

山陽自動車道盛土法面崩壊に対する浸透・変形解析

斜面崩壊 盛土 FEM

山口大学大学院 学生会員 ○劉 丹
山口大学大学院 国際会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正

1. はじめに

平成17年9月7日未明、台風14号に伴う豪雨により、山陽自動車道岩国ICから玖珂IC間の甘木地区において大規模な盛土法面の崩壊災害が発生した¹⁾。この災害では盛土構造の道路本体が、上り線の走行追い越し車線の路面を含め、道路延長方向に約50m、高さ約23mにわたり崩壊した。この区間の山陽自動車道は、施工後10年を経過しており一般的には安定した盛土と考えられたため、地盤工学に関わる技術者にとって大きな衝撃であった。本研究では、災害調査報告書¹⁾を参考にこの盛土法面崩壊事例を対象にした浸透・変形解析を実施し、崩壊原因の分析を行うこととした。最近の気象条件の変化は、土構造物を不安定な状態に近づける可能性がある。このような研究成果の蓄積が、地下排水溝の設計や補強の設計の際に有益な情報となると考えられる。

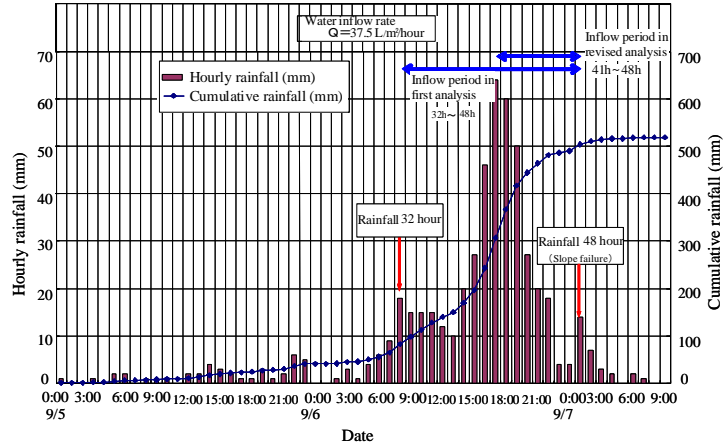


図-1 降雨記録 (山口県寺山観測所)

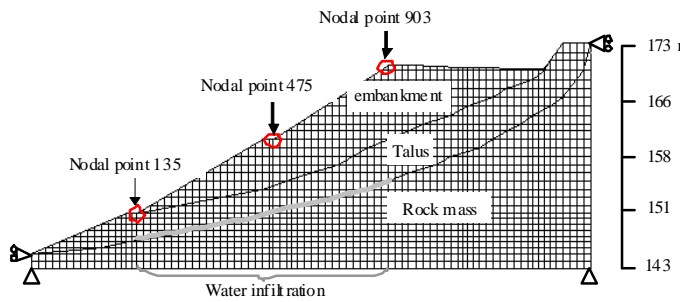


図-2 初期メッシュ図

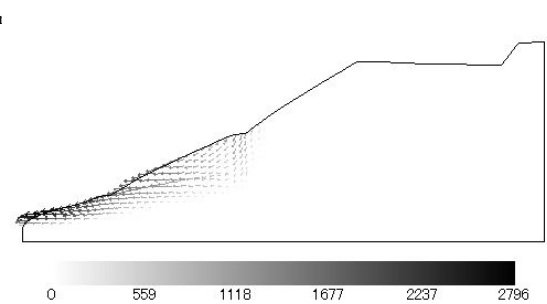


図-3 36h時間での変位ベクトル図 (降雨と湧水)

2. 崩壊の概要

山口県は、5日明け方から強風域に入り、6日昼前から7日明け方まで豪風域が続き、7日の昼過ぎまで強風域が続いた。今回の台風14号は、強風域や豪風域が広く、また速度が遅かったため風の強い状態が長く続いた。風の吹き方は地域によって若干の差があるが、最接近時より前に瀬戸内側で東寄りの風が強い傾向があった。台風の外側を取り巻く雨域に入った5日昼過ぎには県内全域で雨となったが、6日の明け方までは1時間10mm以下の雨が降り続いた。6日明け方から下松、玖珂で1時間10mm以上のやや強い雨が降り始め、台風が九州に上陸した14時頃から県内ほぼ全域で強い雨が降り出した。特に中部と東部を中心に台風が最接近する22時頃まで、激しい雨が降り、7観測点で観測史上最多の日降雨量を記録した。図-1が崩壊地点に最も近い観測所で記録された降雨の状況である。時間雨量のピークを過ぎた、7日0:50頃、この崩壊が発生した。崩壊流出した約13,800m³の土砂は市道などへ高さ5mにおよび堆積した。建設前の調査時点で、底部付近に3箇所の湧水が発見され、盛土内には地下排水溝が設置されていた。しかし、泥水状態で移動した形跡から盛土内は相当の水の供給があったと考えられた。

3. 解析概要

山陽自動車道盛土法面崩壊には降雨とともに、湧水による盛土内の水位の変化が崩壊に大きく関係していることがわかった。そのため2次元の非定常浸透流解析と弾塑性変形解析との連成させる有限要素法により解析することとした。浸透流解析に適用する降雨強度は、崩壊地に最も近い位置にある図-1に示された時間雨量を採用した。解析に考慮する湧水量は、湧水調査から推定された37.5L/m²/hであり、湧水箇所は図-2中に示すように盛土底面としている。湧水の時間は、降り始めから32時間後より崩壊時間の48時間までの16時間とした。本解析に使われる基本的な材料定数をまとめたものが表-1である。標準貫入試験結果に基づいて、地盤は盛土、崖錘と岩盤の3つの層で構成した。これらの層の力学モデルはMohr-Coulombの破壊基準とする弾完全塑性体とした。これらの強度定数は、圧密非排水三軸圧縮試験の結果から決定した。また、ヤング係数はN値から推定した。

不飽和状態における浸透特性については以下のようなVan Genuchtenモデルで表現できると考えた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + |\alpha \psi|^n} \right)^{1-1/n} \quad (1) \quad k_r = S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad m = 1 - 1/n \quad (n) > 1, 0 < m < 1 \quad (2)$$

ここで、 α と n は材料定数試行錯誤の結果、いずれも2.0であるとした。さらに、飽和度透水係数は透水試験より求めた表-1に示す値を用いた。

図-2は横80m、縦30mの盛土斜面モデルである。有限要素メッシュの要素数は1773、節点数は1817である。初期水位は左側を標高140m、右側を標高150mに設定し、16ヶ月間の予備解析により得られたものを用いた。なお、モデル底面は非排水境界をしている。また、雨水は斜面表面から浸透することとした。

表-1 材料定数

| Soil | Wet unit weight γ t(kN/m ³) | c(kN/m ²) | ϕ (°) | E(kN/m ²) | k (m/s) |
|------------|--|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| Embankment | 19.0 | 26.0 | 13.0 | 1.0×10^4 | 3.0×10^{-7} |
| Talus | 20.0 | 35.0 | 12.0 | 1.0×10^4 | 3.2×10^{-7} |
| Rock mass | 20.0 | 302.0 | 21.0 | 1.0×10^6 | 1.7×10^{-12} |

4. 解析結果

図-3は、36時間における変位ベクトル図で、湧水浸透を始めて4時間が経過した時の結果である。この時、法先の変位ベクトルは3m近くに達し、盛土斜面の1/3が左斜め下方に変位していることがわかる。

図-4は、図-2に示した三つの節点135、475、903に着目して、横軸と縦軸それぞれを浸透時間と x 方向(水平)変位を描いたものである。湧水浸透が始まる降雨開始32時間の時点で、それぞれの変位量は節点135で0.3m、節点475で0.11m、節点903で0.01mである。この32時間から節点135と節点475の変位量が急激に増大していることがわかる。そして38時間の時点で3mを超える変位量となった。一方、節点903は0.03mしか変位してない。

図-5は、y 方向(鉛直)変位を描いたものである。節点135は32時間の降雨後 -0.2mの変位量となっている。節点475と節点903はそれぞれ-0.1mと0.01mである。48時間が経過した時点で節点475だけ1m以上の変位になった。実際には、47時間時点まで、盛土の法先に対する変状の報告はされていない。また、崩壊時間の直前で高速道路面上に小さい隆起が報告されている。この解析では実際より早く変状する結果となった。これは、解析では盛土底面に敷設された地下排水溝をモデル化していなかったことが原因の一つであると考えられる。

このように、盛土の崩壊が湧水を与え始めてから急激に進行するという結果が得られた。さらにこの結果を分析するために、降雨のみを与えた解析ならびに湧水のみを与えた解析を行った。図-6は、法先の節点135に注目して、降雨、湧水と両方ある場合の水平方向変位量を示したものである。降雨のみの場合、48時間でわずか-0.2mの変位であった。湧水のみの場合、47時間で5m以上の大きな変形となった。この結果から、本崩壊の要因が湧水によるものであるという知見が得られた。

5. まとめ

本研究では、山陽自動車道の事例を対象とした浸透・変形解析を実施し、事例の崩壊要因のうち、降雨条件と湧水条件が与える影響を分析した。その結果、降雨よりも湧水の方が崩壊要因としての重要度が高いことがわかった。

参考文献：1)山陽自動車道災害調査検討報告書：山陽自動車道災害調査検討委員会，2006。

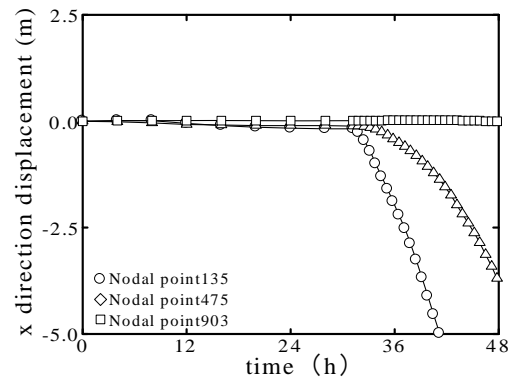


図-4 x方向ベクトル (降雨と湧水)

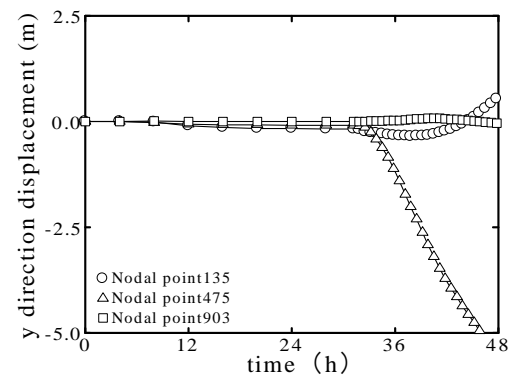


図-5 y方向ベクトル (降雨と湧水)

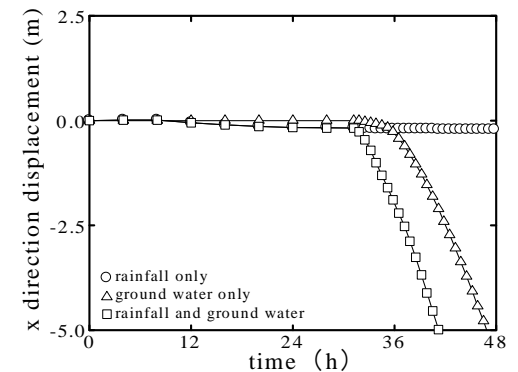


図-6 節点135のベクトル変位図