の変化の大きい供試体については、2,3日間隔で測定した。供試体は、1つの要因について1個ずつ作製し、各供試体に付き3か所ずつ試験を行った。

c) 試験結果

各供試体の3か所の測定部分における単位時間当たりの透水量の平均値の変化を各供試体ごとに求めた。透水試験中メスピペット内の水頭が変化するため、透水性の大きい表面処理なし、発水系の供試体などでは、試験の初期においてはその水圧の変化の影響を若干受け、透水量の変動が他の表面処理系よりも大きくなる傾向にあった。しかし、材令とともにその変動は少なくなり、透水



図一八 透水性試験供試体

量はある一定値に収束する傾向を示した。この、定常値となる透水量を求め、単位時間、単位面積当たりの透水量に換算したものを透水度とし、各コンクリート、表面処理系の透水性を表わす指標とした。これを表一3に示す。

コンクリート中への水の浸透、拡散についても見掛け上 Fick の法則は成り立つものと考えられる。しかし、鋼材腐食における酸素の拡散とは異なり、コンクリート中に浸透した水は蓄積されて濃度分布は大きく変化するものと考えられる。水の見掛けの拡散係数 D_i を簡略化して求めるためには水の濃度が一定であるところを探し、その点とコンクリート表面との濃度差より D_i を推定することが可能であろう。本試験の場合では水の濃度が一定であると仮定することが可能であるのは、表面処理層下面とコンクリート供試体下面である。コンクリートが十分に乾燥しており、表面処理層を通過した水分がすぐさまコンクリート中に逸散し、表面処理層下面には残らないと考えれば表面処理層下面で水分濃度はほぼ0

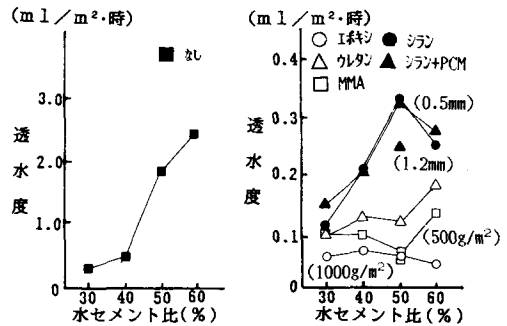
となる。この場合の拡散層は表面処理厚となる。また、供試体底面は空気に接しており、水分濃度は0と考えてよい。この場合の拡散層は、表面処理層も含めた、供試体厚さとなる。しかし、前者は計算上は塗膜のみの拡散係数でありプライマー、パテの影響が考慮できないのに対して、後者は見掛けではあるが、コンクリートも含めた値となっており、透気性試験結果における整理方法との整合性もある。したがって、拡散係数としては後者の値を算定し、表一3に併せて示す。

各表面処理系について、コンクリートの水セメント比が透水度に与える影響を図一9に示す。遮水型のエポキシ、ウレタン、および MMA 系の表面処理は、水セメント比の影響をあまり受けておらず、シラン、シラン+PCM 系のように発水型のものでは水セメント比の影響を受け、ばらつきはあるものの水セメント比の増大に伴って透水度も増大しており、表面処理なしの場合と似た傾向を示している。

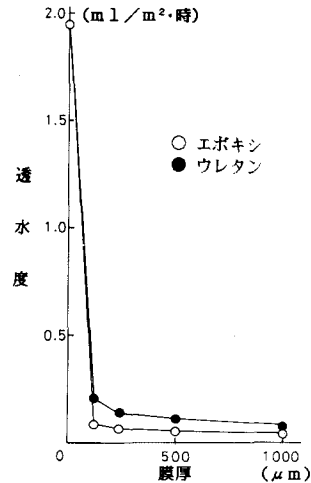
エポキシおよびウレタン系ライニングでの膜厚が透水度に与える影響を図一10に示す。ここでは、膜厚の増

表一3 透水度および見掛けの水の拡散係数

W/C (%)	処理仕様	処理量	透水度 $\times 10^{-3}$ (g/m ² ・時)	見掛けの拡散係数 $D_i \times 10^{-8}$ (cm ² /sec)
50	エポキシ	120 μ m	8.1	1.4
		240 μ m	6.5	1.1
		500 μ m	5.4	0.9
	ウレタン	1000 μ m	4.0	0.7
		120 μ m	20.6	3.4
		240 μ m	14.1	2.4
	MMA	500 μ m	10.8	1.8
		1000 μ m	7.6	1.3
		500 g/m ²	7.0	1.2
	シラン	130 g/m ²	33.5	5.6
	シラン + PCM	130 g/m ² + 0.5mm	32.5	5.4
	シラン + PCM	130 g/m ² + 1.2mm	26.0	4.3
なし		195	32.5	
30	エポキシ	240 μ m	6.5	1.1
	ウレタン	240 μ m	10.8	1.8
	MMA	500 g/m ²	10.8	1.8
	シラン	130 g/m ²	13.0	2.2
	シラン + PCM	130 g/m ² + 0.5mm	15.2	2.5
なし		27.1	4.5	
40	エポキシ	240 μ m	7.6	1.3
	ウレタン	240 μ m	15.2	2.5
	MMA	500 g/m ²	10.8	1.8
	シラン	130 g/m ²	21.1	3.5
	シラン + PCM	130 g/m ² + 0.5mm	20.6	3.4
なし		51.9	8.7	
60	エポキシ	240 μ m	4.9	0.8
	ウレタン	240 μ m	19.5	3.3
	MMA	500 g/m ²	14.6	2.4
	シラン	130 g/m ²	24.9	4.2
	シラン + PCM	130 g/m ² + 0.5mm	28.1	4.7
なし		238	39.7	



図一9 透水度に与える水セメント比の影響



図一10 透水度に与えるライニング膜厚の影響

大に伴って透湿度は減少し、膜厚 240 μm 以上ではしだいに一定値に収束するような傾向がみられる。これより、膜厚がある一定厚さ以上となればライニングの増厚効果はきわめて小さくなるものと考えられる。

また、表面処理の各仕様間で、液体状の水の浸透抑制効果の大小関係は一般に、エポキシ>MMA>ウレタン>シラン+PCM>シラン>なし、として得られた。

(3) 水蒸気の透過性

a) 水蒸気の逸散, 拡散

透水がコンクリートまたは表面処理表面が水に濡れている状態で生じるのに対し、水蒸気の逸散は表面が乾燥し、コンクリートが十分な含水率を保持していることが条件となる。

b) 測定方法

JIS Z 0208「防湿包装材料の透湿度試験方法」を参考にして、図-11に示すように、呼び寸法 5 mm のふるいによりウェットスクリーニングしたモルタル供試体で 4 週以上密封養生したものを、アルミ容器にエポキシ樹脂接着剤で接着して用いた。アルミ容器とのすき間をエポキシ樹脂充填材で充填し、容器をエポキシ樹脂接着剤で密封した後、容器に穴をあけ蒸留水約 20 cc を注入、その後再び密封した。環境湿度としては、RH 60±5%、RH 85±5% の 2 種類を用いた。供試体は 1 つの要因について 2 個ずつ作製し、供試体部分からの水蒸気の逸散量は、重量の変化を測定することにより求めた。測定は、28 日間は 24 時間ごとに、それ以降は 7 日間隔で 10 週まで行った。

c) 試験結果

室温は大きく変動せず、供試体の容器内部側の湿度は常に 100% であるため、環境湿度が一定に確保されれば水蒸気の濃度勾配は一定となり、透湿度もほぼ一定となるはずである。そこで、透水性試験におけると同様に透湿度の変化から定常値を推定し、その値を単位面積から単位時間に逸散した水蒸気の重量に換算したものを透湿度として、表-4 に示す。

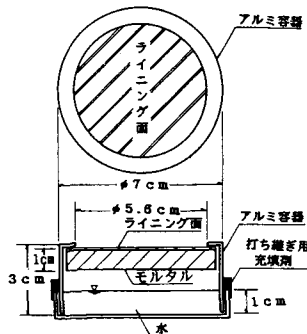


図-11 透湿度試験供試体

コンクリート中の水蒸気の移動に関しても、酸素や水と同様に見掛け上 Fick の法則に従うと考えられる。コンクリート中の水蒸気は、孔隙中の気中部に存在し、孔隙中に水が存在する場合には、ごく表層の大気の影響を受ける部分を除いてコンクリート中では本試験の供試体同様、RH 100% であると仮定できる。この仮定の下では、コンクリートの表面近くまで湿度は RH 100% であるため、水蒸気の拡散を考えるとときの拡散層は、本来コンクリートの表面近くのみを極めて薄い層となるものと考えられる。しかし、表面処理なしや含浸型の表面処理系は塗膜厚がほぼ 0 であり、また含浸深さが必ずしも一様ではないために拡散係数の算定が困難である。そこで透湿度の評価方法においてもかぶりコンクリートを含めた系を見掛けの拡散層とし、これを用いた見掛けの拡散係数 D_0 を求め、表-4 に併せて示す。

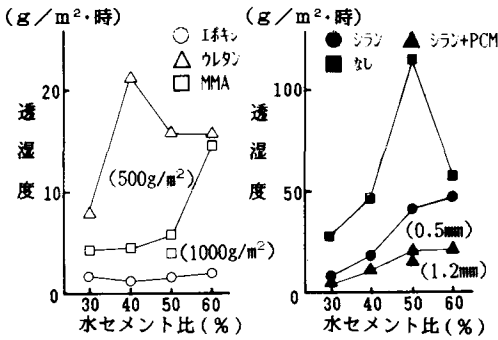
コンクリートの水セメント比が透湿度に与える影響を図-12 に示す。特に遮水性の大きなエポキシを除いて

表-4 透湿度および見掛けの水蒸気の拡散係数

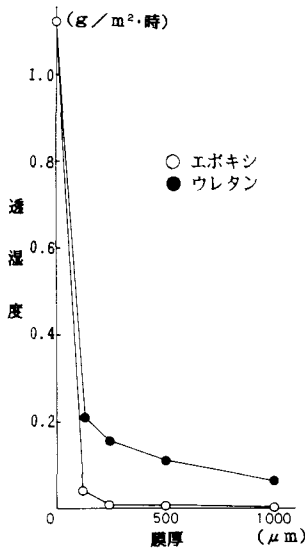
W/C (%)	処理仕様	処理量	環境湿度 (%)	透湿度 × 10 ⁻⁸ (g/m ² ・時)	透湿度 / 透水量	見掛けの水蒸気拡散係数 D_0 × 10 ⁻¹⁰ (cm ² /sec)	
50	エポキシ	120 μm	60 ± 5	4.1	0.50	1.6	
		240 μm		1.6	0.25	0.7	
		500 μm		1.3	0.24	0.5	
		1000 μm		0.8	0.21	0.3	
	ウレタン	120 μm		21.2	1.03	8.5	
		240 μm		15.7	1.11	6.3	
		500 μm		10.6	0.98	4.3	
		1000 μm		6.5	0.86	2.6	
	MMA	500 g/m ²		5.9	0.84	2.4	
		1000 g/m ²		4.1	0.69	1.6	
	シラン	130 g/m ²		40.8	1.22	16.4	
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm		19.6	0.60	7.9	
	シラン + PCM	130g/m ² +1.2mm		16.3	0.63	6.6	
	なし			11.4	0.59	45.9	
	エポキシ	240 μm		85 ± 5	0.8		0.3
		ウレタン			240 μm	15.5	
なし			21.2			8.5	
30	エポキシ	240 μm	1.6	0.25	0.7		
	ウレタン	240 μm	7.8	0.72	3.1		
	MMA	500 g/m ²	4.4	0.41	1.8		
	シラン	130 g/m ²	6.5	0.50	2.6		
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	5.7	0.38	2.3		
	なし		27.8	1.03	11.2		
40	エポキシ	240 μm	1.2	0.16	0.5		
	ウレタン	240 μm	21.2	1.40	8.5		
	MMA	500 g/m ²	6.0	0.56	2.4		
	シラン	130 g/m ²	18.0	0.85	7.2		
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	11.4	0.56	4.6		
なし		45.7	0.88	18.4			
60	エポキシ	240 μm	2.0	0.40	0.8		
	ウレタン	240 μm	15.5	0.80	6.2		
	MMA	500 g/m ²	14.7	1.01	5.9		
	シラン	130 g/m ²	47.4	1.90	19.0		
	シラン + PCM	130g/m ² +0.5mm	21.2	0.75	8.5		
なし		57.2	0.24	23.0			

は水セメント比が増大するに伴って、等湿性も増大する傾向が認められる。

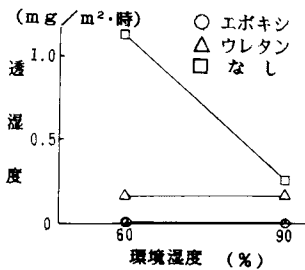
エポキシおよびウレタン系ライニングでの膜厚が透湿度に与える影響を図—13に示す。これより、透気試験、透水試験同様、膜厚が大きいほど、また同じ膜厚ではウレタンよりエポキシのほうが透湿性が低く、特に膜厚240 μm 以上では顕著なことが認められる。表面処理なし、エポキシ、ウレタン系ライニングにおいて環境湿度



図—12 透湿度に与える水セメント比の影響



図—13 透湿度に与えるライニング膜厚の影響



図—14 環境湿度と透湿度との関係

が透湿度に与える影響を図—14に示す。表面処理したものに比べて表面処理なしの透湿度は環境湿度に大きな影響を受けている。したがって、透水性試験の結果も含めれば、表面処理を施すことにより、RH 60%~90%の範囲ならば、環境湿度がコンクリートに出入りする水分量に与える影響を小さくすることが可能である。

また、表面処理の各仕様間では、水蒸気の透過性の大小関係は一般に、なし>シラン>シラン+PCM>ウレタン>MMA>エポキシ、として得られた。ここで、透湿度と透湿度との比を算定し、表—4に併せて示す。これによれば、発水系のシランではこの比が大きいのは当然であるが、シランと同様にウレタンもまた透湿度に対して透湿度が大きく、エポキシ系とは大きく異なった挙動を示している。ウレタンは一般的には遮水系と考えられているが、その透湿度は小さいものの、むしろ発水系と考えた方がよいと考えられる。

3. 鋼材腐食に関する耐久性設計への適用

本研究で得られたコンクリート、表面処理系の諸特性の実験結果をもとに、それらの値をコンクリート中の鋼材腐食抑制を目的とする耐久性設計にどのように適用させていくかについて若干の検討を行う。

コンクリート構造物の設計法の主流になりつつある限界状態設計法の枠組みの中で耐久性設計を考えるうえで、一般の限界状態と同様の重要性をもって、構造物に想定される劣化機構に応じた限界状態が定義されなければならない。したがって、耐久性設計を行うにあたっては、その対象とする劣化機構における限界状態を明確にしておく必要がある。塩害における限界状態としては、一般に、腐食の発生、腐食による鋼材軸方向のかぶりコンクリートひびわれの発生、腐食減量の3種をあげることができる。これらのうち、現行の設計法では激しい腐食の発生を主要な限界状態とみなして、たとえば環境条件に応じて許容ひびわれ幅などを設定するという考え方を採用しているものが多い。しかし、腐食発生は単に腐食損傷の始まりであり、構造耐力上の限界状態よりはかなり安全側に位置すると考えられる。鋼材軸方向ひびわれの発生は、鋼材に酸素や塩化物イオンを直接接触させることになり、急速な腐食反応に起因する鋼材断面の減少によって耐力力の低下に結びつくとともに、食孔による靱性の低下を生じる⁸⁾。したがって本研究での塩害における主要な限界状態としては、鋼材軸方向のひびわれの発生を用いる。

鋼材軸方向ひびわれの発生までの時間は、腐食の発生までの第一段階と腐食発生後、軸方向ひびわれ発生までの第二段階に区分することができる。鋼材の不動態被膜が破壊されることによる腐食開始までの第一段階の時間

t_i を支配するのは、一般にコンクリート中への塩化物イオンの拡散である。塩化物イオンの見掛けの拡散については誤差関数を用いての推定等、比較的簡単に行うことが可能である。

しかし、ひとたび腐食が始まれば、その腐食速度は酸素の拡散過程に律速されるものと考えられる。腐食速度が大きければ、コンクリートのひびわれ発生までの時間や鋼材断面の減少に伴う耐力の低下までの時間は短くなる。腐食速度を律速する酸素の拡散速度を制限するためには、前節で述べた見掛けの酸素拡散係数を小さくすることが必要になる。本実験の結果より、確実性をもってこれらの性能を具備すると考えられるのは、水セメント比の小さい密実なコンクリートの使用や、エポキシ、MMA およびウレタンの表面処理系の適用である。

コンクリート中の鋼材腐食が、酸素の拡散のみに律速されると仮定すると、鋼材の自然電位の測定などのモニタリング、はつり出しなどから鋼材の腐食量を調べることで、鋼材軸方向ひびわれの発生に達するまでの許容腐食量を求めることができる。さらに、許容腐食量から酸素拡散率を用いて限界状態に達するまでの時間（構造物の余命 t_r ）を算出することが可能となる。図—15 に、確定論的でまだ十分なものではないが、塩害における構造物の余命を求める簡単なフローチャートを示す。

ここで、許容腐食量は従来の研究を参考にして水セメント比 50 %、かぶり 5 cm における最も安全側の値をとって、軸方向ひびわれ発生時の腐食減量を 10 mg/cm^2 と仮定する。次の条件下で構造物を補修するにあたって余命を概略的に推定する簡単な計算例を示す。

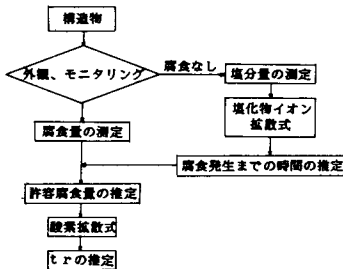
算定条件：湿度 80 %：大気中

鋼材の腐食量 $C_0 = 0 \text{ g/cm}^2$

鋼材の限界腐食量 $C_i = 10 \text{ mg/cm}^2$ (軸方向ひびわれ発生)

塩化物イオン量 = 腐食発生量以上(たとえば、 1.2 kg/m^3 以上)

塩化物イオン量が腐食発生に達していることから、余命を求めるにあたっては図—5 の腐食発生までの時間は 0 であって、鋼材の許容腐食量は $C_a = C_i - C_0 = 10 \text{ mg/}$



図—15 構造物の余命を求めるフローチャート

表—5 余命 (t_r) の推定

処理仕様	無処理に対する余命比
なし	1.0
エポキシ (240 μm)	9.2
ウレタン (240 μm)	1.5
M M A (500 g/m^2)	3.5

cm^2 として算定することができる。 O_2 が 1 mol 供給されると、Fe 2 mol が腐食する。 t_r は酸素の拡散率 J_0 と Fe の分子量 ($M=55.8$) を用いて次式のように表わすことができる。

$$t_r = C_a / (2J_0 M) \dots \dots \dots (7)$$

さらに、酸素の濃度分布が直線であると仮定した場合には、 t_r は見掛けの拡散係数 D_0 を用いて次式のように表わすことができる。

$$t_r = C_a / (2D_0 (C_i / \delta) M) \dots \dots \dots (8)$$

この式に透気性試験で得られた値を代入し、水セメント比 50 % の場合について各表面処理仕様と無処理との余命比を推定した結果を表—5 に示す。

表—5 より、本実験で用いた仕様に関しては、鋼材の腐食が発生し始めた後もコンクリートに表面処理を施すことにより、酸素の拡散が抑制され余命の延伸が可能となる。しかし、その程度は表面処理仕様によってかなり相違することが理論的に明らかであり、仕様の選定には十分な配慮が必要であることを示唆している。なお、式 (8) の解析結果によると、余命の絶対値はたとえば本仕様のエポキシでも 2 年未満であって、補修効果はあまり期待されないと推定された。このことは、かぶりコンクリートをはつりおらずに補修された構造物では、短時間で再び腐食損傷が生じている例が多いことを考えると、ある程度妥当なもののみなすことができる。

もとより、以上の簡単な計算例は、酸素の拡散到達量が腐食の律速過程であるとした場合における推定であり、表面処理による若干のひびわれ発生抑制効果も考慮していない。また、ある精度をもって厳密にコンクリート構造物の余命を推定したものではない。しかし、現在手法論的な確立が強く要求されている、補修工法の有効性の評価を行うにあたって、大きな目安になるものと考えられる。

4. 結 論

本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (1) 鋼材腐食時の鋼材表面における酸素の消費とそれに伴う酸素の拡散をモデル化した本実験におけるコンクリート中の酸素の見掛けの拡散係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にあった。

(2) 本研究で用いた表面処理系のうちエポキシ、MMA、ウレタンは低い物質透過性を持ち、その効果はある程度以上の膜厚（エポキシ、ウレタンについては $240\mu\text{m}$ ）で顕著となる。

(3) シランおよびシランとポリマーセメントモルタルを併用した仕様は、物質透過抑制効果はエポキシなどに比べて小さいものの、コンクリート中からの水分逸散を期待できる。なお、ウレタンについてもシランと同種の効果を期待できる可能性が高い。

(4) 表面処理による物質透過抑制効果は、母材コンクリートの水セメント比の影響は受けるものの表面処理を施さないコンクリートにおける水セメント比の影響より小さい。

(5) 塩化物イオンがかぶりコンクリート中にすでに多量に蓄積されている場合、かぶりコンクリートをはつり取らずにコンクリート表面処理を補修用として施工しても、現在一般に用いられている仕様ではその補修効果は小さく、仕様の改善等、補修方法の検討を要する。

参 考 文 献

- 1) Somerville, G. : The Design Life of Concrete Structures, The Structural Engineer, Jour. of The Institution of Structural Engineers, Vol.64 A, No. 2, 1986. 2.
- 2) 岡田 清：コンクリート構造物の寿命，セメントコンクリート，No.470，pp.2～7，1987.4.
- 3) 田村英雄・松田好晴：現代電気化学，培風館，昭和52年4月。
- 4) 小林一輔・出頭圭三：各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学，Vol.24，No.12，pp.91～106，1986.12.
- 5) 宮川豊章・岡田 清，ほか：コンクリートの電気抵抗および酸素浸透について，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.265～266，1983.9.
- 6) Feldman, R. F. : Pore Structure, Permeability and Diffusibility as Related to Durability, Proc. of 8th International Congress on the Chemistry of Cement, pp.336～356, 1986.9.
- 7) 岡田 清・宮川豊章：コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報，33巻，pp.494～497，1979.12.
- 8) 岡田 清・小林和夫・宮川豊章・九富 理：鉄筋腐食における鉄筋軸方向ひびわれがコンクリート部材に与える影響，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.113～116，1985.5.
- 9) 宮川豊章：耐久性の評価，既存橋梁の耐荷力と耐久性，pp.162～178，土木学会関西支部，1985.7.

(1987.6.12・受付)