

地盤の極限状態における平衡に関する研究

川崎 栄久

要 旨

構造物を構築する場合、地盤の安定性を考えなければならない。地盤の安定問題には構造物の基礎の支持力、擁壁や山留めに作用する土圧の釣り合い、斜面の安定などがある。

これまでの地盤の安定性を検討する場合は地盤を剛塑性体と仮定して極限平衡（釣り合い）法によって解かれ、理想的な地盤条件の下で計算される。実際の地盤は粘性土から砂質土まで広く存在するので、計算による予測値と実現象が乖離している場合が多い。これは実現象の破壊メカニズムが仮定された円弧滑り面と必ずしも整合しないためである。設計時の計算値と施工時の実測値に整合を持たせるには、地盤の破壊メカニズムを解明する必要がある。地盤の力と変形の実験的な関係を明らかにすることが支持力の予測方法の精度の向上に資する。

本研究では地盤の硬軟の両極端である、超軟弱粘性地盤と砂地盤を取り挙げた。山留め・掘削工におけるヒービング現象と直接基礎や杭基礎先端の地盤支持力の評価方法を対象に、これらの地盤の安定問題を土槽実験、三軸試験と平板載荷試験等から解明することとした。

軟弱地盤の山留め・掘削工におけるヒービング現象は、掘削底面下土塊の滑りに対する抵抗モーメントが掘削底面から地表面までの滑りモーメントよりも小さいために発生するとされている。超軟弱地盤におけるヒービング現象の対策について多くの研究が行われているが、実際の掘削ではヒービングの発生が危惧される場合にはセメントなどによる地盤改良工法で、掘削工事を完了させている。超軟弱地盤の力学的な特性を正しく評価せずに地盤の固結に頼ることは合理的であるとは言いがたく、性能設計に向かいつつある地盤工学にとって地盤の変状予測に応じた抑止策を採用していくことが必要と考える。

以上の考えに基づいて超軟弱地盤におけるヒービング現象の予測と評価のために土槽実験を実施した。その結果、ヒービング現象は掘削により、土圧のバランスを崩した地盤の塑性流動であることがわかった。また、ヒービングは掘削によって生じる水頭差がもたらす掘削底面下の過剰間隙水圧や地下水位の位置とも深い関わり合いがあることが認められた。超軟弱地盤は粘弾性の性質を帯びているので、バネとダッシュポットを組み合わせた5要素固体モデルによって隆起量の予測が可能であると考えた。実測の隆起量と時間の関係に同モデルを適用した結果、両者の関係をほぼ近似することが出来た。その結果から、5要素固体モデルによる計算は、超軟弱地盤の変状予測あるいは評価のために有力な手法と判断される。また、弾塑性法と組み合わせることで矢板の変形と地盤の変状を同時に予測することも可能となる。

次に超軟弱地盤の安定性を確保する方法を検討した。既存のヒービング抑止方法には浅層、または深層混合処理工法がある。これは強度の低い掘削底面土をセメントや石灰で固結する方法で、根切り底面が大平面でかつ大深度である場合には地盤改良材を多量に必要とする。地盤の安定に役立つ

学位記番号と学位：第17号，博士（工学）

授与年月日：平成15年3月20日

授与時の所属：大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程

つのは掘削終了時に残った改良地盤であるので、掘削地盤中に含まれるセメントは土と共に廃棄されることとなっていた。

既存の判定方法と抑止方法に対して、土槽実験より判明したヒービング現象の発生メカニズムに基づき、合理的で経済的な方法を考案した。一般的には緩速施工で掘削底面下の過剰間隙水圧の発生を抑制しながら主働、受働の土圧のバランスを取りながら施工するのがよい。また、地下水位の位置がヒービングに大きく影響していることから地下水位を下げることも有力な手法である。

さらに、抑止杭群および抑止杭群+真空ストレーナー杭を山留め壁背面地盤に挿入する方法も考案した。抑止杭の期待される効果は主働土圧を受け持つことで塑性流動を阻止することである。真空ストレーナー杭の効果は抑止杭の役割に加えて間隙水の吸引による有効応力の増加とストレーナー杭周りに吸引により形成された土柱により流動幅を狭めることである。

検証実験は無対策実験、抑止杭群実験、抑止杭群+真空ストレーナー杭実験の3ケースである。無対策実験は掘削直後に地盤の隆起量と沈下量は時間との関係で直線的に増大したが、時間の経過と共に非線形となり、収束した。抑止群杭は掘削直後の直線的な隆起と沈下を抑え、非線形部分の変位も減少した。抑止杭群と真空ストレーナー杭は抑止杭群のみと比較して隆起量を相対的に減少させたが、沈下量は抑止杭群と比較して大きくなった。これは地下水の過剰な吸引が原因である。

砂地盤における支持力は Terzaghi の仮定した破壊面から基礎直下の主働くさび、対数らせんブロック、受働ブロックの抵抗力との釣り合いによって発現される。Terzaghi の支持力公式は地盤材料を剛塑性体とし、強度定数 (C, ϕ) も一定として極限支持力を算定するものである。実地盤の破壊は進行破壊が多く、滑り線どおりにすべらない場合があること、拘束圧の増加によって砂粒子が破碎を生じて ϕ の値が減少すること、地盤の強度が異方性を有していることなどから支持力は計算値と必ずしも一致せず支持力のメカニズムは解明されているとは言い難い。

本研究は中圧三軸試験を使用して、拘束圧により粒子破碎を生じる砂の非線形なモール・クーロンの破壊条件を定式化すること、 C, ϕ の変動を考慮した支持力公式を提案すること、考案した支持力公式による算定値と平板載荷試験による極限支持力との整合性を検証することを目的とした。三軸圧縮試験の結果によると拘束圧が高い場合、主応力差のピークが現れても正のダイレイタンスは現れなかった。これより基礎直下の主働くさびは圧縮破壊して対数らせんの滑り線は生じにくいと推察される。

以上の研究によって、超軟弱地盤のヒービング現象に対する予測方法と抑止方法、砂地盤における支持力の予測方法が合理化できる。地盤材料を一律に剛塑性体と仮定して力やモーメントの釣り合いを求める極限平衡法に頼るのではなく、力と変形の非線形な関係を解明することにより、実地盤の安定性を確保することができる。

軟らかい地盤と固い地盤の力と変形の関係を解明したので、両者の中間にある土の安定問題も両者の力学的性状を考慮することで解決することができる。

主指導教員 塩井幸武

Studies for the equilibrium of ground in the ultimate state

Teruhisa KAWASAKI

Abstract

Ground stability is prerequisite in the construction of structures. Ground stability problems include the bearing capacity for structures, the balance of earth pressures at retaining walls and cofferdams, the stabilization of slope, etc. The conventional calculation methods for these problems assume ground as a rigid body and adopt the plastic equilibrium theory. Regardless of the wide ranging size of ground from clay to sand, these methods such as the circular slip method cannot explain the actual failure mechanism precisely. For the agreement between calculation and phenomena, it is necessary to clarify the failure mechanism and the non-linear relation between load and deformation of ground, which should contribute to a more accurate estimation of bearing capacity. This study, concentrates on two extreme objects, very soft ground and sandy ground in the ultimate state. One is heaving at a cofferdam on very soft ground and the other is bearing capacity of spread foundation and pile tip. These themes are explained through model tests, loading tests at site, triaxial compression test etc. the generation of heaving is dependent on smaller resistant moment under the bottom rather than sliding moment from the outer surface. If there is a danger of heaving, a consolidation method with cement for the inner ground is adopted to complete excavation although various counter-measures are devised for heaving. These traditional methods are not satisfactory regardless of site excavation for the mechanical properties of very soft ground. It is necessary to select a proper measure corresponding to estimate deformation in accordance with the current geotechniques that aim at performance-based design.

To solve the above-mentioned problems, we performed a series of model tests for the prediction and estimation of heaving on very soft ground. As a result, the phenomenon of heaving was related to excavation. It was also recognized that heaving is strongly related to excess pore water pressure beneath the excavation bottom, and the level of ground water. As a result the 5 elements solid model was applied to the actual movement and was very useful in predicting and estimating the deformation of very soft ground. Furthermore, it was possible to predict the deformation of sheet piles and ground in combination with an elasto-plastic method. Then, the stabilization method at excavation on very soft ground was investigated. The main traditional method for the prevention of heaving is the shallow or deep mixing method, which mixes weak ground with cement or lime and requires much material in cases of wide or deep excavation. Since the effective part for ground stability is the improved ground remaining after excavation, the cement included in excavated soil was discarded together with the soil.

From the model tests, reasonable and economical methods for the prediction and preven-

tion of heaving were devised. In general cases, slow step excavation, controlling the generation of excess pore water and the balance of active and passive earth pressure, pressure under the excavated bottom, and lowering of ground water level are practical methods to prevent of heaving.

Also, restrain group piles and those with vacuum strainer piles driven into the background of a cofferdam were proposed. The restraint group piles are expected to receive active earth pressure and to prevent the settlement of background. The vacuum strainer piles increase the effective stress of the ground by the absorption of pore water and narrow the flowing width between piles by a soil column wrapped around the piles in addition to the roll of the roll of group piles. Three cases of verification test were performed for no measure, restraint group piles and those with vacuum strainer piles. The upheaval and settlement in the no measure test increased linearly up to a substantial amount after excavation and ceased non-linearly after time had elapsed. The group piles restrained the amount of upheaval and settlement both in linear and non-linear parts. The group piles and the vacuum strainer piles greatly decreased the amount of upheaval but could not restrain the amount of settlement compared to the group piles, depending on the strong absorption of ground water. According to Terzaghi's theory, the bearing capacity of sandy ground reveals, based on resistance combination with the active cone under the bottom and logarithmic spiral and passive earth pressure blocks. The theory calculates the ultimate bearing capacity under the presumption that the ground materials are rigid plastic and have constant cohesion and frictional angle values. However, the actual bearing capacity is not always equal to the calculated value depending on the fact that many raptures are progressive, that the sliding lines are not similar to those presumed and that the value of the frictional angle decreases depending on the breakage of sand particles, as well as the strength of the ground having anisotropical properties. Therefore, it is difficult to confirm whether the mechanism of bearing capacity has been resolved.

This study aimed at the foundation of the non-linear rapture condition of sand by Mohr-Coulomb depending on particle breaking-up by confined pressure, the proposal of bearing capacity calculation considering variable values of cohesion and frictional angle, and the confirmation of correspondence between the ultimate bearing the capacity of loading test at site and the calculated value from the newly proposed formula.

According to the triaxial compression test, particle dilatancy is not revealed at the peak of principal stress difference under a strong confined stress. It measures the active cone beneath the foundation breaking under compression and the logarithmical spiral line is barely evident. Based on the above-mentioned studies, the prediction and restraint methods for bearing capacity of sandy ground can be realized. Ground stability can be obtained to satisfy the non-linear relation between force and deformation, not depending on the ultimate equilibrium method based on the balance of forces or moments that equally presume ground material as rigid plastic bodies.

Since the relations between force and deformation of very soft ground and hard ground are clear, it is possible to resolve stability problems of the intermediate soils between both types

地盤の極限状態における平衡に関する研究 (川崎)

of ground considering of each mechanical property.

Professor (Chairperson)

Yukitake SHIOI