

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・角 哲也・田中 茂信・三島 康二⁽¹⁾

Toshio HAMAGUCHI, Tetsuya SUMI, Shigenobu TANAKA and Kouji MISHIMA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This research shows the useful 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.

キーワード : 重力ダム, 基本断面, 人工群知能, ミツバチコロニー最適化, 0-拡張

Keywords : Gravity dam, Basic section, Artificial swarm intelligence, Bee colony optimization, 0-extension

1. 序論

重力コンクリートダムの初期設計では, 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) を考え, そこでは転倒安定性・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. その後, 設計された基本断面を基に余水吐など各施設を加味した状態で細部や局所の安全性検討のために三次元設計へと展開される.

その際に, 地質条件や空間の物理条件, さらに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出来るだけ小さくするこ

と, また, ダム軸を中心に建造可能な上下流範囲を踏まえて底面岩盤との設置面積を出来るだけ大きくすることが重要となってくる. そうした条件を実現するため, 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係に影響を受けてバイリニアな変化を強いられる. 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に算定するには障害となり得る. それが原因となって, 導関数を用いた最適アルゴリズムにより同設計値を求めることは難しくなる. 従来で

は上述の場合分けを一方(主にフィレット高<堆砂高の想定ケースが多い)に定めて最適化するか、フィレット高を固定または上流面勾配を固定(鉛直法面として勾配ゼロ)して算定されていた。

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し、最適化計算時にケース別評価式に関して変数の大小関係を意識せずに利用できるようにすることである。2つ目は、導関数が不連続でも問題なく最適値を探索できる人工群知能アルゴリズムを用いることである。これらによって、基本断面設計諸元の容易な最適値算定が可能となる。

2. 0-拡張理論

2.1 理論概要

本節では、重力ダムの安定計算について述べるにあたり、0-拡張理論について理解する必要があるが、詳細は浜口ら(2015)を参照いただきたい。要約すれば、この手法の主な目的は、'場合分けのスイッチ'の役割を持つ数学的因子によって場合分けされるべき式を単一式で表現できるようにするものである。

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 $u\{x-a\}$ に対して同じ変数 $x-a$ を乗じたものの $(x-a) \cdot u\{x-a\}$ が $x-a$ に対する0-拡張変数となる。つまり、 x に対する0-拡張変数は $a+(x-a) \cdot u\{x-a\}$ となる(浜口ら, 2015)。

2.2 堆砂圧への適用

フィレット設置を設計に考慮した重力ダムの場合、フィレットの一般形状として台形(上流側に長方形断面の凸部を作った状態)でなく三角形を扱うものとする。その際の上流面形状はフィレット高位置を境にバイリニア(双線形)となる。ゆえにフィレット設置の検討が、ダム上流面における設計堆砂圧の鉛直成分量ならびに堤踵部での堆砂圧モーメントに場合分けを伴わせる要因となる。フィレット高が堆砂高よりも高い場合には、堆砂は堤体の断面形状変化部に達しないでフィレット傾斜面内におさまる。その一方で、堆砂高がフィレット高よりも高い位置まで達する場合には、堆砂圧の受圧面となる上流面は双線形となる。したがって従前は、設計堆砂圧の鉛直成分を場合分けして2通りの式で考え、設計状況に応じて式を使い分けている。いま、フィレット高の堆砂高に対する下回り量に着目する。まずこの量に数学的工夫を凝らして場合分けを1つの数式で表記する。次に堆砂圧鉛直

成分に関して、堆砂の接触面がすべて線形面であったと見なした場合を基準に据えて、双線形面が変わった場合の荷重差に相当する項に先述の数式表記を利用し、フィレット高と堆砂高の大小に関わらず存在する項として表す。この目論見は、同荷重差項が(フィレット高) $\geq$ (堆砂高)のときに0、(フィレット高)<(堆砂高)のときに正数となるように図るものである。

上記の数学的工夫には、上述の0-拡張理論が適している。いま、堆砂高を h_s 、フィレット高を h_v 、フィレット高の堆砂高に対する下回り量を Δh 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、

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

という式が作成できる。ここに、 $u\{\bullet\}$ は単位階段関数を表す。この Δh を使って、堆砂圧の鉛直成分を表せばよい。先に説明した堆砂圧の鉛直荷重差項は Δh を因数に含んでおり、上記の場合分けに一致する。また、重力ダム基本三角形の上流面勾配(m_1)がフィレット勾配(n)よりも傾斜が急($m_1 < n$)であることは内部にフィレットより高い上流面で引張応力を発生させないための形状条件として至極当然のことである。したがって、堆砂圧の荷重差項は非正値をとることが普通である。この荷重差項の具体的なかたちについては、次節にて詳述する。

3. 重力ダムの安定条件

3~5章の内容は浜口ら(2015)に掲載しているが、確認すべき参照内容が多いことを鑑み、本稿単体で容易に理解するため再掲する。

検討対象となる基本三角形は、ダム軸に対して垂直に切りとった単位厚さの代表断面とする。本稿では、頂点が満水面と一致する三角形の上流面が下部で拡張され双線形となったもの(フィレット部の付設)と考えることで、設計時の一般性を失わない。つまりフィレットのない断面を考える場合はフィレット勾配(n)が上流面勾配(m_1)に等しい($n=m_1$)条件となれば対応可能である。重力ダムの設計は基本断面の底面において鉛直、水平、回転という釣合の3条件に基づいた安定条件の検証を通じて行われる(飯田, 1992)。詳細は下記で述べる。ただし、鉛直方向の釣合である安定条件は地耐力保有条件であるが、これはダムサイトの選定において配慮されるものであるため、設計検討時にはすでに条件を満たしていると考えてよい。

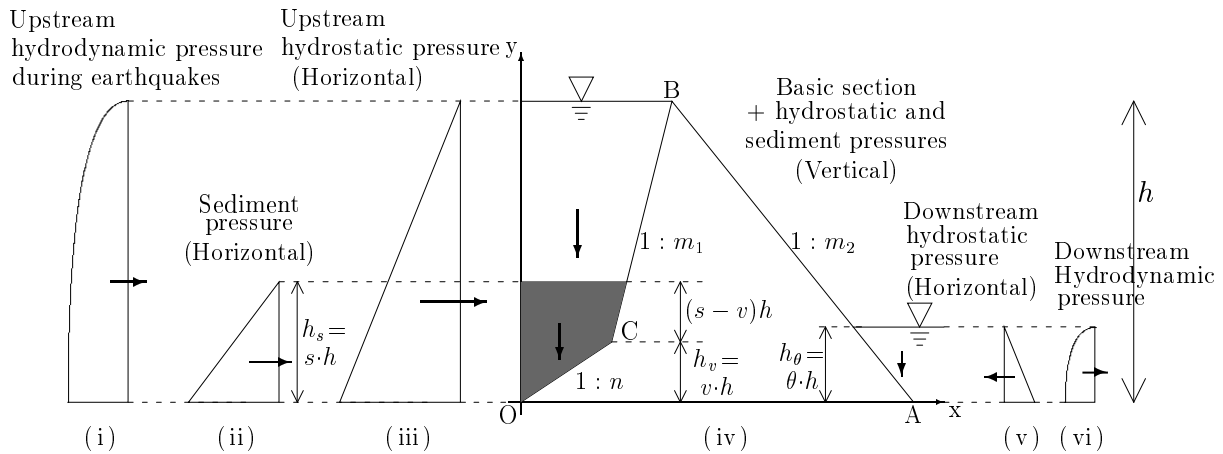


Fig.1 Forces to a gravity dam except uplift and self-weight forces in case of $h_s \geq h_v$

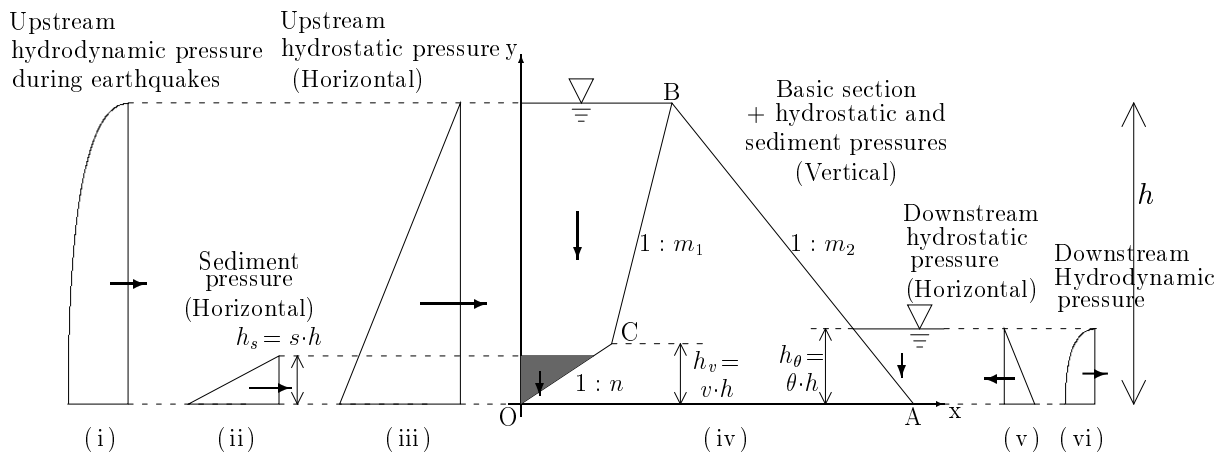


Fig.2 Forces to a gravity dam except uplift and self-weight forces in case of $h_s < h_v$

3.1 許容応力条件

許容応力条件は「内部応力が許容圧縮/引張応力であればよい」であるが、ダム高150m以下の斜面に凸な形状が無い断面の重力ダムでは概して圧縮応力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)であり、150mのダムの最大圧縮応力でも45(kgf/cm²)以下となるからである。詳細に行うのであれば、有限要素法による応力解析を行い、主応力分布図を作成して引張応力が発生している要素が無いかどうかを確認し、もしあれば設計の修正を行うことになる。

3.2 転倒安定条件

転倒安定条件は「上流面に鉛直引張応力を生じないこと」である。ここでは堤踵(上流面のり先)におけるモーメントと鉛直合力の関係で検討している Middle-Third理論を適用する。

3.3 滑動安定条件

滑動安定条件は「堤体と岩盤の接触面のせん断滑りに対して安全であること」である。同式はHenny式と呼ばれ、転倒安定条件式と同時に満たすように諸元を決定する。

3.4 基本断面設計の利点

応力・変形数値解析法のみによる設計は、設計初期段階のダム形状の大まかな案の策定に向いていない。最終的には、決定したダム形状に対して再度安定計算を行って安全性を確認し、必要に応じて修正するものであるから、はじめから大がかりな計算は必要ない。その意味でも基本断面設計から出発することは、安定計算が平易であるため、必要な修正を加えた後の再計算も容易である。その他ダムが高い場合に、安定条件のうち、滑動安定条件が支配的にダム形状を決めるということが多いのも、基本断面での設計を後押ししている。

3.5 上流面勾配

重力ダムの上流面勾配というものは、理論的にはダム湖空虚時の安定条件から定まるものである。すると理論上は、ある程度の勾配が必要という結果を得ることになる。しかしながら、こういった安定条件の問題よりもむしろ経済的問題から定まることの方が多い。ダム斜面打設には型枠を用いるが、それを設ける手間は人的作業によるところが大きい。したがって、そこに大きな人件費がかさむ上に労力や時間が必要以上に費やされることは、ダム建造において経済的に好ましくない事になる。故に上流面勾配は不要であるとの結論になり、結果として鉛直にしてしまう場合もしばしば見受けられる。後述の計算では、上流面勾配は最適化パラメータの1つとして求めている。その上で、後述の最適化計算例ではフィレットを設ければ同勾配は鉛直で最適化されることも確認でき、この点は上述の判断が正しいと納得できるもので、最適化の結果として興味深いものとなる。

3.6 ダム高

本稿では、従来通り設計時の水位が基本三角形のダム高に一致した式をたてる。設計基準とする水位として、常時満水位、サーチャージ水位、設計洪水水位の計3水位がある。それぞれの水位に付加高さ、すなわち、風または地震による波高とゲート操作の遅れ等に対する余裕高の総和をそれぞれに加えて考えることが通例で、得られた3つの貯水位に対して、そのどれよりも高くなるようにダム高を決定することになる。波高について詳述すると、風による波高は上述3水位全てに加算される。地震による波高は常時満水位状態のものを計算した後、常時満水位にはそのまま、サーチャージ水位には1/2倍して加算し、設計洪水水位には何も加算しない。

いま設計水位をダム高に一致した値を置くことで、先の3水位の場合よりも危険な状態であるため、十分な安定条件を求めていると言える。

4. 設計諸元

先ず準備として、各面の勾配などといった安定計算時の文字数表記をTable 1に掲げたとおりとする。堆砂高やフィレット高など長さや高さに関わるものはダム高に対する比で表すように定義し、その無次元化された比を定数または変数として最適化設計に使用する。なお同表の揚圧力の関連定数 α , β , d についての詳細は設計作用荷重における揚圧力の説明時に図とともに述べる。

文字数で表記された基本断面形状はFig.1またはFig.2

Table 1 Design parameters of a basic triangle

Symbols	Parameter descriptions
V	Vertical force (tf)
H	Horizontal force (tf)
M	Moment at upstream slope toe (tf·m)
m_1	Gradient of upstream slope
m_2	Gradient of downstream slope
n	Gradient of fillet slope
h	Dam height (m) [Here, =Upstream water depth]
$s = h_s/h$	Ratio of sedimentation height to dam height
$v = h_v/h$	Ratio of fillet height to dam height
h_θ	Downstream water depth (m)
$\theta = h_\theta/h$	Ration of Downstream water depth to dam height
γ_c	Concrete unit weight (tf/m ³)
γ_w	Water unit weight (tf/m ³)
γ_s	Submerged sedimentation unit weight (tf/m ³)
C_e	Mud pressure coefficient
k	Seismic coefficient
α	Uplift coefficient
β	Uplift drainage-affected coefficient
d	Ratio of distance up to drainage well to dam length
F_s	Safety factor of shear stress
τ_0	Intension of shear stress (tf/m ²)
f	Internal friction coefficient

のようになる。このように定数諸元を文字数で表記すると例えば、 $n = m_1$ とすればフィレットの無いダム、 $m_1 = 0$ とおけば鉛直上流面のダム等のように様々な形状の基本断面を考察しやすいという恩恵が得られる。その断面の各頂点の名称を図のようにO, A, B, Cとおき、Oを原点とする xy 座標系を導入する。両図における上記4点の座標は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} A & \left(\ell, 0 \right) \\ B & \left(\ell - m_1 h, h \right) \\ C & \left(nvh, vh \right) \end{aligned}$$

ここに ℓ は式(2)の様に表示したダム長(底面長)である。

$$\ell = \{(m_1 + m_2) + (n - m_1)v\}h \quad (2)$$

また、式(1)もTable 1の表記を用いて無次元化し、

$$\eta_{sv} = (s - v) \cdot u\{s - v\} \quad (3)$$

とおく。この η_{sv} は、 $s \geq v$ のとき $s - v$ 、 $s < v$ のとき0となる0-拡張数である。続いて滑動安定に関わる定数 t_0 を予め以下のように定義しておく。

$$t_0 = \frac{\tau_0}{h} \quad (4)$$

t_0 は式表記上の便宜的な文字数であって物理的意味は持ち合わせていない。

5. 設計作用荷重

基本断面での設計作用荷重(中村, 1990) は以下で順に説明する. 水圧および堆砂圧に関しては, Fig.1または Fig.2を参照しながら荷重式を考察されたい.

5.1 自重

基本断面の自重は鉛直方向のみに作用する.

$$V_c = \frac{\gamma_c}{2} \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v^2 \right\} h^2 \quad (5)$$

H_c : なし

$$M_c = \frac{\gamma_c}{6} \left[(m_1 + m_2) \left\{ (2 - 3v)m_1 + m_2 + 3nv \right\} + (n - m_1)(2n - m_1)v^3 \right] h^3 \quad (6)$$

5.2 地震時慣性力

地震時慣性力はダム堤体に対して水平に作用するものとし, 堤体自重に設計震度を乗じたものとする. 本稿は常時満水位状態を想定した設計震度を用いるものとして式展開を行う.

V_e : なし

$$H_e = \frac{\gamma_c}{2} k \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v^2 \right\} h^2 \quad (7)$$

$$M_e = \frac{\gamma_c}{6} k \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v^3 \right\} h^3 \quad (8)$$

5.3 静水圧荷重

重力ダムの上下流面上の或る点における静水圧は, 同面に対して垂直に作用する. 本稿では一般性を持たせるべく, 上流側だけでなく下流側の静水圧も考慮した式展開を施すことにする. 上流側の水深に対する下流側の水深の比を下流水深比 θ とおく.

$$V_w = \frac{\gamma_w}{2} \left\{ n - (n - m_1)(1 - v)^2 + m_2\theta^2 \right\} h^2 \quad (9)$$

$$H_w = \frac{\gamma_w}{2} (1 - \theta^2) h^2 \quad (10)$$

$$M_w = \frac{\gamma_w}{6} \left[(1 + n^2) - (n - m_1)(1 - v)^2 \times \left\{ 3nv + (n + m_1)(1 - v) \right\} + 3m_2 \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v \right\} \theta^2 - (1 + m_2^2)\theta^3 \right] h^3 \quad (11)$$

5.4 堆砂圧荷重

重力ダムの上流面に作用する堆砂圧は, 静水圧と同じく同面に対して垂直に働く. ただし静水圧と異なり, 堆

砂は底面から或る高さまでしか存在しないために堆砂圧も上流面下部でしか作用していない. 鉛直方向には, 上流面に載荷した土砂の水中荷重が働く. 水平方向には単にその鉛直堆砂圧に泥圧係数を乗じた荷重が作用する.

$$V_s = \frac{\gamma_s C_e}{2} \left\{ ns^2 - (n - m_1)\eta_{sv}^2 \right\} h^2 \quad (12)$$

$$H_s = \frac{\gamma_s C_e}{2} s^2 h^2 \quad (13)$$

$$M_s = \frac{\gamma_s C_e}{6} \left[(1 + n^2)s^3 - (n - m_1)\eta_{sv}^2 \times \left\{ 3nv + (n + m_1)\eta_{sv} \right\} \right] h^3 \quad (14)$$

5.5 地震時動水圧荷重

地震時の動水圧はダム湖水の慣性力に基づいて, ダム堤体とダム湖水との接触面に垂直に作用する. 動水圧は, 上流面に傾斜があれば Zanger の式を, 同面が鉛直であれば Westergaard の式を用いるのが一般的である. ただし上流面がほぼ鉛直で, ダム高の 1/2 以下の高さであるフィレットを有した堤体であれば, Westergaard の式を用いても差し支えないと言われている. 本稿は傾斜面を考えているが, 概してこのような適用可能条件にかなった場合が対象となるものとし, 式展開の簡便化にも配慮して Westergaard の式を用いた.

V_d : なし

$$H_d = \frac{7}{12} \gamma_w k (1 + \theta^2) h^2 \quad (15)$$

$$M_d = \frac{7}{30} \gamma_w k (1 + \theta^3) h^3 \quad (16)$$

5.6 揚圧力

堤体底面に作用する揚圧力は, 監査廊位置からの排水を考慮して状態を分けて取り扱う. Fig.3(i) は非排水時の揚圧力状態を, (ii) は排水孔による低減量分布を, (iii) は排水時の揚圧力状態を示している. 図中にある文字数について, 排水孔距離比を d とし, 堤体底面長 ℓ に対する堤踵から排水孔位置(監査廊位置)に至るまでの距離の比で定義する. また, 静水圧に対する揚圧力の比を揚圧力係数 α , 排水孔による揚圧力低減の程度を示すものを揚圧力排水影響係数 β と定義する. 排水孔位置での揚圧力は, 堤趾(下流面のり先)揚圧力に幾分かの揚圧力を加えたものと見なす. 堤踵と堤趾の揚圧力差に対する, 堤趾揚圧力からの増分量の比を表したのが β であり, $0 \leq \beta \leq 1 - d$ を満たす. $\beta = 0$ で排水孔位置の揚圧力が下流側に等しくなり, $\beta = 1 - d$ で非排水状態となる. 通常の設計では, $\alpha = 1/3$, $\beta = 1 - d$ 程度, ないしは, $\alpha = 1$, $\beta = 1/5$ 程度が

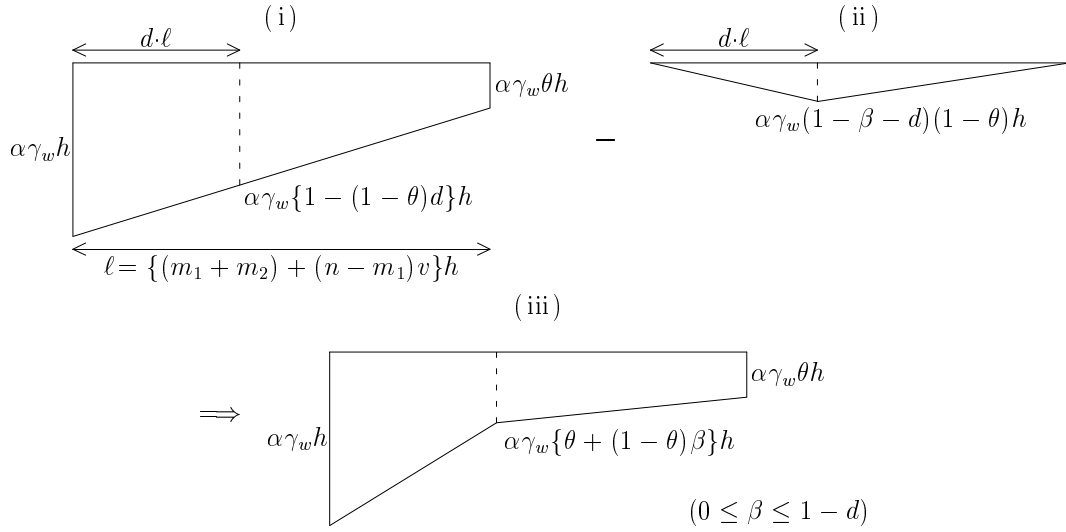


Fig.3 Uplift force considering drainage at inspection gallery

$$V = \frac{1}{2} \left(\left[\gamma_c - \gamma_w \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} \right] (m_1 + m_2) + (\gamma_w + \gamma_s C_e s^2) n + \gamma_w m_2 \theta^2 \right. \\ \left. + \left[\gamma_c v^2 - \gamma_w (1 - v)^2 - \gamma_s C_e \eta_{sv}^2 - \gamma_w \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} v \right] (n - m_1) \right) h^2 \quad (22)$$

$$H = \frac{1}{2} \left[\gamma_c k \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1) v^2 \right\} + \gamma_w \left\{ 1 - \theta^2 + \frac{7}{6} k (1 + \theta^2) \right\} + \gamma_s C_e s^2 \right] h^2 \quad (23)$$

$$M = \frac{1}{6} \left\{ \left[\gamma_c \left\{ (2 - 3v) m_1 + m_2 + 3nv + k \right\} + 3\gamma_w m_2 \theta^2 \right] (m_1 + m_2) \right. \\ \left. + \left[\gamma_c (2n - m_1 + k) v^3 - 3 \left\{ \gamma_w (1 - v)^2 + \gamma_s C_e \eta_{sv}^2 \right\} nv + 3\gamma_w m_2 v \theta^2 \right. \right. \\ \left. \left. - \left\{ \gamma_w (1 - v)^3 + \gamma_s C_e \eta_{sv}^3 \right\} (n + m_1) \right] (n - m_1) \right. \\ \left. + (\gamma_w + \gamma_s C_e s^3) (1 + n^2) - \gamma_w (1 + m_2^2) \theta^3 \right. \\ \left. + \gamma_w \left(\frac{7}{5} k (1 + \theta^3) - \alpha \left[(1 - \theta) \left\{ \beta(1 + d) + d^2 \right\} + 3\theta \right] \left\{ (m_1 + m_2) + (n - m_1) v \right\}^2 \right) \right\} h^3 \quad (24)$$

Fig.4 Resultant vertical forces, horizontal ones and moments

採用されている。

$$V_u = -\frac{\gamma_w}{2} \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} h \ell \quad (17)$$

H_u : なし

$$M_u = -\frac{\gamma_w}{6} \alpha \left[(1 - \theta) \left\{ \beta(1 + d) + d^2 \right\} + 3\theta \right] h \ell^2 \quad (18)$$

$$M = M_c + M_e + M_w + M_s + M_d + M_u \quad (21)$$

式(19)～(21)の右辺各項に式(5)～(18)を代入した詳細な結果はFig.4の式(22)～(24)にまとめているので、そちらを参照されたい。

5.7 合力

鉛直荷重, 水平荷重, モーメントの各々総じた量 V , H , M は, 以下の式(19)～(21)で求まる。

$$V = V_c + V_w + V_s + V_u \quad (19)$$

$$H = H_e + H_w + H_s + H_d \quad (20)$$

5.8 Middle-Third式

この安定条件は, 先述の通り, 断面内での引張応力の発生を抑えるもので, 堤体への荷重合力が水平断面三分分の中央1/3を通る条件を満足していれば十分とする *Middle-Third*理論を適用して考えられ,

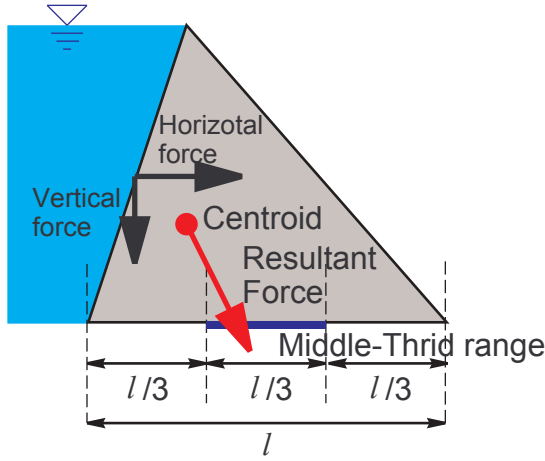


Fig.5 Concept of Middle-Third

$$M \leq V \cdot \frac{2}{3} \ell \quad (25)$$

で表される。Fig.5はこの条件の概念を示している。ダム底面部の青い領域がMiddle-Third域であり、重心からの合力(赤色)が同域を通ればよいということになる。なお、この条件を用いた場合には堤底における引張力の発生に対して、中央1/3からさらに1/12程度の余裕がある(長谷川, 1967)。

5.9 Henny式

滑動安定を得るためには、Hennyの式を満たせばよい。Henny式は、

$$\frac{\tau_0 l + fV}{H} \geq F_s \quad (26)$$

と書ける。いま、

$$\zeta = \alpha \left\{ (1 - \theta)(\beta + d) + 2\theta \right\} \quad (27)$$

とおいた文字数 ζ と式(4)の t_0 を用いれば、式(26)を整理する際に非常に見やすい不等式表記ならびに数値解析プログラムの記述の簡便化が可能となる。

6. 人工群知能

先述の式(25),(26)を用いて基本断面の最適化を図るには、所与諸元と設計諸元に分けて扱うことになる。主に設計対象となる諸元は、上下流面勾配 m_1, m_2 、フィレット勾配 n 、フィレット高 h_v であることが多い。しかしながらこれらは、同時に検討する際、これまでの説明通り、フィレット高が堆砂高との大小関係から単純な線形的検討はできず、かつ、場合分けが生じる。また既存の最適化アルゴリズムは導関数を用いるものが多く、これでは本断面設計問題のように検討する目的関数が連続でも導関

数が不連続になる問題には不適切であり、場合分けがあることから局所解が複数存在する可能性もあって、こうした既存のアルゴリズムでは1つの(局所)解に収束した後は自らのアルゴリズムだけで他の局所解の検討へ移行しにくいことから、さらに適用の適切さに欠ける。

そこで同時に局所解を探索でき、かつ、導関数を用いないで解の探索が可能な人工群知能を用いる。動物が群れをなし、群れ単位でエサを探索取得して群れ全体で生計を立てるという自然の動物活動が群知能と称され、それを人間がシステム化したものが人工群知能と認識される。群には、いくつかの方向に同時にエサを探索し、それぞれ発見されたエサでその時点で最も有用なものに多くの労力が割かれるような行動原理の特徴がある。著名なものとして、粒子群最適化(PSO; Particle Swarm Optimization)法、蟻コロニー最適化(ACO; Ant Colony Optimization)法、遺伝的アルゴリズム(GA; Genetic Algorithm)が挙げられ、さらに最近ミツバチコロニー最適化(BCO; Bee Colony Optimization)法(Karaboga and Basturk, 2007)も有力な手法として広まってきている。本設計問題には目的関数(基本三角形の断面積)が連続かつ微分不可能であることに加えて、その微分不可能となる原因の変数を含む多変数を同時に変動させて最適化を図るため、人工群知能を用いることが適切と考えられる。浜口ら(2015)を参照し、PSOによる最適化の結果はBCOとの比較に用いる。

6.1 PSO

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)は複数存在する場合が多い。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、最適場を探索している。

粒子群最適化(PSO)では、生物個体を粒子と見なし、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、その挙動がアルゴリズム化されている(江本ら, 2005)。

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 r_1 \frac{p_i - x_i^t}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{p_g - x_i^t}{\Delta t} \quad (28)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \Delta t \quad (29)$$

ここに、 x_i : 粒子 i の現状検討解、 v_i : 移動速度、 Δt : 移動時間ステップ、 w : 慣性定数、 c_1, c_2 : 学習係数に属し、それぞれ認知係数/社会係数と呼ばれる局所/全体で良

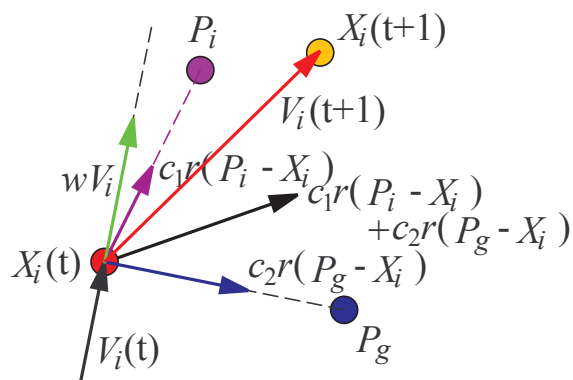


Fig.6 Concept of PSO updating process

好解に向かう粒子の割合, r_1, r_2 : それぞれ0から1の異なる乱数, p_i : その時間に発見した x_i の局所的最良解, p_g : 群全体でその時間までに発見した x の大域的最良解, まず, 各粒子の解 x_i をランダムに配置し, その時点での速度 v_i は0とする. 次に, 式(28),(29)に基づき, 速度と解を更新する. ここに t は時刻を表す. この計算を各次元, 各粒子ごとに行う. Fig.6は新たな局所解発見時の次時刻探索方向と移動速度の更新プロセスの概念図である. 各粒子について, 算出された x_i の値が式(25)と式(26)の両条件式を満たし, かつ, 今までで最適な値であると判断されれば,

$$p_i = x_i \quad (30)$$

とし, その値による評価値が全ての個体中で最適なものである場合はさらに

$$p_g = x_i \quad (31)$$

とする. この計算過程を逐次行い, 最適解を算出する.

6.2 BCO

このアルゴリズムはミツバチの採餌行動に基づいている. ここではミツバチを下記のように分類する. 複数の蜜源から蜜のある花をそれぞれ1つずつランダムに選択してハの字ダンスを行いつつ, それらを巣箱に持ち帰って合わせて調整または更新する役割を果たす収穫蜂 (Employed bee), その収穫蜂のダンスを見て, どの蜜源群に花の蜜が最もあるか (適合度) を判断し, 蜜源自身ひとかたまりで選択し, その蜜源の花の蜜だけを巣箱に持ち帰って調整または更新を試みる役割の追従蜂 (Onlooker bee), 収穫蜂と追従蜂によって一定回数調整または更新されない蜜源を放棄し, その順番の蜜源の存在を消して, (初期化して) 新たに離れた位置の蜜源を設置し直す役割の偵察蜂 (Scout bee) の3つである. このような行動に基づいた3つのフェイズからアルゴリズムを構築している (Fig.7).

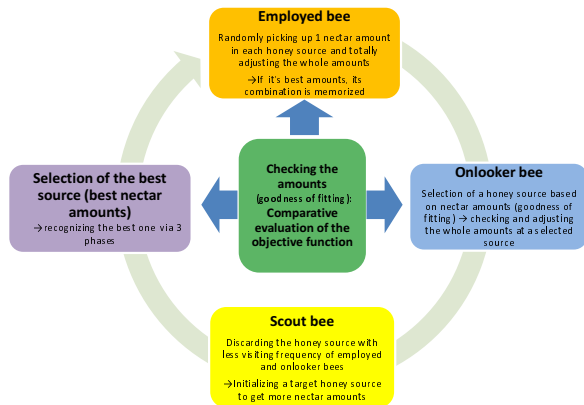


Fig.7 Cyclic flowchart of BCO algorithm

収穫蜂と追従蜂の両フェイズにおいては局所解候補近傍の探索を行うのは同じだが, 収穫蜂は決定論的に局所解候補を選択する一方, 追従蜂は確率的に局所解候補を選択する. 偵察蜂のフェイズは, 採餌行動において取り尽くした食糧源を捨てるミツバチの行動を真似たもので, 探索の進捗において有益と見なせなくなった局所解候補を見限り, 探索空間の新たな領域においてこれまでと異なる局所解を探索できるように, 収穫蜂と追従蜂の両フェイズにおける探索の礎となる同候補を選定するものである. 本アルゴリズムは, 収穫蜂と追従蜂の両フェイズで先験的知識を利用した局所解探索を行いつつ, 偵察蜂のフェイズで過去に囚われない新規探索を行って, 新旧両領域での探索のバランスをとった安定的な探索活動が繰り返し広げられていると見なせる. それ故, 高次元問題に対して有効なアルゴリズムとして認知されてきている.

(1) 収穫蜂

収穫蜂はあちこちに存在する蜜源から蜜のある花を見つけると, その際に後続する追従蜂にその位置をハの字ダンスで教えてから, それを収穫して巣まで持ち帰る. しかしそのまま帰巢せず, 他の蜜源も訪問し, そこでも同

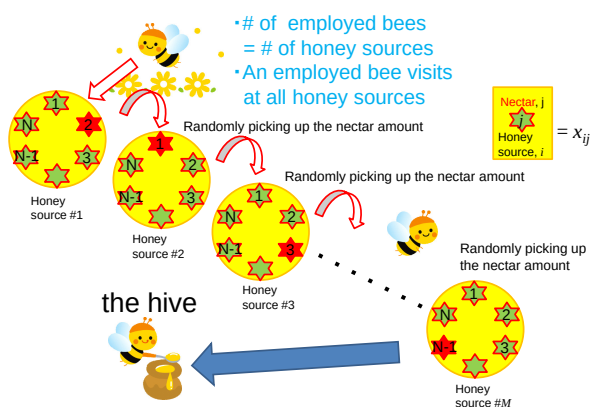


Fig.8 Schematic behavior of an employed bee

じように1つ蜜のあるの花を見つけ、ダンスしてそれを持ち帰る。アルゴリズムとしては、各蜜源から1つずつ花の蜜を選択して、全蜜源を通してから帰巢して蜜の量を見る。その挙動の概念をFig.8に示す。そこでは式(32)に基づいてに基づいて解(蜜量)が調整される。

$$\hat{x}_{ij} = x_{ij} + r_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (32)$$

ここに、 $\hat{x}_{ij}$ ：調整後の蜜源 i の蜜 j 成分、 x_{ij} ：調整前の蜜源 i の蜜 j 成分、 r_{ij} ：蜜源 i の蜜 j 成分に対する $[-1,1]$ で発生させた乱数、 x_{kj} ：ランダムに選ばれた蜜源 k の蜜 j 成分である。ここでいう調整とは、収穫蜂が選んだ蜜を一部の蜜源とランダムに入れ替えることで蜜量の増える可能性を探ることである。

(2) 追従蜂

追従蜂は収穫蜂の八の字ダンスを見て蜜源の場所を知り、そこへ向かうが、ダンス場所が1箇所ではないので比較を行って蜜を持ち帰る標的の蜜源を決める。実際は見た目や花の環境などから蜜量を判断するが、必ずしも的確な判断にはならない。本アルゴリズムではその判断基準となるベースは目的関数とし、そこから適合度を算定する。その各蜜源の適合度は

$$\text{Fit}_i(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \text{Obj}_i(\mathbf{x}_i)} & \text{when } \text{Obj}_i(\mathbf{x}_i) \geq 0 \\ \frac{1}{1 + |\text{Obj}_i(\mathbf{x}_i)|} & \text{when } \text{Obj}_i(\mathbf{x}_i) < 0 \end{cases} \quad (33)$$

で定義される。ここに、 $\mathbf{x}_i$ ：式(32)でも示した蜜源 i のベクトル(成分は N 個存在する花の蜜)、 $\text{Fit}_i(\mathbf{x}_i)$ ：蜜源 i の適合度、 $\text{Obj}_i(\mathbf{x}_i)$ ：蜜源 i の目的関数値を表す。その適合度から、各蜜源の重みは

$$w_i = \frac{\text{Fit}_i(\mathbf{x}_i)}{\sum_{i=1}^M \text{Fit}_i(\mathbf{x}_i)} \quad (34)$$

で算定される。ここに、 w_i ：蜜源 i の重みである。Fig.9は追従蜂の挙動を示した概要図となる。

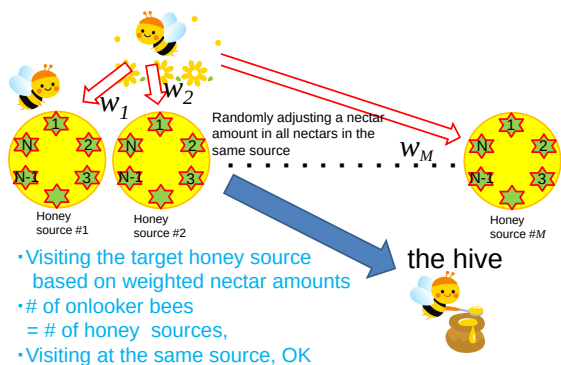


Fig.9 Schematic behavior of an onlooker bee

(3) 偵察蜂

偵察蜂は、蜜源を常に確認して収穫蜂や追従蜂がある一定回数以下しか訪れなかった蜜源を特定し、それらが蜜の収穫には役に立たないものとして蜜の収集候補から排除してしまう役割を担っている。排除してしまうばかりであれば一方的に蜜源が減るばかりとなるため、排除した数だけ全く新しい場所から蜜源を掲げ、それを収穫蜂や追従蜂に評価してもらうように準備する。アルゴリズム上では全く新しい蜜源作り出すことに等しいため、初期化と称している。Fig.10は偵察蜂の挙動を示した概要図となる。

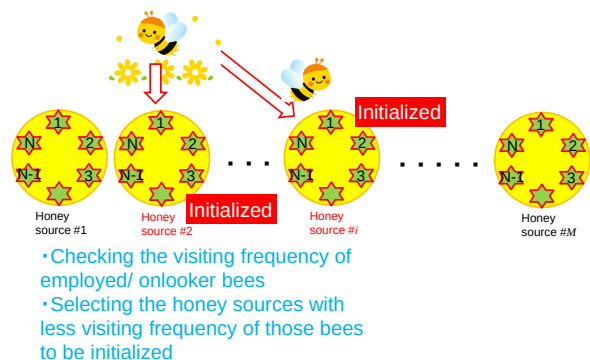


Fig.10 Schematic behavior of a scout bee

これらの3フェイズを経て、より良い解候補が更新され、一部の蜜源の初期化により新たに良い解候補が現れる可能性が出てくる。この循環的繰返しから、大域的探索がスムーズかつ高速に処理されることとなる。

7. 設計諸元の最適化

事例として、現況フィレットが無いAダムを用いる。そこで与えられる設計諸元はTable 2の通りである。これらの諸元を図化すると、断面形状はFig.11となる。ここでは、上述したPSOとBCOそれぞれのパラメータ最適化結果を示し、比較する。ただし内部引張応力発生防止のさらなる必要条件として「 $m_1, m_2 \geq 0, n > m_1$ 」の成立をを前提とする。

Table 2 Design parameters of 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

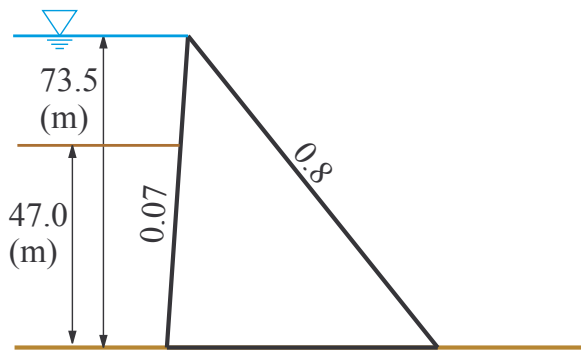


Fig.11 Actual basic section of A-dam

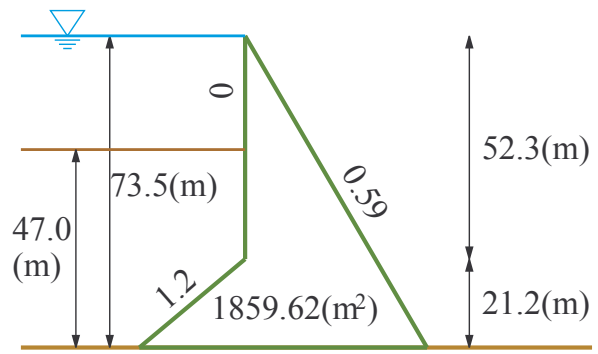


Fig.13 Designed basic section of A-dam with parameters optimized by BCO

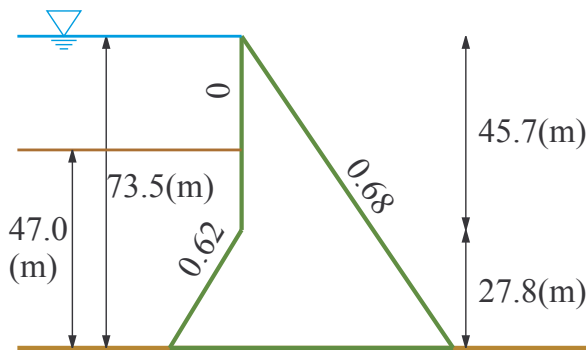


Fig.12 Designed basic section of A-dam with parameters optimized by PSO

本稿では、上・下流面勾配 m_1 , m_2 , フィレット高比 v , フィレット勾配 n に対して、建設経済性を考慮した場合に最も効果がある基本三角形の断面積を最小化するために最適化する。それ以外は所与の既知諸元とする。したがって目的関数は断面積 S である。

$$S = \frac{1}{2} \{ (m_1 + m_2) + (n - m_1)v \} h^2 \quad (35)$$

PSO の結果として $m_1=0.00$, $m_2=0.68$, $v=0.38$, $n=0.62$ という最適解を得て、本来の断面積 2349.98m^2 に対して 2188.11m^2 まで縮小できる結果 (Fig.12) を得た。一方、BCO の結果として $m_1=0.00$, $m_2=0.59$, $v=0.29$, $n=1.2$ という最適解を得て、本来の断面積に対して 1859.62m^2 まで縮小される結果 (Fig.13) を得た。明らかに BCO の結果が優秀なものとなり、PSO は最適解を見つけられなかったと言える。本稿の数値実験では、両者とも 1000 サイクルの探索をそれぞれ行っていたが、1 サイクルあたりの計算時間は PSO が 5 分程度、BCO は 10 秒程度であった。すなわち、PSO は約 83 時間強かかるのに対して、3 時間弱で済んでいる。PSO の計算時間に対して BCO の計算時間が 30 倍短く済んでおり、精度だけでなく計算効

率の面からも BCO の方が秀逸であると言える。両者の探索は収束条件による計算ではなく探索回数の上限で行われるため、PSO が BCO で発見できた最適解を見つけられなかったわけであるが、PSO もサイクル数を増やしてじっくり時間をかければ同じ最適解を見つけられる可能性がある。しかしながら、式 (29) を見れば分かるとおり初期値に依存しており、かつ、式 (28) から移動方向は第一項で慣性力 (事前情報の重み) が働くことになる。これは Fig.6 を見ても明らかで、緑の矢印 (慣性あるいは事前情報) が次に求める移動 (赤色の矢印) に大きな影響を及ぼしてくる。同図の考察時点の最適解が P_g 点であることから、その近傍しか探索出来なくなってしまう。また w を小さくして慣性の影響を弱めると局所解やその時点の最適解の影響を強く受け、その方向に移動方向が偏り出す。学習係数や慣性定数のバランスが鍵となるが、それらは問題によってバランスを取らねば新しい探索がしにくくなることは同ベクトル図からも想像に難くない。方向転換するためにも計算回数を重ねねば方向が変わらず、探索の効率は上がらない。これは粒子数 (i の取り得る上限) が大きくなればなるほど、慣性項が効いてしまう。そのため、恐らく狙い撃ちのように初期値を最適解付近の値にするかサイクル数を数百倍にしないと見つからないと思われる。

一方の BCO は確率的にある条件を満たすと全く新しい可能性を作り出す仕組みのため、PSO の大きな方向転換あるいは大きなジャンプ (赤色矢印の方向や長さの大変化) に匹敵することが、ありきたりに起きてパラメータが多くなっても大域的探索の効率は変わらないので、短時間に容易に見つけたのであると推察される。

ただし、両者とも最適断面として、フィレットの設置によって上流面勾配なし (鉛直のり面) になればいいという結論になっている。これは本来のフィレット設置目的に合致しており、フィレットの効果は断面最適化にする

ことと等価であると言える。

8. 結論

本稿では2つの人工群知能手法を比較しながら重力ダムの断面最小化のため諸元最適化を実現した。その事例計算の比較結果から、多変数最適化を図るにはBCOが精度面で秀逸かつ計算効率面で高いものと分かった。BCO最適化手法は、従来の導関数を用いる最適化手法では算定出来ないことを考えると、とても有用であると言える。この結果を踏まえれば、ダム断面設計だけでなく、水文モデルによる解析時に与えるパラメータ最適化にも活用していけると期待できる。

参考文献

- 飯田隆一 編著(1980)：新体系土木工学 75 ダムの設計，技報堂出版。
- 飯田隆一(1992)：コンクリートダムの設計法，技報堂出版。
- 江本久雄・中村秀明・別府万寿博・河村 圭・宮本文穂(2005)：ナップサック問題における Discrete PSO のパラメータ検討，土木学会 第9回設計工学に関するシンポジウム講演論文集，pp.169-173。
- 中村靖治(1990)：ダムのできるまで II 設計編 [コンクリートダム・フィルダム]，山海堂。
- 長谷川高士(1967)：接触圧による地盤内弾性応力，土木学会論文集，第140号，pp.1-12。
- 浜口俊雄・角 哲也・田中 茂信(2015)：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，京都大学防災研究所年報，第57号，pp.433-440。
- 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.

(論文受理日：2016年6月13日)