

論文 超音波速度法によるコンクリートの初期強度推定に関する研究

平岩 陸^{*1}・田中清人^{*2}

要旨: 本研究では、型枠の脱型時期を明らかにすることを目的として、打設終了後の初期のコンクリートの硬化状況および圧縮強度を超音波速度法によって推定することを試みた。打設後初期の超音波伝播速度と圧縮強度の関係を検討したところ、調合や骨材量などの影響はあるものの、ほぼ線形関係にあり、超音波伝播速度によってコンクリートの初期強度の推定ができる可能性があることがわかった。

キーワード: コンクリート強度推定、超音波速度法、初期強度

1. まえがき

コンクリートの強度は、打設後徐々に上昇していくため、一般には28日強度を基準としている。打設後、この強度が完全に発現するまで型枠を設置しておくのが理想である。しかし、現場においては、工期を短縮するためにも、可能な限り早期に脱型し、型枠を転用し、次の工程へ移ることが求められている。型枠の脱型が可能となるのは、テストピースによる圧縮試験によって強度を測定し、 $5N/mm^2$ であることを確認するか、JASS5^{*)}によって定められている表-1の型枠の存置期間を経過することが必要である。前者の圧縮試験は、脱型時期を確認するためのテストピースが必要になるため、手間のかかることも多く、定められた型枠の存置期間を経てから脱型することも多い。しかし、JASS5に定められている型枠の存置期間は、表-1からもわかるように、セメント種類および気温に

よって細かく分けられて規定されている上、温度が低い場合の存置期間は規定されておらず、その場合はテストピースによる方法しかない。

本研究では、コンクリート型枠の脱型時期を非破壊検査手法によって推定することを最終的な目的として、まず、打設終了後の初期のコンクリートの圧縮強度を超音波速度法によって推定することを試みた。超音波速度法²⁾は、非破壊試験法としてコンクリートに広く用いられているが、ひび割れ深さや欠陥部の探知が主であり、圧縮強度の推定については推定精度も高くなく、適用が困難であるとされている。しかし、本研究が対象とする初期の圧縮強度推定においては、調合も既知であり、推定精度も高くできるものと考えられる。

本実験では、実験要因としてJASS5におけるセメント種類および気温を取り上げるとともに、調合の要因として水セメント比、骨材量お

表-1 セメントの種類 (日) (JASS5^{*)})

セメントの種類	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント 高炉セメントA種 シリカセメントA種 フライアッシュセメントA種	高炉セメントB種 シリカセメントB種 フライアッシュセメントB種
平均気温20℃以上	2	4	5
平均気温10℃以上20℃未満	3	6	8

*1 豊田工業高等専門学校助手 建築学科 博士(工学) (正会員)

*2 豊田工業高等専門学校教授 建築学科 (正会員)

表-2 調合表（セメント種類と気温による影響）

セメント	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	HAE/C (%)
普通ポルトランドセメント	65	202	310	780	1060	0.25
早強ポルトランドセメント		201	309			
高炉セメントB種		199	307			

W/C : 水セメント比, W : 水, C : セメント, S : 細骨材, G : 粗骨材, HAE : 高性能AE減水剤

表-3 測定日

セメントの種類	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	高炉セメントB種
夏 (平均気温30°C)	1, 2, 3, 4, 5, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7
秋 (平均気温15°C)	1, 2, 3, 4, 6, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7	2, 3, 4, 5, 7, 8
冬 (平均気温10°C)	2, 3, 4, 5, 7	2, 3, 4, 5, 7	3, 4, 5, 7, 8

および骨材産地を取り上げ、それぞれの条件下における圧縮強度と超音波伝播速度の関係を検討した。その後、これらの実験結果から、型枠脱型に必要な強度である5N/mm²に達しているためには、どの程度の超音波伝播速度が必要か考察した。

2. 実験方法

2.1 セメント種類および外気温による影響

JASS5の表-1に定められている型枠の存置期間を参考に、まず、セメントを普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種の3種類を用いて、気温が20°C以上の夏、10~20°Cの秋および10°C以下の冬に、それぞれ実験を行った。

この時の調合を表-2に示す。水セメント比を、JASS5で規定されている最大値である65%とし、骨材量を同一として調合を作成した。この調合を用いて、Φ10×20の円柱供試体を各測定日につき3本打設し、そのま

ま気中養生とした。養生期間終了後、上部を研磨機で平面にし、供試体の上下部分に端子を当てて超音波伝播速度を測定した後、圧縮試験を行い、圧縮強度と超音波伝播速度の関係を検討した。測定については、表-1の存置期間を参考に、その前後の材齢を中心に行う予定であったが、実際には表-1の日数よりも早く5N/mm²

表-4 調合表（水セメント比の影響）

W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	HAE/C (%)
65	202	310	780	1060	0.25
50	183	367			
40	167	418			

W/C : 水セメント比, W : 水, C : セメント, S : 細骨材, G : 粗骨材, HAE : 高性能AE減水剤

表-5 調合表（粗骨材量の影響）

W/C (%)	g/c (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	HAE/C (%)
65	40	202	310	780	1060	0.25
	30	235	362	910	795	
	20	269	413	1040	530	

W/C : 水セメント比, W : 水, C : セメント, S : 細骨材, G : 粗骨材, HAE : 高性能AE減水剤

に達している場合が多かった。
実際に測定した日を表-3に示す。

この実験は、JASS5で区別されて扱われているセメント種類および気温を統一して扱える方法として、超音波伝播速度を用いることが可能かどうか検討するものである。

2.2 調合による影響

次に、調合の影響として、水セメント比、粗骨材量および骨材産地を取り上げ、同様の実験を行った。水セメント比は65, 50, 40%の3水準、粗骨材量は40, 30, 20%の3水準とした。これらの調合を表-4, 5に示す。また、骨材産地の影響を検討する場合の調合は、表-6に示すとおりであり、この際に用いた粗骨材の性質は表-7に示すとおりである。なお、これらの調合による影響に関する実験は、

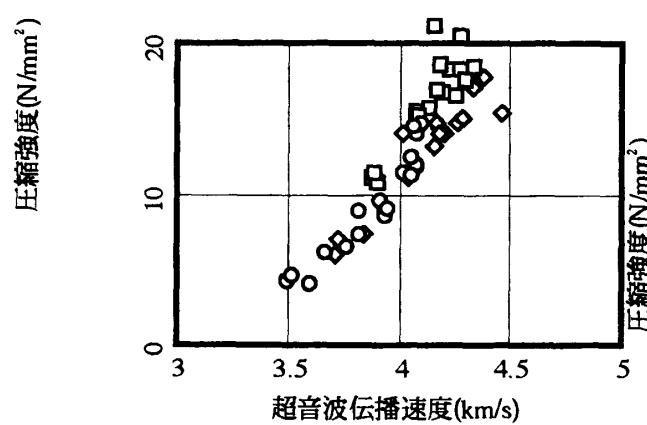
表-6 調合表（骨材産地の影響）

粗骨材	W/C (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	S (kg/m³)	G (kg/m³)	HAE/C (%)
A	60	232	386	828	1059	0.25
B				706	930	
C				709	949	
D				725	960	

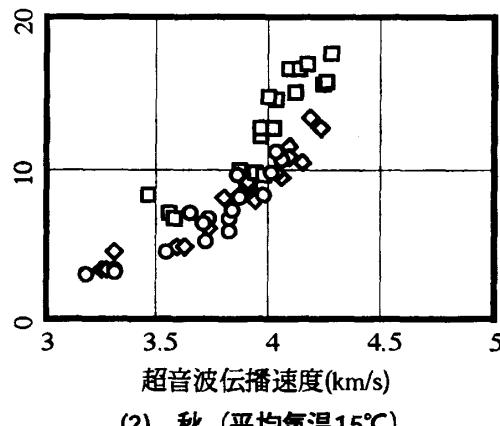
W/C: 水セメント比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,
HAE: 高性能AE減水剤

表-7 骨材の性質

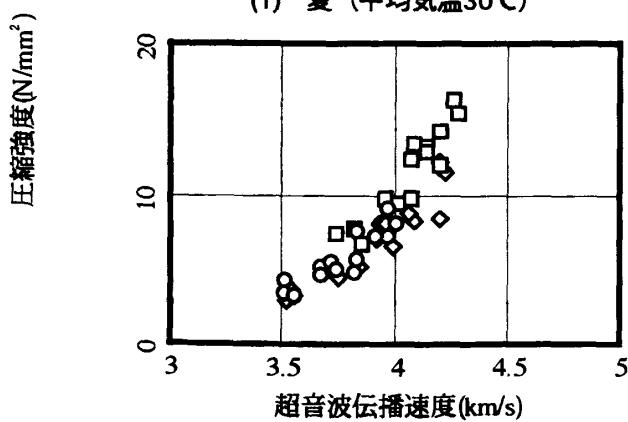
骨材産地	細骨材	密度 (g/cm³)	吸水率 (%)
A	細骨材	2.99	1.55
	粗骨材	2.87	1.12
B	細骨材	2.55	1.91
	粗骨材	2.52	2.00
C	細骨材	2.56	1.69
	粗骨材	2.57	1.65
D	細骨材	2.62	1.63
	粗骨材	2.60	2.10



(1) 夏 (平均気温30°C)



(2) 秋 (平均気温15°C)



(3) 冬 (平均気温10°C)

◆ 普通ポルトランドセメント
□ 早強ポルトランドセメント
○ 高炉セメントB種

図-1 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(各気温におけるセメント種類の影響)

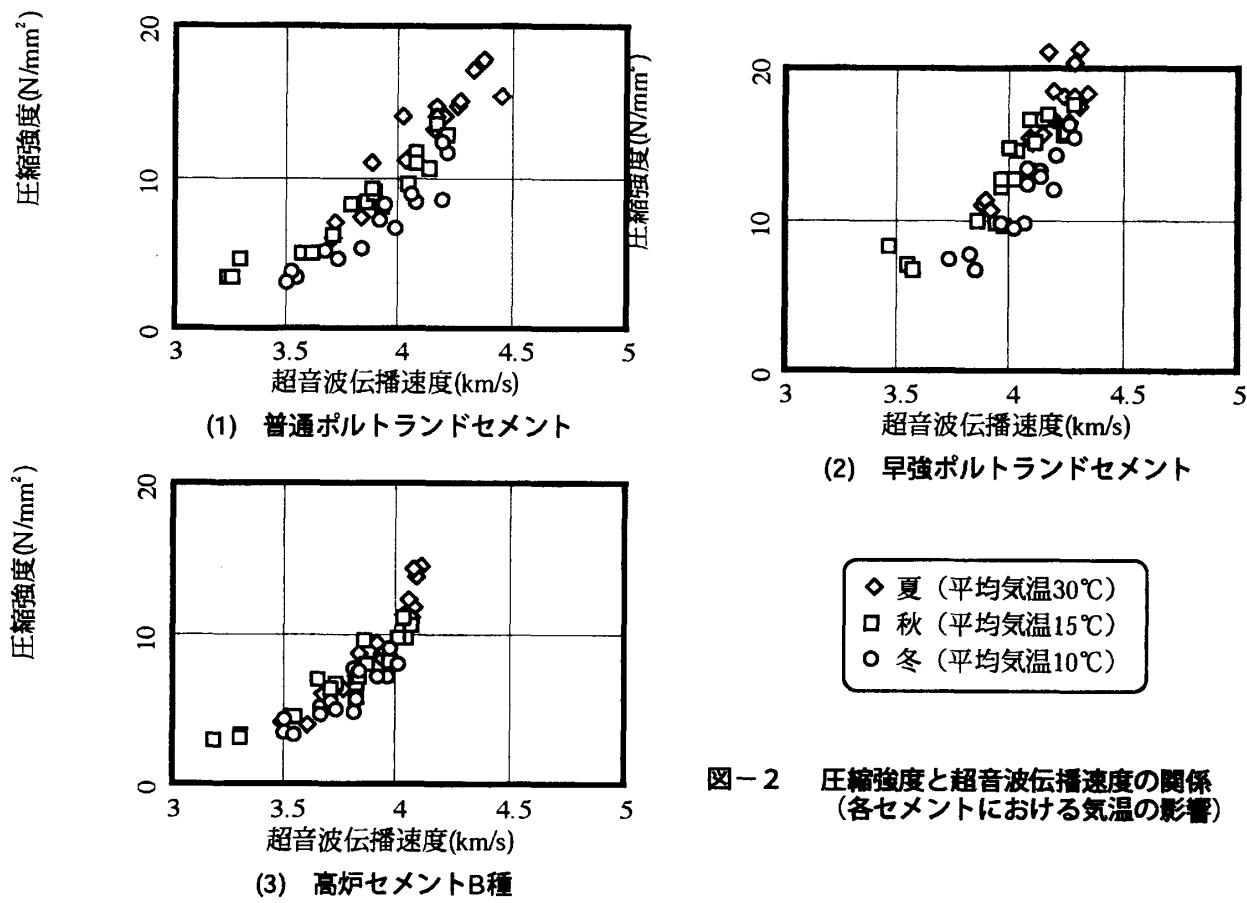


図-2 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(各セメントにおける気温の影響)

普通ポルトランドセメントを用いて夏を行い、測定日は養生期間1,2,3日のみとした。

3. 実験結果および考察

3.1 セメント種類および外気温による影響

図-1は、圧縮強度一超音波伝播速度の関係を、各季節におけるセメント種類の影響を比較できるように示したものである。この図からもわかるように、いずれの季節においても、初期の圧縮強度においては、超音波伝播速度との関係は線形的であることがわかる。また、いずれの季節においても、セメント種類によらずほぼ同一の線形関係があると考えられる。

図-2は、圧縮強度一超音波伝播速度の関係を、各セメントにおける季節、つまり平均気温で比較できるように示したものである。セメントの種類によらず、初期の圧縮強度においては、超音波伝播速度との関係は線形的である。ただし、いずれのセメントにおいても、冬の測

定値が全体的にグラフの下側に来ている。これは、気温が低いことによるセメント水和物の相違とも考えられるが、詳細は不明である。

3.2 調合による影響

(1) 水セメント比

図-3は、圧縮強度一超音波伝播速度の関係に与える水セメント比の影響を示したものである。この図によれば、水セメント比が小さいものでは、材齢が短くても強度が出る傾向がある

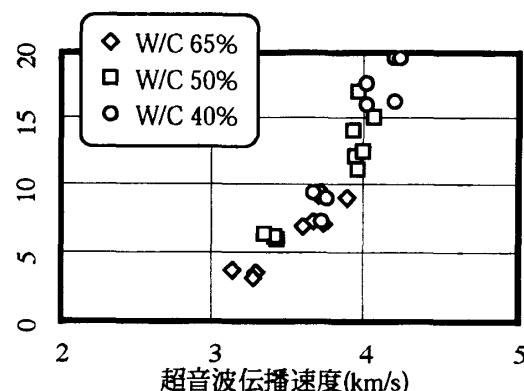


図-3 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(水セメント比の影響)

が、その分超音波伝播速度も大きくなっています。水セメント比が大きいものと比較して圧縮強度-超音波伝播速度の関係にあまり変化はない。よって、初期材齢の圧縮強度-超音波伝播速度の関係は、水セメント比にあまり影響されないといえる。

(2)粗骨材量

図-4は、圧縮強度-超音波伝播速度の関係に与える粗骨材量の影響を示したものである。骨材量が少なくなると、圧縮強度はほぼ同一であっても、超音波伝播速度が小さくなる傾向があることがわかる。これは、粗骨材の方がモルタルよりも内部が密実で超音波伝播速度が大きいものが多く、粗骨材の割合がコンクリート全体の超音波伝播速度に大きな影響を与えるためと考えられる。ただし、粗骨材量が少ない場合には、強度が大きくて超音波伝播速度が小さくなる傾向となり、超音波伝播速度で強度を推定する場合には安全側になると考えられる。一方、コンクリート中の粗骨材量には限度があるため、危険側になるものも限界があると考えられる。

(3)骨材産地による影響

図-5は、圧縮強度-超音波伝播速度の関係に与える骨材産地の影響を示したものである。全体として線形関係にあることは変わらないが、骨材産地が違うと、そのばらつきが大きくなることがわかる。これは、粗骨材量と同様の原因によるものであり、骨材の産地によって骨材そのものの性質が異なるためと考えられる。今回使用した骨材では、表-7からもわかるように、骨材Aが、密度も大きく、吸水率も小さいため、もっとも品質の良い骨材といえる。つまり、この骨材Aがもっとも内部が密実で、超音波伝播速度が大きいと考えられる。図-5においても、圧縮強度がほぼ同一である場合に、骨材Aが、もっとも超音波伝播速度が大きいことがわかる。これは、超音波伝播速度によって圧縮強度を推定する場合においては、危険側となるものである。

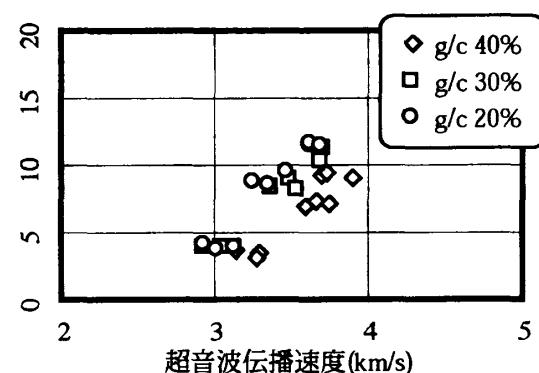


図-4 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(粗骨材量の影響)

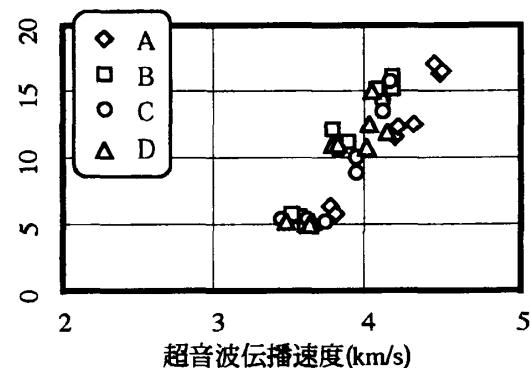


図-5 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(骨材産地の影響)

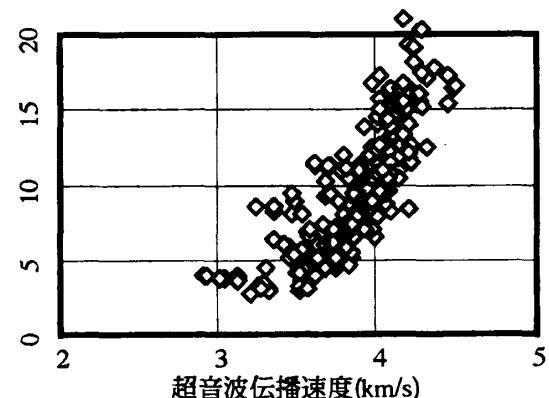


図-6 圧縮強度と超音波伝播速度の関係
(本研究による全結果)

3.3 型枠存置期間の考察

図-6は、本研究で行った実験による圧縮強度と超音波伝播速度の関係を、全てまとめて示したものである。本実験の範囲では、超音波伝播速度が3.9km/s以上とのもので、5N/mm²以下のもの

表-8 JASS5による存置期間と超音波伝播速度3.9km/sを基準とした脱型時期の比較（日）

セメントの種類	早強ポルトランドセメント		普通ポルトランドセメント		高炉セメントB種	
	JASS5	実験結果	JASS5	実験結果	JASS5	実験結果
夏（平均気温30℃）	2	2	4	2	5	4
秋（平均気温15℃）	3	2	6	4	8	7
冬（平均気温10℃）	-	3	-	4	-	8

のは存在しなかったため、本研究の範囲では、超音波伝播速度が3.9km/s以上であれば、型枠の脱型が可能と結論づけられる。ただし、図-6からもわかるように、実際には、超音波伝播速度が3.3km/s程度でも圧縮強度が5N/mm²以上となっているようなものもあり、値のばらつきは非常に大きい。なお、超音波伝播速度で圧縮強度を推定する場合に危険側になるものは、超音波伝播速度が大きいのにもかかわらず、実際の強度が小さいものであり、図-6でいえば図の右下に位置するものである。これらを検討すると、超音波伝播速度が3.8km/s台で5N/mm²に満たなかった唯一の事例である高炉セメントB種の冬の結果をはじめとして、高炉セメントB種および冬の結果で危険側にあるものが多かった。この理由は不明であるが、セメントの種類および冬の気温によるセメント水和物の影響が考えられる。

表-8は、超音波伝播速度3.9km/sを基準と考え、各実験における超音波伝播速度の平均が3.9km/sを越えた日を示したものであり、これが各条件下での脱型時期を示すと考えられる。表中に併記したJASS5の存置期間の日と比較すると、同様の日数か、日数が短縮されていることがわかる。さらに、この方法によれば、平均気温が10℃以下の場合も適用が可能であり、より適切な判断基準となりうると考えられる。

4.まとめ

本研究では、型枠の脱型時期を明らかにすることを目的として、打設終了後の初期のコンクリートの硬化状況および圧縮強度を超音波速度

法によって推定することを試みた。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 初期圧縮強度と超音波伝播速度はほぼ線形関係にあるものの、セメント種類、気温および粗骨材量および品質の影響を受ける。
- 2) 本研究の範囲では、超音波伝播速度が3.9km/s以上であれば、型枠脱型の目安である圧縮強度5N/mm²以上を満たしていた。
- 3) 超音波伝播速度に対して初期圧縮強度の値が低く、超音波伝播速度による脱型時期の推定において危険側となる結果が得られた要因として、高炉セメントB種および気温の低さが挙げられる。

なお、今回はテストピースによって超音波伝播速度を測定したが、実際には型枠上から測定できるのが理想である。このため、今後は型枠上から超音波伝播速度を測定した場合の型枠の影響およびコンクリート中の鉄筋の影響等を検討していく予定である。

謝辞

本研究の研究費の一部は、平成18年度内藤科学技術振興財団研究助成によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説
JASS5 鉄筋コンクリート工事、丸善
- 2) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル
- 3) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の非破壊試験法、養賢堂