

# 論文 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

遠藤 孝夫\*1・李 相勲\*2・熊谷 崇之\*3

**要旨:** 既設コンクリートダムの地震時安全性を照査するためには、コンクリートの諸特性を合理的に定める必要がある。ここでは中庸熟ポルトランドセメントを用いた既設ダムコンクリートのヤング係数を対象とし、コンクリートをセメントペーストと骨材よりなる二相構造と考え、複合理論によりヤング係数を推定することを試みた。すなわちセメントペーストのヤング係数はセメントの水和度から、また骨材のヤング係数は吸水率より求めるものとした。この結果、コンクリートのヤング係数が実測してある場合については、ここで試みた方法が適用できる可能性のあることが示された。

**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, 水和度

## 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震においてダムはほとんど無傷であったため、ダムがどのような地震動まで耐えられるかという問題は依然残ったままである。今後、コンクリートダムの保守管理を適切に行うためには、想定される地震入力に対する挙動を予測し、必要な対策を講じておくことが肝要であろう。地震時挙動を予測する際には、通常は計算上の初期応力として考える常時荷重に対する応力が精度良く推定されていることが大切である。この計算では、特に建設後数年間のコンクリートの諸特性を正しく設定できるかどうか、地震時安全性評価に大きく影響を及ぼすと考えられる。水力発電用のダムを考えるとコンクリートの諸特性のうちクリープ特性については既報告がある<sup>1),2),3)</sup>。しかし、コンクリートのヤング係数についてはほとんど研究がなされていない。

本論文は、前報<sup>4)</sup>に続き既設ダムコンクリートのヤング係数の推定を複合理論により試みるものである。

## 2. 方法

既設ダムコンクリートのヤング係数を求める際、セメントペーストについては実験結果があることを念頭に、コンクリートをセメントペーストと骨材の二相材料と仮定した。セメントペーストのヤング係数は河角の方法<sup>5),6)</sup>、骨材のヤング係数は骨材の吸水率に基づく方法<sup>7)</sup>で求めることとした。以下に詳細を述べる。

### 2.1 セメントペーストのヤング係数の算定法

河角<sup>5),6)</sup>は、中庸熟セメントを用いて水中養生したセメントペーストのヤング係数の算定法を示している。この方法は、セメントペーストのP波とS波の伝播速度を測定し、これより動(パルス)ヤング係数と動(パルス)

ポアソン比を求め、これよりセメントペーストのヤング係数を求めるものである。

#### (1) 河角の研究概要

水セメント比(w/c)が0.25から0.55までの7種類の配合の中庸熟ポルトランドセメントペーストで作ったφ5×10 cm 供試体についてパルス法によるP波とS波の伝播速度( $V_p$ ,  $V_s$ )を3日から2年にわたる種々の材齢において測定し、あらかじめ導いておいた水和を考慮した空隙と水分を含んだセメントペースト内の超音波伝播速度を表す理論式に当てはめ、任意の配合と材齢において $V_p$ と $V_s$ を求める式を得た<sup>5)</sup>。次に、この $V_p$ と $V_s$ からセメントペーストの動ヤング係数、動ポアソン比を求めた。その後、実験で別に求めておいたセメントペーストの動ヤング係数とヤング係数の関係、動ポアソン比とポアソン比の関係よりヤング係数とポアソン比を求めている<sup>6)</sup>。

#### (2) セメントペーストの超音波伝播速度(パルス速度)

河角は水中養生した中庸熟ポルトランドセメントペーストの両端にセラミック振動子を用いて超音波パルスを発生させ、試料内を伝播する弾性波の伝播速度を求め、以下の式で表した<sup>5)</sup>。

$$V_p / COEF = 4924 .18 - 5729 .98 \phi_l - 4283 .04 \phi_g \quad (m / s) \quad (1)$$

$$V_s / COEF = 2610 .15 - 3513 .92 \phi_l - 1927 .00 \phi_g \quad (m / s) \quad (2)$$

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

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

\*1 東北学院大学 工学部環境建設工学科教授 博(工) (正会員)

\*2 東北学院大学 工学部環境建設工学科准教授 博(工) (正会員)

\*3 東北学院大学 大学院工学研究科土木工学専攻

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

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

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 )

$\gamma$  : 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<sup>3</sup> 当たりの水の質量 ( kg/m<sup>3</sup> )

$C$  : セメントペースト 1m<sup>3</sup> 当たりのセメントの質量 ( kg/m<sup>3</sup> )

$\rho_w$  : 水の質量 ( kg/m<sup>3</sup> )

$\rho_C$  : セメントの密度 ( kg/m<sup>3</sup> )

$W_B(t)$  : 材齢  $t$  日において、1m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> )

$\phi_l$  : セメントペースト 1m<sup>3</sup> 中の液体としての水の体積 ( m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> )

$\phi_g$  : セメントペースト 1m<sup>3</sup> 中の空気の体積 ( m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> )

$C_H(t)$  : 材齢  $t$  日において、1m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> )

$R_H(t)$  : 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<sup>3</sup>/kg/m<sup>3</sup> )

$k_0, n$  : セメントの種類と養生条件により定まる定数  
なお、式 (1) は弾性固体内の間隙と水を考慮して導かれた弾性波速度式をセメントペーストに当てはめたものであり<sup>5)</sup>、式 (6) は水和したセメントの生成速度が未水和のセメントと未水和水の体積濃度の積に比例すると仮定して導かれたものである<sup>1)</sup>。

### (3) セメントペーストの動ヤング係数

超音波伝播速度が求まると、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。

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

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

ここに、

$E_d$  : 動ヤング係数 ( N/mm<sup>2</sup> )

$\rho$  : 媒体の密度 ( g/cm<sup>3</sup> )

$\nu_d$  : 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 )

### (4) セメントペーストのヤング係数

河角によれば、セメントペーストの動ヤング係数と動ポアソン比よりヤング係数 ( $E_{SP}$ ) とポアソン比 ( $\nu_{SP}$ ) は次式で求められる<sup>6)</sup>。

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

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

ここに、

$E_{SP}$  : セメントペーストのヤング係数 ( N/mm<sup>2</sup> )

$\nu_{SP}$  : セメントペーストのポアソン比

## 2.2 骨材のヤング係数の算定法

骨材のヤング係数は、コンクリートのヤング係数に大きく影響を及ぼすと考えられるが実際にはその値は曖昧である。そこで、骨材の何らかの普遍的な特性とヤング係数を結びつけるデータが必要となってくる。ここでは、文献7)による吸水率に基づく次式を採用することとした。

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

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<sup>2</sup> )

$\mu$  : 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

## 2.3 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

表-1 コンクリートの示方配合

ダム名	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラン プ(cm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%)	細骨材 率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (AE 剤)
黒部	180	2~4	47	3~4	20	85	85	434	1722	0.375
殿山	80	2~4	42	1.5~2.5	30	92	92	629	1491	0.440
大美谷	80	2.5~4.5	49.1	2.5~4.5	27.2	113	113	568	1528	0.115
奥新冠	100	3~5	43	4~5	25.6	105	105	573	1671	—

表-2 40mm 湿式フルイ別けに換算したコンクリートの配合

ダム名	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	空気量 (%) (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	細骨材 率(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					セメン トの密 度 (g/cm <sup>3</sup> )
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (AE 剤)	
黒部	40	47	6.4 (0.064)	45.7	143 (0.143)	304 (0.095)	836 (0.322)	992 (0.376)	0.705	3.20
殿山	40	42	2.6 (0.026)	41.3	119.4 (0.119)	285.5 (0.090)	816.2 (0.319)	1,161.9 (0.446)	0.571	3.19
大美谷	40	49.1	5.38 (0.054)	36.4	140.5 (0.141)	286.0 (0.090)	706.4 (0.263)	1,235.2 (0.452)	0.143	3.19
奥新冠	40	43	4~5	25.6	105	245	573	1,671	—	3.19

\*表中の ( ) 内はコンクリート 1m<sup>3</sup> 中の各容積 (m<sup>3</sup>) を示す

入した次式<sup>4)</sup>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<sup>2</sup>)
- $E_{sp}$  : セメントペーストのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $E_a$  : 骨材のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $V_a$  : 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、中庸熟ポルトランドセメントを用いたダムとして、既設のアーチダムである黒部ダム、殿山ダム、大美谷ダムおよび奥新冠ダムのコンクリートを選んだ<sup>1),2),3)</sup>。これらのコンクリートを対象として、セメントペーストと骨材のヤング係数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し、ここで述べた手法の適応性を検討する。

表-3 40mm 湿式フルイ別け後のコンクリートの物理特性

ダム名	材齢 t (日)	ヤング係 数(N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
黒部	7	17,100	20.4
	28	22,000	33.4
	91	25,300	43.4
	183	26,900	46.1
殿山	365	29,700	48.5
	7	18,500	25.5
	28	24,100	37.3
大美谷	91	32,000	48.9
	7	27,300	15.2
	28	30,200	28.6
	91	35,200	33.7
奥新冠	183	40,800	36.4
	365	41,100	36.1
	7	23,700	25.5
	28	28,200	40.6
奥新冠	91	29,900	46.4

表-4 セメントペーストの密度

ダム名	セメントペースト 1m <sup>3</sup> 当たり		
	W(kg/m <sup>3</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )	密度 ρ(g/cm <sup>3</sup> )
黒部	600.8	1277.3	1.8781
殿山	571.6	1366.7	1.9383
大美谷	610.5	1242.6	1.8531
奥新冠	574.5	1357.4	1.9319

表-5 セメントペーストの水和度，弾性波速度

ダム名	t* (日)	R <sub>H</sub> (t)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)
黒部	7	0.5716	3,132	1,497
	28	0.7155	3,535	1,744
	91	0.8201	3,827	1,924
	183	0.8708	3,969	2,011
	366	0.9121	4,085	2,082
	730	0.9441	4,175	2,137
殿山	7	0.5438	3,279	1,595
	28	0.6818	3,686	1,844
	91	0.7837	3,986	2,028
	183	0.8344	4,136	2,120
	366	0.8768	4,261	2,196
	730	0.9118	4,364	2,260
大美谷	7	0.5811	3,076	1,460
	28	0.7268	3,475	1,705
	91	0.8319	3,763	1,882
	183	0.8820	3,900	1,966
	364	0.9223	4,011	2,033
	730	0.9531	4,095	2,085
奥新冠	7	0.5466	3,265	1,585
	28	0.6853	3,672	1,834
	91	0.7876	3,972	2,018
	183	0.8384	4,120	2,110
	366	0.8806	4,244	2,186
	730	0.9156	4,347	2,248

t\* : 材齢

### 3.1 ダムコンクリートの配合とヤング係数

黒部ダム，殿山ダム，大美谷ダムおよび奥新冠ダムに用いられたコンクリートの示方配合を表-1に，これらのコンクリートを40mm湿式フルイわけしたものに換算したコンクリートの配合を表-2に，さらに硬化コンクリートの物理特性を表-3に示す。表-3のデータは，実験室で養生された試験体より得られたものである<sup>2),3)</sup>。

表-6 セメントペーストのポアソン比とヤング係数の計算値

ダム名	t* (日)	ν <sub>d</sub>	E <sub>d</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>sp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ν <sub>sp</sub>
黒部	7	0.3519	11,390	7,400	0.290
	28	0.3391	15,310	11,000	0.280
	91	0.3310	18,520	14,100	0.273
	183	0.3274	20,180	15,800	0.270
	366	0.3246	21,580	17,200	0.268
	730	0.3225	22,660	18,400	0.266
殿山	7	0.3452	13,270	9,100	0.285
	28	0.3331	17,590	13,200	0.275
	91	0.3254	21,160	16,800	0.268
	183	0.3219	23,050	18,800	0.266
	366	0.3191	24,690	20,600	0.263
	730	0.3168	26,080	22,100	0.261
大美谷	7	0.3545	10,700	6,900	0.293
	28	0.3415	14,450	10,200	0.282
	91	0.3333	17,490	13,100	0.275
	183	0.3297	19,040	14,600	0.272
	364	0.3270	20,340	16,000	0.270
	730	0.3250	21,350	17,000	0.268
奥新冠	7	0.3458	13,060	8,900	0.285
	28	0.3337	17,340	12,900	0.275
	91	0.3259	20,870	16,500	0.269
	183	0.3224	22,740	18,500	0.266
	366	0.3196	24,350	20,200	0.264
	730	0.3174	25,730	21,800	0.262

t\* : 材齢

### 3.2 セメントペーストと骨材のヤング係数の算定

これらのデータをもとに，各ダムのコンクリートにおけるセメントペースト1m<sup>3</sup>中のセメント量，水量および密度を求めると表-4のようになる。これらをもとに，R<sub>H</sub>(t)，V<sub>p</sub>，V<sub>s</sub> 求めると表-5が得られる。なお，ここでは中庸熱ポルトランドセメントの試験結果を示した文献1)より，γ=0.37，k<sub>0</sub>=0.0009168，n=0.6111を用い，φ<sub>g</sub>=0と仮定した。さらに，式(7)より式(10)まで用いると，表-6の結果が得られる。次に，使用した骨材の特性を表-7に示す。骨材の吸水率を基に，式(11)と式(12)より骨材全体のヤング係数が表-8のように求められる。またこの表には，骨材の容積比も示した。ここでV<sub>m</sub>，V<sub>a</sub>はそれぞれ全容積に対する母材（セメントペースト）と骨材の容積比である。

表-7 骨材の特性

ダム名	細骨材			粗骨材		
	吸水率(%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	岩質	吸水率(%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	岩質
黒部	0.6	2.59	花崗岩	0.7	2.64	花崗岩
殿山	2.6	2.56	砂岩, 頁岩, 細礫岩	1.5	2.6	砂岩, 頁岩, 細礫岩
大美谷	1.9	2.68	砂岩, 輝緑凝灰岩	1.1	2.73	砂岩, 輝緑凝灰岩
奥新冠	1.39	2.85	角閃石, 粘板岩, 片麻岩	0.74	2.92	角閃石, 片麻岩

表-8 骨材のヤング係数

ダム名	細骨材のヤング係数 Esa(N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材のヤング係数 Esg(N/mm <sup>2</sup> )	細骨材の絶対容積 Vsa(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	粗骨材の絶対容積 Vsg(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	S <sub>a</sub>	骨材全体のヤング係数 Ea(N/mm <sup>2</sup> )	母材容積比 V <sub>m</sub>	骨材容積比 V <sub>a</sub>
黒部	64,600	62,500	0.322	0.376	0.4613	63,500	0.238	0.762
殿山	46,800	52,900	0.319	0.446	0.4170	50,300	0.209	0.791
大美谷	50,100	56,600	0.263	0.452	0.3678	54,200	0.231	0.769
奥新冠	53,700	61,700	0.280	0.404	0.4089	58,400	0.254	0.746

3.3 コンクリートのヤング係数の算定

これらの結果をもとに式(13)によりコンクリートのヤング係数を求める事になる。ここで  $k$  の値を決める必要がある。清原ら<sup>7)</sup>は、 $k$  を一定とした場合 0.87 を最適としている。この値を用いて計算を行ったが、実測値とよい対応は得られなかった。係数  $k$  に影響する因子として  $V_m/V_a$  や  $E_{sp}/E_a$  が考えられる。 $V_m$  は四つのダムコンクリートでは 0.21~0.25 程度でほぼ同じと考えられるため、ここでは  $E_{sp}/E_a$  と  $k$  との関係をもとに以下のような回帰式を求めた。

$$\text{黒部ダム} \quad k = 0.235 + 1.16 \cdot \frac{E_{sp}}{E_a} \quad (14)$$

$$\text{殿山ダム} \quad k = 0.071 + 2.03 \cdot \frac{E_{sp}}{E_a} \quad (15)$$

$$\text{大美谷ダム} \quad k = 0.823 + 0.825 \cdot \frac{E_{sp}}{E_a} \quad (16)$$

$$\text{奥新冠ダム} \quad k = 0.618 + 0.109 \cdot \frac{E_{sp}}{E_a} \quad (17)$$

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ヤング係数と実測値を表-7 と図-1 に示す。これらから、大美谷ダムではヤング係数の経時変化が他のダムと異なるとともに計算値と実測値の間に若干の相違が見られるが、その他はヤング係数の計算値と実測値がほぼ近似していることが示された。

表-9 コンクリートのヤング係数の計算値

ダム名	材齢 t(日)	E <sub>sp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	k	Ec(c) <sup>*1</sup>	Ec(e) <sup>*2</sup>
黒部	7	7,400	0.370	17,100	17,100
	28	11,000	0.436	21,800	22,000
	91	14,100	0.493	25,500	25,300
	183	15,800	0.524	27,600	26,900
殿山	7	9,100	0.440	18,000	18,500
	28	13,200	0.604	25,200	24,100
	91	16,800	0.749	31,400	32,000
	366	17,200	0.549	29,200	29,700
大美谷	7	6,900	0.928	26,200	27,300
	28	10,200	0.978	32,400	30,200
	91	13,100	1.022	36,800	35,200
	182	14,600	1.045	38,900	40,800
奥新冠	364	16,000	1.067	40,700	41,100
	7	8,900	0.635	23,900	23,700
	28	12,900	0.642	27,700	28,200
	91	16,500	0.649	30,200	29,900

Ec(c)<sup>\*1</sup> : Ec の計算値(N/mm<sup>2</sup>),

Ec(e)<sup>\*2</sup> : Ec の実測値(N/mm<sup>2</sup>)

したがって、ここで対象としたダムコンクリートのようにヤング係数の実測値がある場合は、この方法でヤン

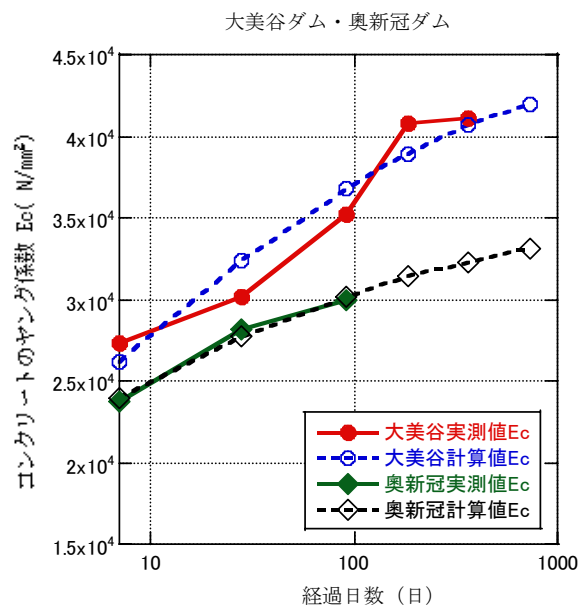
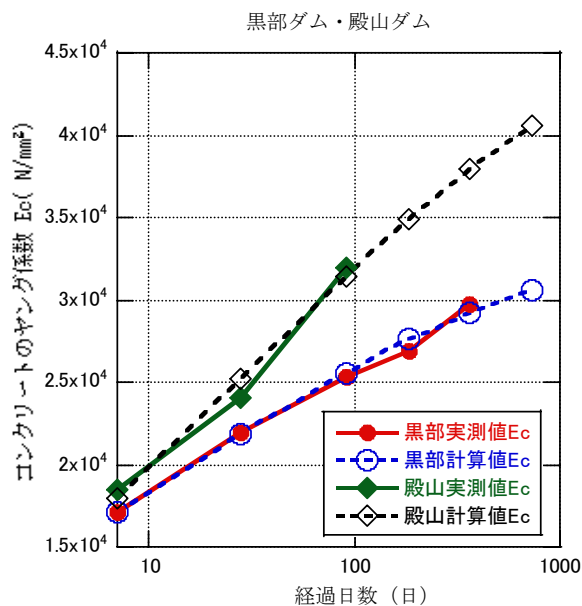


図-1 コンクリートのヤング係数の比較

グ係数の経時変化を推定できる可能性が示された。

#### 4. まとめ

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出す目的で、コンクリートを二相構造と考え、中庸熟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ヤング係数算定の可能性が示された。

なお、この手法は現在のところセメントが中庸熟ポルトランドセメントで、ヤング係数の実測値が残っている場合に限られる。今後骨材のヤング係数の算定法や、セメントペーストと骨材のヤング係数との比率がコンクリートのヤング係数に及ぼす影響を明らかにすることや多くのダムコンクリートへの適用性の確認など残された課題は多くあると考えられる。

**謝辞** 本研究では電力中央研究所先輩諸氏の貴重なデータを使わせて頂いた。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, 関 慎吾, 笠原 清, 栗山武雄: 高温度下におけるコンクリートのクリープ, 電力中央研究所技術第二研究所報告, 研究報告 72018, 1973.5

2) 河角 誠, 笠原 清, 栗山武雄: 高温度下におけるコンクリートのクリープ 第4報: 載荷材令と水/セメント比の影響, 電力中央研究所報告, 研究報告 382008, 1982.8

3) 関 慎吾, 河角 誠, 笠原 清, 栗山武雄: マスコンクリートのクリープとセメントの水和, 電力土木, No.185, pp.1-11, 1983.7

4) Endo, T, Ishikawa, M. and Kawasumi, M.: Determination of the static elastic constant of concrete derived from the elastic constant of cement paste, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, pp.97-102, Proceedings of the eighth international conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures, ISE-SHIMA, JAPAN, 30Sep. - 2 Oct. 2008

5) 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

6) 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

7) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 混和材を用いたコンクリートのヤング係数の評価方法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.25, No.1, pp.389-394, 2003