

論文 耐震改修調査データによる既存建物の中性化および鉄筋腐食の実態調査

土屋 直子^{*1}・宮内 博之^{*2}・棚野 博之^{*3}・山口 修由^{*4}

要旨: 建物の長期活用に向けた鉄筋コンクリート建物の耐久性評価方法の確認・再検討の一検討として、実建物の鉄筋コンクリートの中性化速度係数とコア強度の関係および中性化深さと錆びグレードの関係の実態を明らかにするための調査を行った。調査は全国の耐震改修時の調査データを活用し、仕上げ種類、屋内外および地域を区別して整理した。その結果、屋内の中性化進行が速いこと、タイルや屋外モルタルなどの中性化抑制効果があること、錆びグレードは必ずしも中性化深さの鉄筋位置への到達に依存しないことを確認した。また促進実験と実建物調査との比較も行い、促進実験による結果は安全側評価であることも確認した。

キーワード: 既存建物, 中性化深さ, 鉄筋腐食, 仕上げ, 屋内外, 地域

1. はじめに

今後、建物の長期活用に向けた改修工事も増えることが予想されるものの、更新か改修かの判断、改修後の保全計画、長期活用計画の具体的方法について判断に迷う部分は多い。これは技術的知見の整理が十分ではないことも一因であるといえる。

1980年代に建設省により実施された総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」以降、鉄筋コンクリートの耐久設計では、コンクリートの中性化促進実験と理論を基とした耐久設計をしてきた^{例えは1)2)3)}が、今後は数十年経過した実構造物を用いた実態の調査により、新設時に行う耐久設計以降における、すなわち供用期間中における耐久性の診断方法および改修・保全計画の在り方を検討することが必要である。

本研究では、建物の長期活用に向けた鉄筋コンクリート建物の耐久性評価方法の確認・再検討の一検討として、全国に多数ある耐震改修時の建物調査データを活用し、実建物の耐久性に関わる要素の実態を明らかにするための調査を行った。

2. 調査手法

2.1 建物の耐久性の考え方^{例えは1)2)3)}

鉄筋コンクリートの耐久設計は、鉄筋の腐食確率が設定値に至るまでの期間を基としている。ここで、鉄筋の腐食確率の算出に必要な値として、次の事項が必要となる。

- ・中性化速度係数 A の予測値
- ・中性化速度のばらつき (変動係数 ν)
- ・設計かぶり厚さ (D)

・設計かぶり厚さのばらつき (標準偏差 σ_d)

t年後の中性化深さの分布は、平均 $A\sqrt{t}$ 、標準偏差 $A \cdot \nu \sqrt{t}$ の正規分布で表される。

一方、かぶり厚さの分布は、平均 D、標準偏差 σ_d の正規分布で表される。

したがって、かぶり厚さと中性化深さの差 (中性化残り) の分布は、平均値 $(D - A\sqrt{t})$ 、標準偏差 $(\sqrt{(A^2 \cdot \nu^2 \cdot t + \sigma_d^2)})$ で表される。

例えば、中性化が鉄筋のかぶり厚さに到達した (中性化残りが 0) 時点で鉄筋が腐食すると仮定すると、この時の鉄筋の腐食確率は、上記正規分布の $-\infty$ から 0 までの累積確率として求められる。

これまでは、中性化の変動係数や鉄筋腐食確率の上限を設定し、それを満たす中性化速度係数を持つコンクリートを用いることで供用期間中は耐久性が満足するとした考え方を採り、コンクリートの中性化速度係数を中性化促進実験により確認して、満足するコンクリートの材料設計を行うとしていることがなされてきた。すなわち、コンクリートの中性化が鉄筋部へ到達するまでの期間を基に、耐久設計を行ってきたといえる。

2.2 既往研究による知見

(1) 中性化速度係数

中性化速度係数 A (mm/ \sqrt{t}) は、コンクリート表面からの中性化の深さ C (mm) を時間 t の平方根で除したものである。

中性化進行に及ぼす要因には、環境条件 (温度や降雨積雪)、仕上げ材による抑制効果、コンクリートの品質 (材料種類や調合など)、施工要因 (養生など) が挙げられている¹⁾²⁾³⁾。

*1 建築研究所 材料研究グループ 研究員 (正会員)

*2 建築研究所 材料研究グループ 主任研究員 (正会員)

*3 建築研究所 材料研究グループ グループ長 (正会員)

*4 建築研究所 材料研究グループ 研究員 (非会員)

長瀧ら⁴⁾は、促進中性化試験による中性化速度係数と強度の関係について検討し、コンクリートの材料種類や調合、養生条件の違いを考慮した上で圧縮強度により中性化速度を評価できる可能性を示した。

三橋ら⁵⁾は、日本各地の気象データを用いて、W/C65%のコンクリートの環境条件による中性化深さの差を検討し、降雨積雪の有無による中性化深さの差は15年で3mm、また地域差は約5mmとしている。なおこの値を中性化速度係数に直すと、概ね0.77mm/√年から1.3mm/√年である。

一方で、玉井ら⁶⁾⁷⁾は、東京都における学校建築物を主とする公共鉄筋コンクリート建物の耐震改修調査データを用いたコア強度と中性化速度係数の関係の検討を通し、仕上げ種類や屋内外環境と中性化進行の関係について検討を行っている。表-1にこれらの研究で得られた知見をまとめたものを示す。ここでは、コア圧縮強度と中性化速度係数の関係が大きくばらつくことが確認されている。

また長谷川ら⁸⁾は、文献調査から普通コンクリート(30~40N/mm²)の屋外暴露試験データを抽出し、屋外にお

けるコンクリートの中性化進行予測について検討しており、中性化速度係数と28日強度の関係などの検討を通し、既往の実験式(岸谷式、和泉式、依田式、土木学会式)は安全側の評価をしていること、地域によるばらつきは、部位のばらつきと同程度であり、進行予測には地域条件とともに部位条件を考慮することが重要であることなどを示唆している。なお、個々での検討では仕上げ等については特に触れられていない。

これら既往の研究での中性化速度係数(mm/√年)は0~10程度であり、大きくても20を超えない結果となっている。

一方、CO₂濃度5%促進試験による中性化深さ結果から実環境下の濃度を0.04%および0.06%とした場合の中性化深さへの変換係数を(0.04/5)^{0.5}=0.089および(0.06/5)^{0.5}=0.11とすると⁹⁾、促進試験による中性化速度係数(mm/√促進週)から中性化速度係数(mm/√年)への変換係数は0.64および0.79であり、長瀧らの結果である4~18(mm/√促進週)⁴⁾も玉井ら、長谷川らの結果と同等であるといえる。なお、CO₂濃度は気象庁が示す大気データおよび著者らの実験棟の一室の実測値を用いた。

(2) 標準偏差と変動係数

平松ら¹⁰⁾は、経過年数30~40年の一般環境下の3建物を対象に、同じ部位からコアを大量に採取し、中性化深さおよび鉄筋かぶり厚さの標準偏差と変動係数について検討している。

(3) 中性化深さと鉄筋腐食

岸谷ら¹¹⁾は、試験体を中性化促進させた実験により、中性化残りと鉄筋の腐食面積率の関係を示した。pH勾配、フェノールフタレインによる着色領域および鉄筋腐食限界の考察も加えながら、塩分がない場合には中性化残りが8mmの範囲で腐食が観察される結果を示した。一方で、既存建物調査も加味する必要も言及している。

既存建物調査による中性化深さと鉄筋腐食の関係については、1983年に嵩ら¹²⁾により、鉄筋表面から中性化領域までの距離と錆びグレードの関係について1500本以上の調査結果がまとめられており、中性化領域であると鉄筋表面から中性化領域までの距離と相関して腐食が進行していること、屋内より屋外の方が腐食していたこと、仕上げ材の有無は中性化抑制には関係があるが中性化領域の場合には有無によらず腐食する傾向があることなどを示した。このデータは全国各地の経過年数が10年未満のものから50年以上のものを含む、コア強度が83~276kg/cm²の44件の建物から得られている。また勝俣ら¹³⁾は、経過年数約50年の建物の調査から含水率が低い場合に鉄筋腐食が抑制される傾向を示唆している。

2.3 耐震改修調査データの内容

耐震改修調査データから、北海道、東北地方、関東地

表-1 玉井らによる実建物調査による仕上げと中性化速度係数の検討⁶⁾⁷⁾ 結果まとめ

調査項目	結果・考察
環境条件	屋外、居室、非居室、普通教室、特別教室
完成年別の打放し仕上げの中性化速度係数	大きくばらつく
完成年別の塗装仕上げの中性化速度係数	大きくばらつく
使用環境と表面仕上げ別(打放し、塗装、リシン)の中性化速度係数とコア圧縮強度の関係	居室の中性化速度係数が大きく、屋外が低い。ただし、塗装の場合は差が見られない。
使用環境と表面仕上げ別(打放し、塗装、リシン)の中性化速度係数とコア圧縮強度の関係	居室の中性化速度係数が大きく、屋外が低い。ただし、塗装の場合は差が見られない。
使用環境と表面仕上げ材料別(打放し、塗装、リシン、モルタル、モルタル+塗装)の中性化と材齢の関係	大きくばらつくが材齢経過とともに中性化深さは大きくなる傾向あり。材齢40年でも中性化が認められない場合がある一方、仕上げ無しと同等の中性化進行が見られた箇所もあった。
環境条件と仕上げ材料種類別(打放し、塗装、リシン、モルタル、モルタル+塗装)の中性化速度係数Aとコア圧縮強度の関係	相関は低い。
環境条件と仕上げ材料種類別(打放し、塗装、リシン、モルタル、モルタル+塗装)の中性化速度係数Aと竣工年の関係	1965年以降竣工のものはそれ以前竣工のものに比べて中性化抑制効果が高い。施工の要因なのか、後から塗装されたためによるか、といった理由は不明。

表-2 耐震改修調査データから抽出した項目

建物情報として	・立地
	・建物用途
	・使用年数(建物竣工年数および調査年次より)
	・設計基準強度
部位(コア採取)情報として	・強度
	・中性化深さ
	・仕上げ種類
	・室内・室外
	・錆グレード、はつり結果など
	・ひび割れや欠損の状況図など

方、近畿地方、中国地方、四国地方の RC 建物の表-2 に示すデータを抽出した。いずれの地域でも約 50 件以上の建物件数となるように、また複数本の平均データではなく、平均化する前の個別のデータを抽出した。なお、都道府県によって調査内容が異なり、また報告方法も異なっていたため項目によってデータ数が異なる。

なお、今回用いたデータは、1960 年以降竣工で設計基準強度 18~24N/mm² の使用年数が 30 年から 40 年の建物が多かった。

2.4 実建物調査データによる検討方法

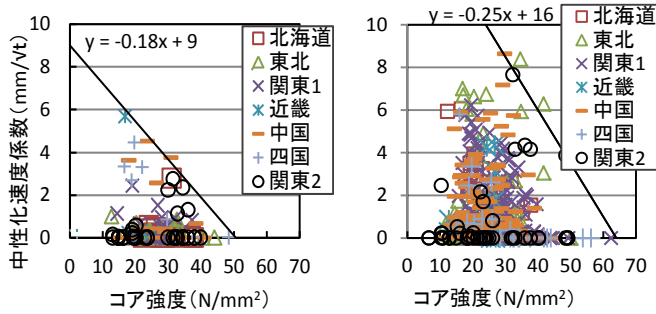
(1) 検討方針

以上を踏まえ、全国の実建物調査データを用いて、コンクリートコア強度と中性化速度係数の関係について整

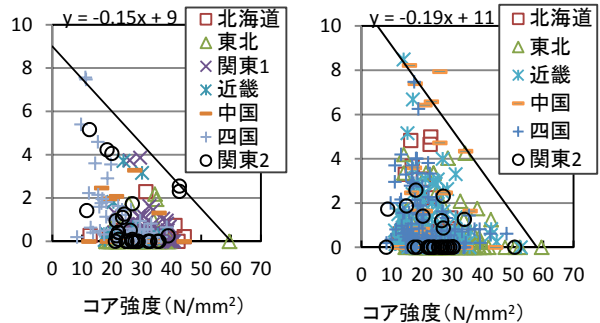
理した。その際、中性化速度に影響があると既往研究で示唆されている仕上げ種類および環境（屋内外や地域）を区別して検討した。一方、標準偏差および変動係数については該当の調査データからは検討が難しいため対象としない。また調査数は限られるが錆びグレードの結果があるため、中性化深さと錆びグレードの関係について検討した。

(2) 強度と中性化速度係数の関係式

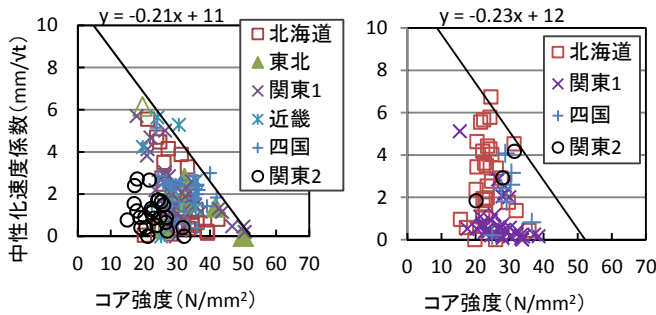
整理したコア強度と中性化速度係数の関係図から、これらの関係式を得た。地域ごとでは平均となる近似線を、屋内外および仕上げ種類ごとでは、中性化速度係数の最大値を包含するような線形式を検討した。この際、60N/mm² の中性化速度係数が 0±2 となるように統一した。



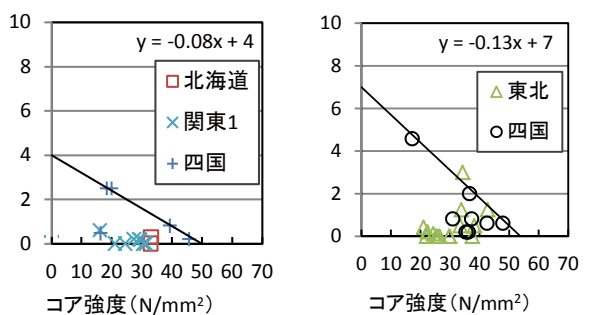
(a) モルタル 屋外 (b) モルタル 屋内
図-1 コア強度と中性化速度係数の関係図



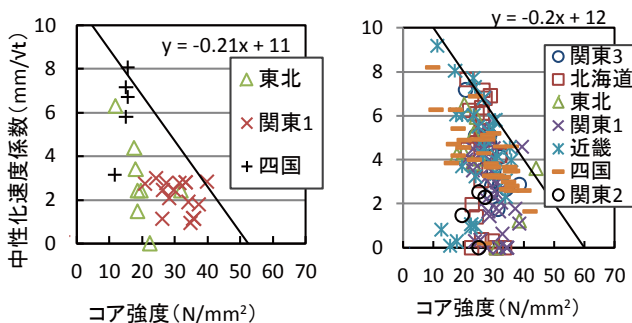
(a) モルタル+塗料 屋外 (b) モルタル+塗料 屋内
図-2 コア強度と中性化速度係数の関係図



(a) 塗料 屋外 (b) 塗料 屋内
図-3 コア強度と中性化速度係数の関係図



(a) タイル 屋外 (b) タイル 屋内
図-4 コア強度と中性化速度係数の関係図



(a) 打ち放し(+ボード) 屋外 (b) 打ち放し(+ボード) 屋内
図-5 コア強度と中性化速度係数の関係図

表-3 中性化速度係数とコア強度の線形式の係数

仕上げ種類	屋内外	比例係数 a	切片 b
モルタル	屋内	-0.25	16
モルタル+塗料	屋内	-0.19	11
塗料	屋内	-0.42	17
タイル	屋内	-0.13	7
打ち放し(+ボード)	屋内	-0.2	12
モルタル	屋外	-0.18	9
モルタル+塗料	屋外	-0.15	9
塗料	屋外	-0.21	11
タイル	屋外	-0.08	4
打ち放し(+ボード)	屋外	-0.21	11
仕上げ無し	促進試験	-0.27	16

(3) 関係式の係数による比較

さらにこれらの線形式の比例係数 a および切片 b を用いて、仕上げが施されていないケースに対する比率を算出し、仕上げによる抑制効果について検討した。また同様に長瀬らの中性化促進試験による結果図を参考にして、 CO_2 濃度 5% 促進による中性化深さ結果を実環境条件である 0.05% での結果となるよう算出し直し、これを用いて得た中性化速度係数と強度の関係式の各係数との比較

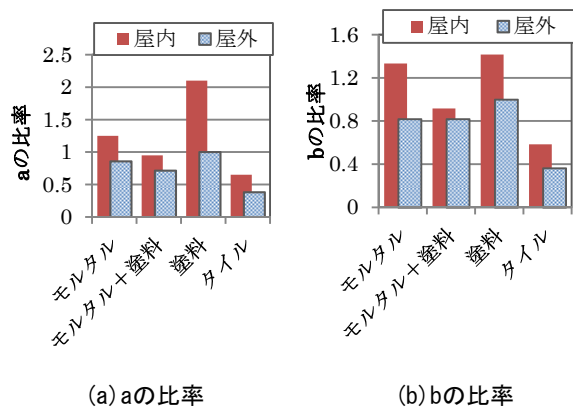


図-6 中性化速度係数とコア強度の線形式係数の打ち放しの結果に対する各仕上げの結果の比

を通し、促進試験結果と実建物データによる結果の比較も行った。

(4) 中性化深さと錆びグレードの関係の検討

錆びグレードごとに、中性化深さと鉄筋かぶり厚さの関係について整理した。屋内外および仕上げ種類別とした。多くの耐震調査報告書では 5 段階であり、1:錆がほとんど認められない、2:部分的に点錆を認める、3:大部分が赤錆におおわれている、4:亀裂、打ち継ぎなどに局

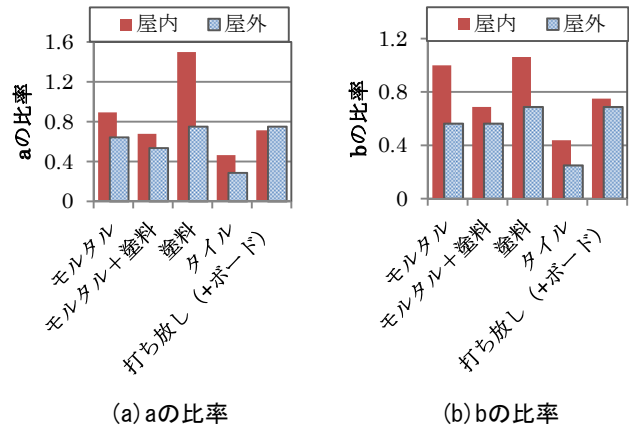


図-7 中性化速度係数と強度の線形式係数の促進試験の結果に対する実建物調査による結果の比

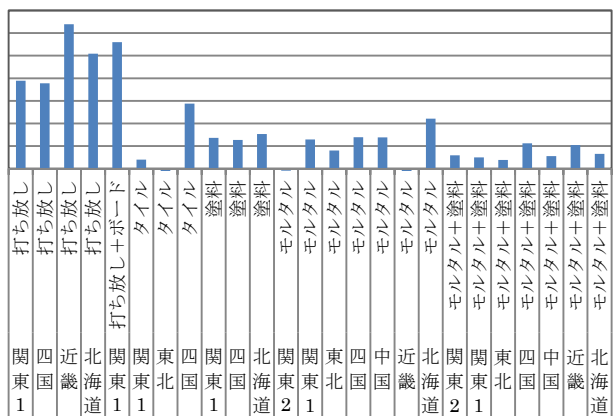
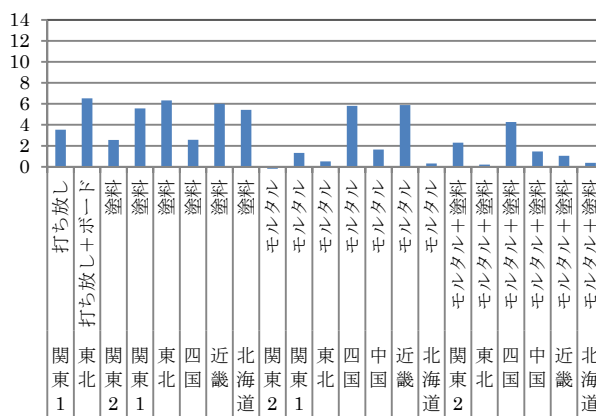
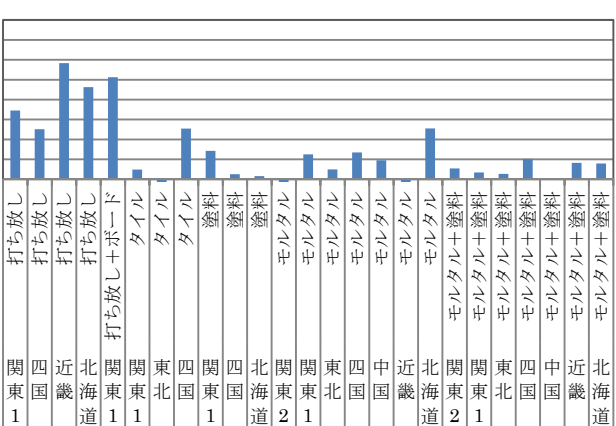
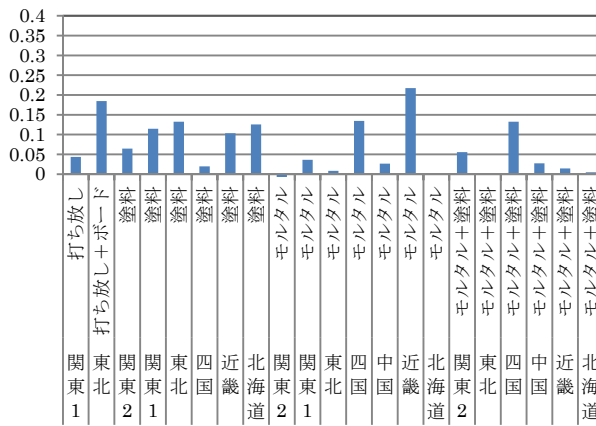


図-8 地域ごとの中性化速度係数とコア強度の線形式の係数

所的な断面欠損がある、5:膨張力によりかぶりコンクリートを持ち上げている、となっていた。いくつかの調査報告書では、4段階となっているものや表現が若干異なるものもみられたが、概ね同じ状態と考え、同様として扱った。なお、ここで扱う中性化深さははつり部における中性化深さである。

3. 結果・考察

3.1 実建物調査データによる中性化速度係数

図-1 から図-5 に建物調査データによるコア強度と中性化速度係数の関係の結果を仕上げ種類別、および屋内相別に示す。地域を凡例別で示している。コア強度は概ね 10~60N/mm²であった。なお、仕上げ種類の「打ち放し(+ボード)」は「打ち放し」および「打ち放し+ボード」を一括したものを示している。

既往の研究と同様に、コア強度と中性化速度係数の関係はばらつきが大きいものの、コア強度が小さい場合でも中性化速度係数が小さい場合も多数であるが、強度が大きければ中性化速度係数が大きくなることは少ない結果を示した。

3.2 関係式による比較

表-3 に中性化速度係数とコア強度の線形式の係数の結果について、屋内外および仕上げ種類ごとの結果を示す。ここで検討した式は、図-1 から図-5 に記載したような中性化速度係数の最大値を包含するようなものとした。さらにこれらを用いて、打ち放しの係数に対する比率結果を図-6 に、促進中性化試験に対する実建物調

査から得た中性化速度係数とコア強度の関係式の係数の比率結果を図-7 に示す。

また、地域ごとの近似線の比例係数と切片について結果を図-8 に示す。

3.3 中性化深さと錆びグレードの関係の結果

図-9 および図-10 に、錆びグレードごとの中性化深さと鉄筋かぶり厚さの関係について屋内および屋外で区別して示す。なお、錆びグレード5の報告は存在しなかった。

3.4 考察

(1) 中性化速度係数と仕上げ種類

図-6 から、a も b も比率が1以下のモルタル屋外、モルタル塗料屋内外、タイル屋内外は抑制効果があるといえる。特にタイルを施した場合には中性化速度係数が小さくなっている。ただし、比率結果が1以上を示した塗料などは、塗装時期が不明であるため、効果に対する判断はしかなる。

(2) 中性化速度係数と屋内外

図-1 から図-5 から、全体的に屋内の中性化速度係数が大きい傾向であると言える。

(3) 中性化速度係数と地域

図-8 から、屋内塗料の場合、四国の中性化速度係数が小さく、屋内モルタルの場合では四国および近畿の中性化速度係数が大きく、また屋外モルタルの場合には北海道の結果が大きいの。しかしながら、図-1 から図-5 の結果を含め、地域による差は明確には判別しがたい。今回検討した九州沖縄を除いた地域では、他の要素と比

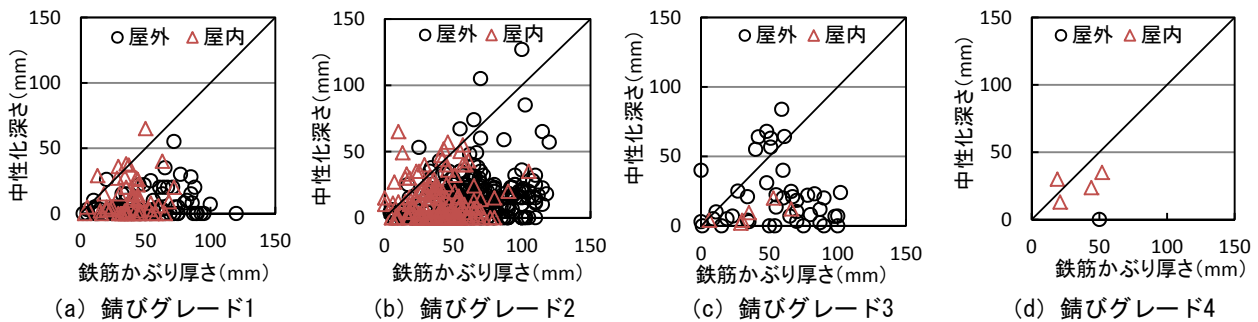


図-9 中性化深さと鉄筋かぶり厚さの関係（屋内外区別）

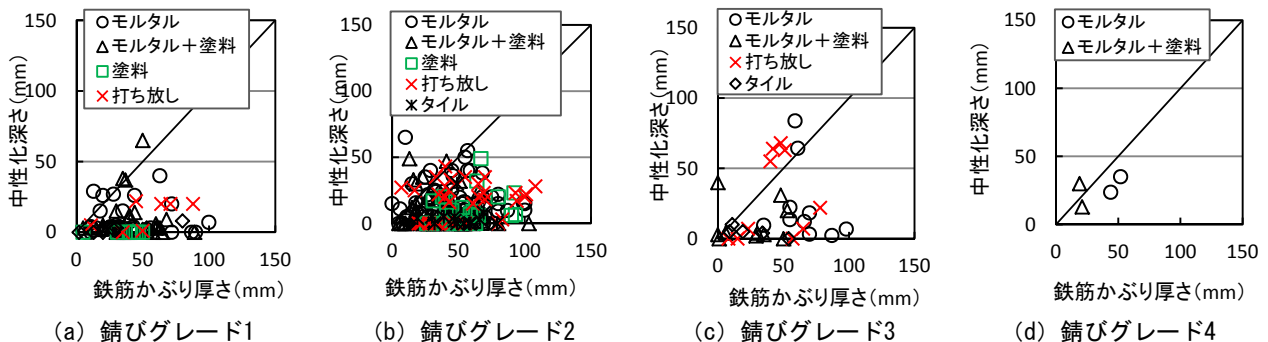


図-10 中性化深さと鉄筋かぶり厚さの関係（仕上げ種類別）

べて影響は大きくないことが示唆される。先述した既往の研究の結果で言及している地域による中性化速度係数の差が1前後であることと同等の結果であるといえる。

(4) 促進中性化試験による結果との比較

図-7の結果より、打ち放しの結果は、a,b いずれも0.6から0.8であり、促進中性化試験による推測は、先述した変換方法で中性化速度係数を算出した際には安全側であるといえる。

(5) 中性化深さと錆びグレードの関係の検討

図-9(c)から、中性化深さが鉄筋かぶり厚さに到達していない状態でも、鉄筋は大部分が赤錆におおわれている状態(錆びグレード3)の状態となる場合があることが分かる。このような事例については更なる検討が必要である。一方で、図-9(a)(b)から中性化深さが鉄筋かぶり厚さに到達している状態でも鉄筋は部分的に点錆を認める状態(錆びグレード2)が多数みられ、またほぼ錆が見られない状態(錆びグレード1)も少なからず存在している。このグラフからは中性化深さが鉄筋かぶり厚さに到達してからの経過した時間が不明であるが、それを鑑みても中性化の鉄筋部への到達の有無だけが錆のグレードと相関しているわけではないことがいえる。また、中性化が鉄筋かぶり厚さに到達しても錆びグレード1あるいは2であるものの特徴として、屋内であること、または屋外でかぶり厚さが50mm以上であることが傾向として伺える。

一方、図-10から、既往の研究で報告されている傾向と同じように、仕上げ種類による差は見られなかった。しかし、仕上げの改修時期が加味されていない状態での分析であるため、今後はこのような点も加味した検討も必要であると考ええる。

4. まとめ

ここでは、全国の耐震改修時の調査データを活用し、実建物の鉄筋コンクリートの中性化速度係数とコア強度の関係および中性化深さと錆びグレードの関係について整理した。竣工が1960年以降のコア強度10~60N/mm²で使用年数が30~40年の各地域の50件以上の建物データを用いて、仕上げ、屋内外及び地域による影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 仕上げを施した場合について、モルタルは屋外、モルタル塗料は屋内外、タイルは屋内外に施すことで中性化進行の抑制効果があるといえる。
- 2) 屋内外の差について、既往の研究と同様に全体的に屋内の中性化速度係数が大きい傾向であった。
- 3) 地域による差について、今回検討した九州沖縄を除いた地域では、仕上げ種類や屋内外の要素と比べて影響は大きくないことが示唆される。

- 4) 促進中性化試験による推測はここで用いた変換方法で中性化速度係数を算出した際には安全側であるといえる。
- 5) 中性化の鉄筋部への到達の有無だけが錆のグレードと相関しているわけではないことを確認した。

謝辞：本研究に用いたデータの収集には、一般社団法人文教施設協会および茨城県営繕にご協力頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説，2003
- 2) 日本建築学会：JASS5，2015
- 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，2004
- 4) 長滝重義，大賀宏行，佐伯竜彦：コンクリートの中性化深さの予測，セメント技術年報，No.41，pp.343-346，1987
- 5) 三橋博三，岩上真也，金子佳生：コンクリートの中性化進行速度に及ぼす気象環境条件の影響に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.10，No.1，pp.143-149,1999
- 6) 玉井孝幸他：構造体コンクリートの圧縮強度と中性化の実態調査，日本建築学会大会講演梗概論文集，A-1，材料施工，pp.459-460，2006
- 7) 玉井孝幸他：1953年から1985年に建設された建物の構造体コンクリートの中性化の実態，日本建築学会技術報告集 Vol. 13，No. 25，pp. 1-6，2007
- 8) 長谷川拓哉，千歩修：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.665-670，2006
- 9) 阿部道彦他：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.409，pp.1-10，1990
- 10) 平松和嗣：既存RC建物構造体の実用的な耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.831-836，2007
- 11) 岸谷孝一，檜野紀元：コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究 その1 コンクリートの中性化深さが鉄筋腐食に及ぼす影響について，日本建築学会論文報告集，第283号，pp.11-16，昭和54年9月
- 12) 嵩英雄他：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1, 2, 3)，日本建築学会学術講演梗概集，Vol.58，pp.201-206，1983
- 13) 勝又洗達他：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査 その10：透気係数・鉄筋腐食，日本建築学会大会講演梗概論文集，A-1，材料施工，pp.435-436，2015