

限界状態設計法とはどのような設計法なのか？

福井 次郎

正会員 工修 サンコーコンサルタント株式会社 技術本部（〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9）

1. はじめに

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震における東京電力の福島第一原子力発電所の事故をきっかけに、基準地震動・津波を超えるなどにより「安全性」が損なわれた場合に対する新たな性能として「危機耐性」という概念が提案されている¹⁾。この定義から「危機耐性」は、基準以下の地震動・津波に対して「安全性」等の性能を確保することを規定した現行の耐震設計法の体系と整合した概念と位置づけられる。

現行の耐震設計法は、平成8年（1995年）兵庫県南部地震の被害を受けて道路橋示方書耐震設計編²⁾（以下、道示耐震編）等に採用されたいわゆる多段階設計、性能規定型設計法で、 L_1 、 L_2 設計地震動に対し、構造物の重要度に応じて耐震性能1,2 または3を確保することを目標としている。しかし、本設計法では設計地震動および耐震性能の数や大きさ、また両者の組合せの根拠は明らかではなく、概念が不明確である。したがって、性能規定型設計法と整合のとれた危機耐性の概念を確立する前に、性能規定型設計法の概念、定義を明確にする必要がある³⁾。

「性能」とほぼ同義語として扱われる「限界状態」をベースとする限界状態設計法は性能規定型設計法と関連性があり、その概念、定義を明確にする上で参考になると思われるが、限界状態設計法の概念、定義も極めて不明確である。

本論文では、限界状態、性能、設計地震動等の概念およびそれらの関係を検討し、限界状態設計法とはどのような設計法なのか、その概念、定義、取り扱うべき内容等を明らかにする。その結果、限界状態設計法が、実は性能規定型設計法と同じものであること⁴⁾、その概念を拡張した延長上に危機耐性という概念があることを示す。

2. 現行の限界状態設計法の定義と問題点

限界状態設計法⁵⁾は提唱されてから50年以上たち、さまざまな解釈がなされているが、土木学会では包括設計コード⁶⁾および性能設計における土木構造物に対する作用の指針⁷⁾で、「照査すべき限界状態を明確にした設計法。照査フォーマットとして信頼性理論のレベルIにあたる部分安全係数設計法を採用することが殆どであるため、部分安全係数設計法が限界状態設計法と同義で使われることもある」と定義している。

我国で用いられている許容応力度設計法は時代遅れで、諸外国で既に導入されている限界状態設計法に移行すべきだ、ということで、限界状態設計法が引合いに出されることがあるが、ここでの限界状態設計法は、上記の部分安全係数設計法を指している。しかし、「限界状態」と「部分安全係数」は異なる概念であり、限界状態設計法を部分安全係数設計法と同義で用いるのは誤用である。

したがって、限界状態設計法の本来の定義は上記説明の「照査すべき限界状態を明確にした設計法」と考えられるが、この説明は極めて抽象的である。土木学会の耐震設計ガイドライン(案)⁸⁾では、「構造物の限界状態を定義し、設計耐用期間中に作用する荷重などの外的作用に対して、構造物が所要の安全性を有して限界状態に至らないことを照査する設計法」ともう少し詳しく定義されている。しかし、限界状態が理論的、客観的に定義されるのか、または設計者や構造物の管理者が任意に定義できるのかが不明であるし、そもそも限界状態に至らないことで照査できるということが証明されていない。

図-1 下段の図は、構造物に作用する荷重（地震動） P と変形 δ の関係を模式的に表したものである（図には後の説明のため、使用限界を表示している

が、ここでは無視する）。十分な変形性能を有する構造物の荷重－変形関係は、一般的にはこの図に示すように、荷重の増加に対し、初期状態では弾性（線形）挙動であったものが、降伏点を超えると変形の増加率が大きくなり、最大耐力に達した後、耐力が低下して破壊に至るという連続的な挙動をする。したがって、構造物の挙動を正確に把握しようとする、この荷重－変形曲線上のすべての点の状態を把握する必要がある。しかし、設計では荷重－変形曲線上のすべての点ではなく、曲線上の特定の状態のみを照査している。この状態が限界状態であり、限界状態でのみ照査すれば十分であることを証明する必要がある。しかし、荷重－変形曲線を見ただけでは曲線上のどの点で照査できるのか、またできるとすれば、その個数、大きさはどのように決定されるのか明らかでない。そこで、性能という概念を定義、導入する。

土木構造物、例えば道路橋は供用期間中、通行者が安全かつ快適に通行でき、所要の便益を得ることを目的に設計、建設するのであるから、地震が発生して構造物に被害が生じた場合、そのまま使用できる状態であるかどうかは、耐震設計上照査すべき最も基本的な性能で、使用性（道示耐震編では、耐震性能1）と定義できる。

図-1中段の図は、性能が確保されている状態と確保されていない状態を下段の図の変形の進行と連動して模式的に表したものである。図に示すように変形の初期段階では使用性が確保されている状態にあったものが、変形が増加していくと使用性が確保されない状態に移行していく。使用性が確保されている状態から確保されない状態への移行する限界点の使用限界状態、一般には弾性限界、降伏強度を用いて定量的に決定することができる。この使用限界状態と地震荷重が作用したときの構造物の応答値とを比較することにより、構造物の使用性が確保されているかどうかを定量的に照査することができ、荷重－変位曲線上のすべての点ではなく、使用限界状態で照査できることが証明された。

図-1上段の図は、地震による被害で使用性が失われた構造物を使用できる状態に戻すために必要な費用（以下、被害費用）を示したものである。使用限界状態に達していない場合、この費用は発生しないが、使用限界状態を超えて使用性が失われた場合、再構築費および再構築期間中構造物が使用できないことによる便益の減少額が被害費用となる。被害費用は、後述する費用便益分析により設計地震動の大きさを決定する際に用いられる。

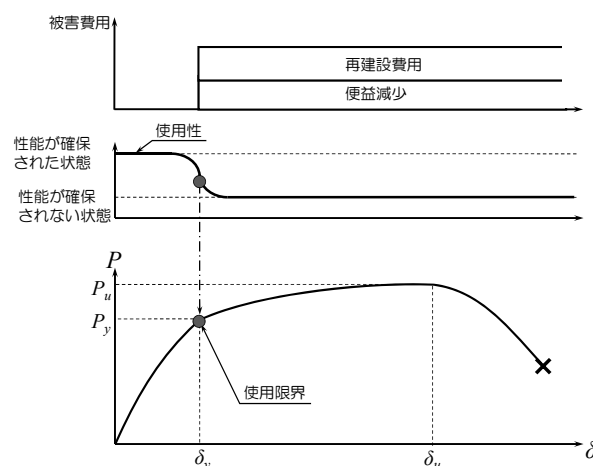


図-1 荷重－変形関係と性能、限界状態、費用（その1）

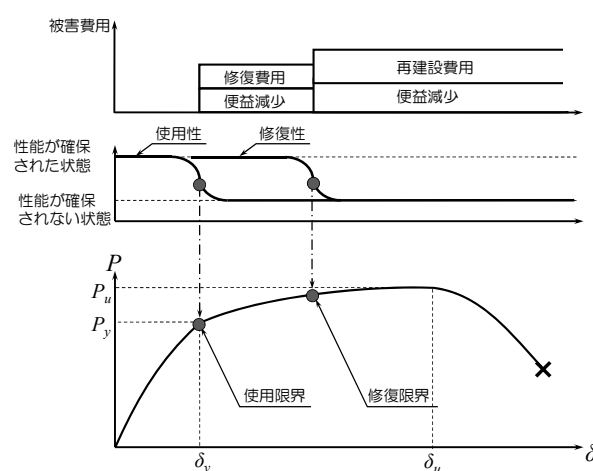


図-2 荷重－変形関係と性能、限界状態、費用（その2）

地震によって構造物が使用限界状態を超え、そのままでは使用できなくなった場合、上記のように再構築するのであれば、使用限界状態以外の限界状態に対する照査は不要である。しかし、土木構造物では使用限界状態、すなわち降伏強度を少し超える程度の損傷であれば、適切な工法によって妥当な工期、工費で補修・補強（修復）することが可能であり、修復して再使用した方が経済的な場合が多い。このような場合は再構築ではなく、修復して使用し続ける方針で設計、運用した方が合理的である。しかし、損傷度がある限界を超えて大きくなると修復することが技術的、経済的に困難、あるいは不可能となる。したがって、使用限界状態を超えた構造物を修復して使用の方針で設計する場合、修復できる状態であることを示す修復性（同、耐震性能2）という性能を定義し、それが確保されている限界の状態、すなわち修復限界状態以下であることを照査する必要がある。この場合、図-1は図-2のように改められ、

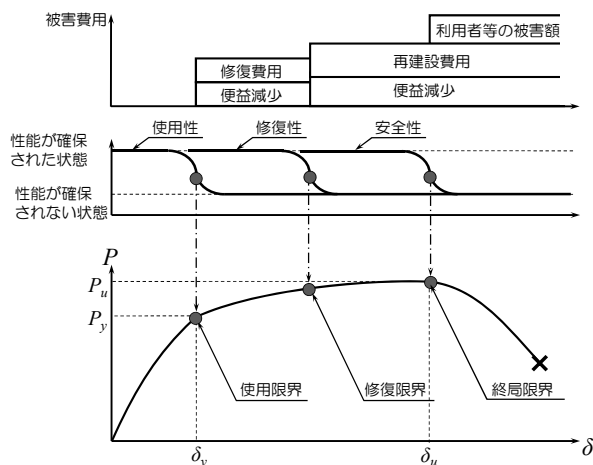


図-3 荷重－変形関係と性能，限界状態，費用（その3）

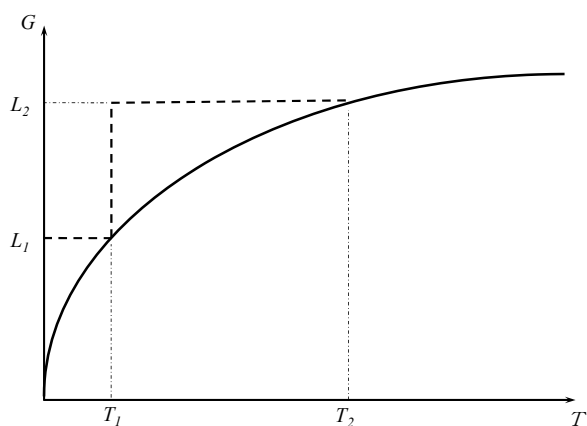


図-4 地震動と再現期間の関係

使用限界状態を超え修復性が確保されている状態では、修復費用と修復期間中の便益の減少額が被害費用となり、修復限界状態を超えて修復性が失われた状態では、再構築費および再構築期間中の便益の減少額が被害費用となる。

修復限界状態を超え、修復による再利用が不可能となった場合、構造物を使用できる状態に戻すためには再構築以外に選択肢がなく、構造物の損傷度が破壊に近いかどうかは関係ない。しかし、構造物が破壊することによって、構造物の利用者や第三者の生命、財産に損害を与える恐れがある場合（例えば橋梁の場合、落橋によって通行者の生命を損なうような場合）、構造物が破壊に達していない状態であることを示す安全性（同、耐震性能3）という性能を定義し、それが確保されている限界の状態、すなわち終局限界状態以下であることを照査する必要がある。この場合、図-2は図-3のように改められ、終局限界状態を超えた場合の被害費用は、修復限界状態を超えた場合の費用に利用者等の被害額が加わる。

これら以外にも、地震後の救援活動に利用するために短期間で機能を回復できる性能や、疲労損傷に対する性能、環境作用の影響に対する性能等が考えられているが、これらは上記の3つの性能の副次的な性能、あるいは特定の損傷要因に対する性能と位置づけられる。

上記の説明は、便益を得ること、利用者や第三者の生命、財産に損害を生じさせないことを目的に設計するという観点から、使用性、修復性、安全性という性能が定義できること、各性能が確保されていることを使用限界状態、修復限界状態、終局限界状態で照査できる、あるいは照査しなければならないことを明らかとしたもので、従来の限界状態設計法の定義に対する理論的な裏付けとなるものである。しかし、これだけでは限界状態設計法が完全な形の設計法であるとは言えない。

耐震設計を含む構造設計は、端的に言えば構造物に作用する荷重と抵抗の大きさを比較し、所要の性能が確保されていることを確認する作業である。したがって、照査に用いる荷重と抵抗の両方を同じ考えに基づき設定する必要がある。例えば今日、荷重抵抗係数設計法と呼ばれる設計法は当初、荷重係数設計法と呼ばれ、構造物に作用する荷重の変動性を評価する荷重係数を定義、導入した設計法であった。しかし、抵抗の変動性も同様に評価する必要があることから、抵抗係数の定義を追加し、名称も荷重抵抗係数設計法と改められた。

限界状態設計法はこれまでその名称に拘泥し、限界状態（抵抗）にのみ着目し、設計に用いる荷重を設定していなかった。しかし、完全な形の設計法とするには、限界状態の設定と同じ考えに基づき設計に用いる荷重（設計地震動）を設定し、さらに両者の組合せを設定する必要がある。

3. 限界状態設計法で設定する設計地震動と限界状態の組合せ

図-4 は地震動の大きさ G と地震の再現期間 T の関係を模式的に示したものである。もし、破線のように、再現期間の増加に応じて、地震動の大きさが段階的に増加していくのであれば、道示耐震編のような2段階の設計地震動の設定は可能だろう。しかし、実際は実線のように地震動の大きさは再現期間の増加に応じて連続的に増加していき、発生確率の差はあるが、構造物の供用期間中あらゆる大きさの地震が発生する可能性がある。したがって、構

造物が所要の性能を有していることを明らかにしようとする、全ての大きさの地震動に対して照査する必要がある。しかし、設計では離散的な大きさの設計地震動で照査しており、設計地震動のみで照査すれば十分であることを証明する必要がある。

構造物の荷重－変形関係も図-1 に示したように連続的に変化しているが、性能という概念を定義し、性能が確保されている状態から確保されない状態へ移行する限界点を限界状態と定義することにより、限界状態の大きさを離散的、定量的に設定することができた。しかし、地震動－再現期間関係ではそのような概念を定義することができない。

設計地震動は単なる地震動ではなく、先頭に「設計」という名称がついているように、構造物を継続的に使用して便益を得るために設計することを前提に設定する地震動であり、構造物に関する情報、条件を基に従属的に設定することしかできない。

そこで、まず性能、限界状態が3段階であることから設計地震動も3段階であることを証明する。

あらゆる大きさの地震動に対して使用性を確保した構造物を設計することは技術的にも経済的にも不可能であり、使用性を確保すべき最大の地震動が存在する。それを L_I 地震動とすると、無震動の状態から L_I までの間の全ての地震動に対して使用性が確保されていることを照査する必要がある。しかし、 L_I 以下の地震動に対する構造物の応答は L_I に対する応答より小さいので、 L_I に対して使用性が確保されていることが照査できれば、 L_I 以下の地震動に対しても使用性が確保されていることは明らかであり、 L_I を使用性を照査するための設計地震動と定義できる。また、 L_I に対して使用性を確保する場合、応答が図-1 の使用性が確保されている領域のどこでもよいのではなく、荷重と抵抗の変動に応じた必要最小限の余裕度を持って使用限界状態に近づけることによって経済的な設計とすることができる。したがって、限界状態と設計地震動を用いた照査は、性能が確保されていることを確認するだけでなく、経済的な設計を行うための作業ともいえる。

以下、同様に修復性、安全性に対する設計地震動も定義され、設計地震動も性能、限界状態と同じ3段階であることが証明できる。これ以外の設計地震動が設定されても、3段階の設計地震動との大小関係からどの性能が確保されているかが自動的に決定できる。逆に設計地震動が3より少ないと、本来照査すべき性能、限界状態が照査できない。

道示耐震編等、現行の耐震設計基準は性能、限界状態と設計地震動の数が異なっており、早急に第3

の設計地震動を設定すべきであると筆者は考える。

設計者や構造物の管理者が設計地震動の大きさを任意に設定できるのであれば、設計地震動の大きさを小さくすることにより初期建設費用を抑えることができる。しかし、設計地震動を小さくすると、地震が発生した場合、限界状態を超えて図-3 に示す被害費用が発生し、初期建設費用を抑えた以上に被害費用が増加する可能性がある。したがって、経済的な設計を行おうとすると、初期建設費用と被害費用の和（総費用）が最小となるように設計地震動の大きさを設定する必要がある。そこで、初期建設費用と被害費用の和が地震動の再現期間によってどのように変化するかを検討する。この検討は、一般的な費用便益分析と同じである。ただし、被害費用は限界状態を超えた場合にのみ発生するので、リスクマネジメントの概念におけるリスクと同じ、期待値で算出、評価する必要がある。

総費用は次式で表される。

$$C_0 = C_{I,T} + N_T \cdot C_R \quad (1)$$

ここに、

C_0 : 総費用

$C_{I,T}$: 再現期間 T 年の地震動に対する初期建設費用

C_R : 被害費用

N_T : 設計供用期間中に再現期間 T 年以上の地震が発生する回数の期待値

T : 地震の再現期間

T が長くなると地震動が大きくなり、構造物の強度を大きくする必要があるため、 $C_{I,T}$ は T に対して単調増加する。一方、 N_T は T に逆比例し、単調減少する。

図-5は、総費用 C_0 と地震の再現期間 T の関係を表したものである。図中、右上がりの曲線が $C_{I,T}$ 、右下がりの曲線が $N_T \cdot C_R$ 、放物線状の曲線が C_0 で、 C_0 が最小となる再現期間 T_{opt} が存在する。したがって、再現期間が T_{opt} の地震動を基に、設計地震動を合理的に設定できることが分かる。

図-3に示した被害費用のうち、修復費用、再建設費用は構造物の諸元、施工条件等が同じであれば変わらない。しかし、修復または再構築による便益減少や利用者等の被害額は構造物の種類や利用状況によって大きく変化する。このため、その大きさに応じて設計地震動の大きさを変化させる必要がある。

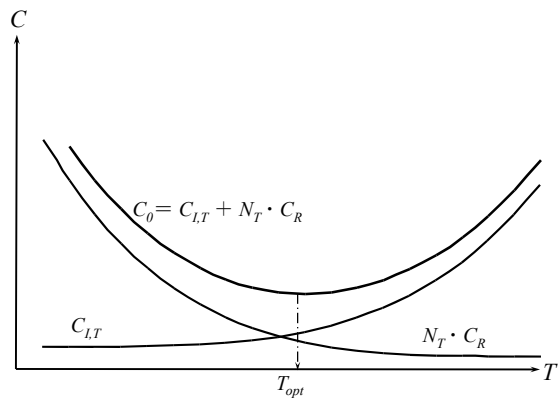


図-5 総費用と再現期間の関係

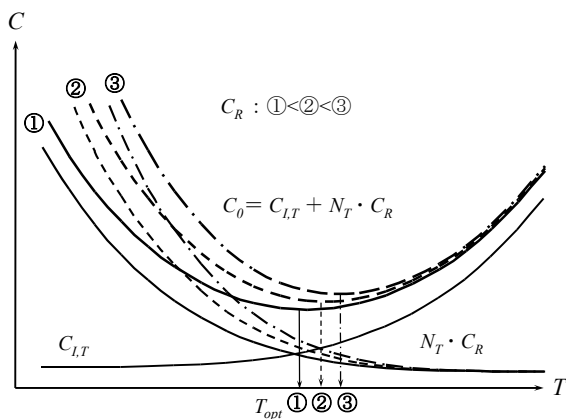


図-6 被害費用による総費用と再現期間の関係の変化

図-6は、総費用 C_0 と地震の再現期間 T の関係が被害費用 C_R の増加に応じてどのように変化するかを示したものである。 C_R が増加すると、 $N_T \cdot C_R$ を示す曲線が①から、②、③へと上昇していき、 C_0 を示す放物線の最小となる T_{opt} がそれに応じて大きくなることが分かる。ただし、 C_R の大きさを定量的に算出するための手法は確立されておらず、また、そのためのデータも十分な精度で得られていない。

このため、現行の耐震設計基準では C_R と密接な関係にある要因を基に重要度という指標を定義し、重要度に応じて設計地震動と限界状態の組合せを変えている。例えば、道示耐震編では、1)地域の防災計画上の位置づけ、2)他の構造物や施設への影響度、3)利用状況及び代替性の有無、4)機能回復の難易、を考慮してA種の橋とB種の橋に区分している。

以上の検討結果を基に、限界状態設計法で設定する設計地震動と性能（限界状態）の組合せを道路橋を例として図-7に示す。また、参考のため、図-8に性能マトリクス形式で表した道示耐震編における設計地震動と性能の組合せを示す。

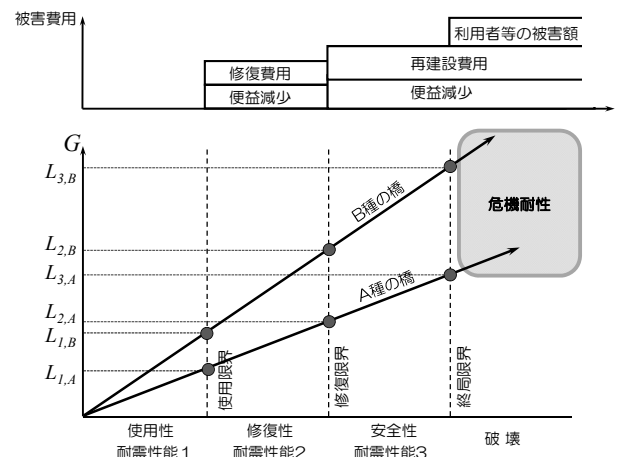


図-7 限界状態設計法における設計地震動と性能（限界状態）の関係

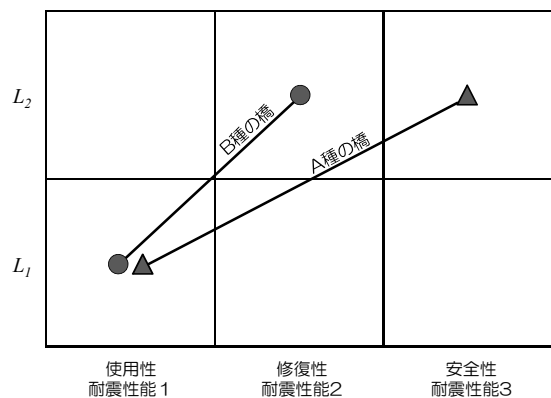


図-8 道示耐震編における設計地震動と性能（限界状態）の関係

図-7と図-8は、表示方法は異なるが、その内容は同じで、限界状態設計法が性能規定型設計法と同じものであることが分かる。ただし、現行の耐震設計基準とは以下の点が異なる。

- ① 設計地震動と性能の組合せは、現行の耐震設計基準では 2×3 であるが、限界状態設計法では 3×3 である。
- ② 現行の耐震設計基準では、設計地震動を先に設定した後、構造物の重要度に応じて性能を設定するのに対し、限界状態設計法では性能を先に設定した後、被害費用の大きさに応じて設計地震動の大きさを設定する。この結果、道示耐震編ではA種の橋の安全性照査に用いる設計地震動とB種の橋の修復性照査に用いる設計地震動は L_2 地震動で同じ大きさであるが、限界状態設計法では図-7に示すように、 $L_{3,A}$ と $L_{2,B}$ が同じ大きさになるとは限らない。

4. 限界状態設計法と危機耐性の関係

3. で述べたように、 L_3 地震動は、費用便益分析により設定した地震動であり、図-4に示した地震動-再現期間関係における最大地震動ではない。したがって、 L_3 以上の地震動が発生する確率は小さいがゼロではない。

一方、 L_3 地震動に対して、構造物は所要の余裕度を持って終局限界状態に達しないように設計しており、この余裕度を無視して考えると、 L_3 以上の地震動に対して構造物は必ず破壊する。

これまで設計地震動以上の地震動により構造物が破壊した場合、「想定外」という表現が用いられているが、上記のように L_3 以上の地震動に対して構造物が破壊することは確実であるので、「想定内」と解釈、表現した方が正確である。ただし、破壊することが想定内だからといって何の対策もしなくてよい訳ではなく、何らかの対策を行うことによって、被害費用を低減すること、特に人的被害を低減することが要求されている。この機能が危機耐性であると考えられる。したがって、図-8のハッチングした領域が危機耐性が取り扱う範囲と考えられ、限界状態設計法、性能規定型設計法との関係が明確になる。

ただし、危機耐性の具体的な定義、内容はまだ不明確な部分があり、引き続き検討を行い、確定していく必要があると考えられる。

例えば、1. で述べたように危機耐性は、「新しい性能」として提案されている。しかし、使用性、修復性および安全性は構造物が確保すべき必須の性能で、それが確保できなくなる限界状態を用いて照査するのに対し、危機耐性は上記のように構造物が破壊した場合に被害費用の低減を図ることを目的としたオプション的な機能で、同じ「性能」といっても、その内容、性格が異なり、その違いを明確にする必要がある。

また、危機耐性の機能として、被災後に短期間で構造物を復旧し、供用を再開するための機能や、冗長性を有するインフラネットワークとしての機能が提案^{例えば9)}されているが、これらの機能は既にマニュアル等^{例えば10)}に取り入れられたものもあり、これらとの整合性を明確にする必要がある。

危機耐性の具体的な例として、構造物が終局限界を超えて倒壊する場合、倒壊する方向をコントロールする機構の付与や倒壊の広がりコントロールする機構の付与が提案^{例えば11)}されている。しかし、破壊、倒壊する直前の構造物の挙動は非常に不安定であり、確実にコントロールすることが可能かどうか

を確認する必要がある。また、挙動が不安定な状態でも筐子トンネルの天井板が、たった1本のボルトの抜け落ちによって、約140mにわたって連鎖反应的に落下¹²⁾したような破壊形態を避けることも、危機耐性で取り扱う機能、性能ではないかと考えられる。このため、構造物の破壊直前の挙動を明らかにすることが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)，2013.7.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996.12.
- 3) 福井次郎：設計地震動と限界状態の組合せの設定方法を規定した新たな性能規定型設計法の提案，第34回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，A12-587, 2014.10.
- 4) 福井次郎：道路橋基礎の性能設計，基礎工，2001.8.
- 5) CEB：Recommendations for an International Code of Practice for Reinforced Concrete，1964.
- 6) 土木学会：包括設計コード(案)，2003.3.
- 7) 土木学会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，2008.3.
- 8) 土木学会：土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)，2001.9.
- 9) 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(1) 試案構築に向けての考察，第35回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，A11-824, 2015.10.
- 10) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震前対策編)平成18年度改訂版，2006.9.
- 11) 野津厚，室野剛隆，本山紘希，本田利器：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系(2) 鉄道・港湾構造物の設計指針と「危機耐性」，第35回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，A11-848, 2015.10.
- 12) 国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，2013.6.