

論文

[1154] モルタル・コンクリートの中性化速度に関する実験的研究

正会員○島添洋治（九州産業大学建築学科）

正会員 麻生 実（九州産業大学建築学科）

白川敏夫（九州産業大学建築学科）

1. はじめに

コンクリートの中性化は、鉄筋の防錆作用を損う劣化要因の一つであり、鉄筋コンクリート構造物の耐久設計、耐久性診断、耐用年数推定を行う際の基礎となる事項である。従って、中性化速度を正確に予測することや各種要因の及ぼす影響などを明確にすることは不可欠であり、多数の研究が行われており、その成果から実用的な中性化速度式が提案されている[1]。しかし、骨材供給事情や技術革新などによりコンクリート自体の品質も多様になっており、更に、実構造物の調査において予測される中性化速度よりも速く進行している実態が報告されるなど[2]、中性化速度に関する情報が不足している点も多い。本研究は、中性化速度に及ぼす各種要因の影響を明らかにすることを目的に促進中性化試験を実施し、モルタルとコンクリートの中性化深さの経時変化から求められる中性化速度係数と促進試験の環境湿度、水セメント比及び圧縮強度との関係、また、単位セメント量を変化させたコンクリートの中性化速度係数について検討したものを報告するものである。

2. 実験概要

本研究の実験は、次のように区分する。

実験Ⅰ：促進試験条件の温度・二酸化炭素濃度は一定とし、湿度を変化させた実験。

実験Ⅱ：促進試験条件を一定とし、コンクリートの水セメント比45、55、65%において単位セメント量を変化させた実験。

2. 1 使用材料および調査

セメントは市販の普通ポルトランドセメント、細骨材は長崎県壱岐郡産の海砂、粗骨材は福岡県久山産の砕石2005であり、砕石については実験Ⅰの湿度50% R. H. 及び実験Ⅱで使用したものは購入時期により物性が若干異なり、これらの物性を表-1に示す。実験Ⅰの調査は、単位水量及び単位粗骨材量を同一として、水セメント比5種類のコンクリートとそれより粗骨材を除いたモルタル5種類を設定し、表-2に示す。実験Ⅱの調査は、水セメント比45、55、65%のコンクリートの単位セメント量を変化させるため目標スランブを8、15、21cmとし9種類設定し、表-3に示す。

表-1 使用材料

材料名	種類と物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 比重 3.17
細骨材	海砂2.5mm, 表乾比重 2.62, f_m 2.47
粗骨材	表乾比重 2.82(2.96) (内は, 50%RH)
砕石2005	粗粒率 6.65(6.72) の実験で使用

表-2 実験Ⅰの調査表

記号	W/C (%)	スランブ (cm)	単位質量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
C45	45	18.3	199	443	684	1128
C50	50	18.4	199	399	719	1128
C55	55	17.8	199	361	749	1128
C60	60	17.3	199	332	776	1128
C65	65	18.0	199	307	797	1128

注)モルタルの調査は上記より粗骨材を除去し記号をM45～M65とする。促進試験湿度50%RHの実験では、粗骨材の質量は1184(kg/m³)である。

表-3 実験Ⅱの調査表

記号	W/C (%)	スランブ (cm)	単位質量 (kg/m ³)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
C4508	45	8.0	188	418	757	1157
C4515		15.5	214	476	660	1137
C4521		21.0	243	539	679	971
C5508	55	9.5	185	336	838	1151
C5515		16.2	204	371	768	1143
C5521		22.2	232	422	796	980
C6508	65	7.5	183	282	893	1145
C6515		16.0	200	307	838	1134
C6521		20.5	227	349	870	980

注) 砕石の表乾比重: 2.96

2. 2 試験体および養生

試験体は、実験Ⅰ・Ⅱともに各種類について、中性化試験体は10×10×20cmを2個、圧縮強度試験体はφ10×20cmを5個とした。成形は、ミキサーで練り混ぜた試料を鋼製型枠を用いて、一層10cmを棒突き締固めにより行った。脱型は材令2日で行い、その後、水槽（20±2℃）にて材令28日まで標準養生を行った。

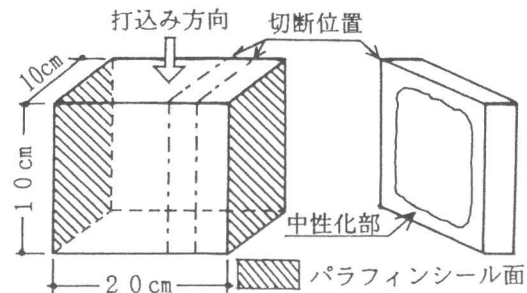


図-1 中性化試験体

2. 3 試験方法

(1). 促進中性化試験

中性化試験は、試験体を材令28日に水上げし、図-1に示すように10×10cmの二面をパラフィンシールし、恒温恒湿室（20±2℃、60％R.H.）にて前養生を7日間行った後、下記の促進試験条件に設定した試験装置により中性化を促進した。

実験Ⅰ：湿度40、50、60、80％R.H.、二酸化炭素濃度15％、温度30℃とした。

実験Ⅱ：湿度40％R.H.、温度30℃、二酸化炭素濃度15％とした。

中性化深さの測定は、試験体2個を15日間隔で90日まで図-1のように端部から順に切断し、十分に水洗いした4断面の各々について、フェノールフタレイン1％溶液による呈色反応の結果から周囲12ヵ所をノギスを用いて測定し、その平均中性化深さを求めた。

(2). 圧縮強度試験

圧縮強度は、JIS A 1108に準じ、材令28日の標準養生試験体5個の平均値を求めた。

3. 実験結果と考察

3. 1 中性化深さの経時変化

実験Ⅰの促進環境湿度を変化させた結果の一例としてモルタル及びコンクリートの水セメント比60％を図-2に示し、実験Ⅱの単位セメント量を変化させた結果を図-3に示す。中性化深さと促進期間tの関係は、図-2に示す以外の各種調査の結果も含めて、一般的な式(1)を最小自乗法で求めると、中性化速度係数Aは表-4、表-5のようになり、相関係数は0.9～1.0の範囲にあった。

$$x = A\sqrt{t}$$

(1)

ここで、 x ：中性化深さ(mm)， t ：時間(day)， A ：中性化速度係数(mm/√day)

表-4 実験Ⅰの中性化及び圧縮強度試験結果

種類	促進環境湿度(％R.H.)				Fc (kgf/cm ²)
	40%	50%	60%	80%	
	A	A	A	A	
M45	0.69	0.57	0.40	0.27	590
M50	1.12	0.84	0.63	0.43	524
M55	1.47	1.12	0.83	0.57	481
M60	1.95	1.59	1.15	0.74	416
M65	2.38	1.98	1.58	1.03	396
C45	1.02	0.80	0.62	0.43	447
C50	1.60	1.27	1.02	0.63	422
C55	2.20	1.69	1.37	0.88	394
C60	2.73	2.20	1.82	1.17	353
C65	3.55	2.84	2.39	1.55	310

実験式 $A = B(1/\sqrt{Fc} - 1/\sqrt{Fo})$ の実験定数

種類	40％R.H.		50％R.H.		60％R.H.		80％R.H.	
	B	Fo	B	Fo	B	Fo	B	Fo
コンクリート	256	548	208	545	181	536	117	538
モルタル	177	715	150	698	120	678	76	693

A：中性化速度係数(mm/√day)
Fc：材令28日圧縮強度(kgf/cm²)
促進試験温度・CO₂濃度：Tem 30℃，CO₂ 15％

表-5 実験Ⅱの中性化及び圧縮強度試験結果

W/C (%)	スランプ°08		スランプ°15		スランプ°21	
	A	Fc	A	Fc	A	Fc
45	1.17	461	1.04	457	0.97	452
55	2.34	380	2.09	398	1.92	386
65	3.64	333	3.43	313	3.26	333

A：中性化速度係数(mm/√day)
Fc：材令28日圧縮強度(kgf/cm²)
促進試験条件：Tem 30℃，CO₂ 15％，40％R.H.

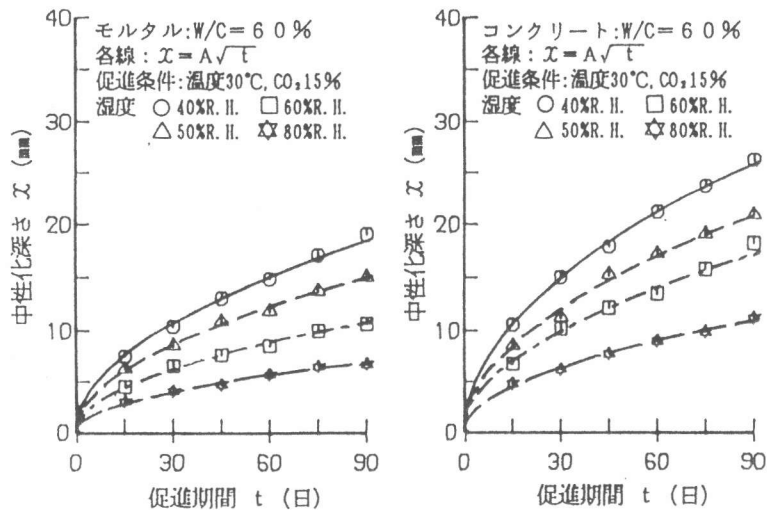


図-2 中性化深さの経時変化の例(実験I)

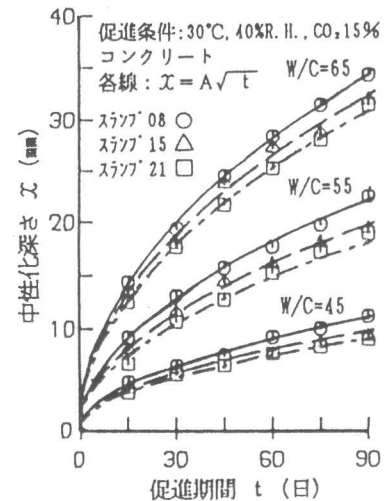


図-3 中性化深さの経時変化(実験II)

これらの結果から、中性化深さの経時変化はいずれも式(1)で精度良く表されるので、本論文では調査ごとに促進環境湿度80%R. H.を基準または同一促進試験条件のモルタルとコンクリートの水セメント比60%を基準とする中性化速度係数の比を中性化比率と定義し、中性化速度に及ぼす各要因の影響について、中性化速度係数及び中性化比率との関係をもとに以下考察する。

3. 2 促進環境湿度と中性化速度との関係

実験Iの結果より促進環境湿度と中性化速度係数との関係を図-4に示し、図-5に湿度80%R. H.の中性化速度係数を基準とする中性化比率との関係を示す。これらの図より各種の調査について、促進環境湿度80%R. H.で最も中性化速度は遅く、湿度が低くなるほどモルタル・コンクリートの中性化比率は、図-5に破線・実線で示すように60%R. H.で約1.5、50%R. H.で約2.0、40%R. H.で約2.5と中性化速度は速くなっており、本結果の範囲では促進環境湿度と中性化速度の間にはやや下凸の曲線状の関係が認められる。既往の研究によると、中性化速度係数は40~50%R. H.附近で最大となる上凸状の2次式をあてはめ、そして、環境湿度の及ぼす影響としては、空隙中の水分量に關係して二酸化炭素の拡散に影響することや空隙内水分量の多少が化学反応量に影響を与え中性化速度に関わるとする化学反応面から考察した報告もある[3]。湿度の影響について、試験体の含水状態なども考慮した詳細な実験が必要であると考えられる。

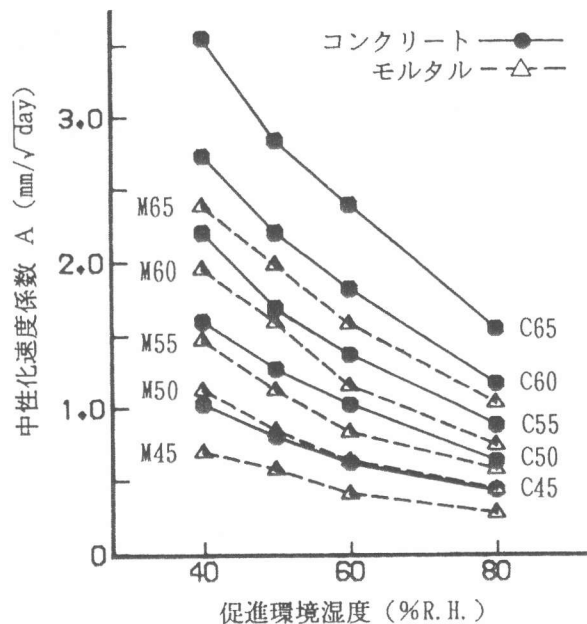


図-4 促進環境湿度と中性化速度係数との関係

3. 3 水セメント比と中性化速度との関係

実験Iの結果の表-4より促進試験条件の各湿度、モルタル及びコンクリートについて水セメ

ント比60%の中性化速度係数を基準とする中性化比率 $R_{80\%RH}$ と水セメント比との関係を求めて図-6に示す。表-4の結果から中性化速度は、水セメント比が大きいほど速く、更にモルタルに対してコンクリートは1.35~1.65倍程度速くなっている。図-6より水セメント比と中性化比率 $R_{80\%RH}$ との関係は、モルタル、コンクリート及び促進環境湿度の違いにより若干ばらつきはあるものの、いずれもほぼ同様であり、また、既往の研究[4]で指摘されている水セメント比60%以上になると中性化速度は加速化するような傾向が同様に認められる。そこで、水セメント比45~65%の範囲を一つの直線式で表しても大差は無いようであるが、各種類の結果を総合して水セメント比60%を境界とする二つの直線式を最小自乗法により求めると図中に示す実験式が得られ、1点鎖線の岸谷氏及び破線の白山氏の中性化式と比較すると[1]、水セメント比65%を除いてほぼ同じ結果を得ており、水セメント比65%では本実験の範囲からは、図-6のように中性化比率は大きい方にあるように考えられる。

3. 4 圧縮強度と中性化速度係数との関係

中性化速度係数 A は、後述の式(3)によると二酸化炭素の拡散係数 D の平方根に比例し($A \propto \sqrt{D}$)、また、拡散係数 D は圧縮強度 F_c の逆数に比例($D \propto 1/F_c$)するとすれば、中性化速度係数 A は圧縮強度 F_c の平方根に反比例($A \propto 1/\sqrt{F_c}$)することになるので、圧縮強度と中性化速度係数に関する馬場氏提案の式(2)は妥当と考えられる[5], [6]。

$$A = B (1/\sqrt{F_c} - 1/\sqrt{F_0}) \quad (2)$$

ここで、 A : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{day}}$)、 F_c : 圧縮強度(kgf/cm²)、 B, F_0 : 実験定数

そこで、実験Iの圧縮強度と中性化速度係数の実験結果について、モルタル、コンクリート及び促進環境湿度ごとに式(2)の実験定数を最小自乗法により求めた結果を表-4及び図-7に示す。図-7より圧縮強度が高くなるほど中性化速度係数は小さく中性化速度は遅くなる傾向が顕著であり、また、式(2)を示した図中の曲線と実験値は、各種類いずれも良く適合しており、圧

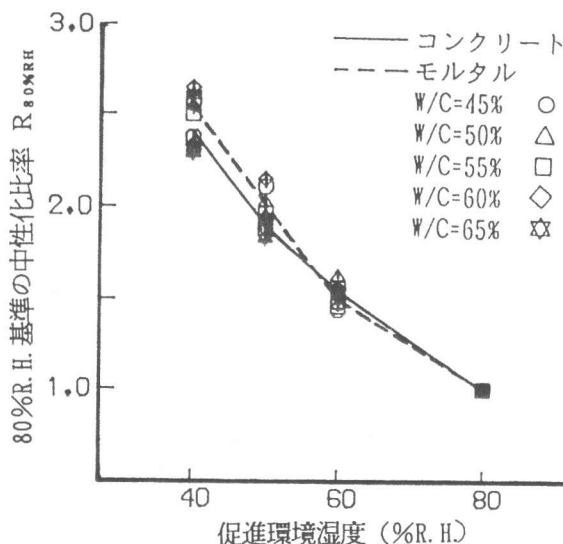


図-5 促進環境湿度と中性化比率 R との関係

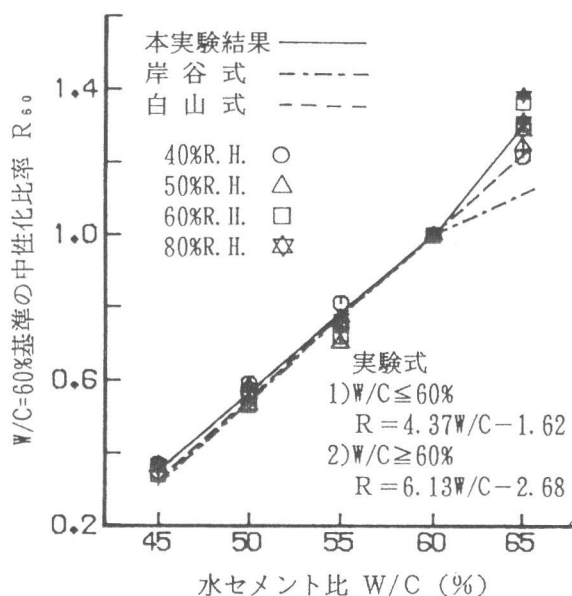


図-6 水セメント比と中性化比率 $R_{80\%RH}$ との関係

縮強度と中性化速度係数とは高い相関関係が認められた。

3. 5 単位セメント量、水セメント比と 中性化速度係数との関係

中性化速度係数Aは、コンクリート中の二酸化炭素の拡散をフィックの第一法則に従うものとし、また、拡散してきた二酸化炭素はコンクリートのアルカリと反応し固定されると仮定して式(3)の関係が得られる[6]。

$$A = \sqrt{2 \cdot D \cdot C / a} \quad (3)$$

ここで、D：二酸化炭素の拡散係数

C：表面の二酸化炭素濃度

a：アルカリとの反応により固定される二酸化炭素量

そこで、実験Ⅱの結果について式(3)から次のように考えて検討する。本実験では二酸化炭素濃度Cは一定であり、式(3)の分子は拡散係数Dに依存することから3.4に示した式(2)及び圧縮強度Fcにセメント水比説を考慮すると、 $\sqrt{2DC} = K$ に関する式として、 $K = \alpha_3 / \sqrt{Fc} - \alpha_4$

$$= \alpha_3 / \sqrt{\alpha_1 / (W/C) + \alpha_2} - \alpha_4$$

が誘導される。一方、式(3)の分母は単位セメント量Gcに関係するから $a = Gc$ と置き換えられ、中性化速度Aと単位セメント量Gc及び水セメント比W/Cとの関係について式(4)が成立することになる。

$$A = K / \sqrt{Gc} \quad (4)$$

ここで、K：W/Cに関係する係数で、 $K = \alpha_3 / \sqrt{\alpha_1 / (W/C) + \alpha_2} - \alpha_4$

α_1, α_2 ：セメント水比説(FcとW/Cとの関係)より定まる係数

α_3, α_4 ：KとW/Cの関係より定まる係数

表-3、表-5より湿度40%R.H.の各水セメント比について式(4)の係数Kを最小自乗法で求めた結果を図-8に示し、相関係数は0.84~0.98であった。図-8より式(4)は実験値を精度良く表しており、いずれも単位セメント量が増加すると中性化速度は遅くなっている。次に、図-

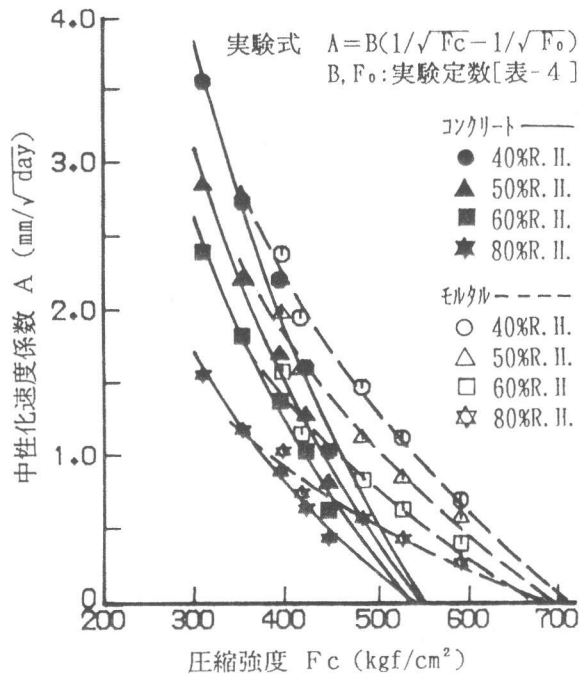


図-7 圧縮強度と中性化速度係数との関係

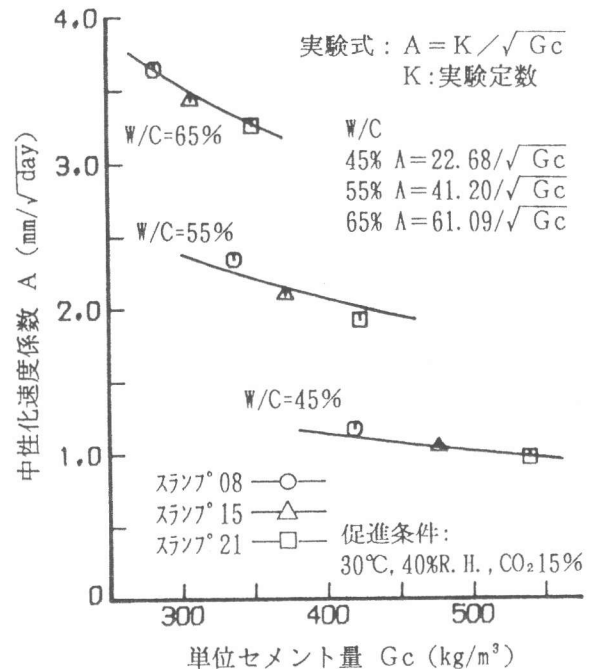


図-8 単位セメント量と中性化速度係数の関係

8に示した係数Kの値とW/Cの関係を図-9にて検討すると、図中の実線は係数Kについて最小自乗法により、まずセメント水比説の関係から α_1, α_2 を決め、続いてKとW/Cの関係より α_3, α_4 を求めた結果であり、破線は近似的に直線式を求めたものであるが、両式とも実験値と良く適合しており、中性化速度係数Aは式(5)で表されることが確認され、また、本実験範囲では直線式で表示しても大差ないようである。湿度40% R. H.の実測値と式(5)による計算値と比較すると、その比は0.93~1.08と良く一致している。この結果は限定した促進試験条件の内、湿度40% R. H.の場合に単位セメント量と水セメント比より中性化速度係数は推定できることになったが、各種の要因から中性化速度をより精度高く予測するために、更に研究を継続する必要がある。

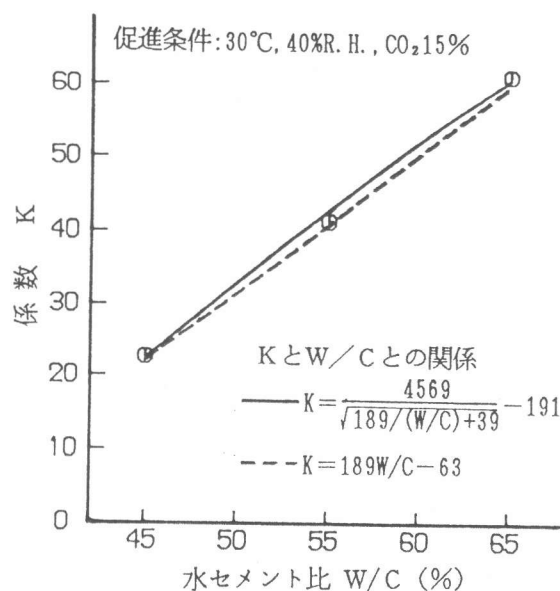


図-9 係数Kと水セメント比との関係

$$A = (4569 / \sqrt{189/(W/C) + 39} - 191) / \sqrt{Gc} \quad (5)$$

4. まとめ

本研究の促進中性化試験より得られた結果は次のように要約される。

- (1) 中性化深さの経時変化は、一般的な $\sqrt{t}$ 則に良く近似しており、中性化速度は湿度40~80% R. H. の範囲では湿度が低く、水セメント比が大きく、圧縮強度が小さいほど速くなる。
- (2) 中性化比率 R_{so} と水セメント比との関係は、W/C=60%を境界に二つの直線で良く表される。
- (3) 中性化速度係数は圧縮強度の平方根に反比例するとした実験式と高い相関関係が認められる。
- (4) 中性化速度係数と単位セメント量及び水セメント比との間には式(5)の関係が成り立つことを明らかとした。

参考文献

- 1) 岸谷孝一・西澤紀昭ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「中性化」、技報堂出版、pp. 34-40, 1986
- 2) 小林一輔・宇野祐一：コンクリートの炭酸化のメカニズム、コンクリート工学論文集、第1巻第1号、pp. 37-48, 1990. 1など
- 3) 鄭載東・平井和喜・三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第1巻第1号、pp. 85-93, 1990. 1
- 4) 鄭載東・平井和喜・三橋博三：中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第1巻第1号、pp. 61-73, 1990. 1
- 5) 馬場明生・千歩修：各種の表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定方法に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集 9-1、pp. 333-338, 1987
- 6) 福島敏夫：鉄筋コンクリート造建築物の寿命、技報堂出版、pp. 45-46, pp. 56-64, 1990