

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

Verification of the embankment collapse that caused the loss of all power
at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

太田英将*, 廣野一道 (太田ジオリサーチ)

Hidemasa OHTA, Ichido HIRONO (Ohta Geo Rsearch)

キーワード：盛土崩壊，地震，安定解析，福島第一原発

Keywords: Embankment Collapse, Earthquake, Stability Analysis, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

1 はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では東京電力福島第一原発の事故により、今もなお放射能汚染等で深刻な影響が続いている。

福島第一原発の重大事故は、全電源喪失によって引き起こされた。その原因の一つのディーゼル発電機の津波による水没はよく知られているが、もう一つの原因である地上送電線鉄塔の倒壊はあまり知られていない。倒壊した夜の森線 No.27 鉄塔は、谷埋め盛土の崩壊土砂が鉄塔に流れ込み、その衝撃に耐えきれず倒壊した。これにより原発に供給される地上電源は消失した。

筆者は「盛土の滑動崩落ではあまり人が亡くなることが無い」として、真剣に取り組まれていないと常々感じている。確かに滑動崩落の直接死として明確なのは、1995年の西宮市仁川百合野町の盛土崩壊の犠牲者34名のみである。しかし、地盤工学会関西支部¹⁾の報告では、盛土造成地と死者発生箇所には関係が深いことが指摘されている。

福島第一原発の全電源喪失の誘因となった滑動崩落現象は、宅地ではないので宅造法が対応する場所ではないが、被害者の数では群を抜いて多い(原発関連死は東京新聞の2016年集計で1300人を超える)。本発表では、夜の森線 No.27 鉄塔を倒壊させた谷埋め盛土を例にして、滑動崩落現象の適切な解析方法について考察する。

2 2次元安定解析による再現の試み

東京電力は、全電源喪失の誘因となった盛土崩壊について、地質調査・土質試験を実施し、2次元安定計算により現象の再現を試みている²⁾。

福島第一原発では、地上線の送電が停止した時刻が正確に把握され、盛土崩壊は地震の揺れのピークからかなり遅れて発生したことが明確である。すなわち地震の揺れそのもので崩壊したのではない。ボーリング調査結果からは、盛土の品質は十分締固められたことも明らかになっている。

土質試験結果 ($c=91\text{kN/m}^2$, $\phi=9^\circ$; N値=7) を

用いた2次元安定解析では、動的解析、静的解析ともに円弧スベリの最小安全率 F_s は1を超え(それぞれ $F_s=1.051$, 1.103)、スベリは発生しない計算結果となった、と報告している。

そこで、苦肉の策として、「地盤強度が繰返し応力の影響で低下した」と想定し、対象層を $N=5$ として $c=6.25\text{N}$ から $c=30\text{kN/m}^2$, $\phi=0^\circ$ として再度2次元安定計算し、安全率が動的 $F_s=0.665$, 静的 $F_s=0.681$ となったと結論付けている。

土質試験結果等は下記のように修正された。

N 値 (旧表土) = 7 \rightarrow 5

粘着力 $c=91\text{kN/m}^2 \rightarrow 30\text{kN/m}^2$

内部摩擦角 $\phi=9^\circ \rightarrow 0^\circ$

この調査・解析は、事後に行われたものであるが、この方法論を事前評価に使えたとは思えない。強度低減量を事前に設定することができないので、事前調査して評価したとしても、安全評価にしかならず、現実の崩壊を予防することはできなかったであろう。

実は、現行の大規模盛土造成地の変動予測ガイドライン³⁾でも、2次元安定解析が用いられているが、このような強度値の低減は行われぬ。すなわち、事前調査で安全評価しても滑動崩落が起きる可能性が残り、適切な危険度評価にならない。

3 側部抵抗モデルでの再現の試み

鈴木雅一 (2012)⁴⁾の地形図でモデル化し、側部抵抗モデル⁵⁾を用いて盛土の安定度評価を行った結果を図1に示す。この方法は、地震を大規模振動台実験ととらえ統計的に最適土質パラメータを導いたものである。地盤調査不要なのが特徴である。

その結果、4つある谷埋め盛土のうち、夜の森線 No.27 を倒壊させた盛土のみが安全率1を下回っていた ($F_s=0.8$)。評価結果と実現象が合致したのである。ちなみに、この手法の再現率は、阪神地区で88%、長岡市地区で86%、柏崎市地区で76%、仙台市太白区緑が丘周辺地区で100%の再現率となり、高い再現率である。

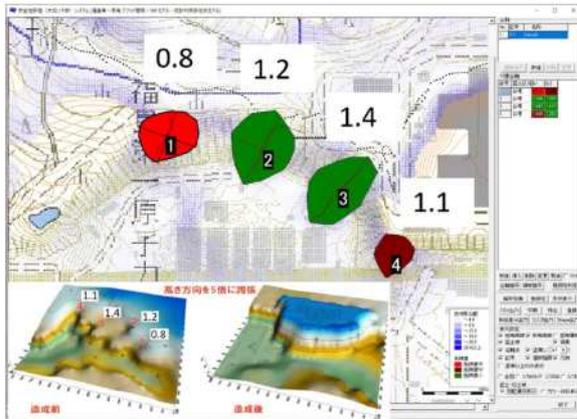


図1 側部抵抗モデルによる評価結果

4 3次元安定解析での再現の試み

太田ほか(2020)⁶⁾は、実測土質強度を用いて土質力学的に3次元安定解析を行う方法を提案した。調査結果を「加工せず」そのまま用いて現象が再現できれば、事前評価が可能となり、重要構造物近くの谷埋め盛土対策や、大規模盛土造成地の滑動崩落危険度評価に用いることができ、予防対策が可能となる。

側部抵抗モデルで用いた地形情報を用いて、3次元安定解析(Jambu法)を実施した。使用したソフトは、Rocscience社のSlide3である。数多くの楕円弧スベリ(弱層部に沿うオプションを選択)を計算し、最小安全率を探索する方法である。

計算結果を図2に示す。夜の森線 No.27 鉄塔を倒壊させた盛土の最小安全率は、 $F_s=0.7$ となった。

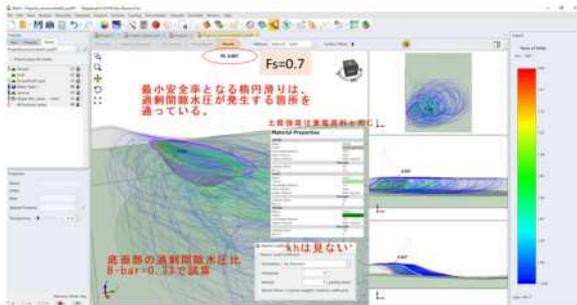


図2 3次元安定解析による評価結果

なお、この計算では、GL-22.8m以深の旧表土分布域に厚さ1mの弱層を設定し、その土層にのみ過剰間隙水圧比0.33を作用させた。この過剰間隙水圧比は、側部抵抗モデルの最適パラメータから導いた値である。

なお、東京電力の報告書で、崩壊は地震の揺れのピークから20秒以上経過してから発生したことがわかっているので、設計水平震度 $kh=0$ とした。す

なわち、揺れて崩れるのではなく、過剰間隙水圧で崩れる条件での計算である。

5 まとめ

夜の森線 No.27 鉄塔の倒壊が福島第一原発の全電源喪失の誘因となったことは、土木学会原子力土木委員会の報告書⁷⁾(ドラフト版の意見募集ページ)に明確に書かれている。

大地震時の盛土地すべり(滑動崩落)は、事前評価が非常に重要である。事前評価を適切に行うことにより、予防対策が可能となることを切に望んでいる。そのためには、国のガイドラインに示される2次元法³⁾ではなく、周縁部抵抗と過剰間隙水圧を考慮できる3次元(的)解析が不可欠である。

そもそも、2006年の宅造法改正時には、側面抵抗を考慮した方法論でないと滑動崩落現象は解けないと結論が出ており⁸⁾、その流れで法改正が行われた。現行のガイドラインは、それが無視されて作成されている。その原点に立ち返るべきである。

参考文献

- 1) 地盤工学会関西支部(2019): 関西の地盤情報に基づく 防災ハザードマップ開発研究委員会報告書, pp.5-56-5-88
- 2) 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)
- 3) 国土交通省(2015): 変動予測調査編, 国交省 HP
- 4) 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
- 5) 太田英将ほか(2006): “谷埋め盛土の地震時滑動崩落の安定計算手法”, Geo-Kanto2006, DS1
- 6) 太田英将ほか(2020): “滑動崩落の安定計算方法の提案”, 第59回日本地すべり学会研究発表会
- 7) 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)」, <https://committees.jsce.or.jp/ceofnp05/node/41>
- 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」, (2021年4月に行政文書開示) <http://toshisaigai.net/publication/index.html>