

技術

# 福島第一原発を襲った土砂災害

## ～夜の森線 No.27 鉄塔を倒壊させた盛土地すべり～



有限会社太田ジオリサーチ 相談役  
技術士（森林部門—森林土木，建設—土質及び基礎，応用理学—地質，総合技術監理—森林—森林土木） 太田 英将

### 1. はじめに

2021年7月には、熱海市の残土盛土の崩壊による土石流で甚大な人的被害を出したのをはじめ、6月に千葉県多古町の盛土、8月に滋賀県の湖西道路横の斜面からの残土崩壊などがあった。事の重大性から、盛土・残土に関する法制化が議論され始めた。

熱海市の災害の場合には、宅地造成の範疇か、森林開発なのか不明確だったが、土にとってみれば行政の区割りは関係なく、自然の摂理に従った挙動をとるだけである。事実として、大雨により盛土が崩壊して土石流化し、下流の街を襲い多くの犠牲者を出したのである。技術者は、こういった盛土・残土の安定性を適切に評価し、災害を予測し、予防することに努めなければならない。

福島第一原発の盛土衝突による鉄塔倒壊の影響については、土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価小委員会が公表した報告書（ドラフト版）<sup>1)</sup>p.226に、「2011年東北地方太平洋沖地震による造成斜面の崩壊は、送電鉄塔の倒壊による外部電源の喪失をもたらすとともに、それを誘因とした福島第一原子力発電所の事故を引き起こした」と明確に記載されていた。あの重大事故の原因に盛土地すべりが関与していたということなので、その現象を事例として、地震時に発生する盛土地すべりについて紹介する。

### 2. 福島第一原発の全電源喪失の経緯

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で、東京電力福島第一原子力発電所が地震の揺れと、その後に襲われた津波により1号機から4号機が全電源喪失となった。

この事故は連日報道されたこともあり、知らない人はほとんどいない。一方、この全電源喪失に土砂災害が大きな影響を与えていたことを知る人は少ない。

地震発生時には、原子炉1号機は運転中で、4～6号機は定期点検のため停止中だった。ただし、原子炉は、停止中であっても冷却用の電源が必要である。

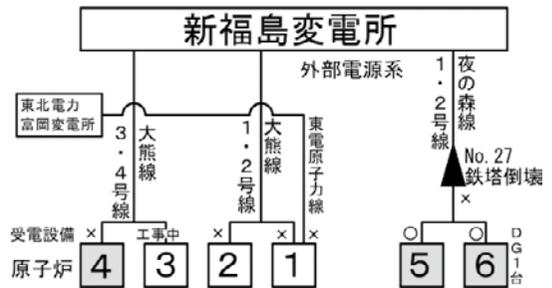


図1 福島第一原発の外部電源系<sup>2)</sup>

図1に示すように、福島第一原発には外部電源として新福島変電所から大熊線1・2号線（275kV）が1・2号機に、大熊線3・4号線（66kV）が3・4号機に、夜の森線1・2号線（66kV）が5・6号機に接続されていた<sup>2)</sup>。この他、1号機に予備線として東北電力富岡変電所から東電原子力線（66kV）が接続さ

れていた。全部で7回線の外部電源があったのである。ただし、地震発生当時、大熊線3号線は工事中だったため、使用可能な外部電源は6回線だった。

運転中の原子炉(1～3号機)は、大きな地震加速度を検知して自動停止した。その瞬間に原子炉からの電気供給が停止したので、所内電源が切り替えられた。しかし、外部電源6回線は間もなく全て給電能力が失われ、各号機に2台ずつ用意されていた非常用ディーゼル発電機(DG)が自動起動した。その後、津波の来襲により、非常用DGは6号機の1台を除いてすべて水没し使用不能になった。

大熊線1・2・4号線、東電原子力線は地震の強振動により受電設備等が損傷して電源喪失した。一方、夜の森線1・2号線は地震の強振動では損傷せず給電可能だった。

ところが、この夜の森線1・2号線は、地震の最大加速度発生時刻の14:48:28から、わずか34秒後の14:49:02には、土砂が送電線のNo.27鉄塔に衝突し倒壊させたため給電不能に陥った<sup>3)</sup>。唯一給電能力があった外部電源2回線が、土砂災害により失われたのである。

このようにして、福島第一原発の6つの原子炉の電源は、非常用DG1台を除き、すべて失われた。1台残ったDGは、5・6号機の冷却に使われたため、1～4号機は全電源喪失となり、あの原子力発電所事故につながった。

### 3. 鉄塔を倒壊させた土砂災害とは

受電設備が損傷せず給電能力を保持していた夜の森線1号線2号線は、No.27鉄塔が倒壊したことにより福島第一原発の地上線の給電能力が全て失われた。

No.27鉄塔の倒壊は、造成盛土が崩壊し、その崩壊土砂が流下して鉄塔に衝突したことが原因であった。

東京電力は、被災後に地質調査<sup>3)</sup>を実施し、地盤構成と土質強度から2次元安定計算を

行っている。しかし、動的解析・静的解析ともに安全率が1.0を上回り「変動しない」結果となった。東京電力はその矛盾を説明するために、強振動により旧表土層の土質強度が低下して盛土が地すべりを引き起こしたと結論付けている<sup>3)</sup>(表1)。

表1 旧表土層の土質強度と安全率<sup>3)</sup>

	実測値	低減値
粘着力c	91kN/m <sup>2</sup>	30kN/m <sup>2</sup>
内部摩擦角φ	9°	0°
N値	7	5
安全率(静的)	1.103	0.681
安全率(動的)	1.051	0.665

本当にそうなのだろうか?という疑問が自身自身で解析してみようと考えたきっかけである。東京電力のこの方法論だと、被災後の原因説明はできても、事前に危険性を評価し予防することが不可能だからである。これでは重要施設の周辺に谷埋め盛土を造ることは防災の観点から不可能になるし、すでに存在している谷埋め盛土の危険度評価も無理である。

### 4. 「滑動崩落」現象とは

盛土が地震時に地すべりを引き起こすことは、1995年の阪神・淡路大震災の時に数多く発生したことからよく知られるようになった。宅地盛土で発生するこの現象による被害を予防するため、2006年に宅地造成等規制法が改正され、宅地耐震化推進事業が創設された。

この法律改正の中で、造成地の盛土が地震時に地すべりを起こす現象を国土交通省が「滑動崩落」と命名した。

滑動崩落現象は1968年の十勝沖地震(M7.9)で青森県南部町立剣吉中学校の校庭が地すべりを起こし、そこに避難してきた生

徒4名が犠牲になったのが最初のようなのである。

また、この地震では、国鉄が東北本線の盛土区間で間隙水圧を計測しており、地震の瞬間に過剰間隙水圧比0.2相当の急激な水圧上昇を記録している<sup>4)</sup>。土中の過剰間隙水圧が盛土地すべりの原因となることを示唆する最初の計測記録である。東北本線では、この地震により多数の路線盛土がすべり破壊を起したため、国鉄が盛土区間の地震対策の研究を始めるきっかけとなった。

その10年後に、1978年の宮城県沖地震で仙台市周辺に多数盛土地すべりが発生した。これも、今から考えれば、滑動崩落現象だったのだが、当時は「仙台市の盛土は特殊なので他の地域では起きない現象だ」で処理され、研究が進むチャンスを失った。

1995年の兵庫県南部地震では、阪神間の宅地盛土が多数地すべりを引き起こした。太田ほか(2011)では、阪神間で調査された217箇所(約40%)が地すべり変動を起こしていた<sup>5)</sup>ことを明らかにした。なお、これとは別に、溜池を埋めた盛土95箇所は全箇所(100%)が変動していたためこの集計からは省いてある。

2011年の東北地方太平洋沖地震でも仙台市等で数多くの滑動崩落が発生した。中埜(2017)<sup>6)</sup>では、造成前後のDEMの比較から仙台市内で1697箇所の盛土が抽出され、そのうち182箇所(約11%)が滑動崩落したとしている。ただし、滑動崩落の有無の判定を公共事業の緊急対策事業箇所で代用しており、踏査等の現地調査結果ではない。

兵庫県南部地震後の大地震でも造成盛土が存在する地域ではほぼ例外なく滑動崩落が起きている。2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2016年熊本地震、2018年胆振東部地震などである。

#### 4.1 滑動崩落の変動メカニズム

阪神間の谷埋め盛土の変動は、近接する箇

所で同程度の揺れを受けているにもかかわらず、また盛土の強度(N値)も同程度にもかかわらず、変動するものと、変動しないものが混在していた。その理由を釜井・守随(2002)<sup>7)</sup>は数量化解析により明らかにした。数量化解析の結果は、変動・非変動を区別する主要因は、盛土土塊の横断形状(幅/深さ比)であり、他の要因の影響は極めて小さかった。

これは、縦断形状で2次元解析による安定計算が主流だった斜面工学にとって驚くべき事実である。すなわち、傾斜が急であるほど、強度が弱いほど滑りやすいという斜面工学の常識と異なったからである。

幅/深さ比が圧倒的影響力をもつということを力学的に解釈すると、次のようになる。

- (1) 盛土底面は地震の揺れにより「液化化」が発生し、抵抗力を著しく失う。

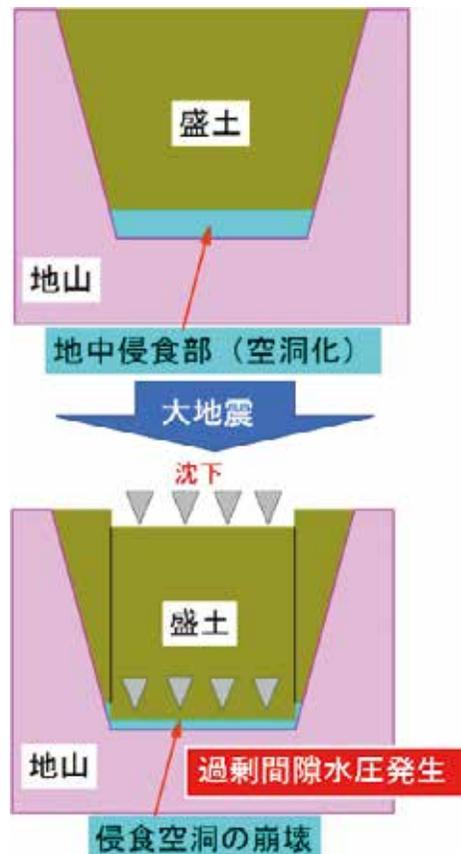
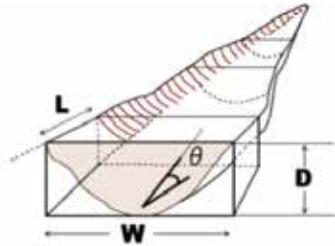


図2 滑動崩落現象の地中イメージ

(2) 側面摩擦力は液状化の影響を受けないので、総摩擦力に占める側面抵抗力の割合が大きいと、変動が抑制される。

地中で起きていることをイメージ化すると図2のようになる。



L:長さ, W:幅, D:深さ, U:底面水圧, θ:底面の傾斜角

#### 4.2 滑動崩落の予測モデル

前述の解釈を力学的なモデルに仕上げたのが、「側方抵抗モデル」<sup>8)</sup>である。これは盛土の幅・深さ・傾斜の3要素のみと、実際に大地震域に存在した谷埋め盛土全ての変動・非変動実績をフィッティングさせた統計手法である。図3のように力学的な体裁にしたのは、阪神間と盛土材料の土質条件の異なる地域にも活用できるようにしたためである。なお、地下水水位は、現地調査結果に基づいた地山傾斜角との関数としている。

側方抵抗モデルは、盛土底面が、常時には粘着力及び内部摩擦角によるせん断抵抗力が働いているが、地震時には、液状化～流動化または、過剰間隙水圧の発生等によりせん断

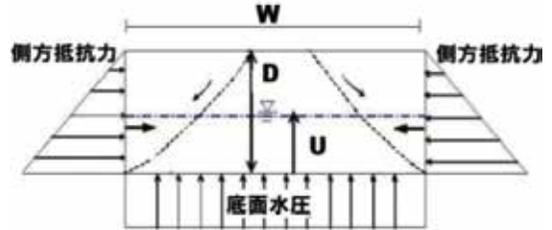


図3 側方抵抗モデルの概念図

抵抗力が低下し、いわゆるローラーライダーのような状況に陥ると考えて組み立てたものである。側面は深度に比例した摩擦抵抗となるように工夫がされている。

太田ほか(2006)<sup>9)</sup>は、阪神間のデータで試算した結果、図4に示すように、平常時に

表2 側方抵抗モデルの最適パラメータと正答率  
「正答率」とは、実現象の再現率のことを示す

パラメータ①: 変動盛土の正答率が100%となる設定				パラメータ②: 変動・非変動盛土の正答率の合計が最大となる設定				パラメータ③: 変動盛土の正答率が90%以上で非変動盛土の正答率が最大となる設定			
過剰間隙水圧高 (m)		4.5		過剰間隙水圧高 (m)		3.0		過剰間隙水圧高 (m)		4.4	
水の単位質量 (kN/m <sup>3</sup> )		9.8		水の単位質量 (kN/m <sup>3</sup> )		9.8		水の単位質量 (kN/m <sup>3</sup> )		9.8	
単位体積質量 (kN/m <sup>3</sup> )		18.0		単位体積質量 (kN/m <sup>3</sup> )		18.0		単位体積質量 (kN/m <sup>3</sup> )		18.0	
側面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		25.0		側面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		39.0		側面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		39.0	
側面内部摩擦角 (°)		35.0		側面内部摩擦角 (°)		35.0		側面内部摩擦角 (°)		35.0	
底面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		0.0		底面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		0.0		底面粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )		0.0	
底面内部摩擦角 (°)		36.0		底面内部摩擦角 (°)		25.0		底面内部摩擦角 (°)		33.0	
側方土圧係数		0.5		側方土圧係数		0.5		側方土圧係数		0.5	
水平震度 kh		0.25		水平震度 kh		0.25		水平震度 kh		0.25	
正答率	阪神地区	変動盛土	100%	阪神地区	変動盛土	95%	阪神地区	変動盛土	100%		
		非変動盛土	42%		非変動盛土	98%		非変動盛土	78%		
	長岡地区	変動盛土	100%	長岡地区	変動盛土	86%	長岡地区	変動盛土	95%		
		非変動盛土	20%		非変動盛土	100%		非変動盛土	50%		
	柏崎地区	変動盛土	100%	柏崎地区	変動盛土	71%	柏崎地区	変動盛土	76%		
		非変動盛土	35%		非変動盛土	100%		非変動盛土	92%		
	3地区	変動盛土	100%	3地区	変動盛土	85%	3地区	変動盛土	91%		
		非変動盛土	38%		非変動盛土	98%		非変動盛土	79%		

は変動した盛土も非変動だった盛土も安全率に明瞭な違いは出ないが、過剰間隙水圧と水平震度を与えると、明瞭な違いが出るのが判明したので、谷埋め盛土の危険度予測に活用可能なモデルになる期待が持てた。

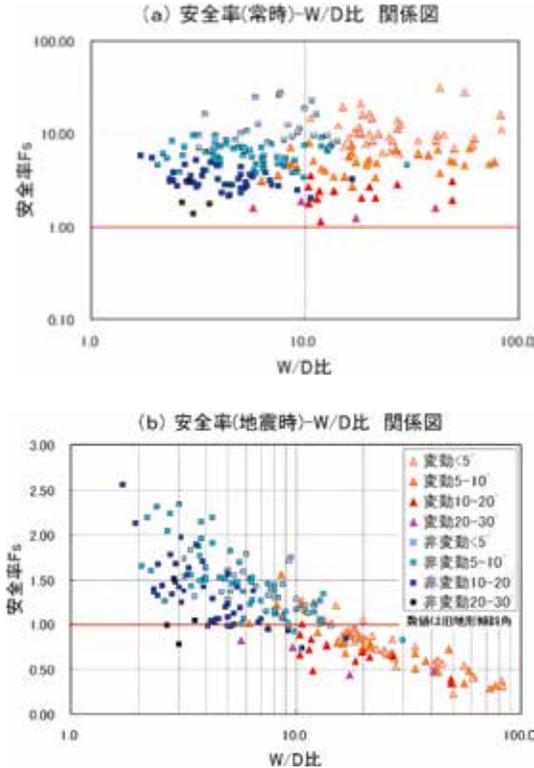


図4 側方抵抗モデルの試算例<sup>9)</sup>

この計算に必要なパラメータは、底面強度(粘着力・内部摩擦角)・側面強度及び過剰間隙水圧高である。大地震が起き、数多くの滑動崩落が発生した地域を、一種の実大振動台実験と考え、変動・非変動を最もよく再現する最適パラメータをトライアルにより探索して求めた。

中埜ほか(2012)<sup>10)</sup>では、阪神地区・長岡地区・柏崎地区の調査済の全データについて、①変動盛土の正答率が100%になる設定、②変動・非変動盛土の正答率の合計が最大となる設定、及び③変動盛土の正答率が90%以上で非変動盛土の正答率が最大となる設定の

3ケースについて最適パラメータを導いた。その値を表2に示す。

変動する恐れのある谷埋め盛土を見逃さないためには①のパラメータを使い、全体の正答率を最大化するためには②を、変動の恐れのあるものの正答率を高めつつ、全体の正答率も上げたい場合には③を適用すればよい。大地震により実際に起きた現象を再現する際には②のパラメータを使って検証している。

阪神地区・長岡地区・柏崎地区は、地域が異なり盛土材も異なるが、3地区で同じパラメータを用いても、それぞれの地区でも高い正答率となった。このことは、盛土材の違いや地域の違いが存在しても、同じパラメータで危険度評価が可能ということを示している。すなわち、まだ滑動崩落の被害が発生していない地域で、盛土材の土質情報等がなくても、比較的高い精度で予測できるモデルである。

実際、2010年に仙台市太白区の盛土データを用いた計算結果は、翌年の大震災で発生した現象を精度良く予測していた<sup>11)</sup>。

## 5. 福島第一原発の滑動崩落現象への適用

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で福島第一原発施設内の盛土が崩壊し、夜の森線No.27鉄塔を倒壊させ、地上からの電力供給が途絶えたことを、筆者は鈴木(2012)<sup>12)</sup>で知った。

現地は、原発事故処理のため容易に立ち入れる場所ではないので、鈴木論文に書かれている2万5000分の1の地形図の写しをもとに、造成前の地形と造成後の地形から、盛土のモデルを作成した。

図5に造成前後の地形を示す。当該斜面には4つの盛土が存在していることがわかる。

### 5.1 側方抵抗モデルの適用

この盛土モデルを前述の最適パラメータ②を用いて安全率計算した結果を図6に示す。

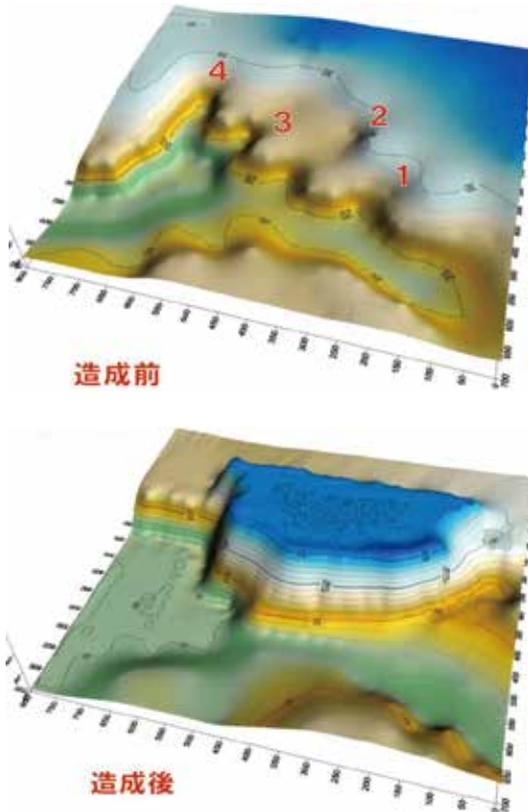


図5 造成前後の地形

4つの盛土のうち夜の森線 No.27 鉄塔を倒壊させた盛土のみが、安全率 1.0 を下回り ( $F_s = 0.8$ )、残りの盛土の安全率が全て 1.0 を超えており、実現象を再現できた<sup>13)</sup>。

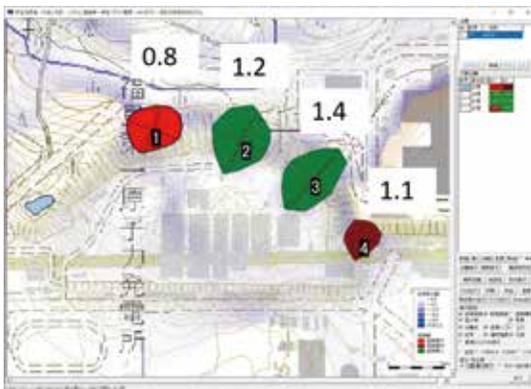


図6 側方抵抗モデルを用いた評価結果<sup>13)</sup>

幅 / 深さ比は、変動した①盛土が  $W/D =$

12.9 と、10 を超えているが、②③④盛土は、それぞれ 4.4、3.4、5.7 であり、計算された安全率も 1.0 を上回っていた。これは、より簡易的な評価として、幅 / 深さ比のみでも評価可能ということを示している。

## 5.2 3次元安定計算の適用

側方抵抗モデルは統計手法であり、簡易で有用な手法であっても、そこから先の技術的な発展性に乏しい。

このため、東京電力が地盤調査した結果を用いて、「土質強度を低減させることなく、そのまま用いた 3次元安定解析」を実施した。

盛土の強度としては、旧表土層の実測値である、 $c = 91 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi = 9^\circ$  を用いた。計算上の工夫としては、盛土の底面付近に厚さ 1 m 程度の別層を創り、その土層にのみ過剰間隙水圧比 0.33 を与えた。過剰間隙水圧比の決定方法は以下のとおりである。

側方抵抗モデルのデータセットの平均盛土層厚  $D = 5 \text{ m}$ 、単位体積重量  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ 、最適パラメータ②の過剰間隙水圧高  $\Delta U = 3.0 \text{ m}$ 、水の単位体積重量  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$  なので、過剰間隙水圧比  $= \Delta U \times \gamma_w \div (\gamma \times D) = 0.33$  となる。

なお、盛土の崩壊が、地震の揺れのピークから 20 秒以上経過してから発生していると推定されていることから、揺れは直接影響しておらず水平設計震度  $kh = 0$  とした。

楕円弧で試行計算するのに用いたソフトウェアは、Rocscience 社の Slide3、計算手法は Janbu 法である。

計算結果を図 7 に示す。この計算では、最小安全率となる楕円弧スベリは  $F_s = 0.7$  となった。側方抵抗モデルの安全率  $F_s = 0.8$  と大差ない計算結果である。

## 6. まとめ

滑動崩落現象とは、盛土底面の地中侵食部に起きる一種の液状化が底面抵抗力の多くを

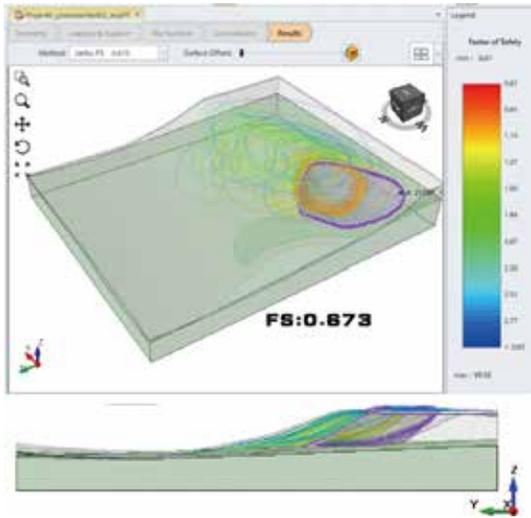


図7 3次元安定解析結果<sup>13)</sup>

失わせ、側面抵抗力との総抵抗力が、総滑動力よりも小さくなることによって引き起こされる現象であり、統計モデルでも極限平衡法でも同様に計算できることを示した。

底面強度が著しく弱い場合、土塊の幅が広がるにしたがって、側面抵抗力の関与割合が小さくなり、ある幅(幅/深さ比=10程度)になると安全率が1.0を下回り滑動崩落する。しかし、盛土されている谷幅が狭い場合、安全率1.0を下回るだけの十分な幅が確保できないことがあり、その場合には滑動崩落は起きない。滑動崩落は極めて3次元要素の強い現象である。

福島第一原発の地震時に受電設備が壊れなかった夜の森線1号線及び2号線は、津波で非常用DGが使えなくなったので、全電源喪失回避の最後の拠り所だった。

それが、想定していなかった盛土崩壊による鉄塔倒壊で失われようとは、当時の関係者は想像できなかったかもしれない。

今後このような事態を引き起こさないようにしなければならない。重要施設を維持するための装置の近傍に盛土がある場合には、側方抵抗モデルでその安定性を簡易的にチェックするか、少なくとも幅/深さ比が10を超

えていないことを確認するのが望ましい。

施設の維持に深刻な影響を与える恐れのある崩壊の危険性をもつ盛土が見つかった場合には、事前に地盤調査し、3次元安定解析によって詳細な検討を行い、予防対策を講じる必要がある。

予防方法として参考になるのは、1978年の宮城県沖地震と2011年の東北地方太平洋沖地震の両方で滑動崩落が発生した、宮城県白石市緑ヶ丘(1978年当時は寿山と呼ばれていた)の事例である。そこでは1978年の被災後に集水井工が施工されたが、2011年にはその水抜ボーリング孔が届いている範囲だけが滑動崩落を免れた。そこでは水抜パイプによって過剰間隙水圧の発生が抑制されたと考えられるが、水抜パイプから離れた場所ではその抑制効果は無く大きく変動していた。すなわち、単に地下水位を低下させるだけでなく、大地震時に過剰間隙水圧が急速に消散できるだけのパイプとの距離が重要と考えられる。

本稿は、福島第一原発の造成盛土について記載したが、手法として盛土造成地の変動予測方法を用いた。

実のところ、2006年に改正された宅地造成等規制法によって始まった大規模盛土造成地の変動予測事業はうまくいっていない。それは、盛土の危険性を従来の斜面問題対処法と同じ「過剰間隙水圧の発生も側面抵抗の影響も考慮しない2次元安定解析」で行っているからである。

全国で51,000箇所見つかった大規模盛土のうち、これまで危険と判定されて事前に対策がされた箇所は2か所(全体の0.004%)のみである。多くの自治体では、最も危険性が高いと考える数か所を第2次スクリーニングで詳細調査するが、そこが安全判定されたら、残りの全ての盛土が自動的に安全判定になる。

一方、これまでの大地震では、30～40%程

度の盛土が変動している。今後大地震が発生すれば、震度6以上の地域で数多くの「第2次スクリーニングで安全判定された盛土」が滑動崩落するだろう。

この事態を回避するためには、谷埋め盛土の安定度評価を2次元法から3次元法に修正しなければならない。本稿は、それを促すための目的もある。

## 参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価小委員会 (2021) : (ドラフト版への意見公募)「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術〈技術資料〉(2020年度版)」, (現在ダウンロード終了)  
<https://committees.jsce.or.jp/ceofnp05/node/41>
- 2) 原子力災害対策本部 (2011) : 原子力安全に関する I A E A 閣僚会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—, 第IV章
- 3) 東京電力 (2012) : 福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録に関する報告を踏まえた対応について(指示)に対する追加報告について(鉄塔倒壊に関わる福島第一原子力発電所内の盛土の崩壊原因)
- 4) (社)日本鉄道施設協会 (1972) : 盛土の耐震設計に関する研究報告書, pp.102-103
- 5) 太田英将ほか (2011) : 宅地盛土の地震時被害軽減を目的とした地盤技術者のアウトリーチ活動, 日本地すべり学会誌, 第48巻, 6号, pp.40-45
- 6) 中埜貴元 (2017) : 宅地盛土の地震時安全性評価パラメータの改良, 日本地理学会秋季学術大会発表要旨集
- 7) 釜井俊孝, 守随治雄 (2002) : 『斜面防災都市』, 履行図書, pp.148-157
- 8) 日本地すべり学会 (2006) : 平成17年度谷埋め盛土造成地の危険度評価・安定解析手法に関する検討報告書, 国交省委託業務(情報公開請求によりNPO都市災害に備える技術者の会HPに公開されている)
- 9) 太田英将, 榎田充哉 (2006) : 谷埋め盛土の地震時滑動崩落の安定計算手法, 地盤工学会関東支部第3回関東支部研究発表会講演集, pp.21-35
- 10) 中埜貴元ほか (2012) : 宅地盛土における地震時滑動崩落に対する安全性評価支援システムの構築, 日本地すべり学会誌, 大49巻, 4号, pp.12-21
- 11) 太田英将, 釜井俊孝 (2011) : 2011年東北地方太平洋沖地震に伴う造成地盛土の地すべり, 日本応用地質学会関西支部平成23年度研究発表会論文集, pp.6-9
- 12) 鈴木雅一 (2012) : 東北地方太平洋沖地震で福島第一原子力発電所の送電線鉄塔倒壊をもたらした盛土斜面崩壊について, 砂防学会誌, Vol.64, No.5, pp.38-42
- 13) 太田英将, 廣野一道 (2021) : 福島第一原発の全電源喪失の原因となった盛土崩壊の検証, 第60回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.87-88