

連続計測による岩盤斜面の破碎帯部における 見かけ比抵抗と降雨との関係

楠見 晴重*・中村 真**・西田 一彦*

要 旨

岩盤斜面内の地下水は、主に亀裂、断層や不連続面内を流れることはよく知られている。本論文では、ダイポール・ダイポール電気探査法を用いて、5つの降雨パターンで、ある岩盤斜面で連続的に見かけ比抵抗を測定した。そのときの測線は、1つの破碎帯を横切って設けている。そして、比抵抗の変化と降雨との関係について考察した。

その結果、破碎帯部分とほかの岩盤内とは、比抵抗の変化特性は全く異なっており、とくに、比抵抗の変化と降雨とは1つの指数関数に近似できることが認められた。そして、この指数関数の係数を用いて、降雨浸透に伴う岩盤斜面の状態変化のモニタリングが可能であることを示した。

Key words : 岩盤斜面 rock slope, 破碎帯部 fracture zone, 見かけ比抵抗 apparent electric resistivity, 連続計測 continuous measurement

1. はじめに

岩盤斜面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、これら不連続部の性状に支配されることはよく知られていることである。しかし、その挙動を精度よくモニタリングできる手法は、現時点においては確立されておらず、先の北海道豊浜トンネルでみられたような岩盤崩落を未然に防ぐためにも、この分野の研究が必要とされている。一方、電気探査比抵抗法による地下水計測は、これまで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がいくつかみられる。和田ほか¹⁾は地表に配置したアレイ式の電極系を用いた比抵抗法で、シラス台地における降雨が地中に浸透する様子のモニタリングを実施し、地表付近の土壌水分の移動についての検討を行っている。また竹内ほか^{2),3)}は、地表に配置したアレイ式の電極系を用いた比抵抗法で、White⁴⁾は面的な電極系を用いた比抵抗法で、トレーサーとして地面内に注入した低比抵抗流体の移動のモニタリングを実施し、地下水の流動速度や経路の把握を行っ

ている。さらに高倉⁵⁾は、地下水位変化と比抵抗変化のモニタリングを試みている。これらの中で、直接降雨の浸透状況を連続的に測定したのは1)の文献のみで、シラス台地における降雨の浸透状況が、電気探査の連続計測によって捉えられている。しかし、降雨の量と比抵抗の変化との関係については、言及していない。

本研究は岩盤斜面内の破碎帯や地層境界部を対象として、斜面上部から下部にかけて95mの計測線を設けてダイポール・ダイポール電気探査法によって連続的に見かけ比抵抗を計測し、各測点の見かけ比抵抗変化と降雨との関係について検討を行い、とくに破碎帯部におけるこれらの関係について考察した。

2. 岩盤斜面の地形・地質と計測線

計測現場は大阪府高槻市の有馬一高槻構造線の北側に位置し、標高150~200mの丘陵地で比較的不規則な稜が連続する。計測現場付近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結果より、これら岩盤のボーリングコアから得られた一軸圧縮強度は、約600~800 kgf/cm²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はその計測線の断面を表している。この計測線上には1

* 関西大学工学部 Faculty of Engineering Kansai University

** (株)ニュージェック New Jec. Inc.

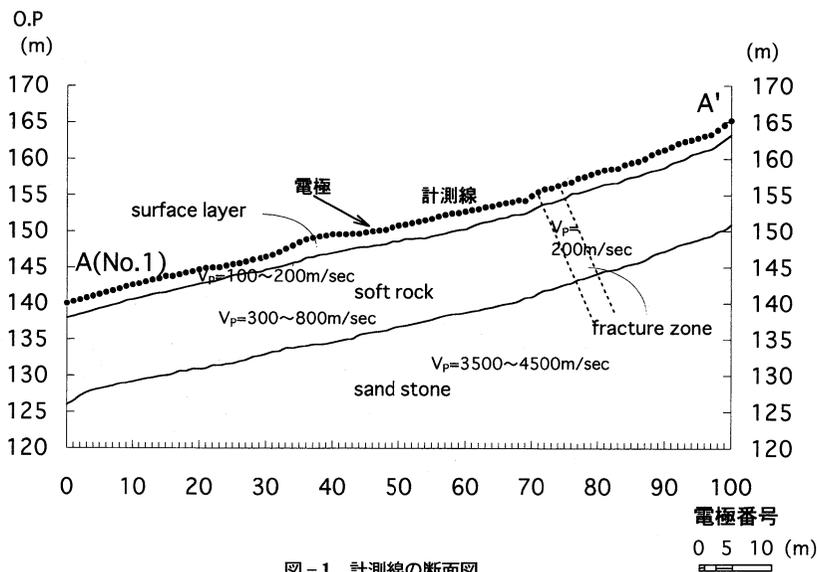


図-1 計測線の断面図

m 間隔で96本の電極が配置され、斜面下部より電極番号 No. 1, No. 2...としている。計測線の全長は95 m, 標高差24.5 m, 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ところ地表面から約 1~4 m 程度までは、弾性波速度が100~200 m/sec, 深度 4~14 m 程度までは弾性波速度が300~800 m/sec, さらに深度14~15 m 以深では、弾性波速度は3,500~4,500 m/sec となった。また弾性波探査の結果より、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。

図-2 は、計測線の電極番号 No. 1 から約10 m 離れた斜面法尻部でのボーリング結果を示したものである。この図より、上部から粘土混じりの風化土、亀裂が発達した軟岩層、そして砂岩が主体の岩盤の順となっている。本ボーリング結果は、図-1 に示した弾性波探査による速度断面とほぼ対応しているものと考えられる。また、このボーリング孔内の地下水位は-3.5 m 程度で季節的な水位の変化は小さい。

電極配置は図-3 に示すようなダイポール・ダイポール電極配置を用いた。これは電位電極間および電流電極間を a と一定とし、 C_2P_1 間を a の整数倍 (n) として、探査を行う手法である。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, n : 整数

電極間隔は 1 m, 電極本数は96本として、最大測定深度

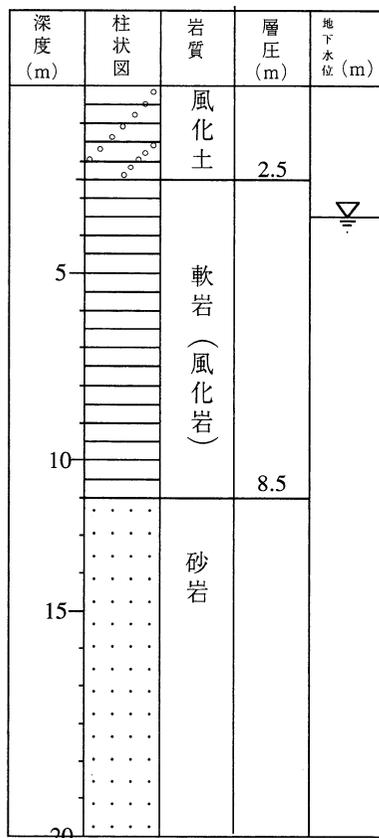


図-2 ボーリング柱状図

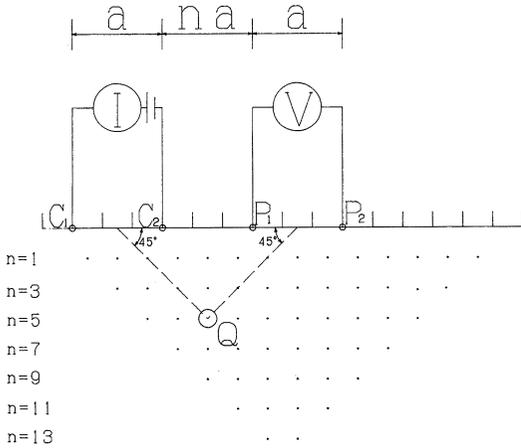


図-3 ダイポール・ダイポール電極配置図

は30 mである。しかし、各測定点では測定値の精度を向上させるため、計測は1点に同じ交代直流を4回電流電極に与えて重畳させて行うために多くの時間を必要とする。このため可能な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、測定対象とした計測

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 (14bit A/D変換器使用)

点は289点(図-5参照)とし、電極間隔 $a=2\text{ m}$ 、また $n=1, 3, 5, 7, 9, \dots, 21$ とした。これより最大の見かけ深度は22 mとなり、1回当たりの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。また、ある計測期間について一断面の見かけ比抵抗の測定間隔は6時間ごとに連続的に行った。また、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、表面がさびている鉛棒を用いた。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ことから、電極としてこれを採用した。

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に示すとおりである。

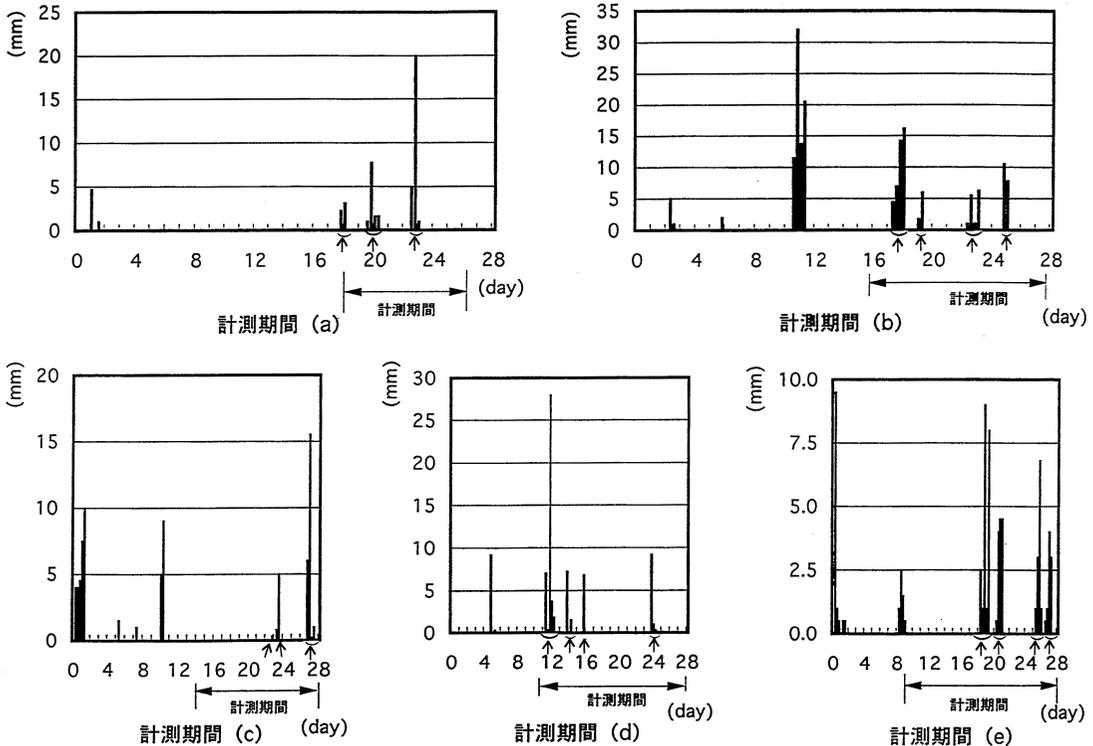


図-4 各計測期間の降雨状況

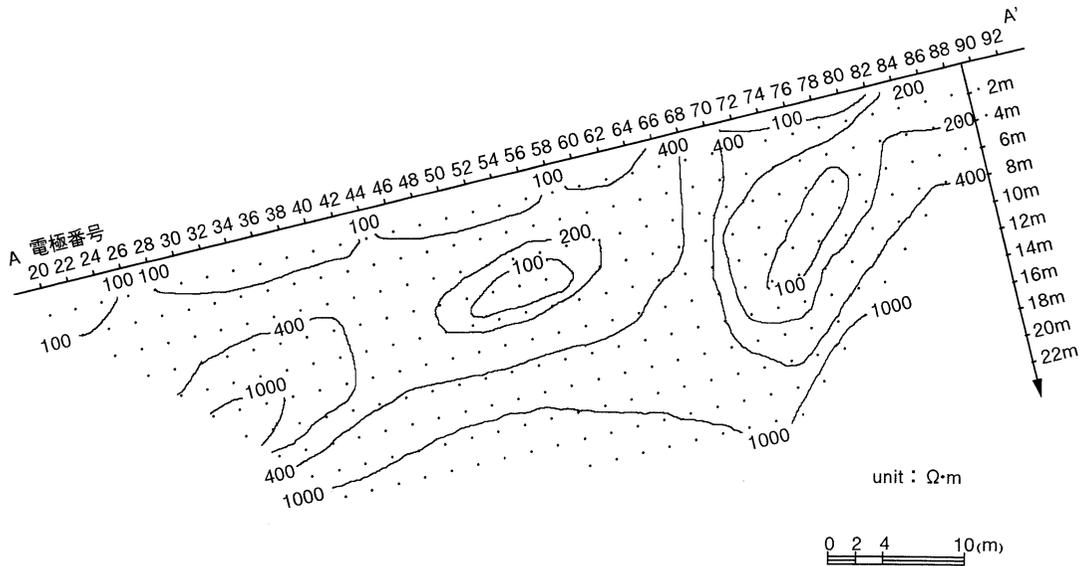


図-5 計測期間(a)における計測開始直後の等見かけ比抵抗分布曲線

3. 各計測期間前および期間中の降雨

見かけ比抵抗計測は、図-4に示す(a)から(e)までの5つの降雨事象(以後の計測期間は、計測期間(a), 計測期間(b), …と表すことにする)について行った。これら図中の降雨は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。各図に示した矢印は各計測期間で解析対象とした降雨である。計測期間(a)は計測を開始するまでは、17日間降雨が観測されておらず、地盤は比較的乾燥した状態にあったと思われる。また、この計測期間は約10日間で、このときの最大の6時間降雨量は20 mmである。計測期間(b)は、計測開始の4~5日前に、79 mmの24時間降雨量を観測しており、観測前の地盤は湿潤状態にある。この計測の期間は約13日間で4回の連続的な降雨が観測されており、最大の6時間降雨量は16 mmである。計測期間(c)は、計測開始の4日前には12時間で14 mmの降雨量を記録し、さらにそれより9日前には24時間で約30 mmの降雨を記録していることから、計測開始時の地盤は湿潤状態にあったと思われる。また、この期間の解析対象とした始めの降雨は0.5 mmと低い値を示しているにもかかわらず、比抵抗値は減少していることから、解析対象の降雨とした。この原因については、降雨の観測誤差等が考えられる。しかし、計測器には問題はなく、また、得られた見かけ比抵抗値の値にも大きな誤差は見られないことから、本降雨

を採用した。計測の期間は14日間で、降雨は計測の後半に観測され、最大の6時間降雨量は約15.5 mmである。計測期間(d)は、計測開始の5日前に6時間で約9 mmの降雨が観測されているが、その前は無降雨の期間が一週間以上続いていたことから、計測開始時点の地盤は、比較的乾燥していたものと考えられる。計測の期間は約18日間であり、期間中における最大の6時間降雨量は約28 mmである。計測期間(e)は、計測開始の直前に5.5 mmの降雨が観測され、さらにそれより6~8日前にかけて24時間で約12 mmの降雨が認められていることから、計測開始時の地盤は湿潤状態にあるものと考えられる。また計測の期間は19日間で、その間の最大の6時間降雨量は9.2 mmである。

以上より、計測開始時点において、地盤が乾燥状態にあるのが計測期間(a)と(d)であり、湿潤状態にあるのが計測期間(b), (c), (e)であると考えられる。

4. 降雨に伴う見かけ比抵抗の時間的変化

図-5は計測期間(a)における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。ここで、この擬似断面の深度は、図-3に示したように表されるもので、真の深度とは若干異なることがあるので、見かけの深度とする。この擬似断面の表面は、実際の平均の斜面傾斜と同様に、水平面に対して14°傾斜させている。

図-6は図-5と同様、計測期間(a)における計測開始後6日経過した時点の見かけ比抵抗の等分布曲線を示している。計測期間(a)では3回の降雨が観測されて

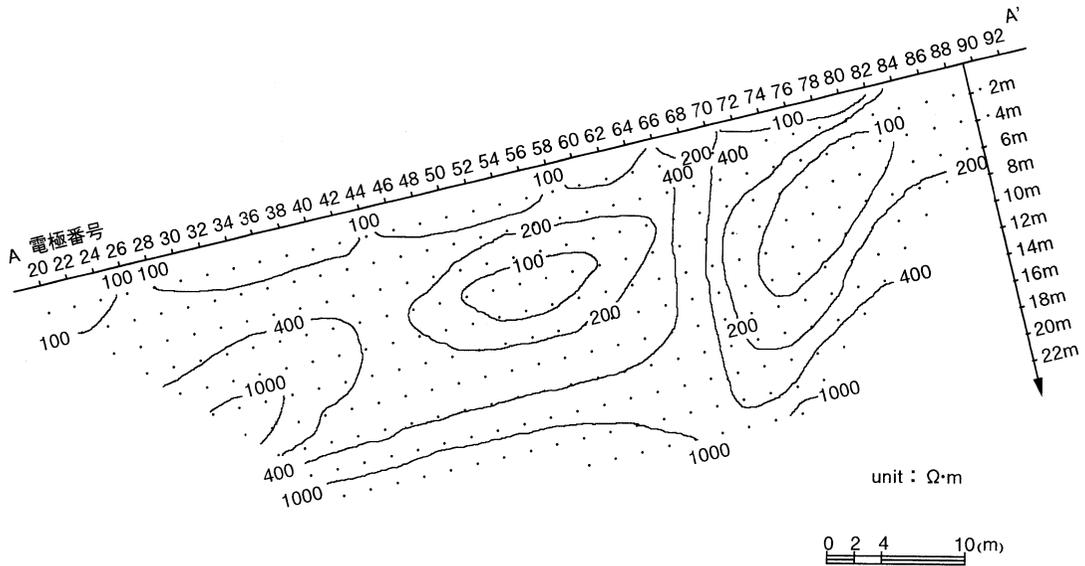


図-6 計測期間(a)における計測開始後6日経過した後の等見かけ比抵抗分布曲線

いるが、図-6の見かけ比抵抗分布は、3回目の降雨直後のものである。図-5と図-6とを比較すると、降雨後は全体的に表層部を除き、見かけ比抵抗は低くなっているようにみられるが、場所によってその度合いは異なっているように思われる。とくに破碎帯部と思われる付近の見かけ比抵抗部の変化が大きいことが認められる。

図-7は、計測期間(a)における電極番号60番、見かけ深度4m、電極番号74番、見かけ深度6m、電極番号70番、見かけ深度14m(以後No. 60-4, No. 74-6, No. 70-14と表す)の見かけ比抵抗の時間変化を表している。ここで各測点のナンバーは電極番号、後の数字はその電極番号における断面表示上の深さ(m)を表している。まずNo. 60-4においては、降雨に対して見かけ比抵抗はほとんど変化が見られず、ほぼ一定の値を示している。No. 74-6およびNo. 70-14では降雨があると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。これはこの斜面においては表層部からの雨水の浸透は少ないためと考えられる。No. 74-6やNo. 70-14のような降雨が観測されると見かけ比抵抗が減少を示す測点は、この斜面内では十数点(図-13参照)見られ、それら測点の表示位置は、破碎帯や地層境界部に一致している。ほかの測点では、見かけ比抵抗と降雨とは必ずしも顕著な関係は見い出されなかった。No. 74-6は破碎帯部、No. 70-14は地層境界部の見かけ比抵抗変化を反映しているものと思われる。とくに前者では破碎帯部における、地表面からの雨水の

浸透が、ほかの表面に比べ大きいことから、降雨に対する見かけ比抵抗の低下が顕著に現れたものと考えられる。

5. 降雨とそれに伴う比抵抗変化

図-7に示したように、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、次に示した見かけ比抵抗変化率 α を各測点で求めた。

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

ここで、 α : 見かけ比抵抗変化率(%)

ρ_s : 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-8は、計測期間(a)における各測点の降雨量と見かけ比抵抗変化率 α との関係を示したものである。この図より、降雨量が多くなると見かけ比抵抗変化率 α は増加しているが、その増加傾向は各測点によって異なっていることがわかる。しかし、これらの関係は次に示すような指数関数に近似することができる。

$$\alpha = m \cdot r^n \quad (3)$$

ここで、 r : 降雨量(mm)

m, n : 各測点によって決まる定数

図-9は、No. 74-6における各計測期間での降雨量

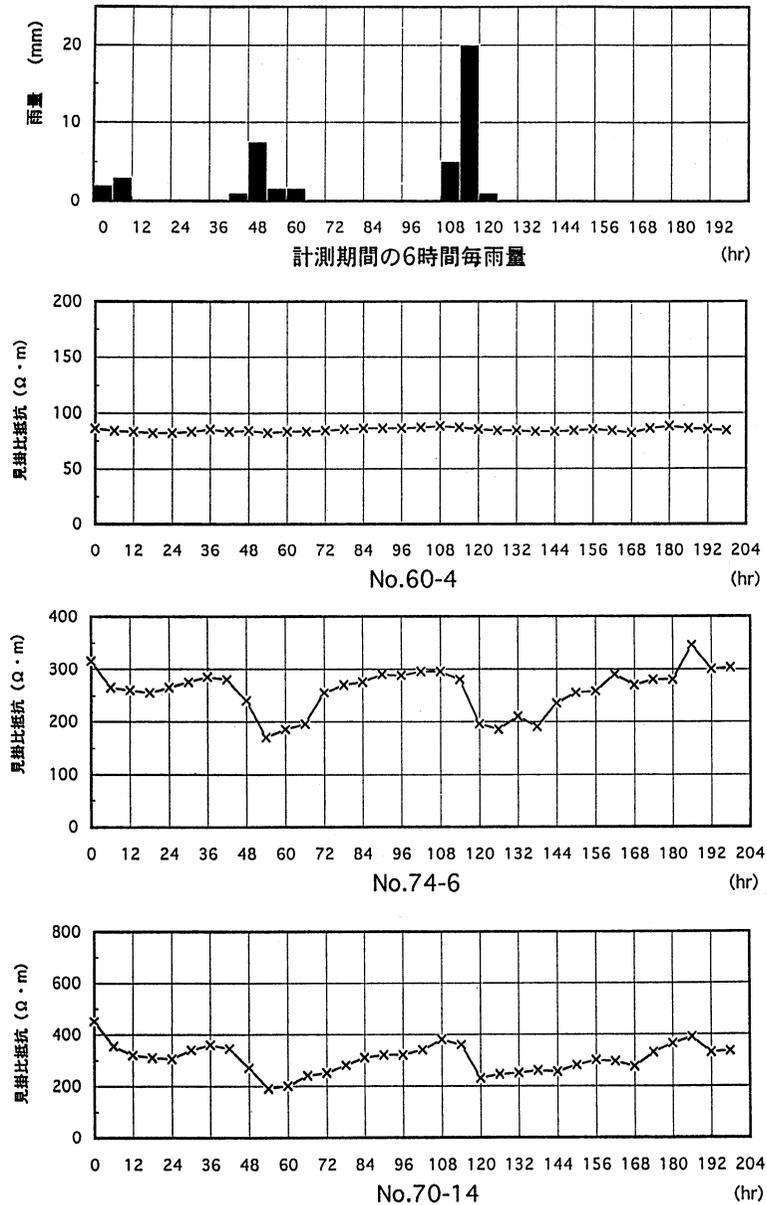


図-7 計測期間(a)における降雨に伴う比抵抗変化

と見かけ比抵抗変化率との関係を示したものである。この図より、各計測期間の見かけ比抵抗変化率と降雨量との関係は式(3)に近似できるが、その増加傾向は異なっている。この原因は式(2)における ρ_s の値によるものと考えられる。すなわち ρ_s は、各計測期間によって異なり、先行降雨量が多い場合、もしくは先行降雨量と計測開始時期がさほど離れていない場合には、 ρ_s は一般的に小さい値となる。したがって、図-9に示した計

測期間(b), (e)は上述したケースにあたるものと考えられる。そして計測期間(a)~(e)を含め、No. 74-6における計測したすべての見かけ比抵抗の中で最も高い見かけ比抵抗が得られた計測期間(a)の ρ_s を計測期間(b)~(e)にも適用すると、No. 74-6の降雨量と見かけ比抵抗変化率との関係は、図-10に示すように、計測期間中における雨の降り方に関係なく1つの指数関数として表すことができ、次式が求められた。

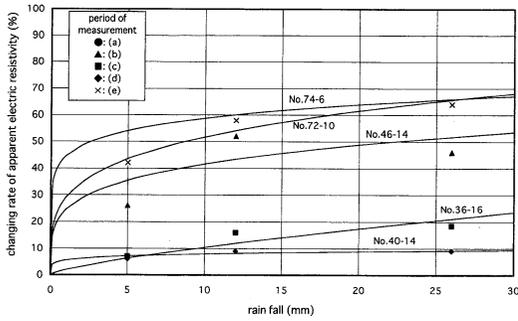


図-8 計測期間(a)における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係

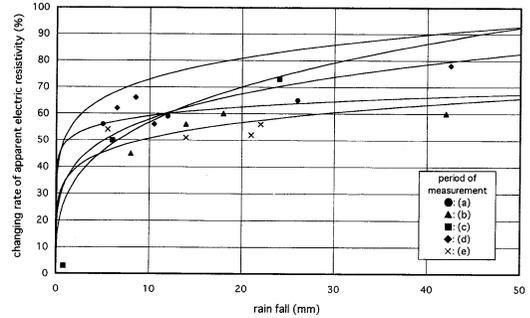


図-11 No. 70-14における降雨量と見かけ比抵抗変化率との関係

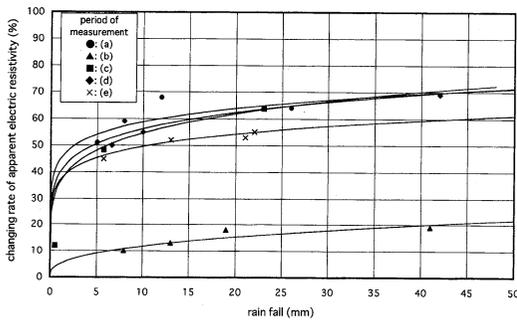


図-9 No. 74-6における降雨量と見かけ比抵抗変化率の関係

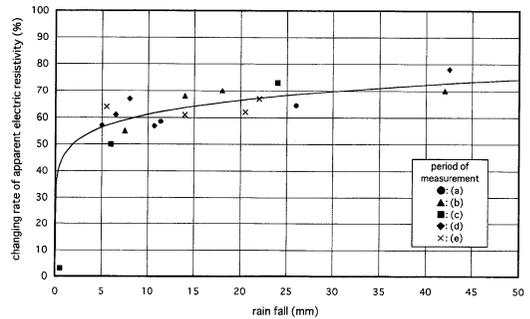


図-12 No. 70-14における降雨量と見かけ比抵抗変化率との関係
(計測期間(a)の ρ_s をすべてに適用)

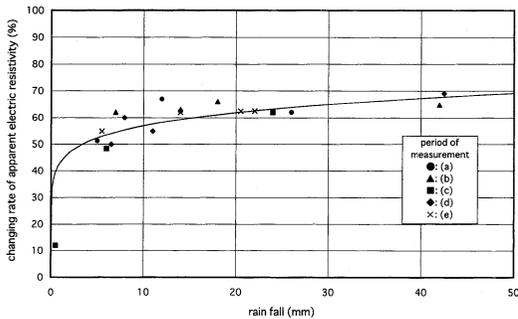


図-10 No. 74-6における降雨量と見かけ比抵抗変化率との関係
(計測期間(a)の ρ_s をすべてに適用)

$$\alpha = 43.2 \cdot r^{0.12} \quad (4)$$

図-11は、No. 70-14における各計測期間の見かけ比抵抗変化率 α と降雨量 r との関係を示したものである。この図より各計測期間の α と降雨量 r との関係はNo. 74-6と同様、指数関数的な変化傾向がみられるが、計測期間によってその傾向が異なっているのがわかる。これから、見かけ比抵抗変化率を求めるために必要な ρ_s について計測期間(a)における値をすべての計測期

表-2 地層境界部付近の m, n

測点	m	n
No. 36-16	3.91	0.15
No. 40-14	5.50	0.16
No. 46-14	24.5	0.23
No. 50-12	3.65	0.18
No. 54-16	12.6	0.09
No. 58-14	18.8	0.09
No. 62-16	3.18	0.08
No. 64-18	43.2	0.09
No. 68-14	62.0	0.12
No. 68-18	22.0	0.12
No. 72-12	42.7	0.11

間に適用して α を求めて、その α と降雨量との関係を示したのが、図-12である。これより、No. 74-6の場合と同様、 α と降雨量は計測期間に関係なく一つの指数関数として表すことができ、次式が求められた。

$$\alpha = 46.4 \cdot r^{0.12} \quad (5)$$

ここで式(4)と(5)の m, n を比べると、 m の値は若

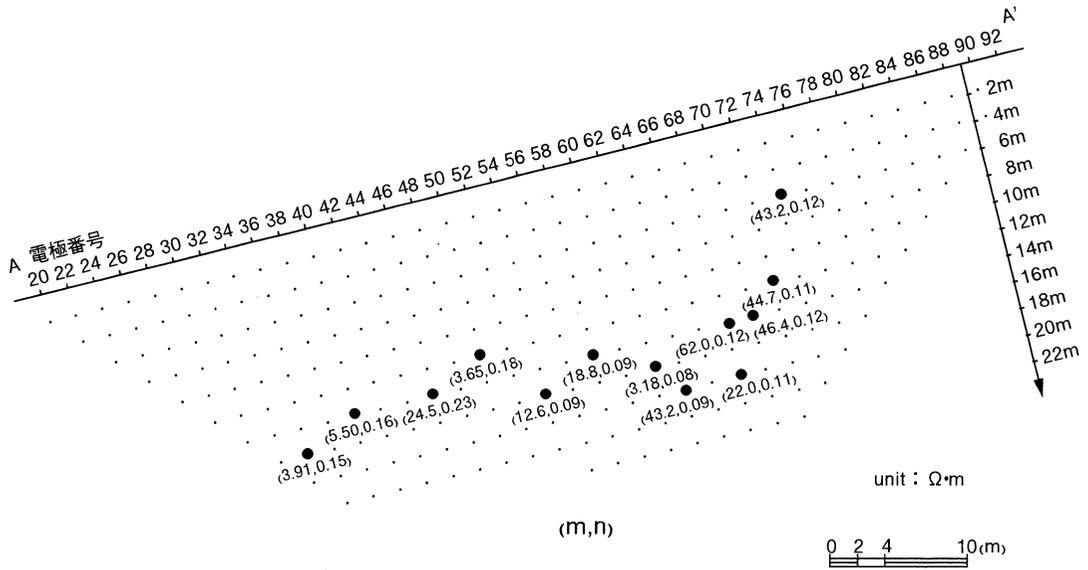


図-13 疑似断面における m, n の分布

干異なっているが、 n は 0.12 と同じ値を示している。これは、測点 No. 70-14 が地層境界部に対応しているとともに破砕帯部に近いことから、 m の値は若干大きくなったものと考えられる。また、破砕帯部からの降雨の流入は、地層境界部にまで達しているものと推定される。

次に、破砕帯部より下流側にあり、地層境界部の見かけ比抵抗変化率と降雨量との関係について、No. 74-6、No. 70-14 と同様に、 ρ_s について計測期間(a)の ρ_s を用いて見かけ比抵抗変化率 α を算出し、降雨量 r との関係を表式(3)に近似させて m, n を求めた。その結果を表-2 に示す。図-13 は、これらの測定点を疑似断面に表し、それぞれの m, n を示した。この図より、見かけ比抵抗変化率と降雨量とが式(3)に近似できる測定点は、図-1 に示した弾性波探査による地層断面の破砕帯部と地層境界部に大方対応しているものと考えられる。またこれらによると、地層境界部に相当する各測点の m, n は種々な値をとり、一定の値を示さない。これは、地層境界部が場所によって地質条件が異なっていること、計測線部は 2 次元断面なのに対し、実際の地下水流動は平面的な方向にも流れること、および測定が表示上の位置であり、その場所の見かけ比抵抗変化率そのものを示すわけではないことなどによるものと考えられる。しかし、No. 68-14 の測定点においては、破砕帯部に近接しているためか、 n は No. 74-6、No. 70-14 と同様の値を示している。また、No. 72-12 の測点は破砕帯部に位置していると推定されるが、 n は No. 74-6、No. 70-

14 と若干異なった値を示しているが、ほぼ同様の値を示しているとみなして差し支えないものと思われる。

ここで m, n がどのような物理量を表しているのか考察する。 m は 0 から 1 mm の降雨に対する見かけ比抵抗変化率の変化の大きさによって決まり、破砕帯部に対応する測点では値が大きいことから、降雨に対する見かけ比抵抗の変化が大きいのことを示すと考えられる。 n は降雨量に伴う見かけ比抵抗変化率の増加の割合によって決まり、地質状況が同様な場所では、ほぼ同じ値を示すものと考えられる。

これより、この計測対象とした岩盤斜面においては、破砕帯部では、 m は比較的大きな値を示している。また、 n は地層境界部において、特徴的な傾向はみられないが、上述したように破砕帯部もしくはそれに近い地層境界部では、 n の値は同じ値となっていることから、これが破砕帯部の降雨浸透の特徴を表すものと考えられる。例えば降雨に伴って、破砕帯部もしくは地層境界面に状態変化が生じた場合、これら不連続面の降雨浸透特性は大きく変化することは十分予測できる。今回の測定対象とした岩盤斜面は、とくに危険な斜面ではないので、5 つの測定期間では、岩盤斜面の変形は全く見られなかったことから、上述した推測は確認できなかった。しかし、もし破砕帯部に降雨による状態変化が生じたなら、その変化は m, n の値にも変化が見られることは十分に推測される。

これより、岩盤斜面内に破砕帯あるいは不連続面が存在している場合、比抵抗法(ダイポール・ダイポール法)

による降雨浸透に伴う岩盤斜面の状態変化のモニタリングが m, n の値に注目することによって、可能であることが示唆された。

6. ま と め

岩盤斜面において、降雨に伴う見かけ比抵抗変化を連続的に計測を行い、見かけ比抵抗変化率 α という指標を提案し、不連続帯部の情報を反映するある測定点における降雨量と α との関係について検討した。その結果、降雨量と見かけ比抵抗変化率は、ある一連の降雨事象において、その降雨事象直前の見かけ比抵抗 ρ_s を基準として α を算出すると、降雨量と α は指数関数的な関係を有し、その関係は雨の降り方によって異なることが認められた。また、対象とした計測期間の内、最も高い ρ_s を基準として、すべての計測期間の見かけ比抵抗変化率 α を求めると、 α と降雨量とは一つの指数関数で表すことができる。これは同一の破碎帯部の異なった測定点においても同様な方法で α と降雨量との関係を求めると、ほぼ同じ量の係数、指数を持った指数関数で表されることから、測定対象とした破碎帯部固有のものであることが判明した。これよりある岩盤斜面内の破碎帯部

において、降雨量と見かけ比抵抗とはその破碎帯部においてそれ固有の指数関数として表すことができることが認められた。この関数は地山の状態の変化に伴い、変化することが推測されるので、岩盤斜面の安定性の監視に適用できる可能性について示した。

参 考 文 献

- 1) 和田卓也, 井上 誠, 横田修一郎, 岩松 暉(1995): 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.
- 2) 竹内睦雄, 長江亮二(1988): 電気探査による地下水流動モニター法の研究, 応用地質, Vol. 31, No. 1, pp. 12-18.
- 3) 長江亮二, 竹内睦雄(1990): 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.
- 4) White, P. A.(1988): Measurement of ground-water parameters using salt-water injection and surface resistivity, Groundwater, No. 26, pp. 176-186.
- 5) 高倉伸一(1991): 比抵抗法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.

(1996年12月2日受付, 1997年3月13日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol. 38, No. 2, pp. 74-82, 1997

Relationship between Apparent Electric Resistivity and Rain Fall in Fracture Zone of Rock Slope by Continious Measurement

Harushige KUSUMI, Makoto NAKAMURA and Kazuhiko NISHIDA

Abstract

It is well known that the groundwater in rock slope mainly flow joint, fracture zone, fault and discontinuity plane. In this paper, using Dipole-Dipole electric resistivity method, the electric resistivities are continuously measured in a rock slope during five rain fall patterns with the measuring line crossing a fracture zone, and the relationship between the change of apparent electric resistivity and the rain fall are discussed.

As the results, making a comparison between fracture zones and the other rock mass, the characteristics of the change of apparent electric resistivity is quite different, and especially, it is recognized that the relationship between the change of apparent electric resistivity and rain fall can be approximated with an exponential function.

Key words : rock slope, fracture zone, apparent electric resistivity, continious measurement