

ミツバチコロニー最適化手法を用いた重力ダム基本断面設計法

Design Approach of Basic Section for Gravity Dam Using Bee Colony Optimization Scheme

○ 浜口 俊雄・田中 茂信・角 哲也・三島 康二

○ Toshio HAMAGUCHI, Shigenobu TANAKA, Tetsuya SUMI, Koji MISHIMA

This research shows the excellent performance in designing a basic triangle of gravity dam using the artificial swarm intelligence (ASI) approach of the bee colony optimization (BCO) scheme. The obstacle to design a basic triangle is to optimize the parameters to be decided subject to the minimized 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 paper, two steps of theoretical and numerical schemes are conducted. The first step is to theoretically employ the 0-extension approach to lump two-cased equations together. The second one is to use the BCO approach to optimize the dam parameters in bilinear processes. It can be concluded that the proposed approach is much useful in optimally designing the parameters of gravity dam with a fillet compared with the particle swarm optimization (PSO) scheme.

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、滑動安定性、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、同断面積は小さくしても滑動しないよう岩盤接触面積を最小限に大きく取ることが重要となってくる。その観点から、基本断面を減らしつつ、接触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。ここで、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係数に影響を受けてバイリニアに変化を強いられる。これは上下流水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. 設計作用荷重と設計パラメータならびに各安定条件

0-拡張理論については参考文献1)を参照されたい。基本断面での採用荷重はFig.1に示すとおりである。ただし同図はフィレット高 h_v が堆砂高 h_s を下回ってバイリニアとなるケースを示している。その設計パラメータ諸元をTable 1に示す。上記のバイリニアのケースでは0-拡張理論を用いるとEq.(1)のようになる。ここに Δh はフィレット高の堆砂高に対する下回り量である。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。許容応力条件に関して、概してダム高150m以下の重力ダムの圧縮応力はほとんど問題にならない。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 $\eta_{sv, \ell}$ はそれぞれEq.(7),(8)で定義される。

3. ミツバチコロニー最適化法(BCO)

ここでは人工群知能として、ミツバチコロニー最適化法(BCO)と粒子群最適化法(PSO)を用いたが、前者が後者に比べて計算時間が短く、また大域的探索において

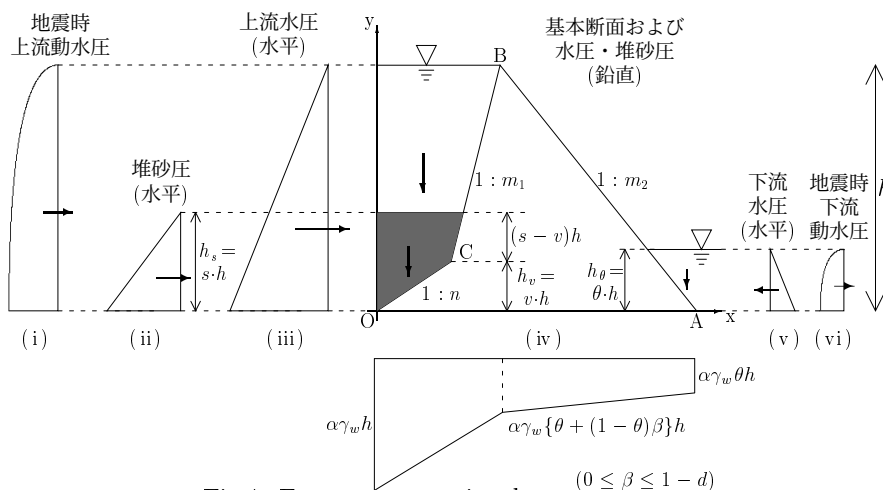


Fig.1 Forces to a gravity dam

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

$$\Delta h = (h_s - h_v) \cdot u \{ h_s - h_v \} = (s - v) \cdot u \{ s - v \} h \quad (1)$$

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

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

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

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

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

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

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

も後者が見落とした局所解も的確に見つけることから前者を採用した。BCO²⁾はKarabogaにより提唱された群知能アルゴリズムの一種で、高次元問題に対して有効なアルゴリズムである。一般に一つの巣を構成するミツバチの群れにおいて、働き蜂が花の蜜を巣まで持ち帰る行動をモデル化したものである。一匹の働き蜂が良質な蜜源を発見した際、他の蜂に知らせるためにミツバチダンスと呼ばれるコミュニケーション行動をとることで他の働き蜂もその蜜源を利用する。BCOでは働き蜂をその行動過程ごとに収穫蜂・追従蜂・偵察蜂のフェーズに分類し、最良の蜜源(解)を探索することを目的とする。

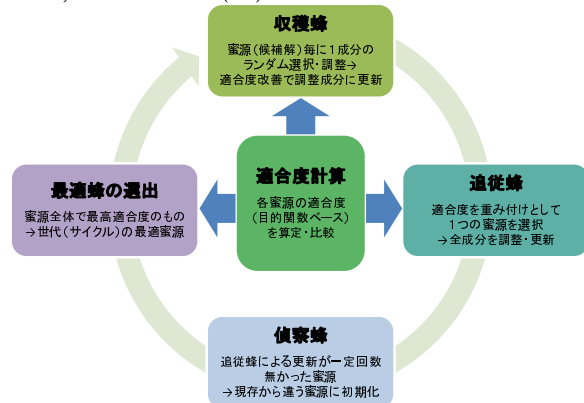


Fig.2 Processes of the BCO scheme

Fig.2にミツバチコロニー最適化の処理過程を示す。図中の「調整」とは「解の試行」であり、「更新」とは「解の試行後に施行された解への変更」を意味する。また、収穫蜂(harvest bee)は「全蜜源に対して、各蜜源で成分の1つを調整および更新」する作業を有し、追従蜂(onlooker bee)は「蜜源の各適合度を基に、全蜜源から訪れる蜜源を選択し、その蜜源の解を調整および更新」する作業を有する。これらの処理で最も適合度の高い蜜源をその世代の最適解として、次の世代計算に移る。これを所与の世代数計算し、最終的に最も適合度の高い蜜源蜜源が最適解となる。

4. 基本断面パラメータの最適化

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

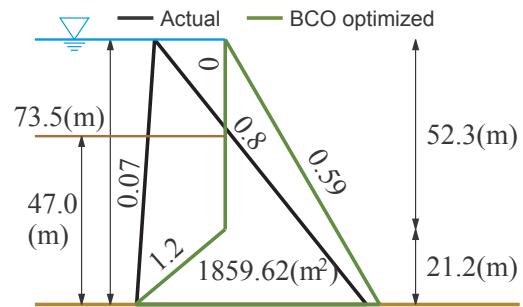


Fig.3 BCO-optimized triangle and actual one

計算事例として、現実にはフィレットの無いAダムを用いる。Aダムのパラメータ諸元はTable2の通りである。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BCOで最適化すると、 $m_1=0.0, m_2=0.59, v=0.29, n=1.2$ を得た(Fig.3)。本来の断面積2349.98m²に対して1859.62m²まで約21%も縮小できるという結果を得た。特に $m_1=0.0$ となったことは、フィレット設置理由である接触面積増加と断面積減少の同時実現という目的に適った結果となっており、妥当な結果と言える。またPSOでは計算時間が数十倍～数百倍かかる上に、この最適断面の解を得るに至らなかったことから大域的探索がBCOより苦手、初期設定が局所的に上手く与えられない限りは最適解を得られない可能性もあるということが推察される。

5. 結論

本研究ではBCOによって重力式ダムの最適断面設計を行ったところ、探索自由度の高さに起因して長時間の計算を要するPSOでも探索しきれなかった最適解が容易に得られ、BCOが秀逸であることが分かった。本手法の計算の容易さを踏まえると、本断面設計だけでなく、計算量の比較的大きなシミュレーションのモデルパラメータ同定にも有用であろうと期待できる。

参考文献

- 1) 浜口俊雄・村上 章・長谷川高士：平面解析で移動境界を考慮した地下水モデルと逆解析への応用，土木学会論文集，第568号/III-39，pp.133-145，1997.
- 2) D. Karaboga and B. Basturk(2007): A powerful and efficient algo-rithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm, *J. Global Optimization*, Vol.39, pp.459-471.