

論文 超音波に基づく表面から深さ方向へのコンクリートの品質評価手法

下村 雄介*1・鎌田 敏郎*2・内田 慎哉*3・六郷 恵哲*4

要旨：本論文は、コンクリート表面から深さ方向へのコンクリートの品質評価手法について検討したものである。実験では、異なる2種類の水セメント比のモルタルおよびコンクリートを用いてそれぞれ作製した2層構造の供試体において、超音波法によって得られた走時曲線とコンクリートの品質との関係について検討した。その結果、コンクリート表面から深さ方向における品質の違いを、走時曲線の形状により把握できることが示された。さらに走時曲線は、層厚の違いに対しても感度を有する評価指標であることが確認できた。

キーワード：品質評価, 非破壊検査, 超音波法, 走時曲線, 伝播深さ

1. はじめに

環境によるコンクリート構造物の劣化のほとんどは、コンクリート表面から内部へと進展していく。このような劣化では、劣化初期の段階においてコンクリート表面に変状がほとんどみられない。しかしながら、劣化の進行に伴い、鉄筋の腐食、あるいは剥離や剥落を生じ、最終的には構造物の耐久性能を低下させる。そのため、早い時期にコンクリート表面から深さ方向における劣化程度の差違を把握する必要がある。

これに対して現状の実務では、テストハンマー法およびコアの採取などが行われている。このうち、テストハンマー法は、表面あるいはごく表層部分の圧縮強度を推定しているにすぎず、コンクリート表面から深さ方向にかけてのコンクリート品質の程度を適確に評価することは、原理上困難である。一方、コアの採取による圧縮強度試験では、深さ方向の情報、つまり深さ方向の強度分布を得ることが可能である。しかしながらこの方法では、構造物の損傷をまぬがれない。以上のことから、現状の実務レベルでは、コンクリート表面から深さ方向に対しての

品質を評価する非破壊検査法がないのが現状である。

このような背景から、深さ方向の品質を評価することを目的に、非破壊検査を活用した研究^{1), 2)}が行われている。ここでは、超音波の伝播時間から伝播速度を求め、速度分布により表面から深さ方向の品質を把握している。また、伝播時間の走時曲線から、コンクリートの損傷した厚さを推定する式³⁾なども提案されている。しかしながら、いずれの研究においても、走時曲線と、深さ方向へと品質が変化した場合における品質変化部の厚さとの関係について十分な検討が行われていない。

そこで本研究では、コンクリート表面から深さ方向へと品質が変化する場合について、走時曲線とコンクリートの品質との関係について検討した。実験では、深さ方向における品質を変化させるため、異なる2種類の水セメント比のモルタルおよびコンクリートを用いてそれぞれ作製した2層構造の供試体において、品質や層厚の違いが走時曲線に与える影響について検討した。さらに、AE センサをコンクリート表面

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学助教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 (正会員)

*4 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

に併置した場合に、超音波法によって評価可能な表面からの深さの範囲についての検討も併せて行った。

2. 実験概要

実験は、以下に示す3ケースについて行うこととした。すなわち、まず「実験1」では、異なる水セメント比のモルタルを用いて作製した2層構造のモルタル供試体で、超音波計測を行った。続いて「実験2」では、実験1と同様の構造を有するコンクリート供試体を対象に計測を行い、計測面側のコンクリート厚さを変化させ、これと走時曲線との関係について検討した。さらに「実験3」では、超音波法により評価可能な表面からの深さについて把握するため、供試体に深さの異なる数種類のスリット入れ、これと走時曲線との関係について考察した。以下にそれぞれの実験概要を示す。

2.1 実験1

(1) 供試体

写真-1に供試体の概要を示す。ここでは基礎的な実験として、粗骨材による超音波の反射等の影響を排除するため、モルタル供試体を用いた。供試体の寸法は、縦100×横400×深さ100mmとした。深さ方向に品質の異なる2層構造とするため、以下の手順により打設を行った。まず、ベースとなるW/C=30%のモルタル(写真-1に示す2層目:層厚50mm)を打設した。その後、W/C=80%のモルタル(写真-1に示す1層目:層厚50mm)を打ち重ねて供試体を作製した。また比較のため、W/C=30%のモルタルにより上記2層の厚さ分を打設した1体型供試体(寸法:縦100×横400×深さ100mm、これ以降、「健全供試体」と呼ぶ)も作製した。モルタルの配合を表-1に示す。

(2) 超音波計測

超音波計測装置を写真-2に示す。超音波は電気信号発生器によりパルス波を発生させ、AEセンサによりコンクリートへ発振した。受振に

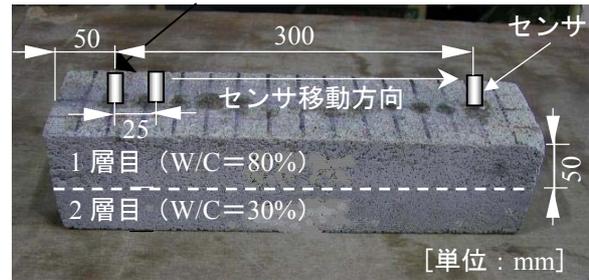


写真-1 実験1で用いた供試体



写真-2 超音波計測装置

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
	W	C	S
30	150	500	1671
80	150	188	1930

は、同じくAEセンサを用いた。受振した信号は、プリアンプおよびメインアンプにてそれぞれ40dBの増幅を行った後、AE計測装置に記録した。発振および受振に用いたAEセンサは、140kHz共振型のものである。

計測に際しては、発振側のセンサを供試体端部から50mmの位置に固定した。受振側のセンサについては、発振側のAEセンサから25mm間隔で、発振側から300mmとなるまで移動させ、各位置(計12点)において超音波の計測を行った(写真-1参照)。なお、超音波の計測は、1層目側(W/C=80%)および2層目側(W/C=30%)の両側から行った。

2.2 実験2

(1) 供試体

実験2で用いた供試体の一例を、写真-3に示す。供試体には、実際への適用を考慮して、

コンクリートを用いた。また供試体の寸法は、底面および側面からの超音波の反射の影響を極力小さくするため、縦600×横600×深さ300mmとした。打設は実験1と同様に、W/C=30%のコンクリート(2層目)の上に、1層目のコンクリート(W/C=80%)を打ち重ねた(写真-3参照)。この実験では、層厚の違いが走時曲線に与える影響について検討するため、計測面を1層目のコンクリート表面からとした上で、1層目の厚さを40および100mm(2層目の厚さは、それぞれ260および200mm)とした。また、比較用の供試体として、縦600×横600×深さ300mmで、かつW/C=30%と一定である供試体(「健全供試体」とする)も作製した。コンクリートの配合および物性値を表-2に示す。

(2) 超音波計測

写真-2に示す超音波計測装置により、計測を行った。計測条件は、実験1と同様である。

センサの移動間隔は、25mmとした。また、発振側のセンサは、供試体端部から50mmで固定し、受振側のセンサを上記の間隔にて500mmまで走査した(写真-3参照)。超音波の計測点数は、合計20点である。

2.3 実験3

(1) 供試体

写真-4に実験3で用いた供試体の一例を示す。この実験では、超音波法によって評価が可能な表面からの深さの範囲について検討するため、スリットの深さを30, 50, 70および100mmとした供試体と、スリットの入っていない供試体(「健全供試体」)を作製した。供試体寸法は、実験2と同様、縦600×横600×深さ300mmである。スリットの幅は2mmとした。なお、コンクリートの圧縮強度は37.8MPa、静弾性係数は27.8GPaである。

は27.8GPaである。

(2) 超音波計測

超音波計測装置(写真-2参照)および計測条件は、実験1および2と同じである。

センサ間距離は、スリットの有無およびその深さによる影響を把握するため、発振側センサも走査することにより、センサ間距離にバリエ

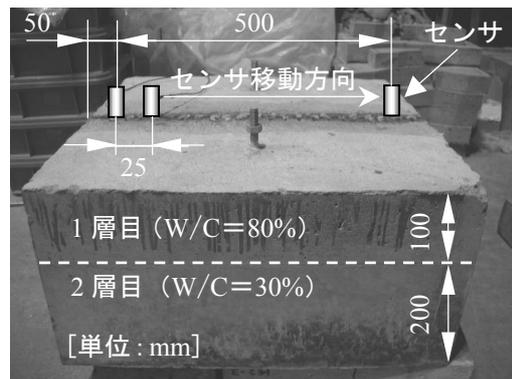


写真-3 実験2で用いた供試体
(写真は1層目の厚さが100mmの場合)

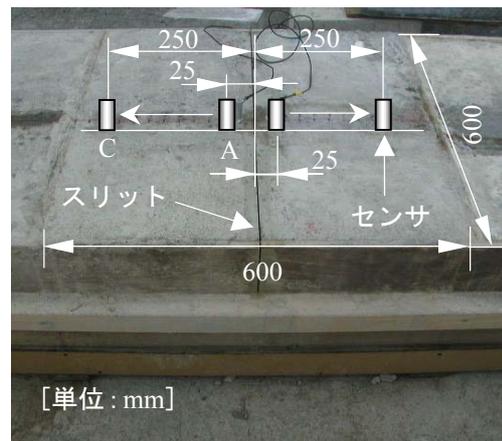


写真-4 実験3で用いた供試体
(写真はスリット深さ100mmの場合)

表-3 実験ケース

スリット深さ (mm)	ケース	発振側	受振側
		スリットからの距離	スリットからの距離
0, 30, 50, 70, 100	A	25	25~250
	B	125	25~250
	C	250	25~250

表-2 コンクリートの配合および物性値

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
		W	C	S	G	高性能AE 減水剤	AE剤		
30	42.4	184	613	631	861	12.2	-	74.1	34.6
80	42.4	184	230	766	1045	-	10.4	13.8	20.2

ーションを設けた。受振側センサの移動間隔は25mmとした。表-3にその詳細を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 品質の違いが走時曲線形状に与える影響 (実験1)

図-1, 2および3に, 超音波伝播時間とセンサ間距離との関係を, 実験1の供試体のうち, 健全供試体, W/C=80%側からの計測およびW/C=30%側からの計測の場合についてそれぞれ示す。いずれの場合においても, センサ間距離の増加に伴い, 伝播時間が増加していることがわかる。これは, センサ間距離の増加により, 供試体内部における超音波の伝播経路も長くなるためと考えられる。このうち, 図-1の健全供試体では, センサ間距離と伝播時間はほぼ比例関係にあり, 伝播速度が一定であることがわかる。これに対して図-2のW/C=80%側からの超音波計測では, センサ間距離100mmを境に走時曲線の傾きが小さくなっており, 伝播速度が速くなっていることがわかる(図中の矢印参照)。これは, センサ間距離を大きくとったことにより, 超音波の伝播経路もより長くなり, 2層目のモルタル部分(W/C=30%)を超音波が透過したためと考えられる。一方, 図-3では, 図-2と異なり走時曲線が下に凸の形状となっている。しかも走時曲線における変曲点の位置(図中の矢印参照)は, 図-2のそれと比較して, およそ2倍(センサ間距離200mm)となっている。つまり, センサ間距離が200mmまでは1層目, それ以降については2層目の部分を, 超音波が主に透過している可能性が考えられる。

以上のことから, 超音波の計測面側の品質および深さ方向における品質の違いを, 走時曲線の形状特性より把握できる可能が示された。また, 実際の適用にあたっては, 評価対象範囲をできるかぎり広く確保するため, センサの移動間隔を小さくし, 可能な範囲内で最大センサ間距離を大きくとることが有効であることが確認

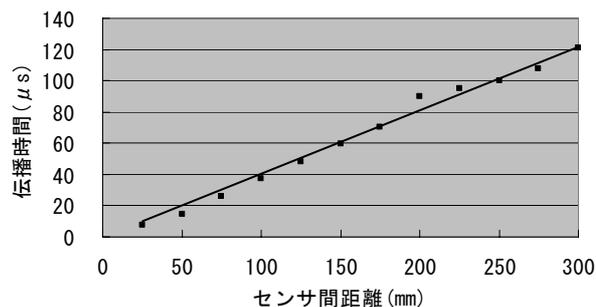


図-1 走時曲線 (健全供試体)

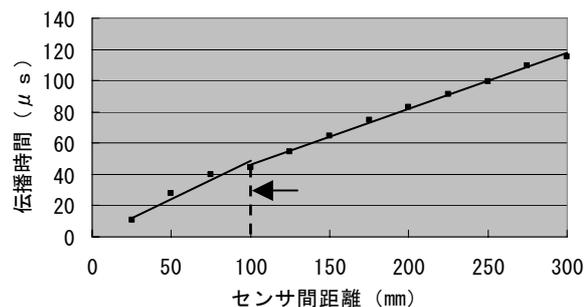


図-2 走時曲線 (W/C 80%側から計測)

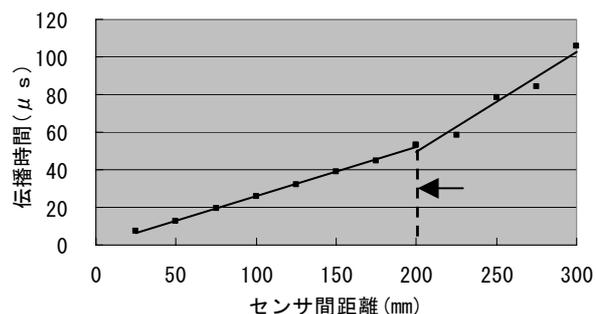


図-3 走時曲線 (W/C 30%側から計測)

された。

3.2 層厚の違いが走時曲線形状に与える影響 (実験2)

図-4に実験2の健全供試体で得られた走時曲線を示す。この図によれば, センサ間距離に対して伝播時間が一定の割合で増加していることがわかる。これに対して, 図-5に示す実験2の供試体の1層目の厚さが40mm(2層目厚さは260mm)の場合は, 若干ではあるが上に凸の形状になっている。なお, 図-5上での傾きが判読しづらいため, 図中にそれぞれの傾きを示した。また, 走時曲線は, センサ間距離が100mmにおいて変曲点を向かえていることがわかる。これより, センサ間距離が100mmより小さい

場合では、超音波の主な透過成分、特に初動波がコンクリート表面から浅い部分（1層目：W/C=80%のコンクリート）を伝播していると考えられる。しかしながら、センサ間隔を大きくすることにより、初動波は、より深いところ（2層目：W/C=30%のコンクリート）を伝播したと考察できる。このような傾向は、実験1での結果からも確認されている。

図-6に、実験2供試体での1層目の厚さが100mmの場合における走時曲線を示す。この図より、センサ間距離が200mmにおいて、伝播時間の急激な増加が生じている。しかも、その後もセンサ間距離に応じて伝播時間も急激に大きくなっていることがわかる。実験1での結果を考慮すると、走時曲線は本来上に凸の形状になるべきと考えられる。しかしながら、実験2の範囲内では、そのような結果を得ることができなかった。この部分に関する考察は、次節での結果を踏まえて、再度次節にて議論することにする。

以上のことから、少なくとも1層目の層厚が50mm（実験1）から40mm（実験2）へと薄くなった場合、つまり層厚の違いを走時曲線により把握することは十分可能であることが示された。しかしながら今後は、更に層厚に幾つかのバリエーションを設けた上で、走時曲線を用いた検討を行い、その適用範囲をより明確にする必要があると考えられる。

3.3 超音波により評価可能な深さの範囲の検討（実験3）

図-7には、実験3供試体の各実験ケースで得られた走時曲線を示す。いずれのケースにおいても、健全供試体で得られた伝播時間が最も小さく、スリットの深さに対応して、伝播時間も大きくなる傾向を示している。特にケースAでは、このような傾向が最も顕著に表れている。また、ケースがAからB、そしてCへと推移していくことにより、つまり、発振側のAEセンサを供試体端部へと走査し、より伝播経路を長

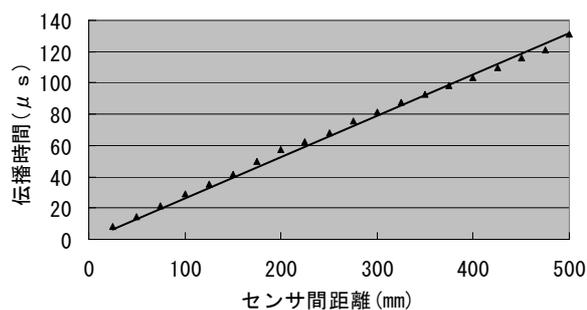


図-4 健全供試体の走時曲線

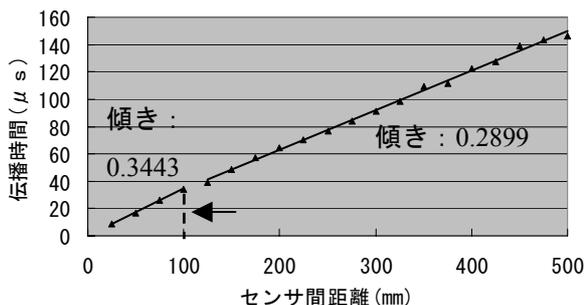


図-5 厚さ40mmの走時曲線

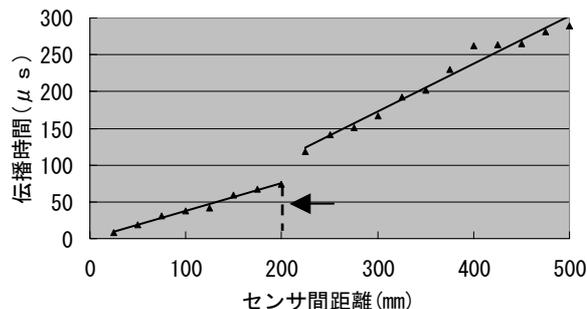


図-6 厚さ100mmの走時曲線

くすることにより、スリット深さ30、50および70mmの場合の伝播時間が健全供試体で得られたそれと比較して、同程度の値を示している。さらにこのような傾向は、センサ間距離を最も離れた場合（ケースCにおけるセンサ間距離500mm）においては、特に顕著に表れていると考えられる。しかしながら、スリット深さ100mmの場合では、健全供試体で得られた伝播時間と比較して、非常に大きい値となっている。これは、スリット（深さ100mm）の影響を受け、スリット先端での回折波を捉えたことによって、伝播経路が長くなったためと考察できる。

以上のことから、本研究の範囲内では、センサ間距離を離すことにより、コンクリートの表面からより深い領域を超音波が透過している可

能性が示された。また、健全供試体とスリットを入れた供試体との比較により、超音波法によって評価が可能な深さは、本研究の範囲内では、およそ 70mm 程度と考えられる。さらに、走時曲線の感度を高める工夫として、可能な範囲内でセンサ間距離を大きく設定する必要があることを再度確認できた。なお、実験 2 において、1 層目の層厚が 100mm の場合において、走時曲線の感度が非常に鈍かった原因としては、超音波が評価可能である深さを超えてしまったためと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) 水セメント比 80%側から超音波計測を行ったものと、水セメント比 30%側からのものでは、走時曲線の形状が明らかに異なることがわかった。
- (2) 上記の結論(1) より、コンクリート表面から深さ方向における品質の違いを、超音波法によって得られた走時曲線の形状により把握できる可能性が示された。
- (3) 実際の適用にあたっては、計測面の品質あるいは深さ方向における品質の違いなどは不明である。そのため、評価指標として走時曲線の感度を高めるためには、センサ間距離を可能な範囲内で大きく設定するのが有効であることが示された。
- (4) 健全供試体およびスリットの入った供試体で得られた走時曲線との比較により、本実験条件の範囲内では、超音波の伝播深さがおよそ 70mm 程度であるものと推定された。この値が、本供試体でコンクリートの品質を評価可能な深さの範囲と考えられる。

参考文献

- 1) 和藤 浩, 王 曉梅, 畑中重光: 劣悪コンクリートの強度推定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2,

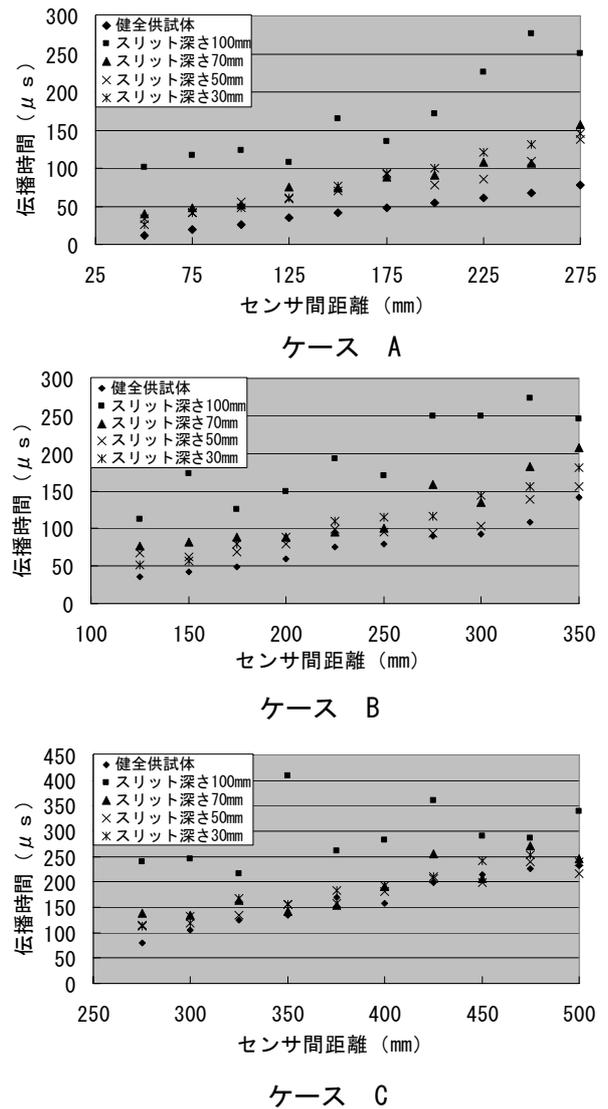


図-7 評価可能深さの検討

pp.357-362, 1997

- 2) 森濱和正, 野田一弘他: 超音波法によるコンクリートの品質評価, コンクリート技術シリーズ 61 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, pp.273-280, 2004.8
- 3) A. GALAN: COMBINED ULTRASOUND METHODS OF CONCRETE TESTING, DEVELOPMENTS IN CIVIL ENGINEERING34, Amsterdam; New York: Elsevier: Elsevier Science Pub. Co, pp. 202-205, 1990.