

上界計算に基づく擁壁主働土圧の算定に関する研究

岐阜工業高等専門学校専攻科 学生会員 ○前田 宗春
 岐阜工業高等専門学校 正会員 水野 和憲
 長岡技術科学大学大学院 正会員 大塚 悟

1. 研究の背景と目的

従来、土圧の算定には剛な仮想壁を導入して作用荷重を算出する方法が用いられる。Coulomb(1773)は剛な仮想壁と直線すべりの間にある土楔を予め仮定して運動(滑動)方向を規定することにより、主働・受働土圧を算出した¹⁾。一方、塑性定理である極限解析から土圧問題を捉えると、受働土圧は仮想壁を介して土楔に作用する荷重(未知数)と変位速度(運動)がなす外力仕事率は正となるが、主働土圧に対しては荷重と変位速度が逆方向になるために仕事率は負になる問題が生じて、極限解析を適用するには注意が必要となる。擁壁の設計において主働土圧の評価は大変重要であるが、上記の理由により、極限解析による主働土圧算定はこれまであまり実績がない。

そこで本研究では、上界定理に基づく極限解析により、仮想壁(以後、擁壁と呼ぶ)に作用する荷重の境界条件を工夫して主働土圧算定を実施した。上界定理に基づく極限解析には剛塑性有限要素法²⁾(Rigid Plastic Finite Element Method, 以後、RPFEMと呼ぶ)を用いた。RPFEMによる解析は、連続体理論に基づくために、すべり線のような不連続線を取り扱うことができないが、Coulomb土圧の直線すべりのように破壊形式を仮定する必要はなく、境界値問題に応じた破壊形態を合理的に決定できる特徴がある。そして、RPFEMにより得られた主働土圧については、同計算条件で得られるCoulomb主働土圧と比較し、解の妥当性を確認した。

2. 極限解析による主働土圧算定法

裏込め土に作用する外力荷重系は、一定載荷される物体力 \mathbf{X} としての自重と擁壁を介して作用する表面力 \mathbf{T} としての荷重である。この表面力を基準荷重 \mathbf{T} とし荷重係数(荷重強度)を ρ とすると、この基準荷重 \mathbf{T} が ρ 倍された時に塑性崩壊となる主働状態(もしくは受働状態)であるとする。この $\rho\mathbf{T}$ を主働土圧合力(もしくは受働土圧合力)と定義した。本研究で

は基準荷重 \mathbf{T} と得られる速度場 $\dot{\mathbf{u}}$ がなす外力仕事率が正となる崩壊モードに対する荷重係数 ρ をRPFEMにより求めた。擁壁に作用する荷重 \mathbf{T} の作用位置や作用方向は自由に設定できるが、受働破壊では擁壁を裏込め土側に押込む方向(この向きを正とする)に基準荷重を設定し、逆に、主働破壊では擁壁を引き下げる方向(この向きは負となる)に設定した。

極限解析によって荷重係数 ρ を求めるには、運動学的可容な速度場 $\dot{\mathbf{u}}$ を仮定し、外力仕事率と内部消散率を等しいとする次式の上界計算式を用いる²⁾。

$$\rho \int_{S_\sigma} \mathbf{T} \cdot \dot{\mathbf{u}} dS = \int_V \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p dV - \int_V \mathbf{X} \cdot \dot{\mathbf{u}} dV \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p$ は内部消散率 $D(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p)$ である。内部消散率を計算するために、地盤材料の降伏関数はDrucker-Prager型の降伏関数とし、この降伏関数による剛塑性構成式³⁾を適用した。さらに降伏関数に関する制約条件式(関連流れ則を適用することによる塑性ひずみ速度 $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^p$ の条件式)、および変位速度の大きさを規定する制約条件式を満足するように荷重係数の最小化演算を行う。最小化演算には式(1)の右辺を目的関数とする汎関数の停留条件を用いることで、最終的に荷重係数 ρ が求まり、主働土圧合力 P_a もしくは受働土圧合力 P_p が算出される。なお、本研究では解析の高速化を目的にPenalty法を適用した。

3. RPFEMによる主働土圧算定の事例解析

3.1 解析条件

本研究では典型的な土圧算定を実施するため、水平地表面(地表面傾斜角 $i = 0^\circ$)をもつ裏込め土が、高さ $H = 6\text{m}$ 、幅 $d = 0.1\text{m}$ 、擁壁背面角 $\alpha = 0^\circ$ の(仮想)擁壁に及ぼす主働土圧についてRPFEMを用いて算出する。解析に用いた有限要素メッシュ及び境界条件を図-1に示す。計算は2次元平面ひずみ条件とした。裏込め土および下部地盤はそれぞれ均一な砂質地盤を想定して表-1に示す土質パラメータを用いる。また、擁壁は極めて剛性の高い材料とし、

表-1 に併記した値を用いてビーム要素でモデル化した。また、擁壁下端は下部地盤の影響を受けないように切り離した。そして、擁壁を介して、下端から $h = 2\text{m}$ の位置に擁壁を引き下げる方向に集中荷重を作用させて極限解析を実施した。

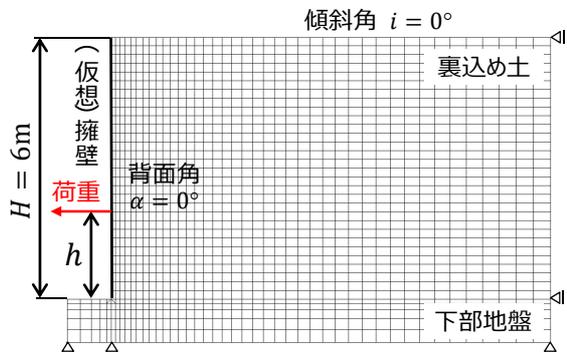


図-1 有限要素メッシュと境界条件 (主働時)

表-1 裏込め土、下部地盤および(仮想)擁壁の材料定数

裏込め土の土質パラメータ	
せん断抵抗角 ϕ [°]	10,20,30,40
粘着力 c [kN/m ²]	1 ($\div 0$)
単位体積重量 γ_t [kN/m ³]	20
下部地盤の土質パラメータ	
せん断抵抗角 ϕ [°]	40
粘着力 c [kN/m ²]	1 ($\div 0$)
単位体積重量 γ_t [kN/m ³]	20
(仮想) 擁壁の材料パラメータ	
軸降伏応力 N [kN/m ²]	1
降伏曲げモーメント M [kN・m]	10000

3.2 解析結果

RPFEM を適用して解析した結果、荷重係数 ρ は負の値が得られた。つまり $\rho (< 0) \times T (< 0) = \rho T (> 0)$ となり、主働土圧合力は擁壁を押す方向で算出された。土塊自重による仕事が卓越する場合には、擁壁を引き下げなくても裏込め土は崩壊することが示された。つまり擁壁側から裏込め土に圧縮力を作用させた崩壊モードであることがわかった。

裏込め土の内部摩擦角に応じた主働土圧合力 P_a を図-2 に示す。図-2 には同条件で求めた Coulomb 主働土圧合力についても併記した。これらより両者はほぼ同程度の値が得られた。図-3 に裏込め土の内部摩擦角 $\phi = 40^\circ$ における等価塑性ひずみ速度分布図(帯状部が破壊領域)を示す。なお図中には変位速度場も併記した。また Coulomb 土圧論より得られる直線すべりとその水平方向からの角度も併記した。これらより主働状態では破壊領域の土塊の運動方

向が適切に求められていることがわかる。また、典型的な境界条件における土圧算定であれば、図-3 の主働状態の破壊領域は既存の Coulomb 土圧論より求められるすべり線と概ね一致することを示した。

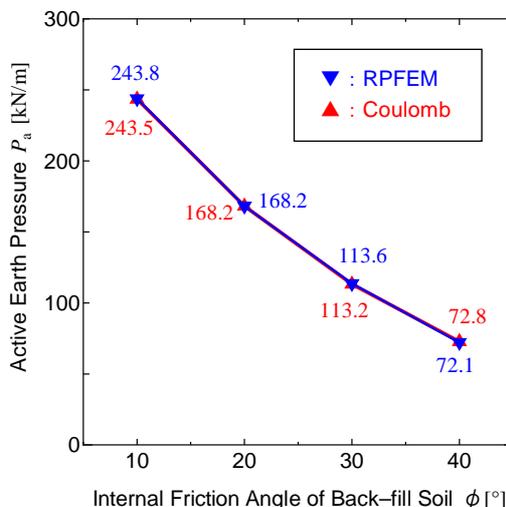


図-2 RPFEM および Coulomb 主働土圧合力

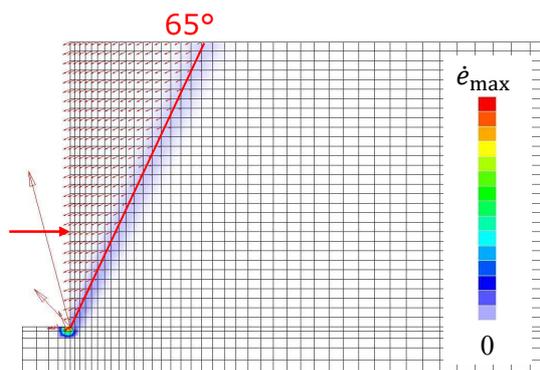


図-3 等価塑性ひずみ速度分布図と変位速度場 ($\phi = 40^\circ$)

4. 結論

紙面の関係で省略したが、受働土圧や地震時主働土圧も本計算手法で解析可能であることを確認した。このように剛塑性境界値問題を合理的かつ統一的に理解するには、「基準荷重と速度場がなす外力仕事率が正になること」を基準に考えることが重要である。また、剛塑性有限要素法による土圧の解析は、既存の土圧理論で対応できない3次元問題や擁壁背後地盤が不均質である場合にも有効である。

参考文献

- 1) 土質工学会編：土質工学ハンドブック, pp.266-267, 1982.
- 2) Tamura, T. : Rigid-Plastic Finite element method in Geotechnical Engineering, Computational Plasticity, Current Japanese Material Research, pp.15-23, 1990.
- 3) Tamura, T., Kobayashi, S. and Sumi, T. : Rigid plastic finite element method for frictional material, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.1-12, 1987