

論文 超音波速度法による高強度コンクリート構造体の品質の推定

木村 芳幹*1・谷川 恭雄*2

要旨: 超音波速度法による高強度コンクリートの圧縮強度およびヤング係数の推定式, ならびにトモグラフィー法を用いたコンクリート構造体内部欠陥の推定手法について検討した。その結果, 圧縮強度推定式は指数近似式とするのが適切であること, ヤング係数は一次回帰式を用いて推定できることを明らかにした。また, トモグラフィー法を用いて断面内の超音波伝搬速度分布を推定することにより, 構造体の空洞部およびヤング係数の分布をほぼ正確に把握できることを明らかにした。

キーワード: 高強度コンクリート, 超音波速度法, トモグラフィー法, 圧縮強度

1. まえがき

相次いだトンネル覆工コンクリートの剥落事故を契機に, 土木・建築工事においてコンクリートの耐久性に関する信頼性が社会問題となっている。このような事故を未然に防ぐには, 確立された調査・診断技術を用いて, コンクリートの品質を総合的に評価することが必要となる。

非破壊試験技術, なかでも超音波速度法を用いてコンクリートの圧縮強度を推定する技術については古くから研究がなされており, すでに多くの推定式^{1),2)}が提案されている。一方, 1980年代の高性能 AE 減水剤の出現を契機にコンクリートの高強度化が進み, 近年では従来とは異なる強度レベルのコンクリートが使用される機会が増加する傾向にある。これに対して, 過去に提案された圧縮強度推定式の適用性について検討がなされた例は極めて少ない。また, 医療分野では一般的に扱われているトモグラフィー法を, コンクリートに適用して欠陥部を推定した事例³⁾はいくつか報告されているが, その適用範囲や評価方法などについて検討がなされた例はみられない。

そこで本報では, 超音波伝搬速度法を用いたコンクリートの物理的性質の推定式, ならびに

トモグラフィー法による構造体内部欠陥の推定手法に関する考察を行う。

2. 実験概要

2.1 実験の構成と目的

コンクリートの物理的性質の推定式に関する検討では, 圧縮強度が $20 \sim 120 \text{N/mm}^2$ の供試体を対象として超音波伝搬速度と圧縮強度およびヤング係数との関係を明確にする。さらに, 骨材量が超音波伝搬速度に及ぼす影響を確認する。

トモグラフィー法による構造体内部欠陥の推定では, 高強度コンクリートを打ち込んだ模擬柱部材断面方向の空洞位置の推定ならびに均質性について, 手法の適用性を検討する。

表-1 供試体の概要

分類	供試体形状	母数		
		Vp	Fc	Ec
普通コンクリート W/C=40~60% (材齢3~91日)	コア	72	72	70
	シリンダー	240	240	215
	小計	312	312	285
普通コンクリート 学校建築 ⁴⁾ (竣工年:1960~1978年)	コア	380	380	0
	シリンダー	0	0	0
	小計	380	380	0
高強度コンクリート W/C=28~40% (材齢1~91日)	コア	132	132	132
	シリンダー	128	128	73
	小計	260	260	205
合 計		952	952	490

Vp:超音波伝搬速度, Fc:圧縮強度, Ec:ヤング係数

*1 (株)新井組技術研究所主任研究員 (正会員)

*2 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

2.2 供試体の概要

分析対象とした供試体の概要を表-1に示す。供試体数は、超音波伝搬速度および圧縮強度が952件、ヤング係数が490件である。ここで、高強度コンクリートは、構成する材料のうち粗骨材量が少なく、同一圧縮強度時における超音波伝搬速度が遅いと考えられることから、本報では普通コンクリート(W/C=40~60%)と高強度コンクリート(W/C=28~40%)とを分類して検討する。なお、普通コンクリートには、兵庫県南部地震で被災した学校建築から抜き取ったコンクリートコア(以下、コアと略す)⁴⁾による試験値が含まれる。

2.3 模擬柱部材の概要

模擬柱部材の概要を図-1に示す。模擬柱部材の数量は、振動締めめの有無を要因とした2体である。いずれも断面は $\square 900 \times 900 \text{mm}$ 、高さは2100mmであって、主筋には24D38、帯筋には4D16@100の配筋が施されている。打ち込まれたコンクリートはW/C=33.0%、スランプフロー値625mmの高強度コンクリートである。

模擬柱部材には、図-1に示すように、コア採取に伴う空洞(直径: $\phi=100 \text{mm}$)が、材齢28日時点で2ヶ所、材齢91日時点で5ヶ所設けられている。

2.4 超音波伝搬時間の測定方法

超音波伝搬時間の測定には、振動子周波数50kHzの測定器を用いた。

供試体の伝搬時間の測定方法は、測定方向を載荷方向、測定点数を一供試体あたり1~5点とし、測定時期を圧縮強度試験の直前とした。伝搬時間は発・受信子の接触時間である5~10秒間に示された最小値の各測点平均値、伝搬速度は供試体高さを伝搬時間で除した値とした。また、骨材量が物理的性質に及ぼす影響の検討は、振動締めめを行った模擬柱部材から採取したコアを対象とした。なお、骨材量はコア供試体端面の骨材面積率による評価とし、本報では骨材面積率を骨材容積率として扱う。

つぎに、断面内の空洞位置の推定、ならびに

均質性の検討は、振動締めめを行っていない模擬柱部材を対象とした。測定時期は材齢58日および115日、測定高さは床から+900mmとした。発・受信子の配置方法は対称法および斜角法、測定点数は1側面あたり15点、1測点の波線数は8~15とした。各波線の伝搬速度はみかけの伝搬距離を伝搬時間で除した値とした。

2.5 部材断面内の均質性の評価方法

部材断面の均質性の評価にはトモグラフィー法を用いた。すなわち、図-2に示すように、

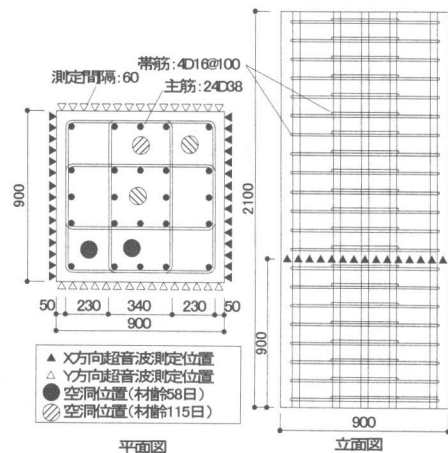


図-1 模擬柱部材の概要(単位:mm)

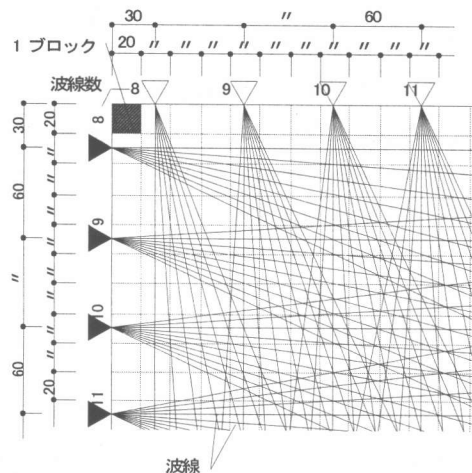


図-2 ブロック分割図(単位:mm)

模擬柱部材の水平断面を45×45のブロックに分割し、ブロックを通過する波線のみかけの伝搬速度平均値を求めることによった。各ブロックの伝搬速度平均値は、式(1)⁹⁾に示すように、ブロックを通過する波線の長さの割合で重みをつけて求めた値とした。

$$V_j = \frac{\sum (l_{ij} \cdot V_i)}{\sum l_{ij}} \quad (1)$$

ここに、 V_j : ブロック j の伝搬速度(km/s)

l_{ij} : 波線 i がブロック j を通過する長さ(mm)

V_i : 波線 i の伝搬速度(km/s)

ここで、あるブロックの伝搬速度が他のブロックの伝搬速度に対して著しく小さく評価されたブロックを欠陥部(空洞部)と判定する。判定基準は、式(2)に示すトンプソンの棄却検定⁶⁾における τ が-1.94以下(危険率5%以下)となる場合とする。

$$\tau = \frac{(x_R - \bar{x})}{s} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

x_R : 不良と考えられる測定値

\bar{x} : 平均値

x_i : 測定値

n : 測定個数(波線数)

つぎに、波線が空洞部を通過するとみかけの伝搬速度が遅く評価され、結果としてその波線が通過する健全部の伝搬速度を遅く評価するこ

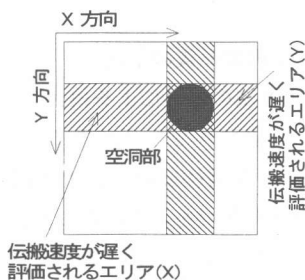


図-3 伝搬速度が遅く評価されるエリア

ととなる。そこで、各ブロックを通過する波線のみかけの伝搬速度についても式(2)による棄却域に該当した波線を除外してブロックの伝搬速度を算出することとした。なお、式(1)を用いてX、Y方向測定値を同時に解析すると、図-3に示すように、X方向の解析で値が小さく評価されるエリアとY方向の解析で値が小さく評価されるエリアをともに評価することとなる。つまり、図-3中の片側斜線部分のエリアは、欠陥部でないにもかかわらず超音波伝搬速度が小さく評価される可能性がある。そこで本報では、XY方向を同時に解析する場合(平均値評価)と、別々に解析して大きいほうの値を採用する場合(最大値評価)についても比較する。

3. 超音波伝搬速度による物理的性質の推定

3.1 圧縮強度の推定式

図-4に、超音波伝搬速度と圧縮強度との関係を、既往の推定式¹⁾を併記して示す。図-4より、圧縮強度が40N/mm²を超える範囲では、超音波伝搬速度と圧縮強度との関係は既往の推定式による値と大きく異なることが分かる。また、これまで提案されている関係式^{1),2)}の多くは一回帰による式であるが、図-4より、高強度領域を含めたコンクリートの圧縮強度の推定式は指数近似式とするのが適切であると考えられる。本実験の範囲で式(3)が、高強度コン

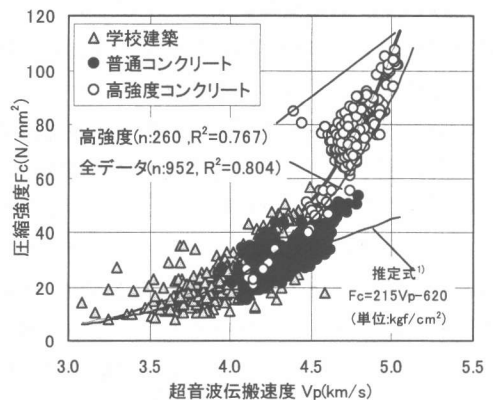


図-4 超音波伝搬速度と圧縮強度との関係

クリートを対象として式(4)が得られた。

全ての測定値：

$$F_c = 0.0805e^{1.404V_p} \quad (n:952, R^2=0.804) \quad (3)$$

高強度コンクリート：

$$F_c = 0.0805e^{1.438V_p} \quad (n:260, R^2=0.767) \quad (4)$$

ここに、 F_c ：圧縮強度(N/mm²)

V_p ：超音波伝搬速度(km/s)

3.2 ヤング係数の推定式

図-5に、超音波伝搬速度とヤング係数との関係を示す。超音波伝搬速度は、ヤング係数、単位容積質量、およびポアソン比の関数として理論式⁹⁾が導かれているが、図-5より、ヤング係数は超音波伝搬速度を説明変数とした一次回帰式で近似できると考えられる。本実験の範囲で式(5)が、高強度コンクリートを対象として式(6)が得られた。

全ての測定値：

$$E_c = 2.58V_p - 8.52 \quad (n:490, R^2=0.939) \quad (5)$$

高強度コンクリート：

$$E_c = 2.38V_p - 7.46 \quad (n:205, R^2=0.908) \quad (6)$$

ここに、 E_c ：ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm²)

V_p ：超音波伝搬速度 (km/s)

3.3 骨材量が物理的性質に及ぼす影響

図-6に、模擬柱部材から抜き取ったコアにおける骨材容積率と超音波伝搬速度およびコンクリートの物理的性質との関係を示す。

同図より、高強度コンクリートにおいても、コンクリート中の骨材量が大きくなるほど超音波伝搬速度が大きくなるのが分かる。しかし、圧縮強度は骨材容積率が0.25を下回る範囲では骨材容積率が小さいほど大きくなる傾向がみられる。これは、単位体積中のセメント量が多くなることによると考えられる。したがって、骨材容積率が0.25を下回る部位では式(3)、式(4)を用いて圧縮強度を精度良く推定するのは困難であると考えられる。一方、ヤング係数は骨材量にほぼ比例して増減すると考えられる。

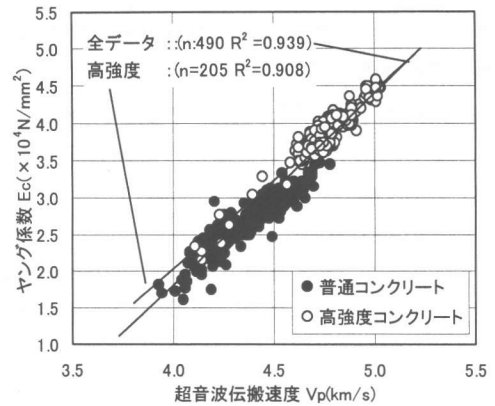


図-5 超音波伝搬速度とヤング係数との関係

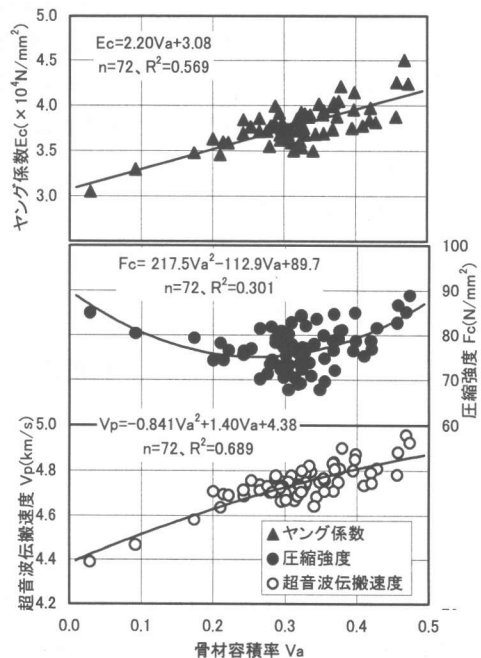
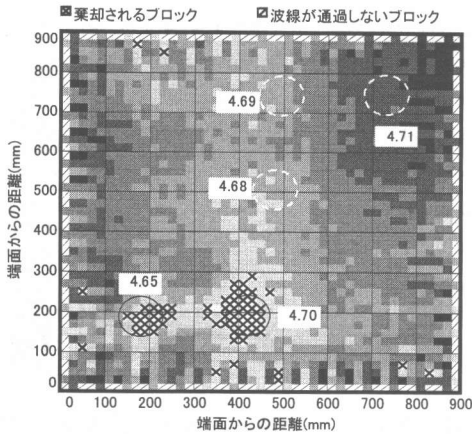


図-6 骨材容積率と物理的性質との関係

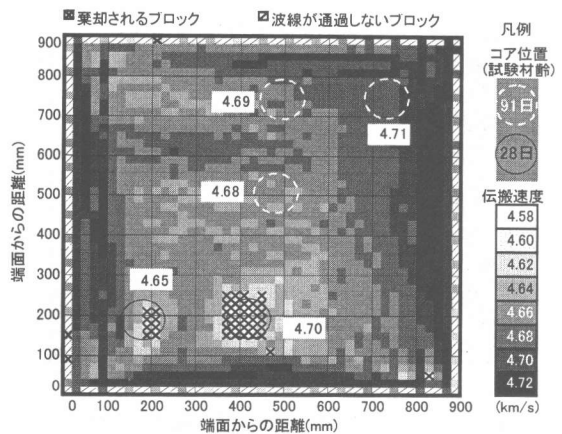
4. 構造体内の品質の推定

4.1 解析方法の違いによる検討

図-7に、空洞が2ヶ所である場合(材齢58日)における、模擬柱部材断面内の超音波伝搬速度の推定分布状況を示す。なお、同図には、材齢28日および91日のコア供試体による超音波伝搬速度試験値を併記してある。同図より、平均値評価および最大値評価では、ともに主と



(a) 平均値評価



(b) 最大値評価

図-7 超音波伝搬速度の断面内推定分布状況(空2ヶ所 材齢58日)

してコア採取部に欠陥(空洞)があると判定されることが分かる。両手法はともに $\phi 100\text{mm}$ 程度の空洞位置推定に適用できると考えられる。

一方、トモグラフィー法による解析値をコア試験値と比較すると、平均値評価より最大値評価のほうがコア試験値に近い値であることが分かる。したがって、断面内の物理的性質の分布を推定するには、最大値評価のほうが適しているといえる。なお、棄却されないブロックを対象とした超音波伝搬速度平均値は、表-2に示すように、平均値評価で 4.664km/s 、最大値評価で 4.683km/s である。

4.2 空洞数の違いによる検討

図-8に、空洞が5ヶ所である場合(材齢115日)における超音波伝搬速度分布状況を示す。ただし、同図は最大値評価によるものである。図-8と図-7(b)とを比較すると、空洞が5ヶ所であるほうが全般に伝搬速度が遅く評価されている。また、断面中心部に空洞があるにもかかわらず、欠陥部として判定されていない。これは、分析対象とした波線のうち空洞部を通過する波線が多すぎるにより、健全なブロックの解析において、欠陥部を通過した波線の伝搬速度が棄却されないことによると考えられる。このことより、空洞が3ヶ所以上に分散している場合には、分析可能な解析方法について

さらに詳細に検討することが必要であるといえる。なお、合計5ヶ所の空洞を通過する波線数は186波線(56%)である。

表-2 評価方法による解析値の違い

評価方法	分類	母数	平均 (km/s)	標準偏差 (km/s)
平均値評価	波線が通過するブロック	1909	4.662	0.022
	棄却されるブロック	62	4.608	0.010
	棄却されないブロック	1847	4.664	0.020
最大値評価	波線が通過するブロック	1909	4.682	0.026
	棄却されるブロック	42	4.615	0.011
	棄却されないブロック	1867	4.683	0.024

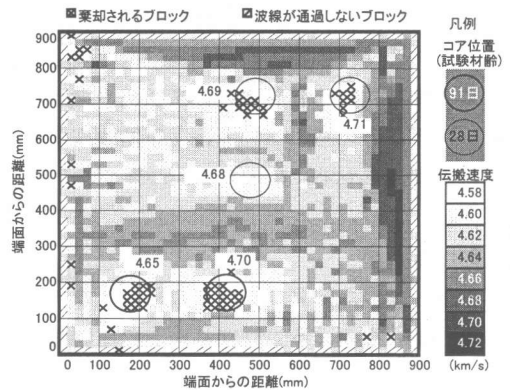


図-8 超音波伝搬速度の断面内推定分布状況(空洞5ヶ所:最大値評価)

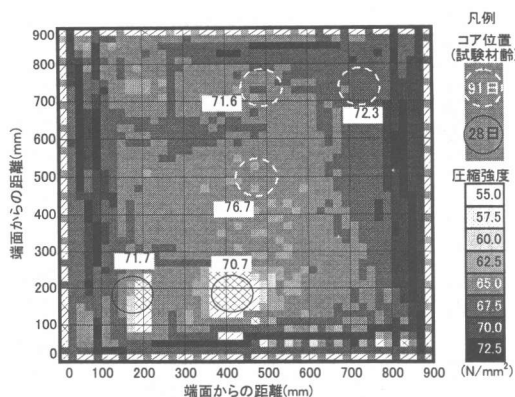


図-9 圧縮強度の分布状況(材齢 58 日)

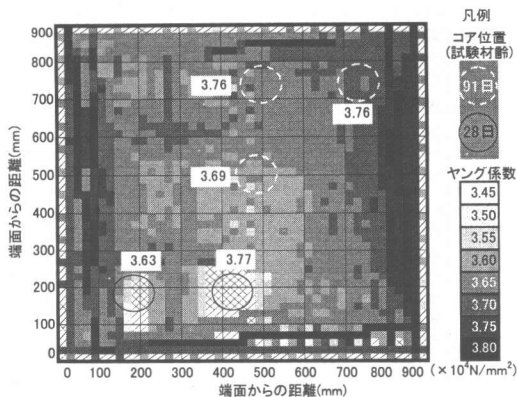


図-10 ヤング係数の分布状況(材齢 58 日)

4.3 断面内部の物性値の推定

図-9, 10に, 空洞が2ヶ所である場合について, 式(4)および式(6)を用いて推定した断面内の圧縮強度およびヤング係数の推定分布状況を示す。なお, 分布状況は最大値評価によるものであり, 図中に示した数値は材齢28日および91日のコアによる試験値である。

図-9, 10を総体的にみると, 断面内の物理的性質の分布状況は, 外周で大きく中心で小さく評価されていることが分かる。この傾向は, コアによるヤング係数の分布と一致している。さらに, 断面内のヤング係数推定値は, コアによる試験値とほぼ一致している。このことより, 超音波速度測定値のトモグラフィー法による最大値評価で, 断面内のヤング係数分布が推定できると考えられる。

一方, コアによる圧縮強度の分布は外周より中心で大きく, 推定分布状況と傾向が異なる。この要因には, 粗骨材量の分布状況や含水率の違いなどが考えられる。今後, 圧縮強度の推定精度を向上させるための検討が必要である。

5. まとめ

本研究で得た知見は, 以下のとおりである。

- 1) 40N/mm^2 を超えるコンクリートの圧縮強度推定式としては, 指数近似式が適切である。ヤング係数は一次回帰式を用いて推定できる。
- 2) 高強度コンクリートにおいても骨材量が超音

波伝搬速度に影響を及ぼす。

- 3) トモグラフィー法を用いて, コンクリート構造体の空洞を検出する場合, 空洞が3ヶ所以上に分散していると正しく評価されないことがあり, 今後分析が可能な解析方法について検討が必要である。
- 4) 超音波伝搬速度測定値をトモグラフィー法を用いて最大値評価することで, コンクリート断面内のヤング係数分布が推定できる。

なお, 本研究費の一部は, 平成12年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)によることを付記する。

参考文献

- 1) 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, 丸善, pp.28~75, 1983.2
- 2) 十代田知三, 野崎喜嗣, 小林幸一: 超音波法, 反発度法および複合法による強度推定式の提案とその有効性の検証 - 非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法(その3) -, 日本建築学会構造系論文集, 第458号, pp.1~9, 1994.4
- 3) 山下英俊, 堺孝司, 熊谷守晃, 喜多達夫: 実構造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集, Vol.22, No.1, pp.361~366, 2000.6
- 4) 日本建築学会近畿支部材料施工部会: 1995年兵庫県南部地震 材料・施工に関する被書調査報告書, pp.3~52, 1996.7
- 5) 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, pp.37~39, 1990.5
- 6) 谷川恭雄: 構造材料実験法, pp.87~89, pp.217~218, 森北出版, 1980.4