

道路橋の耐震設計における不確実性への対応 に関する分析的研究

河原井耕介・大住道生

1. はじめに

道路橋は、道路橋示方書¹⁾（以下「H29道示」という。）に基づき、多様な不確実性を考慮し、所要の信頼性で要求性能を満足するように設計される。部分係数設計法は、作用や抵抗特性等のばらつき等、定量的に評価できる不確実性を部分係数により考慮した照査手法である。また、構造物の状態に影響を与える可能性はあるが設計状況として考慮するには十分な知見や経験がない状況等も考えられ、H29道示ではこのようなものを「不測の事態²⁾」として設計で考慮することとされている。道路橋の設計における不測の事態への対応等は、橋梁毎に個別に対応方法が検討される。

不測の事態も不確実性の内の一部と考えれば、近年、津波や断層変位等の不確実性の高い事象による橋梁被害の経験や、気候変動を背景とした水災害の激甚化など、不確実性に適切に対応することの重要性は益々高まっている。そして設計における不確実性への対応を体系的に整理することは、これをより確実・効果的なものとする上で有用な視座を与えるものと考えられる。

そこで、本研究では、道路橋の設計における不確実性について概観したうえで、不確実性への対応方策の体系について考察する。不確実性は、リスクと密接に関連する概念であり、例えばISO 31000³⁾はリスクを「目的に対する不確かさ（uncertainty、不確実性）の影響」と定義し、その対応の枠組みが整理されている。不確実性への対応の考察にあたってはISO31000等におけるリスク対応の体系が参考になる。本研究では、道路橋の耐震設計における不確実性への対応について、リスク対応の枠組みとの比較を通して考察した。更に、事例研究として、活断層の影響等を考慮して計画・設計された新阿蘇大橋⁴⁾を対象に、断層変位の影響を考慮した耐震設計における、不確実性への対応の体系を例示した。

2. 道路橋の設計における不確実性

2.1 不確実性の捉え方

事象の不確実性、即ち事象が確定的でなく、その結果の推定に一定の難しさを有することに対し、それをどの様に捉えるかには様々な考え方があり⁵⁾。設計において不確実性を議論する場合、何を不確実性と捉え、どの様に評価するのかという点を明確にすることが重要と考えられる。

2.2 原因に着目した不確実性の分類

まず、何を不確実性と捉えるかという観点から、その原因に着目した不確実性の分類を整理する。構造物の設計の分野では、表-1に示すように、偶然的及び認識論的不確実性に区分して不確実性を捉えることが多い⁶⁾。

偶然的な不確実性は、事象が本来的に有する不確実性であり、一般的には低減できないものと捉えられている。一方、認識論的不確実性は、知見や情報の不足という制約に起因したもので、技術水準の向上に伴い低減可能な不確実性と捉えられている。認識論的不確実性を低減することは、構造物の設計における信頼性向上の一つの方策となる。

2.3 評価方法による不確実性の分類

次に、不確実性をどの様に評価するかという観点で評価方法による分類を整理する。経済学分野等では、計算可能な不確実性をリスクと呼び、計算不可能なものを真の不確実性として区別する提案がある⁷⁾。計算不可能な不確実性は、経験的または工学的な判断により評価される。このような考え方は、例えば原子力安全分野⁸⁾にも見られる。

2.4 道路橋の設計における不確実性とその対応

前節までに整理した様に、構造物の設計における不確実性には、原因に着目した偶然的／認識論的不確実性の区分と、その統計的確率評価の可能

表-1 原因に着目した不確実性の分類⁹⁾

分類	定義(文章はISO2394 ⁵⁾ を翻訳したJIS A 3305による)
偶然的 不確実性	典型的には荷重環境、構造物の幾何量及び材料特性と関連する固有の不確実性。
認識論的 不確実性	一般に測定又は理論の進歩によって低減され得る、知識の不足による不確実性。

性に着目した区分とが考えられる。これを整理した例を表-2に示す。

道路橋の設計においては、材料特性のばらつき等、確率的に評価される不確実性を部分係数により考慮して信頼性を確保している。一方、レベル2地震動の様に、極めて稀であるために確率を評価することが難しい事象については、工学的判断も加味して作用が設定されるなど、不確実性の種類に応じた評価がなされている。

以上のように、道路橋の設計においては、不確実性の種類に応じて、適切に評価を行っていると考えられる。次章より、道路橋の耐震設計に着目し、不確実性への対応の枠組みについて、ISO31000等におけるリスク対応の枠組みとの比較を通して考察する。

3. 道路橋のリスクマネジメント

3.1 リスクマネジメントプロセス

ISO31000によるリスクマネジメントプロセスは、図-1の第1列目に示す要素を含む。まず、リスクマネジメントの対象とする範囲やその対象の置かれた状況を整理し、リスク基準（意思決定の判断基準）を決定する。次に目的に影響し得るリスクを特定し（リスク特定）、そのリスクの性質や特徴を理解する（リスク分析）。リスク分析により明らかとなったリスクの程度をリスク基準

に照らし、必要な追加の行為を決定する（リスク評価）。追加の行為としては、更なる情報収集や、現状維持なども含まれるが、設計の観点で重要となるのはリスク対応の検討である。リスク対応の検討では、適用可能な選択肢を選定しその有効性を評価して採用する選択肢を決定する。さらに、決定したリスク対応の結果残るリスク（残留リスク²⁾）を評価し、残留リスクが許容できない場合は更なる対応を検討する。

リスクマネジメントにおいては、この一連の流れでリスク対応は完了せず、対応の結果についてモニタリング及びレビューを行い、マネジメントプロセスを繰り返すことで対象のリスクを適切に管理する。なお、モニタリングの観点では維持管理の側面が重要となるが本稿では設計の側面に着目し、維持管理については対象としない。

3.2 リスクマネジメントプロセスと道路橋の耐震設計の関係

道路橋の設計をする場合、上位計画である道路ネットワークの計画などを踏まえて、架橋位置を検討し（ルート計画）、橋梁形式等の検討（橋梁予備設計）の後、構造に応じた性能照査により構造諸元が決定される（橋梁詳細設計）。このような事業の各段階で、リスクマネジメントプロセスに準じた意思決定がなされるものと捉えられる。

道路橋の耐震設計を例にルート検討、橋梁予備

表-2 構造物の設計における不確実性の整理

確率評価可能性による区分	偶然的な不確実性	認識論的不確実性	不確実性の評価方法	
確率的に評価可能な不確実性	・事象が本来的に有する不確実性	・統計的誤差 ・統計データの不完全性(十分な統計データが得られない等) ・モデル化誤差 ・対象に対する知見の不足 等	実験・観測等による確率	統計的確率
稀であるために統計的確率を考慮することが困難な不確実性		・技術的知見や情報の不足等により、事象を一定の精度で推定することができないことによる不確実性	シミュレーションによる確率	
			工学的判断	

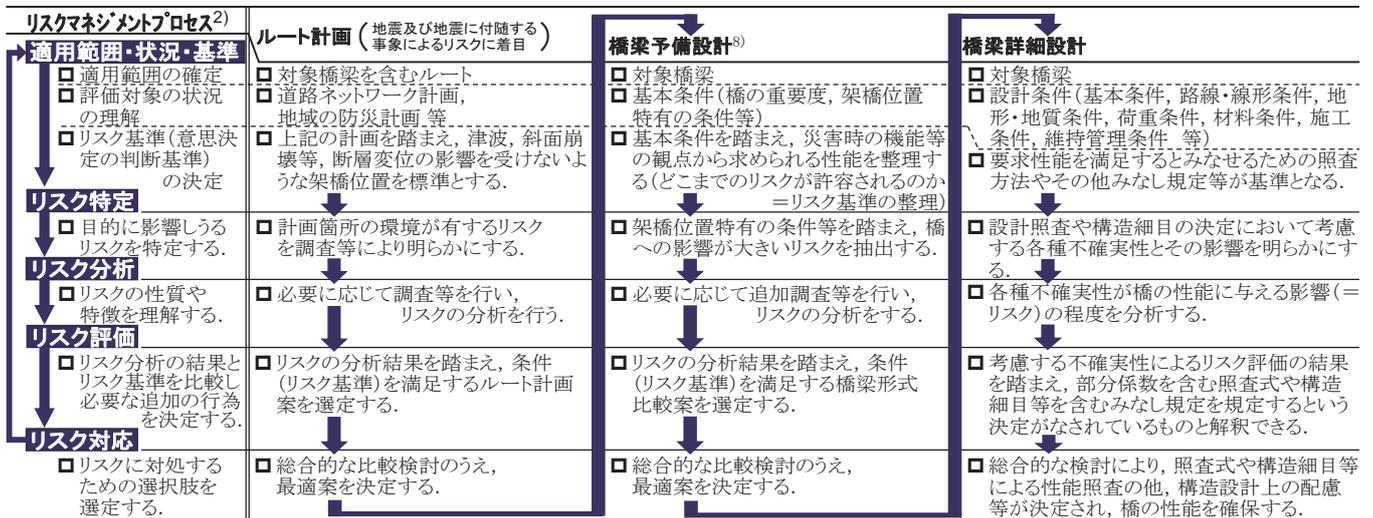


図-1 リスクマネジメントプロセスと道路橋の耐震設計の比較

設計、橋梁詳細設計の各フェーズでの検討とリスクマネジメントプロセスとの対比を図-1に示す。

リスク対応によりリスクを低減した場合でも、残留リスクがゼロになることはない。図-1に示すように、各フェーズでのリスク対応の結果残る残留リスク情報を次のフェーズに引継ぎ、継続的にリスクに対応していくことで、要求性能を満足させるという目的が達成されている。

4. 道路橋設計におけるリスク対応の選択肢

4.1 リスク対応の選択肢の分類

設計においてリスク対応を体系的に考えるためにはリスク対応の選択肢とそれらの選定方法を整理する必要がある。ISO31000及び構造物を含むシステムに関する国際規格であるISO13824⁹⁾に示されるリスク対応の選択肢を表-3に示す。

これらを参考にすると、道路橋の設計におけるリスク対応の選択肢は、大きく1)リスクの回避、2)リスクの低減、3)リスクの保有の3つに分類できる。リスクの共有は、社会全体のリスクを緩和するものではなく設計基準では対象としていない。リスクは、リスク源、リスク源から生起し得る事

表-3 リスク対応の選択肢

ISO13824	ISO31000	備考(構造物の設計との対比)
1)リスクの回避	1)リスクの回避	設置位置を変更するなどリスクそのものを回避する。
—	リスクの取得・増加	投機等の観点であり構造物の設計には該当しない。
2)リスクの低減	2)-1 リスク源の除去	ISO31000では、リスクの低減に関連してさらに細分化された選択肢が示されている。設計においてリスク対応の選択肢を具体化する上では細分化した視点がより参考になる。
	2)-2 起こりやすさの変更	
	2)-3 結果の変更	
リスクの共有	リスクの共有	保険などによるリスクの共有では社会全体のリスクの緩和にはならない。
3)リスクの保有	3)リスクの保有	リスク対応により許容可能な水準まで緩和されたリスクは保有される。

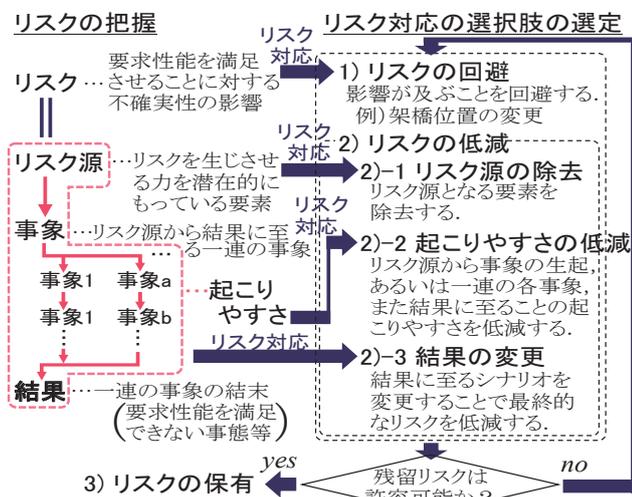


図-2 道路橋の設計におけるリスク対応の選択肢の選定フロー (リスク対応の枠組)

象及びそれらの結果と、リスク源から結果に至る一連のリスクシナリオの起こりやすさで説明できる²⁾。リスク対応の選択肢の「2) リスクの低減」は、リスク源・事象・結果・起こりやすさのどの要素に着目してリスクを低減するかという観点で、2)-1 リスク源の除去、2)-2 起こりやすさの低減、2)-3 結果の変更の3つに細分化できる。このように細分化した分類は、構造物に対するリスク対応の具体的な方法を考える際の着眼点となる。

4.2 道路橋の設計における選定プロセス

以上のリスク対応の選択肢は、リスクシナリオに対応させて、図-2に示すような流れで検討されるものとして整理できる。図-2には、前述のリスク対応の選択肢の番号も示した。

まずリスクそのものを回避出来る可能性を考え、次にリスク源→事象→結果というリスクシナリオに照らして、リスク源の除去が可能か、起こりやすさを低減できるか、結果に至るシナリオを変更できるか、という観点で対応を検討する。以上の対応の結果残る残留リスクに対し、これが許容可能であれば残留リスクを保有する最後の対応が採られ、許容できなければ追加のリスク対応を検討する。リスク対応では、このような繰返しのプロセスにより、保有できると判断できる程度まで残留リスクを低減する。

リスク対応は、前節に示したように分類されるリスク対応の選択肢を、リスクシナリオに照らして検討し適用する図-2のリスク対応の枠組みの形で体系的に捉えることができる。

5. リスク対応の枠組みの適用例

5.1 新阿蘇大橋の耐震設計の概要

リスク対応の枠組み(図-2)の適用例として、2016年熊本地震で被災した阿蘇大橋の復旧橋として建設された新阿蘇大橋を対象に、断層変位に関する不確実性への対応を整理する。

新阿蘇大橋では、被災した阿蘇大橋に近接して活断層の存在が指摘されており、これに対して架橋位置の計画を含むルート計画の段階から橋梁形式の検討や構造設計までの各段階で断層変位に関連する不確実性への対応が行われている³⁾。

5.2 新阿蘇大橋の耐震設計における断層変位に関するリスク対応の体系

新阿蘇大橋では、被災した橋梁の復旧であるこ

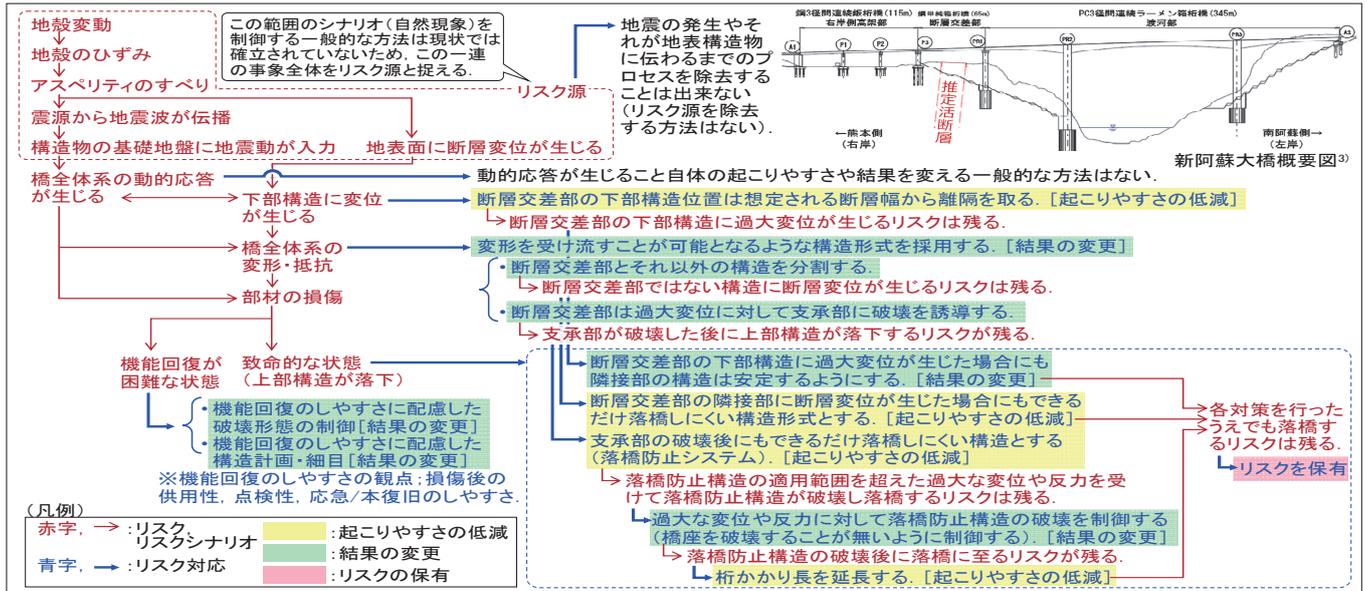


図-3 新阿蘇大橋における断層変位に関連するリスクシナリオとリスク対応の体系的整理の例

と等の制約条件を踏まえた総合的な検討の結果、架橋位置を断層から離すリスク回避の選択ではなく、断層と交差する架橋位置を踏まえてリスクを低減する対策が採られた。耐震設計において採用された各種対策を、図-2に示したリスク対応の枠組みに照らして整理すると図-3の様になる。

図-3より、リスクシナリオの各事象に対応して、その起こりやすさを低減する又は結果を変える観点で取り得る対策が抽出されることが分かる。さらに、各事象に対して第一段階目のリスク対応が適用されたのち、残るリスクに対する追加対応が階層的に適用され、最終的な残留リスクは保有される体系として整理できる。

6. まとめ

本稿では、道路橋の耐震設計における不確実性への対応について、リスク対応の枠組みとの比較を通して考察した。不確実性への対応は、リスク源→事象→結果というリスクシナリオに照らして体系的に検討できること、またこの対応は1段階で完結するのではなく、残留リスクを考慮して不確実性の影響を許容可能な程度にまで低減するよう、対応を重ねることが重要であることを示した。

道路橋の性能確保の観点では、このように階層的に不確実性に対応すると共に、ライフサイクルを通じてリスク情報を引継ぎ、各段階で適切にリスク対応を採ることが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編、同V耐震設計編、2017
- 2) ISO: ISO31000:2018(E) Risk management - Guidelines, 2018
- 3) 星隈順一、今村隆浩、宮原史、西田秀明：新阿蘇大橋の性能に及ぼす地盤変状の影響を小さくするための構造的な配慮と工夫、土木学会論文集A1、第77巻、第2号、pp.339~355、2021
- 4) 河原井耕介、大住道生：道路橋の設計におけるリスク・不確実性に関する考察、第26回耐震設計シンポジウム講演論文集、2023（掲載決定）
- 5) ISO: ISO2394:2015(E) General principles on reliability for structures, 2015
- 6) IAEA: IAEA nuclear safety and security glossary, 2022
- 7) フランク・H・ナイト（桂木隆夫、佐藤方宣、太子堂正称共訳）：リスク、不確実性、利潤、筑摩書房、p.309、2021
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の設計における諸課題に関わる調査（2018-2019）、国総研資料第1162号、2021
- 9) ISO: ISO13824:2020(E) Bases for design of structures - General principles on risk assessment of systems involving structures, 2020

河原井耕介



研究当時 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員、現 大日本ダイコンサルタント(株) KAWARAI Kosuke

大住道生



土木研究所 構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士(工学) Dr. OHSUMI Michio