

論文 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

坂本守*¹・山下英俊*²・堺孝司*³・丸茂文夫*⁴

要旨：超音波法によってセメント硬化体の品質を評価するために、ペーストおよびモルタルの品質と周波数の異なる超音波伝播速度との関係を検討した。その結果、超音波伝播速度が硬化体の圧縮強度および細孔構造と良好な相関関係があることを明らかにした。これにより、超音波法によるコンクリート構造物の品質評価の可能性を見出した。

キーワード：超音波法, 超音波伝播速度, 細孔構造, 非破壊試験, 品質評価

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の性能設計が注目されている^{1),2)}。この設計法においては、打設されたコンクリートが所要の品質を有することが大前提の1つとなっている。したがって、この設計法を機能させるためには、現場施工後にコンクリートが所要の品質を有していることを確認する手法が必要となってくる。コンクリートは複合材料であることや、フレッシュ時のブリーディングなどにより品質にばらつきがあると考えられるが、これまでそれら进行评估するのは難しいとされてきた。コンクリートの品質进行评估する方法としては、圧縮強度が用いられているが、これは通常打設前の品質検査であること、および構造物本体のコンクリートでないことなどから、前述のような部分的な品質进行评估することは難しい。また、非破壊試験による評価方法もいくつか提案されているが、ばらつきが多いことなどが課題となっている³⁾。

著者らは、非破壊試験のうち超音波法に着目し、数種類の異なる周波数の超音波により、コンクリートの品質进行评估する手法を検討している。本論文では、超音波伝播速度と、コンクリートの耐久性に深い関係のある細孔構造との関

係に関して検討した結果について述べる。

2. 一般的な超音波の伝播イメージ

超音波は、コンクリート中を縦波の球面波として距離とともに減衰しながら伝播していく。しかし、複合材料であるコンクリートには大小様々な空隙が存在する。水の超音波伝播速度は約1530m/sec⁴⁾であり、普通コンクリートの約1/2~1/3程度であるため、実際に受信されるのは、図-1のように空隙や細孔の存在によって迂回する球面波であると考えられる。また細孔の液体中を伝播することにより、伝播時間の遅れを生じることも考えられ、その度合いは細孔構造により異なるものと思われる。

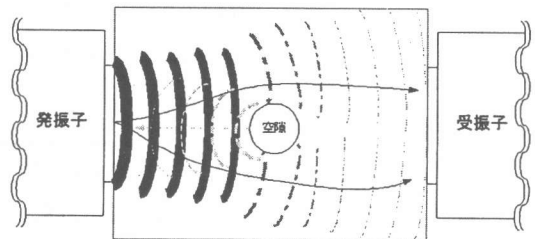


図-1 超音波伝播イメージ

- * 1 (株) 間組 土木本部技術設計部、工修 (正会員)
- * 2 (株) 間組 技術本部技術研究所技術研究部 (正会員)
- * 3 北海道開発局 開発土木研究所構造部、工博 (正会員)
- * 4 (株) 東横エルメス エンジニアリング事業部 (正会員)

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合

超音波伝播特性を検討する際に出来るだけ変動要因を低減するため、供試体はプレーンのペースト(P)およびモルタル(M)とした。ペーストの配合はモルタル中の細骨材を除いた配合とし、骨材の存在による影響も検討した。ペーストおよびモルタルの配合を表-1に示す。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止するため、練り混ぜには図-2に示すようなダブルミキシングを実施した。

3.2 測定概要

作製供試体はφ50×100mmとし、材齢1日で脱

型し、測定まで標準養生を行った。測定時の材齢は84日である。各供試体について、圧縮強度、細孔径分布および超音波伝播速度を測定した。併せて細骨材母岩の細孔径分布および超音波伝播速度も測定した。

超音波探触子は周波数が5kHz, 200kHz, 20MHzの3種類を使用し、供試体の長手方向(約100mm)の伝播波形を記録し、伝播速度を算出した。測定装置の概要を図-3に示す。

なお、測定供試体の端部は研磨により平滑にし、測定時には探触子と試験体の間にグリスを塗り、密着度を確保した。また、試験体の飽水度の影響を除去するため、試験体は常に水中で保管した。

表-1 ペーストおよびモルタルの配合とフロー値

| 配合 | W/C | S/C | W | C | S | フロー |
|------|-----|------|-----|------|------|-------|
| P-30 | 30 | | 482 | 1606 | | 151 |
| P-40 | 40 | | 553 | 1382 | | 207 |
| P-50 | 50 | | 606 | 1213 | | 266 |
| P-60 | 60 | | 648 | 1080 | | 300以上 |
| M-40 | 40 | 1.89 | 276 | 689 | 1300 | 137 |
| M-50 | 50 | 2.15 | 302 | 605 | 1300 | 175 |
| M-60 | 60 | 2.41 | 323 | 539 | 1300 | 198 |
| M-70 | 70 | 2.68 | 340 | 486 | 1300 | 232 |

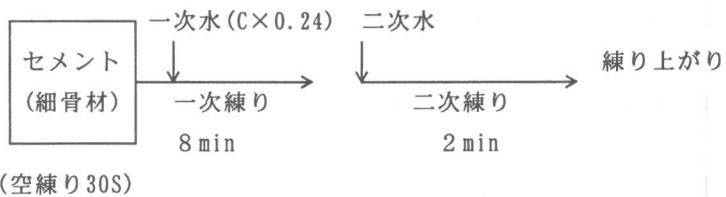


図-2 ダブルミキシングによる練り混ぜ方法

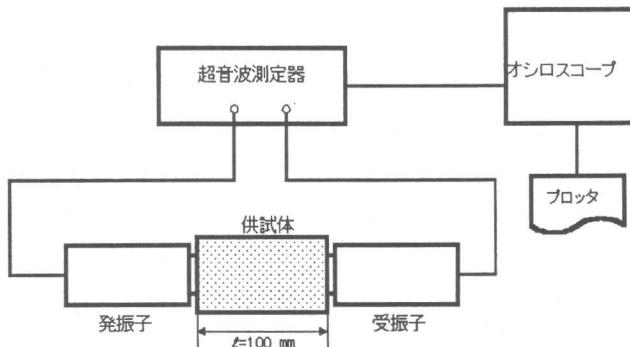


図-3 超音波測定装置概要

4. 実験結果および考察

4.1 水セメント比と超音波伝播速度の関係

水セメント比と超音波伝播速度の関係を図-4, 5に示す。水セメント比と超音波伝播速度の間には明確に相関関係が認められ、水セメント比が増加すると超音波伝播速度が低下することがわかる。また、今回使用した3種類の周波数範囲では、超音波伝播速度に大きな差は現れなかったが、ペーストでは20MHzなど周波数の大きい超音波の伝播速度がやや遅くなる傾向が認められた。

4.2 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

硬化体の品質のうち最も一般的な指標である圧縮強度と超音波伝播速度の関係を図-6, 7

に示す。圧縮強度の増加に伴い、超音波伝播速度が上昇する傾向にある。これは、水セメント比が低く、圧縮強度が高いものは組織が密実となり、その結果超音波伝播速度が速くなることを意味する。

4.3 各配合の細孔径分布

今回作製した各供試体の各細孔径ごとの細孔量(1.5nm以上)を図-8に示す。AE剤を使用していないことやダブルミキシングを採用していることなどから100nm以上の細孔容積には大きな差はなく、各配合間の細孔容積の差は、1.5~100nm, 特に1.5~10nmの細孔容積の違いに現れていることがわかる。

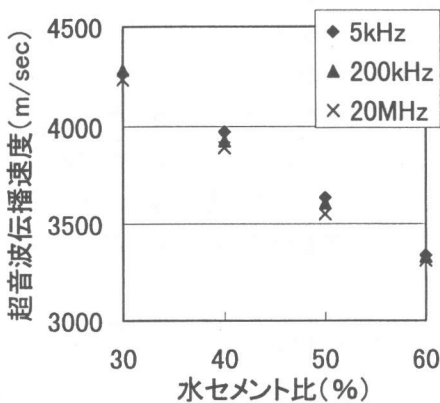


図-4 W/Cと超音波伝播速度の関係(ペースト)

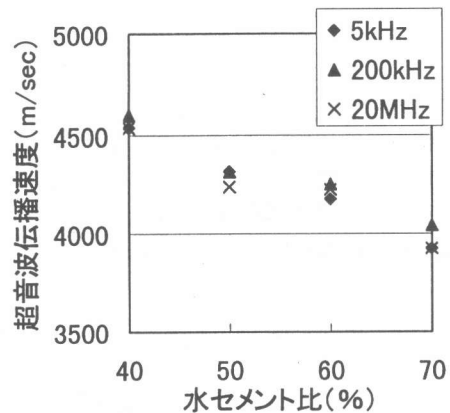


図-5 W/Cと超音波伝播速度の関係(モルタル)

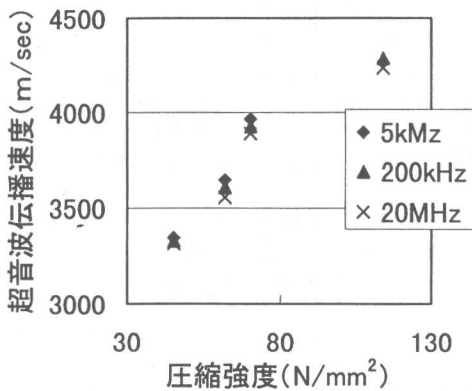


図-6 圧縮強度と超音波伝播速度の関係(ペースト)

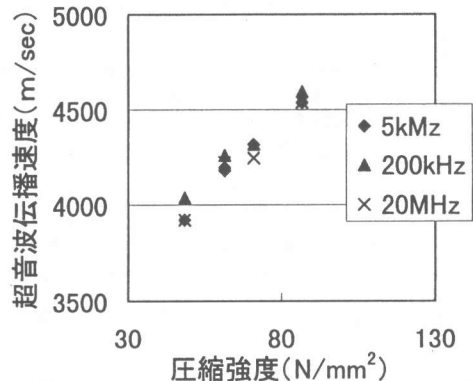


図-7 圧縮強度と超音波伝播速度の関係(モルタル)

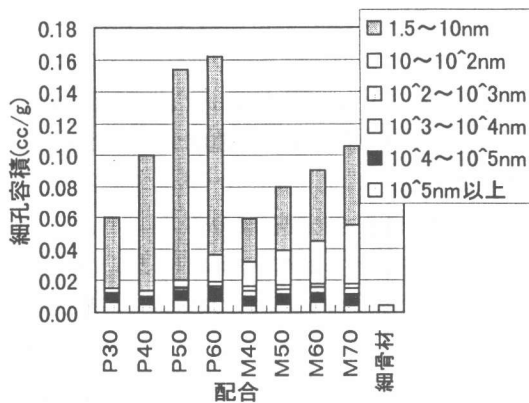


図-8 各配合の細孔径分布

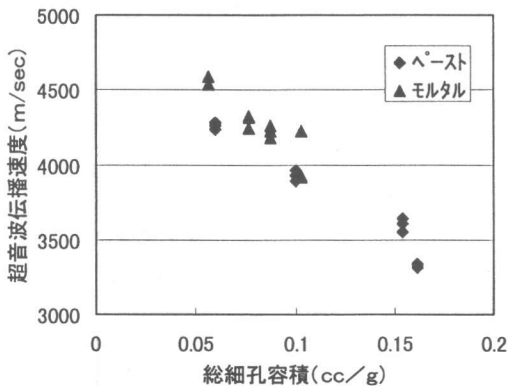


図-9 総細孔量と超音波伝播速度

4.4 総細孔量と超音波伝播速度の関係

超音波が伝播する上で障害となると考えられる細孔の総量と超音波伝播速度の関係を図-9に示す。ペースト、モルタルともに総細孔量の増加に比例して超音波伝播速度が低下する傾向にある。実際にはこの細孔容積中の大部分を満たす水も超音波を伝播するが、セメント水と組織よりも超音波伝播速度が遅いため(1530m/sec)、このような関係が現れたと考えられる。

4.5 超音波伝播速度に及ぼす各細孔の影響

図-10は、超音波伝播速度に及ぼす各細孔径別の容積の影響について示した。今回測定した結果からは、100nm以上の細孔については100nm以下の細孔に比べ細孔容積がかなり少ないことや各配合間の差が少ないため、特にモルタルについては超音波伝播速度との間に明確な相関関係は認められなかった。一方、ペーストでは細孔容積の増加に伴い超音波伝播速度が低下する傾向が見られる。また、10nm以下の細孔径についてはペースト、モルタルともに、細孔容積の増加に伴い超音波伝播速度の低下が認められる。

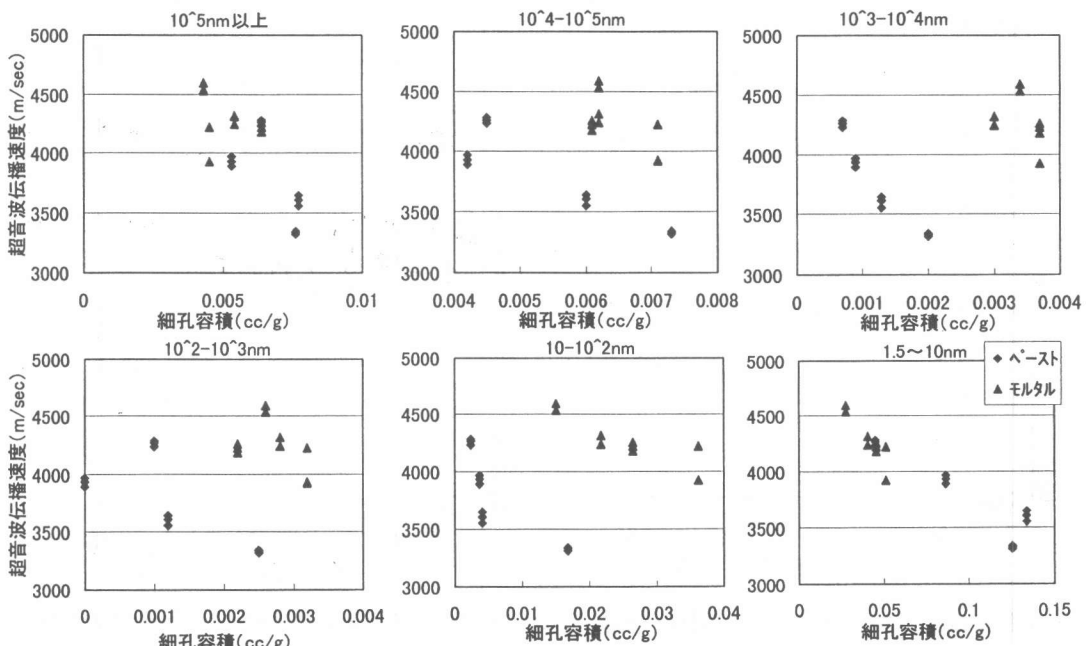


図-10 超音波伝播速度に及ぼす各細孔の影響

4. 6 水和物濃度と超音波伝播速度の関係

これまでの結果から得られた、単位体積中における水和組織の密度が高いものの方が超音波伝播速度が早くなるという現象は、常識的にも容易に想像できる。このことを水和物の占める割合から評価するために、単位体積あたりに占める水和物の容積を算定して、これらが超音波伝播速度に与える影響について検討することにした。ここで、水和物の占める容積は、配合上から算出した単位重量当たりの容積から測定した1.5nm以上の細孔容積および細骨材の容積を差し引いたものとし、水和物占有率は（水和物容積）／（ペースト容積）として表した。

図-11に示すように、各配合における水和物の占める容積は単位セメント量が異なっているにも関わらずほぼ一定である。このことから、超音波伝播速度の差が細孔容積の影響であることが推察される。

次に、この容積が単位容積試料中に占める水和物の占有比率と、5 kHzの場合の超音波伝播速度との関係を示したのが図-12である。なお、200kHzおよび20MHzについても同様の傾向であった。ここで、モルタルの超音波伝播速度は骨材の影響を取り除いたペースト部分の伝播速度として算出した。この図から、水和物の占有率、つまり水和物濃度が超音波伝播速度を支配していることは、明らかである。

換言すれば、これらの結果は、凍害や中性化など様々な耐久性を左右するとされる細孔構造

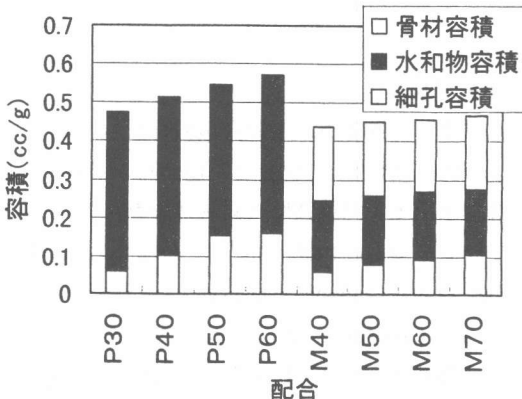


図-11 水和組織と細孔の容積

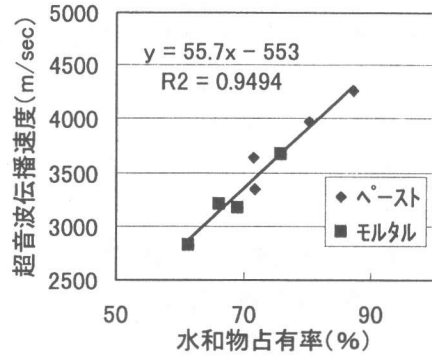


図-12 水和物占有率と超音波伝播速度

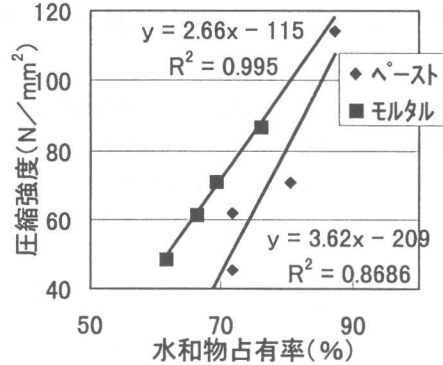


図-13 水和物占有率と圧縮強度

の違いによって超音波伝播速度が異なることを示しており、施工されたコンクリートが保有する耐久性を判断する手法として超音波法を活用できる可能性のあることを示している。

4. 7 水和物濃度と圧縮強度の関係

図-13に水和物占有率と圧縮強度の関係を示す。水和物濃度は組織の緻密さを示す指標であるため、超音波伝播速度と同様に、水和物占有率が増加するのに伴い、圧縮強度も増加する傾向があることがわかる。また、今回の試験では骨材種類と骨材容積率をパラメータとしていないため定量的には判断できないが、この図におけるモルタルとペーストとの違いが骨材の影響であり、骨材強度や骨材容積率などによりモルタルの回帰式の勾配が変化していくと考えられる。

4. 8 超音波伝播速度による細孔容積と圧縮強度の推定

今回の実験の範囲において、図-12, 13から得られた回帰式を用いて、測定した超音波伝播

速度と細孔容積および圧縮強度の推定式を仮に求めると、単位重量あたりの試料容積は $1/\rho$ であるからペーストの場合以下ようになる。

$$V_P = (0.901 - 0.000180 V_{US}) / \rho$$

$$F_c = 0.0652 V_{US} - 173$$

ここで、

V_P : 単位重量あたりの細孔容積 (cc/g)

V_{US} : 超音波伝播速度 (m/sec)

ρ : 試料の比重

F_c : 試料の圧縮強度 (N/mm²)

これらの式から得た推定値と実測値の比較を図-14, 15に示す。このようにペーストでは良い相関が認められ、今後データの蓄積や、骨材の影響を検討することで、モルタルやコンクリートへの適用の可能性があると考えられる。

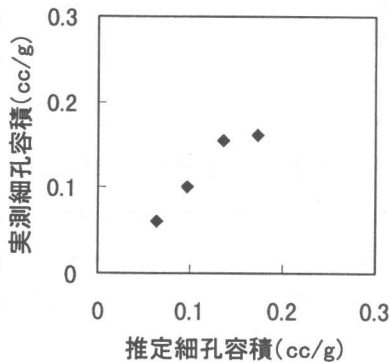


図-14 推定値と実測値の比較(細孔容積)

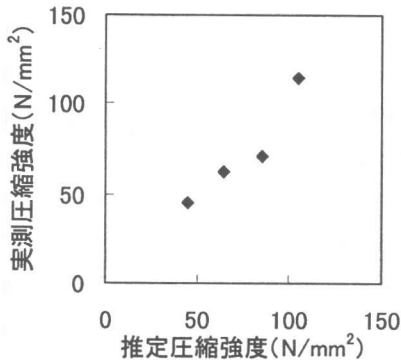


図-15 推定値と実測値の比較(圧縮強度)

5. まとめ

本研究により、以下のことが明らかとなった。

- (1) 水セメント比、圧縮強度と超音波伝播速度の間には良好な線形関係が存在する。

- (2) セメント硬化体中に占める水和物占有率の増加に伴い、超音波伝播速度が速くなる。
- (3) セメント硬化体中に占める水和物占有率の増加に伴い、圧縮強度は高くなる。
- (4) 細孔容積が増加すると、超音波伝播速度は低下する。
- (5) 超音波伝播速度の測定により、コンクリートの細孔容積および圧縮強度を推定できる可能性がある。

6. あとがき

超音波超音波伝播速度を測定することによって、強度や細孔容積など、コンクリートの耐久性を左右する品質を判断できる可能性を見出すことができたが、現段階ではデータ数も少なく、また均質なプレーンペーストやモルタルのみであるため、超音波伝播速度による定量的な品質判断にはさらに検討を重ねていくことが必要である。

現実の構造物の測定のためには、骨材の種類と量や混和材の存在、さらには鉄筋の存在や乾燥状態の違いなど、超音波伝播速度に影響すると考えられる要因は多い。また今回の検討結果では明確な差は認められなかったが、より大きな径の空隙が存在する場合には超音波の周波数の影響も考えられる。これら全てを考慮してコンクリートの品質を評価するには困難が予想されるが、試験条件を整備すれば、今後のデータの蓄積により、この手法を品質評価に利用できると考えられる。

参考文献

- 1) 堺孝司：性能照査型設計法のゆくえ、橋梁と基礎, vol. 31, No. 8, pp. 73-83, 1997
- 2) 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
- 3) R. Jones: Non-destructive testing of concrete, Cambridge Univ. Press, p. 40, 1962
- 4) 伊藤健一：SCIENCE AND TECHNOLOGY 超音波のはなし, 日刊工業新聞社, p. 59, 1982