

2009年台風Morakotにより台湾高雄県小林村で 発生した深層崩壊発生機構に関する検討

AN INVESTIGATION INTO TRIGGERING MECHANISM OF DEEP SEATED
LANDSLIDE OCCURRED IN SHAOLIN VILLEGE, KAOHSIUNG COUNTY,
TAIWAN DUE TO TYPHOON MORAKOT, 2009

堤 大三¹・藤田 正治¹・宮本 邦明²・今泉 文寿²
藤本 将光³・国領 ひろし⁴・泉山 寛明⁵

Daizo TSUTSUMI, Masabaru FUJITA, Kuniaki MIYAMOTO, Fumitoshi IMAIZUMI,
Masamitsu FUJIMOTO, Hiroshi KOKURYO and Hiroaki IZUMIYAMA

¹ 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: tsutsumi@sabom.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 筑波大学生命環境科学研究科 (〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1)

³ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁴ 日鉄住金建材株式会社 (〒135-0042 東京都江東区木場 2-17-12 SAビル)

⁵ 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

Key Words: deep-seated landslide, Typhoon Morakot, Shaolin Village, rainwater infiltration, slope stability

1. はじめに

2009年8月に発生した台風8号(Morakot)は、6日から10日にかけて台湾に上陸し、全土に記録的な豪雨をもたらした。特に台湾中部から南部にかけての降水量が多く、場所によっては最大で約3,000mmを記録した。この豪雨によって、広範囲にわたって土砂災害と洪水災害が多発し、多くの人的・物的被害が発生した。その中でも、南部の高雄県甲仙郷小林村において発生した大規模な深層崩壊は、斜面脚部の集落を壊滅させ(図-1)、400名以上の犠牲者を発生させた未曾有の土砂災害となった¹⁾。筆者らは、土木学会と砂防学会の合同調査団として現地に赴き、深層崩壊の現状把握と情報収集を行い、深層崩壊の発生機構の検討を行った。本稿では、これまでに得られた深層崩壊発生機構に関する検討結果を報告する。

2. 災害の概要

小林村はChishan川左岸、崩壊が発生した斜面脚部にまとまった集落として存在していた。崩壊発生前日の8日夜には、降雨が1500mmを超えており、各種の警報や非難指示が発令されていたが、周辺への避難路となる道路や橋が土石流等で破壊されており、集落は孤立状態であった。ほとんどの住民が集落内の小学校に避難していたようである。9日朝6時過ぎに集落上部の斜面が長さ約2.5km、最大幅約800mにわたって崩壊し、避難所の小学校を含むほぼ全域が崩土の直撃を受けて破壊され、住民400名以上が犠牲となった。このとき崩壊した土砂がChishan川をせき止めて、高さ50m程度の天然ダムが形成された。約40分後に天然ダムは決壊した様である。

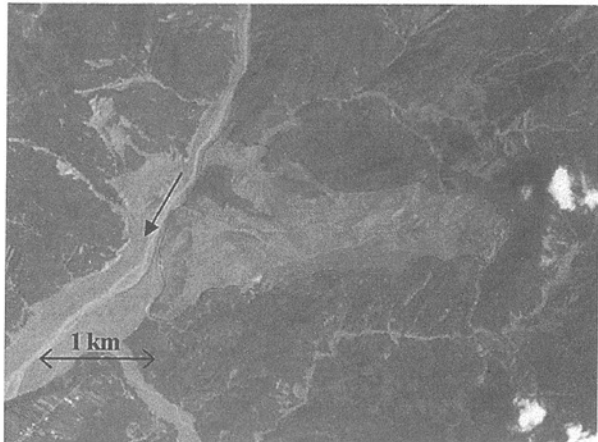


図-1 台湾高雄県小林村で発生した大規模深層崩壊の様子 (上: 斜面下から, 下: 航空写真, 台湾国立成功大学提供)

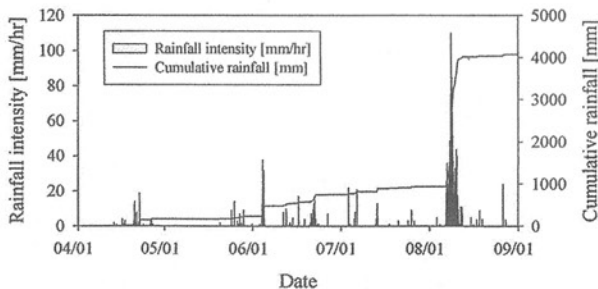


図-2 小林村に最も近い地点で観測された降雨 (高雄縣桃源郷高中派出所, 2009/4/1 - 8/31)

3. 深層崩壊発生に関わる降雨, 地形, 地質

(1) 降雨特性

災害が発生した2009年8月より4ヶ月前の2009年4月から8月までの降雨の記録を図-2に示す。4月から7月にかけてまとまった降雨が何度か観測され、積算降雨量は1000 mm程度まで到達している。しかし、8月6-10日の台風Morakotによる降雨では、いっきに積算降雨量が4000 mmまで急増しており、いかに莫大な降雨量であったかということがわかる。また、8日午後には最大降雨強度110

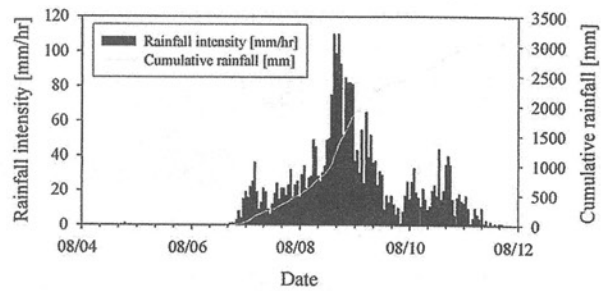


図-3 台風Morakotによる小林村での降雨 (8月4 - 12日)

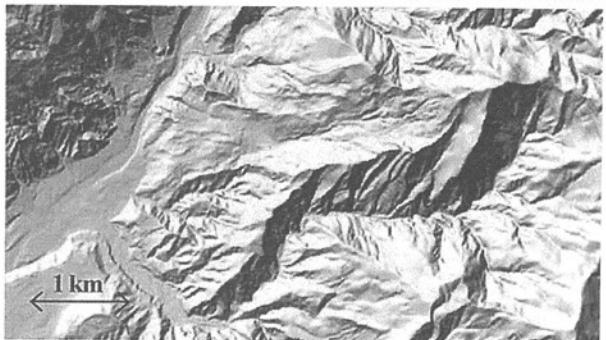


図-4 DEM データから作成した深層崩壊前後の地形の比較 (上: 崩壊前, 下: 崩壊後, 台湾林務局提供)

mm/hr が記録されており、それ以外の時間帯でも20 mm/hr以上の強度が約半分を占めている(図-3)。降雨は6日の降り始めから4日以上も途切れることなく続いており、継続時間も長い。これらをまとめると、台風Morakotによる降雨は、継続時間が長かつ強い雨であったため、結果として4日間で3,000 mmという莫大な降雨となったといえる。これは、Morakotの進行速度が遅く、勢力を保ったまま台湾上空にとどまったことに起因する。このような記録的な降雨が、土層の深部にまで浸透し、通常の降雨では安定であった斜面を不安定化したことが深層崩壊発生の最も大きな要因であると考えられる。

(2) 地形変動

崩壊発生前後にとられたDEMデータから作成した地形

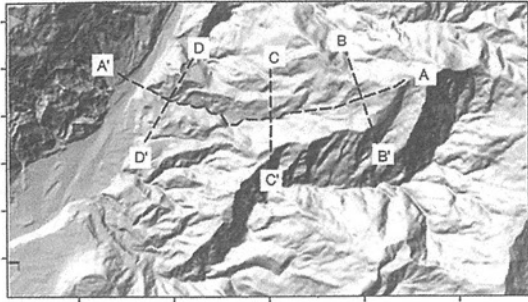


図-5 斜面の縦横断面形状に対応する側線

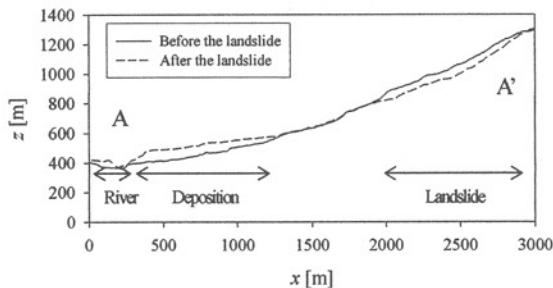


図-6 深層崩壊の前後における崩壊中心線 (A-A') の縦断面標高変化

図(陰影図)の比較を図-4 に示す。図中央に位置する斜面の地形が大きく変化していることがわかる。崩壊前には比較的平坦であった斜面上部の地形が、崩壊後にはいくつかの溝のようなものがある地形に変わっている。現地調査では、当該地域に不透水面となるような基岩が斜面横断方向に傾いた形状で筋状に露出しており、この基岩に沿ったガリー状の地形を表していると考えられる。一方、斜面下部では、元々あった谷地形が崩壊土砂の堆積によって平坦形状に変わっている様子が見られる。このように大きく地形が変動している領域が斜面崩壊の主要部であると考えられるが、その周辺部でも明らかに地形が変化している斜面も存在し、斜面が複数のブロックに分かれて崩壊しているものと考えられる。

さらに詳しく見るため、主要な崩壊部の中心線に沿って、尾根から河道までの縦断線 (A-A') とそれに対して直角な横断線を斜面上部 (B-B'), 中部 (C-C'), 下部 (D-D') に設定し (図-5), DEM データから崩壊前後での標高変化を読み取り, 図-6, 7 に表示した。縦断図 (図-6) と横断図 (図-7) から明らかなように, 斜面上部約 1 km の部分は地形が低下し, 下部約 1 km の部分は逆に上昇しており, ほとんど地形が変化していない部分がそれらの間の中部に存在する。これらの侵食と堆積の傾向を見れば, 斜面

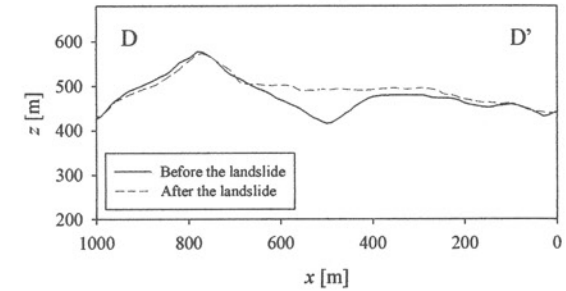
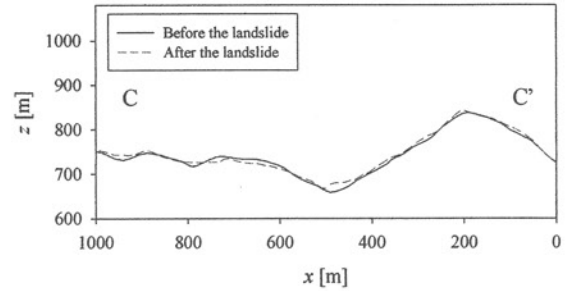
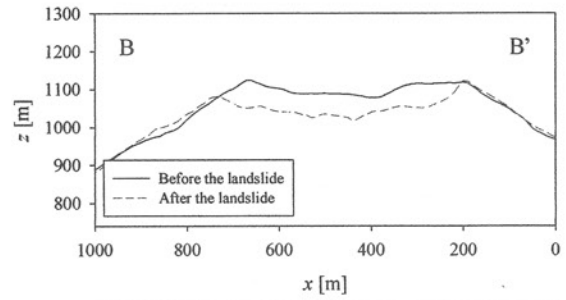


図-7 深層崩壊の前後における横断線 (B-B', C-C', D-D') の横断面標高変化



図-8 斜面中部に基岩が露出している様子。ここより上部が約 1km の長さにわたって崩壊した。

上部で崩壊が発生し, 流下した土砂が, 斜面下部に堆積したであろうことが想像される。しかし, 結果として土砂が堆積している部分や標高がほとんど変化していない部分でも, 一旦侵食した後に上流からの土砂が堆積した可能性も考えられる。実際に現地の様子を調査すると, 図-6 の C-C'断面付近は基岩が露出していた。そのため, 斜面の中

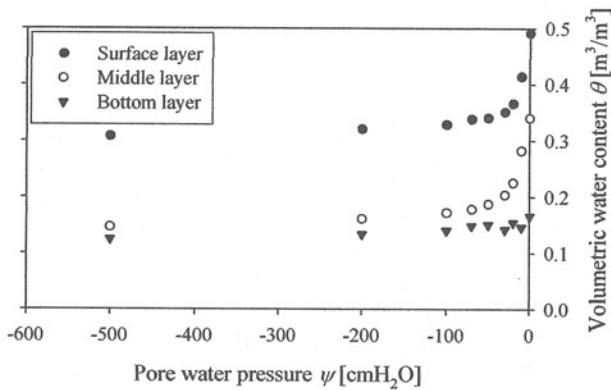


図-9 崩壊土層の代表的な水理特性曲線

部付近で標高変化が見られなかったのは、斜面崩壊前も基岩が露出しており、侵食も堆積も起こらなかったためである事が分かった。この事より、地形がほとんど変動していない斜面中部によって斜面上部と下部が分断されており、斜面上部から下部までが一体となって崩壊したわけではない。斜面崩壊は、横断線 A-A' を含む約 1 km の斜面上部で発生し、中部を流下して、河道へ進み小林村を壊滅させたと考えられる。一部の土砂は、横断線 D-D' を含む斜面下部に堆積している。崩壊前後の標高差から、斜面上部の主要崩壊の最大深は 84 m、平均深は約 50 m、長さ 1,100 m、最大幅約 500 m であり、非常に深く崩壊土砂量も多い深層崩壊であることが確認された。

また、図-4 や 6 から、河道や右岸側の地形も大きく変化しており、一時的に形成された天然ダムの痕跡を見ることが出来る²⁾。

(3) 土層の水理特性

現地において、崩壊残土や崩壊周辺の表層土からサンプルを採取し、実験室に持ち帰って pF 試験を実施した。その結果得られた水理特性を図-9 に示す。土層底部のサンプルは基岩直上から採取したもので、岩石が風化した状態の土層である。中層や特に低層の含水率が森林土層等に比べ小さい。

4. 降雨浸透解析

(1) 解析方法

前節で示した降雨、地形変化、土層水理特性を用いて、斜面における降雨浸透解析を実施する。通常は三次元解析を行って横断方向の浸透も考慮するが、対象領域が非常に大きいため、ここでは、斜面中心線に沿った $x-z$ 二次元

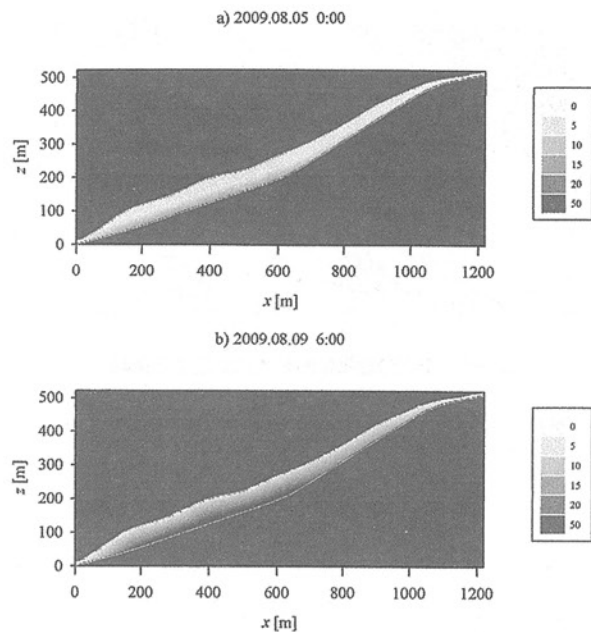


図-10 崩壊前後における土層内圧力水頭分布の計算結果

(a : 2009 年 8 月 5 日 0:00, b : 同 9 日 6:00)

解析を実施する。

浸透解析では、二次元の Richards 式を有限要素法によって解く³⁾。対象断面を要素で分割するにあたり、斜面と平行な方向に対しては、10 m の等間隔、鉛直方向には最大で 1.5 m 程度の間隔で分割している。土層の水理特性には、実測した現地土層の水理特性を考慮した値を表層土と下層土の 2 種類に分けて与えている。ただし、ここで土層としている部分は、実際には風化した岩盤と未風化の岩が混在している領域で、岩盤の亀裂や風化した土層の分布など、非常に不均質な状態であると考えられるが、ここでその状態を再現する事は困難である。解析では、均質な土層を想定し、岩盤の亀裂などの選択流路と通る早い浸透流を考慮して、実測された透水係数よりも大きな値を与えている。

土層水分状態の初期条件としては、比較的湿潤な水分分布を仮定して、その土層表面に sin カーブ状の降雨（継続時間 24 hr、最大降雨強度 20 mm、総降雨量 240 mm）の降雨を与え更に 36 hr 自然排水した状態を用いた。その後、実測された降雨（図-3）を土層表面に与え、土層内部の圧力水頭分布の変化を求めた。

(2) 解析結果

降雨開始前 (a: 2009 年 8 月 5 日 0:00) と崩壊発生時刻 (b: 同 9 日 6:00) における斜面の土層内圧力水頭分布の計算結果を図-10 に示す。降雨開始前は、土層の底面に地下水位が見られるものの、斜面の大部分は不飽和状態で

ある。ただし、比較的湿潤な状況を呈している。一方、崩壊発生時刻においては、全体に水圧が上昇しており、斜面の表層まで含めて、ほぼ飽和に近い状態まで地下水面が発達している状況である。地表面および基岩の勾配が約25°と勾配が急ではない事と土層が非常に厚いため、浸透水が斜面下流端に集中せず、土層全体の圧力水頭がほぼ均一に上昇し斜面全体が飽和する傾向を示している。このため、斜面は下流端から上流端にかけて全体的に不安定となり、斜面全体が一度に滑り出したものと考えられる。現在は、検討段階であるが、計算した土層内の圧力水分分布を入力値として臨界滑り面と安全率を求める斜面安定解析を行った結果からも、圧力水頭の上昇と共に斜面の安全率が低下し、安全率が1をきる時点での滑り面形状は、斜面下流端から上流端までの土層底面を通る形状を示した。これらの事から考えると、斜面崩壊は約1 kmの長さにわたり一度に起こったものと想像できる。これは、現地での目撃証言や土砂の流下・堆積プロセスに関する検討とも一致するものである。

5. おわりに

本稿では、現地調査、GISによる地形変動調査、降雨浸透解析および斜面安定解析を行い、小林村での深層崩壊の発生機構について検討を行った。これらの検討の結果、小林村での深層崩壊は、土層内の圧力水頭が降雨と共にほぼ均一に上昇し、下流端から上流端までの斜面全体が不安定化して一気に斜面全体が崩壊したという斜面崩壊発生機構がある程度解明された。これは、現地での目撃証言や崩壊土砂の流下・堆積プロセスとも一致する現象である。た

だし、解析においては、初期条件の設定、風化岩盤の亀裂や土層の分布などの不均質性を考慮していない点、斜面安定解析の精緻化など、更なる検討の余地がある。

本稿で対象とした現象は、降雨、崩壊規模の面から、台湾にとってもこれほど大規模な現象は、記録上未経験のものであり、被害も未曾有であったといえる。このような規模の降雨や土砂災害は、これまでの日本では考えられない程大きなものである。しかしながら、日本においても想定を超える規模の降雨が発生する事は十分に起こりえるものであり、台湾だけで起こる現象と決め付けるわけにはいかない。台湾での災害を教訓に、調査研究を進めることで、将来わが国でも起こりえる大規模で複合的な降雨・土砂災害に対する備えに少しでも貢献していきたい。

参考文献

- 1) Chjeng-Lun Shieh, Yuan-Jung Tsai, Wen-Chi Lai, Yu-Shiu Chen, Kun-Ting Chen and Cheng-Lung Chiu: Disasters caused by Typhoon Morakot in Taiwan and the renovation strategy, Proceedings of the International Symposium on Water and Sediment Disasters in East Asia, 36-44, 2010.
- 2) Daizo Tsutsumi and Masaharu Fujita: Relative importance of slope material properties and timing of rainfall for the occurrence of landslides, International Journal of Erosion Control Engineering, 1 (2), 79-89, 2008.
- 3) 原義文・内田太郎・吉野弘祐・宮本邦明・権田豊・今泉文寿: Morakot 台風による台湾小林村における天然ダムの越流侵食について, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, 90-91, 2010.

(2010. 5. 14 受付)

