

コンクリート構造物の維持保全に供する 非破壊試験・微破壊試験の現状

— 強度, 劣化, 含水状態の観点から —

防水ジャーナル2011年2月号

特集「非破壊検査による
コンクリート構造物の診断技術」より

日本大学 生産工学部 建築工学科 准教授・博士(工学)

湯浅 昇

コンクリート建造物の維持保全に供する 非破壊試験・微破壊試験の現状

— 強度, 劣化, 含水状態の観点から —

湯浅 昇

① はじめに

地球環境という切迫化した問題から、日本もスクラップ&ビルドという姿勢は終わらせざるを得ず、遅ればせながら、長寿命化・資源循環型社会の構築に真剣に向かいはじめたといえよう。スクラップ&ビルドの時代では、さほど重要視されなかった「維持保全」が、長寿命化・資源循環型社会の構築では、極めて重要な意味を持つわけであるが、その中においてひときわ要となるのが「診断」であろう。

実験室で試験体を試験する場合と異なり、構造体コンクリートの品質を評価し、建造物の耐久性ならびに劣化度を診断するには、いかに調査目的に合致した試験データを多量に、そして簡易に入手するかが重要である。構造体コンクリートから採取したコンクリートコアや、はつりによって得られた試料の試験結果は、信頼性が高いものの、小規模ではあるが破壊試験であるため、構造耐力上の問題があるばかりでなく、大掛りな作業や補修を伴い、それがさらに高価な費用負担につながることから、多数のデータを得ることはできず、点としての情報を得るにすぎないことが多い。これらは、非破壊試験、僅かな破壊を許容する微破壊試験によれば解決

が可能である。

しかしながら、精度の良さを第一に考えて、破壊試験に頼らざるを得ないことも多いのも実態である。

ここでは、強度, 劣化, 含水状態別に、既存鉄筋コンクリート建造物に適用可能な試験方法¹⁾を紹介し、その現状を解説するものである。

② 強度試験方法

構造体コンクリートの強度を試験する方法には、①構造体から採取したコンクリートの直接強度試験による方法②構造体コンクリートの表面硬度より推定する方法③構造体コンクリートの貫入抵抗より推定する方法④構造体コンクリートの切削抵抗より推定する方法⑤構造体コンクリートの局部破壊試験により類推する方法⑥構造体コンクリートから採取したコンクリート塊の細孔構造により分析する方法⑦構造体コンクリートの音響特性より推定する方法⑧構造体コンクリートの温度管理による方法——に大別できる。表-1は、このうち既存建造物に適用が可能と思われる各種強度試験方法の種類と特徴を示したものである²⁾。

採取コアによる直接載荷試験 (JIS法)

JIS A 1107およびJIS A 1108で規定された骨

表一 1 構造体コンクリートの強度に関する試験方法の種類と特徴(湯浅)

試験方法の種類		測定概要	長 所	短 所	備 考
採取コンクリートによる直接試験	JIS 法	コアを切り出し、コアを直接強度試験に供する	直接強度を評価できる方法である	<ul style="list-style-type: none"> 柱・梁にはほとんどの場合適用できない 直径の2倍の高さでコアを入手できないことがほとんどであり、補正を要する 切断した骨材とペーストとの付着破壊が懸念される 	<ul style="list-style-type: none"> JIS A 1107, JIS A 1108で規格されている 多くの場合、φ100mmコアが使われる 測定された値は最も信頼性が高く、評価できるものとして扱われることが多い
	小径コア法	JISに適用外の小径コアを切り出し、コアを直接強度試験に供する	<ul style="list-style-type: none"> 直接強度を評価できる方法である 柱・梁に適用できる 直径の2倍の高さが確保されやすい 目的に応じて、コンクリートの表層部と内部を分けて評価できる 採取及び採取後の補修がJIS法に比し容易である 現場持ち込み可能な低荷重装置により現場で強度の評価が可能な方法である 	<ul style="list-style-type: none"> 切断した骨材とペーストとの付着破壊がJIS法に比べても更に懸念される 直径10cm高さ20cmの円柱供試体を基準と考えると小径であることの寸法効果が懸念される 試験体が表層部のものなのか内部のものなのか混同せず、またそれを明示する必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> 2007年日本建築学会によりCTM-14「コンクリートからの小径コアの採取方法及び小径コア供試体を用いた圧縮強度試験方法(案)」が提案された
表面硬度法	反発硬度法	コンクリート表面を打撃し、反発硬度を測定する	<ul style="list-style-type: none"> 測定が簡便 被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート表面近傍のみの性状が反映する 15×15cm程度の測定面が必要なため仕上を取り除き、面を平滑にする必要がある 圧縮強度への推定には多くの影響要因を補正する必要があり、関係式も多く、試験方法として確立できていない 	<ul style="list-style-type: none"> 最も普及している非破壊試験方法であり、JIS A1155として規格された。ただし、ハンマー、強度を推定する方法は規格外である 実務者、研究者の間では、竣工検査レベルでの強度推定にはある程度期待できるが、年月を経過した構造物では推定は困難であるとの評価がある
	引っかけ傷法	引っかけ試験器もしくは釘により、所定の荷重でコンクリート表面を引っかかり、その時の傷幅をクラックスケールで測定する	<ul style="list-style-type: none"> 測定が簡便 被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる 僅かである引っかけ傷が残るのを許容できる場合、非破壊試験と位置付けられる 脱型前のコンクリートを供すれば強度発現が評価できる 内部のコンクリートとは相違することを前提に任意の時に表層劣化度を評価できる 	<ul style="list-style-type: none"> 表面強度、表層劣化を評価するための方法であり、脱型前などはコンクリート強度発現を推定することも可能であるが、脱型後の乾燥の影響や劣化などを受けた場合、内部の強度までを推定できるものではない 高い強度(30N/mm²以上)域での推定は困難である 	<ul style="list-style-type: none"> 日本建築士学会が床スラブの強度に関わる試験器として開発し、日大が構造体コンクリートの強度発現及び表層強度試験方法として整理した。構造体コンクリートに直接引っかかり方法及び円柱供試体に適用できる方法がある 三重大・名大では、荷重を考慮できる試験者により釘を用いて、極めて簡便に、多くのコンクリートを極短時間で評価する試験方法として提案している 名城大では、コア側面に引っかけ試験器を適用させ、コアの採取時におよその強度評価が可能であり、有効であると報告している
切削抵抗法	ドリル法	一定の力で押しつけたドリルの削孔速度、もしくは低速載荷による反力や削孔エネルギーを測定する	<ul style="list-style-type: none"> 試験及び試験後の補修が極めて容易である 深さ方向の強度分布を推定できる ドリル削孔時にリアルタイムで評価が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> ビットの形状、切れ味の影響が大きい 骨材の影響が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> φ18mmのドリル刃を用いており、更に精度向上が必要であるが、構造体コンクリートへの適用可能性を示している
細孔構造法	吸水法	吸水法によりコンクリートの単位ペースト当たりの細孔量を測定する	<ul style="list-style-type: none"> 形状によらず、コンクリートから採取した小塊もしくはコアを適用できる 切断可能な局部ごとに評価が可能である 安価な一般化学器具及び試薬で測定が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> 試料の作製、測定に時間と手間を要する 有効細孔量以外の指標を考慮に入れない分、北大提案の水銀圧入法に比し推定精度には限界がある 	<ul style="list-style-type: none"> 水銀圧入法(日大法)をもとに測定方法を簡便にしたもの

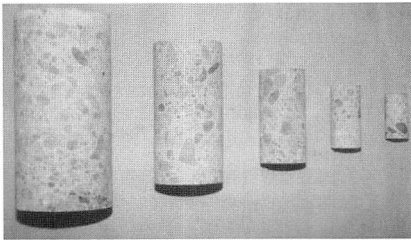


写真-1 小径コア (左から φ100, 75, 50, 33, 25mmコア)

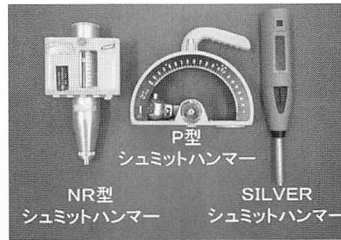


写真-2 各種リバウンドハンマー

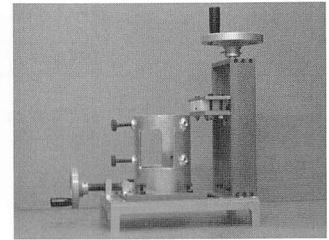


写真-3 コア側面に適用する引っかき試験装置⁹⁾

材の最大粒径の3倍以上の直径のコアを構造体から切り取り直接荷重する方法は、広く普及し最も信頼のおかれた方法である。

採取コアによる直接荷重試験(小径コア法)³⁾⁴⁾

JIS法に対し、小径コア(写真-1)による方法は、直径25~50mmの小径コアを構造体から切り取り直接荷重する方法である。微破壊試験の持つ利点に加え、これまでJIS法では困難であった帯筋・あばら筋間隔の狭い柱・梁への適用を可能とし、高さ補正・鉄筋補正を回避できる長所をもつ。試験体が小さいので、構造体コンクリートの表層から深さ方向に層に分けて強度を評価できる反面、図-1で示されるような構造体コンクリートの品質の不均質性⁵⁾を理解せず、直径の2倍が得られるからといって、表層部のみを採取し試験体とした場合、本質的な意味で、それが構造体コンクリートの強度を評価できているかという疑問が残る。結果とともに試験体の採取情報の併記が必要な方法である。

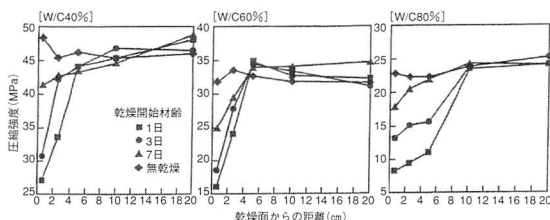


図-1 圧縮強度分布⁹⁾

リバウンドハンマー法⁶⁾⁷⁾

リバウンドハンマー(写真-2)によりコンクリート表面の反発度を求め、その反発度に基づいてコンクリートの圧縮強度を推定する方法である。反発度の測定は、熟練を要することなく容易に非破壊で行えることから、初期材齢における強度管理、既存構造体コンクリートの各種診断および調査手法として広く採用されている。2003年、コンクリートの反発度の測定に関しては、JIS A 1155「コンクリートの反発度測定方法」としてJIS制定されたが、反発度の測定結果から強度を推定する方法については、規格外となっている。

反発度と圧縮強度の関係は、研究者・試験条件によって異なっている。圧縮強度を推定するまでには、多くの未解決な課題が残っており、正確な強度推定に至るまでには、結局のところ、多くの時間と手間がかかる手法である。

2005年3月、日本建築学会関東支部で開催されたパネルディスカッション「リバウンドハンマーによって圧縮強度は推定可能か」での議論に

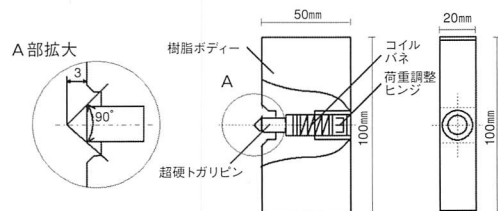


図-2 引っかき試験器⁹⁾

非破壊検査による診断技術

表一 2 RC構造物の中性化及び塩害による劣化度評価試験方法の種類と特徴(湯浅)

試験方法の種類	測定概要	長 所	短 所	備 考	
中性化深さ	直接法	コンクリートのはつり面、もしくは採取コアの側面に、1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、非呈色域を中性化域とし、表面からの深さを測定する	<ul style="list-style-type: none"> ● 中性化深さのみならず、かぶり厚の測定、鉄筋の腐食状況の観察が可能であり、総合的に劣化の評価が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> ● 小規模であるが破壊を伴い、補修工事が必要である 	<ul style="list-style-type: none"> ● 強度試験用コアを併用する他、中性化試験専用50~75mmのコアを採取する場合がある。この場合、鉄筋の交差位置でコアをボーリングし、同時にかぶり厚、鉄筋の腐食状況を観察する
	ドリル法	ハンマードリルを用いて、コンクリートの表面から連続して削孔した粉を、1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧した濾紙に落とし、呈色した時点の削孔深さを測定する	<ul style="list-style-type: none"> ● 短時間で結果が得られる ● 直径10mmのドリル刃を用いて行うため極めて損傷が小さく、多くの箇所測定が可能となる方法である ● 一般的な工具(ハンマードリル、ノギス)、薬品(フェノールフタレイン、エタノール、濾紙)で行うことができる 	<ul style="list-style-type: none"> ● 削孔粉の呈色とドリルの停止とのタイムラグにより、中性化深さが若干大きめに評価される可能性がある。ただし、これは安全側の評価である ● 骨材のみを貫通して削孔する可能性を否定できないので、1箇所の評価は複数の削孔で行う方がよい 	<ul style="list-style-type: none"> ● もともとは日大が開発、提案した方法であるが、NDIS 3419(ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法)として、日本非破壊検査協会の規格となっている
塩化物イオン量	コア法	コアを採取し、コンクリート表面から深さ方向に層別に切断、粉碎して試料を作製する。これを JIS A 1154 により分析し、塩化物イオン量を求める	<ul style="list-style-type: none"> ● 精度が高く、標準的な方法と評価されている 	<ul style="list-style-type: none"> ● 分析のみならず、試料を粉碎する分析前処理にも手間がかかる方法である ● 結果を得るまでに費用がかかる 	<ul style="list-style-type: none"> ● JIS A 1154による方法の他に、コアを表面から垂直な方向に切断した面に対して、EPMA、近赤外分光法を用いて分析する方法があり、これらの精度は高い。また、精度は著しく劣るが、同切断面もしくは割裂面に硝酸銀を噴霧する方法が検討されており、おおざっぱに状態・傾向をつかむ試験と位置づけられる
	ドリル法	ドリル削孔粉をコンクリート表面から深さ方向に層別に全量採取し、削孔粉を JIS A 1154 により分析し、塩化物イオン量を求める	<ul style="list-style-type: none"> ● 現場で、一般的な工具(ハンマードリル、ノギス、カバー)で、粉碎した分析試料を得ることができる ● 数センチのドリル刃を用いて行うため極めて損傷が小さく、多くの箇所測定が可能となる方法である 	<ul style="list-style-type: none"> ● ドリル刃は、骨材を避けセメントペースト部分をより削るため、測定される塩化物イオン量は大きい傾向にある 	<ul style="list-style-type: none"> ● 粉碎試料が飛散しないようカバーで覆いながら削孔することがポイントとなる ● もともと日大が開発・提案した方法であるが、CTM-17「硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法(案)」として、日本建築学会が規格化を図っている ● 日大は、さらに現地で簡易に分析し、即時に結果を得る方法も提案している
かぶり厚	直接法	コンクリートをはつるか、鉄筋の交差位置でコアをボーリングし、直接かぶり厚を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ● 確実な方法である ● 鉄筋の腐食状況を同時に観察できる 	<ul style="list-style-type: none"> ● 破壊を伴い、補修工事が必要である ● 構造物全体に対し、点における測定に限定される 	<ul style="list-style-type: none"> ● 主に非破壊試験において測定する場合も、その測定値を検証する意味で直接法を併用する方がよい
	電磁波レーダ法	コンクリート面に電磁波を放射し、鉄筋により反射した電磁波を測定、解析することにより、かぶり厚を推定する	<ul style="list-style-type: none"> ● 非破壊で行うことができ、測定にかかる時間が短い ● 全数検査が可能である方法である 	<ul style="list-style-type: none"> ● コンクリートの誘電率(主に水分)により推定結果が異なる。直接法を併用し誘電率を検証するとよい ● ジャンカなど空洞の影響を受ける 	<ul style="list-style-type: none"> ● JSTM-III B5707(電磁波レーダ法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法(案))として、日本建材・住宅設備産業協会が規格化されている
	電磁誘導法	コンクリート近傍で発生させた磁束が、鉄筋により変化する時の電気上(コイルの起電力)の変化を解析し、かぶり厚を推定する	<ul style="list-style-type: none"> ● 空隙や仕上材等があっても推定が可能である ● 非破壊で行うことができ、測定にかかる時間が短い ● 全数検査が可能である方法である ● 原理的に、電磁波レーダ法に比し、より鉄筋径推定な方法である 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電磁波レーダ法に比し、探査可能な深さが浅い(20cm以下) ● コンクリート中の鉄分に影響を受ける。直接法を併用し結果を検証するとよい 	<ul style="list-style-type: none"> ● JSTM-III B5708(電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置・径の測定方法(案))として、日本建材・住宅設備産業協会が規格化されている

非破壊検査による診断技術

試験方法の種類	測定概要	長 所	短 所	備 考	
鉄筋腐食度	目視法	鉄筋の位置に沿った錆汁の有無、かぶりコンクリートの浮き・剥落の有無を観察する	<ul style="list-style-type: none"> 錆汁、浮き・剥落の存在は、有害な腐食の発生・進行を示している 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食の発生前の危険度を評価することはできない 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食に関係するひびわれの状況(劣化度)について、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説」の劣化度評価基準がある
	直接法	コンクリートをはつるか、鉄筋の位置でコアをボーリングし、直接鉄筋腐食状況を観察する	<ul style="list-style-type: none"> 確実な方法である 鉄筋の腐食状況を同時に観察できる 	<ul style="list-style-type: none"> 破壊を伴い、補修工事が必要である 構造物全体に対し、点における測定に限定される 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食度の判定に、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説」の鉄筋腐食度評価基準がある
	自然電位法	露出させた鉄筋(測定対象鉄筋と電氣的に導通しているもの)とリード線でつながれた電位差計を用いて、測定対象鉄筋位置の直上コンクリート面に照合電極を接触させ、自然電位を測定する。腐食が進むほど自然電位は負の方向に変化する	<ul style="list-style-type: none"> 腐食発生の有無を確率的な尺度で評価する 一部の鉄筋を露出させ、結線する必要があるが、全体として破壊の程度は小さい ASTM C876などで、自然電位による腐食性評価基準が示されている 	<ul style="list-style-type: none"> 測定の際、コンクリートを湿潤状態に保つ必要がある 測定される自然電位に及ぼすかぶりコンクリートの含水率、中性化、塩化物イオン量の影響が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> 解析の結果、腐食の確率が高いところ、低いところで実際に鉄筋をはつり出し、検証するとよい 建築構造物よりも土木構造物での適用例が多い JSCE-E 601(コンクリート構造物における自然電位測定方法)として、土木学会により規準化されている
	分極抵抗法	一方を露出させた鉄筋(測定対象鉄筋と電氣的に導通しているもの)とリード線でつなぎ、もう一方を測定対象鉄筋位置の直上コンクリート面に照合電極を接触させ、周波数の異なる交流電圧を印加する。周波数により電流経路が異なるという電気回路の特性により腐食反応抵抗を求める	<ul style="list-style-type: none"> 腐食の速度を定量的に推測できる 一部の鉄筋を露出させ、結線する必要があるが、全体として破壊の程度は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 測定方法や評価基準は研究段階で、定まっていない かぶりコンクリートが非常に乾燥している場合、コンクリート表面が水で覆われている場合、コンクリートもしくは鉄筋が絶縁体で覆われている場合、適用できない。また、適用可能な場合も含水率の影響を受ける 	<ul style="list-style-type: none"> 標準化や規格化されていないため、それぞれの装置や手順によって、精度や信頼性に大きなバラツキがある。実際にはつり出し、鉄筋の腐食状況を目視で確認し、検証する姿勢が必要である

よれば、結論は、情報の多い新設ならともかく、竣工後数年経過したコンクリートの強度推定は、相当数のコアによる破壊試験と反発度と対応があること、工学的に議論・検証のできる技術者の検証があって、はじめてなんとかおおよその範囲で可能であり、ただ反発度を測るだけでは無理だということであった。反発度は、深さ1～2cmまでのコンクリートの品質を反映したものであると考える研究者が多い。また、仕上げ材を取り除く必要がある場合、決して非破壊試験とは言えず、壁などの大がかりな修復を伴うことが多い。

引っかかり傷法⁸⁾

図-2に示す試験器により、所定のピンをコンクリート表面に所定の荷重で押しつけながら引っかかり、その傷幅からコンクリートの強度を

推定するものである。強度推定に際しては、測定した傷幅をあらかじめ求めておいた傷幅と圧縮強度の関係に対応させる。

コンクリート表面に対して、「表面強度」、「表層劣化」を評価するための方法であり、脱型前などはコンクリート強度発現を推定することも可能であるが、脱型後の乾燥の影響や劣化などを受けた場合、内部の強度までを推定できるものではない。適用上、留意しなければならない。

また、写真-3のような装置を使い、コンクリートコア側面(中央部)に対して、この試験方法を適用する場合、コア採取時におおよその強度を評価することが可能である⁹⁾。

有効吸水量法¹⁰⁾

コアもしくは小塊から測定しようとする部分

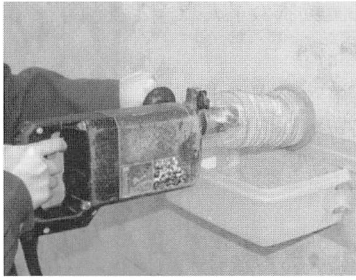


写真-4 ドリルによるコンクリート粉末の採取¹²⁾



写真-5 鉄筋探査機

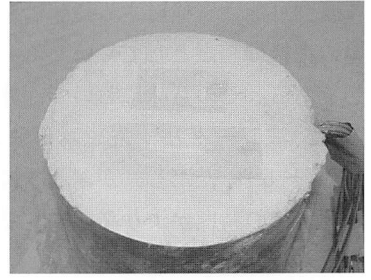


写真-6 乾燥度試験紙による水分蒸発速度測定

のコンクリート片を採取し、2.5mm~5.0mm程度の試料寸法を調整の上、アセトン処理により水和を停止させ、D-dry乾燥させ測定用試料とする。この試料について、吸水量を測定し、強度を推定する方法である。試料中のセメントペーストあたりの吸水量（有効吸水量）という指標から強度を推定する。

3 劣化度評価試験方法

中性化深さと塩化物イオン量の試験

表-2は、RC構造物の中性化および塩害による劣化度評価試験方法の種類と特徴を示したものである。

これまで、中性化深さは、採取コアの側面に、1%フェノールフタレインアルコール溶液を散布し、中性化深さを求めてきた。また、塩化物浸透量は、採取コアを深さ方向に層別し、粉碎・化学分析してきた。これらは、コアの小径化という意味で微破壊試験に移行され得る。

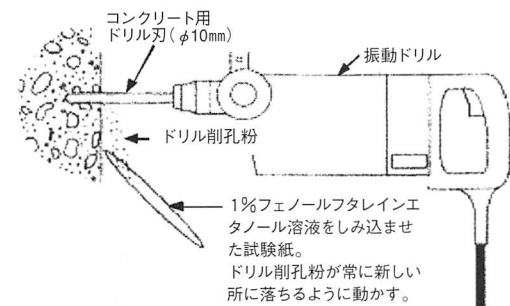


図-3 ドリル削孔粉による中性化深さ試験¹¹⁾

しかしながら小径とはいえ、コンクリートコアを得るためには、排水処理を必要とする破壊試験となるため、試験箇所が限定され、試験に要する費用も少なくない。

笠井・湯浅らは、φ10mmのドリルの削孔粉を用いて中性化深さを試験する方法（図-3）を検討し、その有効性を確認した¹¹⁾。その成果に基づき、1999年、社団法人日本非破壊検査協会より、NDIS 3419「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験方法」が制定された。この方法によって測定された中性化深さは、コンクリートコアを用いる方法による深さとほぼ等しく、破壊程度、作業量、補修量の面で大幅な改善が期待できる方法である。

また、笠井・湯浅らは、写真-4の示すように、φ10mmのドリル削孔粉をコンクリート表面から深さ方向に層別に全量採取する方法を確立し、ドリル削孔粉を用いた塩化物イオン量の測定方法を提案した¹²⁾。粉碎試料を得やすいことも利点である。この方法は、その後、日本建築学会により、CTM-17「硬化コンクリート中の塩化物イオン量の簡易試験方法(案)」として採用されている。

配筋検査方法

中性化深さや塩化物イオン量がわかっただけでは、それらの劣化形態である「鉄筋腐食」の程度もしくは腐食開始までの余時間がわかるわけではない。それには、鉄筋のかぶり厚の把握が重要となる。

腐食可能性を検討する意味において、かぶり厚の把握は、点としてではなく、全量把握が理想である。その意味において、非破壊試験である電磁波レーダ法、電磁誘導法が有効である(写真-5)。ただし、かぶり厚に関しては、電磁誘導法の精度がより高いようである。

鉄筋腐食評価方法

鉄筋腐食を評価する微破壊試験として、自然電位測定法、分極抵抗測定法があり、前者は腐食発生の有無を確率的尺度で、後者は腐食速度を定量的に評価するものである。両者とも対象鉄筋と電気的に導通している鉄筋をハツリだし測定器と結線する必要がある。

4 含水率試験方法

硬化コンクリートの含水率を測定する方法は、これまでに多くの研究者によって研究開発が進められており、日本でも多くの方法が開発されてきた。測定原理から、①水分を電気的に測定する方法②湿度および結露水を測定する方法③水による中性子の減水を利用する方法——などに大別される。これらの中でも①の電気的方法の中で、埋め込み電極を用いる方法¹³⁾¹⁴⁾は、最も多くの研究者によって適用され、他に比べると高い精度で含水率を測定できると評価されている。

しかしながら、含水率測定は研究者が研究用に扱う場合を除くと、施工現場で、塗り床、張り床などの施工可否の判断などのために実施したいと考える技術者が多く、その場合は、多少精度が落ちてでも簡便で安価で測定できることが望まれる¹⁵⁾。誰でも容易に採用できる方法を採用した市販品として、押し当て式電極(静電容量・電気抵抗)、挿入型の電気抵抗式電極¹⁶⁾、乾燥度試験紙¹⁷⁾による方法などがある。現場での使用実績は無視できないが、使用者が原理やキャリブレーションのあり方、開発思想などを考えずにを行うと、表示された値を鵜呑みにした

議論が展開され、数値の1人歩きと批判される状況を作っている。

表-3は、構造物の建設中および経年後の試験で適用可能なコンクリートの含水状態に関する試験方法の種類と特徴を示したものである¹⁸⁾。

押し当て式電極による方法¹⁸⁾

本体と検出部を一体化したハンディタイプのもので市販されている。測定対象に電極をコンクリートに押し当て静電容量を計る(電気抵抗を計るものもある)もので、含水状態を直接デジタル表示するものである。さらには含水率が直読できるようにもなっており、極めて測定が簡便なので、建設現場で多くの実績がある。しかしながら、原理的にはどこの深さにどのような強さで電流が流れているかがわからないことから、測定された静電容量が持つ意味は一律ではない。市販品における、目安のために表示された含水率は、工学的な値とは言い難い。

挿入式電極による方法^{16) 18)}

市販品として、コンクリートに6mmの平行な2つの小径を削孔し、孔に棒状の電極を挿入し、電極間の電気抵抗を測定するものである。原理は明解であり、工学的に含水率を測定できる方法として、押し当て式電極よりも使用上、開発に期待ができる。市販品とするため、押し当て式同様、含水率が直読できるようになっているが、普遍的な値を示すものでない。

乾燥度試験紙による方法^{17) 18)}

筆者らが市販されている乾燥度試験紙を用いたコンクリートの含水状態(水分蒸発速度)測定方法として研究・提案したものである。水分の存在により青色から赤色に変色する乾燥度試験紙(12mm×40mm)を透明なテープ(50mm×100mm)の中央に試験紙を貼り付け、吸湿量に応じて青色から赤色に変色する乾燥度試験紙をコンクリート表面に貼り付けた後、10分経過後の変化した色を標準変色表と比較して、青色か

非破壊検査による診断技術

表一 3 構造物の建設中および経年後の試験で適用可能なコンクリートの含水状態に関する試験方法の種類と特徴(湯浅)

試験方法の種類		測定概要	長 所	短 所	備 考	
電気的方法	埋め込み式	センサをコンクリート中に埋め込み、コンクリートもしくはコンクリートの含水状態に平衡な状態にあるセラミックの電気抵抗を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ●精度が良好である ●深さ方向の分布がとれる ●同じ位置で経時変化をとらえることができる 	<ul style="list-style-type: none"> ●予めセンサを実構造物のコンクリート打設の際、埋め込む必要があり、センサの埋め込み作業、線の引き直し作業等に工夫と時間が必要である ●コンクリートから引き出された線の切断の痕が残りに、補修が必要である 	<ul style="list-style-type: none"> ●北大、大林組、名工大・中部大、日大(セラミックセンサ 1990 年～)におけるセンサが対応する ●最近日本大学では、建設現場で測定が可能な測定方法を提案した。また、自動スキャンモニタリングシステムを提案を提案した¹⁹⁾ ●研究用の範囲を出していない 	
	挿入式	ドリルでコンクリートに2つの孔を平行に削孔し、一対となる電極を挿入し、電極間のコンクリートの電気抵抗を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ●精度が良好である ●深さ方向の分布がとれる ●予めセンサを埋め込む必要がない 	<ul style="list-style-type: none"> ●コンクリートにあげた孔を補修する必要がある ●一度あげた孔のみで経時変化を測定できない 	<ul style="list-style-type: none"> ●Kett HI-800, PM-100i (挿入型プローブ)等の市販品があるが、これらを利用するときには、デジタル表示された含水率は単なる尺度でしかなく、真値については実験が必要である ●研究用の範囲をでていない 	
	押し当て式	電気抵抗法	コンクリート表面に電極を押し当て、電気抵抗を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ●測定が極めて簡便 ●非破壊で行うことができる ●同じ位置で経時変化をとらえることができる 	<ul style="list-style-type: none"> ●コンクリートのどこにどのように電流が流れているかわからないので、原理にそぐわない方法である ●深さ方向の分布がとれない 	<ul style="list-style-type: none"> ●Millard の研究があり、Protimeter, PM-100i (押し当てプローブ)等の市販品があるが、これらを利用するときには、原理的でないこと、デジタル表示された含水率は単なる尺度でしかなくことに注意が必要である
		静電容量式	コンクリート表面に電極を押し当て、高周波静電容量を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ●測定が極めて簡便 ●非破壊で行うことができる ●同じ位置で経時変化をとらえることができる ●日本では市販品が普及し、多くの実測データがある 	<ul style="list-style-type: none"> ●コンクリートのどこにどのように電流が流れているかわからないので、原理にそぐわない方法である ●深さ方向の分布がとれない 	<ul style="list-style-type: none"> ●Kett HI-520 等の市販品があるが、これらを利用するときには、原理的でないこと、デジタル表示された含水率は単なる尺度でしかないことに注意が必要である ●Kett HI-520 (および 500) は、日本床施工研究協議会の「コンクリート床下地表層部の諸品質の測定方法、グレード」で採用されている測定機器である。ただし、測定方法については同協会が規定している
湿度(結露)による方法	貼りものによる方法	不透湿シートによりコンクリート表面を覆い、周囲をガムテープ等でシールし、翌日シート内面に結露水が生じた場合、一般的に仕上材の施工は時期早々と判断する	<ul style="list-style-type: none"> ●前準備が不要で、極めて簡易で、安価に行える ●非破壊で行うことができる ●防水施工可否の判断方法として実績がある 	<ul style="list-style-type: none"> ●含水状態を細かく把握することはできない 	<ul style="list-style-type: none"> ●経験的な方法であるが、極めて有用な方法である 	
	乾燥度試験紙による方法	乾燥度試験紙を一定時間貼り付け色の変化により水分蒸発速度を評価する	<ul style="list-style-type: none"> ●前準備が不要で、極めて簡易で、安価に行える ●非破壊で行うことができる 	<ul style="list-style-type: none"> ●内部の含水状態を把握することはできない 	<ul style="list-style-type: none"> ●日大の研究が対応する ●日本床施工研究協議会の「コンクリート床下地表層部の諸品質の測定方法、グレード」で採用されている測定方法である ●最近日本大学は、より容易で客観的な評価を可能とすることを目的に、改良型乾燥度試験紙を提案した 	
小孔湿度による方法	湿度センサ法	コンクリートに孔をあけ、湿度センサを挿入し湿度を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ●精度が良好である ●深さ方向の分布がとれる ●予めセンサを埋め込む必要がない 	<ul style="list-style-type: none"> ●コンクリートにあげた孔を補修する必要がある ●一度あげた孔のみで経時変化を測定できない 	<ul style="list-style-type: none"> ●東工大・東海大(椎名)の研究が対応する 	
	発色紙による方法	コンクリートに孔をあけ、発色紙を挿入しその変色から含水状態を評価する	<ul style="list-style-type: none"> ●前準備が不要で、極めて簡易で、安価に行える 	<ul style="list-style-type: none"> ●内部の含水状態を把握することはできない ●現時点では評価軸が定まっていない 	<ul style="list-style-type: none"> ●戸田建設の研究が対応する 	

ら赤色の変色の程度に基づき含水状態を客観的に評価する(写真-6)。

5 おわりに

本稿は、読者の多くが防水関係者であることを念頭に置きながらも、鉄筋コンクリート建築物の維持保全全般に係わる非破壊試験・微破壊試験を紹介・解説した。

さらなる試験方法の開発・発展の重要性もさることながら、使用者の既存の試験方法に対する理解が極めて重要である。

私の思うところ、建築物の長寿命化の流れは、単なる「防水」から「建築物の保護」への展開に繋がり、防水業界の動向として、建物の劣化との関わりが増すだろう。今後、私は、コンクリート研究者として、仕上材の「RC造保護機能」に最大の関心をもって研究展開を図っていくつもりである。皆さんにもRC造の劣化のメカニズムを理解いただき、RC造維持保全全般の中で「防水」、「仕上材」、およびその施工、その劣化を考えていただきたいと思っている。

(日本非破壊検査協会 鉄筋コンクリート構造物
の非破壊試験部門 幹事)

[参考文献]

- 1) 湯浅昇:鉄筋コンクリート構造物の耐久性診断方法, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学, Vol.46, No.1, pp.23-30, 2008.1
- 2) 谷川恭雄・魚本健人・湯浅昇・山田和夫・込山貴仁・永山勝・濱崎仁:コンクリート構造物の非破壊検査・診断方法, セメントジャーナル社, p.19-47, 2006.12
- 3) 若林信太郎・谷川恭雄・中込昭・佐原晴也・寺田謙一:小径コアによる構造体コンクリート強度の推定に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.1-8, 2002.3およびNo.556, pp.9-16, 2002.11
- 4) 国本正恵・湯浅昇・笠井芳夫・松井勇:小径コアを用いたコンクリートの圧縮強度試験方法の検討, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学年次論文報告集, 第22巻, 第1号, pp.427-432, 2000.6
- 5) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇:構造体コンクリートの表面から内部にいたる圧縮強度分布, セメント協会セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.840-845, 1997.12
- 6) 湯浅昇:コンクリート強度測定におけるリバウンドハンマーの位置づけ, 工文社, 建築仕上技術, Vol.32, No.383, pp.40-49, 2007.6
- 7) 湯浅昇:リバウンドハンマーによる強度推定に関する話題提供-各種リバウンドハンマーの相互比較, リバウンドハンマーの反発度と圧縮強度との関係を求める方法の提案-日本コンクリート工学協会, コンクリート工学, Vol.48, No.12, pp.23-30, 2010.12
- 8) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 篠崎幸代:引っかけ傷によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案, 日本非破壊検査協会, シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集(Vol.1), pp.115-122, 2003.8
- 9) 西川奈津子, 山根政夫, 谷川恭雄, 鈴木計夫, 各種非破壊試験法による低強度コンクリートの強度推定方法に関する研究(その2引っかけ傷法), 日本建築学会大会学術講演概要集A-1, pp.241-242, 2007.8
- 10) 佐々木隆・湯浅昇・笠井芳夫・松井勇:有効吸水量, 総有効細孔量に基づく硬化コンクリートの水セメント比, 圧縮強度の推定方法, 日本非破壊検査協会, シンポジウム「コンクリート構造物への非破壊検査の展開」論文集(Vol.2), pp.49-54, 2006.8
- 11) 笠井芳夫・湯浅昇:コンクリートの中性化とその簡易な試験方法の提案, 非破壊検査協会, 非破壊検査, Vol.47, No.9, pp.643-648, 1998.9
- 12) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオン量の現場試験方法の提案, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学年次論文報告集, 第21巻, 第2号, pp.1303-1308, 1999.7
- 13) 鎌田英治, 田畑雅幸, 中野陽一郎:コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報1976, pp.288-292, 1976
- 14) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇:埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第498号, pp.13-20, 1997
- 15) 湯浅昇, 笠井芳夫:非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.49-55, 1994.9
- 16) 沓掛文夫, 千歩修, 熊谷敏男:注入補修界面の含水率測定方法の一提案, 日本建築学会大会学術講演概要集A, pp.313-314, 1989
- 17) 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇・逸見義男・佐藤弘和:乾燥度試験紙によるコンクリートの水分状態の評価, 日本建築士学会論文報告集, VOL.5, NO.1, pp.1-6, 1997.10
- 18) 湯浅昇:建設現場で適用可能な含水率試験方法, 工文社, 月刊建築仕上技術, Vol.33, No.393, pp.44-496, 2008.4