

塩釜市新浜地区の地盤沈下と

その対策に関する研究

Study on measurement for subsidence of Shinhama in Shiogama City

月館 優太 (Yuta Tsukidate)

Abstract

Fish processing factories in Shiogama City is located in Shinhama area. The ground in this area is consist of the landfill on the very soft marine clay. Therefore, Land subsidence has been occurred by outer forces, and earthquake is one of outer forces. This paper shows the subsidence mechanism and the measure method by using the database of geo-information and the ALOS and also by introducing the monitoring system, the overall system safety is assured.

1.はじめに

塩釜市新浜地区は、40年以上前に軟弱な粘土地盤が厚く堆積する湾の入江を未改良のまま埋め立てて造成された土地である。それゆえ、すでに工場などが立地している当該地区では、長期にわたって地盤沈下が進行しており、巨大地震が発生する度に地殻変動による地盤沈下が発生し、地震後の沈下速度が増加することも記録されている。このような場所に構造物を建設する場合には、基礎杭によるのが一般的であるが、リアス式海岸では基盤岩の不陸が大きく、埋立地ゆえに岩塊等が不規則に混入している恐れもある。

本研究は、当該地区に新設する水産加工工場を対象として、杭基礎に代わる壁状基礎工法の適用を試みたものであり、地盤情報のデータベース化、土質特性の把握、新しい施工方法とその維持管理方法の適用により、一連の基礎構造のシステムとしての性能を高めたものである。

2.対象地区の地盤性状

塩釜市新浜地区は、海岸や湾入部を埋め立てた低地あるいは丘陵部を造成した人工地盤の多い地域である。地盤構造は新第三紀中新世松島湾層群網尻層が基盤岩となっており、その上を粘性土が最大厚さ20mで覆い、表層部は埋立土および盛土が分布する。図-1は、塩釜粘土の土性図である。粘土層は自然含水比が150%を超えるものが多く、土粒子の密度は 2.5g/cm^3 、土の湿潤密度が 1.25g/cm^3 とやや小さいことと、目視により有機物が多く含有していることがわかる。

図-2は地盤データベース(DIG)を利用した、塩釜粘土の粒径加積曲線である。ほとんどが細粒分によって構成されており、細粒土層には砂や礫といった粗粒土が含まれていない。図-3は新浜地区すべての地盤調査で得られた含水比・液性限界・塑性指数の深度分布図である。含水比は最大180%と非常に高く、液性限界も200%を超えるものもあり、塑性指数も最大150%近くとなっている。仙台港の粘土と比較すると、含水比は1.5倍以上あり、塩釜粘土は非常に鋭敏であることがうかがえる。これは地震などの外力によって、容易に流動化し圧密沈下が進行することを示す。

図-4 は塩釜粘土の圧縮曲線である。初期間隙比 e_0 が 4 の粘土は圧縮指数 C_c がほぼ 2 であり、圧縮性が非常に高い。

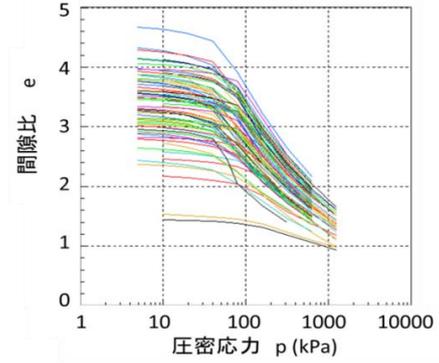


図-4 塩釜粘土の圧縮曲線

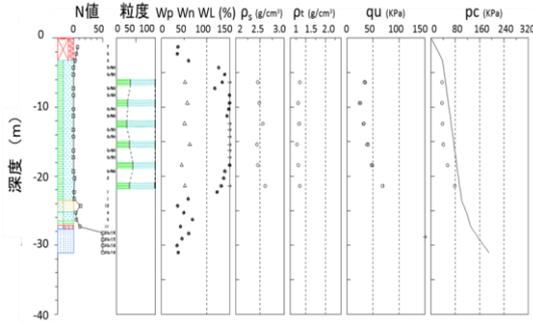


図-1 塩釜粘土の土性図

3. 衛星を利用した地盤沈下分布の把握

塩釜市新浜地区の平面的な地盤沈下分布を観測するため、ALOS (Advanced Land Observing Satellite) の SAR (Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ) データを干渉させた InSAR 解析を行った。干渉できる衛星データを抽出し、2006 年 12 月 25 日より 2011 年 4 月 7 日までの 6 つのシーンを解析した結果、時間の経過とともに地盤沈下が進行している状況が確認できた。その一例として、図-5 に 2010 年 11 月 20 日と 2011 年 4 月 7 日の干渉分析結果を示す。地盤沈下の定量的な評価は、地殻の水平変位も考慮して検討する必要がある、引き続き分析を行う予定である。

今回は、InSAR 解析により対象地域全体の地盤沈下の変動を 20m メッシュで捉えることができ、地盤沈下の現状を広域的に把握できた点を報告する。

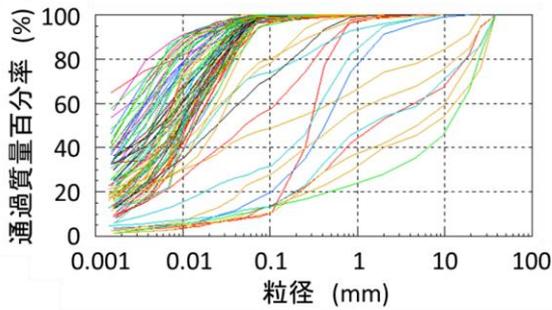


図-2 塩釜粘土の粒径加積曲線

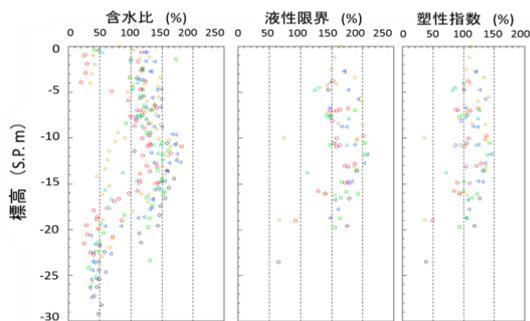


図-3 塩釜粘土のコンシステンシー深度分布

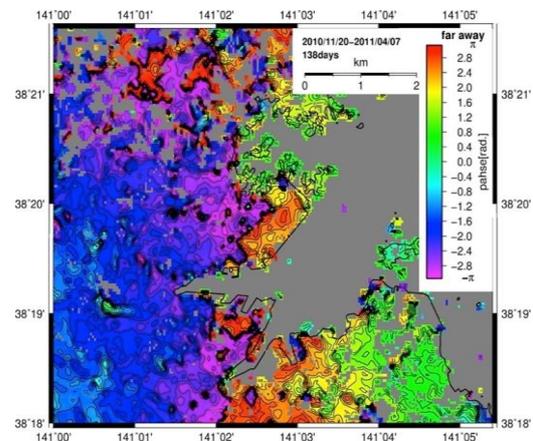


図-5 InSAR 解析による地盤変状の把握

4. 塩釜粘土の圧密特性

粘土地盤は未改良で埋め立てを行った場合、20年～30年経過すると、上載荷重に見合った沈下量で沈下が収束する。しかし、塩釜市新浜地区では図-6に示すように地震の度に沈下が加速していることがわかる。また、図-7に示す仙台市の観測資料によると、東北地方太平洋沖地震後には地盤沈下の速度が大きくなっていることが観測されている。

そこで、新浜町三丁目地内で行われた調査ボーリングで、シンウォールにより採取された試料を用いて圧密試験を実施した。

図-8と図-9は、調査ボーリング位置が同じで深度が異なる2つの試料の圧縮曲線である。なお、圧密試験には不攪乱試料とその骨格構造を人為的に乱した攪乱試料を用いている。図-8は図-9より深度の浅い粘土の圧縮曲線で、不攪乱と攪乱の両曲線の間隙比の差は間隙比の大きいところで認められる。しかし、深度の深い粘土は両曲線の間隙比に大きな差がないことがわかる。ここで、図に示すように不攪乱試料と攪乱試料の同一上載荷重での間隙比の差が、簡易的ではあるがこの地盤の地震時の最大沈下量（沈下ポテンシャル）を示している。間隙の大きい粘土層上部は、地震などの外力を受けると骨格構造が破壊され、一時的に未圧密状態となり土被り圧によって沈下が進行するものと考えられる。一方、粘土層下部では、外力を受けても骨格構造がすでに安定していること示すものと考えられる。このことから、塩釜粘土は深度が深くなるにつれて、鋭敏性が小さくなっている可能性がうかがえる。

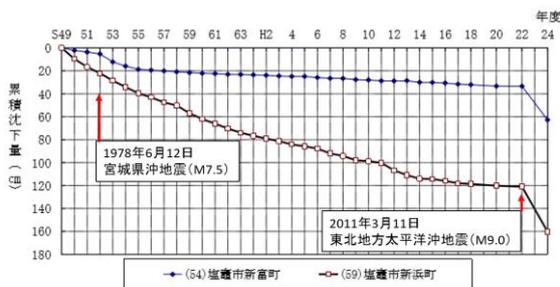


図-6 塩釜市内の地盤沈下量¹⁾に加筆

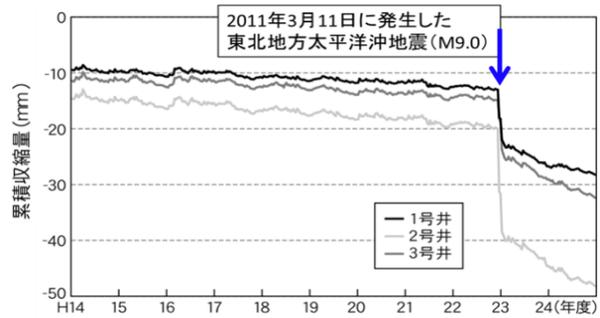


図-7 仙台市における地震前後の地盤沈下速度の変化²⁾に加筆

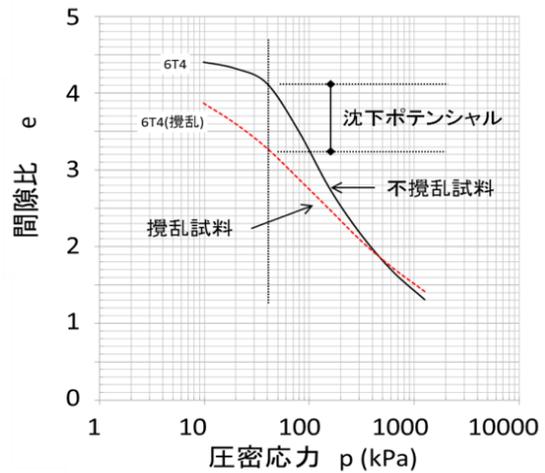


図-8 地震時沈下ポテンシャル（上部粘土）

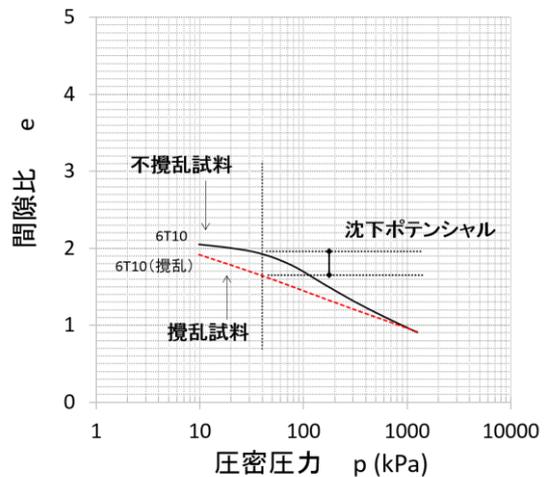


図-9 地震時沈下ポテンシャル（下部粘土）

次に、土の骨格構造を考えるにあたって、塑性限界 W_p が重要な指標になると考え、不攪乱・攪乱試料の圧縮曲線と塑性限界の関係について考察を行った。考察を行う上で、不攪乱試料の正規圧密領域の直線と攪乱試料の直線を A 点とし、それに対応する間隙比を e' として、図-10 のように圧縮曲線をモデル化した。この e' と、塑性限界における間隙比 e_p の関係を図-11 に示す。これより、 $e' = (1.0 \sim 2.0) \cdot e_p$ の相関関係にあることが認められたものの、今後のデータ集積が必要である。

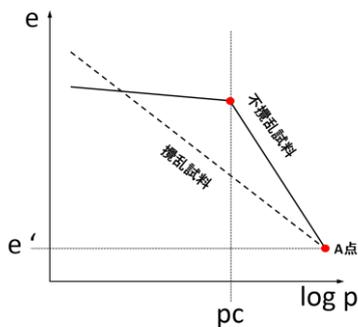


図-10 圧縮曲線のモデル図

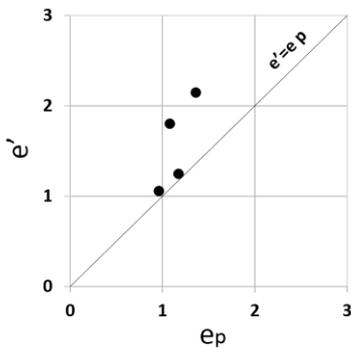


図-11 e' と e_p の関係図

5. 壁状基礎工法

5.1 壁状基礎の設計と施工

塩釜市新浜地区に工場を建設するにあたり、当初は基礎杭によって支えられる設計であった。しかし、リアス式海岸では基盤岩深度の不陸が大きく、杭の打ち止め位置の確認が困難であり、埋立地ゆえに岩塊等が不規則に混入している恐れもあるため、杭による支持層への支持を確保することが難しいと判断された。さらに、コンクリート杭や鋼管杭では、水平地震力による杭の座屈や破壊が生じる恐れもある。(写真-1 参照)

そこで、当該地区には壁状基礎を採用した。壁状基礎の構成は、上部を壁状にすることで地震時の剛性を確保し、基礎先端部を基盤岩に着底させることで不等沈下を抑制する構造となっている。また、地盤改良は工期・経済性および地震時の変位を考慮して櫛状案を選定した。図-12 に今回採用した壁状基礎の構成図を、表-1 に壁状基礎の構成案の比較表を示す。

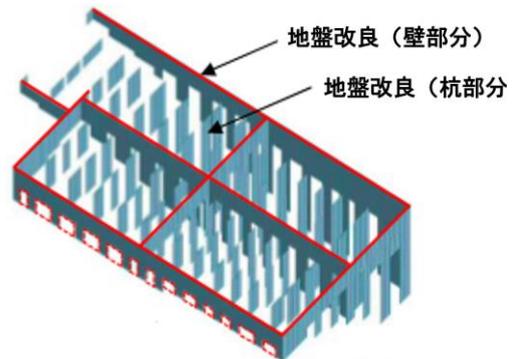
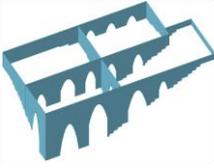


図-12 壁状基礎の構成



写真-1 地震による杭頭部の被害

表-1 地震時変形性能を考慮したアーチ案および櫛状案

CASE	杭	①アーチ案	②櫛状案
モデル図			
変位(mm)	10程度	3.0程度	6.5程度
工期	3ヶ月 (制圧まで)	6週間	5週間
積卸地盤への適用性		○	○

また、施工には高品質な地盤改良工法が適切であると判断した。壁状基礎として施工する地盤改良工法は、深層を対象とした水平混合攪拌方式の CDM 工法 (Cement Deep Mixing method)、DJM 工法 (Dry Jet Mixing method)、テノコラム工法などと、垂直攪拌混合方式の TRD 工法 (Trench cutting Re-mixing Deep wall method)、CCC 工法 (Chain Conveyor Cutter method)、パワーブレンダー工法などが対象となる。今回は構造物の基礎として採用するため、品質のばらつきが少ない工法を選定する必要がある。水平混合攪拌方式は攪拌羽根を水平に回転させ改良材と混合する方式のため、軟弱な粘土層を挟む変化の大きな地盤では、堆積土の性質に改良体の強度が左右される。しかし、垂直攪拌混合方式であれば、チェーンソーのように深度方向を一体として改良できるため、当該地区に適すと判断した。また、TRD 工法では横引きでの施工となるため、岩塊や支持地盤の強度などを考慮すると工期が延びる可能性が指摘された。それゆえ、最終的に 20m を超える深度まで施工可能な CCC 工法を採用した。

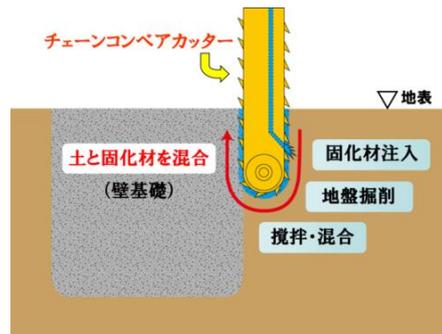


図-13 CCC 工法

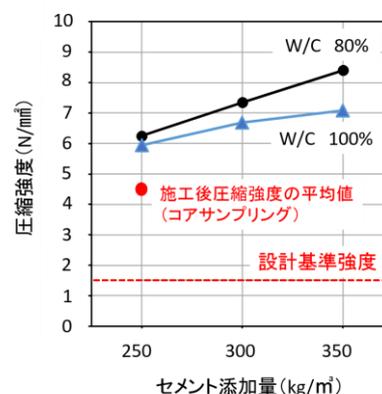


図-14 室内配合試験の圧縮試験結果

5.2 改良体の力学特性の確認

施工に先立って、室内配合試験を行った結果が図-14 である。CCC 工法は垂直攪拌混合方式であるため、土層毎の土質のサンプリングと層厚の割合を考慮した試料を用意して、これにセメントを添加し供試体を作製した。

試験結果から、W/C を 100%、セメント添加量を 250kg/m³ とした。

また、施工後に 3カ所でボーリングを行い、それぞれ上部・中部・下部より供試体を採取して、圧縮試験を実施した。表-2 に圧縮試験結果を、図-15 に配合試験用供試体の粒度分布を示す。改良体の圧縮強度の平均は 4.48N/mm² で、深度方向にもばらつきが少なく、一様に攪拌・混合されたことがわかった。

表-2 改良体の圧縮試験結果

深さ	設計基準強度	供試体圧縮強度 (N/mm²)			平均圧縮強度	全体平均	標準偏差
		No.1	No.2	No.3			
上部	1.5	4.99	5.07	5.34	5.13	4.48	0.74
中部		2.96	4.59	4.48	4.01		
下部		3.51	4.33	5.05	4.30		

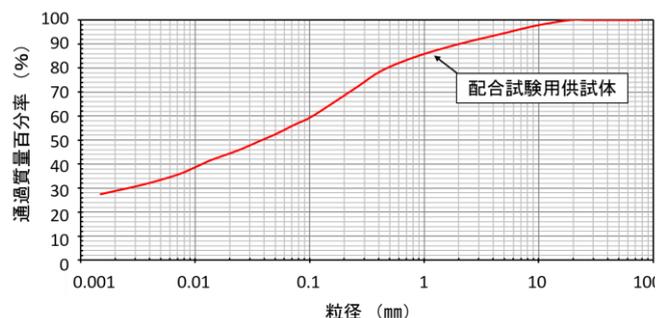


図-15 配合試験用供試体の粒度分布

6.維持管理方法

壁状基礎工法の有効性の検証や、新浜地区の地震動評価のための基礎データ構築のため、地震計（加速度センサー）と GPS（Leica 社製）を設置し、地盤振動観測および変位観測によるモニタリングシステムを導入した。

図-16 に各センサーの設置場所とシステム概要図を示す。

システムの設置後、福島県沖で地震が発生したので、その時の地震動記録を図-17 に示す。

地表 2 および GPS2 を設置している地点は最も基盤が深くなっている。加速度の最大値で比較すると地表 2 では基盤のおよそ 2 倍の加速度が記録された。一方、GPS 記録では地震前後で短期間の大きな値の変化は見られなかった。なお、現在はデータの蓄積を重ねている段階のため、今後は GPS データの長期変動の解析ともあわせて検証を重ねていきたい。

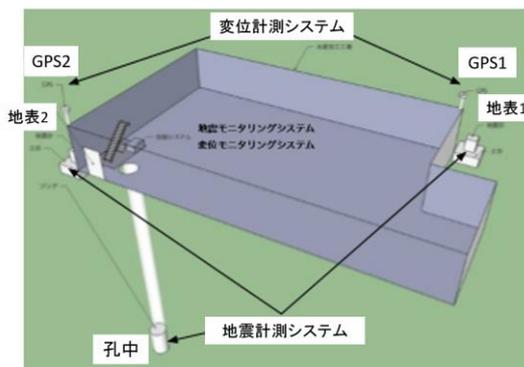


図-16 システム概要図

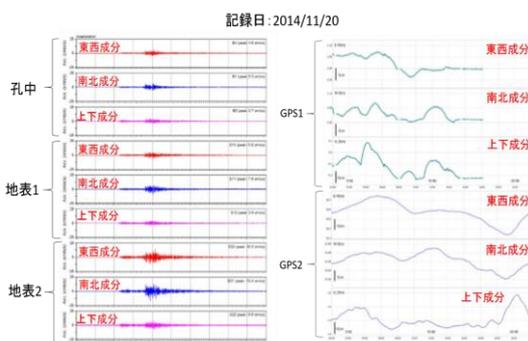


図-17 地震の加速度記録（左）と GPS 記録（右）

7.おわりに

塩釜粘土は高含水比、高液性限界で、鋭敏な粘土の性質を示すことが確認できた。また、InSAR 解析により 20m メッシュで新浜地区全体の地盤沈下の変動を捉えることができた。さらに、このような場所に構造物を建設する場合、土層構成や圧密特性を把握する必要がある。今回は、地盤改良工法を用いた壁状基礎工法を提案し施工を行った。その結果、壁状基礎は基礎剛性が高く、地震時の変位を小さく抑えられる。CCC 工法は地中障害に対する掘削能力が高く、施工性も良い。また、深度方向の品質も均一で信頼性が高いという特徴が得られた。

また、経済性に優れている本工法は、横浜市のマンションにおいて、杭が基盤岩に到達していないことによる不等沈下問題に対処することができる。

最後に、本研究にあたって、現地の情報を提供下さった塩釜市建設部下水道課、塩釜市団地水産加工業協同組合の佐々木栄一氏、地盤情報の整理にご協力いただいた地域地盤環境研究所の北田奈緒子氏と井上直人氏、設計・施工にご協力いただいた NTT ファシリテーターズの齋藤賢二郎氏と柏井康彦氏ならびにランドクリエイティブの生田静夫氏と増田好重氏に心より謝意を表す。

参考文献

- 1) http://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/30386_1.pdf、2015.4
- 2) https://www.city.sendai.jp/kankyou/kikaku/sendai-shi-no-kankyou/H24/10_H24-h-00.pdf、2014.6
- 3) 今西・月館：塩釜粘土を対象とした不攪乱・攪乱試料の圧縮曲線に関する一考察、第 50 回地盤工学研究発表会、2015.9
- 4) 今西・月館・金澤：塩釜粘土の地盤沈下特性と地盤沈下対策方法の一提案、第 11 回地盤改良シンポジウム論文集、pp.91~96、2014.11
- 5) 柏井・齋藤・佐藤・宮崎・吉海・金澤・今西：軟弱粘性土地盤における壁状基礎の適用事例、2014 年度日本建築学会大会(近畿)学術講演会・建築デザイン発表会、2014
- 6) 井上・北田・金澤・今西：塩釜水産加工場における GPS・地震計によるモニタリング、第 50 回地盤工学研究発表会、2015.9