

山岳工事における地盤評価方法とその施工への適用

神 藤 健 一

要 旨

トンネル・斜面・ダム基礎など地盤を対象とした山岳土木工事では、その工事地点の地形・地質・周辺環境などの地盤条件が、その建設工事の工期・工費・安全性および完成後の維持管理などに大きく影響する。地盤は、工事の特徴や内容を十分理解した上で、必要とするデータを調査・試験で的確に得て、その構造物に適した評価を行うことが必要であるが、地盤が ① 分布・性状とも複雑で変化に富む、② 工種(トンネル・斜面・ダム基礎等)や施工条件(土被り・勾配・施工法等)との関係で現象が異なる等のため、適切な地盤評価が難しいのが現状である。

本研究では、山岳土木工事で工事が多く、地盤評価が難しい表-1 に示すような地盤条件に対する地盤評価方法を提案し、施工に適用することにより、地盤に起因するトラブル防止を図ることを目的に研究を行った結果、次のような結論を得た。

まず、表-1 に示すような地盤条件に対して簡易な調査・試験・計測により地盤評価方法を提案するとともに、模型実験・数値解析・現場データにより施工に伴う挙動を把握し、表-1 に示すような安定性を評価するかに名判定指標や管理規準を提案し、実務に使用できることを確認した。

表-1.1 地盤条件別のトラブル現象と地盤評価方法

| 対象地盤条件 | トラブル現象 | 地盤評価方法 | 提案項目 |
|--------------------|---------------------------------|---|--|
| 土かぶりの大きな軟質地山 | トンネルの大きな変形・ 強大な土圧 (膨張性土圧) | 内部摩擦角 ($\tan\phi$) $\tan\phi \cdot C/rH$ | トンネル周辺応力の再配置 変位量の予測式 |
| 含水未固結地山 | トンネル切羽崩壊 | 表面波速度と比抵抗値の組 み合せ | 切羽安定評価のための地山 分類 |
| シーム・断層等のある長大 岩盤 | 斜面変状・崩壊 | FEM ジョイント要素法 (JFEM) 個別要素法 (DEM) 施工中の計測 | 安定の判断基準と安定評価 方法 計測位置・計測管理基準 |
| 急勾配掘削の土砂地山 | 斜面変状・崩壊 | 近似円弧すべりによる 安定計算 施工中の計測 | 安定性評価方法 計測管理基準・計測範囲 |
| 高透水性岩盤 | 割れ目からの漏水 | ポアホールスキナーに よる割れ目調査 ルジオン試験 比抵抗トモグラフィ | 割れ目幅による地山分類割 れ目幅とグラウト浸透性の 関係グラウトの選定、仕様 |

学位と学位記番号: 博士 (工学), 博第 5 号

授与年月日 : 平成 12 年 12 月 21 日

授与時の所属 : 八戸工業大学大学院受託研究員・前田建設工業(株)技術研究所

以下、各章の結果を述べる。トンネルは、線状構造物であり、トンネル切羽周辺での適切な対応が施工の良否を決めるので、切羽周辺の地山挙動と施工中の切羽安定評価方法を取り上げ、それぞれの次のような結果を得た。

第2章では、土被りの大きい軟質地山でのトンネル掘削に伴う周辺地山の挙動は、クリープ挙動を含めて、地山強度比1.0以下で、地山挙動を評価する場合、内部摩擦角($\tan\phi$)が有効な指標となる。また、トンネル掘削に伴う周辺地山の応力再配置過程で、5つの領域(初期応力状態領域、応力増加領域、応力減少領域、応力再増加領域、および強度低下領域)が存在し、これらの分布形状や応力増減も地山の力学的性質(とくに、内部摩擦角)に関係する。トンネル掘削に伴う地山変位は安定係数の逆数(C/rH)と内部摩擦角($\tan\phi$)で予測できることを示した。

第3章では、物理探査手法(表面波探査、比抵抗探査)を用いて切羽前方の10mまでの地層境界や断層破砕帯を施工サイクル内で事前に調査できることを確認した。さらに、トンネル工事で切羽崩壊現象が多い含水未固結地盤を対象に、S波速度が主に固結度と比抵抗値が含水状態と相関があり、これらを組み合わせることにより事前に切羽の安定性を評価できる地山分類を提案し、施工中の切羽崩壊対策の必要性の判断指標に役立つことを示した。

以上のようにトンネル切羽周辺の応力再配置過程や切羽安定性の地山分類を示すことにより、施工中の瀬パ安定化の評価・対策に有効であることを確認した。

次に斜面では、掘削に伴う地山評価で、安全性や対策工の必要性を判断し、変状・崩壊の奉仕を図ることが施工時に求められるので、法面の安定評価方法と計測管理用法を取り上げ、それぞれ次のような結果を得た。第4章では、シーム・断層等の不連続面がある長大岩盤斜面への数値解析手法(JFEM, DEM)での安定・不安定の判断基準を示すとともに、長大岩盤斜面での安定評価に適用できることを確認した。また、JFEMで地山内の引張亀裂の位置を推定でき、さらに水平変位量を粘着力との関係から推定することにより、合理的な計測管理値を提案できることを示した。

第5章では、比較的自立性のない土砂地山等をロックボルトと吹付けコンクリート等で補強しながら、急勾配切土する場合、1段あたりの掘削高さは、少なくとも地山の自立高さ以下とする必要があること、法面に円弧状の崩壊面が生じ、補強材のせん断強度と引抜き抵抗で補強することで法面の安定を保つという考え方に立って安定性を評価する方法を提案した。また、計測管理として、地表面の水平変位の管理規準(水平変位の法高さに対する割合)や地表面の沈下、ロックボルト軸力管理の考え方(収束性やロックボルト軸力分布)を示すとともに、計測範囲についても法高さの関係で提案した。

以上のように斜面の掘削において、計測管理規準や対策工の追加の考え方を示し、多くの長大岩盤斜面や切土法面補強工法の現場施工に適用することにより、変状・崩壊等防止し、あるいは早期に対応することにより無事施工することができた。

第6章では、ダム基礎で問題となる高透水性岩盤を対象に透水試験法やボアホールテレビ等による調査でグラウチング対象である岩盤割れ目を評価し、ルジオン値と岩盤割れ目性状との関係から、透水性のための地山分類を作成するとともに、高透水岩盤でのグラウチング対象割れ目は比較的大きな割れ目(0.4mm以上)であることを示した。また、室内試験や現場実験により割れ目幅とグラウトの浸透性の関係を検討し、割れ目でのグラウトの閉塞と沈殿との両面から明らかにするとともに、割れ目とグラウチングの目的からグラウトの選定方法の提案した。さらに、比抵抗トモグラフィによりグラウチングによる改良範囲・効果等を評価できることを明らかにした。

以上から、止水グラウチングでの施工中の調査を利用し、岩盤中の割れ目に適したグラウチングを施工することにより、グラウチングでの高孔数孔の削減によるコスト削減の可能性を示唆することができた。

以上のような施工の安定化のための地盤評価方法を提案し、施工へ適用することにより、トンネル・斜面・ダム基礎の地盤に起因するトラブル防止や安全施工や工事コストの削減に役立せることができた。

Study on Ground Evaluation Method for Tunnels, Slopes, and Dam Foundations

Doctor Course in Doctor of Engineering

Ken-ichi KANTO

ABSTRACT

In mountainous civil engineering works such as tunnels, slopes, and dam foundations, for which the ground is modified, ground evaluation is important, because the ground conditions such as topography, geology, and surrounding environment at the site affect the term, cost, and safety of construction works, as well as maintenance and management after completion. However, it is currently rather difficult to carry out the ground evaluation properly, as a) the ground is complicated with variety both of distribution and properties, and b) its characteristic differs depending on the type of works (tunnel, slope, dam foundation, etc), work execution conditions (overburden, grade, work execution method, etc) and such like.

This study assessed the earth pressure and face stability of tunnels, which are frequently constructed in mountainous civil engineering works and ground evaluation is difficult, stability evaluation and monitoring management of slopes, and water cut-off grouting for dam foundation treatment. Based on the results, a rational ground evaluation method is proposed, for facilitation the design and work execution preventing troubles caused by the ground. The following conclusions have been drawn.

In chapter 2, expansive earth pressure is investigated by using model experiments, and the following conclusions have been drawn: obtained as follows. a) The behavior of surrounding ground during tunnel excavation in soft ground with large overburden, including creep behavior, is controlled by the mechanical properties of the ground. Internal friction angle ($\tan c$) is a useful index; b) In the stress relocation process of the surrounding ground during tunnel excavation, 5 domains exist, and their distribution patterns and stress increase/decrease are related also with the mechanical properties of the ground (especially, internal friction angle), and c) Ground displacement accompanied with tunnel excavation occurs ahead of the face on a large scale. In addition, displacement of a cavity in tunnels is correlated with inverse of a safety factor (C/rH) and internal friction angle ($\tan c$).

In chapter 3, by using a geophysical exploration technique, the front ahead of tunnel faces is surveyed and evaluated in advance. Field experiments on an advanced face design and for preventing face collapse showed that: a) the strata boundaries and the fault fracture zones up to 10 m ahead of faces can be surveyed in advance within the work execution cycle, by using a geophysical exploration

(surface wave exploration and resistivity exploration) technique; and b) with respect to water-bearing unconsolidated ground, face collapse frequently occurs in tunneling works. By combining the S-wave velocity and resistivity value, a classification system for the evaluating face stability beforehand is proposed and, shown to be very useful to for taking countermeasures against face collapse during work execution.

In chapter 4, for the design of long and large slopes that have discontinuity such as seams and faults, and for preventing collapse a model analysis is performed using a numerical analytical technique (JFEM and DEM), Application of the analysis to actual collapse cases in the field showed that ; a) JFEM and DEM can be applied to stability evaluation in long and large rocky ground slopes, and b) The position of tension cracks inside the ground can be estimated by using JFEM, and a rational monitoring management value can be proposed by estimating the horizontal displacement based on the relation with cohesion in the case of JFEM, and by estimating the rigid displacement founded on the displacement history in the case of DEM.

In chapter 5, with respect to the reinforced earth work method with a steep grade for reinforcing relatively weak self-supporting ground such as sandy ground by using rock bolts and shotcrete, model experiments in a laboratory to simulate this work method and field measurements showed that : a) Stability of the slope face can be maintained by reinforcement by utilizing the shear strength and pull-out resistance of the reinforcing materials, when an arc shaped collapse face is generated on the slope face. Based on this, a method of evaluating stability is proposed, and b) As for the monitoring management, a management standard for horizontal displacement of the ground surface, subsidence of the ground surface and axial tension of rock bolts, management philosophy, and measurement range are proposed referring to the height of the slope faces.

In chapter 6, for the design of the dam foundation and to save cost, as the result of surveying the ground cracks and investigating the grout test results in a laboratory, and fields, conclusions have been obtained as follows. a) By surveying the crack width for grouting by using a bore hole scanner, a ground classification for water permeability has been established ; b) The relation between crack width and grouting permeability in conformity to the both sides of blockage of grout particles in the cracks and sedimentation of grout due to critical velocity was clarified, and a selection method for grouting based upon the purpose of grouting and crack width is proposed : c) The range improved by grouting can be evaluated by using resistivity tomography. The study results described above are considered to be of great use for preventing troubles originating in the ground of tunnels, slopes and dam foundations, as well as for making sophisticated designs and work execution.