

急傾斜地崩壊対策事業における風化土層厚の把握と対策検討例

神奈川県県土整備部 砂防海岸課
森永 勝正

1. はじめに

平成 13 年度の土砂災害防止法制定を受け、急傾斜地崩壊危険箇所の指定や避難対策等、ソフト面からの土砂災害の予防に従来以上の力点が置かれるようになった。しかし一方で、対策工の実施等ハード面からの対応が必要な箇所も多く、そうした箇所では今後とも個々の斜面状況に応じた対策が必要である。

こうした急傾斜地崩壊対策検討のために対象斜面について調査・把握すべき内容は、①崩壊可能性のある風化土層の厚さ及び硬さ、②斜面形状(傾斜・地形)、③土質・地質の状況、④湧水の状況等である。特に風化土層の厚さについては、同一斜面内においても地形や位置により様でないため、面的な把握が必要である。

これまでの急傾斜地崩壊対策事業における対策工法は、対象斜面において実施されたボーリング結果から、斜面の地層状況を推定したデータを基に検討・設計されることが多かった。こうしたボーリング結果からは、調査地点における詳細な地質状況や標準貫入試験による N 値が得られるが、ボーリング調査の費用が高いため調査点数が限られ、また急傾斜地では機械の設置が困難であるため得られるデータは傾斜の緩い斜面の上端・下端部でのものに偏りがちである。そのため斜面上の風化土層厚の分布を面的に把握できず、また貫入力が強すぎるため斜面崩壊の大部分が発生する表層 1~2m 程度の土層状況の把握には適さなかった。

一方、斜面の土層調査用機器として「斜面調査用簡易貫入試験機」^{3),4)}(通称、土研式簡易貫入試験機:以下、簡易貫入試験機)が開発されているが、重錘が 5kg と重いため斜面表層の軟らかい土層状況を詳細に捉えることは難しかった。

以上を踏まえて神奈川県では、従来の簡易貫入試験機を改良して斜面崩壊と関わり深い表層土層調査用に開発された「SH 型簡易貫入試験機」¹³⁾を使用することで、急傾斜地における風化土層厚分布の面的調査を実施し、そのデータを踏まえた急傾斜地対策事業の検討・設計を開始している。

本報は、神奈川県において崩壊未発生斜面と崩壊発生斜面の 2 箇所において SH 型簡易貫入試験機を使用した調査検討を実施したので、その概要を報告するものである。

2. SH 型簡易貫入試験機の概要

2.1 各種貫入試験機との比較

表 1 に各種貫入試験機の諸元を、表 2 にそれらの特徴をまとめた。SH 型簡易貫入試験機(図 1)は、簡易貫入試験機の改良型¹³⁾で、表層崩壊と関係の深い斜面表層の比較的軟らかい風化土層を調査し、その硬さと深さの的確な把握を図った機器である。

従来の簡易貫入試験機は 5kg の重錘を 50cm の高さから落下させ、先端角 60° で $\phi 25\text{mm}$ の円錐コーンを地中に貫入させて土層の硬さ(貫入抵抗)を求めるもので、コーンが 10cm 貫入するのに要した重錘の打撃回数を Nc 値として表す。SH 型簡易貫入試験機は重錘を 3kg+2kg の着脱式としたことにより(図 2)、3kg 重錘では貫入力が約半分となり、軟らかい土層の構造を高分解能で把握可能とした。なお、3kg 重錘使用時の Nc 値を Nc' 値と呼び、両者の関係は $Nc = 0.5Nc'$ となる³⁾。ある程度硬い土層では、2kg 重錘を付加し 5kg とすることで従来型と同じ貫入力で調査が行える。また、SH 型簡易貫入試験機は一打撃毎に測定するため(図 3: $Nc'(Nc)/\text{drop}$ で表示)、薄い軟弱層や礫の影響が判る詳細なデータが得られる。

またボーリングやスウェーデン式サウンディングと比較して本体が軽量であるため移動・設置が容易で急斜面でも調査が可能であり、加えて試験時間が短いため短期間で多点の調査ができる(表 1)。さらにデータロガー(図 4)を使用することで、より迅速で精度の高い調査が可能となる⁹⁾。

この試験機の弱点として、重錘が軽いため土中の大礫や転石に当たると貫入不能となることもあり、この場合にはその箇所での調査続行は不可能なため、近傍で再度試験を行う。

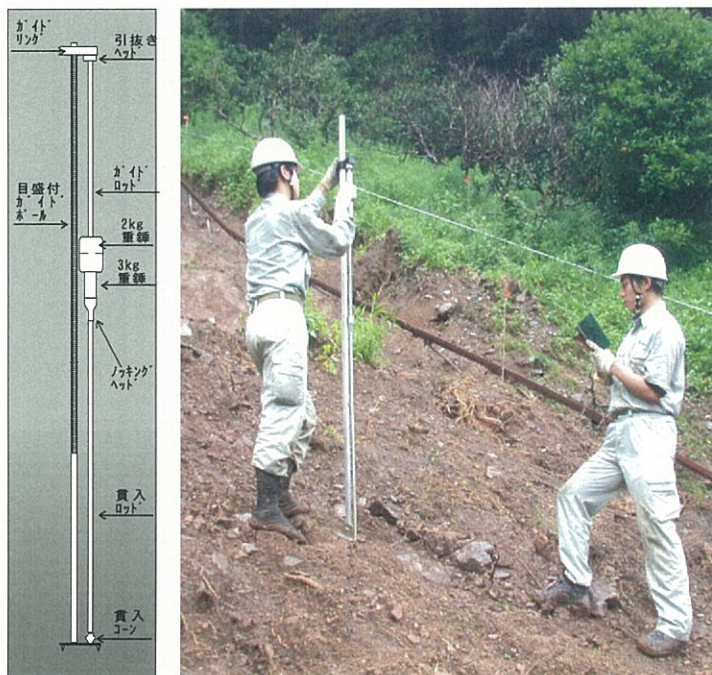


図 1 SH型簡易貫入試験機概観及び試験状況

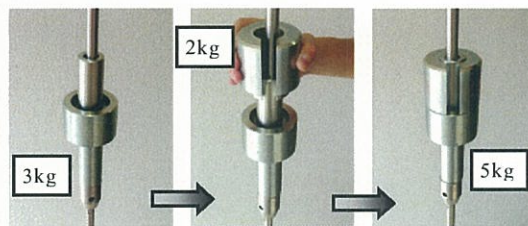


図 2 着脱式重錘 (3kg+2kg⇒5kg)

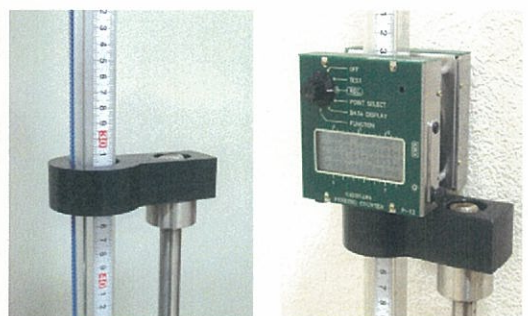


図 3 目盛付ガイドポールで一打撃毎の貫入量を測定

図 4 テータロカード(開発中)により迅速に作業可能

表 1 貫入試験機の諸元比較

	SH型簡易貫入試験機	簡易貫入試験機(従来型)	標準貫入試験(ボーリング)	スウェーデン式サウンディング試験機
おもり重量	3kg+2kg(着脱式)	5kg	63.5kg	100kg(5,15,25,50,75,100kgと段階的に载荷)
貫入部先端形状	円錐コーン(∠60°,φ25mm)	円錐コーン(∠60°,φ25mm)	標準貫入試験用サンプラー(φ51mm,L810mm)	スクリーポイント(φ33mm,L200mm)
貫入方法	動的貫入 高さ50cmから重錘を自然落下	動的貫入 高さ50cmから重錘を自然落下	動的貫入 高さ76±1cmからハンマーを自然落下	静的貫入 ①荷重による貫入(段階的に载荷) ②回転による貫入(100kg重錘)
分解能	1打撃毎(1mm単位で読取り,自動記録機使用時は0.1mm単位)	約10cm毎	1m毎	25cm毎(回転貫入時)
データ表示	Nc/drop (1打撃毎のNc値,3kg時はNc'/drop) 従来型の10cm毎のNc表示も可能	Nc値 (10cmの貫入に要した打撃回数)	N値 (30cmの貫入に要した打撃回数)	Wsw (荷重貫入時,荷重の大きさで表示) Nsw (貫入量1m当たりの半回転数)
作業人数	2人	2人	2人	2人
本体重量	17kg(ロッド5m分)	15kg(ロッド5m分)	約400kg	110kg超(ロッド5m分)

表 2 貫入試験機の特徴比較

	長所	短所
SH型簡易貫入試験機	高分解能・詳細なデータ・簡便な測定	大礫や転石に弱い
簡易貫入試験機(土研式)	簡便な測定	大礫や転石に弱い・データが粗い
標準貫入試験(ボーリング)	N値を測定・土壌サンプル採取	単価が高い・急傾斜では困難
スウェーデン式貫入試験機	N値に換算可能	大礫や転石に弱い・搬入に労力大・急傾斜では困難

2. 2 SH 型簡易貫入試験のグラフ例

次に、実際に実施した SH 型簡易貫入試験のグラフ例を示す (図 5)。

試験を行った斜面の地質は①関東ローム層、②扇状地性の砂礫層、③新第三紀の泥岩層の 3 種類である。SH 型簡易貫入試験機の特徴である一打撃毎表示 ($0.5N_c'/\text{drop}$ 、 N_c/drop) は、従来型の簡易貫入試験機の 10cm 毎表示 ($0.5N_c'$ 、 N_c) よりも詳細に土層状態を反映しており、3 種類の地質の特徴がグラフのパターンに表れていることが分かる。

①関東ローム層では、 N_c 値は表層から深部に向かい漸増し、0~0.8m で $N_c=1\sim5$ 、0.8~1.7m で $N_c=5\sim10$ 、1.7m 以深は概ね $N_c=10\sim20$ の値をとった。局所的な硬い箇所、軟らかい箇所はなく N_c 値の推移が緩やかであり、一打撃毎表示と 10cm 毎表示による土層状況に顕著な違いは見られなかった。火山灰起源の関東ローム層では、こうした均質な土層状態がその特徴の 1 つと考えられた。

②砂礫層の現場は試験位置が斜面下部であり砂礫層を崩積土が覆う状態だった。グラフを見ると深度 2m 程度までは $N_c=1\sim4$ 程度で振幅も小さく、表土及び崩積土が堆積しているものと考えられる。2m 以深では N_c 値が急増し振幅も大変大きく、一打撃毎表示の N_c/drop は 10~60 超の間で激しく増減する。局所的な硬い箇所は礫によるものであり、その間にある軟らかい箇所がマトリックス自体の硬さを示す。従来の 10cm 毎表示 (グラフ中の系列: $0.5N_c'$ 、 N_c) では礫とマトリックスの分離が悪いが、SH 型簡易貫入試験機の一打撃毎表示により砂礫層の状態が明瞭に把握できた。

③泥岩層では、深度 1.1m までは $N_c=1\sim5$ 程度と軟らかいが、深度 1.1~1.5m に $0.5N_c'/\text{drop}=10\sim20$ になる部分が 2 箇所見られる。現地の露頭からこれらは泥岩の強風化礫であると推察される。それ以深では $N_c=20$ を超え 60 以上の値をとり、弱風化部あるいは基岩に達したと考えられる。ここで一打撃毎の値を見ると深度 1.8m 付近に $N_c/\text{drop}=20$ 程度の箇所があり、基岩内のクラックの存在が推察される。

以上のように、SH 型簡易貫入試験結果を調査箇所の地質概況を踏まえて総合的に考察することで、従来のグラフより詳細に土層状況を推定できると考えられる。

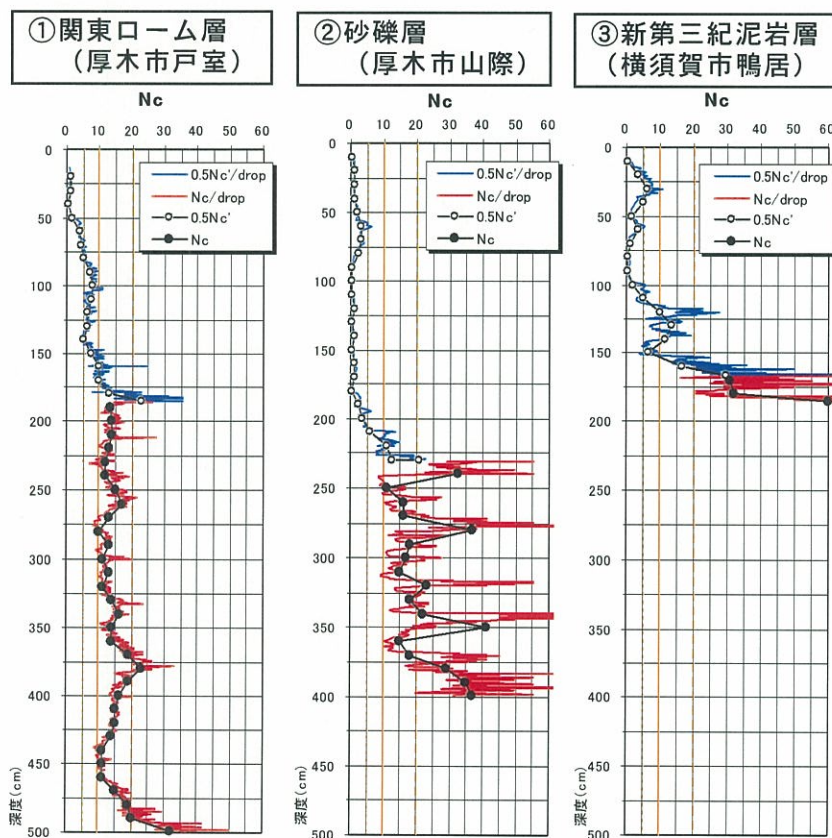


図 5 異なる地質における SH 型簡易貫入試験のグラフ例

3. 厚木市山際での調査検討例

3.1 調査概要

本調査地(図 6)は厚木市山際地内で、水平距離約 90m、高さ 35m、斜面平均角度 30° (斜面下部角度 45°)、斜面下に人家があり平成 15 年 5 月に急傾斜地崩壊危険区域の指定を受けている。調査地のある中津原台地は段丘群からなり、中～大礫を主とする砂礫層を基盤としその上位をローム層が整合に覆う。ここでは平成 14 年度にボーリング調査を 3 箇所実施しており、このデータの補完と斜面状況の面的な把握のため、SH 型簡易貫入試験を斜面 4 断面(各断面約 10~15m ピッチで 3~4 箇所ずつ)と既存ボーリング箇所直近(1m 以内)の計 16 箇所で行った(図 7)、ボーリング調査結果と SH 型簡易貫入試験による Nc 値との関係を合わせて風化土層厚を推定した。



図 6 調査斜面全景 (山際)

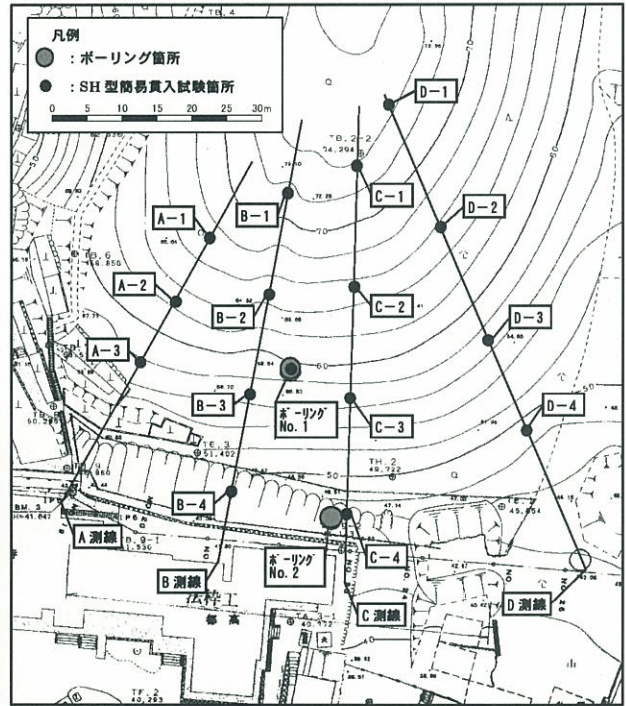


図 7 調査地及び貫入試験位置図

3.2 調査結果と土層状況の把握

(1) ボーリング結果との対比

SH 型簡易貫入試験結果とボーリング調査結果の対比を図 8 に示した(ボーリング No.2 地点: 斜面下部)。

ボーリング結果では、地表から 1.3m までは風化した礫混じり粘土で N 値 2 となった。1.3m から 4.5m までは、粘土混じり砂礫で、2.3m 付近で N 値 6、3.3m 付近では N 値 18、4.3m 付近で N 値 19 となった。

SH 型簡易貫入試験結果では、地表から 1.9m までは膨軟な土層で Nc=1~3、深度 1.9m~2.3m までは転石等の影響が見られ Nc=5~10 となった。2.3m 以深では礫の影響で Nc/drop の振幅が激しく Nc=11~41 となったが、礫の間のマトリックスは Nc=10~15 である。この礫層は、試験箇所近傍で見られた露頭(図 9)のように、マトリックス中に中～大礫が多量に存在する状態であると思われる。対比結果及び過去の簡易貫入試験による調査事例⁴⁾より、Nc=0~5 が表土層、Nc=5~10 がローム層または崩積土層、Nc=10~20 が深部ローム層または砂礫層風化部と考えられた(表 3)。また、軟らかい土層ではほぼ Nc=N に近い関係が得られた。

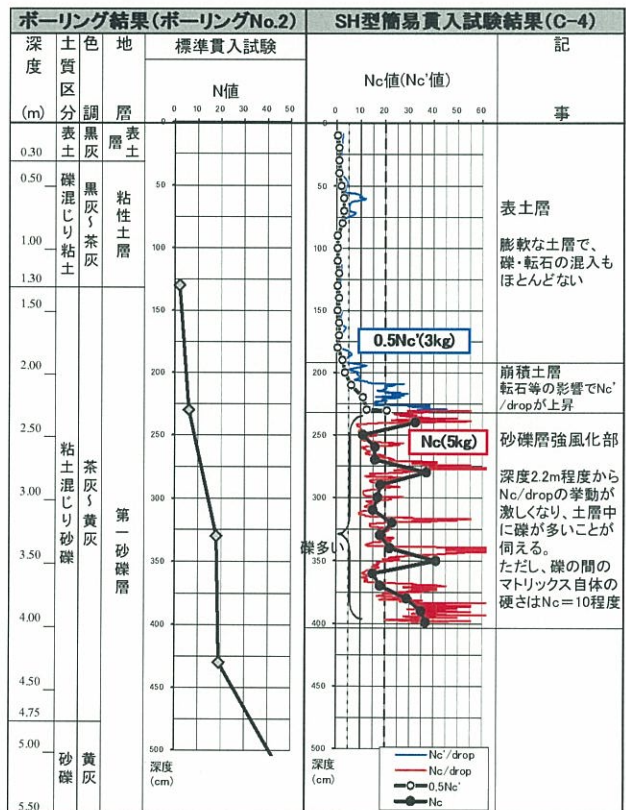


図 8 ボーリング結果との対比 (山際)

ここでNc値を用いた表層崩壊すべり面に関する調査事例を挙げると、花崗岩斜面における簡易貫入試験結果から崩壊可能性のある表層土の硬さをNc値10とした事例⁶⁾を始め、Nc値10前後で崩壊の可能性が高いとする報告が多い^{1),2),7),8),11),12)}。また、表層崩壊の抑止に寄与すると考えられる樹木根系とNc値との関係については、コナラの根系はNc'=20(Nc=10)以上の土層にはほとんど侵入しないことが報告されている¹⁰⁾。こうした事例から、ここではNc値10相当の深度を潜在的な表層崩壊すべり面と考えることとした。

(2) 土層厚分布の推定

調査結果を基に、推定土層厚断面図を作成した(図10:土層厚のスケールは標高の3倍)。Nc値10以下の土層厚に着目すると、斜面上部では2.6m、中部では1.9~2.5mとやや薄く、下部で3.6mと厚くなった。このように、Nc値10以下の軟らかい土層が斜面全体を厚く覆っていることが分かった。

斜面の傾斜を勘案すると、上~中部は傾斜が緩いのに対し、下端部の急傾斜部では、傾斜と土層厚がともに大きいため、何らかの対策を講じる必要があると考えられた。



図9 礫層の露頭(山際)

表3 Nc値と土層状況(山際)

中~上部	表層土層		崩壊土層	
下~中部	表層土層	崩壊土層	崩壊土層	
(ローマ字) 崩壊土層	表層土層	ローマ字	崩壊土層	—
斜面傾斜	0	2	10	50
	Nc値			

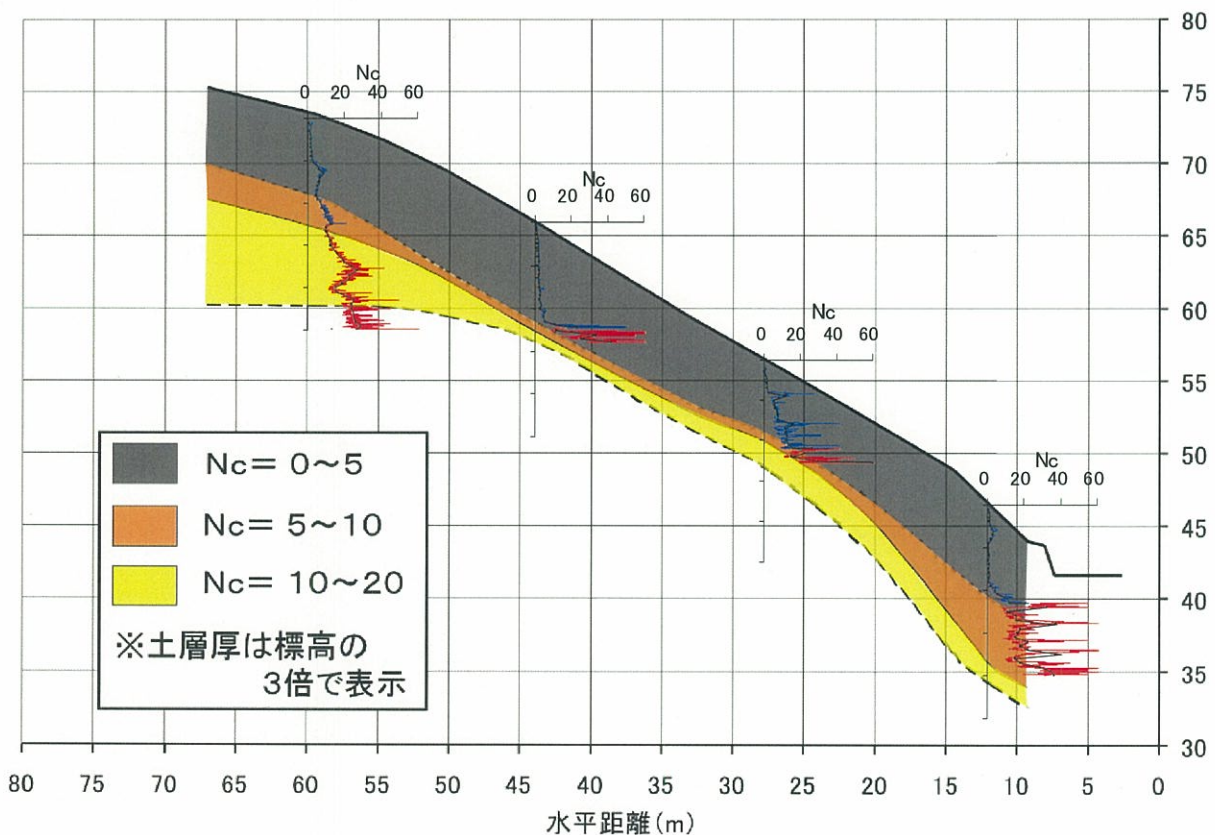


図10 推定土層厚断面図(山際C側線)

3.3 対策工の検討

調査結果から、斜面上部～中部は傾斜角度 30° 程度以下で湧水もなく、ほぼ安定しているため、現況樹林を残したままとした。斜面下端部では傾斜角度 45° と急勾配で土層厚も厚いため、法長 $10\sim 15\text{m}$ を現場打ち法枠工及び落石防護柵工で対策することとした(図 11、図 12)。

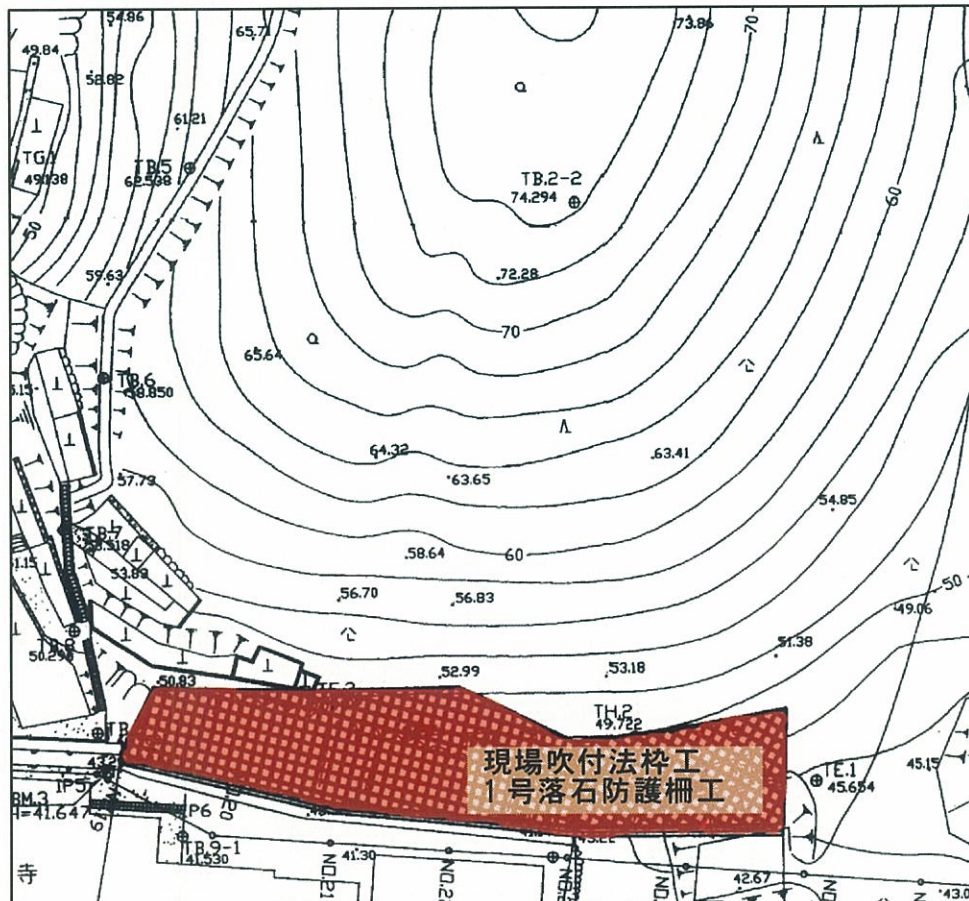


図 11 対策工平面図 (山際)

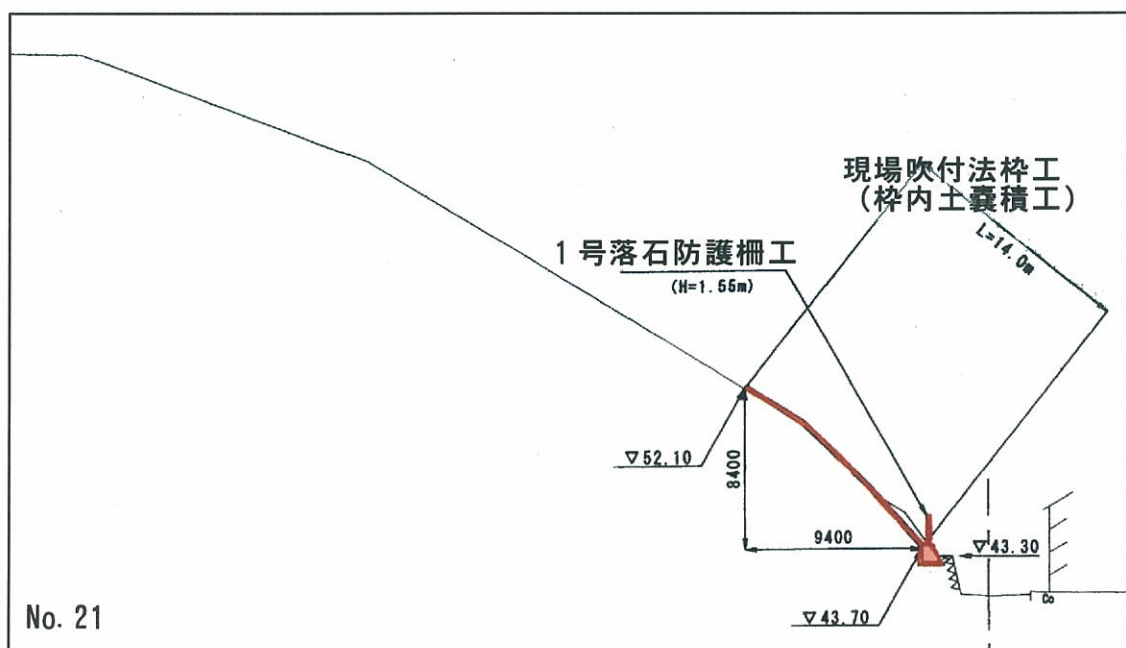


図 12 対策工断面図 (山際)

4. 横須賀市鴨居での調査検討例

4.1 調査概要

本調査地の横須賀市鴨居3丁目地内(鴨居3丁目B)は水平距離約150m、高さ20m、平均傾斜約45°の斜面である(図13、14)。斜面上には広葉樹林が成立しているが、斜面下部には小学校が位置し、斜面上は宅地として造成されている。また斜面下部には防空壕が数箇所掘られている。調査地の地質は新第三紀中新世の三浦層群逗子層であり、泥岩砂岩互層でやや泥岩優勢である。当斜面では平成16年3月31日に128mmの連続雨量を記録し、斜面左方で最大幅20m、最大崩壊深2mの崩壊が発生した。

平成16年6月に対策工検討のための調査としてボーリングを4箇所(斜面上端・下端2箇所ずつ)実施し、そのデータの補完と斜面の土層厚分布の面的な把握のためSH型簡易貫入試験を2断面(各5箇所ずつ)と、崩壊地近傍の未崩壊箇所と崩壊地内も含めた計17箇所で行った(図15)。これらボーリング調査結果と踏査結果、及びSH型簡易貫入試験によるNc値より、対象斜面の地質状況及び風化土層厚を推定し、対策工の検討材料とした。



図13 調査地全景(鴨居)



図14 崩壊地の状況(鴨居)

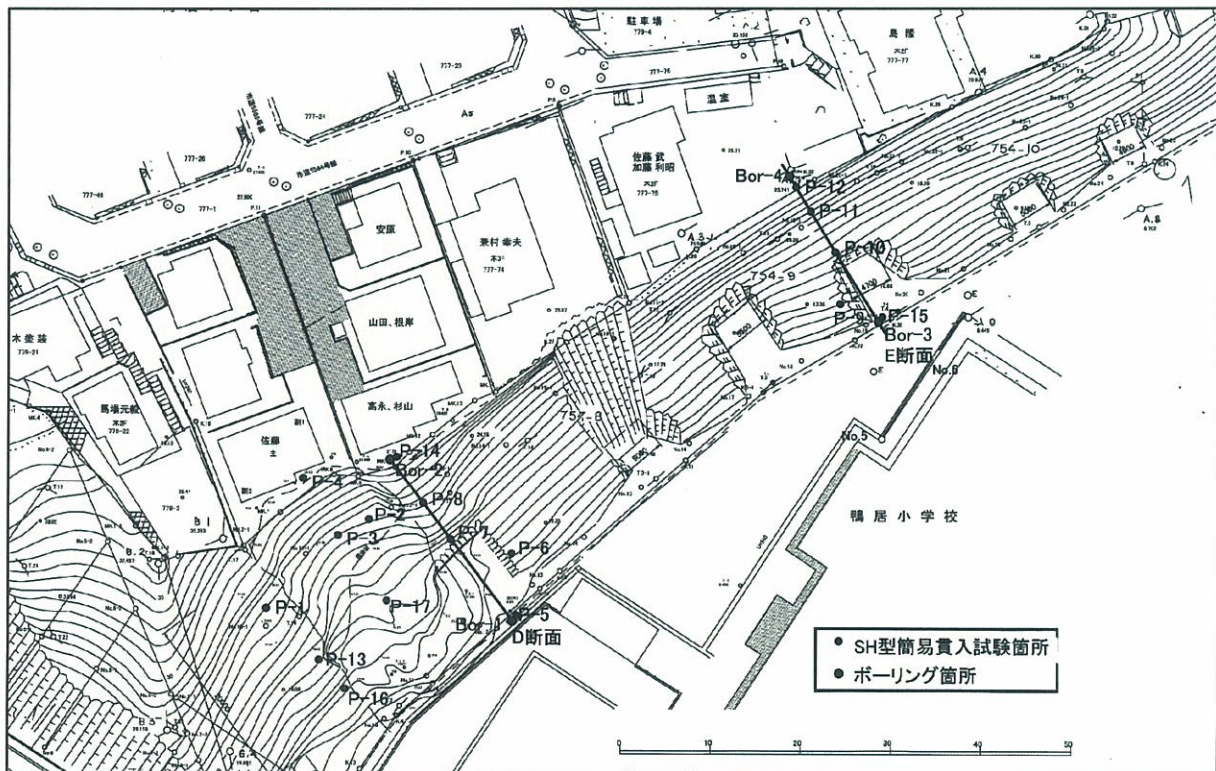


図15 調査位置図(鴨居)

4. 2 調査結果と土層状況の把握

(1) ボーリング結果との対比

SH 型簡易貫入試験結果とボーリング調査結果の対比を図 16 に示した (Bor-1 地点 (P-5) : 斜面下部)。

ボーリング結果では、深度 0.75m までは砂礫であり、0.75~2.15m までが風化の進んだ泥岩、それ以深は弱風化~新鮮な泥岩だった。標準貫入試験の N 値は、深度 1.3m 付近で 32、深度 2.3m 付近以深では 50 を上回る硬さだった。

SH 型簡易貫入試験結果では、深度 0.9m までは $0.5Nc'=1\sim6$ 程度と軟らかい土層である。深度 0.9m 付近で $0.5Nc'=10$ を上回ると土層は徐々に硬くなり、深度 1.2m 程度で $Nc=30$ を上回り貫入不能となった。 Nc 値が増加し始めた深度はボーリング結果にある砂礫と風化泥岩の境界とほぼ一致した。斜面上部の地盤造成時に新鮮な泥岩が露出し、その上に盛土や崩積土による砂礫層が堆積していると推察され、その泥岩は表面から風化が進行していると考えられる。以上のように $Nc=10\sim30$ 程度が強~弱風化泥岩に相当すると推察されることから、風化層厚はおよそ 0.2~0.3m と考えられた。

(2) 露頭観察結果との対比

ボーリング結果との対比により Nc 値と風化泥岩との関係が把握できたが、ボーリング箇所が斜面上端・下端の切土部であったために基岩が表面付近の浅い層に現れ、斜面上部の風化土層に関する詳細なデータが得られたとは言い難い。そこで、崩壊地脇の斜面中腹で見られた露頭とその直近で実施した SH 型簡易貫入試験結果とを比較することで、 Nc 値と風化土層状況との対比を試みた (図 17、図 19)。

露頭観察結果では深度 0.4m まで (AB 及び C 層) は風化礫を含まず根系のよく発達した森林土壌であり、 $Nc=1\sim2$ であった。深度 0.4~1.0m (R1 層) では風化の進んだ泥岩がブロック状を呈するが、指圧で容易に潰れる硬さであり、 $Nc=5\sim11$ であった。深度 1.0~1.5m (R2 層) はクラックが発達した強風化泥岩で R1 層よりやや硬く、ハンマーの軽打で容易に碎ける程度であり、 $Nc=6\sim18$ であった。深度 1.5~1.8m (R3 層) はクラックの発達した強風化泥岩であり、ハンマーの打撃により碎ける程度の比較的硬質な状態であり、 $Nc=24\sim31$ であった。貫入停止となった深度 1.8m 付近では $Nc=46$ となり、弱風化部或いは基岩に達したものと推察された。この R3 層と崩壊地内に露出した泥岩 (図 18) とを露頭観察結果や周辺で実施した SH 型簡易貫入試験結果から比較検討したところ、両者は同等の風化状態・土層であると推察され、R3 層に相当する土層が崩壊地内に露出していると考えられた。

以上、ボーリング結果及び露頭観察結果と SH 型簡易貫入試験結果の対比により、当斜面における土層状況と Nc 値との対応は概ね以下になると推察された

(表 4)。土層区分は、 $Nc=0\sim5$ が表層土、 $Nc=5\sim10$ が表層土及び強風化泥岩塊、 $Nc=10\sim20$ が強風化泥岩層、 $Nc=20\sim30$

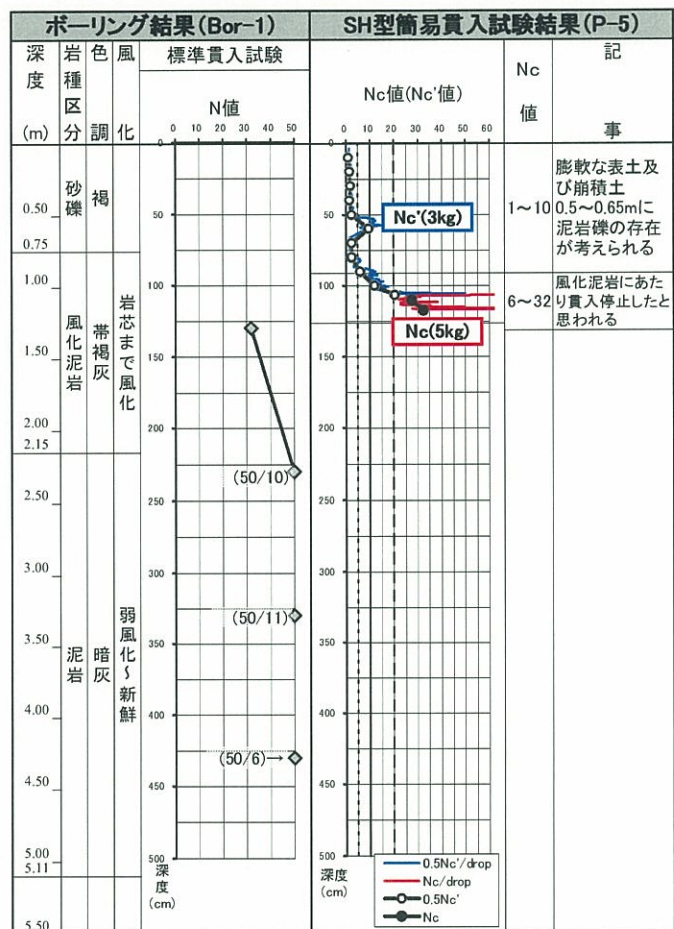


図 16 ボーリング結果との対比 (鴨居)

表 4 Nc 値と土層状態との関係 (鴨居)

Nc値				
0	5	10	20	30
表層土層	表層土及び強風化泥岩塊	強風化泥岩層	強~弱風化泥岩層	基岩及び弱風化泥岩層

が強～弱風化泥岩層、 $N_c=30$ 以上が弱風化泥岩層及び基岩であり、 $N_c=30$ が風化層境界とするのが妥当と考えられた。



図 17 露頭状況 (P-13 付近)



図 18 崩壊地内に露出した泥岩

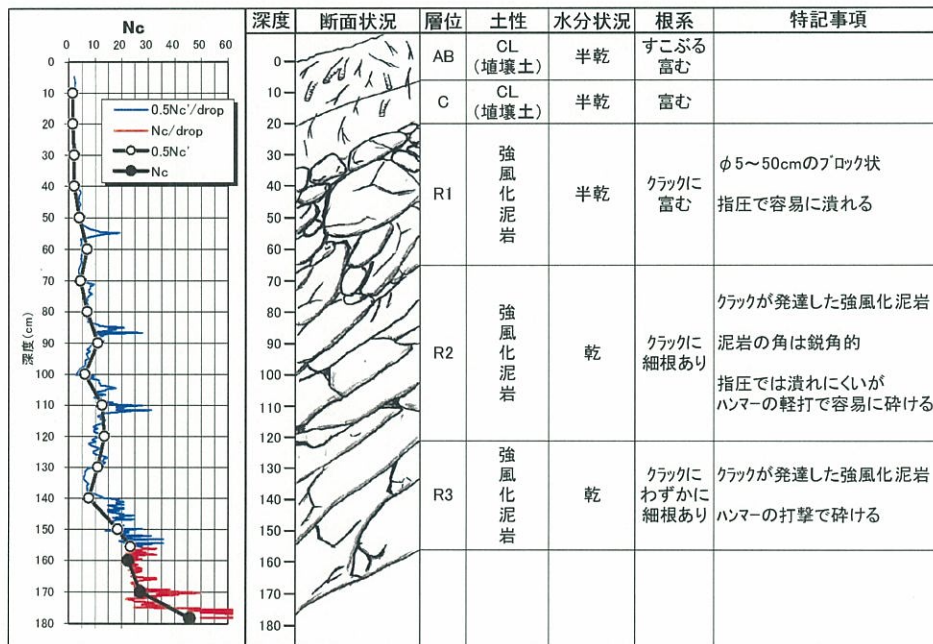


図 19 N_c 値と露頭観察結果との対比 (P-13)

(3) 土層厚分布及び地層断面の推定

SH型簡易貫入試験結果を基に、D側線の推定土層厚断面図を作成した(図20:土層厚のスケールは標高の3倍)。斜面中腹のP-7地点以外では $N_c=5, 10, 20, 30$ 相当の土層厚の差が小さく、泥岩の風化層が薄いことが分かった。斜面頂部は土層厚が薄い、宅地造成時に切土されたためと推察できる。斜面下部では土層厚が厚く、傾斜が上部よりやや緩くなっており、崩積土が堆積していることが分かる。

次にボーリングによる地質状況と踏査結果、及びSH型簡易貫入試験結果を合わせて地質断面図を作成した(図21)。このD側線付近では泥岩からなる基岩上に1.0～1.8mの表土及び強風化泥岩が存在し、また斜面下部の防空壕の上部はやや緩んだ状態である。

既往の簡易貫入試験の研究では $N_c=10$ 相当の土層が表層崩壊すべり面とされることが多い。だが本調査地では露頭や崩壊地との関係より、 $N_c=20\sim30$ の強風化層も一部崩壊していると考えられることから、安全側を見て $N_c=30$ を潜在すべり面と仮定すると、本調査地の他の区間においても最大層厚2m程度の崩壊が今後発生する可能性が考えられる。

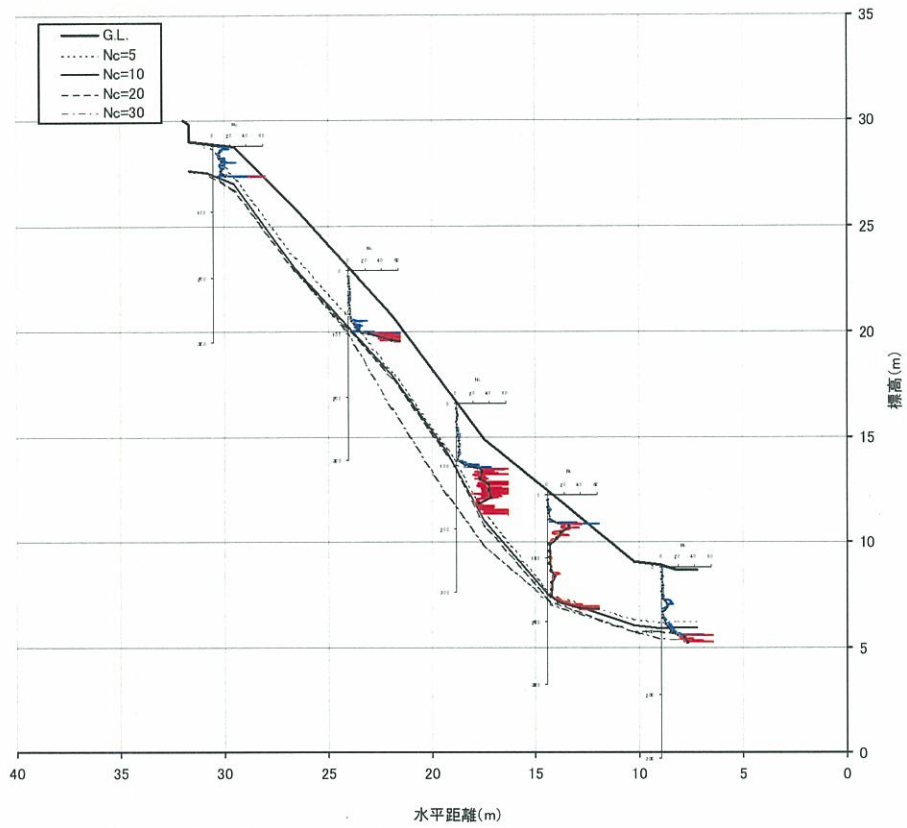


図 20 SH型簡易貫入試験による土層厚分布図 (D断面)
 ※土層厚は標高の3倍のスケールで表示

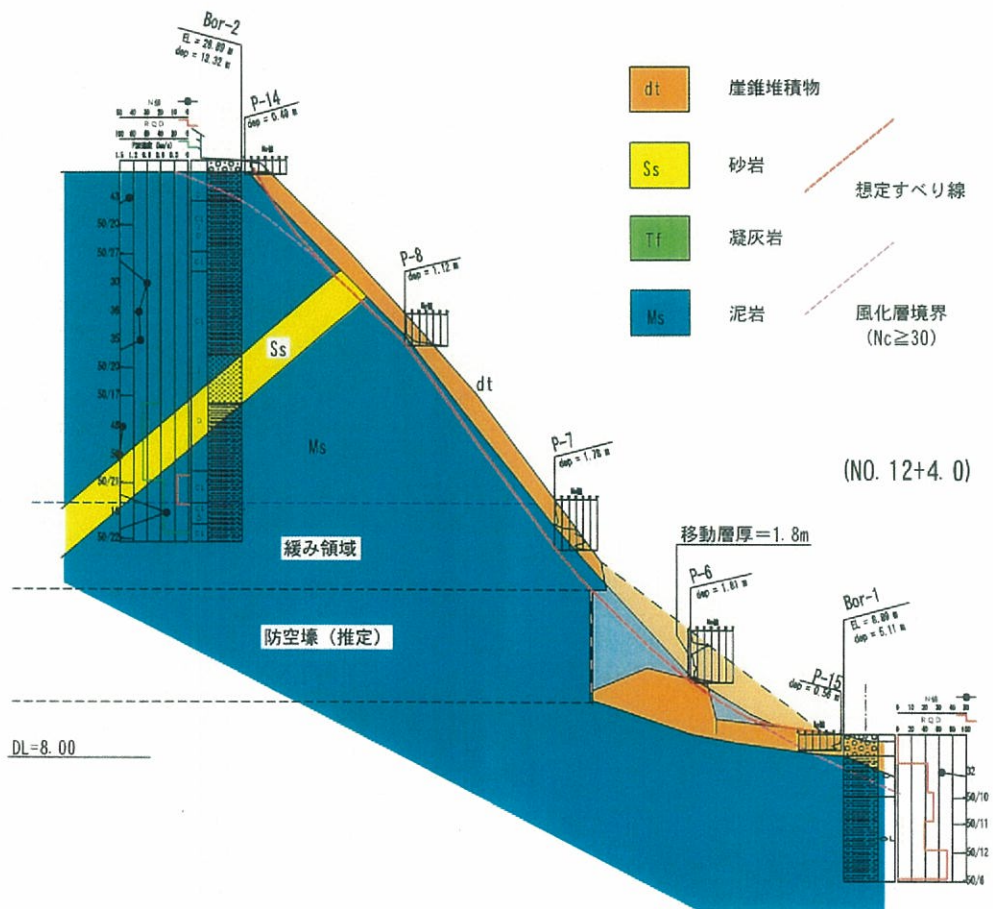


図 21 地質断面図 (D断面)
 ※土層厚と標高スケールは等倍

4. 3 対策工の検討方針

調査結果より、当斜面では風化土層厚が 1.1~1.8m 程度存在することが確認され、今回の崩壊はまさにその風化土層が崩壊したと言える。また今回崩壊した箇所は他の箇所と大きな違いがないため、当斜面では今後も同程度の崩壊が発生する可能性が高い。

そのため、斜面全体に対策工を行う方針とし、現在、検討・設計中である。

5. おわりに

急傾斜地崩壊対策事業における斜面の地質調査として、従来の主要調査であるボーリングとそれを補完するための SH 型簡易貫入試験を併用して実施し、その結果を元に対策工の検討を行った。崩壊の発生していない砂礫層を基盤とする斜面、及び崩壊発生後の泥岩層の斜面を対象としたが、いずれの斜面においても SH 型簡易貫入試験結果は斜面の土層状況・土層厚を良好に捉えていた。これにより、従来のボーリング調査だけでは把握できない急傾斜箇所の土層状況を把握可能となり、また軽便であるという利点を生かして多点で調査することにより、対象斜面の風化土層の状況を面的に掴むことができた。そして調査結果を対策工の設計に反映させることで、従来以上に合理的な設計が可能となったと考えられる。

今後も今回のような調査を様々な条件の現場で実施し、多くのデータを蓄積するとともに、そのデータを設計に対して有効に反映するための設計手法を検討することが重要である。

また、斜面の土層状態は不均一なものと考えられるため、調査・設計の精度及び効率の観点より、対象斜面に対して必要十分な試験点数や試験密度を検討する必要がある。

さらに、施工時の安全管理上からも斜面土層状況を十分に把握しておく必要があるため、こうした調査結果を安全対策に反映させる手法の確立も望まれる。

引用・参考文献

- 1) 稲垣秀輝(2000)：滋賀県南西部に分布する風化花崗岩の表層崩壊の特徴，応用地質，41(2)，103-112
- 2) 遠藤治郎・松崎健・木村隆樹・五十嵐浩行(1989)：積雪地森林の水保全機能に関する研究(4)，新大演報，22，51-65
- 3) 大久保駿・上坂利幸(1971)：簡易貫入試験機による地盤調査，土木技術資料，13(2)，83-87
- 4) 大久保駿・上坂利幸・船崎昌継(1971)：簡易貫入試験機による地盤調査(2)－試験機の性能－，土木技術資料，13(8)，403-409
- 5) 逢坂興宏(1996)：斜面土層構造の測定，恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編「水文地形学」，古今書院，16-23
- 6) 日浦啓全・大手桂二・日置象一郎・村上公久(1978)：山地における土砂生産に関する研究(I)，京都府立大学農学部演習林報告，No.22
- 7) 平松晋也・井良沢道也・本郷国男(1998)：融雪に起因した山腹崩壊の発生に関する一考察，新砂防，51(3)，27-34
- 8) 平松晋也・尾藤顕哉(2001)：斜面調査用簡易貫入試験を用いた崩壊予測モデルへの入力諸元簡易設定手法に関する一考察，新砂防，54(4)，12-21
- 9) 平松晋也・宮前崇・長谷川秀三・漆崎隆之(2004)：改良自記型簡易貫入試験機の砂防調査への適用性，平成16年度砂防学会研究発表会概要集，220-221
- 10) 福永健司・石塚望・富樫勇介・横島朋子・漆崎隆之・長谷川秀三(2003)：コナラの根系分布と土壌硬度の関係，日本緑化工学会誌，29(1)，261-264
- 11) 松倉公憲・田中幸哉・若月強(2002)：韓国ソウル郊外の花崗岩と片麻岩山地における土層構造と表層崩壊形状に与える基盤岩質の影響，地学雑誌，111(3)，416-425
- 12) 水山高久・小菅尉多(1993)：表層崩壊予測のための土層調査例，新砂防，46(1)，38-40
- 13) 吉松弘行・川満一史・瀬尾克美・村中重仁・長谷川秀三(2002)：斜面の表層構造調査用の簡易貫入試験機について，平成14年度砂防学会研究発表会概要集，392-393