

道路橋の耐震設計の信頼性確保に向けた検討

大住道生

1. はじめに

道路橋の耐震設計の歴史は、様々な不確実性を克服し、いかに設計に信頼性を確保するか試行錯誤してきた歴史と言ってもよい。本報では、耐震設計において不確実性を考慮する必要性、および信頼性を確保した設計方法の確立に向けた土木研究所における検討状況について報告する。

2. 黎明期の耐震設計とその不確実性

今からちょうど100年前、1923年関東地震により東京と近県では本邦史上最大の災害が発生した。

道路橋の耐震設計について規定されたのは関東地震から3年後の1926年、内務省より出された道路構造に関する細則案である。これは内務省土木研究所第3代所長となった物部長穂を中心として検討された。当時の設計は地震動の作用を水平力によって置きかえる方法（震度法）である。今と違って地震動観測体制は非常に貧弱で、関東地震で観測された震度（地震により生じた加速度の重力加速度に対する比）は0.08、家屋の倒壊率から推定された水平震度は最大0.4程度であった¹⁾。物部はこの誤差が大きいと考えたようであるが、設計で予期すべき震度は0.15～0.4とされた。さらに、許容応力度を60%増しにする等、工費縮減のために大胆に耐震計算法を見直した。この理由を物部は「唯、一に十橋の工費を以て十数橋を架し、百里の工費を以て百数十里の道を通じ、以て一日も早く改良道路網の完成を期し、その運輸上の実能力を発揮せしめん事を希望したるによるものである。」と書き残している。一方で「重要橋又は新形式橋に対しては、竣工後、開通に先立って載荷試験を行う」ことを望んでおり²⁾、橋梁の実耐力に不安を持っていたことを窺わせる。

現在の道路橋示方書³⁾では、関東地震を想定した作用は最大水平震度1.4相当である。また、非線形応答も考慮した動的解析により設計されるこ

とが一般的になっており、許容応力度法ではなく、部分係数法に基づく限界状態設計法が採用されている。現在から見れば物部の不安は尤もで、作用する地震動そのものとしては、関東地震の後、さらに大きなものが発生している。また、当時の設計方法では地震動が橋の揺れによって増幅された力として作用することも考慮されていないし、材料品質、耐力算出方法、構造細目などもその後大きく改善されている。

ただし、現在の技術水準に至るまでには地震被害を繰り返し受け、その度に技術基準を改定してきた歴史があり、それらの上に現在の技術が確立されている。しかしそれでも実現象が全て解明されたわけではなく、不確実性が存在することを前提とした設計を行っている。

3. 耐震設計において考慮すべき不確実性とその対処の考え方

3.1 現在の設計体系と不確実性の存在

道路橋の耐震設計は、様々な不確実性を考慮した上で所要の信頼性で要求性能を満足するように行われる。その不確実性への対応は、路線計画の段階から始まる。図-1に橋の形式選定の流れを示す。道路橋では、道路予備設計、つまり路線計画や橋梁概略計画の段階で、起震断層・断層変位、津波、土砂・斜面災害等の地震に関するリスク要因を避けられるかどうかから始まる。これらはその影響範囲、影響程度に不確実性が大きいとともに、橋に及ぼす影響が大きくなる可能性があり、構造諸元を決める段階になってから対応するのは、性能を確保することが難しいリスク要因である。

次に橋の形式選定のための基本条件として、調査、地震の影響、維持管理、施工、新材料等の不確実性がある⁴⁾。一般に計画段階で可能な調査は限られているが、特に架橋位置周辺の斜面等の安定、軟弱地盤、地盤の液状化・流動化の発生、地盤特性の急激な変化や基礎地盤の変状等の地盤条

件は橋の耐震性に大きな影響を及ぼすものである。また起震断層が近傍にある場合には橋に作用する地震動が大きくなり、断層変位の影響を受けることも考えられる。これらは設計上の不确实要因となるため、計画段階で避けることが望ましいが、道路は線状の構造物であり、地点間を結ぶことや沿道利用がその目的であること、土地利用や耐震性以外の要求事項もあることから、必ずしも避けることはできない。また、仮に避けるつもりでも、事前調査で分かることは限られていることを踏まえれば、不确实性は残ることになる。従って、これらの要因の影響を受けにくい構造形式を選定することが求められる。

維持管理も耐震設計上の前提条件である。それは、維持管理により部材の劣化を一定程度に抑えられること、地震後変状があれば速やかに検知し対策できることを前提として設計されているからである。しかし、現状の点検維持管理は事後保全となっている例が多く、特に支承部などは耐震性確保の不确实要因となっていると考えられる。

施工も耐震設計上の前提条件である。設計通りに施工できてこそその性能であるが、以前は、設計通りに鉄筋が入らない、施工誤差により設計通りに設置できないという話を聞くことがあった。そのような不确实性を低減するために、施工しやすい設計を行うことも重要である。

図-2に橋の耐震設計の流れを示す。入力地震動はレベル1地震動、レベル2地震動（以下「L2地震動」という。）の2段階が規定されており、レベル1地震動は確率的に考慮された地震動、L2地震動は

橋に被害をもたらした地震動として、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震などの観測記録を元に与えられている。しかし、現実には橋に作用する入力地震動は未知であり、地震動強度、周期特性、位相特性、継続時間それぞれが仮想でしかない。

耐震設計においてはこれらの地震動をモデル化された橋に作用させるが、橋は3次元であるのに耐震設計では1次元で地震動を作用させているのが現状であり、橋の特徴に応じてその作用のさせ方を考慮する必要があるが、不确实性は残ることとなる。

橋の構造特性として、部材の質量分布、剛性、耐荷力、変形能、減衰等に応じてモデル化に反映することになるが、解析手法に応じて簡素化する分、実分布は省略され誤差が生じる。

地盤特性も簡易にモデル化されており、実際の状態からは乖離がある。

応答計算は振動単位系毎にモデル化されるが、振動単位系の設定の仕方、モデル化の方法や運動方程式の解法など、様々な簡素化をする必要があり、その分実現象とは乖離が生じている。

3.2 不确实性の種類－偶然的な不确实性と認識論的不确实性

不确实性の捉え方について、Ang and Leonはその原因から偶然的な不确实性と認識論的不确实性に分類している⁵⁾。偶然的な不确实性は、偶然性又は本来的に存在するばらつきによる不确实性と定義される。Angらはさらに、「厳密に言えば、偶然性は自然のありさまであり、そこに不确实性は含まれない」が、一方で確定的でない事象のため、

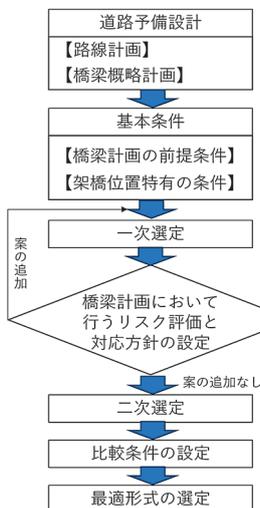


図-1 橋の形式選定の流れ (文献⁴⁾を参考に作成)

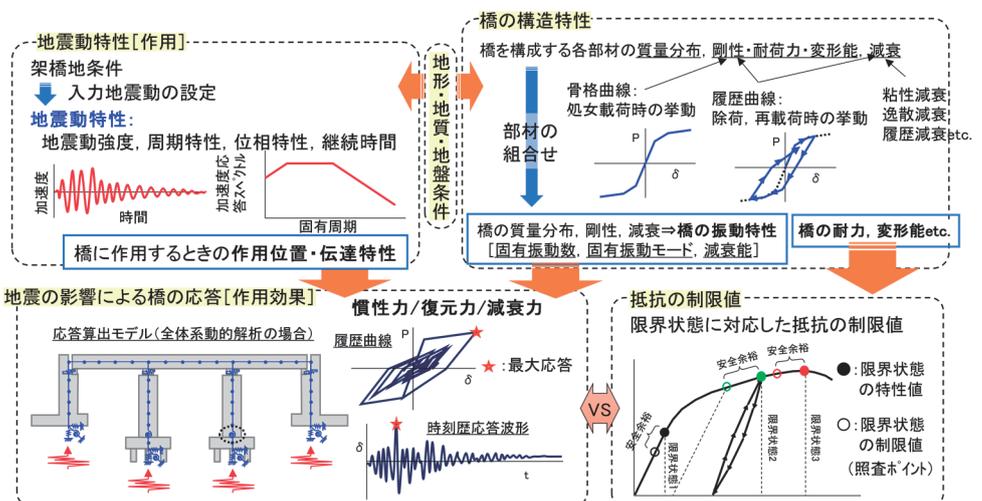


図-2 橋の耐震設計の流れ

確率として記述されるものであるとしている。従って、材料強度やヤング率などの物性値は本来的に存在するばらつきに起因して統計的にばらつくため、設計上は部分係数によってその不確実性に対処することができると考えられる。

一方、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。従って、設計において偶然的な不確実性に分類されることとして確率的に扱っている事象であっても、その算出結果には誤差が含まれ得るし、そもそも確率的に扱うことのできない不確実性に対しては、その他の方法で安全を確保しなければならないことになる。

3.3 不確実性の種類に応じた安全性確保の考え方

道路橋示方書においては、耐震設計上考慮すべき様々な不確実性に対して、設計の信頼性確保のために種々の方策が用いられている。確率論的に扱える各種のばらつきに対しては部分係数が与えられているが、確率論的に扱えない不確実性に対しては、設計として安全側になるように、照査項目に応じて様々な設計上の仮定を置くことによって対応しようとしている。ここでは確率論的には扱えない不確実性に対して、いくつか例を挙げてその方法を紹介する。

(1) L2地震動

レベル1地震動は確率的な評価も踏まえて規定されており、諸外国でもそのように与えられることが多いが、道路橋示方書においては、L2地震動は橋に被害をもたらした地震動として確定論的に与えられている。それは、L2地震動に相当する地震の発生は極めて稀で、統計処理に足る記録がなく、活断層の位置や、同時に活動する区間、破壊過程等の不確実性に起因する地震動のばらつきに対し、必要な評価方法の信頼性が十分でないことによる。

(2) 液状化

液状化については、その発生の推定に不確実性が大きいだけでなく、発生すると急激に地盤の抵抗が低下する。このような事象に対しては、発生する場合としない場合の両方に対して照査計算を

行い、両方に対して安全を確保するという方法が有効であると考えられている。

(3) 塑性化位置

現在の道路橋の設計において、最も一般的な橋梁形式である桁橋では、大規模地震に対しては橋脚基部において塑性化させることで合理的に設計する手法が一般的である。確実に橋脚基部で塑性化するように設計できれば良いが、そこにも不確実性がある。そこで、万一橋脚基部が塑性化するより先に基礎が塑性化した場合にも、致命的な損傷とならないように、基礎が脆性的な破壊とならないような構造細目上の配慮がなされるように規定されている³⁾。

(4) 落橋防止システム

上記のように様々な不確実性を考慮して耐震設計を行った上で、それでも過去の地震で支承部において橋が損傷したことにより致命的な被害を受けた事例に鑑み、道路橋示方書においては、その破壊を想定したとしても、上部構造が容易には下部構造から落下しないように、適切な対策を別途講じることが規定されている³⁾。

4. 耐震設計の信頼性確保に向けた取組み

4.1 材料特性や地盤特性のばらつきを考慮した応答算出の不確実性

材料特性や地盤特性のばらつきが、確率分布によって与えられるものとしたときに、道路橋に生じる損傷パターンについてその割合を試算した結果を図-3に示す。ここではⅡ種地盤用のL2地震動標準波を確定的に与え、上部構造が積層ゴム支承とRC橋脚によって支持されているモデルを用い、道路橋示方書に基づき倒壊しないように設計した。材料特性として、橋脚の鉄筋のヤング係数、鉄筋の降伏耐力、コンクリートの圧縮強度、上部構造の死荷重、積層ゴム支承のせん断剛性を正規分布として与えた。また、地盤特性として、基礎杭の軸方向ばね定数、水平方向地盤反力係数を対数正規分布として与えた。その結果、材料特性によって、結果への寄与度は異なり、全体としては、設計未満の損傷に留まる割合が半数近くあり、設計を超え崩壊するシナリオとなる割合は4%と設計上の想定である5%を下回る結果となった⁶⁾。確率的に取り扱えるばらつきに対する設計法としては妥当であると考えられる。

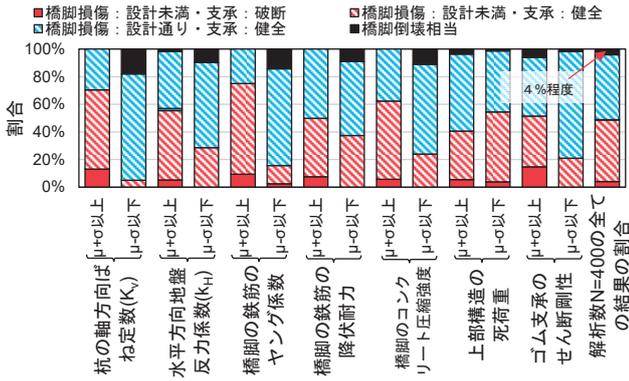


図-3 材料特性や地盤特性のばらつきが道路橋に生じる損傷パターンに及ぼす影響（文献6）を編集

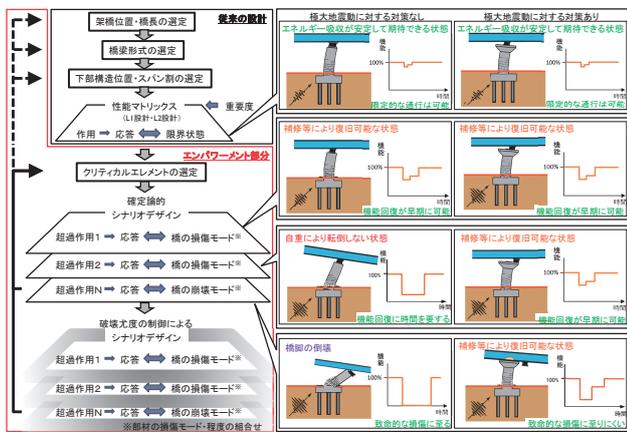


図-4 シナリオデザイン設計法の概念図（文献7）に加筆

4.2 超過外力に対するシナリオデザイン

3.3で述べたようにL2地震動は確定論的に与えられているが、今後橋にL2地震動を超える地震動、津波、地盤変状など、地震に伴って発生し橋に致命的な影響を及ぼすおそれのある事象が作用する可能性も排除できない。

そこで筆者らはシナリオデザイン設計法（図-4参照）を提案している。シナリオデザイン設計法では、外力の大きさを予め想定できないという認識論的不確実性が大きな状況において設計を行う方法論を提示し、超過地震動に対する具体的な対策も提案している7)。橋の損傷モードに着目し、仮に外力を漸増させると、橋の構成部位の中で耐力が相対的に小さい部位から順に損傷が進展する損傷シナリオを描くことができる。外力を一定以上大きくすれば崩壊するが、その過程は部材間の耐力の相対的な大小によって決められるため、より望ましいシナリオとなるように耐力を設定すればよいというものである。その際、できるだけ不確実要因を低減し、計算過程に含まれる様々な不

確実性を考慮した上で、当てが外れる場合への配慮も必要である。

5. まとめ

本報では、道路橋に対する耐震設計に関して様々な不確実性があり、それぞれの不確実性をどのように分類し、どのように対処すべきなのかを論じた。しかし、道路橋の耐震設計の信頼性確保には道半ばである。道路橋のように、大規模地震の後であってもその機能が維持されることが求められる社会インフラにあつては、様々な不確実性の影響を考慮して設計を行うとともに、機能回復性を高める対策を講じることが信頼性確保につながると考えられる。これまで多くの地震被害を受け、その知見を反映して技術は進歩してきたが、数百年から数千年と言われる巨大地震の再現期間に比べて、耐震設計の歴史は百年足らずである。今一度謙虚になって研究開発に励む必要があると考える。

参考文献

- 1) 物部長穂：耐震に就いて、道路の改良、第6巻第9号、pp.22～29、1924
- 2) 物部長穂：立案者の見たる橋梁細則案、道路の改良、第12巻第1号、pp.127～136、1930
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2017
- 4) 国土交通省道路局国道・技術課、他：道路橋の設計における諸課題に関わる調査（2018-2019）、国土技術政策総合研究所資料第1162号、2021
- 5) 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.11, pp.19-31, 2005
- 6) 小林巧、河原井耕介、大住道生：材料特性や地盤特性のばらつきが道路橋の耐力階層化構造の崩壊シナリオに与える影響に関する解析的検討、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.79（地震工学論文集第42巻）掲載決定、2023
- 7) 大住道生、中尾尚史、石崎寛史、庄司学：破壊強度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.77（地震工学論文集第40巻）、No.4、pp.I_360～I_372、2021

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