

# 論文 コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響

尼崎 省二

**要旨:** 本研究は、コンクリートの非破壊試験法である超音波法を取り上げ、超音波パルス縦波の伝播時間測定値に及ぼす測定装置、供試体の形状・寸法の影響について検討するとともに、コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響を検討したものである。その結果、コンクリートの弾性波速度は、超音波パルス発生装置の性能に影響されるとともに、静的試験で得られる弾性定数から算出される速度より速く、鉄筋軸と平行な方向に対称法で測定したコンクリートの弾性波速度は、鋼材から 10 cm 程度以内の距離では、鋼材の影響を受けることなどが判明した。

**キーワード:** 非破壊検査、弾性波速度、弾性定数、鋼材

## 1. はじめに

現在、わが国では、コンクリートに適用される超音波法に関する規格類が制定されていないため、超音波パルス放射方式および伝播時間計測方法は多種多様であり、超音波法を適用する者が独自の装置で伝播時間を測定しているのが現状である。さらに、超音波法に関する従来の研究は無筋コンクリート供試体を用いたものが多い。

性能照査型設計法のもとでは、構造物コンクリートの品質評価が重要となり、弾性波の伝播時間あるいは伝播速度によって品質を評価する場合には、鋼材の存在を無視できないことが多い。材料中の縦波弾性波の伝播速度は、材料が半無限体と考えられる場合と材料の横寸法が弾性波の波長程度以下のいわゆる棒の場合で異なり、それぞれ、次式で与えられる。

$$\text{半無限体: } V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}} \quad (1)$$

$$\text{棒: } V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

ここで、 $E$ : 弾性係数、 $\rho$ : 密度、 $\mu$ : ポアソン比である。

コンクリート弾性波速度に及ぼす鋼材の影響については、鉄筋の弾性波速度を 5800~5950

m/s とし、コンクリートの品質と鉄筋径を考慮した研究成果が報告されている<sup>1), 2)</sup>が、定量化するには至っていない。また、コンクリート中の鋼材の弾性波速度を評価する場合に、鋼材とコンクリートのポアソン比の相違をどう評価するのも明らかになっていない。いずれにしても弾性波はコンクリートよりも鋼材を速く伝播するため、コンクリート中の弾性波伝播時間の測定位置によっては鋼材の影響を受けるため、その影響を的確に評価する必要がある。

本研究は、発振子の圧電体への直流電圧の印加・放電によって弾性波を発生させる超音波パルス伝播時間測定装置（受振波観察方式および飽和増幅方式）を用いて、印加電圧、放電時間、供試体の形状・寸法が弾性波速度に及ぼす影響、さらに鉄筋がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響を検討したものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 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/cm<sup>3</sup>）、細骨材が野洲川産川砂（表乾密度 2.62 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.58%、F.M.: 2.57）、粗骨材が高槻産硬質砂岩砕石（表乾密度 2.70 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.64%、最大寸法 20 mm）、

鋼材が異形棒鋼 D13～D29 (SD345) および直径 51 mm (φ51) の SS 400 である。

供試体は、図-1 に示す鉄筋コンクリート供試体 (以下、RC 供試体) のほかに、円柱 (φ100x200 mm) および角柱供試体 (100x100x400 mm) とし、RC-5 供試体で鉄筋位置の弾性波速度、RC-3 および RC-2 で鋼材がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響範囲を検討した。RC 供試体の鉄筋端部は厚さ 10 mm のペーストを埋め戻している。なお、円柱供試体で静弾性定数、角柱供試体で弾性波速度、密度および動弾性係数 (JIS A 1127 の縦振動) を測定した。

コンクリートは、スランプ 50～80 mm、空

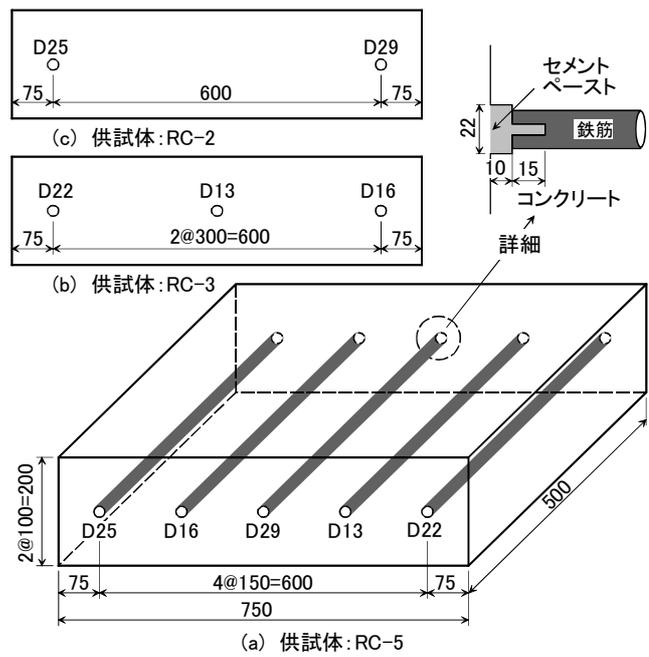


図-1 RCモデル供試体の形状・寸法

表-1 コンクリートの配合表

供試体の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 助剤
RC-5	20	50～80	4～6	70	48	185	264	862	970	0.66	1.32
				60	46	177	295	825	1006	0.74	1.48
				50	44	176	352	770	1018	0.88	1.76
				40	42	176	440	704	1010	1.1	2.2
RC-3				70	46	175	292	829	1010	0.73	1.46
RC-2				50	44	172	344	780	1027	0.86	1.72

気量 4～6%とした。配合を表-1 に示す。表-1 のコンクリート以外に、品質の非常に悪いコンクリートを想定して、W/C=0.70 で空気量 10%以上のコンクリートについても RC-5 供試体を作製した。なお、RC 供試体は 1 バッチ 1 個とし、RC-3、RC-2 の作製時期は RC-5 と異なっている。

供試体は、材齢 1 日で脱型、4 日間の散水養生後、室内保管とした。測定は材齢 7 日、28 日および 91 日に行った。

鉄筋は公称直径ごとに同一ロットのものを使用することとし、端面を機械仕上げした長さ 480 mm の鉄筋を RC 供試体に使用した。

## 2.2 測定方法

コンクリートの静弾性定数および動弾性係数は、それぞれ、土木学会規準 JSCE-G 502 および JIS A 1127 に準拠して測定した。弾性波伝播

時間はジルコン・チタン酸鉛 (PZT) 系圧電体に所定の直流電圧を印加・放電する方式により測定した。使用した測定装置は、以下の性能を有する飽和増幅方式 (以下、飽和方式) および波形観察方式 (以下、波形方式) である。

飽和方式は印加電圧 800V、放電時間  $2 \times 10^{-6}$  s、入力感度  $100 \times 10^{-6}$  V の装置、PZT-5 を用いた共振振動数 54 kHz、直径 50 mm の変位振動子を使用した。波形方式は、印加電圧を 1200、1000、800、500 V、放電時間を 0.5、3、 $5 \times 10^{-6}$  s に設定可能な装置で、共振振動数 200 kHz の PZT-7 を用いた変位振動子 (直径 50 mm) を使用し、立上り時間は JCI 規準：超音波パルス伝播速度の標準測定方法 (試案)<sup>3)</sup> に準拠して測定した。RC 供試体の弾性波速度は、供試体高さの中央部で供試体端部から振動子の中心間隔 25 mm

で鉄筋軸方向に測定した。

鉄筋の弾性波速度は、端面を機械仕上げした長さ 500 mm の試験片で測定し、弾性定数はリブおよびふしがなくなるまで機械仕上げした 14A 号試験片で測定した。SS 400 の弾性波速度は、端面を機械仕上げした長さ 500 mm の試験片で測定し、弾性定数は直径 22 mm の 14A 号試験片で測定した。なお、鋼材の弾性定数は、各試験片の平行部の中央で直径方向の二箇所長さに 2 mm のロゼットゲージを貼付して測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鋼材の弾性波速度

表-2 に鋼材の弾性波速度の計算値と実測値の比較、図-2 に鋼材径による速度変化の一例を示す。波形方式による実測速度は飽和方式の場合よりも早く、いずれの実測値も、鋼材が太くなるとともに早くなるが、D13 は棒の計算速度よりも早く、φ51 は半無限体の計算速度よりも遅くなっている。

パルス波の波長に及ぼす充電電圧および放電時間の影響、および見かけ上の分散が生じるパルス波の波長と材料の横寸法との関係は明らかではない。しかしながら、図-3 に示すように、鉄筋の弾性波速度は印加電圧の増大および放電時間の減少によって増大している。SS 材（直径 51 mm）の弾性波速度は放電時間の減少によってわずかに増大する傾向にはあるが、印加電圧による速度変化は非常に少ない。これは振動子の直径よりもかなり細い鉄筋では、印加電圧が大きくなるほど、圧電体の変形エネルギーが試験片に伝播しやすいが、振動子直径よりも太い SS 材では印加電圧に関係なく、圧電体の変形エネルギーが試験片に十分伝達するためと考えられる。

放電時間の減少にともなう速度増は、パルス波の波長減少が原因と思われる。すなわち、鋼材の弾性波速度を 6000 m/s と仮定した場合、放電時間  $5 \times 10^{-6}$  s に生じる鋼材の軸方向変位は 30 mm で、鉄筋直径よりも少し大きいのみである。

充・放電方式によるパルス波の波長の評価方法は明らかではない。しかしながら、細長い棒を打撃したときの波長と同様に、この変位 30 mm をパルス波の波長と考えれば、波動の見掛けの分散が生じ、弾性波速度が低下することになる。一方、放電時間  $0.5 \times 10^{-6}$  s の鋼材の軸方向変位は 3 mm と鉄筋直径よりもかなり小さくなるため、見かけの分散が少なくなり速度が増大したと思われる。

#### 3.2 コンクリートの弾性波速度

図-4 に角柱供試体の弾性波速度の実測値と計算値の比較の一例を示す。波形方式（印加電

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)			
			計算値		実測値	
			棒	半無限体	波形観察	飽和増幅
D13	214	0.287	5220	5950	5350	5290
D16	212	0.283	5200	5900	5420	5310
D19	212	0.281	5200	5880	5500	5380
D22	212	0.285	5200	5910	5560	5460
D25	210	0.289	5170	5910	5620	5510
D29	213	0.296	5210	6010	5670	5600
φ51	212	0.292	5200	5960	5900	5770

注：波形は印加電圧1200V、放電時間 $0.5 \times 10^{-6}$ 秒時の速度

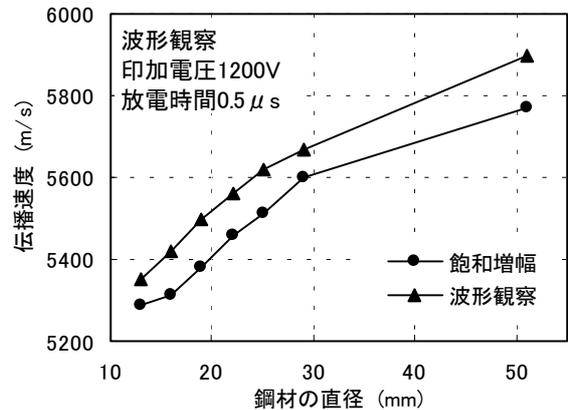


図-2 鋼材の直径と伝播速度

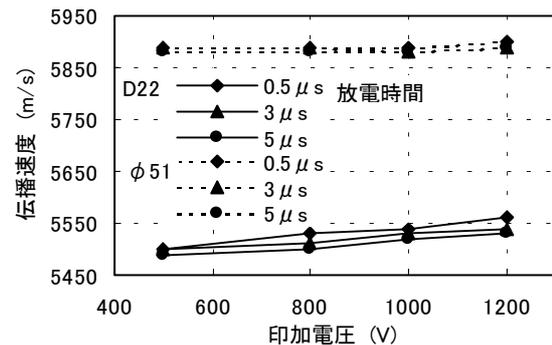


図-3 印加電圧による鋼材の速度変化

圧 1200 V、放電時間  $0.5 \times 10^{-6}$  s) による弾性波速度  $V_w$  が最も早く、飽和方式、動弾性係数  $E_d$  と  $\mu = 0.25$  の計算速度、 $E_d$  と静的ポアソン比の計算速度の順に遅くなっている。 $\mu = 0.25$  を仮定したのは、動的に求めたポアソン比は約 0.24 になるとの報告<sup>4)</sup>およびひび割れ深さの測定方法に  $\mu = 0.25$  と仮定する方法<sup>5)</sup>があることを考慮したためである。なお、伝播時間測定方式による速度の相違は、両方式による立上り時間決定法の違い<sup>3)</sup>ら生じたものである。

動弾性係数と弾性係数  $E_{1/3}$  の比が 1.2~1.7 であることから、**図-4** から、供試体横寸法が弾性波の波長に比べて大きい（弾性波速度 5000 m/s、放電時間  $0.5 \times 10^{-6}$  s の場合のコンクリートの軸方向変位は 2.5 mm）と考えられる場合であっても、静弾性定数から算出されるコンクリートの弾性波速度は実測値よりも遅く、ポアソン比  $\mu$  を 0.25 と仮定し、動弾性係数を用いた計算速度が実測値に最も近い。超音波レベルの変位速度におけるコンクリートのポアソン比についてはさらに検討が必要であるが、 $\mu = 0.25$  と動弾性係数から求められる弾性波速度が実測値に最も近いことから、超音波レベルでのコンクリートのポアソン比は 0.25 程度と考えられる。

**図-5** は角柱供試体の印加電圧と放電時間による弾性波速度変化の一例である。鋼材の場合と同様、印加電圧の増大、放電時間の減少とともに弾性波速度は早くなっている。コンクリート供試体では、振動子直径は供試体断面よりも小さいことから、印加電圧の増大による受振波立上り部の振幅の増大によって、伝播時間が見掛け上短くなったためと思われる<sup>3)</sup>。

### 3.3 弾性波速度に及ぼす鋼材の影響

対称法による弾性波伝播時間の測定位置近傍に測定方向に平行な鋼材がある場合、**図-6** に示すように、鋼材位置から  $a$  の距離で測定される弾性波の伝播時間は経路 1 の伝播時間  $t_1$  と経路 2 の最短伝播時間  $t_{2min}$  の短い方の時間となる。伝播時間  $t_2$  およびその最小時間  $t_{2min}$  は、それぞれ、次式で与えられる<sup>6), 7)</sup>。

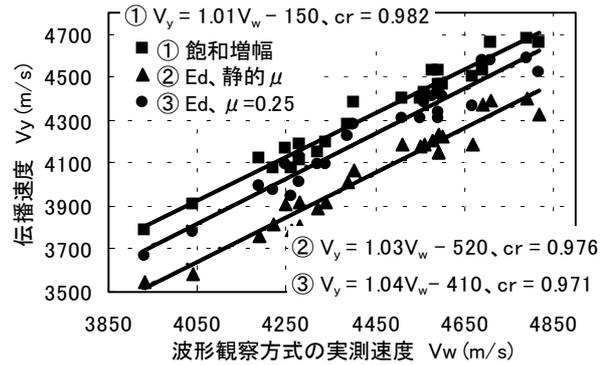


図-4 コンクリートの弾性波速度の比較

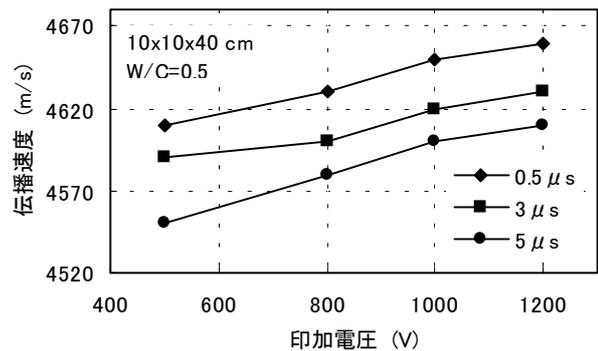


図-5 印加電圧によるコンクリートの速度変化

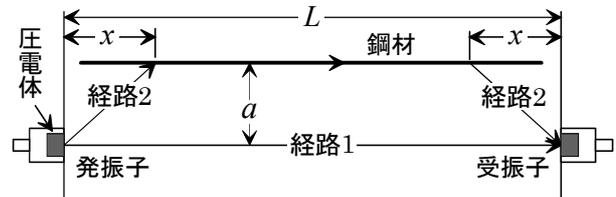


図-6 コンクリート中の鋼材と弾性波伝播経路

$$t_2 = \frac{L-2x}{V_e} + \frac{2\sqrt{x^2+a^2}}{V_c} \quad (3)$$

$$t_{2min} = \frac{1}{V_c} \left( \gamma \cdot L + 2a\sqrt{1-\gamma^2} \right) \quad (4)$$

ここで、 $\gamma = V_c/V_e$ 、 $V_c$ ：鋼材の影響を受けていないコンクリートの弾性波速度、 $V_e$ ：鋼材位置を伝播する弾性波速度（以下、鋼材の有効速度）で、鋼材径およびコンクリートの品質によって異なるといわれている<sup>2)</sup>。

**図-7** は RC 供試体の弾性波速度分布の一例である。波形方式（印加電圧 1200 V、放電時間  $0.5 \times 10^{-6}$  s）による弾性波速度が飽和方式の場合より早いのは、前述の場合と同様である。弾性波速度は鉄筋位置が最大で、鉄筋位置から離れると低下しており、弾性波速度が鋼材の影響を受けていることがわかる。後述するように、最

低速度部分も鋼材の影響を受けているが、鋼材位置の弾性波速度は、鉄筋が太くなると早くなる傾向がある。コンクリート中の鋼材の弾性波速度に及ぼすポアソン比の影響は明らかではないが、前述のように、鉄筋の弾性波速度が鉄筋径とともに速くなるのが原因していると思われる。なお、RC 供試体の鉄筋端部は 10 mm のセメントペーストがあるのみであり、鉄筋位置の弾性波速度は鉄筋の有効速度と考えられる。

弾性定数から算出した鋼材の半無限体速度の平均値 5930 m/s と角柱供試体の弾性波速度  $V_c$  との差を鉄筋径  $d$  で除したパラメータ  $x$  と鉄筋位置の有効速度  $V_e$  との関係を図-8 に示す。パラメータ  $x$  と有効速度  $V_e$  の相関係数 (0.85) は大きくないが、速度  $V_e$  は鉄筋径およびコンクリートの品質に影響されることがわかる。相関係数が大きくなるのは、図-9 および 10 に示すように、鉄筋位置の有効速度がコンクリートの品質変化よりも鋼材の速度の影響を大きく受けるためと考えられる。

図-9 および 10 は水セメント比の異なる供試体 RC-2 の弾性波速度分布の材齢による変化を示している。鋼材の影響を受けていない供試体中央部のコンクリートの弾性波速度は水セメント比の減少および材齢の増大とともに大きくなっているが、鉄筋位置の速度は材齢とともに早くなる傾向は認められるが、水セメント比による変化はほとんどなくほぼ一定で、鉄筋径の影響が大きい。このように、鉄筋位置の有効速度が水セメント比および材齢に大きく影響されないことが、有効速度とパラメータ  $x$  の相関が悪くなった原因と考えられる。

コンクリートの弾性波速度が鋼材の影響を受けない鋼材からの最短距離  $a_{\min}$  は式(4)から次式で与えられる。

$$a_{\min} = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{V_e - V_c}{V_e + V_c}} \quad (5)$$

RC-2 および RC-3 供試体について、鉄

筋位置の有効速度  $V_e$  とコンクリートの平均弾性波速度  $V_c$  から得られる  $a_{\min}$  の計算値と弾性波

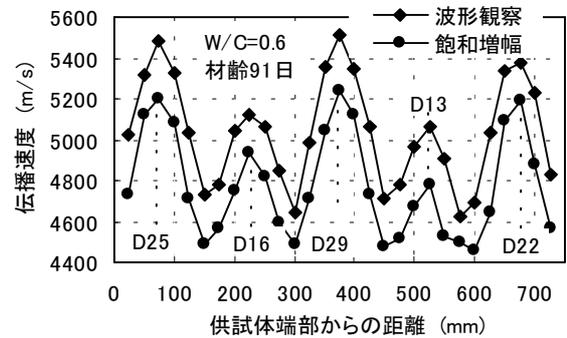


図-7 RC供試体の弾性波速度分布の例

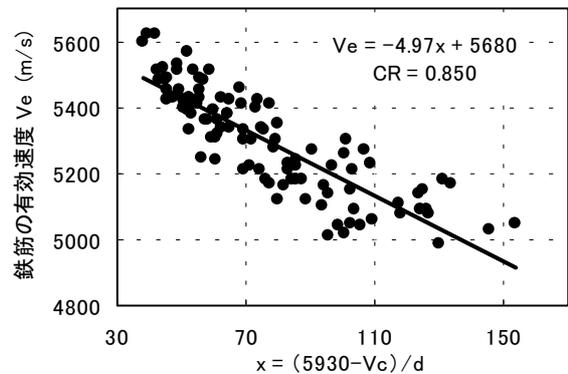


図-8 有効速度とコンクリートの品質の関係

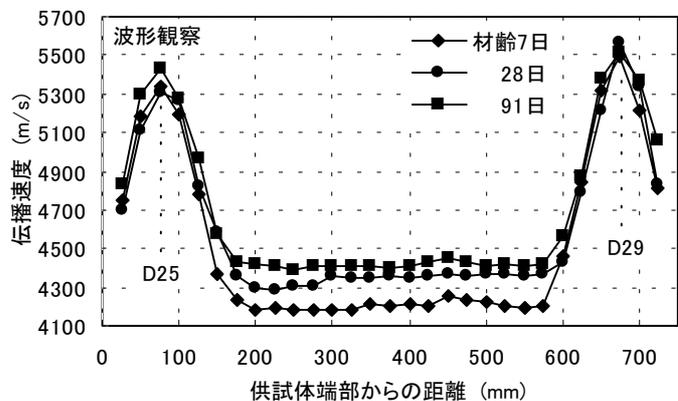


図-9 RC-2供試体(W/C=0.7)の伝播速度分布

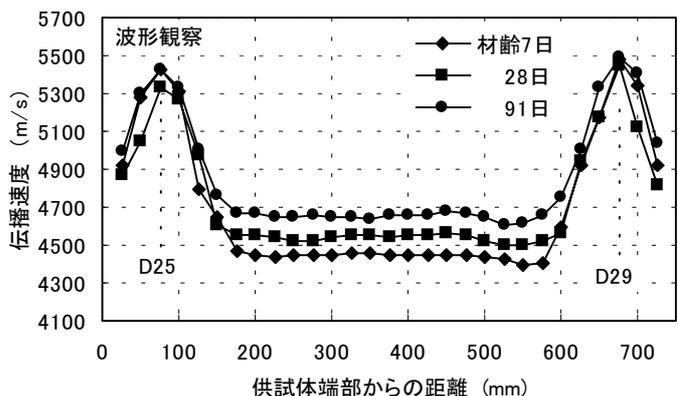


図-10 RC-2供試体(W/C=0.5)の伝播速度分布

速度分布から求めた測定値の比較を表-3 に示す。測定値は鉄筋位置から振動子中心までの距離であり、25 mm 単位となるが、D13 の両側で  $a_{min}$  が異なる場合あるいは影響範囲が明確にならない場合には、平均値を示している。表-3 の傾向は、飽和方式の場合も同様であり、 $a_{min}$  の計算値は測定値よりも小さくなる傾向が認められる (図-9、10 参照)。コンクリートの弾性波速度に影響する範囲は、鉄筋径に依存するが、鉄筋から 100 mm 程度であり、RC-5 供試体の弾性波速度は鋼材の影響を受けていることになる。

$a_{min}$  の計算値の鉄筋径による変化を図-11 に示す。鉄筋 D13~D22 と D25、D29 で供試体およびコンクリートの品質は異なるが、鉄筋が大きくなると鋼材の影響範囲は広がる。材齢が大きくなると、 $a_{min}$  が小さくなるのはコンクリートの弾性波速度が大きくなり、経路 1 の伝播時間  $t_1$  が短くなるためである。

#### 4. まとめ

本実験の範囲内で得られた研究成果をまとめると、以下のようなものである。

- (1) 弾性波速度は伝播時間測定装置の性能によって異なり、印加電圧が大きく、放電時間が短いほど早くなる。
- (2) 細い鉄筋の弾性波速度は見掛けの分散のため半無限体速度よりも遅く、直径 50mm 程度になると半無限体速度に等しくなる。コンクリートの弾性波速度は、動弾性係数を用い、ポアソン比を 0.25 と仮定した速度に近い。
- (3) 鉄筋位置の有効速度はコンクリートの品質および鉄筋直径に影響されるため、鋼材がコンクリートの弾性波速度に影響する範囲の決定には、鉄筋部分の有効速度が必要である。

#### 「参考文献」

- 1) Jones R. :Testing of Concrete by Ultrasonic-Pulse Technique, Proceedings of 32 Annual

表-3 コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響範囲  $a_{min}$  (mm) [波形観察]

鉄筋	W/C=0.7			W/C=0.5		
	7日	28日	91日	7日	28日	91日
D13	80	75	71	66	58	54
	75	*63	*63	75	75	75
D16	88	80	79	70	65	58
	75	75	75	75	72	75
D22	91	85	85	76	72	70
	100	100	100	100	*88	100
D25	86	79	80	79	71	70
	100	100	100	100	*88	100
D29	91	88	83	81	75	72
	100	100	100	100	*88	100

上段:計算値、下段:測定値

\*:左右の平均あるいは明確でない場合の推定値

注:印加電圧1200 V、放電時間  $0.5 \times 10^{-6}$  s

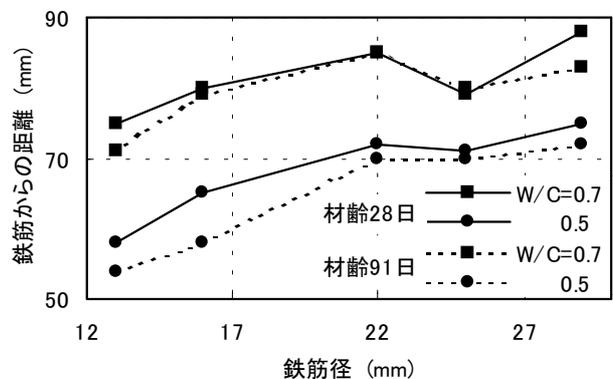


図-11 伝播速度に及ぼす鋼材の影響範囲

Meetings, Highway Research Board, pp. 258-275, 1953.

- 2) Chung, H. W. :Effects of embedded steel bars upon ultrasonic testing of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 30, No. 102, pp. 19-25, March 1978.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書、pp.251-258、1992.3
- 4) Neville, A. M. : Properties of Concrete, Pitman Publishing, pp.320, 1977
- 5) 戸井田克ほか：コンクリート構造物のクラック深さ測定法、土木学会第 42 回年次学術講演会概要集、pp.316-317、1987.9
- 6) 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、pp.1-22、1988 年 2 月
- 7) Y. Lin, T. Liou and C Hsiao : Influence of Reinforcing Bars on Crack Depth Measurement by Stress Waves、ACI Materials Journal、pp.407-418、July-August 1998