

論文 弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定

岩野 聡史*1・森濱 和正*2・極檀 邦夫*3・境 友昭*4

要旨： コンクリートの圧縮強度を、実際の構造物で衝撃弾性波法により、精度良く推定することを目的として以下の実験を行った。まず、過去の実験で弾性波速度と圧縮強度の関係式を得ているが、この関係式はコンクリートの使用材料等によって変化する可能性がある。そこで、実際の構造物でコンクリート打設時にコンクリートを採取して製作した円柱供試体で、弾性波速度と圧縮強度を測定し、過去の実験で得た関係式が適用できるかを確認した。次に、実際の構造物で弾性波速度を計測し、圧縮強度を推定した。その結果、コア抜きによる圧縮試験結果との誤差は平均で 2.0N/mm^2 となった。

キーワード： 衝撃弾性波法, 非破壊検査, 圧縮強度, 弾性波速度, 実構造物

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の圧縮強度を把握するには、現地でコアを採取して圧縮試験を行うことや、現地でコンクリートを打設する際に製作した円柱供試体を用いて圧縮試験を行うことが一般的である。しかし、前者は構造物への影響や時間的問題からサンプル数が限定されるという問題があり、後者は構造物を直接的に評価出来ないという問題があると考えられる。そこで、コンクリート構造物で非破壊検査である衝撃弾性波法により、弾性波速度を直接計測して、圧縮強度を推定する方法について研究を行っている^{1) 2)}。コンクリート中を伝搬する弾性波の速度は、ポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例する。また、弾性係数とコンクリートの圧縮強度には、正の相関関係があると言われており³⁾、これから、弾性波速度から圧縮強度を推定できる可能性が示される。過去の実験²⁾では、両者は指数曲線で相関関係にあることが確認でき、回帰式から両者の関係式を得ることができた。しかし、弾性率と圧縮強度の関係はコンクリートの使用材料などによって変化するとされており³⁾、弾性波速度と

圧縮強度の関係式もコンクリートの使用材料などによっては変化する可能性が考えられる。そこで、今回の実験では、実際の構造物（国道の擁壁底版）で圧縮強度を精度良く推定することを目的とし、先ずこの構造物でコンクリート打設時にコンクリートを採取して製作した円柱供試体を用いて、過去の実験での関係式が、この構造物で圧縮強度を推定する式として適用できるかを確認した。次に、現地の構造物で弾性波速度を計測して、圧縮強度を推定した。この推定結果と、構造物からコアを採取して行った圧縮試験結果と比較を行ったので報告する。

2. 弾性波速度と圧縮強度の関係について

過去の実験²⁾では、表-1に示す、主に粗骨材最大寸法 (G_{\max})、水セメント比、養生方法が異なる3種類の円柱供試体を製作して、材齢1～56日で弾性波速度と圧縮強度を測定し、材齢が経過することにより増強する圧縮強度と弾性波速度の関係を調べた。その結果、弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c には図-1に示す通り、相関係数0.95で、式(1)の関係にあることが確認された。

$$f_c = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.2} \quad (1)$$

*1 伊藤建設(株)技術研究所技術開発グループ 主任研究員 (正会員)

*2 (独)土木研究所技術推進本部構造物マネジメント技術チーム 主任研究員 (正会員)

*3 東海大学助教授 工学部土木工学科 (正会員)

*4 アプライドリサーチ(株)代表取締役 工博

表-1 関係調査に用いた供試体

供試体	Gmax (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	材齢 (日)	養生方法	設計寸法 (mm)
A	25	50.0	43.0	1,3,7	封緘	φ100×200
				14,28	水中, 気中	
B	40	49.5	41.5	1,3,7	封緘	φ125×250
				14,28	水中, 気中	
C	40	40.0	34.1	1,3,7	封緘	φ125×250
				28,56	水中, 気中	

両者が指数曲線で相関関係にある理由を考えると、周知のとおり、弾性波速度 V_p は弾性係数 E と密度 ρ とポアソン比 ν により

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

により表される。コンクリートの圧縮強度 f_c と、動的試験法により求めた動弾性係数 E_D には、コンクリートの単位重量がほぼ同じ場合には、

$$E_D = A \cdot f_c^B \quad (3)$$

の関係があると言われている³⁾。ここで、A, B は、コンクリートの使用材料などによる定数である。式(2)、式(3)から弾性波速度 V_p とコンクリートの圧縮強度 f_c の関係式は

$$f_c = \left\{ \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{A(1-\nu)} \right\}^{1/B} \cdot V_p^{2/B} = kV_p^\alpha \quad (4)$$

となる。これから弾性波速度と圧縮強度の関係式は指数関数で示され、両者は指数曲線で相関関係にあると考えられる。しかし、式(4)の定数 k , α はコンクリートの使用材料などによって異なる定数となるので、図-1の試験片Cの気中養生では回帰曲線との誤差が生じているように、両者の関係式はコンクリートの使用材料などによっては異なる場合が考えられる。

3. 円柱供試体による関係式の確認実験

3.1 実験内容

前述の通り、弾性波速度と圧縮強度の関係式は条件によって異なる可能性があり、厳密に言えば、使用材料、養生方法毎に關係式を求めることが必要となる。しかし、条件毎に關係式を求めるとは、サンプル数や実際の構造物では

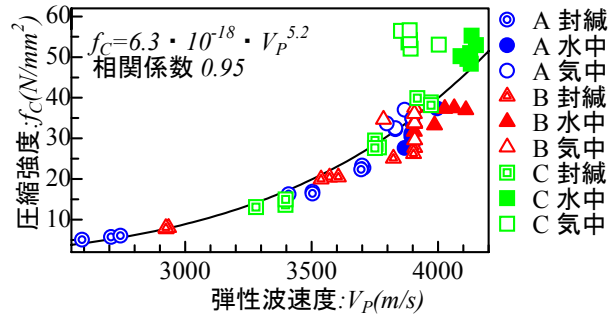


図-1 弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

養生条件をどこまで把握できるかなどの問題があると考えられる。そこで、圧縮強度を推定する式として式(1)を採用することを前提とし、この妥当性を確認するために実験を行った。内容は測定を行う実際の構造物で、コンクリート打設時にコンクリートを採取して製作した円柱供試体で弾性波速度を計測し、式(1)により圧縮強度を推定する。この後、圧縮試験を行い、実際の圧縮強度と推定した圧縮強度とを比較した。

3.2 円柱供試体による関係式の確認実験方法

(1) 実験に用いた供試体

表-2 実験に用いた供試体

打設日	材齢 (日)	養生方法	設計寸法 (mm)
A	27,44,58,86	封緘	φ125×250
B	11,21,28,119		
C	8,13,27,55		

実験に用いた円柱供試体の概要を表-2、配合を表-3に示す。打設日が3種類と異なる円柱供試体について、材齢を8~119日と変えて、材齢により圧縮強度を変化させて実験した。

(2) 弾性波速度の計測方法

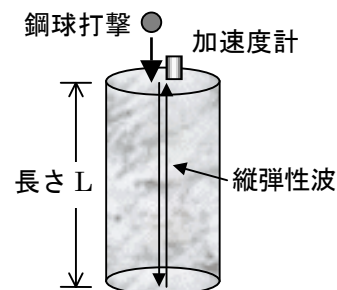


図-2 円柱供試体での測定状況

測定状況を図-2に示す。表面に加速度計(PCB社製、352C66型、測定振動数20kHz)を手で押し付け、その近傍を直径15mmの鋼球で打撃する。加速度計が検知した測定波形に対し、

表-3 実構造物および円柱試験片でのコンクリートの配合

セメントの種類	呼び強度	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
							水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
											AE減水	AE
高炉B種	24	40	8	4.5	47.4	39.2	144	304	723	1138	0.121	—

自己相関関数を求めてからFFT解析を行い、縦弾性波が打撃面と底面で多重反射することにより生成される振動数 f_0 を求める⁴⁾。サンプリングクロックは 10μ 秒、データ数は800個である。この振動数 f_0 と円柱供試体の長さ L から、弾性波速度 V_p を

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (5)$$

により計測する。

3.3 圧縮試験片による関係式の確認実験結果

圧縮試験による圧縮強度と3.2により計測した弾性波速度との関係を図-3に示す。図-3より、今回の実験では圧縮強度 f_c と弾性波速度 V_p は相関係数0.94で式(6)の関係となった。

$$f_c = 7.5 \cdot 10^{-16} \cdot V_p^{4.6} \quad (6)$$

式(6)の係数は、式(1)とは完全には一致しないが、弾性波速度4000m/sで両式により推定した圧縮強度の差は 2.3N/mm^2 となるように、両指数曲線は弾性波速度3400~4000m/sの範囲では近似している。また、計測した弾性波速度から式(1)により推定した圧縮強度と、圧縮試験結果の関係を図-4に示すと、Bは推定強度が若干強くなるが、誤差は最大 4.6N/mm^2 、平均 1.3N/mm^2 と良く一致した。以上から、この構造物では、計測した弾性波速度から圧縮強度を推定する式として、式(1)が妥当であると判断できる。

4. 実際の構造物での圧縮強度推定実験

4.1 実験方法

(1) 測定した構造物

測定した構造物の全景を写真-1に示す。測定した構造物は擁壁の底版で、鉄筋コンクリートである。配筋状況は図-7に示す測定線に対して平行・垂直方向に250mm間隔、表面からのかぶりは平行方向で110mm、直角方向では約123mm、鉄筋径はD13(表-4に示すNo.1の直角方向のみD16)である。

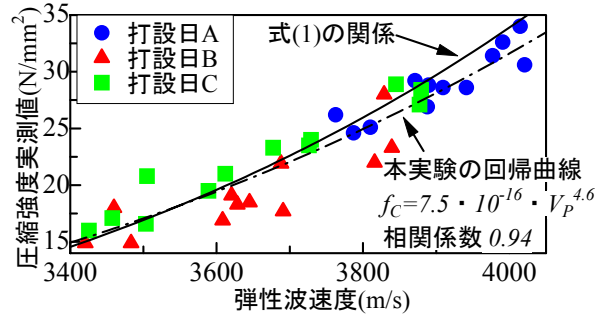


図-3 圧縮強度と弾性波速度の関係

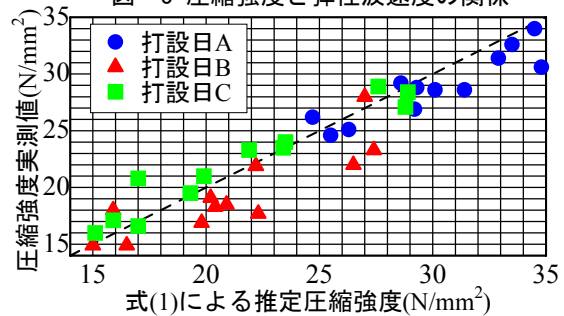


図-4 圧縮強度実測値と推定結果の比較

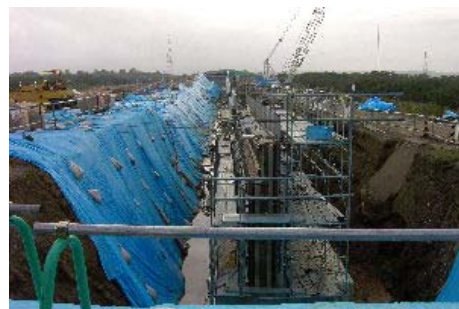


写真-1 構造物全景



写真-2 底版の状況

(2) 弾性波速度の計測方法

弾性波速度は3.1(2)に示す通り、縦弾性波の多重反射による振動数と多重反射する位置が分かれば、式(5)により計測できる。しかし、今回測定した底版は、写真-2に示す通り、測定面から見た設計厚さは1200mmであるが、背面に

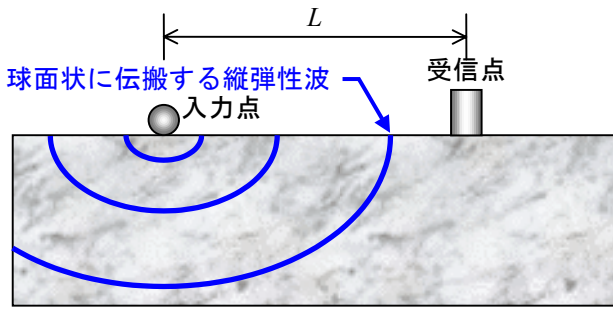


図-5 縦弾性波の伝搬模式図

ステコン・地盤が密着し、測定面から入力した縦弾性波が多重反射する深さを、明確に把握することはできない。そこで、コンクリート表面を鋼球で打撃すると、縦弾性波は内部を球面状に伝搬するが（模式図を図-5）、この性質を利用して、以下の通り弾性波速度を計測した。

衝撃加速度計（PCB 社製，350B03 型）を取り付けた直径 10mm の鋼球でコンクリート表面を打撃し、表面に加速度計（PCB 社製，352C66 型，測定振動数 20kHz）を手で押し付けて、入力波形と受信波形を測定する。入力・受信点間距離は 100mm, 200mm と 100mm 間隔で 1000mm まで変え、入力波形で発振時間，受信波形で最初に到達する振動の到達時間を計測して、縦弾性波の到達時間差を計測する（写真-3，図-6）。サンプリングクロックは 1μ秒である。

圧縮強度を精度良く推定するには、弾性波速度を精度良く計測する必要があるが、これには、縦弾性波の次の性質を、十分に吟味をする必要がある。受信側に最初に到達する縦弾性波の伝搬経路は、コンクリート表面と内部との品質の差によって異なる性質がある。表面と内部の品質がほぼ均一であれば、最初に受信側に到達する縦弾性波の伝搬経路はコンクリート表面となり、入力・受信点間距離 L と計測した到達時間差 T_p は式(7)の直線比例関係となる。

$$T_p = \alpha \cdot L + \beta \quad \text{式(7)}$$

この場合では、計測結果から式(7)を最小二乗法により求めると、 α から表面を伝搬する縦弾性波の速度 V_p が計測される。また、内部と表面の品質がほぼ均一であるので、内部を伝搬する縦弾性波の速度は表面を伝搬する縦弾性波

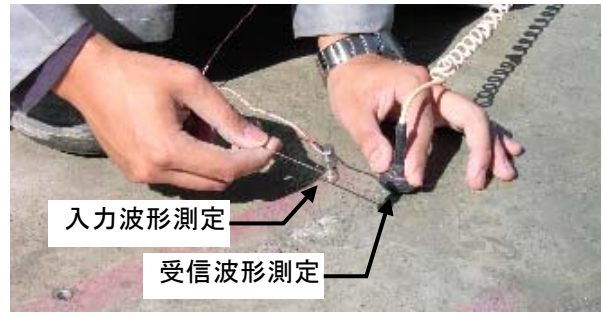


写真-3 弾性波速度測定状況

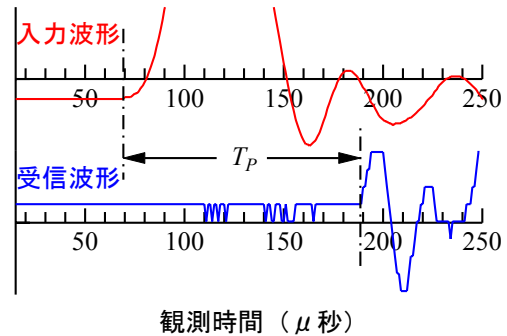


図-6 弾性波の到達時間差測定例

表-4 実構造物での圧縮強度推定 測定位置

測定部位	材齢 (日)	測定位置(mm) ※壁からの距離
No. 1	41	1080
		1280
		1470
No. 2	34	840
		1050
		1230
No. 3	74	820
		1030
		1220
No. 4	18	800
		1,000
		1,220
No. 5	11	800
		1020
		1220

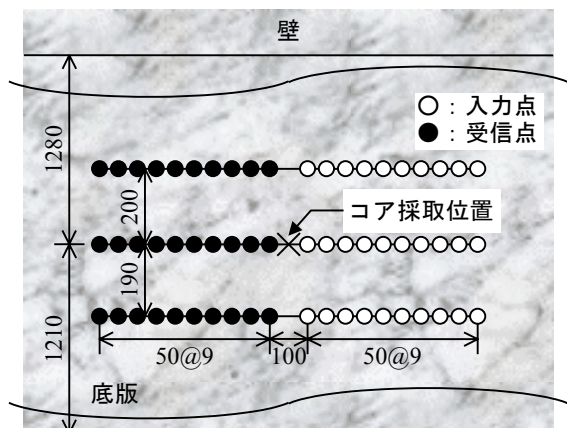


図-7 部位 No. 1 での測定位置（平面図，単位 mm）

とほぼ等しくなり、この結果からコンクリート内部の圧縮強度を推定できる。

一方、表面の品質が内部より劣る場合や、測定点の近傍に鉄筋が存在する場合には、スネルの法則により受信側に最初に到達する縦弾性波の経路は L によって異なる^{4) 5)}。この場合、式(7)で弾性波速度を求めると、 L が短い範囲では表面付近を伝搬する縦弾性波の速度が計測され、 L が長くなるに従い、内部や鉄筋を伝搬する縦弾性波の速度が計測されることとなる。従って、圧縮強度を推定するには、適切な弾性波速度が計測される L の範囲を判別し、弾性波速度を決定する必要がある。

(3) 測定位置

材齢が 11 日～74 日と異なる 5 部位に対して測定した。各部位の概要を表-4 に、測定位置の例として部位 No.1 の測定位置を図-7 に示す。また、3.2 の実験に用いた円柱供試体は、打設日 A は No.2、打設日 B は No.4 で製作したものである。打設日 C は今回の測定部位で製作したものではない。弾性波速度は入力点と受信点の距離を変えて計測するが、入力点と受信点を左右に 50mm ずつ移動させ、中心位置は固定した。また、鉄筋の影響を受けないよう、測定線は別途調査した配筋位置の中心とした。各部位で測定位置は 3 箇所であるが、測定後に中心の測定位置で、比較のために $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ での圧縮試験用のコアを採取し、圧縮試験を行った。

4.2 実験結果

主な測定位置で計測した縦弾性波の到達時間差 T_p と入力・受信点間距離 L を図-8 に示す。図-8 より、全測定位置とも縦弾性波の到達時間差は、入力・受信点間距離 100～1000mm において、直線比例関係にあることが確認できる。これから、この構造物のコンクリート表面と内部の品質はほぼ均一であり、また、内部の鉄筋の影響を受けずに、回帰直線の傾きから計測する弾性波速度が、コンクリート内部を伝搬する縦弾性波の速度と同値であると判断できる。

全測定位置において、計測した弾性波速度と

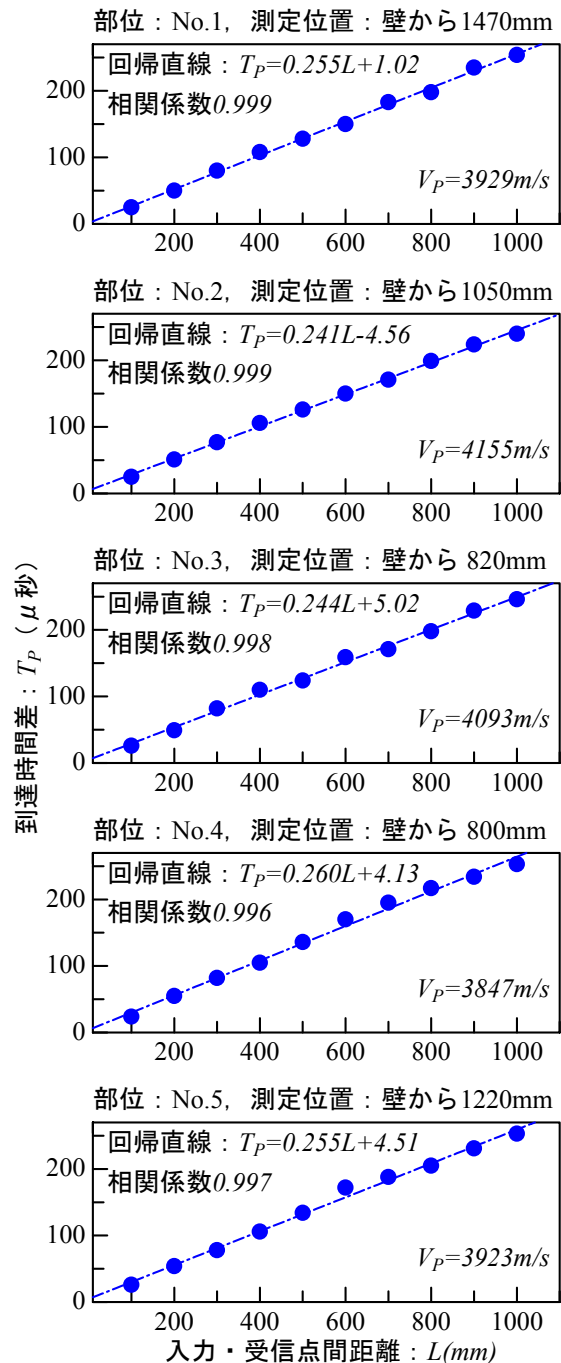


図-8 各部位での弾性波速度測定結果

この弾性波速度から式(1)により推定した圧縮強度を、また、比較のためコア採取による圧縮試験での圧縮強度を表-5 に示す。本構造物は同一配合であるが、材齢が異なることから測定部位により圧縮強度実測値は異なった。それに対し、各部位の 3 箇所での弾性波速度を平均し、推定した圧縮強度平均値は、圧縮強度実測値の変化に良く対応し、両者の誤差は $0.5 \sim 4.1\text{N/mm}^2$ となった。これから、推定式として式(1)を適用したことで、弾性波速度計測方法は適切であり、

表-5 圧縮強度推定結果一覧

測定部位	材齢(日)	測定位置(mm) ※壁からの距離	弾性波速度(m/s)	推定圧縮強度(N/mm ²)		圧縮強度実測値(N/mm ²)	誤差 (平均値-実測値) (N/mm ²)
				平均値			
No. 1	41	1080	3909	30.1	30.8	31.5	-0.7
		1280	3943	31.5			
		1470	3929	30.9			
No. 2	34	840	4062	36.7	36.3	36.8	-0.5
		1050	4155	41.3			
		1230	3940	31.3			
No. 3	74	820	4093	38.2	36.3	34.4	1.9
		1030	4102	38.6			
		1220	3967	32.5			
No. 4	18	800	3847	27.7	25.6	29.7	-4.1
		1000	3771	25.0			
		1220	3750	24.2			
No. 5	11	800	3868	28.5	28.9	26.0	2.9
		1020	3847	27.7			
		1220	3923	30.6			

衝撃弾性波法により、コア採取による圧縮試験と同等に圧縮強度を推定できることが示された。

5. まとめ

実際のコンクリート構造物で、衝撃弾性波法により弾性波速度を直接計測し、圧縮強度を精度良く推定することを目的として実験を行った。今回の実験での結果を以下に示す。

1)今回測定した構造物の円柱供試体を用いて、弾性波速度と圧縮強度を測定し、過去の実験で得られた関係式と比較した。その結果、回帰曲線は過去の実験結果と近似し、過去の関係式で推定した圧縮強度と実際の圧縮強度との誤差は最大 4.6N/mm²、平均 1.3N/mm² と良く一致した。これから、今回の構造物では過去の関係式が推定式として妥当であることが確認できた。

2)縦弾性波が多重反射する位置が明確でない状況では、コンクリート表面で縦弾性波の伝搬時間を計測し、速度を決定する。この場合、入力点と受信点の距離を変えて計測し、縦弾性波の伝搬経路を吟味することが有効である。

3)以上から、実際の構造物で圧縮強度を推定すると、コア採取による圧縮試験結果と同等に圧縮強度を推定できることが示された。

今後は、これまでと配合が大きく異なる場合には推定式として、過去の関係式が適用できるのか、また、適用できない場合や既設構造物で

関係式の確認実験が出来ない場合での適切な推定式について実験する。なお、本研究は独立行政法人土木研究所との共同研究で行ったものであり、論文は研究成果の一部である。

最後に、国土交通省北海道開発局釧路道路事務所にご協力頂いたことに感謝致します。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極檀邦夫, 森濱和正: 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ、強度の推定, 日本道路協会第 24 回日本道路会議一般論文集 (A), pp.336-337, 2001.10
- 2) 岩野聡史, 境友昭, 極檀邦夫, 森濱和正: 非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その 2 3 弾性波法によるコンクリート強度の推定, 日本非破壊検査協会平成 13 年度秋季大会講演概要集, pp.111-114, 2001.10
- 3) 河野清, 田澤栄一, 門司唱: 新しいコンクリート工学, 朝倉書店, 1987.5
- 4) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭, 森濱和正: 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001.6
- 5) 森濱和正: 超音波による正確なコンクリート版厚の測定方法, 土木技術資料, Vol.41, No.2, pp.38-43, 1999.2