

コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発

—構造体コンクリートへの適用に関する検討—

Development of Nondestructive Inspection Method for Estimating Concrete Strength — Study of the Application to Concrete in Structures —

立見 栄司 EIJI TATSUMI

衝撃弾性波の伝播速度を用いた非破壊圧縮強度推定法を構造体コンクリートに適用する場合、その弾性波速度を適切に測定するため、弾性波速度測定に影響を及ぼす要因について検討する必要がある。本報告では、構造体コンクリートを模擬した2種類の試験体に関する実験により、弾性波速度の内部特性および鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定された弾性波速度に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード： 構造体コンクリート、非破壊検査、衝撃弾性波、弾性波速度、圧縮強度、鉄筋

In a case to apply the proposed nondestructive inspection method to concrete in structures, it is essential to evaluate the elastic wave velocity appropriately by existence of some influence factors to the measurement velocity. This paper described experiments conducted on two kinds of specimen modeling concrete structures and clarified the influence of internal velocity distribution and existence of reinforcements, on the elastic wave velocity measured at the surface of concrete.

Key Words: Concrete in Structures, Nondestructive Inspection, Impact-Elastic Wave, Elastic Wave Velocity, Compressive Strength, Reinforcement

1. はじめに

筆者はコンクリートの圧縮強度を従来の反発度法や超音波法^{1),2)}とは異なる衝撃弾性波の伝播速度（弾性波速度）から推定する方法、いわゆる「衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法」³⁾を開発した。この方法は、強度を測定する部位に振動検出器を当て、その近傍をハンマーで軽く叩くだけの極めて簡便な方法で圧縮強度が推定できることを特徴としている。

すでに現場展開を意図した試作機を作製し、場所打ちコンクリート杭の杭頭強度確認⁴⁾を中心に、施工中の構造体コンクリート（壁・スラブ・梁）の強度推定など、施工時の強度管理に適用した結果、高い実用性を確認した。

本方法は、コンクリート表面で弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との関係を用いて強度を推定しているため、弾性波速度に影響を及ぼす要因が推定精度の低下や誤差を招く可能性がある。そこで、推定精度の向

上および適用範囲を把握する観点から、既往の研究⁵⁾において、コンクリートの使用材料、調合および養生方法など、コンクリートの構成要素が弾性波速度と圧縮強度との相関関係に及ぼす影響について検討した。その結果、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの場合、粗骨材の量や種類などが一般的な調合の範囲（圧縮強度が20~70N/mm²）であれば、その構成要素が弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響は比較的小さいことを確認し、これらの検討結果を基に標準的なコンクリートに対する圧縮強度推定式を設定した。

一方、コンクリートの含水率が超音波速度（音速）に影響を及ぼすことは多くの研究^{6),7)}から知られているが、衝撃弾性波に関する系統的な研究はあまり見られないため、昨年度は含水率が弾性波速度に及ぼす影響について検討⁸⁾した。そして、既報⁵⁾で設定した圧縮強度推定式が含水率を考慮した強度推定式に拡張できる可能性を明らかにした。

さらに、本方法を構造体コンクリートの強度推定に適用する場合、その内部と表面（表層）の弾性波速度が異なること、また、コンクリート中の鉄筋が弾性波速度に影響を及ぼす⁹⁾ことなどの特性を把握する必要がある。

本報告では、構造体コンクリートの弾性波速度を適切に測定することを目的に、構造体コンクリートを模擬した試験体を用いた実験により、弾性波速度の内部特性および鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定された弾性波速度に及ぼす影響等を検討する。

2. 実験概要

(1) 実験の目的および実験項目

構造体コンクリートの弾性波速度は、表層部と内部とは異なり、一般的には内部が速い。これにはコンクリートの型枠、打設方法、養生方法、発熱および乾燥などの要因が考えられる。また、弾性波速度はコンクリートより鋼材の方が速いため、鉄筋コンクリートの場合、鉄筋近傍の弾性波速度は鋼材の影響を受けて見掛けの速度として速くなる可能性がある。弾性波速度測定方法において、図-1に示すように、コンクリート表面に設置した二つのセンサーにより、その延長線上を打撃して発生させた衝撃弾性波の位相速度を測定する場合、コンクリートと鉄筋の相対的な弾性波の速度差により、鉄筋を通してセンサーに到達する経路（経路C）がコンクリート表面を伝播する経路（経路A）よりも時間的に短いとき、測定された弾性波速度は、見掛け上、実際より速くなる。

本研究で対象とする圧縮強度推定法は、コンクリートの弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との相関関係から圧縮強度を算出している。このため、測定した弾性波速度が構造体コンクリート本来のものとは異なる場合、推定圧縮強度の精度に影響を及ぼすことになる。本強度推定法を構造体コンクリートに適用する際に、あらかじめ弾性波速度測定に関する問題点を検討すること

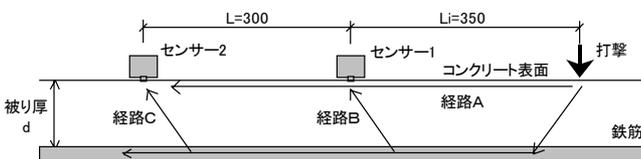


図-1 弾性波速度測定方法および弾性波の伝播経路模式図

表-1 実験概要

実験シリーズ	実験項目
実験(1) 構造体コンクリートの弾性波速度特性	(1) コア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係
	(2) 模擬試験体表面の弾性波速度
	(3) 模擬試験体の弾性波速度分布
	(4) コア供試体と模擬試験体の弾性波速度の関係
実験(2) コンクリート中の鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響	(1) 水セメント比の異なるコンクリートに対する鉄筋の影響
	(2) 鉄筋径がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響
	(3) かぶり厚さがコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響
	(4) 測定角度がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響

は、推定精度向上の観点から非常に重要であると考えられる。

そこで、本報告では2種類の実験を計画した。表-1に実験概要を示す。実験(1)は構造体コンクリートの弾性波速度特性を把握するものである。ここでは、構造体模擬試験体(1,000W×700D×300H)により、コンクリート表面で測定した弾性波速度と試験体から採取したコア供試体の弾性波速度を比較した。実験項目は、コア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係、模擬試験体表面の弾性波速度、模擬試験体の弾性波速度分布およびコア供試体と模擬試験体の弾性波速度の関係とした。次に、実験(2)はコンクリート中の鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響を把握するものである。鉄筋が弾性波速度に影響を及ぼす因子として、水セメント比、鉄筋径、かぶり厚さおよび測定角度が考えられる。測定角度とは弾性波速度測定の測線と鉄筋との成す角度である。水セメント比、鉄筋径およびかぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート壁の試験体を作製し、弾性波速度分布を測定した。実験項目は、水セメント比の異なるコンクリートに対する鉄筋の影響、鉄筋径がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響、かぶり厚さがコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響および測定角度がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響とした。

各実験の試験体は、水セメント比が40、50および60%の3種類とし、打設後5日目に型枠脱型され、実験室内で気中養生された。実験(1)の測定は材齢7、14、28および56日に行い、実験(2)は材齢8週に行った。

(2) 使用材料および調合

コンクリートは生コンプラント製である。使用材料を表-2に、コンクリートの調合および実測スランプ、空気量を表-3に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材は茨城県稲敷郡産の陸砂および栃木県栃木市産の砕砂を等率混合で、粗骨材は栃木県安蘇郡産の砕石を使用した。粗骨材は硬質砂岩で、最大寸法は20mm、かさ容積は0.60m³/m³とし、目標スランプは18cmおよび目標空気量は4.5%とした。

表-2 使用材料

主材料	種類・性質
セメント	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³ 、比表面積3,280cm ² /g)
細骨材	茨城県稲敷郡産・陸砂(表乾密度2.58、粗粒率2.20)、 栃木県栃木市産・砕砂(表乾密度2.62、粗粒率3.10)、50:50混合
粗骨材	栃木県安蘇郡産・砕石(表乾密度2.67g/cm ³ 、実積率60.0%)

表-3 コンクリートの調合および実測スランプ、空気量

水セメント比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				実測スランプ(cm)	実測空気量 (%)
		W	C	S	G		
40	42.5	190	475	679	943	20.5	5.8
50	45.0	182	364	770	967	18.5	4.1
60	47.3	180	300	837	956	17.0	4.5

コンクリート供試体は、φ100×200mmの円柱供試体を用い、水セメント比および測定材齢ごとに3体ずつ作製し、標準養生を行った。

(3) 弾性波速度の測定方法

円柱供試体の弾性波速度 V_p は、既報⁵⁾と同様に、衝撃弾性波の多重反射波を測定し、スペクトル解析により、反射波の1次振動数 f_1 および供試体の長さ L から式(1)により算出した。この方法は、インパクトエコー法¹⁰⁾として一般的であり、円柱供試体のように形状が単純で整った部材において、比較的安定した測定結果が得られる。

$$V_p = 2L \cdot f_1 \quad (1)$$

試験体の弾性波速度測定方法は、位相法¹¹⁾と透過法を用いた。位相法は、図-1に示すように、コンクリート表面に設置した二つのセンサーにより、その延長線上を打撃して発生させた衝撃弾性波の位相速度を測定する方法であり、試験体表面の弾性波速度測定に用いた。他方、透過法は、センサーを内蔵したハンマー（インパルスハンマー）でコンクリート表面を打撃し、弾性波が構造体内部を透過して反対面に到達したときの位相速度を測定する方法である。この方法も位相法の一つであるが、超音波測定法で用いられる透過法に似ているので、透過法と呼ばれている。透過法は、構造体内部を伝播する弾性波速度を測定できるので、奥行き寸法が既知の場合は、有効な測定方法である。

3. 構造体コンクリートの弾性波速度特性

(1) 構造体模擬試験体および弾性波速度測定部位

この実験シリーズは、構造体コンクリートの弾性波速度特性を把握するものである。図-2に構造体模擬試験体概要図を示す。試験体は無筋で3体作製した。寸法は長辺方向1,000mm、短辺方向700mmおよび高さ300mm、水セメント比は40、50および60%である。弾性波速度測

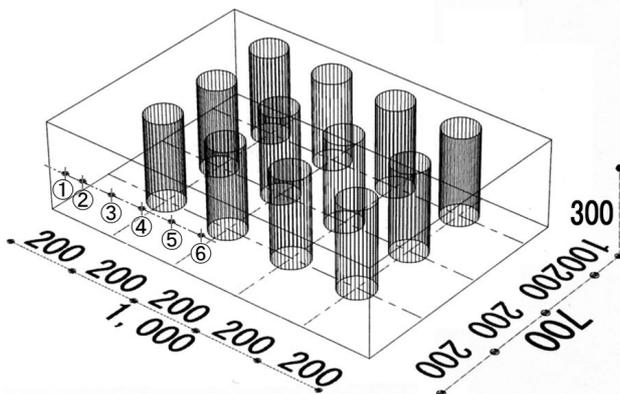


図-2 構造体模擬試験体概要図

定は材齢7、14、28および56日に実施した。コア供試体は、図-2のように、φ100のボーリングマシンで採取されたコアのコンクリート打設面を切除され、φ100×200mmに端面成型されたもので、材齢ごとに3本採取された。

位相法による試験体表面の弾性波速度測定は、長辺方向の1,000×300mmの面（側面）で行った。透過法による試験体内部の弾性波速度測定は700mmの透過距離を持つ短辺方向で行い、測定点は、図-2の①～⑥で示すように、長辺方向の側面の端部から中央までを100mm間隔（端部のみ50mm間隔）とした位置である。

(2) コア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係

標準養生による円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-3に示す。比較のために、既報⁵⁾で設定した圧縮強度推定式を図中に示す。各凡例記号の点は左から材齢7、14、28および56日を示している。円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係は、材齢7日および14日は圧縮強度推定式に載っていないが、材齢28日および56日は非常によく載っていた。この傾向は普通ポルトランドセメントの特性とは異なり、むしろ高炉セメントB種の弾性波速度と圧縮強度との関係⁵⁾に類似している。

円柱供試体およびコア供試体の弾性波速度と圧縮強度

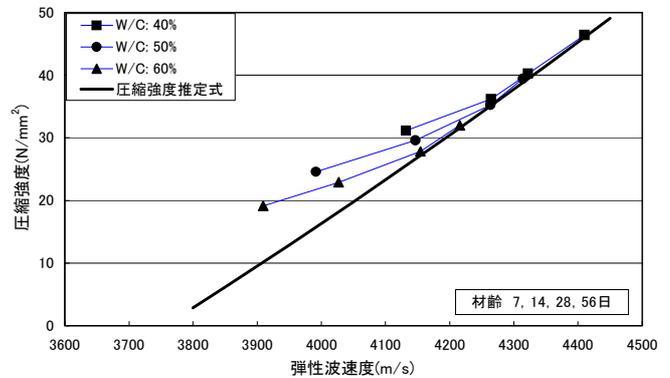


図-3 円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係

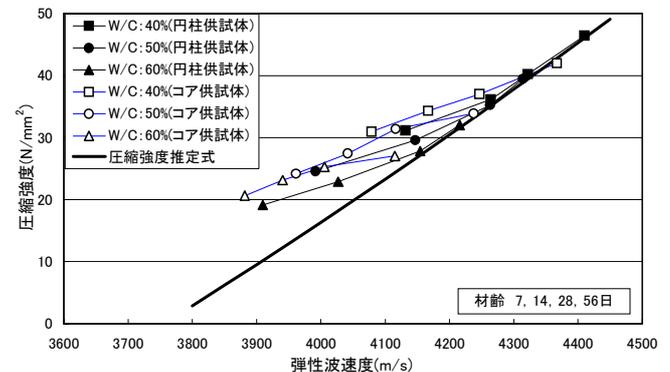


図-4 円柱供試体およびコア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係

との関係を比較して図-4に示す。同一強度に対する弾性波速度は、全般的にコア供試体が円柱供試体より遅い傾向が見られるものの、両者とも圧縮強度との相関関係は比較的良好に一致していた。これにより、構造体コンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係は、標準養生による円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係にほぼ一致していることが確認された。

(3) 模擬試験体表面の弾性波速度

材齢7, 14, 28および56日において、構造体模擬試験体の長辺方向の側面で、図-5に打撃方法を示すように、打撃面の違いによる2種類の位相法による実験を実施した。打撃面の違いによる弾性波速度の比較を図-6に示す。横軸に示す直交面打撃の弾性波速度とは、センサーの延長線上の測定面と直交する側面を打撃すること(打撃A)、すなわち、粗密波の進行方向に打撃することにより測定した位相速度である。他方、縦軸に示す同一面打撃の弾性波速度とは、センサーの延長線上の測定面を打撃すること(打撃B)により測定した位相速度である。この結果、両者はほぼ一致しており、測定に適した打撃方法が

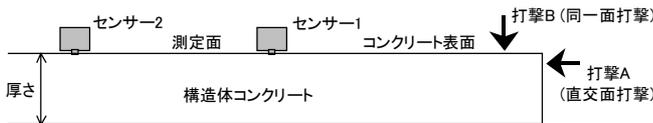


図-5 位相法の打撃方法

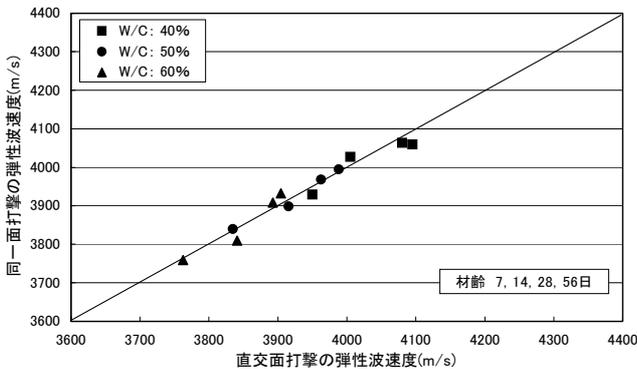


図-6 打撃面の違いによる弾性波速度の比較

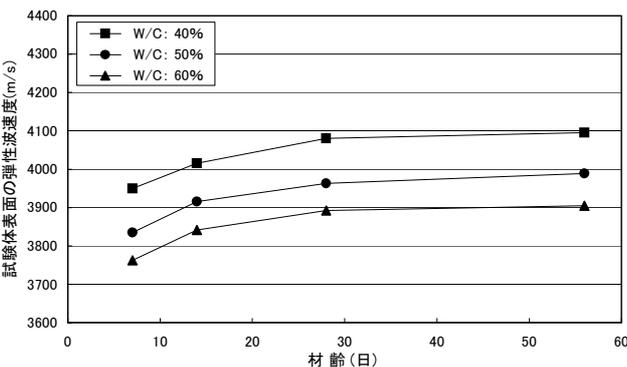


図-7 試験体表面の弾性波速度の材齢変化

可能であることが確認された。

試験体表面の弾性波速度の材齢変化を図-7に示す。試験体表面の弾性波速度は、材齢28日までは顕著な増加が見られたが、その後56日までは、円柱供試体の弾性波速度の増加量に比較してわずかな増加に留まった。これは、加齢とともに試験体表面から乾燥が進み、含水率の減少が弾性波速度の成長に影響を及ぼしたものと考えられる。

(4) 模擬試験体の弾性波速度分布

材齢7, 14, 28および56日において、構造体模擬試験体の短辺方向で透過法により、試験体内部の弾性波速度分布を測定した。一例として、材齢14日における模擬試験体内部の弾性波速度分布を図-8に示す。試験体内部の弾性波速度の分布は、水セメント比に関係なく、端部の5cmは遅くなる傾向があるものの、大きな変動・バラツキはなく、ほぼ一定値を示していた。

試験体内部と端部の弾性波速度の比較を図-9に示す。ここで、試験体内部とは端部から10~50cmの部位を、試験体端部とは端部の5cmの部位をいう。試験体内部の弾性波速度は、内部5測点の平均値である。試験体内部と端部の弾性波速度を比較すると、水セメント比に拘らず、試験体内部が若干速い傾向が見られた。また、加齢に伴う弾性波速度の増加は、試験体端部に比べ、試験体内部に顕著な傾向が見られ、その差は水セメント比が大きいほど顕著であった。この傾向は試験体表面の弾性波速度

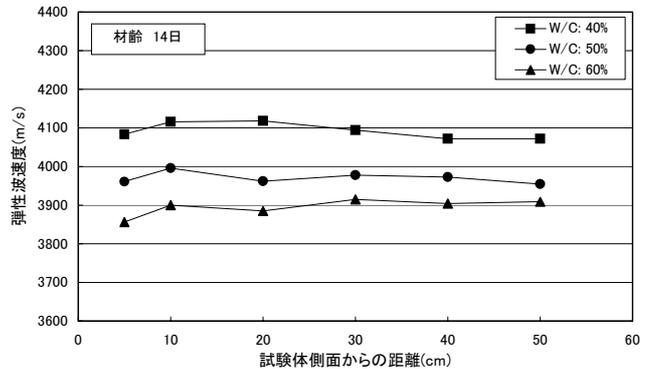


図-8 模擬試験体内部の弾性波速度分布

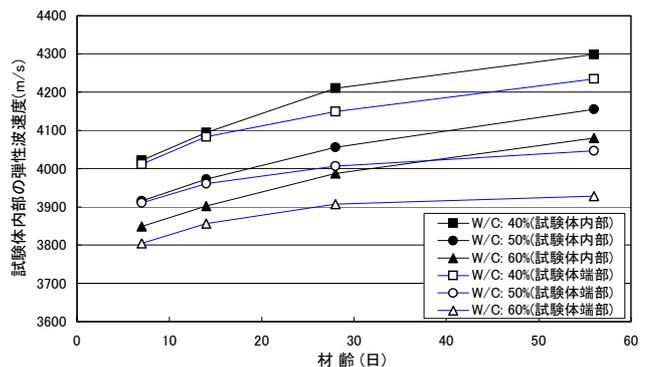


図-9 試験体内部と端部の弾性波速度の比較

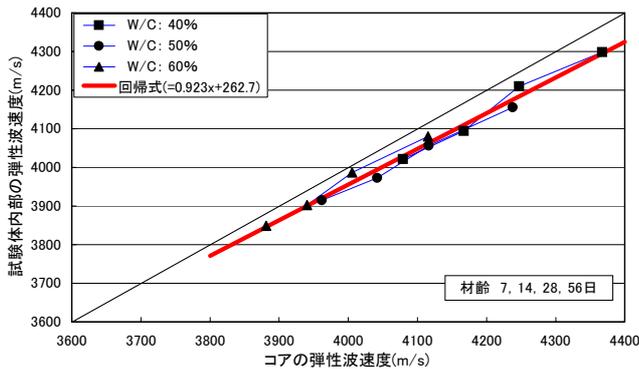


図-10 試験体内部とコア供試体の弾性波速度の比較

の材齢変化（図-7）にも共通する含水率の影響であると考えられる。すなわち、水セメント比が大きいコンクリートほど、緻密性が低いため、表層部の含水率の低下量が大きくなり、弾性波速度に及ぼす含水率の影響が大きく現れたためであると思われる。

(5) コア供試体と模擬試験体の弾性波速度の関係

試験体内部とコア供試体の弾性波速度の比較を図-10に示す。試験体内部とコア供試体の弾性波速度は、コア供試体がわずかに速い傾向が見られるものの、水セメント比、材齢に拘らず、ほとんど一致していた。図中の太い直線は回帰式であり、凡例に直線の式を示す。回帰式より算出した試験体内部とコア供試体の弾性波速度の差は約 1.5%であるが、強い相関性が認められた。これにより、透過法でコンクリート内部の弾性波速度を高精度で測定できること、この結果、構造体コンクリートの強度推定が可能であることが確認された。

他方、試験体表面とコア供試体の弾性波速度の比較を図-11に示す。試験体表面とコア供試体の弾性波速度は、水セメント比および 28 日以下の材齢に対して依存性がなく、強い相関性が見られた。しかしながら、各凡例記号右端の材齢 56 日の場合、試験体表面の弾性波速度は、(3) 節で述べたように増加量が小さいため、材齢依存性が見られた。図中の太い直線は材齢 28 日までの相関関係から求めた回帰式である。この回帰式から算出した試験体表面の弾性波速度はコア供試体より約 3.5%遅くなった。この結果、コンクリート表面で測定した弾性波速度から推定した強度は、構造体コンクリートの強度より低い可能性がある。したがって、適切な推定を行うためには、実験データを蓄積することにより、強度補正を施す必要があるものと考えられる。

(6) まとめ

3 章では、構造体模擬試験体の表面で測定した試験体内部の弾性波速度およびコア供試体の弾性波速度等を比較

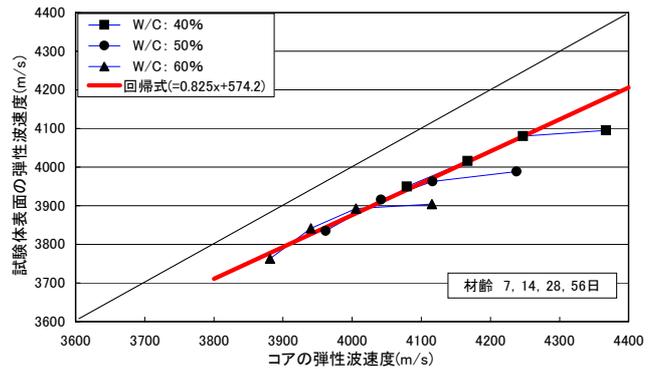


図-11 試験体表面とコア供試体の弾性波速度の比較

検討し、以下のことを明らかにした。

- ① 円柱供試体およびコア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係は比較的よく一致していた。これにより、構造体コンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係は、標準養生による円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係にほぼ一致することが確認された。
- ② 試験体表面の弾性波速度測定において、打撃面を直交面および同一面とした 2 種類の位相法を実施した。直交面打撃の弾性波速度と同一面打撃の弾性波速度はほぼ一致しており、測定に適した打撃方法が可能であることが確認された。
- ③ 試験体表面の弾性波速度は、材齢 28 日までは顕著な増加が見られたが、その後 56 日までは、円柱供試体の弾性波速度の増加量に比較してわずかな増加に留まった。これは、加齢とともに試験体表面から乾燥が進み、含水率の減少が弾性波速度の成長に影響を及ぼしたものと考えられる。
- ④ 試験体の短辺方向で透過法により弾性波速度分布を測定した。試験体内部と端部の弾性波速度を比較すると、水セメント比に拘らず、試験体内部が若干速い傾向が見られた。また、加齢に伴う弾性波速度の増加は、試験体端部に比べ、試験体内部が大きい傾向が見られた。
- ⑤ 試験体内部とコア供試体の弾性波速度は、水セメント比、材齢に拘らず、ほぼ一致していた。これにより、透過法でコンクリート内部の弾性波速度を測定できること、この結果、構造体コンクリートの適切な強度推定が可能であることが確認された。
- ⑥ 試験体表面とコア供試体の弾性波速度は、水セメント比および 28 日以下の材齢に対して依存性がなく、強い相関性が見られたが、材齢 56 日では、材齢依存性が見られた。試験体表面の弾性波速度はコア供試体に比べて遅くなる傾向があるため、コンクリート表面で測定した弾性波速度から推定した強度は、実際より低く評価される可能性がある。

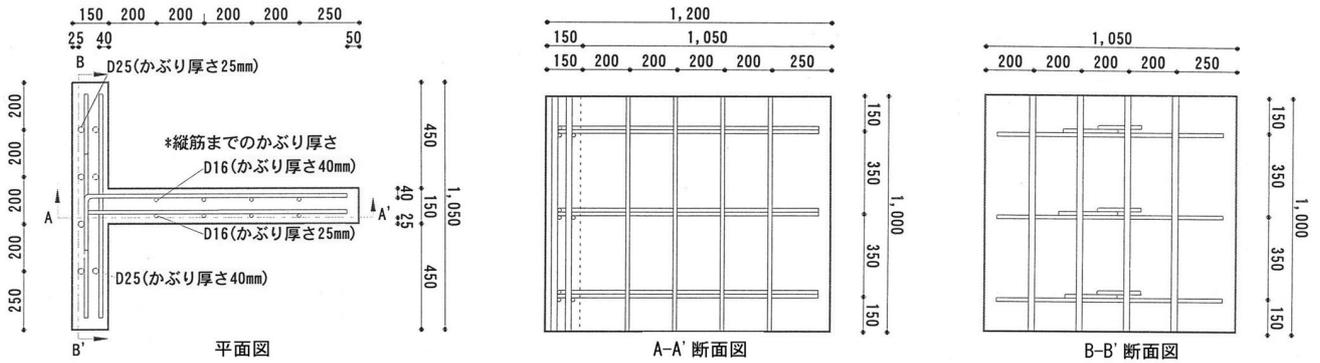


図-12 鉄筋コンクリート壁試験体概要図

表-4 実験項目に対する影響因子および水準

実験項目	影響因子			測定角度(度)
	水セメント比(%)	鉄筋径(mm)	かぶり厚さ(mm)	
(1)水セメント比の異なるコンクリートに対する鉄筋の影響	40,50,60	16	25	0
		25	25,40	
(2)鉄筋径がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響	50	16,25	25	0
(3)かぶり厚さがコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響	50	25	25,40	0
(4)測定角度がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響	50	25	25	0,30,45

4. コンクリート中の鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響

(1) 実験項目および試験体概要

鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定した弾性波速度に影響を及ぼす因子には、前述したように、水セメント比、鉄筋径、かぶり厚さおよび測定角度がある。これらの因子が弾性波速度に及ぼす影響を明らかにするため、表-4 に実験項目に対する影響因子および水準を示す。それぞれの影響因子と水準は、水セメント比が 40, 50 および 60%, 鉄筋径が D16 および D25, かぶり厚さが 25 および 40mm, 測定角度が 0, 30 および 45 度である。

鉄筋コンクリート壁試験体概要図を図-12 に示す。試験体は、自立させるため、D16 で配筋された壁 (A-A'断面) と D25 で配筋された壁 (B-B'断面) とが T 型平面を成している。それぞれの壁はダブル配筋とし、かぶり厚さは一方が 25mm, 他方が 40mm である。測定の対象とした鉄筋は縦筋で、200mm 間隔に配筋した。試験体数は水セメント比ごとの 3 体とした。コンクリートは生コンプラント製であり、使用材料、調合等は 2 章の(2)節に示す。試験体は、打設後 5 日目に脱型され、実験室内において気中養生された。弾性波速度測定は材齢 8 週に行った。

(2) 水セメント比の異なるコンクリートに対する鉄筋の影響

水セメント比の異なる試験体の弾性波速度分布を図-13~図-15 に示す。図-13 は鉄筋径 D25, かぶり厚さ 25mm の弾性波速度分布であり、図-14 は鉄筋径 D25, かぶり厚さ 40mm の弾性波速度分布である。また、図-15 は鉄筋径 D16, かぶり厚さ 25mm の弾性波速度分布であ

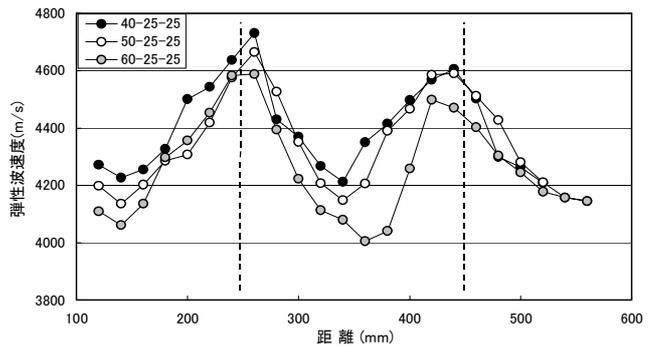


図-13 鉄筋径 D25, かぶり厚さ 25mm の弾性波速度分布

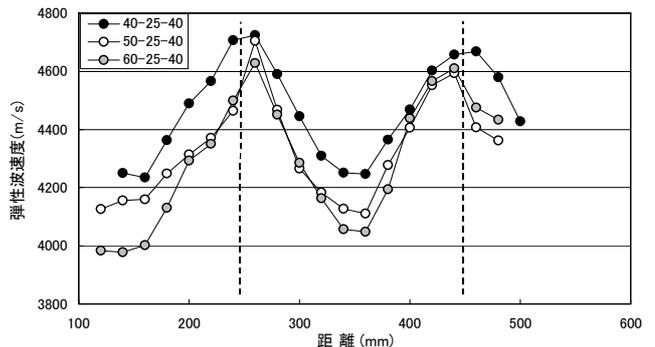


図-14 鉄筋 D25, かぶり厚さ 40mm の弾性波速度分布

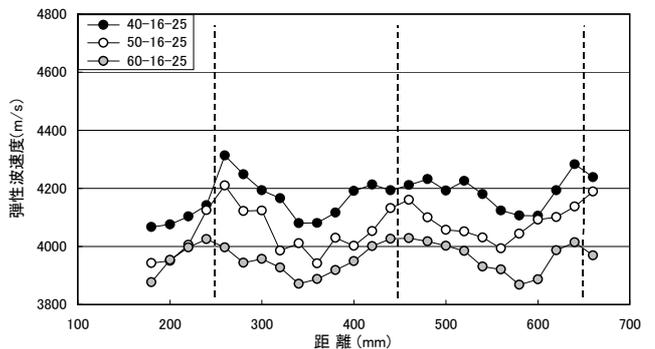


図-15 鉄筋 D16, かぶり厚さ 25mm の弾性波速度分布

る。各図の横軸は試験体壁面に無かい右端からの距離を示し、縦軸は 20mm 間隔で測定した測定角度 0 度の弾性波速度である。凡例は水セメント比-鉄筋径-かぶり厚さを示す。いずれの水セメント比の場合にも、弾性波速度に山と谷の変動が見られ¹⁰⁾、山部は破線で示す鉄筋位

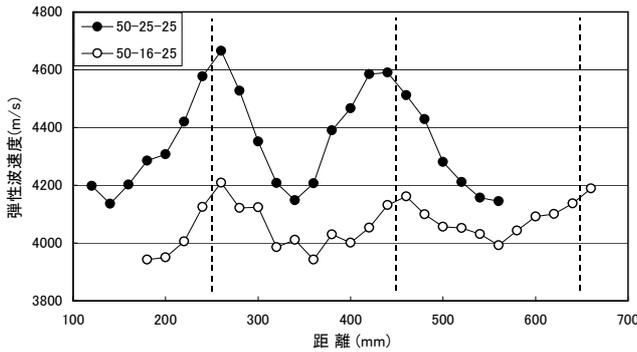


図-16 鉄筋径の違いによるコンクリートの弾性波速度分布

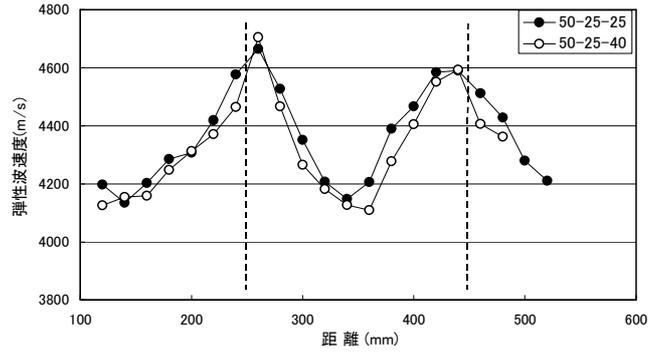


図-17 かぶり厚さの違いによるコンクリートの弾性波速度分布

表-5 試験体の上下間で測定した弾性波速度

水セメント比 (%)	弾性波速度(m/s)			
	鉄筋を伝播する速度		コンクリートを伝播する速度	
	D25	D16	D25	D16
40	4753	4361	4161 (4187)	4019 (4000)
50	4744	4298	4108 (4147)	3936 (3929)
60	4682	4218	4012 (4078)	3850 (3849)

()は計算値

置に、谷部はその中間に対応していた。これにより、山部は鉄筋の影響により速度が速く測定され、谷部は本来のコンクリートの弾性波速度か、それに近い速度であると考えられる。また、水セメント比が小さいコンクリートほど、弾性波速度の変動全体が速い値を示した。D16は弾性波速度の変動が小さいので、D25(図-13)に着目すると、水セメント比が40%と60%の弾性波速度の差は、鉄筋直近より中間の方が大きい傾向が見られた。このことは、水セメント比が大きいコンクリートほど、弾性波速度が遅いので、鉄筋の影響を受けて見掛けの弾性波速度が増加する割合が高くなると考えられる。

(3) 鉄筋径がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響

水セメント比 50%について、鉄筋径の違いによるコンクリートの弾性波速度分布を図-16 に示す。D16 と D25 による壁の弾性波速度分布に大きな相違が見られ、D16 の場合には速度の変動が小さかった。鉄筋の影響を受けなければ、弾性波速度分布の谷部ではD16とD25の弾性波速度は一致すると思われるが、本試験体の場合は一致しなかった。これは、現実の配筋間隔を想定して200mmとしたことで、D25 の場合には鉄筋中間のコンクリートにおいても鉄筋の影響を受けたものと推測される。このことを説明するため、試験体の上下間で鉄筋および鉄筋中間のコンクリートの弾性波速度を透過法により測定した。表-5 に試験体の上下間で測定した弾性波速度を示す。この結果においても、D16 と D25 の鉄筋中間のコンクリートを伝播する速度は異なり、弾性波速度分布の谷部の速度(図-16)とほぼ対応している。

さらに、参考文献¹⁰⁾に記載されている鉄筋を伝播経路とした最短時間を算出する式から計算した速度値を表-5

で比較した。このとき、鉄筋の伝播速度には表-5 に示す鉄筋を伝播する速度を用い、コンクリートの伝播速度には D16 で測定したコンクリートを伝播する速度を用いた。この結果、D16 および D25 とともにコンクリートを伝播する速度の計算値は測定値とほぼ一致した。すなわち、D16 の場合、コンクリートの弾性波速度として仮定した値とこれを用いた計算値とが一致した。これにより、D16 の中間点では、鉄筋の影響が現れるか否かの境界にあったと推測される。なお、D25 の場合、測定値が計算値より若干遅い理由は、コンクリートを直接伝播した弾性波より鉄筋を迂回した弾性波のセンサーへの到達時間がわずかに早いので、それぞれの波頭が僅差で重なり、弾性波の立ち上り時間の算定に誤差が生じたためと思われる。

以上の結果から、鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響は鉄筋径に依存し、比較的細径の鉄筋では影響が小さいことが確認された。これは、コンクリートの拘束により、鉄筋を伝播する弾性波速度が周囲の弾性波速度の影響を受けるので、細い鉄筋ほど相対的にコンクリートの影響が大きくなり、鉄筋の見掛けの弾性波速度が遅くなるため、コンクリートへの影響が小さくなると考えられる。

(4) かぶり厚さがコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響

水セメント比 50%、鉄筋径 D25 について、かぶり厚さの違いによるコンクリートの弾性波速度分布を図-17 に示す。かぶり厚さ 25mm、40mm とともに弾性波速度分布は非常に類似しており、本試験体では、異なるかぶり厚さによる弾性波速度の明瞭な相違は見られなかった。この理由として、図-1 に示す弾性波の伝播経路模式図において、衝撃弾性波のセンサーへの到達時間が経路 A よりも経路 B および経路 C の方が早い場合、センサー間の伝播時間差は経路(C-B)に要する時間となり、結局、弾性波が鉄筋中をセンサー間隔(L)だけ伝播するのに要する時間となるためであると考えられる。ちなみに、表-5 に示す水セメント比 50%の鉄筋を伝播する速度である 4744m/s と図-17 に示す弾性波速度分布のピーク値である 4705m/s とはほぼ一致していた。

(5) 測定角度がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響

測定角度の違いによるコンクリートの弾性波速度分布を図-18に示す。写真-1に測定角度が45度の測定状況を示す。測定角度が大きくなるに従い、鉄筋の影響による弾性波速度の変動は小さくなった。これは、鉄筋と速度測定測線の成す角度が大きくなると、鉄筋を伝播する弾性波の経路よりもコンクリートを直接伝播する経路A(図-1)が最短時間になるためであると考えられる。測定角度が45度の場合、図-18の谷部の弾性波速度4029m/sは、測定角度0度の谷部の速度4136m/sより107m/s遅くなり、鉄筋の影響を受けていないと考えられるD16のコンクリートを伝播する速度3936m/sに近づく傾向が見られた。これにより、45度の測定角度により鉄筋の影響をかなり排除できるものと思われる。

(6) まとめ

4章では、鉄筋コンクリート壁の試験体により、鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定した弾性波速度に及ぼす影響を検討し、以下のことを明らかにした。

- ①鉄筋コンクリート壁の弾性波速度分布に山と谷の変動が見られ、山部は鉄筋位置に、谷部はその中間に対応していた。これにより、鉄筋の弾性波速度はコンクリート表面で測定した弾性波速度に影響を及ぼすことが確認された。
- ②水セメント比が大きく、相対的に弾性波速度が遅いコンクリートほど、鉄筋の影響を受けて見掛けの弾性波速度が増加する傾向が見られた。
- ③鉄筋が弾性波速度に及ぼす影響は鉄筋径に依存するため、比較的細径の鉄筋では影響が小さい。
- ④本実験では、かぶり厚さを25mmおよび40mmとしたが、弾性波速度分布に明瞭な相違は見られなかった。本測定法では、コンクリート表面より鉄筋中を伝播する方が、弾性波がセンサーに到達する時間が早い場合、かぶり厚さは無関係になるためであると考えられる。
- ⑤測定角度が大きくなるに従い、鉄筋の影響による弾性波速度の変動は小さくなった。測定角度が45度の谷部の弾性波速度は鉄筋の影響が比較的小さいと考えられる。

5. おわりに

本報告では、構造体コンクリートの弾性波速度を適切に測定することを目的に、構造体コンクリートを模擬した2種類の試験体を用いた実験により、コンクリート表面で測定された弾性波速度の内部特性、および鉄筋の弾

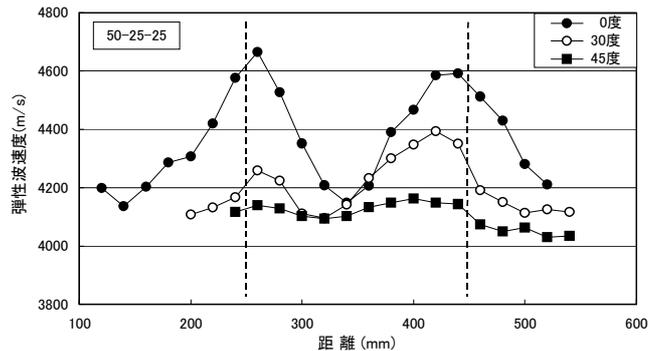


図-18 測定角度の違いによるコンクリートの弾性波速度分布



写真-1 測定角度が45度の測定状況

性波速度がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響を検討した。

コンクリート表面で測定された弾性波速度の内部特性に関しては、透過法により測定した弾性波速度が試験体から採取したコア供試体の弾性波速度とほぼ一致したことから、透過法がコンクリート内部の弾性波速度測定に有効であり、この結果、構造体コンクリートの適切な強度推定が可能であることが確認された。また、試験体表面の弾性波速度は、材齢56日で材齢依存性が見られたこと、および試験体内部の弾性波速度より若干遅い傾向があることが確認された。このため、コンクリート表面の弾性波速度から推定された強度は実際より低く評価される可能性がある。

一方、鉄筋の弾性波速度がコンクリート表面で測定した弾性波速度に及ぼす影響に関しては、鉄筋コンクリート壁の弾性波速度分布に山と谷の変動が見られ、鉄筋がコンクリートの弾性波速度に影響を及ぼすこと、および最も影響が大きい因子は鉄筋径であることが確認された。しかしながら、弾性波速度の測定角度を大きくすると鉄筋の影響は減少し、測定角度が45度の場合には鉄筋の影響が比較的小さくなった。したがって、45度の測定角度により鉄筋の影響をかなり排除できるものと思われる。

今後は、構造体コンクリートの表面と内部の弾性波速

度の違い、および鉄筋の弾性波速度に及ぼす影響を低減するため、速度補正係数の検討および弾性波速度測定法の改良などの課題に取り組む必要があるものとする。

pp.15-21, 2005.1

謝辞：本研究において、ものづくり大学建設技能工芸学科中田善久助教授および河谷史郎教授のご指導を賜り、また、埼玉建興株式会社権田武士氏には実験にご協力頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 十代田知三, 野崎喜嗣, 小林幸一：実大モデルによる超音波法, 反発度法および複合法の検討－非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.428, pp.1-9, 1991.10
- 2) 森濱和正, 吉荒俊克, 太田資郎：非破壊試験による圧縮強度の推定, 非破壊検査, 50(7), pp.440-445, 2001.7
- 3) 立見栄司, 辻定和, 蓮尾孝一：衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.985-986, 2002.8
- 4) 立見栄司：コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 試作機による杭頭強度確認への適用, 三井建設技術研究報告, Vol.27, 2002
- 5) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎：コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 コンクリートの構成材料が弾性波速度に及ぼす影響, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.1, 2003
- 6) ヴォラプッタポーン コンキット, 十代田知三：条件の異なるコンクリートの音速と動弾性係数との関係－非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その2)－, 日本建築学会構造系論文集, No.527, pp.15-19, 2000.1
- 7) 森濱和正：コンクリートの音速に及ぼす含水率の影響, 第58回セメント技術大会講演要旨, pp.100-101, 2004
- 8) 立見栄司：コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発 コンクリートの含水率が弾性波速度に及ぼす影響, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.2, 2004
- 9) 尼崎省二：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1491-1496, 2002
- 10) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino：Impact-Echo Method, Concrete International, Vol.10, No.4, pp.38-46, 1988.4
- 11) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎：衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究－コンクリートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響－, 日本建築学会構造系論文報告集, No.587,