

論文の要旨

題目 **A Study on Geotechnical Engineering Characteristics of Soft to Firm Clays in Yangon**
(ヤンゴンにおける粘性土の地盤工学特性に関する研究)

氏名 山田 義満

ミャンマーでは総選挙による政権交代が 2010 年に行われて以来、多くの外国人投資家がミャンマーの社会インフラ市場に参入しており、特にヤンゴン地区では、多くの建設プロジェクトが進行中である。この建設ブームの中、ヤンゴンに広く分布する軟弱粘土のような、構造物の設計や施工上において問題となる粘性土に関する研究、つまり、ヤンゴン地域における粘性土の特性に関する地盤工学的視点からの既存の研究はほとんど見当たらない。また、土質特性に関する各建設プロジェクトの情報は共有されておらず、各プロジェクトサイト内での扱いに限定されている。今後のインフラ開発プロジェクトの計画や実施において、円滑にプロジェクトを推進するためには、これらの情報共有は非常に重要であると考えられ、本論文を通じてヤンゴンの粘性土の特性に関する情報が広く共有されることは非常に意義のあることと考えられる。

また、このような地盤情報の不確実さは、特に海外工事においては大きなリスクの一つに数えられ、地盤情報の共有は海外工事に潜むリスクを低減させるためにも非常に重要なことである。本論文は、ヤンゴンにおける粘性土の地盤工学的特性に関するミャンマーで初めての包括的な研究成果である。

本論文では、以下の項目について検討を実施している。

- 1) 粘性土の地盤工学的特性に関する既往の研究の整理
- 2) 粘性土の不攪乱試料の品質に関し、特に影響を受けやすいサンプラーの違いによる試料の攪乱の影響に関する検討
- 3) ヤンゴンにおける粘性土の地盤工学特性の比較検討（粘性土の堆積状況の把握、堆積盆の違いによる土質特性の比較、7つの区域間での土質特性の比較、他国の海成粘土等との土質特性の比較）
- 4) ヤンゴン地域における典型的な軟弱地盤の分布するヤンゴン川沿いのティラワ地区における軟弱粘土の地盤工学特性の把握及び検討

本論文では、ミャンマーで行われたボーリングと室内試験の結果の中から、ヤンゴン地区で実施されたものを選択し、ヤンゴンに焦点を絞り、分布する粘性土の地盤工学的特性について述べている。本論文で使用している試験データは、JGS（日本地盤工学会）規準に規定されたボーリング及びサンプリング方法で採取した粘土試料の室内試験を実施したものである。

本論文での上記の検討につき、項目ごとにその要旨を以下のようにとりまとめる。

1) 粘性土の地盤工学的特性に関する既往の研究の整理

本論文に関する既往の研究は、以下の 5 つ分類され、分類ごとに既往の研究成果を取りまとめた。

- ① 粘性土の物理特性や力学特性に関する各パラメータの相関性に関する研究
- ② 粘性土のせん断強度や強度増加率に関する研究
- ③ 粘性土の二次圧密係数に関する研究
- ④ 粘土の鉱物と物理特性に関する研究
- ⑤ 不攪乱試料粘土の品質、特にサンプラーの違いが粘性土試料に与える乱れの影響に関する研究

2) 粘性土の不攪乱試料の品質に関し、特に影響を受けやすいサンプラーの違いによる試料の攪乱の影響に関する検討

ここでは、研究の大前提である試料の品質に関して議論をしている。今回用いた粘土試料は不攪乱試料採取用のサンプラーにより採取したものであるが、これまでの既往の研究ではサンプラーの違いにより採取した不攪乱試料の品質が異なり、乱れの影響を受けることが指摘されている。

ミャンマーでは、一般にASTM 規準により規定されているシェルビーチューブサンプラーが主流として使用されているが、これまでは不攪乱試料粘土の攪乱に対する影響には注意が払われてこなかった。一方、日本では既に固定ピストン式サンプラーでの不攪乱試料採取が規準化されており、シェルビーチューブによる不攪乱試料採取はほぼ見られない。したがって、サンプラーの違いによって、どの程度の攪乱の影響が採取した試料に及ぶかについて、ヤンゴン市内及びその近郊の合計3地点において、実際に固定ピストン式サンプラーとシェルビーチューブサンプラーを用いて試料を採取し、攪乱の程度の差異を明らかにするとともに、既往研究の結果を用いて、超軟弱粘土であるホーチミンのメコンデルタの河口に位置するチーバイ粘土、および、日本の八郎潟粘土の場合との比較も実施した。

その結果、サンプラーの違いによる攪乱の影響の差異は、日本の八郎潟粘土やベトナムのチーバイの軟弱粘土ほどの大きなものは認められなかった。つまり、ヤンゴン及びその近郊粘土では、粘土の状態により攪乱の差の程度は異なるものの、明らかに試料の品質は一軸圧縮試験の結果に影響を及ぼし、固定ピストン式のサンプラーによる試料のほうが乱れの影響が少ないことが分かった。また、試料の品質の差は、乱されていないサンプルが有する応力-歪み関係に応じて表れることが分かった。

3) ヤンゴンにおける粘性土の地盤工学特性の比較検討（粘性土の堆積状況の把握、堆積盆の違いによる土質特性の比較、7つの区域間での土質特性の比較、他国の海成粘土等との土質特性の比較）

ここでは、ヤンゴン地域全体の粘性土の土質特性について述べている。ヤンゴン地域全体の地盤の評価では、ヤンゴンが二つの堆積盆（Irrawaddy Delta Sub-Basin, Pegu-Yoma Sittaung Basin）の境界にあることから、その堆積盆の違いにより土質特性に違いがあるのか否かを確認した。また、ヤンゴンの中央部を南北に貫く第三紀の堆積物により構成されるCentral Sub-areaを中心として7つのサブエリアに分け、各エリア間の土質特性の違いを確認した。さらには、既往の研究に示されるミャンマー全体の平均的な値との比較や他国の海成粘土等との土質特性の比較を試みた。

その結果、二つの堆積盆での差異はほとんど認められないこと、地盤構造の異なるセントラルサブエリアを除けば、各サブエリアの土質特性には、際立った大きな差のないことが明らかとなった。ただし、全く堆積環境の異なる諸外国の粘土との物理特性の比較においては、ヤンゴン粘土は過圧密の程度がやや大きく（OCR=1.6）、また、単位体積重量が大きく（平均18kN/m³）含水比は小さい（平均40%）など、土質特性の明らかな違いが認められた。また、力学特性の比較では、一軸圧縮強度 q_u と圧密降伏応力 p_c の関係を比較することにより、同一の p_c に対してヤンゴン粘土の q_u は日本の海成粘土の60%程度の値である。これは、ヤンゴン粘土が日本の粘土に比べて過圧密度がやや大きいことから、過圧密による応力解放の影響もその原因の一つであると考えられる。さらには、ヤンゴン粘土の圧縮指数 C_c をヤンゴン粘土の平均的な含水比40%のケースで比較した場合、ヤンゴン粘土の C_c は日本の海成粘土の5/9、ベトナムのチーバイ粘土の2/3と小さなものであることが分かった。最後に、圧密係数 c_v と液性限界 w_L の関係において、 c_v の分布はばらつきが大きいものの、同じ液性限界 w_L に対し、ヤンゴン粘土の c_v は日本の海成粘土やホーチミン粘土よりも小さい。したがって、ヤンゴン粘土が所定の圧密を完了するのに必要な時間は、日本の海成粘土の4倍、ホーチミン粘土の1.3から2倍を要することになる。

4) 軟弱地盤の分布するヤンゴン川沿いのティラワ地区における軟弱粘土の地盤工学特性の把握及び検討

ヤンゴンの中でも特に、均質な軟弱粘性土が厚く（最大 20m 程度）堆積し、Thanlyin Sub-area 内のヤンゴン川沿いに分布するティラワの粘性土を取り上げ、ヤンゴンの典型的な河川沿いの軟弱粘土の土質特性を明らかにした。土質特性の検討では、ティラワの港湾エリア（ヤンゴン川沿いに全長約 7.5km）において、5 か所の地点から採取した試料を用いて、ティラワ粘土の物理・力学特性に関して日本の粘土やその他の国の海成粘土との比較を実施した。また、二次圧密特性の検討や X 線回析試験による粘土の鉱物試験を実施し、構成される鉱物の種類などから日本の粘土との相違の有無を明らかにした。

その結果、ティラワ粘土の過圧密度は日本の港湾地域の海成粘土のそれよりもやや大きく、日本の粘土の平均的な過圧密度 1.25 に対し、地表部 (GL- 5 ~ - 6 m) の大きな過圧密度の層を除いた場合、ティラワ粘土の平均的な過圧密度は約 1.40 となる。また、ティラワ粘土の一軸圧縮強度 q_u と標高 (CDL) の関係は、陸上と河川の両方とも同じ式で表すことができ、これはおそらく、もともとは河川も陸上も同じ標高の陸地であったものが、河川による侵食を受け現在の地形になったからであると推察できる。また、ティラワ粘土の一軸圧縮強度 q_u と標準圧密試験から得られた圧密降伏応力 p_c とから得られた回帰直線式 $q_u = 0.445 p_c$ より、ティラワ粘土の正規化せん断強度（強度増加率相当） α_v / p_c は約 0.22 であった。なお、これは日本の海成粘土の平均的な値である 0.30 の約 2/3 程度であり、プレロード工法などを採用する場合には注意が必要であることが分かった。三軸圧縮試験 (CIU) から得られたティラワ軟弱粘土の有効応力の摩擦角は日本の軟弱粘土のものより小さく、 $\phi' = 25^\circ$ であり、これは日本の粘土の一般値 $\phi' = 30^\circ$ よりも小さい。

ティラワ粘土の正規圧密状態における平均圧密係数 α_v は、日本の海成粘土と比較して大差はないが、同じ液性限界 w_L に着目した場合には、日本の海成粘土と比較して 1/6 ~ 1/3 と小さいことが分かった。しかしながら、ティラワ粘土の平均圧密係数はバンコク粘土、シンガポール粘土およびチーバイ粘土（ベトナム）よりも大きく、これは、ティラワ粘土や日本の粘土の圧密係数がアジアの他の地域のそれよりも大きいことを示唆しており、その理由の一つはティラワ粘土や日本の海成粘土は粘土分含有量が他のアジア諸国のそれよりも低いことにあると考えられる。

また、X 線回析による鉱物試験結果をティラワ粘土と東京湾粘土とで比較したが、ほぼ同様の鉱物組成であることが確認された。

以 上