

鉄筋コンクリート構造物の劣化・耐久性診断方法

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負えなく、遅ればせながら、超寿命化・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、超寿命化・資源循環型社会の構築では、極めて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、構造物の耐久性ならびに劣化度を診断するには、いかに調査目的に適合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、大がかりな作業や補修を伴い、それが更に高額の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、非破壊試験、微破壊試験は万能ではなく、精度の良さを第一に考えて、破壊試験に頼らざる負

えないことが多いのも実態である。ここでは、まず、コンクリート構造物の診断における破壊試験、微破壊試験、非破壊試験の位置づけを整理し、それらと診断の目的や試験項目、劣化のメカニズムとの関係を示し、最後に具体的に診断における試験方法の現状を概説する。

2. 診断における破壊試験、微破壊試験、非破壊試験の位置づけ

日本建築学会では、1993年に刊行された「建築物の調査・劣化診断・修繕の考え方(案)・同解説」で、調査・修繕の手順の標準を示しており、劣化調査を表-1に示す一次、二次、三次劣化調査に段階的にわけて進めることを提案している。ただし、実際には必ずしもこのとおりに行う必要はなく、例えば、一次、二次劣化調査によっても修繕の要否ができなければ、必ず次に三次調査を行うというのではなく、高次の調査に要する費用と修繕費を見比べ高次の調査に要する費用が過大である場合、修繕を実行する場合があるとしている。

ところで、この最近5年をみると、「微破壊試験」なる用語が十分認知されてきたように思う。この用語は、笠井・湯浅があくまで非破壊試験という位置づけで、ドリルによる中性化深さ試験、透気性試験、吸水試験を提案した際、ドリルを使用した試験は「非破壊試験」といえるのかという意見および議論を通して、15年前であろうか、笠井・湯浅が自らがすっきりとする用語として

表-1 一次・二次・三次劣化調査の相違点

診断レベル	目的・内容		行為者	方法		調査結果の表示	運用
一次劣化調査	概況診断 保全診断	総括的な内容診断	一般的な建築技術者	目視、体感問診	足場準備せず 仕上材はつらず	記述および計数	各劣化現象 共通の診断
二次劣化調査	劣化診断	中程度の診断	専門技術者	非破壊試験が中心	脚立程度の足場 仕上材のはつり	計量	各劣化現象 個別の診断
三次劣化調査	劣化診断	詳細な診断	高度な専門技術者*	破壊試験を含む	大がかりな足場 躯体からの試料の抜取り	計量	各劣化現象 個別の診断

[注] *学校教育で建築を専攻し、引き続き建築関係の実務に携わっている者で、所定の講習などの修了者。

表-2 三次劣化調査案(湯浅)

診断レベル	目的・内容		行為者	方法		調査結果の表示	運用
三次劣化調査	劣化診断	詳細な診断	高度な専門技術者*	微破壊試験 破壊試験	建物全体または局部的に 行う詳細試験	計量	各劣化現象 個別の診断

[注] *学校教育で建築を専攻し、引き続き建築関係の実務に携わっている者で、所定の講習などの修了者。

* ゆあさ・のぼる/日本大学生産工学部 建築工学科 准教授(正会員)

「微破壊試験」と公に言い出したと自負している。「微破壊試験」の定義は、公に定まっているとはいえないが、笠井・湯浅は、 $\phi 50\text{ mm}$ 以下の小径コアやドリルを用いた試験は、これに該当すると考えている。ドリルによる試験も非破壊試験と考えていた当時は、引っかき傷程度が残る試験も我々にとっては疑う余地なく「非破壊試験」であったが、今となっては、「微破壊試験」で区別されてもいいと、すっかり「非破壊試験」の許容範囲は狭まっている。

さて、表-1の中における「微破壊試験」の位置づけであるが、その多くは三次劣化調査において、利用される試験である。三次劣化調査の中において、構造物全体をみるための試験であり、破壊の大小は関係なく、破壊試験同様の精度で結論を決定でき得るものも多い。技術者の誤解を防ぐ意味で、三次劣化調査の項目・内容のみを表-2とするのが妥当と考える。

3. 診断の目的と試験方法の選択

表-3は、単なる強度診断を別にして、中性化による鉄筋腐食、塩害による鉄筋腐食、凍害を対象とした耐久性診断における、劣化メカニズムに関連する品質、劣化予想、劣化度評価に対応する試験項目を整理したものである。また、表-4は、試験項目に対応する多種にわたる試験方法である。さらに、各試験方法は破壊試験で可能なのか、微破壊試験、非破壊試験ではどうかを整理してある。

試験方法が少なく、またあっても開発途上であった頃は、使えそうな試験方法をとにかく劣化と関連づけて実施することしかできなかったように思うが、近年、現象やそのメカニズムから素直に試験項目を選択し、その中で目的にふさわしい試験方法を適用することが可能になってきている。10年前は、試験方法が限定され、歯抜け感があり、このように考えることができなかった。

ただし、「現象・メカニズム—試験項目」から次に具体的な試験方法を選択する場合、現象・メカニズムの観点から、選ぶべきものの順序があることを理解していただきたい。その順序と、やはり現象・メカニズムの観点から判断される必要な精度、破壊の許容度、許容できる費用のバランスの中で考えるべきものであろう。

4. 強度試験

とくにこの10年、1995年に発生した阪神大震災、近年の性能規定化への移行をきっかけに、既存建築物のコンクリート調査や竣工検査において適用可能な強度試験方法が求められ、多くの研究機関によって様々な方法が開発・提案され、発展してきた。

容易に、安価で、構造物をあまり傷つけることなく、強度を正確に評価することが可能な試験方法の出現を社会は期待しているが、これらをすべて満たす試験方法の

出現は難しいと思われる。

ただし今日、唯一の万能な試験方法でなくとも、試験方法を理解し、目的に応じて選択・採用すれば、構造体コンクリートの強度を理解することは可能な時代となったといえる。更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な時代にやっとたどり着いた。

ここでは、構造体コンクリートに適用可能な強度試験（強度推定を含む）を紹介する。表-5は、構造体コンクリートの強度試験方法を総括して示したものである。

表-3 劣化診断における試験項目（湯浅）

劣化現象	評価の観点	メカニズムに対応する項目	試験項目
中性化による鉄筋腐食	劣化予測 抵抗性評価	中性化進行	中性化深さ
		中性化残り	かぶり厚
		中性化の進行抵抗（コンクリートの緻密性）	細孔量
			透気性
			強度
			水セメント比
		水分（中性化抵抗・中性化鉄筋到達後は腐食危険性）	含水率
		アルカリ度	水セメント比
			セメント種類
			pH
CO ₂ 遮蔽	仕上材		
劣化度評価	鉄筋腐食度	鉄筋腐食量	
		浮き	
		ひび割れ	
塩害による鉄筋腐食	劣化予測 抵抗性評価	含有塩化物イオン量	塩化物イオン量
		浸透距離	かぶり厚
		塩化物イオンの浸透抵抗（コンクリートの緻密）	細孔量
			透水性
			透気性
			強度
		水セメント比	
		腐食危険性	含水率
塩化物イオン遮蔽	仕上材		
劣化度評価	鉄筋腐食度	鉄筋腐食量	
		浮き	
		ひび割れ	
凍害	劣化予測 抵抗性評価	凍害危険性	含水率
		コンクリートの耐凍結融解性	耐久性指数
			気泡間隔係数
			空気量
			強度
			水セメント比
			細孔径分布
		透水性	
		骨材吸水率	
		水分遮蔽	仕上材
劣化度評価	凍害度	ひび割れ	
		剥落	
		弾性係数	
		スケーリング	

表-4 試験項目に対応する試験方法と破壊程度（湯浅）

試験の分類	試験項目	試験方法	破壊試験		微破壊試験		非破壊試験
			φ100 mm 程度以上のコア	ハツリ	小径コア	ドリル	
材料・調査	水セメント比	化学分析法	○	○	○	△	×
		細孔構造分析	○	○	○	×	×
		有効吸水量分析	○	○	○	×	×
	セメントの種類	化学分析法	○	○	○	△	×
強度	強度	コアによる試験	○	×	○	—	×
		後付ピン引き抜き法	—	○	—	—	×
		リバウンドハンマー	○	×	×	×	△
		衝撃弾性波	○	×	△	×	○
		超音波伝搬速度	○	×	△	×	○
		引っかき試験	○	×	△	×	△
		水銀圧入法	○	○	○	×	×
		有効吸水量法	○	○	○	×	×
		コア切削効率	○	×	○	×	×
基礎物性	細孔量	水銀圧入法	○	○	○	×	×
		有効吸水量法	○	○	○	×	×
	細孔径分布	水銀圧入法	○	○	○	×	×
		コアによる試験	○	×	△	×	×
	透気性	ドリル削孔法	—	—	—	○	×
		シングルチャンパー法	—	—	—	—	○
		ダブルチャンパー法	—	—	—	—	○
	透水性	コア法	○	—	×	—	×
		ドリル削孔吸水法	—	—	—	○	×
		表面吸水法	—	—	—	—	○
	気泡間隔係数	リニアトラバース法・修正ポイントカウント法	○	△	△	×	×
	空気量	リニアトラバース法・修正ポイントカウント法	○	△	△	×	×
	pH	化学分析法	○	○	○	○	×
		pH 試験紙・pH メータ利用	○	○	○	○	△
	骨材吸水率	直接法	○	○	○	×	×
含水率	絶乾法	×	○	×	×	×	
	挿入型電極を用いる方法	—	—	—	○	×	
	押し当て電極による方法	—	—	—	—	○	
	乾燥度試験法	—	—	—	—	○	
劣化	中性化深さ	フェノールフタレイン溶液法	○	○	○	○	—
		携帯型 X 線分析	—	—	—	—	○
		近赤外分光法	—	—	—	—	○
	塩化物イオン量	化学分析法	○	○	○	○	×
		EPMA 法	○	○	○	×	×
		電磁波レーダー法	—	—	—	—	○
		携帯型 X 線分析	—	—	—	—	○
	かぶり厚	近赤外分光法	—	—	—	—	○
		実測法	○	○	△	△	×
		電磁波レーダー法	—	—	—	—	○
電磁誘導法	—	—	—	—	○		
中性化速度係数	促進中性化試験	○	—	△	—	×	
Cl 拡散係数	塩水浸せき乾燥試験	○	—	△	—	×	
耐久性指数	凍結融解試験	○	—	△	—	×	
仕上材	目視	○	○	○	—	○	
鉄筋腐食度	直接法	○	○	△	—	×	
	自然電極電位法	○	○	○	—	×	
	分極抵抗法	○	○	○	—	×	
浮き	打音法	—	—	—	—	○	
	赤外線カメラの利用	—	—	—	—	○	
ひび割れ	目視	—	—	—	—	○	
剥落	目視	—	—	—	—	○	
弾性係数	超音波伝搬速度	○	×	△	×	○	
スケーリング	目視	—	—	—	—	○	
	表面凹凸評価	○	○	○	—	○	

○可, △可能性はあるがあまり適さない, ×不可

表-5 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、φ100 mm コアが使われる。 ・測定された値は最も信頼性が高く、評価できるものと扱われることが多い。
	コア抜き法 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、コンクリートの表面部と内部を分けて評価できる ・採取および採取後の補修が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10 cm 高さ20 cm 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 ・試験体が表面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"> ・財団法人建築センター技術審査証明を取得した名大・銭高・前田・日本国土開発法と、日大法があるが、寸法補正については、現在のところ見解が分かれている。 ・上記の2団体の成果をもとに、「既存マンション躯体の劣化度調査・診断技術マニュアル(財団法人建築センター、財団法人フォーラム・紛争処理支援センター、平成14年3月発行)」には、「構造体コンクリートからの小径コアの切り取り方法(案)」ならび「小径コアによるコンクリートの圧縮強度試験方法(案)」が提案されている。 ・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およ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 リバウンドハンマー法	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 ・15×15 cm 程度の測定面が必要なために土を取り除き、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る、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 A 1155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。
	引っかき傷法	引っかき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き、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 ・僅かである引っかき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面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(30 N/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す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およ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く方法と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短時間で評価する試験方法として提案している。 ・名大では、コア側面に引っかき試験器を適用させ、コアの採取時におおよそ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	コア法	コンクリートコアの切削効率を測定する	<ul style="list-style-type: none"> ・深さ方向の強度分布を推定できる ・コア採取時にリアルタイムで評価が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> ・骨材の影響を除去するためには、コア供試体による直接強度試験を併用する必要がある ・骨材最大粒径以下のコアドリルを使用した場合、コア径の影響が無視できない 	<ul style="list-style-type: none"> ・大同工大が提案している方法であり、火害診断、アルカリ骨材反応劣化診断に適用している。
	ドリル法	一定の力で押しつけたドリルの削孔速度、もしくは低速搬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"> ・試験およ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"> ・名大・三重大が提案しているφ3 mm程度のドリル刃による方法は、煉瓦、タイル、テラコッタに適用できるが、コンクリートへの展開は途上である。 ・太田の方法は、φ18 mm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。
貫入抵抗法	後付ピン引き抜き試験	コンクリートに孔をあけ、特殊なアンカピンを挿入して引張耐力を測定する	打設時にあらかじめピンを埋め込む必要がない	試験後に補修が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・CAPO試験、Internal fracture試験、ESCOT expanding sleeve試験があるが、CAPO試験には特殊な削孔技術を要する。
	表面引張強度試験	正方形の鋼板をコンクリート表面に貼り付け、鋼板周辺に切り込みを入れ引張強度を測定する	切り込み深さに応じて測定できる	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートと鋼板の接着のため試験には最低2日を要する ・試験後に補修が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートに施した仕上材の接着試験への適用例が多い。
細孔構造法	水銀圧入法	水銀圧入法によりコンクリートの単位ペースト当たりの細孔構造の指標を測定する	<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(1~2 mm程度)ごとに評価が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> ・高価な水銀圧入装置が必要である ・試料の作製、測定に時間と手間を要する 	<ul style="list-style-type: none"> ・多孔材料全般に考えられていた概念を北大がコンクリートの基本物性から検討し提案した方法である。 ・日大は北大の提案を受け、有効細孔量のみから推定する簡易な方法を提案し、深さ方向の推定強度分布を示している。
	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およ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。
音響法	超音波法	コンクリートの超音波伝搬時間を測定し、コンクリートの音速を求める	<ul style="list-style-type: none"> ・被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる ・同一箇所に繰り返し適用できる ・大きな振動エネルギーと受信周波数の選定により、良好な測定が可能である ・コアもしくは2つのコア間の音速により深さ方向の分布を測定できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料・調合・材齢の影響を受ける他、表面の状態、含水率、ひび割れや内部空隙の有無、鉄筋量、配置などの影響を受ける ・使用周波数を高くすると指向性は高くなるが、音波の減衰は大きくなる 	<p>最近では、財団法人土木研究所で、多岐にわたる適用研究が実施されている。土木研究所では、同一平面から表面走査を行うことにより内部の音速分布、強度分布の推定を行っている。</p>
	衝撃弾性波法	測定する部位に振動検出器をあて、その近傍をハンマーで叩くことにより、衝撃弾性波伝搬速度を求める	<ul style="list-style-type: none"> ・被測定物の形状・寸法に関係なく適用できる ・同一箇所に繰り返し適用できる ・超音波に比べても大きな振動エネルギーと受信周波数の選定により、良好な測定が可能である 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料・調合・材齢に影響を受ける他、表面の状態、含水率、ひび割れや内部空隙の有無、鉄筋量、配置などの影響を受ける 	<ul style="list-style-type: none"> ・最近、注目を集めている技術であり、様々な測定システムが提案されている。

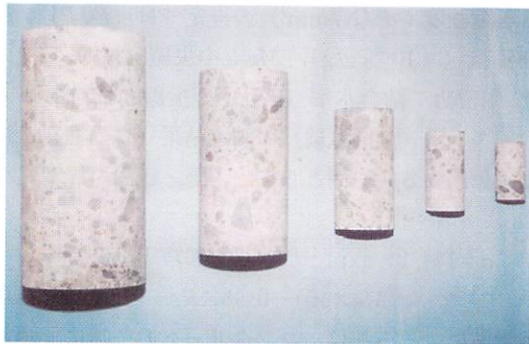


写真-1 小径コア (左からφ100, 75, 50, 33, 25 mm コア)

JISで規定されている骨材の最大粒径の3倍以上の採取コアによる方法は、構造体コンクリートから切り取ったコアの強度、梁の曲げ強度および圧縮強度を試験する時に広く適用されている直接試験である。竣工時の最終的な強度確認、構造耐力診断の際に最も適用される試験方法である。

これに対し、小径コア(写真-1)による方法は、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^{1),2)}。試験体が小さいので、構造体コンクリートの表層と内部など部分部分をわけて評価できる反面、構造体コンクリートの品質の不均質性(図-1)³⁾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と評価できるかという問題になる。目的に応じた採取、結果に対する試験体の採取情報の併記が必要な方法である。

反発硬度を利用した方法は、リバウンドハンマー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。反発度が弾性係数と比例関係にあり、さらに弾性係数と圧縮強度は相関が強いことから構築された方法である。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

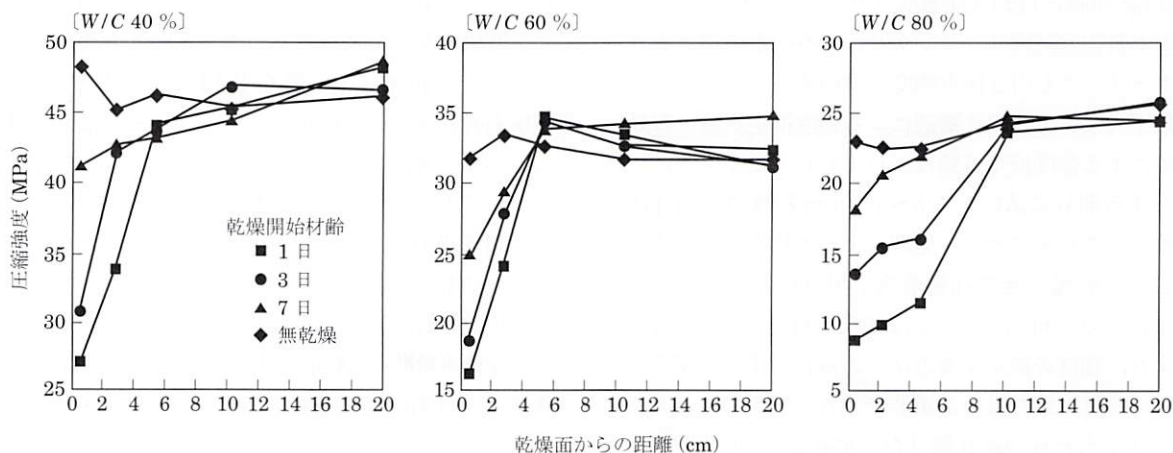


図-1 圧縮強度分布³⁾

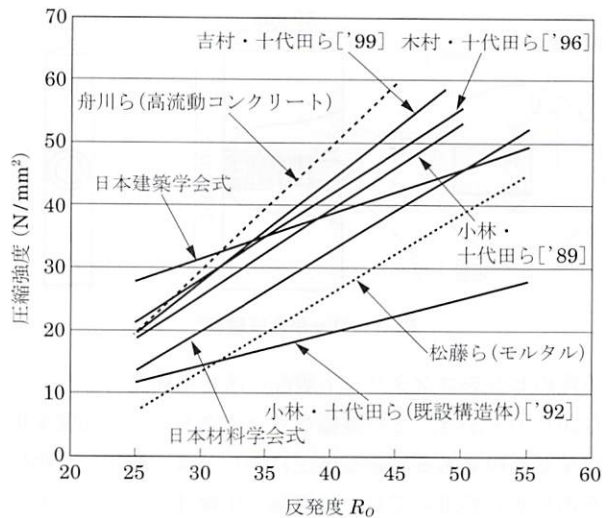


図-2 反発度と圧縮強度との関係⁴⁾

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。平成15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、図-2⁴⁾に示すように、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」での議論によれば、結論は、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があり、それを反発度と対応させ、工学的に議論・検証のできる技術者の検証を伴ってはじめて、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⁵⁾。また、仕上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、大がかりな壁等の修復を伴うことが多い。

引っかき傷による方法は、図-3に示す試験器により、

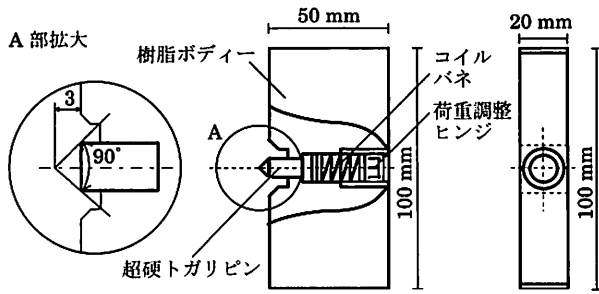


図-3 引っかかり試験器⁶⁾

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⁶⁾。

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ことに、適用上、留意しなければならない。

一方、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⁷⁾。

コアもしくはドリルの切削効率・抵抗による試験は、切削効率・速度、反力・削孔エネルギーを測定し、強度を推定するものである。コア採取時^{8),9)}・ドリル削孔時¹⁰⁾に、深さ方向の強度分布を推定できる方法である。応用として、火害診断⁸⁾、アルカリ骨材反応による劣化診断⁹⁾に適用させているが、表層部の品質評価に有効であり、凍害劣化度の評価も可能であろう。

後付ピン引抜き試験は、ピンをコンクリート中に、削孔により設置し、ピンの引き抜き耐力によりコンクリートの強度を推定する方法である。構造体コンクリート表層部の品質評価が可能である。コンクリートを削孔し、後装着でピンを設置する試験には、①CAPO 試験¹¹⁾、②Internal fracture（内部破壊）試験¹²⁾、③ESCOT expanding sleeve（ESCOT 拡大スリーブ）試験¹³⁾がある。

表層引張強度試験は、コンクリートを所定の深さまでコアボーリングし引き抜き強度を試験する¹⁴⁾。

水銀圧入法による細孔構造による強度推定試験・有効吸水量による強度推定試験は、コアもしくは小塊測定しようとする部分の試料を 2.5~5.0 mm 程度の試料寸法に調整し、これをアセトン処理により水和を停止させた後、D-dry 乾燥させ細孔構造測定用試料とし、①水銀圧入法により分析¹⁵⁾、もしくは②吸水量を測定¹⁶⁾することにより、強度を推定する方法である。いずれの場合も試料中の骨材の取り扱いが重要であり、試料中のセメントペースト当たりの細孔量（有効細孔量）、吸水量（有効吸水量）という指標から強度を推定する。細孔構造に

よる圧縮強度： σ (N/mm²) の推定では、ETPV：総有効細孔量 ($\times 10^{-2}$ cc/g)、 Me ：中央値 (nm)、 Re ：戻り比、 WRh ：結合水率 (g/g) の指標と試料のセメントペースト量（溶解試験）の測定結果（有効細孔量）を基に、算出する。一例として、吉野・鎌田の提案式を示す。

$$\sigma = 144.2 \times \exp(-0.0267 \times ETPV - 0.485) \times \log(Me \times 10) - 0.96 \times Re + 3.56 \times WRh$$

超音波による方法は、コンクリートの一端に接触させた測定端子から発振した超音波パルスが、コンクリート中を透過し、対向する他端に接触させた測定端子に到達するまでの所要時間、ならびに両端子間の距離を測定して超音波伝搬速度（音速）を求めるもので、これによりコンクリート強度を推定する方法である¹⁷⁾。

しかし、コンクリート中の音速は、測定条件、使用骨材の種類・単位量、含水率、鉄筋量と配筋等多くの要因に影響を受ける。そこで、音速法を単独で用いるよりも、反発硬度法等の他の強度推定法との複合で用いる方が、結果の信頼性が向上するといわれている。

また、超音波伝搬速度は、原理的に弾性係数と対応することから、凍害による劣化の評価に期待されている。

衝撃弾性波速度による方法は、衝撃弾性波を発生させ、そのコンクリート中の伝搬速度を求め、これを用いて強度を推定する方法である。用途は超音波と変わらないが、超音波に比べると衝撃弾性波のエネルギーは大きく、かつ調整可能であり、これまで超音波では測定が難しかった長い距離間、伝搬速度の極めて小さい部位での測定に有効である¹⁸⁾。

5. 調合推定

構造物に耐久性をもたせるために、これまでの研究成果から水セメント比をはじめとした仕様・調合を規定していることが多いのが現状である。また逆に構造物の調合を推定できれば、コンクリートのポテンシャルを評価することに有効である。

構造体コンクリートの水セメント比の推定には、①単位セメント量および単位水量を分析試験し計算する方法、②細孔構造から緻密度に基づき推定する方法がある。前者では、単位セメント量を F-18 および F-23 あるいは石灰石骨材・海砂を使用したコンクリートにも適用可能なグルコン酸ナトリウム (NDIS 3422)¹⁹⁾、を用いて分析し、これらの延長上の試験もしくは煮沸法²⁰⁾により単位水量を求めて、仕様規定上の水セメント比からコンクリートの品質を評価する考え方であり、一つ一つの試験の精度に依存し、その精度が低い場合（硬化コンクリートの単位水量推定試験は確立していないのが現状である）、本質的には関連づけるコンクリートの品質・耐久性からかけ離れた評価を下す危険性をもっている。後者は性能規定的に、水セメント比の結果として形成される細孔構

造の緻密度に基づいて水セメント比を推定する考え方¹⁶⁾であり、推定される水セメント比は、むしろコンクリートの品質・耐久性上の尺度・指標そのものとなる。

6. 耐久性に関する試験

構造物の耐久性に関連する直接的なコンクリート品質として、強度以外のものをあげると、コンクリートの含有成分、物質移動性（緻密性）、含水率である。また、促進試験により劣化抵抗性を試験することも可能である。なお、中性化および塩害については鉄筋のかぶり厚の評価が重要である。

コンクリートの含有成分では、中性化に対してpHという意味でセメントの種類とその量（単位セメント量）、塩害に対して塩化物イオン量、凍害に対して空気量（気泡間隔）が重要であり、これらの分析の簡易性を模索したいものである。中性化深さの測定に対しては、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²¹⁾」があり、塩化物イオン量の測定に対しては、ドリル削孔粉による試験方法（日本建築学会CTM-17）が提案されている²²⁾。

物質移動性（緻密性）の評価には、透気性、透水性、細孔構造、マイクロクラックの試験が対応するが、構造体コンクリートに適用可能な方法の利用が望まれる。透気性は、表-4にも示したように多くの原理のものが提案されているが、詳細については文献23)がよくまとめられているのでそれを参照されたい。透水性（吸水性）については、①直接加圧試験（German Water Permeability Test）と、②J.W. Figgの着想に基づいた簡易吸水試験²⁴⁾等がある。細孔構造の評価については、水銀圧入による評価¹⁵⁾、有効吸水量による評価¹⁶⁾が参考になる。また、マイクロクラックの評価については、文献25)がある。

構造体コンクリートに適用可能な含水率の評価方法としては、①ドリル削孔へ挿入した電極による方法、②押し当て電極による方法、③乾燥度試験紙による方法²⁶⁾があり、実用上有効である²⁷⁾。①②の方法では、市販されている機器が利用でき、多くの場合これを使うことになるかと思うが、測定される数値は、含水率表示される場合も本質的な真の含水率ではないので、含水率としての数値として、一人歩きさせないことが必須である。表示される測定値は含水率表示も含めて、含水状態を示す指標でしかない。原理を理解し、測定値と105°C絶乾による質量含水率の対応を自ら求めるなどではじめて含水率としての議論が可能である。

劣化抵抗性評価のための促進試験方法として、コアによる①JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」、②塩水浸せき乾燥試験、③JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」が利用できる。

鉄筋のかぶり厚を評価する方法として、①電磁波レー

ダーによる方法、②電磁誘導による方法があるが、前者はコンクリートの比誘電率がコンクリートの含水率等により影響を受けること、後者はコンクリート中の鉄分および鉄筋の成分・形状、近接鉄筋等に影響を受けることが知られており、これらの測定上の妨害因子を理解することが重要である。

7. 劣化度評価方法

鉄筋の腐食度を評価する方法としては、①鉄筋をはつり出し直接観察する方法、②自然電極電位による方法、③分極抵抗による方法があるが、②③による腐食判定については提案されている評価基準に対応させるだけでなく、①による直接観察結果による検証が推奨される。

ひび割れの調査では、クラックスケールをひび割れに当て幅や長さを直接測定し記録する方法が一般的であるが、最近、ノンプリズムトータルステーション（測定ポイントにレーザー光を照射し、レーザー光が反射して戻ってくるまでの時間を測定することで、ポイントまでの距離を測ることができる測量器械）にクラックスケールを組み合わせた機器が開発され、非接触で測定が可能となっている。

浮きの調査では、打音により浮き・剥離を評価することが一般的に行われているが、高所等で直接打音法を適用できない場合、赤外線カメラによる方法が適切な場合が多い。

凍害などによる表層脆弱層の評価には、強度試験の項で紹介した引っかき傷による方法、コアもしくはドリルの切削効率・抵抗による試験方法、後付ピン引抜き試験方法、表層引張強度試験方法、超音波による方法が適用可能である。また、凍害によるマイクロクラックの発生を観察²¹⁾することも有効である。スケールリングなどの評価では、観察面を印象材等で写し取るか直接レーザーで凹凸を観察することも可能である。

8. おわりに

本稿では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性診断方法の現状を破壊か、微破壊か、非破壊であることを意識してまとめてみた。

微破壊試験や非破壊試験は、破壊試験に対し単なる低次の劣化調査用試験ではなく、近年の微破壊試験、非破壊試験の開発・整備が、これまで破壊試験だけではできなかった本質的な耐久性診断体系をもたらしているといっても過言ではない。

更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。そして、診断の目的に対して必要な精度、破壊の許容度、許容できる費用のバランスの中で、適切な試験方法を選択するべきである。

本稿が、これからの鉄筋コンクリート構造物の診断の

あり方を模索するにあたり、研究者・技術者の一助となれば幸いである。

最後に、非・微破壊試験のよりよい理解のために文献28)「非(微)破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説」を紹介したい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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，コンクリート工学年次論文報告集，第22巻，第1号，pp.427~432，日本コンクリート工学協会，2000.6
- 3) 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
- 4) 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，p.32，セメントジャーナル社，2006.12
- 5) 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，建築仕上技術，Vol.32，No.383，pp.40~49，工文社，2007.6
- 6) 湯浅 昇・笠井芳夫・松井 勇・篠崎幸代：引っかき傷によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案，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，日本非破壊検査協会，2003.8
- 7) 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 引っかき傷法），日本建築学会大会学術講演概要集 A-1，pp.241~242，2007.8
- 8) 太田福男：コンクリート部材表面部の圧縮強度推定方法，鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム講演論文集，pp.37~42，日本非破壊検査協会，2001.1
- 9) 太田福男：切削効率と超音波法によるアル骨反応進行無筋コンクリート構造物全体の劣化度評価方法について，第30回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.69~74，2003.11
- 10) 太田達見：ドリル削孔法によるコンクリート圧縮強度の推定，コンクリートの試験方法に関するシンポジウム報告集，pp.2-75~2-78，日本建築学会，2003.11
- 11) C.G. Petersen：Lok-test and CAPO-test development and their applications，Proceedings，Part 1 Design and Construction Institution of Civil Engineers，Copenhagen，76，1980.9
- 12) A.J. Chabowski，and D.W. Bryden-smith：A simple pull-out test to assess the strength of in-situ concrete，Current Paper CP 25/77，Building Research Establishment，Garston，1977.6
- 13) P.L. Domone and P.F. Castro：An expanding sleeve test for in-situ concrete and mortar strength evaluation，Proceeding of Structure Faults and Repair 87，Engineering Technics Press，Edinburgh，pp.149-156，1987
- 14) 月永洋一・庄谷征美・菅原 隆：表層部の緻密化によるコンクリートの品質改善に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp.570~573，1992.12
- 15) 吉野利幸：空隙指標による強度式表示とその応用，北海道大学博士学位論文，1996
- 16) 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，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，日本非破壊検査協会，2006.8
- 17) 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.10~28，1983.2
- 18) 岩野聡史・首藤浩一・森濱和正・境 友昭・極楳邦夫：衝撃弾性波法による現地でのコンクリート構造物の圧縮強度の推定，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.49~56，日本非破壊検査協会，2003.8
- 19) 中田善久・笠井芳夫・松井 勇・湯浅 昇：硬化コンクリートの単位セメント量判定試験方法に関する研究（グルコン酸ナトリウムによる試験方法の確立），日本建築学会構造系論文集，第460号，pp.1~10，1994年6月
- 20) 中田善久・笠井芳夫・横山 滋・西山直洋：コンクリートコアの直径が単位セメント量の判定試験結果に及ぼす影響，非破壊検査，Vol.46，No.7，pp.511~519，1995年7月
- 21) 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，Vol.47，No.9，pp.643~648，非破壊検査協会，1998.9
- 22) 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，コンクリート工学年次論文報告集，第21巻，第2号，pp.1303~1308，日本コンクリート工学協会，1999年7月
- 23) 今本啓一・下澤和幸・山崎順二・二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31~38，2006.2
- 24) 湯浅 昇：構造体コンクリートの微破壊試験方法（小径コアを用いた調査推定とドリル削孔を用いた耐久性評価），非破壊検査，Vol.50，No.7，pp.434~439，日本非破壊検査協会，2001.7
- 25) 松村 宇・桂 修・吉野利幸：凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究，建築学会構造系論文集，pp.9~13，No.563，2003.1
- 26) 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
- 27) 湯浅 昇・佐々木隆・笠井芳夫・松井 勇：各種コンクリート含水率試験方法の相互比較，平成19年度秋季大会講演概要集，pp.127~130，日本非破壊検査協会，2007.10
- 28) 湯浅 昇：非(微)破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説，非破壊検査，Vol.53，No.9，pp.538~544，日本非破壊検査協会，2005.9