第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

道路橋の設計におけるリスク・不確実性に関する考察

河原井　耕介[1]・大住　道生[2]

[1]正会員　修(工)　国立研究開発法人土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　交流研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
[2]正会員　博(工)　国立研究開発法人土木研究所　構造物メンテナンス研究センター　上席研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

1. はじめに

現在の道路橋の設計では，過去の被災経験の蓄積と，これを踏まえた多くの研究成果を反映し，多様な不確実性を考慮して安全が確保されている．近年では，地震被害の他，気候変動を背景とした水災害の激甚化等による橋梁の被害も毎年のように発生し，国土交通省において「道路リスクアセスメント要領（案）[1)]」が策定されるなど，高まるリスクへの対応が求められている．さらに，急速に進行する社会基盤の老朽化など道路橋を始めとする社会資本を取り巻く状況の変化は著しく，不確実性に適切に対処することの重要性は益々高まっている．

現在の道路橋の設計では，耐荷性能の照査法として信頼性理論を基礎とする部分係数設計法が採用され，作用や応答，抵抗などの不確実性に対して部分係数を用いることで所要の信頼性を確保する方策がとられている[2)]．また，耐荷性能を確保することに加え，「不測の事態に対して橋が致命的な状態に陥ることを抑止する一定の対策（フェールセーフ）を施す[2)]」ことや，「設計では具体的には考慮されない不測の外力[2)]」を受ける可能性も考慮して橋が致命的な状態になることをなるべく回避できるような構造設計上の配慮が検討されている．

このような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ているが，具体的な対応方法やその検討方法は体系的には整理されていない．また，道路橋示方書[2)]（以下「H29道示」と呼ぶ）においては「リスク」や「不確実性」の明確な定義はなされておらず，また設計上考慮すべきリスクや不確実性の種類，またそのとらえ方については設計者の判断によるところも大きい．道路橋の設計におけるリスクまた不確実性の概念を明示的，体系的に整理することは，性能規定型設計基準としての説明性の向上や，危機耐性[3)]など観点なども含めて社会基盤として求められる機能をより確実に発揮できる設計の実現につながると期待される．

リスクや不確実性は，日常的に用いられる用語であるとともに，学術的にも工学分野に限らず学際的に広く用いられる概念であり，それゆえに定義や捉え方は多岐に渡る．工学分野に限っても，その定義や評価指標（あるいは評価方法），その解釈や対処方策等について，一般的また共通的な知見は必ずしも確立されていない状況にあると考えられる．

そこで，本研究では，道路橋の設計におけるリスク及び不確実性の体系的な整理に向けた基礎として，リスク及び不確実性の意味について，文献調査を通じて全体像を概観すると共に，道路橋の設計の観点から具体的な定義や評価方法，およびその対処方法等について考察を行った．

2. リスク・不確実性の全体像

(1) リスクと不確実性

「リスク」の定義の例として，ISO 31000:2018 [4)]では「目的に対する不確かさの影響」とされている．この定義からも分かる様に，リスクと不確実性は密接に関係した概念であり，リスク・不確実性を議論するにあたっては，その意味を明確にして議論することが重要となる．例えば緒方[5)]は，学際的アプローチとしてのリスク解析の確立に向けた考察において，「リスク」が本来的に有する「不確実性」をどの様に捉えるかが極めて重要と指摘している．竹内[6)]は，社会技術的な課題としての安全問題の解決方策を議論するに当り，「リスク」の概念に不可分な「不確実性」の解釈について，歴史的経緯を踏まえ

ながら考察を行っている．本稿でも，リスク及び不確実性を関連する概念と捉え，歴史的経緯を踏まえつつ分野毎の定義や解釈，評価方法について概観し，道路橋設計との関係も見据えて考察を行う．

(2) リスク・不確実性の認識についての歴史的変遷

人が不確実性をどの様に捉えてきたかについて，Stewart[7]は，**表-1**に示したように整理している．科学の発展を見るまでの時代では，自然現象を始めとする事象は予測が難しく，人知を超えた存在によるものと捉えられ，人は不確実性を占いや神の意志によるもの等として解釈していた．近世以降，科学の発展に伴い，Newtonによる古典物理学に代表されるように，自然界の法則は決定論的であり不確実性はその法則についての人間の無知に起因するものと捉えられるようになった．さらに，確率論やこれを基礎とする統計学の発展に伴い，このような不確実性に対して，確率により評価し対処することが考えられた．ここまでは，世界は基本的に確定的であるとの前提に立ち，不確実性とは，人が有する知識や情報の不足により生じるものと捉えられていた．これは，後述する「認識論的不確実性」としての不確実性と言える．

20世紀に入ると量子力学が確立され，素粒子レベルを対象とすると現象は本質的に確率的にしか表現できないということが明らかにされ，自然は本来的に不確実性を有するものと理解された．さらに，カオス理論の確立に伴い，決定論的なシステムにおいても本質的に予測困難となり得ることが明らかとされた．これらの様に，自然には本来的に有する不確実性も存在するとの考えが，後述の「偶然的不確実性」に相当すると考えられる．

以上では，科学・技術的な発展に沿って，人が不確実性をどの様に捉えてきたかを概観した．不確実性やリスクは，対象とするモノに応じて具体的な評価方法や対処方法が検討されてきた．辛島[8]は，個別の分野毎のリスクの捉え方を時系列も踏まえて整理している（**表-1**）．リスクの概念は，歴史的に保険と深く関連し，13世紀の海洋貿易における海事保険にその起源を遡ることができる．この当時は，海難事故に遭う可能性が現代と比較してかなり高い一方で，海上貿易は多大な利益を生じ得る経済行為であった．即ち，当時の海洋貿易は大きな利益を求めてリスクを冒す行為であり，このリスクに対応するために保険が整備されたと解釈できる．経済学の分野においては，19世紀の後半から，経済学の理論形成に応じて，リスクや不確実性の概念が整理された．20世紀に入ると，原子力安全の問題や，公害などの環境・保健分野における安全問題に代表されるように，科学技術におけるリスクへの対応が重要な課題となってきた．同時に，社会におけるリスクへの対応が議論されてきている．分野毎の具体的なリスク・不確実性の議論について次項以降に整理する．

(3) 確率と不確実性（不確実性の数学的側面）

前項で見たように，リスク・不確実性を考える上で，確率は重要な概念と言える．「確率」という概念も，リスクと同様，日常生活から専門領域に至るまで広く使用されるものであり，その意味には幅がある．確率とは，ある事象がどのくらい確かなのか，あるいは不確かなのかを定量化したものである[7]．換言すると，ある事象の蓋然性（確からしさ，probability）の程度を定量化したものとも言える[9]．この様な確率は，17世紀にパスカルとフェルマーにより数学的な考察が始められて以降，対象とする不確実性（あるいは確からしさ）の多様性から，その意味について様々な解釈が提案されてきた[10]．

「確率」が表す内容について，竹内[10]による解説を参考に，**表-2**に整理する．未来の事象を考える場合の確率とは，当然，その事象の生起の可能性を表す．これは，暗に，事象の生起は確定的でないことを前提とした解釈である．確率を評価するにあたって，事象の生起に関する完全な情報が得られる場合は，評価された確率が表すものはこの意味に限定さ

表-1 リスク・不確実性の捉え方の歴史的変遷

Stewart (2019)[7]による整理		辛島 (2000)[8]による整理	
背景	**不確実性の捉え方**	**分野(時代)**	**リスク・不確実性の捉え方**
未来は予測不能	不確実性を占いや神の意志として捉える（信念により不確実性を捉える）	保険（13世紀～）	リスク＝(海難)事故の可能性 損害発生の可能性
科学の発展	自然は確定的であるとの認識．不確実性は人間の無知に起因する．	経済学（19世紀～）	例えばKnight(1921)[10] 測定可能な不確実性＝リスク 測定できない不確実性＝(真の)不確実性
確率論・統計学の発展	人間の知的・技術的な限界による不確実性を確率的に評価し，これに対処しようとした．	科学技術（20世紀～）	原子力安全分野：被害想定としてのリスク 確率論的リスク評価(PRA) 環境・保健分野：PRAを活用したリスク分析
量子力学の確立	自然は真に不確実性を含むものであるとの認識．	社会系領域（20世紀～）	社会問題としてのリスクの顕在化 専門家と社会のリスク認識の齟齬 不確実性下の意思決定
カオス理論の確立	決定論的なシステムにおいても本質的に予測困難となり得る．		

れる．しかし，現実的には，事象を人間が観測するに当り完全な情報が得られることは無く，事象の生起についての情報が不確かであることも，確率が表す内容に含まれる．確率が持つこの二つの側面は，後述の不確実性の分類（偶然的／認識論的不確実性）と相似な関係にあると見ることもできる．

一方で，過去の事象について確率を考える場合，事象の生起は既に確定しているため，事象の生起事態には不確かさは存在しない．その生起について情報が不十分であることに起因する不確かさが，確率が表す内容と言える．

以上の整理は，事象の生起は客観的に評価し得る（そのように評価すべき）との立場を前提とした整理である．確率の捉え方には他にも**表-3**に示すようなものがある[10]．次項以降に示す各分野における確率（あるいはリスク・不確実性）の捉え方は，**表-3**を背景に理解することができる．

確率の計算方法による分類を**表-4**に示す．後に見るように，工学分野においては，対象に応じて統計的確率やベイズ確率が用いられている．

(4) 分野毎のリスク・不確実性の捉え方

a) 経済学におけるリスク・不確実性

経済学においては，Knight[11]によるリスクと不確実性を峻別した整理が参照されることも多いようである[8), 12)]．Knightは不確実性を**表-5**の様に分類している．組合せ確率や統計的確率として計算可能なものをリスクと呼び，従来，保険等により対処されてきた不確実性はこのような不確実性であるとした．その上で，確率的に捉えられるように思われているものの，統計的確率が本質的に計算できない事象があり，これらにいかに対処するかが重要な問題となることからこれを真の不確実性（あるいは単に「不確実性」）と呼び，峻別することを提案している．

表-3の分類を参照すると，Knightは，客観説的に捉えられる不確実性をリスク，主観説あるいは論理説的に捉えられるものを（真の）不確実性と呼んでいると解釈することもできる．

また，Knightによる不確実性への対処は，人間の判断によるものであるとされており，これは，後述の工学分野（特に原子力安全分野）における工学的判断の考え方に通ずるものと考えることができる．

b) リスク解析におけるリスク・不確実性

学際的アプローチとしてのリスク解析における不確実性を考察した緒方[5)]は，不確実性の原因について**図-1**の様に整理している．

不確実性の大きな分類としては，i) 対象となるシステムに本来的に存在している差異や変動に起因する不確実性，ii) 対象となるシステムに関する知識または情報の不足に起因する不確実性の 2 つに分類できると総括している．さらに，それぞれの不確実性について，その原因により細分化している．この 2 つの分類は，後述の工学分野における不確実性の分類と整合的である．

表-2　「確率」が表す内容（文献 10)を参考に整理）

未来の事象に関する確率・不確実性
事象の生起が確定的ではない場合
事象が生起する可能性
事象の生起について情報が不確かであること
事象の生起が確定的な場合（確定的とみなす場合）
（事象が生起するか否かは確定事象）
事象に関する情報・知見が不十分であることによる不確かさ
過去の事象に関する確率・不確実性
事象の生起が確定的ではない場合
（事象の生起は確定している）
事象の生起の結果についての情報が不十分であることによる不確かさ
事象の生起が確定的な場合（確定的とみなす場合）
（事象の生起は確定している）
事象の生起の結果についての情報が不十分であることによる不確かさ

表-3　「確率」の捉え方 [10)]

確率の捉え方※	概要
客観説（客観主義）	「確率」は事象そのものの性質であるとし，その「不確実性」の程度を表す．
主観説（個人主義）	「確率」は，事象についての人間の主観的判断，主観的評価を表す．個人確率あるいは主観確率等と呼ぶ．
論理説（必然論）	「確率」は人間の判断を表すが，それは個人の主観・心理ではなく，一定のルールに従って論理的に導かれる．

※( ) 内はレオナルド・サヴェージ「統計学の基礎」(1954) における呼称．文献10)による．

表-4　「確率」の計算方法

確率の種類	概要	提案者
組合せ確率	事象の対称性（同じ程度に確からしい）を前提として，事象の起こりやすさを，起こり得る組合せに対する比率として算出するもの．	*パスカル* *フェルマー*
統計的確率	同種の事象を繰り返し観測するあるいは，繰返し試行することにより，経験的に確率が算出できるとする．	*ベルヌーイ* フィッシャー ネイマン
ベイズ確率	ベイズの定理に基づき，事象に関して得られる情報を基に，仮定した事前確率を更新し，事後確率として確率を推定するもの．	*ベイズ* *ラプラス* サヴェージ

注：提案者欄の*斜体*は，基礎概念の提案者．

表-5　経済学における不確実性の分類 [11)]

不確実性の分類	内容
リスク	計算可能な不確実性 アプリオリな確率（組合せ確率）や統計的確率として計算可能な不確実性であり，保険等により対処できる．
（真の）不確実性	計算不可能な不確実性 確率を量的に決定するための同質な集合を形成できないような事象では，客観的に測定可能な確率や偶然性という考え方を適用できない．このような不確実性に対しては，人間の判断により対処している．

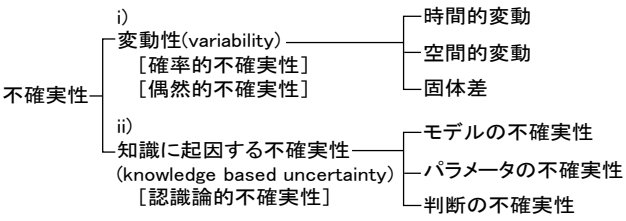


図-1　不確実性の要因による分類（文献 5) に加筆）

c）信頼性工学におけるリスク・不確実性

関根[13]は，信頼性工学の立場からリスク及び不確実性について概観している．Aven[14]に基づいて不確実性を，偶然的不確実性（aleatory uncertainty）と認識論的不確実性（epistemic uncertainty）に区分できるとしたうえで，不確実性のうち「蓋然性の測度」が与えられたものをリスクと呼ぶとしている．

一方で，蓋然性の定量的な測度が与えられない不確実性も多く存在し，これに起因するものも「広義のリスクと理解しても良いが，少なくても，科学技術の分野ではそれを対象としない[13]」としている．

d）構造工学におけるリスク・不確実性

構造工学における不確実性の捉え方については，Ang and Leon[15]やAng and Tang[16]が参照されることが多い．Angらも，不確実性を，その原因から偶然的／認識論的不確実性に分類している．

偶然的不確実性は，偶然性（randomness）又は本来的に存在するばらつき（inherent variability）による不確実性と定義される．Angらはさらに，「厳密にいえば，偶然性は自然のありさま（state of nature）であり，そこに不確実性は含まれない」が，一方で確定的でない事象のため，確率（probability）として記述されるものであるとしている[15]．

認識論的不確実性は，現実に対する不十分あるいは不完全な知識・情報しか得られないために，現実を正確には予測又は推定できない事による不確実性と定義される．また，不確実性を確率的に評価する場合，不確実性の評価指標としての統計量の推定誤差も認識論的不確実性に含まれると考えられる[15]．

なお，構造物の信頼性に関する設計の一般原則を規定した国際規格であるISO 2394:2015[17]においても，不確実性について同様の偶然的／認識論的不確実性の定義が採用されている（**表-6**）．

また，Bulleit[19]は，Ayyub and McCuen[20]に基づいて，構造工学における不確実性を偶然的／認識論的不確実性に区分したうえで，不確実性に関連する多様な観点を各論的に考察している．その中で，不確実性の原因について，次の 5 つの分類を提案している．1) 時間：未来の予測や過去の推定には不確実性が伴う．2) 統計学的制約：統計的に処理する限りにおいて，統計誤差は不可避である．3) モデル化の制約：構造解析や設計に用いるモデルは一定の単純化を行ったものである．4) 偶然性（randomness）：構造の材料特性や部材特性は固定値ではなく変動性を有する．5) 人的過誤（human error）：設計や施工における人的過誤が生じる可能性も存在する．

Bulleit は，上記 5 つの原因による不確実性は，それぞれ偶然的／認識論的の両方の側面を有するとしている．例えば，1) 時間を要因とする不確実性には，材料や部材の状態の経時変化の本来的なばらつき（偶然的不確実性）と，経時変化を予測する解析手法や予測のための情報の不足等による推定誤差（認識論的不確実性）の両面が考えられる．

表-6　ISO2394:2015[17]による不確実性の定義

分類	定義 （文章はISO2394[17]を翻訳したJIS A 3305[18]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定性．
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定性． 注記 偶然的不確定性と認識論的不確定性との厳密な境界は必ずしも明確ではない．

不確実性を評価する方法について，構造工学の分野では確率的な評価をしようとすることが多い．例えば，前述のISO 2394:2015[17]においては，不確実性は確率変数や確率過程等の確率モデルにより表現するものとされており，確率的評価にあたってはベイズの確率理論が基礎となるとされている．Ang and Leon[15]は，対象構造物の真の状態（state of nature）を，認識論的不確実性及び偶然的不確実性を考慮した確率変数として表現することを提案している．国内においても，例えば橋梁の振動特性の推定に含まれる不確実性を，ベイズ推定を利用して評価する試み等が行われている[21), 22)]．

e）原子力安全分野におけるリスク・不確実性

原子力安全分野においても，偶然的／認識論的不確実性の区分が一般的となっている[23), 24)]．

原子力分野は，科学技術の分野の中で最初にリスクと向き合うようになった分野である[8)]．原子力発電はその最初期から安全性が最も重要な課題であった．安全性を評価するに当たってのリスク評価をどの様に行うかが問題の焦点となり，確率論的リスク評価（PRA）が開発された経緯がある[8)]．同時に，PRAによってもその定量的な評価値は不確実性を有するため，PRAの結果をどの様にあるかうのか，またその不確実性をどの様に扱うのかが課題となってきた．糸井ら[25)]は，PRAの利用にあたっては，その不完全さと不確実さの程度を見極め，その限界を把握して適用範囲を慎重に考慮することの必要性を強調している．

この様な背景のもと，原子力安全分野では，不確実性を確率的に捉えるだけでなく，工学的あるいは専門的判断（professional judgement）として評価・把握することとされている[26)]．

3. 不確実性の分類

前章ではリスク・不確実性について分野毎の捉え

方を概観した．これらを踏まえ，構造物設計の立場から，リスクの要因となる不確実性に焦点を当て，その分類について考察する．構造物の設計に関連する不確実性を整理した例を**表-7** に示す．

(1) 計算可能性による不確実性の分類

経済学において Knight[11] がリスクと不確実性を区分し，計算不可能な不確実性に対しては人間の判断により対処するとした思想は，原子力安全分野に置いて，PRA の不確実性を踏まえて，不確実性を定量的に評価するだけでなく，工学的判断として評価する考えに一定の類似性があると考えられる．信頼性工学や構造工学の分野では，不確実性やリスクを確率的に評価することが基本的な思想となっているが，確率的な評価の限界を踏まえて，工学的判断として捉えられる不確実性も，構造物の設計をする上で無視できないと考えられる．これまでの道路橋の設計においても，必ずしも確率的に評価された訳ではないレベル 2（L2）地震動[27] に対して設計をするという行為は，工学的判断により巨大地震の不確実性を考慮したものと考えることもできる．

一方で，（工学的）判断により捉えられる不確実性にも，本質的に確率的事象ではない事象と，本来は確率事象であるものの極めてまれな事象であるために確率を考えることが難しい事象の 2 つがあると考えることができる．Knight による不確実性は，ビジネスにおける意思決定を念頭に，意思決定をする状況は個々に unique なものであるために，同種の事象による集合を形成して統計的に確率を評価することは本質的に不可能であり，またそのような事象に確率を考えることは意味がないとの考えに基づく．即ち，Knight は，意思決定における不確実性には，本質的に確率事象ではない事象が含まれるとみていると解釈できる．

構造物の設計における工学的判断として捉えられる不確実性は，L2 地震動等の様に本来的には確率的に生じると考えられるが，稀な事象であるために確率を考えることが難しい事象で，かつ生じた場合に構造物の安全性の面で影響が甚大な事象を対象としていると考えることができる．

(2) 原因による不確実性の分類

偶然的／認識論的の不確実性の区分は，事象に本来的存在する偶然性，人間の認識の限界による不確実性といった，不確実性の原因による分類である．一方で，不確実性の原因の考え方は，偶然的／認識論的の区分が唯一的なものではなく，例えば，Bulleit[19]が提案した 5 つの原因による分類も考えられる．その他，Rowe[28] も，時間（temporal），構造（structural），測定（metrical），解釈（translational）に起因する不確実性を提案している等，不確実性の原因をどの様な観点で抽出・整理するかは多様な考え方があると思われる．また，緒方 [5]が整理したように（**図-1**），偶然的／認識論的不確実性を更に細分化して整理することも考えられる．

構造物の設計において，不確実性の体系的な整理を考える場合，不確実性をどの様に分類し得るかは有用な視点となると考えられ，今後の重要な課題の一つとなる．現時点では，ISO 2394:2015[17] や IAEA[24] において規定されている偶然的／認識論的不確実性の分類が，一つの規範的な分類と言える．

4. 道路橋の設計と不確実性

(1) 設計行為と不確実性

Bulleit[19] は，Simon[30] による人工物に関する考察

表-7 構造物の設計における不確実性とその評価方法

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">事象の分類</th><th colspan="2">含まれる不確実性</th><th colspan="2" rowspan="2">不確実性の評価方法</th></tr>
<tr><th>偶然的不確実性</th><th>認識論的不確実性</th></tr>
<tr><td rowspan="4">確率的事象</td><td>確率的対称性を有する事象</td><td>・試行の偶然性</td><td>・対称性の仮定の誤差</td><td colspan="2">組合せ確率</td></tr>
<tr><td rowspan="2">確率的対称性の存在しない事象</td><td rowspan="3">・事象が本来的に有する不確実性</td><td>・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）</td><td>実験・観測等による確率</td><td rowspan="2">統計的確率
ベイズ確率</td></tr>
<tr><td>・モデル化誤差
・対象に対する知見の不足
・シミュレーションの条件に含まれる誤差</td><td>シミュレーションによる確率</td></tr>
<tr><td>極めて稀であるために確率を評価することが困難（不可能）な事象</td><td>・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</td><td colspan="2">工学的判断，ベイズ確率</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">（参考）
繰返し生じ得ないユニークな事象（Knight[11]）
※構造物の設計上はこのような事象は想定していないと考えらえる．</td><td colspan="2" rowspan="2">・ユニークな事象であり，確率的に捉えることができないため，判断としてトータルの不確実性を考えている．偶然的／認識論的不確実性を分離できない．</td><td colspan="2">判断</td></tr>
<tr><td>・主観確率を算出する上でのデータの不完全性（十分なデータは得られない）
・主観確率の不確実性（主観確率で考えることの不確かさ．）</td><td colspan="2">判断の背景にある人間の信念の確からしさを評価（主観確率，ベイズ確率）</td></tr>
</table>

を参照しつつ，科学と比較した場合の工学の特徴として，既に存在するものを分析するのが科学である一方，工学はまだ存在しないものを解析するものであることに特徴があると指摘している．設計時に考慮するモデルは現実のモノではないため，そこに不確実性が存在することは不可避である．Ayyub and McCuen[20]も，工学システムにおいて，現実のシステム（real system）とモデル化した仮想のシステムを区別して不確実性を考えている．

これらに照らして構造物の設計における不確実性を考えると，実際に作られる構造物が有する不確実性と，設計する構造物をモデル化することを始めとする設計行為に起因する不確実性というように，2つのフェーズで不確実性を考えることができる．前者が偶然的不確実性であり，後者が認識論的不確実性と考えることもでき，設計行為と不確実性の関係は**図-2** の様に理解する事ができる．なお，**図-2** は，次項に示す道路橋設計を念頭に整理したものである．

(2) 道路橋の設計における不確実性

前項までの考察を踏まえて，現在の道路橋の設計で考慮されている不確実性について考察する．**図-2** に示すように，道路橋の設計においては，設計供用期間中に橋が置かれ得る状況に対して，橋の応答（状態）を評価し，その応答と橋の抵抗（限界状態）を比較して，応答の状態が限界状態を超えないことを照査する[2]．

道路橋設計における偶然的不確実性は，実際に作られる構造物が有する不確実性，及び作られた構造物が実際に置かれるであろう状況の不確実性と理解できる．また，認識論的不確実性は，この両者をモデル化して設計上考慮する過程で生じる不確実性であり，作用のモデルや，応答評価モデル，抵抗評価モデルが有する不確実性，またこれらを用いた解析手法による不確実性など設計プロセスに沿って多様な不確実性が想定される．なお，地盤に関連する不確実性は，作用や応答，抵抗のそれぞれに影響し，その影響はより複雑になるが，**図-2** では地盤の影響は省略している．

(3) 設計状況（作用）に関する不確実性の例

本項では，道路橋の設計における不確実性の例として，設計状況（作用）に含まれる不確実性の一部を抽出し，整理する．H29 道示 I 共通偏及び V 耐震設計編の記述から，設計状況（作用）の不確実性に関連する記載内容の例を抽出したものを**表-8** に示す．ここでは，設計状況の具体的な設定の根拠となった文献 31)の記述も参考に整理した．

H29 道示では，個々の作用の不確実性（ばらつき）と作用の組合せの不確実性を考慮して，設計供用期間中に生じ得ると想定する最も不利な状況を設計で考慮するものとしている．その上で，複数の作用の同時載荷の極値分布と，既往の損傷・被災事例等を参考にして工学的判断に基づき，部分係数が設定されている．同時載荷の極値分布のシミュレーションにあたっては，**表-8** に示した様なばらつき要因が考慮されている（**表-8** に示したものは一例であり全てではない）．ここで考慮している不確実性には，作用自体の偶然的な不確実性と，その評価を行う上での認識論的不確実性の両面が含まれる．

また，偶発作用に関しては，その発生自体が極めて稀であることから，確率統計的に不確実性を考慮することはせず，工学的判断を踏まえて設計作用として設定されている．これは，**表-7** に示したように，本来的には確率的な事象であると考えられるものの，極めて稀な事象であるため発生確率を考えることが困難な事象の不確実性を，工学的判断により評価しているものと考えることができる．

さらに H29 道示では，設計で具体的に想定できない程度に不確実性の大きい事象についても，橋に与える影響が特に大きいものについては，不測の事態として設計において配慮することとされている．これも，不確実性を工学的判断として評価することとしている例と考えられる．

(4) 不確実性の種類とその対処方策に関する考察

不確実性は，その種類に応じて設計における対処の方策も異なると考えられる．前項で述べた H29 道示における設計作用の確率統計的な不確実性に対しては，部分係数により対処が行われている．一方，工学的判断としての不測の事態に対しては，架橋位置や橋梁形式の選定において不確実性の影響を避けることが基本とされている[27]．また，偶発作用に対しては，例えば L2 地震動を工学的判断として設定し，これに対して耐荷性能の照査を行った上で，耐荷性能の確保とは別にフェールセーフとしての落橋

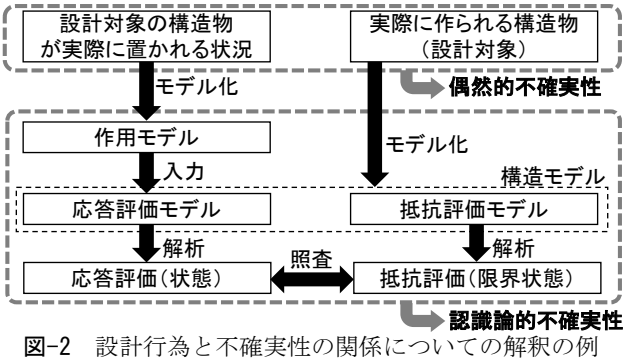


図-2 設計行為と不確実性の関係についての解釈の例

防止システムが設けられる．

設計状況（作用）の不確実性に応じて設計上の対処方策を整理した例を**表-9** に示す．不確実性を体系的に整理し，その特性に応じた設計の対処方法の考え方を整理できれば，より確実・効果的な不確実性への対処の実現に資する知見となると考えられる．

6. まとめ

本研究でで得られた知見を以下に示す．

1) リスク及び不確実性は密接に関連する概念であり，事象の起こりやすさの捉え方から分類整理できる．
2) 不確実性は，確率的に定量化できるものの他，稀であるために確率を考えることが難しい事象の不確実性も考えられる．この様なものは，（工学的）判断として評価されるものと考えることができる．なお，定量的に評価できるものをリスクと呼び，定量的に評価できないものを不確実性と呼ぶ考え方も存在する．
3) 確率の解釈として，事象の生起の可能性と，事象の生起に関する情報の不足等による不確実性が考えられる．これと相似的に，構造工学における不確実性は，偶然的不確実性及び認識論的不確実性の 2 つに分類できる．
4) 設計における不確実性は，設計対象が本来的に有する偶然的不確実性と，設計プロセスにおける認識論的不確実性に区分して理解する事ができる．
5) 確率評価可能な不確実性に対しては部分係数法により対処をし，確率評価が困難な不確実性には，不確実性を工学的判断として評価した上で，別途フェールセーフを設ける等の対策を組み合わせることで性能を確保する方策を考えることができる．

表-8　道路橋設計における状況（作用）に関する不確実性の例

項目			H29道示において考慮されている不確実性の例	出典
設計状況(作用)の不確実性			個々の作用の評価の不確定要因や作用の組み合わせを，作用自体のばらつきを表す荷重係数と，組み合わせ状況を表す荷重組み合わせ係数で考慮.	2)
			作用の組み合わせは，複数の作用の同時載荷の極値分布と，既往の損傷・被災事例等を参考にした工学的判断に基づき設定.	2)
個別の作用の不確実性(例)				
	永続作用	死荷重	寸法のばらつきによる死荷重のばらつきを仮定.（※単位重量のばらつきは無視し得るほど小さいため考慮しない．添架物等による付加死荷重は，供用後の添架物等の設置を想定することは難しいため確率分布としては考慮しない．）	31)
	変動作用		変動作用では，発生頻度や大きさについて，確率統計的な扱いを行う.	2)
		活荷重	交通状況のばらつきを考慮したシミュレーションにより活荷重のばらつきを統計的に考慮.（考慮したばらつき;車両構成比，車両重量，車種別軸重比，車種別軸間距離，車間距離，横方向走行位置，渋滞の発生等）	31)
		レベル1(L1)地震動	橋の設計供用期間中にしばしば発生する地震動(L1地震動)を考慮する. 既往の設計地震動によりおおむね再現期間100年のオーダーの規模と見なしうること，既往の被災事例から従来設計に大きな不足が無いとの判断から荷重係数1.00を設定.	2), 27)
	偶発作用		偶発作用は，発生確率が極めて小さい場合や，過去に実績が無いことなどにより確率統計的な扱いが困難であるため，確率統計的な扱いは行わない.	2), 27)
		レベル2(L2)地震動	橋の設計供用期間中に発生することは極めて稀であるがいったん生じると橋に及ぼす影響が甚大であると考えられる地震動(L2地震動)を考慮する.	2), 27)
			L2地震動(タイプI)は，関東地震において東京周辺で生じた地震動を例として捉え，工学的判断を加えて規定.	27)
			L2地震動(タイプII)は，兵庫県南部地震において地盤上で観測された強震記録に基づき，地震動の平均的な特性を考慮できるよう工学的な判断を加えて加速度応答スペクトルを推定.	27)
	地震動の影響(変動作用，偶発作用共通)		地震動の特性値の設定に当ては次のばらつきを考慮;地震動特性及び橋の地震応答特性のばらつき，地盤の振動特性のばらつき，橋の周辺地域で発生する地震の規模や発生位置等に応じた地震動強度のばらつき，既往の地震被害の特性や地盤の振動特性等に関する工学的判断.	27)
不測の事態としての不確実性			橋の設計においては，不測の事態にも配慮する.（※不測の事態: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のに十分な知見や経験が無いために，具体的に考慮するべき作用を想定できない事象．）	2)
	地震に付随して発生する事象		津波,斜面崩壊等及び断層変位の影響は，橋の設計に取り入れるたの予測技術や影響の評価方法等が工学的に確立されていない.	2), 27)
	供用環境の変化		交通環境の変化などの供用環境の変化も不測の事態として考慮.	2)

表-9　道路橋の設計における不確実性とその対処方策

全ての事象（状況）	蓋然性	事象の特徴と不確実性の程度	事象の推定方法	含まれる不確実性の例		事象(作用)の種類	不確実性への対処方法		
				偶然的不確実性	認識論的不確実性		確率的に評価される不確実性への対処	＋	確率的には評価されない不確実性への対処
確率的に評価可能な事象	蓋然性大	供用期間を通して繰返し生じる事象.	統計的確率	・事象固有のばらつき	・統計誤差 ・モデル化誤差	永続作用 変動作用	荷重係数，荷重組み合わせ係数		―――
極めて稀であるために確率を評価することが困難な事象	↕	不確実性は大きいが，供用期間中に生じると想定し得る程度の事象.	工学的判断（確定的に設定）	・事象固有の不確実性（確率的には評価できない不確実性）	・技術的知見や情報不足等により，事象を一定の精度で推定することができない不確実性（不確実性の程度は，その事象の蓋然性が小さいほど大きい）	偶発作用	工学的判断として決定論的に作用を設定	＋	作用を決定論的に設定していることに対して，フェールセーフを設ける
		供用期間中に生じる可能性いも考えられるものの，その確からしさは低く，また結果を具体的に想定できない.	工学的判断（条件に応じて定性的に考慮する等）			不測の事態	―――		致命的な状態に容易には至らないように配慮する(架橋位置・橋梁形式の選定，構造設計上の配慮)
	蓋然性小	不確実性が極めて大きく，供用期間中に生じ得ると判断するに足る情報が無い事象等.	設計上考慮しない			―	（設計対象とはしない）		

今後は，本研究で整理した不確実性の解釈を基礎として，道路橋設計における不確実性について体系的な整理を試みると共に，それら不確実性に対する設計上の対処方策の枠組みの整理を検討したい．

参考文献

1) 国土交通省道路局：第15回道路技術小委員会 資料4-2 道路リスクアセスメント要領（案），2022.
2) 日本道路協会：道路橋示方書・動解説I共通編，丸善出版，2017.
3) 高橋良和，秋山充良，片岡正次郎，本田利器：国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol. 72, No. 4（地震工学論文集第35巻），pp. I_821 – I_830, 2016.
4) ISO: ISO31000: 2018(E) Risk Management — Guidelines, 2018.
5) 緒方裕光：リスク解析における不確実性，日本リスク研究学会誌，Vol. 19，No. 2，pp. 3 – 9，2009.
6) 竹内啓：社会技術の観点から見たrisk論の一問題，社会技術研究論文集，Vol. 2，pp. 1 – 11，2004.
7) イアン・スチュアート：不確実性を飼いならす 予測不能な世界を読み解く科学，徳田功訳，白揚社，2021.［I. Stewart: *DO DICE PLAY GOD? The Mathematics of Uncertainty*, Joat Enterprises, 2019.］
8) 辛島恵美子：言葉「リスク」の歴史と今日的課題，保険物理，Vol. 35，No. 4，pp. 473 – 481，2000.
9) ジェームズ・フランクリン：「蓋然性」の探求　古代の推論術から確率論まで，南條郁子訳，みすず書房，2018.［J. Franklin: *THE SCIENCE OF CONJECTURE Evidence and Probability before Pascal*, Johns Hopkins University Press, 2021.］
10) 竹内啓：歴史と統計学，日本経済新聞社，2018.
11) フランク・H・ナイト：リスク、不確実性、利潤，桂木隆夫，佐藤方宣，太子堂正称共訳，筑摩書房，2021.［Frank. H. Knight: Risk, *Uncertainty and Profit*, Houghton Mifflin Company, 1921.］
12) 依田高典：不確実性下の意思決定理論―経済心理学から総合システム科学へ，計測と制御，Vol. 46，No. 4，pp. 255 – 260，2007.
13) 関根和喜：リスクについて，日本信頼性学会誌，Vol. 30，No. 7，pp.630 – 637，2008.
14) T. Aven: *Foundation of Risk Analysis*, John Wiley & Sons, LTD, 2003.
15) A. H.-S. Ang and D. De Leon: Modeling and Analysis of Uncertainties for Risk-informed Decision in Infrastructures Engineering, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 19 – 31, 2005.
16) A. H.-S. Ang and W. H. Tang: *Probability Concepts in Engineering Emphasis on Applications in Civil & Environmental Engineering*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2007.
17) ISO: ISO2394: 2015(E) General Principles on Reliability for Structures, 2015.
18) 日本産業規格：JIS A 3305:2020　建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則，2020.
19) William M. Bulleit: Uncertainty in Structural Engineering, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 13, No. 1, pp. 24 – 30, 2008.
20) B. M. Ayyub, and R. H. McCuen: *Probability, Statics, and Reliability for Engineers and Scientists*, 2nd Ed., Chapman & Hall/CRC, 2003.
21) 五井良直，金哲佑：ベイズ推論を用いた橋梁の振動特性推定に伴う不確実性の定量化手法の提案，土木学会論文集A2（応用力学），Vol. 75，No. 2（応用力学論文集Vol. 22），pp. I_647 – I_657，2019.
22) 西尾真由子，藤野陽三：ベイズ推定による既存構造物数値モデルの不確定性定量化とキャリブレーション，土木学会論文集A2（応用力学），Vol. 69，No. 2（応用力学論文集Vol. 16），pp. I_771 – I_718，2013.
23) 高田毅士：構造信頼性理論と工学における役割，日本信頼性学会誌，Vol. 25，No. 5，pp.394 – 403，2003.
24) IAEA: IAEA Nuclear Safety and Security Glossary, 2022.
25) 糸井達哉，林健太郎，大和正明：多様な誘因事象に対する原子力安全の確保（その1）リスク情報活用に係る現状と課題，日本原子力学会誌，Vol. 58，No. 4, pp. 28 – 33，2016.
26) IAEA: IAEA Safety Standards, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev. 1), 2016.
27) 日本道路協会：道路橋示方書・動解説V耐震設計編，丸善出版，2017.
28) William D. Rowe: Understanding Uncertainty, *Risk Analysis*, Vol. 14, No. 5, pp. 743 – 750, 1994.
29) Bilal M. Ayyub (edit): *Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering*, CRC Press LLC, 1998.
30) ハーバート・A・サイモン：システムの科学 第3版，稲葉元吉，吉原英樹共訳，パースナルメディア，1999.［H. A. Simon: *The Sciences of the Artificial Third edition*, Massachusetts Institute of Technology, 1996.］
31) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の設計状況設定法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 第1031号，2018.
32) 糸井達哉，中村秀夫，中西宣博：多様な誘因事象に対する原子力安全の確保（その2）外的事象対策の原則と具体化，日本原子力学会誌，Vol. 58，No. 5，pp. 47 – 52，2016.