未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策 Measures of Subsidence in Natural or Artificial Low Land without Ground Improvement

まえがき

我が国は、世界でも有数の地震多発国である。同時に、台風や豪雨による災害に見舞われる頻度が極めて高いことは、この数十年間、特に近年被った災害履歴を振り返れば疑う余地のないところである。国内のどこであっても災害に見舞われる可能性はあるが、山がちで四方を海に囲まれた地形的な特徴から、人々は急峻な河川の下流域に生活の場を求め、河川・海路輸送を発達させて都市化を進め産業を発達させてきた。この河川下流域は、地形分類でいうところの氾濫平野、旧河道、湿地など、いわゆる低平地であり、干拓地や埋立地である。これらの土地は、軟らかくて変形しやすい、いわゆる軟弱な粘性土地盤上に造成されたものも多く、当時の地盤改良技術の未熟さや、急速な社会の変化に対応するため、地盤改良がされていないケースも多くある。このような場所では、今日でも地盤沈下が収束せず、じわじわと沈下が進行している場所も少なくない。また、地盤沈下が収束するかに見えていた埋立地や低平地においても、特に地下水の汲み上げや土地の嵩上げ、さらには地震動などの外力によって地盤沈下が加速するケースも見受けられる。

本講座を担当する地盤改良部門委員会は、1962年11月に土質安定材料委員会として発足以来、約55年にわたって地盤の改良技術に関係する多くの課題に取り組み、調査・研究活動を推進してきた。この委員会の活動のひとつとして、2014年4月より当講座のタイトルである「未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策研究会」を設置して、未改良の埋立地や低平地の現状を調査し、地盤沈下を含むこれらの地域の課題を抽出、将来に向けての対策方法を提案することを主目的に活動してきた。この間、沈下被害が顕著な国内5箇所（長野県諏訪市、宮城県塩竈市、佐賀県白石町、山形県南陽市、北海道江別市）の現地視察を行い、地域毎の被害や地盤の特徴などについての調査・研究を行った。

本講座では、この未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策研究会の活動を通して得られた成果について、5回にわたり以下の担当者とタイトルで解説する。

第1回「未改良の埋立地や低平地の現状と課題」

第2回「地盤沈下のメカニズム」

第3回「地盤沈下と地域地盤特性」

第4回「代表的な地盤沈下対策方法」

第5回「地盤沈下対策の新たなトレンド」

今西 肇（東北工業大学）、杉山太宏（東海大学）

重松宏明（石川工業高等専門学校）

大島昭彦（大阪市立大学大学院）

日置和昭（大阪工業大学）

今西 肇（東北工業大学）、杉山太宏（東海大学）

1. 未改良の埋立地や低平地の現状と課題

今西 肇* 杉山太宏**

I : Current Status and Issues in Natural or Artificial Low Land without Ground Improvement

by

Hajime IMANISHI * and Motohiro SUGIYAMA **

Key words: Unimproved Ground, Reclaimed land, Low land, Ground Settlement, Ground Water

1 はじめに

日本の国土は約38万km²で、アメリカや中国など大陸諸国（約1000万km²）と比較して、「小さな島国」と表現されることも少なくないが、世界200数十カ国の中では面積の広い方から62位と上位1/3以内にある。この「小さな島国」である日本の地形は、脊梁山脈が背骨のごとく列島中央を貫き、「山地」、「丘陵地」ならびに「台地」を合わせた面積は実に国土の8割を超える。また、

国土面積に対する森林の面積はおおよそ3分の2で、ほとんどの人々が河川下流域から海岸に面した「低地」に居を構え、生活基盤（インフラ）の整備を行ってきた。その結果として国内の都市部はこの低地に発達してきた。都市部では、海浜部を埋立て新たな土地を造成し、港湾の整備、居住地、産業団地を形成して産業振興が行われた。既存埋立地の中には、低地であるがゆえに軟弱な粘性土地盤上に造成されたものも多く、軟弱地盤の改良がなされていない箇所も少なからず見受けられる。1960年

+ 原稿受理 平成30年10月22日 Received Oct. 22, 2018©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 東北工業大学名誉教授 〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町 Emeritus Professor, Department of Civil Engineering and Management, Tohoku Institute of Technology, Taihaku, Sendai, 982-8577

** 正会員 東海大学工学部土木工学科 〒259-1292 平塚市北金目 Department of Civil Engineering, Tokai University, Kitakaname, Hiratsuka 259-1292

代の高度経済成長期に軟弱地盤上に造成工事が行われ、その後 50 年近くが経過した今日でもなお地盤沈下が収束せずに進行しているケースも少なくない。さらに、地盤沈下が収束するかに見えていた埋立地において、外力の増加、特に地震動により粘土構造が破壊され、地盤沈下が加速するケースも散見されている。

このような現状を鑑み、未改良の埋立地や低平地の現状を調査して、地盤沈下を含むこれらの埋立地の課題を抽出し、将来に向けた地盤の沈下と変形に対する対策方法を提案することを目的に、2014 年 4 月に地盤改良部門委員会内に「未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策研究会」（委員長：今西肇）を設置した。当研究会は 18 名の委員で構成され、3 つのワーキングによって 4 年間にわたり調査・研究活動を行ってきた。各調査研究ワーキングでは、未改良の埋立地や低平地の

- ① 現状と課題
- ② 地盤構造や地盤特性
- ③ 地盤沈下を含む課題と対策方法をテーマとしている。

本講座では、「未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策研究会」が取り組んできた内容のうち、上記ワーキング①の報告として、はじめに「未改良の埋立地や低平地」を定義する。次に、このような地域の現状と課題について述べ、未改良の埋立地や低平地の沈下事例とその対策事例を紹介する。最後に、次号からの各回講座の内容を概説する。

なお、本講座の第 2、3 章の内容は、日本材料学会誌「材料」2016 年 10 月号の講座「我が国における地盤改良の変遷 3. 未改良の埋立地や低平地における地盤沈下への対応（今西肇・杉山太宏）¹⁾」で報告したものに、一部加筆・修正したものである。

2 未改良の埋立地や低平地の定義 ならびに現状と課題¹⁾

2.1 未改良の埋立地や低平地の定義

「未改良の埋立地や低平地」とは、漁港や工業港、耕作地や居住地としての埋立地、沿岸部の低平地、内陸部の盆地などを言い、埋立てられたり嵩上げや盛土が施工されたりして、現在何らかの経済活動がなされている場所のことを指す。

このような場所は、地下に軟弱な粘土地盤が厚く分布し堆積していることが多いが、種々の社会経済活動を実施するために、地盤沈下などへの対策がすでに行われている場所でもある。しかしながら、供用開始時に利用が決まっていなかった場所や、地盤改良や基礎構築がなされた箇所の近接部などは、未改良の地盤が多く存在し、埋立地や低平地には未改良部と沈下対策実施部とが混在しているのが実情である。

このような観点から本研究会では、「未改良の埋立地や低平地」を、「全く地盤改良がなされていない埋立地や低平地」ならびに地盤対策として地盤改良や基礎構築がされてはいるが「未改良部分も多く残っている埋立地や低平地」と定義した。

2.2 未改良の埋立地や低平地の現状

環境省、水・大気環境局の「平成 28 年度 全国の地盤沈下地域の概況」によると²⁾、平成 28 年度に地盤沈下の測定のための水準測量が実施された地域は、21 都道府県 29 地域である。ほとんどの地点は、地下水の過剰な採取

図1 全国地盤沈下地域²⁾

図2 代表的地域の地盤沈下の経年変化²⁾

図3 仙台市における東西方向の地質断面図³⁾

により地下水位が低下し、粘土層などの軟弱な層を圧密させることにより地盤沈下が生じている。図1および図2は、全国の地盤沈下地域と代表的地域の地盤沈下の経年変化を示す。

一方、平成 23 年 3 月 11 日には東北地方太平洋沖地震による広範囲な地殻変動が発生した。その後の地盤沈下観測によると、軟弱層が堆積する場所では地盤沈下が加速した事例が報告されている。

図3および図4は仙台市環境局が実施している地下水位の低下の影響を調べたもので、宮城野区の地盤沈下の計測結果である³⁾。これによると、10m 程度の厚く堆積した粘土・シルトからなる軟弱粘性土層の圧密沈下速

図4 仙台市宮城野区日の出町の地盤沈下³⁾ 図5 気仙沼市弁天町の地盤沈下⁴⁾

度が、震災前後で地下水位の変動がないにもかかわらず、大きく異なっていることがわかる。また、宮城県の資料によると⁴⁾、気仙沼市弁天町の埋立地でも図5に示すように、地震前後で地盤沈下速度の違いがあることが報告されている。このような現象は、過去の地震においても観測されており、地殻変動の影響、せん断変形、水圧増加減少に伴う圧密沈下の影響などが考えられるが、今のところ明確な理由は不明である。

環境省の水・大気環境局による自治体へのアンケート調査によれば²⁾、22都道府県29地域のうち、地盤沈下と地震の関係について、「影響がない」としたものは15県20地域であり、「影響がある」とした地域は1件1地域であった。それ以外の7道府県8地域は「影響があるかなわからない」と答えている。これは、仙台市や気仙沼市の例のように記録が取れている場所もあるが、地殻変動や津波などによる破損のため、測定できていない場所も多いと思われる。

2.3 未改良の埋立地や低平地の課題

2.1に定義されている「未改良の埋立地や低平地」はこれを構成する地盤とその利用形態によって、次のような課題がある。

(1) 地盤の課題

- ① 粘土の工学的な性質の地域差が大きい。
- ② 粘土層はその成分や形成の仕方によって性質が千差万別である。

- ③ 地下水位低下による地盤沈下は広域的に発生するため、限定的な対策がとりにくい。
- ④ 数十年にわたる長期の地盤沈下が発生する。
- ⑤ 間隙が大きいために、排水や載荷などの物理的な改良による粘土の圧縮量は数十パーセントに達する。
- ⑥ 地震力による粘土の構造破壊による地盤沈下が発生する。

(2) 地盤の利用形態による課題

- ① 地盤沈下による構造物や既設基礎杭の抜け上がりが発生する。
- ② 道路部の嵩上げによる地盤沈下が進行する。
- ③ 工場などの立て替えにおける既存基礎杭などの処理が発生する。
- ④ 基礎杭支えられた工場建物と道路の段差がある。
- ⑤ 地中に埋設された上下水道管やガス管の沈下が建物境界で不当沈下などが発生して折れ曲がる。

したがって、未改良の埋立地や低平地の地盤沈下の対応を検討するにあたり地盤改良工法を用いる場合には、経済性を考慮した地盤改良技術の応用や、既存の地盤改良技術を複数利用する新たな地盤改良システムの開発が必要である。また、粘土の種類によっては、化学作用による改良効果が不十分な場合もあり、改良材と粘土の相性も考慮する必要がある。

3 軟弱地盤に生じた沈下の実態について

研究会では、国内で観測された沈下被害が顕著な5箇所（宮城県塩竈市、長野県諏訪市、佐賀県白石町、山形県南陽市、北海道江別市、図1に○印で示す）の現地視察を行い、地域毎の被害や地盤の特徴などについて調査研究を行った。本章では、視察地で撮影した地盤沈下による被害を紹介するとともに、研究会を設置するきっかけともなった宮城県塩竈市の地盤沈下の概要について説明する。また、各地の地盤沈下への対応の実態¹⁾について簡単に述べる。

3.1 視察地（塩竈市・諏訪市・白石町・江別市）の沈下被害

図6から図8は宮城県塩竈市新浜地区、図9から図14は長野県諏訪市内、図15から図17は佐賀県白石町、そして図18⁵⁾から図19は北海道江別市内でそれぞれ撮影した沈下被害を受けた施設や建造物、道路の様子を示したものである。

図のキャプションに概要を説明しているが、塩竈は、軟弱な海底粘土地盤を埋立て造成された土地で、無対策で行われた粘土地盤の埋土荷重による沈下が主要因である。

諏訪は、“すくも層”と呼ばれる高含水比で極めて軟弱な有機質腐植土層が堆積しており、温泉や地下水の汲み上げ、造成工事による盛土や構造物荷重が沈下の要因となった。

佐賀の有明海沿岸には、有明粘土層と呼ばれる有機分を多く含む含水比および鋭敏性が極めて高い軟弱な粘土が厚く分布する。平野部の勾配が緩く、河川の感潮域が中流まで及ぶため、古くより地下水が水源として利用された。この地下水の汲み上げが沈下の主要因である。

北海道の石狩川流域には超軟弱な泥炭層が厚く堆積している。札幌～岩見沢間の高速道路建設時には、江別において泥炭地盤の沈下挙動を調べるために試験盛土が施工された地区である。

図6 塩竈市白浜地区の建物沈下
(建物左：杭基礎、右：ベタ基礎)

図10 諏訪市公設地方卸売市場辺地盤の沈下2
(図9マウンドの近景)

図7 塩竈市白浜地区の建物沈下
(基礎杭が約80 cm露出)

図11 諏訪市公設地方卸売市場辺地盤の沈下3
(フーチングの露出)

図8 塩竈市白浜地区の道路と建物沈下
(左：度重なる道路のかさ上げ、右：建物地中梁をジャッキアップ)

図12 諏訪市公設地方卸売市場事務所入口
(沈下によって3段の鋼製階段設置後、更に1段追加された)

図9 諏訪市公設地方卸売市場周辺地盤の沈下1
(荷物の積み下ろしのため局所的にマウンドを設置)

図13 諏訪 IC 料金所付近の沈下1
(ゲート周辺抜上がりのためオーバーレイが繰り返された)

図 14 諏訪 IC 料金所付近の沈下 2
(除雪車用格納庫のマウンド)

図 15 佐賀県白石町の農業倉庫周辺の沈下 1
(農耕機用のマウンドが土盛りされている)

図 16 佐賀県白石町の農業倉庫周辺の沈下 2
(抜け上がった PC 杭と地中梁)

図 17 佐賀県白石町のコンビニストア周辺の沈下
(駐車場のためのマウンド, 隙間の目隠しの設置)

図 18 泥炭地盤上に建設された道路沈下 5)に加筆
(函渠の有無による沈下量の差により洗濯板状に沈下)

図 19 江別市三原道路のボックス部段差
(近づいて段差に気付いて踏んだと思われるブレーキ痕)

3・2 塩竈市新浜地区の地盤沈下と対応¹⁾

(1) 地形、地質ならびに地盤沈下の概要⁶⁾

塩竈市新浜地区は、40 年前（1970 年代）に軟弱な粘土地盤が厚く堆積している海底部を未改良のまま埋め立てて造成された土地であり、主に工場などが立地している。地盤構造は新第三紀中新世松原湾層群網尻層が基盤岩となっており、その上を海底に堆積した粘性土が覆い、表層部には埋立土および盛土が分布する。新浜地区には N 値がゼロの極めて軟弱な粘性土が最大 20 m の厚さに分布しており、自然含水比は 150 % を越えるものが多く、土粒子の密度は 2.50 g/cm^3 、土の湿潤密度は 1.25 g/cm^3 と小さい。また、目視によると有機物が多く含まれている。塑性指数も最大で 150 と高く、液性限界が 200 % を超えるところもある。

(2) 地盤沈下の概要

図 20 は、宮城県内で観測された地盤沈下の経時変化である。当該地区では（図中の塩竈市新富町）昭和 49 年から平成 22 年までに 30 cm を越える沈下が発生しており（図 6～図 8）、1978 年と 2011 年の 2 度の地震直後には、沈下が急増している。この地震による急激な沈下は地殻変動によるものと考えられるが、その後の沈下速度が地震前と比べて大きくなっていることが注目されている⁹⁾。

(3) 地盤沈下への対応例

塩竈市新浜地区においては、水産加工場建設に当たり基礎杭によって支えられる設計となっていたが、リアス式海岸では基盤岩深度の不陸が大きく、打ち止め位置の確認が困難であった。また、埋立地ゆえに岩塊等が不規則に混入している恐れもあり、杭による支持層への支持

図 20 昭和 49 年からの宮城県内の地盤沈下量⁶⁾ 図 21 壁状基礎工法による建物基礎の構築例⁶⁾

を確保することが難しいと判断された。そこで、杭基礎に代わる地震動にも強い基礎工法の選定を実施した結果、強度のばらつきが少ない地盤改良工法を用いた壁状基礎構造とすることとした。図 21 は実施した壁状基礎工法の概要図である。

なお、諏訪地域で古くから採用されてきた代表的沈下対策工法として、松丸太をいかだ状に組んだ浮基礎工法の「いかだ工法」や「杭打ち工法」が挙げられる。昭和 3 年(1928 年)に建設された鉄筋コンクリート 2 階建ての“片倉館”の基礎には、長さ 5.5m の松丸太が合計 2600 本打ち込まれている。昭和 19 年に震度 6 を観測して諏訪盆地の住居や建造物に甚大な被害を与えた東南海地震にも、片倉館は耐えることができた⁷⁾。

また、諏訪市では「特定軟弱地盤対策住宅建設事業補助金交付要綱」に基づき、指定された基礎対策工法（ベタ基礎、杭打基礎（木杭等の摩擦杭、既製コンクリート杭等の支持杭）、小口径鋼管による柱状改良、セメント系固着材による柱状改良、表層地盤改良、コマ型ブロック、表層置換（いかだ工法含む））が施された場合に住宅建設基準に適合したとして補助金が交付されている。

有明粘土が厚く堆積する地域では、支持杭や着底型の地盤改良では工費が高い上に杭の抜け上がりや不同沈下、境界での不陸の発生などの問題が生じるため、非着底型の深層改良工法も開発され、実際に有明海沿岸道路の建設に採用されている⁸⁾。

4 おわりに

未改良の埋立地や低平地の地盤沈下対策は、既存の構

造物などが周辺に存在することなどから、その地域の沈下の特徴を反映して策定されなければならない。地盤沈下への対応は、地盤改良工法が欠かせないものである。最後に、地盤改良工法による地盤沈下対策の基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 地盤沈下を根本的に止める。
- ② 地盤沈下範囲を限定する。
- ③ 地盤沈下を許容し構造物側で対応する。
- ④ 地盤沈下を緩和する。

地盤沈下が発生している埋立地や低平地の利用形態を考慮した上で、種々の工法から選定または組み合わせて対応することが望ましいと考える。

最後に、次回からの内容について概説する。

第 2 回では「地盤沈下のメカニズム」として、土の構造と圧密現象について、室内試験の結果をもとに考察する。第 3 回は、「地盤沈下と地域地盤特性」として、詳細な地盤調査がもたらすもの、地域地盤が持つ個性を解説する。第 4 回では「代表的な地盤沈下対策方法」として、代表的な地盤沈下対策工法の 20 年間の進化（あゆみ）を紹介し解説する。そして最後の第 5 回では「地盤沈下対策の新たなトレンド」として、地盤沈下調査手法、未改良地盤への対策、期待される技術について解説し総括を行う。

参考文献

- 1) H. Imanishi and M. Sugiyama, “Transition of ground improvement technologies in Japan, III: Subsidence measures of unimproved ground in the urban area”, JSMC, Vol. 65, No.10, pp.752-757(2016).
- 2) Ministry of the Environment, Water and air quality stations, Ground subsidence area overview in Japan, pp17-19 (2016).
- 3) Sendai City Environmental Bureau, Environment of Sendai City, Performance Report 2014, pp37-42 (2015).
- 4) Miyagi Prefecture Living and Environment section, Pollution materials (ground subsidence ed.) pp21-24 (2016).
- 5) H. Hayashi and S. Nishimoto, “Advanced analytical for long-term settlement of peaty ground”, Monthly report, Civil Engineering Research Institute for Cold Region, No.666, pp.11-19 (2008).
- 6) H. Imanishi, Y. Tsukidate and I. Kanazawa, “Ground subsidence properties of Shiogama clay and a proposal of countermeasure method for the subsidence”, Proc. of the 11th National Symposium on Ground Improvement, pp.91-96 (2014).
- 7) Ministry of the Environment, http://www.env.go.jp/water/jiban/directory/20nagano/suwa/h18_nagano1.html, (Accessed 9 April 2016).
- 8) T. Turu, K. Komanobe and K. Ryoukai, “Approach on soft ground measure of Ariake sea road ~Plan of the technology standard and utilization of the construction management~, Civil Engineering Journal, PWRC, Vol.52, No.10, pp.56-59 (2010).