

限界状態設計法と性能設計法に基づく 設計荷重の設定方法に関する一考察

福井 次郎¹

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

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）で、東京電力の福島第一原子力発電所が津波によって被害を受けたことについて、「想定外」と説明がなされ、注目されている。ここでの「想定外」という用語は、構造物（原子力発電所）の性能を確保すべき状態（抵抗）の照査に用いる荷重（津波高さ）の設定が適切でなかったことを意味している。

それでは、原子力発電所以外の構造物の耐震設計基準ではどうなっているかといえば、設計荷重は予め決められており、設計荷重の設定方法を規定しているものはほとんどない。このため、設計荷重の設定が適切であるかどうかは不明である。現行の設計基準より先進的で、今後移行が考えられている限界状態設計法でも構造物が確保すべき状態は限界状態と定義しているが、設計荷重の設定方法については、考慮されていない。

本報文では、限界状態設計法に、性能設計の概念のひとつである性能マトリクス²⁾の考え方を導入し、荷重と抵抗の関係を明確にするとともに、リスクマネジメントの考え方に基づく設計荷重の具体的な設定方法について考察する。

2. 設計荷重設定の現状と課題

図-1は、設計法の教科書には必ず載っている設計で考える荷重と抵抗の関係を示したものである。この図は、荷重、抵抗にそれぞれ変動性があることを考慮し、抵抗の特性値（設計値）Rは、荷重の特性値（設計値）Sに対して所要の余裕度を持たせて設定する必要があることを意味している。現行の耐震設計で用いられている許容応力度設計法や部分安全係数設計法、荷重抵抗係数設計法は、これらの変動性の評価方法、照査式の表記方法（フォーマッ

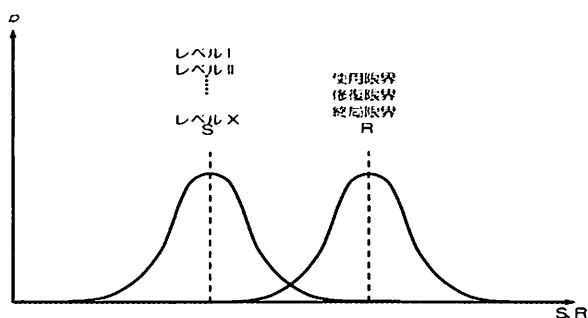


図-1 設計で考える荷重と抵抗の関係

ト)に着目した設計法である。しかし、図中に示すように、荷重および抵抗の特性値については、レベルの異なるものがいくつかあるが、これらの設計法では、それぞれの定義、設定方法および組合せについては考慮されていない。

限界状態設計法は、「照査すべき限界状態を明確にした設計法」¹⁾と定義されており、Rの定義、設定については着目しているが、Sについては着目していない。また、どのレベルのRとSを組合せるかについても着目していない。

一方、「限界状態」とほぼ同義語として用いられている「性能」をベースとした「性能設計」には、様々な考え方や概念があるが、SEAOCがVision2000²⁾で提案した性能マトリクス（Performance Matrix）は、構造物の各種性能と荷重状態の関係を表したものである（図-2参照）。

性能マトリクスは、ロマ・プリータ地震(1989)、ノースリッジ地震(1994)によって多くの建物が被害が生じた際に、建物の所有者が意図していた耐震性能と設計者が目指していた耐震性能が大きく異なり、両者間のコミュニケーションにギャップがあったことが明らかになったことを教訓に、構造物がどのような性能を満たすように設計されているのかを一般人にも理解できるように明示、説明する必要があるとの要請が高まったことを背景に提案されたとき

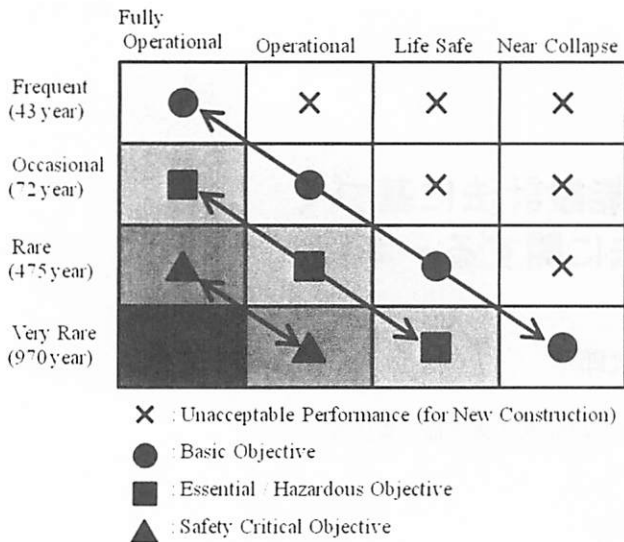


図-2 性能マトリクス

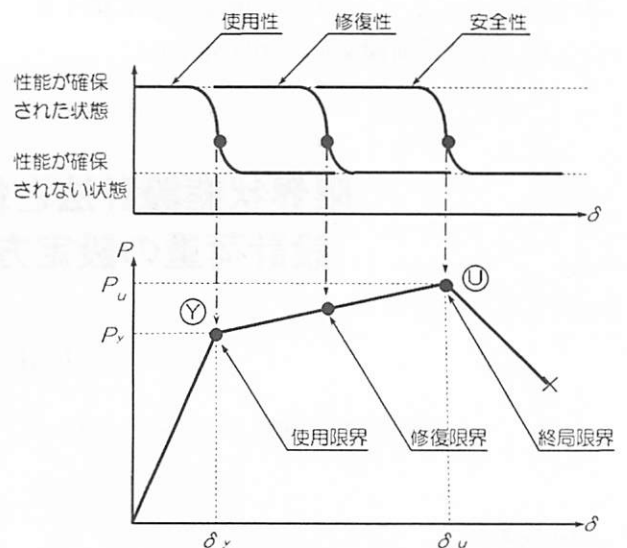


図-3 性能と限界状態の定義、関係

れている³⁾。このことは、福島原発事故で「想定外」が問題となっている状況と全く同じである。そこで、限界状態設計法に性能マトリクスの考えを取り入れる、あるいは統合することにより、どのように設計荷重を想定しているかを説明できる設計体系を確立できると考えられる。

性能マトリクスは、設計で想定する荷重と抵抗の組合せを説明したものであるが、その中で重要な点は、次の2点である。

- ① 荷重レベルが大きくなると、照査する性能も Fully Operational から Operational, Life Safe, Near Collapse へと損傷度が大きくなる。
- ② 構造物の重要度が大きくなると、ある性能の照査に用いる荷重レベルが大きくなる。あるいは、ある荷重レベルで照査する性能が損傷度の小さな性能になる。

一般人が、これらを理解、納得することはそれほど困難ではないであろう。しかし、概略的で定性的な説明にとどまっているため、具体的な内容が明らかでない点がある。例えば、

- ① 各性能は抽象的な表現（例えば、operational）となっているが、具体的にはどのように定義し、算出するのか。
- ② 各荷重の再現期間は、構造物の供用期間を30年、50年、100年とし、非超過確率を50%、10%として算出しているが、非超過確率の値の設定は妥当か。
- ③ 性能、荷重はどの構造物でも4種類あるのか。
- ④ 性能と荷重の組合せは、構造物の所有者、管理者が任意に選べるのか、あるいは、一意的に決定

されるのか。

以下、それぞれについて筆者の考えを述べるが、その前に、ほぼ同義語だと述べた「性能」と「限界状態」の関係について、明確にしておきたい。

3. 性能と限界状態の定義および関係

図-3の下図は、構造物に作用する荷重と構造物の変形の関係を表したものであり、構造物全体系に作用する荷重と荷重作用点の変位の関係、あるいはある断面に作用するモーメントと曲率の関係などを想定している。荷重-変形曲線は、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Yを越えると変形の増分が大きくなり、最大耐力Uに達した後、耐力が低下して破壊に至る。

図-3の上図は、ある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図と連動して模式的に表したものであるが、図に示すように初期状態ではその性能が確保されている状態にあったものが、荷重、変形が増加し、ある限界を越えるとその性能が確保されない状態に移行する。性能が確保されている状態から確保されない状態への移行は不連続ではなく、図に示すように連続的に移行すると考えられるが、工学的にはその限界点を決定することは可能であろう。この点が限界状態であり、「対象とする性能が確保されている状態から確保されない状態に移行する限界の状態」と定義できる。一般には降伏耐力が使用限界状態（使用性の限界状態）、最大耐力が終局限界状態（安全性の限界状態）、その中間の状態のある点が修復限界状態（修復性の限界状

態)として定義される。

耐震設計では、構造物に作用する地震動に対し、構造物が要求する性能を確保しているかどうかを照査する必要がある。しかし、地震動の大きさは再現期間に対して離散的あるいは段階的に増加するのではなく、連続的に増加する。したがって、すべての荷重レベルに対して照査することは困難である。また、図-3で示したように、性能が確保されている状態も幅がある。このようなことから、確保すべき性能に対応する最大の荷重に対し、性能のクリティカルな状態である限界状態に達しているかどうかを照査することが合理的である。したがって、限界状態は、対象とする性能が確保されているかどうかを照査するための指標であるといえる。

4. 性能（限界状態）の種類と照査の必要性

構造物は、ある目的（例えば、道路橋であれば、通行者が安全かつ快適に通行できること）を達成するために建設するのであるから、供用期間中に構造物がこの目的を満足する状態であるかどうか、すなわち使用性が確保されている状態であるかを照査することは必須事項である。使用性の限界状態は、3. で説明したように、一般的には構造物の応答、挙動の弾性限界（降伏耐力）と定義されている。

地震によって使用限界状態を越えた場合、その後の使用を停止して廃棄、あるいは撤去して新しい構造物を新設するのであれば、使用限界状態以外に照査が必要な限界状態はない。しかし、使用限界状態、すなわち降伏耐力を少し越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）を行い、再利用の方が経済的、合理的である。逆に、損傷度が大きくなると再利用することが技術的、経済的に不利、あるいは不可能となる。したがって、使用限界状態を越えた構造物を再利用する方針で設計する場合、修復性が確保されている状態、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。なお、使用限界状態および終局限界状態は、構造物の構造特性、材料特性によって決定されるのに対し、修復限界状態は、「適切な工法によって妥当な工期、工費」と説明したように、補強技術のレベル、コストによっても決定されることが特徴である。

修復限界を越え、再利用が不可能となった構造物は、廃棄あるいは撤去して新しい構造物を新設することとなるが、その選択に当たって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り、構造物の利用者や第三者の生命、財産に損害を与えるおそれがある場合（例えば橋梁の場合、上部構造の落下によって通行者の生命を損なうような場合）は、利用者や第三者安全性が確保されている状態、すなわち終局限界以下であることを照査する必要がある。

性能マトリクスで提案されている Near Collapse は、どのような性能、限界状態を考えているかは不明であるが、現在、一般的に用いられている構造形式、構造材料および利用形態の範囲では、設計で考慮すべき限界状態は、上記の使用限界状態、修復限界状態、終局限界状態で十分であろう。ただし、今後、新しい構造形式、材料を用いた新技術が開発され、用いられるようになると、限界状態の種類、内容が変化する可能性がある。

5. 設計荷重の設定方法

SEAOC の性能マトリクスの提案の後、我が国でも性能マトリクスの検討が行われ類似のマトリクスの提案が行われてきたが、荷重レベルの表記については SEAOC と同様、抽象的な表現（例えば、供用期間中に“数度経験”、“経験するのはまれ”、“経験するのはごくまれ”等）が多いようである。また、マトリクスのどのセルで照査するかは、設計者が任意に選べるかのように説明されているものがある。

構造物のある限界状態を照査に用いる荷重レベルの設定は、原則的には構造物の所有者、管理者が任意に設定することができる。例えば、終局限界状態の照査に性能マトリクスの Frequent に相当する再現期間 43 年の地震動を用いたり、逆に、使用限界状態の照査に Very Rare に相当する再現期間 970 年の地震動を用いることは可能である。ただし、構造物の所有者、管理者はそれによって生ずる被害や無駄な支出に対して責任を取る必要がある。

しかし、ある荷重レベルに対して限界状態を確保するための建設コストと、それ以上の大きさの荷重によって限界状態を確保できずに生じる損害コスト（再構築コストを含む）の和、トータルコストが最小となる経済的で最適な地震動の再現期間があるに違いない。公共構造物は、この考え方に基づいて設計荷重を設定して設計すべきであろう。また、地震で被害を受けた後に「想定外」と釈明することがないよう、この考えに基づいて設計していることを事前に国民に説明し、理解を得ることが重要である。

上記のトータルコストの算出において、損害コス

トは設計荷重以上の大きさの地震が発生した場合のみ生ずるので、期待値として算出、評価する必要がある。これは、リスクマネジメントの概念におけるリスクと同じである。また、損害コストには、構造物の使用性が損なわれることによる直接損害コスト（例えば、有料道路の橋梁であれば、通行料）と構造物が壊れることによる間接損害コスト（例えば、構造物の利用者、第三者の生命、財産の損失に対する補償費）から構成される。

最適な地震動の再現期間を検討するため、以下の条件と命題を考える。

条件：再現期間 R 年の地震に対して壊れない供用期間 t 年の橋を建設する。もし、供用期間中に再現期間 R 年を超える地震が発生して橋が壊れた場合は、同じものを再構築する。

命題：初期建設コストと再構築するコストの期待値および壊れることにより生ずる損害コストの期待値の和を最小にする再現期間 R は何年か。

上記命題は、次式で表すことができる。

$$C = C_i + N_{R,t}(C_i' + C_0) \quad (1)$$

ここに、

- C_i : 初期建設コスト
- C_0 : 損害コスト
- $N_{R,t}$: 供用期間 t 年中に再現期間 R 年以上の地震が発生する回数の期待値
- C_i' : 再構築コスト (=初期建設コスト)

図-4は、式(1)の値を再現期間 R の関数として図示したものである。右上がりの曲線が式(1)の第1項、右下がりの曲線が第2項、放物線状の曲線が式(1)であり、 C が最小となる再現期間 R_{opt} が存在する。したがって、この再現期間の地震動に余裕度を持たせた大きさの地震動を設計地震動として設定することが合理的である。

式(1)、図-4の考え方に基づくと、構造物の重要度が大きくなると、設計荷重のレベルが大きくなることが説明できる。構造物の重要度が大きいということは、交通量が多い、あるいは、壊れることによる社会的影響が大きい等が考えられる。このことは、式(1)の損害コスト C_0 が大きいことを意味する。図-5は C_0 を変化させて C を図示したものであるが、 C_0 が増加すると、 R_{opt} が大きくなるのが分かる。

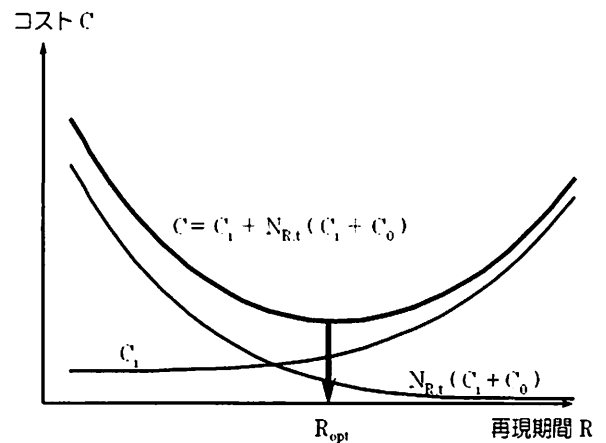


図-4 トータルコスト-再現期間

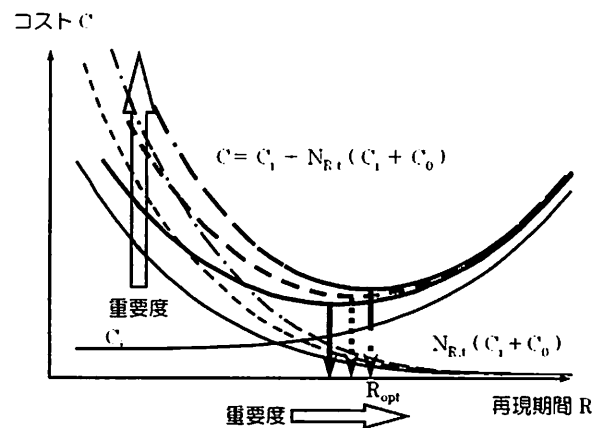


図-5 トータルコスト-再現期間 (2)

6. まとめ

5. の考えに基づき、設計荷重を設定するためには、地震動の発生確率、再現期間のデータが必要であるが、現時点では十分に精度の高いデータは得られていない。また、上記の設計荷重設定の手順で注意すべき点は、最適な設計荷重は地震動特性だけで設定されるのではなく、設計する構造物の構造特性や経済性も考慮する必要があるということである。したがって、構造物の諸元等が決まらなると、設計荷重も決められないこととなり、この設定方法をそのまま実施の設計に運用することは困難である。今後、実用化に向けた更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 包括設計コード(案) Ver.1 : 包括設計コード策定基礎調査委員会, 土木学会, 2003.3
- 2) SEAOC : Vision 2000 - Performance based seismic engineering of buildings, Vision 2000 Committee, Final Report, 1995.
- 3) 本城勇介 : 性能規定型設計・限界状態設計法の動向と杭基礎への適用, 基礎工, 2000.12.