

論文

[1052] 超音波パルス法によるコンクリートの非破壊試験

正会員○中村裕一(八代高専)

正会員 松本安喜(八代高専)

田中 満(日本道路公団)

西村信孝(富士ビーエス)

1. 緒言

塩害やアルカリ骨材反応に見られるように、構造体コンクリートの耐久性についての信頼性が問題になるにつれて、その強度やひびわれなどの確認手段に対する要求が高まっている。このような状況の中で、コンクリートの非破壊試験法としての超音波パルス法は、シュミットハンマー法や共振法などと比較して、測定の手軽さ、精度、応用性などの点において優位性があると言われコンクリート中の縦波弾性波速度測定に基づく種々の研究が進められて来た[1][2]。また最近では、この方法は、硬化後のコンクリートを対象とした非破壊試験法としてだけでなく、硬化しつつある早期材令のコンクリートの強度を推定し、施工管理における適切な脱型時期を決定するための有効手段としても注目されている[3][4]。

このような観点から、著者らは、超音波パルス法による非破壊試験システムを構成し、従来ほとんど行われていない横波弾性波の測定を含めたコンクリートの弾性波速度の測定実験を進めている。本報告では、試験法の詳細とコンクリートの弾性波速度や動弾性係数の材令による変化などについて述べる。

2. 実験方法と実験条件

2-1 超音波パルス法

超音波パルス法は、音速法ともよばれ、超音波パルスを使用してコンクリート中に弾性波を伝ばさせ、その伝ば速度を測定する方法である。通常は縦波弾性波速度(V_p)を測定することが多い。この縦波速度とコンクリートの品質を関係づけた分類表も発表されているが[5]、弾性波伝ば径路でのコンクリートの平均的な性質を表わす縦波速度の一因子のみから強度を推定することは、必ずしも十分な精度を有していない[1]。一方、コンクリートの強度と静弾性係数との間には、ある一定の関係が成立することが知られているが、動弾性係数と強度にもこれと類以の関係が成立すると言われている[5]。共振法を用いると、コンクリートの動弾性係数を求めることが出来るが、被測定物の形状、寸法などに制約があり、現場試験法としては問題がある。超音波パルス法においても、横波弾性波速度(V_s)を測定することによって、動弾性係数を求めることが出来るが、横波の初動波形の判定がむずかしく、従来コンクリートの横波弾性波速度測定はほとんどなされていないようである[6]。しかしながら、近年のデジタル計測器の進歩と実験に使用する超音波振動子の性能が改良され、すべり型圧電振動子を使用することによって、横波の測定も可能になっている[7]。

弾性波理論を適用すると

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

ここで、 E 、 ν 、 ρ は、弾性係数、ポアソン比、密度である。

超音波パルス法によって、 V_p 、 V_s を測定すると次式から動弾性係数を求めることが出来る。

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

2-2 実験方法

図1は、本実験のブロック線図である。コンクリート中を伝ばした弾性波は、受振側の超音波振動子によって電気信号に変換され、デジタル計測器に記録される。弾性波速度を求めるための伝ば時間の測定は、計測器が有するカーソル機能によってなされ、伝ば時間が数値で示される。使用した振動子はチタンジルコン酸鉛系のもので、その固有振動数は縦波用が200KHz、横波用が100KHzである。実験ではまず、発振側と受振側の振動子を密着させてゼロ補正を行う。そののち、二つの振動子間に長さLのコンクリート供試体をはさみ、伝ば時間の測定を行う。図2は、測定した縦波弾性波の初動の受振波形の一例である。伝ば時間の測定では、受振波形の立ち上りをどの位置とするかが重要である。受振波形の立ち上りが垂直になるように増幅器の利得を立ち上がる前の波形の水平部分が歪まない程度に上げて、その立ち上りを読み取ることにした[6]。縦波の場合、同一供試体に対する測定者による読み取り値のバラッキは、 $\pm 0.1\mu\text{s}$ 以下である。図3-(a)の波形は、二つの振動子を密着させた場合の横波弾性波の受振波形の一例である。横波は先行する縦波に続いて受振されるために、初動の判定がむずかしく、コンクリートに対する測定は、従来ほとんどなされていない。しかしながら縦波には見られない特性として横波は、一方の振動子を 180° 回転させると受振波形の初動の立ち上りが反転する性質を有している。文献[7]にも指摘されているように、従来のねじり型振動子に比べて変位の方向性が明確なすべり型振動子を使用することによって、この特性を正確に捕えることが出来る。図3-(b)の波形は、発振側の振動子を 180° 回転させて、図3-(a)の横波の初動が反転したことを示している。図4-(a)は、コンクリート供試体中を透過した横波の受振波形例であり、図4-(b)は、振動子を 180° 回転させて、初動波形の反転を確認したものである。実験手順としては、恒温室内の水中養生タンクから供試体を取り出し、その形状測定と弾性波速度測定を平行して行い、その後、コンクリート供試体の圧縮強度測定をJISA1108に基づいて行なった。

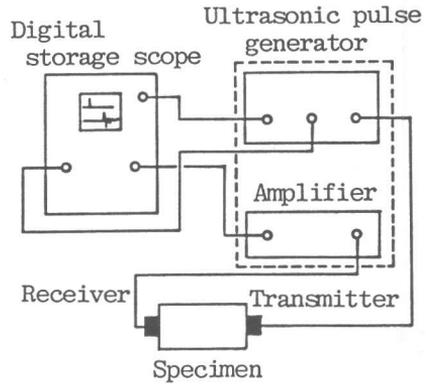
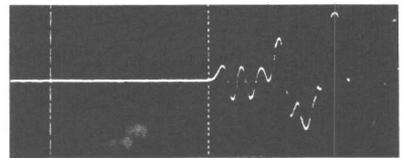
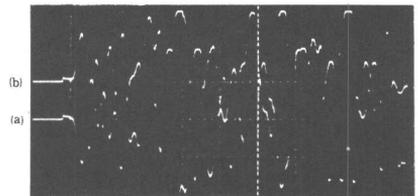


図1. 本実験のブロック線図



時間軸：10 $\mu\text{s}/\text{div}$

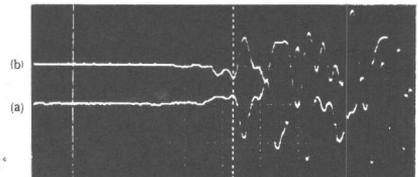
図2. 縦波弾性波の受振波形



時間軸：20 $\mu\text{s}/\text{div}$

図3. 横波弾性波の受振波形

- (a) 決められた方向で密着させた場合
- (b) 発振側の振動子を 180° 回転させた場合



時間軸：20 $\mu\text{s}/\text{div}$

図4. 横波弾性波の受振波形

- (a) 決められた方向で密着させた場合
- (b) 発振側の振動子を 180° 回転させた場合

表1. コンクリートの示方配合表

水セメント比(%)	細骨材率(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
45	50.9	9.5	—	207	460	839	842
55	51.9	9.4	0.7	205	373	895	864
65	52.9	7.8	0.3	203	312	942	872

2-3 実験条件

本実験では、細骨材に川砂(表乾比重=2.59、粗粒率=3.17)を、粗骨材に安山岩の碎石(表乾比重=2.69、最大寸法=20mm)を使用してコンクリート供試体(φ10×20cm)を作製した。コンクリートの示方配合表を表1に示す。コンクリート供試体の養生は、20±1°Cの水中養生とし、試験材令は3、7、14、21、28日で作製した供試体は各々の材令に4本である。

3. 実験結果および考察

キャッピング等による不良供試体を除いた測定データ(各材令について少なくとも3本以上)について考察を行った。弾性波速度の測定精度は一般に±3%が要求されるが[6]、各材令における測定値の範囲を平均値に対する相対誤差の最大値で示すと、縦波弾性波速度1.7%、横波弾性波速度2.5%となり、要求される測定精度をも満足している。同様に圧縮強度について求めるとその値は7%となった。

縦波弾性波速度(V_p)、横波弾性波速度(V_s)と材令の関係を図5、図6に示す、試験材令における値は、平均値を示している。図5、図6より V_p 、 V_s は材令とともに増加していることがわかる。 W/C が小さいほど、弾性波速度が速くなることがわかる。 W/C が40%~70%の範囲で配合されたコンクリートの強度は、 W/C が小さいほど大きくなることが知られているが、硬化にともなう強度発現と弾性波速度の増大が対応していることになる。図7は、 V_p 、 V_s の値を用いて求めた動弾性係数(E_d)の材令による変化を示したものである。 E_d も材令とともに増加することがわかる。 E_d は静的圧縮試験によって求められる応力-ひずみ曲線における初期接線弾性係数に近いと言われているが、弾性波速度測定から求めた本実験値は、共振法による従来の測定結果と同様の傾向を示している。 V_p 、 V_s 、 E_d とも材令3日から14日にかけて、その値の増加が顕著であるが、それぞれの材令に対する増加量は E_d が最も大きく、例えば、 $W/C=45\%$ の場合、材令28日での値は、材令3日での値より約20%程度増加している。これに対して V_p 、 V_s は、10%程度の増加となっている。また、その増加の割合は、 V_p 、 V_s 、 E_d とも W/C が大きいほど大きくなっている。これは、セメントペーストの濃度が小さいほど水和反応

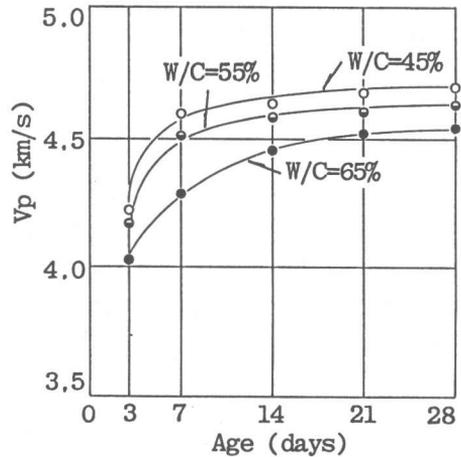


図5. 縦波弾性波速度と材令の関係

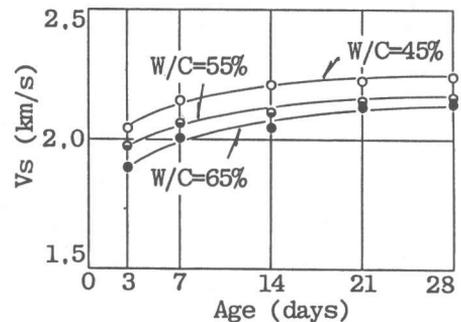


図6. 横波弾性波速度と材令の関係

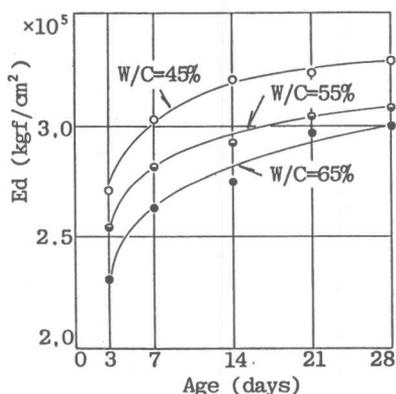


図7. 動弾性係数と材令の関係

による硬化が緩やかであることを意味している。

図8、図9は、縦波速度(V_p)および動弾性係数(E_d)と圧縮強度(f'_c)との関係を示したものである。従来、構造鈍感性に属する V_p のみから構造敏感性に属する強度を推定することは精度の点で問題があることが指摘されているが[1]、図8を見ると、 $W/C=45\%$ の場合、 V_p と f'_c の相関関係に若干の相違があり、 V_p の増加率は f'_c が大きくなるにつれて減少する

ことがわかる。即ち、 V_p の少しの変化に対して、 f'_c の対応する範囲が大きくなる。図9の E_d と f'_c との関係においては、測定値のバラツキが少しあるものの f'_c の増加にともなって、 E_d の増加率が V_p のように顕著に減少することはない。

—参考文献—

- (1) 谷川恭雄、小阪義夫：コンクリートの非破壊試験法に関する研究の動向、コンクリート工学 Vol. 18、No.1、1980、PP.38-50
- (2) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験に関する研究、土木学会論文集、第390号、V-8、1988、PP.1-22
- (3) Elvery, R.H. and Ibrahim, L.A.M. : Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. Magazine of Concrete Research, Vol.28, No.97, 1976, PP.181-190
- (4) 馬場研治：現場試験および非破壊試験に関する国際会議、コンクリート工学、Vol. 23、No.2、1985、PP.60-61
- (5) 岡田清、六車照：コンクリート工学ハンドブック、第9章、朝倉書店、昭和56年
- (6) 尼崎省二：耐久性診断と非破壊試験法、コンクリート工学、Vol. 26、No7、1988、PP.120-122
- (7) 大見美智人、金子勝比古：岩石試料の弾性波伝播速度測定について、熊本大学工学部研究報告、第35巻、第1号、昭和61年、PP.25-31

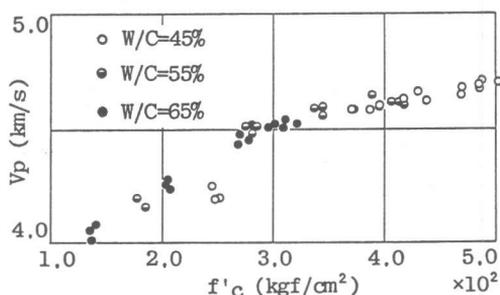


図8. 縦波弾性波速度と圧縮強度の関係

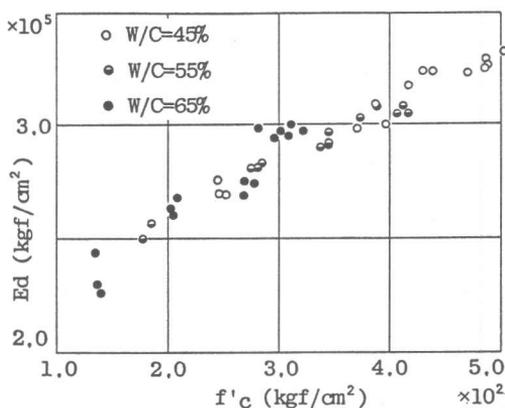


図9. 動弾性係数と圧縮強度の関係