

デジタル化された地盤情報に基づく 埋立造成粘性土地盤の広域不同沈下 評価

三村 衛*・折井 友香**・近藤 隆義***

Assessment of Large and Differential Settlement of the Reclaimed Clayey Foundations Based on the Digital Surface and Underground Information

Mamoru MIMURA*, Yuka ORII** and Takayoshi KONDO***

Abstract

The geoinformatic database of Oaki Town, Toba City was developed by digitizing the written information of boring logs and 3-dimensional underground model has been developed based on the newly developed geoinformatic database. A serious uneven profile of bed rock overlain by the very soft clayey deposits is expected there. A new surveying procedure, called Mobile Mapping System; MMS, is introduced to monitor the 3-dimensional digital geographical data such as sets of latitude, longitude and elevation of each point of the target area. The monitoring data set provides a detailed distribution of settlement of Oaki Town. Based on this underground model, a series of finite element analyses was conducted to describe the actual differential settlement for the past 40 years. The calculated performance is validated by comparing with the present elevation of the original clay deposits checked by the newly conducted boring as well as the digital information through MMS. The newly developed system is found to be versatile and promising to support local governments to establish a policy for disaster mitigation.

キーワード：地盤情報データベース，地下構造モデル，有限要素法，地盤沈下，地盤被害

Key words: Geoinformatic database, Subsoil structure model, Finite element method, Settlement, Geo-disaster

* 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
** パナソニック（株）（元京都大学工学部学生）
Panasonic Co. (Former Student, Dept. of Civil Engineering,
Kyoto University)

***（財）地域地盤環境研究所
Geo-Research Institute

本論文に対する討論は平成23年2月末日まで受け付ける。

1. はじめに

地盤情報とは、広義にはボーリング調査をはじめ、地形・地質、地下水、地球物理学などの種々の地盤調査情報と、地中構造物や地盤造成履歴、地盤挙動計測等の各種情報も含む地盤に関するデータの総称であるが、一般的には、ボーリングデータを主とする地盤調査情報を指すことが多い。ボーリングデータはごく一部に研究目的で得られたものはあるものの、ほとんどは建設プロジェクトに関わる調査目的で行われたものであり、高度経済成長期以降だけでも日本国内で膨大な数の蓄積がある¹⁾。こうした膨大な既存の地盤情報を一元的に集積し、新たな建設活動や学術研究、防災検討などに再利用する技術が「地盤情報データベース」である。関西地域において20年以上の歳月をかけて行ってきた、地盤研究を機軸とする地盤情報データベースの構築と整備に倣うかのように、近年、情報技術テクノロジーの急速な進歩に呼応して各地域においても地盤情報データベースの構築、活用を一体的に推進する動きが活発化している。このように、地域の活動が活発化した背景には、地盤情報データベースの有用性と資産としての価値の認知度の高まりが考えられる。特に、1995年兵庫県南部地震を契機に地震防災検討における地盤情報の重要性が再認識され、地域を網羅した地盤情報が必要とされたことで、各機関が所有する地盤調査情報をデータベース化することの意義が広く認識されるようになってきたためと考えられる。

地盤防災や地域開発にあたっては、まず当該地域の地下構造を正確に把握することが基本となる。何故なら、地盤の変形や破壊問題は非弾性的な初期値・境界値問題であり、初期状態としての地盤の成層構造を知ることが合理的な解を得るための必須条件となるからである。近年、都市部を中心としてボーリング情報を集積した先進的な地盤情報データベースが各地で構築されてきており^{2,3)}、基盤構造を始め、表層の軟弱地盤に着目した電子地盤図など次世代の地盤情報を見据えた取り組みも進められつつある⁴⁾。こうした取り組みは有効に活用すればきめ細かい防災対策や教育用のひな型

として大いに地域社会に貢献しうるものとなる。しかしながら、地方の中小自治体などでは、建設工事に伴うボーリングデータを報告書など紙媒体では保管しているものの、こうしたアナログ情報をデジタル化し、さらにデータベースに仕上げるために必要となる予算や専門的知識を持った人的資源に恵まれないという理由によって死蔵状態に置かれている例が少なくない。また、情報のデジタル化がもたらすメリットについての理解が十分ではないために、容易に事業化できないのも事実である。したがって、地盤情報データベースに関わる専門技術者は、啓発行動の一環として、地盤情報データベースの有用性と、地域開発や地域防災に対していかに有効に機能するのかについて積極的に提示していく必要がある。

本論文では、1970年代に干拓地を埋め立てて造成して開発された鳥羽市^{おあき}大明地区に注目し、関係各位の協力を得て紙媒体で保管されていた既存のボーリング柱状図を集積し、デジタル化することによって同地区のローカルな地盤情報データベースを構築した事例を紹介する。鳥羽市を流下する加茂川河口部の湾曲部において、不規則に変化する基盤上に軟弱粘性土が厚く堆積する同地区では、埋立造成によって大規模長期不同沈下が生じており、公共施設や民家に深刻な被害を及ぼしている。本稿では、構築した地盤情報データベースを用いて大明地区の三次元基盤構造モデルを作成し、一連の地盤情報や新たに導入した先進的な地表面測量情報に基づいて、同地区における地盤沈下の実態を定量的に評価し、さらには数値解析に基づく沈下予測を通して、地域防災への適用というところまでの一連のプロセスを示す。これにより、地盤情報データベースの実践的な適用の雛形を提示したい。

2. 三重県鳥羽市大明地区

2.1 大明地区の干拓と造成の概要

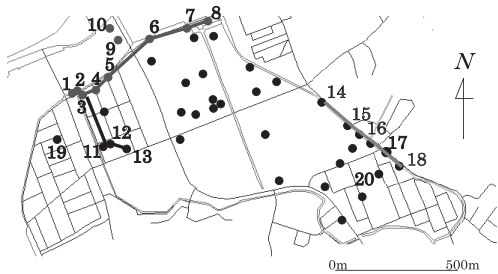
本研究で対象とする地域は、三重県志摩半島北東部に位置する鳥羽市大明地区干拓地である。当地は、鳥羽市街地より南方に発達する標高100m～300m前後の丘陵地、安楽島^{あらしま}の入江部、及び加茂



図2 地盤沈下による被害の一例（杭で支持された構造物と沈下によって標高の下がった道路）

2.2 鳥羽市大明地区の地盤情報データベースの構築

鳥羽市役所の協力によって、2.1で概説した一連の埋立造成工事やインフラ施設の建設に伴う地盤調査によって得られた地盤のデータとして、公的整備事業を中心に紙媒体で合計42本のボーリングを集積した。集積した紙媒体のアナログ地盤データを、山本ら⁷⁾によって開発されたデータベース作成コードであるDIG (Database for Information of Ground) を適用することによってデジタル化し、鳥羽市地盤情報データベースを構築した。鳥羽市大明地区とボーリング位置を図3に示す。大明地区の特徴的な地盤構造を見るため、作成した地盤情報データベースによっていくつか特徴的な地層断面を紹介する。まず、図3においてボーリング



測線 A : No. 1-2-3-4-5-6-7-8 & 9, 10
 測線 B : No. 3-11-12-13
 測線 C : No. 14-15-16-17-18

図3 鳥羽市大明地区の平面図とボーリング位置

No. 1～8 にかけての加茂川右岸護岸に沿った測線 A の断面を図4に示す。同図より、平均的な岩盤標高は-35m～-40m とかなり深く、その上に軟弱な粘性土層が厚く堆積している。ところが、No. 6, 7 の2本は-12m 程度にまで急激に岩盤標高が高くなっている。直近の安楽島大橋橋脚部分で実施されたボーリング No. 9, 10 の岩盤標高もやはり-11～-12m となっており⁸⁾、このあたりに基盤の高まりが存在していることが予察され

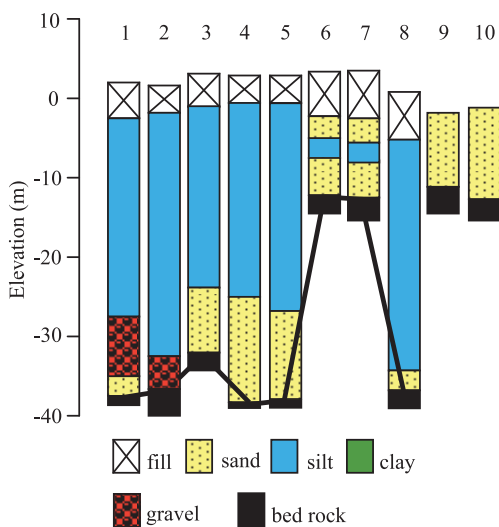


図4 測線 A に沿ったボーリングによる断面表示

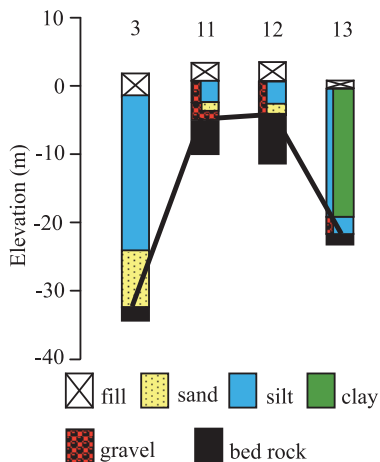


図5 測線 B に沿ったボーリングによる断面表示

る。次に、河川堤防直近のボーリング No. 3 から南側内陸に向かう測線 B に沿った地層断面を 図 5 に示す。選択したボーリング No. 3, 11, 12, 13 による断面では、No. 11, 12 の 2 本で岩盤が非常に浅い位置で出現しているのがわかる。No. 12 と 13 は同一施設の敷地の対角に約 50m 弱の距離で位置するボーリングであるが、基盤岩の出現標高の差が 15m 以上となっている。この地区の大きな基盤構造としては、河川から南側の山地に向けて岩盤層が緩やかに高まっていく構造を有しているが、図 5 に示すように、No. 11, 12 のあたりには局所的な基盤の隆起域が存在し、明瞭な凸構造を有していると考えられる。ただし、より正確な構造を知るためには、追加ボーリングや物理探査の援用などによって地下情報を補強しなければならない。埋立地の東端の道路に沿った測線 C の地層断面を 図 6 に示す。この道路は旧海陸境界で埋立地の端部に相当する。元々陸地であったということで、地表面近傍に岩盤が現れている。ただし No. 16 だけは 10m を越える厚さの軟弱粘性土層が標高 -13.5m 付近で現れる岩盤上に堆積している。現地踏査を行った結果、No. 16 地点では道路の直角方向東側の山地から小河川が流下して明らかな谷地形となっており、この急激な岩盤標高の変動は地形によるものであることが確認されている^{9,10)}。

このように、集積した紙媒体で保管されていたボーリングデータを電子化し、当該地域の地盤情

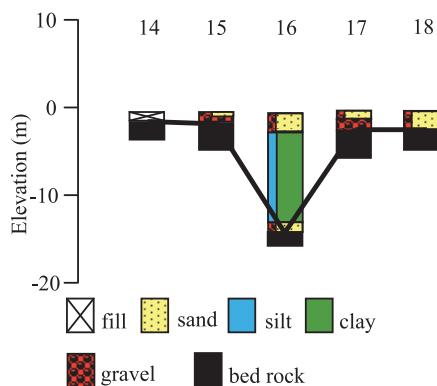


図 6 測線 C に沿ったボーリングによる断面表示

報データベースを構築したことにより、鳥羽市大明地区の基盤が河川側から山側に向かって緩やかに標高を上げていく大きな構造を持ちながら、それとは独立に短い距離の間に標高値が激しく変動する複雑な構造を有していること、および場所によって軟弱粘性土層厚に大きな変化があり、沈下性状にも大きく影響を及ぼす可能性があることが確認できた。

2.3 地盤情報データベースを用いた鳥羽市大明地区の三次元基盤構造

前節で説明した鳥羽市大明地区の地盤情報データベースには、ボーリングの位置座標と基盤岩の出現標高が入力されている。これらの情報に基づき、基盤岩の三次元的な形状を作成した。三次元データの作成にあたり、Golden Software 社製・Surfer8 というソフトを使用した。図 3 から明らかなように、対象地域全面にわたって十分な数のボーリングが均等に存在しているわけではない。このため、データの欠損箇所については補間を行う必要がある。本稿では、補間方法として線形バリオグラムによる Kriging 法を用いている。作成した基盤岩構造の三次元モデルを 図 7 に示す。大明地区については地盤情報データベースをそのまま適用し、図の北東および北西に位置する旧陸上部分については、別途実測した標高（3 章に後述）を読み込んで現地地形を再現している。概略的には、丘陵地となる南側、北東側、北西側に

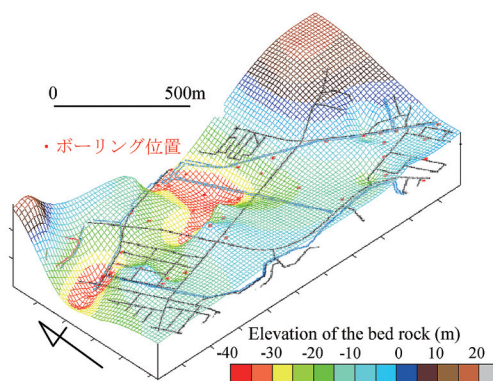


図 7 地盤情報データベースに基づいて作成した三次元基盤構造図

向かって岩盤標高は上昇し、干拓以前は海であった中央部で基盤岩出現深度が深くなる（粘性土層厚が大きくなる）傾向が見られる。その一方で、大きな起伏が散在しており、複雑な基盤構造を有していることがわかる。加茂川右岸の堤防に近接する大明西町と、安楽島大橋東側で岩盤標高が -40m に達し、粘性土層厚が大きくなっていることがわかる。

3. 移動体三次元形状計測システムによる地表面標高測定

鳥羽市大明地区では、複雑で不均質な基盤の上に、厚いところでは層厚 40m に達する軟弱粘性土が堆積している地盤を干拓、埋立によって造成したために、長期間にわたって大規模な不等沈下が発生し、住宅や公共施設に被害を及ぼしている。この地盤変状被害の原因や将来予測、また修復や対策についての議論を行う場合にも、現状を正確に把握する必要がある。本章では、近年開発された、高精度 GPS 移動計測装置（モバイルマッピングシステム（MMS））という移動体三次元形状計測車両による計測手法¹¹⁾を適用して、対象地区全域の位置座標と標高値を測量し、現在の大明地区各地点の標高値をデジタル情報でデータベースに取り込むことにした。

3.1 システムの概要と計測およびデータ処理

モバイルマッピングシステム（MMS）は、移動体三次元形状計測車両による計測手法¹¹⁾であり、走行する道路周辺地物の形状を詳細に捉えて正確な位置座標を測定するだけでなく、画像と組み合わせた高精度な三次元地図も合わせて作ることが出来るものである。実際に計測を行った車両を図8に示す。この車両には、三台のGPSアンテナ、精密ジャイロ（慣性航法装置:IMU）、二台のカメラ、二台のレーザースキャナを一体化したユニットが車両天板上に装備されている。外部車両天板にトリアングルに配置された三台のGPSが1秒毎に精度 $2\sim 3\text{cm}$ で測位計算を行い、搭載したジャイロを複合計算させることにより、より精密な測位と姿勢制御が可能となる。具体的に



図8 MMSを搭載した移動体三次元形状計測車両（三菱電機（株）西川啓一氏提供）

は、正確な時刻同期と姿勢からレーザースキャナの照射点の位置を算出し、カメラ映像とレーザースキャナを重畳表示することで対象地物を判別する。カメラは正面前方と正面路面をそれぞれ捉え、レーザースキャナは二台で前方全周囲を捕捉するように設置されている。計測時には、このようにして得られたGPS、IMU、車速度、画像、レーザースキャナというそれぞれのデータを内部の機器で蓄積し、測量終了後に一括して処理をするという流れになっている。後処理には測位処理、三次元化処理、座標変換処理などが含まれ、最終的にはすべての情報を三次元点群データとして出力する。これをカメラで得られた画像に投影し、CAD化して用いることも可能である。なお、計測に用いたレーザースキャナはclass 1のものであり、人体には全く影響を及ぼさない。

本研究では、2008年12月に、鳥羽市大明西町・東町を測量対象とし、車両が通行出来る道路や路地などほぼ全てを走行し計測を行った。まず安楽島小学校に設置されている四等三角点においてGPSの位置確認作業を行い、タイヤの回転、ジャイロ、GPSの整合（キャリブレーション）を行った。GPSの補正についてはFKP方式を採用した。対象地区の外周道路を走行後、大明東町の住宅街から、西町、公共施設へと測量作業を進めた。公園やグラウンドなどでは道路があっても車両が走行できない場合が多いので、駐車場など進入可能などところまでの計測を行った。対象地域のレーザースキャナ測量を約2時間半で完了し、鳥羽市大明地区全域にわたって三次元デジタルデータを収録し

た。MMS では計測時間が非常に短くなるため、一般的な GPS で問題となるような鉛直方向の測定精度が水平方向の 1/2 から 1/3 となるといった問題が生じることがなく、ほぼ同じ精度での測定が確保されるという利点がある。

3.2 鳥羽市大明地区の地表面標高図

MMS によって得られた鳥羽市大明地区の測量結果の一例を図 9 に示す。同図は大明町内のある地点の情報を測定結果の一例として切り出したものである。図はあたかも写真のように見えるが、3.1 でも述べたように、レーザーで測定した座標値をカメラで撮影した画像に投影させることによって得られた、画像上にデジタル値を有する点群データとなっている。すなわち、地表部分も、家屋や電柱などの構造物もデータとして収録されたものはすべて x, y 座標と標高の 3 次元情報が約 10cm ピッチのデジタル値で記録されている。本論文では、その中から地表面の三次元データのみを抽出し、対象地区全域の標高図を作成した。MMS による測量結果を用いて作成した鳥羽市大明地区の現在の標高コンターを図 10 に示す。埋立が開始された 1971 年時点に実施された地盤調査結果によれば、当時の干拓地標高は +2.33m でその上に 2.5m の造成盛土を実施したということになっており、埋立造成直後の当地区の平均標高は +4.83m 程度あったと想定される。同図より、地区全体でみると 1.5m ~ 1.7m の標高を有しており、初期状態からおよそ 3 m 程度沈下していることになる。また、安楽島大橋西側、保健福祉センター付近の標高が +1 m を下回っており、標高が最も低くなっている。図 7 の基盤岩出現標高 (粘性土層厚に一致する) と比較すると、標高の低い地点は、層厚 40m に達する最大粘性土層厚地点ではなく、それよりもやや層厚の小さい 20~30m 層厚の地点に該当していることがわかる。MMS 測量実施時点 (2008 年 12 月) でこのような沈下性状を示すメカニズムについては後に考察する。また、大明地区では施設の建設や追加盛土など、実際には埋立造成後の土地改変も行われており、この図が必ずしも正確な地盤沈下量と対

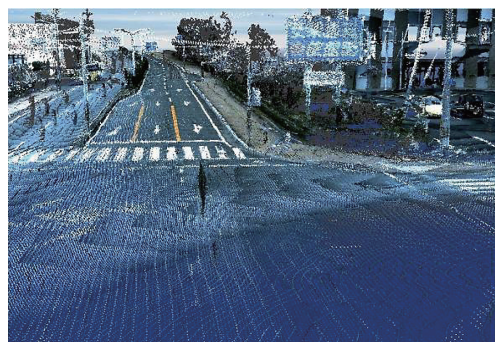


図 9 MMS による測量結果の一例

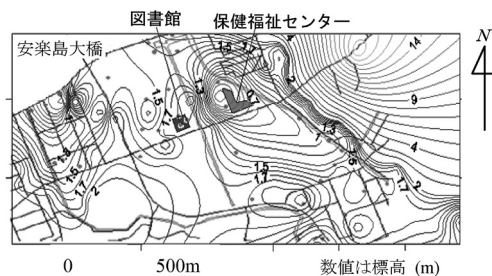


図 10 MMS による測量結果に基づいて作成した 2008 年 12 月現在の地表面標高等高線

応していないことは指摘しておかねばならない。しかし、これら標高の低い場所は津波や高潮に伴う浸水被害の可能性が高く、防災上注意を払うべき地域である。

3.3 鳥羽市大明地区の地上地下統合化データベース

前章で構築したこの地域の地盤情報データベースの全 42 本の柱状図と、地盤情報データベースから得られた基盤岩面に対してそれぞれ位置座標データ、色データを与え、MMS による地上測量データと合成して三次元表示を行った。一例を図 11 に示す。PC 上では MMS による地上の点群データ取得領域を移動しながら地下の地盤情報を合わせて見ることができるようになっており、図 11 はその一断面を切り出して示したものである。三次元表示に際し、ボーリングは円柱として該当箇所に表示し、岩盤標高は深度毎に色付けした点群で表している。このように表示することで、図 4 ~ 6 に示すような地盤断面の

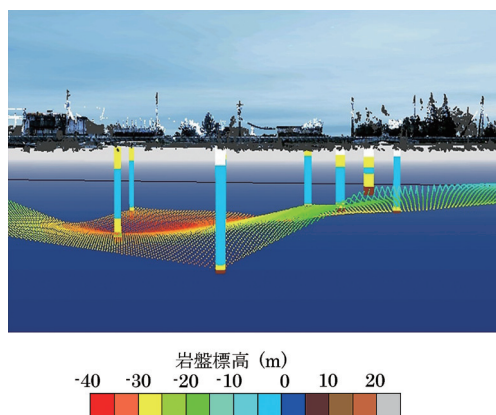


図11 MMSによる地表データと地下構造の統合データモデルの一例

二次元表示に比べてより広域的な地下構造の表示が可能となる。このように、地上の画像と位置座標と標高値を各地点の地下構造と一体化して視覚的に把握することにより、地盤の沈下性状、地震時の震動や増幅特性など災害時の挙動を考える上で非常に有用なものとなる。

4. 弾粘塑性有限要素解析による地盤沈下挙動解析

4.1 解析モデルと地盤モデルの考え方

鳥羽市大明地区は、基盤岩上に直接軟弱粘性土が堆積している地盤であり、変形の対象とするのは単層の粘性土層である。本研究では、変形解析手法として粘性土のダイレイタンスーと時間依存性を同時に表現できる、非定常流動曲面型弾粘塑性構成式^{12,13)}を組み込んだ有限要素法を適用する。数値解析法の詳細は関口ら¹⁴⁾、Sekiguchi et al.¹⁵⁾に詳しい。また、検討目的が大明地区全域の広域沈下問題であること、地盤情報データベースに基づく検討であること、粘性土層内に中間砂層などの排水層が存在しない地盤であることを勘案し、各ボーリングポイントにおける一次元沈下解析を実施する。

本解析で取り扱うような問題では、初期条件の設定が非常に難しい。大明地区は元々干拓という農業関連事業で開発された土地であり、またかなり古い時期のものであることから、地盤の工学的

な情報についてはほとんど期待できない。このため、最もさかのぼれる情報として、1971年に干拓地を埋立造成するにあたって実施された調査ボーリングを基準とした。鳥羽市による干拓事業の記録¹⁶⁾には、1971年から造成が行われる前の干拓地であった状態でおおよそ1 m程度の人工土が粘性土層上部に存在していたことが記載されている。したがって、この1971年造成直前の状態を解析の初期 ($t = 0$) に設定し、解析地盤モデルとして地表面から1 mまでを人工土、その下位から基盤岩が出現するまでを粘性土層とし、層厚1 m毎に要素分割を行って一次元地盤モデルを作成した。解析に用いる土質定数は、地盤情報データベースに使用したボーリングデータに基づき、所定の手順¹⁷⁾にしたがって決定した。力学試験結果がほとんどない状況であったため、圧縮指数 C_c や圧密係数 c_v といった圧密に関わる定数については、唯一現存する図3におけるNo.20のボーリング孔で採取された粘性土試料に対する試験結果を用い、この値を埋立地内の粘性土層に対して位置や深さによらず一定であるとして適用した。設定した土質定数の一覧を表1に示す。土質試験で得られている湿潤密度と土粒子密度、ならびに含水比の値から、完全飽和条件を仮定することによって採取深度における初期応力と初期間隙比の値を設定し、これを基準に深度方向各層ごとに初期応力とそれに対応した初期間隙比の値を設定した。造成に関わる埋立荷重については、対象地区全体にわたって一様に単位体積重量 $\gamma_t = 17.64 \text{ kN/m}^3$

表1 沈下解析に用いた粘土の土質定数

土質パラメータ	設定値
圧縮指数 λ	0.642
膨潤指数 κ	0.230
限界応力比 M	1.2
せん断抵抗角 ϕ'	30°
水中単位体積重量 γ' (kN/m^3)	4.7
二次圧縮指数 α	0.0321
静止土圧係数 K_0	0.533
圧密係数 c_v (m^2/day)	1.18×10^{-2}
埋立土単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	17.64
透水性変化指数 λ_k	0.642

の砂質土を用いて2.5 mの層厚⁶⁾まで一定の載荷速度で1年間をかけて埋立を行ったとする載荷モデルを適用した。

4.2 沈下解析結果と考察

埋立造成開始時点からMMSによる地表面標高測量を実施した2008年12月までの大明地区各地点における沈下～時間関係の解析結果を図12に示す。同図では、粘性土層厚の違いによる沈下性状への影響を評価するために、粘性土層厚ごとに代表ボーリングを決めて比較している。解析結果によると、層厚の薄い粘性土層は圧密進行が早く、早期に沈下が収束するのに対し、粘性土層厚が厚い地点では初期の沈下速度は小さいものの、徐々に沈下量が増大し、大きな沈下を引き起こすことがわかる。興味深いのは、2008年12月時点では粘性土層厚20m以上の地点については沈下量に大きな差異がなく、ほぼ2.5～2.7mの値を示していることである。詳細にみると、この時点での最大沈下は粘性土層厚25mと30mの地点で2.73mとなっており、粘性土層厚40m地点では2.59mとなっていて、現段階では粘性土層厚と沈下量の関係が逆転している。これは粘性土層厚による排水距離の違いが水圧消散速度に影響し、粘性土層厚の大きな地点では圧密速度が非常に遅くなっているためである。そして現段階はまだ圧密途中であり、最大層厚地点では圧密がさほど進行していないために大きな沈下に至っていないと考えればよい。圧密度から予測される大明地区の埋立地盤の全ての粘性土層において一次圧密が終了した段階(2128年:埋立開始から157年後、チェックボーリング実施から120年後)までの沈下～時間関係を図13に示す。一次圧密終了による最終沈下量は層厚の大小に比例しており、層厚40mの粘性土層では4.38mの沈下が生じており、2008年からの120年間に1.78mの沈下が進行することになる。一方、現在埋立地内で最も沈下している層厚25mの地点における一次圧密終了による最終沈下量は3.9mで、2008年からの120年間の沈下量の増分は約1.2mとなる。このように、層厚の大きな粘性土層を有する大明地区の埋立地では、圧密に非

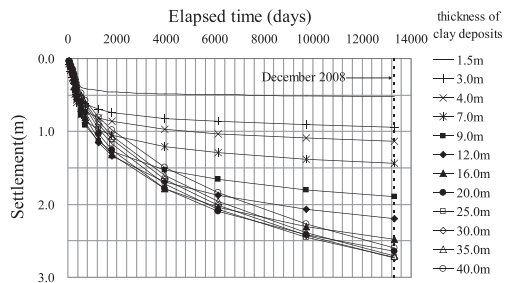


図12 数値解析による埋立開始から2008年12月までの沈下～時間関係と粘土層厚

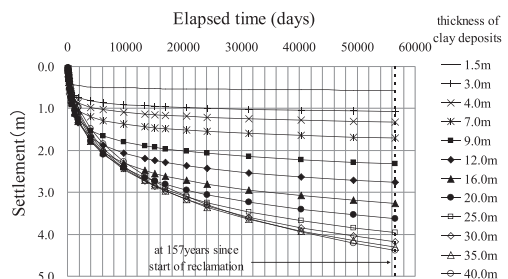


図13 数値解析による沈下～時間関係と粘土層厚(すべての粘土層で一次圧密が終了するまで)

常に長い時間を要するため、今後も長期沈下が継続することがわかる。ただし、2008年12月時点でも粘性土層厚の違いによって沈下量に差異があったように、今後の後続沈下量についても場所によって沈下の発生量が異なる。図13からも明らかなように、これからの沈下は粘性土層厚の大きい地点(図7参照)で大きくなる。

4.3 チェックボーリングによる解析結果の妥当性検証

図3に示す地盤情報データベース構築のために集積した42本のボーリングは測線Bの東側に集中しており、西側には少ないことがわかる。これは、公園や図書館、公民館といった公共施設が測線Bの東側に集中しており、調査ボーリングのデータが公的に管理されているのに対し、西側は主として個人住宅のエリアであるため、個人情報として非公開となっていることによる。データの空白域については補間や外挿による推定を行って

地下構造モデルに反映させなければならぬので、どうしても精度が低下する。本研究では、この問題の克服とともに、埋立地以深の旧海底地盤の沈下量を知るといった目的のために、データ空白域である大明西町においてチェックボーリングを実施した(図3のNo.19)。新規ボーリングに際しては、地域住民の方の自宅裏庭の使用をお許しいただいたことで実現することができた。得られた柱状図を図14に示す。MMSによってボーリング地点の標高が+1.34mであることを確認し、埋立層と思われる砂層と旧海底と思われる粘性土層境界の標高は-1.76mと求められた。また岩着標高は-25.3mとなり、データ空白域であった大明西町の住宅地において貴重な情報を得ることができた。このデータは図7に示した同地区の三次元基盤構造モデルに反映されている。埋立造成が開始された1971年当時、干拓地として放置されていた時点のボーリングデータから当時の旧海底地盤標高は+1.33mであることがわかっているため、今回のボーリングで得られた標高値(-1.76m)と比較することにより、37年間で $1.33 - (-1.76) = 3.09\text{m}$ の変動があったことがわかる。この値は旧海底地盤の埋立造成荷重による37年間の圧密沈下量に相当するので、数値解析によって得られた

沈下量と比較することによって解析結果の妥当性を検証することができる。数値解析によるこの地点の解析沈下量は2.73mとなっており、ボーリングによる実測値3.09mに対して約10%程度の誤差をもって予測されている。鳥羽市による干拓事業の記録¹⁰⁾に基づいて、造成直前の干拓地状態での表土厚は一律1mとし、造成盛土層厚については一律2.5mと仮定しているため、埋立層厚は3.5mであったことになる。ボーリングの結果にもとづいて地表面標高と旧海底地盤標高の差を計算すると、 $1.34 - (-1.76) = 3.10\text{m} < 3.5\text{m}$ となる。検討にあたり、一律に $1\text{m} + 2.5\text{m}$ と埋立層厚を設定したが、場所によって不陸が存在した可能性や、水浸や時間に伴う埋立土層の圧縮の可能性などの不確実性は現時点で補正することはできない。さらに、初期条件や載荷条件の設定精度を考慮すれば、本解析で得られた沈下量の誤差は許容範囲であり、ほぼ現地の状況を表現できていると考えられる。

4.4 地下構造と広域沈下の変遷、および将来予測

4.3において、大明地区に対して実施した弾粘塑性圧密解析結果の妥当性が検証されたことを受け、本節では、一連の解析結果を用いて対象地区全域の地盤沈下の広域分布を、基盤構造すなわち粘性土層厚との関係に着目して議論する。1971年の埋立造成開始から、最大層厚を有する粘性土層の一次圧密が終了するまでの大明地区全域における数値解析による沈下量分布を等高線表記して図15に示す。背景には図7に示した基盤岩標高に基づく軟弱粘性土層厚を緑色の濃淡表示で示している。埋立開始から5年後の1976年時点では、粘性土層厚の小さい地点で沈下が先行し、大きいところでは1.5m程度の沈下が先行して発生しているが、1988年時点になると、徐々に粘性土層厚の大きい地点へと沈下の中心が移動していくことがわかる。また旧海域と陸地の境界部分では、沈下コンターの状態があまり変化しておらず、沈下が収束しつつあることがわかる。さらに10年後の1998年時点では、沈下の大小という位置関係の変化はあ

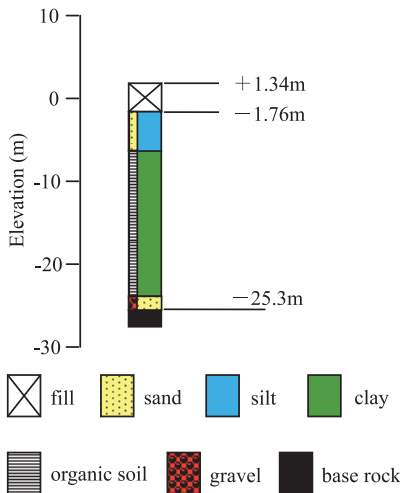
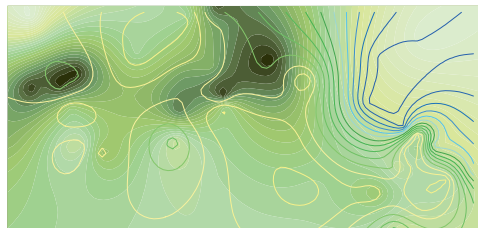
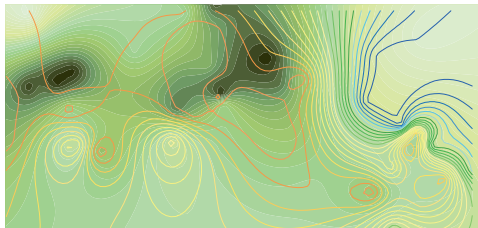


図14 図3におけるNo.19地点における2008年12月に実施したチェックボーリングの柱状図

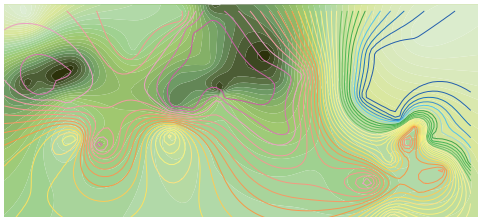
まり顕著ではなく、それぞれの地点で沈下量が増大していることがわかる。この段階で、図の中央やや左側の大明西町の一角2箇所にて黄色で表示される沈下の小さい地点が目立ってくる。この地点



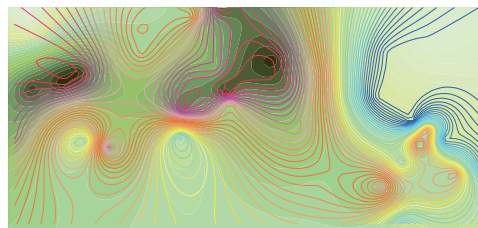
埋立造成開始から5年経過時点 (1976年)



埋立造成開始から17年経過時点 (1988年)



埋立造成開始から37年経過時点 (2008年)



埋立造成開始から157年経過時点 (2128年)

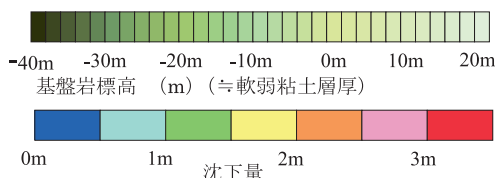


図15 数値解析による面的沈下の変遷と粘土層厚の関係

は図7でも明らかなように、岩盤標高が高く(粘性土層厚が小さく)、圧密が早期に終了し、沈下量も小さくなっている地点であり、基盤構造の影響が沈下性状に明確に反映されている。MMS測量とチェックボーリングを実施した2008年12月時点の結果においては、粘性土層厚の大きい緑色の濃い部分と沈下量の最大発生地点のコンターが一致する方向に徐々に変化していることがわかる。しかしながら、4.3でも指摘したように、最大沈下量が現れているのは最大粘性土層厚地点ではなく、その縁部、具体的には層厚で25m前後の地点となっている。これは、2008年12月時点では、25m以上の層厚を有する粘性土層では圧密度がまだ低く、既に圧密度が80%を越えている層厚25m地点の沈下が先行しているためである。層厚40m地点での圧密が完了すると想定される2128年における結果を見ると、最大沈下は粘性土層厚の最大地点に一致し、合理的なものとなっている。したがって、今後はより層厚が大きい地点で沈下が進行し、最終的には背景の緑の濃淡と沈下量のコンターは一致する方向に変化していくことになる。つまり、大明地区では、今後もう沈下がさほど起こらない地区とこれからゆっくりと大きな沈下が進んでいく地区とが混在する状況が続いていくことになる。

5. 結論

地盤情報データベースの作成と活用が都市域を中心として進められている。一方、技術的、経済的な理由でボーリングデータが紙媒体で保管されていて必ずしも有効活用されていない地方自治体などが多いのも現実であり、こうした組織を支援しうるスキームを構築するモデルを提案した。一連の研究を通して得られた結果は以下の通りである。

- (1) 厚く、不均質な粘性土層上に埋立造成された三重県鳥羽市大明地区を例にとり、鳥羽市の協力を得て42本のボーリングデータを集積して地盤情報データベースを作成した。これに基づいて、基盤の三次元構造をモデル化し、地域の地下構造モデルを構築した。

- (2) 鳥羽市大明地区はリアス式地形で、基盤岩が大きな起伏を有している。したがって、その上に堆積する軟弱粘性土層は層厚が局部的に激しく変動する不均質性を有するため、埋立造成によって不同沈下が長期にわたって生じ、道路や構造物に深刻な被害を与えている。現地の地表面標高値の変化を正確に把握するために、移動体三次元形状計測システム(MMS)による精密レーザー測量を実施して、地盤状況の現状を高密度デジタルデータで収録した。この結果と地下構造モデルを一体化した鳥羽市大明地区の地表地下一体地盤モデルを構築した。
- (3) チェックボーリングを実施し、2008年12月時点における旧海底地盤面と埋立土の境界標高と基盤岩着標高を得た。埋立直前のボーリングから得られる当時の旧海底地盤面標高をチェックボーリングによる実測標高と比較することにより、同地点における正確な地盤沈下量を把握した。
- (4) 地盤情報データベースに登録したボーリング地点ごとに、弾粘塑性一次元圧密解析を実施し、それぞれの地点における沈下の時刻歴を求めた。(3)で示したチェックボーリング地点における解析結果と実測値との比較により、本研究で適用した解析モデルが妥当なものであることを確認した。その上で、解析結果に基づいて大明地区全域の沈下分布図を経過時間ごとに作成し、地下構造との関連性について検討した。その結果、圧密の進行が速い粘性土層厚の小さい地点では早期に沈下が進行、収束するのにに対し、層厚が大きい地点では圧密がゆっくりと進行するために、長期にわたって徐々に大きな沈下が生じることが確認された。現段階ではまだ圧密変形途上である粘性土層もあり、最も層厚の大きい地区では今後さらに1 mを超える後続沈下が発生することがわかった。
- (5) 本研究で構築した鳥羽市地盤情報データベースと地下構造モデル、および蓄積された沈下データは、同地区の地盤変状の検討、また近

い将来に発生が懸念されている東南海・南海地震時の地盤震動検討、津波被害検討、液状化検討などに有効活用することができる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、鳥羽市役所の皆様には、地盤調査の資料やボーリングデータを集積、現地踏査や三重県技術事務所へのデータ拠出の依頼などのご協力を賜りました。三重県議会議員・中村勝氏、鳥羽市議会議員・山本泰正氏には地元との折衝をはじめ、市役所との連絡など大変お世話になりました。また、大明西町在住の寺崎俊幸氏には被害状況調査や自宅敷地内における新規チェックボーリング実施など、厚情あふれる協力をいただきました。こうした鳥羽市の皆様方のご協力がなければ、本研究を遂行することは事実上不可能でした。三菱電機(株)の西川啓一氏、富樫健司氏には大明地区におけるMMS測量を実施していただき、貴重なデータを収集することができました。ご協力いただいた関係各位に対し、記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 三村 衛・山本浩司：地盤情報データベースの変遷と現状、地盤工学会誌、第57巻、第4号、pp. 51-58, 2009.
- 2) KG-NET 関西地盤研究会：新関西地盤-大阪平野から大阪湾-、pp. 296+66, 2007.
- 3) 藤堂博明・山本浩司・安田 進・三村 衛：地域の地盤情報データベースと最近の動向、地盤工学会誌、第57巻、第5号、pp. 54-61, 2009.
- 4) 三村 衛・山本浩司・安田 進・藤堂博明：表層地盤の電子地盤図作成について、統合化地下構造データベースの構築-データベースの連携で築く公共の地盤情報-シンポジウム講演集、pp. 31-36, 2008.
- 5) 建設省国土地理院：沿岸海域基礎調査報告書(鳥羽地区)、1974.
- 6) (財)鳥羽開発公社：加茂干拓地要覧、1981.
- 7) 山本浩司・岩崎好則・諏訪靖二：地盤情報データベースシステムの開発と大阪地域地盤への適用、地盤情報のデータベースに関するシンポジウム発表論文集、pp. 143-150, 1991.
- 8) 三重県志摩建設事務所：一般地方道阿児磯部線

- (安楽島大橋)他1橋地方特定整備事業(橋脚耐震補強地質調査)業務委託報告書, 2008.
- 9) 折井友香: 地下地盤情報を統合した不整形基盤上の軟弱地盤変状評価に関する基礎的研究, 京都大学工学部特別研究論文, 2009.
 - 10) Mimura, M., Orii, Y., Kondo, T. and Nishikawa, K.: Development of support program for assessment of geohazard based on geoinformatic database, Proc. International Symposium on Geo-informatics and Zoning for Hazard Mapping, pp.244-249, 2009.
 - 11) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/pas/mms/index.html>, 2010年2月28日閲覧.
 - 12) Sekiguchi, H.: Rheological characteristics of clays, Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 1, pp.289-292, 1977.
 - 13) 関口秀雄・西田義親・金井文夫: 粘土の平面ひずみ粘塑性モデルについて, 第37回土木学会年次学術講演会概要集, 第3部, pp.181-182, 1982.
 - 14) 関口秀雄・柴田 徹・三村 衛・角倉克治: 大水深護岸の変形解析, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, pp.123-145, 1988.
 - 15) Sekiguchi, H., Shibata, T. and Mimura, M.: Long-term deformation of Pleistocene clays, Proc 10th European Conference on SMFE, Florence, Vol. 1, pp. 261-264, 1991.
 - 16) 鳥羽市役所: 鳥羽市十年の歩み - 加茂干拓建設事業 -, 1965.
 - 17) Mimura, M., Shibata, T., Nozu, M. and Kitazawa, M.: Deformation analysis of a reclaimed marine foundation subjected to land construction, Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, pp.119-133, 1990.

(投稿受理: 平成22年2月19日)

訂正稿受理: 平成22年5月21日)