

論文 反発度法により推定した構造体コンクリート強度に影響する要因の研究

三井 健郎^{*1}・米澤 敏男^{*2}・北川 高史^{*3}・今城 宏三^{*4}

要旨：リバウンドハンマーで測定した反発度と構造体コンクリート強度の関係に影響する要因の影響度を把握することを目的に、コンクリートの水セメント比、暴露環境、含水条件および試験材齢を因子として実験的検討を行った。その結果、反発度と構造体コンクリート強度の関係に対して、中性化の進行の影響度がきわめて大きいことを特定するとともに、含水条件によって両者の関係はある程度シフトするが含水条件の影響度は小さいこと、水セメント比と材齢は両者の関係に直接影響するのではなく中性化の進行を介して見かけ上現れることなどがわかった。

キーワード：コンクリート強度、リバウンドハンマー、反発度、材齢、中性化、含水率

1. はじめに

リバウンドハンマーを使用した反発度法は構造体コンクリート強度(以下コンクリート強度と略記)を推定する手法として、装置や測定が簡便であり、広く用いられている。

一方、反発度法によるコンクリート強度の推定は、表面で測定した反発度と内部のコンクリート強度に相関関係があるとの仮定に基づいているが、測定値はコンクリートの材料、配(調)合、養生条件、含水率、材齢などの要因に影響されることが指摘されている^{1)~3)}。しかしこれらの要因の中から反発度に影響する度合いの大きい要因を特定することとその定量化は進んでいない。このことが反発度からのコンクリート強度の推定精度を不十分なままとしており、構造物ごとにコアで測定した強度に基づいて補正しているのが現状である。

本研究は、反発度法によるコンクリート強度の

推定精度の向上技術を検討するため、反発度とコンクリート強度の関係に影響する諸要因について実験的検討を行い、それらの影響度について検討するとともに主たる影響要因を特定したものである。

2. 実験

2.1 実験の概要

本実験では、コンクリート壁を模擬した試験体を用いて各種試験を行い、反発度とコア強度の関係に及ぼす諸要因の影響について評価を行った。実験の因子と水準を表-1に示す。

表-2 骨材の物理的性質

	種類	産地	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	粗粒率
細骨材	陸砂	茨城県鹿島	2.54	1.93	1650	2.43
粗骨材	碎石	栃木県葛生	2.61	1.08	1610	6.53

表-1 実験の因子と水準

因子	水準
水セメント比	40%, 55%, 70%
暴露環境	屋外, 屋内, 促進中性化
含水条件	無処理, 水噴霧, 24時間吸水
試験材齢	28日, 50日, 100日, 200日, 500日, 1000日

表-3 コンクリートの配(調)合

No.	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
1	40	18	4.5	37.5	198	495	583	993
2	55	18	4.5	45.6	190	345	774	946
3	70	18	4.5	48.2	187	267	855	937

*1 (株)竹中工務店技術研究所 主席研究員(正会員)

*2 (株)竹中工務店技術研究所 部長 Ph.,D(正会員)

*3 関西電力(株)土木建築室

*4 近畿コンクリート工業(株)建築事業部

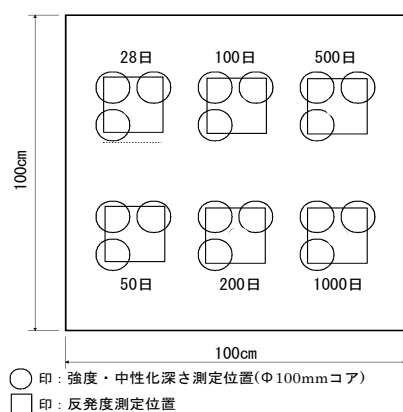


図-1 試験体の形状と測定位置

2.2 使用材料とコンクリートの配(調)合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。骨材の物理的性質を表-2, にコンクリートの配(調)合を表-3に示す。

2.3 試験体

試験体は図-1に示す厚さ30cm×高さ100cm×幅100cmの壁状試験体とした。壁の両面を反発度などの試験面とし、試験面以外の周囲4面をエポキシ樹脂でコーティングした。

2.4 暴露環境

試験体はコンクリート打設後、材齢5日まで湿潤養生した後に脱型し、材齢7日から表-1に示した暴露環境に暴露し所定の材齢で測定を行った。促進中性化の環境条件は、CO₂濃度=5.0%, 温度=20℃, 湿度=60%R.H.とした。

2.5 含水条件

反発度測定時のコンクリートの表面含水率(以下含水率と略記)の影響を把握するため、試験面をA:無処理, B:水噴霧(表面に水膜ができる程度に試験直前に噴霧), C:24時間吸水(試験面に密着する容器で吸水)の3種の含水条件とした。

2.6 測定方法

(1) 含水率

反発度の測定直前に静電誘導式の表面水分計(K社製)により含水率を測定した。この方法では概ね表面から10mm程度の含水率が測定されている。

(2) 反発度

反発度の測定は、NR型リバウンドハンマーを用いて日本建築学会「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」³⁾に従い、図-1

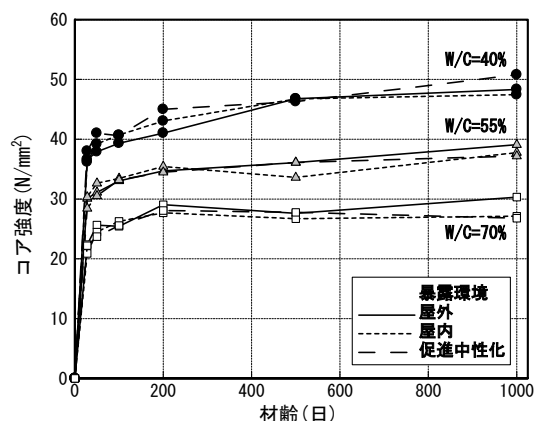


図-2 コア強度と材齢の関係

に示す位置で測定した。

(3) コア強度

反発度測定後、JIS A-1107にしたがい、図-1に示す位置でφ100mmのコアを採取し、両表面側50mmを除いた長さ200mmのコア供試体の圧縮強度(以下、コア強度という)を測定した。

(4) 中性化深さ

コア強度試験時に除いたコアの両表面側50mmの試験体の割裂面でフェノールフタレイン法により中性化深さを測定した。

3. 実験結果

3.1 コア強度

試験体から採取したコア強度と材齢の関係を図-2に示す。コア強度は材齢200日程度まで増加するがそれ以降の増加は小さく、水セメント比40%, 55%の場合は材齢1000日までで5N/mm²程度の増加が、水セメント比70%では増加はほとんど見られなかった。また暴露環境の違いによるコア強度の差異は認められなかった。

3.2 含水率

図-3に含水率と材齢の関係を示す。含水条件が無処理および水噴霧の場合、含水率は材齢とともに若干減少するものの全体としては4~5%の範囲にあり材齢の進行に伴う変化は小さい。24時間吸水の場合、材齢200日程度までは他の2条件に比べて大きな含水率を示すが、200日を越える長期材齢では他の条件との違いは小さかった。

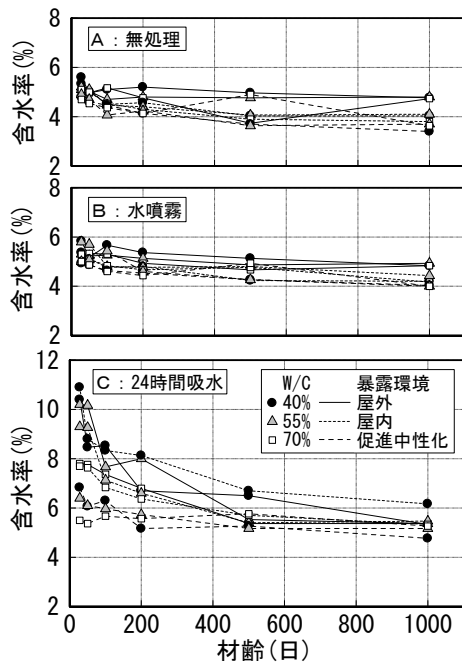


図-3 含水率と材齢の関係

3.3 中性化深さ

図-4に中性化深さと材齢の関係を示す。中性化深さは、促進中性化が最も大きく、次いで屋内、屋外の順であった。また水セメント比が70%と55%で中性化深さが大きい傾向を示した。水セメント比40%ではいずれの暴露環境においても中性化の進行は極めて小さかった。

3.4 反発度と実験因子の関係

(1) 反発度と材齢の関係

図-5に含水条件が無処理の場合の反発度と材齢の関係を示す。この関係には、暴露環境の違いが大きく影響している。特に促進中性化環境での反発度の増加は著しく、材齢200日程度まで反発度は急激に増加している。屋内、屋外の環境では促進中性化環境よりも反発度の値は小さいが、屋内では材齢500日程度、屋外では材齢200日程度まで反発度が増加している。

(2) 反発度と含水率の関係

反発度と含水率の関係を図-6に示す。含水率が大きくなると反発度は小さくなる傾向が見られる。ただし含水率が6%以上のデータは図-2、図-3からわかるようにいずれも含水条件が24時間吸水で材齢初期の低強度時の反発度を反映したものであり、反発度と含水率の関係は図-6では必ずしも明確とは言えない。

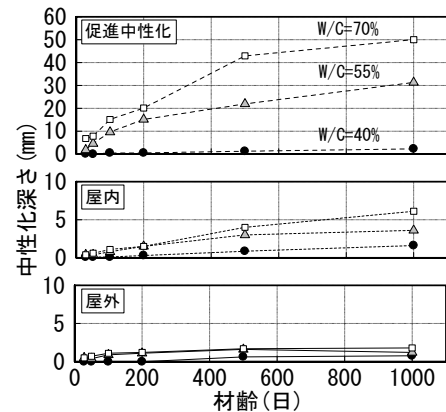


図-4 中性化深さと材齢の関係

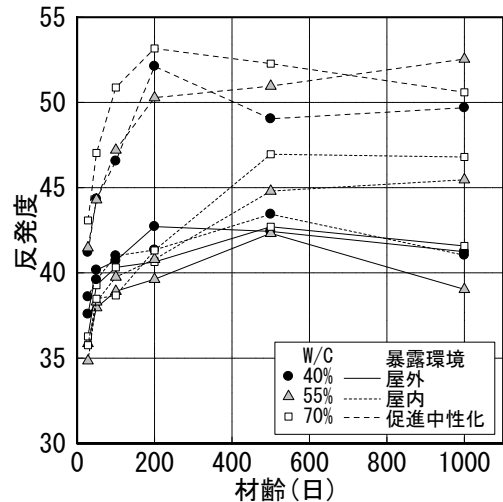


図-5 反発度と材齢の関係(含水条件:無処理)

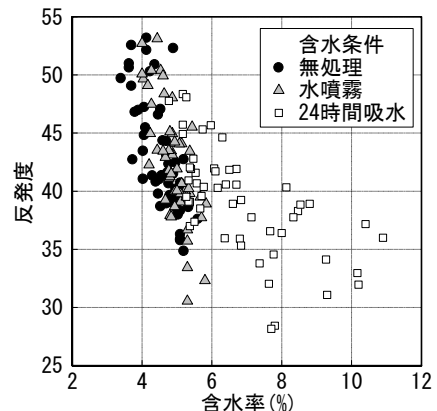


図-6 反発度と含水率の関係(全データ)

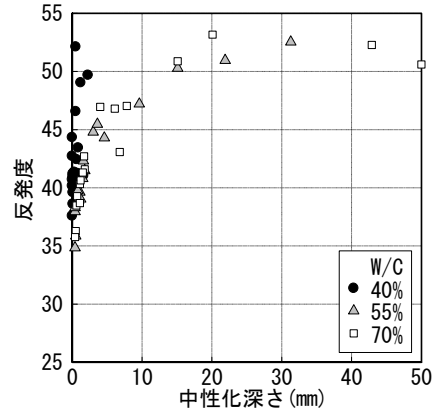


図-7 反発度と中性化深さの関係(含水条件:無処理)

(3) 反発度と中性化深さの関係

図-7に含水条件が無処理の場合の反発度と中性化深さの関係を示す。中性化深さが5mm程度までは中性化深さが大きくなると反発度が増大する。しかし、それ以上中性化が進行しても反発度の変化は少ない。即ち、中性化の影響は深さ5mm程度までということになる。逆にいえば、反発度は表面からこの深さまでの情報を反映していると考えられる。

3.5 コア強度と反発度の関係に及ぼす実験因子の影響

(1) 全体の相関と水セメント比の影響

コア強度と反発度の関係の全データを図-8に示す。水セメント比が同一であれば両者にある程度の直線関係が認められるが、全体としてはコア強度と反発度の相関係数 r は0.325と小さく、このままでは反発度からコア強度を推定することが難しいことがわかる。水セメント比によってコア強度と反発度の関係が相違するのでも反発度法の目的から考えて不都合である。

(2) 含水条件の影響

図-9にコア強度と反発度の関係に及ぼす含水条件の影響を屋外暴露の場合について示す。無処理・水噴霧に比べ24時間吸水で反発度が若干低下する傾向が見られるが影響は小さい。

(3) 暴露環境の影響

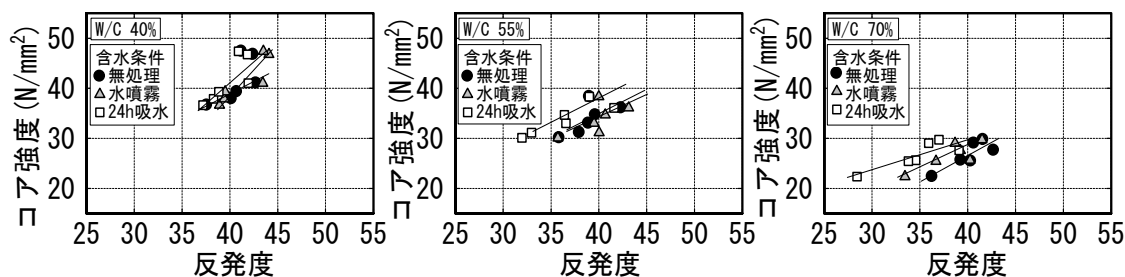


図-9 コア強度と反発度の関係に及ぼす含水条件の影響(暴露環境:屋外)

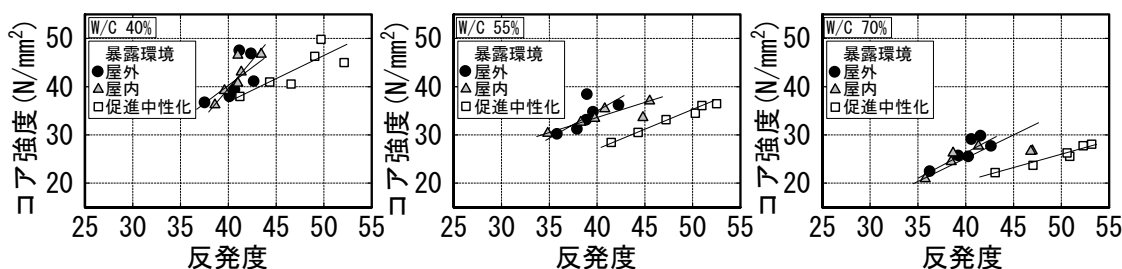


図-10 反発度とコア強度の関係に及ぼす暴露環境の影響(含水条件:無処理)

コア強度と反発度の関係に及ぼす暴露環境の影響を図-10に示す。屋内と屋外の違いは小さいが、促進中性化の場合は反発度は相当大きくなり中性化の影響が強いことがわかる。

4. 考察

コア強度と反発度の関係に影響する要因のうち、従来から影響が大きいと考えられているものの、その影響度が結論されていない含水率、中性化深さ、材齢について本研究の実験結果から考察する。

4.1 含水率の影響

屋外暴露の場合に含水条件の影響が小さいことを図-9で示したが、他の2条件の場合についても検討する。

図-11には、含水条件を無処理とした場合の

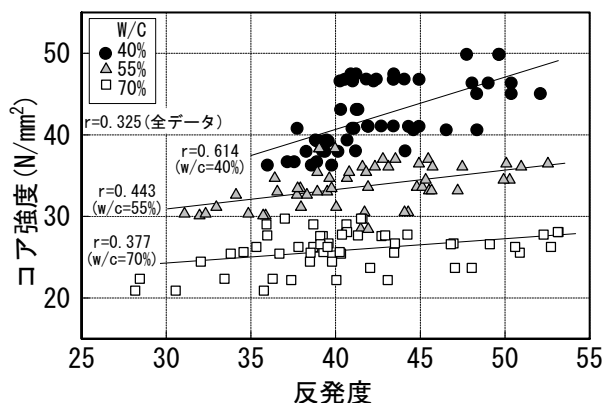


図-8 コア強度と反発度の関係(全データ)

コア強度と反発度の関係を暴露環境別に示す。図-12には、含水条件を24時間吸水とした場合の反発度とコア強度の関係を示す。24時間吸水による含水率の増大により水セメント比の大きい場合(70%)に反発度は若干小さくなる傾向を示すものの、図-11と図-12でコア強度と反発度の関係はほぼ同様であり、表面の含水率はコア強度と反発度の関係を大きく変えるものではないと判断される。測定時の条件を標準化することにより含水率の影響を小さくすることが可能であり、実用的には無処理で測定してよいと考えられる。

4.2 中性化深さの影響

図-13には、含水条件が無処理の場合のコア強度と反発度の関係を、(a)中性化がほとんど進行していない中性化深さ0～1mmの領域、(b)中性化深さの増加に伴って反発度が増加する1～5mmの領域および(c)図-7に示したように中性化深さによって反発度がほとんど変化しなくなる5mm以上の領域、の3つに層別して示した。

中性化が進行していない0～1mmの範囲では暴露環境、水セメント比にかかわらずコア強度と反発度の相関は比較的高い。しかし中性化深さが1～5mmおよび5mm以上では両者の相関は小さい。

図-8や図-11、図-12に示したように、水セメント比によってコア強度と反発度の関係が相違するのも水セメント比によって中性化の程度が異なることが主な理由と考えられ、中性化深さの進行

がこの関係に影響する大きな要因であることが結論できる。

4.3 材齢の影響

構造物の反発度の測定では材齢の影響が強く現れるとの考えから、材齢の経過に伴う見かけの反発度の増大を表-4に示す材齢係数を測定値に乗じて補正する方法(DIN 4240-1962)⁴⁾が提案されている。この考え方の妥当性も含め、コア強度と反発度の関係に及ぼす材齢の影響を下記の方法で材齢係数として検討した。

反発度によるコンクリート強度推定式として日本材料学会式⁵⁾に準じた(1)式を用いて、材齢28日のコア強度と推定強度が一致するよう定数Cを定め、各材齢におけるコア強度に対する推定強度の比を材齢係数として求めた。

$$F_{cn} = 0.098^* \times (13R - C) \quad (1)$$

$$\alpha_n = F_{cn} / F_{en} \quad (2)$$

ここに F_{cn} ：材齢n日のコア強度(N/mm²)

F_{en} ：材齢n日の推定強度(N/mm²)

R：反発度,

C： $F_{c28} = F_{e28}$ となるように定めた定数

α_n ：材齢n日の本実験による材齢係数

*:CGS単位からSI単位への換算係数

図-14に本実験結果により算定した材齢係数とDIN 4240(1962)の材齢係数を示す。屋外環境では材齢係数の値は水セメント比、材齢によらずほぼ1.0であり、DINの材齢係数による

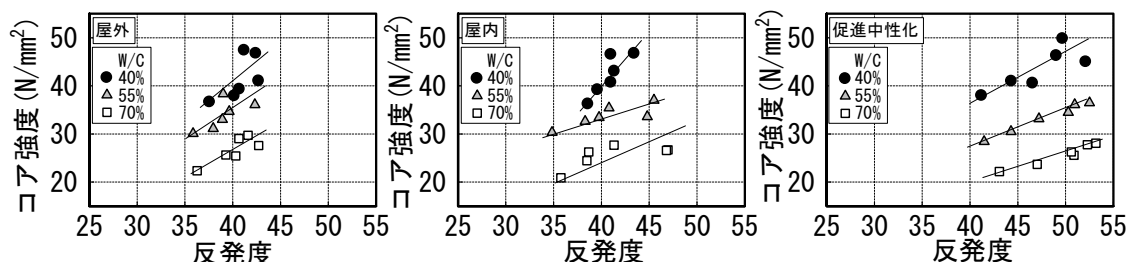


図-11 コア強度と反発度の関係(含水条件：無処理)

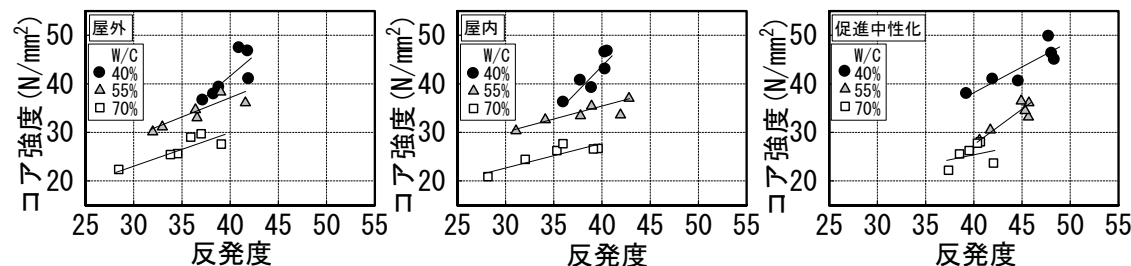


図-12 コア強度と反発度の関係(含水条件：24時間吸水)

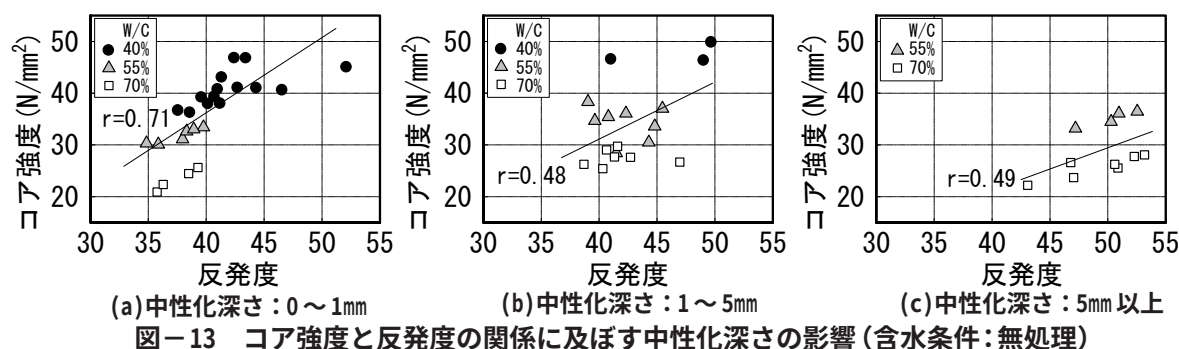


図-13 コア強度と反発度の関係に及ぼす中性化深さの影響(含水条件：無処理)

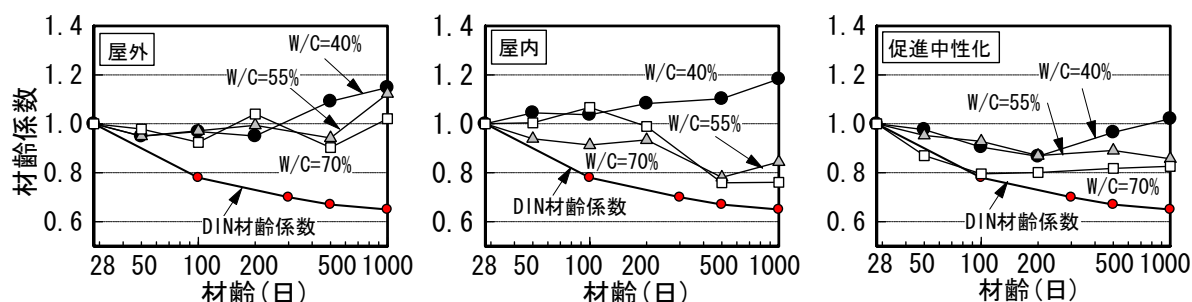


図-14 材齢係数に及ぼす水セメント比、暴露環境の影響(含水条件：無処理)

補正の妥当性は認められない。屋内および促進中性化環境では、水セメント比40%の場合の材齢係数はほぼ1.0で一定であるのに対し、水セメント比55%および70%では材齢の経過とともに材齢係数が低下している。図-4に示したように促進中性化と屋内の環境で水セメント比55%および70%の場合に中性化が大きく進行しており、図-7に示すように中性化の進行により反発度は増大する。したがって、材齢の影響は材齢そのものの影響ではなく、中性化の進行の影響が材齢とともに現れていると考えるのが妥当である。反発度から強度を推定するためには中性化の影響を評価することが必要であり、これができるれば反発度法によるコンクリート強度の推定精度が向上することになると考えられる。

5. まとめ

- (1) 表面の含水率は反発度の測定値に影響するが、コア強度と反発度の関係を大きく変えるものではない。
- (2) 中性化の進行により反発度は大きくなるが中性化深さが5mm程度以上では中性化の進行は反発度に影響しない。
- (3) 中性化の進行によってコア強度と反発度の関係は大きく変化してしまい、中性化がこの関

表-4 DIN 4240(1962)の材齢係数⁴⁾

材齢(日)	28	100	300	500	1000	3000
α	1.00	0.78	0.70	0.67	0.65	0.63

係に最も大きな影響を及ぼす要因であることが特定される。水セメント比によってこの関係が相違するものも中性化の影響が大きい。

- (4) 材齢はコア強度と反発度の関係に直接影響しているのではなく、コア強度と反発度の関係が中性化に影響される結果として見かけ上現れるものと考えられる。

参考文献

- 1) 佐治泰次ら：鉄筋コンクリート造の耐蝕調査研究，日本建築学会九州支部研究報告，Vol.49，pp49-54，1954
- 2) 木村敬三：RC建築物のコンクリート強度と耐久性，鹿島出版，1981
- 3) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，PP.26，1983
- 4) DIN 4240, Kugelschlagprüfung von beton mit dichtem gefuge, 1962.4
- 5) 日本材料試験協会・実施コンクリート強度判定委員会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法(案)，材料試験(材料)，Vol.7，No.59，1958