

岩盤崩壊の特徴とリスク評価

(5W2Hの予測: what, where, whom, when, why, how, and how much)

小俣新重郎

正会員 日本工営株式会社 国内カンパニー (〒102-8539 東京都千代田区麹町5-4)
E-mail: a1647@n-koei.co.jp

Key Words : rockslope, risk management, risk analysis, risk assessment, risk communication

1. 岩盤崩壊の特徴

層雲峡(1987), 越前玉川(1989), 豊浜トンネル坑口(1996), 第二白糸トンネル(1998), 北見北陽のり面(2001), えりも覆工(2004), 中越地震妙見(2004)など, 近年相次いで大規模な岩盤崩壊が発生している。また重大災害に至らなくとも, 中小の岩盤崩壊や落石は地震や豪雨の後にしばしば起こり, その被害は全国的に発生している。

プレート沈み込み帯に位置する日本列島では, スラストが発達した付加体地質が広く分布するだけでなく, 構造運動や火山活動の影響を受け複雑かつ脆弱な岩盤が多いことから, 斜面には岩盤崩壊の素因となる地質的不連続面がよく発達している。また, 国土の3/4を占める山地は隆起が進行しているうえ, アジア大陸東側のモンスーン帯に位置し大気循環に伴う台風, 梅雨, 降雪など降水量が多いことから河川の侵食は活発で, 岩盤崩壊の誘因となっている。さらに冬季の凍結融解, 多発する地震, 人為的な掘削なども岩盤崩壊の誘因となる。

岩盤崩壊は目に見えるような変位が現れてから最終的な崩壊までの時間が短いことが特徴であるが, 一方その不安定化は風化や長期間にわたる重力クリープで徐々に亀裂面が拡大伸展することによるため, 斜面の安定度や崩壊の発生時期を定量的に評価することが難しい現象でもある。また, 地質や地形条件によって崩壊の形態も滑動, 転倒, 崩落, 座屈などと様々である。

本パネルディスカッションでは, 軟岩から硬岩で構成された急崖部で発生し, その安定が斜面の構成岩の不連続面によって支配される岩盤崩壊を, 防災, 減災の視点から取り上げた。規模としては $1 \times 10 \text{ m}^3$ の小規模岩塊から, $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度までの崩壊を対象としている。

2. 岩盤崩壊においてリスクマネジメントが必要とされる背景

岩盤崩壊による災害は, 崩壊現象が社会にかかわることによって生ずるものであるが, 岩盤崩壊の発生や発生後の社会に与える影響には不確実性があるとともに, 災害の形態や規模も様々で, その予測は一般に困難である。一方, 昨今の経済環境においては, 災害を防止するための財源も限られており, また, 事業費のコスト削減に対する社会ニーズも高まっている。

このような背景のもと, 確率論的技術とファイナンスとの統合手法でもあるリスクマネジメント(図-1)には, 以下の役割が期待されている。

- ① 自然現象の不確実性に対する評価手法
- ② 災害予防, 事前対策として実施される技術
- ③ 財源の合理的, 計画的な予算配分, 事業の優先順位付けのための評価手法
- ④ 防災投資の妥当性に関する説明資料の構築

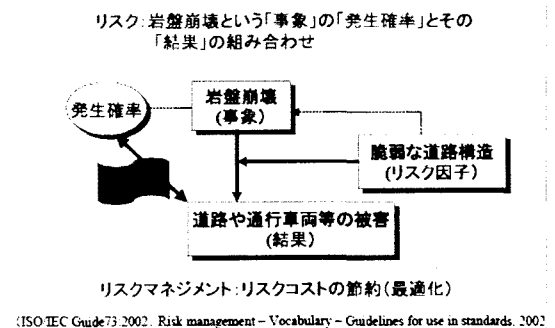


図-1 リスクマネジメントの概念

ここでリスクとは, 岩盤崩壊という「事象event」がある「発生確率probability」によって, 被害を受ける可

能性のある「リスク因子source」のもとで発生したとき、その被害を受けた「結果consequence」と「発生確率」とを組み合わせてコストとして評価したものをいい、リスクマネジメントとは、そのリスクコストを節約（最適化）することという。

例えば、道路近傍で岩盤崩壊が発生することを想定すれば、岩盤崩壊に対する脆弱な道路構造をリスク因子として、道路や通行車両等へ被害（損壊、人的被害、経済損失など）が及ぶことが結果となり、この場合のリスクは被害額と発生確率とを乗じた値となる。

自然災害に対する時系列対応のサイクル

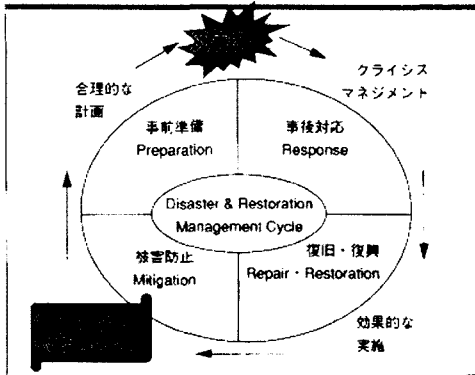


図-2 リスクマネジメントの位置づけ¹⁾

また、リスクマネジメントは将来予想される被害を防止することを目的とするため、図-2に示すように平常時に行われる意思決定や対策のための技術である。

3. リスクマネジメントの流れ

リスクマネジメントは、ISO²⁾の定義に従えば、岩盤崩壊では図-3に示すリスク分析、リスクアセスメント、リスクマネジメントの3つのプロセスからなり、SWZHなどに関するシナリオを想定し、一連のプロセスでリスクの最小化、最適化を計るものである。シナリオは災害履歴、技術者の経験、ブレインストーミング法、KJ法、アンケートをベースにした方法などで不確実な将来を予測するものである。なお、本稿での用語定義はISO/IEC Guide73:2000、JIS TRQ0008:2003に準ずる。

SWZH についての予測は、岩盤崩壊(What)が発生したときに、

Where : どこで→災害の引き金となる岩盤崩壊の事象が対象地域のどこで発生し、どの範囲まで影響する可能性があるか(リスク要因となりうるか)を、経験的手法、

数値シミュレーションなどによって予測する技術。災害の引き金となる岩盤崩壊の発生が予想されたとき、その発生源、影響範囲をハザードマップ(災害予測図)として表現し、これをリスク分析対象に設定する。

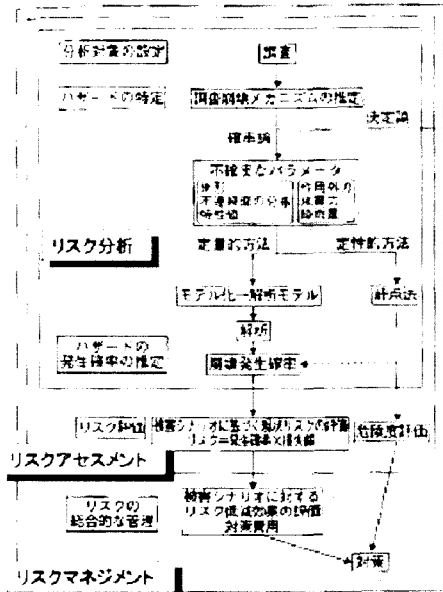


図-3 岩盤崩壊におけるリスクマネジメント³⁾

When : いつ→岩盤崩壊の事象が発生する確率を推定する技術で、経験に基づく方法、発生時期を特定するためのモニタリングに基づく方法および不確実性を考慮に入れた確率論に基づく方法がある。

Whom : なにに→(例) : 道路、住宅、公共施設などに被害が及ぶかについて、落石実験や数値シミュレーションにより推定し、リスクに影響を与えたりリスクの影響を受ける関係者であるステークホルダー-stakeholder を特定する。ステークホルダーは、例えば事業者、管理者、利用者、国民、政府、社会全般などが相当する

Why : なぜ→(例) : 降雨に伴う飽和度、間隙水圧、岩盤強度などの変化、地震による慣性力などの誘因に関する調査や数値解析によるパラメトリックスタディなどで、岩盤崩壊の原因を推定する。

How : どのように→引き金となる事象の発生から災害発生に至る一連のシナリオを予測する技術で、岩盤崩壊では例えば、剥離崩落、転倒、すべり、座屈、複合などの破壊形態についての解析を行い、イベントツリー解析 event tree: ETA、フォールトツリー解析 fault tree: FTA、ヒューマンエラー解析 human error: HE などの手法で、被災事象の発生確率、被災状況、被災規模を想定する。

How much : 損害の程度の評価を行う技術で、ETA、FTA

などを用いてえられた各被害シナリオの事象の発生確率に基づきリスクの算定を行う。

工学分野でのリスクは、被害が想定される事象に対して、その事象の発生確率と事象の結果に伴う損失（被害額）を掛け合わせた損失期待値

$$\text{expected loss } (R = \sum P_i \times C_i)$$

として定義されることが一般的である。ここに、Rは損失期待値、 P_i は事象iの発生確率、 C_i は事象iが発生した場合の損失である。どの程度の被害額か（例：人身損失、物的損失、社会損失などの算定、岩盤崩壊対策の設計施工の費用）を算定する。

本パネルディスカッションでは以上の予測に関する調査、計測および解析のそれぞれの役割について、現状と課題を紹介する。

4. リスクマネジメントの各プロセス

(1) リスク分析 risk analysis

リスク分析は、利用可能な情報を系統的に用いてリスク因子（source:ハザード）を抽出・特定し、リスクを算定するもので、岩盤崩壊の事象（event:What）がどこで（source:Where）発生し、どのような結果（consequence）になりうるのか一連の事象の発生確率（probability:When）はどの程度か、誰（stakeholder:Whom）に対しどのような損害や損傷（harm:How）がありうるか、さらに各リスクを算定（risk estimation:How much）するプロセスである。

(2) リスクアセスメント risk assessment

リスク分析からリスク評価までの全てのプロセスをいい、リスク分析で算定された各リスクを必要なリスク基準risk criteriaと比較し、危害の重大さやリスクを総合的に評価risk evaluationする技術である。

リスク基準は、リスクの重大さを評価するために適用される尺度で、安全性、信頼性、関連する経費、法律及び法令による要求、社会経済及び環境に関する面、関係者の関心ならびにアセスメントに対する優先順位などを含む指標がある。例えば、安全性に関する指標では人身損失を最小にする、社会全体にとっての社会経済学的指標では費用便益分析（対策における必要な投資額 Cost と対策によってもたらされる損失の低減額 Benefit を比較する）に基づき費用対効果を最大にする、利用者にとっての信頼性・利便性指標では道路通行機能を最大にするなどの指標である。

リスク基準を設定する手法としては、過去に体験した危機に対する人々の行動パターンからの統計的な分析やアンケートによって許容リスクレベルを抽出する方法、自然災害や他の人為災害によるリスクと比べてある水準

以下にリスクレベルを設定する方法などがある（図-4）。

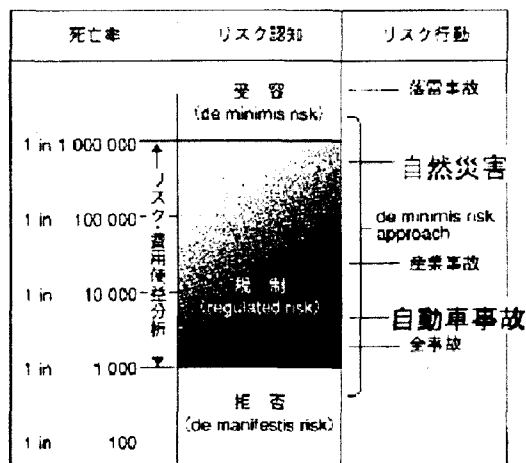


図-4 リスクの社会的需要レベルによる経験的規制のアプローチ¹¹⁾

経済的な評価における費用便益分析はリスクマネジメントにおける各リスク対策について実施される。

リスクアセスメント手法の研究が進んでいる道路防災分野では以下の研究が行われている。すなわち、道路近接の斜面崩壊などに伴う損失について、災害履歴、降雨確率、防災点検の結果等を用いてフラジリティカーブ（降雨量と斜面の壊れやすさの関係曲線）を求め、これを崩壊規模や道路交通量から計算した人身損失や迂回損失等の被害額に反映させて想定被害額を算定し、リスクカーブ（想定被害額と発生確率の関係曲線）として表示するもので、対策工、通行規制、日常管理などの対応策の選定、対策工の優先順位や最適規制雨量値の設定などを目指している（図-5）。これらの損失は人的・物的補償費、復旧費のような直接損失と、道路利用者が被災後に道路が復旧するまでの迂回走行することなどで被る間接損失とに分類され、迂回・走行時間損失がコストとして支配的であること、また、損失額は斜面の想定崩壊土量や人身損失額の違いによって大きな影響を受けることが知られた¹³⁾。

なお、災害による社会的損失の定量化は、「治水経済調査マニュアル（案）」などの各種防災事業の事業評価指針においても、災害の発生頻度と損失の大きさを掛け合わせた年平均損失額（年期期待値）が指標とされているが、このほか社会的損失の平均値（期待値）からの乖離の程度を考慮した年間確率分布でリスクを定義する考え方もある。

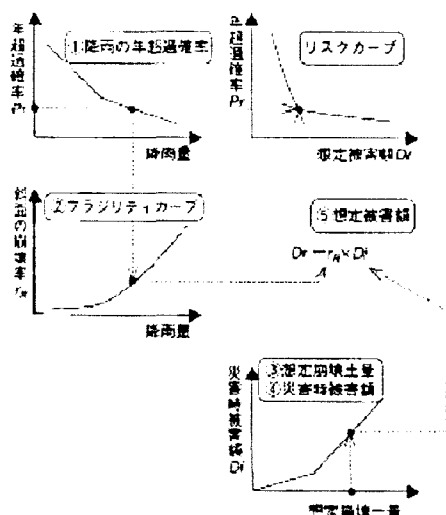


図-5 リスクカーブ（想定被害総額）の作成手順¹³⁾

(3) リスクマネジメント risk management

リスクの最小化・最適化を目的として組織や事業を指揮・管理し、リスクを変更させるための対策 **risk treatment** を検討、選択、実施するすべてのプロセスをいい、リスクアセスメントにおける費用便益分析を参考にどのような事前の対策が合理的かについて、社会的な合意が得られるような対策を講じるための技術である。

また、社会的合意を得るための一連のリスクに関する情報の交換、共有を図るリスクコミュニケーション **risk communication** や防災教育、防災訓練などもリスクマネジメントに含まれる。

適切なリスクマネジメントを行うことによって、リスクを変更させ、社会資本の整備における費用対効果を最大化することが期待される。例えば近年、橋梁、トンネルなど土木構造物の計画・設計・施工・維持・補修・更新を通じたアセットマネジメントに、リスクマネジメントを適用することによって、構造物のライフサイクルコストを最適化する検討も行われるようになってきた。

リスクマネジメントにおける災害対策は、被害が出るのは避けられないが出来るだけ被害を少なくしようとする減災の試みである。一般に発生確率が高くとある程度の外力までは構造物によるハード対策で被害抑止を図ることが出来るので、これを防災の基本とし、一方、発生確率は低くとも外力が大きい場合には被害額が大きくなるからハザードマップによる避難などソフト対策で減災を図るものである(図-6)。

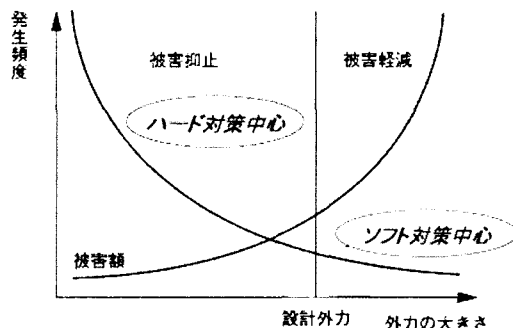


図-6 防災対策の概念図¹⁴⁾

リスク対応は一般に以下の4つに分類される。

① リスクの保有 **risk retention**/ 発生確率が低くリスクも小さい場合にはその損失を負担する、例えば、軽微な浸水や土砂災害による損失であれば受け入れるといった対応をいう。一般に岩盤崩壊では崩壊規模やエネルギーが大きくその被害も甚大であることから、リスクの保有は該当しない。

② リスクの最適化（低減）**risk optimization (reduction)**/ 特定のリスクの発生確率の低減や被害の減少を図る対応によって、リスクを最小化することをいう。

ハードな対策工による災害事象の発生防止、洪水氾濫被害の低減を目指した遊水地や浸水・豪雪被害を低減する高床式住居構造などの土地利用や住居様式の変更がこれに相当する。岩盤崩壊では発生源の予防工対策や崩壊の規模が小さな場合における防護工などの対策が相当する。

ハードな対策の設計にあたっては従来の安全率規範に代わり、機能設計の概念に基づき斜面の耐用年数・重要度も考慮したリスクを損失期待値として評価し、その値と対策工の工費の和を総コストとしてこれを最小化する斜面の設計法も研究されている(図-7)。

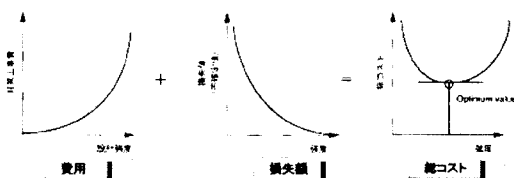


図-7 総コスト最小化原理¹⁾

③ リスクの回避 **risk avoidance**/ リスクのある状況に巻き込まれないようにする意思決定またはリスクのある状況から撤退する行動をいい、例えば道路防災では斜面モニタリングによる通行規制や降雨時通行規制、道路の

付替えなどが、また、土砂災害警戒区域では家屋の移転が、さらに浸水や土砂被害が予想される区域では豪雨時の避難などが相当する。岩盤崩壊では、計測によるモニタリングでの通行規制がこれに該当するが、崩壊の形態によっては計測による発生時期の予測は、なかなか困難である。

④ リスクの移転 **risk transfer**/ 将来予想される損失の負担を他者と共有、すなわち保険や他の契約などで担保することが相当する。例えば、地震災害や火山災害など激甚な被害に対する災害保険で復旧・復興への備えにする制度をいう。

アメリカの災害救助法(スタフォード法 1988)では公的援助として、甚大な被害を受けた個人及びその家族に対して直接的な援助を行うことも、自然災害に対処する連邦政府の責務のひとつとされ、被害者の生活基盤を早急に回復させ、その後の自助努力を促進することが、その地域の経済復興のためにも合理的な政策と考えられている。

なお、このようなリスクの移転は新しいリスク(保険料の未徴収など)を創出したり既存のリスクを変化させる(耐震構造への補強未実施による倒壊可能性の増加など)場合があることから、法律または政府の規制によって、リスク移転は制限、禁止または命令されることがある。

しかしながら、わが国では、リスクの移転によって岩盤崩壊を含めた自然災害に対応することは歴史的、社会的に難しく、事例は少ない。

5. リスクコミュニケーション **risk communication**

リスクコミュニケーションは事業者や行政などの意志決定者と専門家や一般市民などの他の関係者との間におけるリスクに関する情報の交換または共有を目的として、情報の送り手・受け手・内容・媒体などを検討する技術で、社会的合意形成システムとして一連のリスクマネジメントでは不可欠である。

一般にリスクアセスメントで評価された確率・統計的な客観リスクと、個人的、社会的、文化的、環境的、時代的に恐ろしさ・未知性・災害規模・災害特性などからイメージされる主観リスクとにはずれ(認知バイアス)があることから、事象の持つ利便性と危険性を関係者が共有し、合意形成する必要がある。

また、現実には大きな災害が発生している対象についてリスクコミュニケーションを行うことは無意味であることから、対象の持つ客観的リスクそのものが低減されるすなわち、無災害・無事故の実績がリスクコミュニケーションの信頼性の前提となる。

6. 課題

岩盤崩壊の防災面でリスクマネジメント手法を実用化するには、以下の課題がある。

① リスク分析では、リスク因子の特定手法(ハザードマップ・災害発生シナリオなど)に関する十分な客観性の確保が必要である。また、不確定量の確率・統計的な表現・モデル化にあたり十分なデータの蓄積が必要である。すなわち、ETA や FTA で最終事象の発生確率を求める場合、関連する全ての基本事象における確率値が必要であるが、現状ではデータが不備で困難なことが多い。

さらにハザードの脆弱性曲線の算定の際、統計モデルを用いるには崩壊履歴などの多くのデータが必要であり、確率モデルを用いるには解析パラメータの確率密度関数が必要であるが、全国的にも特性が判明している岩盤崩壊の事例はまだ少ない。

なお、岩盤斜面では長時間の経過とともに岩盤クリープが進行し状況が変化することから、データを新しく入手し現況を反映したリアルタイムのリスク分析が逐次行われていくことが望まれよう。

② リスクアセスメントでは、安全性に関する目標や最低限確保すべき水準の設定手法、リスク基準に関する十分な客観性の確保が必要で、公衆のリスク受け入れる可能性を含め、これらの社会的合意も必要である。

③ 対策工の設計における従来の決定論的手法における安全率に対応するリスクマネジメントの指標は、確率・統計的に評価した災害発生確率値か損失期待値となる。

このうち、確率値に関してはアメリカの原子力委員会の例や土木学会の「構造物のライフタイムリスクの評価」などの研究例があるが、構造物の安全性を確保するための確率値がどの程度必要かを判断するのはきわめて困難であり、この的確な設定手法が必要である。

また、期待値で評価する場合は、構造物が破壊したときの被害額で評価することなどが考えられるが、減災を目指したリスクマネジメントでの構造物が破壊する可能性を含んで設計するいわゆる限界設計の考え方に、社会全般の共通認識が得られるようリスクコミュニケーションを深めなければならない。

④ リスクコミュニケーションを通じて、従来の安全率規範に代わるリスクマネジメント手法に関する社会的合意が得られることが必要である。

⑤ 最近、「道路のアセットマネジメント」など、公共の建設物の維持管理にアセットマネジメントの手法を取り入れる例が徐々に増えてきた。公共の建設物の場合は、国民の税金を原資としているため、安全性や利用者満足を確認しながら、いかに長期的な費用を低減するかがア

セットマネジメントの重要なポイントである。国土交通省でも、「道路のアセットマネジメント」を「道路管理において、橋梁、トンネル、舗装等を道路資産と捉え、その損傷・劣化等を将来にわたり把握することにより最も費用対効果の高い維持管理を行う概念」と定義し、それを実現するためのマネジメントシステムの構築を進めている。

わが国の社会資本の多くは 1960 年代から 1970 年代初頭にかけて急速に整備された。今後は、高度成長期に整備されたこれらの多数の構造物が一斉に老朽化の時期を迎え、補修・補強対策や予算措置など維持管理問題が表面化する。岩盤崩壊対策としては斜面の不安定化だけでなく、構造物のライフサイクルコストも考慮したリスクマネジメントの手法を取り入れてアセットマネジメントを行うような、公共の建設物管理の重要性はますます高まることが予想される。

参考文献

- 1) 大津宏康：斜面災害に対するリスクの評価方法研究の現状、日本地すべり学会関西支部シンポジウム「斜面災害リスクの定量的評価」, pp.1-21, 2003.
- 2) ISO/IEC Guide 51 : Safty aspect - Guidelines for their inclusion in standards (安全分野でのリスクの定義), 1999.
- 3) ISO/IEC Guide 73 : Risk management - Vocabulary - Guidance for use in standards (ビジネス分野も考慮したリスクの定義), 2002.
- 4) 土木学会：岩盤崩壊の考え方ー現状と将来展望ー[実務者の手引き] (CD-ROM 版), 第 6 章リスク評価と適用例, 2004.
- 5) 松尾 稔, 上野 誠：斜面崩落防止のための信頼性設計に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.276, pp.77-87, 1978.
- 6) Hock, E : Practical rock Engineering, 1998
- 7) 伊藤 洋, 北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法(その 1) 地盤物性のバラツキの実態とその表示法, 電力中央研究所報告, No.384025, 1985.
- 8) 伊藤 洋, 北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法(その 2) 地盤物性のバラツキが地盤の安定性に及ぼす影響, 電力中央研究所報告, No.384026, 1985.
- 9) 伊藤 洋：土質データのバラツキと設計, 3. 地盤データの二次処理 (統計的処理手法と実際), 土と基礎, Vol.35, No.4, pp.75-82, 1987.
- 10) (社)日本大ダム会議リスクアセスメント分科会：ダム分野におけるリスクアセスメントについて, 大ダム, No.188, pp.8-60, 2004.
- 11) 池田三郎：環境リスク管理への政策科学ーリスクの規制と選択について, 日本リスク研究学会誌, Vol.8, No.1, p.84, 1997.
- 12) (独)土木研究所材料地盤研究グループ土質チーム：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(案), 土木研究所資料, No.3926, 2004.
- 13) 恒岡伸幸, 小橋秀俊：合理的なリスクマネジメント技術の開発, 新道路技術五カ年計画(平成10-14年度)成果報告書, 国土省国土技術開発総合研究所, (独)土木研究所, pp.190-195, 2003.
- 14) 河田恵昭：巨大な自然災害と防災工学, リスク学辞典, 日本リスク研究学会, TBSブリタニカ, pp.129-131, 2000.
- 15) 小俣新重郎：リスクマネジメントの技術ー防災分野の予防・事前対策一, 土木施工, Vol.45, No.10, pp.16-22, 2004.