ILC 関連施設設計・施工・維持管理に資する地盤情報 DB システムの開発

DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL DATABASE SYSTEM FOR USE IN ILC-RELATED PLANT DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE

西山昭一#, A),横山幸也 A),松下典史 A),下山昌宏 A),吉兼理説 A),下山奈緒 A),佐貫智行 B)
Syoichi Nishiyama#, A), Tatsuya Yokoyama A), Norihumi Matushita A), Masahiro Shimoyama A)
Masanori Yoshikane A), Nao Shimoyama A),Tomoyuki Sanuki B)
A) OYO corporation
B) Tohoku Univ

Abstract

For an appropriate construction and maintenance of ILC tunnel as large-scale subsurface structure along with other related structures, it is required to have an efficient and safe design, execution scheme, supervision of work, regional conservation plan and community development-conscious grand design. The authors are in the process of developing a new database system for an appropriate data storing of the ground which is fundamental as well as with the possibility of risks and for rebuilding geotechnical model.

The system was developed with an aim to meet the need of construction company and facility managers by providing three-dimensional topographic information, geological information and ground risk information at any requested region and scope. It was developed based on our own GIS tools with several basic functions such as seamless processing for large-volume high-density topographic laser profiler (LP) data, database registration, browsing and updating geological information as exemplified by outcrop, borehole log data and rock mass information as exemplified by geophysical prospecting, in-situ test. The system enables users to build three-dimensional ground model depending on their level of development (LOD) in addition to an integrated management of stored topography data, geological structure data and rock mass data. In this report, we will summarize the system and refer to our future tasks and prospects.

1. はじめに

国際リニアコライダー（International Linear Collider; 以後 ILC）は、長さ 31km の直線トンネルを初めとした大規模な地下施設を要するため、施設の設計、 施工計画、施工管理、維持管理の各段階で、さらなる効率化と安全への配慮が求められる。同時に、周辺のインフラ整備、長期的視野に立った都市計画、地域環境や生活圏の保全、景観および地域文化とのバランスへの配慮など、地域振興と密接に進める必要がある。

一方で、施設建設に際して注意を払わなければならない地盤リスクが数多く存在する。

我が国の多くの地域が温暖湿潤な気候帯に属し、豊かな自然を享受する反面、自然災害の多い国土でもある。多雨や台風による周期的な災害や、複数のプレートの会合する地震多発帯、島弧の背骨を形成する火山フロントなど、小規模～大規模な災害をもたらす要因が山積する。最近では、東北太平洋沖地震による津波被害、斜面災害、液状化被害などは記憶に新しい。季節的な気象サイクルとは外れた集中豪雨・大型台風による水害、斜面災害、土砂災害は今後も少なくなることはないであろう。これらは深刻な災害をもたらし得る地盤リスクである。

ILC 本体トンネル、アクセストンネル、地中大規模空洞などの地下構造物の地盤リスクはガイドラインに示されている[1]。地上構造物においても、地山の掘削性・安定性、トラフィカビリティなど施工性を左右する問題がある。さらに、自然由来重金属を含む場合の残土処理、地盤の応力解放、風化・浸食、地下水の影響による経年劣化は、維持管理上の問題にも繋がり得る。

筆者らは、様々な建設上のリスクとなりうる地盤の情報を適切に保持し、ILC 事業に役立たせるための地盤情報 DB システムの開発を進めている。既存の地域地質情報、先行する施工現場で得られる地盤情報などを関係者で共有できれば、クリティカルパスの短縮や施工の効率化、災害による不測の事態への的確な対処が期待できる。

さらに、地盤リスクは ILC 関連施設に限ったものではなく、周囲地域も直接・間接的に同じ状況に置かれる。ILC 事業において、より地元の理解と協力を得る為にも、これらの地盤リスク情報を ILC 施設と地域全体で考え、長期にわたり蓄積・管理・運用すべきものと考える。それが地域と最先端科学施設の共存共栄に資する地盤情報 DB と考える。

2. 地盤情報 DB の必要性

ここで、土木工事における一般的な地盤リスクの例と地盤情報の用途を挙げ、地盤情報 DB の具体的な利用場面を考察する。

nisiyama-syoichi@oyonet.oyo.co.jp

2.1 土木工事に絡む一般的な地盤リスク

ILC 本体の地盤リスクは既往資料[1]が詳しいので、ここでは浅い地盤における地盤リスクを例に挙げる。土木工事で地盤リスクの影響を受けやすいのは、土工（切土・盛土工）であり、これらの設計・施工で留意すべき地盤リスクとしては次のようなものがある。なお、これらは一般的な地質調査要領[2]で示される内容である。

- 切土斜面の不安定化
- 構造物基礎の支持力不足
- 地盤を原因とした施工性の悪化
- 軟弱地盤の地盤沈下
- 地盤からの湧水
- 地震時の液状化
- 地すべり地や斜面上の盛土の不安定化
- 掘削ズリの盛土材料としての不適
- 土砂災害
- 自然由来金属を含む地質による環境汚染
- 近接施工による地盤変形　　　など

通常これらの地盤リスクは、あらかじめ調査に基づく対策がとられ、解消もしくは軽減されるものである。しかし、予期しなかった「場所」に問題を与える地質の出現、予測よりも地盤の「強度」が高い／低い、その地盤リスクが当初の予測よりも「量」が多い、周辺環境へ予測外の「影響」を与えるなどで、施工中・施工後に顕在化することも少なくない。いずれも、事業早期に正確な発生予測や適切な対策を施すことで、工期の延滞や予算額の超過、被害拡大を抑えることも可能と考えられる。

地盤リスクの評価対象に対し、地質調査技術者は対象地域における地史と対象範囲の類似点に注目する。そのために、事前情報の入手と分析をおこない、概略的な地盤リスクを想定する。そのうえで、詳細な地盤評価のための各種調査分析を提案・実施し、対象に応じた地盤要素をモデル化し、そのリスクを詳細に評価して設計・施工者に提供する。この詳細な評価に不可欠なものが、2.2 に例示する地盤情報である。

2.2 地盤情報の種類と用途

地盤情報は劣化し易い情報である。例えば切土斜面のような地質露頭は、風化・浸食を抑制するために短期間で保護されてしまい、地質構造・風化・変質状況・分離面の特性など、重要な地質情報が得られなくなる。地中の貴重な情報であるボーリングコアも、応力解放、乾燥・湿潤や、分析自体に必要な「観察・試験行為」で急速に劣化する。

前者の調査で得られる情報は、ルートマップ、露頭写真、分析データ、地質判定根拠が示されたスケッチ・記載として残される。後者は、ボーリングコアの観察記事、柱状図、各種試験計測結果、試錐時の掘進記録である。

地質の物理・化学特性を得るための原位置試験や室内試験は、多くが JIS 規格の元に実施されているが、地盤定数を導き出すデータシートには、複雑な地盤挙動が残されている。

物理探査はトンネルルート調査で用いられる弾性波探査・電気探査、面的に地質構造を把握するための浅層反射、埋設物探査などがあるが、地盤条件や地質解釈の見直しで再解析する場面もある。

様々な面で地盤リスクに関与する地下水の挙動は、水質、水温、水位などを把握するが、季節変動や地域の水利用などを含めた広い視点が必要である。

航空機などのレーザーで所得された高精度地形データは、地盤に由来する斜面変動で生じた微地形を読み取るのに優れている。勿論、正確な地形モデルは設計に用いることも可能である。

そして、地域の地質形成史（地史）を読み解くには、学術・文献資料の収集・整理が必要である。

以上のデータから科学的検討・考察に基づいて、評価対象に適するようにモデル化したものが地質調査の成果品であり、多くが報告書・工学的地質図・地質断面図という形態をとる。

近年では、数値情報として三次元地盤モデルを扱う場面も増えている。これらのデータは、変形解析や地下水流動などの数値シミュレーションに二次利用されることが多い。ただし、三次元地盤モデルデータには、先に述べた地盤の基本的情報を搭載する仕組みが整備されていない。何らかの形で属性情報を付加しないと、間違った利用法につながる恐れもある。

2.3 地盤情報 DB の利用場面

DB（データベース）自体は、多岐にわたる情報管理に有効な手段であり、速やかな情報の提供や、情報の散逸防止に役立つと考えられる。現状でも様々な機関より地盤情報 DB が公開されている[3]。

しかし、地盤情報をただ DB 化するだけでは、多種多様な事業者が関係する ILC 事業では、運用が難しくなると考えられる。DB システムには、既存地盤調査資料を統合管理する性能が求められるが、運用面では利用者の立場に立った情報蓄積・提供・利用法を考えた DB システム化が望まれるだろう。

特に、BIM（Building Information Modeling）の分野では LOD（Level of development）という概念がある。これは、検討・設計の必要性に応じた情報の詳細度レベルを示すものである。地盤情報もまた同様であり、事業の概略設計から詳細設計へと、設計段階の進展にあわせて、地質調査も包括的な情報から精緻化・具体化することになる。

つまり、対象事業・施設のスケールや検討内容に応じて LOD を設定して地質情報を登録する必要がある。ただし、人命や施設の安全性に係る影響の大きいリスク情報は、どの LOD でも網羅しなければならない。

3. システム設計

DB システムの設計に際し、システム全体に要求する性能目標を、「情報登録」・「情報参照」・

「地質解析」に分けて整理した。特に、「地質解析」は高度な情報提供を念頭に、地質技術者が三次元地質解析をおこなえるものとした。

3.1 「情報登録」に求める性能

情報登録の性能は次のようなものが考えられる。これらの情報は適切な LOD を設定して登録することが望ましい。

- 地域の基本的な地形情報として、高密度のレーザー測量情報を扱える
- 劣化しやすい地質露頭やボーリングコアなどの情報は、可能な限り原本性を確保する
- 物理探査や現位置試験などで得られる地盤物性情報は、数値データまで遡りチェックや再解析ができる状態とする
- 地域地質に関連する文献資料を登録できる
- 土木地質分野の電子納品データを取り込める
- 各種施行中に所得された地盤情報を時系列に登録する
- 地盤情報より構築された地盤モデルとそれに付随する属性情報を登録する
- 地質調査報告書に示される地盤リスク情報を登録する

3.2 「情報参照」に求める性能

情報参照性能はシステムの使いやすさに直結するので、特にわかり易さに配慮して下記の性能を満たすことを目標とした。

- ユーザーの立場と用途を考慮した“入り口”を設ける
- 情報の提供手段として共通フォーマットあるいは可読性のある情報とする
- 登録更新時期がわかるようにする
- 三次元情報は三次元可視化し、任意位置で断面などの情報を抽出する
- 出力・図化機能を柔軟にする

3.3 「地質解析」に求める性能

地質技術者が容易に三次元地質モデルを構築し、より高度な情報提供に対応できるように、下記の性能を目標とした。

- 地質モデルの推定アルゴリズムを実装する
- 三次元モデルの高度な編集機能を持つ
- CAD の精度で測定・分析をおこなえる
- 十分な表示処理速度や可視化性能を持つ
- 地質モデル構築に至るトレーサビリティを確保する
- 標準的な CAD フォーマットに対応する
- 直感的に扱えるものとする

4. 開発したシステムの機能

以上の要求性能を考慮しシステムのプロトタイプを開発した。システムは GIS を基幹とした DB 機能を持ち、柔軟な管理メニューを作成できる。例えば、「ILC トンネル工」、「地下空洞工」、「道路法面工」、「敷地造成工用」、「豪雨時災害リスク検討」、「地震時リスク検討」など、ユーザーや目的に応じたカスタマイズが可能となる。この管理メニューが本システムの入り口となる（Figure 1）。また、市販の三次元 CAD を基幹に、地盤データ入力・可視化・分析・地質モデリング機能を開発し、これを地質解析機能とした。

次に、本システムの機能について、登録・参照・地質解析機能の順に開発した内容の特徴を示す。

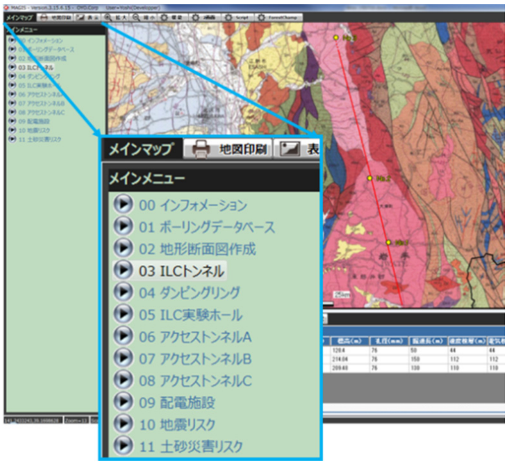

Figure 1: The management menu and interface.

4.1 登録機能

インターフェース上に示される調査範囲や調査位置レイヤ・オブジェクトに、地盤情報を属性ファイルとして登録する。pdf などで電子化された既往文献などの文書は、地域に関連した情報として登録可能である。電子納品データについては、一括インポート機能によりボーリングデータの位置と柱状図を登録する。性能的には 40 万本以上のボーリングデータを一括管理可能である。

各種調査・施行に伴う地盤情報としては、例えばボーリングデータの入力・可視化機能がある。本機能では、劣化し易いボーリングコアの微細な地質情報を、高解像度の画像とともにデータベースに登録し手軽に参照・可視化が可能となる（Figure 2）。

地盤モデルについては、モデルデータとともに、構築範囲や作成者、入力データ、推定アルゴリズム、有効範囲や関連する地盤リスク情報を属性情報として登録できる。

4.2 参照機能

参照機能のインターフェースは、地図を背景とした GIS 機能を持つ高速なマッピングシステムである。DB の基本的な機能として、単語検索、地理検索、住所検索、条件検索、項目検索、地理抽出、二画面比較、地形断面図の動的作成、気象などや道路交通などの動的情報の可視化、三次元可視化機能を持つ。これらの機能は、先の管理メニュー毎に適切な組み合わせで提供する。下記に、地形・地質・地盤リスク情報の参照機能について概要を示す。

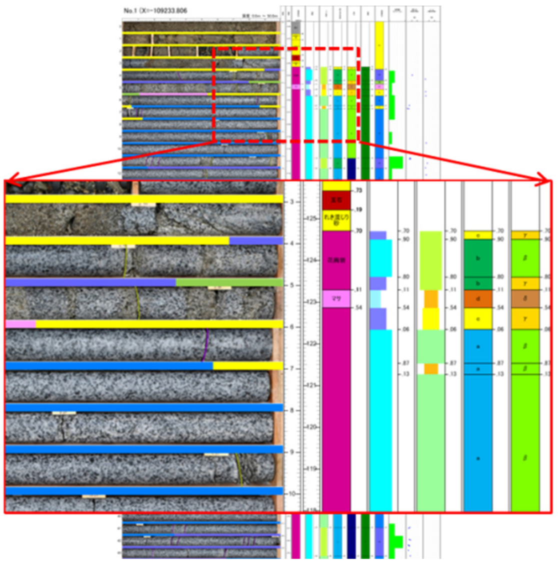

Figure 2: A visualization example of borehole core information.

（１）地形情報

地形データは、どの段階のユーザーでも必要になると思われる。地図上にはレーザー地形データを所得した範囲の地域メッシュとともに、高精細の地形陰影図を背景図として示す。さらに、地域メッシュを管理単位として登録した数値地形データを、任意のメッシュ範囲で取り出すことができる。

（２）地質調査情報

露頭情報、地質図、地質断面図、ボーリング情報などの地質調査情報は、地図上で調査範囲、調査位置を指定すると参照できる。インターフェースには各種地質図をレイヤとして重ねる。ボーリング個別のデータについては、一般的な柱状図とは別に、観察要素を横並びに可視化し、ボーリングコア情報を定量的に評価する資料が作成できる。このコア情報と同列にボアホール孔壁観察データも可視化可能である。

物理探査データは、地図上の探査範囲や側線を指定すると、これに関する計測データや解釈断面、現地写真を参照できる。また、探査断面のような三次元空間分布データは、他の地質情報や地質モデル情報とともに三次元可視化できるので、互いの整合性・関連性を把握し易くなる（Figure 3）。

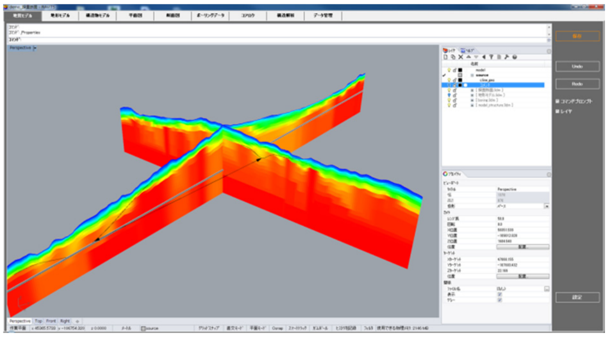

Figure 3: A visualization example of geophysical surveying information.

（３）地質モデル情報

地質モデルは後述する地質解析機能で構築した三次元地質モデルの参照が可能であり、一般的な CAD で利用できる DWG/DXF、B-Rep（Boundary Representation）、3Dprinter 出力にも利用される STL、座標データのテキストファイルなど、様々なファイルフォーマット入出力に対応する。

さらに三次元モデル用に単独のアプリケーションが起動し、自由な位置で地質モデルや構造物モデルの断面表示・出力と属性情報表示を可能とする。

（４）地盤リスク情報

自然災害のリスク情報については、インターフェースの地図上に、登録している災害予測図やハザードマップを表示できる。さらに、任意の指定地におけるリスク情報を、定型的なレポート形式でユーザーに提供可能である（Figure 4）。

Figure 4: An example on a foundation risk information report.

4.3　地質モデリング機能

本機能は三次元地質モデリングに特化する。インターフェースより、LOD に応じた地形・地盤情報を取り出し、三次元地盤モデルの構築を可能とする（Figure 5）。例えば LOD を地図縮尺と読み替えると、1/50,000　1/5,000 1/500 それぞれの縮尺で最適に表現できる地形データを取り出し、本機能にインポートしモデリングに用いることが可能である。特徴的な機能としては次のようなものがある。

（１）関連情報の統合三次元可視化

地形モデルやボーリング情報、物理探査結果、ボアホール解析、地質構造解析結果、既往地質図面などを同じ三次元空間に統合可視化する。例えば、地域に発達する分離面の傾向を把握し、その分離面構

造を三次元化し特定斜面における想定すべり面モデルの推定が可能である。

（２）地質境界面モデル作成

本システムで構築できる地質境界面モデルは次のようになる。

① NURBS 曲面モデル

複雑な曲面を持つ地質構造をモデル化するために、NURBS 法（non-uniform rational B-spline:非一様有理 B スプライン）を採用した。NURBS モデルは B-REP に対応する。モデルを作るための入力データは、点・線・曲線・サーフェスに対応し、地質学的な解釈を元に自由な地質境界・分離面モデルを推定することが可能である。この手法は、例えば岩盤空洞の不連続面や、切土法面上の岩盤すべり面、褶曲・逆転層などのモデル構築に適する。

② グリッドモデル

格子型に頂点データが配列するサーフェスモデルを推定する。このサーフェスモデルを B-REP に変換することも可能である。本法は広域的な地質モデルの作成に適する。

③ 等値面モデル

物性値の三次元分布を外部の三次元補間ツールにより物性分布モデルとして推定し、これをインポートして検査・可視化・等値面抽出機能を持つ。抽出した等値面データを地質境界面推定の材料として二次利用可能である。

（３）トレーサビリティ

データフォルダ構造の定型化や階層型レイヤなどで入力・出力モデルデータを管理し、トレーサビリティを確保している。そのため、新規データの追加・修正による短時間でのモデル更新が可能である。

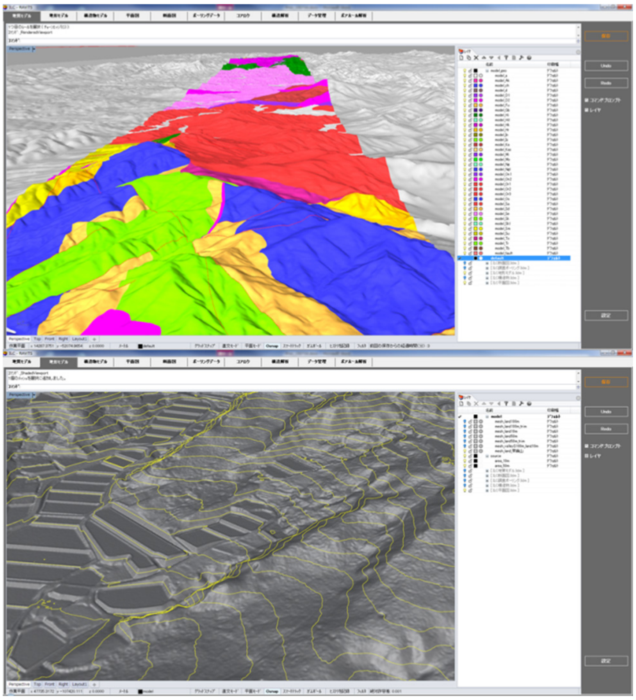

Figure 5: top: A model example in a wide area. bottom: A model example in narrow area.

5. 今後の展開と展望

本システムの開発は緒に就いたばかりであるが、今後は下記に示す問題に取り組み、開発を進めていきたい。

（１）DB 登録・管理・保守の仕組み

保安上守秘すべき情報についてセキュリティに配慮する必要がある。例えば、登録データに著作権情報や暗号キーを埋め込み、事業者に対しキー解読ライセンスを付与する認証システムも考えられる。また、登録する情報によっては著作権の管理や明示も必要となる。

特に、システムを本格稼働させる場合に、その運用機関と登録情報のコーディネーターが必要になると考えられる。地盤情報については、地元の地質を熟知する防災ドクターのような専門家が相応しい。これも地域の技術活性化の一助となりうるだろう。

（２）LOD の設定

より適する地盤情報の LOD 設定は今後も検討を進める。現状では、LOD に応じたデータの利用場面を想定し、DB にプリセットで登録している。将来的には、DB に一つのデータとして登録し、管理メニューに応じて、データ提供時に動的に LOD のデータを提供できるようにしていきたい。

（４）地盤リスクの表現

地盤リスクは文章で記述される情報であるため、その示し方や表現方法には錯誤を招かないよう注意が必要である。地盤リスクを発注者・請負者で分担する仕組みとして、GBR（Geotechnical Baseline Report）が有力なツールとされる[4]。本システムも GBR に対応する検討を始めており、システムの改良を進めていきたい。

（５）CIM との連携

CIM （Construction Information Management）は BIM の土木版とされ、輻輳する工事現場における安全管理、施工計画検討、工事計画説明などの関係機関協議、住民説明資料に役立つとされる。今後は、本事業にも積極的に CIM を活用すべきであると考えられる。地盤情報も CIM への提供を見据えた整備方法の検討を進めていきたい。

参考文献

[1] 宮原正信, “ILC 施設の土木工事に関するガイドライン策定”, 高エネルギーニュース Vol.33 No.2,Aug, 2014.
[2] 一般社団法人 全国地質調査業連合会, “改訂地質調査要領”, Aug, 2013.
[3] 総務省, “地盤情報の二次利用ガイド”, July, 2012.
[4] 地盤リスク学会/社団法人 全国地質調査業協会連合会, “地質リスクマネジメント入門”, April, 2010.