

衝撃弾性波による高強度コンクリートの圧縮強度推定方法に関する研究
高強度コンクリートを対象とした弾性波速度と圧縮強度との関係について

ものつくり大学(学部) 浅沼 武
ものつくり大学 中田善久
三井住友建設(株) 立見栄司
日大理工(院) 大塚秀三

1. はじめに

コンクリート構造物の品質を評価する上で圧縮強度は重要な要素の一つであることから、筆者らは、建設現場におけるコンクリートの圧縮強度の確認・管理法に着目し、強度推定に関する非破壊検査法として衝撃弾性波による圧縮強度推定方法(以下、衝撃弾性波法とする)を検討してきた。これまでの既報^{1)~3)}において、弾性波速度に影響を及ぼすコンクリートの各種要因に関する系統的な検討を行い、一般的な使用材料および調合のコンクリートにおいて適用が可能であることを明らかにした。

本報告では、既報^{1)~3)}で得られた成果をもとにして、さらに衝撃弾性波法の高強度コンクリートへの適用性の確認を目的とし、円柱供試体および柱模擬試験体から採取したコア供試体(以下、コア供試体とする)を用いた検討を行ったものである。

ここでは、セメントの種類、水セメント比、養生方法および打設時期を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係から圧縮強度推定式の適合性を検討し、さらに弾性波速度測定値から推定した強度の妥当性について検討した。

2. 衝撃弾性波による圧縮強度推定方法の概要

本報告で用いた衝撃弾性波法は、コンクリート表面に振動検出器を当て、その近傍をハンマーで軽く叩くという極めて簡便な方法によりコンクリートの弾性波速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との関係式(圧縮強度推定式)を介して圧縮強度を推定するものである。ここでは、衝撃弾性波法のうち反射波法を用いて検討した。反射波法は、2つの平行面からなる部材の一方の面を垂直に打撃して得られた、反射波の振動数により弾性波速度を求める方法である。なお、今回用いた圧縮強度推定式は、水セメント比が35%以上は圧縮強度推定式 $f_c=1/220 \cdot 0.825 \cdot 2.3 V^2 - 121.5$ 、30%未満については圧縮強度推定式 $f_c=1/230 \cdot 0.825 \cdot 2.4 V^2 - 108.0$ を用いた。

$$f_c = 1/220 \cdot 0.825 \cdot 2.3 V^2 - 121.5 \quad \text{推定式}$$

$$f_c = 1/230 \cdot 0.825 \cdot 2.4 V^2 - 108.0 \quad \text{推定式}$$

ここに、

f_c : 推定圧縮強度(N/mm²)

V : 弾性波速度(m/s)

3. 実験概要および試験方法

実験概要を表1、コンクリートの使用材料を表2、調合を表3に示す。実験項目は、養生方法を変えた

表1 実験概要

実験の項目	要因					
	セメントの種類 (水セメント比)	養生方法	打設時期	測定材齢	供試体形状	測定対象
円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係	N (47%, 37%, 27%) M (47%, 37%, 27%) L (45%, 35%, 25%)	標準養生	夏期(8月) 標準期(10月) 冬期(2月)	28日	円柱供試体 (100×200)	円柱供試体
柱模擬試験体から採取したコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係		簡易断熱養生				

表2 コンクリートの使用材料

主要材料	性状および特性
セメント	N 密度3.16g/cm ³ , 比表面積3.290cm ² /g
	M 密度3.21g/cm ³ , 比表面積3.230cm ² /g
	L 密度3.22g/cm ³ , 比表面積3.430cm ² /g
細骨材	栃木県栃木市尻内町産陸砂 (表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.30%, 粗粒率2.75)
粗骨材	栃木県安蘇郡葛生町産石灰岩2005 (表乾密度2.70g/cm ³ , 吸水率0.59%, 粗粒率6.65, 実績率60.0%)
化学混和剤	高性能AE減水剤, ポリカルボン酸系化合物

表3 コンクリートの調合

セメントの種類	W/C (%)	S/a (%)	粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)		
				W	C	S	G	夏期	標準期	冬期
N	47.0	50.6	0.545	175	373	874	883	1.15	1.05	0.95
	37.0	50.7	0.525	170	460	846	851	1.40	1.30	1.20
	27.0	46.2	0.525	170	630	707	851	1.50	1.40	1.20
M	47.0	50.8	0.545	175	373	880	883	1.25	1.15	0.95
	37.0	50.9	0.525	170	460	853	851	1.40	1.35	1.15
	27.0	46.5	0.525	170	630	715	851	1.50	1.40	1.20
L	45.0	51.0	0.545	170	378	890	883	1.15	1.05	0.90
	35.0	51.0	0.525	165	472	856	851	1.25	1.15	1.10
	25.0	46.2	0.525	165	660	705	851	1.25	1.15	1.10

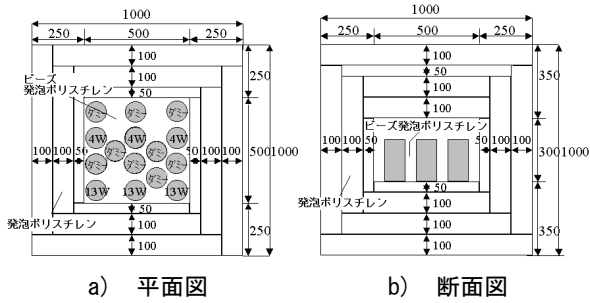


図1 簡易断熱養生の概要

円柱供試体および柱模擬試験体の中心部と端部から採取したコア供試体の弾性波速度と圧縮強度との関係の2項目とした。実験に用いたコンクリートは、セメント種類が普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメント(以下、順にN, MおよびLとする)であり、水セメント比をそれぞれ3水準とし、打設時期を夏期、標準期および冬期の3シーズンとしたものである。弾性波速度の測定と圧縮強度試験は、材齢28および91日に行った。

円柱供試体の採取およびコア供試体を採取するための柱模擬試験体の打設は、練り上がり90分後の同一のコンクリートを用いた。円柱供試体は、試料の採取後に標準養生および図1に示すように簡易断熱養生(JASS5T-705-2005準拠)に供した。また、柱模擬試験体は屋外で打設し、その後2日で脱型し、そのまま屋外に暴露し、所定の材齢において図2に示す柱模擬試験体の中心部と端部からコア供試体の採取を行った。なお、圧縮強度試験は、円柱供試体ではJIS A 1108, コア供試体ではJIS A 1107に拠った。

4. 結果および考察

4. 1 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係 (1) セメント種類の影響

セメントの種類が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係を図3に示す。弾性波速度と圧縮強度の関係は、いずれの養生方法とも推定式に対して相関性が高いものであったが、簡易断熱養生を行ったNおよびMに関しては、圧縮強度推定式②に対する相関係数が低くなる傾向が見られた。これらの原因は定かではないが、材齢や打設時期の違いが影響しているものと考えられる。

(2) 水セメント比の影響

水セメント比が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係を図4に示す。弾性波速度と圧縮強度の関係は、水セメント比35%以上および30%未満では明瞭な違いが見られ、強度推定式①式に比べ、②式の方が若干相関係数が下回る傾向を示したが、いずれの水セメント比の領域においても推定式にほぼ近似した傾きとなった。この結果、水セメント比の大小に関わらず、高強度領域であっても弾性波速

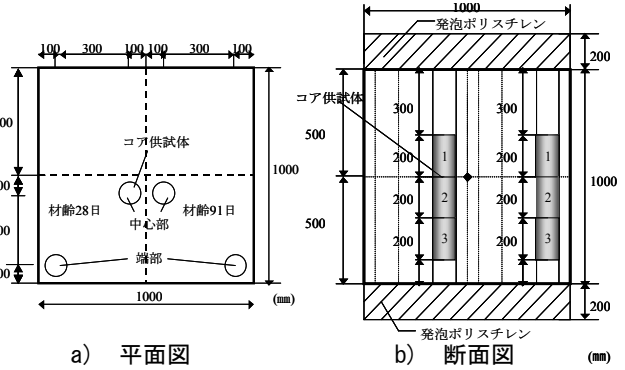


図2 柱模擬試験体概要

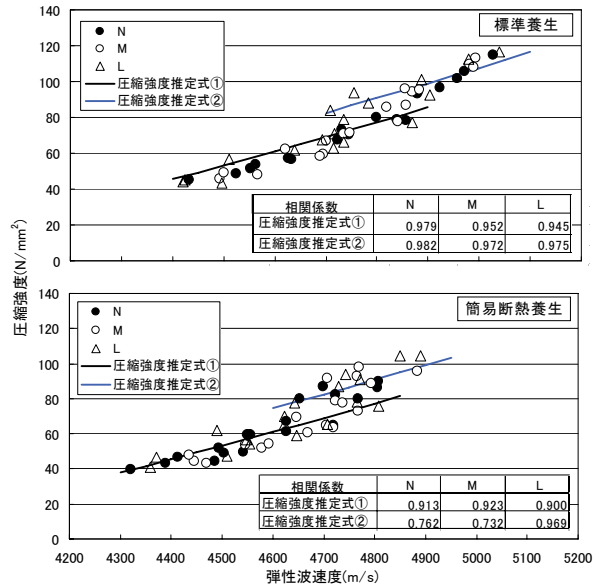


図3 セメントの種類が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係

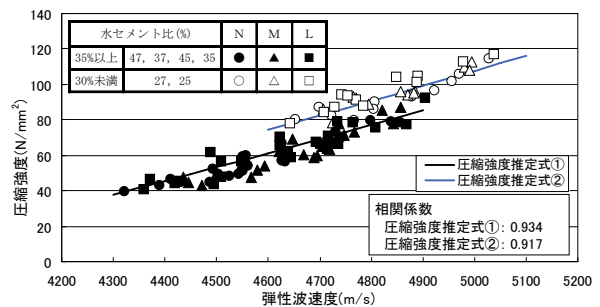


図4 水セメント比が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係

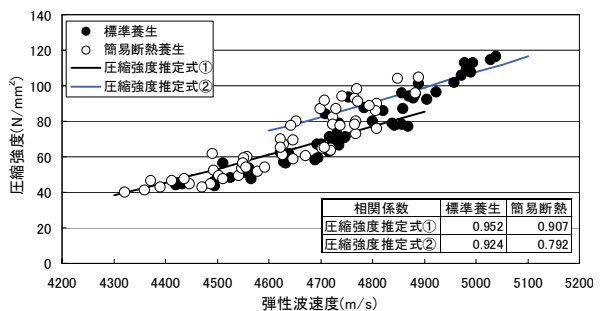


図5 養生方法が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係

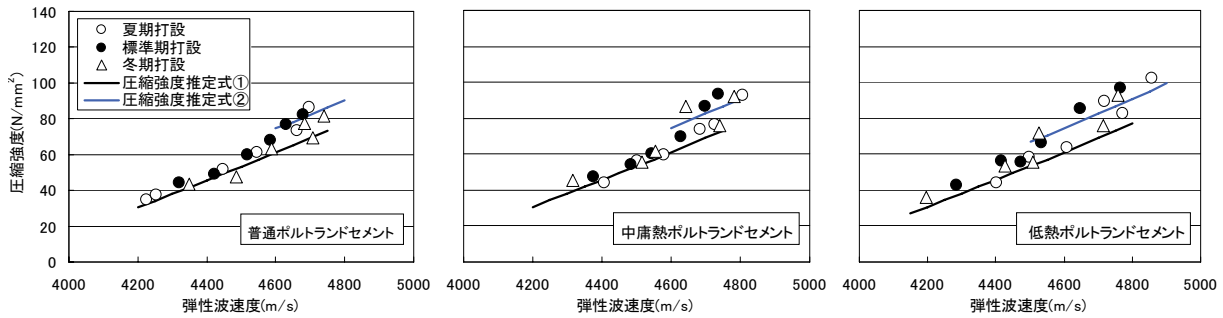


図6 セメントの種類および打設時期が異なるコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係

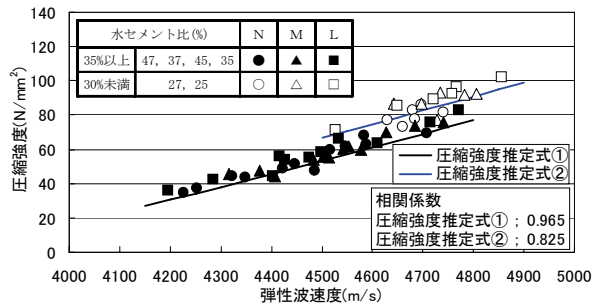


図7 水セメント比が異なるコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係

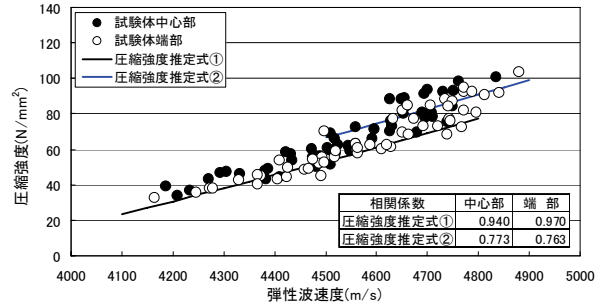


図8 コア供試体の採取位置が異なる弾性波速度と圧縮強度の関係

度と圧縮強度との関係には、水セメント比の依存性が高いことがいえる。また、圧縮推定強度式①に対し、②式の相関係数が若干低いのは圧縮強度推定式の水セメント比を30%としているため、実際の水セメント比と比べ3~5%の差が生じているためと思われる。

(3) 養生方法の影響

養生方法が異なるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係を図5に示す。弾性波速度と圧縮強度の関係は、簡易断熱養生に比べ標準養生の方が広い範囲に分布していた。しかし、いずれも圧縮強度推定式の傾きに対してほぼ近似しており、正の相関性が見られた。標準養生が広い範囲に分布した原因は、含水率が関係していると思われる²⁾、簡易断熱養生に比して、標準養生が十分な湿潤状態であったため、圧縮強度および弾性波速度のいずれも大きくなったことによると考えられる。

4. 2柱模擬試験体から採取したコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係

(1) セメントの種類および打設時期の影響

セメントの種類および打設時期が異なるコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係を図6に示す。ここでは、中心部と端部から採取したコア供試体6本の平均値を用いた。なお、因子を細分化したことでデータ数が少ないため、相関係数の計算は省略した。

柱模擬試験体は屋外で打設し、設置されていたため打設時期の違いによる影響をうける可能性が高い。また、セメントの種類によって温度履歴が異なるため、弾性波速度へ影響を及ぼす可能性も考えられる。

よって、セメントの種類ごとに打設時期の違いによる影響について検討を行った。しかし、セメントの種類ならびに打設時期の違いが弾性波速度と圧縮強度の関係に及ぼす影響は、明確に見られなかった。このことから、コア供試体においても圧縮強度と弾性波速度には非常に強い相関関係があると考えられる。

(2) 水セメント比の影響

水セメント比が異なるコア供試体の弾性波速度と圧縮強度の関係を図7に示す。ここでは、中心部と端部から採取したコア供試体6本の平均値を用いた。弾性波速度と圧縮強度の関係は、コア供試体においても円柱供試体と同様に、強度域ごとに明確な違いが見られ、35%以上が圧縮強度推定式①に、30%未満が圧縮強度推定式②に対して近似する傾向となり、相関性は高いものであった。しかし、30%未満の領域では相関係数が若干小さくなる傾向を示した。これは、高強度領域になるにつれて、水和熱が上昇したことにより、含水率が低下したことで弾性波速度が遅くなったためと推測される²⁾。

また、高強度域において、中心部と端部の温度履歴が大幅に異なっていたことから、さらに、考察するため、次項(3)において中心部と端部のそれぞれから採取されたコア供試体の3本ずつの平均値を用いて検討を行った。

(3) 採取位置が異なるコア供試体の影響

コア供試体の採取位置が異なる弾性波速度と圧縮強度の関係を図8に示す。弾性波速度と圧縮強度の関係は、端部から採取したコア供試体の場合、水セ

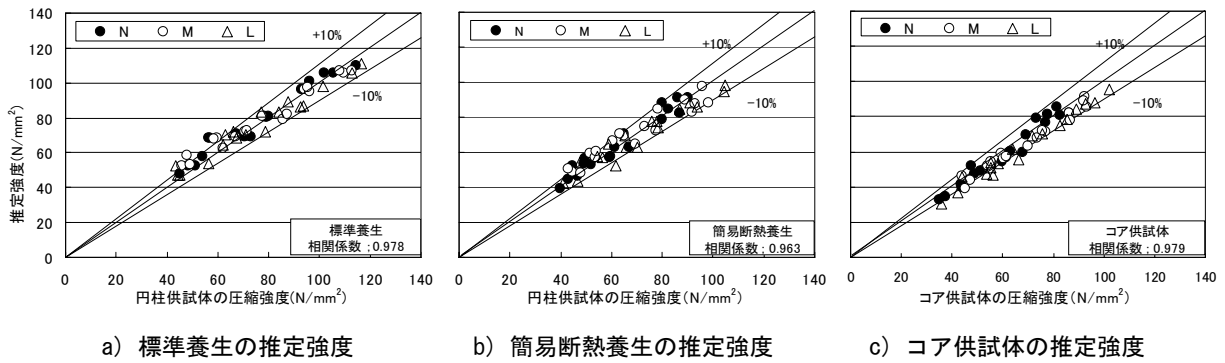


図9 円柱およびコア供試体の弾性波速度から推定した圧縮強度と供試体の圧縮強度の比較

メント比35%以上の領域においては、圧縮強度推定式①にほぼ近似する傾向となり、相関係数も大きかった。しかし、30%未満の領域では圧縮強度推定式②の近傍に分布するものの若干ばらつきが大きくなった。また、中心部では水セメント比が35%以上および30%未満のいずれも圧縮強度推定式よりも上部に分布する傾向が見られ、30%未満の領域では端部と同様に若干ばらつきが大きくなる傾向となった。このことから、採取位置の違いによる温度履歴の大小が弾性波速度と圧縮強度の関係に影響を与えると考えられる。

4. 3 弾性波速度による推定強度と圧縮強度の比較

円柱供試体およびコア供試体の弾性波速度から推定した推定圧縮強度と供試体の圧縮強度の比較を図9に示す。

図9a)は標準養生、b)は簡易断熱養生による推定圧縮強度と実測圧縮強度の関係である。いずれも推定強度と実測圧縮強度の誤差が少ない傾向を示し、ほぼ±10%の範囲内に収まった。しかし、標準養生は推定強度が50～70N/mm²付近で若干+10%を上回る部分が見られ、簡易断熱養生においても同様の傾向が見られた。

図9c)はコア供試体の推定圧縮強度と実測圧縮強度の関係である。ここでは、推定圧縮強度の算出は、中心部と端部から採取された6本のコア供試体の平均値を用いた。推定圧縮強度とコア供試体の実測圧縮強度の関係は、ほぼ±10%の範囲内に分布しており、相関性は高いものの若干-10%を下回る傾向が見られた。このことから、弾性波速度は温度履歴の影響を受けやすい可能性がある。

5. まとめ

高強度コンクリートの円柱供試体ならびに柱模擬試験体から採取したコア供試体を対象に弾性波速度および圧縮強度に関する検討を行った結果、以下の知見が得られた。

(1)セメント種類の違いが弾性波速度と圧縮強度の関係に及ぼす影響は、養生方法の違いに関わらず圧縮強度推定式に近似しており顕著な差異は見られない。

(2)円柱およびコア供試体のいずれも、水セメント比が異なる弾性波速度と圧縮強度の関係には若干の相違が見られた。

(3)打設時期が異なるコア供試体の圧縮強度と弾性波速度の関係は、いずれの打設時期とも相関性は高かったが、採取位置の違いによる影響を受ける。

(4)円柱およびコア供試体の推定圧縮強度は、実測した圧縮強度に対して高い相関性を示したことから、圧縮強度推定式の妥当性が示された。

以上の結果、水セメント比が25～35%の高強度コンクリートに対し、圧縮強度推定式②を用いることにより、衝撃弾性波法の強度管理への適用が可能であると予見された。

今後は、今回新たに提案した圧縮強度推定式②の構造物への適合性および弾性波速度測定値から推定した強度の妥当性を検討していく予定である。また、衝撃弾性波法による現場の品質管理を目指し、高強度コンクリートの実構造物への適応性も検討していきたい。

【謝辞】

本論文において、小山レミコン(株)埼玉工場、埼玉建興(株) 権田武士氏ならびにものづくり大学 中田研究室の学生に多大なご協力を頂きました。ここに付記し、深謝致します。

【参考文献】

- 1) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎: 衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定法に関する研究—コンクリートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響—, 日本建築学会構造系論文集, No. 587, pp. 15-21, 2005. 1
- 2) 立見栄司, 中田善久, 河谷史郎: 衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定方法に関する研究—コンクリートの構成材料・含水率等が衝撃弾性波速度に及ぼす影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1pp. 815-816, 2003. 9
- 3) 立見栄司, 辻定和, 蓮尾孝一: 衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊強度推定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 985-986, 2002. 8