

コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発

—表面の乾燥が構造体コンクリートの弾性波速度に及ぼす影響—

Development of Nondestructive Inspection Method for Estimating Concrete Strength

—Influence of Surface Dryness on Elastic Wave Velocity of Concrete in Structures—

立見 栄司 EIJI TATSUMI

衝撃弾性波の伝播速度に基づく圧縮強度推定法では、コンクリートの弾性波速度を構造体表面で測定するため、特に乾燥による影響を考慮し、適切に弾性波速度を測定する必要がある。本報告では、構造体を模擬した試験体および構造体コンクリートの一部分を想定した円柱供試体を用いて実験を行い、コンクリート表面の乾燥が構造体コンクリート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、含水率

In a method for estimating compressive strength of concrete based on the velocity of impact elastic wave, it is necessary to consider the influence of dryness adequately in measuring the elastic wave velocity, because it is measured on the surface of concrete. This paper describes experiments conducted on test specimens modeling concrete structures and cylindrical specimens assuming a part of concrete in structures, and clarifies the influence of surface dryness on the elastic wave velocity measured at the concrete in structures.

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

1. はじめに

筆者は、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）から圧縮強度を推定する方法、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。本強度推定法は、表面2点法と呼ばれ、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。

2001年、現場展開を意図して試作機を作製し、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の強度推定など、新設構造物の強度管理に適用した結果、高い実用性を確認した。

本強度推定法は、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),6),7)}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。

また、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^{8),9)}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、平成16年度は、含水率が弾性波速度に及ぼす影響¹⁰⁾について述べた。

本強度推定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を把握し、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特性を把握する必要がある。このため、平成17年度は、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¹¹⁾について述べた。

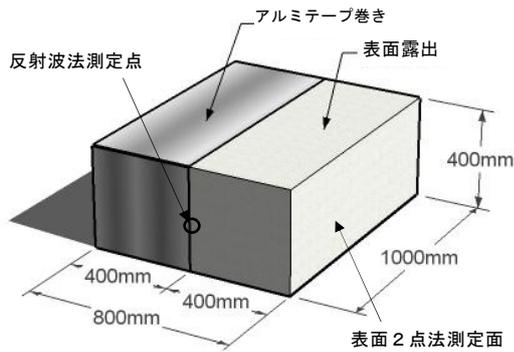


図-1 模擬試験体概要図

近年、場所打ちコンクリート杭に高炉スラグ骨材を用いたスラグコンクリートが場所打ちコンクリート杭などに使用されている。スラグコンクリートの使用実績は極めて少ないため、昨年度、杭頭処理後の強度確認を目的とし、本強度推定法によるスラグコンクリート杭の杭頭強度測定結果¹²⁾について報告した。

本強度推定法における弾性波速度測定は、表面2点法により行っている。表面2点法は、構造体コンクリートの表面で弾性波速度を測定するため、乾燥などが弾性波速度に及ぼす影響により、推定精度を損なう可能性がある。本報告は、表面2点法による強度推定精度の維持・向上に資することを目的とし、構造体を模擬した試験体および構造体コンクリートの一部分を想定した円柱供試体を用いて実験を行い、コンクリート表面の乾燥が構造体コンクリートの表面で測定された弾性波速度に及ぼす影響を検討するものである。

2. 実験概要

(1) 実験の目的および実験項目

コンクリートの弾性波速度は乾燥により含水率が減少すると遅くなる傾向¹⁰⁾がある。コンクリートの乾燥は、表面から進行するため、構造体コンクリートの表面で弾性波速度を測定する表面2点法などの表面法では、強度推定精度に影響を及ぼす重要な問題である。そこで、推定精度の維持・向上に資することを目的として、実験により、含水率および弾性波速度の経時変化を測定し、乾燥による弾性波速度の影響について検討することとした。

実験項目は、①円柱供試体の乾燥と弾性波速度の経時変化、②模擬試験体の乾燥と弾性波速度の経時変化および③模擬試験体の吸水による弾性波速度の変化の3種類とした。実験項目①の円柱供試体の乾燥と弾性波速度の経時変化では、構造体コンクリートの一部分を採取した供試体を模擬した円柱供試体を用い、円柱供試体表面の含水率と弾性波速度の経時変化を測定した。実験項目②の模擬試験体の乾燥と弾性波速度の経時変化では、構造

表-1 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3,300cm ² /g)
細骨材	①栃木県佐野市葛生産・砕砂(表乾密度2.63g/cm ³ 、粗粒率3.20)
	②千葉県佐原市佐原産・陸砂(表乾密度2.62g/cm ³ 、粗粒率1.80)
	*細骨材混合比 砕砂:陸砂=60%:40%
粗骨材	栃木県佐野市葛生産・石灰岩砕石(表乾密度2.70g/cm ³ 、実積率60.0%)
混和剤	AE減水剤:リグニンスルホン酸系化合物ポリオール複合体

表-2 調合、実測のスランプおよび空気量

水セメント比 (%)	s/a (%)	単位置量(kg/m ³)					混和剤 (kg/m ³)	単位容積質量 (kg/m ³)	実測値	
		W	C	S①	S②	G			スランプ (cm)	空気量 (%)
40	44.7	170	425	458	305	972	4.25	2330	13.0	3.5
50	45.1	183	366	468	310	972	3.66	2299	15.0	5.5
60	46.9	181	302	503	333	972	3.02	2291	16.5	4.0

体を模擬した試験体を用い、試験体表面の含水率および弾性波速度の経時変化を測定した。試験体表面の弾性波速度は、乾燥の影響を検討するために、乾燥が進行する場合としない場合について比較した。実験項目③の模擬試験体の吸水による弾性波速度の変化では、乾燥が進行した模擬試験体の測定部位に湿布により吸水させ、弾性波速度の変化を測定した。



写真-1 円柱供試体

(2) 試験体および使用材料・調合

構造体を模擬した試験体は、図-1に概要図を示すように、800W×400H×1,000Lの直方体で、模擬試験体と呼ぶ。試験体の種類は、水セメント比が40、50および60%の3種類とした。また、構造体コンクリートから採取した供試体を模擬するため、φ100×200mmの円柱供試体を前記の水セメント比ごとに3体作製した。

コンクリートは生コンプラント製で、使用材料を表-1に、調合、実測スランプおよび空気量を表-2に示す。セメントを普通ポルトランドセメント、細骨材を栃木県佐野市産の砕砂および千葉県佐原市産の陸砂を混合比6:4、粗骨材を栃木県佐野市産の砕石とした。粗骨材の最大寸法を20mm、単位粗骨材かさ容積を0.60m³/m³とし、目標スランプを15cmおよび目標空気量を4.5%とした。

型枠脱型は打設後7日に行った。模擬試験体は、その半分の乾燥を防止するため、図-1に示すように粘着アルミテープで巻いた。円柱供試体は、構造体コンクリートの一部分を想定し、一端面以外の乾燥を防止するため、写真-1に示すようにアルミテープで巻いた。それぞれは実験室の同一場所で養生した。

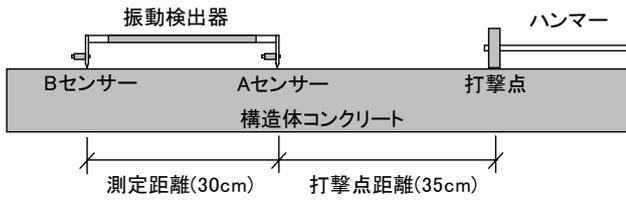


図-2 表面2点法による測定方法

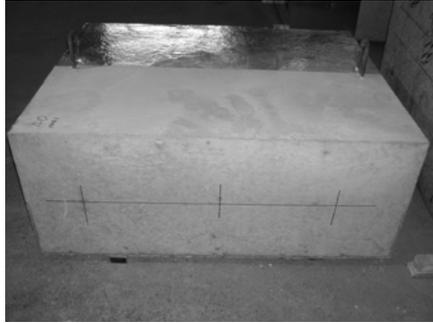


写真-2 測定位置(表面露出)

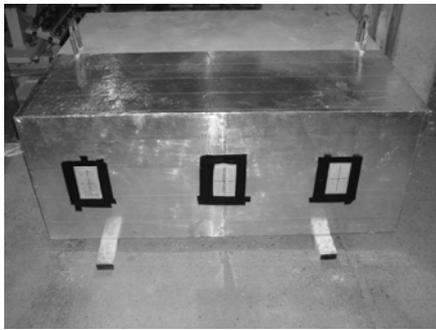


写真-3 測定位置(乾燥防止)

(3) 測定方法

円柱供試体の弾性波速度は、既報⁵⁾と同様に反射波法により測定した。反射波法では、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)¹³⁾により弾性波速度 V_p を算出する。

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

一方、動弾性係数 E と棒状体弾性波速度 V_p の関係は式(2)、動弾性係数と半無限体弾性波速度 V の関係は式(3)で表される。なお、 ρ は密度、 ν は動ポアソン比である。

式(2)、式(3)から E を消去することにより、式(4)が求められる。式(4)により、棒状体弾性波速度から半無限体弾性波速度に変換できる。ここに、動ポアソン比を 0.255 と仮定すると、式(4)は式(5)となる。

$$E = \rho V_p^2 \quad (2)$$

$$E = \rho V^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad (3)$$

$$V = \{ (1 - \nu) / (1 + \nu) (1 - 2\nu) \}^{1/2} V_p \quad (4)$$

$$V = 1.1 V_p \quad (5)$$

模擬試験体の弾性波速度測定は、位相法⁶⁾である表面

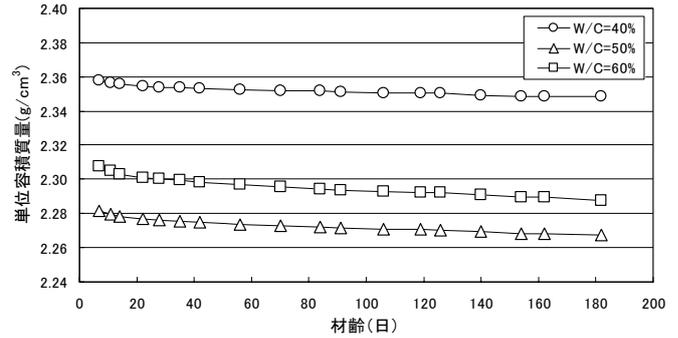


図-3 単位容積質量の経時変化

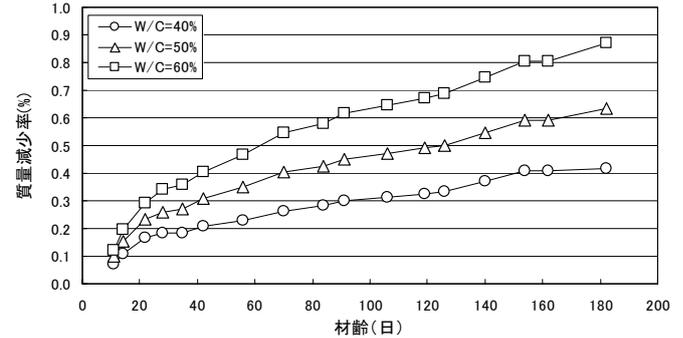


図-4 質量減少率の経時変化

2点法¹⁴⁾により測定した。表面2点法は、図-2に測定方法を示すように、コンクリート表面に設置したA、B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る。

含水率の測定は、接触型水分計により、コンクリート表面で行った。この含水率は、コンクリート表面付近の平均的な値であるため、本報告では計測含水率と呼び検討することとした。

測定は材齢7日から開始し、円柱供試体では質量、含水率および弾性波速度を測定し、模擬試験体では含水率および弾性波速度を測定した。表面2点法による模擬試験体の測定位置を写真-2および写真-3に示す。写真-2にコンクリート打放ち面の測線を示し、本報告では表面露出と呼び、写真-3にアルミテープで巻いた面の測線(測定用の黒枠窓)を示し、乾燥防止と呼ぶこととした。測定間隔は、材齢が40日付近までは3~7日、その後は7~14日とした。模擬試験体の反射波法は、図-1に示すように、端面中央部で行った。

3. 実験結果

(1) 質量減少率の経時変化

単位容積質量の経時変化を図-3に示す。水セメント比が50%の材齢7日の単位容積質量は、表-2に示す調査表の値を下回り、60%のものよりも小さくなった。これは、50%の実測空気量が60%よりも1.0%大きいため、単位容積当たりのコンクリート量が少ないものと考えられる。

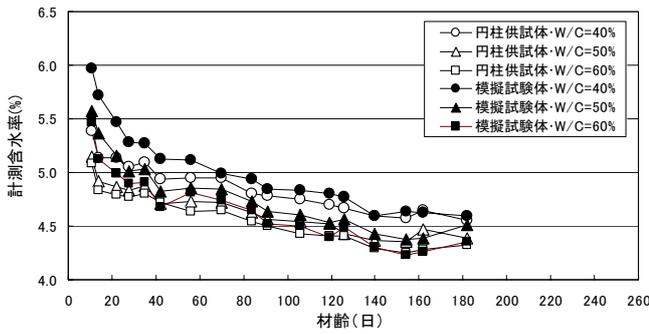


図-5 計測含水率の経時変化

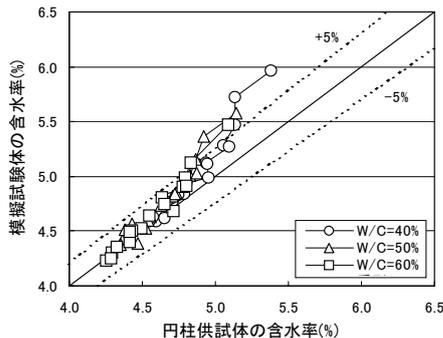


図-6 模擬試験体と円柱供試体の計測含水率の比較

質量減少率の経時変化を図-4に示す。質量減少率とは、測定を開始したときの質量に対する円柱供試体の減少した質量の百分率であり、乾燥の度合いを表す一指標である。質量減少率は、材齢 28 日までは比較的急激に進み、その後はほぼ直線的に推移し、水セメント比が大きいほど大きい傾向が見られ、コンクリートの緻密性に関係していると考えられる。また、材齢 180 日付近では 0.4%~0.9%程度であり、全面露出で乾燥させた場合の 2%~3%⁷⁾に比べて極端に小さくなっていった。

(2) 計測含水率の経時変化

円柱供試体および模擬試験体の計測含水率の経時変化を図-5に示す。計測含水率は、材齢 28 日までは比較的急激に減少したが、その後はなだらかに減少し、質量減少率との対応性が見られた。一方、模擬試験体と円柱供試体の計測含水率の比較を図-6に示す。模擬試験体と円柱供試体の計測含水率を比較すると、急激に減少した材齢 28 日までは若干異なり、模擬試験体の方が 5%以上大きいですが、その後はほぼ一致し、5%以内の相関性が認められた。これにより、円柱供試体の 1 端面以外をアルミテープで巻き、乾燥を防止することより、構造体表面の乾燥状況を模擬できることを明らかにした。

(3) 模擬試験体と円柱供試体の弾性波速度の経時変化

模擬試験体内部の弾性波速度を反射波法により測定し、円柱供試体の弾性波速度と比較した。円柱供試体の弾性波速度は、式(5)により、測定した棒状体弾性波速度から

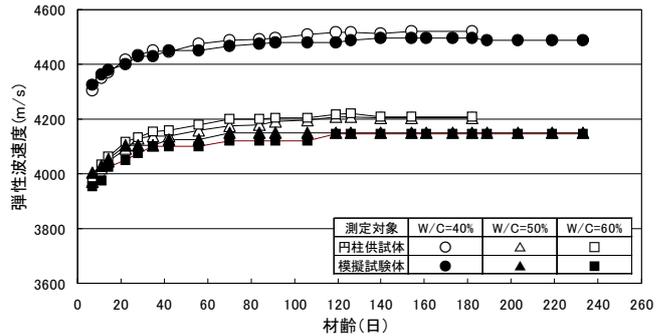


図-7 模擬試験体内部と円柱供試体の弾性波速度の経時変化

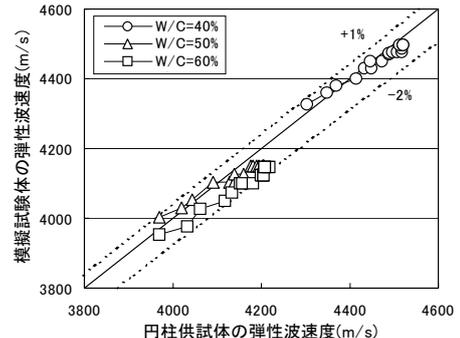


図-8 模擬試験体内部と円柱供試体の弾性波速度の比較

半無限体弾性波速度に変換して検討した。模擬試験体内部と円柱供試体の弾性波速度の経時変化を図-7に示す。弾性波速度は、円柱供試体の方が模擬試験体よりも若干速い傾向は見られるが、ほぼ同様な傾向を示した。また、材齢 40 日までは比較的顕著に増加したが、その後はなだらかな増加傾向を示し、測定を継続した 240 日間では、減少する傾向はほとんど見られなかった。なお、水セメント比が 50%と 60%で異なるにも拘わらず、弾性波速度がほとんど一致している理由は、(1)項で述べたように、50%の実測空気量が 60%よりも大きいため、水セメント比 50%の弾性波速度が相対的に遅くなったものと考えられる。一方、材齢 182 日までの模擬試験体内部と円柱供試体の弾性波速度の比較を図-8に示す。模擬試験体の弾性波速度は、円柱供試体に対して、水セメント比 40%および 50%の場合はほぼ±1%、水セメント比 60%の場合は 0~-2%の範囲に分布した。両者の関係は、低材齢では模擬試験体の弾性波速度が大きいですが、材齢が進行すると逆転現象を示していた。模擬試験体と円柱供試体の弾性波速度はほぼ一致したことから、反射波法で測定した模擬試験体の弾性波速度は半無限体弾性波速度であると考えられる。

(4) 模擬試験体の弾性波速度の経時変化

表面 2 点法により測定した試験体表面の弾性波速度 V_2 は、式(6)¹⁴⁾により、試験体内部の弾性波速度 V に換算し、反射波法による測定結果と比較した。表面 2 点法による模擬試験体の弾性波速度の経時変化を図-9に示す。また、

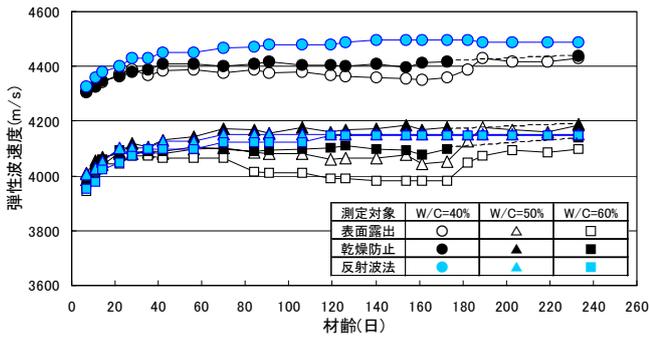


図-9 表面2点法による模擬試験体の弾性波速度の経時変化

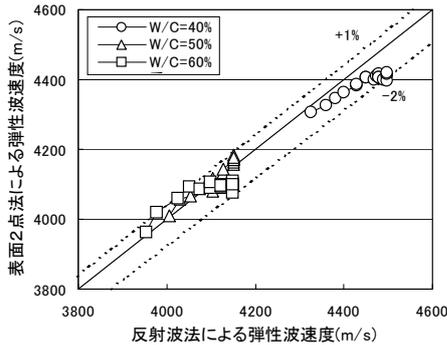


図-10 表面2点法と反射波法による弾性波速度の比較

模擬試験体の表面2点法と反射波法による弾性波速度の比較を図-10に示す。乾燥防止の弾性波速度は、反射波法によるものに対し、水セメント比が40%と60%の場合はやや下回るものの、全般的には良く対応し、+1%~2%の範囲に分布していた。しかしながら、表面露出の弾性波速度は、材齢40~50日付近から乾燥防止のものよりも減少する傾向が見られ、材齢の進行とともに差は拡大しており、表面の乾燥による影響を受けたものと考えられる。

一方、材齢173~233日まで、写真-4に湿布によるコンクリート面の給水状況を示すように、表面露出面が上面になるように試験体を立て、測線部のコンクリートに給水しながら弾性波速度の変化を測定した。なお、乾燥防止面は、下面になるので、測定を中止した。この結果、表面露出の弾性波速度は、材齢189日までの16日間で増加し、乾燥防止とほぼ同等まで復活した。

$$V = V_2 \times \{1.04 - 0.04(V_p - 3850) / 1250\} \quad (6)$$

(5) 円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係

円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係を比較して図-11に示す。弾性波速度と同様に圧縮強度においても、水セメント比が50%と60%で異なるにも拘らず、両者がほとんど一致した理由は、50%の空気量が60%よりも1.0%大きいため、50%の圧縮強度が相対的に低下したものと考えられる。このように、弾性波速度と圧縮強度との間には空気量に対して正の相関性⁷⁾が認められた。

供試体の養生方法および材齢は、標準養生が材齢7, 14,



写真-4 湿布によるコンクリート面の給水状況

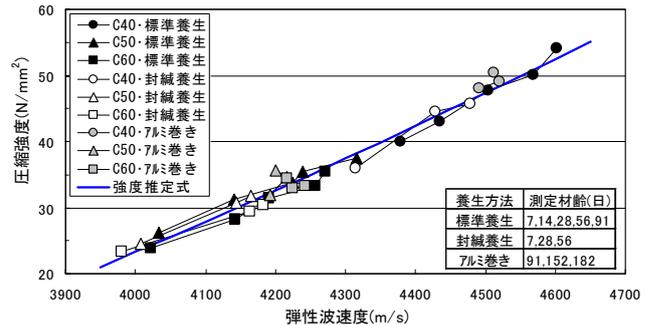


図-11 円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係

28, 56および91日、封緘養生が7, 28および56日、アルミ巻きが91, 152および182日である。それぞれの弾性波速度と圧縮強度との関係は、ほぼ一つの相関関係を形成しており、実験の材齢範囲では乾燥による明瞭な影響は見られなかった。この相関関係を式(7)で示す半無限体弾性波速度に対する強度推定式⁶⁾を回帰することにより式(7)の係数の値を確定した。得られた強度推定式を図-11に実線で示し、係数の値を表-3に示す。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \quad (7)$$

表-3 強度推定式の係数の値

密度 ρ (g/cm ³)	係数 a	係数 b (N/mm ²)	係数 c
2.332	1/340	-67.1	0.825

(6) まとめ

本実験では、円柱供試体および模擬試験体により、コンクリートの乾燥が構造物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質量減少率は、水セメント比が大きいかほど大きい傾向が見られ、コンクリートの緻密性に関係していた。
- ②計測含水率は、材齢28日までは比較的急激に減少したが、その後はなだらかに減少し、質量減少率との対応性が見られた。
- ③模擬試験体と円柱供試体の計測含水率を比較すると、材齢28日までの低材齢では模擬試験体のほうがやや大きい、材齢の進行に伴いほぼ一致し、5%以内の相関

性が認められた。これにより、円柱供試体の1端面以外をアルミテープで巻き乾燥を防止することより、構造体表面の乾燥状況を模擬できることを明らかにした。

- ④構造体内部の弾性波速度は、測定を行った240日の範囲では、乾燥により減少する傾向は見られなかった。
- ⑤表面2点法により測定した表面露出の弾性波速度は、試験体表面の乾燥による影響を受け、材齢40～50日付近から乾燥防止のものよりも減少する傾向が見られ、材齢の進行とともに両者の差は拡大した。
- ⑥材齢173日以後、表面露出の測線部を湿布により給水しながら弾性波速度の変化を測定した。これにより、表面露出の弾性波速度は徐々に増加し、16日間で乾燥防止とほぼ同程度まで復活した。
- ⑦構造体の一部を模擬したアルミテープ巻き円柱供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係は、標準養生および封緘養生のものとはほぼ一つの相関関係を形成しており、実験の材齢範囲である182日間では、供試体内部の乾燥による明瞭な影響は見られなかった。

4. おわりに

本報告では、表面2点法による構造体コンクリートの強度推定精度の維持・向上を目的に、構造体を模擬した試験体および構造体コンクリートの一部分を想定した円柱供試体を用いて実験により、コンクリート表面の乾燥が弾性波速度に及ぼす影響について検討した。

この結果、コンクリート表面の乾燥はアルミテープなどの不透水性テープの粘着により防止できること、構造体表面で測定した弾性波速度は材齢40～50日付近から乾燥の影響により減少すること、減少した弾性波速度は湿布などでコンクリート表面に吸水させることにより復活できることを明らかにした。これらの知見は、実際の測定で適用され、推定精度の維持に寄与するものと思われる。

今後は、本実験を踏まえ、長期間における乾燥の影響、型枠脱型時期による構造体表面の乾燥の影響などの課題に取り組む必要があるものと考えている。

謝辞：本研究において、日本大学理工学部建築学科中田善久准教授のご指導を賜りました。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, 三井建設技術研究所報告, 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) 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査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集, No.587, pp.15-21, 2005.1
- 7) 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—骨材の種類, 養生方法および含水率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集, No.598, pp.13-20, 2005.12
- 8) ヴォラプッタポーシ—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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発—構造体コンクリートへの適用に関する検討, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.3, 2005
- 12) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度測定法の開発—スラグコンクリート杭の強度測定への適用, 三井住友建設技術研究所報告, Vol.4, 2006
- 13) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino: Impact-Echo Method, Concrete International, Vol.10, No.4, pp.38-46, 1988.4
- 14) 衝撃弾性波試験—表面2点法による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), (独)土木研究所ホームページ, <http://www.pwri.go.jp/renewal/relation/conc-kyoudo/kyodo.syogeki2.pdf>