



竹脇 出  
Izuru Takewaki  
京都大学大学院工学研究科  
教授

# 設計荷重と構造物のロバスト性

Design loads and robustness of structures

## Summary

The robustness of structures can be defined as the ability to continue to satisfy the serviceability and safety conditions even under varied design loads and varied structural properties. After the 2011 Tohoku earthquake, this concept is of great concern. In order to evaluate the robustness of a

structural system, the worst case analysis is required for the varied design loads and varied structural properties. It is shown that the plot of the safety region of a structural system with respect to various types of ground motions is effective and examples of structural systems with higher robustness are explained.

## 1. 東北地方太平洋沖地震を経験して

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震は、これまでの耐震設計の常識を覆す様々な要因をクローズアップさせたといえる。東北地方の太平洋沿岸部では津波による建物被害であり、大都市域では長周期地震動による高層建物の長時間にわたる大きな揺れである。

1989年の12月に米国オークランドのホテルで小堀鐸二博士にお会いした際に、博士は1985年のメキシコ地震のことを話された。また、少し前に発生したロマ・ブリエータ地震（サンフランシスコ）については、湾岸部での揺れの増幅について時間を割いて話された。博士の持論<sup>1)</sup>は、地震というもの科学的知見をもってしても近未来には予測不可能であり、そのために自分は制振構造を始めたというものであった。メキシコ地震などの経験に基づけば、今回の3.11地震における大都市域での長周期地震動もある程度予想できたように思われる。しかしながら、メキシコ地震などが発生した当時は、日本では起こらないような雰囲気があったようにも思われる。何事にも想像を逞しくすることが必要と思われる。

図1は、都市や地域に存在する種々の建物であり、それぞれにとって最も好ましくない地震動<sup>2)</sup>というものが存在し、構造設計者はもしその存在が事前にわかっていたら、それに対しても十分な対策を講じることができる。しかしながら、現在の地震動予測の精度からその正確な姿を見出すことは極めて難しいということになる。それでは、どうすればよいかというと、例えば基盤面（地震、工学的）や地表面でエネルギー的な指標から地震動が有するパワーを設定し、その中で当該建物にとって最も好ましくない地震動を誘導することが考えられる。現在では、実際に起こり得る地震動との乖離や物理的生起条件の絞込みなど、まだまだ克服すべき事項はあるが、3.11を経験した現在では、常識という概念を再構築する必要があることも事実である。

## 2. 構造物のロバスト性とは

構造物のロバスト性とは、外乱や構造特性がばらついたとしても、なお構造物が使用性や安全性を保持し続けることのできる能力と定義できる。このようなロバスト性を評価するには、外乱や構造特性にばらつきを想定した上で、その中で最も危険な状態を把握し、それに対して使用性限界や安全性限界を満たすかどうかを調べる必要がある。このような解析をWorst-case analysis（最悪ケースの解析）と呼び、それを解析する手段として区間解析（Interval analysis）という方法がある。例えば、免震建物の設計で要求される「ばらつき解析」<sup>3)</sup>はこの代表例である。本稿では、設計荷重に焦点を当てるため、構造特性のばらつきについては考えないことにしよう。

## 3. 想定すべき入力地震動と建物応答のシナリオ

入力地震動のレベルの変動だけでなく、特性の変動を考慮することが重要である。これまでは、代表的な観測3波、幅広い周期成分を有する告示波、サイト波（長周期地震動なども含む）などが超高層建物や免震建物の構造評定などで考えられているが、より幅広い特性変動を考慮した理論的な取り扱いが必要ではないだろうか。また、地震動に対する建物応答のシナリオを想定することも重要である。例

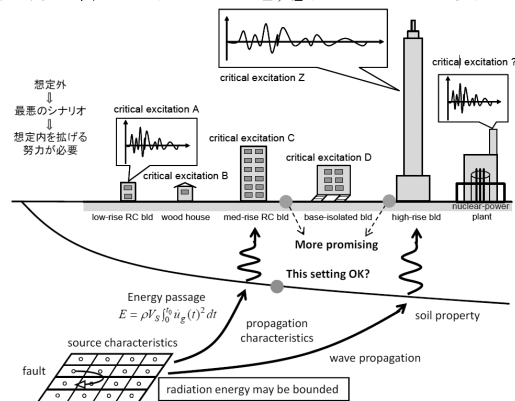
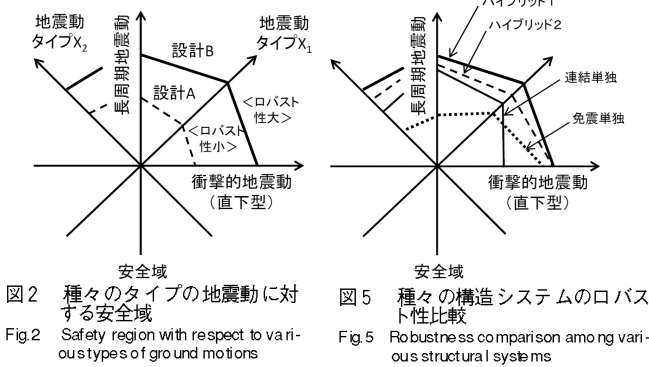


図1 それぞれの建物にとって最悪な地震動とは  
Fig.1 What is the worst excitation for each building?

例えば、遠方から伝わる地震動は前半において実体波が優勢であり、後半において表面波が優勢となることを考えれば、実体波により応答が励起されて損傷を受けた建物が後半の表面波と損傷後の固有周期が一致して壊滅的な状態となることも予想される。このように構造設計者は、想像を逞しくして種々のシナリオを想定し設計を行うことが必要と思われる。



#### 4. ロバスト性に優れた建物とは

図2は、衝撃的な地震動や長周期地震動などを異なるタイプの地震動の例として扱い、それぞれの入力レベルを軸として二つの設計A、Bについての安全域を描いたものである。この例では、設計Bの方が設計Aよりも幅広い地震動に対して安全性が保証されておりロバスト性が高いといえる。

例えば、免震と制振を組み合わせた構造システムはロバスト性の観点から興味深い。周知の通り、免震構造は直下型の衝撃的な地震動入力には効果的であるが、長周期地震動に対しては共振による応答増幅について慎重な検討が必要である。一方、制振構造は、長周期地震動に対しては効率的にエネルギー消費を行なうことが期待され効果的であるが、直下型の衝撃的な地震動入力には必ずしも効果的ではない。

図3は、連結制振と免震を並列的に組み合わせたものであり(2011年日本建築学会技術部門設計競技(大林組提案)4)、衝撃的な地震動入力にも長周期地震動にも有効に抵抗できることが確認されている。一方、図4は、TMDと免震を組み合わせたものであり、これも衝撃的な地震動入力にも長周期地震動にも有効に抵抗できることが確認されている。元来、TMDは風に対する制振機構として用いられているが、免震層に大質量比のマスを設置することにより、最上層に設置する場合に問題となる鉛直負荷の問題を解消できると予想される。この例では、長周期地震動に対して免震建物が共振現象を起こしたとしても、TMDの効果により免震層の変形をある程度の範囲に抑えることを期待している。いずれにしても、考えられ得る可能な限り多種類の地震動に対して安全性の確認を行なっておくことが望ましい。

図5は、前述の種々のタイプの地震動に対する安全域を

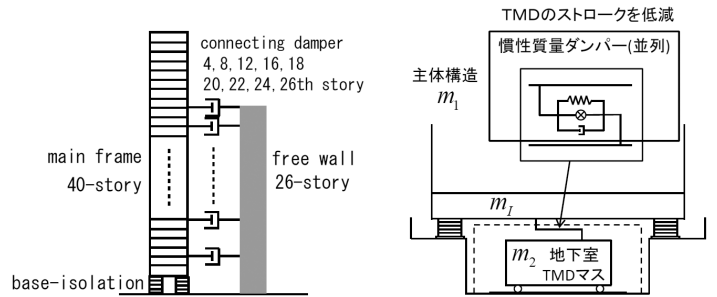


図3 ハイブリッド構造1  
Fig.3 Hybrid system 1

図4 ハイブリッド構造2  
Fig.4 Hybrid system 2

示す図に、図3と図4のハイブリッド構造1、2と、ハイブリッド構造1において免震を取り除いた連結単独モデルおよび連結制振を取り除いた免震単独モデルについて、それぞれの安全域を模式的に描いたものである。尺度は大まかなものである。このような図を用意することにより、それぞれの構造システムが有するロバスト性のある程度表現可能と思われる。

#### 5. 想定外への対応：Passive Defenseの重要性

東北地方太平洋沖地震を受けて、米国のサイエンスライターであるA.Pioreは、雑誌Scientific Americanの2011年6月号に、'Planning for the Black Swan'と題する寄稿を行なっている。その中で彼は、想定外への対応としてPassive Defenseの重要性を説いている。

構造設計においては、本来想定外ということはあつてはならないが、現実の世界ではそうもいかない。要は、想定外の範囲を如何に狭め、想定範囲を広げることができるかに構造設計者の技量が問われている。想定外の範囲を狭めて少しでもロバスト性や冗長性に優れた構造物を設計することが構造設計で要請されている。その際に有効な方法として、Passive Defenseの概念がある。A.Pioreは電源喪失に起因する原子力発電所事故を取り上げ、人力がなくても自然に電源が入るシステムの重要性を指摘している。言い換えれば、外部から新たな力を加えなくても、それ自身で安全性を保証するシステムといえる。例えば構造設計では、建物特性の変化による応答低減効果などである。具体的には、長周期地震動に対して弾塑性化することによる応答低減(共振からの回避)、基礎の浮き上がりによる非線形化、機構・形状による工夫(ex.心柱……)、セルフ・センタリング機構、変形制限機構、ストッパー、曲げ破壊・せん断破壊の制御、柱・梁耐力比制限などの多くの仕様規定などである。Passive Defenseの一層の広がりや高度化など、確実な安全性の向上に関する方法や技術の発展に期待したい。

#### 参考文献

- 1) 小堀録二, 制震構造 - 理論と実際 -, 鹿島出版会, 1993, 2004.
- 2) I.Takewaki, Critical excitation methods in earthquake engineering, Elsevier, 2007.
- 3) 藤田皓平, 竹脇 出, 日本建築学会構造系論文集, 2011年8月, pp1453-1460.
- 4) 建築雑誌, 2011年11月, Vol.126, No.1624, pp73-79.