

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8 衝撃弾性波法 (ITECS 法) によるコンクリート構造物の 圧縮強度推定手順の検証

Study on Inspection Method of Concrete Structures Using Non-Destructive Tests
Impact Elastic Wave Part8 Deliberation of Methodology for Estimation of Compression
Strength of Concrete Structures by The Impact Elastic Wave Method

○岩野 聡史 リック備 森濱 和正 独立行政法人土木研究所
Satoshi Iwano RIK Kazumasa Morihama Public Works Research Institute
境 友昭 アプライドリサーチ備 極檀 邦夫 ITECS 技術協会
Tomoaki Sakai Applied Research Kunio Gokudan ITECS Association

概 要

弾性波速度から圧縮強度を算出する強度推定式は、両者の関係調査により設定する。ここで、両者の関係式は指数回帰により求めるのが一般的であるが、条件によっては直線回帰により求め、強度推定式を設定する。今回の実験では、新設構造物、および以後の維持管理での強度推定を想定し、強度推定式の設定での回帰方法について検討した。その結果、以後の維持管理への適用などを考慮すると指数回帰による設定が、有効であると確認された。また、既設構造物での弾性波速度の測定方法には、コンクリート表面と内部に強度差による影響を考慮することが必要であることが確認された。

キーワード：衝撃弾性波法、圧縮強度、弾性波速度

1. まえがき

筆者らは、新設コンクリート構造物での圧縮強度推定手順について検討をしている。本法では、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を算出するための強度推定式が必要であることから、円柱供試体で弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係式を求めて強度推定式を設定する。ここで、両者の関係式は指数関数で示されるのが一般的であるが¹⁾、関係調査のサンプル数が少ない場合には、指数関数への回帰は困難となり、直線回帰による一次関数で強度推定式を設定することとなる。そこで、新設構造物、既設構造物を対象として、新設時の強度測定、および、以後の維持管理に適用する場合を想定して、強度推定式の設定方法として直線回帰と指数回帰のどちらが適切であるのかを検討した。また、既設構造物は表面のみが劣化する可能性があることから、既設構造物での弾性波速度の測定方法を検討した。

表1 実験対象構造物の概要

構造物 名称	工程	測定部材	コンクリート種類	
			セメント種類	呼び強度
R	上部工	主桁	早強ポルトランドセメント	36
S	下部工	フーチング	高炉セメントB種	27
		柱	高炉セメントB種	30
U	舗装	版	普通ポルトランドセメント	曲げ4.5

2. 実験対象構造物

実験対象構造物の概要を表1に示す。構造物 R、構造物 S は新設構造物、構造物 U は建設後 6 年半経過した既設構造物である。

3. 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

各構造物、各部材での円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度との関係を調査した。構造物 R、構造物 S では、測定材齢は 3 日～91 日、養生方法は水中養生、封緘養生、乾燥養生とした。構造物 U では 6 年半前の新設時に同様に実施した。関係調査結果を図 1 に示す。

弾性波速度と圧縮強度の関係を養生方法で比較すると、過去の実験結果と同様に²⁾、乾燥養生は他の養生方法と関係が異なるが、水中養生と封緘養生では同一の関係となっ

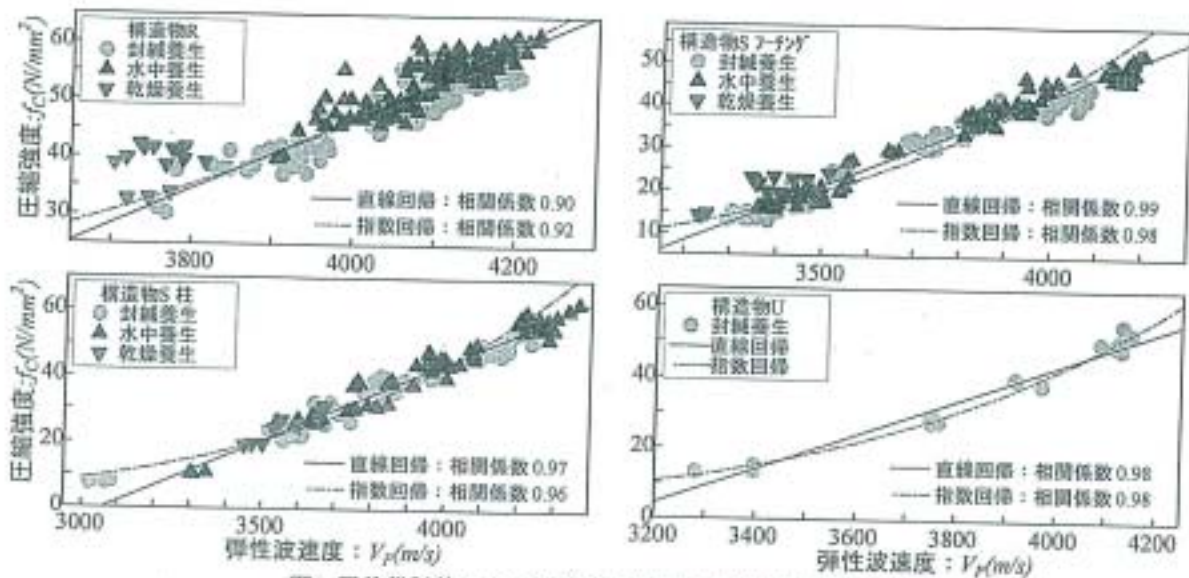


図1 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

た。これから、封緘養生と水中養生の両養生方法で測定した弾性波速度 V_p とコンクリートの圧縮強度 f_c から、両者の関係式を直線回帰による式(1)に示す一次関数、指数回帰による式(2)に示す指数関数により求めた。

$$f_c = a \cdot V_p + b \quad (a, b: \text{係数}) \quad (1)$$

$$f_c = a \cdot V_p^\beta \quad (a, \beta: \text{係数}) \quad (2)$$

求めた関係式を図 1、表 2 に示すと、直線回帰と指数回帰では相関係数に差は無いが、構造物 S 柱の弾性波速度 3000m/s 付近、構造物 U の弾性波速度 3400m/s 付近での結果などから、指数回帰は広範囲の測定材齢での結果に対応していることが分かる。

表2 弾性波速度と圧縮強度の関係式の係数

構造物名称	直線回帰：一次関数			指数回帰：指数関数		
	a	b	相関係数	α	β	相関係数
R	6.16×10^{-2}	-199.7	0.90	2.83×10^{-18}	5.33	0.92
S7-フィング	4.32×10^{-2}	-130.1	0.99	5.84×10^{-20}	5.79	0.98
S柱	4.70×10^{-2}	-143.6	0.97	4.24×10^{-19}	5.56	0.96
U	4.88×10^{-2}	-151.6	0.98	9.33×10^{-22}	6.29	0.98

4. 構造物コンクリートでの弾性波速度の測定結果

(1) 弾性波の伝搬時間差測定結果

構造物コンクリートでの弾性波速度の測定波形例を図 2 に示す。弾性波速度の測定は、入力波形で入力開始時間、受信波形で最初に弾性波が受信点に到達する時間を測定し、これから弾性波の伝搬時間差を決定して、距離差の関係から求める。ここで、入力点から受信点までの距離差 L は 200mm から 100mm 間隔で 1000mm まで変化させ、9 点での測定結果から、弾性波速度を決定することを基本としている。各構造物、部材の構造物コンクリートで弾性波速度を測定した例を図 3 に示す。図 3 より、構造物 R、構造物 S、構造物 U の A01 では、伝搬時間差と入力・受信点間距離差の関係は一直線の比例関係となった。しかし、構造物 U の A04 では、距離差 600mm を境界として、比例関係が 2 通り存在する結果であった。

(2) 弾性波の伝搬性質について

(1) に示したとおり、測定部材によって伝搬時間差と入力・受信点間距離差との比例関係が異なった原因としては、コンクリート表面と内部の強度差による影響が考えられる。

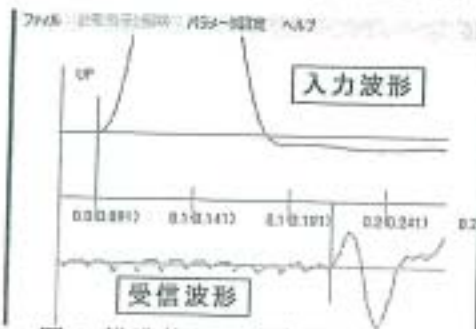


図2 構造物での速度測定波形例

表面と内部の強度が均一な場合では、最初に受信点に到達する弾性波はコンクリート表面を伝搬した弾性波となる。これから、弾性波の伝搬距離は入力点と受信点の距離差となり、伝搬時間差と入力・受信点間距離差は、ほぼ一直線の比例関係となる。これに対し、表面の強度が内部より劣る場合では、最初に受信点に到達する弾性波の伝搬経路は、入力点と受信点の距離差によって異なることとなる。この場合で発生する弾性波の模式図を図4に示す。距離差が短い場合には、表面を伝搬する経路が最短であることから、表面を伝搬する弾性波が最初に受信点に到達する。しかし、距離差が一定以上になると、表面を伝搬する弾性波の速度より内部を伝搬する弾性波の速度が速いことから、内部を経由する弾性波が最初に受信点に到達することとなる。従って、表面の強度が内部より劣る場合では、伝搬時間差と入力・受信点間距離差との直線比例関係は距離差によって2通り存在することとなる。

以上に示した弾性波の伝搬性質から、(1)に示した構造物UのA04では、建設後6年半が経過していることから、コンクリートの表面と内部に強度差が生じているものと推測される。

(3) 弾性波速度の算出方法について

コンクリートの表面と内部の強度が均一な場合と、表面劣化等により表面と内部に強度差が生じている場合では、異なる弾性波速度の算出方法を採用する必要がある。

1) 表面と内部の強度が均一な場合

表面と内部の強度が均一な場合は、コンクリート表面を伝搬して、伝搬距離が入力点と受信点の距離差 L となる弾性波の到達時間差 T_p が測定される。これから、弾性波速度 V_p は式(3)により算出する。

$$V_p = L/T_p \quad (3)$$

2) 表面と内部で強度差が生じている場合

コンクリート内部の強度の推定を目的として弾性波速度を算出する場合には、コンクリート内部での弾性波の速度を算出する必要がある。これには、内部を経由した弾性波が最初に到達する距離2点 L_1, L_2 で測定した到達時間差 T_{p1}, T_{p2} から、弾性波速度 V_p を式(4)により測定することが必要となる。

$$V_p = (L_1 - L_2)/(T_{p1} - T_{p2}) \quad (4)$$

以上から、今回の実験結果については、構造物UのA04では式(4)で、その他は式(3)により弾性波速度を求めた。なお、1測線につき、200mm~1000mmまでの9点で伝搬時間差を測定しているが、複数点で弾性波速度算出結果を平均化処理して、1測線での弾性波速度と決定した。

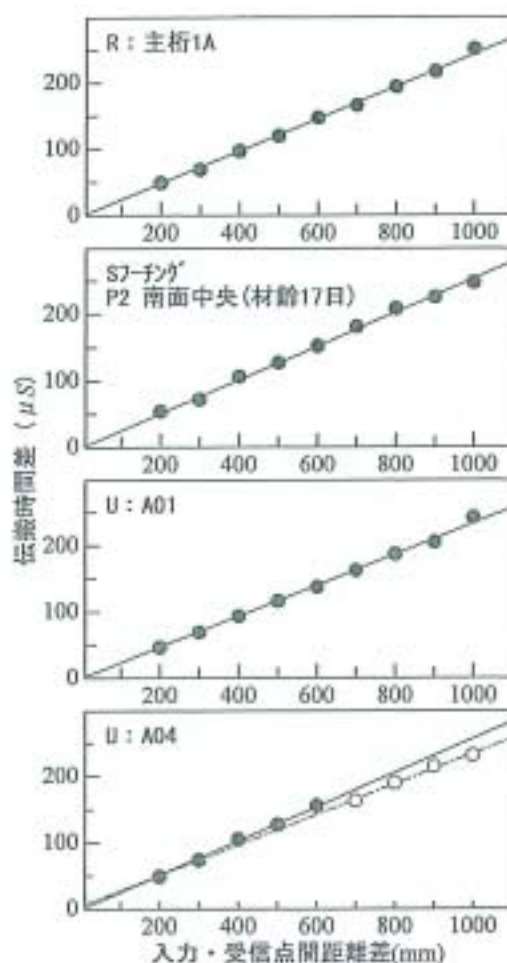


図3 伝搬時間差測定結果例

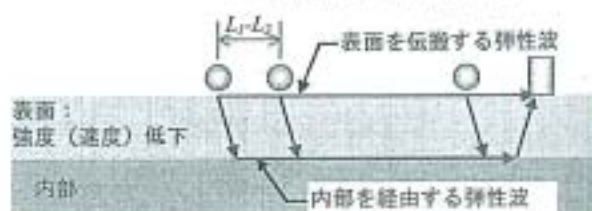


図4 表面が劣化している場合での弾性波の伝搬模式図

5. 構造体コンクリートでの圧縮強度推定結果

4章に示したとおり弾性波速度を測定し、3章で求めた直線回帰による関係式、および、指数回帰による関係式を強度推定式に設定し、圧縮強度を推定した。この推定結果と標準コア、小径コア、ボス供試体による圧縮試験結果との比較を図5に示す。図5より、構造物Rでの小径コアとの圧縮強度試験結果と、構造物Uでの直線回帰により強度推定式を設定した場合に誤差が大きくなった。それ以外の推定誤差は概ね±15%の範囲内であった。

構造物Uで直線回帰により強度推定式を設定した場合に誤差が大きくなった原因を考察する。コンクリートの材齢経過により弾性波速度と圧縮強度は増加するが、一定の材齢期間（材齢7日～91日など）であれば、弾性波速度と圧縮強度は同程度の割合で増加し、両者の関係は一次関数の関係、指数関数の関係の両方で示すことができる。しかし、さらに材齢が経過すると弾性波速度の増加量は圧縮強度の増加量と比べて小さくなるなど、両者の増加の割合は材齢期間によって変化する性質がある。これから、対象となる材齢期間が長い場合には、両者の関係を一次関数の関係で示すことは困難となる。

新設構造物であるR、Sでの測定材齢は7日～35日であった。これから、弾性波速度と圧縮強度は、強度推定式を設定した材齢7日～91日と同程度の割合で増加し、強度推定式を直線回帰で設定した場合と指数回帰により設定した場合で精度に差が生じなかったものと考えられる。一方、建設後6年半が経過した構造物Uでは、弾性波速度と圧縮強度は材齢7日～91日とは異なる割合で増加してきたと考えられる。これから、材齢7日～91日で弾性波速度と圧縮強度の測定した結果から、直線回帰により強度推定式を設定した場合には、誤差が大きくなったものと考えられる。

6. まとめ

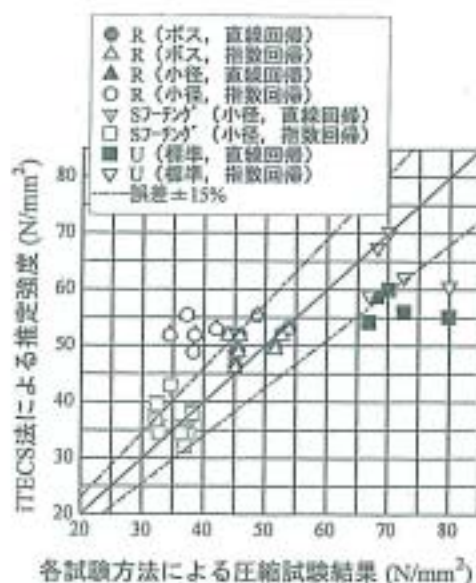
今回の実験では、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を算出するための強度推定式の設定方法として直線回帰と指数回帰のどちらが適切であるのかを検討した。また、既設構造物での弾性波速度の測定方法を検討した。その結果を以下に示す。

①強度推定式を直線回帰と指数回帰のどちらで設定することが適切であるのかについては、測定材齢が7日～91日程度であれば、直線回帰と指数回帰で精度に差は生じない。しかし、建設後6年半が経過した構造物では、直線回帰により強度推定式を設定した場合には、推定誤差が大きくなった。指数回帰による強度推定式の設定は、広範囲の測定材齢での結果に対応できると考えられ、以後の維持管理への適用などを考慮すると、有効な設定方法であると考えられる。しかし、指数回帰はサンプル数が少ない場合では、正確に回帰できないことから、サンプル数、弾性波速度と圧縮強度の関係調査の回数を考慮する必要がある。

②建設後6年半が経過した構造物において、伝搬時間差と入力・受信点間距離差との直線比例関係は距離差によって2通り存在することが確認された。これはコンクリート表面と内部の強度差によるものと考えられる。強度推定に必要な弾性波速度を適切に算出するには、入力・受信点間距離差を例えば200mm～1000mmと複数設定し、伝搬時間差との直線比例関係を確認することが重要になると考えられる。

参考文献：1)岩野聡史，森濱和正，櫻井邦夫，境友昭：弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の測定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1637-1642，2003.7

2)土木学会コンクリート委員会 弾性波法の非破壊検査研究小委員会：弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演要集，pp.18-24，2007.2



各試験方法による圧縮試験結果 (N/mm²)
図5 ITECS法による強度推定結果と各試験方法との比較