傾斜岩盤上の宅地盛土に対する地盤調査の事例と補強工法の提案[†]

西村 豪志* 稲積 真哉** 大北 耕三***

The Investigation and Reinforcement for Residential Grounds Located on Inclined Bedrocks

by

Goushi NISHIMURA*, Shinya INAZUMI** and Kozo OKITA***

Nowadays the land subsidence and the liquefaction at residential grounds have been becoming more apparent. However, there are no particular investigation methods to determine their causes. This is because the grounds of detached residents where an investigation should be conducted are often very confined. In this study, a detailed analysis of N-value distribution at an embankment of a detached residence located on inclined bedrocks using improved Swedish weight sounding machine is conducted. The causes of land subsidence and the future tendency for the land subsidence are estimated. Also, a reinforcement method and material to fortify weak ground is proposed in this study.

Key words:

Embankment, Ground investigation, Reinforcement, Residential ground, Sounding machine

1 結 言

昨今、地盤沈下の原因究明や予測等を実施する上で、有限要素解析等の解析的アプローチを行うことが不可欠になってきており、解析技術は明らかに向上している。しかしながら、解析の基礎データとなる地盤調査の能力・精度向上や調査手法の確立等は明確なものがない現状である。そこで、一連の研究では、地盤調査機として代表的なスウェーデン式サウンディング試験機（従来型 SWS 試験機）に対して、より詳細に調査データを取得することができる等の特徴を有した改良型 SWS 試験機を開発している^{1)~3)}。

本研究では、実際に地盤沈下が発生した住宅盛土地盤において、改良型 SWS 試験機を用いて当該地盤内の換算 N 値分布を詳細に測定し、沈下の原因究明および今後の沈下傾向の推定を図ったものである。同時に、当該測定と並行して、測定で判明した軟弱箇所を簡易に補強する締固め工法ならびに補強材の提案も行っている⁴⁾。

2 従来型 SWS 試験機および改良型 SWS 試験機

改良型 SWS 試験機は、従来型 SWS 試験機と比較して以下の特徴を有している。

- (1) 最大載荷量が 2500N であるため、貫入力が比較的大きい（従来型 SWS 試験機は 1000N）。
- (2) 礫まじり層や、軟岩層も貫入できる（従来型 SWS 試験機は礫にあたると貫入不可）。
- (3) 測定ピッチが 1.08cm であり、詳細なデータ取得が可能である（従来型 SWS 試験機は 25cm ピッチ）。

- (4) 鉛直方向以外にも傾斜測定も可能であり、限られた調査スペースで多くのデータを測定できる（従来型 SWS 試験機は鉛直方向のみ）。

ただし、傾斜測定によって求められた換算 N 値の評価に関しては土の異方性を考慮した手法が現状では確立できておらず、今後はデータを蓄積し、換算 N 値の評価手法を確立する必要がある。なお、改良型 SWS 試験機は、比較的大きい貫入力を有しているが、載荷方式の工夫により騒音・振動は従来型 SWS 試験機と同レベルである²⁾。さらに、空気載荷による自沈制御機能を有しており、自沈を改良型 SWS 試験機のシステムが確認すると、載荷重 0N の状態から試験を再スタートする点も従来型 SWS 試験機と大きく異なる。

従来型 SWS 試験機、改良型 SWS 試験機、および標準貫入試験機の性能を比較するため、某現場内にて 0.5m 程度離れた測点にて当該試験機を用いた比較測定を実施した。Fig.1 および Fig.2 は、改良型 SWS 試験機と従来型 SWS 試験機の結果を比較している。なお、従来型 SWS 試験機を採用した場合、測定要素の一つである 1m あたりの半回転数 N_{sw} が 150 より大きな値になった場合は $N_{sw}=150$ を上限値とする場合がある。Fig.1 および Fig.2 に示された従来型 SWS 試験機の換算 N 値は、その上限値が採用されたものであるため、Fig.3 および Fig.4 では N_{sw} の実測値を採用した場合の換算 N 値を示し、さ

[†] 原稿受理 平成27年6月8日 Received June 8, 2015 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 日鉄住金スラグ製品 広畑事業所 〒671-1125 姫路市広畑区
Nippon Steel & Sumikin Slag Products Co. Ltd., Hirohata-ku, Himeji 671-1125.

** 正 会 員 明石工業高等専門学校 都市システム工学科 〒674-8501 明石市魚住町西岡
Department of Civil Engineering, Akashi College, National Institute of Technology, Uozumi-cho, Akashi 674-8501.

*** 大北耕商事 〒598-0063 泉佐野市湊
Okitako Co. Ltd., Minato, Izumisano 598-0063.

Fig.1 Comparison of converted N-values of improved SWS test and conventional SWS test (survey point: 1).

Fig.2 Comparison of converted N-values of improved SWS test and conventional SWS test (survey point: 2).

Fig.3 Comparison of converted N-values of improved SWS test and conventional SWS test (survey point: 1). Zoomed in a part where conventional SWS machine could penetrate.

Fig.4 Comparison of converted N-values of improved SWS test and conventional SWS test (survey point: 2). Zoomed in a part where conventional SWS machine could penetrate.

らに従来型 SWS 試験機が貫入できた箇所を拡大している。また、Fig.5 は改良型 SWS 試験機と標準貫入試験機の打止め深度から想定岩線を描き、地層断面図を表現したものであり、従来型 SWS 試験機による換算 N 値も比較のため併記している。これらより、以下のことが判明している。

- (1) 従来型 SWS 試験機で探知できなかった軟弱層 (400 ~ 600cm) を改良型 SWS 試験機では探知することができる (Fig.1 参照)。
- (2) 従来型 SWS 試験機は、換算 N 値 15 以上の層には貫入できない (Fig.1 および Fig.2 参照)。
- (3) 従来型 SWS 試験機で測定できている領域の結果と改良型 SWS 試験機による測定結果の傾向は、ほぼ一致している (Fig.3 および Fig.4 参照)。
- (4) 従来型 SWS 試験機において、 N_{sw} 上限値を採用しな

い場合の換算 N 値は過大評価になっている可能性があり、従来型 SWS 試験機を用いた場合は N_{sw} 上限値を採用することが望ましい (Fig.3 および Fig.4 参照)。

- (5) 従来型 SWS 試験機は比較的浅い深度で打止めになっているが、改良型 SWS 試験機は標準貫入試験機の打止め深さに近い深度まで測定できる (Fig.5 参照)。
- (6) 改良型 SWS 試験機は、標準貫入試験機では平均化される中間礫層の存在を確認できる (Fig.5 参照)。
- (7) 標準貫入試験機と改良型 SWS 試験機の打止め深さをを用いて想定岩線を描くことはできるが、従来型 SWS 試験機の打止め深度では、表層崩壊のすべり面となる可能性のある岩線の評価できない (Fig.5 参照)。

3 改良型 SWS 試験機による地盤調査事例

3.1 現場概要と地質観察および沈下原因の推測

本研究において調査対象とした現場は傾斜地にある階段状宅地であり、2 階建ての一般戸建住宅が 2 軒並んだ敷地である。その敷地内の一部で地盤沈下が発生し、建物の一部や周囲のブロック塀等に変状が生じている状況であった。

現場確認 (現地踏査) 前、地質図から沈下現象の原因を推察したところ、通商産業省 (現 経済産業省) 工業技術院監修日本地質図大系によれば、現場の地質は「黒雲母花崗岩」、「非海成粘土・砂・礫および火山灰」、および「礫および砂」が混在する複雑な地質であると読み取れた (Fig.6 参照)。さらに、現場は六甲山系の傾斜地であり、経験則に基づき基盤となる傾斜した花崗岩質の岩盤上に切盛土により造成された宅地地盤であると予想した。また、造成には現地付近のまさ土等が使用されていると考えられ、造成時の締固め不足や降雨の影響等の経年劣化により沈下が発生していると推察した。

3.2 現場踏査および調査計画

調査開始前、現場踏査を実施した。沈下による影響として、敷地境界のブロック塀で段差 (Fig.7 参照)、建物南の踏石の転倒により建物との間に隙間等 (Fig.8 参照) が発生していた。これらの現象はすべて敷地の南側に集中して発生しており、擁壁に近い箇所の締固め不足、盛土厚が不均質、盛土部の経年劣化、ならびに地下水の影響等が特に南側に集中していると考えられた。そこで、本研究では、限られた経費の中で確実に軟弱箇所の確定をするため、階段状宅地における過去の事例などを考慮して軟弱範囲を予測し (Fig.9 参照)、軟弱箇所の深さおよび範囲を特定することを目的とした測定位置および測定方向を Fig.10 のように設定した。

各測点の測定目的として、敷地北側の鉛直方向測定測点 (①, ②, ⑤, ⑥) と隣接地内測点⑨は、山側であるため、盛土厚が小さいと考えられる箇所の換算 N 値分布測定 (比較データの取得) であり、敷地南側 (擁壁側) の鉛直方向測定測点 (③, ④, ⑦, ⑧) は、軟弱である可能性が高い盛土箇所の換算 N 値分布測定である。測点

Fig.5 Hypothesized rock border is drawn based on data acquired from NSWS and standard penetration tests.

Fig.6 Geological map.

Fig.10 Investigation positions and directions.

Fig.7 A gap in a concrete-block wall.

Fig.8 A fall of stepping stone.

Fig.9 An area of weak ground.

⑩～⑬の傾斜方向測定は、軟弱箇所の範囲を把握および擁壁近くの締固め不足範囲を確認するための換算 N 値分布測定とした。ここで、軟弱箇所を面的に把握するためには、従来型 SWS 試験機や標準貫入試験機では測点数を増やすしか方法はなかったが、改良型 SWS 試験機

では傾斜方向測定が可能のため、経済的であると考えた。

3.3 調査結果および考察

Fig.11 および Fig.12 に測定結果の一例として測点④と測点⑩の換算 N 値を示す。各測点の測定中における状況観察および換算 N 値から、いずれの測点も表層は軟弱な礫まじりの砂質土であり、試験終了判断となった貫入不能の現象は、岩着によるものであると考えられた。特に、浅層箇所は換算 N 値が 5 を下回る箇所が多く、沈下に大きく影響している弱層である。これらを基に、Fig.13 に示す A-B 断面、C-D 断面、E-F 断面における弱層の下端線および想定岩線 (Fig.14～Fig.16 参照) を描くことができた。これらは弱層の下端線をすべり境界面とし、弱層の土量を算出することにより、安定度計算に用いるデータとして使用できると考えられる。これらの結果により、宅地 B の弱層の層厚が宅地 A に比べて大きいことが明らかになり、宅地 A での構造物の変位より宅地 B での変位が大きく現れていた一因を明らかにすることができた (変位量の差は Fig.17 および Fig.18 参照)。

さらに、換算 N 値の大小が複雑に入り乱れている箇所が見受けられる (Fig.11 および Fig.12 参照)。これは、降雨による浸透水により礫間の細粒分が流失し、空隙が発生していると考えられる。細粒分は土構造物に粘着力を付与するため、その流失による盛土の強度低下は経年劣化の一要因であると考えられる。

Fig.11 Conventional N-values graph of measurement point: No.4.

Fig.12 Conventional N-values graph of measurement point: No.11.

Fig.13 Hypothesized rock border line and hypothesized rock border contour lines.

Fig.14 A-B Cross section of Fig.11.

Fig.15 C-D Cross section of Fig.13.

Fig.16 C-D Cross section of Fig.13.

Fig.17 A shift of housing site A.

Fig.18 A shift of housing site B.

本研究における地盤調査の事例は、狭隘な敷地、礫まじりの盛土、および既存住宅における調査等、調査条件の悪い現場にて換算 N 値の詳細なデータの取得を実施できたことにより、改良型 SWS 試験機が従来型 SWS と比較して現場条件や地盤の硬さに対する適用範囲が広いと評価できる。さらに本事例により、改良型 SWS 試験機は中礫への貫入が可能であること、傾斜方向の測定により軟弱層や岩線の面的な把握に優位性があることが評価できた。また、改良型 SWS 試験機は軽量（約 120kg）、且つ、貫入力が高く、測定ピッチも細かいことから、表層崩壊の検討にて実施する現状の試験機と改良型 SWS 試験機を組み合わせる実施すれば、礫の影響を排除した正確な表層厚の把握が可能になり、表層崩壊の危険度評価の精度向上に寄与できると考えられる^{5),6)}。

一方、本事例において確定した滑り線の評価については、実際に現場にて発生した地盤変位と解析との整合性などとの比較を行い、その解析方法の評価を含めて現在検討されている。

3.4 補強の必要性

本事例では、換算 N 値が 5 以下の軟弱な層を発見することができた。そのような軟弱な層は、補強・改良を施さない限り、更なる不同沈下に繋がる危険性がある。しかしながら、地盤補強・改良を施すに際して、以下のような課題を挙げることができる。

- (1) 現場が狭隘である。
- (2) 住宅密集地であるため、騒音・振動は好ましくない。
- (3) 傾斜地であるため、排水性能も重要である。

以上の課題を考慮した、地盤補強工法と補強材を提案する。

4 補強工法および補強材の提案

4.1 提案する補強工法の概念

本研究において提案する補強工法は、調査孔を拡孔することによる締固め効果および、粘土分を含んだ補強材による砂質地盤への粘着力を付与する（施工後の降雨等による浸透水により粘土分が拡散し、周辺の砂質土箇所に粘着力を付与する効果を期待するもの）概念を利用したものである。

提案する補強工法に関して想定できる利点は、以下のように挙げられる。

- (1) 使用する機械が改良型 SWS 試験機であり、小型（作業面積は約 1.5m²）である。
- (2) 一般的なコンポーザーの施工と比較して、施工中の振動・騒音が小さい。

Fig.19 Summary of proposed ground improvement method.

(3) 締固め工法であるため、施工の影響による急激な地下水位の上昇は発生しない。

提案する地盤補強は次の手順で行う (Fig.19 参照)。なお、本工法には調査で用いた改良型 SWS 試験機を用いる。

- (1) 改良型 SWS 試験機で用いるビットスクリーポイント (□22mm) を先端に装着した状態で掘削する (Fig.19 における①～③)。
- (2) 一旦引き抜き、拡孔用オーガ (□50mm) にて再度掘削する (Fig.19 における④～⑩)。
- (3) 砂を充填し、再度オーガ (□50mm) で掘削する (Fig.19 における⑪～⑬)。
- (4) 補強材 (藤森粘土と砂を混合して棒状に整形したもの) を充填する (Fig.19 における⑭)。

4.2 室内実証実験による補強効果の確認

前述した補強工法を実施工に適用するに当たり、現場条件の把握とともに、その条件に対する設計手法を確立する必要がある。現状では手法を提案できるのみで、設計に供する要素がないため、1 か所の施工が周辺地盤に与える影響範囲および、締固め効果の確認を以下の手順により室内実証実験を実施し、評価した。

- (1) 海砂により作製した均質土層のコーン指数を測定し、換算 N 値を算出する (Fig.20 参照)。
- (2) □50mm のオーガによる掘削、海砂の充填を 2 回繰り返す (Fig.21 参照)。
- (3) 孔の中心から 50mm, 100mm, 150mm の各位置でコーン指数を測定し、換算 N 値を算出する (Fig.22 参照)。

N 値が 3.7 と 0.7 の均質土層にて行った実証実験の結果 (換算 N 値) を Table 1 および Table 2 に示す。各均質土層の結果において、いずれも中心から 150mm の位置まで換算 N 値の増加が確認できた。強度の増加は、砂層が水平方向へ締め固められたことによるものであると考えられる。なお、補強材に関しては地盤に粘着力を付与することを目的としており、確認した換算 N 値の増加には無関係であると考えられる。機械が小型であるため、効果の範囲も小さいが、改良範囲が小さい現場や、大型の施工機械が侵入できない現場等、条件に合えば実用化

Fig.20 A confirmation of soil layer strength.

Fig.21 Hole expansion by earth auger.

Fig.22 A confirmation of soil layer strength after the hole expansion by earth auger.

の可能性はあると考えられる。ただし、今後は施工後における地盤全体の透水状態の評価、せん断強度の評価、大型土槽を用いた改良効果の影響範囲の確認等を実施する必要がある。

Table 1 Soil layer: N-value 3.7.

Distance (mm)	Conventional N-values
50	8.81
100	7.87
150	7.80

Table 2 Soil layer: N-value 0.7.

Distance (mm)	Conventional N-values
50	2.31
100	1.66
150	1.31

5 結 言

本研究により、下記の成果が確認できた。

- 1) 改良型 SWS 試験機による測定結果は、他の調査手法と比較してより詳細な測定結果が得られている。
- 2) 改良型 SWS 試験機は、従来型 SWS 試験機と比較して適用できる条件が広い。
- 3) 改良型 SWS 試験機の適用により、不同沈下の原因となった不均質な盛土状態を評価できた。
- 4) 詳細な換算 N 値の表現により、土中水が地盤にもたらす経年劣化の影響も表現できた。
- 5) 土構造物の維持管理および対策工の検討時には、地盤の経年劣化による不均質性等を評価する必要性があり、改良型 SWS 試験機が有効である。
- 6) 改良型 SWS 試験機を用いた締固め工法の効果は、室内実証実験にて確認できた。

今後の課題としては、改良型 SWS 試験機から得られる詳細な N 値データを土構造物の維持補修工法等の設計に活かせる技術確立することが求められると考えられる。

地盤補強の手法に関しては、現状では室内での実証実験が完了した段階である。今後は大型模型を用いた実験や、実際の現場において本工法および補強材を適用し、効果の調査や施工後地盤全体の評価を行う必要がある。また、補強材には粘土（藤森粘土）と海砂を用いているが、一般的な粘土、建設発生土や、海砂の代替としてのリサイクル材料（コンクリート殻やフライアッシュ、鉄

鋼スラグ等）等の材料の適用性の評価等を進め、工法の適用範囲を拡大していきたいと考える。さらに、実際の現場において適用する場合、設計面での課題も考えられる。そこで弱層の換算 N 値と目標の換算 N 値から補強材の充填量や、施工間隔の検討等の設計手法を確立する必要がある。住宅における不同沈下の被害は頻発しており、当該工法の実用できれば、それらの解決や、関東ローム層、シラス地盤等多岐にわたる土質に対応できることが期待できると考える。

参 考 文 献

- 1) S. Inazumi, K. Shishido, and K. Okita “Survey and repair for void in ground using NSWS”, Proceedings of the 9th National Symposium on Ground Improvement, pp.233-236 (2010).
- 2) S. Inazumi, K. Okita, T. Kondo and K. Kazarashi, “In-situ ground surveying by the NSWS testing machine”, International Journal of GEOMATE: Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol.1, No.1, pp.1-9 (2011).
- 3) S. Inazumi, K. Kazarashi, T. Kondo and K. Okita, “Identification of influence region on ground subsidence based on in-situ NSWS testing”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.60, No.12, pp.1144-1148 (2011).
- 4) G. Nishimura, S. Inazumi, K. Okita and T. Kondo, “Ground investigation of the housing embankments on inclined rocks, and proposal of their reinforcing materials and methods”, Proceedings of the 11th National Symposium on Ground Improvement, pp.431-438 (2014).
- 5) National Institute for Land Infrastructure Management, “Research on a method of estimating the potential depth of slope failure using a knocking pole test”, National Institute for Land Infrastructure Management, No.261 (2005).
- 6) Public Works Research Institute, “Debris flow generation risk assessment manual due to surface collapse”, Public Works Research Institute, No.4129 (2009).