

氏名	おか べ のぼる 岡 部 登
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第176号
学位授与年月日	平成17年 3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	塑性問題における極限平衡法の位置付けと力学的特性に関する研究
学位論文審査委員	(主査) 榎 明 潔 (副査) 西田良平 木山英郎

学位論文の内容の要旨

極限平衡法(LEM)は、実務上の地盤工学的諸問題、特に土圧問題、支持力問題および斜面安定問題の解を得るために古くから用いられている数値解法であり、現在でも、その簡便さから設計実務で多く用いられている。地盤は破壊に至る過程で複雑な挙動を示す材料であるため、近年では、コンピューターテクノロジーの飛躍的な進歩に肖り、有限要素法などの高度な数値解析手法を駆使して、その複雑な挙動をより正確に再現しようとする研究が主流である。しかし、実務的には極限平衡法の簡便さは捨て難く、現在でも設計実務において重要な役割を果たしている。しかし、これまで、その位置付けや、用いている定式化の意味について論じられることは少なかった。これは、静定化手法が異なっても得られる解の誤差は小さいだろうという考え方や、極限平衡法自体が持つ数値解析法としての誤差よりも物性値評価誤差などの方が解に与える影響が大きいだろうという考え方が背景にあり、実務上、追求する必要性が薄かったからだとも思える。しかし、いかなるケースでも数値解析法としての誤差が小さいという保証はないので、極限平衡法を用いる目的を明確にし、その位置付けを理論的に整理することは意義があると考えられる。

本論文は、第1編の基礎編で極限平衡法の目的、位置付けおよび意味を明確にし、第2編の応用編で極限平衡法の実用問題への応用について述べた。第1編の基礎編は4章からなっている。以下に各章の概要を述べる。

第1章の「極限平衡法の位置付け」では、極限平衡法などの古典的塑性論と土の構成式と有限要素法などの数値解析手法を組み合わせた近代的塑性論の関係を考察したうえで、塑性論を基礎とする土質力学における極限平衡法の位置付けを明らかにした。得られた知見を以下に述べる。

古典的塑性論は、近代的塑性論のせん断降伏条件のみを使っており、大変形を伴うような系全体の破壊を考えた場合には、両者が同じ解を得ることになる。よって、すべり面でせん断破壊を生じて大変形に至るような破壊現象においては、Kötter式に基づくすべり線法の(SLM)解が工学的には重要であることを示した。また、LEMにより得られる解は、SLMの解を積分したものとなり、逆に、SLMにより得られる解はLEMの解を微分したものであるという関係になる。これは、LEMはSLMの必要条件であり、逆に、SLMはLEMの十分条件となることを意味する。したがって、LEMはSLMの積分解あるいは近似解を得る手法と位置付けるのが妥当と考える。この知見を踏まえ、LEMでSLMの近似解を得る手法として“一般化された極限平衡法(GLEM)”を提案した。LEMでSLMの近似解を得るためには、LEMにおける力の場がすべり線応力場をブロック面積について積分したものと同じになる必要がある。GLEMはこの条件を満足している。ただし、SLMでは応力で表示したときのモーメントの釣合い条件を満たしているが、GLEMはモーメントの釣合い条件を用いていないので、GLEMはSLMの必要条件になる。

第2章の「スライス法の非妥当性」では、第1章の考察結果を踏まえ、斜面安定解析によく用いられているスライス法の妥当性について考察した。まず、スライス法に導入された問題を静定化するための仮定が、問題に依存しない普遍的なスライス間力仮定を用いているため、スライス法でSLMの近似解を得ることが不可能であることを示した。また、スライス間力仮定の妥当性は問題に依存し、スライス法で導入されているような問題に依存しない普遍的な仮定は存在しないことからスライス法の非妥当性が示されることがわかった。

第3章の「斜面安定解析における解の存在条件」では、斜面安定解析に極限平衡法を用いた場合の解の存在条件を明らかにした。斜面安定解析における解を実務的な観点から定義し、最小安全率が極小値として求められ、かつ、そのすべり面が計算領域内に位置していることとすれば、斜面安定解析において解が存在するのは、すべり面が深くなればなるほど安全率が小さくなる「 c 効果」と、すべり面が深くなるにつれ平均すべり面勾配が緩くなるために安全率が大きくなる「有限斜面効果」によるものであることがわかった。

第4章の「結論」では基礎編で得られた研究成果を要約した。

第2編の応用編では、第1章において、塑性論における応力場および変位増分場に対して正解としての条件を満たす解が、GLEMを用いて得られることを示した。また、第2章では、間隙水圧の考慮や進行性破壊などの各種の土質特性のGLEMへの適用が可能であることを例示した。第3章～第5章では、補強地盤、隣接基礎の支持力の干渉効果、軟弱地盤上の盛土問題などの実用問題へのGLEMの適用方法を提案した。さらに、第6章では、極限平衡法のうち静定解を与える無限斜面安定解析法を用いて、降雨による斜面表層崩壊のメカニズムを考慮した斜面の表土復元の力学設計法を提案した。最後に、第7章の「結論」で応用編で得られた研究成果を要約した。

以上の知見は、下記の点で地盤工学において有益であると考える。

- ① 塑性論における極限平衡法の位置付けを明確にすることで、理論体系が整理できる。
- ② GLEMはスライス方のような曖昧さがないので、数値解として一定の精度で解が得られる。
- ③ 従来、別個のアプローチと考えられていた土圧、支持力および斜面安定問題を統一的に解析することが可能となった。
- ④ 斜面安定問題の解の存在条件を整理することで、実務設計を担当する技術者の計算結果に対する理解の一助になる。
- ⑤ 極限平衡法を正しく用いれば、補強地盤や隣接基礎の干渉効果などの実務に即した問題も比較的容易に解析に導入することが可能であることがわかった。

論文審査の結果の要旨

極限平衡法は、擁壁・基礎・斜面などの地盤関係の問題に対して、実務上もっともよく使われている経験的安定解析法である。これは、破壊状態にある領域についてのつりあい条件と破壊条件を連立させて解くことによって、求めたい力あるいは安全率を得る方法である。極限平衡法から派生したスライス法は、斜面の安定解析で一般的に使われているが、破壊領域を複数の土塊に分割するので、土塊間面力についての仮定が必要となり、仮定によって解が異なってくる。

本論文では、前半で、スライス法等の極限平衡法を用いることにより、土塊間面力についての仮定によっては、弾性応力場や塑性応力場を含む各種の応力場などを求めることができることを示した後、極限平衡法を理論的な古典的塑性論（すべり線法、極限解析法）や近代的塑性論（土の構成式と有限要素法を組み合わせる方法）と比較し、解集合の包括関係を、微分-積分関係・使用する条件式などから調べるとともに、極限平衡法を理論的方法に近づける方法についても述べている。また、後半では、実務的な極限平衡法の特徴を生かして、地盤工学の各種の問題へ適用する具体的な方法を示している。

本研究の成果の第一は、経験的な極限平衡法を理論的な塑性理論と集合論的に比較して位置付けたことであり、今後の同種の議論にこの比較手法は大いに役立つと考えられることである。第二は、極限平衡法の適用限界や実際問題への適用方法を示すことによって、極限平衡法の今後の発展の可能性と方向を示したことである。

安定解析は土木技術者にとって、もっとも日常的かつ基本的な解析であり、本研究の実用上の意味は非常に大きい。したがって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認められる。