

超音波法を用いた構造物各部位におけるコンクリートの不均一性の評価

新潟大学大学院 学生会員 ○古澤潤 新潟大学工学部 正会員 佐伯竜彦
株式会社小野組 正会員 大野智也 株式会社ベーシック 正会員 鈴木章太

1. はじめに

コンクリート構造物は部位によって劣化の進行が異なる。これは、劣化作用と劣化抵抗性が部位によって不均一となるためであり、どのような部位で構造物の劣化抵抗性が低くなりやすいかを把握することで効率的な維持管理が行えると考えられる。過去の研究¹⁾では、劣化抵抗性が不均一になる要因として材料分離後のコンクリートの品質の不均一性に着目し、新潟県内で撤去された橋梁の各部材からコアを採取し調査を行った。その結果、同一構造物の同一部材中でも部位ごとで品質が異なり、それに伴い劣化抵抗性に不均一があることを確認することができた。しかし、コア採取のような破壊試験は、供用中の構造物に行うことが困難であり、さらなる検討のためのデータが不足しているのが現状である。

そこで本研究では、非破壊検査である超音波法を用いて、実構造物各部位における材料分離後の不均一性についての研究を行うこととした。具体的には、測定対象のコンクリートの超音波伝搬速度からの骨材体積率の推定手法を確立し、実構造物各部位の推定骨材体積率から材料分離の傾向・程度を評価した。

2. 骨材体積率の推定手法

本研究では、超音波伝搬速度から骨材体積率を推定する手法を提案した。以下に推定手順を示す。

まず、コンクリートの含水率を推定し、推定した含水率により超音波伝搬速度を補正する必要がある。これは、コンクリートの含水率が超音波伝搬速度に与える影響が大きく²⁾品質推定の精度を低下させる恐れがあるからである。本研究では、含水率と相関のある電気抵抗率を四電極法により測定し、測定値から含水率の推定をすることとした。電気抵抗率と含水率の関係³⁾を図-1に示す。左の図のように配合が異なると電気抵抗率と含水率の関係も異なることが確認できた。そこで、鈴木ら⁴⁾が提案した式(1)、(2)の電

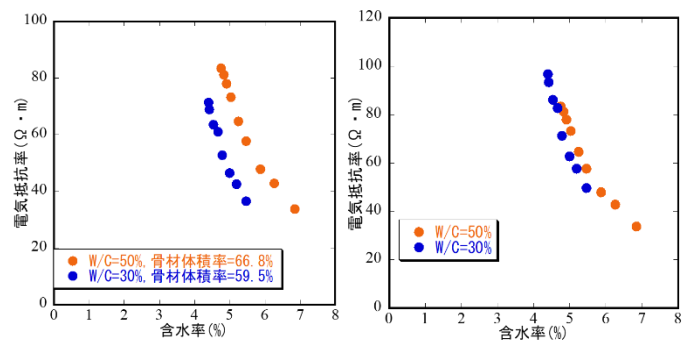


図-1 コンクリートの含水率と電気抵抗率

左図：異なる骨材体積率の含水率と電気抵抗率

右図：同一骨材体積率に換算した含水率と電気抵抗率

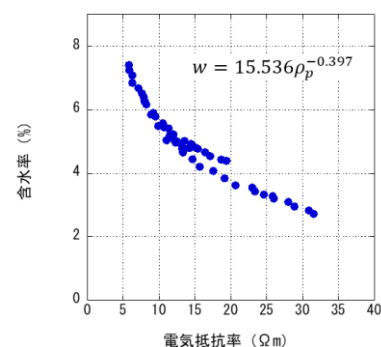


図-2 セメントペーストの含水率と電気抵抗率

気抵抗率の算出式を用いて、骨材体積率を 66.8%に換算した。なお、式(1)は普通ポルトランドセメント、式(2)は高炉スラグセメントが使用されたコンクリートでの電気抵抗率の算出式を表している。右の図のように、一つの近似曲線で表せることが確認できた。このことから、本研究ではまず測定対象のコンクリートの配合上の骨材体積率での含水率と電気抵抗率の関係式を作成することとした。具体的には、式(1)、(2)を用いてセメントペーストの含水率と電気抵抗率の関係式（図2）を求め、再度式(1)、(2)より測定対象の骨材体積率でのコンクリートの含水率と電気抵抗率の関係式を作成した。

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1 - \left(0.88 \cdot \frac{X}{0.769}\right)}{\rho_p} + \frac{\left(0.88 \cdot \frac{X}{0.769}\right)}{\rho_p \left(1 - \frac{0.769}{0.88}\right) + 8.0 \times 10^3 \cdot \frac{0.769}{0.88}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1 - \left(0.95 \cdot \frac{X}{0.769}\right)}{\rho_B} + \frac{\left(0.95 \cdot \frac{X}{0.769}\right)}{\rho_B \left(1 - \frac{0.769}{0.95}\right) + 8.0 \times 10^3 \cdot \frac{0.769}{0.95}} \quad (2)$$

ここに、 ρ_c ：コンクリートの電気抵抗率($\Omega \cdot m$)、 ρ_p ：普通ポルトランドセメントペーストの電気抵抗率($\Omega \cdot m$)、 ρ_B ：高炉セメントペーストの電気抵抗率($\Omega \cdot m$)、 X ：骨材体積率

$$v'_c = v_c + 81(6.5 - w) \quad (3)$$

ここに、 v'_c ：飽水状態の超音波伝搬速度(m/s)、 v_c ：含水率補正前の超音波伝搬速度(m/s)、 w ：含水率(%)

$$v_s = 3300\rho_s - 3670 \quad (4)$$

ここに、 ρ_s ：細骨材の表乾密度(g/cm³)、 v_s ：細骨材の超音波伝搬速度(m/s)

$$v_p = -31x + 5000 \quad (5)$$

ここに、 v_p ：セメントペーストの超音波伝搬速度(m/s)、 x ：水セメント比(%)

$$T_m = \frac{V_{s/m}}{v_s} + \frac{(1 - V_{s/m})}{v_p} \quad (6)$$

$$v_m = 1/T_m \quad (7)$$

ここに、 T_m ：モルタルの超音波伝搬時間(s)、 $V_{s/m}$ ：モルタル中の細骨材の割合、 v_s, v_p, v_m ：細骨材、セメントペースト、モルタルの超音波伝搬速度(m/s)、

$$v_G = 8000\rho_G - 15350 \quad (8)$$

ここに、 v_G ：粗骨材の超音波伝搬速度(m/s)、 ρ_G ：粗骨材の表乾密度(g/cm³)

$$T = \frac{L \cdot X}{v_G} + \frac{L \cdot (1 - X)}{v_m} \quad (9)$$

ここに、 T ：コンクリートの超音波伝搬時間(s)、 L ：伝搬経路長(m)、 v_G, v_m ：粗骨材、モルタルの超音波伝搬速度(m/s)、 X ：粗骨材体積率

推定された粗骨材体積率は、モルタル中の細骨材率が一定と仮定しているため、式(10)により骨材体積率が求まる。

$$V = X + (1 - X) \cdot V_{s/m} \quad (10)$$

ここに、 V ：骨材体積率

表-1 含水率に対する超音波伝搬速度の増加量

W/C(%)	含水率に対する超音波伝搬速度の増加量(m/s)
40	87w
50	81w
60	108w

次に作成した関係式から推定した含水率を用いて超音波伝搬速度を飽水状態の値に補正した。コンクリートの飽水状態での質量含水率を6.5%と仮定して、推定した含水率との差を求め、表-1の含水率と超音波伝搬速度の増加量の関係⁵⁾の中から測定対象のコンクリートの水セメント比に近いものを用いて、飽水状態の質量含水率と推定した含水率の差を代入して増加量を求めた。例として水セメント比50%のコンクリートの飽水状態の超音波伝搬速度の算出式を式(3)に示す。そして求めた増加量を元の測定値に足して飽水状態の値に補正した。なお、飽水状態を6.5%に仮定したのは、既往の研究⁵⁾の飽水状態の供試体の含水率が6.5%程度であったためである。

セメントと水の分離、モルタル中の細骨材の分離がないと仮定して、式(4)~(7)を用いて測定対象のモルタルの超音波伝搬速度を算出し、式(8)、(9)を用いて粗骨材体積率の推定を行った。なお、式(4)は岩石と超音波伝搬速度の関係をまとめた論文^{7,8,9)}から、式(5)は、水セメント比とセメントペーストの超音波伝搬速度をまとめた論文⁹⁾の測定値を基に定式化を行った。式(7)については、式(4)、(5)の超音波伝搬速度の算出式と式(7)の複合則を用いて、コンクリートの超音波伝搬速度と粗骨材体積率の関係についてまとめた論文^{10,11)}の測定値から粗骨材の超音波伝搬速度を逆算し、粗骨材の超音波伝搬速度の推定式とした。なお、これらの式は全てコンクリートが飽水状態の場合を対象とした式である。

含水率と電気抵抗率の関係式を作成した際、配合上の骨材体積率を用いているため、関係式から推定された骨材体積率とは一致しない場合がある。そこで、推定された骨材体積率を用いて再度、含水率と電気抵抗率の関係式を作成するところから計算をはじめ、先ほど求めた手法と同じように骨材体積率を推定する。この計算を繰り返すことで、骨材体積率の値が収束していく。最終的に、推定された骨材体積率と、含水率と電気抵抗率の関係式の作成の際に用いる骨材体積率が一致することで、骨材体積率の推定と関係式の作成における整合性を確保することができる。

表-2 模擬構造物の規格, 配合

呼び寸法 B×H(mm)	外幅 B0(mm)	外高 H0(mm)	有効長 L(mm)	厚さ(mm)			W/C (%)	s/a (%)	密度(g/cm ³)	
				T1	T2	T3			細骨材	粗骨材
1450×1500	2450	2300	3950	400	400	500	50.6	39.8	2.58	2.62

3. 模擬構造物への適用

本推定手法を用いて, 2025 年に打設されたボックスカルバートの模擬構造物を測定対象として, 骨材体積率の推定を行った. 測定位置を図 3 の青線で示す. 測定面は南北の壁の内面と外面の 4 面に対して行った. 測定箇所は, 高さ方向に 8 箇所(内面は 6 箇所)横方向は A から D の 4 箇所とした.

(1)測定方法

模擬構造物では, 表面走査法により超音波伝搬速度を, 四電極法により電気抵抗率を測定した. 表面走査法は, 一面に探触子を 2 つ押し当てて行う測定方法であり, 骨材分布や探触子間隔によって伝搬経路が変化する. 今回の測定は, 探触子間隔 500 mmで行ったため, 伝搬深さが 70 mm程度となっており, 伝搬経路長を弧長としてニュートンラプソン法により伝搬経路長が 500 mmと求まった. 四電極法の電極間隔は 50 mmであり, 測定深さは 50 mmとなっている. なお, 表面走査法の探触子間隔 500 mmであり, 四電極法の両端の電極間の距離が 150 mmであるため, 四電極法は各測定位置の 500 mmの側線内で 3 か所測定

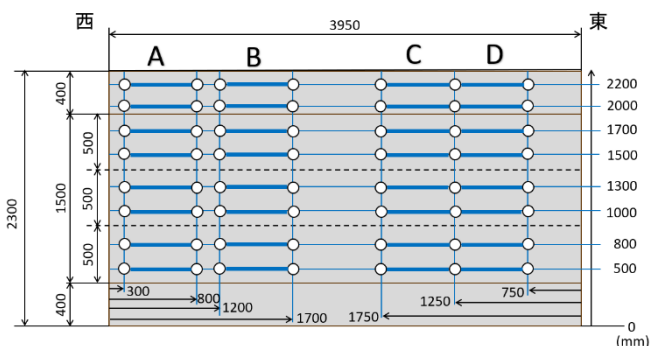


図-3 模擬構造物の測定位置

しその平均値を測定値として用いた.

(2)推定結果

図 4 に, 模擬構造物における推定結果の骨材体積率マップを示す. 全112箇所で行った測定を行い, 推定した骨材体積率の平均値は 70.9%であった. 一方, 配合条件から算出した骨材体積率は 69.6%であり, 誤差は 1.3%であった. 模擬構造物の広い範囲を対象として測定を行った結果, 各測定箇所から推定された骨材体積率の平均値が配合上の骨材体積率と近い値を示したことから, 本推定手法による骨材体積率の推定結果は概ね妥当であると考えられる.

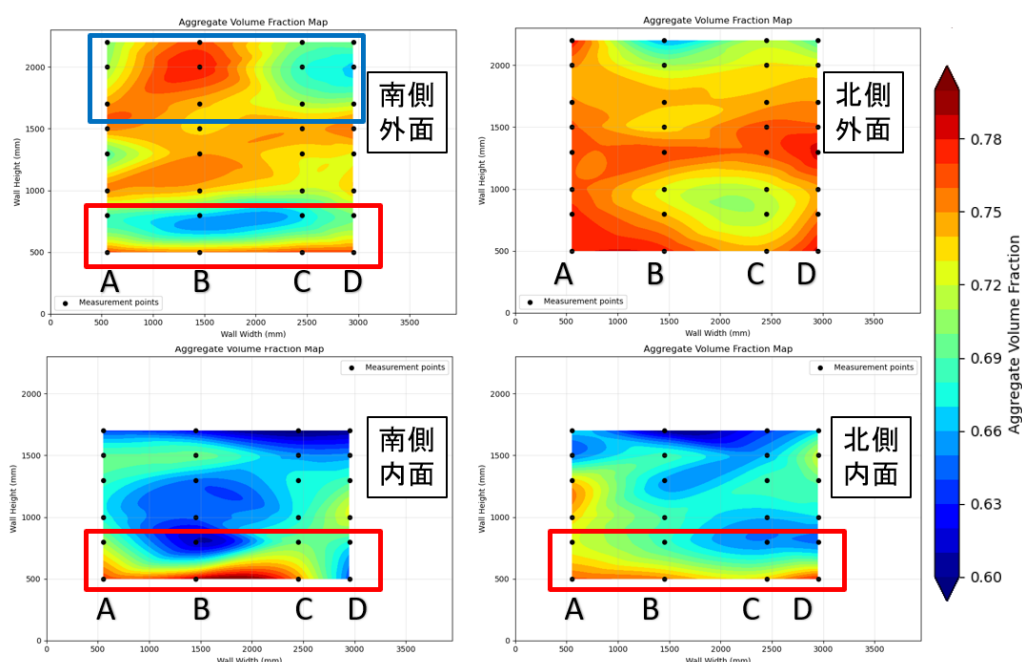


図-4 骨材体積率の推定結果

(3) 考察

各面の骨材体積率の傾向に着目すると、外面と比較して内面の骨材体積率が低い傾向がみられる。配筋図から、内面側では鉄筋が密に配置されていることが確認できる。このため、打設時にコンクリート中の骨材が鉄筋間を十分に通過せず、内面側における骨材体積率の分布が少なかった可能性が考えられる。

図4の赤枠で示した範囲は、打設時の1層分に相当する高さである。北側外面を除く各面では、下方で骨材体積率が高く、上方で低くなる傾向がみられる。このことから、打設時に骨材が鉛直方向に偏在し、材料分離が生じた可能性が考えられる。

また、図4の青枠で示した範囲に着目すると、同一高さにおいても水平方向に骨材体積率のばらつきがみられる。これは打設時にコンクリートが水平方向に十分に流動せず、骨材体積率の分布に偏りが生じたためと考えられる。

5. まとめ

電気抵抗率から推定した含水率を用いて補正した超音波伝搬速度から、構造物の各部位における骨材体積率を推定する手法を提案した。本推定手法を模擬構造物に適用した結果、模擬構造物内部の骨材体積率分布を推定することができ、材料分離の評価が可能であることを示した。

今後は、材料分離評価にとどまらず、推定した骨材体積率を用いた耐久性評価を行う。骨材は劣化因子の拡散を阻害するため、一般に骨材量の増加は耐久性の向上に寄与すると考えられる。一方、既往の研究¹¹⁾では、骨材量の増加に伴い、骨材とモルタルの界面に形成される遷移帯が物質移動特性に影響を及ぼす可能性が示されている。このため、骨材量の増加が必ずしも耐久性の向上につながるとは限らず、骨材量と耐久性の関係は単純ではないと考えられる。そこで、骨材体積率と耐久性の関係に着目し、非破壊試験に基づく耐久性評価手法の構築を目指す。

謝辞

本研究で、測定対象とした模擬構造物は、新潟コンクリート技術講習会（新潟県生コンクリート工業

組合、新潟生コンクリート協同組合主催）で作製したものであり、関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木章太, 佐伯竜彦, 斎藤豪: 実構造物における材料分離によるコンクリートの不均一性の調査, コンクリート工学年次論文集, 46 巻, 第 2 号, pp949~954, 2024
- 2) 鎌田敏郎, 内田慎哉: コンクリートの非破壊試験の理論と実際, コンクリート工学, Vol.51, No.4, pp.340~347, 2013.4
- 3) 福上大貴, 水越睦視, 松原三郎, 上松航星: コンクリートの電気抵抗率に関する基礎的研究
- 4) 鈴木三馨, 石田哲也: コンクリートの比抵抗モデルを用いた腐食レベルの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.755~760, 2019
- 5) 立見栄司: コンクリートの非破壊圧縮強度推定法の開発-コンクリートの含水率が弾性波速度に及ぼす影響-, 三井住友建設技術研究所報告 第 2 号, pp.105~111
- 6) 井上正康, 大見美智人, 菊田毅: 岩石の弾性波伝搬速度および弾性定数と含水の関係について(I), 応用地質 第 11 巻 第 4 号, pp.6~12, 1970.12
- 7) 飯塚進: 岩石資料の超音波速度測定, 地質調査所月報 第 26 巻 第 7 号, pp.31~39
- 8) Jingluo jiang, Dawei Zhang, Fuyuan Gong, DianZhi : Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity for Cement, Mortar, and Concrete through a Multiscale Homogenization Approach, Materials 2022, 15, 3241
- 9) 松土雄紀, 小俣貴洋, 満木泰郎, 溝渕利明: 超音波を用いたコンクリートの力学的特性の推定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010
- 10) 大西逸樹, 安澤朋也, 澤村秀治, 永島裕二: 擬似若材齢コンクリートの力学的特性と超音波速度に対する骨材の影響, 土木学会北海道支部 論文報告集 第 66 号, 2009
- 11) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也: コンクリートの気体拡散係数への骨材量の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, 17-22, 2001