

# 原子力発電所の基礎地盤 及び周辺斜面の安定性評価技術 ＜技術資料＞「2020年度版」

2021年7月

土木学会原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会

目次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1. 地盤安定性評価小委員会の活動の概要.....            | 1  |
| 2. 断層変位評価手法.....                     | 7  |
| 2.1 従来技術.....                        | 7  |
| 2.1.1 概要.....                        | 7  |
| 2.1.2 数値解析.....                      | 10 |
| 2.1.3 地表地震断層データベース.....              | 12 |
| 2.2 新技術.....                         | 15 |
| 2.2.1 数値解析.....                      | 15 |
| (1) 高性能計算による断層変位評価.....              | 15 |
| (2) 断層の動力学的破壊進展解析による断層変位評価.....      | 21 |
| 2.2.2 リモートセンシングによる変位計測技術.....        | 25 |
| (1) LiDAR-DEM 差分解析.....              | 26 |
| (2) DInSAR 解析.....                   | 30 |
| 2.3 適用例.....                         | 35 |
| 2.3.1 数値解析.....                      | 35 |
| (1) 高性能計算による断層変位評価.....              | 35 |
| (2) 断層の動力学的破壊進展解析.....               | 48 |
| 2.3.2 リモートセンシングによる断層変位データベースの拡張..... | 56 |
| (1) 2016 年熊本地震.....                  | 56 |
| (2) 2014 年長野県北部の地震.....              | 61 |
| (3) 2011 年福島県浜通りの地震.....             | 67 |
| 3. 地盤安定性評価手法.....                    | 73 |
| 3.1 はじめに.....                        | 73 |
| 3.2 従来技術（現行の評価手法）.....               | 73 |
| 3.2.1 全般.....                        | 73 |
| 3.2.2 従来技術の課題.....                   | 74 |
| 3.2.3 対策工を含む斜面の地震時安定性評価の現状と課題.....   | 77 |
| 3.3 新技術（新しい評価手法）.....                | 79 |
| 3.3.1 地震時の変位量および移動量の評価.....          | 79 |
| 3.3.2 対策工を含む斜面の地震時安定性評価.....         | 79 |
| 3.4 適用例.....                         | 81 |
| 3.4.1 軟岩斜面の時刻歴非線形解析.....             | 81 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| (1) 解析手法.....                    | 81  |
| (2) 対象とする動的遠心力模型実験.....          | 83  |
| (3) 時刻歴非線形解析による再現計算.....         | 89  |
| (4) まとめ.....                     | 94  |
| 3.4.2 基礎地盤の時刻歴非線形解析.....         | 95  |
| (1) 解析手法.....                    | 95  |
| (2) 対象とする動的遠心力模型実験.....          | 97  |
| (3) 時刻歴非線形解析による再現計算.....         | 103 |
| (4) まとめ.....                     | 106 |
| 3.4.3 抑止杭工斜面の地震時安定性評価.....       | 107 |
| (1) 抑止杭工斜面の地震時安定性評価フロー.....      | 107 |
| (2) 対象斜面と杭設計.....                | 108 |
| (3) 対象斜面の遠心力模型実験.....            | 110 |
| (4) 安定性評価フローの検証.....             | 112 |
| (5) まとめと今後の課題.....               | 115 |
| 3.4.4 アンカー工を有する斜面の地震時安定性評価.....  | 116 |
| (1) アンカー工を有する斜面の地震時安定性評価フロー..... | 116 |
| (2) 定着部の残留アンカー力の評価.....          | 117 |
| (3) アンカー引抜き試験のシミュレーション.....      | 120 |
| (4) まとめと今後の課題.....               | 123 |
| 4. 斜面崩落評価手法.....                 | 125 |
| 4.1 はじめに.....                    | 125 |
| 4.2 従来技術（現行の評価手法）.....           | 127 |
| (1) 崩落岩塊の影響範囲.....               | 127 |
| (2) 衝撃力.....                     | 127 |
| 4.3 新技術.....                     | 133 |
| 4.3.1 到達位置の確率分布の評価と質点系解析.....    | 133 |
| (1) はじめに.....                    | 133 |
| (2) 落石挙動の分布に注目した評価の例.....        | 134 |
| (3) 検討に用いた質点系解析の概要.....          | 136 |
| (4) 質点系解析による落石実験の再現性.....        | 138 |
| 4.3.2 個別要素法.....                 | 140 |
| (1) 斜面崩落解析の流れ.....               | 140 |
| (2) 個別要素法のモデル化方法.....            | 141 |
| (3) 岩塊崩落による到達距離解析.....           | 144 |
| (4) 岩塊衝突による衝撃力解析.....            | 145 |

|        |                                  |     |
|--------|----------------------------------|-----|
| 4.3.3  | 不連続変形法                           | 146 |
| (1)    | 三次元粒状体 DDA の概要                   | 146 |
| (2)    | 解析パラメータの設定                       | 149 |
| (3)    | バラツキの考慮                          | 149 |
| 4.3.4  | エネルギー法                           | 150 |
| (1)    | 地震時斜面崩壊におけるエネルギー収支               | 150 |
| (2)    | エネルギー法による斜面流動量の評価法               | 152 |
| 4.4    | 適用例                              | 154 |
| 4.4.1  | パラメータの寄与度分析                      | 154 |
| 4.4.2  | 粒子サイズの検討                         | 159 |
| 4.4.3  | 調査データに基づいた岩盤斜面の岩塊ブロックサイズの評価方法の提案 | 161 |
| (1)    | 既往の岩塊ブロックサイズの指標                  | 161 |
| (2)    | 岩塊ブロックサイズの評価方法の提案                | 161 |
| 4.4.4  | 浅いすべり線の崩落                        | 166 |
| (1)    | 崩壊領域の設定                          | 166 |
| (2)    | 到達距離解析                           | 166 |
| 4.4.5  | 深いすべり線の崩落                        | 171 |
| (1)    | 崩壊領域の設定                          | 171 |
| (2)    | 到達距離解析                           | 171 |
| 4.4.6  | 岩塊の反発係数の決定                       | 174 |
| (1)    | 反発係数                             | 174 |
| (2)    | 鉛直落下試験                           | 175 |
| (3)    | 実規模斜面落石実験                        | 178 |
| (4)    | 実験の再現解析                          | 179 |
| 4.4.7  | 転がり抵抗を導入した崩落解析                   | 182 |
| (1)    | 転がり摩擦                            | 182 |
| (2)    | シリンダを用いた安息角の実験と再現解析              | 183 |
| (3)    | 実被害における安息角の再現解析                  | 185 |
| (4)    | まとめ                              | 188 |
| 4.4.8  | 弾性理論による衝撃力                       | 189 |
| (1)    | 個別要素法による衝撃力解析                    | 189 |
| (2)    | コンクリート外壁の損傷評価例                   | 191 |
| 4.4.9  | 岩塊の破碎を考慮した衝撃力                    | 194 |
| (1)    | 衝突破碎を考慮した解析モデル                   | 194 |
| (2)    | 衝突破碎を考慮した衝撃力解析                   | 197 |
| 4.4.10 | 質点系解析                            | 200 |

|   |     |
|---|-----|
| (1) 原子力発電所を対象とした地震時リスク評価のための質点系解析.....                        | 200 |
| (2) 一般道路を対象とした落石の危険度解析と最適対策工配置 .....                          | 204 |
| 4.4.11 三次元粒状体 DDA による崩落解析の例.....                              | 207 |
| (1) 解析の概要.....  | 207 |
| (2) 解析結果.....   | 209 |
| (3) まとめ.....  | 212 |
| 4.4.12 エネルギー法の適用例.....  | 212 |
| (1) 模型振動実験.....   | 212 |
| (2) 実際の斜面崩壊データ分析と摩擦係数の逆算 .....                                | 213 |
| (3) まとめ.....  | 217 |
| 5. リスク評価手法.....   | 219 |
| 5.1 設計超過事象への対応.....   | 219 |
| 5.1.1 設計超過事象 (BDBE: Beyond Design Basis Event) へのこれまでの対応..... | 219 |
| 5.1.2 BDBE に関する現在の議論.....                                     | 220 |
| (1) IAEA .....  | 220 |
| (2) Canada の規制基準 .....  | 222 |
| 5.1.3 リスク評価の必要性.....  | 224 |
| (1) リスク論・リスク評価が必要な理由.....                                     | 224 |
| (2) 基礎地盤・斜面を対象とした状況.....                                      | 224 |
| 5.2 従来手法 (基礎地盤・斜面の地震時損傷確率評価) .....                            | 225 |
| 5.3 試解析例.....   | 226 |
| 5.3.1 原子力規制庁プロジェクト .....                                      | 226 |
| (1) はじめに.....   | 226 |
| (2) 地震起因の斜面崩壊に関する影響評価の基本的な枠組み .....                           | 228 |
| (3) 各限界状態に対するフラジリティ評価事例.....                                  | 230 |
| (4) あとがき.....   | 238 |
| 5.3.2 原子力リスク研究センター共同研究.....                                   | 240 |
| (1) 基礎地盤を対象としたリスク解析.....                                      | 241 |
| (2) 周辺斜面を対象としたリスク解析.....                                      | 247 |
| 5.4 まとめと今後の課題.....  | 254 |
| 5.4.1 不確かさ評価.....   | 254 |
| 5.4.2 検証と妥当性確認 (V&V) .....                                    | 255 |
| (1) はじめに.....   | 255 |
| (2) V&V に関するこれまでの取り組み.....                                    | 255 |
| (3) 最新の取り組みと今後の課題.....  | 256 |
| 5.4.3 システム上の機能維持.....   | 258 |