

特別論文

地盤の可視化技術と地盤情報データの活用

福井工業大学建設工学科教授、大阪大学名誉教授

松井 保

1. はじめに

最近、地盤情報に関連して、「地盤の可視化」が注目されている。土木・建設分野において、この 10 数年間に急速に発展してきた地盤の可視化技術は、物理探査と地盤情報データベースであろう。筆者は、10 数年前に、地盤工学のさらなる発展のためには、計画、設計、施工の流れの中で横糸の役目を果たす地盤調査分野の発展が不可欠であり、とりわけ地盤の可視化と同定に係る物理探査と地盤情報データベースが重要であることを指摘している¹⁾。また、いくつかの研究会活動を通して、これらの地盤の可視化技術に 20 数年もの長きにわたって係ってきた。

本文では、まず、地盤の可視化技術が今必要な理由を述べるとともに、個々の可視化手法の特徴と現状を簡潔に解説する。つぎに、筆者が係った地盤の可視化に関する研究会活動の概要とともに、地盤情報データの活用について述べる。

2. 今、なぜ地盤の可視化か？

地盤工学における究極の目標は、地盤に関する実際の現象の解明・予測である。この目標に向けた取組みとして、図-1 に示すように、未知なる実際の現象へのアプローチが設計全般であると考えると、種々の設計概念や設計法をより実際の現象に近づけるための 3 つのアプローチが考えられる。すなわち、力学モデルや解析手法などによる解析関連のアプローチ、物性・力学試験や遠心載荷実験を含む模型実験などによる実験室関連のアプローチ、および地盤調査、原位置試験、実大実験、現場計測などによる現場関連のアプローチである¹⁾。

この 3 つのアプローチにおいては、この半世紀の間に数多くの有用な知見と成果が得られ、地盤工学が大いに発展してきた。しかし、相対的に比較すると、とりわけ地盤調査と原位置試験の信頼性のレベルが低い。したがって、地盤工学のさらなる発展のためには、地盤特性の同定手法のレベル向上が不可欠である。

一方、プロジェクトのコスト縮減は、10 年以上にわたって言われ続けている社会的要請である。現在では、コスト縮減のための正攻法的な手段がなくなりつつある中、地盤情報を適確に活用することによるコスト縮減は、そのための数少ない手段であろう。したがって、信頼性ある地盤情報という意味

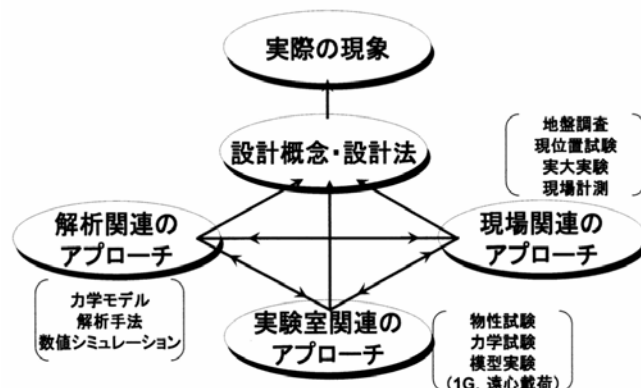


図-1 地盤工学における実際の現象へのアプローチ

での地盤の可視化は不可欠なのである。その対象は、地盤構成および地盤特性（物理特性、力学的特性、工学的特性）である。

3. 地盤の可視化技術と特徴

この10数年にわたって急速に発展してきた地盤の可視化技術は、図-2に示すように、物理探査と地盤情報データベースである。この図の物理探査については、土木・建設分野において広く適用されている物理探査手法の分類を示している。現在、物理探査が適用されているのは、主に土木・建設分野であり、トンネル地山調査、地すべり

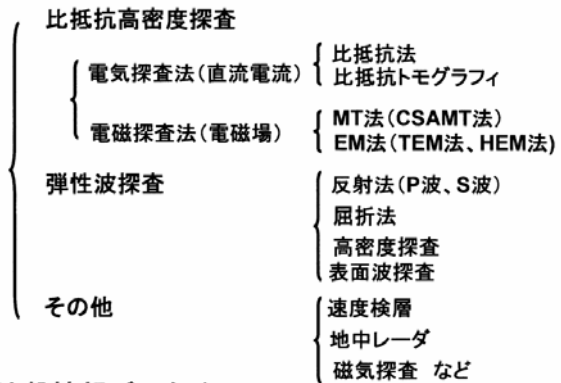
調査、地下水調査、断層調査をはじめ、ほとんどすべての種類の地盤調査に適用されている。そのうち、比抵抗高密度探査と弾性波探査がともに40%強の適用率である^{2) 3)}。

比抵抗高密度探査は、直流電流を用いる電気探査法と電磁場を用いる電磁探査法に大別され、それぞれにいくつかの方法がある。これらのうち、土木・建設分野で最もよく用いられている方法が比抵抗法であるが、比抵抗トモグラフィは狭い領域の精査、CSAMT法はより深い領域の探査、ヘリコプターを用いる空中電磁法（HEM）は広い領域の概査など、各方法の特徴を活かして用いられている。一方、弾性波探査については、断層調査に対してP波反射法探査（音波探査）、トンネル地山調査や地すべり調査などに対して屈折法探査と高密度探査がよく用いられている。S波反射法探査、表面波探査、およびその他の弾性波探査は、各方法の特徴を活かして用いられている^{3) 4)}。

表-1は比抵抗高密度探査と弾性波探査の特徴を比較して示している。表中の適用箇所を比較すると、前者では地盤の間隙部（軟弱部）、後者では実体部（固体部）に焦点を当て、主にそれぞれの特性を把握している。また、影響要因については、後者は地盤材料の硬軟のみであるが、前者はそれ以外に含水状況や粘土含有量などにも影響を受ける。したがって、両探査法は互いに競合するものではなく、むしろ補完関係にあるので、地盤の同定に両探査法を用いる複合探査は信頼性向上に非常に有用であり、最近注目されつつある⁴⁾。

一方、地盤情報データベースは、地盤のボーリングデータや各種地盤調査データをデータベース化したものである。図-3は、地盤情報データベースの目的を示している。情報の保存（次世代へ）、建設活動への有効利用（情報化）、地域地盤の研究、地盤防災・環境保全への活用など、多様な目的を持っている。地盤情報データベースには、各ボーリング位置に対応した土性図や試験

● 物理探査



● 地盤情報データベース

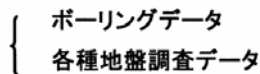


図-2 地盤の可視化技術と分類

表-1 比抵抗高密度探査と弾性波探査の特徴

	物理量	適用箇所	影響要因
比抵抗高密度探査	比抵抗	間隙部 (軟弱部)	地盤材料の硬軟 含水状況 粘土含有量 など
弾性波探査	弾性波速度	実体部 (固体部)	地盤材料の硬軟

結果一覧表も含まれる。

地盤情報データベースの直接的な活用方法としては、以下のようなものが挙げられる。すなわち、位置図上で必要なボーリングをクリックすることにより、ボーリング断面図を瞬時に描くことができ、多数のボーリングデータによる地盤の可視化ができる。また、多数のデータによる塑性図、圧密の e-logp 関係図、1 軸圧縮強さなどの深度分布図は、容易に作成できる。平面的あるいは断面的な物性値分布・地層分布も種々な形で描くことができる。さらに、地層構成や土質特性の 3 次元可視化も可能になる。地盤情報データベースを用いて地盤工学的特性を検討する例として、たとえば液状化危険地域の予測などが挙げられる。

表-2 は、物理探査と地盤情報データベースの特徴を示している。すなわち、物理探査については、データの連続性とコストにはメリットがあるが、精度が落ちる。

一方、地盤情報データベースについては、地盤情報は不連続であり、その取得にはコストがかかるが、高い精度が得られる。しかし、前者では、上述の複合探査などにより信頼性（精度）向上を図ることができ、また後者では、データベース化によりコスト削減をはかり、また多数のデータを用いることにより不連続性の欠点も補うことができる。今後、両者はそれぞれの特徴を活かしてますます活用されていくものと思われる。

4. 地盤の可視化に関する研究会活動の経緯

ここでは、筆者が係った地盤の可視化に関する研究会の活動概要について述べる。

(1) 物理探査による地盤の可視化に関する研究会活動

16 年ほど前の 1992 年に、トンネル地盤の可視化技術の確立を目標に、(財) 災害科学研究所トンネル調査研究会（委員長：筆者）が発足し、現在も継続している。当時、物理探査技術の分野に逆解析手法が盛んに取入れられ、電気・電磁探査に高密度探査手法が適用されて多次元解析が導入された結果、地盤の可視化が現実味を帯びてきた時期であった。しかし、土木・建設分野では、これらの探査法は信頼性のない手法として、ほとんど活用されていなかった。この研究会では、発足から約 10 年間に、比抵抗高密度探査のトンネル地盤調査への実際の適用例を数 10 ケース収集し、比抵抗高密度探査の地盤調査への適用に関する研究を行うとともに、その活用の普及に努めた。その間、土木学会関西支部の共同研究グループや調査・研究委員会として研究活動を行い、数多くの成果を公表する^{5) 6)}とともに、実務に携わる建設技術者のための書籍出版も行った³⁾。

その後、比抵抗高密度探査の地盤調査への有用性が土木・建設分野において広く認知され、

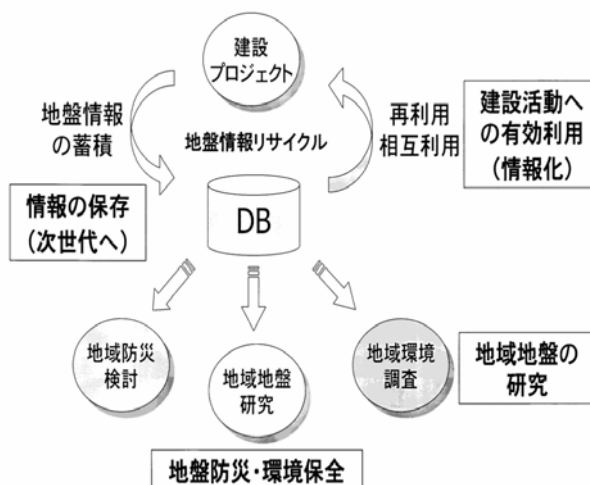


図-3 地盤情報データベースの目的

表-2 物理探査と地盤情報データベースの特徴

	精度	データの連続性	コスト
物理探査	低	連続	安
地盤情報データベース	高	不連続	高

数多くの適用例も得られてきた。そこで、次の目標として、弾性波探査など他の物理探査手法も用いた複合探査の実用化を目指して、2003年より土木学会関西支部の調査・研究委員会として研究活動を精力的に行い、地盤の可視化と探査結果の解釈法の高度化、探査と解析技術の特化・先鋭化、地山評価法の信頼性向上などに関する数多くの知見と成果が得られ⁴⁾、講習会も行った。現在、これまでの成果をまとめた書籍出版に向けて、鋭意準備している。

(2) 地盤情報データベースに関する研究会活動

24年ほど前の1984年に、土質工学会（現在、地盤工学会）関西支部に大阪湾海底地盤の研究委員会（委員長：赤井浩一）が発足し、その3年目に筆者がコントロールタワーの役割を任された。当時、大阪湾のプロジェクトは、関西空港やフェニックス事業のように沿岸から沖合へと展開されはじめていた。しかし、大阪湾海底地盤のデータは多くなく、かつオープンにされていなかったため、海底地盤の研究を推進するには、多くの機関からのデータの収集とデータベースの構築が不可欠と考えて発案したところ、委員長はじめ委員の方々の賛同が得られた。ここから、ほとんど全ての関係機関の地盤情報データを集積したデータベースがスタートし、いろいろな紆余曲折を経ながら多くの方々の叡智を結集して、現在の関西圏地盤情報データベースに至ったのである。その詳細は後述するが、関西圏地盤情報データベースは、約5万本のボーリングデータと各種地盤調査データから構成されている。現在、会員になれば全ての機関や企業が自由にこのデータベースを利用できるシステムになっており、スタートから20数年を経た現在、理想の形にかなり近づいている。また、世界的に見て先駆的に実用に供されているのは、画期的であり特筆すべき点である。

図-4は、関西における地盤研究活動の系譜とそれに伴う地盤情報データベースの構築の経緯を示している。ここで、関西圏地盤情報データベースの源流をたどってみると、大阪湾海底地盤に関する上記の委員会では、多数の機関参加とデータ公開を目指して大阪湾海底地盤情報のデータベース化が試みられ、その後「大阪湾地盤情報の活用に関する研究委員会（委員長：筆者）」へと引き継がれ、大阪湾地盤情報データベースを活用した数多くの成果が得られ、書籍出版として公表された^{7) 8)}。この過程で、当初、各機関が保有する地盤情報データは基本的に未公開であったが、多数のデータ提供機関を得るとともに、他機関の地盤情報データを相互に利用できるようにし、また研究委員会で加工・処理した地盤情報データは公表できるようにしてきた。

一方、関西陸域の地盤情報データベースは、大阪湾海域のものに少し遅れて、1989年に「地下空間の活用と技術に関する研究協議会」（座長：土岐憲三）が

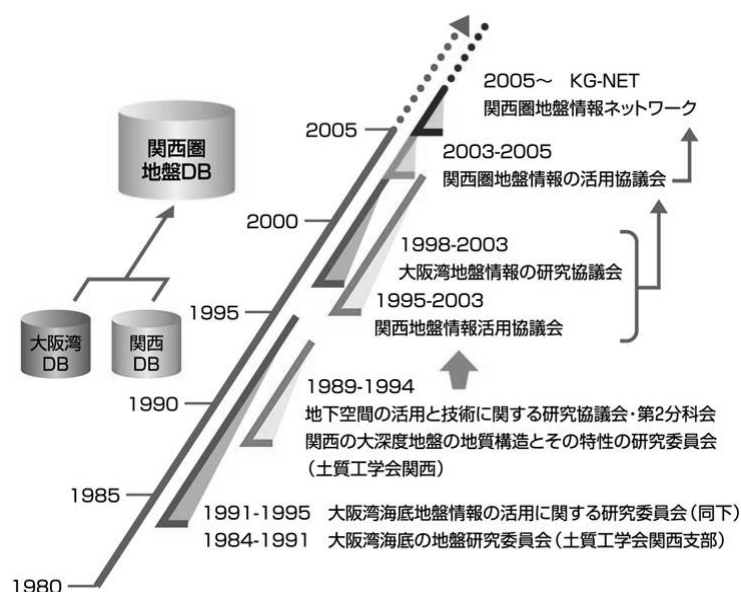


図-4 関西圏地盤情報データベースと地盤研究の系譜

設立され、その第2分科会が土質工学会関西支部「関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会」（委員長：足立紀尚）と連携した活動を行い、「関西地盤調査情報データベース」として構築され、これを活用して得られた成果は書籍出版として公表された⁹⁾。その後、この活動は1995年より「関西地盤情報活用協議会」（座長：建設省近畿地方建設局企画部長）に引き継がれ、数多くの成果が書籍出版として公表された^{10) 11) 12)}。ここでは、地盤情報データベースの管理を協議会方式で行うシステムが新たに採用された。少し遅れて、「大阪湾地盤情報の研究協議会」（座長：運輸省第三港湾建設局技術次長）も協議会方式で設立され、その成果は大冊の書籍出版として公表された¹³⁾。この時点で、現在の「関西圏地盤情報データベース」の礎が築かれたと言っても過言ではない。

その後2003年には、大阪湾地盤情報の研究協議会と関西地盤情報活用協議会は、関西圏地盤情報の活用協議会として統合された。それに伴って海域と陸域の地盤情報データベースも統合され、関西圏地盤情報データベースが構築された。また2005年には、この協議会はさらに関西圏地盤情報ネットワーク（KG-NET）という組織連携方式の体制へと発展的に改組された。このネットワークは、図-5に示すように、関西圏地盤情報の活用促進・連携を担当する関西圏地盤情報協議会（KG-C）、関西圏地盤DBの運営（維持・活用）を担当する関西圏地盤DB運営機構（KG-A）、関西圏地盤の諸問題に関する研究を担当する関西圏地盤研究会（KG-R）の3者のネットワークとして構成されている。筆者は、これらの一連の改組に主導的に参画するとともに、現在、関西圏地盤研究会（KG-R）の委員長として、関西圏地盤情報データベースを活用した研究活動を行い、その成果は、最近「新関西地盤—大阪平野から大阪湾—」¹⁴⁾として書籍出版されたところである。

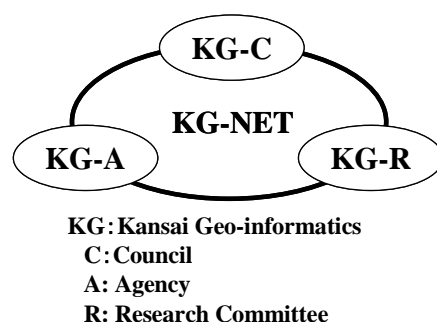


図-5 関西圏地盤情報ネットワーク

5. 地盤情報データの活用

従来からの調査手法により得られる地盤情報データに、上述した地盤の可視化手法によるデータが加わることによって、最近では、地盤情報データの信頼性が飛躍的に向上している。ここでは、このような状況を踏まえた視点から、地盤情報データの活用について述べる。

(1) 地盤調査の方法

一つのプロジェクトに対して地盤調査を行う場合、地盤調査一式を予め計画して行うことがほとんどであり、その結果からさらに地盤調査が必要であると判断した場合でも、追加の地盤調査が行われないことが多い。理由は、すでに行われた地盤調査の設定が不備であるとみなされてしまう恐れがあるからである。しかし、上述した物理探査による地盤可視化手法は、比較的手軽に広域の地盤情報を得ることができるので、この特徴を活かして、まず物理探査により広域の地盤情報を得て、それに基づいて地盤状況が複雑なところを抽出し、ボーリング調査などの調査位置を設定してより詳細な地盤調査を実施することを地盤調査の基本とすべきであろう。すなわち、地盤調査は、基本的には2段階で行うことによって、限られた予算の中でよりの確な地盤情報が得られ、ひいてはプロジェクト全体のコスト縮減と工程短縮に繋がるものと思われる。

(2) 地盤情報主導型プランニング

地域計画やプロジェクト計画が実施される際には、地盤情報を十分考慮して計画立案されるケースは非常にまれである。これまでは、たとえ地盤情報が提供されていても、地盤情報を十分に生かした計画決定がなされないことが多くみられた。筆者自身も、プロジェクトの設計・施工時に、構造物の平面位置やレベルを少し移動するだけで、想定されるトラブルを簡単に取り除くことができ、コスト縮減と工程短縮にも繋がるケースを少なからず経験している。しかし、このようなケースでも、すでに都市計画決定がなされていることなどの理由で変更されなかったことが多くみられた。

しかし、これまででも、災害が起きたり一旦トラブルが生じてしまうと、地盤情報を詳細に調査して周到な対策が行われてきたところをみると、新規のプロジェクトでも、地盤情報を十分考慮して計画立案することは困難ではないはずである。地盤情報の高度化が進みつつある現在、当初から地盤情報が十分考慮できるような計画立案・決定システムの確立、すなわち“地盤情報主導型プランニング”が広く実行されることを提案したい。

(3) 地盤情報主導型プランニングの実例

10 数年前に、筆者は上述の地盤情報主導型プランニングを“夢”として述べている¹⁵⁾。その後、筆者が研究会委員長として係ったプロジェクトで、その主旨に沿って地盤情報を十分考慮して、道路やトンネルのルートが決定あるいは変更された 2、3 の実例を、以下に簡単に紹介する。

1) 水越トンネル

水越トンネルは、国道 309 号の大阪府と奈良県の府県境にある水越峠（葛城山の南側斜面）を通る延長 2370m の道路トンネルである。地質調査によれば、当初に想定されたルートに沿って 4 本の断層がほぼ平行に存在し（図-6 参照）、また山

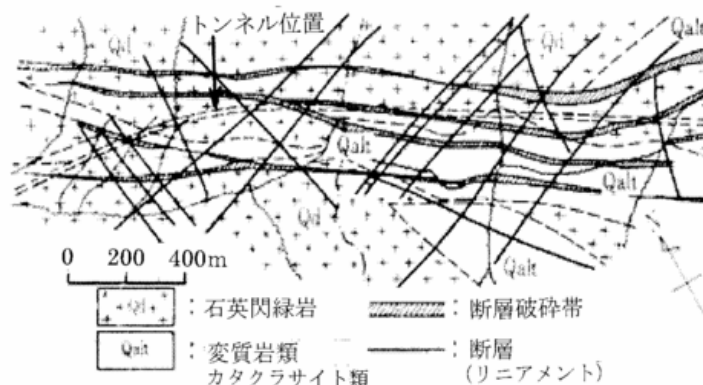


図-6 水越トンネルのルートと地質状況

腹より湧水が自噴している箇所もあった。そこで、より詳細な地山情報を得るために、通常行われるボーリング調査や弾性波探査のみならず、当時トンネル地山調査にほとんど適用されていなかった比抵抗高密度探査も実施し、断層破碎帯の性状、および岩種や地下水の分布状況を把握した。それらの結果に基づいて、数ルートの中から図-6 に示すルートを選定した。このルートは平行した断層の間に設定されたものであり、さらに詳細な地山情報を取得して 3 次元水文解析を行い、トンネル掘削に伴う地下水挙動も予測して設計、施工を行った。施工中、奈良側の湧水量は多かったものの、トンネル内への湧水量の経時変化はほぼ予測通りであり、難工事であったが、格段のトラブルもなく無事完成した。

2) 伯母谷道路

伯母谷道路は、和歌山県の新宮より奈良盆地にいたる重要な幹線道路である国道 169 号のうち、伯母谷工区部分を指している。この部分は地形的に問題が多いので、その改良整

備が国道 169 号の奈良側では最後に残されていた。この区間の直線距離は 2.8km、高低差は 170m で、平均勾配は 6.1%（南半分（山本茶屋側）は 7.4%、北半分（伯母谷側）は 3.9%）であった。地形は、伯母谷川に向かって沢と尾根が発達し急峻であり、中央構造線に関連する 1 級の断層である大迫構造線（仏像構造線）が存在する。そのため、この地域の地質情報は比較的豊富であった。さらに、詳細な地山情報を取得するとともに、大迫構造線が通る地域には比抵抗高密度探査を実施した。交通工学的な知見とともに地盤情報も十分に加味して、21 の候補ルートから、最終的に図-7 に示すルート（平均勾配は 4.35% でほぼ一定）を選定した。このルートは 5 つの連続するトンネルからなり、高度を稼ぐために中間にループが設けられた。その半分はトンネルで、残り半分は高さ約 30m の橋脚 3 本に支えられたループ橋とした。施工時に最も難しいと思われた大迫構造線を横切るトンネル工事では、比抵抗高密度探査で推定された位置で断層に遭遇し、切羽が崩壊したが、幸い断層幅が小さく無事通過することができた。その後は、格段のトラブルもなく無事完成した。

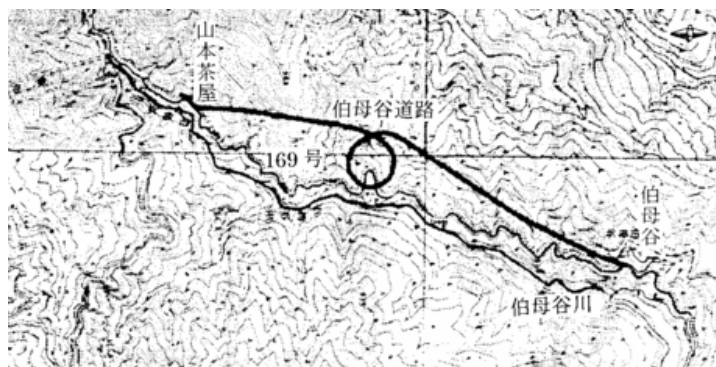


図-7 伯母谷道路のルートと地形状況

2) 箕面グリーンロードトンネル
 箕面グリーンロードトンネルは、図-8 に示すように、国道 423 号のバイパスとして計画されたものであるが、将来、新名神高速道路のインターチェンジと接続し、高速道路から都心へのアクセスを担う重要なトンネルである。当初、3 ルートから最短距離に近い西側ルートが選定されていた。しかし、このルートは箕面の滝と箕面川ダムに近く、トンネル内の湧水と地上での湧水の問題が懸念され、ルートの変更が検討された。2 次元比抵抗高密度探査が、滝とダムを含めてメッシュ状に実施され、また比較するトンネルルート沿いにも実施された。その結果に基づいて、地山状態が比較的良いと考えられ、かつ滝とダムからできるだけ離れたルート（図-8 中の現行ルート）に変更された。その際、箕面のサルの生息域も避けるよう、またトンネル内に湧水した地下水はできるだけ地上に戻すように配慮された。このトンネルは、南坑口付近の最大断面積が約 310m² の超大断面トンネル

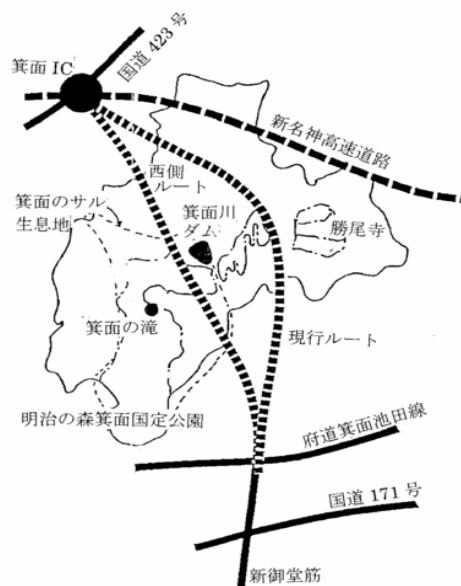


図-8 箕面グリーンロードトンネルのルート比較

であるなど難工事であったが、格段のトラブルもなく無事完成した。

一方、地盤情報主導型プランニングの実例は、国外でも見受けられる。例えば、ユーロトンネルでは、シールド掘削に適している連続したチョーク層中にルートを設定して、シールド掘進したことは有名である。また、ベルギーのアントワープにあるウエスターシェルデトンネルでは、砂層と粘土層が複雑に入込んだ軟弱地盤において多数のボーリングを実施することによって、できるだけ良い地盤を精度良く選んでシールド掘進ルートが決められた。日本の軟弱地盤におけるシールド工事でも、これまで 200-300mあたり 1本のボーリング調査がなされてきたが、これを 50mに 1本程度にすることにより、コスト縮減や工程短縮に寄与できるルート選定を行うことができるケースが多いのではないかと思われる。

6. むすび

本文では、今注目を集めている地盤の可視化技術の現状と特徴、および筆者の係った地盤の可視化に関する研究会活動の概要を述べるとともに、地盤情報データの活用について、2、3の提言をした。

参考文献

1. 松井 保：巨大化する地盤工学、土と基礎、Vol. 42, No. 4, pp. 1-2 (1994)
2. 松井 保：比抵抗高密度探査の地盤工学的ニーズと応用、物理探査、第 48 巻第 6 号, pp. 530-580 (1995)
3. (財) 災害科学研究所トンネル調査研究会：地盤の可視化と探査技術 — 比抵抗高密度探査法の実例、鹿島出版会、(2001)
4. 地盤の可視化とその評価法に関する調査研究委員会：地盤の可視化とその評価法、平成 17 年度講習会テキスト、土木学会関西支部 (2005)
5. トンネル地盤調査・特に高密度電気探査に関する研究委員会：比抵抗高密度探査に関する研究ワークショップ発表論文集、土木学会関西支部 (1995)
6. 比抵抗高密度探査に基づく地盤評価に関する調査・研究委員会：比抵抗高密度探査に基づく地盤評価 — 平成 9 年度講習・研究討論会テキスト、土木学会関西支部 (1997)
7. 土質工学会関西支部・大阪湾海底の地盤研究委員会：大阪湾海底地盤, 171p (1990)
8. 土質工学会関西支部：海底地盤—大阪湾を例として—, 406+184pp (1995)
9. 土質工学会関西支部 関西の大深度地盤の地質構造とその特性の研究委員会・地下空間の活用と技術に関する研究協議会：関西地盤, 212p (1992)
10. 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤—神戸および阪神間—, 270p (1998)
11. 関西地盤情報活用協議会：関西地層分布図—大阪平野— (1998)
12. 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤—京都盆地—, 196p (2002)
13. 大阪湾地盤情報の研究協議会：バイエリアの地盤と建設—大阪湾を例として—, 505+65pp (2002)
14. 関西圏地盤情報ネットワーク(KG-NET)・関西圏地盤研究会(KG-R)：新関西地盤—大阪平野から大阪湾—, 354+64pp (2007)
15. 松井 保：“地盤情報主導型プランニング”の夢、創立 40 周年記念誌、地盤工学会関西支部、p46 (1995)