

令和6年能登半島地震等の地震を誘因とした急傾斜地崩壊対策施設の被災に関する多項ロジスティック回帰モデルによる傾向分析

日本工営株式会社 ○岡崎丈 西口尚希 杉崎友是 小原大輔 村岡純奈
国土交通省国土技術政策総合研究所 瀧口茂隆 岸本優輝 小林正直

1. はじめに

災害時に取得された被災状況に関する情報は、今後の防災対策を進めるうえで重要な情報を含んでいる。本研究では、令和6年能登半島地震を中心に地震動により被災した急傾斜地崩壊対策施設を対象として、収集可能な資料を用いて、急傾斜崩壊対策施設の被災状況を整理し、被災実態を分析した。本稿では、この傾向分析の結果を報告する。加えて地質等の外形的に判別が難しい情報は、災害時資料では網羅的には取得できない場合も多いため、マルコフ連鎖型モンテカルロ法（以下 MCMC）による欠損値補完や複数パターンでの多項ロジスティック回帰（以下 MLR）モデルの比較による被災傾向分析も試行した。

2. 統計的な被災傾向分析

2.1 既往地震における斜面災害の被災傾向

地震時の斜面災害については、既往地震でも被災傾向の分析が行われてきている。1995年兵庫県南部地震における吹付法面の被害実態に関する分析では、尾根地形で崩壊が多く、被害の規模も大きいこと、法面崩壊は法肩からの崩壊がほとんどであることが確認されている¹⁾。2007年能登半島地震における斜面崩壊の分析では、断面形状が凸の斜面で崩壊規模が大きいことが確認されている²⁾。このように、一般的に地震時の斜面災害は、縦断凸形斜面で発生しやすく被害が大きくなりやすいことが知られている。本研究では、これらの傾向を踏まえて、地震時の急傾斜地崩壊対策施設（擁壁、法枠、落石防護柵等）の被災傾向の分析を試みた。

2.2 被災情報の収集整理

(1) 収集対象とした被災情報

本研究では、急傾斜地崩壊対策施設の被災情報について1995年兵庫県南部地震の2事例、2004年中越地震の1事例、2007年中越沖地震の2事例、2007年能登半島地震の2事例、2024年能登半島地震の152事例の計159事例を収集しカルテを作成した。カルテ作成にあたっては、図面や写真等から、施設の種類や施設諸元、地形地質に関する情報を記載した。カルテ作成の際、被災施設のみならず、被災施設近傍の無被災の施設についてもカルテ作成の対象とした。このような収集過程のため、被災施設の全数、無被災施設の全数を対象とした分析ではない点に留意が必要である。

(2) 被災の説明変数となり得る指標

カルテ作成にあたり、被災の説明変数となり得る指標として、推計震度や施設諸元、地質のほか、DEM（数値標高モデル）から、図1に示す範囲の各種地形指標の統計量を算出した。DEMは国土地理院基盤地図情報³⁾及び石川県取得データ⁴⁾を使用した。

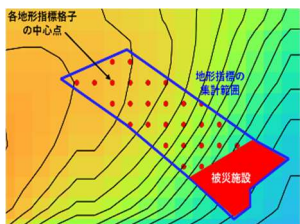


図1 地形統計量算出範囲の概念図

(3) 変状類型の分類

様々な変状実態に基づく変状の類型化は、単純に類型区分が線形的な規模の増加を示すとは限らない。そこで、類型区分が線形的な被災規模の増大に極力近似するように、変状類型A（地盤変形・施設変状無し）、変状類型B（地震動のみによる施設変状有り）、変状類型C（地盤変形有り：対策施設内で停止）、変状類型D（地盤変形有り：対策施設外に及ぶ変状）に集約して分析した（表1）。

表1 変状類型毎のデータ数分布

| 変状の類型 | 擁壁 | 法枠 | 落石防護柵 |
|-------|----|----|-------|
| 変状類型A | 16 | 12 | 8 |
| 変状類型B | 19 | 9 | 0 |
| 変状類型C | 34 | 17 | 13 |
| 変状類型D | 7 | 1 | 11 |
| 合計 | 76 | 39 | 32 |

2.3 被災傾向分析

分析の対象施設は施設数が多く、概ね変状類型を網羅する擁壁、法枠、落石防護柵とした。施設種別、変状類型毎の各指標について、区間毎の占有率で示し、その相関性により分析した（図2）。なお、地質等の外形的に判別が難しい情報には、欠損が相当数存在し、そのデータを除外していることに留意が必要である。

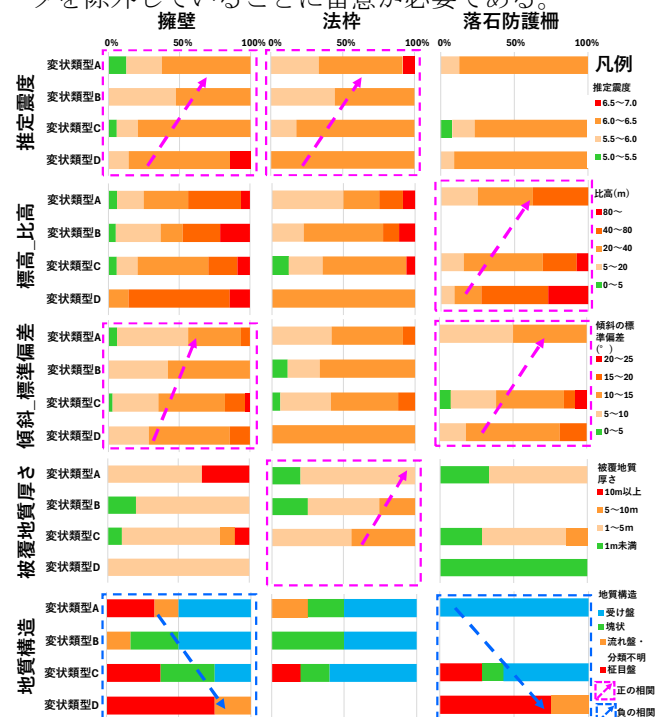


図2 100%積み上げ棒グラフによる被災傾向分析

図2に示す分析結果から、以下の傾向が示唆された。

- ・擁壁と法枠では、推計震度が大きいほど被災規模が大きい傾向がある。
- ・落石防護柵では、比高が大きいほど被災規模が大きい傾向がある。
- ・擁壁と落石防護柵では、傾斜の標準偏差が大きい（異なる傾斜の斜面で構成される＝急傾斜地では縦断凸形）ほど被災規模が大きい傾向がある。
- ・法枠では、被覆地質厚さが厚いほど被災規模が大きい傾向がある。

- ・擁壁と落石防護柵では、受け盤の地質構造ほど被災規模が小さい傾向がある（地質構造はカテゴリ変数で数値が大きい方が受け盤、小さい方が流れ盤となるように設定）。
- ・無被災（変状類型 A）の場合は、施設効果により一部上記の傾向と異なる場合がある。

分析の結果、上記の通り、施設種別に応じてある程度説明可能な傾向が認められた。しかし、これらの積み上げ棒グラフによる相関分析は定性的で、一部データが少ない変状類型もあるため、区間の設定によっても解釈が異なる可能性があるなど、課題も多い。

3. MLR による傾向分析の試行

3.1 分析データの前処理と説明変数の選定

(1) 分析データの前処理

災害時の被災情報は重要な情報を含んでいるが、外形的に判別が難しい情報は取得できない場合も多く、カルテ作成箇所のうち、全く欠損のない箇所は全体の5%であった。欠損値を補完する方法は、平均値等の統計値で補完する方法もあるが、変数の分布が持つ情報を棄損するという問題がある。ここでは MCMC により、無情報で欠損値を補完し、オリジナルの変数分布が持つ情報を棄損せずに分析データとする方法を採用した。

(2) 多重共線性を考慮した説明変数の選定

説明変数となり得る指標は、地震動、地形、地質（地質構造を含む）、施設諸元等の 30 以上存在するが、これらの指標は相互に関係するものも多いうえ、説明変数が多すぎると汎化性が低下する。MLR モデルの学習で使用する説明変数は、多重共線性がある場合、回帰超平面が定まらないため結果が安定しないことが懸念される。このため、散布図行列を使用して相関性の目安を参考に、多重共線性が少ないように説明変数を選定した。

3.2 MLR モデルによる傾向分析の試行

目的変数となる変状類型は、それぞれ複数の要因が関係する独立した現象であるため、極力近似するように区分したものの、単純に類型 A から D に向かって、現象の規模の増大を示すわけではない。また、変状類型毎の事例数は、バラツキが大きい。説明変数は、素因・誘因にまたがる複数分野（地震動、地形、地質、施設諸元等）にわたり、カテゴリ値と連続値の両方を含み、それぞれ単位スケールが異なる変数である。このため、説明変数の標準化を行ったうえで、変状類型の独立性を考慮して、MLR による傾向分析を試みた。

(1) MLR モデルによる被災傾向分析

MLR の学習では、目的変数（カテゴリ：変状類型 A～D）と説明変数の間に、回帰モデル係数が得られる。回帰モデル係数は、①正の係数の場合、説明変数が大きいほどそのカテゴリの確率が高まる、②負の係数の場合、説明変数が小さいほどそのカテゴリの確率が高まる。被災傾向分析では、回帰係数を信頼区間付き係数プロットで可視化し、線形的に影響度の高い説明変数を抽出した。例えば図 3 に示すように、擁壁の地震動、地形、地質、施設諸元を説明変数とした MLR モデルでは、震度、傾斜の標準偏差で説明変数が大きいほど被災規模が大きくなりやすく、地質構造のカテゴリ説明変数からは、受け盤ほど被災規模が小さくなりやすい傾向が認められた。これは、多数の説明変数から、3 つの線形的に影響度の大きい説明変数を抽出できたことを示している。実際に図 2 の分析で対象とした指標は、MLR

による傾向分析でマイニングした指標である。ここには示さないが、擁壁、法枠、落石防護柵それぞれの、MLR モデルによりマイニングされた影響度の大きい説明変数も、2.3 章の傾向分析結果と同じであるため、分析処理前のデータでも同様の傾向を示すことが確認できた。

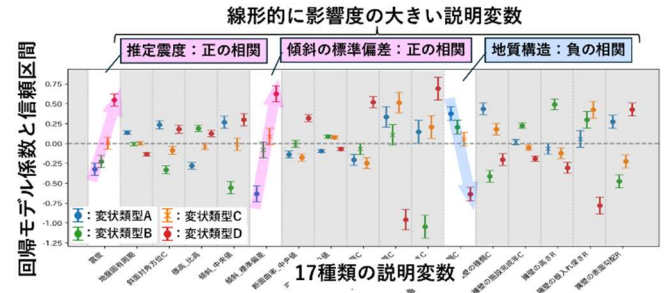


図 3 擁壁の回帰モデル係数の信頼区間付き係数プロット

(2) 複数の MLR モデルの比較による傾向分析

説明変数の組合せを変えた複数の MLR モデルを学習させて、モデル性能を重み付け F1 値で比較して分析した。なお、この F1 値はテスト/トレインを分割していないため、汎化性能を示しているわけではない。表 2 に示す通り、全体的に被災に対する施設諸元の影響は小さいものの、斜面に直接施工する法枠では施設諸元の影響が大きいものに対し、相対的に規模の小さい待ち受け対策である落石防護柵で、施設諸元の影響が小さいなど、施設の特徴に応じた傾向を把握することができた。

表 2 F1 値による複数の MLR モデルの評価

| | 説明変数の組み合わせ | 擁壁 | 法枠 | 落石防護柵 |
|--------------------|---------------|------|------|-------|
| 重み付け平均 F1 値とその相対評価 | 地震・地形・地質・施設諸元 | 0.60 | 0.84 | 0.90 |
| | 地震・地形・地質指標のみ | 0.53 | 0.77 | 0.87 |
| | 施設諸元のみ | 0.41 | 0.47 | 0.29 |
| | | 影響中 | 影響大 | 影響小 |

4. 考察

災害時の被災情報は、類型毎のデータ数がばらついたり、情報が不完全な場合もある。一方で、地形・地質・構造物の複雑な相互関係により、被災状況が決定されるため、説明変数となり得る指標が多岐にわたる場合もある。今回の場合、MLR 等の機械学習手法を活用することで、被災情報が含有する重要な被災傾向をマイニングして、被災メカニズムの作業仮説を検討できた。なお、この被災傾向は、分析処理前のデータに基づく積み上げ棒グラフ等による分析と整合的であった。

5. まとめと今後の課題

- ・積み上げ棒グラフによる被災傾向分析により、施設種別に応じてある程度説明可能な傾向が認められた。
- ・MLR でも同様の傾向が得られ、機械学習手法の活用による傾向分析の可能性が示唆された。
- ・複数の MLR モデル比較から、説明変数の種別毎の影響度も施設種別に応じて比較できた。
- ・被災傾向に基づく防災対策を進めるうえでは、災害時の極力欠損のない被災情報の収集が課題である。

参考文献

- 1) 三木博史、三原慎弘、石橋晃睦、藤原鉄朗(1996) 兵庫県南部地震によるモルタル吹付のり面の被害実態、土と基礎、44-2, pp. 73-75
- 2) 国土技術政策総合研究所(2007) 平成 19 (2007 年) 能登半島地震被害調査報告、国総研資料 第 438 号
- 3) <https://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 4) <https://www.geospatial.jp/ckan/organization/ai-gid-dsaster-20240101>