

コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発

—コンクリートの含水率が弾性波速度に及ぼす影響—

The Development of a Nondestructive Inspection Method for Estimating Concrete Strength —Influence of total moisture content in Concrete on Elastic Wave Velocity—

立見 栄司 EIJI TATSUMI

コンクリートの圧縮強度を衝撃弾性波の伝播速度を用いて推定する非破壊圧縮強度推定法において、推定精度の向上および適用範囲を把握する観点から、弾性波速度と圧縮強度との適切な関係を導くことは非常に重要である。本報告では、円柱供試体を用いた2種類の実験により、含水率が弾性波速度に及ぼす影響を検討し、既に得られている圧縮強度推定式を含水率に応じた圧縮強度推定式へ拡張できる可能性について述べる。

キーワード: 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, 含水率

In order to improve the accuracy of results during a nondestructive inspection of the compressive strength of concrete using the velocity of impact-elastic wave, it is very important to establish the appropriate relationship between velocity and strength. This paper studies the influence of total moisture content in concrete on elastic wave velocity by two types of experiment, and describes the possibility that the existent estimating formula can be extended to a formula which considers the percentage of total moisture content.

Key Words: Concrete, Nondestructive Inspection, Impact-Elastic Wave, Elastic Wave Velocity, Compressive Strength, Percentage of Total Moisture Content

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)から推定する手法,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。

一昨年度,現場展開を意図した試作機を作製し,主に場所打ちコンクリート杭の杭頭強度確認⁴⁾や施工中の構造物における壁・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。

本手法は,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により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,昨年度は,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⁵⁾した。そこでは,コンクリートの弾性波速度や圧縮強度に影響を及ぼす可能性がある要因・因子を洗い出し,円柱供試体を用いて弾性波速度測定および圧縮強度試験を行った。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 $20\sim 70\text{N/mm}^2$)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少ないことを把握した。そして,これらの検討結果を反映させて標準的な圧縮強度推定式を設定した。

一方,含水率が超音波速度に及ぼす影響に関する研究は多々^{6),7)}あるが,弾性波速度に対する系統的な研究はあまり見られない。本報告では,含水率が弾性波速度に及ぼす影響を検討するため,乾燥材齢の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係および型枠脱型時期の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係について実験を行った。そして,前報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。

表-1 実験概要

実験項目	調査記号	セメントの種類	水セメント比(%)	粗骨材		スランブ/空気量	供試体形状(mm)	型枠脱型時期(日)	養生方法	材齢(週)	
				種類	最大寸法(mm)						かさ容積(m ³ /m ³)
(1)乾燥材齢の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係	E1-C60	普通ポルトランドセメント	60	硬質砂岩	20	0.60	スランブ18cm・空気量4.5%	φ100×200	1	標準養生28日後 気中養生	(乾燥材齢) 0, 2, 4, 8, 16, 32
	E1-C50		50								
	E1-C40		40								
	E1-C30		30								
(2)脱型時期の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係	E2-C60	普通ポルトランドセメント	60	硬質砂岩	20	0.60	スランブ18cm・空気量4.5%	φ100×200	3, 5, 7	気中養生	1, 2, 4, 8
	E2-C50		50								
	E2-C40		40								
	E2-C30		30								

表-2 使用材料の種類および性質

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	茨城県真壁郡関城町関本肥土地先産洗砂(密度2.58g/cm ³ 、吸水率2.82%、粗粒率2.60、実積率67.0%)
粗骨材	埼玉県秩父産硬質砂岩の碎石(密度2.71g/cm ³ 、吸水率0.55%、粗粒率6.56、実積率58.8%)
混和剤	AE減水剤:リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体 高性能AE減水剤:ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体 空気量調整剤:アルキルアルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤

表-3 コンクリートの調査および品質

調査記号	s/a (%)	単用量(kg/m ³)				混和剤(kg/m ³)		実測スランブ(cm)	実測空気量(%)	単容質量(kg/m ³)
		W	C	S	G	AE減水剤	空気量調整剤			
E1-C60	47.6	185	308	826	954	1.23	0.0108	20.3	5.4	2276
E1-C50	46.3	183	366	784	954	1.28	0.0128	20.2	5.3	2291
E1-C40	43.5	185	463	700	954	1.84	0.0162	19.4	6.0	2283
E1-C30	41.9	170	567	654	954	*5.67	0.0096	20.5	3.9	2363
E2-C60	47.6	185	308	826	954	1.23	0.0083	19.5	5.6	2259
E2-C50	46.3	183	366	784	954	1.28	0.0110	20.0	5.1	2289
E2-C40	41.9	185	463	700	954	1.84	0.0139	19.0	3.7	2342

*は高性能AE減水剤

2. 実験概要

(1) 実験項目

コンクリートの弾性波速度に影響を及ぼす要因の一つに含水率がある。一般に、コンクリートは含水率が低下すると、弾性波速度も低下するが、圧縮強度は、極端な場合を除き、ほとんど変化しない。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、含水率の変化が弾性波速度に及ぼす影響を把握し検討することは、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。

本報告では2種類の実験項目を設定した。表-1に実験概要として示す。実験項目(1)は、乾燥材齢の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を求める実験である。ここで、乾燥材齢とは乾燥させるために標準養生から気中養生に切り替えた時を起点とする測定日までの材齢である。実験項目(1)では、水セメント比が30%、40%、50%および60%の4種類のコンクリートに対し、強度発現がある程度落ち着く最初の28日間を標準養生、その後、恒温室における気中養生により、乾燥材齢2、4、8、16および32週における質量、含水率、弾性波速度および圧縮強度を測定し、含水率が弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響を調査した。なお、上記材齢以外においても、質量、含水率および弾性波速度については経時変化に応じて1~10数日の間隔で適宜測定し、急激な変化を補足した。

次に、実験項目(2)は、型枠の脱型時期の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を求める実験である。コンクリート供試体は、水セメント比が40%、

50%および60%の3種類であり、打設後、3日、5日および7日目に型枠脱型を行い、恒温室における気中養生とした。材齢1、2、4および8週において、質量、含水率、弾性波速度および圧縮強度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との関係の経時変化を調査した。

なお、各実験項目ともに水セメント比以外の水準は、使用材料としてセメントの種類を普通ポルトランドセメント、粗骨材の種類を硬質砂岩および粗骨材の最大寸法を20mm、調査として粗骨材のかさ容積を0.60m³/m³、目標スランブを18cmおよび空気量を4.5%とした。コンクリート供試体は、φ100×200mmの円柱供試体であり、測定材齢ごとに3体ずつ用意した。気中養生においては、予め供試体の端面処理のみを行い、全面から乾燥させた。

(2) 使用材料および調査

使用材料の種類および性質を表-2に示す。細骨材は茨城県真壁郡関城町産の川砂を、粗骨材は埼玉県秩父産の硬質砂岩碎石を用いた。混和剤は、水セメント比40%以上の場合、ポゾリス No. 70のAE減水剤を、水セメント比30%の場合、レオビルド SP8S(B)の高性能AE減水剤を使用し、空気量調整剤としてポゾリス No. 303Aを使用した。

コンクリートの調査および品質を表-3に示す。表中の調査記号は、表-1に対応するもので、実験項目および水セメント比を記号化したものである。なお、両実験項目とも、水セメント比40%、50%および60%の場合、空気量調整剤以外の調査は同一である。

(3) 円柱供試体の弾性波速度および含水率の測定方法

円柱供試体の弾性波速度 V_p は、前報と同様に、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⁸⁾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。

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

他方、含水率は、写真-1に示すように、接触型水分計を円柱供試体の端面に接触させて測定した表面含水率である。なお、測定値は、弾性波速度および含水率ともに、供試体の片端面3ヶ所の平均値とした。

3. 乾燥材齢の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係

(1) 含水率と質量減少率との関係

質量減少率の経時変化を図-1に示す。質量減少率⁷⁾とは、供試体質量の乾燥材齢0日に対する減少割合を百分率で表示したものである。質量減少率は、水セメント比に依存しており、低水セメント比ほど小さくなる傾向が見られた。これは、低水セメント比になるとコンクリートの緻密性が高まるので内部の水分が放出されにくくなり、質量の減少が抑えられたためと考えられる。また、質量減少率の経時変化は、乾燥材齢20日付近までは比較的急激に変化するが、その後、120日付近までは変化は鈍

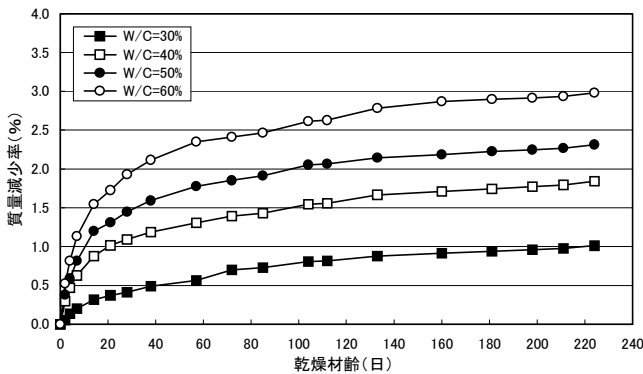


図-1 質量減少率の経時変化

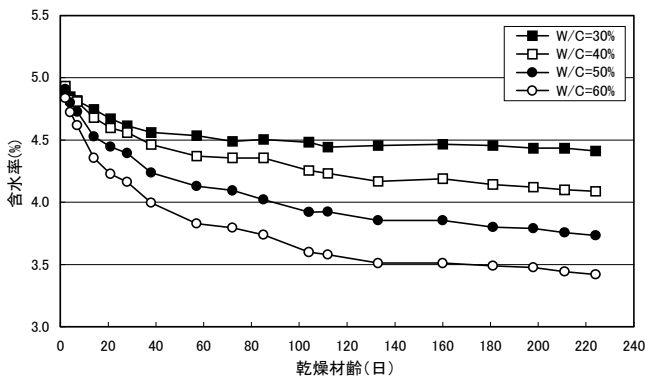


図-2 含水率の経時変化

るものの顕著であり、それ以降の変化は緩慢になった。

一方、含水率の経時変化を図-2に示す。含水率の変化は、質量減少率に関連しており、乾燥材齢20日付近までは比較的急激に減少するが、その後、120日付近までは減少がやや鈍り、それ以降は緩慢な減少となった。それに伴い、各水セメント比の減少傾向に類似性が見られた。これは供試体内の含水率が均等化したためと推測される。

含水率と質量減少率の関係を図-3に示す。いずれの水セメント比においても、含水率が低くなると質量減少率は大きくなる明瞭な相関関係が見られたが、水セメント比が30%の関係は、40, 50, 60%とは異なっていた。水セメント比が40~60%の含水率と質量減少率との相関関係はほぼ重なっていた。これに対し、水セメント比30%の含水率と質量減少率との相関関係は、水セメント比40~60%の関係に比べ、同一含水率に対して低い質量減少率を示していた。また、水セメント比が40~60%の含水率と質量減少率との相関関係は、含水率が4.5%以下の範囲で、ほぼ直線的になっていた。これにより、供試体内部の含水率が均等化してきたものと考えられる。

(2) 含水率と弾性波速度との関係

弾性波速度の経時変化を図-4に示す。弾性波速度は、気中養生に切り替えた直後、すなわち、乾燥材齢が数日間は、水セメント比に依存してわずかに増減する傾向が



写真-1 円柱供試体の含水率測定方法

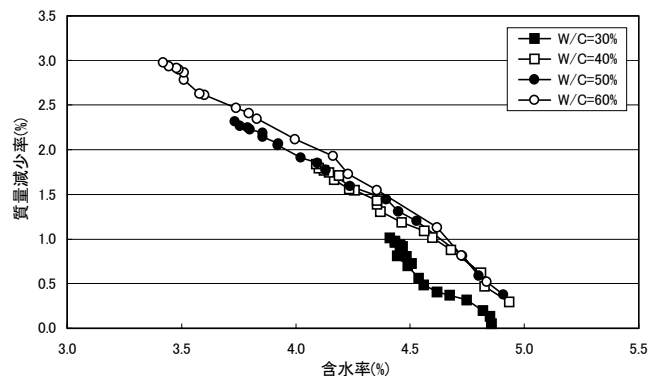


図-3 含水率と質量減少率との関係

見られた。水セメント比が50%および60%の場合は増加し、30%および40%の場合は減少していたが、この原因については不明である。

乾燥材齢2日以後の含水率と弾性波速度の経時変化を図-5に示す。含水率は、最初、水セメント比に拘らず5%程度であった。この値は、接触型水分計で測定しているため、供試体端部の表層部の水分量が支配的になっているためと考えられる。その後、水セメント比により異なる経時変化を示し、低水セメント比ほど緻密性が高いために含水率の低下量は少なかった。他方、弾性波速度は含水率が4.3%付近まではほとんど変化せず、低水セメント比ほど含水率が高い傾向はわずかに見られるが、4.3%以下になるとほぼ直線的な低下傾向を示した。

(3) 弾性波速度と圧縮強度との関係

圧縮強度の経時変化を図-6に示す。黒抜き記号は標準養生を示し、材齢は7, 14, 28, 56および91日である。また、白抜き記号は気中養生を示し、材齢は42, 56, 84, 140および252日(乾燥材齢2, 4, 8, 16, 32週)である。材齢28日で気中養生に切り替えた場合、その後の圧縮強度は標準養生よりも高く⁹⁾なっており、材齢56日で比較すると10%前後高くなった。

乾燥材齢0~32週の弾性波速度と圧縮強度との関係を図-7に示す。弾性波速度は乾燥材齢が進み低含水率になるに従って低下したが、圧縮強度は材齢56日(乾燥材齢

4週)まではわずかに増加し、かつ、図-6に示すように、乾燥により見掛けの強度が増加したため、弾性波速度と圧縮強度との関係に含水率による変化が見られた。ここで、乾燥による見掛けの強度増加の影響を除くため、乾燥材齢2週以上の圧縮強度から材齢56日における気中養生と標準養生の強度差を差し引き、この値を修正圧縮強度とした。弾性波速度と修正圧縮強度との関係を図-8に示す。水セメント比40~60%の關係に着目すると、弾性波速度と圧縮強度との關係は、乾燥材齢が4週以後、弾性波速度の低下により、圧縮強度推定式から外れて弾性波速度軸を左の方向に移行する傾向が見られた。

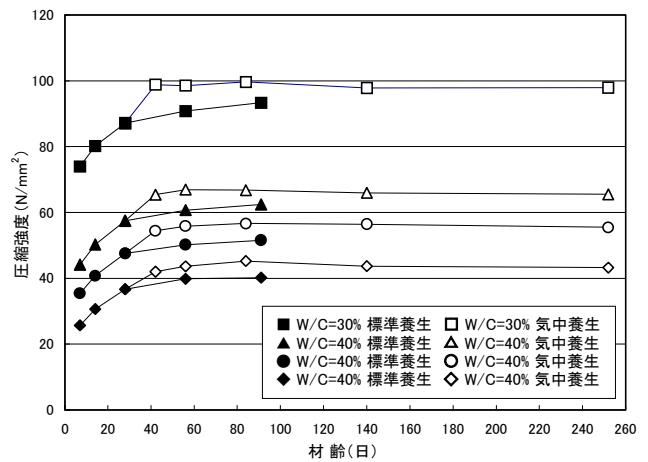


図-6 圧縮強度の経時変化

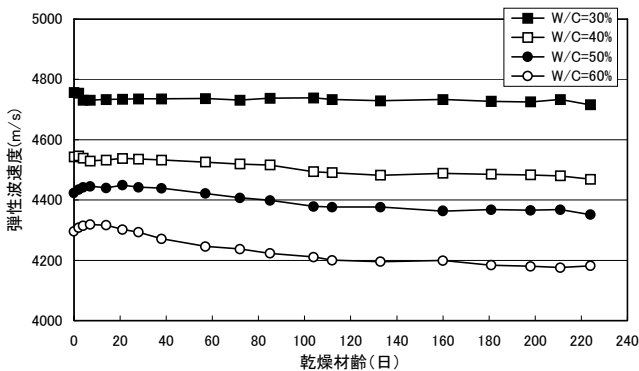


図-4 弾性波速度の経時変化

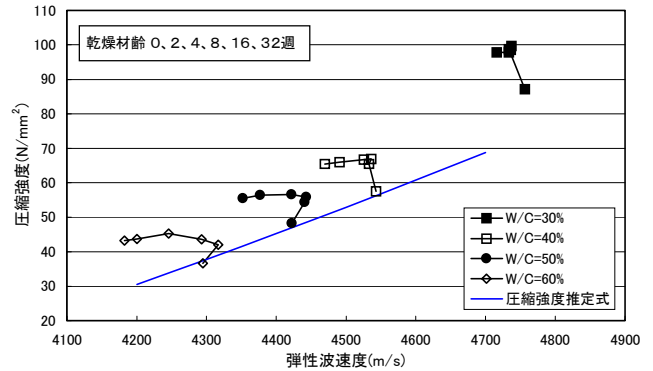


図-7 弾性波速度と圧縮強度との関係

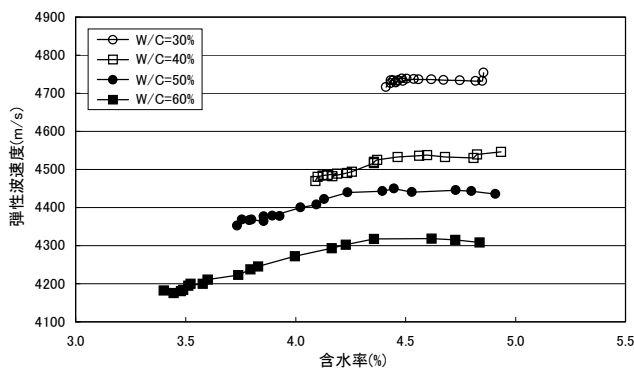


図-5 含水率と弾性波速度の経時変化

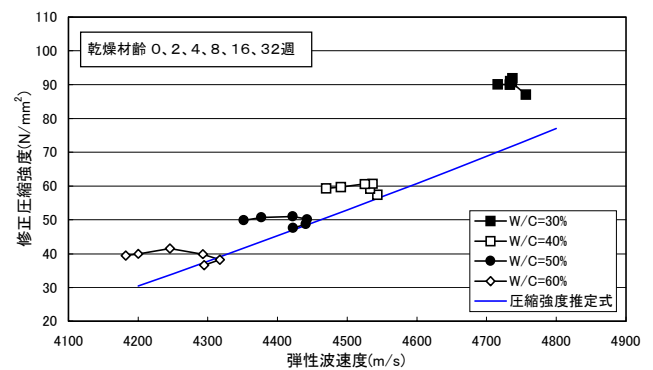


図-8 弾性波速度と修正圧縮強度との関係

4. 脱型時期の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係

(1) 含水率と弾性波速度との関係

型枠脱型時期の違いによる含水率の経時変化を図-9に示す。材齢は7, 14, 28および56日である。図中の凡例は水セメント比および脱型時期を記号化したもので、例えば、C40-3は水セメント比が40%、型枠脱型時期が材齢3日（3日脱型）の供試体を示す。含水率は水セメント比に依存し、水セメント比が高くなるに連れて含水率は低くなる傾向を示した。さらに、型枠脱型時期にも依存性が見られ、3日脱型は5日脱型よりも低い含水率を示した。7日脱型の7日材齢の含水率は、脱型当日に表乾状態で試験を行うため、5日脱型に比較してかなり高い値を示したが、その後は急激に低下して5日脱型の経時変化とほぼ同様な変化をたどった。また、含水率の経時変化は、水セメント比に拘らず、ほぼ同じ割合で低下する傾向が見られ、実験項目(1)の図-2における乾燥材齢120日以降の傾向と類似していた。

弾性波速度の経時変化を図-10に示す。弾性波速度は、28日材齢までは増加傾向が見られたが、56日材齢では減少傾向に転じていた。含水率と同様に弾性波速度に対しても型枠脱型時期に依存性が見られ、3日脱型の弾性波速度は5日脱型よりも低い値を示す傾向が見られた。

含水率と弾性波速度の経時変化を図-11に示す。弾性

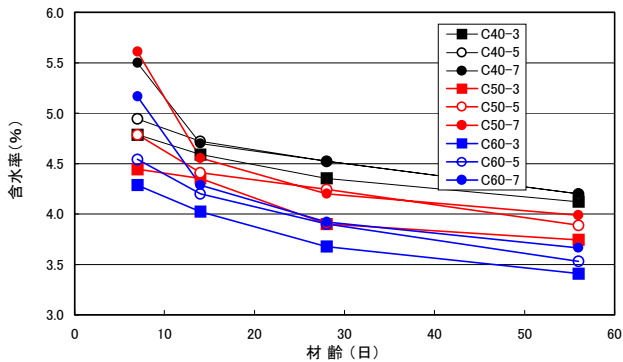


図-9 含水率の経時変化

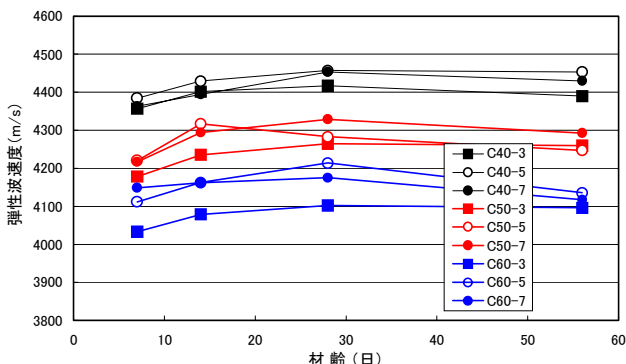


図-10 弾性波速度の経時変化

波速度がピークに達する時の含水率は4.5%~4.0%弱となっていた。この時の含水率には水セメント比および型枠脱型時期の依存性が見られ、低水セメント比では含水率は高くなり、早い脱型時期では含水率は低くなっていたが、5日と7日脱型とは有意な差はなかった。

(2) 弾性波速度と圧縮強度との関係

圧縮強度の経時変化を図-12に示す。圧縮強度においても、含水率および弾性波速度と同様に、型枠脱型時期による差が見られた。すなわち、3日脱型の圧縮強度は5日脱型より低かった。しかしながら、5日脱型および7日脱型の圧縮強度には有意な差は見られなかった。

弾性波速度と圧縮強度との関係を図-13に示す。7日材

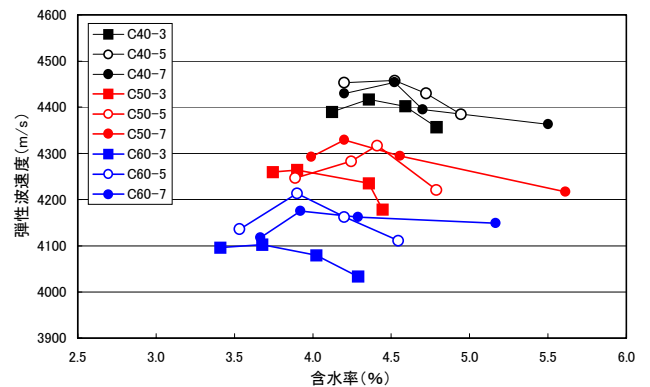


図-11 含水率と弾性波速度の経時変化

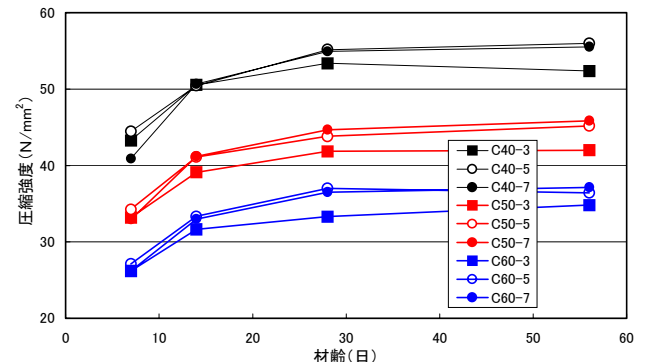


図-12 圧縮強度の経時変化

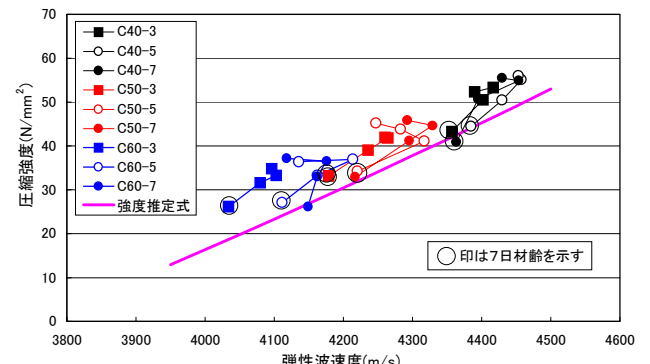


図-13 弾性波速度と圧縮強度との関係

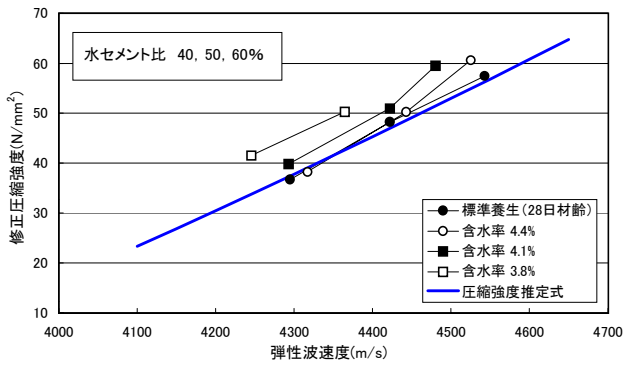


図-14 乾燥材齢の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係

齢の弾性波速度と圧縮強度との関係は、C60-3、C60-5 および C50-3 以外では、圧縮強度推定式に近接していた。すなわち、水セメント比 60%の脱型時期 5日以下および水セメント比 50%の 3日脱型の場合は、圧縮強度に見合う本来の弾性波速度より低かったため、圧縮強度推定式から外れたものと考えられる。これらの含水率は、図-9 および図-11によると、いずれも 4.5%以下であった。その後、材齢に伴って含水率が徐々に低下すると、他の場合でも圧縮強度の増加に応じた弾性波速度の増加が見込めず、その相関関係は圧縮強度推定式から外れて行った。このことから、含水率がおよそ 4.5%を下回ると、弾性波速度に影響が現れるものと推測される。

5. 含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係

含水率が弾性波速度に及ぼす影響を把握するため、2種類の実験を行った。実験の一つは、乾燥材齢の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係について検討したものである。他方の実験は、型枠の脱型時期の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係について検討したものである。この結果、弾性波速度と圧縮強度との関係として、それぞれ図-8 および図-13 が得られ、その相関関係は、含水率に依存することが明らかになった。そこで、弾性波速度と圧縮強度との関係を含水率の範囲ごとに分類し、含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係を図-14 および図-15 に示す。

(1) 乾燥材齢の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係

図-14 は、乾燥材齢の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係であり、図-8 に示した値の中から各水セメント比に対して同じ含水率の弾性波速度と圧縮強度との関係を結んだものである。なお、水セメン

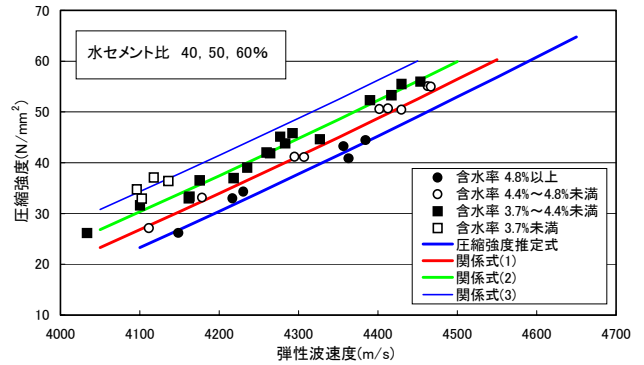


図-15 型枠脱型時期の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係

ト比 30%は、前報で述べたように、水セメント比 40~60%とは相関関係が異なるため、図-14 からは除外した。この実験では乾燥材齢を水準としたため、水セメント比 40%と 60%では、図-2 および図-5 に示すように、含水率の変化量が異なり、水セメント比 40%の含水率は 4.1%以下にはならなかった。したがって、水セメント比 40%はデータが不足しているが、材齢 28 日および含水率 4.4%の相関関係は前報で設定した圧縮強度推定式にほぼ一致しているのに対し、含水率が 4.1%および 3.8%の相関関係は、圧縮強度推定式にほぼ平行に、弾性波速度が低下する方向に（左に）移動する傾向が見られた。

(2) 型枠脱型時期の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係

図-15 は、型枠脱型時期の違いによる含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係である。これは、図-13 の弾性波速度と圧縮強度との関係を含水率の範囲ごとに分類して表示したものであり、同時に前報で設定した圧縮強度推定式およびその係数 b を表-4 に示す値に変えた 3 種類の関係式を示した。圧縮強度推定式を式(2)に示す。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \quad (2)$$

ここに、 f_c は推定圧縮強度、 V は半無限体を伝播する弾性波速度、 ρ は密度 (便宜的に 2.3 g/cm^3)、係数 $a = 1/220$ 、 $b = -121.5 \text{ N/mm}^2$ 、 $c = (1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu) = 0.825$ である。

表-4 関係式に用いた圧縮強度推定式の係数 b の値

係数 b の値 (N/mm^2)	圧縮強度推定式	関係式 (1)	関係式 (2)	関係式 (3)
		-121.5	-117.5	-114.5
含水率 (%)	4.8 以上	4.4~4.8	3.7~4.4	3.7 未満
相関係数	0.984	0.996	0.989	0.677

さらに、含水率が 4.8%以上の場合は圧縮強度推定式に、4.4~4.8%未満の場合は関係式(1)に、3.7~4.4%未満の場合は関係式(2)に、3.7%未満の場合は関係式(3)に対応

させ、相関係数を求めて表-4 に示す。この結果、含水率が 3.7%未満の場合は、弾性波速度の分布幅が狭かったため、相関係数がやや低く評価されたが、それぞれの関係式に対して非常に高い相関性が認められた。このことにより、含水率の範囲ごとに弾性波速度と圧縮強度との関係を分類すれば、それぞれの相関関係に対して圧縮強度推定式を拡張した関係式が適用できるものと思われる。

6. おわりに

本報告では、2種類の実験により、含水率が弾性波速度に及ぼす影響を検討し、その影響が弾性波速度と圧縮強度との関係に与える効果について考察した。

本実験結果から以下のことを明らかにした。

- 1) 質量減少率は、水セメント比に依存し、同じ材齢では低水セメント比ほど小さくなる傾向が見られた。これは、コンクリートの緻密性が高いほど、水分の放出による質量の減少が抑えられるためと考えられる。
 - 2) 含水率は、質量減少率と同様に水セメント比に依存し、同じ材齢では低水セメント比ほど大きくなる傾向が見られた。
 - 3) 乾燥材齢による弾性波速度の経時変化は、含水率が 4.3%付近まではほとんど変化せず、4.3%以下になるとほぼ直線的な低下傾向を示した。弾性波速度の低下が始まるときの含水率は、4.3%を前後に低水セメント比ほど高い値になる傾向がわずかではあるが見られた。
 - 4) 含水率と型枠脱型時期の間には依存性が見られ、3日脱型の含水率は5日脱型よりも低い値を示した。しかしながら、5日脱型および7日脱型の含水率にはほとんど相違は見られなかった。
 - 5) 弾性波速度と型枠脱型時期の間には依存性が見られ、3日脱型の弾性波速度は5日脱型よりも低い値を示したが、5日脱型および7日脱型の弾性波速度には有意な差は見られなかった。
 - 6) 型枠脱型時期の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係は、含水率が 4.8%以上では前報で設定した圧縮強度推定式に一致していたが、4.5%以下になると弾性波速度が低下するために同式から外れ、弾性波速度軸の減少する方向（左）に平行移動する傾向が見られた。
 - 7) 実験で得られた弾性波速度と圧縮強度との関係を含水率に応じて分類し、含水率を考慮した弾性波速度と圧縮強度との関係を作成した。この相関関係と圧縮強度推定式およびその係数 b を変えた関係式との対応性が認められたことから、含水率を考慮した圧縮強度推定式への拡張の可能性が確認された。
- 上記の知見 7) より、強度推定のための弾性波速度測定

と同時に接触型水分計を用いて含水率を測定し、あらかじめ用意した数種類の含水率を考慮した圧縮強度推定式の中から、その含水率に応じた圧縮強度推定式を用いて強度を推定する方法が考えられる。これにより、推定精度を向上させる可能性があると思われる。また、含水率を考慮した圧縮強度推定式は係数 b のみが関係しているため、含水率の関数とすることも可能であると思われる。

今後は、含水率が弾性波速度に及ぼす影響について、さらに、含水率の範囲を拡大した検討および含水率を考慮した圧縮強度推定式の検証などの課題に取り組む必要があるものとする。

謝辞：本報告は、ものづくり大学建設技能工芸学科の中田善久講師および河谷史郎教授のご指導の基で行った研究である。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) ヴォラプッタポーニ コンキッ, 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) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino：Impact-Echo Method, Concrete International, Vol. 10, No. 4, pp. 38-46, 1988. 4
- 9) 小野竹之助：コンクリート工学 材料篇, 森北出版株式会社, pp. 163-164