

まだ壊れていない土構造物の維持管理法の提案

太田 英将 (建設・応用理学・森林・総監部門)

土で構成される土構造物斜面、あるいは自然斜面については、「素早く造る」「壊れたら素早く直す」ということを念頭に、主に経験知に基づいた調査・設計手法が発達してきた。維持管理が重要な時代になり、「造る」と「直す」の間にある「まだ壊れていない」ものの評価が重要となってきたが、そのための(時間・コスト・論理的な合理性を持った)実現可能な具体的手法が存在しなかった。新しく開発された調査機器等を用いた手法を紹介する。

キーワード：斜面安定、簡易調査、低コスト、演繹法、崩壊確率、意思決定

1 はじめに

高度経済成長期に数多く造られた社会インフラのうち、「土」が関係する構造物(切土・盛土や道路横の自然斜面)は、今後老朽化が進み、維持管理していかねばならない時代となる。

物を造る時には、ピンポイントの場所で詳細な調査・解析・設計が行われる。予算も十分に確保される。しかし、出来上がった数多くの土構造物の健全性を評価・解析・設計するのに、一体どれだけの予算が割けるのだろうか？

盛土の耐震化などでは、許容変位量管理を行う数値解析手法が研究され、ほぼ完成の域に達している。しかし、予防保全が必要な箇所すべてに対して必要な調査・解析費を確保できる見込みは無い。技術は十分であっても、事業成立性が無いのである。

このため、現実的な方法論を考えなければならない。それができなければ土構造物の予防保全は絵にかいた餅になってしまう。

ところで、「土の劣化・老朽化」とはどんなことを言うのだろうか？岩盤が風化し、劣化しきったものが土である。土粒子そのものは、これ以上の劣化はあまり進まない。社会インフラを「土の劣化・老朽化」の視点でとらえたとき、それは土構造物としての劣化・老朽化のことを指す。劣化させる要因のうち最大の影響を持つものは「地下水」である。地下水が構造物としての性質を変化させるのである。

つまり、地中の水は位置エネルギーを使って、斜面物質の排出(地中侵食)→間隙率の増大→パイプ網の発達→地下空間部分の増大(緩みの増大)→地表の陥没・沈下→谷の発達(斜面崩壊)を引き起こす。これは、自然斜面、人工斜面の区別なく共通である。

現存する斜面が、この過程の中のどの状態にあるのかを現地で計測し、適切に評価することによって

はじめて、土砂災害防止のための投資を行うか否かの意思決定が可能となる。

2 造るとき、直すときの方法論

斜面崩壊や地すべりは土のせん断破壊現象なので、十分な期間の観測と、土質工学的な解析が原則である。しかし、社会インフラが大量に造られた戦後復興期は、じっくりと時間を掛けている余裕はなく、次々と工事の進捗を挙げていく必要に迫られていた。

そのような中で、盛土・切土斜面の築造方法として、「標準勾配」が用いられた。地すべり対策方法としては、地すべり地形を呈する箇所に「現状安全率+逆算法+計画安全率」の概念が用いられた。これらは、実際に施工された現場経験から、変動・非変動の境界を実例に基づいて安全基準化した統計的・確率的手法である。

また、壊れた斜面を素早く直すためには、壊れる直前の状態をギリギリの安定条件(安全率=1.0)と想定し、地盤条件を逆算する手法(逆算法)が用いられた。そして、計画安全率まで安定度を向上させることで、対策工設計を簡略化させることに成功した。

素早く造る、あるいは素早く直す、ということに関するこれらの方法は、土のせん断破壊現象というややこしい問題に正面から挑まなくてもよく、迅速な対策を行うための優れた帰納的手法であった。

時代は高度経済成長期から半世紀ほど経過し、社会インフラが老朽化し、対策が必要かどうかを判断し、対策を施すべきかどうかを意思決定する必要がある。しかし、まだ壊れていない斜面や土構造物に対しては、これまでの経験的方法では解決不能であり、演繹的手法を用いた土質力学的評価を避けて通ることはできない。演繹的手法を用いるためには、現地から土質に関する情報を直接取得しなければならないが、主にコスト面で現実的な手法がなかった。

3 予防保全が必要な土構造物

自然が平たい地形を造るのは、主に沖積低地のみである。人間は傾斜地においても平たい地形を造るために、切土・盛土といった造成を行い平坦化してきた。竣工直後から、自然は、放置された土構造物を元の地形あるいはより安定な地形に戻す仕事を開始し始める。利用する限り、人工地盤は維持管理が必要である。土構造物としては以下のようなものが代表的である。

①道路盛土

道路は線状構造物であり、繋がってはいじめて機能する。山間地の緊急輸送道路指定されている道路で、大地震時に壊れたら仮復旧であってものかなりの時間を要するものとして、盛土がある。今壊れていない盛土の健全性評価および対策は「しらみつぶし」に行わねばならない。時間と費用の制約がある。

②鉄道盛土

鉄道盛土は、多くの乗客を安全に輸送するために、高い安全性と不断のメンテナンスが行われている。予防保全レベルが高い土構造物である。

③宅地盛土

大規模造成地内の盛土は、その存在位置すら明らかでなく、施工時の情報もすでに破棄されて存在しない。事実上メンテナンスを放棄された土構造物である。「盛土は年数の経過とともに強くなる」という根拠なき神話によって、阪神・淡路大震災や、東日本大震災で数多くの谷埋め盛土が滑動崩落し、個人に責任が重くのしかかった。

④河川堤防盛土

本来自由に河道を変えて土砂を平野に供給し続ける機能を持っていた河川を、堤防によって流路を固定するための構造物である。何度も改築が行われている歴史的かつ内部構造不明な土構造物である。

⑤溜め池堤体盛土

農業用などに非常に数多くの溜め池が造られ、十分なメンテナンスがなされていない。対策には、予算の制約が大きい。

4 「今を評価する」調査手法の提案

盛土・切土等の土構造物や、自然斜面は、数量・延長ともに莫大であることから、維持管理業務のためにボーリング調査を行い、砂質土の不攪乱試料を採取し、土質試験を行うことは、よほどの重要箇所以外ではコスト的に非現実的と考えられる。また、土は不均質で、物性の違いがあるため、土質強度(特

に $c \cdot \phi$) のばらつきの把握も重要である。さらに、地下水位が、目標とする降雨量条件で、どの程度まで上昇するかを知るためには、地盤の透水性(透水係数 K) の把握も重要である。

限られた予算の中でピンポイントで最重要対策箇所を抽出する方法論もあった方がよい。

次の5つの斜面の調査評価方法を試験的に実施した。高さ3m程度の両盛土、区間延長 $L \approx 50m$ である。(1)~(3)および(5)は、調査員3人で2日間の作業、(4)は室内で半日の作業であり、時間的・コスト的に維持管理業務において実施可能なレベルと考えられる。

- (1) 土層構成：高精度表面波探査 (V_s , 換算 N 値)
- (2) 地盤強度計測：土層強度検査棒 ($c \cdot \phi$)
- (3) 透水性計測：原位置透水試験 (K)
- (4) 安定解析：浸透流解析(地下水位)と安定解析(平均安全率 F_s , 崩壊確率 PF)
- (5) 地中音測定：パイプ流の位置探査

4.1 土層構成：高精度表面波探査 (V_s , 換算 N 値)

応用地質(株)が開発し販売しているツールである(図1)。地盤の地表付近を伝わる表面波(レイリー波)を多チャンネルで測定・解析することにより深度20m程度までの地盤の S 波速度を二次元断面として画像化する技術である。素早く低コストで S 波速度構造を求めることができる。



図1 高精度表面波探査

4.2 地盤強度計測：土層強度検査棒（ $c \cdot \phi$ ）

土木研究所が開発した簡易な地盤調査器具である（図2）。コーンを突き刺して土層深を得、上載荷重を掛けつつベーンコーンを回して、 $c \cdot \phi$ を得る。 $c \cdot \phi$ は三軸圧縮試験結果との相関関係から導くため精密さにはやや欠けるが、数多くの計測が可能で強度のばらつきを統計的処理に導くことができる。精度よりも、数で勝負という考え方である。



図2 土層強度検査棒

4.3 透水性計測：原位置透水試験（K）

（株）四電技術コンサルタントが開発・販売する簡易な原位置透水試験装置である（図3）。

マリオットサイホンを利用した原位置透水試験装置（表層用）は、地表に直径30cm、深さ30cmの穴を掘って計測する。浅層用では $\phi 100\text{mm}$ 程度の穴を約2m掘って計測する。現場においては、穴を掘る時間と労力が大半となる。

4.4 安定解析：浸透流解析（地下水位）と安定解析（平均安全率 F_s 、崩壊確率 PF）

実測した透水係数 K を用い、目標とする降雨量で地下水位をシミュレーションする。そのうえで、実測した $c \cdot \phi$ を用いて安定解析を行う。このとき、 $c \cdot \phi$ のばらつき（標準偏差）を与えることで、統計的な計算をおこない、安全率 $F_s < 1.0$ となる頻度をもって崩壊確率 PF (Probability of Failure) を算出する。



図3 原位置透水試験

4.5 地中音測定：パイプ流の位置探査

土構造物の老朽化を防ぐには、「健全なパイプ流による地下水排除」が重要である。「健全」の意味は、地中侵食が少なく過大な空隙を地中に形成せず、途中で閉塞することなく、安定的に機能することである。

この目的のために、人工的な鋼製パイプドレーン工を設置したり、布団籠工を設置する方法があるが、予算の都合上、それらを十分数多く設置できるとは限らない。重要箇所をピンポイントで狙う技術も必要である。その際には「自然の地下水排除工」であるパイプ流（soil pipe）の近くに打設するのが効果的である。

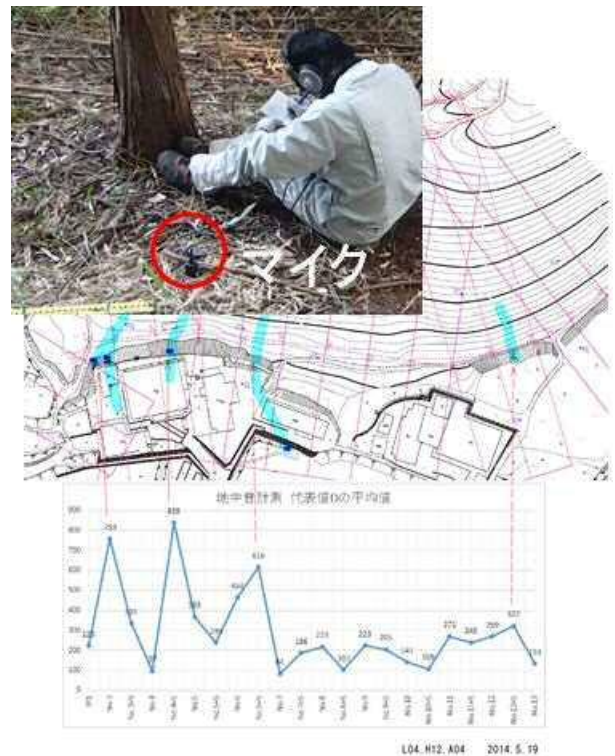


図4 地中音測定

森林総合研究所の多田泰之氏が考案し、(株)拓和が製作・販売している地中音測定器を用いて地中音でパイプ流の存在箇所を探索する方法が実用化されている(図4)。地中音測定法は、人間の五感の一つで確認できるので、他の間接的手法よりも説得性が高い。説得性が高いことは、特に非専門家が依頼者・受益者となる民間需要では重要である。

5 評価事例

前述の方法で調査を行った箇所安定度評価を行った。

安定計算は Bishop 法の順計算で実施した(図5)。活用した実測値は、透水係数 K、地盤強度 $c \cdot \phi$ およびそれらの標準偏差である。

実測 K を用いた降雨の浸透流解析では、100mm/日の浸透が地表面からある場合を想定した。浸透流解析しない場合には、豪雨時に地表面近くまで地下水水位が上昇するとした。

実測値の活用の違いでケース1~3の組み合わせをつくり、実測値を全く使わないケース4と合わせて評価結果を比較する(表1)。

対象盛土は、昭和20年代に築造された盛土である。現在も存在し、顕著な変状が発生していないので、 $F_s < 1.0$ の評価となるケース3、4は、正しい評価とは言えない。ケース2は、崩壊確率 $PF = 69\%$ ($< 100\%$) なので、斜面が崩壊せず存在し続けていることと必ずしも矛盾はしないが、地下水水位の上昇を過大に評価している。ケース1は、豪雨時平均安全率 $F_s = 1.26$ 、崩壊確率 $PF = 13\%$ となり、半世紀以上豪雨に耐え、存在し続けた盛土法面の評価として、最も妥当と考えられる。

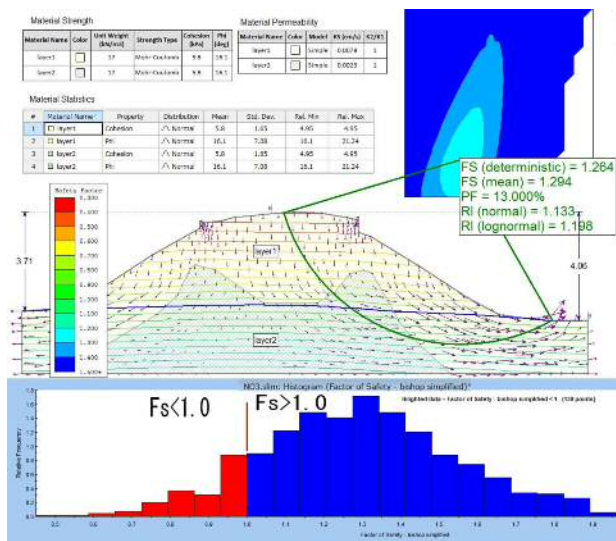


図5 現場実測値($K \cdot c \cdot \phi$)を活用した斜面安定解析結果例

表1 ケースによる斜面安定度評価結果の違い

ケース	標準値	実測 K	実測強度 $c \cdot \phi$		安定性 評価結果
			平均値	統計値	
1	×	○	○	○	$F_s = 1.26$ $PF = 13\%$
2	×	×	○	○	$F_s = 0.90$ $PF = 69\%$
3	×	×	○	×	$F_s = 0.90$
4	○	×	×	×	$F_s = 0.31$

○採用, ×不採用, 標準値: 緩い砂質盛土なので $c=0$, $\phi = 25^\circ$, 実測 K: layer1 の $K = 7.8e-03 \text{ cm/s}$, layer2 の $K = 2.3e-03 \text{ cm/s}$ で、日雨量 300mm の 1/3 の 100mm/日 が地表面から浸透したとして定常浸透流解析を実施, 実測強度 $c \cdot \phi$: 土層強度検査棒による $c \cdot \phi$ 計測値 ($c = 5.8 \text{ kPa}$, $\phi = 16.1^\circ$), 統計値: 標準偏差 $\times 3$ 倍の幅で正規分布するとして、確率的安定計算を実施。(c の標準偏差 $\sigma = 1.65$, ϕ の $\sigma = 7.08$)

6 まとめ

老朽化する社会インフラや既存造成地の維持管理は、すでに差し迫った問題となっている。しかし、従来型の一点豪華主義的な調査・解析・設計・対策では、量的・時間的・費用的問題を解決できないだろう。

今回ご紹介した程度の現場計測であれば、コスト面から十分実現可能性が高い。また、「まだ壊れていない土構造物」には、土質工学的な順解析以外の解決策がないことから、最小限のコストで実測値を得る方法の一つとなりえるものとする。

簡易な調査・対策は、業界の利益に反することになる可能性もあるが、技術者として解決していかないといけない問題と考える。

太田 英将 (おた ひでまさ)
技術士 (建設部門、総合技術監理部門)
(応用理学部門、森林部門)
有限会社太田ジオリサーチ 代表取締役
Apec Engineer (Civil)
コンクリート診断士
地盤品質判定士
e-mail: ohta@ohta-geo.co.jp



平成26年度 第1回業績研究発表会 平成26年7月5日(土)

まだ壊れていない土構造物の維持管理法の提案

都市による砂害防止対策 駅前による道路陥没対策 橋脚による地盤沈下対策 集積場による汚染土壌対策

太田 英将 (太田ジオリサーチ)
(建設・応用理学・森林・総監部門)

1
<http://www.obta-geo.co.jp>

土の劣化・老朽化とは？

- 土は最終劣化物、これ以上劣化しない
- 地中の水は位置エネルギーを使って
- 斜面物質の排出(地中侵食)→間隙率の増大→パイプ網の発達→地下空間部分の増大(緩みの増大)→地表の陥没・沈下→谷の発達(斜面崩壊)を引き起こす
- 地下水が土の構造を変化させ、それに伴い安定性も変化する

2
<http://www.obta-geo.co.jp>

従来の方法論は統計的経験則

- 標準勾配
さまざまな勾配の中で「壊れる」と「壊れない」の境界から導かれた経験則
- 計画安全率
地すべり対策の試行錯誤の結果、このくらいの安全率があれば、ほとんど壊れない(崩壊確率PF≒0)とされる安全率

「素早く造る」「素早く直す」ためには土質力学を使わない!

3
<http://www.obta-geo.co.jp>

「造る」と「直す」の中間の方法論

現状評価は土質力学的方法

- 「いまの状態はどんな具合？」

安全率=抵抗力÷滑動力

$$F_s = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \phi + c \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

斜面は現存している; $F_s > 1.0$

4
<http://www.obta-geo.co.jp>

既存の方法論

既存の方法論は、現状を評価するのに向いていない

- 地盤構成: ボーリング調査+N値
→N値からの強度換算では安定計算できない
- 地盤強度: 不攪乱試料採取+三軸試験など
→砂質土系の不攪乱試料採取は難しい。高価。
- 間隙水圧: 地下水位観測
→長期の観測が必要。崩壊時の水圧の設定は? 地表面?
- 評価手法: 2次元安定解析
→2次元でよい場合、悪い場合
- 評価結果: 安全率
→安全率で防災投資判断できる?
→ $F_s=1.05$ と $F_s=1.30$ の評価は、どちらも「崩れない」

5
<http://www.obta-geo.co.jp>

換算N値は $c=0\text{kN/m}^2$ 、 ϕ のみ(砂質土)

従来の試験方法は簡易動的コーン貫入試験でもスウェーデン式サウンディングでも、N値換算が基本

標準貫入試験値
図-1.4 内部摩擦角 ϕ とN値の関係

6
<http://www.obta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

粘着力C=0 kN/m²の結末

- 無限長斜面の安定度評価

$$Fs = \frac{(W \cos \theta - U) \tan \phi + c \cdot l}{W \cdot \sin \theta}$$

土の単位体積重量 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$
 粘着力 $c = 0 \text{ kN/m}^2$
 内部摩擦角 $\phi = 30 \text{ 度}$
 土層厚 $h = 2.0 \text{ m}$
 1m幅あたりの質量 $W = 34.0 \text{ kN/m}$
 水の単位体積重量 $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

注連勾配	巻積厚	巻積力 T(kN/m)	巻積力 W(kN/m)	巻積力 U(kN/m)	安全率		安全率
					FS	FS	
1:1.0	45.0	24.0	24.0	1.41	1.68	6.8	0.0
1:1.2	39.8	21.8	21.1	1.30	1.63	9.2	0.1
1:1.5	33.7	18.9	18.3	1.20	1.58	11.4	0.0
1:1.8	29.1	16.5	15.7	1.14	1.52	12.8	0.0
1:2.0	26.6	15.2	14.4	1.12	1.50	13.5	0.0
1:2.5	21.8	12.6	11.8	1.08	1.46	14.6	0.0
1:3.0	18.4	10.8	10.0	1.06	1.44	15.2	0.0
1:4.0	14.0	8.2	7.4	1.05	1.43	15.8	0.0

経験手法と演繹手法はリンクしていない
現状評価不能

標準勾配は土質力学的には不安定斜面

7 <http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

高精度表面波探査

8 <http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

換算N値に頼らないC・φ直接計測

土層強度検査棒

換算N値ではなく直接C・φ計測へ

地盤調査の方法と解説

荷重計
トルク計

9 <http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

土層強度検査棒

土層強度検査棒試験データシート

計測が容易なので数多くのデータが得られ、統計処理できる

10 <http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

原位置透水試験

表層用
浅層用(2m)

排水
現位
N

11 <http://www.ohta-geo.co.jp>

OHTA-GEO

被災箇所の再現の場合

C・φがわかると水頭だけが未知数になる

土質工学は崩壊時水圧を極めて甘く評価している、と思う

某鉄道
庄原

12 <http://www.ohta-geo.co.jp>

被災箇所再現の場合

地下水圧

吹き飛ばされた岩

菱刈町の道路沿い

水圧爆発孔 直径21cm

パイプ流が被圧水化し高水圧で道路沿いの巨大岩塊を吹き飛ばした

13
<http://www.obta-geo.co.jp>

岩は水圧で吹き飛ばされた

14
<http://www.obta-geo.co.jp>

地下水流を「耳」で探る

地中音測定

ミズミチを流れる水音は聞こえる!

水音のパワーレベル

地下水流

15
<http://www.obta-geo.co.jp>

地中音測定

16
<http://www.obta-geo.co.jp>

高水圧こそが崩壊原因のような気がする

地下水が吹き出て崩壊が発生

爆裂的崩壊

相対的難透水性地盤

盛土本体

土砂と水が流れた跡

自由水頭で崩壊しているようには見えない

地盤による崩壊で現れたパイプ破裂跡

新開原小千谷町

爆裂孔から液体状に流下する「土」

17
<http://www.obta-geo.co.jp>

高水圧こそが崩壊原因のような気がする

地下水が吹き出て崩壊が発生

爆裂的崩壊

相対的難透水性地盤

盛土本体

土砂と水が流れた跡

崩壊面のパイプ流れ

表層部には「相対的難透水性地盤」

地下水が吹き出て崩壊が発生

崩壊面にはパイプ穴があり、土砂は流動している

18
<http://www.obta-geo.co.jp>

土質工学は崩壊時水圧を極めて甘く評価している、と思う

C・φがわかると水頭だけが未知数になる

崩壊時の被圧水頭

19 <http://www.ohita-geo.co.jp>

高水圧こそが崩壊原因のような気がする

地震による崩壊で現れたパイプ爆裂坑

崩壊面内のパイプ (ボールペンが入る)

新潟県小千谷市

20 <http://www.ohita-geo.co.jp>

高水圧こそが崩壊原因のような気がする

爆裂孔から液体状に流下する「土」

円弧滑り? など見たことない (海成堆積物の円弧滑り跡ならあるが)

押し抜きせん断破壊のようだ

パイプ流は永遠の課題だ!

21 <http://www.ohita-geo.co.jp>

「演繹」であることが何より大切

実測値があると演繹的評価が可能

地震強度による安全率の違い

透水性の違いによる地下水位の違い

22 <http://www.ohita-geo.co.jp>

解析例

(非専門家の理解が容易)
(投資の意思決定者は非専門家)

確率解析結果(例)

安全率Fs=1.26
崩壊確率 PF=13%
信頼性指数RI=1.13<3

Reliability Index
信頼性指数: この値が3以上であれば完全に安定(崩壊確率0%)な斜面

Rocscience社のSlide V6使用
C・φはどの層でも正確に算定させ、
モンテカルロシミュレーション

Fs<1.0 破壊
Fs>1.0 破壊せずFs≧1

23 <http://www.ohita-geo.co.jp>

意思決定

Fs=1.26だがPF=13%

どちらを優先するか?

Fs=1.04だがPF=0%

24 <http://www.ohita-geo.co.jp>