

## 道路橋示方書におけるリスク対応の枠組み・リスク基準と 落橋防止システムが対応するリスクに関する考察

河原井 耕介<sup>1</sup>・大住 道生<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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 (同上)

### 1. はじめに

現在の道路橋の設計は、これまでの多くの被災経験やそれを踏まえた多くの研究成果を反映し、様々な観点から安全を確保することへの配慮がなされている。現在の道路橋示方書（以下「H29 道示」と呼ぶ）による設計の枠組みは、信頼性理論に基づく部分係数設計法を用いた限界状態設計が基本となっている<sup>1)</sup>。これにより、設計で考慮する作用に対して設定した限界状態を超えないことが一定の信頼性をもって保証される。一方で、必ずしも確率的に考慮しきれない不確実性など、限界状態設計法の書式では考慮しきれない事象もある。最も端的な例の1つが、落橋防止システムが想定する支承部の破壊と言える。地震時の支承部の破壊は、発生の可能性と発生した場合の影響が大きいという経験的認識から「不測の事態」として設計において考慮されてきた。

不測の事態への対応は、2000年代以降では2011年東北地方太平洋沖地震や、2018年熊本地震などを通してその必要性の認識が強まってきた。また、気候変動を背景とする水災害の激甚化など、地震以外の自然災害なども背景として、国土交通省において道路リスクアセスメント要領(案)<sup>2)</sup>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。

構造物設計の分野においては、構造物の信頼性に関する設計方策を体系化した国際規格であるISO 2394<sup>3)</sup>が、リスク対応の考え方を全面的に取り入れて2015年に改訂されている。H29道示で考慮されている不測の事態への対応も、リスク対応の観点から一般化できる可能性が考えられる。

落橋防止システムは、H29道示においても仕様規定的な取り扱いとなっている。実際の構造物では、支承部の破壊の発生頻度や損傷モードは橋の構造条

件によって異なると考えられるが、落橋防止システムの設計では、条件によらず一律に支承部の破壊を想定することとしている。また支承部が破壊した場合に上部構造が落下するリスクに対して、どの程度の水準で対応できているのかは明らかとなっていない。道路橋の設計におけるリスク対応の水準を具体化することができれば、不測の事態に対してより合理的な対策方法を検討することや、各リスク対応方策の水準の整合を図ることが可能となる。

落橋防止システムの性能の具体化に向けて、筆者らは、危機耐性の考え方<sup>4)5)</sup>を背景として設計基準外事象(BDBE, Beyond Design Basis Event)への対応の観点で落橋防止システムの位置付けを整理することを提案している<sup>6)</sup>。一方、H29道示では、前述の通り落橋防止システムに限らず、多様な観点からリスク対応が取り込まれていると考えられる。そこで、リスク対応の観点からH29道示を分析し、落橋防止システムを中心に、H29道示におけるリスク対応の体系的な整理を試みる。本研究では、試行的な整理として、H29道示V編<sup>7)</sup>を対象に整理を行う。

### 2. リスクの定義

リスクという単語は、今日では新聞や報道、日常会話でも一般に使用されているが、危険とほぼ同義で使用され、学術分野での定義との乖離もみられる。

リスクの定義を表-1に整理する。最も一般化されたリスクの定義はISO 31000:2018<sup>9)</sup>であり、好ましいか否かに関わらず、リスクを考える対象に関する不確かさの影響の全てをリスクと捉えている。一方、製品、システムの安全側面についての国際規格であるISO/IEC Guide 51:2014<sup>10)</sup>は、ISO31000:2018における「不確かさの影響」を危害、すなわち人への損

表-1 リスクの定義

出展	定義	
広辞苑 <sup>8)</sup>	①危険。②保険者の担保責任。被保険物。	
ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines <sup>9)</sup> JIS Q 31000:2019 リスクマネジメント— 指針	effect of uncertainty on objectives / 目的に対する不確かさの影響 注記1: 影響とは、期待されていることから乖離することをいう。影響には、好ましいもの、好ましくないもの、又はその両方の場合があり得る。影響は、機会又は脅威を示したり、創り出したり、もたらしたりすることがあり得る。 注記2: 目的は、様々な側面及び分野をもつことがある。また、様々なレベルで適用されることがある。 注記3: 一般に、リスクは、リスク源、起こり得る事象及びそれらの結果並びに起こりやすさとしてあらわされる。	
ISO/IEC Guide 51:2014 Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards <sup>10)</sup> JIS Z 8051:2015 安全側面—規格への導入指針	combination of the probability of occurrence of harm and the severity of that harm / 危害の発生確率及びその危害の度合いの組合せ 注記: 発生確率には、ハザードへの暴露、危険事象の発生、及び危害の回避又は制限の可能性を含む。 ※危害の定義: 人への損害若しくは健康障害、又は財産及び環境への損害。	
ISO 2394:2015 General principles on reliability for structures <sup>3)</sup> 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	effect of uncertainty on the objectives / 不確実性が目的に及ぼす影響 注記 意思決定理論の観点からは、リスクとは望ましくないあらゆる結果の期待値、すなわち、事象の結果とその確率の積とを全て足し合わせたものである。	
道路リスクアセスメント要領(案) <sup>2)</sup>	(道路のリスク) 想定する状況に対して評価の対象とする道路の持つ通行機能が低下する可能性とそれが通行に与える影響をいう。影響の度合いに応じて区分する。	
社会基盤におけるリスク(リスク評価)	大澤, 本田(2015) <sup>11)</sup>	起きうる事象の影響の大きさの期待値。
	原田ら(2017) <sup>12)</sup>	「事象の生起確率」と「事象が生起した結果生じる影響度」の積。期待被害額として表現される。
	石橋ら(2020) <sup>13)</sup>	(道路ネットワークのリスク) 経済的損失の期待値。経済的損失は被災構造物の復旧に要する費用(直接損失)と、構造物の被災による交通機能低下から生じる損失(間接損失)の和。

害等に限定している。これは、ISO/IEC Guide 51:2014 が、人が使用する製品、システムの安全を対象にしているためである。以上 2 つの国際規格では、リスクは必ずしも定量化できるものではないとして、期待値の形では定義していない。

構造物の信頼性を対象とした ISO2394:2015<sup>3)</sup> は、ISO31000:2018 にも引き継がれた ISO31000 初版<sup>11)</sup> の定義を採用しているが、構造物の設計は、損傷など望ましくない状態にならない信頼性を確保することに主眼があり、“意思決定論の立場からは望ましくない結果を対象とする”ことが注記されている。ただし、ISO/IEC Guide 51:2014 の様に危害にまで対象を限定してはいない。また ISO2394:2015 ではリスクは期待値として定量化できるものと捉えている。

道路リスクアセスメント要領(案)<sup>2)</sup> では、対象を道路の通行機能に限定しているが、ISO2394:2015 と整合した定義となっている。ただし、リスク評価はリスクマトリクスを用いた定性的な評価方法を採用している。社会基盤を対象としたリスク評価に関する研究<sup>12-14)</sup> では損失の期待値と定義する例が多い。

H29 道示では「リスク」という言葉は明示的にはほとんど使用されていない。しかし、不測の事態を考慮した様々な配慮は、工学的な判断という形で望ましくない状態に至るリスクを定性的に評価し、対応が図られているものと考えられる。

### 3. H29 道示におけるリスク対応とリスクマネジメントプロセスとの比較考察

(1) H29 道示とリスクマネジメントプロセスの比較  
構造物の設計においてリスクに対応する場合、設計における意思決定はリスクマネジメントプロセス

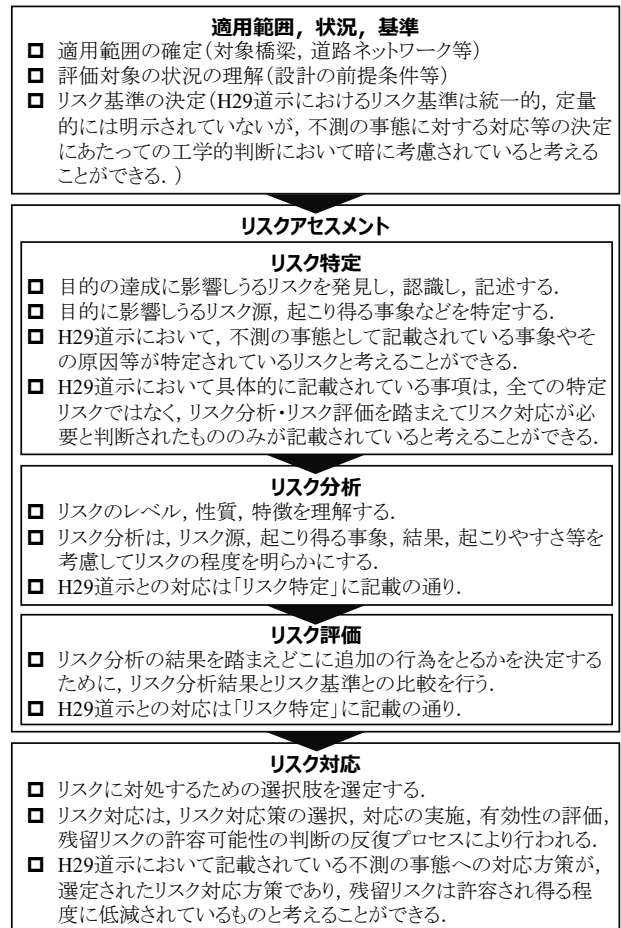


図-1 ISO31000:2018 によるリスクマネジメントプロセスと H29 道示の対応

の結果と捉えることができる。本節では、ISO 31000:2018 に基づくリスクマネジメントプロセスとの比較を通して、H29 道示の背景にあるリスクマネジメント的な判断を考察することで、H29 道示におけるリスク対応を整理する。ISO31000:2018 に基づくリスクマネジメントプロセスを図-1 に示す。図中

には H29 道示との対応も記載している。

リスクマネジメントの最初のステップでは、適用範囲を確定し、評価対象の置かれている内外の状況、及びリスク評価の際の判断基準となるリスク基準を決定する。H29 道示の対象範囲は、道路橋であるが、道路橋の主な機能は通行機能であり、それを有意義化する道路ネットワークの一要素であることを踏まえて、ネットワークの観点も考慮に入れている。評価対象の置かれている内外の状況とは、道路橋に対しては道路条件や交差条件、設計状況（作用）、橋の位置する道路ネットワークやこれを踏まえた橋の重要度、また維持管理の条件や、橋を含む地域の防災計画等が含まれると考えられる。リスク基準は、リスクアセスメントにより見積もられたリスクの程度に対して、どのような対応を行うかの判断をする際の基準となるリスク水準である。H29 道示においても、様々な不測の事態を考慮してその対応を行っているが、統一的、明示的なリスク基準のようなものは整理されていない。ただし、不測の事態に対する対応等が規定、また解説された背景には、何らかの判断基準が暗に考慮されていると考えることができ、リスクマネジメントのプロセスに照らして H29 道示を分析することで、リスク基準を浮き上がらせることが可能と考えられる。

リスクアセスメントのステップでは、リスクを特定し、そのレベルや性質、特性などを見積もるリスク分析を行い、最後にリスク分析の結果とリスク基準を照らしてリスク評価を行って意思決定を行う。一般のリスクアセスメントでは、リスク評価における意思決定は、1) 更なる活動の停止、2) リスク対応の選択肢の検討、3) 更なるリスク分析、4) 目的の再

考から選択されることとなるが、道路橋の設計基準である H29 道示においては橋を整備することを見送るなどといった 1), 3), 4) の選択の手続き論や代替手段との比較方法などは範疇外であり、2) のリスク対応の要否が検討されることとなる。リスク対応を行う判断がなされた場合は、次のリスク対応に進む。

リスク対応のステップでは、リスク対応方策の選択、対応の実施、その有効性の評価、残留リスクの許容可能性の判断という反復プロセスを実施し、残留リスクが許容可能な水準以下に留められる。

H29 道示に記載されている様々な不測の事態への対応等は、基準策定の際に具体的なリスクアセスメントのプロセスは経ていないとしても、アセスメントの結果に相当する判断の結果であると考えことは不自然ではない。そこで次節以降で、リスクアセスメント及びリスク対応に照らして H29 道示で考慮しているリスクを明らかにする。

## (2) リスク特定：H29 道示で考慮しているリスク源

H29 道示 V 編で考慮されている不測の事態を抽出し、リスク源として整理した結果を表-2 に示す。表-2 では BDBE との対応も左欄に示している。ISO 31000:2018 ではリスク源を「それ自体又はほかとの組み合わせによって、リスクを生じさせる力を潜在的にもっている要素」と定義している。H29 道示における不測の事態は、耐荷性能の設計では直接考慮しない不確実な作用と、構造や地盤条件に起因する不確実な事象が考慮されている。前者は、作用に関する BDBE に対応し、作用自体がリスク源である（表-2 の i)）。後者は、不確実な応答の原因となる構造や地盤自体がリスク源である場合（表-2 の ii),

表-2 H29 道示で考慮されているリスク源の例

BDBEの区分	グループング	H29道示で考慮されているリスク源の例
作用の BDBE(リスク源そのもの)	設計状況を超える状況 設計状況と異なる状況	地震(設計地震動, および設計地震動を超える強度の地震動) 津波, 斜面崩壊等, 断層変位
	i) 不確実性の大きい作用	地盤震動変位
応答の BDBE に関するリスク源	ii) 応答の不確実性が大きい部材 や構造系	地震時の応答の不確実性の大きい構造(斜橋, 曲線橋等)
		設計地震動に対して, 塑性化する部材と塑性化させない部材を区別していない構造系
		設計地震動に対して, 構成部材に塑性化が生じる上部構造
		設計地震動に対して, 軸力変動や塑性化を生じる高軸力部材(全体系の挙動や安定に大きな役割を担う部材)
		設計地震動に対して, 種類の異なる複数の部材が塑性化する構造系
		設計地震動に対して, に基礎が塑性化する免震橋
抵抗の BDBE に関するリスク源	iii) 認識論的不確実性	破壊挙動が明確になっていない部材
		支承部
		地震時応答の不確実性(塑性化しない設計としていた部材が塑性化する)
		基礎の地震応答の不確実性(塑性化を考慮せず, 構造的にも塑性変形能を有しない基礎に塑性化が生じる)
状態の BDBE に関するリスク源	iv) 不確実性の大きい環境条件	橋全体系及び部材の抵抗特性の不確実性
		ねじりを受ける部材の抵抗特性の不確実性
		地震による地盤の抵抗特性の変化, 地盤の変状
状態の BDBE に関するリスク源	v) 地震後の橋の速やかな復旧に 悪影響のある構造	支承本体又は台座コンクリートの高さが高い支承部
		1支承線上の支承数が少ない構造
		点検や修繕が困難な構造
		修復が困難な個所に塑性化を考慮した構造

iv) ) と、特定の構造等に起因するのではなく応答評価に無視できない認識論的不確実性があり、これがリスク源となる場合(表-2のiii))とに分類できる。v)は地震後に橋の機能が低下することを考慮して、速やかな復旧ができなくなるリスクに着目したリスク源である。H29道示V編では、以上のようなリスク源に対してリスク対応が考慮されている。

### (3) リスク分析：H29道示で考慮されるリスクにおける結果(リスクが顕在化した場合の影響)

リスクアセスメントにおいては、リスクをリスク源、起こり得る事象、結果、起こりやすさにより捉え、リスクのレベル、性質や特徴を把握する。ここでの結果(consequence)とは、リスクが顕在化した場合の影響を指している(以下、一般用語の「結果」との区別のため〈結果〉と表記する)。H29道示V編で考慮している〈結果〉を表-3に示す。

表-3のa)は、具体的な損傷は想定していないが、制御不可能な応答により橋が機能を喪失することを懸念したものと考えられる。一方、b)~f)は、橋の損傷を想定した〈結果〉である。b)は部材の損傷が他の部材の機能に影響するレベル、c)は全体系に影響するレベルの結果に区分できる。d)~f)は上部構造、下部構造、基礎構造の機能の喪失を考慮している。以上のa)~f)は、構造物への直接的な影響であり、直接的結果<sup>3)</sup>と言える。g)は復旧の観点で、復旧性や緊急輸送路などのネットワークとしての機能などへの影響であり、間接的結果<sup>3)</sup>と言える。

H29道示では、橋梁の構造系を上部構造、下部構造・基礎構造、上下部接続部に区分している。表-3より、上部構造、下部構造・基礎構造の機能喪失はリスク源から派生したリスクシナリオの結果として対処すべき事象と評価されている。一方、上下部接続部(支承構造)の機能喪失は、事象自体がリスク源として扱われている。ISO31000:2018では事象がリスク源となり得ることが解説されているが、リスク源とみなした事象—ここでは支承部の損傷—を生起させる因子を解明することが、より根源的なリスク源の特定につながると考えられる。

### (4) リスク評価及びリスク対応：H29道示で選定されているリスク対応方針

表-3に示したリスクの〈結果〉は、全てH29道示においてそれぞれに対するリスク対応が規定されている。すなわち、リスクマネジメントのプロセスに照らすと、表-3の内容は、全てリスク対応を行うと判断された〈結果〉を示している。これらのリスクに対する対応方針を表-4に示す。なお、表-4には

表-3 H29道示で考慮されているリスクの〈結果〉の例

グルーピング	H29道示で考慮されている リスクが顕在化した場合の影響〈結果〉の例
a) 不確実な応答による橋の機能喪失	不確実な地震動応答による橋の機能喪失(具体的な損傷形態は特定しない)
b) 部材の損傷が他の部材の機能に影響する	支承部等の損傷による落橋防止システムへの機能的な悪影響(装置本体とその取付部の損傷)
c) 橋全体系の崩壊	部分的な損傷を起点とする橋全体系の連鎖的な崩壊、不安定化 全体系の安定に影響する部材に損傷が生じる 過大な作用による橋全体系の崩壊
d) 上部構造が機能を喪失する	上部構造の耐荷力の急激な低下 上部構造が落橋する 上部構造が流失する
e) 下部構造が機能を喪失する	支承部が破壊し下部構造が自立しない 下部構造が倒壊する
f) 基礎が不安定化する	基礎に損傷が生じる、脆性的な損傷が生じる。 基礎の過大な変位、不安定化等が生じる。
g) 震後対応・復旧の観点で望ましくない結果	地震後に求められる橋の機能(通行機能、緊急輸送路としての機能等)の低下、喪失 路面に大きな変状が生じて橋の機能の回復が速やかに行えない 地震後の点検や補修が速やかに行えず、地震後の橋としての機能が果たせない 下部構造が倒壊する等、上部構造の落橋、流失に対して復旧の障害となる被害形態となる

リスク対応に対応して推測されるリスク基準についても示している。これについては次章で考察する。

### a) ISO31000:2018によるリスク対応の分類とH29道示におけるリスク対応方針の比較

ISO31000:2018におけるリスク対応の方法は、次の7つに分類されている；1) リスクを回避する、2) ある機会を追求するためにリスクを取る又は増加させる、3) リスク源を除去する、4) 起こりやすさを変える、5) 結果を変える、6) 保険などによりリスクを共有する、7) 情報に基づいた意思決定によりリスクを保有する。このうち、「2) リスクを取る」は投機の観点であり、公共構造物におけるリスクには当てはまらない。「6) リスクを共有する」はいわゆる地震保険などの観点ではあるが、巨大災害等を対象とする場合、十分にリスクを下げた上でしか機能しないことが知られており<sup>15)</sup>、ここでは対象としない。以上2)、6)以外の観点から、H29道示において規定されているリスク対応の方策を整理した。

リスクを回避する観点では、耐荷性能の設計のレベルから、影響の大きなリスク源を回避する構造計画のレベルまで多様なレベルでそれぞれのリスクを回避する方針がとられていることが分かる。

起こりやすさを変える観点は、対象のリスクができるだけ顕在化しない構造的配慮を行う方策である。

結果を変える観点では、損傷が生じる場合にも望ましくない部位に損傷するリスクを、相対的に望ましい位置に損傷(塑性化)を誘導することや、塑性変形能を付与して脆性的な現象が生じることを防止することなど、結果を変えるような構造計画・設計を採用することと言える。

表-4 H29 道示におけるリスク対応と推測されるリスク基準の例

リスク対応の区分	リスク対応の方法		考慮されていると推測されるリスク基準の例 (番号は表-6に対応)
	グルーピング	H29道示で考慮されているリスク対応の例	
リスクを回避する	リスクの大きい構造としない	上部構造は設計において限界状態Iに留める。	2)-①設計作用に対して上部構造に塑性化が生じることの影響が不明確なため、上部構造は設計作用に対して弾性範囲に留める。
		設計において種類の異なる複数の部材を塑性化させない。	2)-①設計作用に対して種類の異なる複数の部材が塑性化する場合の応答の不確実性は許容しない。
		免震橋の設計において基礎は塑性化させない。	2)-①設計作用に対して免震橋において基礎が塑性化する場合の応答の不確実性は許容しない。
		斜角の小さな斜橋、曲率半径の小さな曲線橋、大きな偏心モーメントを受ける橋脚など、地震時の応答の不確実性が大きい構造を避ける。	2)-①地震時の応答の不確実性の大きい構造は <b>できるだけ避ける</b> 。
できるだけ影響の不明確な応答が小さくなる配慮をする	支保部を含む一部の部材の破壊を考慮した場合にも、下部構造は自立して安定を失わず、最低限上部構造を支持できる構造とする。	3)-①支保部やその他の一部の部材が破壊する場合に、下部構造が自立しなくなるリスクは許容しない。	
	ねじりの影響をできるだけ小さくする。	2)-①ねじりの影響で部材に損傷が生じ、橋全体の崩落等の致命的な状態に至るリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。	
不確実な作用の影響を受けない位置、構造とする	津波、斜面崩壊等、断層変位の影響を受けないような架橋位置、橋梁形式の選定。	1)-①津波、斜面崩壊等、断層変位の影響を受けるリスクを避けることを基本とする。	
	津波が上部構造に達しないように桁下高さを確保する。	1)-①津波により上部構造が流失するなど、橋の機能が速やかに行えないほどの被害を受けるリスクは許容しない。(地域の防災計画等において、橋の機能の回復を速やかに行うことが求められる場合。)	
起こりやすさを変える	できるだけ安定性の高い構造とする	水平剛性の高い基礎の選定。不静定次数の高い構造系の採用(多点固定方式、ラーメン形式)。	2)-④地震時の地盤の変状によって、基礎に過大な変位や不安定化が生じるリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。
	できるだけ上部構造が落下しない構造とする ※結果を変える側面も持つ。	支保部が破壊した場合を想定して、上部構造が容易に落下しうる構造の場合は、上部構造が容易には落下しない対策を行う。 ・多径間連続構造、ラーメン構造の採用 ・十分な頂部幅を確保、上部構造と下部構造間の相対変位を拘束する構造の設置(=落橋防止システム)	3)-②支保部が破壊する場合に、上部構造が落下するリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。(容易に落下するリスクは許容しない。)
	致命的な被害が生じにくい構造とする ※結果を変える側面も持つ。	津波、斜面崩壊等、断層変位に対して致命的な被害が生じにくい構造とする。 致命的な被害が生じにくい構造の例； ・津波、斜面崩壊等、断層変位に対して鈍感な構造形式、下部構造配置。 ・上部構造が津波の作用を直接受ける場合に、その影響を軽減できる構造的工夫をする。 ・上下部構造間に相対変位が生じても上部構造が落下しにくい橋梁形式や、上下部構造間の相対変位に追従性の高い橋梁形式。	1)-②津波、斜面崩壊等、断層変位に対して橋の機能回復が速やかに行えないほどの被害が起こるリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。
	塑性変形能を付与する	部材に脆性的な破壊を生じさせない。特に、橋全体の崩落等の致命的な損傷につながる部材に注意する。想定される設計状況と異なる状況に対して、塑性化する可能性がある部材に注意する。 塑性化が生じないよう設計する部材でも構造細目等により塑性変形能を付与する。 設計で橋脚に塑性化を期待しない場合でも、橋脚の塑性化を考慮した設計を行う。 基礎の構造に塑性変形能を付与する。	2)-③不測の事態により設計で想定していない部材に損傷が生じることで、橋全体の崩落等の致命的な状態に至るリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。 2)-②設計で想定していない部位が脆性的に破壊するリスクは許容しない。 2)-②設計で塑性化を考慮しない橋脚に対して、不測の事態により塑性化が生じる場合にも脆性的な破壊を生じるリスクは許容しない。 2)-②地盤震動変位により基礎が脆性的に破壊するリスクは許容しない。
結果を変える	全体系の崩壊につながるような部材に損傷が生じないようにする	各部材の耐力を階層化し、塑性化を期待する部材と期待しない部材を明確に区別する。 その破壊が橋全体系の崩壊につながり得る部材には、損傷が生じないようにするか、損傷が生じる場合にも損傷の程度を制限するよう構造的配慮をする。	2)-③部分的な破壊により橋全体系が崩壊するリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。
	支保部が破壊しても機能回復がしにくい構造としない	支保部の破壊後に機能回復を速やかに実施できるようにするための対策を検討する。 ・支点落下に対する段差防止構造 ・負反力に対する段差防止構造 ・1支承線上の支承数の少ない構造を避ける ・1支承線上の支承数が少ない場合は、橋軸直角方向の残留変位を抑制する対策を講じる	4)-①支保部が破壊する場合に、桁端部における鉛直方向又は橋軸直角方向の大きな変位により、橋としての機能回復に時間を要するような状態に至るリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。
	部材の損傷がその他の部材の損傷につながらないようにする	支保部・制振装置等の取り付け部の破壊を考慮した落橋防止システムの計画・設計	3)-③支保部や制振装置等の取付部が損傷する場合に、落橋防止システムの機能が損なわれるリスクは許容しない。
リスクを保有する	橋の機能の低下、喪失することを考慮して地域防災計画等と整合した橋梁計画とする	津波、斜面崩壊等、断層変位の影響を受ける場合は、地域の防災計画等と整合して必要な対策を講じる(例えば、致命的な被害が生じにくい構造とする)	1)-②津波、斜面崩壊等、断層変位の影響を受ける場合で、地域の防災計画等で求められる機能を下回るリスクがある場合、影響の <b>緩和措置</b> をとる。
	橋の機能の低下、喪失することを考慮して復旧に配慮した構造とする、復旧を計画	上部構造が津波の作用を受ける場合でも、下部構造の倒壊等により被害の大きい事態には至らない構造的配慮をする。 震後対応を確実に実施できるよう配慮した設計とする。 ・損傷の発見、修復が容易な部材に塑性化を期待する。 ・損傷の発見が困難な部材は、塑性化の程度を修復不要な程度に留める。 ・点検や修復が困難な箇所をできるだけ少なくする。	4)-①震後対応が遅れるリスクを <b>小さくする設計上の配慮</b> をする。
		橋の機能が喪失する場合に対して、機能回復措置の準備等しておく。 ・設計段階において機能回復措置の方策を計画しておく。 ・機能回復措置に必要な資機材を整備しておく。 ・道路網の多重化により補完性を確保した路線計画とする。 ・その他、地域の防災計画等と整合した対策を取る。 復旧が容易にできるように情報を整理する。 ・損傷個所の把握、損傷程度の確認のための調査・診断方法 ・応急復旧工法に応じた資機材の保管場所	4)-②震後対応が遅れるリスクを <b>小さくする措置</b> を別途とる。

リスクを保有する観点、橋の機能が低下、あるいは喪失するリスクは保有しつつ、復旧で対応する場合に相当する。この時、復旧が遅れるようなリスクに対しては重ねて対応することとなる。

#### b) リスク源とリスク対応の関係

表-2 に整理したリスク源と表-4 に示したリスク対応方策の対応を考察する。表-2 の i) 不確実性の大きい作用のうち、構造物に与える影響が特に甚大な設計地震動を超える強度の地震や、津波、斜面崩壊等、断層変位に対しては、リスクの回避及び起こりやすさの変更、結果の変更、リスクの保有の各方策を組み合わせ対応している。

不確実性の大きい地盤振動変位や、iii) 認識論的不確実性、iv) 不確実性の大きい環境条件に対しては、部材に塑性変形能を付与し脆性的な破壊が生じないような対策、結果を変える対策を適用している。

ii) 応答の不確実性の大きい構造は、その様な構造を適用しない、すなわちリスクを回避する対策を適用している。ただし、支承部に対しては、支承部が破壊するリスクは保有しつつ、支承部の破壊をリスク源とする事象に対して、上部構造の落下という望ましくない事象ができるだけ生起しないような対策（落橋防止システムの適用）により、起こりやすさを変える対応を取っている。なお、落橋防止システムは、上部構造が落下する“起こりやすさ”を変える側面と同時に、落下しないようにする—“結果を変える”側面も持っていると言える。支承部のみ、その破壊をリスク源としてリスク対応を考える背景については次章で考察する。

v) 地震後の復旧に障害となるリスク源に対しては、障害となる可能性のある構造を避けるリスク回避の対応などを適用している。また復旧で対応しようとする方針は前述の様にリスク保有の方策である。

なお、本研究では H29 道示 V 耐震設計編を分析対象としたことから、ii)~v) のいずれのリスク源に起因するリスクも、i) の地震に関連するリスク源と組み合わせ初めて顕在化するリスクである。

#### c) リスクの〈結果〉とリスク対応の関係

表-3 に整理したリスクの〈結果〉と表-4 に示したリスク対応方策は、一対一に対応するものではなく、〈結果〉に応じて適宜複数の対応を組み合わせることでリスクの低減を図ることが基本となる。

例えば、表-4 の c) に分類される「過大な作用による橋全体系の崩壊」に対する対応は、津波、斜面崩壊等、断層変位（以下、「津波等」と呼ぶ）の影響を受けないような架橋位置や橋梁形式を選定するリスク回避の対応や、津波等に対して致命的な被害が生じにくい構造とする起こりやすさの変更又は結

果の変更、さらに、リスクを保有して津波等を受けることを考慮した地域の防災計画等と整合した対策の実施などによりリスクに対応する。

また、d) の上部構造が落橋する〈結果〉に対しては、支承部が破壊しても上部構造が落下しにくい橋梁構造とする又は上部構造が落下しにくい対策（＝落橋防止システム）をとる起こりやすさの変更と共に、リスクを保有し地域防災計画等と整合した対策をとることを組み合わせることでリスクに対応している。

## 4. H29 道示におけるリスク対応の枠組みとリスク基準の整理

### (1) H29 道示におけるリスク対応のマトリクス

リスク対応の方策は、リスク源に対して、それぞれ留めたい状態に誘導するための方策であると考えることができる。H29 道示における橋の耐荷性能は、状況に対して留めたい橋の状態の組合せで整理されている。これを拡張してリスク対応を考えると、全てのリスクに共通的な「作用としてのリスク源（表-2 の i)）」を状況面の BDBE、リスク対応の結果留められる状態を状態面での BDBE と考えることができる。橋の性能マトリクスを、状況面、状態面それぞれの BDBE を考慮して拡張した表に表-2~表-4 の内容を再整理すると、表-5 の様に表現できる。

状況に関する BDBE の欄は、表-2 に示した作用に関するリスク源である。ただし、地盤振動変位は耐荷性能の設計で考慮されているため、ここには該当しない。状態に関する BDBE の欄は、表-3 に示した〈結果〉に対応する橋の状態を踏まえて、表-4 に示した対応により留められる状態に対応する。なお、種類の異なる複数の部材に塑性化を許容しないこと等、応答の不確実性に関するリスクを回避する対応は、応答の不確実性を低減して橋の耐荷性能を満足させるための対応と考えられることから、表-5 の BDBE への対応には含めていない。

3章(4)c)で考察した様に、複数のリスク対応を組み合わせることでリスクに対応しようとする枠組みが表-5 に表れている。リスク対応方策の決定にあたっては、保有されるリスクに対する対応である復旧計画や防災計画等との整合を踏まえ、表-5 の枠組みで必要なリスク対応を過不足なく選択することが重要となる。

### (2) H29 道示 V 編で考慮されているリスク基準についての考察

H29 道示 V 編で暗に考慮されていると考えられるリスク基準について考察する。各リスク対応方策から推測されるリスク基準を表-4 に示した。これを総

表-5 H29 道示におけるリスク対応のマトリクス

状態	耐荷性能の設計における橋の限界状態	状態に関するBDBE						
		機能回復が比較的容易な状態, 早期に復旧できる状態				致命的な状態		
		上部構造が落橋, 流失等していない状態				上部構造が落橋, 流失		
		支承部が破壊した状態						
状況	部分的な損傷が生じても全体系の不安定化, 崩壊には至らない状態	下部構造が自立して上部構造を支持できる状態				下部構造が倒壊しない状態	一部の下部構造が倒壊している状態	橋全体系の崩壊
		上部構造が容易には落下しない状態		路面変状が容易に復旧しやすい程度にとどまる状態				
		路面に生じる段差が一定程度以下		橋軸直角方向の残留変位が一定程度以下				
永続作用支配状況 変動作用支配状況	耐荷性能の設計 により対応する領域	・部材に塑性変形能を付与する	・上部構造が落橋しにくい構造によりできるだけ落橋させない	・支承部が破壊しても段差が生じにくい構造とする(低い支承高, 段差防止構造)	・支承部が破壊しても橋軸直角方向に残留変位が生じにくい構造とする(1支承上の支承数が多い構造, 横変位拘束構造等の残留変位を抑制する対策)			
偶発作用支配状況		・部材の耐力を階層化する	・上部構造を落下しにくくする対策(落橋防止システム)によりできるだけ落橋させない	【起りやすさの変更】	【起りやすさの変更】			
作用に関するBDBE 設計地震動を上回る強度の地震動 津波 斜面崩壊等 断層変位	・影響を受けにくい架橋位置, 構造形式によりBDBEの状態できるだけ至らないようにする 【リスク回避】	【結果の変更】	・致命的な被害が生じにくい構造 【起りやすさの変更】	【リスク保有】	【起りやすさの変更】	・地域防災計画等と整合した必要な対策をとる。(復旧の対応方針等を事前に定めて準備をする, 代替路の確保する等) 【リスク保有】	・上部構造が流出しても下部構造はできるだけ倒壊しない構造 ・できるだけ剛性の高い基礎 【結果の変更】	
		・震後対応が遅れるリスクを小さくする設計上の配慮を行う(点検可能な構造, 補修が容易な位置で塑性化) 【リスク保有】						

※どこまでの状態にとどめようとするかは, 地域の防災計画等との整合を図って適切に設定する。

括して分類したものを表-6 に示す。3 章(3)での考察も踏まえ, H29 道示におけるリスク基準を4つに分類している(表-6 1)~4)。

1) はリスクの影響程度が最も甚大な, 橋全体系が崩壊するリスクに対する基準である。続いて, 2) 上部構造, 下部構造・基礎構造に対してこれらが機能を喪失するリスクに対し, リスク源毎の基準が設定されていると考えられる。3) の上下部接続部については, 支承部の破壊をリスク源として考慮してそこから派生するリスクに対応する観点でのリスク基準であり, 支承部が破壊した状態の構造系に対してどのような状態にとどめるかという観点での基準となっている。落橋防止システムは, このリスク基準を満足するためのリスク対応方策と考えられる。4) の復旧の観点で, 復旧に支障が生じるリスクの観点で基準が設定されているものと考えられる。

H29 道示においては, 表-6 に示したように, リスクを「できるだけ」小さくする考えが多くみられる。これは, リスク対応における ALARP (as low as reasonably practicable, 合理的に実施可能な限り低い) の原則<sup>16)</sup>に対応するものと解釈することができる。ALARP の原則では, リスクを次の3つに分類する; 許容不可能 (intolerable) なリスク, 広く受容される (broadly acceptable) リスク, 以上の2つのリスク水準の間の領域である ALARP 領域のリスク。リスク評価の結果, リスクが ALARP 領域にあると判断された場合は, 「合理的に実施可能な限り<sup>16)</sup>」リスクを低減することが求められる。H29 道示におけるリスクをできるだけ低減する考えは, 当該リスクが顕在化する可能性は認めつつ, 総合的な判断のもと可能な範囲でリスクに対応するもので, ALARP の原則に一致する。ALARP の原則でリスクをとらえることは, 体系的にリスク対応を検討していく上で, 一つの方法であると考えられる。

表-6 H29 道示で考慮されていると推測されるリスク基準

1) 橋全体系が崩壊するリスクに対する基準	①津波, 斜面崩壊等, 断層変位に対しては構造計画段階でのリスク回避を基本とする。 ②津波, 斜面崩壊等, 断層変位の影響を避けられない場合は, 多重にリスク対応を考え, <b>できるだけリスクを小さく</b> する。【ALARP 領域】
2) 上部構造, 下部構造・基礎構造の機能損失のリスクに対する基準	①地震時応答の不確実性の原因となる構造を適用することによる不確実性は許容しない。 ②部材が脆性的に破壊するリスクは許容しない。 ③一部の部材の損傷が全体系の崩壊の可能性に繋がるリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。【ALARP 領域】 ④液状化・流動化の不確実性に対しては, 基礎の損傷・不安定化のリスクを <b>できるだけ小さく</b> する。【ALARP 領域】
3) 上下部接続部(支承構造)の機能損失をリスク源とするリスクに対する基準	①支承部が破壊した状態で下部構造が自立しないリスクを許容しない。 ②支承部が破壊した状態で上部構造が落下するリスクは <b>できるだけ小さく</b> する。【ALARP 領域】 ③支承部の破壊が, 上部構造の落下リスクを低減する機能(落橋防止構造)に支障をきたすリスクは許容しない。
4) 復旧性に支障をきたすリスクに対する基準	①震後対応が遅れるリスクを <b>小さくする設計上の配慮</b> をする。 ・被災後に点検が困難となる構造としない 【ALARP 領域】 ・復旧が著しく困難となる被災形態としない ②震後対応が遅れるリスクを <b>小さくする措置</b> を別途とる。【ALARP 領域】

### (3) 上下部接続部(支承構造)の機能喪失をリスク源とすることについての考察

H29 道示において, 支承部については, その他の橋の構造部位と異なり, その機能の喪失(破壊)という事象自体をリスク源としてリスク対応を取る方針となっている。この背景について考察する。

表-6 の1) や2) に示したリスク基準を満足するための対応は, 前述のように, 例えばリスク源を避ける構造計画や, 塑性変形能を付与する方策(結果の変更)等により実施される。

一方, 支承部が破壊するリスクに対しては, 支承構造を剛構造にするなど支承部を用いない(リスクの回避)以外, 起りやすさの変更や, 冗長性を

付与する等の具体的な方法が確立されていない。そのため、支承部については、破壊する事象自体をリスク源とみなしてリスク対応を取る方策がとられていると考えることができる。

支承部が破壊することのリスクに対して、起こりやすさの変更や結果の変更などのリスク対応を実現する方法を確立することが、支承部の破壊に関するリスクへの対応方策の合理化に繋がると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、落橋防止システムを中心に H29 道示におけるリスク対応について考察した。H29 道示 V 編を対象とした考察から得られた知見を以下に示す。

- ・リスク対応で考慮されているリスクの〈結果〉は構造レベル（上部構造、下部構造・基礎構造）の機能喪失等（直接的結果）と、ネットワーク機能の喪失等（間接的結果）に区分できる。支承部の機能喪失はリスク源として扱われている。
- ・リスク対応は、状況面の BDBE と状態面の BDBE を軸にマトリックスの形で整理できる。
- ・リスク基準は、次の 4 区分に整理できる；1) 橋全体系が崩壊するリスクに対する基準、2) 上部構造、下部構造・基礎構造の機能喪失リスクに対する基準、3) 上下部接続部（支承構造）の機能喪失をリスク源とするリスクに対する基準、4) 復旧に支障をきたすリスクに対する基準。リスク基準には ALARP の原則に対応する基準が含まれる。

本研究では、試行的に H29 道示 V 編を対象に整理を行った。より一般的な整理のためには、道路橋を対象としたリスクマネジメントにより網羅的にリスクを把握する必要がある。また、本研究では、リスク基準について定量的な検討は行っていない。今後、落橋防止システムを例に、道路橋に求められるリスク対応の水準、すなわち落橋防止システム等に求められる性能の具体化に向けて、体系的整理をさらに進め、併せて定量的な検討を実施する予定である。

**謝辞：**本研究の実施にあたって、土木学会 地震工学委員会 性能に基づく橋梁の耐震構造計画・設計法に関する研究小委員会 耐震構造計画WGにおける議論から多くの示唆を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお、本論文の内容は上記WGにおける合意事項ではありません。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I共通編，丸善出版，2017。

- 2) 国土交通省 道路局 環境安全・防災課 道路防災対策室：道路リスクアセスメント要領（案），2022。
- 3) International Organization for Standardization: ISO2394: 2015(E) General principles on reliability for structures, 2015.
- 4) 本田利器，秋山充良，片岡正次郎，高橋良和，野津厚，室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系—試案構築にむけての考察—，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\_459-I\_472, 2016.
- 5) 武田篤史，西村隆義：橋梁耐震への危機耐性導入に関する一考察，土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 75, No. 4(地震工学論文集第38巻), pp. I\_688-I\_700, 2019.
- 6) 河原井耕介，中尾尚史，大住道生：落橋防止システムにより確保される橋の性能についての基礎的検討，第24回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 13-20, 2021.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善出版，2017。
- 8) 新村出編：広辞苑 第五版，岩波書店，2005。
- 9) International Organization for Standardization: ISO31000: 2018(E) Risk management—Guidelines, 2018.
- 10) International Organization for Standardization: ISO/IEC GUIDE 51:2014(E) Safety aspects — Guidelines for their inclusion in standards, 2014.
- 11) International Organization for Standardization: ISO31000: 2009(E) Risk management—Guidelines, 2009.
- 12) 大澤遼一，本田利器：管理者行動の影響を考慮したインフラ維持管理におけるリスク評価，土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 71, No. 5(土木計画学研究・論文集第32巻), pp. I\_151-I\_161, 2015.
- 13) 原田剛志，小野剛史，倉内文隆，高木朗義：道路ネットワーク防災機能の便益評価に関する研究，土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 73, No. 2, pp. 109-123, 2017.
- 14) 石橋寛機，小島貴之，秋山充良，村越俊一：南海トラフ地震による強振動と津波を受ける道路ネットワークのリスク・レジリエンス評価手法の提案と構造物の補強優先度判定への適用，土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 76, No. 4(地震工学論文集第39巻), pp. I\_32-I\_46, 2020.
- 15) 堀田一吉：巨大災害・巨大リスクと保険制度，保険学雑誌，第620号，pp. 23-42, 2013.
- 16) International Electrotechnical Commission: IEC 31010 Ed. 2.0:2019 Risk management—Risk assessment techniques, 2019.