

数値解析を用いた地震時の斜面安定度の評価手法(案)

平成27年 10 月

一般財団法人 砂防・地すべり技術センター

【 目 次 】

	page
1. はじめに	1
2. 地震時の斜面安定度の評価手法(案)の検討にあたって	1
3. 地震時の斜面安定度の検討フロー(案).....	4
4. 地震時の斜面安定度の評価手法(案)～解説～	6

1. はじめに

我が国では、近年、地震に伴う大規模な地すべり等(主に地すべりと崩壊)が多発しており、地域社会に深刻な影響を与えている。特筆すべき災害としては、平成 16 年新潟県中越地震や平成 20 年岩手・宮城内陸地震に伴う斜面災害が挙げられる。

M9.0 を記録した平成 23 年東北地方太平洋沖地震においても、地すべり等が発生している他、橋梁への被害や津波被害等、広範な分野にわたる被害が発生した。その結果、各分野での地震に係わる認識を再考させ、地震に対する調査・研究が活発化している。

以上のような状況により、地すべり等の分野においても、既設の対策施設が地震時に発揮する効果度合いや危機管理の観点等から、地震時の影響を評価する手法を現地へ適用した事例が蓄積されてきており、様々な観点からそれぞれ多様な手法により検討が実施されているところである。今後もさらに検討が活発化するものと考えられる。

これらの成果を、今後防災事業に広く活用していくためには、これまでの検討事例より、解析の過程においてポイントになる事項を取りまとめておくことが重要である。

このような背景から、一般財団法人・砂防・地すべり技術センターは、自主研究として、現時点での最適な評価の実施の手引きとなる「地震時の斜面安定度の評価手法(案)」(以下「手法(案)」という)を作成した。作成にあたっては、学識経験者及び専門家からなる「地震時の斜面安定度の評価手法に関する検討会」を開催しながら検討を行った。

2. 地震時の斜面安定度の評価手法(案)の検討にあたって

(1)「本手法(案)」が対象とする評価項目

「本手法(案)」が対象とする評価項目は、地すべり等の分野の防災事業への活用の観点から以下のとおりとする。

- 1) 広域的な領域における地震時の地すべり等の相対的評価
- 2) 地震時の地すべり等の安定度評価
- 3) 地震時の地すべり等の対策施設の効果評価

なお、これら項目の評価により、防災上以下のような活用も期待される。

- ・地震を想定した警戒避難検討への活用
- ・地すべり防止施設の機能への影響評価への活用 等

(2)「本手法(案)」が対象とする手法

(1)で挙げた評価項目に対応する評価手法は、様々なアプローチ(例えば統計解析モデル、物理モデル等)のものが存在するが、ここでは、有限要素法等数値解析を用いた手法について、以下の既存の検討事例(7事例)から取りまとめを行った。

・芋川流域地すべり	北陸地方整備局湯沢砂防事務所管内	(H17~19 実施済)
・大河津分水路下流部右岸すべり	北陸地方整備局信濃川河川事務所管内	(H19 実施済)
・由比地すべり	中部地方整備局富士砂防事務所管内	(H16~実施中)
・亀の瀬地すべり	近畿地方整備局大和川河川事務所管内	(H18~21 実施済)
・善徳地すべり	四国地方整備局四国山地砂防事務所管内	(H22~実施中)
・譲原地すべり	関東地方整備局利根川水系砂防事務所管内	(H21~実施中)
・滝坂地すべり	北陸地方整備局阿賀野川河川事務所管内	(H24~実施中)

上記事例等より、「本手法(案)」が対象とする手法は、「Newmark 法(渡辺・馬場)」及び「動的弾塑性有限要素法」を基本とした。これら手法の長所は、動的な地震動を考慮でき、かつ、すべり面を伴う地盤の大変位や地盤の非線形性を考慮した解析が比較的簡便に可能であることである。ただし、現時点では、変位の進行に伴う土塊の破碎・分裂・流動化等の現象を十分に表現できるものではないことに留意が必要であり、それら現象の評価のためには、別途手法を選定する必要がある。

(3) 本手法(案)が対象とする現象、及びその規模

本手法(案)を作成するに際して対象とした現象は、(2)で挙げた事例より地すべりと崩壊であり、以下に示す規模に相当するものである。

- ・斜面長: 数百 m 程度
- ・幅: 数百 m 程度
- ・厚さ: 数十 m 程度

(4) 「本手法(案)」の構成

第 3 章「地震時の斜面安定度の検討フロー(案)」(以下「検討フロー案」という)では、上述の前提を踏まえ、検討の手順を示した。

第 4 章「地震時の斜面安定度の評価手法(案)～解説～」(以下「解説」という)では、第 2 章で示したフロー案においてポイントとなる事項を解説し、それぞれの検討項目実施の際に留意すべき点についても示した。

3. 地震時の斜面安定度の検討フロー(案)

第2章(1)～(4)を踏まえ、検討の手順を以下の3段階とした。これら検討では、各段階で、適宜学識経験者の助言・指導を受けつつ検討を実施することが望ましい。

なお、下記①～③の検討は、必要に応じて個別の検討として実施することも可能である。その際、必要に応じ本手法(案)で挙げた手法以外も考慮することが可能である。

①地震時の地すべり等の解析モデルの検討

検討に用いる基礎条件(検討範囲、地盤の力学特性等)を収集し、解析モデルを検討する。

②地震時の斜面の安定度評価

広域的な領域における地すべり等への地震動の影響評価を実施し、個別に安定度の評価が必要となる地すべり等を抽出する。抽出した地すべり等に対し、地震時の安定度を評価する。

なお、現時点では、広域的な領域における地すべり等への地震動の影響評価は3次元、抽出した地すべり等に対する地震時の安定度評価は2次元での実施が一般的である。

③対策工の効果予測・効果評価

個別の地震時の地すべり等の安定度評価モデルを基本とし、それに抑制工、抑止工の効果を加味した解析を実施し、地震時の地すべり等の対策施設の効果を予測・評価する。

次項、図-1に検討フロー(案)を示す。

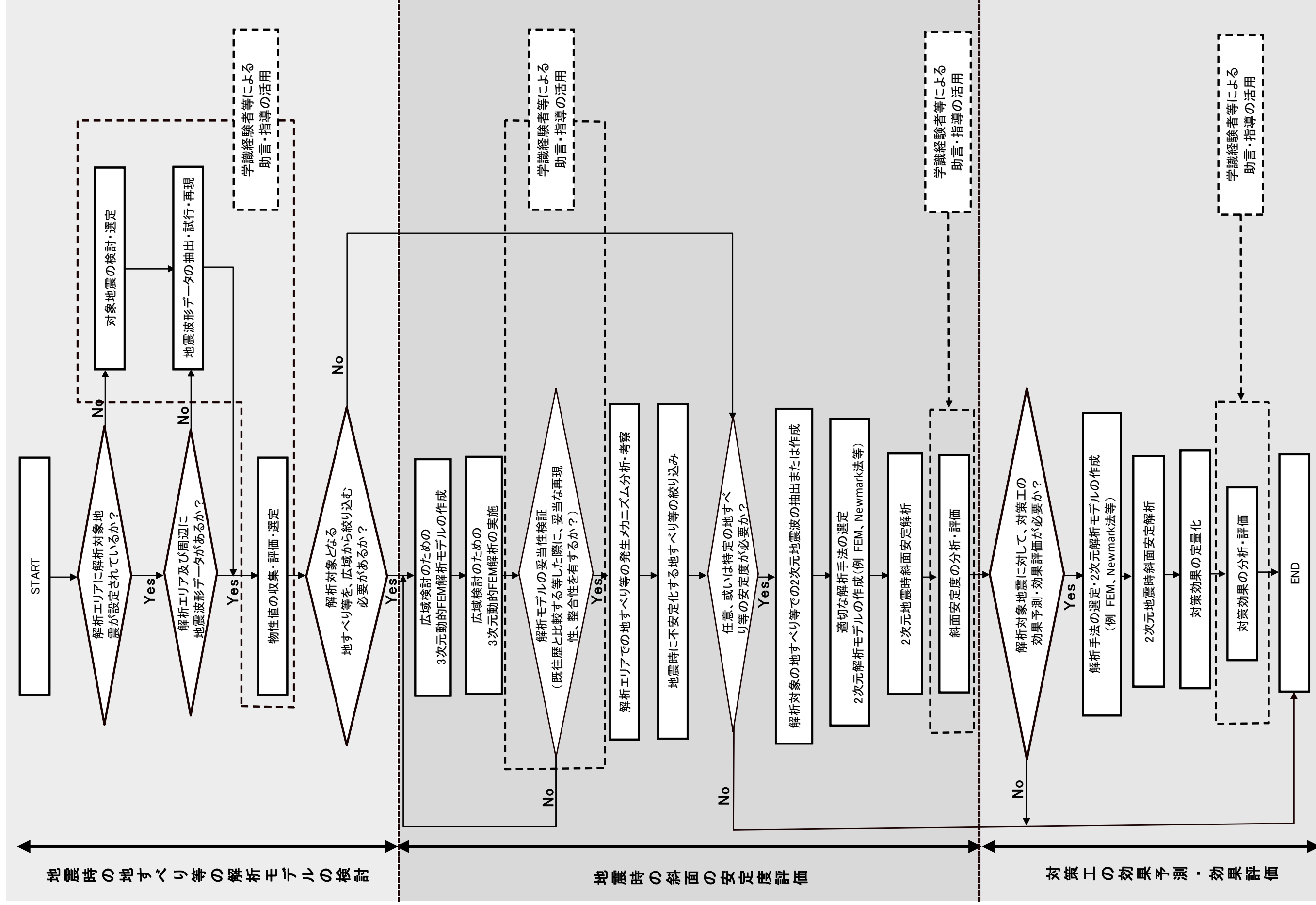


図-1 地震時の斜面安定度の検討フロー(案)

4. 地震時の斜面安定度の評価手法(案) ～解説～

(1) 地震時の地すべり等の解析モデルの検討

① 解析対象地震動の設定

検討対象とする地すべり等に対して、想定される適切な範囲・規模の地震動(波形)を設定する。

【解説】

- 1) 地震時の斜面安定度を評価する上では、解析エリアにおいて検討対象となる地震動が設定されていることが必要である((例)実際に地震によって地すべり災害が多発した芋川流域では、中越地震時の観測波形を対象地震動として検討が実施された)。
- 2) この点、解析エリアに想定・設定された地震がない場合には、検討対象となる様な、或いは対象とすべき地震を選定・設定する必要がある。
- 3) また、検討対象地震動については応答解析実施のための入力加速度成分の時間的変化を示す波形データを得ることが必要である((例)芋川流域の場合、山古志竹沢の強震データが採用された)。
- 4) 解析エリアに既往の地震波形データがない場合には、解析対象とする地震動(地震波形データ)を、解析エリア以外の気象庁公開データや既往資料など公開されているデータ等を参照して設定する必要がある。

② 物性値の設定

解析に用いる物性値は解析対象範囲の地形・地質等を十分に考慮し、適切な値を設定する。

【解説】

- 1) 解析エリアの物性値は、可能な限り多くのデータを収集、整理した上で設定する。解析エリアの土質・岩石試験などのデータが少ない場合には同様の地質分布域のデータや既往資料も積極的に収集する。
- 2) 実施する地震解析は、波動解析であるので波動特性が得られる弾性波速度等も収集すべき重要な資料である。
- 3) 2次元地震時斜面安定解析の実施にあたっては、土要素の単調載荷ならびに繰返し載荷時の応力ひずみ関係を把握するための力学試験を実施した物性値も入手する。
- 4) 解析に用いることができる物性値が存在しない場合には、別途調査、試験が必要である。
- 5) 物性値を設定した解析モデルが数値解析上の想定のみで、非現実的なものにならないようにするために、後述する「(2)②解析モデルの妥当性検証」が必要である。

《参考》

解析エリア内の物性値については、詳細に調査等が実施されている地すべり地等以外では試験値が存在しない場合が往々にしてある。既往の解析事例でも、解析エリア内に存在する地質毎の試験値がすべて揃っている事例は極めて少ない。

この点、既往の多くの検討では、同様な地質を呈する周辺域の値や、一般値を入力し、「(2)②解析モデルの妥当性検証」を実施しつつ、その値を設定した。

(2)地震時の斜面の安定度評価

① 解析モデルの選定

地震解析を実施するモデルの対象範囲及び次元(3次元、または2次元)は、解析対象とする地すべり等の特性を考慮して選定する。

【解説】

- 1) 解析対象とする地すべり等が個別斜面に限定されていれば、地震波、及び物性値の設定後、同斜面に対する2次元での地震時斜面安定解析を実施する。
- 2) 一方で、解析対象となる地すべり等が個別斜面にとどまらず広域に分布しうる場合、斜面群から成る全体系の応答を把握するために、広域を対象とした3次元での地震応答解析を採用する。
- 3) 3次元地震応答解析を実施する際、解析エリアは少なくとも1箇所以上の地震計設置箇所(気象庁、他機関等)を含む範囲とすること。
- 4) 極めて広い範囲を効率的に検討するために、地形・地質等を単純化したモデルを用いることが一般的である。

② 解析モデルの妥当性検証

構築した3次元地震応答解析モデルは、既往歴等をもとにその妥当性を検証する。

【解説】

3次元地震応答解析モデルは、その結果が実現象に整合するか否かについて、既往歴等(地すべり等の発生箇所、被害調査の結果他)と比較する等の検討を実施し、その妥当性を検証する。例えば芋川流域では、現実が発生した地すべり等の発生位置と解析結果との関係を検討した事例がある。

③ 解析結果の考察

3次元地震応答解析の結果から、解析エリア内における斜面安定度を考察する。

【解 説】

3次元地震応答解析による解析結果として、既往の広域的な検討事例では「最大水平加速度分布」、「最大せん断応力分布」、「累積変位量分布」、及び「最小局所安全率分布」の各分布性状にもとづく分析がある。これらの解析結果と、解析エリア内に存在する地すべり等との位置関係を把握し、不安定化する可能性のある斜面・領域について考察する。

④ 2次元地震時斜面安定解析での地震波の設定

2次元地震時斜面安定解析で使用する地震波は、その方向、規模を適切に設定する。

【解説】

- 1) 個別斜面を対象とした地震時の斜面安定解析では、当該斜面の主たる運動機構を代表する2次元断面における解析を採用している。
- 2) 2次元地震時斜面安定解析に使用する地震波は、解析対象地震波形を2次元安定解析断面方向へ投影し、作成する。

《参考》

広域を検討対象とした3次元地震応答解析を実施した場合は、解析対象となる個別斜面の地すべり等における入力地震波形データを抽出し、2次元地震時斜面安定解析における地震波を設定することが可能である(図-2、芋川での設定事例)。

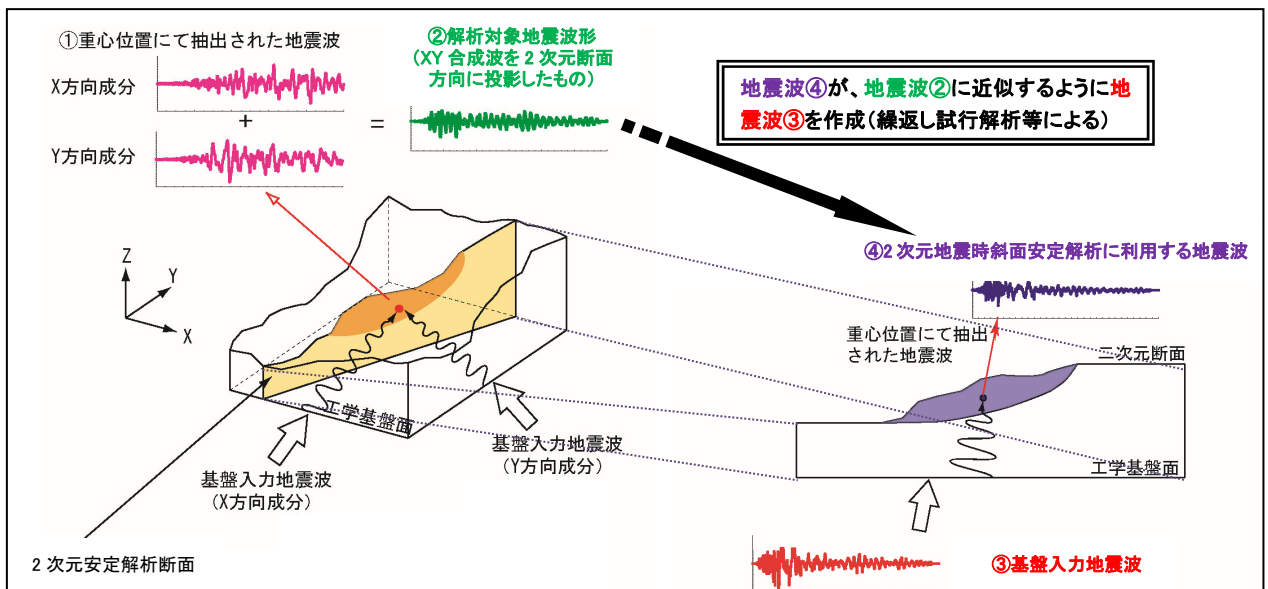


図-2 2次元斜面安定解析断面における入力地震波の設定

- 3) 既往の検討においては、上記2)、《参考》何れの手法も実施した実績を有している。

⑤ 解析手法の選定

2次元地震時斜面安定解析では、評価対象とする地すべり等の対策効果を定量的に評価できる手法を選定する。

【解説】

1) 既往の地すべり等における実績としては、有限要素法、Newmark(渡辺・馬場)法と有限要素法が挙げられる。上記の2手法(有限要素法、Newmark(渡辺・馬場)法)を比較すると、Newmark(渡辺・馬場)法は有限要素法と比較して相対的に単純なモデルであり、相対的に解析が容易となる。有限要素法は現実に即した(地震動は地すべり土塊と基盤の双方に作用するという)動的解析が可能であるといえる。

2) 解析手法を選定する際に留意すべき点として、間隙水圧の考慮の方法がある。

一般に、土中の間隙水圧は「静水圧」と「過剰間隙水圧」とに分けられるが、これらはいずれも斜面内の有効拘束圧の低下に関係するため、地震時の地すべり安定度、及び対策工、特に地下水排除工の効果を予測・評価する上で、地下水位以深における間隙水圧の考慮は重要である。

間隙水圧のうち、地下水位の存在による地震前の「静水圧」を考慮する際には、解析に用いる土の材料構成則において、静水圧を考慮した有効応力の下での初期応力状態を用いる。ここで、地震中に非排水状態を仮定した“全応力規準に基づく構成則”を採用する場合には、地震前の初期有効拘束圧の応力レベルを反映した見かけの非排水せん断強度を、地震前および地震中の強度定数として用いる必要がある。

一方、間隙水圧のうち、地震中の「過剰間隙水圧」を地震地すべり解析において考慮する目的は、水圧増加に起因する有効応力の減少がせん断強度の低下をもたらして滑動を助長する可能性があるためである。解析対象とする地盤材料が比較的均質かつ極めてゆるい砂の場合には、液状化の発生を再現しうる“有効応力規準に基づく構成則”が適用される。

ただし、多くの自然斜面のように、一部固結した地層の有する土構造としての見かけ

の強度(固結成分)が地震中に損傷することによってもせん断強度が低下する事象においては、過剰間隙水圧の上昇だけを強度低下の原因とする“有効応力規準に基づく構成則”よりも、構造の損傷と水圧の上昇とをあわせた見かけの強度低下の総体をモデル化する“全応力規準に基づく構成則”の方が、より妥当と考えられる。

この点、既往の地すべり等の検討事例では、地下水排除工の効果として、地下水位の変動を解析に反映する手法として、全応力による地震地すべり解析が採用されている。

⑥ 斜面安定度の分析・評価

斜面安定度の分析・評価では、地震動が作用した際に予測される地すべり等の挙動を定量的に評価する。

【解説】

- 1) 地震動が作用した際に予測される地すべり等の挙動として、2次元安定解析断面での「移動土塊の重心位置の変位量」、「地表面における最大変位量」等を具体的な数値として把握する。
- 2) 上記1)にて算出した変位量と地すべり等の斜面長から、当該地すべり等の挙動を推定する事が可能である。既往の検討事例では、地震時に想定される最大の変位量が、その斜面の限界移動量(図-3)を超えるか比較し、斜面安定度を評価する一つの目安としている。なお、この限界移動量の考え方に基づく評価方法は、実績として再滑動型地すべりに適用した事例が主であり、初生地すべりについては慎重な取り扱いが必要である。

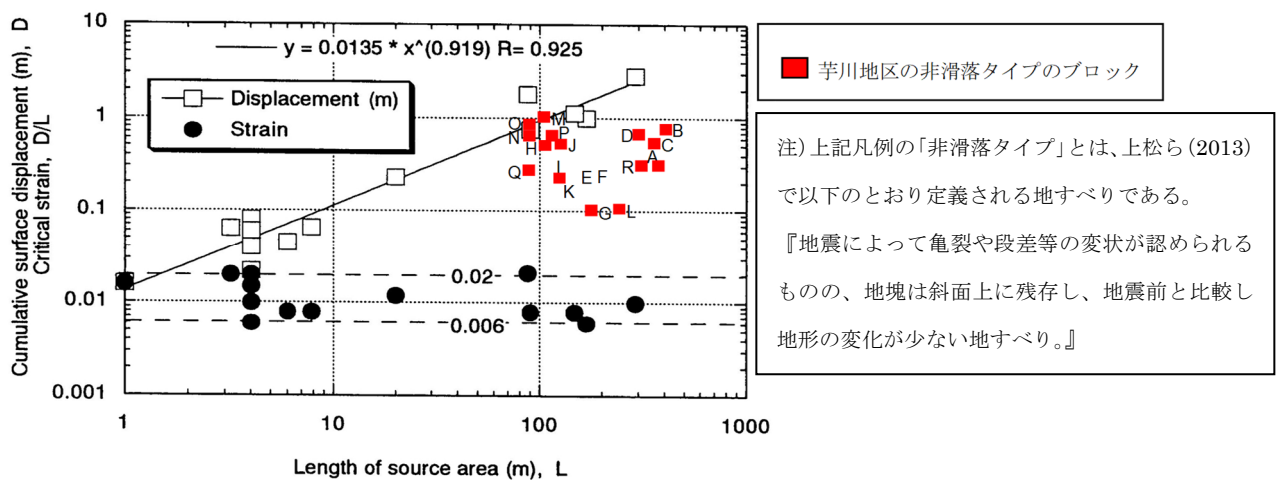


図-3 地すべり斜面長と累積変位の関係

-上松ら(2013): 芋川流域地震地すべりにおける地すべり移動量と斜面長の関係,第52回日本地すべり学会研究発表会講演集-

※「森脇寛(2001): 地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価,地すべり 38(2)」に芋川地区の非滑落タイプのブロックの事例を加筆

- 3) また、検討対象斜面全域におけるすべり面の「せん断力(ΣT)、注:ただし地震応答に起因する慣性力を除いた自重由来の滑動力のみ」、「ひずみレベルに応じたせん断抵抗力(ΣR)」の分布、及びそれらの総和の比(ΣR/ΣT)を表すことにより斜面安定度を評価することもできる。

(3) 対策工の効果予測・効果評価

① 解析手法の選定・解析モデルの作成

対策工の効果を予測、評価する際には、評価対象とする地すべり等で実施された、あるいは実施される対策工を適切にモデル化できる解析手法を選定し、解析モデルを作成する。

【解説】

- 1) 安定度の評価を経て、任意、或いは特定の地すべり等での既設の地すべり等の防止施設、または、配置計画のある地すべり等の防止施設の効果の評価する必要がある場合には、それらの対策を解析モデルに反映し、対象地震動に対する個別斜面の 2 次元地震時斜面安定解析を実施する。
- 2) 既往の検討事例では、2 次元断面での有限要素法、または Newmark(渡辺・馬場)法による安定解析が実施されている。これらの 2 手法においては、現段階で地下水排除工による地下水位の変化、抑止工(杭工、深礎杭工、アンカー工)による抑止効果のモデル化が可能である。抑止工については、必要に応じて塑性化を考慮したモデル化や、地震前の応力状態を再現したモデル化の導入を検討することが望ましい。

②対策効果の予測・評価

地震動が作用した際に予測・発揮される対策効果は、地震動が作用した際に予測される地すべり等の挙動により定量的に評価する。

【解説】

対策効果の予測・評価は、前出「(2)⑥斜面安定度の分析・評価」と同様の手法にて、対策の有無による相違を具体的な数値として比較することにより実施する。

本「手法(案)」作成にあたっては、「地震時の斜面安定度の評価手法に関する検討会」を開催し、以下のメンバーより頂いた意見を反映した。

【「地震時の斜面安定度の評価手法に関する検討会」メンバー】

◎座長

石井 靖雄(独立行政法人 土木研究所 土砂管理研究グループ 上席研究員)

西井 洋史(国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部 保全課 保全調整官)

◎丸井 英明(新潟大学 災害復興科学研究所 教授)

吉松 弘行(一般社団法人 斜面防災対策技術協会 理事)

若井 明彦(群馬大学 大学院理工学府 教授)

(五十音順、敬称略)

本「手法案」作成にあたり御協力いただいた上記検討会メンバー各位に深謝の意を表します。

※本「手法案」に関する質問等は、下記事務局にご連絡ください。

(令和3年3月更新)

【事務局】

一般財団法人 砂防・地すべり技術センター

TEL:03-5276-3273

武士 俊也(斜面保全部長) takeshi@stc.or.jp

相楽 渉(斜面保全部 課長) sagara@stc.or.jp

宮城 昭博(斜面保全部 技師) miyagi@stc.or.jp