

簡易な非破壊試験による RC 建築物の劣化度評価

佐藤 一郎**, 小野 博宣*, 渡辺 健治*

An Evaluation for RC Structure with Simple Non-destructive Tests

Ichiro SATO**, Hironobu ONO* and Kenji WATANABE*

(Received June 12, 2002)

This experimental study was carried out to investigate the simple tests evaluation method for the durability(persistence) of reinforced concrete. The first program was examined as follows: First test method was measured the fundamental dare of mechanical strength comparing with ultrasonic wave propergation velocity for deteriorated test pieces by freezing and thawing action. Other test method was observed the color diffrence, crack propergation length, measured ultrasonic wave velocity and inquired into steel bar in concrete columns and walls of Chubu University buildings. This method of non-destructive test is useful to estimate the durability of a reinforced concrete building.

Keywords: freezing and thawing action, non-destructive test, evaluation for RC structure

1. 結 論

建物の劣化度診断の最も難しい点の一つは、所有者の理解を得る事である。建物を傷つける破壊試験は勿論のこと、建物を全く傷つけない非破壊試験であっても、「調査する」ということは、問題が生じている可能性を示しており、風評を含め、建築物の評価、価値が下がる危険性がある。

さらに問題なのは、非破壊試験の信頼性と、実際の物性値との相関性である。非破壊試験の信頼性は破壊試験に比べて必ずしも良くない。だからと言って破壊試験を行えば信頼性の高いデータが取れると言うものでもない。仮に破壊試験であるコア供試体による判定を行ったとしても、部分破壊する上に一部の検査であるため、建物の全体像が掴みにくいといった問題がある。

このように、建物の劣化度を診断するためには、多くの問題があるものの、寿命を迎えようとしている建物が急速に増加しようとしている現在、なんらかの有効的な方策を探る必要がある。

本研究では、まず①実験室レベルで凍結融解作用によりコンクリート供試体の劣化度を任意に促進させ、それぞれの劣化段階での基礎物性値と非破壊試験値の関係について検討し

た。次に②実際の建物(三浦学園内)について、建物を全く傷つけることなく、簡易かつ迅速にできる非破壊調査として外観調査(色差分布調査、ひび割れ調査)、躯体調査(超音波伝播速度法、鉄筋探索調査)を行う。それら調査データを基に複合的な劣化度診断を検討する。

2. 劣化したコンクリートの基礎的物性

2.1 実験概要

(1) コンクリートの調査および供試体作製

コンクリートの調査を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材および粗骨材(最大寸法10mm)には木曽川産川砂(密度 2.56g/cm³、および 2.60g/cm³)を用いた。なお、供試体の形状寸法は、4×4×16cm とした。

表-1 コンクリートの調査

Series	W/C (%)	s/a (%)	Weight(kg/m ³)				Air (%)	Sl (cm)
			W	C	S	G		
N-40	40	42	180	450	715	987	1.8	8
N-55	55	42	180	327	756	1044	1.7	12
N-70	70	42	180	257	780	1077	1.7	14

s/a:細骨材率、W:単位水量、C:単位セメント量、S:細骨材、G:粗骨材、Air:空気量、Sl:スランプ

*建築学科 (Department of Architecture)

**建設工学専攻大学院生(Graduate Student, Constructional Engineering)

(2) 実験方法

(a) 凍結融解試験

水中養生させた材齢 7 日の供試体を 0、10、30、60 サイクルの 4 段階に劣化促進させた。なお、本試験は、JIS A 6204 附属書「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して養生したが、供試体の寸法は上記のように小さく、供試体容器は、用いていない。

(b) 促進中性化試験および測定方法

中性化促進は、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の条件で行い、中性化深さの測定は 1% フェノールフタレイン溶液の噴霧によって行った。なお、測定は、促進日数 3 日、7 日目に行った。

(c) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、材齢 28 日に行った。なお、同時に、動弾性係数、超音波伝播速度の測定も行った。

2.2 実験結果と考察

(1) 相対動弾性係数

写真-1 に N-40、写真-2 に N-55、写真-3 に N-70 の凍結融解によって劣化した供試体を示す。また、図-1 に相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係を示す。低水セメント比なもののほど、低下率は小さく N-40 の供試体は、ほとんど劣化が見られなかった。しかし、同図より、N-55 の供試体は、30 サイクル、N-70 の供試体は、10 サイクルくらいから、急速に劣化していることがわかる。

(2) 超音波伝播速度

図-2 に、超音波伝播速度と凍結融解サイクル数の関係について示す。凍結融解 0、10 サイクルまでの各シリーズの超音波伝播速度には、大きい差が見られなかった。しかし、N-55 の供試体は、30 サイクル以降で超音波伝播速度が低下した。N-70 の供試体では、10 サイクルを過ぎた時点からすでに、超音波伝播速度が低下していくのが観察された。

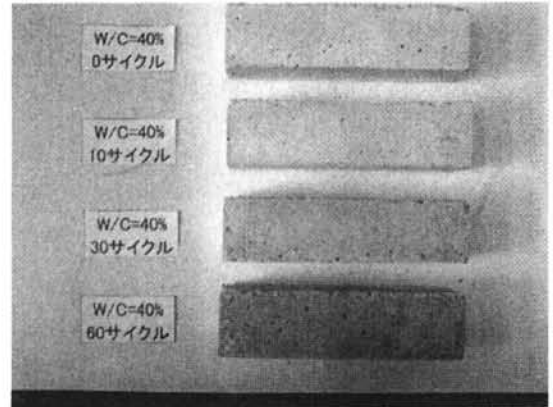


写真-1 N-40 (W/C=40%) の劣化した供試体

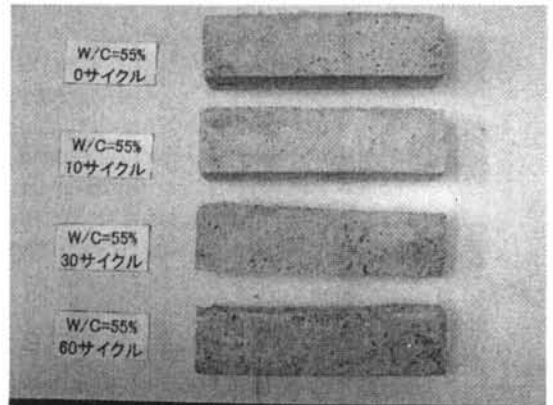


写真-2 N-55 (W/C=55%) の劣化した供試体

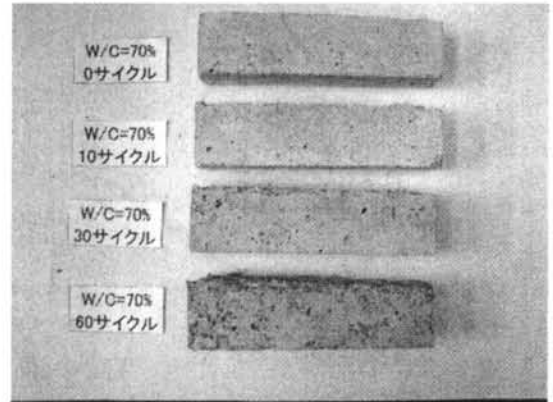


写真-3 N-70 (W/C=70%) の劣化した供試体

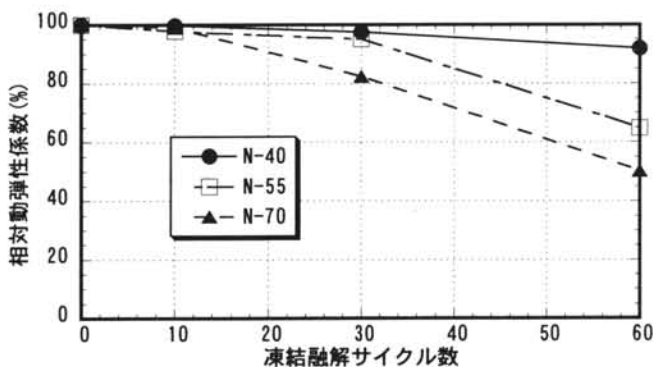


図-1 相対動弾性係数と凍結融解サイクル数の関係

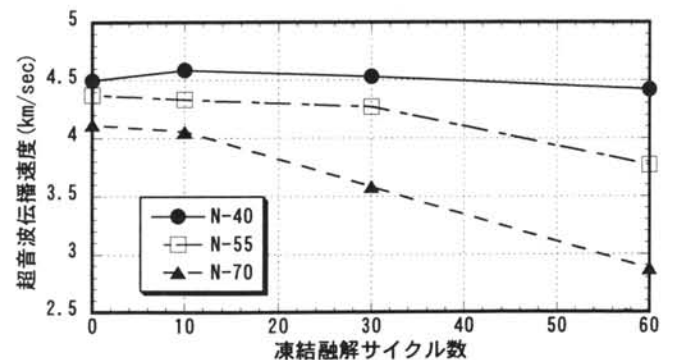


図-2 超音波伝播速度と凍結融解サイクル数との関係

(3) 圧縮強度

図-3に、圧縮強度と凍結融解サイクル数の関係を示す。圧縮強度は、相対動弾性係数や超音波伝播速度に比べると、それほど差が顕著に現れなかった。60 サイクル時の N-40 の供試体においては、ほとんど圧縮強度低下しなかったが、N-55 の供試体で 20%、N-70 の供試体で 30%程度低下する結果となった。

(4) 中性化深さ

中性化深さと凍結融解サイクル数の関係を図-4に示す。これまでの物性値結果からも劣化進行が著しかった N-70 の供試体は、中性化深さも大きかった。これらの結果より、中性化速度とコンクリートの劣化の間には、密接な関係があると予想される。

(5) 圧縮強度と超音波伝播速度

2次データとして圧縮強度結果と超音波伝播速度結果を対応させて比較検討した結果を図-5に示す。既往の研究⁹⁾でも、この両者の関係は、線形的な関係であることが報告されている。本研究では、圧縮強度と超音波伝播速度は、曲線的な相関関係を示す結果となった。

(6) 中性化深さと超音波伝播速度

中性化深さと超音波伝播速度の関係を図-6に示す。超音波伝播速度は、圧縮強度より中性化深さの方が強い相関関係

を示す結果となった。これは、中性化が、コンクリート内部に炭酸ガスが浸透することにより生ずる現象であるから、コンクリートの空隙状況と深く関連があるからであると考えられる。また、これらの結果により、超音波伝播速度により中性化速度の推定する可能性があり得ると考えられる。

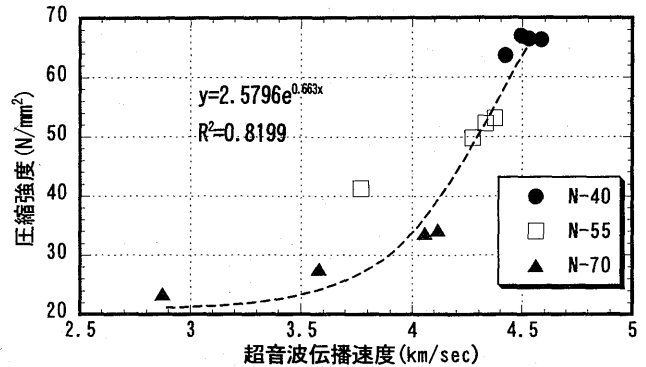


図-5 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

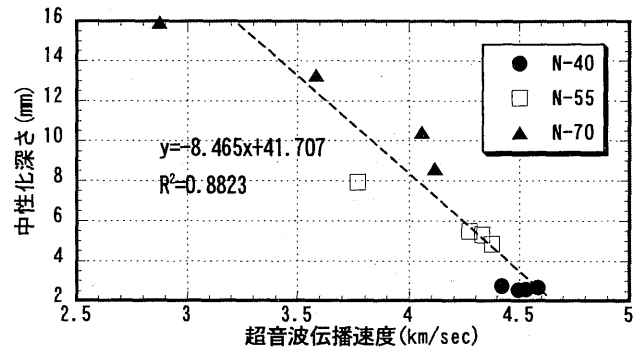


図-6 中性化深さと超音波伝播速度の関係

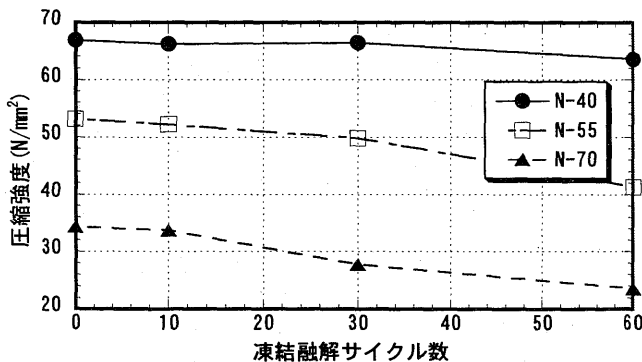


図-3 圧縮強度と凍結融解サイクル数の関係

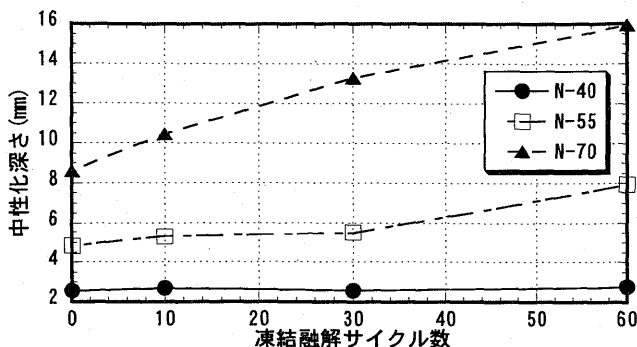


図-4 中性化深さと凍結融解サイクル数の関係

3. RC 建築物の劣化度調査

3.1 調査概要

(1) 調査対象建物

対象となった建物は A-I まで記号を付した。建物の概要を表-2に示す。いずれも学校法人が所有する建物で、大学の学生が日常的に利用する講義棟を中心に建物を選択した。現地調査は平成 13 年 7 月から 11 月の日中に実施した。

表-2 調査対象建物の概要

	用途	築年数	外壁仕上げ	外壁色
A	図書館	7年	塗装	白
B	実験室	27年	塗装	灰
C	講義室	8年	塗装	白
D	講義室	18年	塗装	白
E	屋内プール	20年	RC打放し	灰
F	実験室	13年	RC打放し	灰
G	用務室	31年	RC打放し	灰
H	実験室	13年	RC打放し	灰
I	実験室	26年	RC打放し	灰
J	食堂	25年	RC打放し	灰
K	講義室	15年	RC打放し	灰

(2) 調査手法

(a) 色差分布調査

外壁の色ムラや汚れを評価するために、デジタルカメラによる写真映像を色差分析し、色差 ΔE とその部位の占める割合(面積率 A)の関係を求めた。図-7 に撮影時の条件を示す。日照変化による誤差をできるだけ小さくするため、撮影する画像内に白と黒の要素をフレームインし、明度補正を行った。ここで、 ΔE と面積率 a の関係を曲線近似した。近似式を式(1)に示す。ここで、 E_1 と E_2 が壁面の特性値となる。

$$\Delta E = E_1 e^{E_2 a} \quad \dots (1)$$

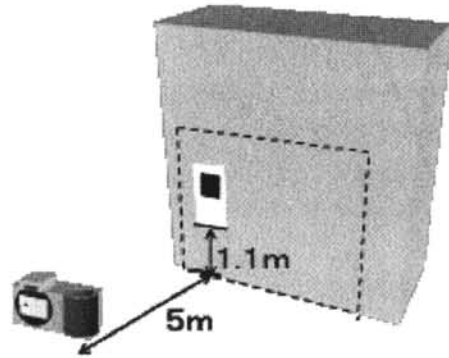


図-7 デジタルカメラによる壁面撮影時の条件

(b) ひび割れ調査

調査対象建物のひび割れ発生状況を把握するために、ひび割れ調査を行った。建物前面の全数調査は難しいことから、躯体の重要部分であるGLより1.5mを、ひび割れ幅0.2mm以上のものを対象として調査を行った。なお、ひび割れ幅の測定は、クラックスケールを用いて行った。

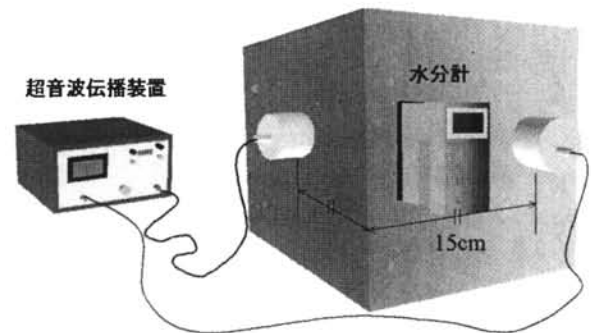


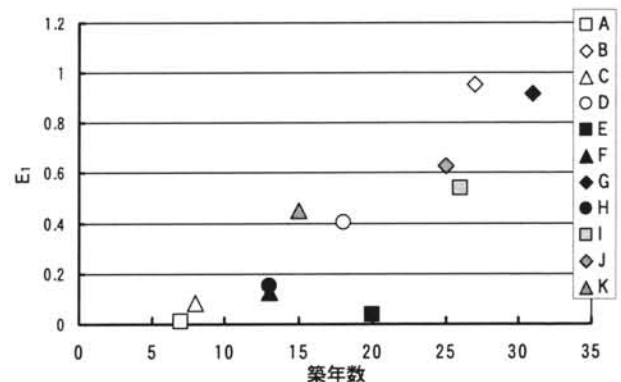
図-8 超音波伝播速度と水分率の測定条件

(c) 超音波速度調査

中性化はコンクリート内部に炭酸ガスが浸透することにより生ずる現象であるから、コンクリートの空隙状況と深く関連があると予想される。一般に材料密度が高いほど超音波伝播速度が速いことから、超音波伝播速度も用いて材料密度を推定し、圧縮強度や耐中性化の指標とすることにした。測定条件を図-8に示す。調査は、柱部材を対象にし斜角測定法を用い測定した。なお、同時に水分計を用いて超音波測定箇所の含水率も測定を行う。

(d) 鉄筋探査調査

柱部材を対象として、鉄筋探査機(電磁誘導式)を用いて耐久性上最も影響の大きい1階部分の柱を任意に抽出し、RC躯体内の鉄筋のかぶり厚さを計測し、どの程度のバラツキがあるかを調査した。

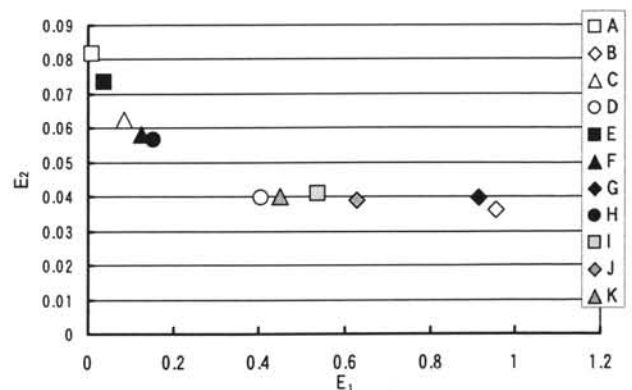
図-9 調査建物における壁面の特性値 E_1 と E_2 の関係

3.2 調査結果と考察

(a) 色差分布調査

図-9に壁面の特性値 E_1 と E_2 の関係を示す。各々の特性値は、 E_1 が大きいほど全体的に汚れており、 E_2 が大きいほど、全体的には汚れていないが部分的に鮮明に汚れがあることを示している。同図より、 E_1 と E_2 は相関関係にあるので E_1 を壁面の汚れ度合の指標として、以降の考察に用いる。

図-10に築年数と壁面の特性値 E_1 の関係を示す。同図によれば、外壁仕上げに関係なく築年数に伴い、汚れていることがわかる。

図-10 調査建物における壁面の特性値 E_1 と築年数の関係

(b) ひび割れ調査

図-11 に外壁 1㎡あたりのひび割れ面積(ひび割れ長さ×幅)と築年数の関係を示す。同図によれば、全体的に見ると、バラツキはあるものの、塗装仕上げ建物 A~D と RC 打放し建物 E~I に分けて見ると、相関性が見られる。

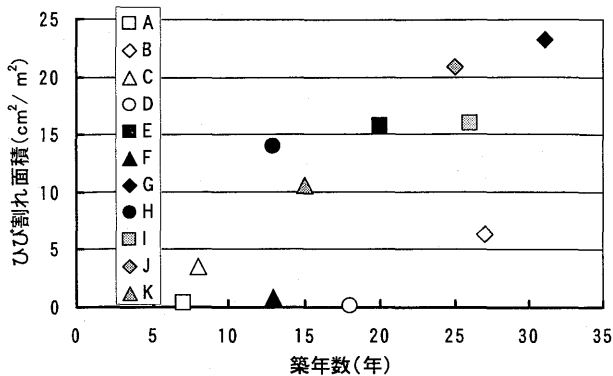


図-11 外壁 1㎡あたりのひび割れ面積と築年数の関係

(c) 超音波伝播速度調査

超音波伝播速度と築年数の関係を図-12 に示す。全体的にみると築年数の増加に伴い、超音波伝播速度が低下する傾向にあるが、これは、経年劣化によって空隙が増加し、相対的に均質性、連続性が失われたためと考えられる。しかしながら、建物ごとのバラツキが大きく、この場合は相互に独立したパラメータとすることが妥当である。例えば、築年数が10年未満の建物でも、超音波伝播速度が速い建物 A と遅い建物 C に大きい差がみられた。したがって、超音波伝播速度は、コンクリート躯体の品質の違いを表現することで重要な目安になりうると考えられる。

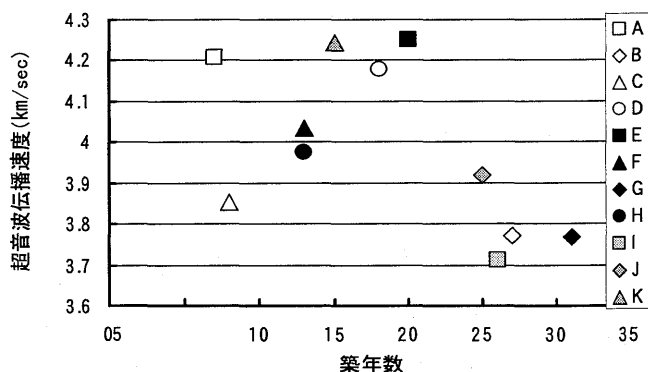


図-12 超音波伝播速度と築年数の関係

(d) 鉄筋探査調査

図-13 外壁 1㎡あたりのひび割れ面積とかぶり厚さの関係を示す。建築基準法の最小かぶり厚さの規定より、かぶり厚さ 0~3cm、3~4cm および 4cm~ の3つのエリアに区分けし、それぞれエリア A、B、C と呼ぶこととし、鉄筋の腐食の程度を評価した。エリア A にプロットされる建物は、かぶり厚さが

少なく、ひび割れも多いので鉄筋腐食の可能性が高いと推測され、目視観察でも錆汁の発生箇所が多数見つかった。反対にエリア C は、かぶり厚さも十分あり、ひび割れも少なく、目視調査においても、錆汁などの欠陥は発見されなかった。

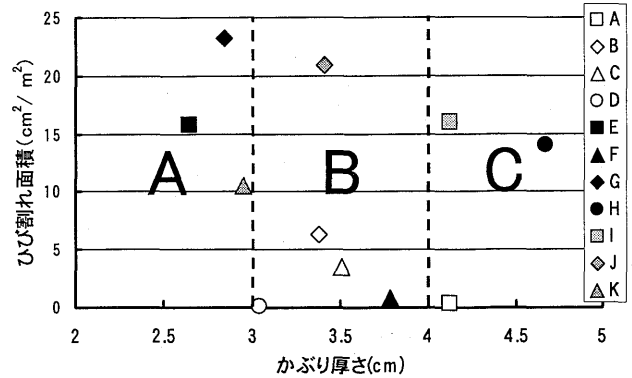


図-13 1㎡あたりのひび割れ面積とかぶり厚さ

(4) 総合評価

(a) 圧縮強度推定

調査した超音波速度 (V_c : km/sec) および、同時に測定したの含水率 (W : %) を、谷川ら²⁾の研究より提案する推定式(2)に代入し、推定強度 (σ_c : N/mm²) を求めた。

$$\sigma_c = 0.7 \times V_c^{3.44} \times W^{-0.87} \quad \dots (2)$$

推定した圧縮強度を表-3 示す。

表-3 推定結果の一覧

	圧縮強度(N/mm ²)	中性化速度比	中性化深さ(cm)	余寿命(年)
A	37.81	1.18	0.87	114.71
B2	7.81	1.84	2.65	3.44
C	26.33	1.98	1.55	15.83
D	38.90	1.13	1.33	36.69
E	35.58	1.30	2.30	0.99
F2	6.83	1.93	2.75	2.74
G	23.28	2.32	5.11	0
H	28.65	1.77	2.52	12.21
I	25.75	2.04	4.11	0.11
J	31.44	1.55	3.07	0.80
K	33.23	1.44	2.20	2.72

(b) 中性化深さの推定

コンクリートの圧縮強度は、水セメント比、セメントの種類、養生条件などに関わらず、それらの影響をすべて包含した結果であり、圧縮強度を指標とすれば中性化速度が評価しやすいことが言える。

和泉ら³⁾は、圧縮強度と中性化速度比を、式(3)のように表現できると報告している。そこで、(a)の推定圧縮強度を用い、式(3)に代入することによって、中性化速度比 R を推測した。

$$R = 676 \times \frac{0.098}{\sigma_c} - 0.64 \quad \dots (3)$$

この中性化速度 R と築年数 (t : 年) を式(4)に代入し、中性化深さ C_t (cm) を推定した。⁴⁾ 推定結果を表-3 に併記した。

$$C_t = \alpha \times \beta \times \gamma \times \sqrt{t} \quad \dots (4)$$

$$\gamma = \frac{R(x - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3x)}} \quad \dots (5)$$

ここで、式(4)における環境係数 α 、および仕上げ材による係数 β

$$\begin{cases} \alpha = 1.0 (\text{屋外で雨風にさらされる場合}) \\ \alpha = 1.7 (\text{屋内面の場合}) \\ \beta = 1.0 (\text{仕上げがない場合}) \\ \beta = 0.5 \sim 0.7 (\text{塗装仕上げの場合}) \end{cases}$$

式(5)における x は、 W/C であるが、式(3)の中性化速度比が $W/C60\%$ が基準となっているため、ここでは 0.6 を代入することとした。

(c) 推定中性化深さと鉄筋かぶり厚さの関係

図-14 性化深さとかぶり厚さの関係を示す。図中の点線より上は、かぶり厚さより中性化深さが大きく、鉄筋腐食の確率が極めて高いと推測される。点線より上側にある建物 G や建物 I は、目視調査においても多数の錆汁を確認した。点線より下側であっても点線付近の建物には、一部錆汁が発見され、今後、さらに増えてくるものと推測される。

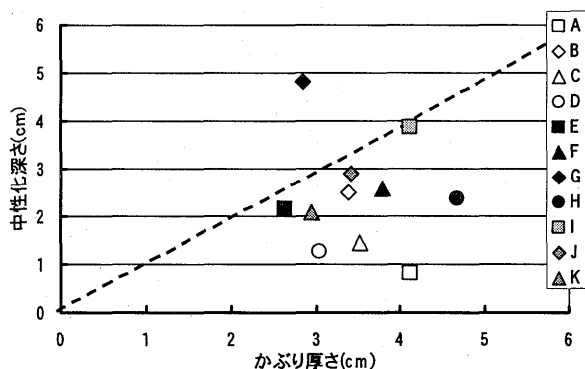


図-14 中性化深さとかぶり厚さの関係

(d) 構造的な余寿命の推定

式(4)を用いて構造的な余寿命の推定をした。ただし、ここで推定する余寿命とは、あくまでも推定された中性化深さから想定された、中性化にかかる時間であり、ただちに構造物が危険な状態に陥るというものではない。図-15 に外観と推定余寿命の関係を示す。両図共に、エリア A にプロットされる建物が多い。これは、外観劣化の進行に対して、余寿命が短い建物が多いことを示している。すなわち、外観に異常が発見されてから、構造的な検査を行っても手遅れである可能性が高い可能性があると考えられる。

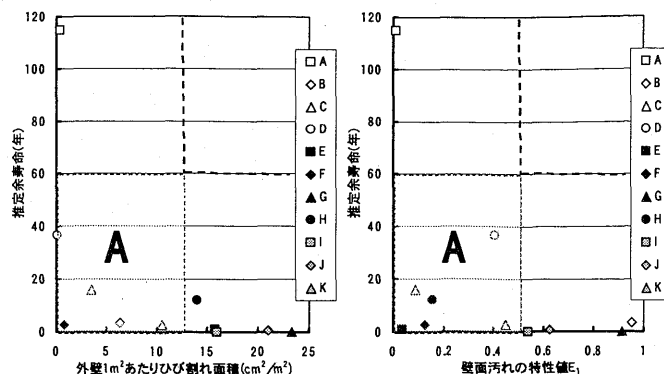


図-15 外観と推定余寿命の関係

4. まとめ

- 1) 凍結融解作用による劣化に対し、中性化深さと超音波伝播速度の間で相関関係があるという知見を得た。これらの結果により、超音波伝播速度により中性化速度の推定する可能性があり得ると考えられる。
- 2) 壁面の汚れや色むらを定量化することによって、躯体調査結果と対応させて評価することが可能となった。
- 3) 超音波伝播速度から推定した圧縮強度を用いて中性化深さも推定し、この中性化深さとを比較することにより、構造物の余寿命を全く傷つけることなく簡易に推測することが可能である。

謝 辞

本研究の一部は、中部大学ハイテク・リサーチセンターと中部大学総工研研究費の補助支援を受けたものである。本研究の推進にあたり、本学卒業生、国井卓也君、木谷佳奈さんの支援とご協力を受けました。付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験、コンクリートパンフレット、36号、日本セメント技術協会、昭和29.8、63p
- 2) 谷川恭雄、童寿興、他「非破壊試験法によるコンクリートの強度推定に関する研究」コンクリートの検査・補修委員会、資料集I、pp20～25、1991
- 3) 和泉意登志、嵩英雄、他「コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類及び養生条件の影響について」、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 4) 社団法人コンクリート工学協会「コンクリート診断技術'01」[基礎編]
- 5) 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