

論文 15年間屋外暴露されていた打放し鉄筋コンクリート外壁モデル化試験体の耐久性調査

木許 真悟^{*1}・吉崎 芳郎^{*1}・長谷川 拓哉^{*2}・福島 敏夫^{*3}

要旨：外壁をモデル化した打放し鉄筋コンクリート試験体を8年屋外暴露後の調査に続き、15年間暴露し、その中性化深さ、炭酸カルシウムの生成量、水酸化カルシウムの残存量、鉄筋腐食の状況を調査した。炭酸カルシウム量と水酸化カルシウム量の関係より炭酸化フロントを求め、非定常拡散方程式による Laplace 変換法に基づいた解析解を理論解とした場合、実際の中性化深さと炭酸化フロントの位置は理論解と同じ位置にあることを確認した。また炭酸化フロントは中性化深さの2倍の深さに位置していた。

キーワード：中性化、屋外暴露、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、非定常拡散方程式

1. はじめに

コンクリートの中性化は、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を表す重要な指標であり、その進行はコンクリートの特性や環境条件により複雑な影響を受ける。現在国内において、中性化の進行を明確に予測する各種の研究がなされており、実用的な中性化速度式も多数報告されている^{1)~3)}。しかし、その基礎となる中性化深さが二酸化炭素の浸透深さ（以下炭酸化フロントという）とどのような関係になるかは、理論式を確認する上で必要不可欠であるが、実際の屋外暴露状況下でそれらの関係を実験的に調べた例は、必ずしも多くなく、最近では福島ら⁴⁾の研究によりフェノールフタレイン1%アルコール溶液による着色領域、つまり中性化深さは炭酸化フロントには必ずしも対応しないと結論づけている。

本研究は、中性化速度を予測する場合の要素として、内的要因としてコンクリートの水セメ

ント比を、外的要因として環境条件の内、特に方位（南北面）を選び、8年間屋外暴露したコンクリートの中性化深さの調査に引き続き、暴露15年の調査を行い炭酸カルシウム-水酸化カルシウム（以下 CaCO_3 , Ca(OH)_2 で示す）の濃度分布の関係を求め、これらがコンクリートの水セメント比ならびに方位にどのような影響を受けているか試験した結果について報告するとともに、暴露8年の試験結果の解析が暴露15年においても適応できるか否かについて検討した結果を報告するものである。

2. 試験概要

2.1 試験体

屋外暴露に用いた試験体は、表-1に示す3調合のコンクリートで、図-1に示す80×100×25cmの土台の上部に連続で打ち上げた、18×100×100cmの打放しコンクリートのパネルである。

表-1 コンクリートの調合表

試験体	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤				7日	28日
1	55	45	175	318	807	1000	1.11	19.0	4.4	20.0	24.2	36.9
2	60	46	175	292	836	995	1.02	19.0	4.5	19.5	19.3	32.2
3	65	49	175	269	899	950	0.94	19.0	4.4	20.0	14.8	29.6

*1 ㈱八洋コンサルタント 技術センター（正会員）

*2 独立行政法人 建築研究所 材料研究グループ(正会員)

*3 北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科資源循環学講座担当教授（正会員）

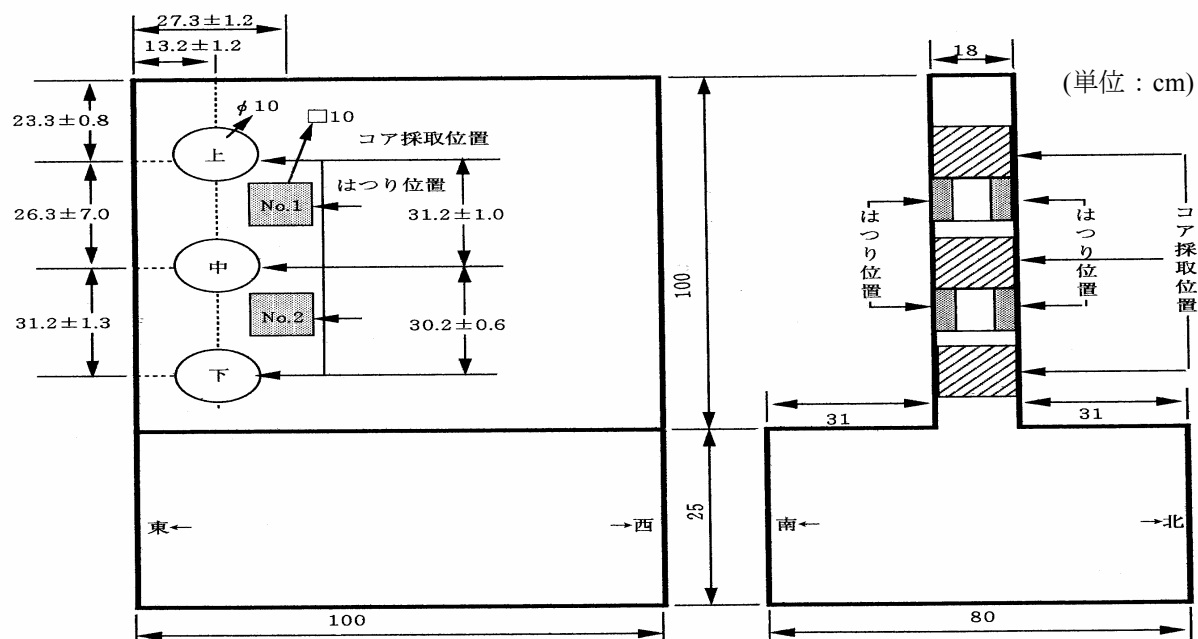


図-1 試験体の形状及び中性化深さ，炭酸化試料採取位置の概要

2.2 中性化深さ測定方法

中性化深さは、図-1 に示した上・中・下の3箇所から切り抜いたコンクリートコアの側面と、上下2箇所のはつりを行った箇所について、フェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し、赤紫色に変色しない部分の各表面からの距離を測定し、中性化深さとした。

2.3 圧縮強度

圧縮強度は、中性化深さ測定後のコンクリートコアを用いて、JISA 1107「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」により行った。

2.4 $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$ 分布分析方法

中性化深さ測定後のコンクリートコアを用いて、各表面から 10mm 間隔で上・下コアは南北両表面より3分割，中コアは4分割してそれぞれ試験体を調整し、粉末X線回折により $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$ の測定を行った。

3. 試験結果

3.1 実測結果

各試験体のコアおよびはつり部分の中性化深さ測定結果を図-2 に示した。また、その中性化深さと中コアによる $\text{CaCO}_3\text{-Ca(OH)}_2$ 濃度分布の関係を図-3 に示す。図-2 において、水セメント比が大きくなるに従って、中性化深さも大きくなり、方位による相違は南側の値が大きくなっている。また、暴露8

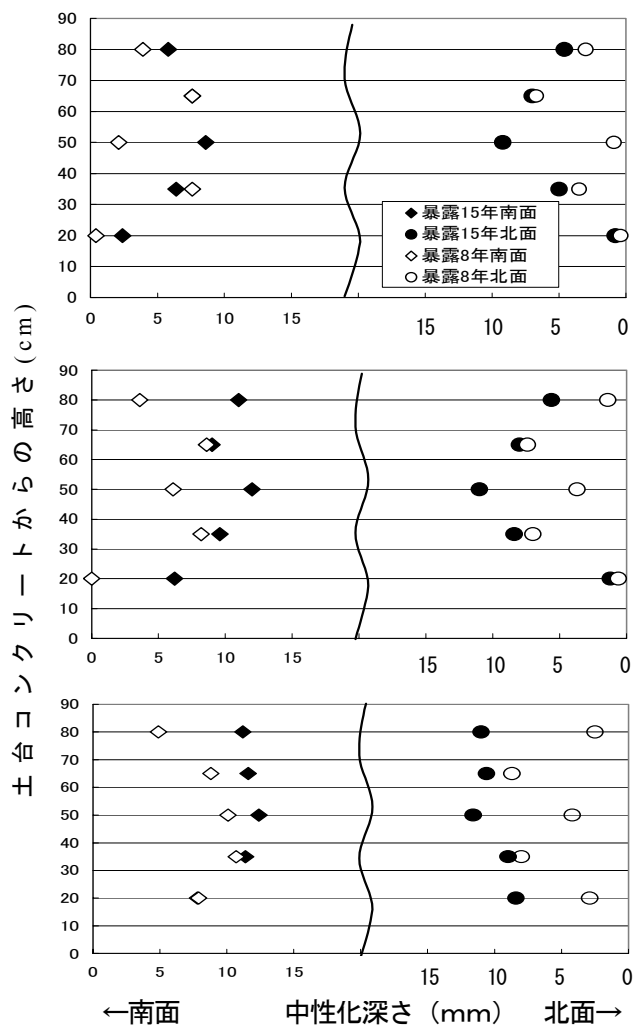


図-2 試験体の中性化深さ

年では水セメント比 65%, 南, 中コア部分を除いて, 他はいずれもはつり部分に比べ, コアの中性化深さは小さく, およそ 1/2 程度⁵⁾である。しかし暴露 15 年でははつりとコアの中性化深さには, 大きな差は見られないが, 試験体の上・下面側は中性化が小さく, 真中が最も大きい結果となっていた。この現象の一つとして, 雨水による湿潤・乾燥の影響によることが考えられるが, 本研究の中性化の解析では, 暴露 8 年でははつり部分で求めた中性化深さの値を, 暴露 15 年では中コアの値を用いた。

図-3 では, CaCO_3 の最大量および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の最小量は, はつり部分の中性化深さの表面部分に位置しており, コンクリート表面からの距離が増す毎に

CaCO_3 は減少し, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は徐々に増加する傾向であった。これは, 中性化が進行するほど CaCO_3 が増大し, 逆に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少するとされている一般的な傾向と一致している。この図より炭酸カルシウムの外側の 2 点と内側の 2 点の直線回帰式の交点を炭酸化フロント位置として求め, 中性化深さとの比を表-2 に示した。

これによると中性化深さの実測値は, CaCO_3 が検出されない炭酸化フロントよりコンクリート表面側にあり, その関係は暴露 8 年, 15 年のいずれにおいても同等で, 概略, 式(1)と考えられた。

$$\text{中性化深さ}(X_n) = 1/2 \text{ 炭酸化フロント}(X_f) \quad \dots \text{式}(1)$$

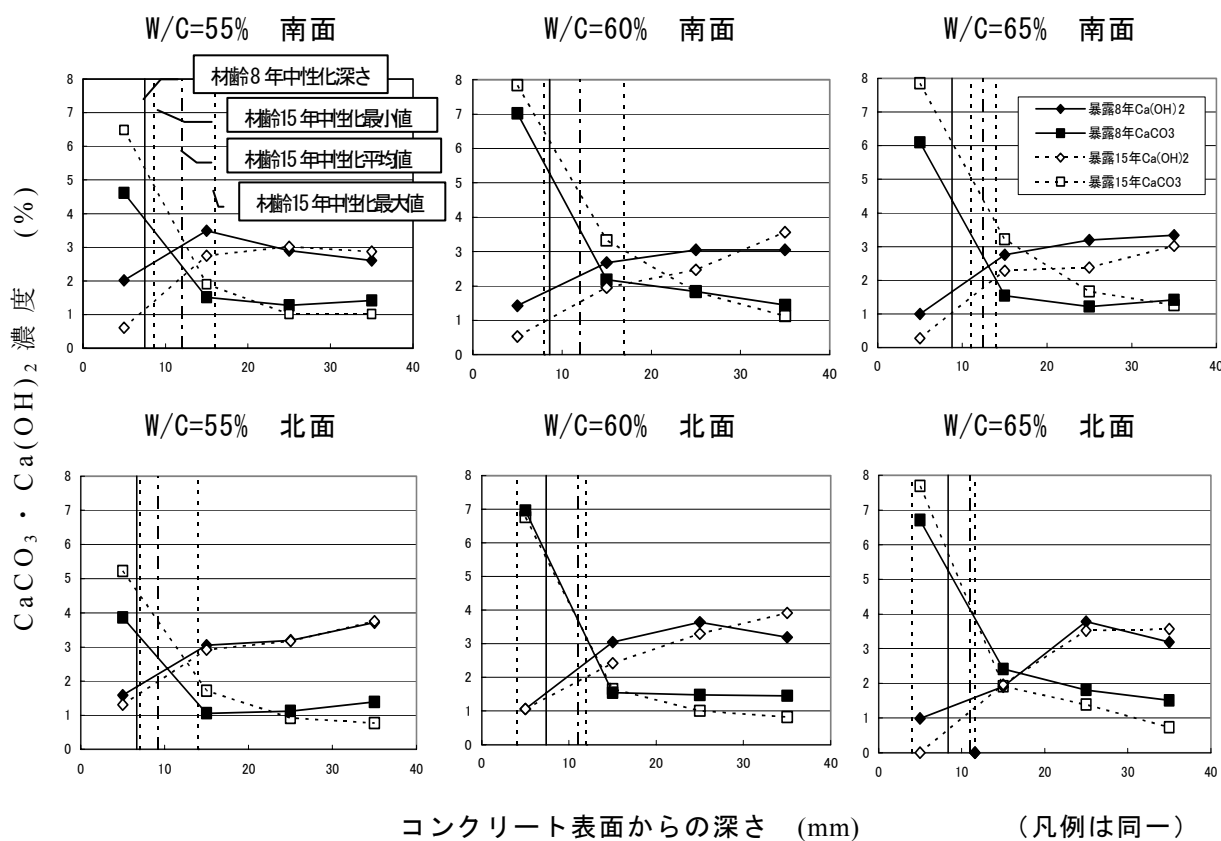


図-3 CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の濃度分布

表-2 中性化深さと炭酸化フロントの関係

暴露期間	水セメント比 (%)	中性化深さ(mm) X_n		炭酸化フロント(mm) X_f		X_n/X_f	
		南面	北面	南面	北面	南面	北面
暴露 8 年	55	7.5	5.1	15.5	14.3	0.4	0.5
	60	8.4	7.2	16.1	15.1	0.5	0.5
	65	9.8	8.4	17.4	15.2	0.6	0.6
暴露 15 年	55	8.6	9.2	17.5	18.1	0.5	0.5
	60	12.0	11.0	25.6	23.1	0.5	0.5
	65	12.4	11.6	26.0	24.3	0.5	0.5

3.2 圧縮強度・鉄筋腐食

各暴露期間の圧縮強度試験結果は、表－3に示す。なお鉄筋の腐食は何れも確認されなかった。

3.3 数値解析結果

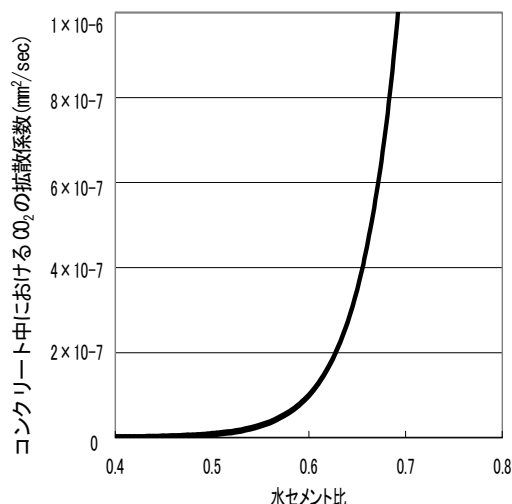
コンクリートの中酸化速度は、コンクリート中における CO_2 の拡散現象であることから、水セメント比を要因とした場合、 CaCO_3 より求められるコンクリート中の CO_2 の拡散係数 $D_i[x]$ は式2で表す^{4,5)} ことができる。

$$D_i[x] = 1 \times 10^{-7} \exp[15(x/0.6 - 1)] \quad \cdots \text{式2}$$

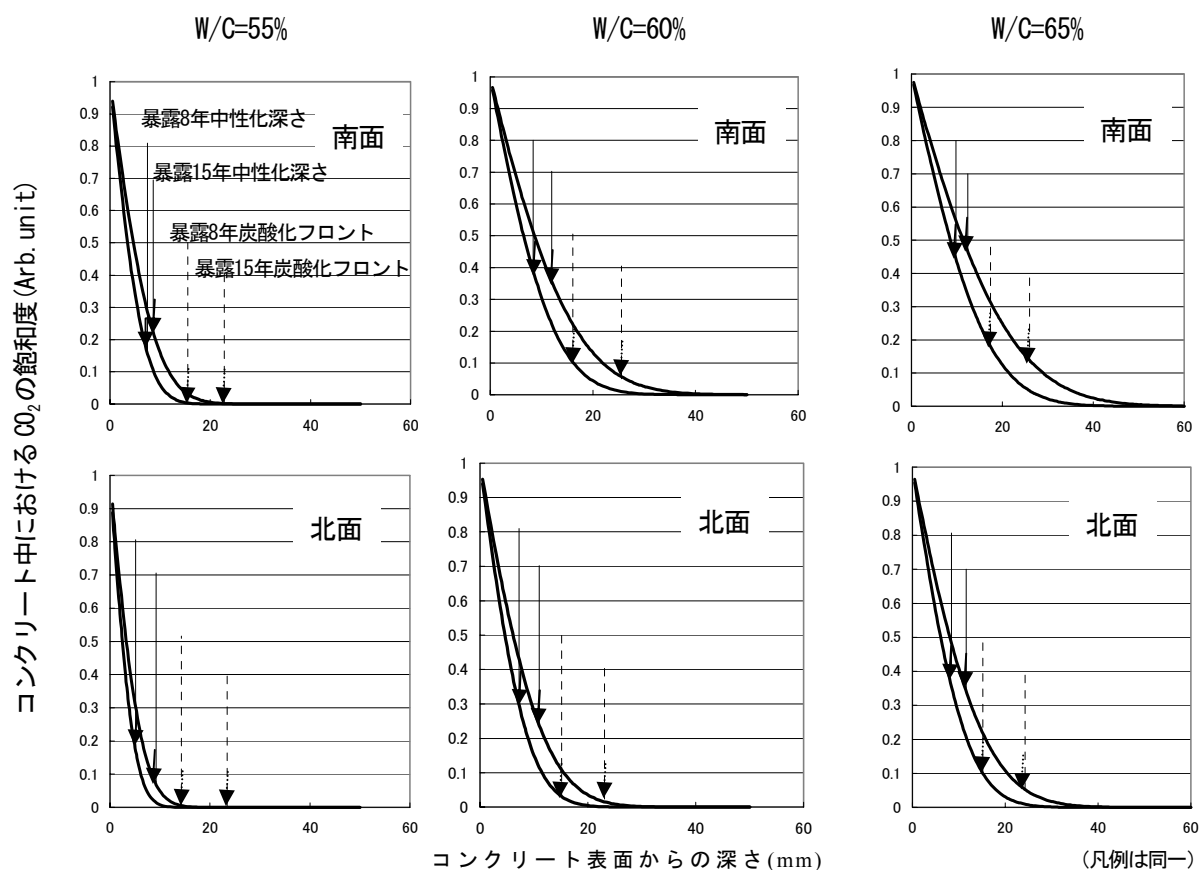
表－3 圧縮強度試験の結果 (N/mm²)

試験体 種別	暴露 8 年			暴露 15 年		
	W/C:55%	W/C:60%	W/C:65%	W/C:55%	W/C:60%	W/C:65%
上	37.7	36.4	34.2	42.1	35.9	32.0
中	39.8	35.5	32.1	42.0	39.2	28.7
下	58.6	53.7	41.2	63.4	62.4	38.8

式2より本暴露期間内における、各水セメント比毎の CO_2 の拡散係数を求めたものを図－4に示した。この関係より水セメント比毎の CO_2 の拡散係数を求め、この値を用いて屋外側の大気中の CO_2 濃度を一定 (300ppm) として、非定常拡散方程式に関して Laplace 変換法に基づいた解析解である式3により、暴露8年及び暴露15年の中性化深さと CO_2 の飽和度の関係の関係を求め、図－5に示した。



図－4 各水セメント比における CO_2 の拡散係数



図－5 暴露 8 年及び暴露 15 年の中性化深さと CO_2 の飽和度の関係

表-4 Laplace 変換法で求めた中性化深さと炭酸化フロント位置

水セメント比 (%)	暴露面	暴露 8 年			暴露 15 年		
		中性化深さ (mm)	炭酸化フロント (mm)	Xn/Xf	中性化深さ (mm)	炭酸化フロント (mm)	Xn/Xf
55	南	8.5	15.0	0.6	12.0	20.5	0.6
	北	6.0	11.0	0.5	8.5	14.5	0.6
60	南	16.0	28.0	0.6	21.5	38.0	0.6
	北	11.5	20.0	0.6	15.5	27.0	0.6
65	南	21.5	37.0	0.6	29.0	50.5	0.6
	北	15.0	26.5	0.6	20.5	35.5	0.6

ただし、ここで算出された水セメント比毎の CO_2 の拡散係数は日照条件等を加味した拡散係数とし、南面と北面の拡散係数は、年平均気温が約 10°C 異なるとして、アウレニウス則により南北では 2 倍の関係になるとしたが、やや南面が大きく計算される結果となった。また水セメント比が大きくなるとやや大きく計算される。

[基礎方程式] : $\partial C / \partial x = D(\partial^2 C) / (\partial x^2) - kC$

[初期条件] : $t \leq 0, 0 \leq x \leq +\infty : C=0$

[境界条件] : $t > 0, x=0 : C=C_0 \equiv 300\text{ppm}$

$t > 0, x \rightarrow +\infty : C=0$

[Laplace 変換法による解析解] :

$$F(x, t) \equiv C(x, t) / C_0 = 1/2(\exp(-x\sqrt{k/D}) \cdot \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) - \sqrt{kt}) + \exp(x\sqrt{k/D}) \cdot \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) + \sqrt{kt} \quad \cdots \text{式3}$$

図-5 において、大気中の CO_2 が 300ppm の場合の、コンクリート中の換算 CO_2 濃度が表面濃度の 10%になる位置が中性化深さに対応させれば、浜田式¹⁾とほとんど一致した。このことにより、Laplace 変換法で求めたコンクリート表面からの深さと、 CO_2 濃度分布の関係より、概略中性化深さ(Xn)が CO_2 濃度の 10%の位置にある^{4,5)}とし、炭酸化フロント(Xf)が CO_2 濃度が検出されない 0%になる位置と仮定した場合のそれぞれの表面からの距離を求めて表-4に示した。

これらの関係を表-2と同様に Xn/Xf を求めると、試験から得られた関係は概略、式 1 と同一の結果となった。

3.4 中性化進行予測

Laplace 変換法では、各暴露期間における中性化深さを計算できる。本式で求めた中性化深さと、一般的に中性化進行予測に用いられる岸谷式²⁾により求められる中性化深さを対比として、暴露 8, 15 年における中性化深さ分布図を、図-6 に示した。

この結果によると、図-6 において中性化深さはそれぞれ、水セメント比 55%では Laplace 変換より岸谷式が大きく、60%ではほぼ同等、65%では逆に Laplace 変換が岸谷式より大きい結果となっていた。また暴露試験体では、北面に比べて南面の中性化深さが大きな値となっていた。水セメント比 55%では Laplace 変換と北面の中性化深さが、水セメント比 65%では Laplace 変換と南面の中性化深さが同一であった。

4. まとめ

中性化の進行を明確に予測するために、本研究は 8 年及び 15 年間屋外暴露したコンクリートの中性化深さと、炭酸カルシウム-水酸化カルシウム (CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$) の濃度分布の関係を求め、中性化速度を予測する場合の要素として、コンクリートの水セメント比と、方位(南北面)を選び、これらがコンクリートの水セメント比ならびに方位にどのような影響を受けているか試験した結果より、以下のことが明らかとなった。

1) 水セメント比が大きくなるに従って、中性化深さも大きくなり、方位による相違はやや南側の値が大きく、一般的な傾向と一致している。

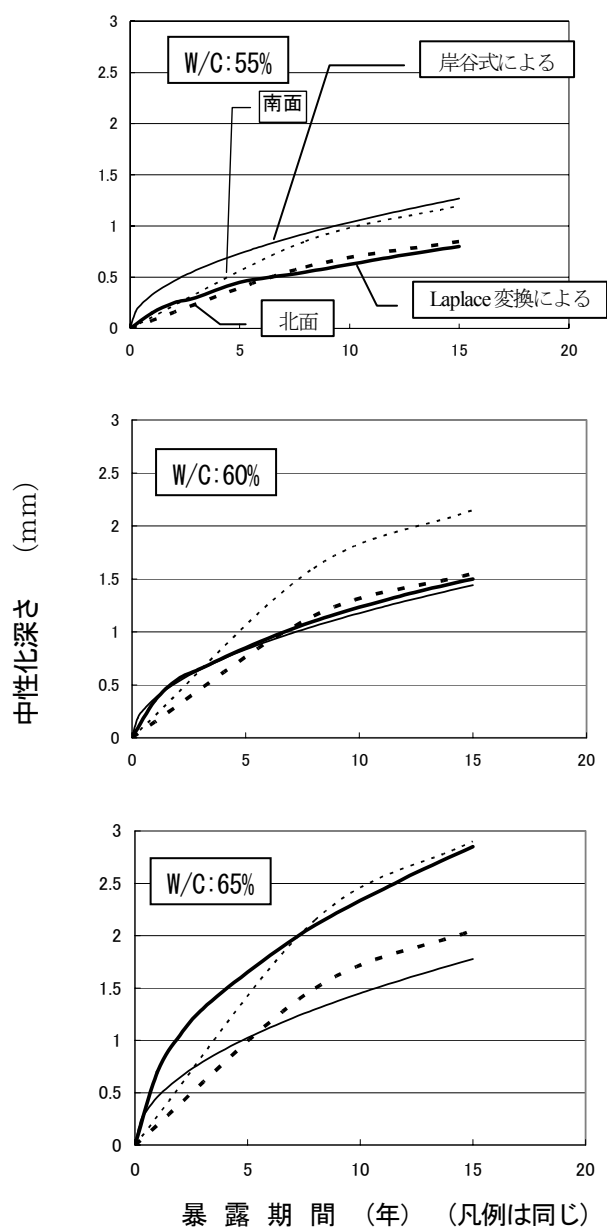


図-6 中性化深さにおける
Laplace 変換法と岸谷式の関係

2) CaCO_3 の最大量および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の最小量は、中性化深さの表面部分に位置しており、コンクリート表面からの距離が増す毎に CaCO_3 は減少し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は徐々に増加する傾向であった。これは、中性化が進行するほど CaCO_3 が増大し、逆に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少するとされている一般的な傾向と一致していた。

3) 1%フェノールフタレインアルコール溶液で測定される中性化深さの実測値は、 CaCO_3 が検出されない炭酸化フロントのコンクリート表面側にあり、その関係は概略、式1と考えられた。

$$\text{中性化深さ}(X_n) = 1/2 \text{ 炭酸化フロント}(X_f) \cdots \text{式 1}$$

4) CO_2 の拡散方程式に基づいた Laplace 変換法より推定した、概略中性化深さが CO_2 濃度の 10%の位置にあるとし、炭酸化フロントが CO_2 濃度が検出されない 0%になる位置と仮定した場合のそれぞれの表面からの距離は、概略、式1 と同一の結果であった。

5) 中性化予測式として使用されることの多い岸谷式と対比した場合、水セメント比 60%では、Laplace 変換法より推定した値とほぼ同じ予測値となるが、水セメント比 55%では岸谷式が、水セメント比 65%では、Laplace 変換の方がそれぞれ大きい値となっていた。

以上のことから炭酸化フロントは、1%フェノールフタレインアルコール溶液で測定される中性化深さより 2 倍の深さの位置にあることが、試験から求められた関係と、 CO_2 の拡散理論から求められた予測値の関係が一致し、今後のコンクリートの中性化進行予測および炭酸化について、一つの方向性が与えられた。なお、本報告は水セメント比が異なる3調合の試験体について調査したものであるが、南・北面の実測の中性化深さとはやや相違している部分がある。今後のより多くの試験体で調査し、適応性を確認してゆくつもりである。

[参考文献]

- 1) 浜田稔：コンクリートの中性化と鉄筋の腐食，セメント・コンクリート，No272，pp. 2～18，1969
- 2) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963
- 3) 梶田佳寛，棚野博之：コンクリートの中性化進行予測モデル，コンクリート工学論文集，第2巻第1号，pp. 125-134，1991
- 4) 福島敏夫：21世紀に向けてのコンクリートの中性化進行予測法，セメント・コンクリート論文集，No47，pp. 420-425，1993
- 5) 吉崎芳郎，福島敏夫，高橋幸一：コンクリートの中性化深さと炭酸カルシウム-水酸化カルシウムの濃度分布—8年間の屋外暴露試験結果，セメント・コンクリート論文集，No50，pp. 404-409，1996