

論文 超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響

山下英俊^{*1}・堺孝司^{*2}・熊谷守晃^{*3}・喜多達夫^{*4}

要旨：コンクリート構造物の品質を定量的に評価することは、今までにも各種非破壊試験等で数多く提案されている。しかし、測定値のばらつきが大きいことなどから、実用化されているものは少ない状況にある。著者らは、その中でも超音波法によるコンクリートの品質評価手法を提案し、今までコンクリートの品質を定量的に評価できることを報告してきた。本論文では、超音波伝播速度の測定値に大きく影響を与える骨材の物性値について詳細に検討し、骨材の影響を取り除くことで、より定量的な品質評価が可能であることが分かった。

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

1. はじめに

コンクリート構造物の性能を評価する手法として、性能照査型が一般化しつつあり、コンクリートの品質を精度よく評価することが重要な課題となっている。今までは、同一コンクリート構造物であれば、コンクリートの品質は一定であると評価して劣化予測等を実施するのが普通であったが、実際のコンクリート構造物の品質は均一ではなく、ある程度のばらつきを有していた。そのため、劣化予測等の精度も必ずしも高いものではなかった。これらを解決する方法として、多くの非破壊試験が提案されているが、測定値のばらつきが多いことや適用制限があることなど、コンクリートの品質を定量的に評価するのは難しいとされ、その結果、一般に用いられるようにはなっていない現状にある。コンクリート構造物は長期間使用されるのが普通であり、その間の性能をより定量的に精度よく評価できる手法は今後構造物を維持管理していく上で必要となってくる。すなわち、長期間にわたるコンクリート構造物の品質を合理的に

評価できる手法が望まれている。

著者らは、これまで室内試験において、ペースト、モルタル、コンクリート毎にペースト部の総細孔量（有効細孔量）と骨材の影響を取り除いた修正伝播速度の間には良い相関関係があることを示し¹⁾、伝播速度を測定することで、コンクリートの見かけの水セメント比を推定できることを示してきた。そして、実構造物にこの手法を適用²⁾したところ、トモグラフィー法で示すことにより、実構造物におけるコンクリートの品質は、表面部の方が内部に比べて低いことを定量的に評価できた。また、コンクリートは骨材が大部分を占めるため、骨材の品質が伝播速度の測定値に大きく影響することが考えられる。今までにも、コンクリート中の骨材量の違いについては修正伝播速度で評価することにより、定量的に評価できることを確認している。しかし、さらに多くのコンクリート構造物に本手法を適用するには、多種多様の骨材においての確認が必要であるため、本論文では、骨材の品質の違いやセメント種類の違いによって超音

*1 ㈱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 国土交通省 北海道開発局 事業振興部（正会員）

*4 ㈱間組 技術本部技術研究所技術研究部（正会員）

波伝播速度にどのように影響を与えるかの検討を行った。また、トモグラフィーの適用性についての確認も行った。

2. コンクリートの品質評価の手順²⁾

既報において、コンクリートの有効細孔量と修正伝播速度の関係や、水セメント比と有効細孔量の関係がそれぞれ良好な相関関係にあることから、図-1に示すとおりコンクリートの超音波伝播速度を測定することにより、水セメント比の推定が可能であることを示した。しかし、この提案は同一骨材において行った室内試験の結果で確認したものであるため、この手順にお

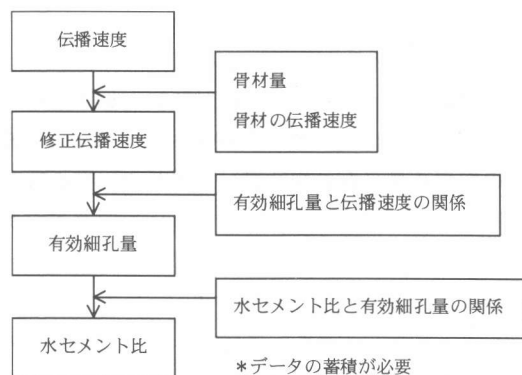


図-1 水セメント比の推定手順

・修正伝播速度の計算方法

$$S_r = \{S - (V_a \times S_a)\} / V_p$$

S_r : 修正伝播速度 (ペースト換算伝播速度)

S : 伝播速度

V_a : 骨材の体積比

S_a : 骨材の伝播速度

V_p : ペーストの体積比

・有効細孔量と修正伝播速度の関係

$$S_r = a \times P_e + b$$

P_e : 有効細孔量

a, b : 係数

・水セメント比と有効細孔量の関係

$$P_e = p \times W/C + q$$

W/C : 水セメント比

p, q : 係数

いて骨材の品質や骨材量が異なる場合でも、有効細孔量と修正伝播速度の関係や水セメント比と有効細孔量の関係が、今までの結果と同様であるか検討する必要がある。そのため、以下に詳細に検討した結果を示す。

3. 実験概要

3.1 骨材の品質の評価

水セメント比の推定では、図-1に示すとおり、修正伝播速度を計算するのにコンクリート中の骨材量と骨材の伝播速度が必要である。しかし、各コンクリート毎の骨材の伝播速度を測定するのは困難であるため、実際は骨材の密度と超音波伝播速度の関係から骨材の伝播速度を推定し、修正伝播速度を計算すれば、水セメント比の推定が可能になるように考えた。そこで、15種類の骨材の密度と伝播速度の関係を測定した。測定した岩種は、砂岩、安山岩、石灰岩、花崗岩、チャート等である。各々の試験体は、骨材母岩からφ50×100mm程度のコア試験体を削孔して作製し、軸方向および軸直角方向の伝播速度および密度を測定した。なお、センサーは28kHzを使用した。

3.2 使用材料および示方配合

コンクリート中の骨材量および骨材の超音波伝播速度や密度などの品質が異なると、水セメントが同じであっても超音波伝播速度は大きく変化することは今までの実験によって確認されている。そのため、この骨材の影響を取り除くことが重要であり、骨材の品質や単位量が異なってもコンクリートの水セメント比が同じ場合、修正伝播速度が同一の値になるのが望ましいと言える。そこで以下の実験を行った。供試体の配合を表-1に示す。供試体は、コンクリートの水セメント比を40, 50, 60, 70%, 空気量を4±1.5%とし、使用セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメント、細骨材は砂岩、粗骨材は砂岩、安山岩、石灰岩の3種とした。また、骨材の影響を明確にするために、骨材量一定を標準としたが、一般に使用されているコンクリ

表-1 コンクリートの配合

	粗骨材 (密度)	セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)		
					W	C	S	G	AD					
1	砂岩 (2.66)	普通	70.0	49.0	170	243	909	975	0.0040	959	9.0	4.5	21.0	
2			60.1	47.0		283	857	994	0.0040		9.0	4.8	21.0	
3			50.0	45.0		340	799	1004	0.0045		9.0	4.8	21.0	
4			40.0	43.0		425	734	1002	0.0055		8.0	4.1	21.0	
5			69.9			214	306		956		0.0100	21.0	5.2	21.0
6			59.9			203	339				0.0045	18.5	4.5	20.0
7		50.0		190	380			0.0045	16.0	5.0	21.0			
8		40.0		173	433			0.0060	8.0	4.0	21.0			
9		70.1	高炉	211	301	760			0.0100	919	20.5	5.2	20.0	
10		59.9		200	334				0.0055		20.0	4.3	20.0	
11		50.0		187	374				0.0045		17.5	3.9	20.0	
12		40.0		170	425				0.0100		6.0	4.5	20.0	
13	69.9	214		306				917	0.0090		20.0	5.0	21.0	
14	59.9	203		339					0.0050		19.0	4.7	21.0	
15	50.0	190	380				0.0040	16.0	4.5	21.0				
16	40.0	173	433				0.0065	7.0	4.0	22.0				
17	70.1	211	301			945	0.0070	20.5	5.2	20.0				
18	59.9	200	334				0.0050	18.5	4.8	20.0				
19	50.0	187	374				0.0050	15.0	4.4	21.0				
20	40.0	170	425				0.0080	6.0	3.8	22.0				
21	69.9	214	306				948	0.0080	20.5	4.3	20.0			
22	59.9	203	339					0.0050	19.5	4.5	20.0			
23	50.0	190	380			0.0045		17.0	4.8	20.0				
24	40.0	173	433			0.0085		7.0	4.8	20.0				
25	70.1	211	301			0.0090		21.0	5.2	20.0				
26	59.9	200	334			0.0055		19.5	4.5	20.0				
27	50.0	187	374			0.0055	16.0	4.7	20.0					
28	40.0	170	425			0.0100	6.5	4.5	20.0					

* 岩種毎の密度は、供試体の実測値を示している。

ートのワーカビリティを確保するため、スランプ8cm一定の配合も検討した。試験体は、材齢28日で超音波伝播速度を測定し、その後、圧縮強度、静弾性係数および有効細孔量の測定を実施した。なお、超音波伝播速度は周波数28kHzのセンサーを使用した。

3.3 トモグラフィー法の構造物への応用

トモグラフィーにより、実コンクリート構造物の平面的な品質の分布を表すことにより、内部と表面の品質の違いを定量的に示すことが可能であることは既に報告済みである。本論文では、コンクリート内部と表面部の品質が異なる構造物において、本手法の適用性について確認するために、図-2に示す方法で伝播速度の測定を行った。対象構造物は、耐震補強を行った構造物で、表-2に示すとおり、内部は20年程度前に施工されたコンクリート、表面部はモルタルによって充填されたものであり、明らかに

品質（超音波伝播速度）の違うことが分かっている。測定は、28kHzのセンサーを使用した。なお、モルタルの厚さは15~20cm程度である。

表-2 構造物の概要

	材齢	伝播速度
コンクリート	20年	4450m/sec
モルタル	0.2年	3628m/sec

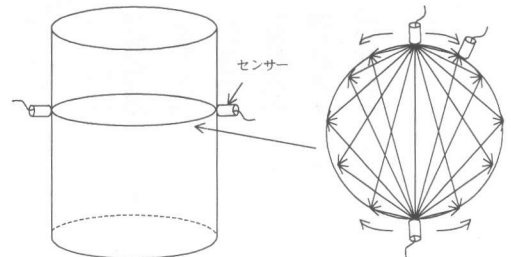


図-2 伝播速度の測定方法

4. 実験結果

4.1 骨材の密度と伝播速度の関係

骨材の密度と伝播速度の関係を図-3に示す。採取した試験体はももとの母岩に入っていたと思われるひび割れが多数見られるため、伝播速度の測定は軸方向および軸直角方向の可能な箇所測定した。骨材は、砂岩、石灰岩、安山岩等が主であり、岩種による差は若干あるものの、密度が大きくなるに従い伝播速度が速くなっているのが確認できた。砂岩と安山岩はほぼ同一直線上を、石灰岩は若干異なる傾きを示した。さらに多くの骨材の試験が必要ではあるが、図-3の結果から骨材の密度が分かれば伝播速度の推定が可能であると思われる。

4.2 岩種毎の圧縮強度と静弾性係数の関係

岩種毎の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。水セメント比が小さいほど圧縮強度、静弾性係数ともに大きくなっていることは、既

往の結果と同様である。圧縮強度は、水セメントが同一であれば、普通ポルトランドセメント（安山岩使用）で若干大きめの値となっているが、セメントの種類、岩種に関係なく、ほぼ同一の値となっている。一方、静弾性係数は、セメントの種類別には高炉セメントが普通ポルトランドセメントに比べ小さめの結果になっている。また、岩種別には、普通ポルトランドセメント（安山岩使用）で若干違う傾向にあるが、

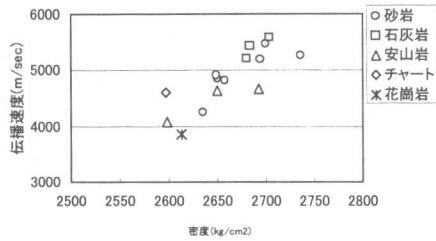


図-3 骨材の密度と伝播速度の関係

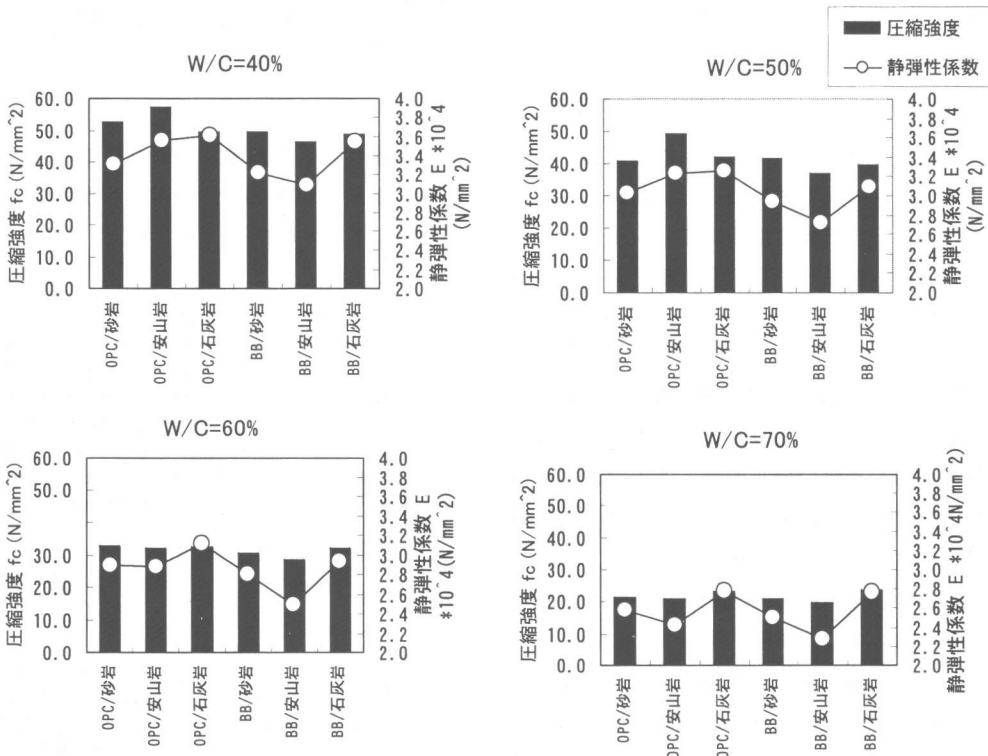


図-4 岩種毎の圧縮強度と静弾性係数

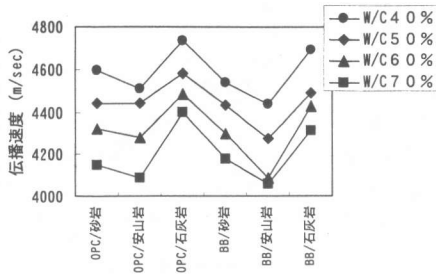


図-5 岩種毎の伝播速度

全体的に、密度の大きい石灰岩、砂岩において静弾性係数が大きく、密度の小さい安山岩が小さくなる傾向にあり、岩種の違いにより静弾性係数が異なることが確認された。

4.3 岩種毎の伝播速度

岩種毎のコンクリートの伝播速度を図-5に示す。コンクリートの伝播速度は、骨材の伝播速度の速い順番、すなわち石灰岩(5583m/sec)、砂岩(4809m/sec)、安山岩(4636m/sec)の順番で速くなっており、骨材の伝播速度がコンクリートの伝播速度に大きく影響することが再確認できた。この傾向は密度の違いによる静弾性係数の結果より敏感であった。

5. 考察

5.1 昨年度の結果との比較

本研究の結果から有効細孔量と修正伝播速度の関係性を求め、図-6に示す。ここで凡例に示す昨年度は昨年までに得られた結果であり、今回は今年度の結果である。昨年までの結果では、ペースト、モルタル、コンクリートの試験体の結果を示したが、今回のコンクリートのみの結果もほぼ同一の関係にあることが確認でき、有効細孔量と修正伝播速度の関係は、有効細孔量が大きくなるに従い、修正伝播速度が小さくなる傾向にあった。すなわち、骨材の品質や単位量の異なるコンクリートであっても、コンクリート中の骨材量および骨材の伝播速度を適切に考慮したペースト部の伝播速度(修正伝播速度)と試料中の骨材を示したペースト部の細孔量で

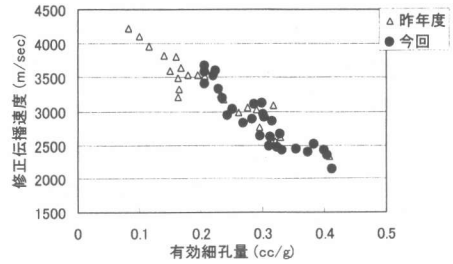


図-6 有効細孔量と修正伝播速度の関係

ある有効細孔量は良好な相関関係が得られることが確認できた。

5.2 水セメント比の検討

前述の水セメント比の推定手法の再検討を行った。今回の実験で確認した配合における水セメント比を、今までの実験で得られた結果から求めた近似式によって求めてみた。計算するに当たり、有効細孔量と修正伝播速度の関係および水セメント比と有効細孔量の間関係を求めた。有効細孔量と修正伝播速度の関係は、図-7に示すとおり昨年度までに得られた結果に今回の結果を加えたものの近似式で求めた。近似式は、簡便性を優先させたために1次式で示している。今後データの蓄積が進めば、この近似式は更新していくつもりである。

同じく、図-8に示すとおり水セメント比と有効細孔量の間関係も昨年までの結果と今回の結果の近似式で求めた。それぞれの係数は各図に示すとおりである。今回は、骨材の密度と伝播速度の測定で比較的良好な関係の得られた砂岩と安山岩の配合上の水セメント比と計算によって求めた水セメント比の間関係を図-9に示す。計算値は水セメント比40%では小さめ、70%では大きめな値となったが、ほぼ数%の差の範囲に収まっている。これは、データ数がまだ少ないことや有効細孔量と修正伝播速度の関係や水セメント比と有効細孔量の間関係を1次式で近似したためと思われる。今後さらにデータが蓄積されれば、より精度の高い推定式になると思われる。

5.3 トモグラフィーの適用

円形断面の構造物にトモグラフィーを適用した結果を図-10に示す。表面部の補修材の厚さが必ずしも実際の厚さと等しくはないが、コンクリート内部と表面部の品質の違いが明確に表わされている。それぞれの伝播速度も図中で示される伝播速度(コンクリート部4300m/sec程度、モルタル部3700m/sec程度)は、単独に測定した伝播速度(表-2)とほぼ同じ値になっている点でも、この手法が実際の構造物の物性値を正確に評価していることが確かめられた。アウトプットに与える影響としては、測定間隔などの測定方法も大きく影響すると思われる、今後さらに実構造物への適用性の検討を進めていきたいと思う。

6. まとめ

- (1)骨材の密度と超音波伝播速度の関係は、岩種によっては異なるが全体的には良好な関係にあることが確認できた。
 - (2)骨材の密度の違いにより、コンクリートの静弾性係数が異なることが分かった。
 - (3)コンクリートの超音波伝播速度は、骨材の超音波伝播速度の違いにより異なることが分かった。
 - (4)骨材の品質が異なっても、修正伝播速度と有効細孔量の関係は良好な関係にあることが確認できた。
 - (5)データの蓄積が必要ではあるが、コンクリートの超音波伝播速度を測定することにより、水セメントの推定が可能であることが確認できた。
- 謝辞：本研究行うにあたっては、東横エルメスの丸茂氏、太平洋セメントの菅谷氏には多大な協力を頂きました。

参考文献

- 1) 山下英俊, 塚孝司, 嶋田久俊, 丸茂文夫: 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, コンクリート工学年次論文報告集第21巻, 第2号, pp.1273-1277, 1999
- 2) 山下英俊, 塚孝司, 熊谷守晃, 喜多達夫: 実構造

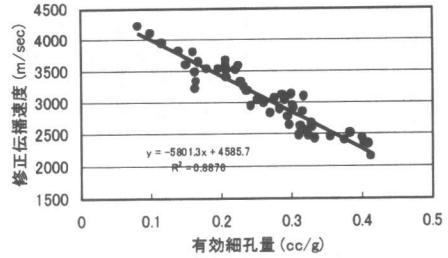


図-7 有効細孔量と修正伝播速度の近似式

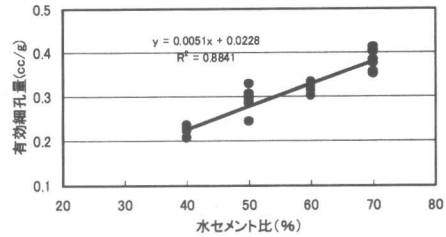


図-8 水セメント比と有効細孔量の近似式

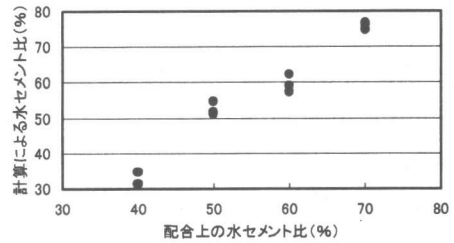


図-9 水セメント比の計算結果

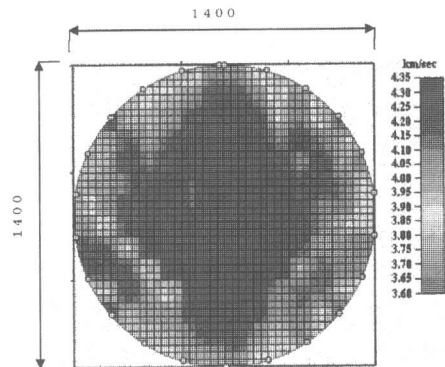


図-10 トモグラフィーの結果

物におけるコンクリートの超音波による品質評価, コンクリート工学年次論文報告集第22巻, 第1号, p. 361-366, 2000