

海岸付近の建築物におけるコンクリート中の 塩化物イオンの拡散挙動について

DIFFUSION BEHAVIOR OF CHLORIDE IONS IN CONCRETE
OF THE BUILDINGS NEAR THE COAST AREA VICINITY

金子 樹^{*1}, 桝田佳寛^{*2}, 佐藤幸恵^{*3},

阿部道彦^{*4}, 安田正雪^{*5}, 田中 齊^{*6}

Tatsuki KANEKO, Yoshihiro MASUDA, Sachie SATO,

Michihiko ABE, Masayuki YASUDA and Hisashi TANAKA

This research is the rearrangement of the survey results which were conducted approximately 60 reinforced concrete buildings in 1985-88 for the purpose of accumulating data of the salt attacks. As the results, in the actual structures, chloride ion content of concrete surface is larger than the standard value and the diffusion coefficient in concrete is smaller than the values of accelerated or exposure test. In the distribution in which the peak of chloride ion is not located at surface area, the diffusion coefficient is expected from analysis in which the provisional surface is set and the wholesome concrete is targeted.

Keywords : Concrete, Chloride Ion, Building investigation, Diffusion Coefficient, Mortar Covered

コンクリート, 塩化物イオン, 建物調査, 拡散係数, モルタル仕上げ

1. はじめに

海岸付近における鉄筋コンクリート造の建築物では、その表面に風によって運ばれて来る海水飛沫や海塩粒子が付着するため、これらに含まれる塩化物イオンがコンクリートの内部に浸透・拡散し、蓄積する。コンクリート中の鉄筋近傍に有害量の塩化物イオンが蓄積すると鉄筋が腐食し、建築物の耐久性が損なわれる。これを鉄筋コンクリートにおける塩害と呼んでおり、海岸付近に建てる鉄筋コンクリート造の建築物においては、コンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散の挙動を把握し、塩害への対策を講じる必要がある。

日本建築学会では、建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS 5 と略記）の25節「海水の作用を受けるコンクリート」や鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説（以下、耐久設計施工指針と略記）において、コンクリートへの塩化物イオンの浸透・拡散の挙動に関して、表面塩化物イオン量を一定とした半無限固体における非定常拡散方程式の解に基づいてコンクリート中の塩化物イオン量の分布の経時変化を予測することとし、そのためのコンクリートの拡散係数および表面塩化物イオン量の標準値が示されている。しかし、そこに示されているコンクリートの拡散係数は、塩水への浸漬または乾湿繰返しによる促進環境や電気泳動法による試験の結果を基に導かれた¹⁾ものである。また、このような拡散係数の標準値との関係は屋外暴露試験について検討した報告²⁾はあるが実構造物によるものはほとんど見ら

れない。一方、表面塩化物イオン量の標準値は、海岸線に設置された橋梁などの遮蔽物のない土木構造物における測定結果に基づき示された値であり、一般に防潮堤などの遮蔽物によって囲まれた内側に位置する建築物においては過剰な値であると考えられる。

そのため、塩害に対する耐久設計に際し、実際の建築物のコンクリート中で生じている浸透拡散作用よりも大きい拡散係数や表面塩化物イオン量を用いてコンクリート中の塩化物イオン量を求めるることは安全側の評価になるが、不経済であることから、原子力発電所などの重要な建築物以外では、ほとんど適用されていないのが実状である。

建設省建築研究所（現、国立研究開発法人建築研究所、以下、建築研究所という）では、1985～88年頃に当時の建設省住宅局や官庁営繕部の協力を得て、全国の海岸付近に建つ約60棟の鉄筋コンクリート造建築物からコア試験体を採取してコンクリート中の塩化物イオン量の分布状況を調査した。その結果の概要は、筆者らにより発表^{3), 4)}されているが、詳細な検討については実施されておらず、同様な実建築物における調査報告もほとんど見当たらない。このため、この調査データを使用して実際の建築物におけるコンクリートの拡散係数や表面塩化物イオン量を求めるることは、海岸付近の建築物の耐久設計を合理的に行う上で重要であると考えられる。

本報ではこの実際の建築物における調査結果を基に、海岸付近に建つ鉄筋コンクリート造建築物に対して全塩化物イオンの浸透を予

*¹ 株長谷工コーポレーション技術研究所 博士(工学)

HASEKO Corporation Technical Research Institute, Dr.Eng.

*² 宇都宮大学 名誉教授・工博

Prof. Emeritus, Utsunomiya Univ., Dr.Eng.

*³ 東京都市大学工学部建築学科 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo City University, Dr.Eng.

*⁴ 工学院大学建築学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Kogakuen Univ., Dr.Eng.

*⁵ 東洋建設㈱総合技術研究所

Technical Research Institute, TOYO CONSTRUCTION CO., LTD.

*⁶ (株)日東コンクリート技術事務所 博士(工学)

Nittou Concrete Technology Office Co., Ltd., Dr.Eng.

Table 1 Data of building using investigation

Building No.	Location*	Completed	Building age of survey (years)	Distance from the coast (m)	Thickness of mortar (mm)	Amount of cores	Building No.	Location*	Completed	Building age of survey (years)	Distance from the coast (m)	Thickness of mortar (mm)	Amount of cores
1	Hakodate-shi, Hokkaido	1961	25	590	15~34	4	27	Tokoname-shi, Aichi	1973	12	40	Non	2
2	Mutsu-shi, Aomori	1969	17	40	Non	1	28	Maizuru-shi, Kyoto	1978	8	150	21~28	4
3	Mutsu-shi, Aomori	1969	17	140	Non	3	29	Hannan-cho, Osaka	1970	15	50	23~46	4
4	Aomori-shi, Aomori	1973	12	20	2	2	30	Hannan-cho, Osaka	1970	15	10	29~31	2
5	Zougata-cho, Akita	1979	7	150	Non	6	31	Akashi-shi, Hyogo	1969	16	150	21~28	4
6	Sakata-shi, Yamagata	1975	11	800	27~54	5	32	Kobe-shi, Hyogo	1977	8	100	Non	4
7	Choushi-shi, Chiba	1963	24	20	7~14	8	33	Kusimoto-cho, Wakayama	1973	13	10	24~30	2
8	Choushi-shi, Chiba	1984	3	20	Non	3	34	Tomari-son, Tottori	1972	14	10	17~34	6
9	Katsuura-shi, Chiba	1965	22	10	10~60	6	35	Hamada-shi, Shimane	1970	16	80	21~40	5
10	Katsuura-shi, Chiba	1965	22	10	Non	6	36	Hamada-shi, Shimane	1971	15	60	11~25	4
11	Katsuura-shi, Chiba	1966	20	50	Non	4	37	Hiroshima-shi, Hiroshima	1969	15	50	Nom	2
12	Kominato-cho, Chiba	1964	21	50	Non, 8~20	4	38	Ube-shi, Yamaguchi	1972	13	250	22~29	5
13	Kominato-cho, Chiba	1970	15	30	Non	4	39	Imabari-shi, Ehime	1967	19	5	Non	6
14	Futtsu-shi, Chiba	1970	18	50	Non	13	40	Hokujyo-shi, Ehime	1975	10	350	Non	3
15	Niigata-shi, Niigata	1958	28	1200	19~32	2	41	Karatsu-shi, Saga	1955	30	500	11~31	7
16	Niigata-shi, Niigata	1965	21	120	15~55	6	42	Nagasu-shi, Kumamoto	1973	12	300	20~23	3
17	Shinminato-shi, Toyama	1971	15	360	10~26	4	43	Nagasu-shi, Kumamoto	1975	10	300	21~24	3
18	Uchinada-cho, Ishikawa	1971	15	700	28~48	4	44	Misumi-cho, Kumamoto	1967	19	25	20~22	2
19	Numazu-shi, Shizuoka	1969	15	700	14~21	3	45	Usa-shi, Oita	1970	15	550	17~59	2
20	Numazu-shi, Shizuoka	1969	15	700	21	1	46	Usa-shi, Oita	1975	10	450	15~20	2
21	Numazu-shi, Shizuoka	1970	14	700	14~32	3	47	Nango-cho, Miyazaki	1976	9	5	27~36	3
22	Numazu-shi, Shizuoka	1971	13	700	16~24	2	48	Nichinan-shi, Miyazaki	1967	19	2000	40~43	2
23	Fuji-shi, Shizuoka	1976	8	350	Non, 18~33	4	49	Kagoshima-shi, Kagoshima	1961	24	200	12~21	2
24	Fuji-shi, Shizuoka	1976	8	250	20~40	3	50	Kagoshima-shi, Kagoshima	1961	24	200	16~29	2
25	Fuji-shi, Shizuoka	1976	8	250	Non	1							
26	Fuji-shi, Shizuoka	1976	8	230	Non	2							

* Location is the name of the time investigated.

測するための拡散方程式における拡散係数と表面塩化物イオン量について検討することを目的とする。

なお、本論文は、1980 年代に建築研究所が実施した全国規模の建築物コンクリートへの塩化物イオン浸透状況調査の結果をまとめ直したものである。調査の終了から今日まで長い時間が経過したが、その理由として実際の建築物のコンクリート中の塩化物イオンの分布に大きなばらつきがあり、促進試験や屋外暴露試験のような解析が困難だったことがあげられる。今回、当時の調査者以外のものが加わり、再度調査結果について考察を行い、まとめたものである。

2. 調査結果の概要

2.1 調査方法

本報で検討対象とした鉄筋コンクリート造建築物の概要を Table 1 に、地図による建物の分布を Fig.1 にそれぞれ示す。これらの建物は、前述の建築研究所で実施された実建物調査のうち、海からの距離が 2000m 以内で、かつ建物の海岸に面する部位（以下、海側という）におけるデータを有する 50 件とした。これらの建物の用途は事務所、省庁、学校、共同住宅とその付属建物などであり、いずれも 1986 年に建設省（現、国土交通省）よりコンクリート中の塩分総量規制が通達される以前に建設されている。また、コンクリートの実強度は測定されていないが、設計基準強度はおおむね 180 または 210kgf/cm² である。

これらの建物の表面仕上げは打放しまたはモルタル塗りであり、これらの表面にリシン（外装薄塗材 E）が施されているものも見られた。リシン仕上げにおいては、二酸化炭素⁵⁾ や塩化物イオン⁶⁾ のコンクリート中への浸透抑制効果が見られないことから、ここでは仕上材がないものと見なすこととした。

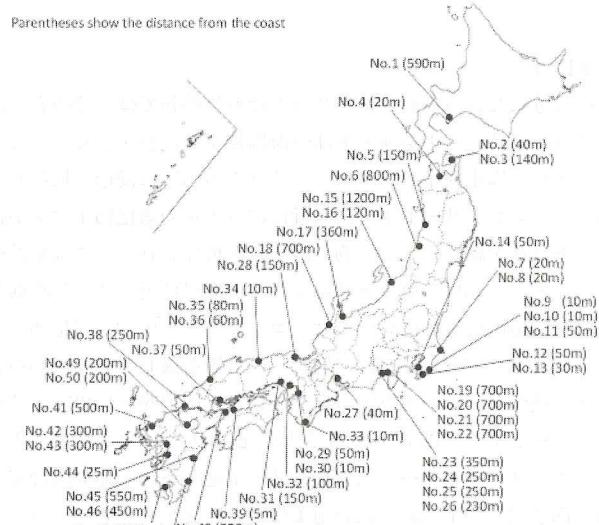


Fig.1 Location of investigated buildings

コンクリート中の塩化物イオン量の調査は、海側および海岸に直接は面しない部位（以下、陸側という）から採取した直径 10cm のコア試験体を用いて実施した。塩化物イオン量の測定は、コア試験体のコンクリート部分について主に 5~25mm の厚さにカットし、ジョークラッシャで粗粉碎した後、振動ミルで微粉砕して試料とした。この試料を硝酸で全溶解して塩化物イオンを抽出し、電位差滴定法、吸光度法およびホルハルト法のいずれかにより全塩化物イオン量を求めた。

また、コンクリートの表面にモルタルによる仕上げが施されている場合は、モルタル中の塩化物イオンについてもコンクリートと同

様の方法で全塩化物イオン量を求めている。

なお、本論文の検討においては、コンクリートおよびモルタルの単位容積質量が不明なため、それぞれの単位容積質量をコンクリー

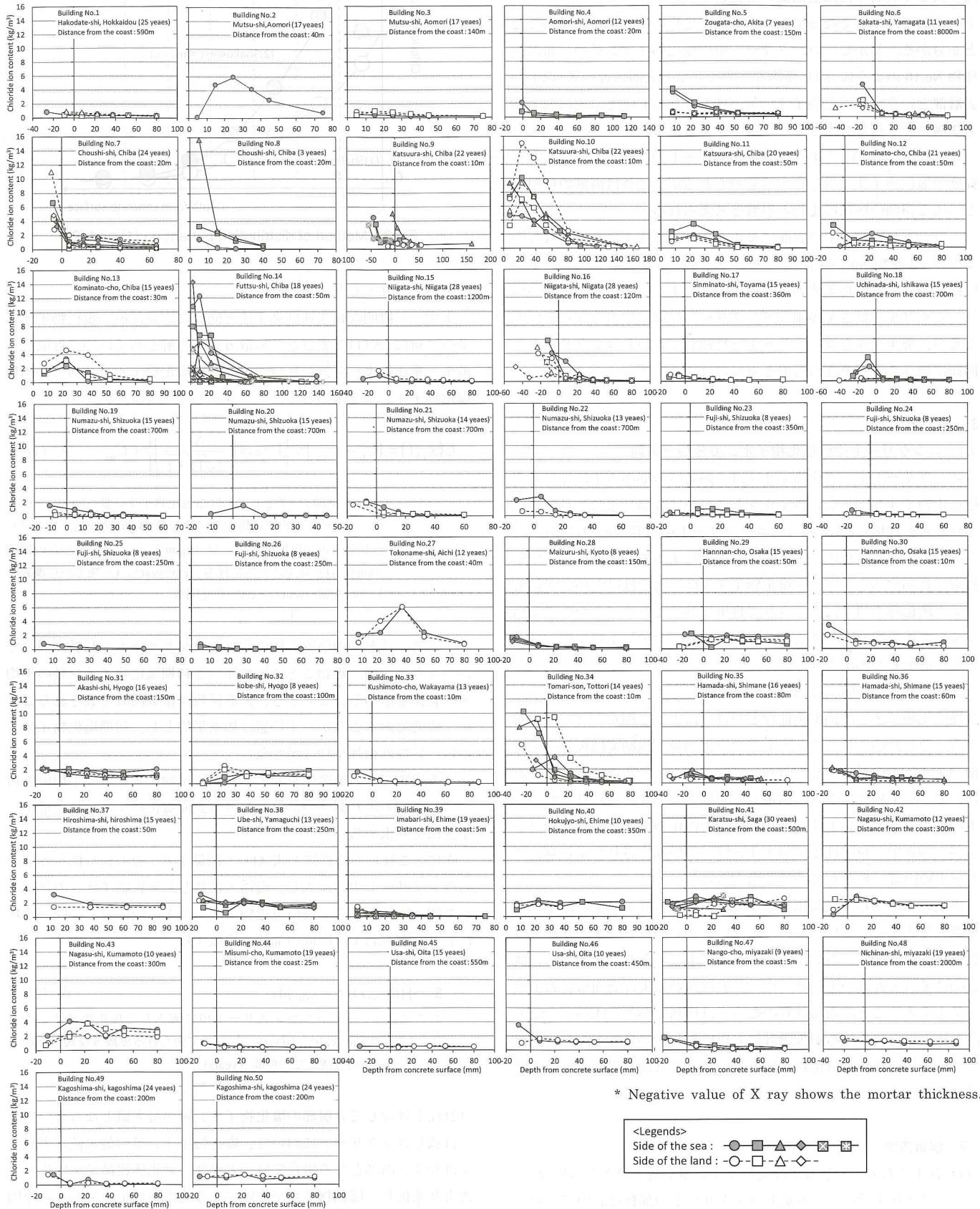


Fig.2 Relationship between distribution chloride ion content and depth from concrete surface

2.2 調査結果

建物ごとのコンクリート中の塩化物イオン量の調査結果を Fig.2 に示す。コンクリートの表面からの距離と塩化物イオン量の関係では、概して表層または表面側の塩化物イオン量が多く、コンクリートの内部では小さくなってしまっており、外來塩化物の影響を受けていることが分かる。しかし、コンクリート中の塩化物イオン量の分布は、建物 No.10 のように、同じ建物であっても最も表面に近い層(以下、表層部という)で塩化物イオン量が最大となるものと、表層部よりも 2 層目や 3 層目で大きくなるものが見られる。

また、建物 No.31 のように、コンクリートの内部においてもある程度の塩化物イオン量を有するものもあるが、これは海砂の使用などによる初期の内在塩化物の影響と考えられる。

一方、コンクリートの表面にモルタルによる仕上げが施されている場合は、建物 No.7 のように、モルタルの表面からコンクリートの内部にかけて塩化物イオン量が連続的に低下していく状況が認められ、モルタルの厚さを等価なコンクリートの厚さに換算する必要はあるが、モルタルをコンクリートと見做して打放しコンクリートと同様に扱うことができるものと考えられる。

3. 解析方法

3.1 コンクリート中の塩化物イオンの分類と挙動

コンクリート中の塩化物イオンは、測定時の抽出方法により可溶性塩化物イオンと全塩化物イオンとに分類される。水によって抽出される可溶性塩化物イオンは、コンクリートの細孔溶液中に存在し、水の中に溶出するため、主として濃度差によってコンクリート中を拡散・移動する。一方、全塩化物イオンは、可溶性のものおよびセメント硬化体の組織に固定されて自由に動くことのできない塩化物イオンであるフリーデル氏塩などからなり、セメント硬化体組織を硝酸で溶解して抽出される。

このうち、鉄筋腐食に影響するのは前者とされているが、この可溶性塩化物イオンは抽出条件などの違いによって測定される量が異なる。そのため、コンクリート中の塩化物量の規制では後者の全塩化物イオン量を対象としており、本調査においても同様とした。また、セメント硬化体組織に固定される塩化物イオンの量は、セメントの種類、水セメント比、水和反応や中性化の程度などにより異なるが、細孔中の可溶性塩化物イオンは一部が固定されながらコンクリートの内部に拡散していくと考えられる。

以上のことから、全塩化物イオンは、その移動が厳密には単純な拡散方程式に従っているものではないが、その量がコンクリートの表層部では大きく、内部にいくに従って小さくなる。そのため、便宜的に拡散方程式の解をあてはめて拡散係数および表面塩化物イオン量を求めるることは簡易計算のためには便利であり、JASS 5 や耐久設計施工指針における耐久設計にも用いられていることから、本報においても同様に全塩化物イオン量を用いて拡散方程式の解から検討を行った。

3.2 解析方法

(1) 仕上げなしで表層部の塩化物イオン量が最大値となる場合

モルタル仕上げのない打放しコンクリートの部材において、コンクリート表層部の塩化物イオン量が最も多くなる場合の解析手順は

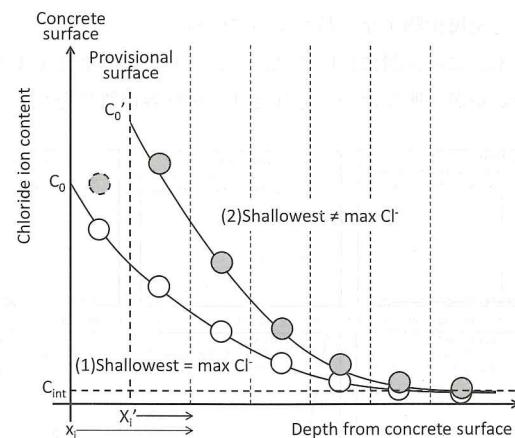


Fig.3 Method of distribution pattern on (1) and (2)

以下のとおりとした。

まず、一般的な耐久性評価手法と同様に、各部位の塩化物イオン量の分布に、式(1)で表される拡散方程式の解をあてはめて近似し、最小二乗法によって拡散係数および表面塩化物イオン量および初期塩化物イオン量を求める。

$$C(x_i, t) = (C_0 - C_{int}) \times \left\{ 1 - erf \left(\frac{x_i}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} + C_{int} \quad \text{式 (1)}$$

ここに、 $C(x_i, t)$: 期間 t 、深さ x_i における塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C_0 : コンクリート中の表面塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C_{int} : コンクリート中の初期塩化物イオン量 (kg/m^3)、 x_i : 浸透面からの距離 (cm)、 D : 見かけの拡散係数 (cm^2/year)、 t : 竣工から調査時までの期間 (years)、 erf : 誤差関数

ここで、ひとつの建物に用いられたコンクリートの品質は同一であると考え、同一建物ごとに拡散係数と初期塩化物イオン量の平均値の範囲を求める。このとき、拡散係数は指數関数で表されることが一般的であることから平均値は相乗平均とし、初期塩化物イオン量については相加平均で示した。

この建物ごとの拡散係数および初期塩化物イオン量の平均値を用いて、式(1)より個々の部位における表面塩化物イオン量を最小二乗法により求める。

次に、これらの特性値と式(1)の関係より、その積分値を外部からコンクリート中へ流入し、浸透・拡散した塩化物イオンの総量として式(2)より求め、表面塩化物イオン量との関係および同一建物における海側および陸側の部位を比較する。

$$S = \int \{C(x_i, t)/t - C_{int}\} dx \quad \text{式 (2)}$$

ここに、 S : 外部からコンクリート中に流入した塩化物イオンの量 ($\text{kg}/\text{m}^3/\text{year}$)、 $C(x_i, t)$: 式(1)で表される拡散方程式、 t : 竣工から調査時までの期間 (years)

(2) 仕上げなしで表層部の塩化物イオン量が最大値とならない場合

打放しコンクリートにおいて、塩化物イオン量の最大値が表層部ではなく、内部となる場合には、表層部の硬化体組織が中性化などにより変化し、塩化物イオンを固定する能力が低下したことが原因と考えられる。小林らの理論⁷⁾によると、表層部分の塩化物イオン

を固定する能力が表層部において低下すると、その部分の可溶性塩化物イオンの濃度が高くなり、再拡散によって表層部よりも内部の塩化物イオン量が濃縮されて多くなるとしている。この時の再拡散挙動も拡散理論に従うと考えられ、再拡散はセメント硬化体組織が変化していない健全な内部のコンクリート中の拡散であるため、その拡散係数は濃縮現象が起きる前の拡散係数と変わらないと考えられる。

そこで、Fig.3 のように、2層目以深の塩化物イオン量がもっとも多い層の表面を新たな表面（以下、仮想表面という）と仮定し、その内側のコンクリートに対して式（1）によって最小二乗法により近似し、拡散係数、仮想表面における表面塩化物イオン量および初期塩化物イオン量を求める。ただし、式（1）においては、 C_0 を仮想表面の塩化物イオン量 C_0' (kg/m^3)、 x_i を仮想表面からの距離 x_i' (cm) と読み替えることとした。

これにより、解析方法（1）の場合と混在している建物について拡散係数および初期塩化物イオン量を比較する。

（3）モルタル仕上げが施されている場合

コンクリートの表面にモルタル仕上げが施されている場合の RC 部材の耐久性評価について、モルタル厚さを等価なコンクリートに換算する考え方がある。モルタルの塩化物イオンの透過性をコンクリートの α 倍とすれば、モルタル層の厚さはコンクリートの厚さに等価換算すると $1/\alpha$ と見做すことができ、式（1）より逆解析して拡散係数、表面塩化物イオン量および初期塩化物イオン量を求めることができる。同一建物においては、部材によってモルタルの厚さは異なるが、モルタルの品質は同じであると仮定できるため、部位ごとに α を考慮した拡散係数の範囲を求める。

4. 仕上げなしにおける解析結果

4.1 初期塩化物イオン量および拡散係数

解析方法（1）および（2）により、コンクリートに表面仕上げがない場合に式（1）で求められる、各部材の初期塩化物イオン量を Fig.4 に、拡散係数を Fig.5 に、また、それらの各建物における最大値、最小値および平均値の一覧を Table 2 に示す。

これらから分かるように、仮想表面を考慮した解析方法（2）で求められる拡散係数および表面塩化物イオン量は、解析方法（1）と同程度の範囲の値を示した。また、Table 2 に示すように同一建物において双方の解析方法が用いられた建物においても、両者に明確な違いは見られなかった。すなわち、コンクリート表層部の組織の変化などにより、コンクリート中の塩化物イオン量の最大値が表層部とならない場合においては、解析方法（2）のように仮想表面を設定し、コンクリートの健全部について扱うことで、一般的な耐久性評価と同様に拡散方程式の解を用いて拡散係数および表面塩化物イオン量を求めることが可能となる。

本調査で求められた各特性値について、初期塩化物イオン量では、建物 No.32, 37 および 40 において一般的にコンクリート中の鉄筋の腐食限界とされる $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上の初期塩化物イオン量であった。これらの建物はいずれも瀬戸内海に面した立地であったことから、建設当時の除塩が不十分な海砂の使用が推測される。

拡散係数では、各部材では $0.01 \sim 1.0 \text{ cm}^2/\text{year}$ の範囲に多く分布し、各建物の平均では $0.02 \sim 0.82 \text{ cm}^2/\text{year}$ であった。Fig.5 には筆者らが

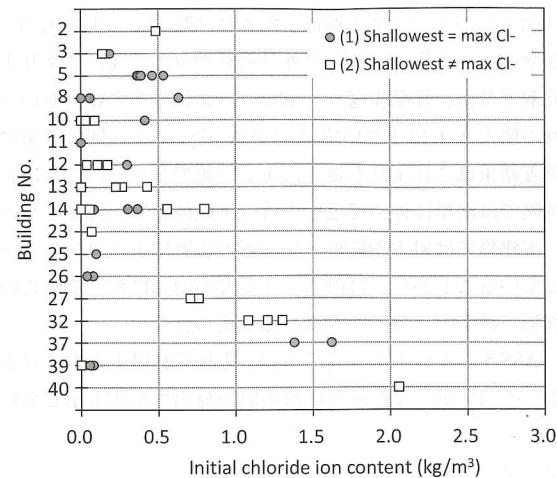


Fig.4 Initial chloride ion content of each building.

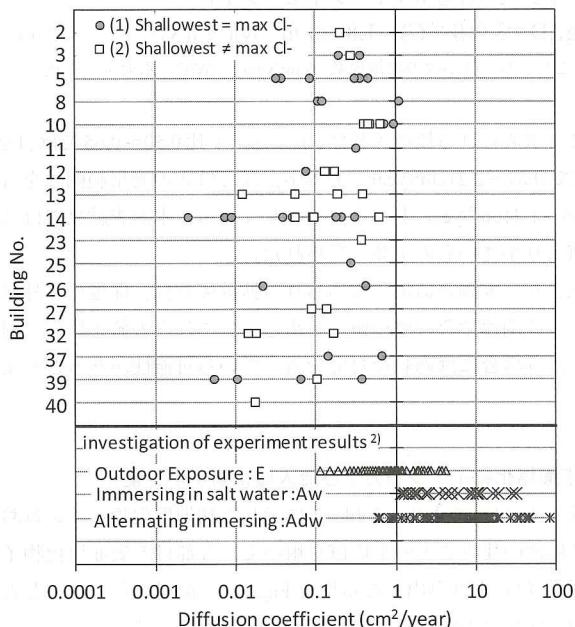


Fig.5 Diffusion coefficient of each building.

Table 2 Characteristic values of diffusion equation.

Building No.	Initial chloride content (kg/m^3)		Diffusion coefficient (cm^2/year)	
	(1) Shallowest = max Cl⁻		(2) Shallowest ≠ max Cl⁻	
	Min-max	Mean	Min-max	Mean
2	—	—	(n=1)	0.48
3	0.15-0.19	0.17	(n=1)	0.14
5	0.36-0.53	0.42	—	—
8	0.00-0.63	0.23	—	—
10	0.00-0.41	0.21	0.00-0.09	0.03
11	(n=1)	0.00	0.04-0.17	0.11
12	(n=1)	0.30	—	—
13	—	—	0.00-0.43	0.23
14	0.00-0.37	0.10	0.00-0.80	0.29
23	—	—	(n=1)	0.07
25	(n=1)	0.10	—	—
26	0.04-0.08	0.06	—	—
27	—	—	0.71-0.76	0.74
32	—	—	1.08-1.30	1.20
37	1.38-1.62	1.50	—	—
39	0.02-0.08	0.06	(n=1)	0.00
40	—	—	(n=1)	2.05

既往の文献より調査、整理²⁾を行った各種試験方法により求められる拡散係数の分布を併記した。屋外暴露試験（記号 E）により求められる拡散係数は、乾湿繰返し（Adw）や塩水浸漬（Aw）といった促進試験の値より 1 桁小さい約 0.1~4.0cm²/year の範囲に分布するが、本調査結果はこれよりもさらに小さい値であった。これは、屋外暴露試験では海岸に極めて近い場所で試験体が風雨に曝されるのに対し、実建物では樹木や屋根・庇などの影響によりコンクリートが乾燥していることから、自由水を介しての内部における塩化物イオンの移動が緩慢となっているためと考えられる。

また、JASS 5 および土木学会⁸⁾では、それぞれ以下のような水セメント比との関係から拡散係数の標準値を算出する式を示している。

- JASS 5 の式（普通ポルトランドセメント）

$$D = 0.65 \times 10^{(-3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5)} \quad \text{式 (3)}$$

- 土木学会式（普通ポルトランドセメント）

$$\log_{10} D = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad \text{式 (4)}$$

ここに、D：見かけの拡散係数 (cm²/year)、W/C：水セメント比

ここで求められる拡散係数は、水セメント比 0.50~0.65 では、JASS 5 の式で 0.87~2.21cm²/year、土木学会式では式の適用範囲外を含むが 0.50~1.41cm²/year となる。しかしながら、本調査結果ではこれらの値より小さいものが多く見られた。

以上より、本調査結果で求められる拡散係数は、促進や屋外暴露試験および関連学会の標準値より小さく、これらの値を用いて耐久設計を行う場合には過剰な対応を講じている可能性があると考えられる。

4.2 表面塩化物イオン量および流入塩化物イオン量

解析方法（1）で求め、Table 2 に示した初期塩化物イオン量および拡散係数の建物ごとの平均値を用いて、各部材の表面塩化物イオン量を式（1）より算出した結果を Fig.6 に、海岸からの距離と表面塩化物イオン量の関係を Fig.7 にそれぞれ示す。

建物の海側および陸側の関係では、陸側の表面塩化物イオン量は約 2.3kg/m³ 以下と少なく建物による違いも見られない。一方で、海側においては建物の環境条件による差が大きく、海側の表面塩化物イオン量が少ない場合には陸側と大差ないが、海岸からの距離が短くなるに伴い海側の表面塩化物イオン量は多く、陸側との差は大きくなる。

また、Fig.7 中には JASS 5 における表面塩化物イオン量の標準値を併記した。JASS 5 では、地域と立地条件の例をあげて塩害環境の区分を重塩害環境、塩害環境および準塩害環境に分類し、それぞれの区分における表面塩化物イオン量を 11.0、6.9 および 3.6kg/m³ として標準値を示している。本調査においては、海側の多くで JASS 5 の標準値よりも大きい表面塩化物イオンが見られた。特に、太平洋側に面した関東地方では、JASS 5 における標準値との乖離が顕著であり、かつ危険側に評価されている可能性が示唆される。

Fig.8 に各部材において 1 年あたりにコンクリート中に流入する塩化物イオン量を示す。同一建物においてコンクリート中に流入する塩化物イオン量は、山側よりも海側の方が大きい。

また、Fig.9 に流入塩化物イオン量と表面塩化物イオン量の関係を

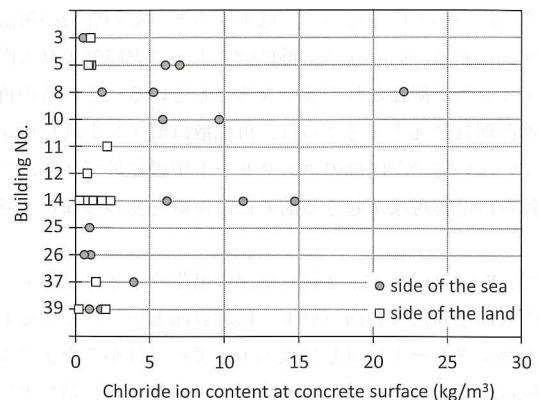


Fig.6 Chloride ion content at concrete surface of each building.

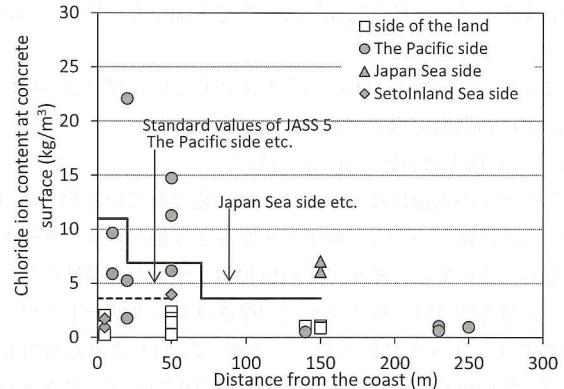


Fig.7 Chloride ion content at concrete surface and Distance from the coast.

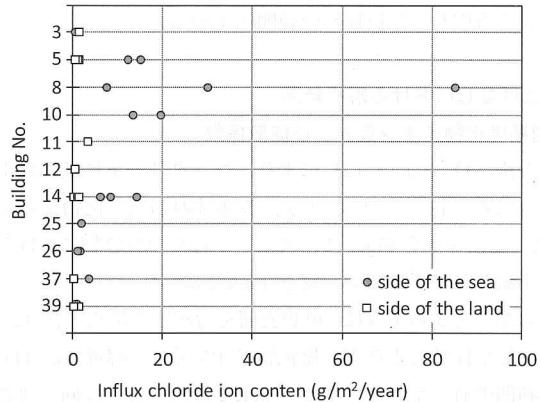


Fig.8 Influx chloride ion content in concrete of each buildings.

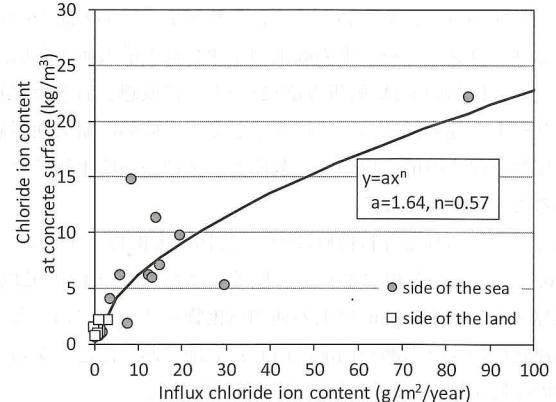


Fig.9 Chloride ion content at concrete surface and Influx chloride ion content.

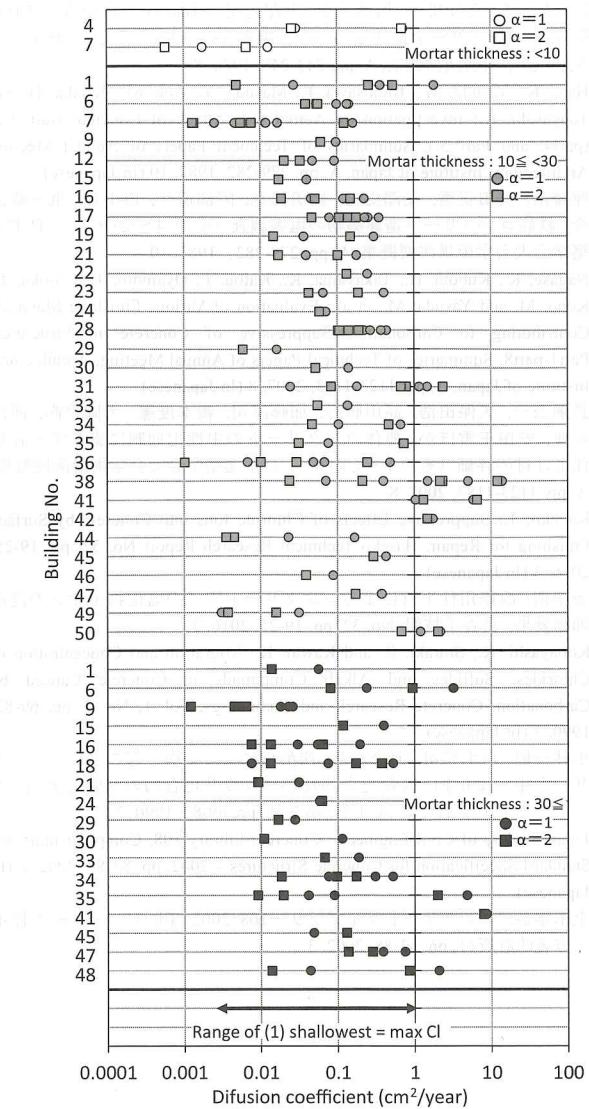


Fig.10 Diffusion coefficient of each building with mortar covers.

示すように、海側においては表面塩化物イオン量が大きい場合にコンクリート中に流入する塩化物イオン量も大きくなる関係が見られる。しかし、本検討の範囲においては、この関係は図中に示した回帰式のように表面塩化物イオン量は流入塩化物イオン量の約 0.5 乗となつたことから、必ずしも直線的ではないことがうかがえる。

5. モルタル仕上げありにおける解析結果

コンクリートの表面にモルタル仕上げが施されている場合について、モルタルの等価厚さについて検討を行った。

モルタルの等価厚さとは、仕上げモルタルが物質透過性などに対してコンクリートとの関係を表すものである。筆者らの検討によれば、モルタル中における鉄筋腐食速度はコンクリート中の $\alpha = 2$ であることから、鉄筋腐食速度に対するモルタル等価厚さは $1/2$ としてコンクリートのかぶり厚さに加算できるとしている。²⁾

ここでは、実建物においてモルタル仕上げが施された部材のモルタルおよびコンクリート中の塩化物イオン量の分布から、塩化物イオンの透過性における等価厚さ α の検討を行った。

建物ごとにおいて各部材で $\alpha = 1$ および 2 として算出した拡散係数を Fig.10 に、また、両者の拡散係数の関係を Fig.11 に示す。

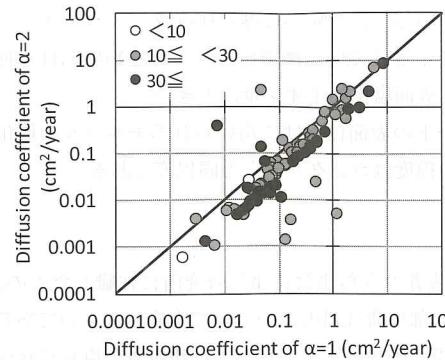


Fig.11 Relationship between diffusion coefficient of $\alpha = 1$ and 2 .

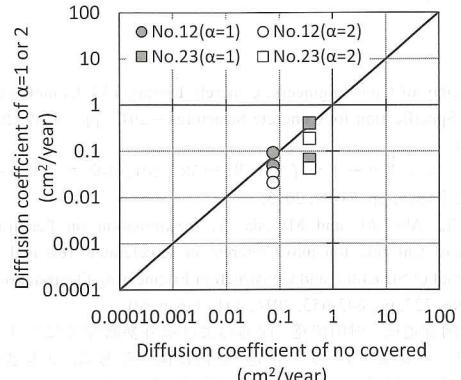


Fig.12 Relationship Between diffusion coefficient of no covered and mortar covers

Fig.10 および Fig.11 はいずれも仕上げモルタルの厚さに応じて 10mm 未満、 10mm 以上 30mm 未満、 30mm 以上に分類して示しているが、 $\alpha = 1$ および 2 として求められる拡散係数の範囲は、いずれも解析方法(1)で求められた範囲と同程度である。しかし、いずれのモルタル厚さにおいても $\alpha = 2$ の場合の拡散係数は $\alpha = 1$ より小さく、その傾向はモルタル厚さが大きいほど大きくなつた。また、Fig.12 に示すように、仕上材のあり・なし両方の部材を対象としている建物 No.12 および 23 におけるこれらの拡散係数の関係では、仕上げなしの部材の拡散係数に対しては $\alpha = 1$ とした拡散係数の方が近い値を示している。

すなわち、RC 構造物において仕上げモルタルの塩害に対する効果は、鉄筋腐食ではモルタル等価厚さは $1/2$ としてコンクリートのかぶり厚さに加算でき²⁾、塩化物イオンの透過性においてはコンクリートと等価な厚さとして塩化物イオンの浸透・拡散に有効に働くものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、実際の建築物における調査結果により、海岸付近に建つ鉄筋コンクリート造建築物におけるコンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散について検討を行つた。検討の結果をまとめると以下のとおりとなる。

- 1) コンクリート表層部の塩化物イオン量が小さく内部で大きい分布においては、仮想表面を設定して解析することで拡散係数を求めることができる。
- 2) 実建物におけるコンクリートの塩化物イオンの拡散係数は各種

促進試験や屋外暴露試験から得られる値より小さい。

- 3) 関連学会で示されている標準値より、実建物における拡散係数は小さく、表面塩化物イオン量は大きい。
- 4) コンクリートの表面仕上げに用いられるモルタルの塩化物イオンの拡散の程度はコンクリートと同程度である。

謝辞

本調査は、著者のうち建設省建築研究所に在職したものが1980年代に分担し、部外研究員の協力を得て実施したものである。調査にあたっては当時の建設省住宅局および建設省大臣官房官庁営繕部の担当官の多大の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Japan Society of Civil Engineers: Concrete Library 138, Complementary for Standard Specification for Concrete Structures – 2013, pp. 71-89, 2013. 3 (In Japanese)
土木学会: コンクリートライブラリー138 2012年版コンクリート標準示方書改訂資料, pp. 71-89, 2013. 3
- 2) Kaneko, T., Abe, M. and Masuda, Y.: Examination on Penetration and Diffusion of Chloride Ion into Concrete in Accelerated Test and Exposure Test, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 722, pp. 643-653, 2016. 4 (In Japanese)
金子樹, 阿部道彦, 株田佳寛: 促進および屋外暴露環境におけるコンクリート中の塩化物イオンの浸透・拡散に関する考察, 日本建築学会構造系論文集 第81卷 第722号, pp. 643-653, 2016. 4
- 3) Tougasaki, K., Amano, H., Masuda, Y., Tomosawa, F., Abe, M., Tanaka, H. and Yasuda, M.: Investigation on Actual Salt Attack of Concrete Buildings (part1.-Part3.), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A, pp. 243-248, 1986. 8 (In Japanese)
土木学会: コンクリートライブラリー108 2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, pp. 83-88, 2002. 3
- 4) Hara, K., Yasuda, M., Tomosawa, F., Masuda, Y., Abe, M., Tanaka, H. and Tougasaki, K.: Investigation on Actual Salt Attack of Concrete Buildings (part4. and Part 5.), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, A, pp. 279-282, 1987. 10 (In Japanese)
原謙治, 安田正雪, 友澤史紀, 株田佳寛, 阿部道彦, 田中齊, 東ヶ崎清彦: 鉄筋コンクリート造建築物の塩害調査 (その4~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp. 279-282, 1987. 10
- 5) Nagase, K., Kubota, H., Takayama, K., Katou, J., Oyamoto, T., Oh-oka, T., Kono, M. and Yasuda, M., et al.: Evaluation of Various Finishing Materials Contributing to Carbonation Suppressive of Concrete in Structures. Part1-part8, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, A, pp. 1123-1183, 2007. 8 (In Japanese)
長瀬公一, 久保田浩, 高山勝行, 加藤淳司, 親本俊憲, 大岡督尚, 河野政典, 安田正雪ほか: 軸体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価 (その1~その8), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp. 1123-1183, 2007. 8
- 6) Kaneko, T.: Suppressive Effects of Chloride Ions into Concrete by Surface Finishing for Repair, Haseko Technical Research Report No. 32, pp. 19-25, 2016. 3 (In Japanese)
金子樹: 改修用仕上材によるコンクリート中の塩化物イオンの浸透抑制効果, 長谷工技報 No. 32, pp. 19-25, 2016. 3
- 7) Kobayashi, K., Shiraki, R. and Kawai, K.: Migration and Concentration of Chlorides, Sulfides and Alkali Compounds in Concrete Caused by Carbonation, Concrete Research and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 69-82, 1990. 7 (In Japanese)
小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集 第1巻 第2号, pp. 69-82, 1990. 7
- 8) Japan Society of Civil Engineers: Concrete Library 108, Complementary for Standard Specification for Concrete Structures – 2002, pp. 83-88, 2002. 3 (In Japanese)
土木学会: コンクリートライブラリー108 2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, pp. 83-88, 2002. 3

DIFFUSION BEHAVIOR OF CHLORIDE IONS IN CONCRETE OF THE BUILDINGS NEAR THE COAST AREA VICINITY

Tatsuki KANEKO *¹, *Yoshihiro MASUDA* *², *Sachie SATO* *³,
Michihiko ABE *⁴, *Masayuki YASUDA* *⁵ and *Hisashi TANAKA* *⁶

*¹ HASEKO Corporation Technical Research Institute, Dr.Eng.

*² Prof. Emeritus, Utsunomiya Univ., Dr.Eng.

*³ Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo City University, Dr.Eng.

*⁴ Prof., Dept. of Architecture, Kogakuin Univ., Dr.Eng.

*⁵ Technical Research Institute, TOYO CONSTRUCTION CO., LTD.

*⁶ Nittou Concrete Technology Office Co., Ltd., Dr.Eng.

In general, for evaluating the durability of concrete on exogenous type salt attack, standard values of diffusion coefficient and chloride ion content of concrete surface are used. These standard values are shown in the specification of Architectural Institute of Japan and Japan Society of Civil Engineers, however these are established on the basis of accelerated tests or exposure tests, because of the lack of the reports on the investigated date in actual buildings. Accordingly, using standard values are estimated on the safe side, but it is uneconomical, so cannot be applied hard.

This research is the rearrangement of the survey results which were conducted approximately 60 reinforced concrete buildings in 1985-88 by the Building Research Institute of the Ministry of Construction (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) for the purpose of accumulating data on actual structures subject to the salt attacks.

These buildings were constructed before the notification of the regulation on total salt content in 1986, and located less than 2km from the coast. Furthermore, surface finishes of these buildings were sorted to undressed concrete or covered mortar. On these buildings, this research is examined using the distribution of total chloride ion content in concrete.

As the results, in the actual structures, chloride ion content of concrete surface is larger than the standard value of JASS 5 for durability design. On the other hand, the diffusion coefficient of concrete is smaller than the values of the accelerated test or exposure test. Moreover, it clarify that on the covered mortar, the diffusion coefficient is the same level with concrete.

Furthermore, in the actual structures, the peak of chloride ion distributes moves inside from surface in concrete, because of carbonation and so on. In this case, the treatment of the surface layer is not clear in conventional analysis for durability evaluation. In such a distribution of chloride ion, the diffusion coefficient of concrete is expected from analysis in which the provisional surface is set and the wholesome concrete is targeted.

(2018年10月10日原稿受理、2019年2月26日採用決定)