

土質力学教育への取組み

島 重章*・宮崎 祐助*

(平成13年10月26日受理)

New Approach to Teaching Soil Mechanics

Shigenori SHIMA and Yusuke MIYAZAKI

(Received Oct. 26, 2000)

Abstract

In the faculty of engineering, the subjects of mechanics take special and important position for the students who learn in the Department of Civil and Architectural Engineering.

Students have to understand stress problems which occurred in the soil foundation, and how the safety of the structure is depending on the appropriate relieving and distribution of the stress from the upper structure.

However, many students lack the motivation to fully understand the complicated phenomena of soil mechanics. Therefore, we developed and introduced a soil laboratory model, which is able to produce similar phenomena of soil mechanics.

This paper introduces new approach for developing the ability and the skills of the students for better and comprehensive understanding of soil mechanics.

Key words: soil mechanics, education, soil laboratory model, soil foundation structure,

1. はじめに

建設工学を学ぶ学生に対して、大学専門科目の中で最も多くの時間を掛けて教育指導する学科目は力学系の科目であろう。それは、建設工学科において土質力学、構造力学および水理学の3科目に代表され、これをもとにした多岐にわたる関連学科目が存在するのである。これらの科目は、専門科目としてカリキュラムの中に配属されているものの、近年のカリキュラム構成の中では専門科目を下級年次に配属する傾向がある。それは早く専門的内容になじませること、大学における専門性への取組みを早めること、学ぶ学生たちへ大学教育の中での専門性の重要性を感じさせることなどの学習効果を目指すものである。

建設工学系の学生は、専門科目の学習効果の中に実務に対する応用力を育て、将来の建設分野の中で設計、施工へ

の理解力と取組みの可能性を期待されるのである。そのことは、幼年時からの自然環境への接触度や、日常生活の中での工夫や、感性の度合いが大きく関係していたようである。そのことが、基本的に技術に対する意識や考え方を育むものと考えられる。しかしながら、近年の理工系各大学で耳にするのは、数学、理科に対する理解力が低下しているという意見である。世の中が利便性のみを求めた受験対策と、日常生活から自然性が遠のいた都市構造の中で成長した若者たちが、教科書に記載された理数系の内容を理解することすら不十分であることは、当然の結果かもしれない。

理工系大学の中で、特に重要視されてきた力学系の学科目は、建設工学科を学ぶ学生たちにとって、将来の重要な部分を占めることに変わりはない。そのためにも、力学系の学問を十分に理解することの必要性が求められるのであ

* 広島工業大学工学部建設工学科

る。土質力学においても、地盤の中に発生する応力問題を理解し、上部構造からの応力伝達を安全に受け止めるために、地盤基礎の重要性を理解していかなければならない。学生がこのような学問を理解できるようになるためには、学生の学習する意欲が基本的に必要である。近年の学生は、教員の口頭説明や黒板・OHP・ビデオなどの文字、図表、映像を介した説明では十分に意思伝達ができず、力学環境の概念を理解することができない傾向にある。

以上の対応策としては、力学を学ぶ学生たちが直接に手で触れるなどの体験学習をすることにより、正しく現象を見つめたり考えたりすることのできる学習環境が必要であろう。それが学問の理解に繋がっていくものと考えられる。そこで、土質地盤工学の中で、地盤構造に対する変形、変位の現象を再現させるための模型実験装置を導入した。ここでは、この模型実験装置を用いて、これらの現象を学ぶ学生たちが土質力学の理解度を高め、教育効果を向上させるための新たな取組みについて述べた。

2. 土質工学と土質力学特性

土質工学（地盤工学；Geotechnical Engineering）と土質力学（Soil Mechanics）の違いは、土質工学のほうが一般的名称であり、後者が特論的名称であるということである。土質工学は近年、地盤工学または土質・基礎工学と称されて土、地盤の力学的な範囲だけではなく、地質学、地形学的な側面、設計や施工における各種工法、工事手順の工夫や効率の向上、管理など多岐にわたる項目が構成要素になっている。特に土や地盤の改良、補強の工夫など、力学的考察から説明できる代物ではない。しかしながら、土質力学が土質工学構成の中心にあって土の変形や強度特性を考察する重要な要素を占めていることから、土質力学を理解せずに土質工学の理解はありえないと考えられる。

特に土質力学は、実験計測、数値解析および変形強度特性の3要素から構成されていると考えられる。その内容について以下のように説明される²⁾。

(1) 模型実験と現場計測

室内実験や現位置試験は、土の内部に生じる応力とひずみの関係から、非一様な土のマス挙動を観察することができる。その結果からは、

- ①土圧、支持力、斜面安定などの現象を解明できる。
- ②土の物性と合わせて、土の挙動を計算予測が可能になる。
- ③マクロ的な挙動から逆算して、今後の設計資料とすることができる。

しかしながら、これらの結果から正確で内容の豊富なデータを得るには、大量の観測値が必要である。

(2) 数値解析

解析対象の境界条件、マスの内部構造、土の変形・強度

特性が明らかな場合には、

- ①変形解析による弾性解、弾塑性による FEM 解などの解析が可能である。
- ②円弧すべりなどの安定解析に極限釣合い法や応力特性曲線法などがある。

これらの数値解析法には、土層の連続体や不連続体の問題などを対象にするが、不均一構造体に対する複雑な解析法は無いのが現状である。

(3) 土の変形・強度特性

ここに対象となる現象は、土のせん断試験、圧密試験、サウンディング試験、載荷試験などから特性を求めるものである。それぞれに異なる現象から、それらの変形課程は多様であり、可変であり、複雑である。しかしこれらに共通するものは有効応力である。従ってこれらの法則性は単純化した構成式によって用いられている。

実際の設計においては、以上の構成要素をバランスよく組み合わせ、最も確からしい結果を求めて検討することになる。そのためには現場における現象の把握と、地盤内部に生ずる変形・強度特性などの知識をうまく組み合わせることが必要になるのである。従って、このように統合された考え方を要求されるため、土質力学を十分に理解した土質工学の学習が肝要であろう。

3. 土質工学教育

昭和63年に土木学会が作成した大学土質工学教育に関する調査資料が、当時の学会誌に公表された。その中からデータを引用する。次の二つの設問と回答が図-1および図-2のように紹介されている³⁾。

設問1 教育上、土質工学に教えるににくい点があるとすれば何でしょう。(複数解答される場合は合計が10点になるように()内に重みを付けてください)。

- () ①特に問題があると思わない。
- () ②構造物の種類と材料の種類・性質の幅が広い。
- () ③馴染みのない難解な言葉が多い。
- () ④理論に仮定が多く、実際とのギャブが大きい。
- () ⑤構造物、材料ごとに考え方が違う。
- () ⑥体系化されていない。
- () ⑦経験に基づく考え方が強調される。
- () ⑧その他

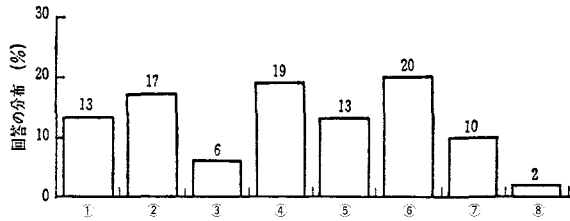


図-1 設問1と回答の分布

設問2 土質工学の中で学生が理解しにくい概念(あるいは用語)を、難しいと思われる順に挙げてください(最大五つまで)。

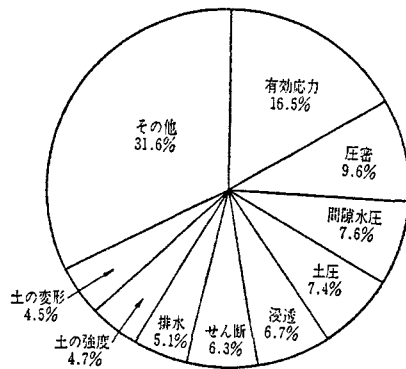


図-2 設問2と回答の分布

4. 土質模型実験装置

大学教育の中で評価基準となるのは、講義内容が斬新で体系的かどうか、それによって学生たちがその講義を良く理解したかどうかであろう。しかしながら体系的な学問は学生にとって理解しがたいものとなる場合が多いようである。そのことが前節の設問1および2の回答に現れていると考えられる。学生たちが理解するための内容は、学生たちが自分なりに良く勉強して納得のいく結果を見出したときに、理解度は向上するものと考えられる。

ここでは、土質力学教育のための模型実験装置を導入し、教室内の講義だけではなく、学生たちがこの装置を動かし、実際に体験して理解度を深めるための試みをまとめた。

(1) 圧密模型実験装置 AYMS-843

粘土地盤に構造物を築造する際、あらかじめ地盤沈下を予測することは、構造物の崩壊抑制を図る上にも重要なことである。その基本となる圧密実験装置を導入した。

本実験装置では、粘土の骨組みを単純な力学的性質を持ったテルツァギーモデルに置き換えて圧密現象を説明できる。シリンダー内部のスプリングは、土粒子が形成する粘土の骨格を表し、シリンダー内の水は、粘土中の間隙水を表す。また、ピストンに取りつけた小穴の数は、粘土の透水性に対応している。その外観図を写真-1に示す。

本実験装置を用いると、(1) 圧密経過時間～沈下量、(2) 透水係数、(3) 有効応力と間隙水圧、などの実験が

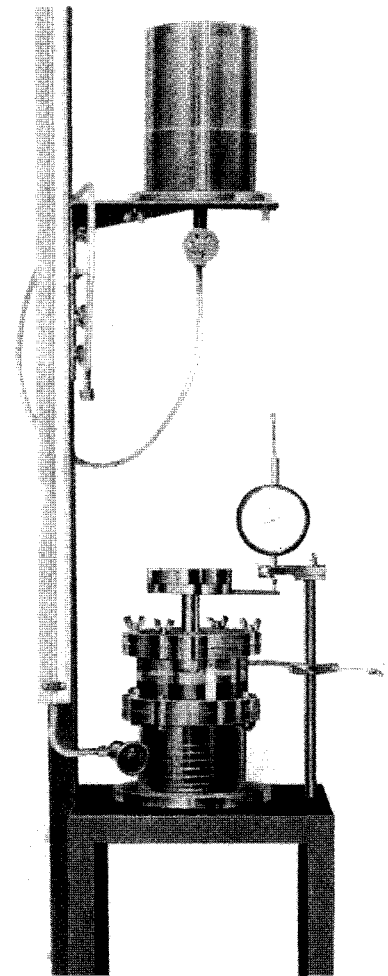


写真-1 圧密模型実験装置

できる。更に、得られた実験値と計算値を比較検討することにより、圧密現象の持つ意味を理解することが可能である。

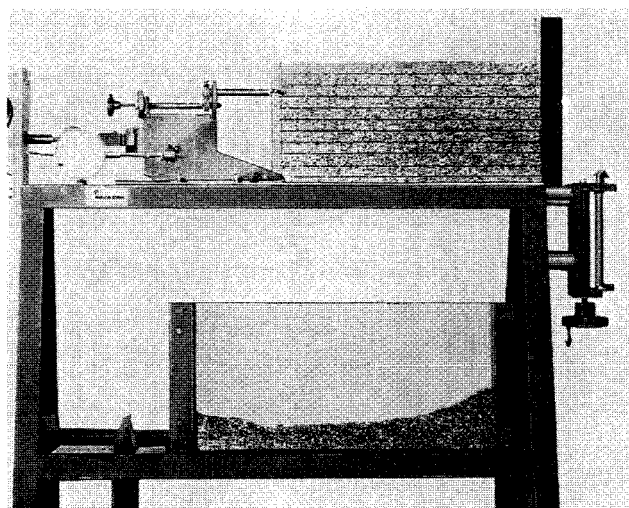
(2) 擁壁土圧実験装置 AMS-811

擁壁は、斜面崩壊の抑制を図る代表的な構造物で、基本となる土圧論の研究は、18世紀のクーロン土圧論に始まる。ここに導入した擁壁土圧の実験装置は、簡単な操作によって擁壁土圧の種々の状況を現出し、更にそれぞれの状態の変化も観測できる装置である。

装置の全体図を写真-2に示す。

試料には、従来の砂の物理的性質に最も近似しているアルミニウム丸棒の短辺を用いており、しかも作業性を考慮した装置といえる。その操作は小型で、土圧計算に必要なデータとして試料の単位体積重量、せん断抵抗角、試料と壁体の摩擦角などを測定できる。試料にアルミニウム棒を使用しているため、二次元状態の実験ができ、アルミニウム棒の模型積層の短面にメッシュを描くことができるので、粒子の移動を可視により測定できる。

実験は、静止土圧の測定から始まり、擁壁板を引く方向に主動土圧の測定、および擁壁板を試料に対して押す方向

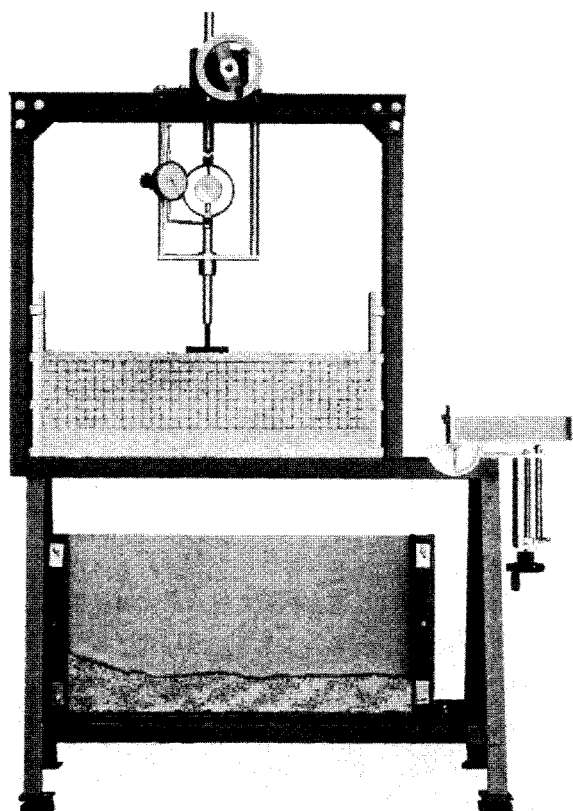


写真一 擁壁土圧実験装置

に受働土圧を測定できる。従って、いろいろな形式の擁壁崩壊パターンの可視化実験が可能である。

(3) 基礎の支持力実験装置 AMS-822

地盤基礎は、地上および地中に構造物を築造する更に重要な役目を担うもので、その基本となる支持力を簡単に検証できるような模型実験装置である。ここに導入した基礎の支持力実験装置は、いろいろな形式の基礎に対して、基礎周辺の地盤の状況を設定し、更にその変化状態を観測できる模型実験装置である。装置は写真一 3 に示す。



写真一 3 基礎の支持力実験装置

試料には、砂質土の力学的性質に最も近似した異形アルミニウム丸棒の短辺を用いており、装置に積層に詰めることにより二次元状態の実験ができる。

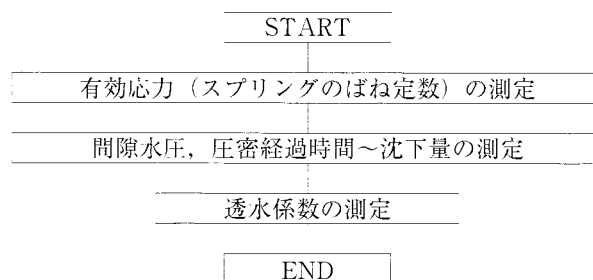
装置は小型であり、支持力値算出に必要なデータとしての単位体積重量、せん断抵抗角および試料と基礎底面の摩擦角を測定することが可能である。

実験は剛性領域（領域Ⅰ）、放射状過渡塑性領域（領域Ⅱ）、ランキンの受動領域（領域Ⅲ）の発生に至る変化状況等の観測ができ、いろいろな基礎形式に対する地盤の崩壊パターンが測定できる。標準装備の模型基礎は、基礎幅 $B=60, 90, 120, 200\text{mm}$ の 4 種類である。主な機能は、力計容量 20kgf 、垂直移動範囲 $\text{MAX}140\text{mm}$ であり、アルミニウム丸棒は $\phi 1.6 \times 50\text{mm}$ および $\phi 3.0 \times 50\text{mm}$ を使用している。

5. 実験結果の例

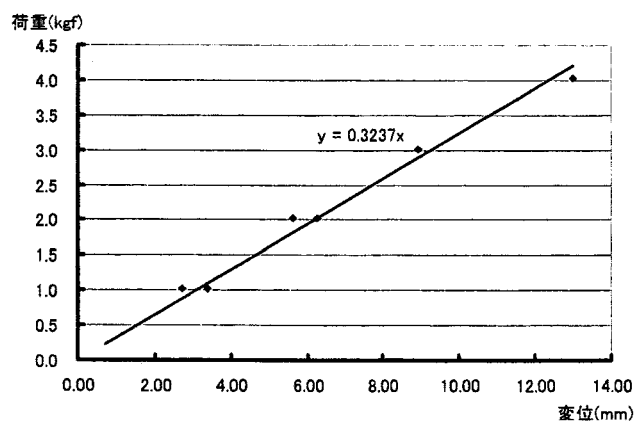
(1) 圧密模型実験結果

a) 実験方法



図一 3 圧密試験の順序

b) 有効応力の測定結果



図一 4 スプリングの変位と荷重の関係

c) 間隙水圧, 圧密経過時間～沈下量の測定結果

- ・ 圧密終了までの時間的感覚が実験を支配する。
- ・ 取扱説明書を判りやすくまとめることが必要。

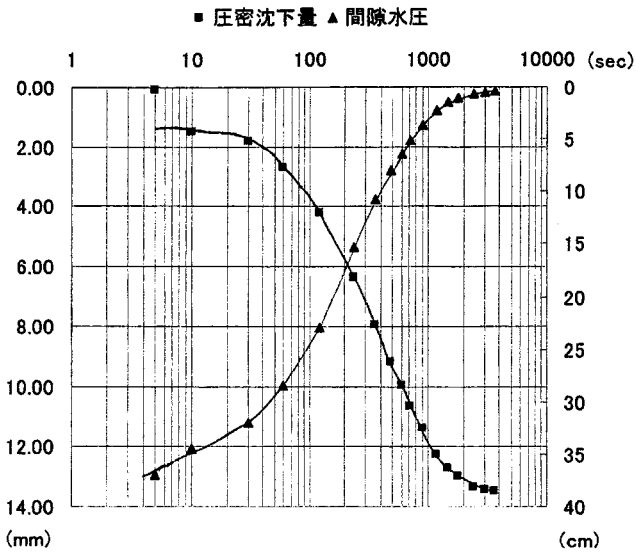


図-5 沈下量, 圧密度～経過時間の関係

d) 透水係数の測定

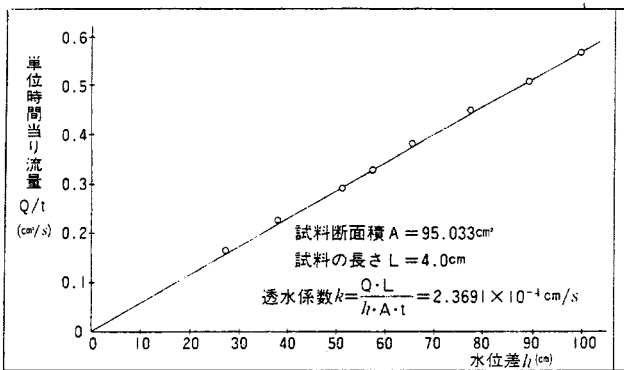


図-6 流量と水位差の関係

e) 得られた結果

実験装置は、あらかじめ上部水槽へ水を注ぎ入れ、下部シリンダーへ空気が入らないようにしておくことが必要である。測定の方法は、図-3に示す順序に従った。

スプリングの変位と荷重の関係は図-4に示す。得られたばね定数は $k = 0.324 \text{ kgf/mm}$ である。

沈下量, 圧密度～経過時間の関係は図-5に示す。載荷と経過時間の関係, および間隙水圧の変化状況が得られた。

透水係数の測定は, 図-6に示す。流量と水位差の関係から, 透水係数 $k = 2.4 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ が得られた。

実験を行った学生たちのレポートに記載された感想から, 問題点を以下に記す。

- ・ 水漏れに対する止水シールテープなどが必要。
- ・ 透水プラグを緩める感覚に熟慮を要する。

(2) 擁壁土圧実験結果

a) 実験方法

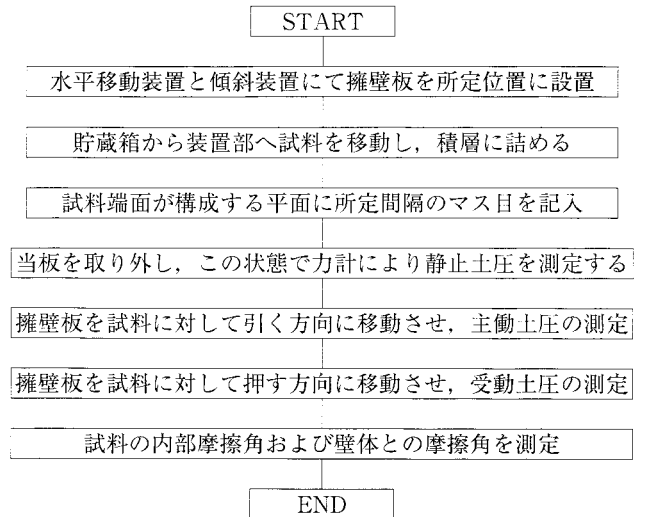


図-7 擁壁土圧実験の方法

b) 主動土圧分布測定結果

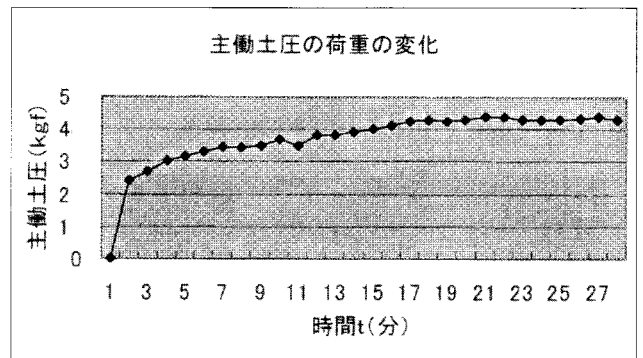


図-8 主動土圧力の変化図

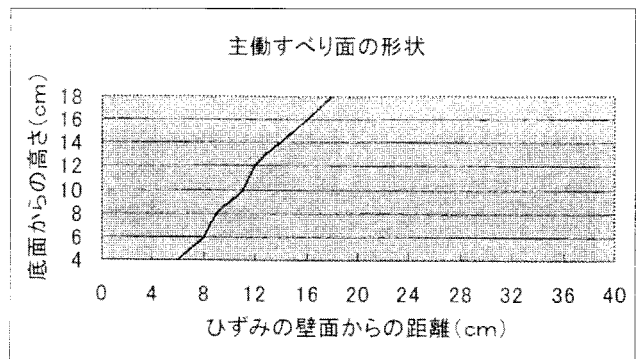


図-9 主動土圧すべり面の形状

c) 受動土圧分布測定結果

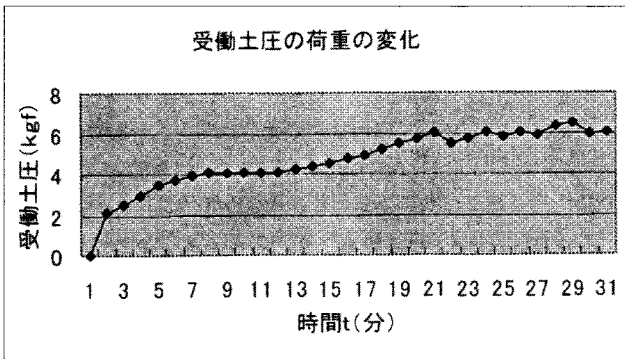


図-10 受働土圧力の変化図

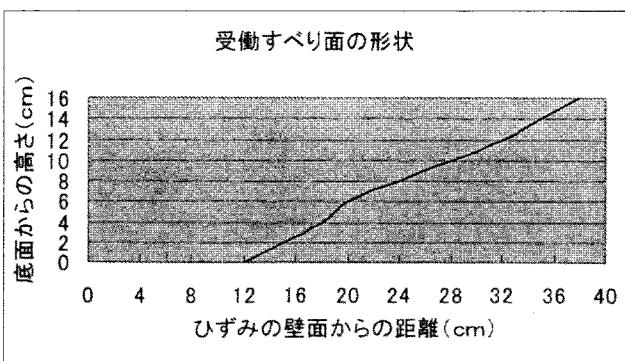


図-11 受働土圧すべり面の形状

d) 得られた結果

ここでは壁体が一体として水平移動する場合に、あらかじめ壁体全体が 5° 傾斜しているものとする。

得られた主働土圧力は、 $P_a = 4.4 \text{ kgf}$ であり、静止土圧力は $P_o = 2.7 \text{ kgf}$ 、および受働土圧力は $P_p = 6.5 \text{ kgf}$ である。

試験方法は図-7に示すが、擁壁板の下方を固定して擁壁の上方を押したり引いたりする方法と、あらかじめ擁壁板を傾けたままで板全体を前後させる方法がある。ここでは後者の方法を実施した。

実験を行った学生たちの報告は、この実験の感想を記す。以上の結果を求めるに至るまでに、解説書の説明に不十分な点があり、試行錯誤を繰り返しながら一応の実験を終了した。なかでも、積層の締固めを初めて行う場合に、説明書には記載されていないために慣れるための時間と要領が必要である。力計への荷重時間は記載されているものの、途中で変速を要するため、これも経験を要する項目であろう。

(3) 基礎の支持力実験結果

砂質土地盤としては、土の物性値に近似した異形アルミニウム棒の短辺を用いており、浅い基礎の支持力および基礎の引き抜き抵抗力を求めるための実験装置である。実験方法を図-12に示す。



図-12 基礎の支持力実験方法

a) 地盤のすべり状況

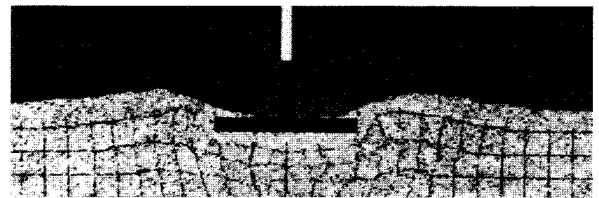


図-13 地盤の荷重状況

b) 荷重～沈下測定

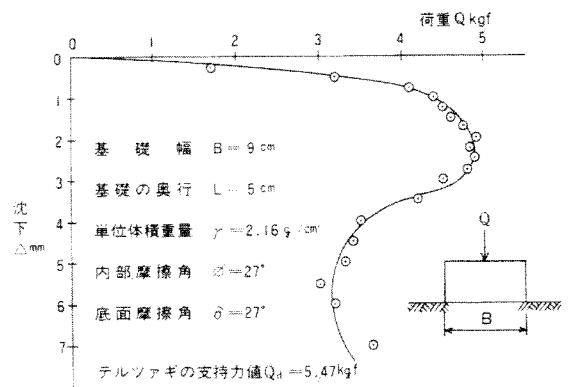


図-14 荷重～沈下の関係

c) 得られた結果

実験結果は荷重～沈下曲線に示す。徐々に荷重すると、 $D_f = 0$ のために基礎周辺の盛りあがり確認された。また載荷面直下の積層に触れてみると、よく締まって固くなっており、深部の積層部分はそれほど締まっていないことが確認できた。

実験の感想から主なものを紹介すると、

- ・積層の取扱いになれていないための試行錯誤が多い。
- ・内部摩擦角測定時の傾斜に伴うアルミ棒の転落は、その

下段に受け皿が必要である。

・説明書が体系的でなく、説明の理解に時間を要した。

6. おわりに

以上3種類の土質実験模型装置を用いて、学生たちが実際に実施した結果についてまとめたものである。ここに、そのレポートの中から学生たちの実験に対する感想を述べて、この報告のを終わりとする。

・圧密試験；実験作業にはかなりの試行錯誤があり、実験精度の得られる結果までには至らなかったが、圧密現象の経過を理解することができた。

・擁壁土圧試験；積層の要領や載荷の方法など、説明書だけでは読み取れない方法を修得する必要があるものの、受動土圧、主動土圧の作用を実際に再現できることから、土圧力を理解することができた。

・支持力試験；準備の時間を要した割に単純作業であるが、地盤積層の締固めや、載荷による地盤の動きなどを実際に見ながら実験ができたことは大きな前進である。

謝 辞

本実験に使用した機器は、本学建設工学科の教育用機器整備事業の一環として平成12年度および平成13年度に設置されたものであり、ここに感謝申し上げます。

文 献

- 1) 龍岡文夫；土のせん断変形・強度およびその試験法，わかりやすい土質力学原論，(社)地盤工学会，pp.1～4, 1987
- 2) 赤井浩一；体系的土質工学是非論考，(社)地盤工学会誌「土と基礎」，Vol.40, No.9, pp.1～6, 1992