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。先ず,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/mm²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 って変化すると言われており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。

 $f_C = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_P^{5.2}$

(1)

- *1 伊藤建設㈱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㈱代表取締役 工博

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)	
	25	50.0	43.0	1,3,7	封緘	φ100×200	
A				14,28	水中,気中		
В	40	40 49.5	41.5	1,3,7	封緘	φ 125×250	
				14,28	水中,気中		
С	40	40 40.0	34.1	1,3,7	封緘	\$ 125×250	
		40.0		28,56	水中,気中	φ123~230	

表-1 関係調査に用いた供試体

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v により

$$V_{P} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$
(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では、

 $E_{D}=\mathbf{A}\cdot f_{c}^{B}$ (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

$$f_{c} = \left\{ \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{A(1-\nu)} \right\}^{l/B} \cdot V_{P}^{2/B} = kV_{P}^{\alpha}$$
(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, a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,養生方法毎に関係式を求める ことが必要となる。しかし,条件毎に関係式を 求めることは,サンプル数や実際の構造物では



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)	
Α	27,44,58,86			
В	11,21,28,119	封緘	φ125×250	
С	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。





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,

	1111 粗骨材		空気 水セメント	紿	単位量 (kg/m ³)							
セメントの時初	呼び	最大寸法	スラノノ	튤	比	材率	-4		约 函 品 士	告取生	混和	剤
の俚親	^{5虫/送} (mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	不	2775	和月11	相肖的	AE減水	AE	
高炉B種	24	40	8	4.5	47.4	39.2	144	304	723	1138	0.121	-

(5)

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

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·f₀·L 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。

 $f_c = 7.5 \cdot 10^{16} \cdot V_p^{4.6}$ (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/mm² 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/mm²,平均 1.3N/mm² 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。





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 1 μ 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、充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。

 $T_P = \alpha \cdot L + \beta$ 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



観測時間(µ秒) 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		
		1080		
No. 1	41	1280		
		1470		
		840		
No. 2	34	1050		
		1230		
		820		
No. 3	74	1030		
		1220		
		800		
No. 4	18	1,000		
		1,220		
		800		
No. 5	11	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では, 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 4 100mm×200mm 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



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0.5~4.1N/mm² となった。これから,推定式として式(1)を適用 したこと,弾性波速度計測方法は適切であり,

測定 材齢		測定位置(mm)	弾性波速度	推定圧縮強度(N/mm ²)		圧縮強度実測値	誤差 (平均値一実測値)	
部位(日)	※壁からの距離	(m/s)		平均値	(N/mm ²)	(N/mm ²)		
		1080	3909	30.1	30.8	31.5	-0.7	
No. 1	41	1280	3943	31.5				
		1470	3929	30.9				
		840	4062	36.7	36.3	36.8	-0.5	
No. 2	34	1050	4155	41.3				
		1230	3940	31.3				
	74	820	4093	38.2	36.3	34.4	1.9	
No. 3		1030	4102	38.6				
		1220	3967	32.5				
	18	800	3847	27.7	25.6	29.7	-4.1	
No. 4		1000	3771	25.0				
		1220	3750	24.2				
No. 5	11	800	3868	28.5	28.9	26.0		
		1020	3847	27.7			2.9	
		1220	3923	30.6				

表-5 圧縮強度推定結果一覧

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

- 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23 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