

ポルトランドセメントペースト硬化体の弾性波速度の推定

東北学院大学工学部 学生員 大沼 克典
東北学院大学工学部 齊藤 大志
東北学院大学工学部 フェロー会員 遠藤 孝夫

1. はじめに

既設コンクリートダム の長期安全性を照査するためには、ダムを構成しているコンクリートの力学特性を正確に評価する必要がある。その目的でクリープ試験が実施されてきた。しかし、ヤング係数やポアソン比の経時変化についての研究は少ないと思われる。

そこで本研究では、コンクリートダム の安全性評価確立に資するため、既往の実験結果をもとにセメントペーストのヤング係数評価に用いられる弾性波速度（P波とS波の伝播速度）の推定式算出を試みる。

2. セメントペーストのヤング係数の推定法

河角¹⁾によれば、セメントペーストの静ヤング係数、静ポアソン比を求めるため、まず動ヤング係数、動ポアソン比を求めているが、これらはセメントペーストのP波とS波の伝播速度より算定される。河角は、中庸熱ポルトランドセメントペーストについて、水中養生した場合のP波とS波の伝播速度の算定式を実験より定めているが、密封養生した場合については示していない。そこで、ここでは河角のデータより、密封養生したセメントペーストの弾性波速度式の算定を試みる。

2.1 河角の研究¹⁾

水中養生した中庸熱ポルトランドセメントペースト硬化体の超音波伝播速度（パルス速度）は河角によれば以下の式で求められる。

$$V_p / COEF = 4924.18 - 5729.98 \phi_l - 4283.04 \phi_g \quad (m/s) \quad (1)$$

$$V_s / COEF = 2610.15 - 3513.92 \phi_l - 1927.00 \phi_g \quad (m/s) \quad (2)$$

$$COEF = \left[1 + \left(\frac{1-D}{1+\gamma} \right) \left(\frac{\gamma-W/C}{D+W/C} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$D = \rho_w / \rho_c \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi_l(t) &= \frac{W - W_B}{\rho_w} = \frac{W - \gamma \cdot C_H(t)}{\rho_w} \\ &= \frac{W - \gamma \cdot R_H(t) \cdot C}{\rho_w} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_H(t)}{C} &= R_H(t) \\ &= \frac{1 - \exp\{(\gamma \cdot C - W) k_0 t^{1-n}\}}{1 - \gamma(C/W) \exp\{(\gamma \cdot C - W) k_0 t^{1-n}\}}, (W/C \neq \gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、

V_p : 縦波（P波）の伝播速度（m/s）

V_s : 横波（S波）の伝播速度（m/s）

γ : セメントの完全結合水量＝すなわちセメント

1kgを完全に水和させるのに必要な水の質量（kg/kg）

W : セメントペースト 1m³ 当たりの水の質量（kg/m³）

C : セメントペースト 1m³ 当たりのセメントの質量（kg/m³）

ρ_w : 水の質量（kg/m³）

ρ_c : セメントの密度（kg/m³）

$W_B(t)$: 材齢 t 日において、1m³ のセメントペースト中でセメントに結合している（水和している）水の質量（kg/m³）

ϕ_l : セメントペースト 1m³ 中の液体としての水の体積（m³/m³）

ϕ_g : セメントペースト 1m³ 中の空気の体積（m³/m³）

$C_H(t)$: 材齢 t 日において、1m³ のセメントペースト中で水和しているセメントの質量（kg/m³）

$R_H(t)$: 全体のセメントに対して材齢 t 日における水和したセメントの重量比（kg/m³/kg/m³）

k_0, n : セメントの種類と養生条件により定まる定数

2.2 セメントペーストのS波速度とP波速度の算定式

河角は中庸熱ポルトランドセメントの水セメント比を 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50, 0.55 と変化させ、材齢を 7 日から 732 日までの密封養生したセメント硬

キーワード：ダムコンクリート、ヤング係数、複合理論、セメントペースト

連絡先：〒985-8537 多賀城市中央一丁目 13-1 東北学院大学工学部 遠藤孝夫研究室 TEL 022-368-7390

化体の動ヤング係数と動ポアソン比を表示している。
この実験結果²⁾を基に、試験体の動（パルス）ヤング係数、動（パルス）ポアソン比、密度より、P 波速度（ V_p ）と S 波速度（ V_s ）を算定するとともに、河角の方法にならない水和水量を計算し硬化ペースト内の未水和水量（ ϕ_l ）を求め、この未水和水量と V_p / COEF および V_s / COEF との関係を求める。本来ならペースト中の空気量についても考察すべきであるが、密封養生の結果では空気量の計測値が示されていないため、やむなく上記の未水和水量のみをパラメータとした。この結果を図 1 と以下に示す。

$$V_p / \text{COEF} = 4660 - 5733\phi_l \quad (\text{m/s}) \quad (7)$$

$$V_s / \text{COEF} = 2393 - 3049\phi_l \quad (\text{m/s}) \quad (8)$$

この場合の決定係数は、それぞれ 0.818 と 0.849 であった。またここでは、 $\gamma = 0.37$, $k_0 = 0.0009168$, $n = 0.6111$ を用いた。

比較のために、水中養生を行った場合についても未水和水量のみをパラメータとして表示すると図 1 と以下のように表示される。

$$V_p / \text{COEF} = 5346 - 8196\phi_l \quad (\text{m/s}) \quad (9)$$

$$V_s / \text{COEF} = 2831 - 4681\phi_l \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

この場合の決定係数は、それぞれ 0.928 と 0.900 であった。これらをもとに動ヤング係数 $E_d (\text{N/mm}^2)$ と動ポアソン比 ν_d がもとまれば、以下の式により静ヤング係数と静ポアソン比がもとめられる²⁾。

$$E_{SP} = 0.001628 \times (E_d / 0.09807)^{1.315} \quad (11)$$

$$\nu_{SP} = \nu_d / 1.212 \quad (12)$$

ここに、 E_{SP} ：静ヤング係数(N/mm^2)

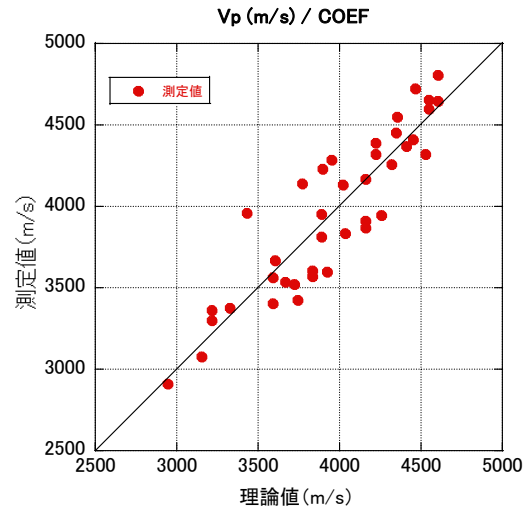
ν_{SP} ：静ポアソン比

3. まとめ

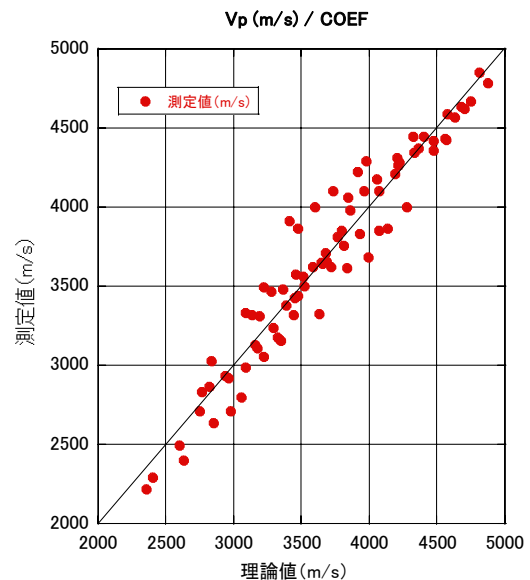
中庸熱ポルトランドセメントペーストで密封養生した場合のヤング係数とポアソン比を算定するために必要な、P 波と S 波の伝播速度の推定式を既往の実験結果より未水和水量をパラメータとして求めることを試みた。この結果は、今後さらなる検証が必要であるが、これらによって、任意の水セメント比と任意の材齢における中庸熱ポルトランドセメントペーストで密封および水中養生した場合の弾性波速度、動ヤング係数、動ポアソン比、静ヤング係数、静ポアソン比が算定できることになった。

今後は、精度の検証と適用法について検討したい。

本研究では電力中央研究所の貴重なデータを使わせ



(a)密封養生したペーストの P 波速度



(b)水中養生したペーストの P 波速度

図 1 P 波速度（ V_p ）の当てはめ

て頂いた。また、本研究の一部は、2007-2009 年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C））（代表者 遠藤孝夫）の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 河角 誠：コンクリートのクリープ予測式における瞬間ひずみ成分の決定—任意の配合・材令におけるセメント・ペーストの静弾性定数の予測—，電力中央研究所報告，研究報告 U93043(1994.3)
- 2) 河角 誠：コンクリートのクリープ予測式における瞬間ひずみ成分の決定—セメント・ペーストの動弾性定数と静弾性定数の関係—，電力中央研究所報告，研究報告 U92004(1992.7)