併用探査による降雨に伴う斜面内の地下水挙動のモニタリング手法[†]

中村 真* 楠見 晴重**

Monitoring of Groundwater Behavior with the Rainfall on a Rock Slope by Combination Geophysical Prospecting

by

Makoto NAKAMURA* and Harushige KUSUMI**

Generally, the groundwater flow in rock slope depends on the direction for the development of rock joints sets, those are very complicated. It is a very important problem on civil and disaster prevention engineering to grasp the groundwater behavior included to the flow conditions in rock slope. In particular, the groundwater flow in a rock slope which has random joint sets is very complicated, and the specific methods which to monitor this flow don't have been developed. The electric resistivity methods have been mainly used to make a survey of the aquifer. However, the investigations in associate with the continuous monitoring of the groundwater flow in rock slope are very few.

In this paper, the continuous change of electric resistivity are measured in order to monitor the movement of groundwater flow in rock slope site by dipole-dipole electric resistivity technique on the period of rainfall, and the proposed analysis of groundwater flow in this slope based on the measured resistivity data are tried out. As the results, it is shown the possibility that proposed technique is very useful for the monitoring of groundwater flow in rock slope, and the groundwater conditions through the fracture zone and the rock joints in this site are monitored by this technique.

Key words : Slope, Rainfall, Groundwater, Geophysical prospecting, Conversion analysis

1 緒 言

斜面崩壊の原因として、降雨等による地下水の変動があることは良く知られている。岩盤内の地下水の浸透あるいは流動挙動は、岩盤内に存在する亀裂や破碎帯を主な水みちとしていることから、これら不連続面部の性状に支配される。したがって、斜面地盤内の地下水の流動状況まで含めた地下水挙動を把握することは、土木工学上、防災工学上大変重要な問題である。地中の水の流動による比抵抗変化をモニタリングしている研究^{1), 2)}はいくつか見られるが、岩盤内の含水状態と比抵抗変化との関係にまで言及した論文は見受けられない。

そこで本論文では、岩盤斜面を対象として降雨前後で連続的に地盤の比抵抗を計測し、著者らが提案する地盤の弾性波速度と比抵抗値を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法を用いて、各測点の見かけ比抵抗や岩盤の飽和度および体積含水率の変化と降雨との関係について検討を試み、本手法による水みち評価の可能性について考察した。

2 計 測 概 要

計測を実施したのは、大阪府東部の標高 150 ～ 200m の丘陵地である。計測地点の地質は中生代ジュラ紀から古生代二畳紀に形成された丹波層群の砂岩、粘板岩、チャートを基盤とし、計測線に比較的近い場所で行われたボーリングコアから得られた一軸圧縮強度は、約 60 ～ 80MPa の値を示す。また地表近くは、場所によって風化

が進んでいるところも見受けられ、一部は粘土化している。Fig. 1 に計測線の断面を示す。計測線の全長は 95m、標高差 24.5m、平均斜度 14.5° である。この計測線において弾性波探査を実施した結果、地表面から約 1 ～ 4m 程度までは弾性波速度が 100 ～ 200m/sec、深度 4 ～ 14m 程度までは弾性波速度が 300 ～ 800m/sec、さらに深度 14 ～ 15m 以深では弾性波速度は 3 500 ～ 4 500m/sec となった。また電極番号 73 から 75 付近においては、破碎帯と思われる低速度帯が存在しており、露頭観察結果からも破碎された表面が観察されている。

この計測線上に 1m 間隔で 96 本の電極を斜面下部よ

Fig. 1 Geological profile and measured line of rock slope.

[†] 原稿受理 平成 18 年 12 月 7 日 Received Dec. 7, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* (株)ニュージェック 〒531-0074 大阪市北区本庄東, NEWJEC Inc., Kita-ku, Osaka, 531-0074

** 正 会 員 関西大学環境都市工学部都市システム工学科 〒564-8680 吹田市山手町, Dept. of Civil, Environmental and Applied System Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

り電極番号 No. 1, No. 2 …として配置した。電極配置は Fig. 2 に示すようなダイポール・ダイポール電極配置を用いた。本配置では見かけ比抵抗 ρ_a は次式によって求めることができる。

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi aV/I \quad (1)$$

ここで、 V : 電圧、 I : 電流、 a : 電極間隔、

n : 整数 (1 ~ 22)

電極間隔が 1m、電極本数が 96 本の場合、最大測定深度は 30m であるが、すべての測点について計測すると、膨大な時間がかかることから、測定は基岩である砂岩層より浅部を中心に、最大の見かけ深度を 22m までとした。(したがって、本配置では $n=22$ までとなる)

また、電極間隔も 2m としたので計測点の合計は 289 点、1 回当たりすべての測点を一巡するのに要する時間は、約 2 時間半である。各計測期間における測定間隔は 6 時間である。使用した探査機は、自動電気探査装置 (Mac-OHM21, 応用地質製) である。

電極は長期の測定に対して耐えられるために、あらかじめ水中に放置しておき、表面に錆を発生させた鉛棒を用いた。これは、鉛はいったんさびるとそれ以上さびが進行しない性質を利用したものである。

見かけ比抵抗計測は、Fig. 3 に示す降雨事象について行った。図中の降雨は 6 時間ごとの降雨量である。また、計測は雨の降り出す前から行っており、したがって、地盤が降雨前まで最も乾燥している状態の見かけ比抵抗値も計測されている。図に示した矢印は、計測期間で解析対象とした降雨である。

3 降雨に伴う見かけ比抵抗の時間的变化

3・1 見かけ比抵抗計測結果

Fig. 4 は計測開始直後の見かけ比抵抗の分布を示している。さらに、Fig. 5 は、計測期間における 3 回目の降雨直後のものである。Fig. 4 と Fig. 5 を比較すると、降雨後は表層部や深部の一部では見かけ比抵抗が大きくな

Fig. 2 Configuration of dipole-dipole arrangement.

Fig. 3 Rain fall patterns for subject of study.

Fig. 4 The distribution of apparent resistivity in rock slope on just after the beginning of measurement.

Fig. 5 The distribution of apparent resistivity in rock slope on just after the third rainfall.

る箇所があり、その原因については今後検討を要するが、全体的に見かけ比抵抗は低くなっており、場所によってその度合いは異なっている。とくに点線で囲む破碎帯部と推定した弾性波の低速度帯付近の見かけ比抵抗の変化が大きいことが認められる。また、弾性波探査では破碎帯の傾斜までは評価できなかったが、この結果より左下がりであると推定される。

さらに、Fig. 6 には計測期間における電極番号 60 番、見かけ深度 4m および電極番号 74 番、見かけ深度 6m (以後 No. 60-4, No. 74-6 と示す) の見かけ比抵抗の時間変化を示す。まず No. 60-4 においては、降雨に対して見かけ比抵抗の変化はほとんど見られず、ほぼ一定の値を示している。一方、No. 74-6 では降雨に伴い見かけ比抵抗は減少し、降雨後は徐々に増加している。No. 60-4 のような見かけ比抵抗の変化を示すのは、比較的浅い部分の測点である。これは、この斜面では表層部からの浸透は少ないためであると考えられる。一方、No. 74-6 のような降雨が観測されると見かけ比抵抗が減少する測点は、Fig. 4 および Fig. 5 において点線で囲った部分で多く見られ、破碎帯部からの降雨の浸透によるものであると考えられる。

3・2 降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係

降雨が観測されると見かけ比抵抗が下がるような現象を定量的に解析するために、次式に示した見かけ比抵抗

Fig. 6 Changing in apparent resistivity over time in measurement period.

変化率 α を定義し、各測点でその変化率を求めた、

$$\alpha = \frac{\rho_{\max} - \rho_x}{\rho_{\max}} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 ρ : 見かけ比抵抗変化率 (%)

$\rho_{\max}$: 計測期間内における最も高い見かけ比抵抗

ρ_x : ある連続する6時間降雨に対する最も低い見かけ比抵抗

Fig. 7 は、計測期間における降雨前後の見かけ比抵抗変化率の分布を示したものである。図中の変化率は正が

Fig. 7 The distribution of resistivity change rate in rock slope after 3 instances of rainfall.

低下である。この図より、見かけ比抵抗変化率は各測点によって異なっており、左下がりの帯状の分布は複数箇所見られる。地質調査結果が希薄なため他の場所の地質性状は不明であるが、Fig. 1 における弾性波速度分布より予想した電極番号 73 から 75 の破碎帯付近から、帯状に連続する見かけ比抵抗変化率の大きい部分が明瞭な水みちと推定できる。

4 変換解析による水みち評価

4.1 変換解析の概要

先に述べた見かけ比抵抗変化率による評価では、水みちの位置はある程度評価可能なことがわかったが、³⁾その規模や水みちへの降雨の浸透量まで評価することは困難である。そこで、著者ら⁴⁾が提案する地盤の弾性波速度と比抵抗の測定結果を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法（以下、変換解析と称す）を用いれば、地盤の飽和度から帯水量の定量評価が可能と考え、本変換解析の適用を試みた。以下に、変換解析の概要を述べる。

原位置岩盤における弾性波速度と比抵抗は異なる物理量ではあるが、岩盤の間隙率や水の飽和度を未知数として関係付けることができる。弾性波速度については式 (3) に示す Wyllie (1956) の式⁵⁾が、比抵抗については式 (4) に示す Archie (1941) らの式⁶⁾が一般に知られている。

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-\phi)}{V_m} + \frac{\phi \cdot Sr}{V_f} + \frac{\phi \cdot (1-Sr)}{V_a} \quad (3)$$

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot Sr^{-n} \quad (4)$$

ただし、 V_p : 岩盤の弾性波速度 (km/sec)

V_m : 岩石実質部の弾性波速度 (km/sec)

V_f : 間隙水の弾性波速度 (km/sec)

V_a : 空気間隙の弾性波速度 (km/sec)

ρ : 岩盤の比抵抗 ($\Omega \cdot m$) で比抵抗探査で求めたもの

ρ_w : 間隙水の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

a, m, n : 地質の違いによる係数(変換パラメータ)

ϕ : 間隙率

Sr : 飽和度

Archie らの式については、最近の研究⁷⁾によれば、この式は砂層ではよく適合するが、岩盤では適合性がよくないとされているので、本システムでは岩石実質部と粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗の影響を加味した、式 (5) の並列回路モデルを採用するものとした。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F \cdot \rho_w} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{1}{\rho_o} \quad (5)$$

ただし、 F : 地層比抵抗係数 ($a \cdot \phi^{-m} \cdot Sr^{-n}$)

ρ_c : 粘土等による間隙中の導電性粒子の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

ρ_o : 岩石実質部の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

式 (3) および式 (5) は、間隙率 ϕ と飽和度 Sr を変換して、Fig. 8 に示すような、ひとつの岩盤要素（小要素に分割したセル）について、それぞれ次の連立した方程式として表される。

$$V_p = f(\phi, Sr) \quad (6)$$

$$\rho = g(\phi, Sr) \quad (7)$$

Fig. 8 Image of conversion.

したがって、調査によって得られる地山の比抵抗と弾性波速度の精度に依存するが、これらの値が既知であれば、式 (6) と式 (7) から連立方程式を解くことにより、未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

Fig. 9 に変換手法による地質構造評価システムのフローを示す。各セルごとに 1 対の比抵抗と弾性波速度が求められると、変換式の選択と別途室内試験により変換パラメータの設定を行い、変換解析と称する算定（連立方程式を解くこと）により間隙率と飽和度が得られる。変換式は、一般的な岩盤については式 (1) と式 (3) を用いる。

変換パラメータの設定は、検討地点の岩石コアから求めるのが望ましいが入手不可能の場合には、変換パラメータデータベースと呼ぶ既存の試験結果に基づくデータベースにより対応する岩種のパラメータを用いることができる。

変換解析によって求められた間隙率分布と飽和度分布のうち、間隙率分布においては、ボーリング等で岩級分布が既知の位置で間隙率から岩級区分への変換のしきい値を決定して、評価地点の岩級区分を求める。

一方、間隙率と飽和度の積から体積含水率を求め、体積含水率の急変箇所から帯水箇所を推定する。

以上の手順により、それぞれ単独かつ定性的に評価されていた弾性波探査や比抵抗探査結果を、連立すること

によって設計、施工時に必要な地山特性として定量的に把握することが可能となる。

4・2 変換解析結果

本解析では、各測定時間毎の弾性波探査結果と比抵抗探査結果を用いるのが望ましいが、検討地点では弾性波探査は事前調査時の一回しか実施していないため、降雨前後とも Fig. 1 に示す事前調査時の結果を用いることとした。また、並列回路モデルの式に含まれる変換パラメータ等は検討地点の岩石コアが入手できなかったため、著者らが別途室内実験によって構築したデータベースから基盤岩である砂岩の物性を用いた。Table 1 に解析に用いた物性を示す。

Fig. 10 に、変換解析結果のうち降雨前後の飽和度分布を、式 (2) と同様に変化率で表した結果を示す。なお、変換解析による間隙率分布は、降雨前後とも同じ結果であった。同図より、降雨前後の飽和度変化率コンターは Fig. 7 に示す見かけ比抵抗変化率コンターとほぼ同じ分布を呈しており、比抵抗変化率の 20% が飽和度変化率の 10 ～ 15% に対応している。

次に、本地点での検討では、比抵抗探査結果で見かけ比抵抗分布を用いていること、弾性波探査結果が事前調査時しかないこと等から定量的評価は困難であるが、さらに変換解析によって得られる間隙率と飽和度の積である体積含水率の指標により、岩盤中の帯水状況の推定を試みた。

Fig. 11 に、先に述べた飽和度変化率と間隙率の積で求めた体積含水率の変化を示す。体積含水率は岩盤の単位体積当りの含水量を表す指標であるので、同じ飽和度であっても間隙率が大きいほうが、岩盤中の含水量が多い。同図より、弾性波探査で基盤岩と推定した 3 500 ～ 4 500 m/sec の地層より浅い範囲での変化が大きいことがわかる。このことより、基盤岩への浸透は少ないと仮定すると、降雨に伴う地下水は基盤岩より浅部の軟岩層との境界付近を主に流下していると予想される。

Fig. 9 The system flow.

Table 1 Physical property of conversion analysis.

Kind of rock		Sand stone
Conversion parameter	a	0.23
	m	1.1
	n	1.7
Resistivity of intact rock ρ_0		10,000[$\Omega \cdot m$]
Resistivity of water ρ_w		50[$\Omega \cdot m$]
Resistivity of clay ρ_c		3,000[$\Omega \cdot m$]
Seismic velocity of intact rock V_m		5,000[m/s]
Seismic velocity of water V_f		1,500[m/s]
Seismic velocity of air V_a		330[m/s]

Fig. 10 The distribution of saturation change rate in rock slope after 3 instances of rainfall.

Fig. 11 The distribution of change rate of water content by volume in rock slope after 3 instances of rainfall.

5 結 言

本論文では、岩盤斜面において降雨に伴う比抵抗変化を連続的に計測し、まず最初に見かけ比抵抗変化率という指標を用いて降雨に伴う水みちの推定を試みた。その結果、弾性波速度分布より予想した破碎帯付近から、帯状に連続する見かけ比抵抗変化率の大きい部分が認められた。

次に著者らが提案する、地盤の弾性波速度と比抵抗値を間隙率と飽和度に変換する地質構造評価手法を用いて飽和度の変化率による評価を行い、良好な水みち推定結果を得た。さらに本手法を用いて、岩盤の体積含水率という指標により岩盤内の含水状態による評価も試みた。その結果、降雨に伴う地下水は基盤岩の境界の浅部の軟岩層に沿って流下していることが認められた。したがって本手法は、水みちの規模や性状の評価における有効なツールになると考えられる。ただし、本論文では本解析手法の妥当性の検証まで至れなかったため、今後も研究を続けていきたい。

参 考 文 献

- 1) T. Wada, M. Inoue, S. Yokota and A. Iwamatsu, "Downward infiltration of rainwater by using continuous electric prospecting within pyroclastic plateau (shirasu-daichi) in southern kyusyu, japan", Journal of the Japan Society of Engineering Geology, Vol.36, No.5, pp.29-38 (1995).
- 2) S. Takakura, "Monitoring of change of groundwater level by resistivity method", BUTSURI-TANSA, Vol.44, No.4, pp.227-231 (1991).
- 3) M. Nakamura and H. Kusumi, "A proposal of monitoring technique of the groundwater behavior by the electrical resistivity survey", West Japan Symposium on Rock Engineering, pp.31-34 (2001).
- 4) M. Nakamura, M. Urayama and H. Kusumi, "Geological Evaluation of Ground for Tunnel Construction by Combination Geophysical Prospectings", International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, pp.573-578 (2006).
- 5) M. R. Wyllie, A. R. Geogory and L. W. Gardner, "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media", Geophysics, Vol.21, No.1, pp.41-70 (1956).
- 6) G. E. Archie, "The Electrical Resistivity Log as Aid in Determining Some Reservoir Characteristics", Trans. A. I. M. E., Vol.146, pp.54-62 (1942).
- 7) A. Chiba and M. Kumata, "Resistivity measurement for granite and tuff samples", BUTSURI-TANSA, Vol.47, No.3, pp.161-172 (1994).