

## 簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験による まさ土斜面の地盤調査

### Soil Investigation of Masado Slopes by Portable Dynamic Cone Penetration Tests and Lightweight Dynamic Cone Penetration Tests

土井豆聡之 Satoshi TSUCHIIZU (広島大学大学院工学研究科)  
 土田孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)  
 加納誠二 Seji KANO (広島大学大学院工学研究科)  
 中井真司 Shinji NAKAI (復建調査設計(株))  
 竹内次郎 Jiro TAKEUCHI ((株)ダイヤコンサルタント)

警戒・避難のための土砂災害危険度評価には雨量指標が用いられることが多いが、同様の降雨があったと考えられる近隣斜面でも崩壊するものと崩壊しないものが存在するなど、斜面の地盤特性の違いが危険度に与える影響は極めて大きいと考えられる。このため、危険度評価の精度向上のためには地盤特性指標と雨量指標を組み合わせたことが重要である。本論文では、地盤特性指標を評価する手法として簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験をとりあげ、過去に豪雨災害実績のある広島大学構内の「ががら山」において崩壊斜面の近接地で両試験を実施し、試験結果を比較検討した。

キーワード：貫入試験，現地調査，斜面，まさ土

(IGC : C08)

#### 1. はじめに

広島県には花崗岩が風化したまさ土が広く分布する。風化が進行したまさ土は降雨時の強度低下が著しく、斜面崩壊が発生しやすい土質である。また広島県内に約 32,000 の土砂災害危険箇所があり、土砂災害に対する危険度が高い地域として知られている。近年、雨量指標を用いた豪雨時の斜面崩壊の危険度評価<sup>1)</sup>が試みられているが、その精度を向上させるには個々の斜面の地盤特性を考慮する必要がある。自然斜面の地盤調査では簡易動的コーン貫入試験が行われることも多いが、従来の簡易動的コーン貫入試験は、その試験値( $N_d$ 値)を地盤強度の評価に用いる手法が十分に確立されていないため、主として表土や強風化土の層厚を求めるためだけの調査として利用されている。

本研究では新しいタイプの軽量動的コーン貫入試験機を自然斜面の地盤調査に適用する。この軽量動的コーン貫入試験機は、管<sup>2)</sup>の室内試験結果より、その貫入抵抗値( $q_d$ )を用いてまさ土の強度定数を推定する手法が提案されている。また Athapaththu ら<sup>3)</sup>の研究によると、軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値-深度関係は 6 つのパターンに分類でき、このパターン分類によって斜面崩壊しやすい場所をある程度把握できる可能性が示されている。

本研究では、同一斜面において簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験を実施し、その結果を対比する

ことにより両者から得られる試験値 ( $N_d$  値と  $q_d$ ) の関係を明らかにするとともに、両試験の調査効率を比較することを目的としている。これらの簡易な斜面調査から斜面の力学特性を評価する手法が確立されれば、雨量指標と組み合わせることにより豪雨時の適切な警戒・避難のための判断指標となりうると考えられる。

#### 2. 試験地点

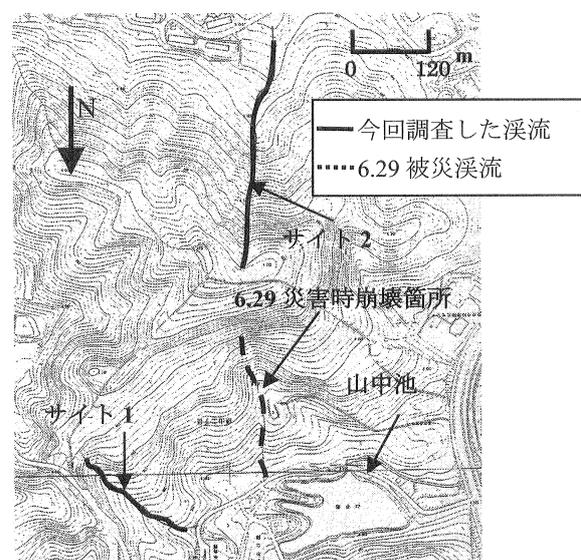


図-1 ががら山地形図

試験地点として、図-1 に示すように広島大学構内にある「ががら山」においてサイト1，サイト2の2箇所を選定した。「ががら山」は1999年の6月と9月の2度にわたり土石流が発生した箇所である。今回は、災害発生箇所に近接する2つの谷地形の中から1/2,500精度の地形図と現地踏査により被災箇所に類似した集水地形を抽出して調査地点とした。

サイト1は長さ約200m、源頭部と谷出口の標高差約40mの南東向きの谷地形であり、サイト2は長さ約400m、源頭部と谷出口の標高差約100mの北向きの谷地形である。

ががら山のまさ土斜面内において軽量動的コーン貫入試験による貫入抵抗値の地盤内分布を調べた結果によると、貫入抵抗値の相関が強い水平距離は11~30mであるとされている<sup>3)</sup>。これらの結果より、貫入試験実施地点を崩壊が発生しやすい谷の源頭部では5m間隔、谷筋の測線では渓谷にそって20m間隔で選定したが、試験地点数はサイト1で24点、サイト2で27点であった。

図-2，3に試験地点の配置を示す。また水準測量より求めた各サイトの断面勾配を図-4，5に示した。

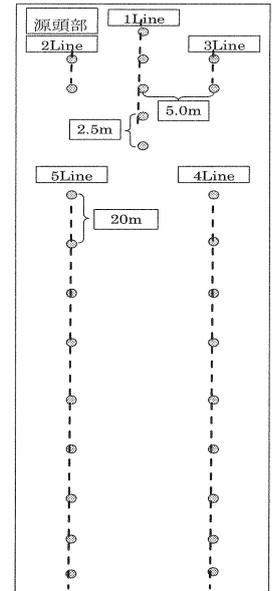
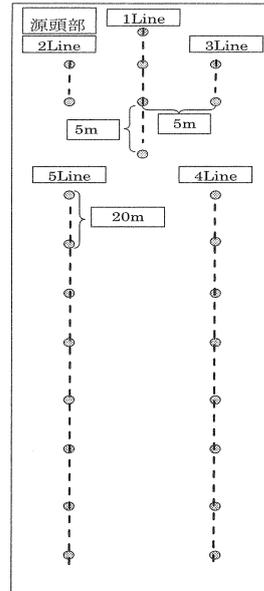


図-2 サイト1試験地点 図-3 サイト2試験地点

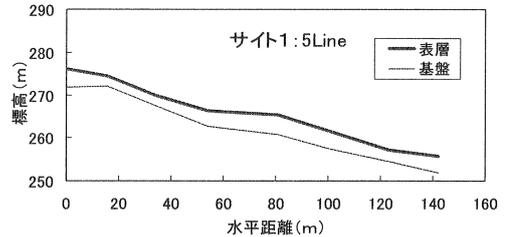
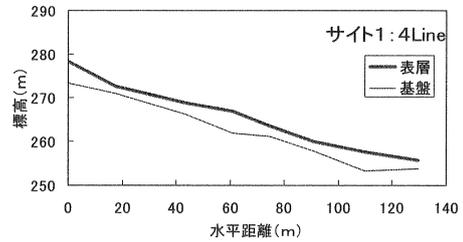


図-4 サイト1の断面図(4Line, 5Line)

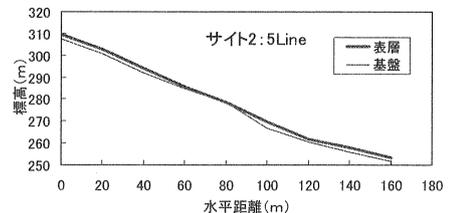
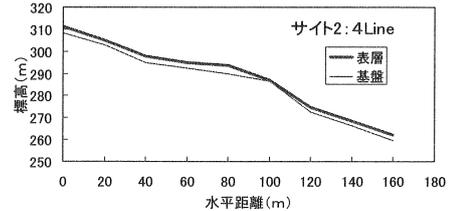


図-5 サイト2の断面図(4Line, 5Line)

### 3. 試験方法

#### 3.1 軽量動的コーン貫入試験の特徴

本研究で用いた軽量動的コーン貫入試験は、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試験法でありその概要を示す。

本機は器材総重量が20kgと小型軽量であることから斜面や狭い作業現場での調査に適している。また、簡易貫入試験と比べると、計測が自動化されていること、地盤調査に慣れていない技術者でも安全に作業を行うことができることが特徴である。

#### 3.2 軽量動的コーン貫入試験方法

図-6のように、ヘッドと中央演算装置、データロガーをケーブルで接続して、水平になるように置かれた中央演算装置に設けられた穴にコーンを先端につけた1mのロッドを通す。コーンは地盤の状態に合わせて使い分けことができ、コーン断面積2cm<sup>2</sup>で回収できるものと4cm<sup>2</sup>で使い捨てのものがある。また、貫入量を計測するため巻取り式テープでヘッドと中央演算装置をつなぐ。試験は、ハンマーでヘッドを打撃してコーンを地盤に貫入させて行う。貫入量が50cmに達するたびにロッドを足して貫入抵抗値が10MPa以上の値が連続して計測されるまで試験を続ける。

これは軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値 $q_d$ と簡易動的コーン貫入試験から得られる $N_d$ 値のおおまかな関係として

$$q_d = \frac{1}{4} N_d \quad (1)$$

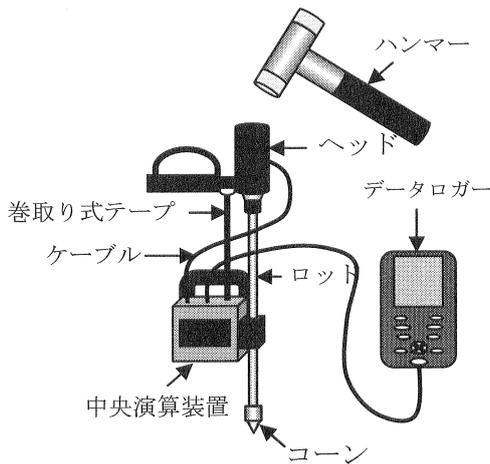


図-6 軽量動的コーン貫入試験機

が得られていて<sup>4)</sup>、貫入抵抗値  $q_d$  が 10MPa 以上ということは  $N_d$  値が 40 以上となり十分な強度があると判断できるからである。貫入抵抗値の計算式にロッドの質量も組み込まれているため、ロッドを足すと同時にデータロガーのロッドの数を変更する。

ハンマーでヘッドを打撃すると、ヘッドに設置されている加速度計が衝突の加速度を計測し、衝突速度に変換する。この衝突速度と巻取り式テープから得られた貫入量を用いて中央演算装置で貫入抵抗値  $q_d$  が計算され、貫入量  $d$  とともにデータロガーに表示・記録される。貫入抵抗値  $q_d$  の計算には下に示す式(2)が適用されている<sup>5)</sup>。

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

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  $90^\circ$ ）である。

軽量動的コーン貫入試験実施時の様子を図-7に示す。



図-7 軽量動的コーン貫入試験実施状況

### 3.3 簡易動的コーン貫入試験方法

簡易動的コーン貫入試験は自然斜面の調査方法として広く用いられてきた。ここでは、5kgのハンマーを50cmの高さから自由落下させ、貫入量10cmに要する打撃回数を  $N_d$  値として記録した。また、 $N_d$  値が50を超えた時点で試験を終了した。

## 4. 簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験の比較

### 4.1 深度方向の $N_d$ 値と $q_d$ 値の比較

軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値  $q_d$  と簡易動的コーン貫入試験から得られる  $N_d$  値との比較を行った。得られる層厚の比較を全点に対し行った結果、全点についての層厚は多少のばらつきはあるもののほぼ一致していた。

次に縦軸に貫入抵抗値  $q_d$ 、横軸に  $N_d$  値をとるグラフを作成する。グラフを作成するにあたって、 $N_d$  値は10cmごとに得られるが、貫入抵抗値  $q_d$  は深度方向に密にデータが得られるので0.1mでスムージング処理をしたデータを使用する。そしてグラフには佐藤らによって求められた関係を式(3)に、Athapaththu らによって求められた関係を式(4)に示す<sup>6,7)</sup>。また Athapaththu らが広島大学構内がら山での結果を基に考案した式(5)も示す。

$$q_d = \frac{1}{4} N_d \quad (3)$$

$$q_d = \frac{1}{2} N_d^{\frac{3}{4}} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} q_d &= 0.33 N_d & (N_d < 10) \\ q_d &= 0.167 N_d + 1.6 & (10 < N_d < 25) \\ q_d &= 0.1 N_d + 3.3 & (25 < N_d) \end{aligned} \right\} (5)$$

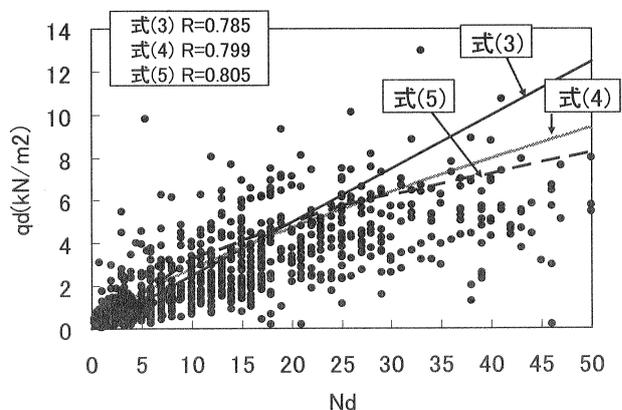


図-8  $N_d$ - $q_d$  比較

図-8 からわかるように式(5)が最も相関が良い。また式(4)もよい相関が得られている。このことから、簡便な方法として式(4)を、より精度の高い推定式として式(5)を用いればよいと考えられる。

#### 4.2 軽量動的コーン貫入試験と簡易動的コーン貫入試験の調査効率の比較

ががら山のサイト1, サイト2で軽量動的コーン貫入試験(LWD-CPT), 簡易動的コーン貫入試験(PD-CPT)を実施するためにかかった時間から調査効率を求めた。作業人数は本来軽量動的コーン貫入試験は1人, 簡易動的コーン貫入試験は2人で調査可能だが, 今回はサイト1は軽量動的コーン貫入試験, 簡易動的コーン貫入試験ともに3人で1組となって調査した。またサイト2では軽量動的コーン貫入試験は2人1組, 簡易動的コーン貫入試験は3人1組で行った。調査効率として貫入量1mあたりにかかる時間と, 1点あたりにかかる試験時間, 1時間で実施可能な試験点数, 1日の作業時間を8時間として1日に調査可能な試験点数を求めた。また2007年1月15~17日に管らが兵庫県で実施した軽量動的コーン貫入試験のデータも含めて比較対象とした。結果を図-9, 図-10に示す。

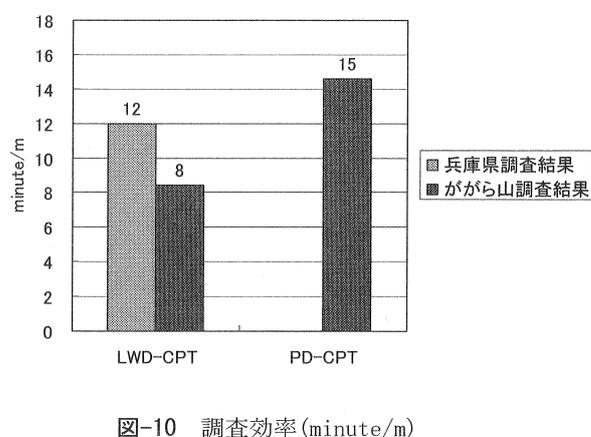
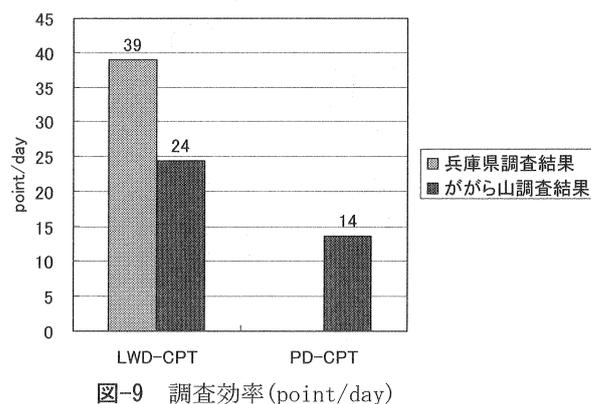
サイト1では軽量動的コーン貫入試験が16(点/日), 簡易動的コーン貫入試験が15(点/日)とはっきりとした調査効率の差は見られないが, サイト2では軽量動的コーン貫入試験が36(点/日), 簡易動的コーン貫入試験13(点/日)と明確な差が見られる。これはサイト2は礫が多く2つの貫入試験を行う際, 何度も打ち直しすることが多かったの

で, ロッドの引抜きやロッドを足す作業が簡易動的コーン貫入試験に比べ軽量動的コーン貫入試験のほうが容易に行えるために生じた差である。このように礫の多いところでは簡易動的コーン貫入試験に比べ軽量動的コーン貫入試験のほうが適しているといえる。また兵庫県での結果は軽量動的コーン貫入試験が39(点/日)となっている。これはサイト1, サイト2のどちらの簡易動的コーン貫入試験結果と比べても大きな数字となっている。これは兵庫県の軽量動的コーン貫入試験の平均深度が0.98mと1.13mで, かなり小さい値となっているためである。またサイト1, サイト2の結果を総合すると軽量動的コーン貫入試験が24(点/日), 簡易動的コーン貫入試験が14(点/日)となった。

#### 4.3 考察

4.1よりこれまで斜面調査で最も多く用いられ実績のある簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験は得られる表層厚からも,  $N_d$  値と貫入抵抗値との関係からもよく対応した結果が得られたと結論づけられる。また調

査の効率に着目すると, 軽量動的コーン貫入は試験簡易動的コーン貫入試験と同等かそれ以上の能率で試験可能で



あるといえる (特に礫の多い地盤で)。作業人数を考慮すると軽量動的コーン貫入試験はさらに効率が良いといえよう。また, 簡易動的コーン貫入試験は試験経験の少ない作業員が実施するとハンマーで指をはさむことにより大きな怪我を負う場合があるが, 軽量動的コーン貫入試験はハンマー自体が軽量であり, ヘッドの部分に手を守るカバーがあるため, 地盤調査の経験の少ない技術者が実施しても安全であることも特徴といえる。

一箇所の危険渓流で地盤調査地点が何カ所必要かは今後検討する必要があるが, 今回の程度の調査密度の場合, 軽量動的コーン貫入試験を用いることにより1箇所をほぼ1日で調査することができることが確認できた。

#### 5. 軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値-深度関係

軽量動的コーン貫入試験から得られる貫入抵抗値-深度関係は, 図-11に示すようにA~Fの6パターンに分類できるとされている<sup>7)</sup>。

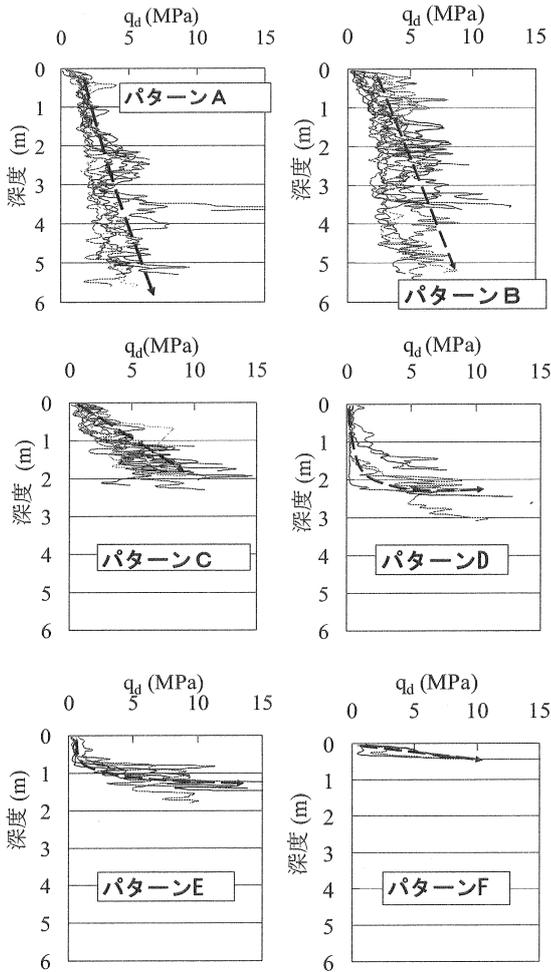


図-11 貫入抵抗値-深度関係のパターン分類

パターン A, B, C は深さ方向に貫入抵抗値が直線的に増加し, A, C は地表面付近で  $q_d=0\text{MPa}$ , B は地表面付近で  $q_d=2\text{MPa}$  である. パターン D, E は貫入抵抗値が  $q_d=1\text{MPa}$  以下と小さいが, 急激に貫入抵抗値が大きくなりそれ以上貫入できなくなる. D は貫入抵抗値が小さい層と大きい層の境界が 2m 付近, E は 1m 付近のものである. パターン F は表層 50cm より浅い位置で貫入抵抗値が大きく, ほとんど貫入できないものである.

パターン A, B, C は風化途中の花崗岩で, 表層に近いほど風化が進んでいるため, 貫入抵抗値が小さくなっていると考えられる. パターン D, E は未風化の基板上に移動土砂が緩く堆積したもので, 移動土砂量によって D, E のように緩い層の厚さが異なっていると思われる. パターン F は, 既に風下層が移動したためか地表面付近まで未風化の層が広がっている. これらの分類の中でパターン D, E のように基盤面の上で明瞭に貫入抵抗値が小さくなっている地盤は, 基盤面を滑り面として崩壊が発生しやすく危険であると思われる.

これに従ってサイト 1, サイト 2 で得られた各点の貫入抵抗値  $q_d$  と深度の関係をも 6 パターンに分類する. 図-12

はサイト 1 のある地点 P のグラフで, 図-13 はサイト 2 のある地点 Q のグラフである. 図-11 と比較すると, 地点 4-4 はパターン A に属することがわかる. しかし図-13 はどのパターンにも属さないで「unknown」としている. このようにサイト 1, サイト 2 の各地点について比較を行いパターン分類していく. サイト 1, サイト 2 の各パターンの割合を図-14, 15 に示す.

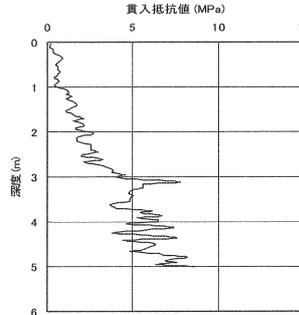


図-12  $q_d$  値-深度関係 (サイト 1 地点 P)

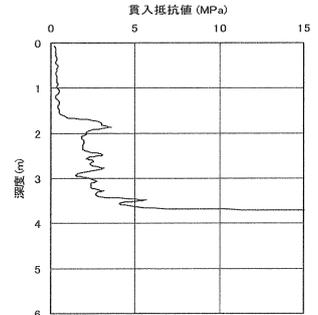


図-13  $q_d$  値-深度関係 (サイト 2 地点 Q)

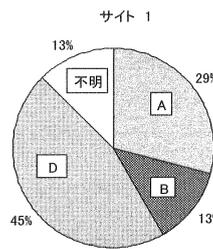


図-14 サイト 1 の各パターンの割合

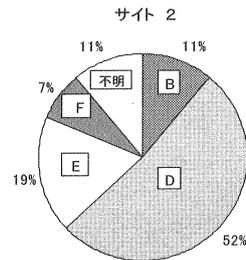


図-15 サイト 2 の各パターンの割合

次にパターンの分布している様子を知るため, パターン分布図を作成する. 図-16, 17 からわかるようにサイト 1, サイト 2 ともにパターン D がかたまっている分布している.

このパターン D は移動してきた土が表層に緩く堆積していると考えられている. そのことからサイト 1, サイト 2 の上部から移動してきた土砂が両サイトの表層に堆積しているのではないかと推測できる. この緩く堆積している土は降雨などの影響で再度移動する可能性があるため危険であるので, 地盤の強度の観点からみると, 今回選定したサイト 1, サイト 2 の危険な部分はパターン D が分布している部分だと考えられる. なお, それぞれの調査地点で軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値から豪雨時の地盤の強度定数を推定し, 長大斜面を仮定した安定解析を行った結果をみると, 安全率が 1 以下となるのはパターン D およびパターン A の地盤条件においてであった<sup>8)</sup>. このこ

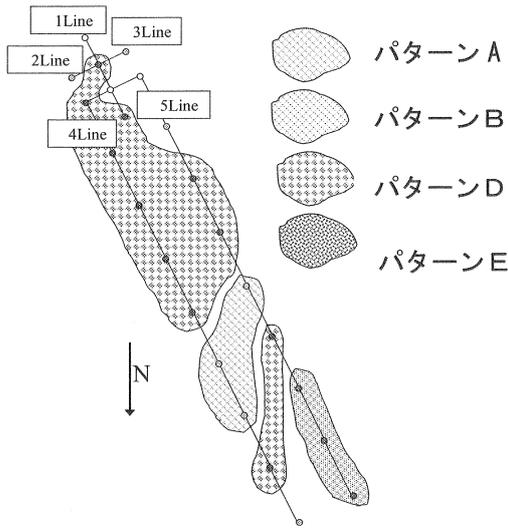


図-16 パターン分布 (サイト 1)

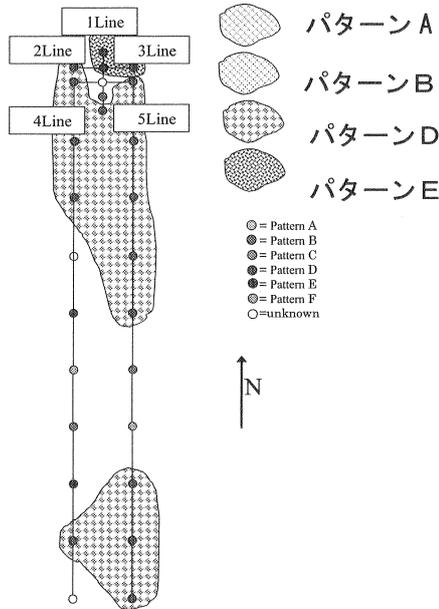


図-17 パターン分布 (サイト 2)

とから、パターン D、次にパターン A の地盤が広く分布している区域が地盤強度の低い区域と推定できる。

次にサイト 1、サイト 2 の各パターンの割合を(社)地盤工学会土質工学セミナー(広島地域)斜面パターンが行った調査結果と比較する<sup>9)</sup>。(社)地盤工学会土質工学セミナー(広島地域)斜面パターンは広島県内で過去に豪雨災害の発生した呉市、広島市安佐北区、広島市佐伯区、廿日市市宮島町の自然まさ土斜面において簡易動的コーン貫入試験を実施した。この調査結果は簡易動的コーン試験結果なのでこれを4.1で最も適しているとした式(4)を用いて簡易動

的コーン貫入試験から得られる  $N_d$  値を貫入抵抗値  $q_d$  に変換し、得られた貫入抵抗値  $q_d$ -深度関係をパターン分類したものである。その結果を図-18 に示す。

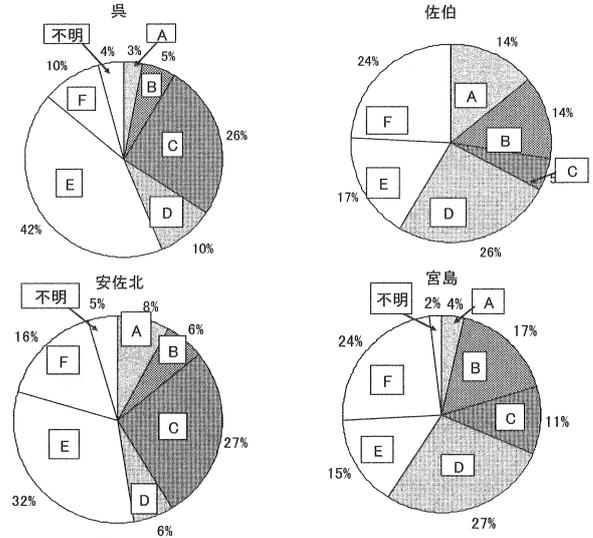


図-18 各調査地点のパターン割合<sup>8)</sup>

図-18 を見ると呉市はパターン C、E が多く、また広島市佐伯区はパターン D、E、F が多くなっている。広島市安佐北区はパターン C、E、F が多く、廿日市市宮島町ではパターン B、D、F が多い。全体的にはパターン E が最も多くなっている。

この結果とサイト 1、サイト 2 の結果を比較する。

まずサイト 1 のグラフの図-14 と図-18 比較する。サイト 1 はパターン D が最も多く、次にパターン A が多くなっている。これに最も近いのは広島市佐伯区の結果である。次にサイト 2 のグラフの図-15 と図-18 を比較する。サイト 2 はパターン D が最も多く、次にパターン E が多くなっている。これに最も近いのはサイト 1 と同様に広島市佐伯区の結果である。

以上、軽量動的コーン貫入試験によって得られた地盤強度のパターン分類を過去の被災箇所と比較すると、がら山の今回の調査地点では地盤強度が小さいパターン D やパターン A の範囲が広く、地盤強度としては脆弱であるといえる。個々の斜面の危険度を評価するには地盤強度だけでなく斜面の傾斜角や降雨の頻度、地形の集水性などをさらに検討する必要があるが、軽量動的コーン貫入試験により地盤強度を測定することはその前提となる情報を与える上で有効であると考えられる。

## 5. まとめ

今回行った簡易動的コーン貫入試験と軽量動的コーン貫入試験の比較により下記のことが得られた。

- 1) 軽量動的コーン貫入試験と簡易動的コーン貫入試験から得られる表層厚はほぼ一致した。
- 2) 簡易動的コーン貫入試験から得られる  $N_d$  値と軽量動的コーン貫入試験から得られる  $q_d$  値の良好な相関が得られた。
- 3) 簡易貫入試験と比較すると、一日に実施できる試験点数や調査に必要な人数、安全性などの面に関して、軽量動的コーン貫入試験の方が優れていることがわかった。
- 4) 軽量動的コーン貫入試験の貫入抵抗値と深度の関係は6パターンに分類できた。斜面の地盤強度を分類することで、地盤強度の観点から斜面の危険度評価を行うことができる可能性が示された。

## 謝辞

ががら山の調査は地盤工学会中国支部土質セミナー広島地域の研究活動として実施しており、本報告の著者以外に12名の方々が参加した。これらの方々のご協力に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Shinji Nakai・Yasushi Sasaki・Masahiro Kaibori・Takeo Moriwaki: Rainfall index for warning and evacuation against sediment-related disaster: reexamination of rainfall index  $R_f$ , and proposal of  $R'$ , SOIL AND FOUNDATIONS vol.46, pp.465-475, 2006.
- 2) 管和暁・Athapaththu Rasika・土田孝・佐藤崇史: 軽量動的コーン貫入試験による自然まさ土斜面の強度定数の評価, 降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関するシンポジウム発表論文, pp.51-57, 2006.
- 3) Athapaththu Rasika・Tsuchida, Takashi・Suga, Kazuaki・Sato, Takashi: Investigation of Spatial Variability of Natural Masado Slopes, ICCEE2006, pp.67-78, 2006.
- 4) 佐藤崇史: 降雨時における自然まさ土斜面の強度評価に関する研究, 広島大学大学院修士論文, 2006.
- 5) Manual of Ultralight Dynamic Penetrometer For Soil Investigation.
- 6) Athapaththu Rasika・Tsuchida, Takashi・Sato, Takashi・Suga, Kazuaki: Evaluation of Insitu Shear Strength of Natural Masado Slopes, Geotechnical Division - ISOPE2006, International Offshore and Polar Engineering vol.2, pp.324-331, 2006.
- 7) ラシカアタパツ・土田孝・加納誠二・佐藤崇史・管和暁: 軽量動的コーン貫入試験による自然まさ土斜面の強度評価, 第41回地盤工学研究発表会, pp.177-178, 2006.
- 8) 土井豆聡之・管和暁・A.M.R.G Athapaththu・土田孝: 自然まさ土斜面の調査における軽量動的コーン貫入試験の適用, 第42回地盤工学研究発表会, pp.75-77, 2007.
- 9) Athapaththu A.M.R.G., Tsuchida Takashi, Suga Kazuaki, Nakai Shinzi, Takeuchi Jiro: Evaluation of in-situ strength of Masado slopes, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.848-861, 2007.

(2007年6月29日 受付)