# 論文 中性化及び塩分浸透に対するかぶりコンクリート品質の信頼性評価 に関する基礎的研究

## 中村 成春\*1・ニー ムイ ゲッチ\*2

要旨:本研究は、RC 造建築物の外壁メンテナンス等における修繕周期の最適化を図る手掛かりを得るために、 既往文献から耐久性劣化因子のばらつき分布を整理し、中性化及び塩分浸透に対するかぶりコンクリートの 信頼性評価に関して基礎的に検討することを目的とした。その結果、本研究の範囲内で、設計かぶり厚さ、 中性化速度係数、見かけ塩分拡散係数、タイル仕上の浮き・破損率のばらつき分布を文献調査し、確率密度 関数で整理した。また、タイル仕上を考慮した中性化及び塩分浸透の経時変化から現れる鉄筋発錆確率を抵 抗 R-作用 S モデルで算定し、抵抗 R モデルと作用 S モデルの確率密度関数形状が及ぼす影響を評価した。 キーワード:かぶりコンクリート、信頼性、中性化、塩分浸透、仕上材、確率密度関数、鉄筋発錆確率

# 1. はじめに

国は、2006年6月に「いいものを作って、きちんと手 入れして、長く大切に使う」としたストック重視の住宅 政策へ転換する指針を定めた「住生活基本法」の施行を 背景に、2009年6月に「長期優良住宅の普及の促進に関 する法律」を施行した。この法律に基づき、国土交通省 は、2009年2月に告示第209号で、長期優良住宅におけ る長期使用構造等とするための措置および維持保全の 方法の基準を示した。

RC 造については,数世代にわたり住宅の構造躯体が 使用できるよう使用期間を100年程度に考え,また,適 切な維持管理により 150~200年を期待して,構造躯体 等の劣化対策として,水セメント比を45%以下とし,建 築部位に応じた最小かぶり厚さを規定した。例えば,土 に接していない屋外の耐力壁や柱やはりの建築部位の 最小かぶり厚さは40mmで,その建築部位の表面に,タ イル貼り,モルタル塗り,外断熱工法による仕上げ等が 施されている場合,最小かぶり厚さを10mm減じること が示されている。なお,実際のかぶりコンクリートの施 工では施工ばらつきを安全側に考慮し,AIJ2009年版 JASS 5 では,各最小かぶり厚さに10mm増した設計かぶ り厚さで対応するよう規定している。建築物損壊の予防 措置となる安全側の立場では,建築物損壊が顕在化して いない埋設鉄筋の発錆開始時点を RC 造の寿命と考える。

したがって、CO<sub>2</sub>や塩分等の劣化因子が、かぶりコン クリートに浸透・侵入してくる時々の濃度分布や埋設鉄 筋への到達時間を精度良く予測できれば、その予測結果 は、いつ頃どうやって修繕するのか等の寿命更新におけ るメンテナンス対策の立案・実施に役立つ指標になる。 一方、かぶりコンクリートの劣化進行では、酸素、水分、 CO<sub>2</sub>、塩分等が浸透・侵入するときのばらつき、埋設鉄

\*1 大阪工業大学 工学部建築学科准教授 博(工)(正会員) \*2 東京工業大学大学院 工学研究科大学院生(非会員)

筋の発錆ばらつき,型枠・鉄筋の組み立てや仕上げ取り 付けの施工ばらつき等,多くのばらつきを有する。その ため,耐久性劣化の予測では,埋設鉄筋の発錆確率に基 づく信頼性評価が合理的である。なお,ばらつきについ て,材料や施工が有するばらつきと予測評価式が有する ばらつきの分離は不可能である。例えば,実験回帰式等 は,材料や施工のばらつきを有することが自明である。

RC 造は,損壊の程度によって建築物全体の寿命がば らつき,ところどころ損壊しても,建築物全体の倒壊危 険性から見たら軽微なことも多い。しかし,軽微な損壊 でも、コンクリート塊が剥落して通行人に当たると生命 の危険もあり,損壊予防による寿命規定は,社会的意義 が大きい。信頼性工学手法の評価例として,AIJ 耐久設 計施工指針案では,損壊を与える可能性を有する鉄筋発 錆確率を,一般建築物 30%(柱・はり主筋 10%),重要 建築物 15%(柱・はり主筋 5%),原子力発電施設等の特 に重要建築物 7%(柱・はり主筋 3%)で規定している。

本研究は, RC 造建築物の外壁メンテナンスにおける 修繕周期の最適化を図る手掛かりを得るために,文献<sup>1)</sup> を発展させて,既往文献から実際の耐久性劣化因子のば らつき分布を整理し,中性化及び塩分浸透に対するかぶ りコンクリート品質の信頼性評価に関して基礎的に検 討した。なお,劣化進行時の周囲環境のばらつきやメン テナンスにおけるコスト関係は検討対象外とした。

#### 2. 信頼性の評価方法

部材全体を上位アイテムに、部材構成の各種材料や状態を下位アイテムとし、上位アイテムの信頼性を、組合せる下位アイテムの信頼性で評価することを考える。あるアイテムの品質等をn個の多次元確率変数となる確率変数ベクトルxとして、式(1)で定義する。

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}_1 \ \boldsymbol{x}_2 \dots \boldsymbol{x}_n \end{bmatrix}^T \tag{1}$$

この変数ベクトル x の関数である破壊基準関数 g(x)を 式(2)とする。g(x)>0ならアイテムは安全で、 $g(x) \leq 0$ なら アイテムは破壊する。

$$g(x) = g(x_1 x_2 \dots x_n) \tag{2}$$

*g*(*x*)が負の値にて,同時確率密度関数 f<sub>1,n</sub>(*x*<sub>1</sub> *x*<sub>2</sub> ···*x*<sub>n</sub>) として,変数ベクトル*x*の破壊確率 *Pf*は,式(3)になる。

$$Pf = \Pr[g(x) \le 0] = \int \dots \int f_{1,n}(x_1 x_2 \dots x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$
<sup>(3)</sup>

この式(3)の個々の確率変数  $x_i(i=1 \sim n)$ を相関のない標 準正規変数  $z_i(i=1 \sim n)$ に変換して,破壊基準関数を標準化 空間で表現したとき,原点からその限界局面への距離が 信頼性指標 $\beta$ となり,式(3)の破壊確率 Pfは式(4)となり, あるアイテムの破壊確率を得る。

$$Pf = \int \dots \int g(z) \le 0 \left\{ \prod_{i=1}^{n} \phi(z_i) \right\} \left\{ \prod_{i=1}^{n} dz_i \right\}$$
(4)  
$$\Rightarrow \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

信頼性指標βや確率計算にあたっては,文献<sup>2)</sup>に掲載の FORTRAN プログラムをベースにしたが, 誤差関数や逆 標準正規分布関数やベータ分布の計算について,大型計 算機用の外部関数の使用が指示されているのみで,具体 的コードは示されておらず,誤差関数,ガンマ関数,ス ターリング公式の階乗関数,連分数関数,挟みうち法に よる逆標準正規分布関数等の計算サブルーチンを自主 開発し追加した。また,文献<sup>2)</sup>にて,ワイブル分布関数 の表記や掲載プログラムに誤りがあり適切に修正した。

# 文献調査に基づくかぶりコンクリートの耐久性劣化 因子におけるばらつき分布と確率密度関数の検討

JCI, AIJ, 土木学会の信頼性評価の既往研究を概観す ると, 確率計算に必要な確率密度の取り扱いは, 正規分 布で仮定されている場合が多い。また, 近年の正規分布 の取り扱いでない場合の信頼性評価の研究では, 例えば 文献<sup>3)</sup>の秋山らの一連の RC 造信頼性研究があるが, 本 研究で対象とするかぶり厚さや中性化速度係数や塩分 拡散係数について, 複数文献による実際のばらつき分布 を調査整理している状況にはない。さらに, 土木学会で は, 文献<sup>4)</sup>の信頼性評価の委員会活動が行われたが, 住 宅等の建築物を対象にせず, 建築物で多用される仕上材 の取り扱いに不明な点がある。

本研究は、かぶりコンクリートの耐久性劣化の因子と して、1)施工ばらつきを反映したと考えるかぶり厚さ(確 率変数 x1), コンクリートの品質ばらつきを反映したと 考える 2)中性化速度係数(確率変数 x2a)及び 3)見かけ 塩分拡散係数(確率変数 x2b), 4)仕上材料による劣化因 子抑制のばらつきを反映したと考える集合住宅等で多 用のタイル張りの浮き・破損状況(確率変数 x3),を既 往文献から調査検討した。中性化速度係数と見かけ塩分 拡散係数は,調査文献の多くが土木構造物より,設計値 として,文献中の W/C から示方書 W/C 換算式より求め た。また,度数が不明なものは,度数1として数えた。

調査結果を表-1~4 と図-1~4 に示す。これら文献 調査から得た確率変数 x1, x2a, x2b, x3 のばらつき分布を 確率密度関数で表現する試行をした。また,確率密度関 数の分析結果を表-5,図-5~7 と図-4 中に示す。

モデルコンクリートは、W/C=60%とW/C=45%、設計 かぶり厚さを仕上無し50mmと仕上有り40mm,普通ポ ルトランドセメント使用で、海岸から1kmの立地とした。 また、確率密度関数には、正規分布を式(5)、対数正規分 布を式(6)、ワイブル分布を式(7)で検討した。

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\overline{x})^2}{2\sigma^2}\right\}$$
(5)

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_w\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \overline{w}}{\sigma_w}\right)^2\right\} \quad (6)$$

$$\sigma_{w} = \sqrt{\ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma}{\overline{x}}\right)^{2}\right\}}, \ \overline{w} = \ln\left\{\frac{\overline{x}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\overline{x}}\right)^{2}}\right\}}$$

$$f(x) = \frac{k}{b^k} (x-a)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^k\right\} \quad (7)$$

図-1&5 のかぶり厚さの確率密度は,設計値よりも実 測値がやや大きい。これは,施工時に設計値を下回らな いような配慮や,型枠はらみの影響と考えられる。この 分布形状の表現には,正規分布 N よりも対数正規分布 LN やワイブル分布 W が良い。ここでは,対数正規分布 LN のあてはまりが最も良く,ワイブル分布 W は分布形 状の左側のあてはまりが文献調査結果と異なった。

図-2&6の中性化速度係数の確率密度は、文献ごとに 分布形状が様々であるが、調査範囲では正規分布Nにな く、実測値が大きい。ここでは、正規分布Nと同じ形状 になるワイブル分布WN、全体形状をあてはめたワイブ ル分布W、分布形状の右下側を正規分布Nと同じにした 全体形状あてはめのワイブル分布W2を検討した。

図-3&7の見かけ塩分拡散係数の確率密度は,正規分 布に近く,ここでは,正規分布Nのみとした。

図-4のタイル浮き・破損率の確率密度は、15年まで

の実測値において、破損率が高いほど減少し、正規分布 Nにない。経過年数が20~30年以上では、平均破損率が

表-1	文献のかぶり厚さばらつき

誤差分布	文献①	文献②	文献③	文献④	1)~4)
中央値	10mm刻み	のかぶり厚	₽さ(実測値	-設計値)の	D誤差度数
mm	26	48	13573	414	14061
-35.0	0	0	6	0	6
-25.0	0	0	152	6	158
-15.0	1	0	996	28	1025
-5.0	15	19	4580	66	4680
5.0	9	29	4605	86	4729
15.0	1	0	1878	103	1982
25.0	0	0	924	64	988
35.0	0	0	311	21	332
45.0	0	0	110	23	133
55.0	0	0	11	8	19
65.0	0	0	0	5	5
75.0	0	0	0	4	4

①曽我部正道 谷村幸裕、松橋宏浩、宇野匡和:鉄道高架橋のRC高欄の変状調査とその劣化予測,コ ンクリートエ学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009.8

(2野中 英, 金森誠治, 佐藤孝一, 田中淳一, 大沼薫春: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定に関 する実験的研究 その2装置の基本性能, かぶり厚さ実測値, 圧縮強度, 含水率, 日本建築学会大会学 術講演梗概集(東北)材料施工, VolA-1, pp.775-776, 2009.8

③川村 力,谷村幸裕,曽我部正道,佐藤 勉,長谷川雅志:実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶ りの施工誤差に関する研究,土木学会論文集,No.767/V-64,pp.253-266,2004.8

④大内雅博、小窪幸恵、太田兵庫:コンクリート構造の鉄筋かぶり計測システム開発、高知工科大学報 告書、21世紀COEプログラム社会マネジメント・システム、2006.3





表-2 文献の中性化速度係数のばらつき



-4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 中性化速度係数(実測-W/C換算)誤差分布(mm/√年)

図-2 文献の中性化速度係数ばらつきの確率密度

高まり分布形状がおそらく正規分布に近づくと思われるため、対数正規分布LNのあてはめとした。

表-3 文献の見かけ塩分拡散係数のばらつき

誤差分布	文献①	文献2	文献③	文献④	文献⑤	1~5	
中央値	0.5cm²/年	の塩分拡帯	收係数(実測	-示方書	N/C換算)0	D誤差度数	
cm²/年	5	26	20	43	431	525	
-3.25	0	0	10	1	0	11	
-2.75	0	0	9	5	0	14	
-2.25	0	0	0	3	0	3	
-1.75	0	0	0	5	23	28	
-1.25	0	0	0	11	63	74	
-0.75	1	4	1	13	178	197	
-0.25	3	11	0	3	97	114	
0.25	1	8	0	1	43	53	
0.75	0	2	0	1	22	25	
1.25	0	0	0	0	5	5	
1.75	0	0	0	0	0	0	
2.25	0	1	0	0	0	1	
<ol> <li>遠藤裕丈。</li> </ol>	田口史雄,嶋日	日久俊,渥美洋	一,窪内篤,	星 俊彦,太田	利隆,佐伯昇:	約40年を経	
た寒冷地コン	クリート防波堤 07 0005 10	での複合劣化	(塩分と凍結	融解)調査,北	海道開発土木	研究所月報,	
NO.031, pp.17		Fel. J.m					
②山路 徹, 中 性能に関する	朝査結果、コン	☆則、山田一ヶ ノクリート工学:	5:夫海洋琼境 年次論文集,V	といった朔间素 'ol.30, No.1, pp	を踏されたコン .609-614,200	クリートの諸 8	
③中村秀明,	高橋 順, 江本:	久雄, 宮本文和	恵:海洋環境下	におけるコン	クリート中の塩	分測定のば	
らつきに関す	る研究、コンク	リートエ学年炎	v論文集, Vol.3	31, No.2, pp.15	49-1554, 2009	9.7	
④横田優,浮田和明,重松俊一,藤枝正夫:拡散理論に基づいた海岸部塩分汚染環境評価,コン							
クリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.443-446, 1987							
(5)青山寶伸,松田哲夫、鳥居和之:海岸部コンクリート構造物の塩化物イオンの表面濃度と拡散 係数 コンクリート工学生次論文集 Vol 25 No.1 pp.683-688, 2003							
1本30、コンワウ	11五十十八)	⊪入未, V01.23	, NO.1, PP.003	000, 2003			





表-4 文献の経過15年までのタイル浮き・破損率

タル浮き・破損率	文献①~②	Σ(度数割合			
分布の5%刻みの	タイル浮き・破損率の	×刻み幅)=1			
中央値	度数	になる度数割合			
分布刻み幅	総度数	刻み幅×総度数			
5	14	70			
2.5	6	0.086			
7.5	3	0.043			
12.5	1	0.014			
17.5	0	0.000			
22.5	1	0.014			
27.5	1	0.014			
32.5	1	0.014			
37.5	0	0.000			
42.5	1	0.014			
47.5	0	0.000			
①近藤健介,田中正司,秋本雅人,久住明:弾性接着剤を用いた外装タイル張り建物に関する調 査研究,日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集,pp.107-110,2004.10					
②稲家 徹, 秋本雅人, 榎本真也, 村山之彦: 変成シリコーン・エポキシ樹脂系接着剤を用いた外壁					

12相家 徹, 秋本推人, 複本具也, 村山之彦: 変成シリコーン・エホキシ樹脂糸接着剤を用いた外壁 タイル張り工法への実践的研究 第6報 接着性の経年変化 その5, 日本建築仕上学会大会学術講 演会研究発表論文集, pp.155-158, 200610



図-4 文献のタイル浮き・破損率ばらつきの確率密度

# 表-5 各確率変数に対する確率密度関数の検討結果

a/itza / // / / / / / / / / / / / / / / / /	ッチC						
確率	確率密度	正規分布		対数正規分	∱布	ワイブル分布	
変数x1	関数	N		LN		W	
設計	d <sub>0</sub> =	平均	53.8699	変数x1の対	数での	下限值a	30.0000
かぶり厚さ	50.0000	標準偏差	12.5140	平均	3.9603	変数k	2.1013
d <sub>0</sub>		変動係数	0.2323	標準偏差	0.2296	変数b	25.0000
[mm]				変動係数	0.0580	変数λ	2.0000
				変数x1での	)	平均	34.0978
				平均	53.8772	標準偏差	2.0490
				標準偏差	12.5374	変動係数	0.0601
				変動係数	0.2327		
	d <sub>0</sub> =	平均	43.8699	変数x1の対	数での	下限值a	20.0000
	40.0000	標準偏差	12.5140	平均	3.7407	変数k	2.1013
		変動係数	0.2853	標準偏差	0.2897	変数b	25.0000
				変動係数	0.0774	変数 λ	2.0000
				変数x1での	)	平均	24.0978
				平均	43.9307	標準偏差	2.0490
				標準偏差	12.9962	変動係数	0.0850
		1		変動係数	0.2958	1	

b)中性化速/	度係数								
確率	確率密度	正規分布		正規分布を	を模した	ワイブル分布		平均かられ	「側を文献
変数x2a	関数	N		ワイプル分布	WN	W		と同じワイフ	ル分布W2
中性化	W/C=60%	平均	1.5250	下限值a	-3.1700	下限值a	-1.6700	下限值a	-1.0700
速度係数	A <sub>0</sub> =	標準偏差	1.7100	変数k	3.3035	変数k	2.1013	変数k	2.1013
A	1.8300	変動係数	1.1214	変数b	5.3010	変数b	3.2604	変数b	3.2604
[mm/√年]				変数λ	3.0000	変数 λ	2.0000	変数 λ	2.0000
				平均	-1.6837	平均	-0.1157	平均	0.4843
				標準偏差	0.4954	標準偏差	0.7772	標準偏差	0.7772
				変動係数	-0.2942	変動係数	-6.7193	変動係数	1.6046
	W/C=45%	平均	0.1750	下限值a	-4.5200	下限值a	-3.0200	下限值a	-2.4200
	A <sub>0</sub> =	標準偏差	1.7100	変数k	3.3035	変数k	2.1013	変数k	2.1013
	0.4800	変動係数	9.7734	変数b	5.3010	変数b	3.2604	変数b	3.2604
				変数λ	3.0000	変数 λ	2.0000	変数λ	2.0000
				平均	-3.0337	平均	-1.4657	平均	-0.8657
				標準偏差	0.4954	標準偏差	0.7772	標準偏差	0.7772
1				変動係数	-0.1633	変動係数	-0.5303	変動係数	-0.8978

				標準偏差	0.4954				
				変動係数	-0.1633				
<u>c)見かけ塩分拡散係数</u>									
確率	確率密度	正規分布							
変数x2b	関数	N							
普通ポルト	W/C=60%	平均	1.9238						
ラント・セメント	D <sub>0</sub> =	標準偏差	0.8075						
見かけ	2.6062	変動係数	0.4198						
塩分拡散	W/C=45%	平均	0.2094						
係数D。	D <sub>0</sub> =	標準偏差	0.8075						
[cm²/年]	0.8918	変動係数	3.8567						
d) 経過15年	までのタイノ	レ仕上の浮	き・破損率						
確率	確率密度	正規分布		対数正規分	<b>}</b> 布				
変数x3	関数	N		LN					
タイル浮き	仕上無し	平均	100.0000	変数x3の対	対数での				
・破損率	=仕上	標準偏差	0.0000	平均	4.6052				
r	全破損	変動係数	0.0000	標進偏差	0.0000				

"	-11-1-	保守禰左	0.0000	十月	4.0002
r	全破損	変動係数	0.0000	標準偏差	0.0000
[%]	と考える			変動係数	0.0000
				変数x3で0	0
				平均	100.0000
				標準偏差	0.0000
				変動係数	0.0000
	仕上有り	平均	12.5000	変数x3のす	対数での
		標準偏差	12.8174	平均	1.9805
		変動係数	1.0254	標準偏差	1.0536
				変動係数	0.5320
				変数x3で0	0
				平均	12.6225
				標準偏差	18.0036
				変動係数	1.4263







図-6 変数 x2a の中性化速度係数の確率密度関数





#### 4. 中性化及び塩分浸透の鉄筋発錆確率の検討

モデルコンクリートに対して,経過期間200年までの 鉄筋発錆確率を,確率密度関数 x1,x2a&b,x3 を組み合わ せた抵抗 R-作用 Sモデル<sup>1),2)</sup>から検討した。なお,中性 化と塩分浸透の解析にて,仕上材の劣化因子の抑制効果 は,仕上材の破損率rを乗じて表面CO2量Tまたは表面 塩分量Cl<sub>0</sub>を低減させることを考える。表面保護する仕 上材は,劣化因子の表面からの流入を耐用年数まで遮 断・遮蔽する効果を有する。本研究では,仕上材が無損 傷の場合,表面流入量を遮断して0と拡散モデル化し, 仕上材が全損傷あるいは仕上無しの場合,表面流入量を そのまま拡散モデルに適用する。このため,仕上材が部 分的に損傷した場合,損傷した箇所のみ表面流入量を考 慮することを,ある対象外壁の浮き・破損率rを定義し て,表面流入量の表面通過率とした。ただし,文献調査 結果が経過 15 年目までであり,それ以降は浮き・破損 率rがより大きくなることが予想される。

中性化深さは,式(8)で算定し,かぶり施工,コンクリート品質,仕上材のばらつき分布を組み合わせて,式(9)の破壊基準関数 g(x)から鉄筋発錆確率 Pf を計算した。

$$g(x) = AAAAA + Y - Y = AAAAA + Y = x1 - \left(x2a \cdot \sqrt{(x3/100) \cdot t}\right)$$
(9)

ここで, y:中性化深さ[mm], t:期間[年],  $A\&A_0$ :中性化速度 係数[mm/ $\sqrt{}$ 年], T:表面  $CO_2$ 濃度[g/mm<sup>3</sup>],  $\alpha$ : コンクリー ト  $CO_2$  拡散係数[mm<sup>2</sup>/年],  $\gamma$ : 中性化の必要  $CO_2$  質量 [g/mm<sup>3</sup>], r: T の低減率[%]で仕上材破損率を表面  $CO_2$ 通 過率と定義し, 仕上無しは仕上材全破損 r=100%。

塩分浸透は,確率計算にて陽形式で確率変数の偏微分 係数が必要なため,示方書等の誤差関数評価式でなく, 文献<sup>5)</sup>の式(10)で算定し,式(11)の破壊基準関数*g*(*x*)から 鉄筋発錆確率 *Pf*を求めた。なお,塩分浸透における抵抗 *R*モデルは,ばらつき無しの平均値としての鉄筋発錆腐 食量 *Clc*とした。*Clc*を確率変数にしなかった理由は, 文献<sup>3)</sup>でも指摘されているが,複数文献による実態に即 した信頼データが収集できなかったことによる。このた め,示方書基準 1.2kg/m<sup>3</sup>以外に, 0.3kg/m<sup>3</sup>も検討した。

$$Cl = \left(\frac{r}{100}\right) Cl_0 \left\{ 1 - \frac{(d/10)}{2\sqrt{3t D}} \right\}^2$$
(10)

 $D = 10^{\{-3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5\}}$ 

$$g(x) = Cl_c - \left[ \left( \frac{x3}{100} \right) Cl_0 \left\{ 1 - \frac{(x1/10)}{2\sqrt{3 \cdot t \cdot x2b}} \right\}^2 \right]$$
(11)

ここで, *Cl*:塩分量[kg/m<sup>3</sup>], *t*:期間[年], *d*:設計かぶり厚 さ[mm], *Cl*<sub>0</sub>:表面塩分量[kg/m<sup>3</sup>]で海岸から1km で1.5, *D*:見かけ塩分拡散係数[cm<sup>2</sup>/年], *r*:*Cl*<sub>0</sub>の低減率[%]で, 仕上材破損率を表面塩分量通過率と定義し,仕上無し 100%, *Clc*:鉄筋発錆塩分量で0.3 または1.2[kg/m<sup>3</sup>]。

図-8 に中性化の解析結果を示す。凡例は,確率変数 x1,x2,x3 で適用した確率密度関数の形状を表している。 上段の作用 S モデルの挙動となる中性化深さの経時変化 を見ると,経過100 年で,W/C=60%が仕上無しで約19mm, 仕上有りで約8mm,W/C=45%が仕上無しで約5mm,仕 上有りで約2mmとなった。この鉄筋発錆確率は,中段 の仕上無しで、W/C=60%が約2~4%、W/C=45%が約0.4 ~0.6%となった。また、下段の仕上有りで、W/C=60%が 約0.3~0.5%、W/C=45%が約0.05~0.15%となった。タイ ル浮き・破損率rが経過15年以上でより大きくなること を考慮すると、住宅の超長期供用では、タイル仕上げで も、定期的なメンテナンスが必要である。

抵抗 R モデルの確率変数となる設計かぶり厚さ x1 に て、LN,W,LN と W,W,LN を比較すると、LN が W よりも 小さい。図-5の各確率密度関数の左側形状にて、W は LN より裾野は小さいが包絡線は大きく、その影響で発 錆確率が大きくなったと思われる。抵抗 R モデルでは、 度数分布結果を取り扱う場合、平均から左側形状の最適 化が重要である。作用 S モデルの確率変数の一つとなる 中性化速度係数 x2a にて、確率密度関数の右下側形状が N と同じ WN や W2 では、他の確率変数の分布形状が同 じ場合、ほぼ同じ発錆確率となった。図-6から、W は N や WN よりも右下側形状が小さく、その分、発錆確率 が小さくなった。作用 S モデルでは、度数分布結果を取 り扱う場合、平均から右側形状の最適化が重要である。

図-9 に塩分浸透の解析結果を示す。文献調査結果と 最も適合性の良いLN,N,LN について解析した。鉄筋発錆 塩分量 Clc=1.2kg/m<sup>3</sup>の仕上無しの期間100年の発錆確率 は、W/C=60%で約46%に、W/C=45%で約5%に達した。 また、Clc=0.3kg/m<sup>3</sup>の仕上有りの期間20年の発錆確率は、 W/C=60%で約8%に、W/C=45%で約4%に達した。かぶ り厚さの確保や仕上材の考慮による劣化因子の抑制効 果が定量できている。なお、今回、抵抗Rモデルの鉄筋 腐食発錆量の設定で、発錆確率が大きく異なり、確率変 数として扱う必要性が理解でき、今後の課題としたい。

中性化と塩分浸透の鉄筋発錆確率を比較すると,塩分 浸透の発錆開始時間が早い。長期供用の重要構造物等で は、かぶり厚さの確保や仕上材対応以外に、さらに、そ の定期的メンテナンスが必要であることがわかる。

#### 5. まとめ

設計かぶり厚さ、中性化速度係数、見かけ塩分拡散係数、タイル仕上の浮き・破損率のばらつき分布を文献調査し、確率密度関数で整理した。

2) 仕上材を考慮した中性化及び塩分浸透経時変化から 現れる鉄筋発錆確率を*R-S*モデルで算定し,*R*モデルと *S*モデルの確率密度関数形状が及ぼす影響を評価した。

#### 謝辞

本研究は、文科省 H21~23 年度科学研究費補助金基盤 研究(C)(一般)課題番号 21560580 (代表者:中村成春)の 助成,ならびに AIJ-JASS5N 基礎研究 WGH20 度下期~ H21 度委員個別基礎研究の一環として実施しました。



### 参考文献

- 1) 中村成春:建築物外壁における各種構成材料の破壊確率に基づく信頼性の一考察,2008年度日本建築学会関東支部シンポジウム超高層建築物外壁の維持保全の在り方-超高層集合住宅を中心に,pp.32-38,2009.3
- 長尚:改訂新版基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂,1995.4
- 3) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における

鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する 基礎的研究, 土木学会論文集, 62(2), pp.385-401, 2006.7

- 4) 鈴木基行,秋山充良,中村晋,中村秀明:公開ハザー ドを用いたコンクリート構造物の信頼性評価:土木学 会コンクリート委員会 336 委員会活動報告,コンクリ ート工学, Vol.47, No.4, pp.21-27, 2009.4
- 5) RILEM REPORT 14 : Durability Design of Concrete Structure, 1996