

# 軟弱地盤上の構造物に対する地盤と基礎の強化 に関する研究

深 田 久

## 要 旨

我国においては、軟弱地盤が堆積する沖積平野に人口の大部分が集中しており、多くの構造物が軟弱地盤上に建設されている。また、我国は世界有数の地震国であり、地震時においても構造物が所定の機能を発揮することが求められる。軟弱地盤上に建設された構造物では、沈下や側方変形、支持力不足、および地震時の液状化等の問題が発生する。

こうした問題の対策として、従来から多種の地盤改良工法が実施されてきた。これらの地盤改良工法は、臨海埋立地や高速道路盛土の建設といった大規模工事に使用されることが多く、構造物の建設前に実施されてきた。しかしながら、1995年に発生した兵庫県南部地震を契機として多くの設計基準が改定され、現在では、耐震性向上を図るために岸壁や河川・海岸堤防等の既設構造物の周辺地盤を改良する事例が増加してきている。一方、道路橋等の基礎構造物においても、改訂された設計基準に照らすと耐震性能が著しく不足する構造物が多く存在するため、構造物の耐震補強が早急に必要とされている。

既設構造物の周辺地盤では構造物に有害な変形を与えずに地盤を改良する必要があるが、施工時に土を排出して変位を抑える地盤改良工法が開発されているが、排出土の予測や施工管理は個別の現場での対応が主で、系統的な研究は実施されていない。また、道路橋等の基礎の補強では空頭制限等で狭隘空間での施工を余儀なくされ、工期および工費がかかる。そのため、既設構造物に影響を与えない施工手法の確立や、狭隘な施工条件下でも対応できる、施工性に優れた地盤や基礎の補強方法の開発が求められている。

本研究ではこうした背景をふまえて、既設構造物周辺の地盤改良において変位低減に必要な排土機構を明らかにし、合理的な施工仕様を提案すること、および狭隘空間で施工性に優れた地盤や基礎の補強工法を開発することを目的とする。具体的には、地盤改良では施工性に優れた工法として「鋼管を用いた急速真空圧密工法」の原理や効果等の基礎特性を明らかにする。また、狭隘空間でも施工可能な「矢板と固化改良を併用した杭基礎の補強工法」の補強効果、設計法の適用性、地震時の応答について検討を加える。

「地盤改良施工時の変位低減に必要な排土機構に関する研究」では、砕石杭工法と排土式深層混合処理工法の排土特性およびオーガスクリュウの排土機構について検討した。まず、砕石杭工法の実現場において排土量の調査を行い、ケーシングパイプ貫入時に発生する排土量は貫入深度に比例して増加することを確認した。次に、外周にスクリュウを装着したケーシングパイプを砂地盤に鉛直に回転貫入する過程においてスクリュウ仕様・貫入速度・回転数および地盤特性の要因に基づい

---

学位記番号と学位：第34号，博士（工学）

授与年月日：平成18年3月18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

た、土砂の排出能力の算定式を構築した。この算定式と実測排土量とを比較し、予測式が実測値を表現できることを確認した。また、ケーシングパイプ先端での切削土量とスクリーによる土砂の排出可能土量に対する算定法の内、小さい方を排土量とすると適合性が良いことがわかった。

排土式深層混合処理工法の調査では、従来使用されている排土係数の特性を整理した。また、排土式深層混合処理工法の貫入時排土量の算定式を、砂地盤と粘性土地盤に対して提案した。砂地盤においては碎石杭工法と同一式となり、粘性土地盤においては付着力に基づく排出効率  $\eta$  を用いた算出式を提案した。砂地盤での実測データと排土の算定値の比較でも、算定式が実測値をよく表現できることを確認した。粘性土地盤ではほぼ同様に算定できるが、乱された地盤の付着力の設定には今後のさらなるデータ収集が必要である。本研究から、砂地盤においては、変位を抑えるために必要な排土量を設定すれば、スクリー仕様と貫入速度等の施工仕様を合理的に設定することが可能となった。

「施工性に優れた地盤改良工法としての真空圧密工法に関する研究」では、鋼管を利用した急速真空圧密工法を提案し、模型実験を通じて効果および適用性を検証した。通常真空圧密工法では気密シートや排水材を密に設置するため高価となる傾向があり、容易に真空圧密を実施する方法として、鋼管を打設してその鋼管から真空吸引を行う工法を考案した。模型実験において模擬鋼管（塩ビ管）を打設した粘性土地盤の沈下・間隙水圧等を測定した。実験では、鋼管径や砂層の有無などの要因を変えて水圧低下の範囲や沈下の影響範囲を計測した。また、有限要素法による数値解析を実施した。

この結果、当工法においては中間砂層がある場合には大気圧载荷の状態となり、粘性土地盤単独の場合は、透水問題における井戸理論に基づいた水圧低下の状況となることが明らかとなった。模擬鋼管の近傍では水圧低下量が比較的大きく、含水比の低下および強度増加が確認された。一方、沈下量は模擬鋼管近傍で小さく、距離が離れるにつれて大きくなることが確認された。沈下量の影響範囲は粘性土の層厚程度であり、水平変位は模擬鋼管に引き込まれる方向に発生する。また、これらの沈下変形状況は有限要素法による数値解析で検証が可能であることを確認した。当工法の適用分野として盛土や橋台等の簡易な側方流動対策や低盛土道路やカルバート等の局所的な沈下対策に適用可能と考えられる。

「矢板と固化改良を併用した杭基礎の補強工法に関する研究」では、狭隘な場所でも施工可能な工法として、フーチングの周囲を矢板で囲み、内部を固化改良することを特徴とする新しい杭基礎の補強工法を提案した。本工法では補強により水平および鉛直方向の抵抗面積を増大させ、基礎の水平変位・回転変位を抑制する。また、内部を固化改良して基礎躯体下面の剛性を増加させ、回転変位の抑制と杭体の拘束を図るものである。

本工法に対して粘性土地盤を対象とした模型実験および砂地盤を対象とした遠心载荷模型実験を実施し、補強効果の検証を行った。この結果、全面固化および部分固化の改良形式に対して、粘性土地盤および砂地盤ともに補強により基礎の水平変位や回転の抑制と既設杭の曲げモーメントの大幅な低減を確認した。解析ではChangの式により簡易的に補強効果を評価できることを示した。また、二次元バネフレームモデルに平面ひずみ要素を加えた数値解析モデルは実験結果を再現でき、実用レベルの適用性があることを示した。

固化改良により補強した構造物を対象とした二次元等価線形化法による応答解析において、杭体の曲げモーメントの低下を静的な载荷実験と同様に確認したが、より詳細な地震時挙動については、今後のさらなる検証が必要である。

軟弱地盤上の構造物に対する地盤と基礎の強化に関する研究（深田）

主指導教員 塩井幸武

## A Study on Reinforcement of Soft Ground and Existing Foundations

Hisashi FUKADA

### Abstract

The author has engaged in three themes of research, or (1) research on clarification of the mechanisms to reduce surrounding ground displacement for ground reinforcement work, (2) research on the vacuum consolidation method as an economical method of soft ground reinforcement, and (3) research on the reinforcement method of the structure itself in combination with solidification improvement. This paper outlines the research results of these themes as well as providing a discussion on the seismic responses of soft ground.

In the first theme, the author studied the soil discharging characteristics of the gravel drain method ('GD method' hereinafter) and the soil discharging deep mixing treatment method ('DM method' hereinafter) and the mechanism of soil discharge of auger screws. The research included measurement of the discharged soil at a site where the GD method was used. It was found that the amount of discharged soil generated from penetration of a casing pipe increases in proportion to the depth of penetration. The author then formulated a calculation equation for soil discharging capability based on such factors as screw specification, penetration speed, rotational speed, and ground characteristics in the process of a casing pipe rotated as it is vertically drilled into the sandy ground. Comparison between the calculation results and the actual measurement of the discharged soil confirmed that the prediction equation is capable of representing the actual measurement. It is also found that use of the calculated value of the amount of soil cut at the tip of the casing pipe or that of the amount of discharged soil by the screw, whichever is smaller, as the amount of discharged soil can produce better agreement. Enhancement of the calculation equation greatly improves rational work management at the site.

The author has also proposed separate equations to calculate the discharged soil during penetration when the DM method is used for two types of ground, sandy and clayey. The equation for the sandy ground is the same as that for the GD method. The equation for the clayey ground uses adhesive force to calculate the discharging efficiency  $\eta$ . Comparison between the actual measurement data and the calculated value of discharged soil, both for the sandy ground, confirmed that the proposed equations could also represent the actual measurement value for the DM method. For the clayey ground, although adhesive force has a big influence on discharging efficiency, the adhesive force estimated from the sensitivity ratio was used to demonstrate the feasibility of calculating the discharged soil.

For the second theme of research, the author proposed a method to use steel pipes for rapid vacuum consolidation and verified the effectiveness and applicability of the method through model experiments. An ordinary vacuum consolidation method tends to be costly because it densely lays out airtight sheets and water-draining materials. The author proposed a method in which steel pipes are driven to carry out vacuum suction through the pipes as an easier method of vacuum consolidation. Settlement, pore water pressure and other factors of the clayey ground, into which simulated steel pipes (PVC pipes) were driven, were measured in a model experiment. Numerical analysis using the finite element method was also conducted. In the experiment, the range of water pressure drop or the range of the ground affected by settlement were measured by changing factors, such as steel pipe diameter or the presence or absence of a sandy layer.

The results of the experiment indicate that said proposed method created a condition with the load equal to atmospheric pressure if a sandy layer exists in the ground and a hydraulic pressure drop based on the well theory for a water permeation problem in case only clayey ground exists. In the vicinity of the mock-up steel pipe piles there occurred a relatively large decline in hydraulic pressure, a decline in water content ratio and a rise in strength. On the other hand, it was confirmed that settlement is reduced near the mock-up piles and increases as the distance from the piles increases. The area affected by settlement is almost equal to the thickness of the clayey layer, and horizontal displacement occurs in the direction in which the mock-up piles are drawn. It was also confirmed that these settlement deformation conditions could be verified by FEM numerical analysis. These results suggest that the proposed method is applicable as an easy method to prevent lateral soil movement at, for instance, the foot of the slope of a fill, or to prevent local ground settlement.

For the third theme, a new foundation reinforcement method, which encircles the footing with sheet piles to solidify the inside for improvement, was proposed as an economical technique applicable in small places. This method increases the resisting area in the lateral and vertical directions by encircling the existing footing with steel sheet piles to mitigate horizontal and rotational displacement of the foundation. Internal solidification helps increase the rigidity of the foundation to control rotational displacement and restrict the piles.

The reinforcing effect of this proposed method was verified by conducting a model experiment for the clayey ground and a centrifugal loading model experiment for the sandy ground. It was confirmed that reinforcement of either the clayey ground or the sandy ground could control horizontal displacement and rotation in the foundation and reduce the bending moment of the piles. In a loading experiment conducted solely on the reinforced part of the foundation in the clayey ground, it was confirmed that the reinforced part showed behavior similar to that of a caisson. Another loading experiment was conducted on the foundation reinforced by the internal solidification method in two cases, or total improvement and partial improvement, and it clarified the difference in effects between the two improvements. Analytical verification was conducted to show that the use of Chang's equation might serve as an easy way to evaluate the reinforcing effect. The applicability of the design method was

suggested, because the author confirmed that use of a numerical analysis model with plane strain factors added to the two-dimensional spring frame model can represent the experiment results.

Professor (Chairperson) Yukitake SHIOI