

上界・下界つり合い法による土圧問題の解析

西原 晃*

An analysis of the earth pressure problems
by Upper and Lower Equilibrium Method

Akira NISHIHARA*

ABSTRACT

The problem of the active and passive earth pressure acting on a rigid retaining wall has been studied ever since Coulomb formulated the limit equilibrium solutions in 1776. It has long been recognized that such solutions greatly overestimate the passive pressure. With the development of the plasticity theory, many problems have been solved on much more logical basis.

The author has examined the logical basis of the limit equilibrium method and the limit analysis, and proposed a set of new methods (Upper and Lower Equilibrium Methods) of obtaining both of the upper and the lower bound solutions. In this paper, the validity of Upper and Lower Equilibrium Methods (ULEM) is examined through analysis of the problem of the active and passive earth pressure by ULEM.

キーワード：上界・下界つり合い解析，極限つり合い解析，極限解析，土圧問題

Keywords: upper and lower equilibrium method, limit equilibrium method,
limit analysis, earth pressure problem

1. まえがき

土構造物のせん断破壊例はまれではない。地盤の破壊に関する問題は、土質力学における最も古くて、かつ大きなテーマであり、土圧論、支持力理論、斜面や盛土の安定問題といった形で発展してきた。これらの諸問題は構造物と地盤の相互作用の違いであり、地盤の破壊の取り扱いとは基本的に同じである。すなわち、地盤が過度の荷重を受けるとせん断変形が著しくなり、ついには、ある面（すべり面）に沿ってすべるようなせん断破壊が生じると考える。このような、せん断破壊を論じるには、すべり面の位置と、そのときに作用している地盤内の力あるいは応力状態を同時に推定することが必要である。

実務的には、地盤の破壊の問題は、地盤を剛塑性体と仮定した、古典的塑性理論に基づいた解析手法が多く用いられている。これらの解析手法は、細かな差異は別として、極限つり合い解析、すべり線解析（特性曲線法）、

極限解析の3つに大別される。

極限つり合い法は、すべり面を仮定し、そのすべり面に沿ってすべろうとする土塊に作用する力のつり合いをもとに解く方法である。この方法は1776年にCoulombによって、よう壁に作用する土圧の問題に適用されて以来、現在にいたるまで最も広く用いられている解析法で、古典的な土圧論だけでなく、支持力理論や円弧すべり面法などはいずれもこの方法である。

極限つり合い法では、すべり面の形状や位置はあらかじめ仮定されるが、これに対して、地盤内部の応力状態とすべり面を同時に求めて行こうとする方法が、すべり線法¹⁾である。すべり線法では、塑性領域の応力状態を応力の特性曲線に沿って数値的に解かなければならず、計算手順はかなり煩雑である。そのため、実務で用いられることは少ないが、解の精度は高く、他の手法で得られた解の検証に用いられることもある。

* 建設環境工学科

残る1つの極限解析法²⁾は、塑性理論における最大塑性仕事の原理を利用した方法である。この方法では、破壊条件を破らなような応力状態から正解よりも小さな下界値と、破壊領域の速度場から正解より大きな上界値を求めることができ、破壊荷重の正解が存在する範囲を明確に示すことができる。しかし、この方法も、解析手順が煩雑で、実務に適用されることは少ない。

これらの解析法によって得られる解は、破壊状態の応力と変形が満足しなければならない条件のうちの、限られたいくつかの条件しか満たさない近似解である。筆者は前報³⁾において、それぞれの解法が満足している条件について詳細に検証し、極限解析の新しい解釈を示すとともに、応力のつり合いと破壊条件のみから、上界値と下界値を同時に求める手法を提案した。本研究では、この手法を土圧問題に適用し、他の解析法の結果と比較することにより、土圧解析法の解について検証する。

2. 上界・下界つり合い法³⁾

2.1 剛塑性体における塑性理論

図-1に示すように、ある荷重系のもとで、静的つり合いの状態にある物体を考える。ここで、問題とするのは、与えられた条件のもとで、物体が破壊を生じるであろう荷重系あるいは内部の応力状態を求めることである。

ある荷重系のもとで、破壊に至った物体を考えると、その内部には、弾性域、破壊域（完全塑性域）、また破壊に至らないまでも塑性変形が生じた塑性域（非破壊塑性域）が混在している。このような境界値問題を厳密に解くためには、弾性域および非破壊塑性域における弾性ひずみ成分を無視することはできない。しかし、實際上多くの問題においては、解析上の困難さを避けるために、ひずみの弾性成分はしばしば無視され、物体は完全塑性状態として取り扱われる。

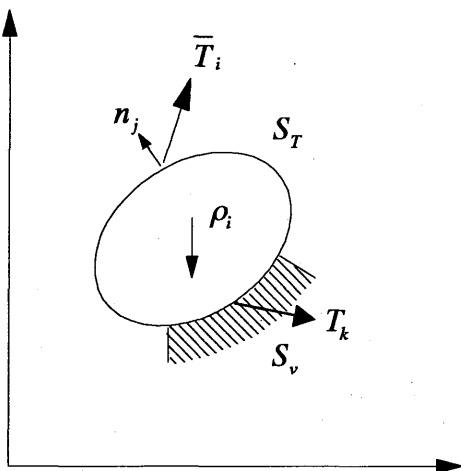


図-2.1 つり合い状態にある系

完全塑性状態にある領域において、応力と変形が満足しなければならない条件は以下の通りである⁴⁾。

①応力のつり合い式

$$\sigma_{ij,j} + \rho_i = 0 \quad (2.1)$$

ここに、 σ_{ij} : 応力テンソル、 ρ_i : 物体力ベクトルである。

②応力（表面力）に関する境界条件

$$\sigma_{ij} \cdot n_j = \bar{T}_i \quad (2.2)$$

ここに、 T_i は表面力ベクトルで、 \bar{T}_i は表面力が与えられる境界 S_T における境界条件である。また、 n_j は境界表面における単位法線ベクトルである。

③破壊条件

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \quad (2.3)$$

④適合条件（ひずみ増分～速度関係）

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2.4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_{ij}$ はひずみ速度テンソル、 v_i は速度ベクトルである。

⑤速度に関する境界条件

$$v_i = \bar{v}_i \quad (2.5)$$

ここに、 \bar{v}_i は速度が与えられる境界 S_v における境界条件である。

⑥応力～ひずみ増分関係（流れ則）

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.6)$$

ここに、 f は式(3)で与えられる破壊関数、 Λ は比例定数である。

図-2.1に示す系で、求める解とは、変位境界 S_v に作用している表面力 T_k であり、上記のすべての条件を満足するようにして得られた解が正解である。しかし正解を求めるのは容易ではなく、実際にはこれらの条件のうちのいくつかの条件を満足するような近似解が求められる。たとえば、極限つり合い解析、すべり線解析および極限解析における下界解析は応力に関する条件のみ

を考慮しており、変形はまったく考慮されていない。

前出の条件のうち、①応力のつり合い式と、②応力に関する境界条件を満足するような応力および表面力の系をつり合い応力系とことにする。つり合い応力系のうち、物質内部のすべての領域において、破壊条件を破らないような応力が静的可容応力系である。このとき、静的可容応力系から求められた解は正解より大きくないことが保障される。これが極限定理における下界定理である。

一方、④適合条件（ひずみ増分～速度関係）と、⑤速度に関する境界条件を満足するひずみ増分および速度を適合速度系と呼び、その速度系から、応力～ひずみ関係によって導かれ、かつ破壊条件を満たすような応力を適合系の応力と呼ぶ。この適合系の応力から導かれた解は正解より小さくないことが保障される。これが上界定理である。適合系の応力には、つり合い条件を満足することが要求されていない。したがって、応力のつり合い条件に基づく塑性仕事の原理を上界定理には適用するには矛盾があること、また、剛塑性体における上界解析はつり合い解析と等価であり、適合速度系とは無関係であることを前報において示した。それによって、上界定理には別の解釈が必要であり、適合応力系にかわるものとして、破壊応力系を新たに導入した。

破壊応力系とは、つり合い応力系のうち、塑性領域において破壊条件を破っている応力である。破壊応力系が設定されれば、この応力系から導かれる解は正解より小さくないことが保障される。これが新しい上界定理の解釈である。破壊応力系は、物体の運動に関係なく、つり合い式と破壊条件のみで求められるため、従来の上界解析に比べてはるかに容易である。

2.2 上界・下界つりあい法

前報³⁾で提案した上界・下界つりあい法は、静的可容応力系と破壊応力系を設定することにより、上界解と下界解を同様の手順によって求める方法である。解が満足すべき条件は、前出の①応力のつり合い式、②応力に関する境界条件の他に、上界つりあい法では、塑性域において応力が破壊条件を破っていること、

$$f(\sigma_{ij}) \geq 0 \quad (2.7) \quad \text{上界}$$

であり、一方下界つりあい法では、すべての領域において応力が破壊条件を破らないこと、

$$f(\sigma_{ij}) \leq 0 \quad (2.8) \quad \text{下界}$$

である。

このような解は、領域をいくつかの剛体ブロックに分

割し、それぞれのブロックにおいて、静的可容応力系あるいは破壊応力系を設定することによって求められる。

剛体ブロックの破壊応力系は、図-2.2に示すように、破壊線の外部に飛び出すような応力円で表される。この応力円の極Pから、破壊線上の各点(i, j, k)に引いた線は方向がブロックの境界（すべり面）の方向を示しており、また各点の応力が境界の表面力の値を示す。1つの応力円を与えられているため、各境界の表面力およびブロック内部の応力はつり合い条件を満足している。

一方、静的可容応力系を設定するには、図-2.3に示すように、応力不連続線を設けて、ブロックを二つの領域にわけなければならない。それぞれの領域で、破壊条件を破らないような応力円を設定すれば、それぞれの応力円の極から、ブロック境界の方向に引いた線と応力円の交点が各境界の表面力を与える。この場合、境界jとkはすべり面ではなく、すべり面の方向は別に定められる。二つの応力円の交点sの応力が応力不連続線上の応力値を与える。この応力不連続線を介して、二つの領域の応力および各境界の表面力は、すべてつり合い条件を満足している。

このように、領域をブロックに分け、それぞれのブロックの応力円を連ねていくことにより、領域全体の破壊応力系と静的可容応力系が求められ、これらの応力系から、それぞれ解の上界値と下界値が求められる。

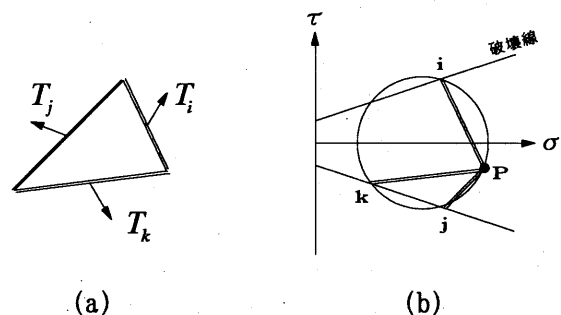


図-2.2 剛体ブロックの破壊応力系

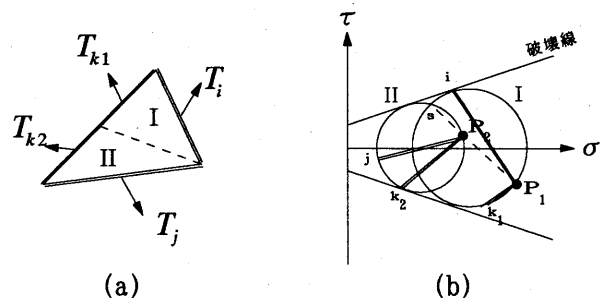


図-2.3 剛体ブロックの静的可容応力系

3. 上界・下界つり合い法による土圧問題の解析

土圧という言葉は広い意味をもっており、一般には土の内部のある境界に作用する応力の総称である。境界面の応力の例として、よう壁と背後の地盤（裏込め土）の接触面に作用する応力があり、これは壁面土圧とも呼ばれる。よう壁の破壊時に作用する壁面土圧を求める解析は土圧問題と呼ばれ、よう壁の設計のみならず、アンカ一杭の働き、水平力を受ける埋め込み基礎の横抵抗などを論じるうえでも重要なものである。

裏込め土に押されるかたちで、よう壁が前方に移動して破壊が生じる事例を主働破壊(active failure)と呼び、主働破壊時に壁に作用している壁面土圧を主働土圧と呼ぶ。逆に、よう壁が後方へ倒れかかり、裏込め土が押されるかたちで、上方へすべり上がる事例を受働破壊(passive failure)と呼び、受働破壊時に壁面に作用している壁土圧を受働土圧と呼ぶ。

破壊時による壁に作用する土圧を求める問題は、18世紀にCoulombによってはじめて力学的に取り扱われた。Coulombは、直線状のすべり面を仮定し、すべり面上の裏込め土を剛体ブロックとして、このブロックに作用する力のつり合い式と破壊条件から、壁面土圧を求めた。彼によって提案されたこの手法が極限つり合い解析のはじまりといわれている。Coulombによって求められた壁土圧はCoulomb土圧と呼ばれ、現在においても土圧問題の解析に最も多用されている。

その後、19世紀の中頃になって、Rankineが土圧問題に対する新しい解析法を提案した。Rankineは、裏込め土内部の応力状態に着目し、それぞれの応力状態によって地盤をいくつかのブロックに分割し、応力のつり合い式と破壊条件から壁土圧を求めた。Rankineの解析法はRankine土圧と呼ばれ、地盤内の応力状態の変化に着目した点で、Coulombの手法よりもすすんでいるといえる。Rankineの土圧論では、地盤をいくつかのブロックに分割し、それぞれの内部でつり合い式と破壊条件を待たすような応力を求める。この手法は、基本的に上界つり合い法と同じである。しかしながら、その解析過程が煩雑であり、実務に用いられることは少ない。

土圧問題に関しては、CoulombとRankineの土圧論以外にも、すべり線法¹⁾や極限定理²⁾を適用した例がある。しかし、土圧問題では、壁の形状や、壁面と裏込め土の間のまさつ抵抗の取り扱いなど、考慮すべき要因が多く、現在にいたるまで、その正解は得られていない³⁾。

3. 1 土圧係数

図-3.1に示すように、高さHのよう壁を考える。裏込め地盤は水平であり、また土質特性は均質であるとする。このとき、壁の上端から深さzの位置に作用する土圧は

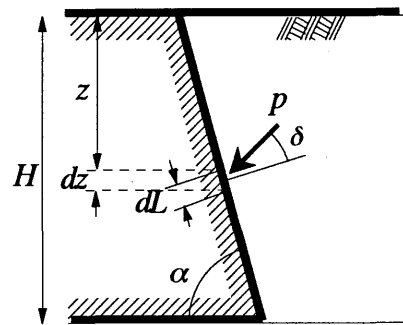


図-3.1 土圧係数の求め方

$$p = A\gamma z \quad (3.1)$$

と表すことができる。ここに、 γ は裏込め土の単位体積重量で、Aは定数である。また、式(3.1)において、 γz は鉛直方向の応力である。

よう壁全体に作用する土圧の合力は、

$$P = \int p dL \quad (3.2)$$

で与えられる。また、よう壁が水平となす角を α とすれば、

$$dL = \frac{1}{\sin \alpha} dz \quad (3.3)$$

であるから、式(3.2)は、

$$P = \frac{1}{\sin \alpha} \int_0^H p dz = \frac{1}{2 \sin \alpha} A \gamma H^2 \quad (3.4)$$

となる。ここで、従来の土圧の表し方にならって、

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cdot K \quad (3.5)$$

と表すことにすれば、

$$K = \frac{A}{\sin \alpha} \quad (3.6)$$

となる。ここで、Kは土圧係数と呼ばれる。

3. 2 受働土圧係数の上界値

図-3.2に示すように、裏込め地盤をいくつかのブロックに分割する。壁と裏込め地盤との接触面が変位境界で、これに接するブロックを変位境界ブロックと呼ぶこと

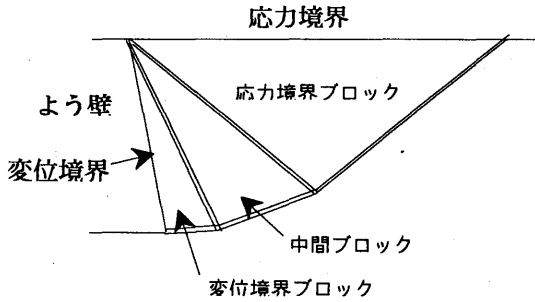


図-3.2 地盤のブロック分割

にする。裏込め地盤の地表面は、応力値が明確な応力境界であり、応力境界を含むブロックを応力境界ブロックとする。また、変位境界ブロックと応力境界ブロックの間のブロックを中間ブロックと呼ぶことにする。図-3.2は中間ブロックが1個の場合を示しているが、中間ブロックの数を増やせば、解析結果は正解に近づく。

ここでは、壁上端から、深さ z の位置における各ブロック内部の応力状態を求める。簡単のために、土の粘着力 c はゼロであり、内部まさつ角 ϕ のみを考えるが、粘着力 c がある場合も手法は全く同様である。

上界つり合い法では、変位境界ブロックから応力境界ブロックまで、ブロック境界（すべり面）において破壊条件を満足するような応力円を連ねていくことにより、各ブロックの応力状態を求める。このようにして求められた変位境界ブロックの応力状態から、よう壁に作用する土圧を求めることができる。図-3.3に上界値の求め方の流れを示す。

図-3.2に示すように、中間領域を1ブロックとした場合を考える。図-3.4(a)は応力境界ブロックと変位境界ブロックの応力状態を示している。受働破壊では、地盤は壁によって水平方向に押されるため、地盤全体として、水平方向の応力が鉛直方向の応力より大きい。応力境界ブロックにおいて、深さ z における鉛直方向の応力を σ_i とすれば、

$$\sigma_b = \gamma z \quad (3.14)$$

であり、 σ_b は最小主応力となる。したがって、応力境界ブロックの応力状態は、破壊線に接するような応力円によって与えられる。一方、変位境界ブロックの応力状態も破壊線に接する応力円によって示される。この応力円において、壁と裏込め土との間のまさつ角を δ とすれば、壁面における垂直応力 σ_a は図-3.4(a)の点 a の垂直応力で与えられる。また、土圧 p は

$$p = \frac{\sigma_a}{\cos \delta} \quad (3.15)$$

であるから、式(3.1)、(3.6)、(3.14)より、土圧係数 K が図-3.3の式(3.13)で求められることになる。

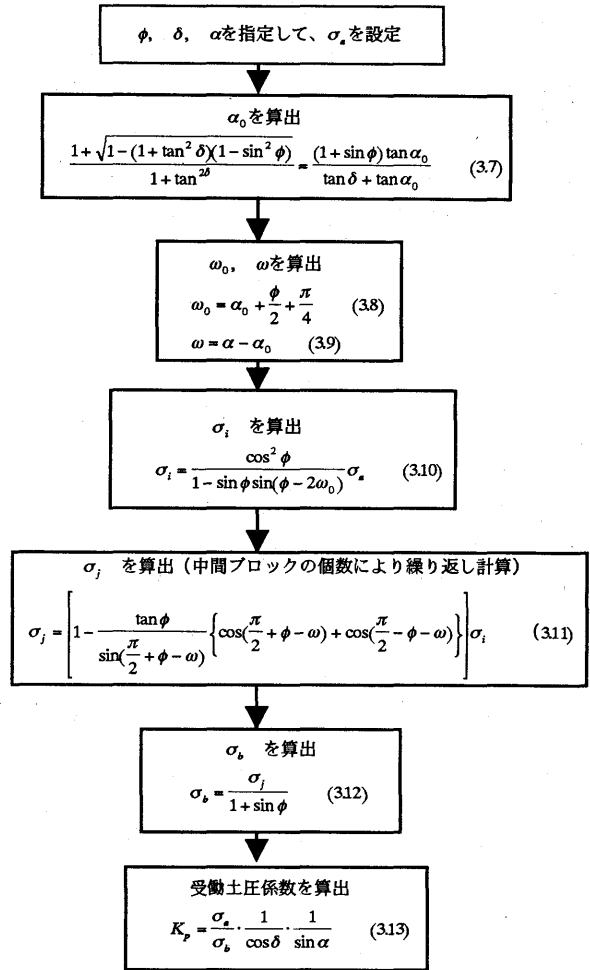
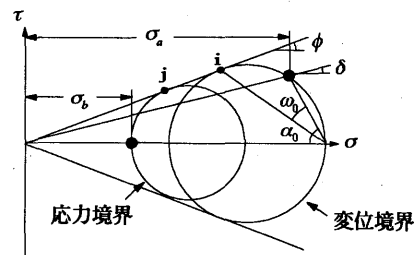
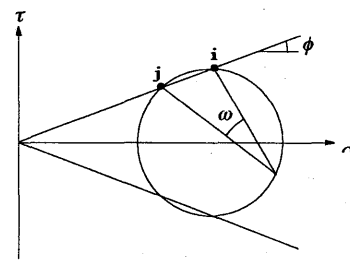


図-3.3 受働土圧係数の求め方（上界法）



(a) 境界ブロックの応力状態



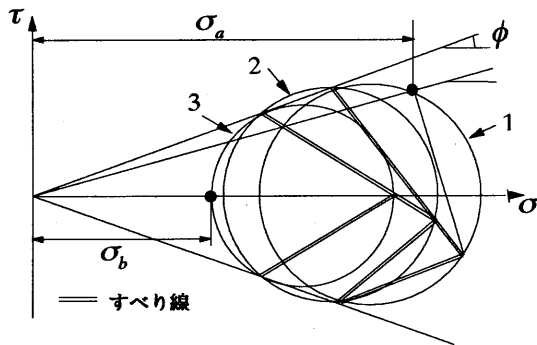
(b) 中間ブロックの応力状態

図-3.4 破壊応力状態の求め方

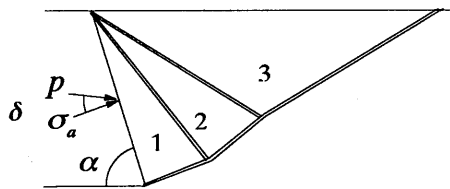
中間ブロックの応力円は図-3.4(b)のように示される。この応力円は、応力境界ブロックと変位境界ブロックが破壊線と接する点*i*, *j*を通るように設定される。これは、各ブロック間の応力の連続性を保つためである。

解析ではまず σ_0 の値を適当に設定して、変位境界ブロックの応力円を確定し、幾何学的関係から、図-3.4に示す角度 α_0 、 ω_0 および中間領域の角度 ω を計算する。これらの角度を用いると、変位境界ブロックおよび応力境界ブロックが破壊線と接する点*i*, *j*の垂直応力 σ_i 、 σ_j が求まり、応力円の位置が確定する。このようにして確定した応力境界ブロックの応力円から σ_0 の値が求まり、最初に設定した σ_0 の値との比より、土圧係数*K*が求められる。また、各ブロックの応力円の極と破壊線上の応力点を結ぶ線の方がすべり面の方向を与える。

図-3.5は中間ブロックが1個の場合の、各ブロックの応力円とすべり面の形状を示したものである。



(a) 破壊応力状態



(b) すべり線の形状

図-3.5 破壊応力状態とすべり線 (受働破壊)

3. 3 受働土圧係数の下界値

図-3.6は、下界つり合い法による受働土圧の求め方の流れを示したものである。また、図-3.7は各ブロックの応力円を示したものである。変位境界ブロックと応力境界ブロックの応力円は上界つり合い法と同様である。しかし、下界つり合い法では、中間ブロックの応力円の設定のしかたが異なる。下界定理では、地盤内のすべての領域において、破壊条件が破られないことが保障されな

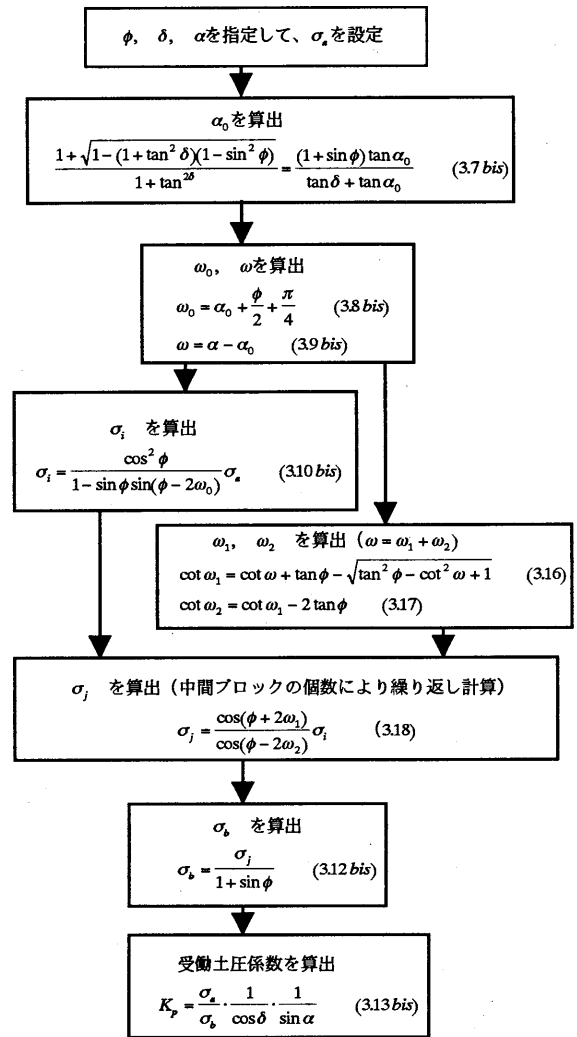
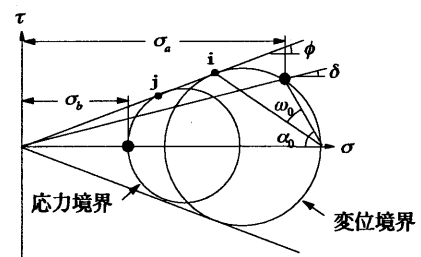
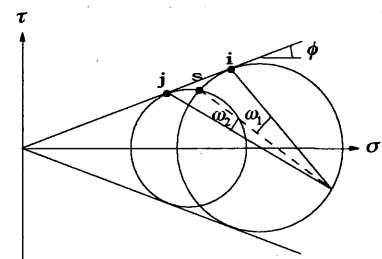


図-3.6 受働土圧係数の求め方 (下界法)



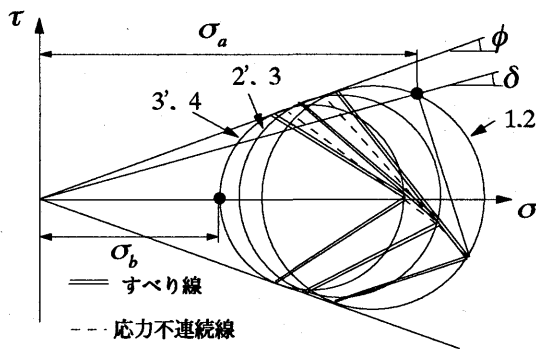
(a) 境界ブロックの応力状態



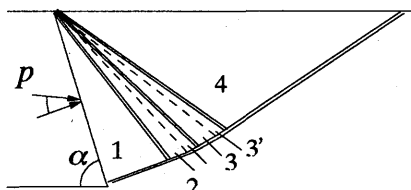
(b) 中間ブロックの応力状態

図-3.7 静的可容応力状態の求め方

なければならない。したがって、すべての応力円は破壊線の外部に出るはいけぬ。中間ブロックの応力円は、応力の連続性から、変位境界ブロックや応力境界ブロックと破壊線上で応力点(i, j)を共有しなければならない。なおかつ、破壊条件を破らないような応力円は、変位境界および応力境界ブロックの応力円と同じである。したがって、中間ブロックの応力円は二つ存在することになり、それを可能にするために、中間ブロックの内部に応力不連続線を設定しなければならない。このようにして求めた各ブロックの応力円とすべり面の形状を図-3.8に示す。



(a) 破壊応力状態



(b) すべり線の形状

図-3.8 静的可容応力状態とすべり線
(受働破壊)

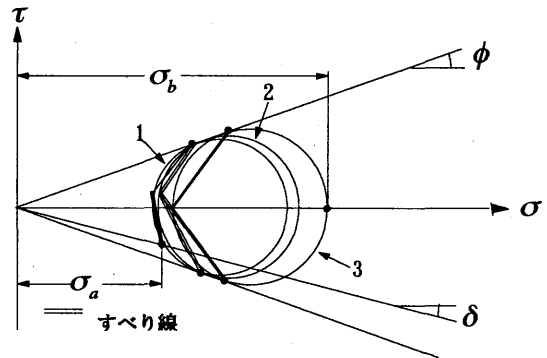
3. 4 主働土圧係数

主働土圧係数の上界値と下界値の求め方も、受働土圧係数の場合とほとんど同じである。しかしながら、主働破壊では、上界と下界の意味が逆転することに注意しなければならない。これは、すべりを起こそうとする外力の作用方向とすべり土塊の運動方向に関係している。受働破壊では壁面から作用する外力(土圧)の向きに土が移動するが、主働破壊では壁面からの土圧と逆方向に土が移動するからである。これにより、主働破壊では、土圧がなす仕事がマイナスとなり、上界と下界の意味が逆転する。すなわち、主働破壊では、破壊応力系が下界を与え、静的可容応力系が上界を与える。また、主働破壊

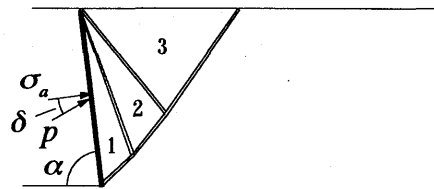
においては、応力境界ブロックにおける鉛直方向の応力は最大主応力となる。

図-3.9は主働破壊時の破壊応力状態とすべり面の方向を示している。紙面の都合上、静的可容応力状態は示さないが、応力不連続線が設定されるだけで、図-3.9とほぼ同様な結果となる。

主働破壊時のすべり線の形状は、図-3.5、図-3.8に示す受働破壊時のすべり線の形状と大きく異なる。これら、受働、主働破壊時のすべり線の形状は、Rankineの土圧論で求められるすべり面の形状と酷似しており、上界・下界つり合い法の妥当性を示している。また、Coulomb土圧あるいはRankine土圧などの極限つりあい法では、すべり面の形状があらかじめ仮定されるのに対して、上界・下界つり合い法では、解と同時にすべり線の方向を求めることができるのも大きな利点である。



(a) 破壊応力状態



(b) すべり線の形状

図-3.9 破壊応力状態とすべり線
(主働破壊)

4. 土圧解析法の解の検証

表-4.1に、上界・下界つり合い法で求めた土圧係数の値を示している。同表には、Sokolovskiがすべり線法で求めた結果¹⁾と、Coulombの土圧論による極限つり合い法の解も併せて示している。上界・下界つり合い法の結果は、中間領域を2ブロックとして求めたものであるが、この程度の分割であっても上界と下界の値は近接しており、正解の範囲をかなりの精度で限定することができる。また、表-4.1で値が得られていない事例は、応力境

界ブロックと変位境界ブロックが重なりあう場合であり、塑性論の立場から言えば、破壊条件とつり合い条件を同時に満たすような応力状態はあり得ないことを意味している。

Sokolovskiによるすべり線解析の結果は、土圧解析法のなかでも数値解析解として、正解に近い精度の高い解といわれている。Skolovskiの解はそのほとんどが上界と下界の間の値となっているが、上界を越える値も多い。

表-4.1 主動土圧係数の解析結果

ϕ	δ	α	下界値	上界値	Sokolovski	Coulomb	
0	70	70	-	-	0.826	0.833	
		90	0.704	0.704	0.700	0.704	
		110	0.662	0.663	0.665	0.644	
	10	5	70	-	-	0.794	0.801
			90	0.667	0.667	0.670	0.662
			110	0.624	0.63	0.620	0.588
		10	70	0.788	0.790	0.794	0.786
			90	0.649	0.659	0.650	0.635
			110	0.593	0.628	0.596	0.549
20	0	70	-	-	0.656	0.648	
		90	0.490	0.490	0.490	0.490	
		110	0.403	0.405	0.482	0.380	
	5	70	70	-	-	0.612	0.627
			90	0.451	0.452	0.450	0.465
			110	0.369	0.374	0.356	0.351
		10	70	0.615	0.616	0.612	0.615
			90	0.442	0.452	0.440	0.447
			110	0.346	0.382	0.344	0.330
30	0	70	-	-	0.521	0.498	
		90	0.333	0.333	0.330	0.333	
		110	0.236	0.238	0.229	0.212	
	5	70	70	-	-	0.487	0.485
			90	0.305	0.305	0.300	0.319
			110	0.213	0.218	0.206	0.199
		10	70	0.502	0.502	0.510	0.478
			90	0.309	0.318	0.310	0.308
			110	0.204	0.234	0.195	0.188

表-4.2 受働土圧係数の解析結果

ϕ	δ	α	下界値	上界値	Sokolovski	Coulomb	
0	70	70	-	-	1.34	1.36	
		90	1.42	1.42	1.42	1.42	
		110	1.71	1.71	1.74	1.76	
	10	5	70	-	-	1.46	1.455
			90	1.54	1.55	1.56	1.57
			110	1.85	1.87	1.95	2.04
		10	70	1.52	1.53	1.53	1.55
			90	1.61	1.66	1.67	1.73
			110	1.90	2.08	2.10	2.38
20	0	70	-	-	1.71	1.748	
		90	2.04	2.04	2.04	2.04	
		110	2.79	2.81	2.90	2.98	
	5	70	70	2.08	2.08	2.08	1.905
			90	2.51	2.52	2.55	2.31
			110	3.41	3.54	3.80	3.61
		10	70	2.35	2.41	2.42	2.08
			90	2.79	3.08	3.04	2.635
			110	3.66	4.79	4.62	4.46
30	0	70	-	-	2.16	2.27	
		90	3.00	3.00	3.00	3.00	
		110	4.76	4.80	5.06	5.34	
	5	70	70	3.16	3.16	3.16	2.53
			90	4.42	4.48	4.62	3.505
			110	6.88	7.50	8.45	6.88
		10	70	4.07	4.33	4.30	2.82
			90	5.41	6.93	6.55	4.14
			110	7.88	15.28	12.3	9.19

これは、すべり線解析では、すべり線上で破壊条件とつり合い条件を満足するために、内部の応力状態が破壊条件を破っていることを示している。すなわち、すべり線法は、上界つり合い法の一つであるといえる。下界値より若干小さな解となる場合があるが、これは数値計算上の誤差である。

Coulombの土圧論のような極限つり合い法は、これまで上界を与えると考えられてきている。しかしながら、表-4.1に示す結果では、下界値よりかなり小さな値を与える場合がある。これは、極限つり合い法では、つり合い条件と破壊条件に関して、応力ではなくて力を考えているためであり、塑性論の立場からいけば、上界であることが保障されないことを示している。したがって、極限つり合い法の解と正解の関係は明確でなく、場合によれば、正解とかなり異なる結果を与える場合がある。

5. 結論

本研究では、上界・下界つり合い法を土圧解析に適用し、従来の解析法の解を検証した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる、

- 1) 上界・下界つり合い法を用いると、主動破壊ならびに受働破壊時の、静的可容応力系と破壊応力系を容易に求めることができる。
- 2) 本手法で求めた上界、下界は正解の範囲を精度よく限定することができる。
- 3) すべり線解析法は破壊応力系を求める上界つり合い法の一つである。
- 4) 極限つり合い法の解は、上界であることが保障されず、正解との関係が明確ではない。

参考文献

- [1] Sokolovski V.V. : Statics of Soil Media, Butterworth, London (1960)
- [2] Chen, W. F.: Limit analysis and soil plasticity. Amsterdam, Elsevier (1975)
- [3] 西原晃 : 極限解析における上下界定理の新しい解釈とその適用に関する研究, 福山大学工学部紀要, 第26巻, pp.57-65
- [4] Hill, R. : A variational principle of maxim plastic work in classical plasticity, Quat. J. Mech. Appl. Math., Vol.1, pp.18-28, (1948)
- [5] Chen W. F. and Rosenfarb, J. L. : Limit analysis solutions of earth pressure problems, Soils and Foundations, Vol.13, No.4 (1973)