

携帯型貫入試験機による風化急斜面の地盤強度の評価と

危険度判定への応用に関する研究



所属名: 広島大学大学院
工学研究科

発表者: 土田 孝

1. はじめに

広島県では古くから急勾配の斜面やそのふもとが生活に利用されているが、斜面を覆う風化花崗岩（まさ土）層が豪雨時に容易に不安定化するため、全国でもっとも多い約 32,000 の土砂災害危険箇所が存在する。土砂災害の予測と対策は地域の最も重要な防災課題のひとつである。

広域的な土砂災害の危険度予測の方法として、降雨量を用いた警戒避難のための雨量指標が一般に用いられている。しかし、雨量データを用いた土砂災害危険度の判定は、雨量計の設置密度から判定の対象がある程度の広さを有する地域にならざるを得ない。実際には、雨量指標が限界値を超えても崩壊が発生する斜面はその地域のごく一部の斜面であり、崩壊がまったく発生しない場合もある。一方で、雨量がその地域で設定されている限界値を超える前に崩壊が発生する場合もある。現行の警戒避難の判定精度を高めるには、雨量の測定密度の向上やレーダーアメダスなどの降雨予測技術を組み合わせることとともに、何らかの方法で危険箇所における斜面内部の地盤の特性に関する情報を活用することが必要であると考えられる。

土質力学的観点から考察すると、降雨時に斜面が崩壊する原因は、斜面内の地下水位の上昇によって有効土被り圧が減少することと地盤の粘着力 c_a が降雨により低下することである。広島県におけるまさ土斜面の過去の被災事例を参考にすると、崩壊斜源頭部の勾配は $30^\circ \sim 50^\circ$ 、層厚が 0.5m~2.0mに分布し、源頭部よりも下がった斜面では勾配は緩やかになり、層厚はもう少し大きくなる。したがって、まさ土斜面の安定では表層から概ね深度 3m程度の範囲での強度定数が問題となるといえる。この深度は通常の土質調査の対象深度から比べるとかなり浅いが、一方、勾配 30° は相当な急勾配であり、かつ自然まさ土斜面では密に植生が繁茂しているため、作業性の面で土質調査には大きな制約がある。

本研究は、新たに軽量動的コーン貫入試験機を用いて個々の斜面内地盤の強度定数を把握し、雨量データと組み合わせることにより、降雨時の斜面の危険度評価の精度を向上し、警戒避難指示における空振り率の低下と警戒避難行動の徹底を実現することを目的として実施した。

2. 軽量動的コーン貫入試験装置の概要

本調査では、フランスで主に盛土の施工管理を目的として開発された軽量動的コーン貫入試験装置を導入し、原位置貫入試験への適用性を検討した。

軽量動的コーン貫入試験装置の概要を図-1 に示す。軽量動的コーン貫入試験装置の特徴としては総重量が約 20kgと小型軽量でデータ収録が自動であること、試験時間が短いこと、ハンマーを通じて地盤の硬さの感覚が作業員の手に伝わることなどが挙げられる。先端コーンには断面積が $2\text{cm}^2, 4\text{cm}^2, 10\text{cm}^2$ のものがある。 2cm^2 のコーンはロッドの先端に剛結するタイプのものであり、 $4\text{cm}^2, 10\text{cm}^2$ のコーンは分離している。試験を実施するときは、図-1 のように、ヘッドと中央演算装置(CAU)、データロガーをケーブルで接続する。中央演算装置を調査対象地盤上に置き、設けられた穴にコーンを先端につけた 1 mのロッドを通しデータロガーの設定を行って調査を開始する。このとき、中央演算装置を地盤上に水平に置くように注意する。中央演算装置(CAU)に埋め込まれている巻取り式テープをヘッドにつなぐことでヘッドへの打撃

1 回ごとの貫入量が計測できる。貫入量の合計が 50(cm) 増えるごとにロッドを 1 本追加する。このときデータロガーにロッド追加処理をすることで貫入抵抗値の計算を補正できるようになっている。

ヘッド部分には加速度計が内蔵されており、この部分に専用のハンマーを用いた打撃が加えられると衝撃の加速度が計測されるようになっている。この加速度と同時に計測された貫入量から、中央演算装置において貫入抵抗値が計測され、貫入量と共にデータロガーに出力・記録される。

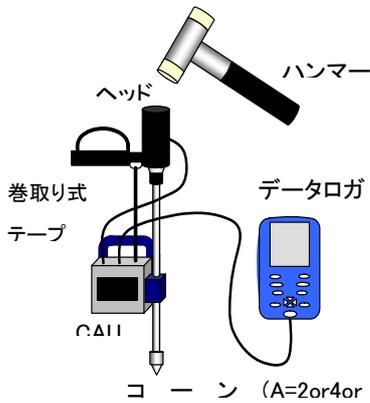


図-1 軽量動的コーン貫入試験装置

貫入抵抗値 q_d の計算は次式を用いる。

$$q_d = \frac{1}{A} \frac{1}{1 + \frac{P}{M}} \frac{1}{2} MV^2 \frac{1}{x_{90^\circ}} \quad (1)$$

ここに、 q_d ：貫入抵抗値 A ：コーン断面積 M ：ハンマーの打撃部分の質量
 V ：ハンマーの衝突速度 P ：計測器の被打撃部分の質量
 x_{90} ：1 回の打撃によるコーン貫入量(コーン角度 90°)

である。なお、原位置斜面で貫入試験を行った際には、自然斜面に異物を残さないためにロッドと剛結できる 2cm^2 のものを使用した。

3. ががら山観測地における貫入試験の実施と簡易貫入試験結果との比較

軽量動的コーン貫入試験装置の自然斜面における適用性を検討するため広島大学構内のががら山観測地において貫入試験を実施した。比較のため自然斜面の調査によく用いられる簡易貫入試験も実施した。ががら山崩壊現場は 1999 年 6 月 29 日の集中豪雨時に斜面崩壊を起こした現場であり、この崩壊渓流の両側に埋設された土中水分量計などを用いて 2001 年 5 月より広島大学によって観測が行われている。

貫入試験結果の一例を図-2 に示す。図-3 は、簡易貫入試験による 10cm 貫入させたときの落下回数 N_d と軽量動的コーン貫入試験装置による貫入抵抗値 q_d (MPa) の比較である。図のように、全体として両者の関係は、

$$q_d = 0.2 \times N_d \quad (2)$$

また、斜面安定で問題となるのは表層の貫入抵抗値が小さい範囲なので、 $q_d \leq 5\text{MPa}$ 、 $N_d \leq 20$ 回の範囲で相関を求めると、

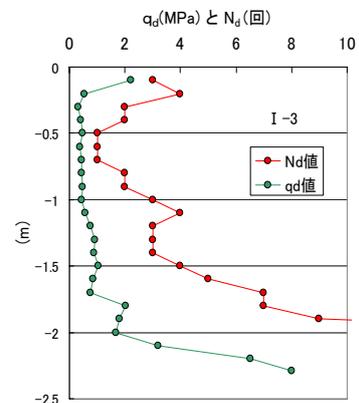


図-2 貫入試験結果の一例

$$q_d = 0.25 \times N_d \quad (3)$$

の関係が得られた(図-4)。

q_d 値は5MPa以下でも有効数字が2桁はあるが、 N_d 値から換算する場合は0.25MPaとなり、分解能の観点からみても表層の緩い地盤を対象とした場合は q_d 値の方が精度はよいといえる。

また、両者の作業効率を比較すると、以下のようにまとめることができる。

- ① 1点の調査に要する時間はほぼ同じである。
- ② 軽量動的コーン貫入試験は1人で試験することができるが、簡易貫入試験は2人で実施する必要がある。また、軽量動的コーン貫入試験の方が、経験のない試験者よりも安全に試験を実施できる。
- ③ 軽量動的コーン貫入試験はオンラインでデータがコンピュータに保存されるため、データ整理が効率的にできる。
- ④ 簡易貫入試験装置に比べて軽量動的コーン貫入試験は強固な地盤に対する貫通力が小さく、 q_d の最大値は35MPaである。

4. 原位置斜面における貫入抵抗値 q_d の空間分布

自然まき土斜面において地盤の強度特性がどのように変化しているか調べるため、がら山崩壊現場の東側に平面的に55箇所の計測用格子点を設置し、各点で軽量動的コーン貫入試験装置を用いた貫入試験を行った。

格子点の間隔は一辺5m間隔とし、全体で20m×50mの範囲を調査対象とした。各格子点には杭を立てており、貫入試験はその杭より大きくとも半径20cm以内の範囲で行った。

55点の計測値を深度～貫入抵抗値 q_d の傾向から以下の6つに分類することができた。

- A：(貫入抵抗値/貫入深さ)が約1(MPa/m)
- B：(貫入抵抗値/貫入深さ)が約2.5(MPa/m)
- C：(貫入抵抗値/貫入深さ)が約5(MPa/m)
- D：深さ2mまで q_d は最大1MPa それ以深で急上昇

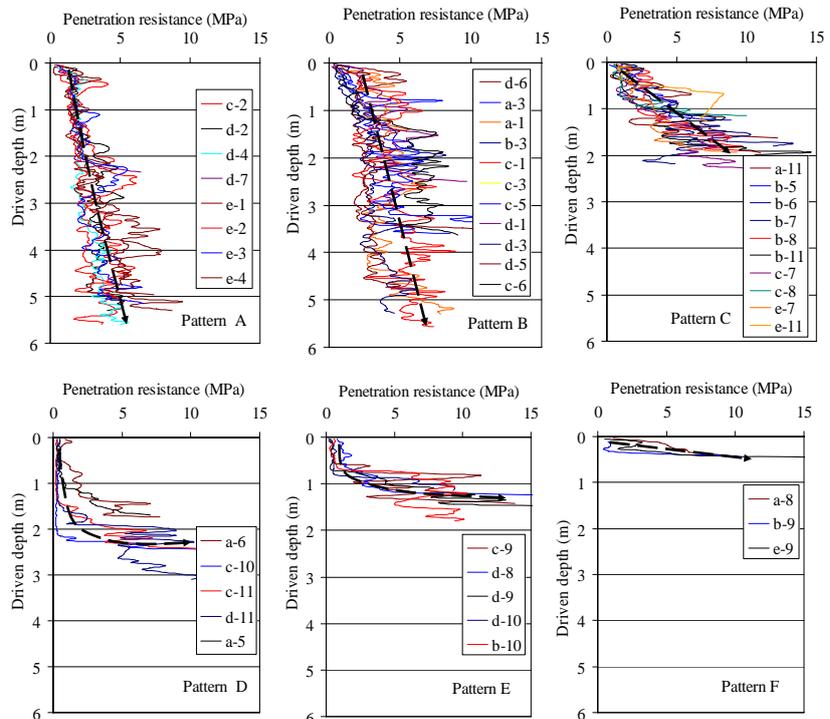


図-5 貫入抵抗値の傾向の分布

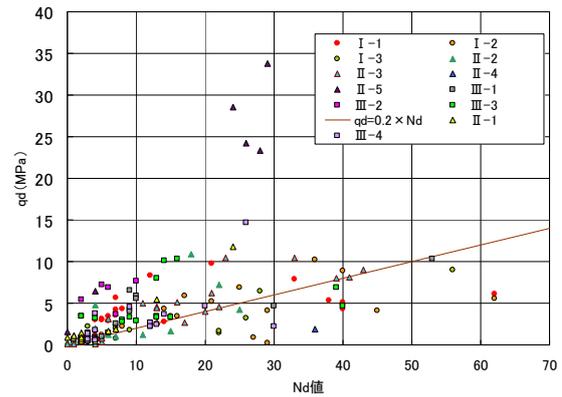


図-3 N_d と q_d の比較(全データ)

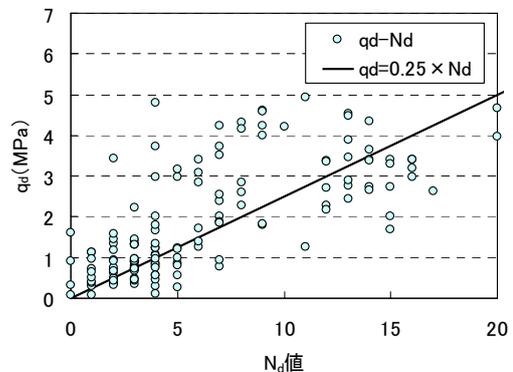


図-4 N_d と q_d の比較($N_d \leq 20$)

E：深さ 1mまで q_d は最大 2MPa それ以深で急上

F：深さ 0.5m未満で $q_d > 5 \sim 10$ (MPa)

図-5には全 55 箇所の深度～貫入抵抗値関係を 6 種類のグループごとに分類して示している。図のように、深さ～貫入抵抗値の傾きが直線的で緩勾配であるのがグループA，中勾配のグループB，急勾配のグループC，緩い曲線を描いて強度が上昇するグループD，急な曲線を描いて強度が上昇するグループE，浅い部分で大きな強度を示すのがグループFである。これらのうちグループD,Eは未風化の花崗岩層の上に緩いまさ土層が堆積したもので、上部の斜面から過去に移動した土が堆積した崖錐層であると推定され、地盤の強度の観点からはもっとも不安定である。しかし、これらの地盤は一度移動しているので緩い傾斜を形成している。一方、グループA,B,Cでは q_d が深さ方向に増加して下部の花崗岩層に至るが、その深さ方向の貫入抵抗値の増加勾配は風化の程度に関連していると推定される。これらの層の安定は q_d 値や豪雨時の地下水発生条件等から工学的に判断する必要があるが、急傾斜を保っていた斜面が豪雨時に崩壊するのはこれらのグループの地盤であると考えられる。グループFの場合は、風化層は非常に薄いので、斜面安定上の問題は無いと考えられる。

図-5に示した貫入抵抗値のグループのうち一点ずつにおいて、降雨が貫入抵抗値に与える影響について調べた。試験の実施日は 2005 年 6 月 11 日、7 月 16 日、10 月 16 日であるが、7 月 16 日における先行雨量が最も多く、次に 10 月 16 日で 6 月 11 日における先行雨量は最小となっている。ここでは 6 月 11 日の測定値を「降雨前」とし、7 月 16 日と 10 月 16 日を降雨後として貫入抵抗値の比較を行った。図-6に貫入抵抗値の降雨前後の比較例を示す。図のように、降雨量が多いほど貫入抵抗値が低下しているが、降雨前後で貫入抵抗値に顕著な変化が見られない場合もあり、今後さらにデータを集めて検討する必要がある。

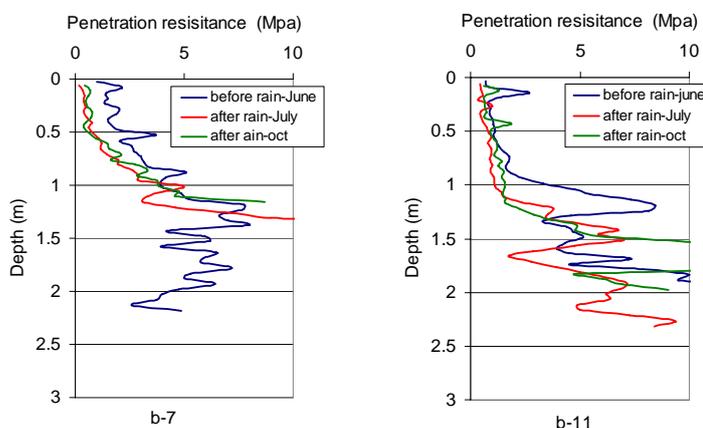


図-6 降雨による貫入抵抗値への影響の調査結果

5. 貫入抵抗値のばらつきに関する検討

前述のメッシュでは 5m 間隔で貫入試験を行ったが、それぞれの貫入抵抗値がその場を代表し得るものかどうかを判断する必要がある。一箇所での貫入抵抗値のばらつきを検定するために代表点を中心に 1m 間隔で 3m×3m の正方形測定メッシュを設定し貫入試験を行った。図-7は貫入抵抗値が比較的大きいグループCに属する測点周辺の試験結果である。図のように、貫入抵抗値が突出している部分を除いて比較すると、試験結果はほぼ同じ傾向を示している。変動係数を求めるとほぼ 0.1～0.25 となり、地盤の強度定数のばらつきとしてはほぼ妥当な範囲に入っているといえる。貫入抵抗値が不連続に突出している理由として礫の存在や木の根が影響していることが考えられるので、貫入抵抗値の下限値付近を地盤強度の代表値として扱うべきと考えられる。

6. 貫入抵抗値と強度定数との関係

軽量動的コーン貫入試験機の貫入抵抗値と、斜面安定解析に用いる強度定数 c_d 、 ϕ_d との関係を求めることを目的として、室内で調整したまさ土試料を用いて一面せん断試験、室内土層に

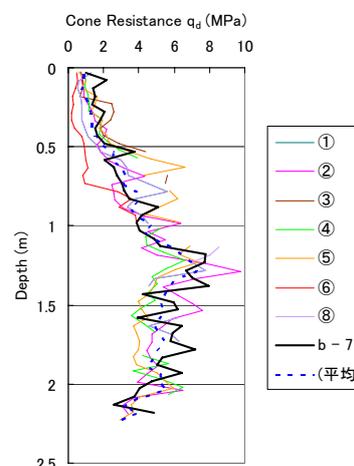


図-7 貫入抵抗値のばらつき

よる貫入試験，不攪乱まさ土試料の三軸圧縮試験を行った。

図-8、図-9 はそれぞれ間隙比と内部摩擦角，飽和度と粘着力の関係である。図のように，飽和度のよらず，内部摩擦角はほぼ間隙比から決まってくる。また，それぞれの間隙比において粘着力は飽和度によって同様の変化をしている。

軽量動的コーン貫入試験機による貫入抵抗値 q_d と間隙比，飽和度の関係を定量的に求めるため，実験室内に模型地盤を作成して貫入試験を行い，試験後サンプリングを実施し，間隙比と飽和度を求めた。模型地盤の寸法は直径 29cm，高さ 20cm のアクリルカラム容器を積み上げて 120cm として，その中で試料を突き固めて作成した。

試験結果を飽和度ごとに貫入抵抗値－間隙比関係のグラフを描き，図-10 に示した。図のように，飽和度が大きくなると，一定の間隔で貫入抵抗値－間隙比関係の曲線が間隙比の密な方向に移動しており，貫入抵抗値と地盤の飽和度がわかれば間隙比を求めることができる。さらに，地盤の飽和度と間隙比がわかれば，図-8，図-9 から内部摩擦角，粘着力を求め，飽和時の粘着力を推定することができる。ただし，貫入試験時の飽和度がわかっていることが条件となるが，晴天が続いた地盤状態では一般的に飽和度 S_r は 40～60%と考えられるので，安全側の飽和度 $S_r=40\%$ とするか，サンプリングを行って飽和度を求める必要がある。

7. 結論

- 1) 軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値 q_d 値と簡易貫入試験の N_d 値は良好な相関があり， N_d が 10 以下の地盤では q_d 値は地盤強度をより精度よく計測する。
- 2) 軽量動的コーン貫入試験機は一人で携帯して斜面内で調査ができ，計測が自動化されているなど優れた特性を有している。
- 3) q_d 値から地盤の強度を測定する場合，レキなどの影響と考えられる突出点を取り除き，下限値付近の貫入抵抗値に着目すべきである。
- 4) がら山まさ土斜面観測サイト内 55 地点で貫入抵抗値の測定を行い，貫入抵抗値と深度の関係を 6 つに分類した。
- 5) 長期降雨の前後に貫入抵抗値を測定したところ，ほとんどの点で降雨の浸透による貫入抵抗値の減少を確認した。
- 6) 室内で調整した礫分を含まないまさ土試料を用いた一面せん断試験を実施した結果，内部摩擦角は飽和度によって大きく変化せずほぼ間隙比によって決まること，各間隙比において粘着力が飽和度と一義的な関係があることがわかった。

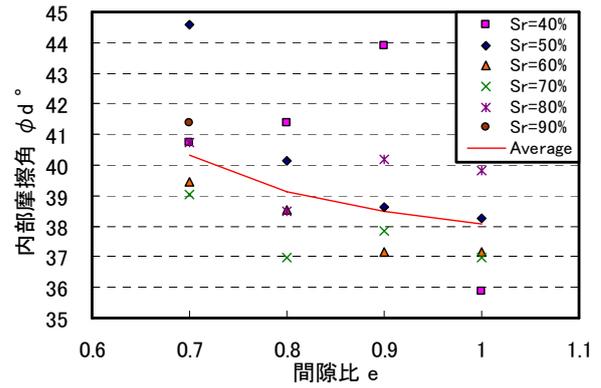


図-8 間隙比，飽和度と内部摩擦角の関係

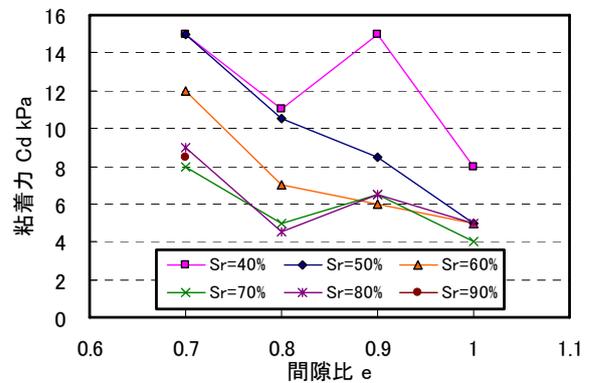


図-9 間隙比，飽和度と粘着力の関係

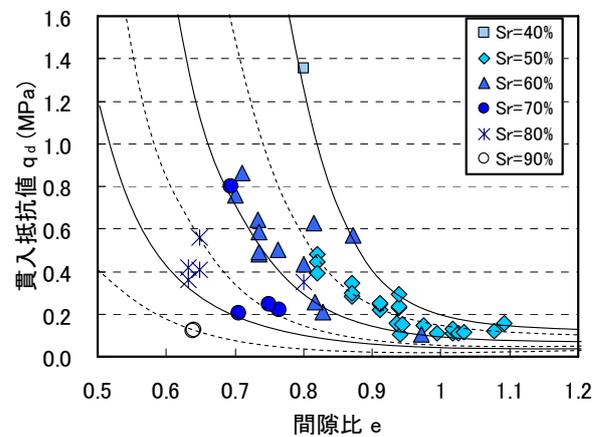


図-10 間隙比，飽和度と貫入抵抗値の関係

7)室内貫入試験の結果、 q_d 値は間隙比と飽和度に対して密接な関係を持つことがわかった。これらの関係を用いると、地盤の間隙比がわかれば q_d 値より地盤の内部摩擦角と現在および豪雨時の粘着力が推定できる。

〈参考文献〉

- 1) (社)地盤工学会中国支部まさ土地帯の風化及び降雨特性と斜面災害に関する研究委員会；まさ土地帯の風化及び降雨浸透特性と斜面災害に関する研究報告書，pp.1～11，2003.