第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

斜面災害が橋梁に及ぼす影響の評価方法に関する一考察

服部　匡洋[1]・幸左　賢二[2]・本橋　英樹[3]・原田　隆典[4]

[1]正会員　博士（工学）　阪神高速先進技術研究所　調査研究部（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）
[2]正会員　Ph.D　九州工業大学名誉教授（〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1）
[3]正会員　博士（工学）　IABC　地震・津波研究室（〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀3-5-13）
[4]正会員　工学博士　宮崎大学名誉教授（〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1）

1. はじめに

2016年4月熊本地震では，**図-1**に示すように阿蘇大橋（鋼アーチ橋）の崩壊が発生し[1]，土木学会をはじめ，さまざまな研究機関で原因分析が行われてきた[例えば2),3)]．これらの分析では，阿蘇大橋が崩壊した原因として地震動による落橋，地盤変動による落橋，斜面崩壊による落橋などが考えられている[4]．

例えば，千田らは航空レーザ測量により推定された地盤変動をアーチアバットに強制変位として与えるFEM解析を実施することで，地盤変動による崩壊の可能性について検討している[2]．また，桐山は阿蘇大橋周辺の斜面を対象にSPH法を用いた再現解析を行い，斜面崩壊による落橋及び土砂の積載による落橋の可能性について検討している[3]．

橋梁分野では，前者のように構造物モデルに対し地盤変位等の作用を与え，応答を評価することは広く実施されてきているが，斜面崩壊についてはすべり面を仮定し簡易的な計算で評価することはあるものの，数値解析を用い橋梁への影響を検討した事例は数少ないのが現状である．

一方で，道路橋示方書・同解説V耐震設計編では，斜面崩壊等及び断層変位に対して，これらの影響を受けないよう架橋位置又は橋の形式の選定を行い，それが困難な場合には少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等の必要な対策を講じるよう規定されており[5]，斜面崩壊が影響を及ぼす範囲や橋梁に及ぼす影響の度合いについて評価するための数値解析ツールの開発が望まれている．

本検討では斜面崩壊が橋梁に及ぼす影響を評価するための解析手法について調査し，既往の斜面崩壊被害の再現解析の事例を踏まえ，実務における斜面災害の影響評価方法について考察した．

2．斜面災害の影響を評価するための解析方法及び解析事例の調査

斜面崩壊の運動過程の再現に関する代表的な数値解析手法として，粒子法（SPH法など）や有限面積法が挙げられる．粒子法は，連続体に対する離散化解析手法の1つであり[6]，粒子（球形）を用いることで有限要素法で用いられるような要素の制約を受けず[3]，複雑な流れの挙動を再現できる．一方で，解析精度を高めるには，微細な粒子を大量に配置することが必要となるため，計算負荷が非常に大きくなることが課題である．桐山[3]やMorikawaら[7]は，この粒子法を用いて2016年4月の熊本地震による阿蘇大橋周辺の斜面崩壊の再現解析を試みている．**図-2**及



図-1　阿蘇大橋周辺斜面の被害状況
（2016 年熊本地震）

び**図-3**にこれらの再現状況を示す．

一方，有限面積法も連続体に対する離散化解析手法の1つである．Savage and Hutter[8]は，斜面崩壊距離に比べると崩壊土の厚さは小さいという仮定の下，Leibnizの定理を用いて斜面崩壊の底面から地表まで積分を行い，崩壊土の深さ方向に平均化した移流方程式を提案した（以降，S-H法と呼ぶ）．現在，斜面崩壊の運動過程の数値解析手法の多くは，S-H法を基に，三次元地形の考慮や間隙水圧，洗堀量等を評価するためのモデルが開発されている．その中でも，比較的簡単なモデルとしてRauterらのK-Tモデル[9]が用いられている．この有限面積法では，鉛直方向の格子積分が減り計算時間を大きく低減することができる．また，モール・クーロン理論が導入され，内部散逸応力および底面抵抗力を鉛直応力に比例する摩擦力（クーロン摩擦則）で評価するため，凹凸した複雑な地形上で，土砂の崩壊，雪崩，地滑りなどを土圧論に基づく数値シミュレーションが可能になる．

本検討では，実務においても斜面崩壊の影響評価を実施することを想定し，計算負荷が小さい有限面積法を使用し，2016年阿蘇大橋周辺の斜面崩壊を対象とした再現解析を実施することで，その適用性について検討した．

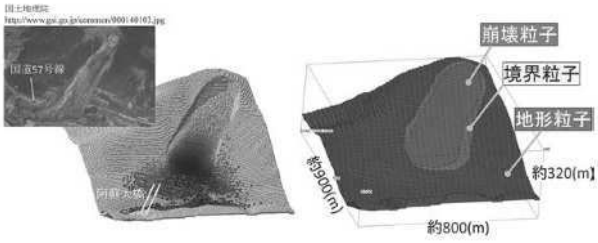


図-2　桐山らの再現解析
（文献 3）より引用）

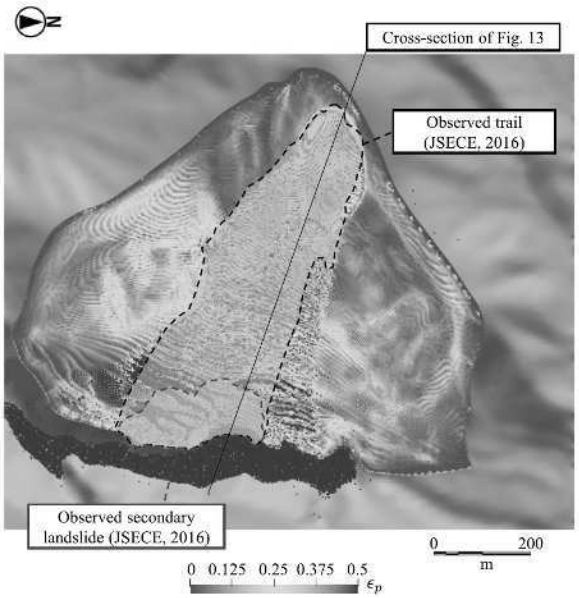


図-3　Morikawa らの再現解析
（文献 7）より引用）

3. 斜面崩壊解析の再現性

(1) 対象範囲及び三次元地形モデル

本検討では，**2.** で調査した有限面積法の再現性を確認するため，2016年4月熊本地震で斜面崩壊が発生した阿蘇大橋周辺の斜面を対象に再現解析を実施した．対象は，阿蘇大橋周辺の1 km四方の範囲とし，文献10)を参考に三次元地形モデルを構築した．

図-4に三次元地形モデル地震前後の鉛直方向成分の差分を示す．正側（赤色）は土砂が堆積した範囲，負側（青色）は土砂が流出した範囲を示す．斜面の頂部付近では20 m～25 m程度の土砂の流出が確認される．これが一次崩壊領域を示していると考えられる．また，一次崩壊の下方では10 m程度の土砂の流出が確認される．これが二次崩壊領域を示していると考えられる．これらの崩壊で流失した崩土は河川に流入し，特に下流側ではこれらの崩土が堆積していることが確認できる．

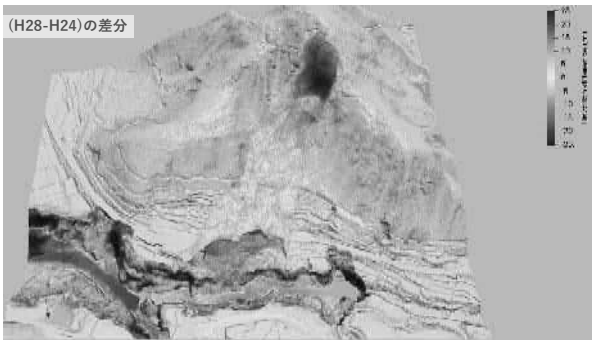


図-4　三次元地形モデル



図-5　解析モデル

(2) 解析モデル

図-5に解析モデル図を示す．構築した三次元地形

モデル（1 km四方）を用いて数値解析を行う．解析モデルは東西方向に1000分割，南北方向に1000分割，鉛直方向には400分割するよう設定し，自動メッシュ機能を用いて要素分割を行った．要素分割した結果，節点数は約1800万，要素数は約2200万となった．なお，本解析は地表面をすべり面とし，その上に仮想厚さの土砂が堆積しているとしてその土砂のすべりを計算するため，地震後の三次元地形モデルを使用している．また，本検討では対象橋梁を解析上モデル化し斜面崩壊と一体的に解析することも検討したが，計算が大規模となることなどを鑑み，斜面崩壊のみ考慮した．

(3) 解析方法・解析条件

表-1に解析方法及び解析条件を示す．本検討では，今後実務においても斜面崩壊の影響評価を実施することを想定し，計算負荷が小さく，粒子流動に適するS-Hの連続体モデルを使用し，対象範囲の斜面崩壊の影響評価を試みた．解析プログラムは3次元汎用流体解析ツールであるOpenFOAMを用いた．

表-2に設定した土の物性値を示す．本検討では対象地点の地質情報を参考に**表-2**のとおり土の物性値を設定した．

図-6に設定したすべり範囲及びすべり深さを示す．本解析では，上述のとおり地震後の三次元地形モデルの地表面をすべり面とするため，斜面崩壊が発生する前に上載していた土砂を仮定する必要がある．そのすべり深さについては**図-4**に示した地震前後の鉛直方向成分の差分から求めた．

また，これまでの対象橋梁の崩壊原因の分析では一次崩壊と二次崩壊が同時に発生した，または一次崩壊した土砂が二次崩壊領域に達したのちその重さによって二次崩壊が発生したと考えられているが，その崩壊状況は特定されていない．本検討では，解析上の制約もあり，一次崩壊と二次崩壊が同時に発生するとして解析を行った．

(4) 解析ケース

本稿の検討は，実際に発生した斜面崩壊を対象に再現解析を行うことで解析の再現性を確認することを目的とするが，本稿では，土の物性値，特に動摩擦角が解析結果に与える影響が大きいと考えられたことから，動摩擦角をパラメータとした解析結果について示す．ここで，Case1は岩質の特性を想定し動摩擦角φ=30°としたケース， Case2は火山灰質土の特性を想定し動摩擦角φ=16°としたケースである．なお，Case1の解析結果の詳細については文献11)に詳述するため，本稿ではCase2の解析結果についてのみ示す．

表-1 解析条件

項 目	内 容
解析コード	OpenFOAM
物理モデル	Savege-Hutter
解析方法	有限面積法
時間の離散化	後退差分 (2 次精度)
空間の離散化	1 次精度風上差分
計算時間と時間間隔	120sまで、Δt＝0.01s

表-2 土の物性値

土質の物性	参考値
密度 ρ [kg/m^3]	1800
粒径 d [m]	0.01
動摩擦角 ϕ [°]	10～30(平均20)
重力加速度 g [m/s^2]	9.81

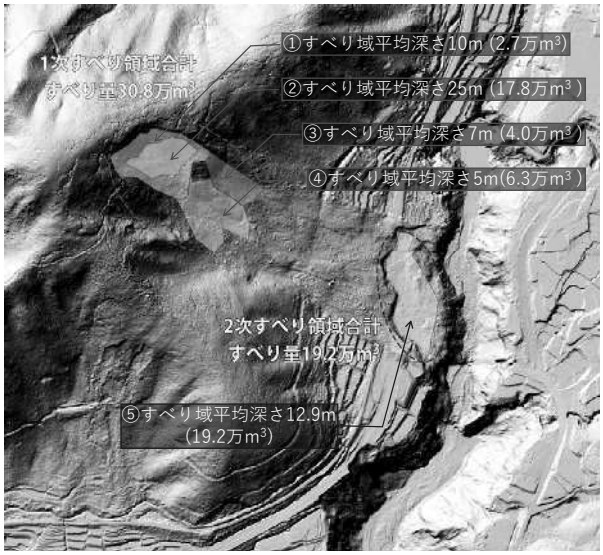


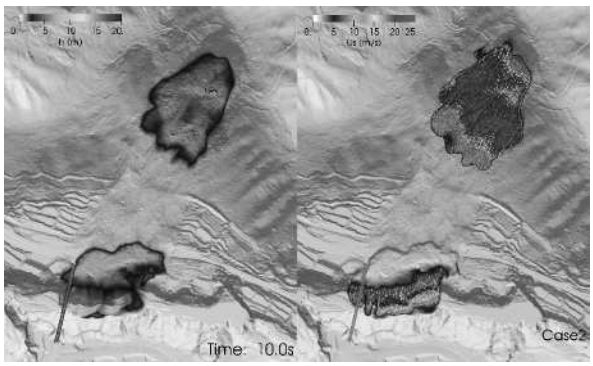
図-6 すべり範囲及びすべり深さの設定

a) 土砂の流下状況

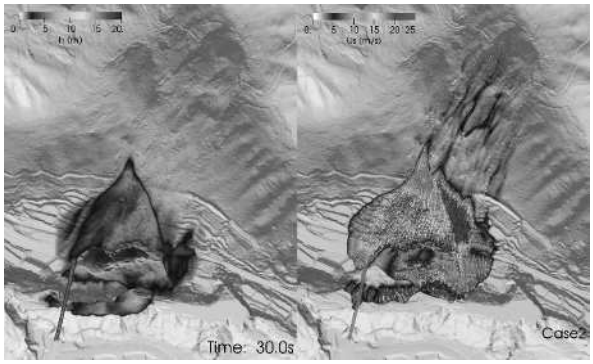
図-7に斜面崩壊が発生してから10秒後，30秒後の土砂の堆積深さ及び流速分布図を示す．動摩擦角φ=16°としたCase2では，一次崩壊により流下した土砂が流下しはじめてから30秒程度で二次崩壊領域まで到達していることがわかる．このとき，二次崩壊領域付近では土砂の堆積高さが15m～20m程度，土砂の流速は20 m/s～25 m/s程度であった．

b) 再現性の評価

図-8に現地調査及び再現解析により確認された土砂の軌跡を示す．現地調査では，一次崩壊発生域の最大幅は約170 m，流下堆積域の最大幅は約280 mであった．一次崩壊により流下した土砂が二次崩壊領域まで到達したCase2における土砂の軌跡と比較すると，実際の土砂の流下幅は対応しており，本解析方法により一次崩壊による土砂の流下挙動を概ね再



（a）崩壊発生から 10 秒後



（b）崩壊発生から 30 秒後

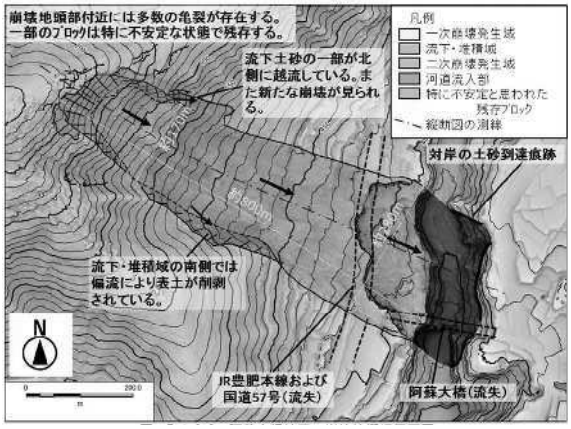
図-7　堆積深さと流速分布の比較
（左：堆積深さ分布，右：流速分布）

現できたといえる．

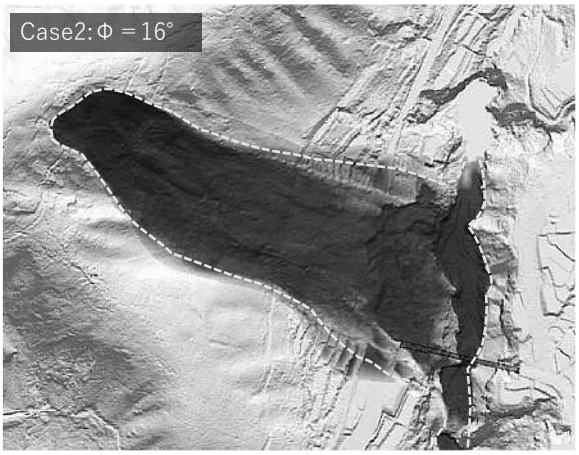
図-9に土砂の対岸への遡上高さを示す．現地調査では対岸斜面下部の樹木が流出・倒伏し，上端付近の樹木が土埃を被った痕跡が見られたことから，植生流失部の上端（植生残存部の下端）の高さまで土砂が到達したと考えられることから，土砂は黒川河床から対岸の30～60m程度の高さまで遡上したと推察される．一方，Case2では黒川河床から最大でも20m程度しか遡上しておらず，対岸への遡上高さについては実際の被害状況を良好に再現するには至らなかった．本検討では一次崩壊と二次崩壊が同時に発生すると仮定して解析を実施したが，二次崩壊領域の斜面の傾斜は一次崩壊領域に比べ緩やかであることから，実際には一次崩壊により流下した土砂が二次崩壊領域に達することで二次崩壊が引き起こされ，一次崩壊による土砂と二次崩壊による土砂が集合し勢いよく黒川の河床を通過した可能性も考えられる．このように，二次崩壊領域の崩壊挙動を適切に評価することが実現象の再現，斜面崩壊メカニズムの解明に繋がると考えられる．

4. 斜面災害の影響評価方法に関する考察

道路橋示方書・同解説IV下部構造編[12]では，下部



（a）現地状況（文献 10)より引用）

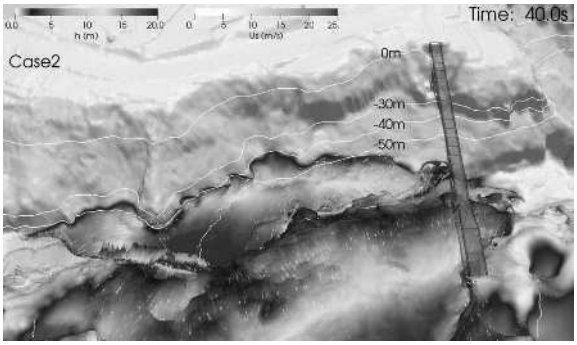


（b）再現解析（Case2）

図-8　崩壊土砂の軌跡

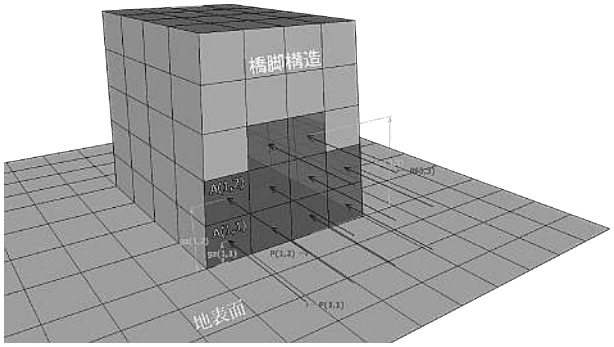


（a）現地状況（文献 10)より引用）

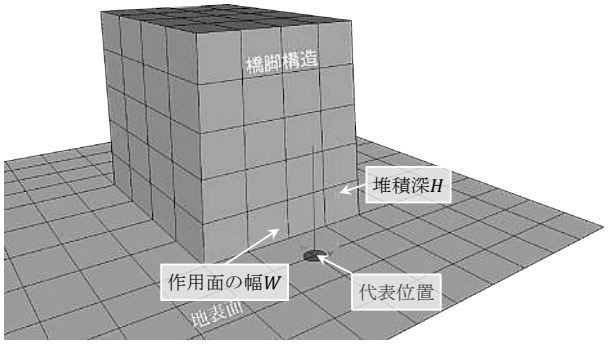


（b）再現解析（Case2）

図-9　崩壊土砂の対岸への遡上高さ

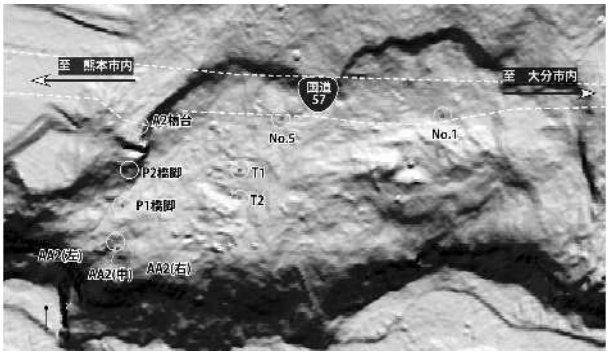


（a）圧力からの算出（イメージ）

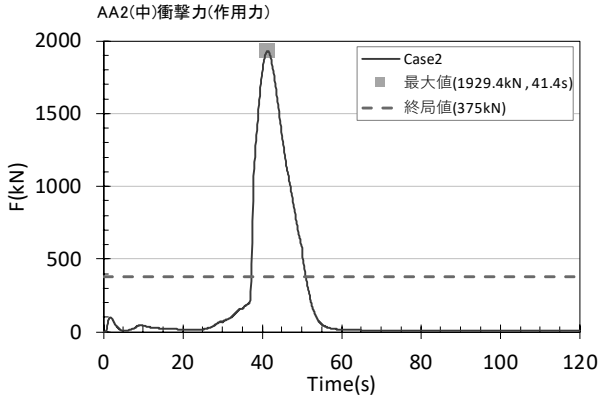


（b）諏訪らの方法（イメージ）

図-10　下部構造に作用する衝突力の算出方法



（a）抽出位置



（b）衝突力と部材耐力の比較

図-11　斜面崩壊による衝突力の試算

構造の設置位置は，斜面崩壊等の影響を受けない箇所を選定することを標準とすると規定されている．しかし，既設橋梁の場合，既に急峻な斜面に隣接して建設され，斜面崩壊が発生することで流下した土砂が下部構造等に衝突することが懸念される橋梁もあると予想される．このような場合，斜面崩壊による土砂の流下を評価できる解析に基づき，下部構造に作用する衝突力を直接または間接的に算出することで，斜面災害が橋梁に及ぼす影響を評価できると考えた．本検討では，3. で示した阿蘇大橋周辺斜面の再現解析に基づき，橋脚に生じる衝突力の算出を試みた．

(1) 橋脚への衝突力の算出

図-10に斜面崩壊で流下した土砂によって下部構造に作用する衝突力の算出方法のイメージを示す．崩壊した土砂が橋脚に衝突したときの衝突力を評価する方法として，a）橋脚面にかかる土圧から直接推算する手法（以下，圧力からの算出）とb）諏訪らの巨礫の運動による衝撃力の推定式（以下，諏訪らの方法）の2つの方法が考えられた．

a）圧力からの算出

崩壊した土砂が橋脚面に衝突し，その面要素の法線方向の単位面積当たりの圧力P_(i,j)が解析結果から得られるため，橋脚に作用する合力および曲げモーメントは，図-14に示したイメージで直接的に求めることができる．この圧力から推算する手法は，背後からの土圧力も解析的に考慮することができる．

b）諏訪らの方法[13)]

諏訪らの推定式は，土石流の先端に走る巨礫の運動を対象する経験式であり，ある代表位置の流速と作用面から衝撃力を推定することができる．本検討では，土砂先端の代表位置は図-10に示すとおり，橋脚の手前の格子中心位置とし，式(1)より算出する．

$$F=1/2\cdot\rho C_d v^2 A \qquad (1)$$

ここで，F: 衝撃力，ρ: 崩壊土砂の密度（1900 kg/m^3），C_d ：抗力係数（=1.5），V ：土砂流速，A ：衝突面積（作用面の幅W×堆積深H）となる．

本検討では，橋梁を三次元解析モデルに考慮していないため，b）諏訪らの方法で衝突力の算出を試みた．現地調査[14)]によると，熊本地震後アーチアバットは2～3m程度の土砂に覆われているため，解析により得られた土砂の堆積深さに3mを加えて衝撃力を算出した．すなわち，アーチアバットAA2付近（**図-11（a）**）の土砂の最大堆積深さは11.3mになる．また，同位置での土砂の流速の最大値は16.9m/s（40.9sの時に最大）であった．これらの値を式(1)

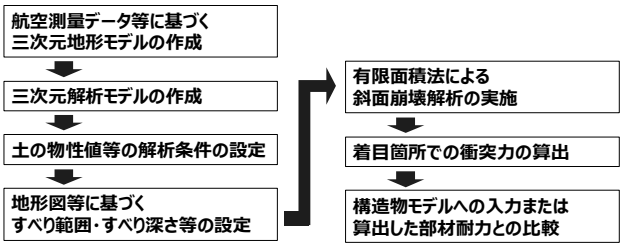


図-12　斜面災害が橋梁に及ぼす影響の評価方法

に代入して求めたAA2に作用する衝撃力の時刻歴波形を図-11（b）に示す．図-11（b）には、AA2が支持する端柱の終局耐力として全塑性モーメントである375kNを示す．Case2における衝突力の最大値は約2,000kNとなり，終局耐力の5.3倍の大きな作用力が5秒近く作用したことになり，斜面崩壊による倒壊の可能性が示唆された．

(2) 橋梁に対する斜面災害の影響評価に関する考察

図-12に斜面災害が橋梁に及ぼす影響の評価方法について示した．航空測量等で得られた三次元地形データから三次元解析モデルを構築した上で，土の物性値等を含めた解析条件の設定，すべり範囲・すべり深さを設定し，有限面積法を用いた斜面崩壊解析を実施する．この解析により下部構造等に土砂が衝突する際の作用力を算出することができることから，簡易的に計算した部材の耐荷力と比較する，または橋梁の構造モデルにその衝突力を作用させた静的漸増解析を実施することにより，橋梁に対する斜面崩壊の影響を評価できると考えられる．

5. おわりに

本検討により得られた知見は以下のとおり．

- 斜面崩壊を評価する解析方法として，粒子法や有限面積法が用いられているが，実務での橋梁への影響評価への適用を想定し，本検討では計算負荷の小さい有限面積法が適切であると考えた．
- 解析の再現性を確認した結果，一次崩壊領域の流下範囲は実際の被害を良好に再現したが，対岸への遡上高さについては再現解析における遡上高さの方が小さく評価される結果となった．二次崩壊領域の適切な評価が実現象の再現性の向上，斜面崩壊メカニズムの解明に繋がると考えらえる．
- 有限面積法を用いて着目箇所での土砂の流速や堆積深さを求めた衝突力に基づき，斜面災害が橋梁に及ぼす影響を評価する方法を示した．

参考文献

1) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告, 国土技術総合研究所資料第967号，土木研究所資料第4359号, 2017.
2) 千田知弘，崔準祜，平川泰之，川崎巧，渡辺浩：航空レーザ測量に基づく地盤変動と斜面崩壊による崩土を考慮した阿蘇大橋崩落の可能性に関する検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学）,Vol.74, No.4（地震工学論文集第37巻）, I_381-I_394, 2018.
3) 桐山貴俊：粒子法による地盤大変形問題への適用 -地震による斜面崩壊への適用-，土木学会誌Vol.102, No.5, pp.36-37, 2017.
4) 木村駿，夏目貴之：特集　防災技術2018　熊本地震はまだ終わらない　阿蘇大橋はなぜ落ちた？落橋のメカニズム，日経XTECH, https://xtech.nikkei.com/kn/atcl/cntncrd/15/180528/112100020/，2018.（2022年4月12日閲覧）
5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017.
6) 土木学会：いまさら聞けない計算力学，応用力学委員会・計算力学小委員会，2008..
7) Morikawa, D.S. and Asai, M.: A phase-change approach to landslide simulations: Coupling finite strain elastoplastic TLSPH with non-Newtonian IISPH, Computers and Geotechnics, Vol.148, pp.1-18. 2022.
8) Savage, S.B. and Hutter, K.: The motion of a finite mass of granular material down a rough incline, J. Fluid Mech., Vol.199, pp.177-215. 1989.
9) Rauter, M., Fischer, J.T., Fellin, W., and Kofler, A.: Snow avalanche friction relation based on extended kinetic theory, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 16, pp. 2325-2345. 2016.
10) 砂防学会：平成28年熊本地震による土砂災害に関する緊急調査報告書，JSECE Publication No.80. 2016.
11) 服部匡洋，幸左賢二，本橋英樹，原田隆典：地震時の大規模な斜面崩壊を対象とした再現シミュレーション，第 63 回地盤工学シンポジウム，2022.
12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2017.
13) 諏訪浩，奥田節夫：土石流先端における巨礫の運動および先端形状について，京大防災研年報16B，pp.425-432, 1973.
14) 幸左賢二，服部匡洋，本橋英樹，原田隆典，佐々木達生，渡邊学歩：斜面崩壊の阿蘇大橋への影響分析，土木学会論文集 Vol.79, No.13（特集号：地震工学），地震工学論文集 Vol.42，2022.（投稿中）