

既設盛土の簡易点検手法の研究

Study on Simple Inspection Method of Road Embankment

野村英雄 Hideo NOMURA (栄建設コンサルタント(株))
 今岡洋輔 Yosuke IMAOKA (山口大学大学院理工学研究科)
 鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学評価室)

降雨による自然斜面の崩壊は毎年のように発生しているが、近年は集中豪雨の多発に伴い、盛土構造物の崩壊が発生している。盛土崩壊による災害を防ぐためには既設盛土の点検によって安全性を評価することが重要であるが、膨大な数の盛土を評価するためには簡易な点検法が必要となる。筆者らは盛土安定度の簡易な評価手法の研究を行っているが、その一環として、既設盛土の品質評価への適用を想定して締固め土に対する簡易動的コーン貫入試験を実施したのでその結果を報告する。また盛土の安定度評価には盛土内部の地下水面形成の評価が必要であることから、簡易な安定度評価手法へ反映することを目的に数値解析によって浸透形態による安全性への影響評価を行ったのでその結果を併せて報告する。

キーワード：盛土，締固め度，サウンディング，浸透流解析 (IGC : E06, H06)

1. はじめに

近年、多発している盛土崩壊を防止するためには既設盛土の安全性を評価する必要がある。既設盛土の代表的な点検手法としては「道路防災点検要領」¹⁾が挙げられる。道路防災点検は、約5年に1回の頻度で実施される防災点検と、1~2年に1回の頻度で実施される定期点検によって構成されている。この点検は図-1に示すように、

盛土の変状、基礎地盤地形、盛土材の材質、地下水の状況、溪流と排水施設の状況、河川水や波浪の影響、といった項目を目視確認及び資料調査によって点数化して評価していくものである。この点検手法は、多くの崩壊パターンを網羅する充実した内容であるが、地域特有の土質特性を考慮することによってさらにその精度を向上させることができると考えている。

要因	評点区分	盛土区分毎の配点					各要点内の最高評点
		片切・片盛部	溪流横過部	傾斜地部	平地地部	切盛境部	
変状	構造的なクラック・開口亀裂あり	2	2	2	2	2	/ (3)
	のり面下部の洗掘あり	3	3	3	3	3	
	補修箇所多数あり	2	2	2	2	2	
	のり面の肌落ちあり	1	1	1	1	1	
	該当なし	0	0	0	0	0	
安定地盤	地すべり・クレープ	2	2	2	2	2	/ (2)
	軟弱地盤	1	1	1	1	1	
	崖錐	1	1	1	1	1	
	安定地盤	0	0	0	0	0	
盛土材	砂質土	1	1	1	1	1	/ (1)
	粘性土	0	0	0	0	0	
	礫質土	0	0	0	0	0	
	不明	1	1	1	1	1	
水の影 響	地下のり部が湿潤	6	6	6	6	6	/ (6)
	盛土のり面に流水跡あり	6	6	6	6	6	
	のり面・自然斜面に湧水あり	6	6	6	6	6	
	周辺の土地利用が湿潤	-	2	2	2	-	
	山側尻部に側溝なし	-	-	2	-	-	
	側溝、縦排水溝断面が不十分	4	4	4	2	6	
該当なし	0	0	0	0	0		
溪流の状況	溪流内に土(砂)石流、流水あり	3	3	-	-	-	/ (3)
	上流側に崩壊地あり	2	2	-	-	-	
	常時流水まないが、ガリーがある	2	2	-	-	-	
	排水工春口部への集水が悪い	2	2	-	-	-	
	該当なし	0	0	-	-	-	
	横断排水施設	6	6	-	-	-	
	排水工断面(φ、D)が不十分	3	3	-	-	-	
排水工流末処理不十分	3	3	-	-	-		
盛土内部での排水工の屈曲・縮小あり	3	3	-	-	-		
横断排水施設がない*	6	6	-	-	-		
該当なし	0	0	-	-	-		
波浪の影 響	のり部が洪水、高潮時に冠水	2	2	2	2	2	/ (2)
	洪水、高潮時に排水工流末が冠水	2	2	2	-	-	
	のり部が常時冠水(攻撃斜面)	1	1	1	2	2	
	のり部が常時冠水	1	1	1	1	1	
	該当なし	0	0	0	0	0	
合計						(A)	点

安定度調査表の改善項目

- 中国地方特有の盛土材料の土質特性と、盛土の締固め度を考慮して評価に反映する
- 盛土への地下水の浸透経路を考慮して評価に反映する
- 盛土内の地下水面を考慮したすべり安全率を評価に反映する。

図-1 既設盛土点検における安定度調査手法の改善イメージ ((財)道路保全技術センター：平成8年度道路防災点検要領(豪雨・豪雪等)，1996 に加筆)

一方、中国地方では盛土材として水に弱い特性を持つまさ土が用いられることが多い。したがって、まさ土からなる既設盛土の安全性を評価するには、まさ土特有の力学特性を考慮した評価手法が必要である。また、締固めた土の力学特性は締固め度によって変化するが、現在の調査表ではこの点が考慮されていないことから、盛土の締固め度を評価することが望まれる。さらに、降雨による盛土の崩壊は盛土内部への浸透状況が大きく影響することから、想定される浸透経路と、その結果低下するすべり安全性を考慮することも必要である。

以上の点から筆者らは、地域特有の土質特性や浸透経路を考慮した簡易な点検手法の研究を行っている²⁾。本文では、簡易な方法で締固め度を算出することを目的として実施した、締固めたまさ土に対する簡易動的コーン貫入試験の結果と、浸透経路がすべり安全性に及ぼす影響を数値解析から評価した結果を報告する。低コストかつ実績の多いサウンディングの1つである簡易動的コーン貫入試験に着目し、密度管理した土層から得られる貫入抵抗値を調べた。実験は50×50×100 cmの締固め土槽と大型ペロフラムシリンダーを用いて静的締固めにより密度管理した土層を作製し、締固め度や上載圧を変えて簡易貫入試験を行った。本文では主に貫入抵抗の上載圧依存性について検討した結果を述べる。また、盛土と地山のモデルを設定した浸透流解析と安定計算によってすべり安全率を調べた。安定性への影響因子として、盛土基盤の傾斜角度、基盤からの湧水の発生位置と湧水の水頭、盛土表面からの降雨浸透をとりあげてモデル化し、それらによる地下水面の形成状況と安全率を求めた。本文では主に各因子の安全率への影響の度合いを比較した結果を述べる。



写真-1 土槽実験の様子

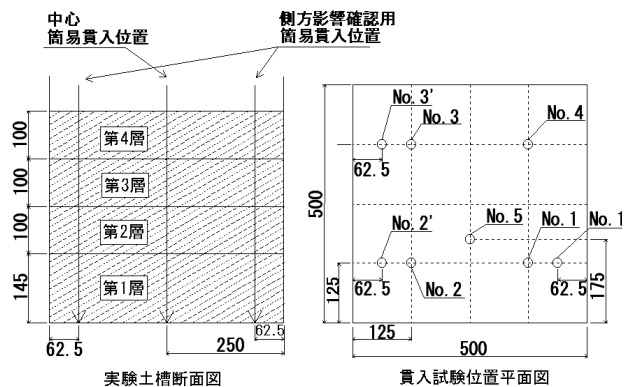


図-2 貫入位置（影響検討試験） 単位：mm

2. 土層実験における貫入の影響範囲

貫入値に対する土槽底面や側壁、既存貫入孔の影響範囲と土層のバラツキなどを確認するための予備的に実験を行った。写真-1に試験状況を示す。自然乾燥させたまさ土（含水比 1.3%、土粒子密度 2.620g/cm³、細粒分含有率 13.1%、細粒分混じり礫質砂）の試料 180kg を 4 層に分けて土槽に投入し、ペロフラムシリンダーに剛結した載荷板によって各層の試料を締固めた。なおここでは試験装置の制約から、高い締固めエネルギーが期待できる動的締め固めではなく、静的な締固め方法とした。締固めは土層の表面から載荷板によって 200kPa を加圧して土層の圧縮が停止するまで行った。各層を締固めた後に上載圧を与えない状態で貫入試験を行い、その後上部層を作成した。これを繰り返して 4 層の土層を作成した後に、上載圧を変えて貫入試験を行った。ただし、載荷を行うシリンダーのストローク長の制約から、第 1 層の作成に際しては他の層より土を多くして層厚も厚くなっている。なお、結果の整理に際しては、以下に示すように 1 回の打撃における貫入量を 10cm に換算して得られる打撃回数を N_d 値と定義し、これを用いて行なった。

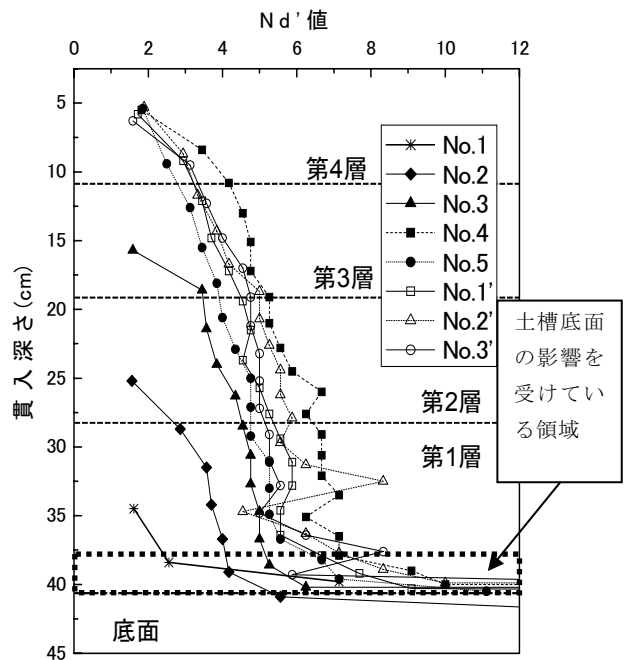


図-3 N_d 値の深度分布

$$N_d' = \frac{10}{S} \quad (1)$$

ここに、S：1回の打撃における貫入量(cm)

図-2に簡易貫入試験の貫入位置を示す。図-2において、No.1, No.2, No.3はそれぞれ第1層、第2層、第3層作製後に貫入試験を実施し、No.4, No.5およびNo.1', No.2', No.3'は第4層を作製した後に貫入試験を実施した。

図-3にすべての貫入試験の N_d' 値の深度分布図を示す。同図より、土層実験における N_d' 値は、貫入深度が土槽底面から5cmの範囲に接近すると土槽底面の影響を受けることが分かる。また第1層から第4層にかけて上部土層の作成に伴って貫入値が増加していることが分かる。

図-3の内、第4層から貫入した試験であるNo.4, No.5, No.1', No.2', No.3'の深度分布図に着目すると、これらはバラツキが小さく、簡易貫入値に対する側壁からの近接度合いの影響は、土層内での平面的な貫入位置にかかわらずほぼ一定である。また既存貫入孔に近接するNo.1', No.2', No.3'と、既存貫入孔から離れたNo.4を比較してみると、違いがほとんど見られず、貫入孔の影響はバラツキの範囲に入るほど小さいものであり、ほとんどない。

また、図-4に各層の乾燥密度の深度分布図を示す。同図より、下層部の乾燥密度が増加していることから、 N_d' 値は締固めによる下層部の密度増加や上部土層の作成に伴う上載圧の増加によって上昇すると考えられる。

3. 土層の締固めエネルギー

研究の目的である簡易動的コーンの貫入値から締固め度を推定するためには、土層の締固め曲線を得る必要がある。今回貫入試験に供した土層は、ペロフラムシリンダーを用いた静的な締固めによって作製した。そこで、静的締固め方法から得られる締固め曲線と、従来の突固め法(JIS A 1210)での締固め曲線を比較した。突固めによる締固め試験では、突き固め回数を変えることで異なる締固めエネルギーでの締固め曲線を求めた。図-5にこれらの比較結果を示す。特徴的なのは突固めによる締固め試験(以後、動的締固めと言う)では締固めエネルギー毎に相似形の締固め曲線を示すが、静的な締固めでは締固め曲線の形状が動的なそれとは異なることである。載荷圧力 $\sigma_v=200\text{kN/m}^2$ での静的締固めを行った締固め曲線は動的な締固めエネルギーでは $E_c=110\sim 220\text{kJ/m}^3$ 程度に相当する。このような傾向は既存の研究³⁾でも報告されているがこの理由は、ランマーを用いた動的な締固めでは変形が容易であるため土粒子配列が変化しやすく、“密な”配列状態になりやすい。一方、静的な締固めでは変形方向が鉛直下方に拘束されているため土粒子配列が変化し難く、含水比の増加による土粒子間の摩擦の低減やサクシヨンの低下が土粒子配列の変化に大きく影響しているためと考察される。

現場における盛土の締固め方法は、動的締固めと考えられる振動ローラー系の締固め機械や、静的締固めと考えられるタイヤローラーやロードローラーのいずれも用

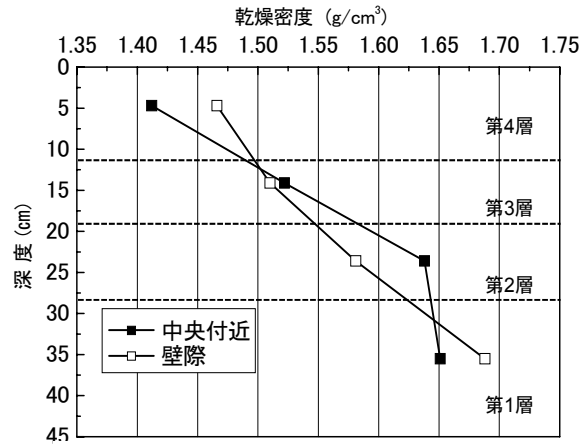


図-4 乾燥密度の深度分布

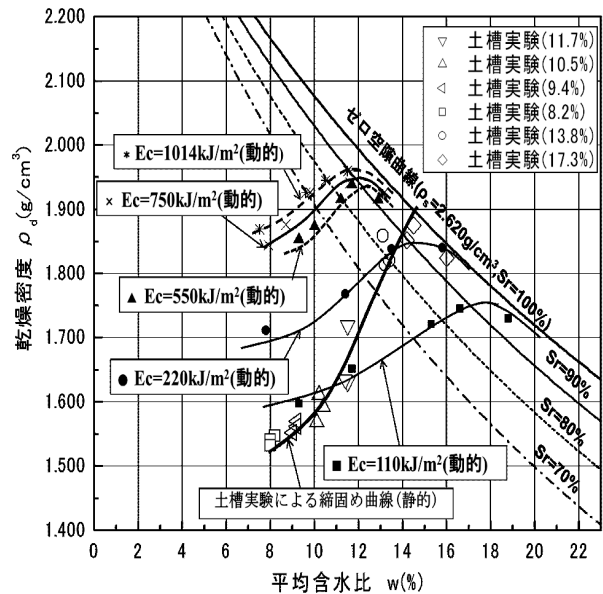


図-5 土槽実験における締固めエネルギーの推定

いられる。盛土で計測した簡易動的コーン貫入値から締固め度を推定するためには、締固めの方法と締固めエネルギーを考慮した上でコーン貫入値を評価する必要がある。

4. 貫入抵抗の上載圧依存性と飽和度の影響

現場でのサウンディングの値に対して上載圧が影響することは広く知られた事実である。したがって、現場における簡易動的コーン貫入試験での貫入値には、上載圧の増加に伴う貫入値の増加分が含まれている。しかし本研究の目的である、現場でのコーン貫入試験から締固め度を求めるには、試験結果から上載圧の影響を除去した上で、締固め度を評価する必要がある。そこで上載圧の影響を調べるために、ペロフラムシリンダーと載荷板によって異なる上載圧を土層に与えた状態で、簡易動的コーン貫入試験を行った。この実験では、層毎に N_d' 値を平均した値を平均 N_d' 値と定義して、測定結果の整理を行った。上載圧依存性の検討を行うため、実験ケースとして上載圧 σ_v' は 0, 50, 100, 150, 200kN/m²

の5ケース, 供試体含水量 w は 8.2, 9.4, 10.5, 11.7, 13.8, 17.3% の 6 ケースで試験を行った。

図-6 に全ての実験ケースの上載圧と平均 N_d' の相関を示す。平均 N_d' は上載圧の増加に対してほぼ線形に増加しているのがわかる。

原位置での貫入試験に対する上載圧補正式は主に標準貫入試験において研究されており, 代表的なものは道路橋示方書⁴⁾と, 港湾の施設の技術上の基準・同解説⁵⁾に以下のように示されている。

道路橋示方書⁴⁾

$$N_1 = \frac{170 N}{\sigma_v' + 70} \quad (2)$$

ここに, N_1 : $\sigma_v' = 100 \text{ kN/m}^2$ に換算した N 値
 N : 標準貫入試験から得られる N 値
 σ_v' : 有効上載圧 (kN/m^2)

港湾の施設の技術上の基準⁵⁾

$$N_{0.66} = \frac{(N - 1.828 (\sigma_v' - 0.66))}{(0.399 (\sigma_v' - 0.66) + 1)} \quad (3)$$

ここに, $N_{0.66}$: $\sigma_v' = 0.66 \text{ kgf/cm}^2$ に換算した N 値
 N : 標準貫入試験から得られる N 値
 σ_v' : 有効上載圧 (kN/m^2)

ここで, これらの代表的な上載圧補正式と土層実験結果を比較した結果を図-6 に示す。不飽和状態である含水比 8.2%~13.8% (飽和度 30.1~80.5%) の平均 N_d' と上載圧の関係を直線近似させると, 近似直線の傾きは 0.016~0.021 (相関係数 0.64~0.83) であり, 道路橋式や港湾式の傾き (0.047) と異なる傾向を示す。しかし飽和状態である含水比 17.3%での試験結果では, 近似直線の傾きは 0.039 (相関係数 0.91) で道路橋式や港湾式の傾きと比較的近い値を示す。この一因として, 道路橋式や港湾式が主に地下水位以下の飽和土に対しての適用を前提として設定されているためと推察される。そこで平均 N_d' と飽和度との関係を上載圧毎に整理した結果を図-7 に示す。飽和度 100%のデータを除いて整理すると, 飽和度の増加に伴って N_d' は減少し, その低下勾配は各上載圧においてほぼ同一のようである。そこで飽和度毎に N_d' と上載圧の関係を直線近似し, 飽和度と近似直線の N_d' 切片をプロットすると図-8 のように整理でき, N_d' 切片は飽和度の関数として表される。この N_d' 切片と, 図-6 に示した近似直線の勾配を用いると, N_d' ~ 上載圧 ~ 飽和度の関係は下式のように表すことができる。

$$N_d' = 0.0183 \cdot \sigma_v' - 6.96 \cdot Sr + 9.03 \quad (4)$$

ここに, N_d' : 1 回の貫入量を 10cm 換算した打撃回数
 σ_v' : 有効上載圧 (kN/m^2)
 Sr : 飽和度

以上の結果から, 平均 N_d' ~ 上載圧 ~ 飽和度の関係が

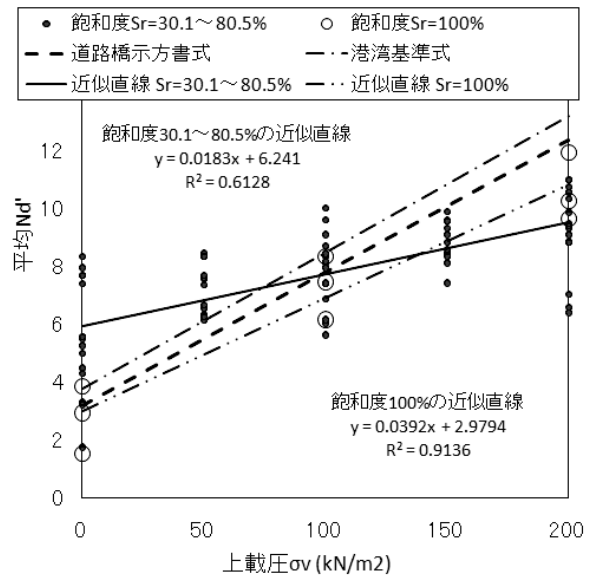


図-6 平均 N_d' 値と上載圧の関係

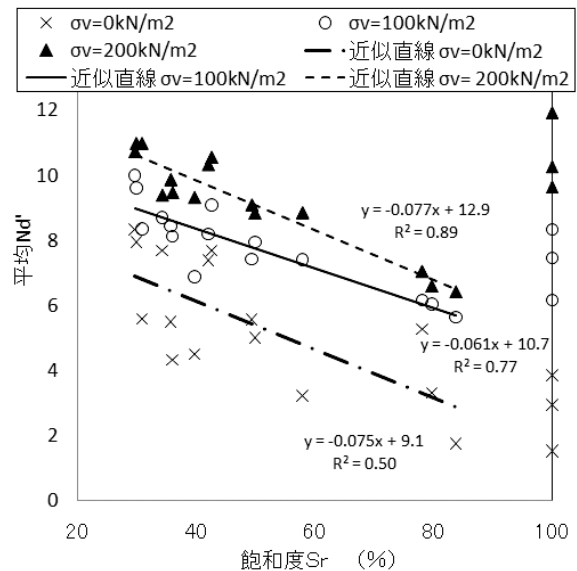


図-7 平均 N_d' 値と飽和度の関係

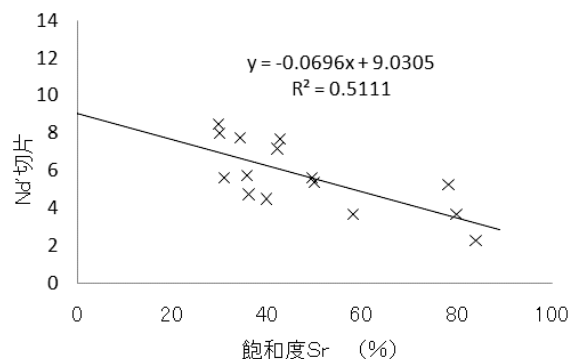


図-8 近似直線の N_d' 軸切片と飽和度の関係

ら, 現場で測定された盛土の N_d' 値と, その測定深度より算定される上載圧から現場の盛土の飽和度を推定できる可能性がある。ただし, 降雨浸透や湧水等による盛土築造後の飽和度変化が N_d' に与える影響や, 締固め曲線

形状が異なる動的締固めの際の飽和度と N_d' の関係、本研究の目的である締固め度 D_c との関係等、明確にする必要のある事項も多く、今後これらの点について検討していく予定である。

5. 浸透水による盛土の安全性低下

盛土の崩壊は降雨浸透や湧水等による地下水面の形成や飽和度の上昇によって発生すると考えられるが、地下水面の形状や高さは浸透経路によって変化し、すべり安全率も同様に变化する。既設盛土を簡易な手法で点検するには予想される浸透経路から安全性の低下度合いを評価できると都合が良い。そこで浸透流解析・安定解析を行って、浸透経路や基盤の傾斜角度が安全性に与える影響を調べた。検討は図-9 に示す傾斜基盤上の盛土を想定し、安定性への影響要因を変化させてすべり安全率の変化を調べた。影響要因としては以下の項目を対象とした。

- ・ 基盤傾斜角度
- ・ 基盤からの湧水位置と湧水水頭
- ・ 天端からの表流水の浸透
- ・ 法面からの降雨浸透

なお安定計算に用いる地下水面の形状は二次元浸透流解析によって求めたが、湧水と表面水浸透による地下水面は定常計算によって、降雨浸透による地下水面は非定常計算を行って求めた。浸透流計算に用いた解析プログラムは、大西・西垣⁶⁾によって開発された UNSAF である。安定解析は修正フェレニウス法を用いて行った。検討モデルの形状及び物性値を表-1 に示す。盛土形状は標準的な 1:1.5 勾配の法面とした。盛土材料はまさ土を想定し、その地盤定数は水浸させたまさ土に対するせん断試験結果⁷⁾⁸⁾⁹⁾や、工学的土質分類に応じた一般的な設計定数¹⁰⁾を参考に設定した。なお、まさ土は水浸による強度低下が発生するが、この強度低下を粘着力の喪失と考え、粘着力は 0 とした。安定解析における仮想すべり面は解析条件毎に円弧中心点と円弧半径を変えたトライアル計算を行い、最小安全率を示す円弧を求めた。しかし土質定数を粘着力 0 の摩擦系材料としたために、解析条件変化に伴う円弧形状の変化は見られず、最小安全率を示す円弧は概ね図-9 に示すような法面に沿った浅い円弧となった。

図-10 に基盤傾斜角度とすべり安全率の関係を示す。なお検討モデルの湧水発生位置は地下水面が高くなりやすい基盤岩上部に設定してある。基盤岩に湧水が無く地下水面が存在しない場合には安全率は基盤傾斜角度に関わらずほぼ一定である。しかし基盤からの湧水がある場合、基盤傾斜角度が大きいほど地下水面が高く形成され、それに伴い安全率は低下する。これは天端幅を固定して基盤傾斜角度を変化させているため、基盤傾斜角度が大きくなるとともに盛土断面積が増加し、盛土底部における地下水流速の低下が大きくなり地下水位が高くなるのが原因である。

図-11 に湧水水頭と安全率の関係を示す。湧水がある

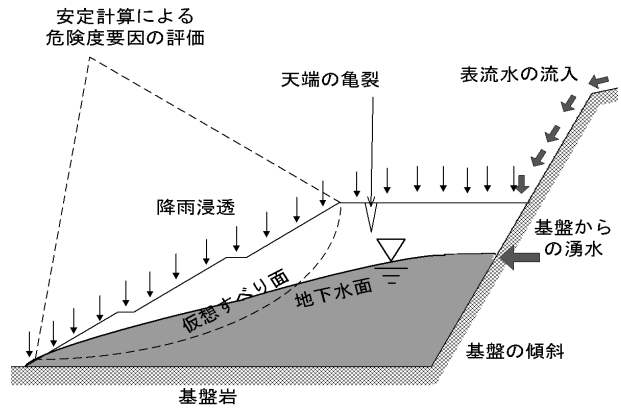


図-9 検討モデルの概略図

表-1 検討モデルの形状と物性値

盛土形状	天端幅	16m
	盛土高さ	15m
	法面勾配	1:1.5
基盤岩	小段	2段, 幅1m
	基盤勾配	10° ~ 80°
	透水性	1×10^{-5} cm/sec
盛土	単位体積重量	18kN/m ³
	粘着力c	0kN/m ³
	内部摩擦角	35°
	透水性	1×10^{-3} cm/sec

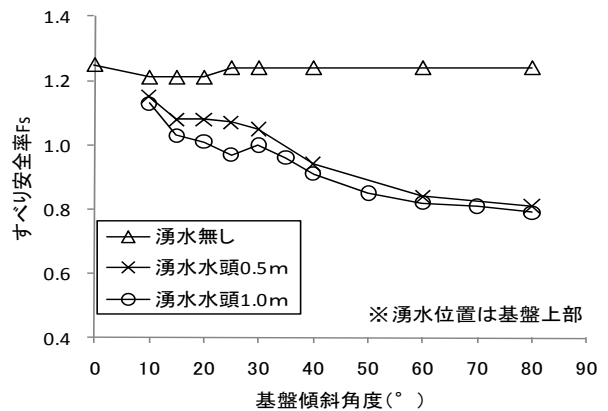


図-10 基盤傾斜角度の影響

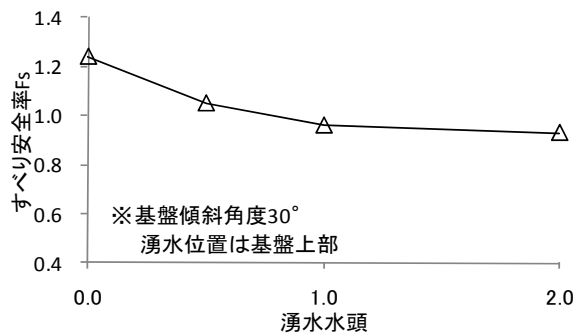


図-11 湧水水頭の影響

ことによって安全率は大きく低下するが、水頭値による低下はあまり大きくない。これは湧水の発生位置を盛土天端に近い基盤上部に設定しているため、最小安全率のすべり円弧が通過する盛土法面付近の地下水面の形状に、湧水水頭による大きな変化が見られないことが原因である。このように基盤上部からの湧水が想定される場合には、湧水水頭の大きさよりも湧水の有無の方が、盛土の安全性には重要であることが分かる。

次に降雨浸透によって生じる地下水の影響を調べた。検討は飽和不飽和浸透流解析を用い、図-12 に示す平成21年山口県豪雨災害時の真尾地点における降雨波形を盛土モデルに与え、得られた地下水面を用いて安定計算を行った。なお、浸透流解析時には天端舗装による遮水性を考慮している。図-13 に降雨浸透によって盛土に発生した地下水面を示す。地下水面は法面の表面と盛土底部に薄く形成される。これは盛土の透水性が比較的低いため、盛土深部まで雨水が浸透し難く、表面付近が先に飽和したためと考えられる。図-14 にすべり安全率の経時変化を示す。降雨強度が小さくなる土石流発生時刻以降も安全率は低下し続けているが、これは盛土内部の不飽和領域における浸透水が盛土底部の飽和領域に到達して、地下水面を押し上げ続けているためである。このような場合には、降雨ピークを過ぎた後に盛土が崩壊する可能性も考えられる。

図-15 に地下水の発生原因とすべり安全率の関係を比較してみた。なお比較の条件は、基盤傾斜角度は30°に固定し、湧水水頭は0.5mとした。また降雨浸透は前述した平成21年山口県豪雨災害時の真尾地点における降雨波形を盛土モデルに与えた結果を用い、表流水の流入は盛土上部において地表面から盛土内部に浸透させる条件で計算した。湧水や表流水の浸透、降雨浸透によって安全率は地下水が無い場合の1.25から1.0付近まで低下する。ただし、基盤底部（盛土底部）から発生する湧水は安全率の低下が小さく、影響が小さいことが分かる。

6. まとめ

膨大な数が存在する既設盛土の簡易点検手法として、現存する「道路防災点検要領」に着目し、これに地域独自の土の特性、簡易な調査手法、机上での予測解析を組み合わせるによってよりよい点検手法を構築することを考えた。図-16 に筆者らが考える室内実験・現場実験・事前解析と改善した簡易点検手法の関連性を示した。簡易動的コーン貫入試験による貫入値と、盛土の締固め度や強度との関連性を事前に調べておけば、現場における貫入試験によって実際の盛土の強度や締固め度を評価することができる。また、色々な盛土形状・透水係数・強度定数や浸透経路における盛土内の地下水位分布とすべり安全率を事前に計算して安全率チャートを作成しておけば、現場における盛土の外観観察や資料調査、簡易動的コーン貫入試験結果によって豪雨時の盛土のすべり安全率を推定することが可能である。この結果を盛土の安定度調査表に反映して安定度評価を行うことにより、簡易でかつ精度の高い既設盛土の点検が可能になると考えている。

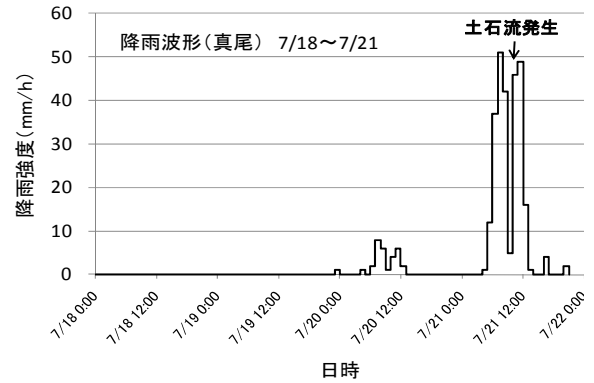


図-12 降雨波形

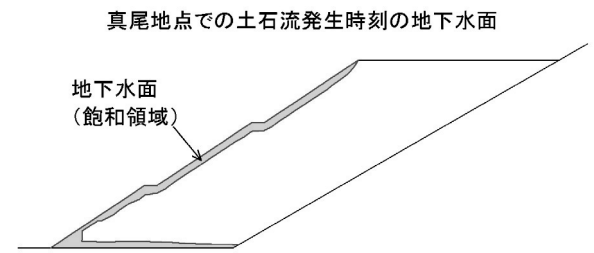


図-13 降雨浸透によって発生した地下水面

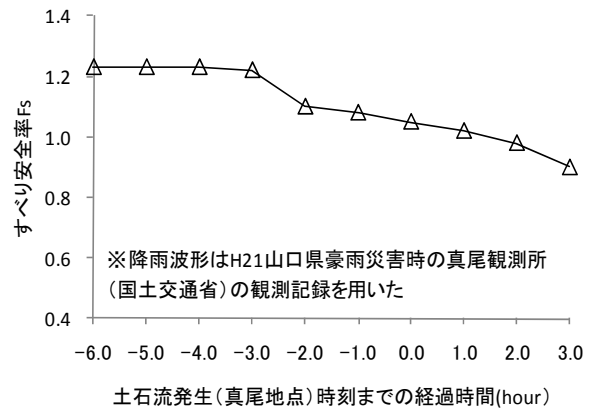


図-14 降雨浸透時のすべり安全率の経時変化

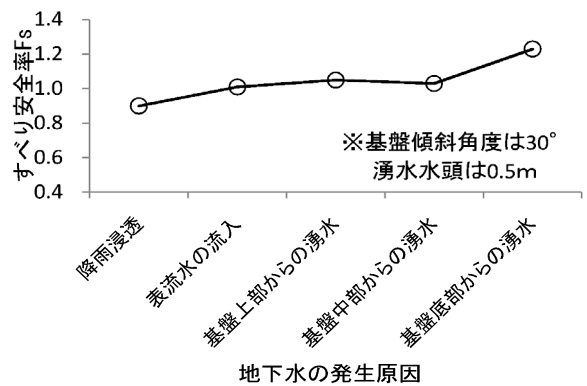


図-15 地下水の発生原因とすべり安全率

なお本論において報告した土層を用いた簡易動的コーン貫入試験では、締固めた不飽和まさ土の貫入値～上載圧～飽和度の関係を得ることができた。しかし、締固め方法の影響、外部からの浸透による飽和度変化の影響、締固め度や強度と簡易動的コーン貫入値との関係等、明確にする必要のある事項も多い。また、盛土法尻部でのパイピングや泥濘化による小崩壊とその進行等、地下水に起因する崩壊形態についても評価していく必要がある。今後はこれらの点について検討していく予定である。

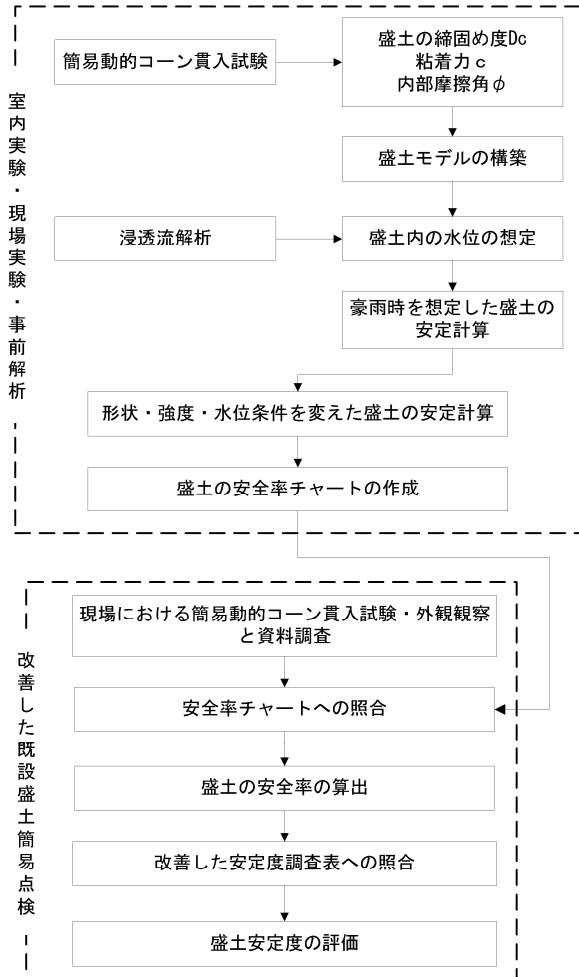


図-16 実験・解析の内容とそれによって改善する既設盛土点検手法の関連性

謝辞

本研究は(社)中国建設弘済会平成 20 年度技術開発支援制度の助成を受けて実施したものである。ここに記して、関係各位に対して感謝の意を申し上げる次第です。

参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：平成8 年度道路防災点検要領（豪雨・豪雪等），1996.
- 2) 野村英雄，大畑俊輔，鈴木素之，山本満男，国重典宏，小田村真一：豪雨時の道路盛土の安全性評価とその点検手法の提案，地盤と建設，Vol.27，No.1，pp129～136，2009.
- 3) 平川修土，西原晃，太田秀樹，大野嘉彦：マサ土の静的・動的締固め特性，第 20 回土質工学研究発表会，1985.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，IV 下部構造編，pp.564，2002.
- 5) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上），2007.
- 6) 大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和 - 不飽和領域の三次元浸透解析，第 12 回土質工学研究発表会，1977.
- 7) (社)地盤工学会調査部 平成 11 年広島県豪雨災害緊急調査委員会：平成 11 年の広島県豪雨災害調査報告書，2000.
- 8) (社)地盤工学会 中国支部，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，2003.
- 9) (社)土質工学会：風化花崗岩とマサ土の工学的性質とその応用，1979.
- 10) 日本道路公団：日本道路公団設計要領第 1 集土工編，p28，2006.

(2010 年 7 月 9 日 受付)

