

論文 コンクリートの弾性定数と弾性波速度の関係

尼崎 省二

要旨: コンクリートの弾性波速度に関する理論解析は、一般に、静的弾性率を用いてなされているが、静的弾性率から算出される伝播速度は実測値に比べてかなり遅いのが現状である。本研究は、コンクリートを伝播する弾性波として超音波パルスを取り上げ、圧縮強度 100 N/mm² 程度までのコンクリートの弾性定数と弾性波伝播速度との関係を検討したものである。その結果、圧縮強度が 80 N/mm² 程度よりも大きくなると、動弾性係数と初期接線係数の比 E_d/E_i 比はほぼ 1 となり、また弾性波伝播時のポアソン比は 0.25 よりも大きく、弾性係数の増大とともに減少すると推定される結果が得られた。

キーワード: コンクリート, 超音波パルス伝播速度, 弾性定数, 圧縮強度

1. はじめに

コンクリートの超音波パルス伝播速度（以下、弾性波速度）は静弾性定数を用いて算出されているが、静弾性定数から算出される伝播速度は実測値に比べてかなり遅いのが現状である。一方、鋼材の弾性波速度の実測値は静弾性定数から算定される値とよく一致することは周知のところであり、コンクリートの弾性波速度の計算値が実測値に比べて遅くなる原因を検討することは、非破壊検査の精度を向上させる上でも重要と考えられる。

圧縮強度 18~35 N/mm² のコンクリートを用いた坂の研究によれば、コンクリートの初期接線弾性係数 E_i と動弾性係数 E_d の比 E_d/E_i は 1.04~1.37 の範囲にあり、強度および材齢が大きくなるとともに小さくなることが報告されている¹⁾。また、コンクリート強度は示されていないが、角柱供試体の共鳴一次振動から求められる動ポアソン比は材齢 14 日と 180 日で 0.11~0.39 の範囲にあり、平均 0.24 になることも報告されている²⁾。近年、超高強度コンクリートが利用されるようになっているが、高強度レベルにおける動的弾性定数を明らかにすることは、コンクリートの弾性波速度の計算値が実測値と異なる原因を究明する上でも重要と考えられる。

本研究は、100 N/mm² 程度までの圧縮強度を有するコンクリートを用いて、静・動弾性係数の関係および動ポアソン比について検討を加えるとともに、弾性波伝播速度を算出する場合の弾性定数について検討したものである。

2. 実験の概要

実験は、水セメント比を 70% から 20% の範囲で変化させた 8 種類のコンクリートを用いて行った。

2.1 材料および供試体

使用材料は、セメントが普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³）、細骨材が野洲川産川砂（表乾密度 2.61 g/cm³、吸水率 1.73%、単位容積質量 1.66 kg/l）、粗骨材が高槻産硬質砂岩碎石（表乾密度 2.66 g/cm³、吸水率 0.92%、単位容積質量 1.62 kg/l）である。

コンクリートは、W/C70~40% が目標スランプ 8±1 cm、W/C35% 以下は目標スランプフロー 60±5 cm とし、W/C70~35% の空気量は 5±1% を目標とした。混和剤は、W/C70%~40% は、AE 減水剤にリグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体、AE 助剤にアルキルアシルスルホン酸化合物系イオン界面活性剤を使用した。W/C35% では、高性能 AE 減水剤にカルボキシル

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	目標スランブ, スランブフロー (cm)	目標空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				減水剤 (ml)	AE 助剤 (ml)	減水剤の種類*
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
70	8±1	5±1	48.1	175	250	874	961	625	950	I
60			46.1	172	287	827	992	718	1148	
50			44.1	169	338	776	1010	845	1352	
40			42.1	166	415	718	1013	1038	2158	
35	60±5	2±1	43.7	168	480	719	951	5280	2304	II
30			47.7	161	537	808	910	7518		III
25			46.7	160	640	752	881	9600		
20			38.1	151	755	595	992	20385		

*: 減水剤の種類

記号	種 類	主 成 分
I	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
II	高性能AE減水剤	カルボキシル酸含有ポリエーテル系(ポリカルボン酸タイプ)
III		ポリカルボン酸系特殊高分子界面活性剤
	AE助剤	アリキルアリスルホン酸化合物系イオン界面活性剤

酸含有ポリエーテル系(ポリカルボン酸タイプ), AE 助剤にアルキルアリスルホン酸化合物系イオン界面活性剤を使用した。W/C30%~20%では, 高性能 AE 減水剤にポリカルボン酸系特殊高分子界面活性剤を使用した。コンクリートの示方配合を表-1 に示す。

供試体は直径 100 mm の円柱供試体および 100 × 100 × 400 mm 角柱供試体とし, 打設翌日に脱型後, 標準養生の継続あるいは 3 日間の標準養生後の気中養生とした。

2.2 試験方法

実験は材齢 7 および 28 日を中心に行い, 確認のため, 一部は 13 週でも行った。コンクリートの静弾性係数は円柱供試体を使用して JIS A 1149-2001 に準拠して, また動弾性定数は JIS A 1127-2001 により動弾性係数, 動せん断弾性係数および動ポアソン比を測定した。

また, 弾性波伝播時のコンクリートのポアソン比がどの程度になるべきかを調べるために, 縦振動における棒の位相速度式(1)および弾性波伝播速度式(2)から, 弾性係数 E (N/m²) と密度 ρ (kg/m³) を消去して, E と ρ に左右されないポアソン比を求めた。この場合, 超音波パルスが使用した供試体を式(2)にしたがって伝播することが前提となる。

$$c = f\lambda = 2Lf = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

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

ここで, c : 棒における弾性波位相速度 (m/s), f : 1 次共鳴振動数 (s⁻¹), λ : 波長 (m), L : 供試体長さ (m), v_f : 縦波速度 (m/s), μ : ポアソン比である。

式(1)と式(2)から E と ρ を消去すると, ポアソン比 μ が次式で与えられる。

$$\mu = \frac{1-a+\sqrt{(9a-1)(a-1)}}{4a} \quad (3)$$

ここで,

$$a = v_f^2 / (4f^2 L^2) \quad (4)$$

弾性波の伝播時間は, 共振振動数 200 kHz のジルコン・チタン酸鉛 (PZT-7) を有する変位振動子 (直径 50 mm) に 1200 V の直流電圧を印加, 放電する方式により超音波パルスを発生させ, JCI 規準: 超音波パルス伝播速度の標準測定方法 (試案)³⁾ に準拠して測定した。なお, 印加電圧の放電に要する時間は 0.5×10^{-6} 秒とした。

2.3 供試体の伝播速度について

縦波・横波などの速度は, 材料の横方向寸法 (半径, 厚さ, 幅など) が弾性波の波長と同程度の大きさになると, 見かけ上の分散のために

低下し始め、横方向寸法が弾性波の波長よりも小さくなると、棒の弾性波速度にまで低下するといわれている⁴⁾。そのため、供試体を伝播する超音波パルスが式(1)、式(2)のいずれに従うかを確認する必要がある。

コンクリート供試体を用いてこれを確認することは困難なため、両端を機械仕上げした長さ 500 mm の鉄筋コンクリート用棒鋼 D13～D32 および直径 51 mm の一般構造用圧延鋼材 SS400 を用いて、鋼材の弾性波速度を測定し、実験に使用した超音波パルスの分散性を検討した。なお、鋼材の弾性定数は、鉄筋はリブおよびふしがなくなるまで機械仕上げした 14A 号試験片、SS 400 は直径 22 mm の 14A 号試験片として、試験片平行部の中央で直径方向の二箇所に長さ 2 mm の二軸ゲージを貼付して測定した。

3. 実験結果および考察

本実験に使用したコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を図-1に示す。C/W=4 と 5 の間で強度の増加がみられないのは普通ポルトランドセメントを使用したことが原因と考えられる。以下の考察は、これらのコンクリートに関するものである。

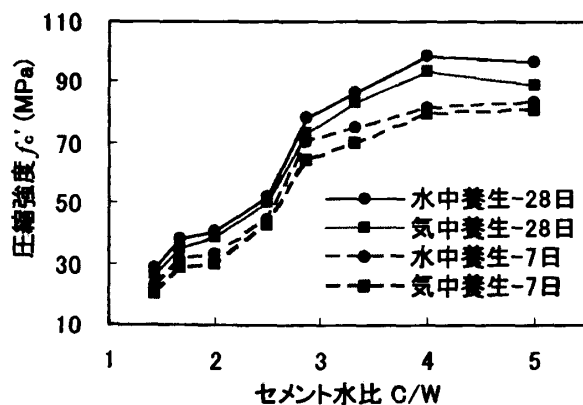


図-1 C/W-圧縮強度関係

表-2に鋼材の弾性定数から求められる弾性波速度の計算値と実測値の関係、図-2に鉄筋の公称径による弾性波速度の変化を示す。弾性波速度の計算値は、棒が平均 5210 m/s、半無限体

表-2 鋼材の弾性波速度の比較

鋼材	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	弾性波速度(m/s)		
			実測値	計算値	
D13	214	0.287	5350	5220	5950
D16	211	0.286	5440	5180	5900
D19	214	0.299	5520	5220	6050
D22	219	0.290	5600	5280	6050
D25	214	0.284	5650	5220	5930
D29	211	0.290	5720	5180	5930
D32	212	0.290	5760	5200	5950
φ51	212	0.292	5900	5200	5960
平均	213	0.290		5210	5970

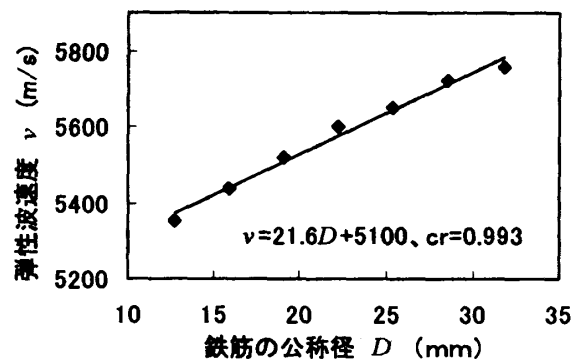


図-2 鉄筋の直径と弾性波速度の関係

が平均 5970 m/s とほぼ一定しているが、実測値は鋼材径によって異なっている。すなわち、弾性波速度は D13 が棒の計算速度よりもわずかに大きく、鉄筋が太くなるとともにほぼ直線的に増大し、φ51 の弾性波速度は半無限体の計算速度にほぼ等しくなっている。このことから、横寸法 50 mm 以上の鋼材では、弾性波は式(2)に従って伝播すると考えられるが、どの程度の直径から速度低下が生じるかは明確ではない。

図-2に示す鉄筋の公称径および直径と弾性波速度との関係

$$v = 21.6D + 5100 \quad (\text{m/s}) \quad (5)$$

から、鉄筋の弾性波速度が半無限体計算速度 $v=5970$ m/s となる鋼材径はほぼ 40 mm、棒の速度 5210 m/s となる直径はほぼ 5 mm となる。すなわち、D41 より細くなると、分散のために弾性波速度が低下をはじめ、D6 で棒の速度となると考えられる。本実験に使用した超音波パルスは圧電体への直流電圧の印加・放電によって発生させたものであり、受振波には発振ならびに

受振圧電体の振動の影響が含まれているため、超音波パルスの波長を定義することは困難である。しかしながら、弾性波速度の分散は材料の横寸法が弾性波の波長に等しくなると生じると仮定すると、鋼材の弾性波速度測定に使用した超音波パルスの波長は 40 mm と考えることができる。したがって、横寸法 100 mm のコンクリート供試体の弾性波速度は式(2)で算出できると考えることができる。

3.1 コンクリート供試体の弾性波速度

コンクリートのポアソン比を構造物の設計に用いられている 0.2 と仮定し、初期接線弾性係数を用いて、式(2)で算出した弾性波速度 v_c と実測値 v_m との比 v_m/v_c のセメント水比による変化を図-3に示す。弾性波速度の実測値は計算値の 1.05~1.25 倍程度であり、静的弾性定数から算出される弾性波速度は実測値よりも小さいが、セメント水比の増加とともに実測値に近くなる傾

向がある。したがって、静的弾性定数から得られる弾性波速度を用いて内部欠陥の位置を探索する解析には誤差を含むことを考慮する必要があると思われる。

3.2 静弾性係数と動弾性係数の関係

図-4に水中養生円柱供試体の静弾性係数と動弾性係数の関係に及ぼす測定方法の影響を示す。静・動両弾性係数には十分な相関（相関係数：0.98 以上）が認められ、動弾性係数は測定方法には影響されないと考えてよいと思われる。この関係は角柱供試体でも同様である。しかしながら、図-5に示すように、測定方法が同じであっても供試体形状が異なると、わずかではあるが静・動両弾性係数の関係が異なる傾向にある。

図-6に円柱供試体の縦振動による動弾性係数と静弾性係数の関係を坂の研究結果¹⁾とともに示す。本研究と坂の研究による静弾性係数と

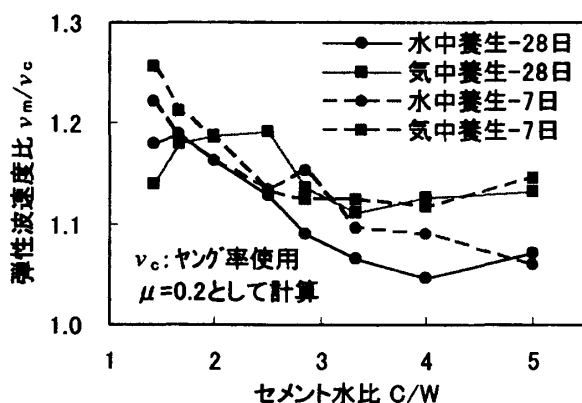


図-3 C/W-弾性波速度比の関係

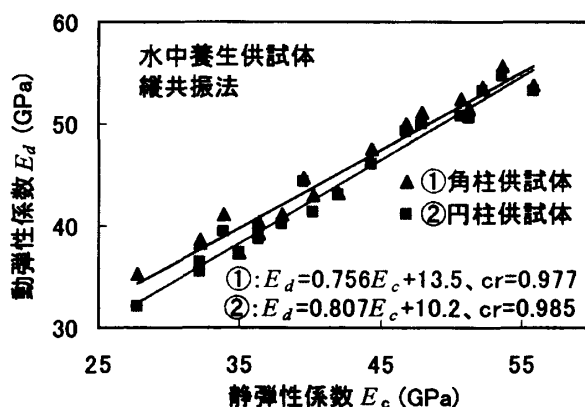


図-5 静・動両弾性係数の関係

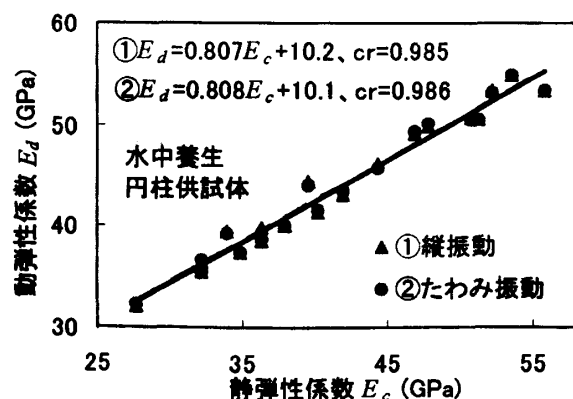


図-4 静・動両弾性係数の関係

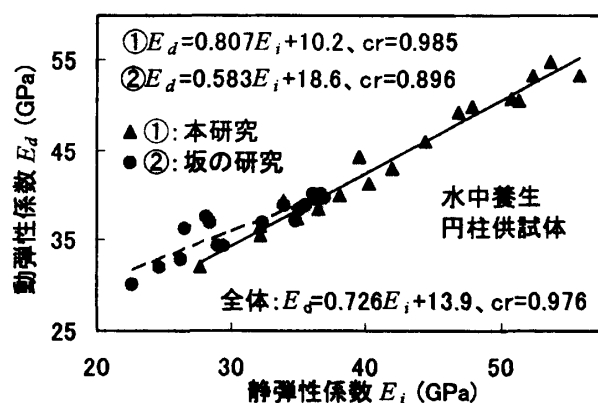


図-6 静・動弾性係数の関係

動弾性係数の関係は、一見、異なるように見えるが、これは二つの研究におけるコンクリートの強度範囲が、それぞれ、 $20 \sim 95 \text{ N/mm}^2$ および $18 \sim 35 \text{ N/mm}^2$ と大きく異なるためであると考えられる。二つの研究結果を併せた全体としての相関係数は 0.976 となり、十分な相関が認められる。図-6に示す坂の研究は $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ の標準供試体を用いて、材齢4週、6月、1年で測定した結果であることを考慮すると、コンクリートの材料、品質が異なっても、供試体形状が同じであれば、静・動両弾性係数の関係は変化しないと考えられる。

図-7に水中養生供試体で得られた縦振動による静弾性係数に対する動弾性係数の比（弾性係数比） E_d/E_i の変化を坂の研究とともに示す。弾性係数比は圧縮強度の増大とともに小さくなっている。従来、弾性係数比 E_d/E_i は $1.04 \sim 1.37$ の範囲にあり、強度および材齢が大きくなると

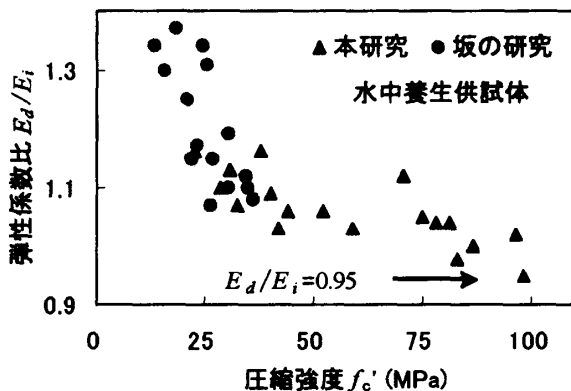


図-7 静・動弾性係数比 E_d/E_i の変化

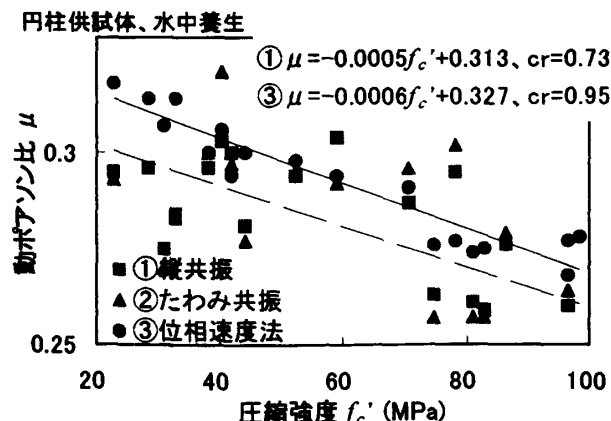


図-8 圧縮強度と動ポアソン比の関係

ともに小さくなるとされてきたが、坂の研究と本研究の結果を併せて、弾性係数比と圧縮強度の関係を累乗近似すると、次式が得られる。

$$E_d/E_i = 1.84 f'_c{}^{-0.137} \quad (6)$$

式(6)を用いると、弾性係数比がほぼ1となる強度は $85 \sim 90 \text{ N/mm}^2$ に存在すると考えられる。 100 N/mm^2 を超える超高強度コンクリートの弾性係数比に関する検討は必要であるが、 $85 \sim 90 \text{ N/mm}^2$ より大きい強度のコンクリートの動弾性係数は、鋼材の場合と同様、静弾性係数に等しくなることが考えられる。

3.3 動ポアソン比の変化

図-8に水中養生円柱供試体で測定した動ポアソン比の圧縮強度による変化を示す。図には、動ポアソン比と圧縮強度の相関関係として、縦共振と位相速度法の場合のみを示しているが、たわみ共振での関係は縦共振の場合とほとんど同じであった。動弾性係数の測定方法にかかわらず、動ポアソン比は圧縮強度の増大とともに低下している。位相速度法で求められる動ポアソン比は、コンクリートの弾性係数と密度には左右されないこと、さらに棒の位相速度と弾性波伝播速度から求められることから、波動伝播時のポアソン比と考えることができる。共振振動数から求められる動ポアソン比もこれと同様の傾向にあることから、コンクリートの動ポアソン比は必ずしも一定にはならないと考えられる。なお、角柱供試体でのこれらの相関は円柱

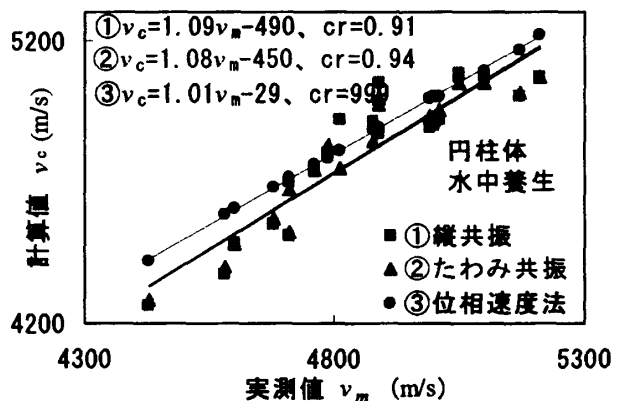


図-9 伝播速度の実測値と計算値

供試体の場合より悪くなっている。

3.4 弾性波速度の計算方法

図－9に弾性波速度の実測値と共振法で測定した動弾性定数（動弾性係数，動ポアソン比）を用いて算出した弾性波速度（位相速度法での動弾性係数は縦振動法を採用）との関係を示す。位相速度法でのポアソン比は弾性波速度から算出しているため，速度の計算値は実測値とよく一致している。動弾性定数から求められる弾性波速度は実測値よりも小さいが，速度が大きくなるとともに実測値に近くなっている。これは，圧縮強度が大きくなるとともに，動弾性係数と静弾性定数が等しくなるためと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られて成果をまとめると，以下のようになる。

- (1) 本研究に使用した超音波パルス伝播時間測定装置を用いた場合，鋼材を伝播する超音波パルスの波長は40 mm程度と考えられる。この超音波パルスを横寸法100 mmのコンクリート角柱供試体に伝播させると，分散による速度低下がなく，半無限体速度で伝播すると考えられる。
- (2) 弾性波速度の実測値は静的弾性定数から計算される速度の1.05～1.25倍程度で，この計算値は水セメント比の増加とともに実測値に近くなる傾向がある。
- (3) 動弾性係数と静弾性係数の比 E_d/E_i は圧縮

強度の増大とともに低下するが，圧縮強度の85～90 N/mm²より大きくなると，動弾性係数は，静弾性係数に等しくなると考えられる。

- (4) 動ポアソン比は必ずしも一定ではなく，圧縮強度の増大とともに低下する。
- (5) 縦振動による共振振動法で得られる弾性定数から計算される弾性波速度は実測値よりも小さいが，速度が大きくなるとともに実測値に近くなると考えられる。

参考文献

- 1) 坂 静雄：コンクリートの静弾性係数と動弾性係数：セメント技術年報，第8巻，pp.322-325，1954.11
- 2) L. J. Mitchell: Dynamic Testing of Materials, Proceedings, Thirty-third Annual Meeting, Highway Research Board, Vol. 33, pp.242-258, 1954.
- 3) 日本コンクリート工学協会：超音波パルス伝播時間の標準測定方法(試案)，JCI 基準集，pp.269-276，2004.4
- 4) 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦：超音波技術便覧(新訂版)，日刊工業新聞社，p.95，1983.12