変換解析による降雨に伴う斜面内の地下水挙動の一評価手法

中村　真[1]，楠見晴重[2]

1　株式会社ニュージェック・技術開発グループ
2　関西大学・工学部都市環境工学科

概　　要

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砕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。しかし，その挙動を精度よくモニタリングできる手法は，現時点において確立されておらず，崩壊危険箇所の推定のためにはこの分野の研究が必要とされている。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の変化と降雨との関係について検討を行い，とくに破砕帯部におけるこれらの関係について考察した。

キーワード：斜面，降雨，地下水，比抵抗，変換解析

1.　はじめに

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。地下水探査法としては，一般的に比抵抗電気探査法がよく用いられ，しかもその目的のほとんどは，帯水層を調査することを主眼としている。比抵抗電気探査法による地下水計測として，これまでにも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)〜4)]はいくつかみられるが，直接降雨の浸透状況を連続的に測定し，降雨に伴う水みちの定量評価ついて言及した論文は見受けられない。

そこで本論文では，岩盤斜面内の降雨に伴う地下水挙動を，比抵抗電気探査法による連続計測結果から評価する手法について検討を行った。

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。図 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。この計測線上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，破砕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砕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り電極番号 No.1，No.2…として配置した。電極配置は図 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。

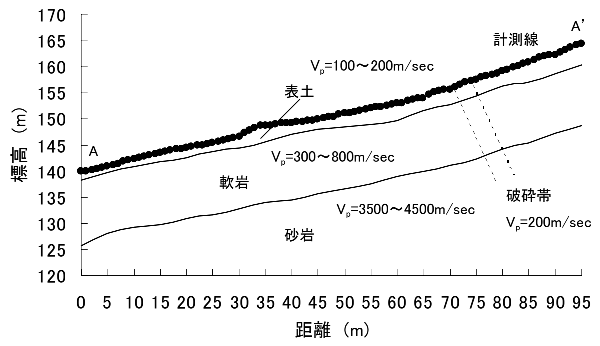

図 1　　計測断面における弾性波速度分布

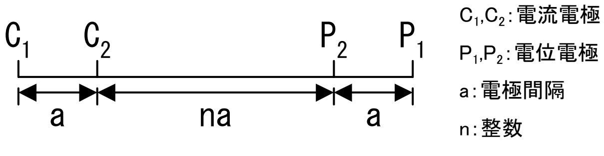

図 2　ダイポール・ダイポール電極配置

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\pi aV / I \tag{1}$$

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。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。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。

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。この探査装置の送信部，受信部の仕様は表 1 に示す通りである。

見かけ比抵抗計測は，図 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変化

3.1 見かけ比抵抗計測結果

図 4 は計測開始直後の見かけ比抵抗の等分布曲線を示している。さらに，図 5 は，計測期間における 3 回目の降雨直後のものである。図 4 と図 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いるようにみられ，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砕帯部と思われる付近の見かけ比抵抗の変化が大きいことが認められる。

表 1　電気探査装置の送受信部の仕様

送信部	最大電圧	200V 交替直流
	最大電流	1～200mA
受信部	入力インピーダンス	5MΩ以上
	入力チャンネル	3 チャンネル
	最小電圧感度	6μV（14bitA/D 変換器使用）

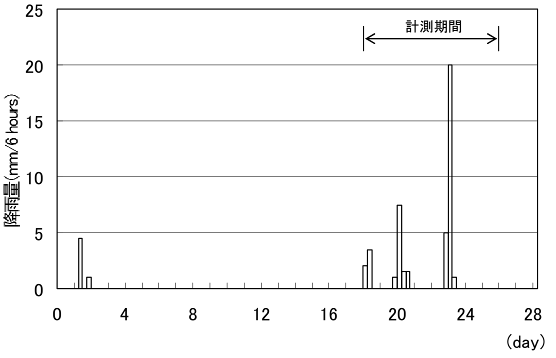

図 3　計測期間の 6 時間毎雨量

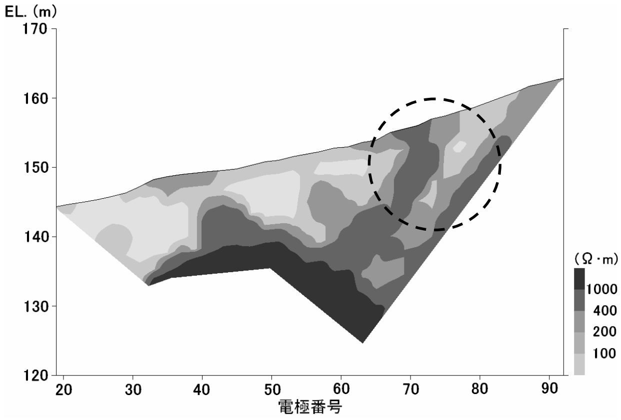

図 4　計測開始直後の見かけ比抵抗分布

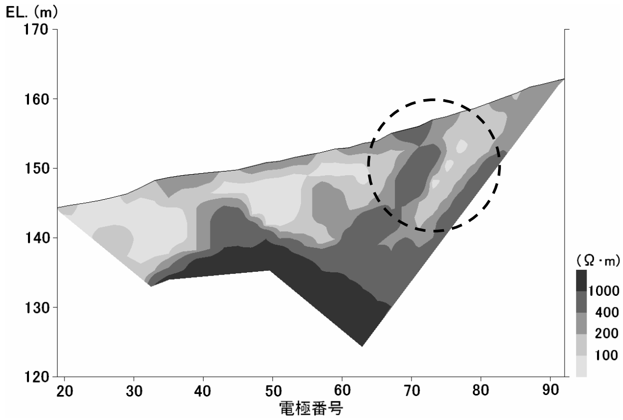

図 5　計測期間における3回目の降雨直後の見かけ比抵抗分布

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。

$$\alpha = \frac{\rho_{\max} - \rho_x}{\rho_{\max}} \times 100 \tag{2}$$

ここで，α：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

図 6 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，図 1 における弾性波速度分布より予想した破砕帯付近から，帯状に連続する見かけ比抵抗変化率の大きい部分が水みちと推定できる。

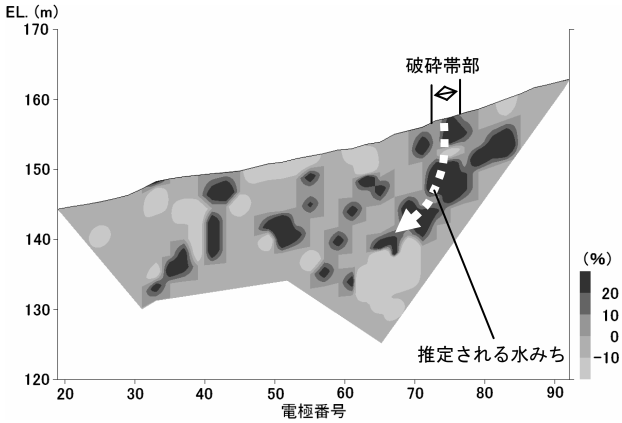

図 6　降雨前後の見かけ比抵抗変化率の分布

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[5]，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[6]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 Wy11ie(1956)の式が，比抵抗については式(4)に示す Archie(1941)らの式が一般に知られている。

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

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

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（Ω・m）で比抵抗探査で求めたもの
ρ_w：間隙水の比抵抗（Ω・m）
a，m，n：地質の違いよる係数（変換パラメータ）
⎞：間隙率，Sr：飽和度

Archie らの式については，最近の研究によれば，この式は砂層ではよく適合するが，岩盤ではあまりよく適合しないとされているので，本システムでは式(5)の並列回路モデルを採用するものとした。

$$\frac{1}{\rho}=\frac{1}{F\cdot\rho_w}+\frac{1}{\rho_c}+\frac{1}{\rho_0} \tag{5}$$

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(Ω・m)
ρ_0：岩石実質部の比抵抗(Ω・m)

式(3)および式(5)は，間隙率φと飽和度 Sr を変換して，図 7 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。

$$V_p=f\ (\phi,Sr) \tag{6}$$

$$\rho=g\ (\phi,Sr) \tag{7}$$

したがって，地山の比抵抗と弾性波とが既知であれば，式(6)と式(7)から逆解析（最適化手法）により，未知の間隙率と飽和度を求めることができる。

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，降雨前後とも図 1 に示す事前調査時の結果を用いることとした。また，Archie らの式に含まれる変換パラメータ等は，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。表 2 に解析に用いた物性を示す。

図 8 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図 6 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。

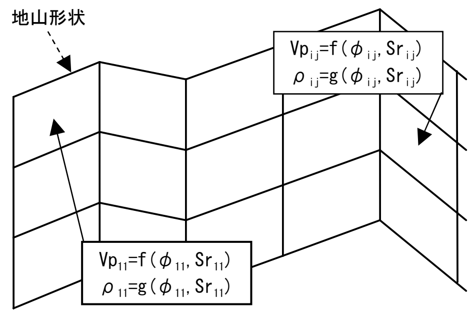

図 7　変換解析における岩盤要素のイメージ

表 2　変換解析に用いた物性値

岩　種	砂岩
地層係数Ｆの係数　a	0.23
間隙率φの指数　m	1.1
飽和度Ｓｒの指数　n	1.7
岩石実質部の弾性波速度　V_m (m/sec)	5000
間隙水の弾性波速度　V_f (m/sec)	1500
空気間隙の弾性波速度　V_a (m/sec)	330
岩石実質部の比抵抗　ρ_0 (Ω・m)	10000
間隙水の比抵抗　ρ_w (Ω・m)	50
導電性粒子の比抵抗　ρ_c (Ω・m)	3000

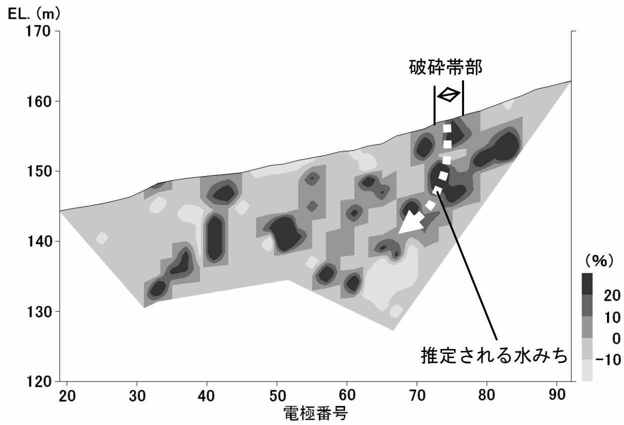

図 8　変換解析による降雨前後の飽和度変化率の分布

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，岩盤中の含水量の推定も可能となろう。

5.　おわりに

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砕帯付近から，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れば，岩盤の体積含水率という指標により岩盤内の含水量の定量的評価も可能となり，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。

参　考　文　献

1)　和田卓也，井上誠，横田修一郎，岩松暉，「電気探査の自動連続観測によるシラス台地の降雨の浸透」, 応用地質, Vol.36/No.5, pp.29-38,（1995).
2)　長江亮二，竹内睦雄，「電気探査による地下水流動モニター法の研究（その2）」，応用地質，Vol.33/No.1，pp.1-16,（1990).
3)　高倉伸一,「比抵抗による地下水位変化のモニタリングの試み」, 物理探査，Vol.44/No.4，pp.227-231,（1991).
4)　鈴木浩一，東貞成，志田原巧，「比抵抗トモグラフィ法の地下水流動のモニタリングへの適用」, 電力中央研究所報告, U97065,（1998).
5)　中村真，楠見晴重，「比抵抗電気探査による地下水挙動のモニタリング手法の提案」，第22回西日本岩盤工学シンポジウム，pp. 31-34,（2001).
6)　中村真，近藤悦吉，楠見晴重，「併用探査によるトンネル施工ルートの岩盤および湧水予測評価法」，土木学会論文集，No.735/VI-59，pp.209-214,（2003).

(2006.07.07 受付)

Monitoring of groundwater behavior on a rock slope by combination geophysical prospecting

Makoto NAKAMURA[1],　Harushige KUSUMI[2]

1　NEWJEC Inc., Technology Development Department
2　Kansai University, Department of Civil and Environmental Engineering

Abstract

The characteristic of the groundwater flow in a rock slope primarily depends on rock joint sets. 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 have not been developed. In our past research, the systematization of geological evaluation technique that converted from seismic velocity and electric resistivity to porosity and saturation was proposed. In this paper, using this proposed technique, we tried to monitor the groundwater flow behavior during rainfall in rock slope site by changing of saturation in a rock slope.

Key words: slope, rainfall, groundwater, electric resistivity, combination geophysical prospecting