セメントペーストの水和度に基づくダムコンクリートのヤング係数推定法の検討

東北学院大学工学部　学生員　及川　義己
東北学院大学工学部　安達　一樹
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．

そこで本研究では，既設ダムコンクリートのヤング係数を合理的に算定する手法を見いだす目的で，コンクリートを二相構造と考え，中庸熱ポルトランドセメントペーストのヤング係数と骨材のヤング係数をもとにコンクリートのヤング係数の推定を試みた．

2．セメントペーストのヤング係数の推定法

河角 [1),2)]は，セメントペースト固化体の P 波と S 波から動（パルス・）ヤング係数と動（パルス・）ポアソン比を求め，この両者より静ヤング係数と静ポアソン比を求めている．中庸熱ポルトランドセメントペーストの超音波伝播速度（パルス速度）は以下の式で求められる．

$$V_P / COEF = 4924.18 - 5729.98\phi_l - 4283.04\phi_g \quad (m/s) \tag{1}$$

$$V_S / COEF = 2610.15 - 3513.92\phi_l - 1927.00\phi_g \quad (m/s) \tag{2}$$

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

$$D = \rho_W / \rho_C \tag{4}$$

$$\phi_l(t) = \frac{W - W_B}{\rho_W} = \frac{W - \gamma \cdot C_H(t)}{\rho_W} = \frac{W - \gamma \cdot R_H(t) \cdot C}{\rho_W} \tag{5}$$

$$\frac{C_H(t)}{C} = R_H(t) = \frac{1 - \exp\left\{(\gamma \cdot C - W) k_0 t^{1-n}\right\}}{1 - \gamma (C/W) \exp\left\{(\gamma \cdot C - W) k_0 t^{1-n}\right\}}, (W/C \neq \gamma) \tag{6}$$

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 1m^3 当たりの水の質量 (kg/m^3)

C ：セメントペースト 1m^3 当たりのセメントの質量 (kg/m^3)

ρ_W ：水の質量（kg/m^3）

ρ_C ：セメントの密度（kg/m^3）

$W_B(t)$ ：材齢 t 日において，1m^3 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/m^3）

ϕ_l ：セメントペースト 1m^3 中の液体としての水の体積（m^3/m^3）

ϕ_g ：セメントペースト 1m^3 中の空気の体積（m^3/m^3）

$C_H(t)$ ：材齢 t 日において，1m^3 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/m^3)

$R_H(t)$ ：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/m^3/kg/m^3）

k_0, n ：セメントの種類と養生条件により定まる定数

2.1　セメントペーストの動ヤング係数

パルス速度が求まると，以下の式により動ヤング係数と動ポアソン比が求められる．

$$E_d = 2(1+\nu_d) \cdot \rho \cdot V_S^2 \times 10^{-7} \quad (N/mm^2) \tag{7}$$

$$\nu_d = \left\{(V_P/V_S)^2 - 2\right\} / 2\left\{(V_P/V_S)^2 - 1\right\} \tag{8}$$

ここに，E_d ：動ヤング係数（N/mm^2）

ρ ：媒体の密度（g/cm^3）

ν_d ：動ポアソン比

V_P ：縦波（ P 波）の伝播速度（cm/s）

V_S ：横波（ S 波）の伝播速度（cm/s）

2.2　セメントペーストの静ヤング係数

河角によれば静ヤング係数（E_{SP} ）と静ポアソン比（ν_{SP} ）は次式で求められる．

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

$$E_{SP} = 0.001628 \times (E_d / 0.09807)^{1.315} \quad (9)$$

$$\nu_{SP} = \nu_d / 1.212 \quad (10)$$

2.3 骨材のヤング係数

細骨材と粗骨材のヤング係数の算定は，吸水率に基づく次式を採用した．

$$\left.\begin{matrix} E_{sa} \\ E_{ga} \end{matrix}\right\} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4 \ (N/mm^2) \quad (11)$$

ここに，

E_{sa}, E_{ga} ：細骨材あるいは粗骨材のヤング係数(N/mm)

μ ：細骨材あるいは粗骨材の吸水率（%）

これらをもとに，細骨材と粗骨材をあわせた骨材全体のヤング係数（E_a）は，細骨材および粗骨材の絶対容積比を用いた次式で表される．

$$E_a = S_a \cdot E_{sa} + (1 - S_a) \cdot E_{ga} \quad (12)$$

ここに，

S_a ：細骨材絶対容積の全骨材絶対容積に対する比率

2.4 コンクリートのヤング係数の算定法

コンクリートが二相モデルで表されるという仮定に基づいて得られた複合理論式のうち，ここではHashin-Hansen の式にモルタルと骨材の界面に生じるマイクロクラックおよび骨材の境界層の影響に対し，見かけ上骨材のヤング係数が低下すると考え，補正係数を導入した次式を用いることとした．

$$E_C = E_{sp} \cdot \frac{(1 - V_a)E_{sp} + (1 + V_a)(k \cdot E_a)}{(1 + V_a)E_{sp} + (1 - V_a)(k \cdot E_a)} \quad (13)$$

ここに，E_C ：コンクリートのヤング係数(N/mm^2)

E_{sp} ：セメントペーストのヤング係数（N/mm^2）

E_a ：骨材のヤング係数（N/mm^2）

V_a ：骨材の容積比，k ：補正係数

３．既設ダムコンクリートのヤング係数の算定

ここでは，中庸熱ポルトランドセメントを用いた黒部ダム，殿山ダム [3]および一ツ瀬ダムのコンクリートを選んだ．なお，一ツ瀬ダムでは結合材の一部としてフライアッシュを用いている．これらを対象として，セメントペーストと骨材のヤング率より算定したコンクリートのヤング係数と実測値とを比較する．

なお，ここでは $k_0 = 0.0009168$，$n = 0.6111$ を用いた．また，E_{sp}/E_a と k との関係をもとに以下のような回帰式を求めた．

黒部ダム　$k = 0.235 + 1.16 \cdot E_{SP}/E_a$　(14)

殿山ダム　$k = 0.071 + 2.03 \cdot E_{SP}/E_a$　(15)

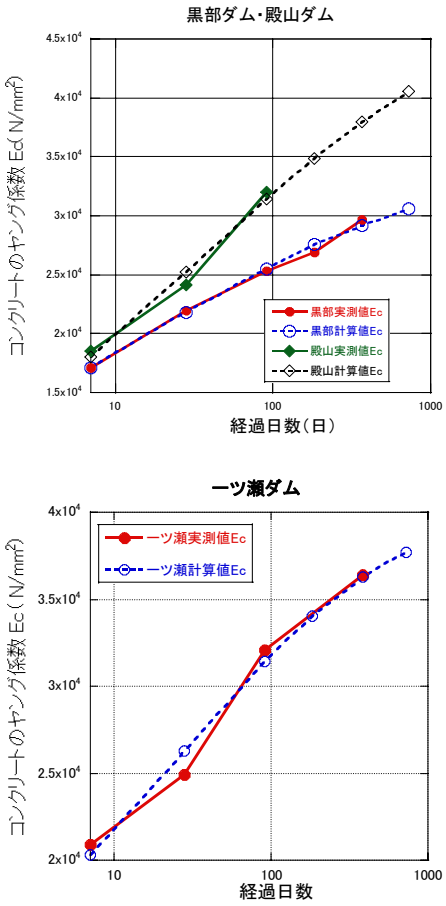

図- 1　コンクリートのヤング係数の比較

一ツ瀬ダム　$k = 0.247 + 3.40 \cdot E_{SP}/E_a$　(16)

これらの k の値と式(13)を用いて算定したコンクリートの静ヤング係数と実測値を図- 1 に示す．

４．結論

中庸熱ポルトランドセメントペーストのヤング係数と骨材のヤング係数をもとに Hashin-Hansen の式でコンクリートのヤング係数の推定を試みた．この結果，実測値と計算値がほぼ近似し，本手法でコンクリートの長期的なヤング係数算定の可能性が示された．

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ー任意の配合・材令におけるセメント・ペーストの静弾性定数の予測ー，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ーセメント・ペーストの動弾性定数と静弾性定数の関係ー，電力中央研究所報告，研究報告　U92004，1992

3) 渡邊克樹他：ダムコンクリートのヤング係数推定法の提案，平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，V-37，2010