

論文内容の要旨

白竜湖軟弱地盤は、有機質土と砂質土が有機質土を挟みながら 100 m 以上の厚さで堆積している。これほど軟弱層の厚い地盤での高速道路建設は前例がない。そこで、試験盛土を 3 箇所構築して対策工の効果や問題点を確認し、計画に反映するとともに、6 種類の解析コードで残留沈下量を予測した。このような検討より

- i) シート式真空圧密工法の圧密促進効果が高い。
- ii) 供用開始から 20 年後の残留沈下量は、関口・太田モデルを拡張した解析コードが最も大きく各エリアとも 0.2~0.3m 程度で、従来の $\log t$ 法による計算結果と大差ない。

等の知見を得た。これに基づき、次のような設計方針の下に高速道路本体を建設することとなった。しかしながら、既往の工事経験に無い軟弱層の厚さより、長期間に亘る沈下が重要な課題として懸念され、その経年的挙動を膨大な土質試験データを拠り所として精査した。

関口・太田モデルも Bjerrum の疑似過圧密効果も、地盤の堆積年代 (t_i) を求める式を導ける。更新統粘性土で計算した堆積年代 (t_i) は、有機質分や火山灰の分析で測定した堆積年代 (t_a) と桁違いに乖離し、多くが $t_i \cong 0$ となった。原因として試料の乱れを疑い、様々な既往研究の指標で評価したが、何れも計算値 (t_i) と測定値 (t_a) の不一致との整合性がなかった。この結果は、 t_i の代わりに OCR を用いた評価でも同様になる。

一方で、更新統粘性土はアイソタック概念における統合近似曲線に適合する。また、国内各地の海成粘土と性状に大きな違いがなかった。このため、試料採取時の品質は既往研究で用いられてきた多くの試料と同程度で、乱れが特に大きいとは言えない。 t_i と t_a の乖離は、圧密試験の結果のバラつきに起因するものと考えられる。ただし、試験盛土の挙動と圧密試験の結果の比較したところ、圧密試験の結果自体は概ね適正であった。

ところで、統合近似曲線の傾きは、 C_α/C_c を表す。 C_c が一定とすれば、 C_α がひずみ速度に応じて低下し、時間経過と共に圧縮曲線の間隔が漸近するため、堆積年代 (t_i) の計算結果に大きく影響する。なお、関口・太田モデルでは C_α は一定であると仮定している。

深層型沈下計の測定値を整理して施工完了後の試験盛土で原位置の $C_{\alpha\epsilon}$ を求めたところ、網干らの実験結果と概ね調和的であった。網干らは、実験開始から 10 年以内に $C_{\alpha\epsilon}$ が 1/3 に低下したとしている。 C_α に時間依存性があつた場合、圧縮曲線が漸近して t_i を求めることが困難になる。このことは、沈下の収束も意味する。

C_α に時間依存性がなく一定であるとする最終沈下量が無限大になるが、室内試験の載荷範囲の程度であれば大きな問題とはならない。この場合、供用から 10 年後の沈下量がその後の 90 年間で生じる沈下量と同じということになる。人間の感覚では、沈下が収束したと感じるであろう。このため、道路構造物の設計では、 C_α は一定と見なして良いと考える。つまり、真空密工法を採用した場合、残留沈下量の予測は、 $\log t$ 法で可能である。

今後、現場での対応として特に構造物と盛土との接続部を重視して観測を継続する必要がある。特に深層型沈下計のデータを蓄積すれば、二次圧密係数の時間依存性の評価につながる可能性がある。

論文審査の結果の要旨

1. 論文の主題（テーマ）

陸成粘性土の擬似過圧密効果と試料の乱れの関係及び二次圧密係数の時間変化と軟弱地盤上の高速道路盛土における残留沈下量の慣用的予測方法の関係に関する研究

2. 当該研究分野における位置づけ

本論文は、厚さが 100m を超える軟弱地盤上に高速道路を建設するにあたり、真空圧密工法を採用した試験盛土の挙動を観察し、本体盛土の設計方針を明確化した。そのうえで、残留沈下量の予測について「慣用方法を採用する」とした方針について、多角的に検討を加えその合理性や妥当性を明らかにしている。これほどまでに厚い軟弱地盤での高速道路の建設経験がない中で、手探りの状態から明確な方針を打ち出し、さらにその妥当性を明らかにした点は、今後の道路建設において国内外を問わず有用な成果である。また、乱れの大きさを示すとされる既往の各指標については、これまでの知見に対して一石を投じている。

特に、本研究の後半部分においては、地盤工学の概念で地質学的な現象の一部についての説明を試みている。擬似過圧密効果の概念と地盤の堆積に関して、基礎的な研究を進めたうえで、残留沈下量の予測という実務的な課題に結び付けて有用な結果を導き出した。研究分野の枠を超えた独創的な取り組みである。

3. 論文の構成（目次と各章の概要）

第 1 章「序論」では、まず研究の背景として、軟弱地盤上に構築した高速道路盛土が抱えてきた問題について簡単に触れる。そのうえで、研究の目的を述べ、さらに研究全体の流れを概括する。本研究で対象とするのは、米沢盆地の北東端に位置する極めて深い軟弱地盤（白竜湖軟弱地盤）である。

第 2 章「白竜湖軟弱地盤の成り立ちと歴史」では、この白竜湖軟弱地盤がどのように形成されたのか、また、近年、人々はどのようにこの軟弱地盤と接してきたのか、その地質的背景と歴史を概観している。

第 3 章「白竜湖軟弱地盤の土質性状」では、白竜湖軟弱地盤を形成する土層の性状について、主に室内土質試験結果を整理して示している。白竜湖軟弱地盤の軟弱層は、100m 以上の厚さで粘性土と有機質土の互層で構成される。粘性土と有機質土について、それぞれ国内各地のデータと比較して差異が認められないことが明らかとなった。さらに、有機質分や火山灰を分析した結果などから、地盤の堆積環境が比較的平穏だったことが推定された。

第 4 章「軟弱地盤対策試験工事」では、白竜湖軟弱地盤に高速道路盛土をどのように構築すべきなのか、その設計に先立ち実施した試験工事の概要とその結果を整理して示されている。そのうえで、試験盛土をそのままの状態で放置した場合、20 年後の残留沈下量を予

測を試みている。

残留沈下量の予測には、複数の解析コードを用いたが、中でも関口・太田の弾粘塑性構成モデルが比較的大きな沈下量を予測する結果となった。このモデルは、Bjerrum による正規圧密粘土の疑似過圧密効果の概念と調和的である。

第5章「地盤の疑似圧密特性と試料の乱れ」では、まず Bjerrum の概念から地盤の堆積年代を推定した。推定結果が実測値と大きく乖離するため、その原因を「試料の乱れ」の観点から考察を加えている。しかしながら、「試料の乱れ」の観点だけでは両者の乖離の原因を説明しきれないことより、堆積年代の推定値と実測値に乖離する要因として、「試料の乱れ」の他に二次圧密係数の不確実性を取り上げている。

第6章「アイソタック概念の適用性」では、白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土がアイソタック則に従うことを示している。このことは、圧縮指数が一定であるとした場合、二次圧密係数が時間依存性を持っていることと同値となる。

第7章「施工完了後の試験盛土の挙動」では、先に述べた試験工事で施工した盛土の挙動から、原位置における二次圧密係数の導出を試みている。その結果が、既往研究と概ね調和的であることが明らかとなった。

第8章「結論と今後の課題」では、第2章から第7章までの結果を概括し、それらの結果を基に本研究の結論を改めて考察する。軟弱地盤対策工における改良深度の妥当性を述べ、「試料の乱れ」については、本章で新たにデータを示したうえで見解を述べる。また、残留沈下量の予測については、二次圧密係数についてさらに研究を進める必要性を指摘する。

4. 論文の独自性や成果

本論文の独自性は、まず、厚さ 100m を超える軟弱地盤において2種類の真空圧密工法をほぼ同時に施工して比較している点が挙げられる。また、地盤の堆積年代の計算値と実測値を比較したうえで二次圧密係数の時間依存性を考察した点や、既往研究で「試料の乱れを示す」とされた指標の多くが過圧密比の大小と関連性がないことを示した点等も独自性が認められる。その成果として、シート式真空圧密工法の適用性がより高いことや、真空圧密工法を採用した場合は残留沈下量の予測が慣用法で可能なことを示したうえで、その妥当性も併せて示している。

5. 論文の課題

本論文では、極めて厚い軟弱地盤においても、道路構造物については真空圧密工法を採用すれば残留沈下量の予測は従来の枠組みの中で可能であることを示した。しかし、より長期間高い精度で維持する必要がある構造物を設計する場合においては、本論文の結論は適用できない。二次圧密係数、あるいは二次圧密係数と圧縮指数の比が時間に依存して変化する可能性については、今後研究を継続するべきである。

6. 論文の評価

本論文は、独自性が高いうえ、今後の道路建設において国内外を問わず地盤工学的に有用な成果も得ている。さらに、地盤工学の枠組みを超えた基礎的な研究にも意欲的に取り組んでおり、今後の地盤工学の発展に大きく貢献する展開も期待できる。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。