

論文 セメント硬化体の超音波伝播速度に及ぼす骨材および細孔構造の影響

山下英俊^{*1}・堺孝司^{*2}・嶋田久俊^{*3}・丸茂文夫^{*4}

要旨: ペースト, モルタル, コンクリートの品質を定量的に評価する方法として超音波伝播速度の有効性を検討した。その結果, 骨材の影響を取り除くことにより, セメント硬化体の細孔構造などと超音波伝播速度の間には良好な相関関係にあることを明らかにした。これにより, 骨材の影響を取り除いたセメント硬化体の超音波伝播速度の測定により, コンクリートの品質評価が可能であることを示した。

キーワード: 超音波伝播速度, 細孔構造, 骨材, 品質評価, トモグラフィー

1. はじめに

コンクリート構造物の性能設計¹⁾が注目されるようになり, コンクリートの劣化予測を精度良く行うことが重要な課題となってきた。しかし, これまでの劣化予測手法は, 対象とするコンクリート構造物の品質は同一であることを前提としており, 同一構造物内の品質のバラツキを考慮していない場合が多い。現在一般的に行われているコンクリートの品質評価手法には, コンクリート打込み前のスランプや空気量の品質検査およびサンプル供試体の圧縮強度試験などがあるが, これらは施工後のコンクリートの品質を評価するものではない。また, コンクリート構造物の品質を評価する方法として, 多くの非破壊試験が提案されているが, 測定値にバラツキが多いため, コンクリートの品質を定量的に評価することは難しいとされてきた。コンクリート構造物の性能設計では, 構成する材料の性能を定量的に評価することが重要となることから, その初期値として施工後のコンクリートの品質を合理的に評価できる手法が望まれている。

著者らは, これまでペーストとモルタルにつ

いて, 超音波伝播速度と細孔構造の関係について検討してきた²⁾。本研究では, 超音波伝播速度とコンクリートの耐久性に大きく影響するセメント硬化体の細孔構造に加えて骨材の影響を明らかにし, コンクリート, モルタルおよびペーストの品質を評価する方法を検討した。また, トモグラフィー³⁾により, ペーストおよびコンクリートの品質のバラツキを評価する方法も検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および示方配合

供試体の配合は, 表-1に示す通り, コンクリート, モルタルは水セメント比 40, 50, 60, 70%, ペーストは水セメント比 30, 40, 50, 60%とした。骨材の影響を明瞭にするために, 基本的にはモルタル, コンクリートの骨材量は一定とした。また, 硬化体の実質水セメント比がブリーディングによって変動することを極力防ぐために, 練り混ぜはダブルミキシングとした。なお, ダブルミキシングの1次水はセメントの24%とした。

* 1 榊間組 技術本部技術研究所技術研究部 工博 (正会員)

* 2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

* 3 北海道開発局 開発土木研究所構造部 (正会員)

* 4 東横エルメス エンジニアリング事業部 (正会員)

表-1 供試体の配合

配合*	W/C	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C × %)	空気量 (%)	スランプ ^o (cm)	フロー (mm)
		W	C	S	G				
P30	30	482	1606	—	—	—	1.2	—	149
P40	40	553	1382	—	—	—	1.4	—	202
P50	50	606	1213	—	—	—	1.6	—	261
P60	60	648	1080	—	—	—	1.8	—	—
PA30	30	462	1541	—	—	0.7	5.0	—	164
PA40	40	530	1326	—	—	0.6	4.7	—	215
PA50	50	582	1164	—	—	0.6	5.7	—	242
PA60	60	622	1037	—	—	0.5	5.8	—	—
M40	40	276	689	1300	—	—	1.7	—	148
M50	50	302	605	1300	—	—	0.7	—	181
M60	60	323	539	1300	—	—	0.3	—	208
M70	70	340	486	1300	—	—	0.2	—	231
MA40	40	253	633	1300	—	0.4	4.3	—	145
MA50	50	278	556	1300	—	0.5	5.3	—	179
MA60	60	297	495	1300	—	0.7	4.0	—	199
MA70	70	313	446	1300	—	1.2	4.9	—	217
C40	40	196	489	754	946	—	1.8	4.0	—
C50	50	215	429	754	946	—	1.5	17.8	—
C60	60	229	382	754	946	—	1.1	22.0	—
C70	70	241	345	754	946	—	0.9	24.3	—
CA40	40	173	433	754	946	1.0	5.0	5.8	—
CA50	50	190	380	754	946	0.8	5.8	14.8	—
CA60	60	203	339	754	946	0.6	4.8	20.7	—
CA70	70	214	306	754	946	0.7	4.1	22.0	—

* Pはペースト, Mはモルタル, Cはコンクリートを示す。
AはAE剤を混入したものである。

2.2 測定概要

ペースト, モルタルはφ 50 × 100mm, コンクリートはφ 100 × 200mmの円柱供試体とし, 材齢1日で脱型し, 測定まで標準養生を行った。測定は材齢28日で行い, 各配合毎に超音波伝播速度, 圧縮強度, 静弾性係数および細孔径分布を測定した。併せて細骨材, 粗骨材母岩の超音波伝播速度および細孔径分布も測定した。超音波センサーは, 周波数75KHz, 200KHz,

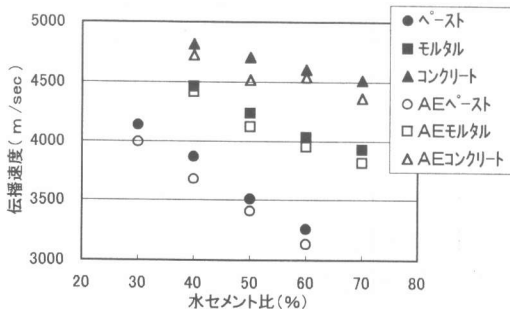


図-1 水セメント比と伝播速度の関係 (75KHz)

20MHzの3種類とし, 供試体長手方向の伝播速度を測定した。なお, 超音波伝播速度の測定供試体は, 端部を研磨により平滑にし, 測定時にはセンサーと供試体の間はグリスを塗ることにより密着度を確保した。また, 飽水度の影響を取り除くため, 試験体は常に水中で保管した。

3. 実験結果

3.1 水セメント比と超音波伝播速度の関係

水セメント比と伝播速度の関係を図-1に示す。水セメント比が大きくなるに従い, 伝播速度は低下する傾向にある。低下割合はペーストが最も大きく, モルタル, コンクリートの順番で小さくなっている。これは, 骨材の影響と思われる。また, AE剤を混入したものは, 混入しないものに比べ, 伝播速度は若干小さくなる傾向にある。なお, 凡例で示すペースト, モルタル, コンクリートはプレーンを示している。

3.2 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

圧縮強度と伝播速度の関係を図-2に示す。水セメント比との関係と同様に、圧縮強度が大きくなるに従い、伝播速度は大きくなる傾向にある。その増加割合は、ペースト、モルタル、コンクリートともほぼ同程度である。また、AE剤の影響は、圧縮強度、伝播速度ともに空気泡の影響を受けた値になっているので、ほぼ同一線上に乗っている。

3.3 密度と超音波伝播速度の関係

供試体の体積と質量から求めた密度と伝播速度の関係を図-3に示す。密度が増加するに従い、伝播速度は増加する傾向にあり、ペースト、モルタル、コンクリートに関係なくほぼ直線関係にある。これは、一般的に言われているように、組織の密実度が超音波伝播速度に大きく影響することを示している。

3.4 静弾性係数と超音波伝播速度の関係

静弾性係数と超音波伝播速度の関係を図-4に示す。静弾性係数が増加するに従い、伝播速

度は増加する傾向にあり、密度と同様、ペースト、モルタル、コンクリートに関係なく、直線関係にある。これも一般的に言われているよう

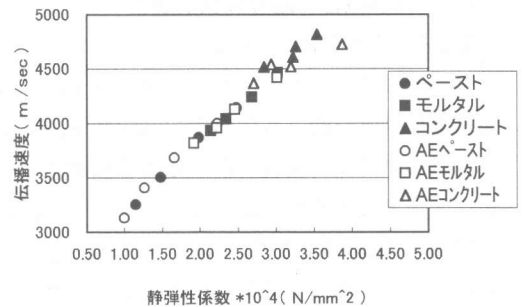


図-4 静弾性係数と伝播速度の関係(75KHz)

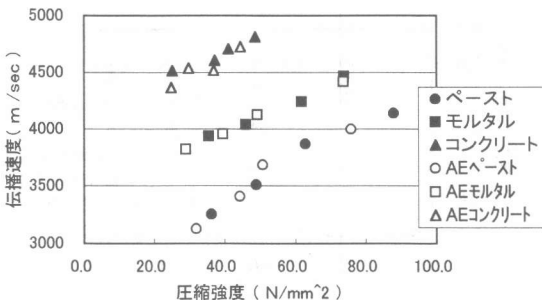


図-2 圧縮強度と伝播速度の関係(75KHz)

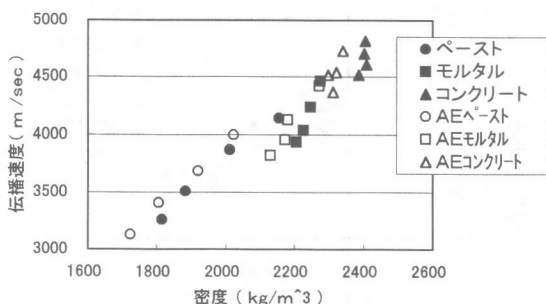


図-3 密度と伝播速度の関係(75KHz)

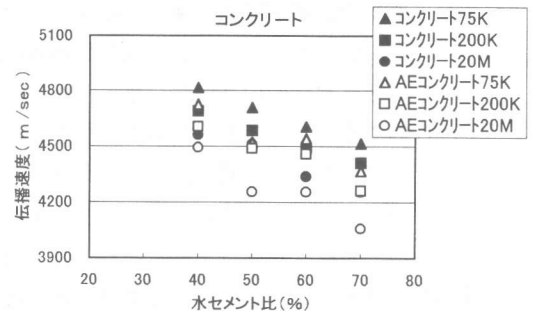
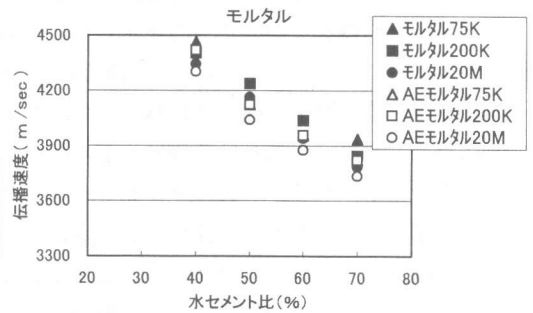
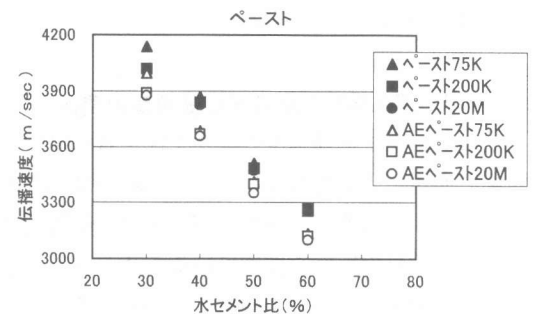


図-5 周波数毎の水セメント比と伝播速度の関係

に、静弾性係数と伝播速度は密接な関係にあることを示している。

3.5 周波数毎の超音波伝播速度

75KHz, 200KHz, 20MHz 毎のペースト, モルタルおよびコンクリートの水セメント比と伝播速度の関係を図-5に示す。ペースト, モルタルについては周波数の違いによる伝播速度の差はさほど大きくないが, コンクリートにおいては明確な差が生じた。AE, Non-AE ともに75KHz と 20MHz では5%以上の差が認められる。これは, 骨材界面の影響と思われるが, 定量的評価には至っていない。また, AE剤の影響はほとんど認められなかった。

3.6 細孔構造と超音波伝播速度の関係

総細孔量と伝播速度の関係を図-6に示す。総細孔量が大きくなるに従い, 伝播速度が遅くなる傾向にある。しかし, 細孔構造, 伝播速度ともに骨材の影響を受けているため, コンクリートとモルタルでの差が生じている。そこで, ペーストを細孔と水和物(ここで言う水和物はペーストから細孔を除いたものとする)に, モルタル, コンクリートを細孔, 水和物および骨材に分け, その結果を図-7に示す。モルタルおよびコンクリートにおける骨材の占める割合が大きいことが判る。一般にコンクリートの耐久性に細孔構造が大きく影響することは知られているが, モルタルやコンクリートにおける細孔の割合は2~3割程度である。図-8に水セメント比毎の伝播速度比(修正伝播速度/ペーストの測定値)を示す。なお, 修正伝播速度は, 測定値から骨材の伝播速度を差し引きペースト部の伝播速度として表したものである。ここで注目すべきことは, 同じ水セメント比であってもペーストと, モルタルやコンクリートのペースト部の品質は異なることである。この傾向は水セメント比が大きくなるに従い明確になる。また, 図-9に有効総細孔量と修正伝播速度の関係を示す。

ここで有効細孔量は, 細孔構造を測定した試料から骨材の質量を取り除いて, ペースト分の細孔量に換算したものとした。実際には, 測定に用いた試料のペースト部を希塩酸で取り除くこ

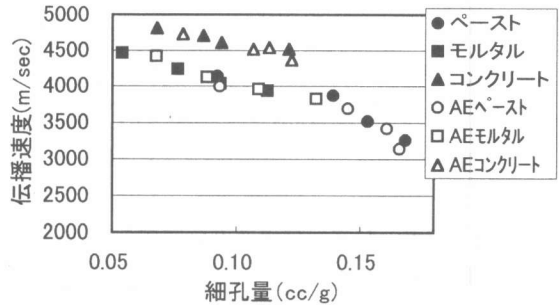


図-6 総細孔量と伝播速度の関係

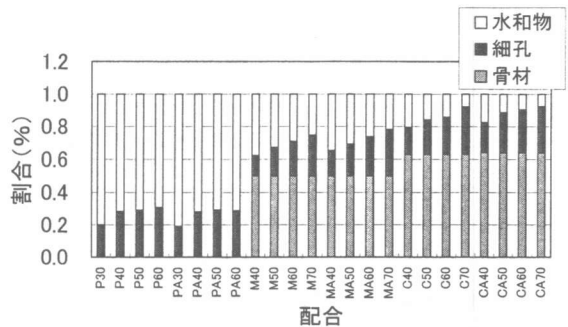


図-7 水和物と細孔と骨材の割合

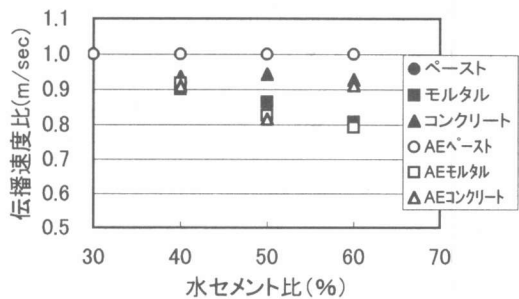


図-8 水セメント比と伝播速度の関係

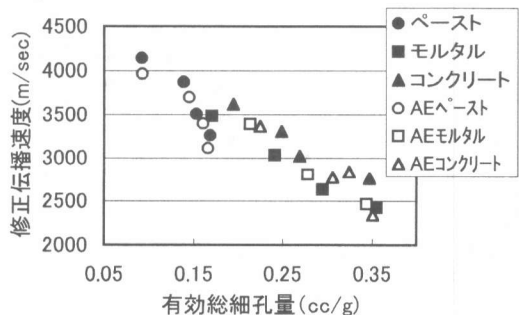


図-9 有効総細孔量と修正伝播速度の関係

とにより、骨材の質量を求めて算定した。図から有効総細孔量が増加するに従い、修正伝播速度はペースト、モルタル、コンクリートに関係なく低下する傾向にあり、良い相関関係にある。すなわち、モルタルあるいはコンクリートの超音波伝播速度を測定し、その骨材量と骨材の超音波伝播速度や細孔構造が判れば、総細孔量を推定できると言える。

また、ペースト中の水和物の割合（水和物容積/ペースト容積）と修正伝播速度の関係を図-10に示す。ここで横軸は、ペーストから有効総細孔量を引いたもので、有効水和物占有率である。有効水和物占有率と伝播速度の間には、総細孔量と伝播速度の関係と同様、良好な相関関係にあることが判る。

4. トモグラフィーによる供試体の品質評価

医学の分野で考案されたCT（コンピュータ

・トモグラフィー）をコンクリートの欠陥部の評価等に使われた例はあるが、コンクリートの品質の評価に直接適用した例はほとんどない。そこで、コンクリートはセメント比40、70%、ペーストは水セメント比30、60%において、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体のトモグラフィー測定を行った。配合毎の品質の違いを図-11に示す。図がカラーでないため明確ではないが、

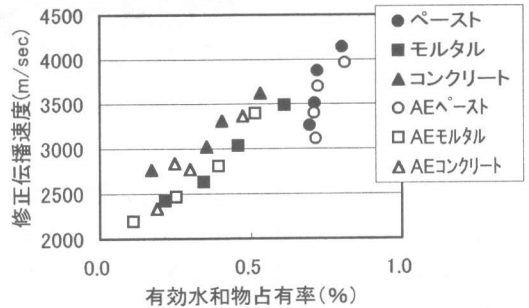


図-10 有効水和物占有率と修正伝播速度の関係

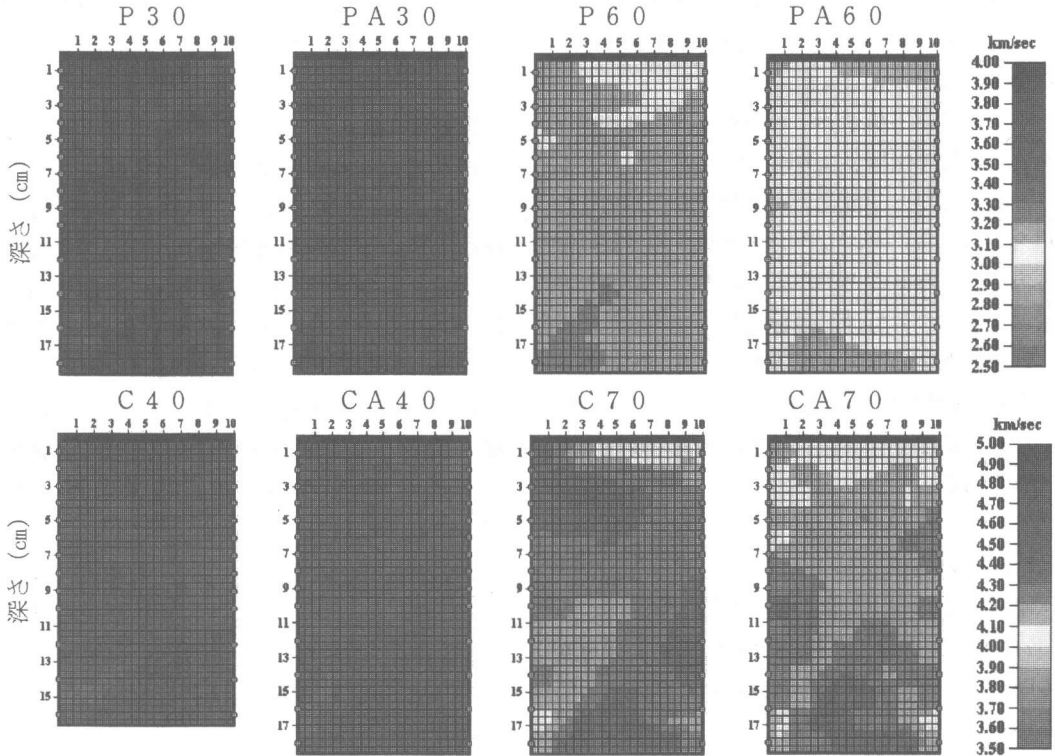


図-11 トモグラフィーによるペーストとコンクリートの品質評価

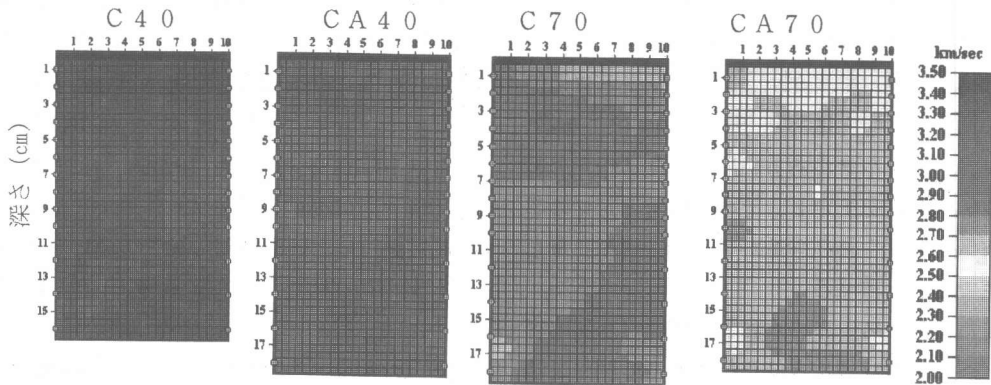


図-12 解析後のコンクリートの品質評価

濃色ほど伝播速度は速く、淡色なほど伝播速度が遅いことを示している。

ペーストにおいては配合毎の品質の違いを明瞭に評価できることが判る。しかし、コンクリートにおいては骨材の影響が大きく水セメント比40%と70%の差があまり明確でない。そこで前述の方法で骨材の影響を取り除き、図-12に示す通り修正超音波伝播速度として表すと、水セメント比の差を明確に表すことができ、水セメント比70%においては、AE剤の影響を評価することもできた。

コンクリート構造物においては、ブリーディング、乾燥の影響により、品質のバラツキがあり、また塩害、中性化、凍害などによる劣化作用を受け、特にかぶりコンクリートの品質は深さ方向で異なることが考えられる。一般的な非破壊試験では骨材の影響を大きく受けるため、これらの品質の違いを評価することは困難であったが、本論文で示した手法を使うことにより、かなりの精度でコンクリートの品質を評価できそうである。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 水セメント比、圧縮強度と超音波伝播速度の間には、骨材の影響を考慮すれば良い相関関係にある。
- (2) 密度、静弾性係数と超音波伝播速度の間には、骨材量に関係なく、良い相関関係にある。

(3) 骨材量が多くなるに従い、高周波数の伝播速度に若干の低下が認められる。

(4) 細孔構造と超音波伝播速度の関係は、骨材の影響を取り除いた有効細孔量と修正超音波伝播速度の関係にすると良好な相関関係が得られる。また、骨材と細孔を取り除いた水和物占有率と修正超音波伝播速度の間にも良好な相関関係がある。

(5) トモグラフィーはコンクリートの品質評価に適用することができる。

6. 参考文献

- 1) 堺孝司：土木構造物の耐久性設計,コンクリート工学,vol.35,No.11,pp.22-25,1997
- 2) 坂本守,山下英俊,堺孝司,丸茂文夫：超音波法によるセメント硬化体の品質評価に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集第20巻,第1号,pp335-340,1998
- 3) 蓮井昭則,世一英俊,北村晴夫,中山浩二：弾性波・電磁波・比抵抗トモグラフィーによる地盤状況の推定,土木学会論文集, No.462 / VI-18,pp.141-150,1993