

弾性波法によるコンクリートの耐久性評価の試み

岩野 聡史 リック(株) 森濱 和正 (独)土木研究所

Evaluation of Durability of Concrete by Elastic Wave Method

Satoshi IWANO RIK. Co. Ltd. and Kazumasa MORIHAMA Public Works Research Institute

キーワード 衝撃弾性波, 接触時間, 超音波, 音速分布, 中性化, 塩化物イオン, 拡散, 内部欠陥, ひび割れ

1. はじめに

弾性波は、コンクリートの非破壊試験にとっても非常に有用な方法であり、筆者らは既に超音波法、衝撃弾性波法によるコンクリート強度、部材厚さの推定、内部欠陥の検出などについて報告している^{1), 2)}。衝撃弾性波法、超音波法によるその後の研究成果を報告するが、今回、特に強調したいのは、非破壊試験によってコンクリート表層の耐久性に関わる評価について検討したことである。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性については、鉄筋の腐食に対する評価が最も重要であり、現状では、炭酸ガスの拡散による中性化、塩化物イオンの拡散の評価が重点的に行われているが、その方法はコアを採取して塩化物イオンの拡散係数を求めたり³⁾、ドリル法によって透気係数、透水係数を求める^{4), 5)}など局部破壊を伴うものばかりである。コンクリートの品質は表面から内部に向かって連続的に変化していると考えられるが、破壊を伴う評価方法は、ある程度の深さの平均的な評価しかできない、損傷の程度をできるだけ小さくする努力が行われているが、そうするとばらつきが大きくなる、部分的とはいえ破壊を伴うことから同じ位置では二度と試験を行うことができない、などの問題がある。

このように、局部破壊試験を行なったからといって必ずしも十分な耐久性評価が行われるとは限らない。非破壊試験であれば、破壊を伴わない、連続的な評価を行うことができる可能性がある、同じ位置で繰返し試験することができるため経時変化を確認することができるなど、局部破壊試験の問題点を解消することができ、維持管理にも有効な手段になりうるものと考えられる。

本文では、衝撃弾性波法の鋼球接触時間の測定によるコンクリート表層の品質とそのバラツキを把握することにより、新設構造物では中性化しやすい箇所、既設構造物では中性化が進行していると予測される箇所の推定、ひび割れ進行箇所での内部欠陥結果について検討した結果を、超音波法による中性化速度、塩化物イオン浸透速度の予測について報告する。

2. 衝撃弾性波を利用した耐久性評価

2.1 衝撃弾性波法の特長について

衝撃弾性波法は非破壊試験であり、「はじめに」に記述した局部破壊試験の問題点を解消できるものと期待される。特に、衝撃弾性波法は簡単な測定方法であり、広範囲な複数点での測定結果の比較が可能である、厚さ2mまでの適用が可能である⁶⁾、といった特長を持つ手法である。

具体的な利用方法の例として、中性化などの劣化が進行しやすい箇所や実際の劣化の進行状況を、衝撃弾性波法により広範囲で把握できれば、局部破壊試験の実施時期の判断など、局部破壊試験を補うことが可能になると期待される。また、外観検査でひび割れなどの変状が確認された場合に、衝撃弾性波法によりコンクリート内部の状況を把握できれば、変状の発生原因の推定や適切な対策の検討において有効な情報を提供できるものと期待される。そこで、衝撃弾性波法により中性化進行箇所の予測、進行状況の確認、および、ひび割れ進行箇所での内部欠陥探査について検討した結果について述べる。

2.2 衝撃弾性波法による中性化進行箇所の予測、進行状況の確認について

2.2.1 鋼球接触時間による中性化進行箇所の予測

ヘルツの衝突理論によれば、コンクリートに鋼球を落下させたときの鋼球接触時間 T_c は式(1)により示される⁷⁾。

$$T_c = 5.97 \left[\rho_s (\delta_s + \delta_p) \right]^{2/5} \frac{R}{h^{0.1}} \dots\dots\dots (1)$$

ただし $(\delta_p = (1 - \nu_p^2) / \pi E_p)$ 、 $(\delta_s = (1 - \nu_s^2) / \pi E_s)$ 。
ここに、 T_c : 鋼球接触時間 (秒)、 ρ_s : 鋼球密度 (kg/m^3)、 R : 鋼球半径 (m)、 h : 落下高さ (m)、 ν_p : コンクリートのポアソン比、 ν_s : 鋼球のポアソン比、 E_p : コンクリートのヤング率 (N/m^2)、 E_s : 鋼球のヤング率 (N/m^2) である。

式(1)より、同じ鋼球で打撃を与えると、鋼球接触時間はコンクリート表面付近のヤング率によって変化することとなる。これから、鋼球接触時間の測定により、コンクリート表面付近の緻密性の相対的な評価が可能になると考えられる。そこで、鋼球接触時間の測定結果と中性化速度係数

(3. 2. 1項参照)とを比較する実験を行った。

供試体および測定器を図1に示す。供試体は150mm×150mm×550mmの角柱供試体で、配合はセメント種類が普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメントB種(BB), 呼び強度が18~60の5種類である。供試体は1配合あたり3本で、材齢28日に衝撃加速度計(PCB社製350B03型)を取り付けた直径10mmの鋼球(合計質量8.4g)でコンクリート表面を打撃し、測定波形の周波数解析により鋼球接触時間を測定した⁸⁾。その後、供試体に対して促進中性化試験を行い、これから求めた中性化速度係数と比較した。

図2に比較結果を示す。図2より、材齢28日での鋼球接触時間が長くなるコンクリートでは、その後の中性化の進行が速くなる相関関係が確認された。周知のとおり、中性化の進行速度はコンクリート表面付近が緻密か粗雑かによって変化する。一方、鋼球接触時間はコンクリート表面付近のヤング率によって変化する。実験結果は、中性化の進行速度と鋼球接触時間が、この様にコンクリート表面の状況によって変化する事が対応した結果である。

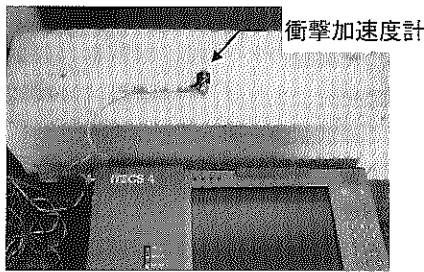


図1 供試体および測定器

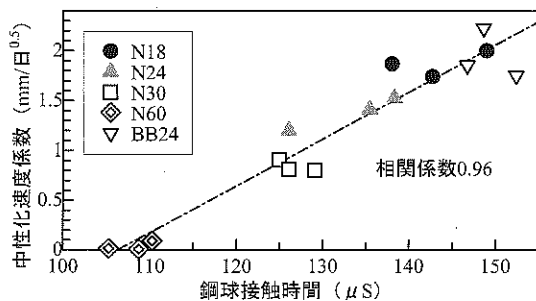


図2 中性化速度係数と鋼球接触時間の比較

これから、新設構造物の同一部材面の複数箇所での鋼球接触時間を測定、比較することにより、中性化等の劣化進行が懸念される箇所を分布で提示することや、図3に示す測定例のとおり、表面にコールドジョイント、ジャンカ、砂すじなどの初期変状が確認される場合には、影響範囲や補修要否の判断に利用できるものと期待される。

2. 2. 2 中性化進行による鋼球接触時間の変化

材齢48日が経過した供試体に対し、促進中性化を行い、促進期間7日~189日間で6回、鋼球接触時間を測定

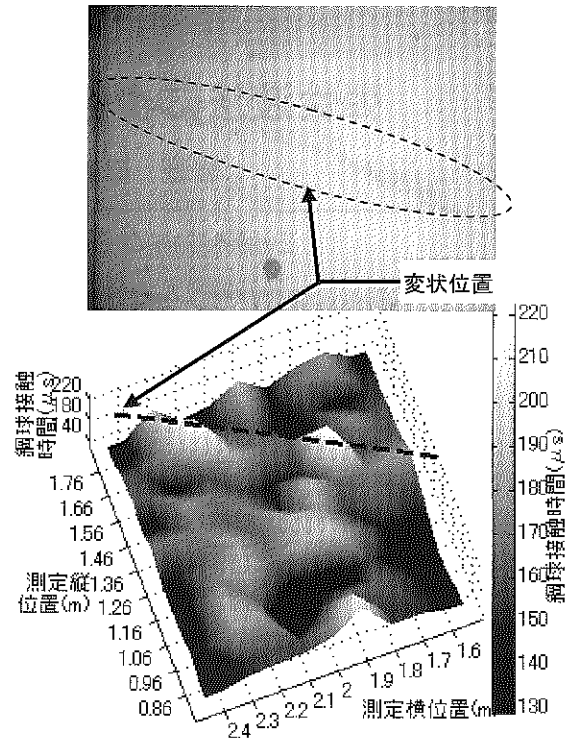


図3 鋼球接触時間適用例(測定物:上, 測定結果:下)

し、中性化の進行による鋼球接触時間の変化について実験した。

鋼球接触時間の測定結果と中性化予測深さとの比較を図4に示す。中性化予測深さ D_t とは、促進期間189日で供試体を割裂し、測定した中性化深さから、 \sqrt{t} 則に基づき式(2)により、鋼球接触時間を測定した各促進期間での中性化深さを予測したものである。 \sqrt{t} 則とは、炭酸ガスの拡散がフィックの第一法則にしたがうと仮定すると、中性化深さは材齢の平方根に比例するというものである。

$$D_t = D_{189} \times \sqrt{t/189} \quad (2)$$

ここに、 D_{189} :促進期間189日での中性化深さ、 t :促進期間(日)である。なお、供試体の配合はセメント種類が普通ポルトランドセメント(N)と高炉セメントB種(BB), 呼び強度が18~30の4種類、寸法は150mm×150mm×

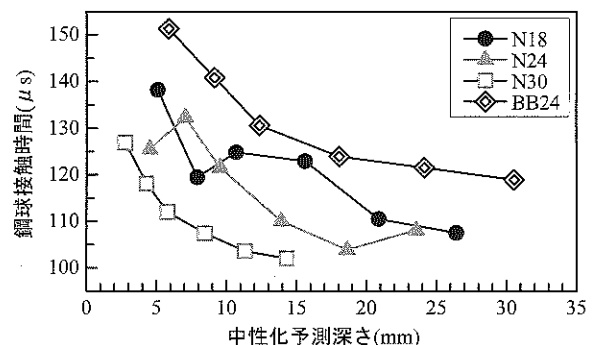


図4 中性化の進行による測定結果の変化について

550mmの角柱供試体である。

図4より、中性化予測深さ20mm程度までは、中性化予測深さが深くなることに対応して、鋼球接触時間は短く変化する結果となった。接触時間が短くなるのは、コンクリートは中性化すると緻密になり、硬くなるためであると考えられる。深さ20mm以上では鋼球接触時間の変化は収束する傾向にあるが、これは、合計質量8.4gの鋼球での接触時間はコンクリートの表面付近の性質を反映したものであり、深い位置での性質には反映しないことを示したものと推測される。

以上のとおり、鋼球接触時間は \sqrt{t} 則による中性化予測深さに対して規則性のある変化を示した。これから、広範囲な複数点で鋼球接触時間を測定し、鋼球接触時間の経時変化量に着目すれば、局部破壊による中性化深さ調査の実施時期や実施箇所決定に利用できるものと期待される。また、局部破壊による中性化深さの調査実施箇所と未実施箇所との鋼球接触時間の変化量を比較すれば、局部破壊試験の未実施箇所に対しても、中性化の進行深さの予測が可能になるものと期待される。

2.3 ひび割れ進展箇所でのコンクリート内部欠陥探査結果

図5、図6にシールドトンネルでの測定例を示す。測定したシールドトンネルは、厚さ100mmの鋼製セグメントに厚さ200mmでコンクリートを覆工したものであるが、天端付近に幅0.5mm以上の軸方向のひび割れが発生していた。さらに、1年後の再調査により、ひび割れ幅の進展が確認された。

これらのひび割れが発生、進展していた範囲において、トンネル内側から衝撃弾性波法により厚さを測定すると、ひび割れが発生していない真横付近では、鋼製セグメント背面までの厚さとなる300mmが測定されたのに対し、天端付近の測定厚さは200mm以下となり、覆工コンクリートの設計厚さを満足しない結果であった。これから、天端付近では覆工コンクリートが鋼製セグメントと密着せずに、空洞が存在していると判断された。

トンネル天端付近に空洞が存在している場合には、周辺地盤からの荷重に対し、天端付近での応力が集中し、ひび割れが発生、進展することが考えられる。これから、このシールドトンネルの天端付近で軸方向のひび割れが発生、進展したのは、内部の空洞が起因している可能性があり、このシールドトンネルに対しては、ひび割れの補修だけでなく、空洞についても充填等による補修が必要になると判断される。

以上の測定例のとおり、外観検査で確認されるひび割れのみを補修しても、発生、進展の根本的な原因を放置すれば、ひび割れの再劣化によるコンクリート構造物の性能低下への危険性を残すこととなる。これから、衝撃弾性波法により、ひび割れ等の変状発生箇所でのコンクリート内部の状況を確認することは、発生原因の推定や適切な対策の検

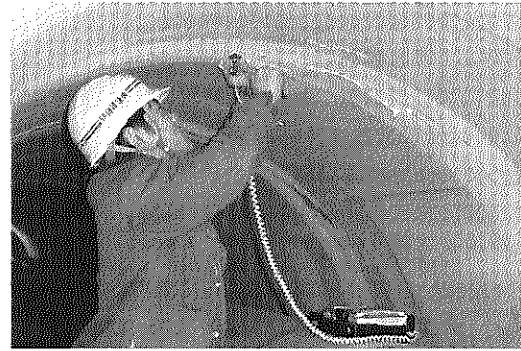


図5 内部欠陥探査状況

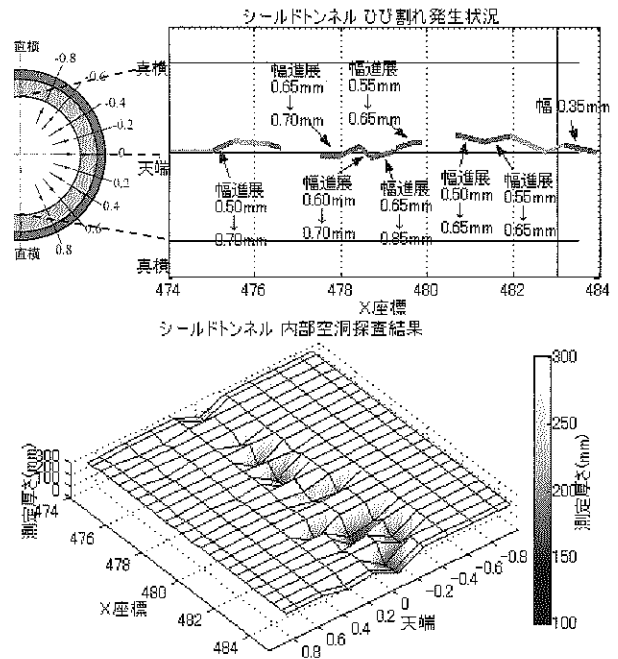


図6 シールドトンネルでの測定結果例 (↑:測定点)

討において有効な情報を提供できるものと期待される。

3. 超音波法による中性化・塩化物イオン浸透度の予測

3.1 緻密性の評価

コンクリート表層の緻密性が重要であることは、「はじめに」のとおりである。これまで多数の実構造物を模擬した大型の供試体、実構造物を用いて、超音波によるコンクリート内部の音速分布を推定することによる緻密性の評価を行ってきた^{1), 9)}。音速分布が緻密性を評価できているかどうかを確認するために、これまではφ100mmの標準コアを採取し、①コアの半径方向の音速、②コアを薄く輪切りにして吸水率または水銀圧入による細孔量を求めた。

緻密性を評価するためにコンクリート内部の音速分布の求め方を示す必要があるが、紙幅の都合によりここでは割愛させていただくこととし、文献1)をご覧ください。

コンクリート内部の音速分布の求め方を、ここでは「提案法」と呼ぶこととする。

一例として、提案法によって求めたコンクリート内部の音速分布と、そのあとコアを採取して、コアの半径方向の音速を表面から10mmずつ測定した結果の比較を図7に、コアの音速測定後に10mmずつ輪切りにして吸水率を測定した結果の比較を図8に示す。

図7の曲線と実線が提案法によって求めた内部音速の結果であり、表面が遅く、内部ほど速くなり、しだいにある一定値に収束している。コアの音速測定結果もほぼ同様の傾向を示しており、提案法はコンクリート内部の音速分布をほぼ推定できていることがわかる。

また、図8の音速と吸水率との関係は、図7のとおり音速が遅い点は表面近くであり、そのときの吸水率は大きい。音速が速くなると吸水率は小さくなり、音速と吸水率の間には負の相関関係がある。提案法による音速は緻密性を評価できることがわかる。

このように、提案法によるこれまでの測定結果は、コンクリート表層の緻密性を評価できていることが確認された。しかし、これまでの検討結果は、耐久性に直接関係する塩化物イオンの拡散や、中性化させる炭酸ガスの拡散を評価したものではない。

そこで、次に提案法による音速分布が中性化深さ、塩化物イオン浸透深さを評価できるのかどうかを検討した結果について述べる¹⁰⁾。

3.2 音速分布と中性化速度

3.2.1 水セメント比と中性化速度

水セメント比を変化させたコンクリートの促進中性化試験を行なった結果の一例を図9に示す。図中の回帰は、 \sqrt{t} 則に基づいて回帰した結果である。 \sqrt{t} 則については2.2.2項をご覧ください。回帰係数を中性化速度係数と呼ぶ。中性化速度は水セメント比の関数になることが知られており、中性化速度係数と水セメント比の関係は図10のように両者はよい相関関係がある。普通ポルトランドセメント(N)の水セメント比と中性化速度係数Aの関係を回帰した結果も図中に示す。この回帰式から、水セメント比が37%のとき中性化はゼロになる。この結果は、これまでの結果¹¹⁾ともほぼ一致しており、今回の実験結果はほぼ妥当なものと考えられる。

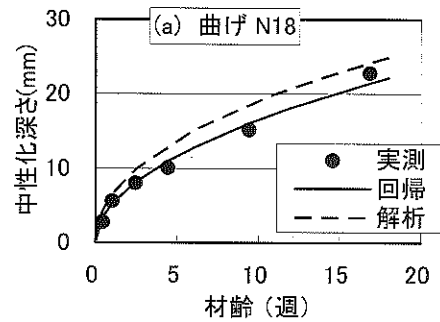


図9 中性化深さ結果の一例¹⁰⁾

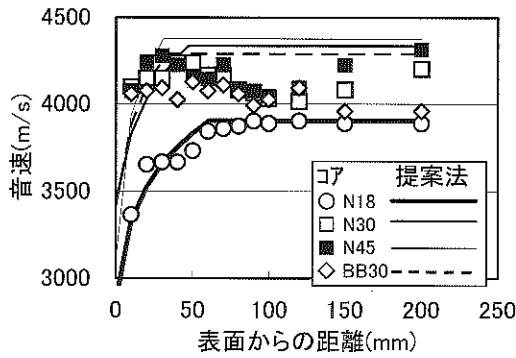


図7 提案法による音速分布とコア音速の比較⁹⁾

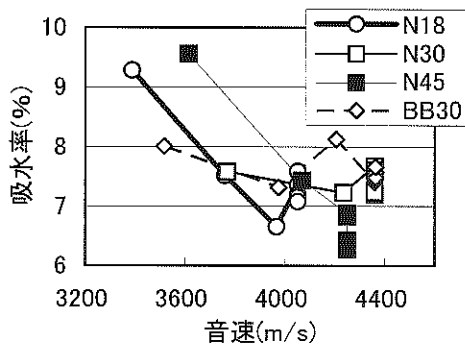


図8 提案法による音速分布と吸水率の比較⁹⁾

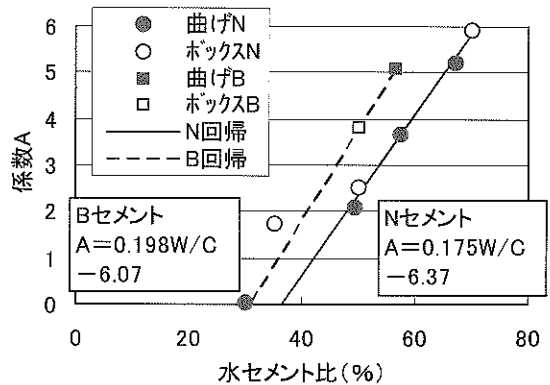


図10 水セメント比と中性化速度係数の関係¹⁰⁾

3.2.2 音速分布と中性化速度

材齢初期の中性化速度は、 \sqrt{t} 則による回帰結果よりもわずかではあるが速くなる傾向がある。これは、表層の音速分布(図7)、吸水率(図8)から明らかとなっており、表層の緻密性が劣っているためであり、次の仮定のもとに音速分布から中性化速度係数を予測し、中性化深さの計算を行なった。

- ①中性化速度は \sqrt{t} 則に従うものとする。ただし、中性化速度係数は音速の関数である。
- ②コンクリート内部の品質が一定部分(図7の音速一定部

分)の中性化速度係数は、水セメント比によって決まる(図10の回帰式)。

③表層の品質が劣っている部分の中性化速度係数は、今後の詳細な検討が必要であるが、今回は音速に反比例するものと仮定した。

②,③の仮定から、音速分布と中性化速度係数の関係は図11(b)のようになる。

このような仮定のもとで中性化深さを計算した結果が、図9の破線(解析)である。図9より、解析結果は全体に過大になっているものの、初期を見ると解析結果と実測値はほぼ一致しており、表層の中性化速度をほぼ推定していることがわかる。

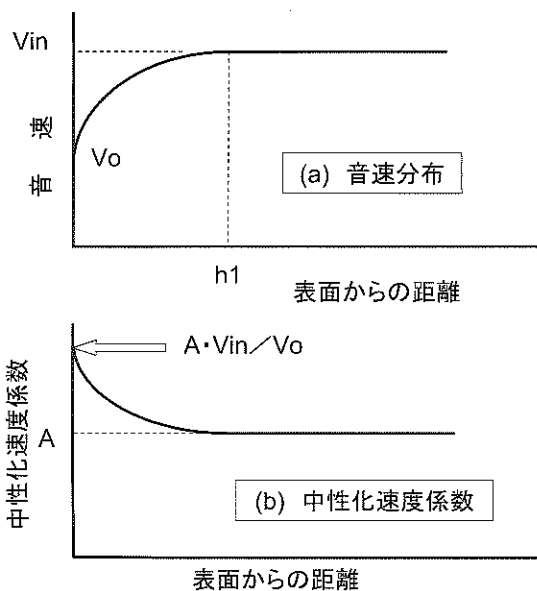


図11 音速分布と中性化速度係数¹⁰⁾

3.3 音速分布と塩化物イオン浸透速度

次に、水セメント比の異なるコンクリートの塩化物イオン浸透深さの関係を示すと図12のとおりである。図12には、図9と同様に回帰と解析の曲線を示している。回帰は、中性化と同様に塩化物イオンの浸透も拡散の問題であり、フィックの第一法則に従うと仮定し、 \sqrt{t} 則で回帰した結果である。解析も中性化と同様に、速度係数は音速に反比例するものと仮定して求めた結果である。

\sqrt{t} 則で回帰した結果は、中性化と同様に実測値とほぼ一致しているものの、詳細に見ると初期はわずかに小さく推定する傾向がある。この結果より、塩化物イオン浸透の場合も表層の緻密性が内部より劣っていることから、初期材齢では \sqrt{t} 則に基づく速度係数よりも大きくなっていることが推定される。

そこで、中性化と同様(図11(b))に音速分布をもとに塩化物イオン浸透の速度係数を求め、浸透深さを計算した結果が図12の破線である。この場合も解析結果は過大に評価する傾向があり、今後、音速分布と速度係数の関係につ

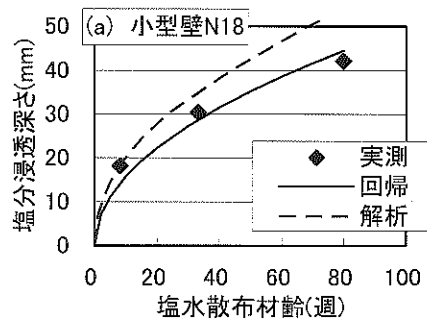


図12 塩化物イオン浸透深さ結果の一例¹⁰⁾

いて詳細に検討する必要があるものの、初期の結果は、解析結果の方がよく一致している。表層の塩化物イオン浸透深さについても、表層の緻密性を考慮する必要がある。特にかぶり厚さが小さい場合には重要である。

4. まとめ

弾性波によるコンクリートの品質評価は、これまでは、弾性波速度が強度と相関関係が高いことから強度推定に限られていた。

コンクリートの強度は、空隙量など緻密性と関係が深い。緻密性は耐久性と関係が深い。これらの関係から、緻密性は弾性波(速度などの物理量)とも関係があるのではないかと考え、弾性波による耐久性の評価について検討した。

検討した内容は、衝撃弾性波によるコンクリート表面の接触時間、超音波によるコンクリート内部の音速分布と、中性化深さ、塩化物イオン浸透深さの関係である。

検討の結果、両方法ともコンクリート表層の品質を評価できることがわかった。衝撃弾性波法は測定が簡単なことから、新設構造物の広い面を打撃することにより相対的に品質の劣る部分の検出に有効と考えられる。また、経時的に測定することにより健全度(または劣化度)診断に役立つものと考えられる。超音波法による音速分布の測定は、新設時に非破壊試験によって中性化速度、塩化物イオンの浸透速度を予測でき、維持管理に役立つものと考えられる。

参考文献

- 1) 富士 岳ほか：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する研究第1報 研究概要および超音波法、非破壊検査、52(9), pp.497-503, (2003)
- 2) 同上 第2報 電磁波レーダ法および衝撃弾性波法、非破壊検査、52(9), pp.691-696, (2003)
- 3) (社)土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と標準化が望まれる試験方法の動向、コンクリート技術シリーズ55, (2003)
- 4) 笠井芳夫ほか：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法、日本建築学会大会学術講演梗概集A1, pp.699-700, (1999)

- 5) 日本大学生産工学部建築工学科建築材料研究室：ドリル削孔を用いた簡易吸水試験方法、試験方法パンフレット
- 6) 非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋かぶり・径の計測に関する共同研究報告書、国土交通省土木研究所 共同研究報告書 第268号, pp.164-167, (2001)
- 7) N.J.Carino, M.Sansalone and N.N.Hsu : A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, ACI JOURNAL / March-April 1986, pp.189-208
- 8) 岩野聡史ほか：非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究 衝撃弾性波その3 鋼球接触時間によるコンクリート表層の強度評価に関する基礎的研究, 日本非破壊検査協会平成16年度春季大会講演概要集, pp.29-30, (2004)
- 9) 森濱和正ほか：超音波法によるコンクリートの品質評価, 土木学会「弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム」論文集, コンクリート技術シリーズ61, pp.273-280, (2004)
- 10) 森濱和正ほか：超音波法による塩化物イオン、炭酸ガス拡散性の評価, 日本コンクリート工学協会「自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム」, pp.261-268, (2005)
- 11) 白山和久：コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説, 日本建築学会, pp.84, (1976)



岩野 聡史 リック(株)(143-0015 東京都大田区大森西1-19-1)技術研究所 所長代理

1994年入社以降、衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の非破壊試験に関する研究に従事し、現在は、コンクリート構造物の調査業務にも携わっている。

<趣味>スキューバダイビング、野球

森濱 和正 <本誌15ページ参照>