

人工群知能を用いた重力ダム設計基本断面の最適化と長期ダム安定性管理への応用 Design Optimization of Basic Section for Gravity Dam Using Artificial Swarm Intelligence and Its Application to Long-term Management of Dam Stability

○ 浜口 俊雄・角 哲也・田中 茂信

○ Toshio HAMAGUCHI, Tetsuya SUMI, Shigenobu TANAKA

This research demonstrates the performance of basic triangle designing of gravity dam using the artificial swarm intelligence approaches such as PSO, ACO and GA. The obstacle to determine a basic triangle is to optimize the parameters to be designed as minimize the triangle area because the shape of the fillet makes the vertical forces of the static water and sediment pressures with bilinear processes in cases that a sediment height gets greater than a fillet one. In this research, two approaches are carried out. The first one is to employ the 0-extension approach to express the bilinear situation as one equation. The second one is to use the artificial swarm intelligence approach to optimize the dam parameters in bilinear processes. A given sediment height is reconsidered to know the upper limitation in managing the long-term dam sedimentation. It can be concluded that this research is useful and helpful in overcoming the difficulty of optimally designing the bilinear basic-triangle parameters and in managing the long-term sedimentation.

1. 序論

重力コンクリートダムは、ダム軸に対して鉛直に切り取った単位厚さの三角形断面（以降、基本断面と呼ぶ）を考え、そこで転倒安定性、活動安定性、許容応力耐性を満たすように形状が設計される。その際に、地質条件や空間の物理条件、さらには経済性を加味して考えねばならない。形状設計として最も経済的にするには基本断面積を最小にすること、また、予め定めたダム軸を中心にして建造できる上下流端の制約からも岩盤との設置面積を出来るだけ小さくすることが重要となってくる。その観点から、断面を減らしつつ、設置面積を大きくするため、ダム上流面にはフィレット（拡幅部）を採用するケースも多い。しかしながら、フィレットは上流面の一部までしか用意されないため、設計時の作用荷重計算において、静水圧ならびに堆砂圧の鉛直成分がフィレット形状と堆砂高の関数に影響を受けてバイリニアに変化を強いられる。これは上下流法面勾配やフィレット高ならびにフィレット勾配の設計値を最適化計算で求めようとするには障害となっており、最適断面を全自動で求めることを避けてしまう要因となっている。従来では場合分けをどちらかに定めて最適化をするか、フィレット

高を固定するかで算定されていた。本研究はこの障害を打破するために2つのアプローチを用いる。1つ目は、荷重計算でケース分けしていた式を1つの式でまとめて表現できるようにすることである。2つ目は、本問題は最適パラメータ同定に用いることの多い導関数が不連続であることで最適化計算を困難にしているため、人工群知能のアルゴリズムを用いることである。これによって、基本断面設計パラメータの容易な最適化が可能となる。

2. 「0-拡張理論」によるアプローチ

重力ダムの安定計算を述べるにあたり、まず0-拡張理論について触れる。簡便に説明すると、変数が非負値をとる範囲ではその値を、逆に負値となる範囲は0を、それぞれとるように定義する式を与える理論である。具体的には、変数 x が零となる値 (a) まで平行移動した単位階段関数 $u\{x-a\}$ に同じ変数 $x-a$ を乗じたものである。この手法の主な目的は、元の定義域とその領域外域間の境界位置に自由度を持たせた物理現象の表記式、もしくは状況に応じて自動的に作用する「場合分けのスイッチ」の役割を持つ数学的因子によって単一式を創り出すことにある。

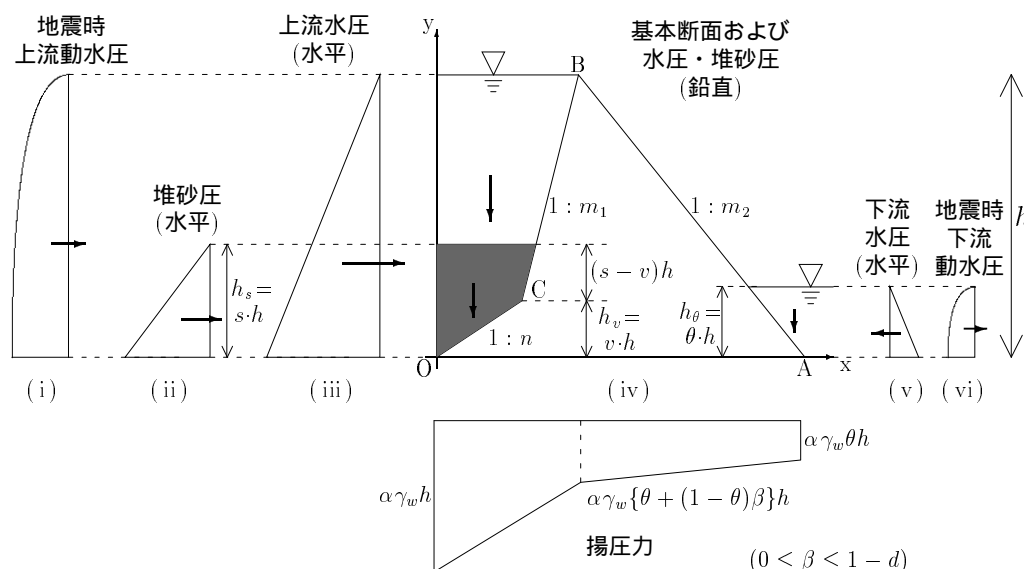


Fig.1 Forces to a gravity dam

Table 1 Design parameters of a basic triangle

文字数	表 記 諸 元
V	鉛直荷重 (tf)
H	水平荷重 (tf)
M	堤踵(上流面のり先)のモーメント (tf・m)
m_1	上流面勾配
m_2	下流面勾配
n	フィレット勾配
h	ダム高 (m) [本稿では=上流水深]
$s = h_s/h$	堆砂高比
$v = h_v/h$	フィレット高比
h_θ	下流水深 (m)
$\theta = h_\theta/h$	下流水深比
γ_c	コンクリート単位体積重量 (tf/m ³)
γ_w	水単位体積重量 (tf/m ³)
γ_s	水中堆砂単位体積重量 (tf/m ³)
C_e	泥圧係数
k	地震係数
α	揚圧力係数
β	揚圧力排水影響係数
d	排水孔距離比
F_S	せん断抵抗安全率
τ_0	せん断抵抗強度 (tf/m ²)
f	内部摩擦係数

$$\Delta h = (h_s - h_v) \cdot u\{h_s - h_v\} = (s - v) \cdot u\{s - v\}h$$

$$V = \frac{1}{2} \left\{ \left[\gamma_c - \gamma_w \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} (m_1 + m_2) + (\gamma_w + \gamma_s C_e s^2)n + \gamma_w m_2 \theta^2 \right. \right. \\ \left. \left. + \left[\gamma_c v^2 - \gamma_w (1 - v)^2 - \gamma_s C_e \eta_{sv}^2 - \gamma_w \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} v \right] (n - m_1) \right] h^2 \right. \right. \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2} \left\{ \gamma_c k \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v^2 \right\} + \gamma_w \left\{ 1 - \theta^2 + \frac{7}{6}k(1 + \theta^2) \right\} + \gamma_s C_e s^2 \right\} h^2 \quad (3)$$

$$M = \frac{1}{6} \left\{ \left[\gamma_c \left\{ (2 - 3v)m_1 + m_2 + 3nv + k \right\} + 3\gamma_w m_2 \theta^2 \right] (m_1 + m_2) \right. \\ \left. + \left[\gamma_c (2n - m_1 + k)v^3 - 3 \left\{ \gamma_w (1 - v)^2 + \gamma_s C_e \eta_{sv}^2 \right\} nv + 3\gamma_w m_2 v \theta^2 \right. \right. \\ \left. \left. - \left\{ \gamma_w (1 - v)^3 + \gamma_s C_e \eta_{sv}^3 \right\} (n + m_1) \right] (n - m_1) \right. \\ \left. + (\gamma_w + \gamma_s C_e s^3)(1 + n^2) - \gamma_w (1 + m_2^2)\theta^3 \right. \\ \left. + \gamma_w \left(\frac{7}{5}k(1 + \theta^3) - \alpha \left[(1 - \theta) \left\{ \beta(1 + d) + d^2 \right\} + 3\theta \right] \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v \right\}^2 \right) \right\} h^3 \quad (4)$$

$$M \leq V \cdot \frac{2}{3} \ell \quad (5)$$

$$\frac{\tau_0 \ell + fV}{H} \geq F_S \quad (6)$$

$$\eta_{sv} = (s - v) \cdot u\{s - v\} \quad (7)$$

$$\ell = \{(m_1 + m_2) + (n - m_1)v\}h \quad (8)$$

3. 設計作用荷重と設計パラメータ

基本断面での採用荷重はFig. 1に描かれたとおりである．ただし同図はフィレット高が堆砂高を下回ってバイリニアとなる場合を示している．またその設計パラメータ諸元はTable 1のように表す．上記のバイリニアのケースでは0-拡張理論が適している．いま、フィレット高の堆砂高に対する下回り量を Δh 部高を h_v とおく． Δh は、 $h_v \geq h_s$ のときに0、 $h_v < h_s$ のときに $h_s - h_v (> 0)$ であるので、ここに0-拡張理論を用いると、Eq.(1)になる．ただし、基本断面の上流面勾配がフィレット勾配よりも急傾斜となることは後述の計算条件の1つである．この鉛直・水平・モーメントの各作用力合力 V, H, M はEq.(2)～(4)で表される．

4. 転倒安定条件・滑動安定条件・許容応力条件

許容応力に関しては内部発生応力が許容圧縮/引張応力であればよいが、概してダム高150m以下の重力ダムでは圧縮応力についてはほとんど問題にならない．高さ x (m)のダムの最大圧縮応力は約 $0.3x$ (kgf/cm²)であって、150mのダムの最大圧縮応力は50(kgf/cm²)以下となるからである．転倒・滑動安定の各条件はそれぞれEq.(5),(6)で表される．前者はミドルサード式、後者はHenny式と呼ばれ、これらを同時に満たすようにパラメータを決定する．なお η_{sv}, ℓ はそれぞれEq.(7),(8)で

Table 2 Given parameters at A dam

m_1	0.07	m_2	0.8	h	73.5(m)
γ_c	2.3(tf/m ³)	γ_w	1.0(tf/m ³)	γ_s	1.1(tf/m ³)
s	0.64	θ	0.0	C_e	0.5
k	0.12	α	0.4	β	0.2
d	0.2	F_S	4.0	t_0	2.45(tf/m)
f	1.0	ξ	1.0	ζ	1.0

定義される．

5. 人工群知能

ここでは人工群知能として、粒子群最適化法(PSO; Particle Swarm Optimization)、蟻コロニー最適化法(ACO; Ant Colony Optimization)、遺伝的アルゴリズム(GA; Genetic Algorithm)を用いたが、本稿では紙面の関係でPSOに言及する．生物群において、一個体がエサ場を発見すると、他の個体はその一個体に倣って行動する．同時に自らが見つけた場所の情報も覚えており、その場所に向かう動きも見せる．自然界では行動範囲内で最適な場所(最適解)は唯一だが、比較的良好な場所(局所解)は複数存在するケースが多い．生物群では、仲間と自分の見つけた場所を同時に考慮しながら、各々が見つけた場所の周辺を探索し、最適な場所を探索している．粒子群最適化(PSO)はこれをアルゴリズム化したものであり、多次元空間において位置情報と速度情報を持つ粒子群によってモデル化されている(江本ら、2005)．

6. 基本断面パラメータの最適化

ケーススタディとして、実際にはフィレットが無いAダムを用いる．そこで与えられるパラメータ諸元はTable 2の通りである．本稿では紙面の関係上、PSOでのパラメータ最適化結果のみ示す．上・下流面勾配、フィレット高比、フィレット勾配をパラメータとして最適化すると、 $m_1=0.01, m_2=0.71, v=0.55, n=0.31$ を得て、本来の断面積は2349.98m²であったものが2188.11m²まで縮小できるという結果を得た．次にフィレットを用いた場合の上流面勾配は0とするケースが多いため、下流面勾配、フィレット高比、フィレット勾配について最適化した．その結果、 $m_2=0.68, v=0.38, n=0.62$ となり．上流面勾配がない分だけフィレット勾配が緩やかになる(フィレット幅が延びる)ものとなった．さらに上記2つ目と3つ目のケースの結果の断面で、長期的視野に立って堆砂高比はどこまで許容できるのかを上限値を同手法で試算したところ、順に $s=0.64, 0.76$ となった．現状が0.64であることから最適形状のフィレットでは約8.82mの余裕があると分かる．

7. 結論

本稿ではPSOでの結果を紹介したが、その他でも良好な結果を得ている．また他のダムでも検討することでも様々な形状のダムにも適用可能であることが示せる．本手法を用いると比較的に検討でき、初期の最適設計だけでなく、近年あちこちで顕現しているダムの老朽化問題や嵩上げなどの強化問題の対策立案にも役立つと期待できる．

参考文献

1) 例えば、江本ら(2005):ナップサック問題におけるDiscrete PSOのパラメータ検討, 第9回設計工学に関するシンポジウム, pp.169-173．