

地盤情報データベースに基づく地盤災害評価支援プログラムの構築

三村 衛・折井友香*・近藤隆義**・西川啓一***

* パナソニック（株），元京都大学地球工学科

** （財）地域地盤環境研究所

*** 三菱電機（株）

要 旨

本稿は、紙媒体のアナログ地盤情報を電子化し、地盤情報データベースを構築することによって、地域の地盤環境を把握し、地盤防災評価に適用できるプロセスを提案したものである。近年、国レベル、また大都市近郊では大量のボーリングデータを使って地盤情報データベースを構築する気運にあるが、一方でデータの質量ともに十分ではなく、また予算や人員の問題で貴重なデータの原石である地盤調査データが死蔵状態におかれている地方自治体も少なくない。本稿では、三重県鳥羽市の加茂川河口部の干拓地を埋立造成した大明地区を例として、保有されている紙媒体の地盤情報をデータベース化し、それに基づく地下構造の三次元モデルの構築と、埋立造成に伴う地盤沈下解析を実施し、地盤情報データベースを活用した地盤災害評価へのアプローチ手法を例示する。また Mobile Mapping System による三次元レーザー測量結果を用いて提案手法の妥当性を検証する。

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

1. はじめに

国土の約 70% を山地が占める我が国では、狭隘な扇状地や河口デルタに人口密集型の都市が広がる形で近代化が進められてきた。こうした地域の地盤は、河川によって運搬され厚く堆積した軟弱土砂層が主体であるため、載荷されると破壊したり沈下や側方流動を引き起こし、上部構造物の安定した供用を阻害することが多い。また地震時には地震動の増幅や津波による甚大な被害を受けやすく、防災という観点からは非常に脆弱な地盤であることを認識しておく必要がある。

地盤防災を考える際、まず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おり（KG-NET 関西地盤研究会, 2007; 藤堂ら, 2009）、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（三村ら, 2008）。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手本として大いに地域社会に貢献しうるものとなる。ところが、地方の中小自治体などでは、予算や知的・人的資源に恵まれないという理由によって、建設工事に伴うボーリングデータなどの情報が報告書など紙媒体のまま死蔵されていることが多い。

本論文では、三重県鳥羽市の加茂川河口に展開する埋立造成地である大明（おあき）地区に着目し、同地区の民家や公共施設で起こっている深刻な被害の原因である地盤沈下のメカニズムを明らかにするとともに、大明地区の地盤状況の現状評価と今後について検討を加える。具体的には、紙媒体のボーリングデータから地盤情報データベースを構築し、これを有効活用することによって三次元基盤構造モデルを作成し、こうした地盤情報に基づいて地盤沈下の実態評価、さらには沈下予測などの防災方面へ適用するというところまでの一連のプロセスを示すことにより、地盤情報の実践的な適用の雛形を提示したい。

2. 鳥羽市大明地区のボーリングデータの集積とデータベースの構築

対象とする鳥羽市大明地区の概要をFig. 1に示す。農林省（現農林水産省）は1954年から三重県鳥羽市の加茂川河口の内湾部を干拓し農地化を目指したが、食糧事情が好転したことで放置されてきた。その後、山地が市街地に迫るような構造で活用できる土地を必要とした鳥羽市に払い下げられ、1971年から造成工事に着手し数年間で完成させ、公共施設、民間住宅として使用されるようになった。鳥羽市一帯は、小島が点在することからもわかるように、基盤が複雑に起伏した地形を有しており、元々海であった大明地区は、起伏に富んだ海底の基盤上に厚く粘性土が堆積しているという軟弱地盤上に開発されている。このため、Fig. 2に示すような地盤沈下被害が広範囲に発生しており、津波や高潮による浸水被害や地震



Fig. 1 Plan view of Oaki area of Toba City, Mie Prefecture

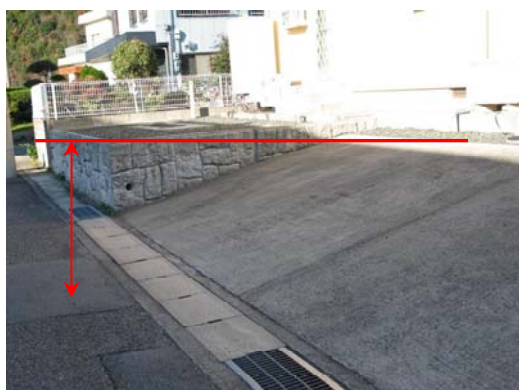


Fig. 2 Serious difference of elevation between the pile-supported building and the road due to settlement

時の激しい揺れのリスクとともに、地域住民の家屋と生活に深刻な影響を与えている。同図において、地盤沈下の可能性を考慮してこのあたりの構造物は

住宅を含め杭基礎で支持されており、建物自体は大きく沈下していないが、道路や駐車場などは杭が打設されているわけではないので、埋立造成荷重によって大きく圧密沈下している。このため、構造物と周辺のインフラ施設との間で不同沈下が生じている。

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、県市議会と鳥羽市役所の協力で公的整備事業を中心として合計42本のボーリングを集積した。鳥羽市地盤情報データベースをDIG(Database for Information of Ground) (山本ら, 1991) を適用することによって構築した。対象とする鳥羽市大明地区とボーリング位置をFig. 3に示す。

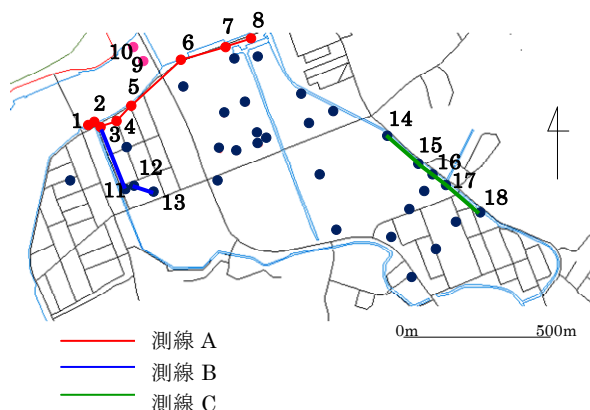


Fig. 3 Location of the selected boreholes for Geo-informatics database

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、Fig. 3において朱線で示したボーリング番号 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 Fig. 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、その上に軟弱なシルト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 (三重県志摩建設事務所, 2008) でもやはり-11～-12m となっており、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る。次に、河口側ボーリング No. 3 から南側内陸に向けて青線で示した測線 B に沿った地層断面を Fig. 5 に示す。選択したボーリング 3, 11, 12, 13 による断面では、No. 11, 12 の 2 本について岩盤が非常に浅い位置で出現しているのが分かる。この 2 本は幼稚園の敷地の対角線に位置しており、2 点間の距離は 50m 弱である。大きな基盤構造としては河口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、Fig. 5 に示すように、この辺りにやはり局所

的な基盤の隆起域が存在し、周辺に向かって再度それまでの岩盤標高に戻るといふ基盤の凸構造を有し

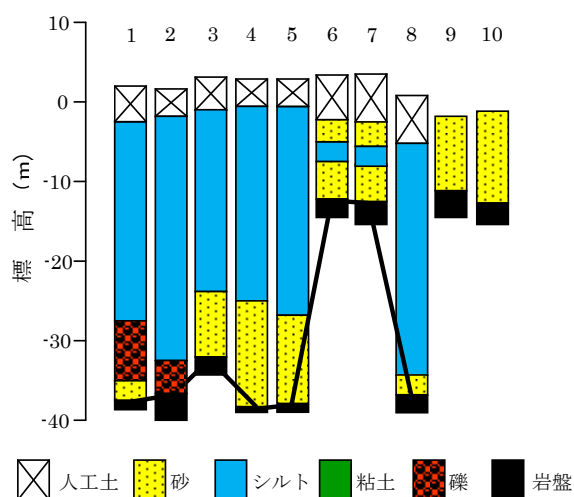


Fig. 4 Cross-sectional view of subsoil condition along the line-A

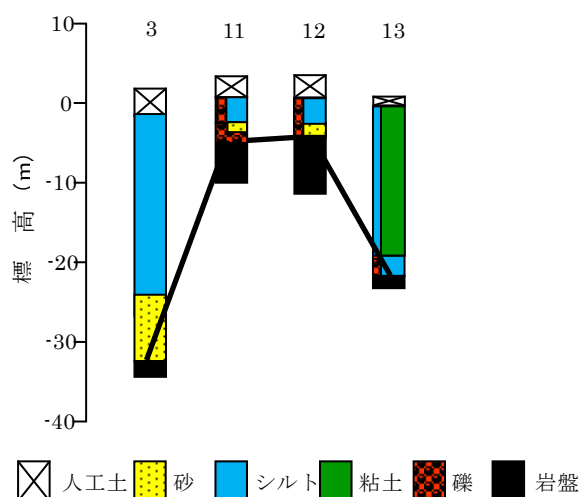


Fig. 5 Cross-sectional view of subsoil condition along the line-B

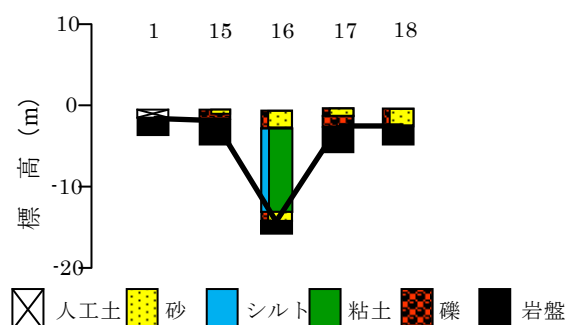


Fig. 6 Cross-sectional view of subsoil condition along the line-C

っていると予察される。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。大明地区埋立地の東端の道路に沿って緑色で示した測線 C の地層断面を Fig. 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、地表面近傍で岩盤が現れている。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（折井，2009）。

このように、集積した紙媒体ボーリングを電子化し、当該地域の地盤情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わかった。

3. 鳥羽市大明地区の三次元基盤構造

前章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岩盤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、HULINKS社製・Surfer8というソフトを使用した。Fig. 3からも明らかなように、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、補間方法としては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Fig. 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（後述）を読み込んで現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岩盤出現深度が深くなる（粘土層厚が厚くなる）傾向が見られるが、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。具体的には、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、粘土層厚が大きくなっていることがわかる。本章では、文章作成の色々な留意点を述べる。

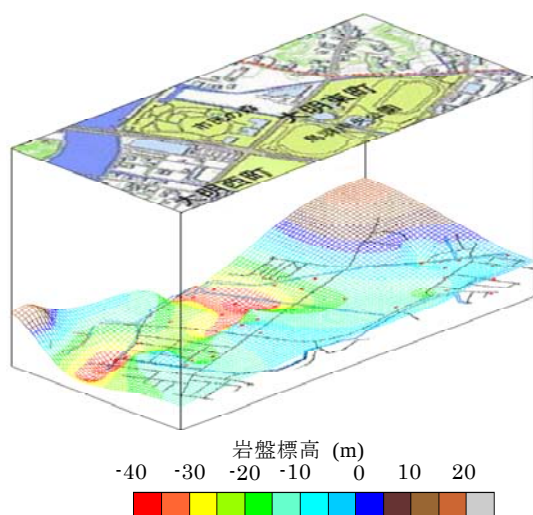


Fig. 7 Model of base rock structure for Oaki, Toba City based on the Geo-informatic database

4. 移動体三次元形状計測システムによる水準測量

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、ひいては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（モービ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（西川, 2008）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。

4.1 システムの概要と計測およびデータ処理

三菱モービ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（西川, 2008）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Fig. 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



Fig. 8 Automobile with mobile mapping system

精度2～3cm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。具体的には、正確な時刻同期と姿勢からレーザスキャナの照射点の位置を算出し、カメラ映像とレーザ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。

本研究では、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。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ところまでの計測を行った。対象地域のレーザー測量を約2時間半で完了し、全域にわたって約10cmピッチでの三次元デジタルデータを収録した。

4.2 鳥羽市大明地区の標高地図

移動体三次元形状計測システムによって得られた鳥羽市大明地区の測量結果の一例をFig. 9に示す。同図はある地点の情報を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、これらはすべてデジタル値を持った点群データである。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次元情報がデジタル値で記録されている。したがって、これらの値を用いて対象地区全域の標高図を作成することができる。



Fig. 9 Example of monitored results by the mobile mapping system at Oaki, Toba City

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マップをFig. 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3m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+1mを下回っており、標高が最も低くなっている。標高の低い地点をFig. 7の岩盤標高（粘土層厚に一致する）と比較すると、層厚40mに達する最大粘土層厚地点ではなく、それよりもやや層厚の小さい20～30m層厚の地点が該当していることがわかる。現時点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

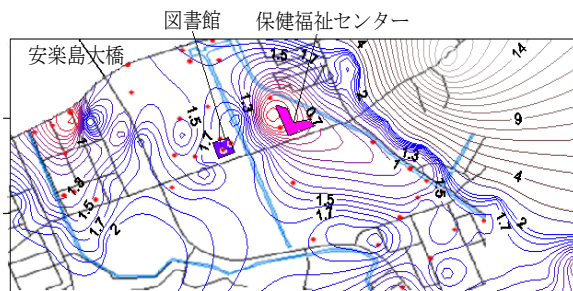


Fig. 10 Contour of the elevation of Oaki, Toba City on December 2008 based on the survey with mobile mapping system

場所は津波や高潮に伴う浸水被害の可能性が高く、注意を喚起しておく必要がある。

4.3 地上・地下統合化データベース

3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Fig. 11に示す。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、Fig. 4～6に示すような地盤断面の二次元表示に比べてより広域的な地下構造の推察が可能となる。このように、各地点の地下構造を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、増幅特性など災害時の挙動を考える上でも非常に有用である。

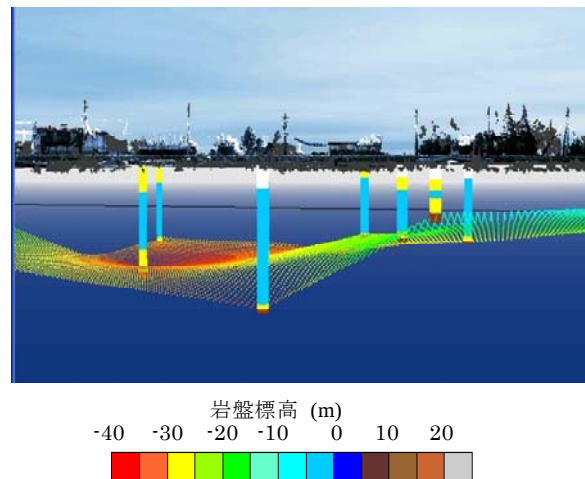


Fig. 11 Example of integrated information; structure of base rock, subsoil profiles and elevation of ground surface at Oaki, Toba City

5. 弾粘塑性有限要素法による地盤沈下評価

前章までに、鳥羽市大明地区の地盤情報データベースの構築と、それに基づく三次元基盤構造と軟弱粘土層厚分布のモデル化、MMSによる現地盤標高の把握を行った。本章では、弾粘塑性有限要素法に基づく数値解析によって、同地区の地盤変状のメカニズムを検討し、数値解析によって地盤沈下の現状と予測が可能であるのかといった点について議論する。

5.1 解析モデルと地盤のモデル化の考え方

鳥羽市大明地区は、岩盤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、粘土のダイレイタ

ンシ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 (Sekiguchi, 1977; 関口ら, 1982) 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 (1988), Sekiguchi et al. (1991) に詳しい。また、検討目的が大明地区全域の広域沈下であることと、地盤情報データベースに基づく検討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。

本解析で対象とするような問題で難しいのは、初期条件の設定である。干拓時における工学的な情報については農水事業というプロジェクトの性質上、また時間的な問題もあって期待できない。このため、最もさかのぼれるものとして、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。前述のように、干拓史 (鳥羽市役所, 1965) には、1971年から造成が行われる前の干拓の段階でおよそ1m程度の人工土が粘土層上部に存在していたことが記録として残っている。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1mまでを人工土、その下位から基盤岩が出現するまでを粘土層とし、層厚1m毎に要素分割を行って一次元地盤モデルを作成した。数値解析に必要な土質定数については、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 (Mimura et al., 1990) にしたがって決定した。適用した土質定数の一覧をTable 1に示す。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 $\gamma_t = 17.64 \text{ kN/m}^3$ の砂質土を用いて2.5mの層厚 (鳥羽開発公社, 1981) 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。

Table 1 Setup Parameters for clays

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 α_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

5.2 大明地区の地盤沈下の特徴

埋立造成開始時点から移動体三次元形状計測システムによる測量を実施した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Fig. 12に示す。同図では、粘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

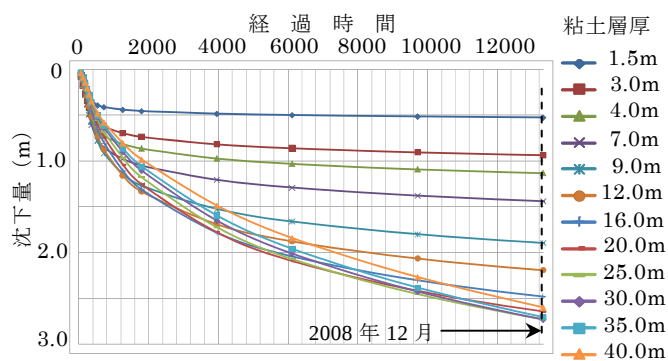


Fig. 12 Calculated settlements with time for the selected boring points at Oaki, Toba City

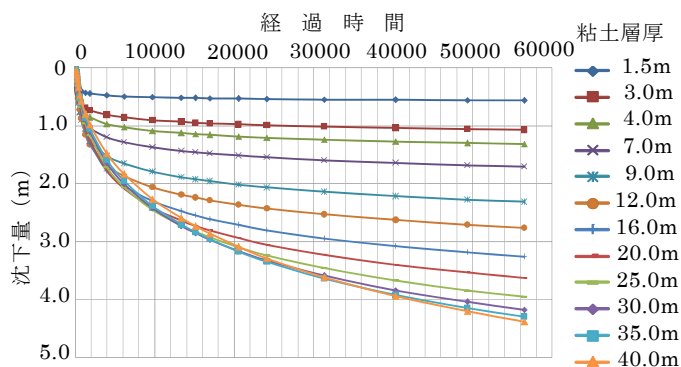


Fig. 13 Calculated long-term settlements with time for the selected boring points at Oaki, Toba City

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土層厚25mと30mの地点で2.73mとなっており、粘土層厚40m地点では2.59mとなっていて、現段階では粘土層厚と沈下量の関係が逆転している。これは粘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土層が圧密完了した段階（2128年；120年後）までの沈下～時間関係をFig. 13に示す。最終沈下量は層厚の大小に比例しており、層厚40mの粘土層では4.38mの沈下が生じており、現在から120年間に1.78m沈下が増加することになる。一方現在埋立地内で最も沈下している層厚25mの地点における最終沈下量は3.9mで、現在から120年間の沈下量増分は約1.2mとなる。このように、層厚の大きな粘土層を有する大明地区の埋立地では、圧密に非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、これまでも粘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、場所によって発生量が異なる。Fig. 13からも明らかなように、これからの沈下は粘土層厚大きい地点（Fig. 7参照）で大きくなる。

5.3 チェックボーリングによる解析結果の妥当性の検証

Fig. 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、西側は主として個人住宅のエリアであるためである。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ない、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う目的のために、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（Fig. 3のポイント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Fig. 14に示す。MMSによってボーリング地点の標高は+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。また着岸標高は-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が得られた。このデータはFig. 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を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。ちなみに、文献に基づいて、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。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不確実性を考慮すれば、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。

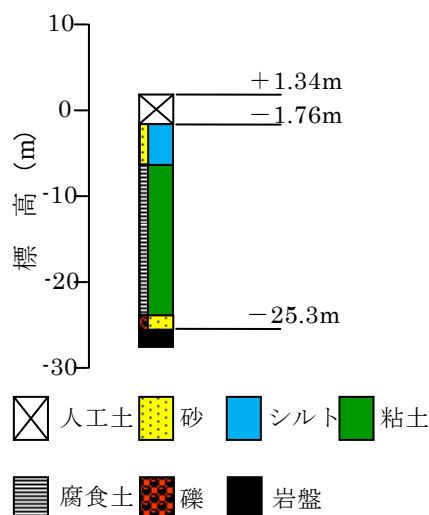
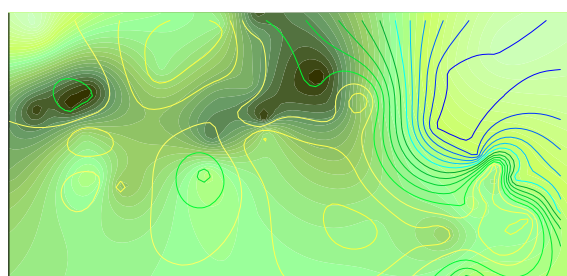


Fig. 14 Results of the boring at Oaki-nishi town, Toba City

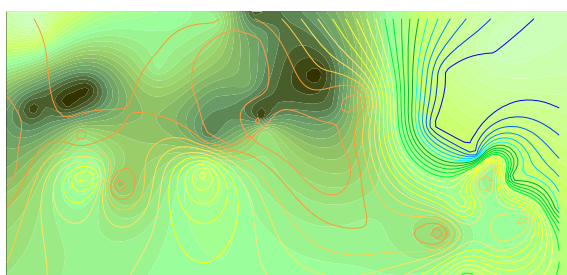
5.4 地下構造と広域沈下変遷との関連と将来予測

前節において、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ので、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2008年12月のMMS測量時点までの大明地区全域の沈下量分布を等高線表記してFig. 15に示す。背景にはFig. 7に示した基盤岩標高に基づく軟弱粘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、粘土層厚の薄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

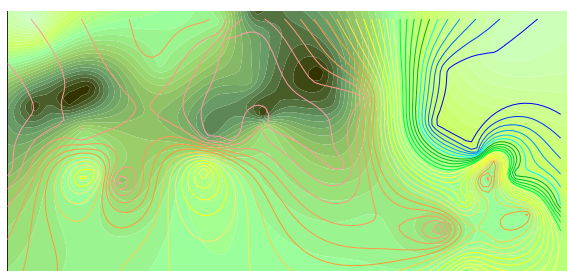
とがわかる。また旧海域と陸地の境界部分では、沈下コンターの状態があまり変化しておらず、沈下が収束しつつあることがわかる。さらに10年後の1998年時点では、沈下の大小という位置関係の変化はあまり顕著ではなく、それぞれの地点で沈下量が増大



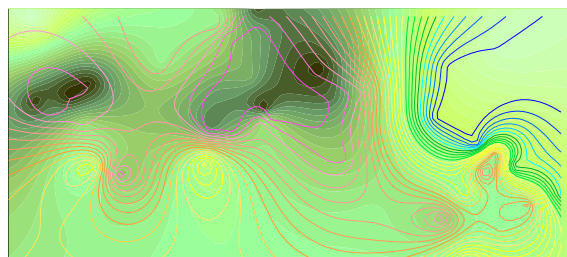
埋立開始から 5 年後 (1976 年)



埋立開始から 17 年後 (1988 年)



埋立開始から 27 年後 (1998 年)



埋立開始から 37 年後 (2008 年)

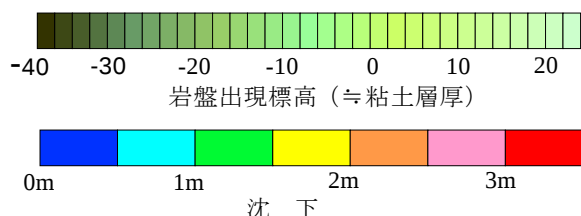


Fig. 15 Calculated performances for transition of settlement profiles with time focusing the relation with the thickness of soft clay deposits at Oaki, Toba City

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。この地点はFig. 7でも明らかなように岩盤標高が高く（粘土層厚が小さく）、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。本研究で実施した現地調査の時点である2008年の結果は、粘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変化しているのが特徴である。しかしながら、5.3でも指摘したように、最大層厚地点ではなく、その縁部、具体的には層厚で25m前後の地点で沈下量が最大となっている。これは、この時点では25m以上の層厚を有する粘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。したがって、5.2で指摘したように、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。

6. 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、緑色片岩で形成される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) 鳥羽市はリアス式地形で、基盤が大きなアンジュレーションを有している。したがったその上に堆積する軟弱粘土層は層厚が局部的に激しく変動する不均質性を伴う。埋立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。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。
- (3) チェックボーリングを実施し、2008年段階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証した。その結果、圧密の進行が速い層厚の薄い地点では早期に沈下が進行し収束するのに対し、粘土層厚が大きい地点では圧密がゆっくりと進むために、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り、最も層厚の厚い地区では今後さらに1m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形の検討、今後近未来に襲ってく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に活用可能なものとなっている。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、鳥羽市役所の協力によって地盤調査の資料やボーリングデータを集積することができた。また現地踏査や三重県技術事務所へのデータ抛出の依頼などの便宜を図っていただいた。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った。大明西町在住の寺崎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いた。こうした鳥羽市地元の皆様方のご協力がなければ、この種の研究を遂行することは事実上不可能であった。記して深甚の謝意を表するとともに、本研究を通じて開発した地盤情報データベースをはじめとする諸情報を地元にお渡しし、地盤災害防止対策や地震・津波防災対策の一助として活用いただければ幸いである。末筆ではありますが、京都大学防災研究所・井合進教授、飛田哲男助教には、貴重なご助言、ご助力をいただいた。記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 折井友香（2009）：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。
- KG-NET関西地盤研究会（2007）：新関西地盤一大阪平野から大阪湾へ，pp.296+66.
- 財団法人鳥羽市開発公社（1981）：加茂干拓地要覧。
- 関口秀雄・西田義親・金井文夫（1982）：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.
- 関口秀雄・柴田徹・三村 衛・角倉克治（1988）：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.
- 藤堂博明・山本浩司・安田 進・三村 衛（2009）：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.
- 鳥羽市役所（1965）：鳥羽市十年の歩みー加茂干拓建設事業ー。
- 西川啓一（2008）：移動体衛星測位を利用した高精度防災情報統合システムに関する研究，京都大学博士論文。
- 三重県志摩建設事務所（2008）：一般地方道阿児磯部線（安楽島大橋）他1橋地方特定道路整備（橋脚耐震補強地質調査）業務委託報告書。
- 三村 衛・山本浩司・安田 進・藤堂博明（2008）：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ーデータベースの連携で築く公共の地盤情報ーシンポジウム講演集，pp.31-36.
- 山本浩司・岩崎好則・諏訪靖二（1991）：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.
- Mimura, M., Shibata, T., Nozu, M. and Kitazawa, M. (1990): Deformation analysis of a reclaimed marine foundation subjected to land construction, *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 4, pp.119-133.
- Sekiguchi, H. (1977) : Rheological characteristics of clays, *Proc. 9th ICSMFE*, Tokyo, Vol. 1, pp.289-292.
- Sekiguchi, H., Shibata, T. and Mimura, M. (1991): Long-term deformation of Pleistocene clays, *Proc 10th European Conference on SMFE*, Florence, Vol. 1, pp. 261-264.

Development of Support Program for Assessment of Geohazard Based on Geoinformatic Database

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

* Panasonic Co. (former Undergraduate Student, Kyoto University), Japan

**Geo-Research Institute, Japan

***Mitsubishi Electric Co., Japan

Synopsis

A support system to assess geo-hazard of the local areas on the basis of geoinformatic database is proposed by exemplifying the pilot study at Oaki in Toba City. A serious uneven profile of base rock overlain by the very soft clayey deposits is expected there. The geoinformatic database of Oaki was developed and 3-dimensional underground model has been developed. Based on this underground model, a series of finite element analyses were conducted to describe the actual differential settlement for the past 40 years. The calculated performance is validated by comparing with the measured results with the mobile mapping system.

Keywords: Geoinformatic database, Subsoil structure model, Finite element analysis, Settlement, Geohazard