論文　既存ＲＣ建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究

平松　和嗣[*1]

要旨：経過年数 30～40 年の一般環境下の 3 建物を対象に，１枚の壁から水平方向，鉛直方向 20～30cm 間隔で集中的にコアを採取し，中性化深さ，鉄筋かぶり厚さ，仕上げ厚さの壁１枚程度の面積の範囲内の標準偏差，変動係数を調査した。旧建設省総プロＲＣ劣化診断技術指針(1986)，建築学会ＲＣ耐久設計施工指針(2004)と異なる傾向として，中性化深さの変動係数は，材令に関係なく一定ではなく，平均中性化深さが大きくなるほど小さくなること等が得られた。また，上記調査において１枚の壁に打放し部と仕上げ部を有するデータが得られたため，中性化深さ推定式の違いによる耐用年数推定への影響について考察した。

キーワード：既存建物，耐久性，中性化深さ，変動係数，かぶり厚さ，劣化予測，仕上げ

1. はじめに

一般環境下におけるＲＣ建物構造体の耐久性評価に関しては，旧建設省総合プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」（1980～84 年度）を契機として，耐久性評価のための構造調査項目・各測定法，中性化進行予測（関数形）・確率論的取扱いの研究成果が数多く，既往の学協会指針等にも反映されている。

その後，外壁補修・改修が行われるようになり，コンクリート打放し外壁，モルタル外壁には塗材，塗装等の仕上げが施され，打放し部分は非常に少なくなっている。また，外壁改修の仕様は美観・イメージ，剥落防止，漏水防止，等の観点から総合的に決まるため，外壁補修・改修仕様の多様化，工事繰返しによる外壁仕上の多様化が進み，中性化深さ調査時には工事履歴不明のケースも多い。

中性化深さの調査は，外観目視に比べて局所的となり，確率論的取扱いの際の設定値を大きくとるほど安全側評価となる。例えば，中性化深さの変動係数を 30～50％に，かぶり厚さの標準偏差を 1～2cm に変化させた池田ほか[1)]によれば，耐用年数は大きく変化しており，中性化対策要否に影響を与えると考えられる。中性化深さ，鉄筋かぶり等に関して，「(1)壁 1 枚程度の面積の範囲内のばらつき（標準偏差，変動係数）」の主要因と「(2)複数枚の壁の壁 1 枚毎の平均値のばらつき」の主要因が異なるとすれば，(1)が同程度の建物の中には，(2)が大きい建物と(2)が小さい建物が存在すると考えられる。複数枚の壁全体のばらつきについては，(2)が大きい建物では，多種多様な条件での調査データに基づくと考えられる上記文献[1)]の上限値に近づくと考えられるが，(2)が小さい建物では，(1)に近くなり，上記文献[1)]の下限値に近くなる可能性があると考えられる。

そこで，ここでは，一般環境下における撤去予定建物において１枚の壁から集中的にコア採取できる機会が得られたことから，壁１枚程度の面積を一つの調査診断評価単位とし（同一仕上げの複数の壁全体の評価には，別途何らかの方法で耐用年数の最低値を洗い出す必要がある。），中性化深さと鉄筋かぶりを正規分布とみなせると仮定し，鉄筋腐食確率により耐久性を評価するための資料とすることを目的として，中性化深さ，鉄筋かぶり厚さ，仕上げ厚さを測定し，環境条件，仕上材の抑制効果，コンクリートの品質が同一と考えられる壁１枚程度の面積の標準偏差，変動係数を調査した。

また，上記調査において，１枚の壁に打放し部分と仕上げを施された部分を有するデータが得られたため，中性化速度係数を変化させる方

*1 ＮＴＴファシリティーズ　研究開発本部　(正会員)

表－1　調査対象建物概要および調査結果

建物名	建物概要	壁名	調査階	調査面積 (m^2)	圧縮強度	屋内外（用途）		仕上げ	コア数	中性化(mm) 平均値	中性化(mm) 標準偏差	仕上げ(mm) 平均値	仕上げ(mm) 標準偏差	かぶり(mm) 平均値	かぶり(mm) 標準偏差
A	RC壁式4階建 埼玉県 1966年 38年	A1	2	14.6	28.3	屋外側		Ft	96	28.1	4.44	2	-	-	-
						屋内側	和室	Pe+P+S+M	52	11.4	4.40	27.4	5.60	-	-
							台所	Pe+P+S+M	44	8.38	5.84	24.5	5.59	-	-
		A2	3	14.5	26.4	屋内側	和室	Pe+P+S+M	51	19.5	5.41	16.1	2.39	25.9	6.73
							台所	Pe+P+S+M	45	8.09	4.86	34.4	5.75	43.2	10.6
		A3	3	18.8	33.9	屋外側		Ft	96	29.4	6.93	2	-	45.4	8.84
B	RCﾗｰﾒﾝ 5階建 埼玉県 1969年 33年	B1	2	10.2	28.9	屋内	和室	Sp+S+M	96	17.0	6.18	26.1	2.66	49.4	9.56
		B2	3	9.26	23.6	屋内	和室	Sp+S+M	96	13.9	6.52	27.5	4.97	-	-
						屋外側		Ft+M	96	2.24	0.68	45.6	5.19	-	-
		B3	3	10.1	36.8	屋外側		Ft+M	31	3.06	1.27	36.6	17.1	38.8	8.67
								Pe+M	65	2.06	1.33	35.2	9.92	49.6	10.1
C	RC壁式4階建 埼玉県 1965年 37年	C1	2	10.6	33.6	屋内側	和室	Pe+P+S	5	18.6	-	23.0	-	66.8	9.60
							押入	打放し	5	29.9	-	-	-	57.4	
							和室	P+S+M	6	16.2	-	27.0	-	72.0	
		C2	3	11.1	33.5	屋内側	和室	P+S+M	5	17.6	-	19.0	-	48.4	10.5
							押入	打放し	5	24.6	-	-	-	59.6	
							和室	P+S+M	6	11.6	-	21.8	-	69.4	
		C3	4	7.61	43.7	屋内	押入	打放し	16	29.2	3.24	-	-	52.4	6.41

圧縮強度(N/mm^2) : C1～C3 は直径 100mm コア 1 本の値（JIS A 1107），A1～B3 は小径コア 3 本の平均値(試験方法は日本建築センター･建築保全センター 建築物等の保全技術審査証明 第 0005 号)
(Ft:吹付タイル, Pe:ペイント, P:プラスター, S:しっくい, M:モルタル, Sp:セメントペースト)

法により中性化深さを推定する場合と中性化速度係数と中性化抵抗を用いて中性化深さを推定する場合の比較を行い，耐用年数推定への影響について考察した。

2. 調査概要

2.1 調査建物概要

コンクリートコアを採取した建物は, RC 造の一般環境下の 3 建物（すべて集合住宅。以下建物 A，B，C と呼ぶ。）であり，1965 年から 1969 年の間に建築されたものである。調査は，2002 年から 2004 年に実施し，**表－1** に調査対象建物の概要，調査時点での経過年数を示す。各建物から 3 枚の壁を選定し（以下壁 A1～C3 と呼ぶ。**表－1** 中にコア採取階，壁面積，屋内外別，仕上げ，仕上げ別のコア採取数を示す。

2.2 調査方法

建物 A，B では，壁 1 枚から水平方向，鉛直方向とも，20～30ｃｍ間隔で合計 96 本の直径 50mm のコアを採取した。採取したコアには, (1) 縦筋と横筋の交点を鉄筋探査機により探査して鉄筋位置までのコアを採取し，仕上げ厚さ，鉄筋かぶり厚さ, 中性化深さを測定したものと, (2) 壁貫通させてコア採取し，屋内側と屋外側の両方の仕上げ厚さ，中性化深さを測定したものがある。(2)は**表－1** のかぶり欄は｢-｣と記載した。１本のコアから仕上げ厚，中性化深さ（コア断面 6 測定点の平均値。骨材部分を除く。），鉄筋かぶり厚を求めた。96 個の仕上げ厚，中性化深さ，鉄筋かぶり厚を用いて，平均値，標準偏差を求めた。A1 屋外, A3 は仕上げ厚平均値が 2mm と小さいため，また，壁 C1，C2 はコア採取数が少ないため，変動係数検討に用いるのは困難であると考え，**表－1** の標準偏差欄は｢-｣とした。

建物 C では，壁 1 枚から 16 本のコア（小径コア(直径 20～30mm):12 本，直径 50mm:3 本，直径 100mm:1 本）を採取した。測定項目は，建物 A，B の(1)と同様である。採取した小径コアの気中質量及び水中質量を測定することにより推定した気乾密度の平均値は建物 A:2.27t/m^3，

B:2.31t/m^3，C:2.33t/m^3，骨材最大寸法の長径の平均値は建物 A:25.2mm，B:21.8mm，C:21.8mm であり，建物 A，B，C とも普通コンクリート，粗骨材の最大寸法は 25mm と推定できる。

3. 中性化深さ，鉄筋かぶり厚さ，仕上げ厚さのばらつき

3.1 中性化深さの標準偏差，変動係数

壁 A1～A3，B1～B3，C3 の平均中性化深さと中性化深さの標準偏差を**表－1** 中に示し，平均中性化深さと中性化深さの変動係数（標準偏差／平均値，**表－1** に示した値を用いて計算）の関係を**図－1** に示す（図中●）。中性化深さの変動係数は，平均中性化深さ 10mm 程度以下の場合を除けば，池田ほか [1]の 30～50%，旧建設省総合プロ劣化診断技術指針(1986)[2]の 40%よりは小さいが，建築学会ＲＣ耐久設計施工指針(2004)[3] に記載のある 10%よりは大きい傾向にある。中性化深さの変動係数は平均中性化深さが大きくなるほど小さくなる傾向にある。総プロ劣化診断技術指針 [2]，耐久設計施工指針 [3] では，中性化深さの変動係数は材令に関係なく一定 [1] の値が採用されているが，これとは異なる結果が得られた。**図－1** 中に，池田ほか [4] の図２に示されている６建物の平均中性化深さと中性化深さの変動係数を○で示す。これについても今回の得られた結果と同様に，中性化深さの変動係数は平均中性化深さが大きくなるほど小さくなる傾向にあるといえる。

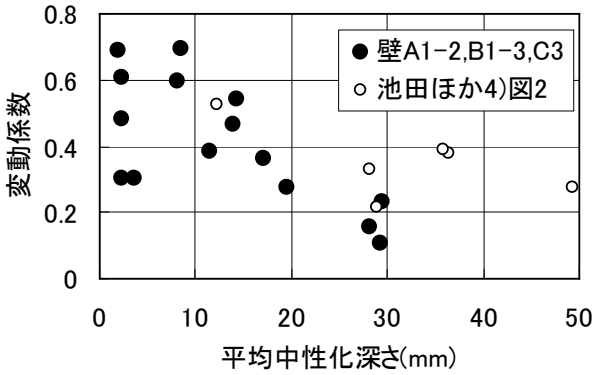
以上より，壁１枚程度の面積を一つの調査診断評価単位とし（同一仕上げの複数の壁全体の評価には，別途何らかの方法で耐用年数の最低値を洗い出す必要がある。），中性化深さと鉄筋かぶりを正規分布とみなせると仮定し，鉄筋腐食確率により耐久性を評価する目的で使用するのであれば，中性化深さの変動係数として，平均中性化深さが鉄筋かぶり厚さ程度の値を用いることができる可能性がある。

3.2 鉄筋かぶり厚さの標準偏差

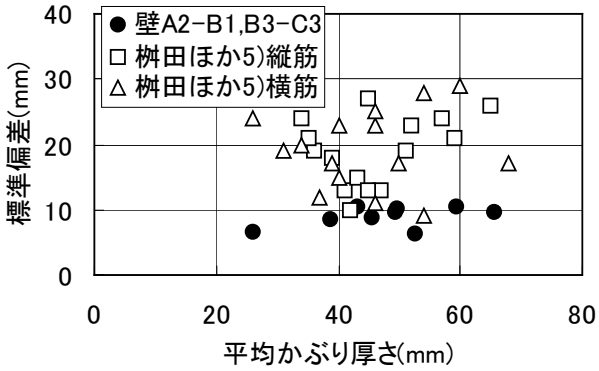
壁 A2～A3，B1，B3，C1～C3 の平均かぶり厚さとかぶり厚さの標準偏差を**表－1** 中に示し，平均かぶり厚さとかぶり厚さの標準偏差の関係を**図－2** に示す（図中●）。標準偏差は 5～10ｍｍ程度である。

図－2 中に，桝田ほか [5]の**表－1** のかぶり厚さと標準偏差を□△で示す。□は縦筋，△は横筋である。これらのデータは同一建物からのデータであるが，標準偏差 10～30mm と広範囲にばらついている。壁 A1～A3，B1～B3，C1～C3（図中●，同一建物の壁１枚の場合）は，桝田ほか [5]の下限値と同程度の値であるといえる。

壁１枚の面積が今回の壁 A1～C3（面積は**表－1** 参照）と異なる場合，複数枚の壁の壁１枚毎の平均値のばらつきが大きい場合には，複数枚の壁全体の標準偏差は，多種多様な条件での調査データを含むと考えられる上記文献 [5]の上限値に近づくと考えられる。同一仕上げの複数の壁全体の評価を行う場合，別途何らかの方法で評価対象の壁１枚の面積に応じた標準偏差，壁１枚毎の平均値の最低値を求める必要がある。



図－1　中性化深さの変動係数



図－2　かぶり厚さの標準偏差

3.3 仕上げ厚さの標準偏差，変動係数

壁 A1～A2，B1～B3 の平均仕上げ厚さと仕上げ厚さの標準偏差を**表－1** 中に示し，平均仕上げ厚さと仕上げ厚さの変動係数（標準偏差／平均値，**表－1** に示した値を用いて計算）の関係を**図－3** に示す（図中●■）。**図－3** に示した壁は**表－1** に示した壁のうち，仕上げにモルタルを含む壁 A1～A2 の屋内側和室，台所，B1～B2 の屋内側，B2～B3 の屋外側である。なお，壁 C1～C3 は標準偏差を求めるにはコア採取数が少ないと考え，**図－3** からは除外した。仕上げ厚さの変動係数は 10～50%程度である。仕上げがある場合には，中性化深さ，かぶり厚さのばらつきに加え，仕上げ厚さのばらつきも見込む必要があるケースも考えられる。

図中■は壁 B3 の仕上げ Ft+M（吹付タイル＋モルタル）部分，Pe+M（ペイント＋モルタル）部分であり，変動係数は 30～50%であり，ほかに比べて大きい。今回の調査では１枚の壁から集中的にコア採取したために判明したことであるが，仕上げ厚さがかなり異なる２つの領域に分けられることが調査終了後に判明した。Ft+M 部分，Pe+M 部分について２つの領域に分けて，平均値，標準偏差を求めて**表－2** に示すとともに，変動係数を**図－3** 中に□で示す。■ではなく□で評価すると，仕上げ厚さの変動係数は 10～20%程度である。

変動係数は既往の値を用い，平均値のみを調査において求めようとする場合のコア採取数は今回の調査より少ないので，環境条件，仕上材の抑制効果，コンクリートの品質が同一とみなせると考えていたのに実際には同一とはみなせない上記のようなケースは，判明しないままになってしまう場合が多いと考えられ，仕上げ厚さに限らず，変動係数を小さめに設定することの難しさを示唆する例であるといえる。

4. 仕上げを有するコンクリート中性化深さ推定式

4.1 既往の中性化深さ推定式

中性化速度係数を変化させる方法（コンクリート全体の速度係数が変化するように取扱う）により中性化深さ D を推定する式[1),2)]は，

$$D = \alpha\ \beta\ \gamma\sqrt{T} \qquad (1)$$

ここに，T：経過年数，α：環境条件による定数，β：仕上材による抑制係数，γ：コンクリートの品質定数，である。

ここで，$\alpha\ \beta\ \gamma$ が T によらず一定の場合，1 調査時点の T(年)と D(mm)を調査すれば，$\alpha\ \beta\ \gamma$ (mm/年 $^{1/2}$)を計算できる。

コンクリートの中性化速度係数，仕上げの中性化抵抗を用いる中性化深さ推定式[6),7),3)]は，

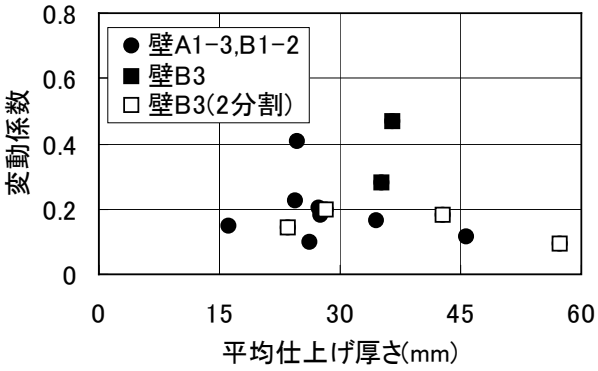
$$D = Ac\sqrt{T} \text{（打放し）} \qquad (2)$$

$$D = Ac(\sqrt{T} - R) \text{（セメント系）} \qquad (3)$$

$$D = Ac(\sqrt{T + R^2} - R) \text{（非ｾﾒﾝﾄ系）} \qquad (4)$$

ここに，Ac：中性化速度係数(mm/年 $^{1/2}$)，R：中性化抵抗(年 $^{1/2}$)，である。

(3)，(4)式による場合，仕上げがセメントモルタルのような中性化される能力のある場合と中性化される能力のない場合の違い等を考慮できるが，実用的観点からいうと，調査対象仕上げの１調査時点の T と D だけから Ac と R の両方



図－3　仕上げ厚さの標準偏差

表－2　壁 B3 の調査結果

壁名	仕上げ(点数)		中性化(mm)		仕上げ(mm)		かぶり(mm)	
		内訳	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
B3	Ft+M (31)		3.06	1.27	36.6	17.1	38.8	8.67
		12	2.21	1.07	57.3	5.29	39.3	13.8
		19	3.60	1.10	23.6	3.42	38.4	2.91
	Pe+M (65)		2.06	1.33	35.2	9.92	49.6	10.1
		31	1.88	1.30	42.7	7.88	51.3	11.6
		34	2.23	1.36	28.2	5.58	48.1	8.50

(Ft:吹付タイル,Pe:ペイント,M:モルタル)

を計算することはできない。環境条件，コンクリートの品質が同一の打放し部分と仕上げ部分が存在すれば，打放し部分の D と T から(2)式により Ac を求め，T，D，Ac から(3)，(4)式により R を求めればよいが，そのようなケースはほとんどない。

4.2 打放し部と仕上げ部の D による Ac,R の推定

壁 C1，C2 において，壁 1 枚中に打放し部分とモルタル仕上げ部分，塗り仕上げ部分が含まれるデータが得られた。1 仕上げ当りのコア採取数が少なくなり，ばらつきの検討には使えなかったが, 壁 C1, C2 については以下の検討を行った。

T と打放し部分の D から(2)式により Ac を算出し，T，仕上げ部分の D，Ac から(3)，(4)式により R を算出し，(1)式によるαβγとともに**表－3** の 4.2 欄に示す。

4.3 仕上げ厚の異なる D_1,D_2 による Ac,R の推定

壁 C2 の仕上げ部分については，中性化深さがかなり異なる領域があることが確認できたため，R(年 $^{1/2}$)が仕上げ厚さ S(mm)に比例すると仮定し，R_1=R'×S_1，R_2=R'×S_2 として，「Ac と R' (年 $^{1/2}$/mm) の連立方程式 $D_1 = Ac(\sqrt{T} - R'S_1)$，$D_2 = Ac(\sqrt{T} - R'S_2)$」を解くことにより，Ac，$R_1$，$R_2$ を算出し，**表－3** の 4.3 欄に示す。D_1，D_2，S_1，S_2 は**表－1** に示した平均値を用いた。ここで求めた Ac は, 4.2 で求めた Ac とかけ離れており，1 調査時点の仕上げ厚さの異なる D_1，D_2 による Ac，R の推定は難しいといえる。

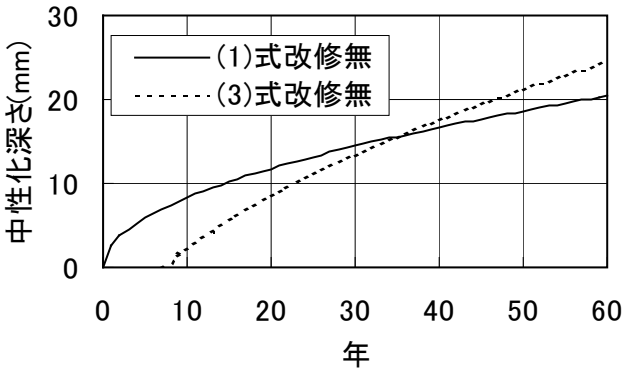
4.4 中性化深さ推定式の違いによる耐用年数推定への影響

中性化速度係数を変化させる方法（(1)式）により中性化深さを推定する場合と中性化速度係数と中性化抵抗を用いて中性化深さを推定する場合（(3)(4)式）の比較を行い，耐用年数推定への影響を調べることを目的として，4.2 において算定した Ac，R を用いて，(1)式と(3)式により壁 C1 のモルタル仕上げ部分の中性化深さと経過年数の関係を求め, **図－4** 中に濃い実線と点線で示す。また，(1)式と(4)式により壁 C1 の塗り仕上げ部分の中性化深さと経過年数の関係を求め，

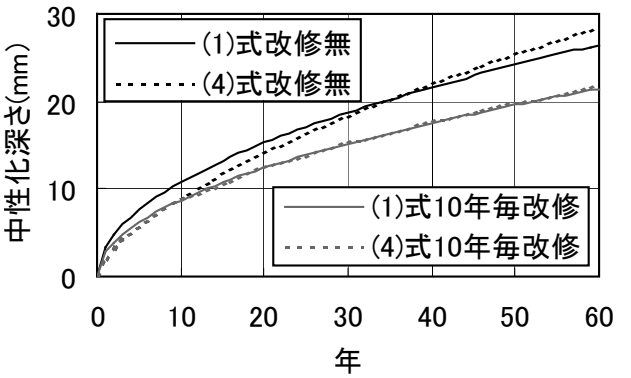
表－3　壁 C1，C2 のαβγ，Ac，R

壁名	仕上げ	中性化 (mm)	4.2			4.3	
			αβγ	Ac	R	Ac	R
C1	Pe+P+S	18.6	3.06	－	3.00	－	－
	打放し	29.9	4.92	4.92	－	－	－
	P+S+M	16.2	2.66	－	2.79	－	－
C2	P+S+M	17.6	2.89	－	1.73	9.59	4.25
	打放し	24.6	4.04	4.04	－	－	－
	P+S+M	11.6	1.91	－	3.21	9.59	4.87

（αβγ，Ac：mm/年 $^{1/2}$，R：年 $^{1/2}$）



図－4　中性化深さ推定式の違いによる耐用年数推定への影響（モルタル仕上げ）



図－5　中性化深さ推定式の違いによる耐用年数推定への影響（塗り仕上げ）

図－5 中に濃い実線と点線で示す。なお，(1)式による曲線は経過年数 35 年の値を(3), (4)式による値に一致させて描いたものである。モルタル仕上げ部分，塗り仕上げ部分とも，経過年数 60 年の中性化深さは(1)式による値のほうが小さくなっており，耐用年数推定の観点からいうと危険側である。ただし，この結果は新築時点～調査時点～60 年まで改修等を全く行わない場合の

値である。

現実的には，調査時点までに，美観・イメージ，剥落防止，漏水防止等の観点から何らかの改修・補修が行われ（工事履歴不明の場合が多い），調査時点以降も調査時点以前と同様の改修・補修が行われていくと考えられる。ここでは, (1)式と(4)式により 10 年毎に改修した場合の塗り仕上げ部分の中性化深さと経過年数の関係を求め，**図－5** 中に薄い実線と点線で示す。(4)式による曲線については，(4)式は，耐久設計施工指針[3)]の（解 5.2.3）式を参考にすれば,

$$\frac{D^2}{2}=\int_0^D xdx=\frac{Ac^2}{2}\int_0^T(1-R/\sqrt{t+R^2})dt \quad (5)$$

ここに，x ：中性化深さ(mm)，t ：時間(年)

と表現できるので，$(1-R/\sqrt{t+R^2})$ の t を経過年数ではなく，$t=\mathrm{mod}(t,10)$ （t を 10 で割った剰余）として計算したものである。(1)式による曲線は経過年数 35 年の値を(4)式による値に一致させて描いたものである。ここでは示していないが 30 年に一致させた値も大差はなかった。この場合は, 0～60 年まで改修なしのケースとは異なり，(1)式による値と(4)式による値はほとんど差がないといえる。

モルタル仕上げ部分については，(1)式を用いる場合，例えば西川ほか[8)]のように，β を経過年数の関数として取り扱う方法，モルタルをコンクリートとみなす方法等を考える必要がある。

5. まとめ

経過年数 30～40 年の一般環境下の 3 建物を対象に, 1 枚の壁から水平方向, 鉛直方向 20～30cm 間隔で集中的にコアを採取し，中性化深さ，鉄筋かぶり厚さ，仕上げ厚さの壁 1 枚程度の面積の標準偏差，変動係数を調査した。旧建設省総プロＲＣ劣化診断技術指針(1986), 建築学会ＲＣ耐久設計施工指針(2004)と異なる傾向として，中性化深さの変動係数は，材令に関係なく一定ではなく，平均中性化深さが大きくなるほど小さくなること等が得られた。また，上記調査において 1 枚の壁に打放し部と仕上げ部を有するデータが得られたため，中性化深さ推定式の違いによる耐用年数推定への影響について考察した。

参考文献

1) 池田美和ほか : 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の研究（その２），日本建築学会大会，pp.525-526，1984.10
2) 国土開発技術研究センター建築物耐久性向上技術普及委員会編 : 建築物の耐久性向上技術シリーズ建築構造編Ｉ鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，技報堂出版，pp.45-46（第１章　鉄筋コンクリート造建築物の劣化診断技術指針・同解説「5.2.6 残存耐用年数の推定」解説），1986.6
3) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，pp.106-107（5.2.f.解説），p.7（5.2.g.h.本文），pp.96-97（5.2.e.解説），2004.3
4) 池田美和ほか : 既存ＲＣ構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について（その２），日本建築学会大会，pp.203-204，1983.9
5) 桝田佳寛ほか : 実際の鉄筋コンクリート建築物における鉄筋のかぶり厚さの実態，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.7，No.1，pp.45-48，1985.6
6) 馬場明生ほか : 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，Vol.9，No.1，pp.333-338，1987.6
7) 外装仕上げおよび防水の補修・改修技術出版企画編集委員会編，: 外装仕上げおよび防水の補修・改修技術　第３編，日本建築センター・建築保全センター，経済調査会，p.92（6.4 補修・改修による目標性能とレベルの設定解説「コンクリートの外壁仕上げ材料の躯体保護効果 2.1 中性化抑制効果」），1992.7
8) 西川忠雄ほか : 既存ＲＣ造局舎における構造体コンクリートの実態調査（その５），日本建築学会大会，pp.119-120，1985.10