

I-28

個別要素法による鋼製砂防構造物の中詰材圧解析法に関する一考察

防衛大学校 正員 香月 智

防衛大学校 正員 石川信隆

防衛大学校 正員 大平至徳

砂防・地すべり技術センター 佐野 清

1. 緒言 鋼製砂防構造物は、鋼製枠組の中に玉石や碎石(中詰材)を詰めて水を透過させ、砂礫を貯砂させる目的で設置されているが、従来、その中詰材圧に関する基礎的研究はあまりなされていない¹⁾。本研究は、このような観点から、玉石を楕円形要素にモデル化し、個別要素法を用いた中詰材圧の解析法を提示するとともに、玉石の偏平率と配列の相違が側壁に作用する中詰材圧にどのように影響するかについて考察したものである。

2. 基本式と解析手順 (1) 接触判定 図-1に示すように、要素jが要素iに接近するとき、楕円iの中心から θ 方向に直線を仮定すると、その直線上における楕円要素i, j間の距離Lは次式のように導かれる。

$$L = \frac{-(a_i^2 R \sin \beta \sin \gamma + b_i^2 R \cos \beta \sin \gamma)}{(a_i \sin^2 \beta + b_i \cos^2 \beta)} - \frac{\sqrt{(a_i^2 R \sin \beta \sin \gamma + b_i^2 R \cos \beta \sin \gamma)^2 - (a_i^2 \sin^2 \beta + b_i^2 \cos^2 \beta)(a_i^2 R \sin^2 \gamma + b_i^2 R \cos^2 \gamma - a_i^2 b_i^2)}}{(a_i \sin^2 \beta + b_i \cos^2 \beta)} \quad (1)$$

ただし、

$$x_0 = a_i \cos \alpha \cos \phi_i - b_i \sin \alpha \sin \phi_i + x_i \quad \alpha = \tan^{-1} \{a_i (\theta - \phi_i) / b_i\}$$

$$y_0 = a_i \cos \alpha \sin \phi_i + b_i \sin \alpha \cos \phi_i + y_i \quad \beta = \theta - \phi_i$$

$$R = \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2} \quad \gamma = \tan^{-1} \{(y_0 - y_j) / (x_0 - x_j)\} - \phi_j$$

ここで、任意の θ の中の最小距離を $\min L(\theta)$ とすると、楕円iとjとの接触開始の条件は、次式によって与えられる。

$$\min L(\theta) \leq 0 \quad (2)$$

ただし、 $\min L(\theta)$ は最小値であるから、この θ は次式より求められる。

$$dL(\theta) / d\theta = 0 \quad (3)$$

ここで、式(3)はニュートン法を用いて解くことが出来る。

(2) 接触点および接触角 図-1に示すように、2つの楕円が点 P_1 , P_2 において交わっているとき、楕円i, jの接触点は、 $P_1 P_2$ の midpoint において与えられるものとした。さらに、 $P_1 P_2$ の全体座標になす角 ω を、この接触点における楕円i, jの接触角とした。

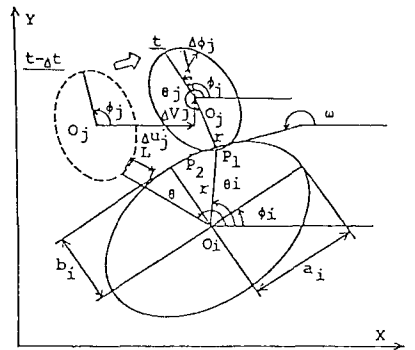


図-1 全体座標系における記号

(3) 接触相対変位 いま、時間 $t - \Delta t$ から t までの Δt 時間における楕円i, jの中心点 O_i , O_j の並進・回転移動量を Δu_i , Δv_i , $\Delta \phi_i$, Δu_j , Δv_j , $\Delta \phi_j$ で表わし、さらにこの間の節点における法線方向および接線方向の相対変位増分を Δu_n (接近を正)および Δu_s (要素が反時計回りする場合を正)とすると Δu_n , Δu_s は次式で与えられる。

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j) \sin \omega - (\Delta v_i - \Delta v_j) \cos \omega - r_i \Delta \phi_i \cos(\theta_i - \omega) + r_j \Delta \phi_j \cos(\theta_j - \omega)$$

$$\Delta u_s = (\Delta u_i - \Delta u_j) \cos \omega + (\Delta v_i - \Delta v_j) \sin \omega - r_i \Delta \phi_i \sin(\theta_i - \omega) + r_j \Delta \phi_j \sin(\theta_j - \omega)$$

(4) 接触時の作用力 図-2に示すように、求められた接触点の接触角に対して、法線方向および接線方向に、それぞれ弾性バネおよびダッシュポットを設ける。このバネおよびダッシュポットに生じる力および材

料定数は、木山ら²⁾が用いた手法に、接触点における曲率半径を用いて求めた。

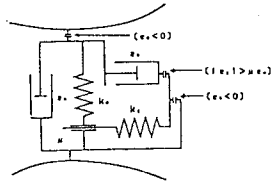
(5) 運動方程式の差分近似解 法線方向の接触力 $[f_n]_t$ および接線方向の接触力 $[f_s]_t$ とすると要素 i に関する x 方向分力 X_i 、 y 方向分力 Y_i 並びに中心まわりのモーメント M_i （反時計回りを正）は次式で表される。

$$[X_i]_t = \sum \{ -[f_n]_t \sin \omega - [f_s]_t \cos \omega \}$$

$$[Y_i]_t = \sum \{ [f_n]_t \cos \omega - [f_s]_t \sin \omega - m_i g \}$$

$$[M_i]_t = \sum \{ -[X_i]_t \cdot r_i \sin \theta_i - [Y_i]_t \cdot r_i \cos \theta_i \}$$

(5) 図-2 接点におけるバネおよびダッシュポット



ここに、 Σ は接触するすべての要素 j に関する総和を表す。また m_i は要素 i の質量である。

よって、式(5)で求めた X_i 、 Y_i 、

M_i を用いて、オイラー法によって、要素 i の t

における加速度、速度、変位増分が求まる。

3. 数値解析例 解析法の妥当性を検証するために、少ない要素における解析例

によって要素間に働く力の伝達傾向などを確認した³⁾うへで、要素のもつ偏平率を変化させて、側壁に作用する中詰材圧に及ぼす影響を調べた。図-3に、横長の配列から縦長の配列に至る4つの詰め込みパターンと、その解析結果における各パターンごとの中詰材圧分布を示した。解析に用いた入力データは、文献^{1), 2)}を参考に、表-1のように決定した。図-3より ①中詰材圧分布はいずれの場合も静止土圧分布（三角形分布）の傾向にほぼ似ている。

②最下段の側壁圧が非常に小さくなっているが、これは壁面や底面との摩擦がこの分布傾向に大きな影響を与えているためと思われる。 ③側壁圧の大きさは配列が縦長になるほど大きい。これは、要素間に働く接触力の方向が水平方向に近づくためと考えられる。

4. 結 言 楕円形要素を用いた個別要素法による中詰材圧の解析法を提示して解析した結果、中詰材圧は要素のもつ形状異方性の影響をかなり大きく受けることが確認された。また中詰材圧を定量的に把握することも可能となった。なお、本研究の数値計算には、当校本科梶元大介学生のご協力を得たことを付記し、謝意を表します。

4. 結 言 楕円形要素を用いた個別要素法による中詰材圧の解析法を提示して解析

した結果、中詰材圧は要素のもつ形状異方性の影響をかなり大きく受けることが確認された。また中詰材圧を定量的に把握することも可能となった。なお、本研究の数値計算には、当校本科梶元大介学生のご協力を得たことを付記し、謝意を表します。

参考文献 1) 砂防・地すべりセンター鋼製砂防物研究会：鋼製砂防構造物設計便覧，昭和60年10月

2) 木山・藤村：カンドルの離散剛要素を用いた岩質粒状の重力流動の解析，土木学会論文報告集，第333号、1983年5月、pp.137~146 3) 梶元・香月・石川：楕円形モデルを用いた個別要素法による中詰材圧の解析法，関東支部技術研究発表会講演概要集、1988年3月、pp.24~25

表-1 解析に用いたデータ

区 分	単位体積重量 (gf/cm^3)	ポアソン比	ヤング係数 (kgf/cm^2)	要素間摩擦角 (度)	要素1個の面積 (cm^2)	要素1個の厚さ (cm)
値	2.6	0.3	750	30	38.5	1

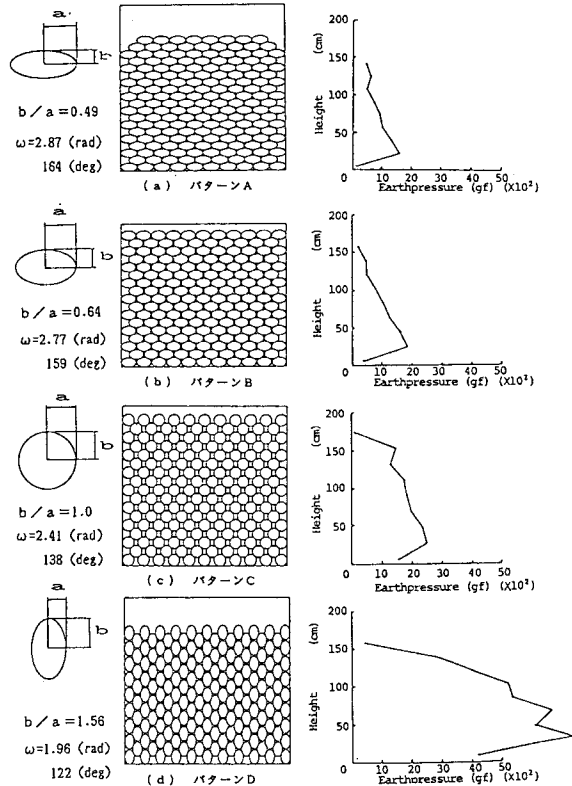


図-3 偏平率毎の配列パターンと側壁に作用する中詰材圧