

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

NDT Measurement of Qualities, Thickness, Diameter and Cover of Re-Bars in RC Members
Part23 Estimation of Strength of Concrete by Elastic Wave Method

伊藤建設(株) 岩野 聡史 アプライドリサーチ(株) 境 友昭
東海大学 極檀 邦夫 独立行政法人土木研究所 森濱 和正

概 要

コンクリート表面を鋼球で打撃すると弾性波が発生し音響インピーダンスの異なる面で多重反射するので一定の振動数が生じる。厚さが既知の構造物では、この振動数から弾性波速度を測定できる。弾性波速度と圧縮強度は相関関係があると考えられるので、供試体・既設舗装版と同じ配合で製作したコンクリート試験片を用いて弾性波速度と圧縮強度との回帰式を求めた。次に、供試体・既設舗装版で弾性波速度を測定し、回帰式に当てはめ圧縮強度を推定した。その結果、養生の違いが影響するが、衝撃弾性波による弾性波速度から圧縮強度を概ね推定できることが分かった。

キーワード：衝撃弾性波法、弾性波速度、動的弾性係数、圧縮強度

1. まえがき

衝撃弾性波法によりコンクリート構造物を検査する研究を行っている¹⁾。これまでは主に、コンクリート表面の鋼球打撃より発生した弾性波が、内部で多重反射することによって生成される振動数を測定し、厚さを推定してきた。一方、橋脚、梁などの厚さが実測できる構造物では、この振動数から弾性波速度を測定できる。弾性波速度は弾性係数などによって変化するので、圧縮強度と密接な関係がある。そこで、水セメント比や最大粗骨材寸法などの配合が異なるコンクリート試験片を製作し、材齢、養生方法を変えて弾性波速度と圧縮強度を測定し両者の関係式を得た。この関係式から、同じ配合で製作した壁供試体などで弾性波速度を測定して圧縮強度を推定し、実際の圧縮強度と比較して、衝撃弾性波法により圧縮強度の推定が可能であるかを検討した。

2. 測定理論

コンクリート表面を鋼球で打撃すると、内部を球面状に伝搬する弾性波が発生し、弾性波は底面に到達すると反射波となって、表面に到達する。その後、弾性波は表面で反射し、表面と底面間で多重反射を繰り返し、弾性波の往復時間の逆数となる振動数 f_0 が生成される。表面に設置した加速度センサーで、鋼球打撃により発生する振動を検知し、振動数解析により振動数 f_0 を求めると、 f_0 は縦振動による振動数なので、厚さ D が既知ならば、弾性波速度 V_P は

$$V_P = 2 \cdot f_0 \cdot D \quad \dots \quad (1)$$

により求められる。また、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、関係式

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

により表される。一方、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的弾性係数 E_D には、コンクリートの単位重量がほぼ同じ場合、一般に、

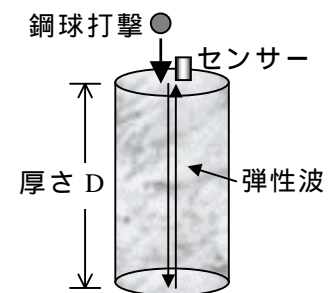


図 1 鋼球打撃で発生する弾性波

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

の関係がある²⁾。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。以上から式(1)により、動的に弾性波速度 V_p を求めれば、 V_p とコンクリートの圧縮強度 f_c の関係式は式(2), 式(3)から

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

となる。 k , α はコンクリートの密度、ポアソン比、使用材料などによる定数であり、コンクリートの配合、養生条件などによって変化する値である。

3. 実験内容

3.1 コンクリート試験片による弾性波速度と圧縮強度の関係式調査

表1 弾性波速度と圧縮強度の関係式調査に用いた試験片の主な状況

試験片	Gmax (mm)	目標スランブ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	材齢 (日)	養生方法	設計寸法 (mm)
a	25	8	50.0	43.0	1,3,7	湿布	100×200
					14,28	水中, 気中	
b	40	8	49.5	41.5	1,3,7	湿布	125×250
					14,28	水中, 気中	
c	40	2.5	40.0	34.1	1,3,7	湿布	125×250
					28,56	水中, 気中	

前述のとおり、弾性波速度と圧縮強度の関係式はコンクリートの配合、養生条件などによって変化すると考えられるので、表1に示すとおり、主に粗骨材最大寸法 (G_{max}) が異なる試験片 a, b、水セメント比が異なる試験片 c を、養生方法を変えて製作した。この試験片について、材齢 1~56 日まで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。

弾性波速度の測定では、図1に示すように、鋼球打撃で発生する振動を加速度センサーで検知し、測定波形の自己相関関数を FFT 解析して振動数 f_0 を測定し¹⁾、式(1)から弾性波速度を求めた。打撃に使用した鋼球は直径 15mm で、打撃点とセンサーの中間点を試験片の中心とした。圧縮強度試験は弾性波速度の測定後に行った。なお、各試験片は3片ずつで、また、養生方法が湿布・水中である試験片では、弾性波速度測定と圧縮強度試験との時間差での乾燥による影響を防ぐため、よく絞った湿布で試験片を覆い乾燥させないようにした。

3.2 コンクリート供試体での弾性波速度測定による圧縮強度の推定

実験に用いた各供試体を表2.1、2.2に、供試体 A, B の形状を図2に示す。供試体 A, B は高さ 1500mm、幅 1600mm、厚さ 200mm で、あらかじめ型枠に凸部を有する型枠 (ボス型枠) を取り付けておき、壁供試体とボス供試体を同時に製作した。配合は3.1の

表2.1 弾性波速度測定による圧縮強度の推定実験に用いた供試体(A, B, C)

供試体名	内容	厚さ方向の設計寸法(mm)	主な配合が等しい試験片	測定日 材齢	養生方法	試験数 (各材齢毎)
A	壁供試体およびボス供試体 実験用に製作	壁: 200	試験片a	3, 7, 28日	7日間湿布 その後気中	壁: 6
		ボス: 150, 200				ボス: 6
B		壁: 200	試験片b			壁: 3
		ボス: 250				ボス: 3
C	既設コンクリート舗装版 実験用に現地より採取	300	試験片c	25年	-	3

試験片 a,b と同じである。供試体 C は既設コンクリート舗装版から切断したもので、配合は試験片 c とほぼ同じである。供試体 D は試験片 a,b,c と配合が異なり、4 種類の水セメント比からなる。

各供試体で衝撃弾性波法により弾性波速度を測定し、3.1により得られた弾性波速度と圧縮強度との関係式から圧縮強度を推定して、この推定結果と供試体から採取したコア試験片で実際に測定した圧縮強度と比較した。弾性波速度と圧縮強度の関係式は配合などによって変化すると考えられるので、供試体 A,B,C では試験片 a,b,c のそれぞれで得られた関係式を用いた。供試体 D では、実構造物では配合、養生条件が不明であることが多いが、この条件で圧縮強度はどの程度推定できるのかを確認するために製作した供試体であり、全試験片 a,b,c で得られた関係式を用いた。

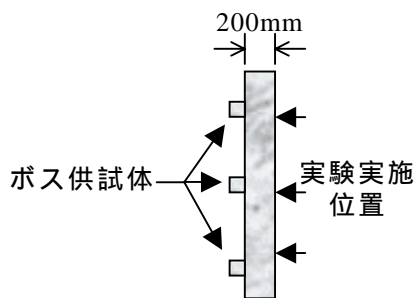


図2 壁・ボス供試体形状

表2.2 圧縮強度の推定実験に用いた配合が異なる供試体D

供試体	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	材齢 (日)	養生方法	設計寸法 (mm)
D	11.5	42.0	28日 以上	28日まで水中 その後気中	150×300
	11.0	47.0			
	9.5	57.0			
	10.5	62.0			

4. 実験結果

4.1 コンクリート試験片による弾性波速度と圧縮強度の関係式調査

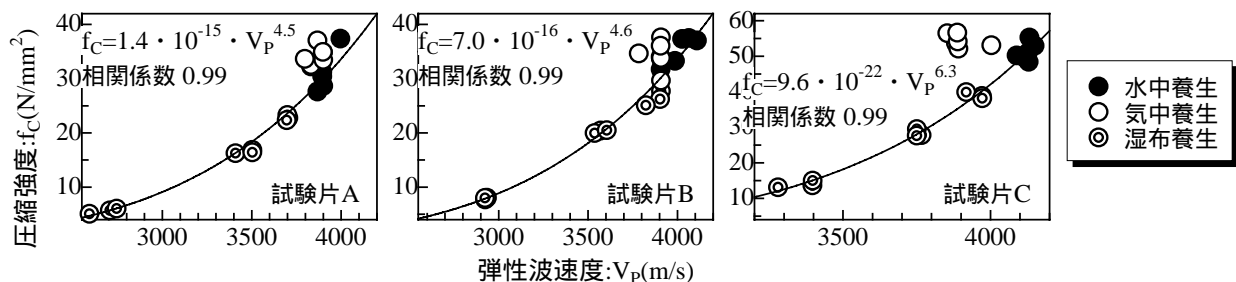


図3 弾性波速度と圧縮強度の関係式調査結果

3.1により測定した弾性波速度と圧縮強度の関係を図3に示す。両者の関係は、コンクリートの配合、養生条件などによって変化すると予想したが、図より水中養生と湿布養生では、弾性波速度と圧縮強度の関係に違いは見られない。しかし、気中養生では圧縮強度は他の養生方法と余り差がないが、弾性波速度は低下するため、両者の関係は他の養生方法と比較して異なる結果となった。水中養生と湿布養生での結果から、最小二乗法により弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c の関係式を求めると、試験片 A では $f_c = 1.4 \cdot 10^{-15} \cdot V_p^{4.5}$ (式5)、試験片 B では $f_c = 7.0 \cdot 10^{-16} \cdot V_p^{4.6}$ (式6)、試験片 C では $f_c = 9.6 \cdot 10^{-22} \cdot V_p^{6.3}$ (式7) となった。相関係数は全て 0.99 である。図4に試験片 A,B,C の全養生方法で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係を示す。相関係数は配合、養生方法を考慮した場合より低くなるが 0.95 となり、両者の相関関係が見られた。回帰式は $f_c = 6.3 \cdot 10^{-18} \cdot V_p^{5.22}$ (式8) である。

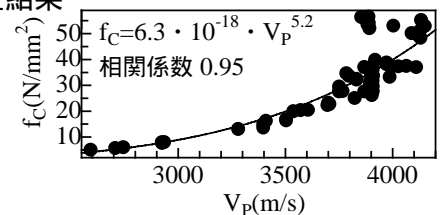


図4 全試験片での調査結果

4.2 コンクリート供試体での弾性波速度測定による圧縮強度の推定

3.2に示した供試体で弾性波速度を測定し、4.1で得られたそれぞれの関係式から圧縮強度を推定した。実際に測定した圧縮強度との比較結果を図5、表3に示す。

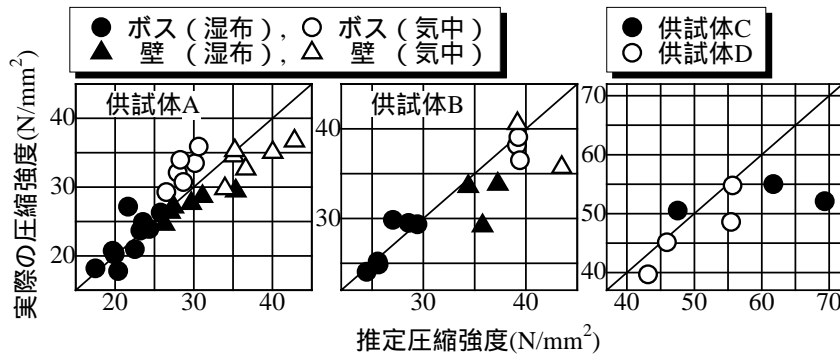


図5 推定圧縮強度と実際の圧縮強度の比較

表3 圧縮強度推定結果

供試体名		推定に用いた関係式	平均誤差(%)
A	ボス	(式5)	8.0
	壁		8.8
B	ボス	(式6)	3.4
	壁		12.9
C		(式7)	17.1
D		(式8)	6.6

図5、表3より、ボス供試体では供試体Aの気中養生での推定圧縮強度は、実際の圧縮強度より小さくなる傾向が見られたが、平均誤差は供試体Aで8.0%、供試体Bで3.4%となった。壁供試体では、供試体A,Bとも推定圧縮強度は、実際の圧縮強度より大きくなる傾向が見られ、平均誤差は供試体Aで8.8%、供試体Bで12.9%となった。4.1より、養生方法が気中養生では、他の養生方法と比較して圧縮強度に余り差はないが弾性波速度は遅くなるので、実際の圧縮強度より小さく推定されることが予想されたが、7日間湿布養生した後の気中養生では、特にこの傾向は見られなかった。

供試体Cでは、推定圧縮強度が実際の圧縮強度より大きくなる傾向が見られ、平均誤差は17.1%となった。

実構造物で配合、養生条件が不明であることを想定した供試体Dは、配合、養生条件を考慮せずに、全試験片で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係式(8)から強度を推定したが、平均誤差は6.6%で、水セメント比の変化による圧縮強度の変化に対応した結果となった。

全体的に比較すると、圧縮強度が大きくなると誤差が大きくなる傾向が見られる。圧縮強度が大きくなることに伴って、式(4)に示した理論通り、測定した弾性波速度は速くなったが、推定圧縮強度はこの弾性波速度を4.5~6.3乗して求めるため、弾性波速度が大きくなると推定精度が悪くなったと考えられる。

5. まとめ

水セメント比を40~50%、最大粗骨材寸法を25~40mmと変えたコンクリート試験片を用いて、衝撃弾性波法で測定した弾性波速度と圧縮強度の関係式を調べ、供試体で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する実験を行った。その結果を以下に示す。

衝撃弾性波法で動的に測定した弾性波速度 V_p と圧縮強度 f_c では $f_c = k \cdot V_p^\alpha$ の関係が得

られた。 k はコンクリートの配合、養生条件などによって変化し、これらを考慮すれば相関係数は0.99と非常に高くなるが、考慮せずに全試験片で回帰式を求めた場合でも、今回の実験での相関係数は0.95となった。

養生方法が気中養生では、他の養生方法と比較して圧縮強度に余り差はないが弾性波速度は遅くなる。従って、試験片で得た弾性波速度と圧縮強度の関係式から圧縮強度を推定すると、気中養生では実際の圧縮強度より小さく推定されることが予想される。

供試体で衝撃弾性波法により弾性波速度を測定し、圧縮強度を推定した結果、平均誤差は3.4~17.1%となった。圧縮強度は弾性波速度を4.5~6.3乗して求めるため、弾性波速度が大きくなると推定精度が悪くなると考えられる。また、配合、養生方法が不明であることを想定した場合は、特に推定精度は悪くならず、水セメント比の変化による圧縮強度の変化に対応した推定結果となった。