

パラダイムシフトとしての鈍構造の提案と 橋梁構造システムへの適用

高橋良和¹

¹正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）

1. はじめに

現在の耐震工学は、耐震・免震・制震という技術を核とする体系を築き上げ、発展してきた。それぞれの体系の枠内で積み重ねてこられた検討により、それぞれの分野のその知識は深まってきた一方で、その枠組みが壁となり、分野間の交流が阻害されてきたことも事実である。科学史家であるKuhnは、科学の飛躍的な進展は、時代の背景とともに、既存の体系の枠組みからはみ出した新しい発想・発見によるものであることを指摘し、これを新しいパラダイムの形成と呼んだ¹⁾。

では、現在、耐震工学においてパラダイムシフトとなり得る概念は何か？そのキーワードのひとつが「地震外力に鈍感な構造（鈍構造）」であると考えられる。土木構造物の建設において考慮すべき荷重等の外乱は、風・水や地震などであり、他の工学分野に比べて極めて不確定性・不確実性が高い。我が国の構造設計において、特に不確実性が高い外乱は、偶発作用である地震であろう。この不確実性の高い地震外力に対し、構造分野はいかに対応すべきか。地震の不確実性が高い以上、それを真正面から対応しては未知なる地震に対して常に後手にならざるを得ない。地震外力に鈍感であることが、構造物本来の能力を発揮できる力となろう。本論文では、鈍構造を実現するための背景、手法を整理するとともに、橋梁構造物への適用性について説明する。

に関する知識や記録が乏しかった時代はもちろん、観測網が充実し、多くの知識や記録が得られるようになった現代でも、不確定性は大きな問題である。

兵庫県南部地震以降、大きく研究が進み、社会に還元されてきた分野のひとつとして、工学的地震動が挙げられる。以前は耐震設計において地震時保有水平耐力法では1Gの弾性強度をもつ入力地震動が設定されていたものの、基本的にはそれまでに日本各地で得られてきた地震記録をもとに、そのスペクトル特性を踏まえた地震動であった。構造物周辺にある断層などを考慮して構造物に入力されるであろう地震動を計算することは、以前より長大構造物や原子力発電所などに対して実施されてきた例はあるものの、極めて重要な構造物に対する例外であった。兵庫県南部地震以降、ほとんどの耐震基準が改定され、その中で断層から発生する地震動を推定するよう規定されるようになった基準は少なくない。

さらに地震動の理解度が進むにつれて、外乱に対する予測精度は現状よりも合理的に小さくなる可能性もあるが、新たな断層の発見によりさらに大きな事例や、想定したシナリオ以外で巨大地震も発生することは、2011年東北地方太平洋沖地震等からも明らかである。地球内部に対する理解度は人工物である構造物よりも低いと考えざるを得ず、構造物の外乱は構造物の挙動に比べ、圧倒的に不確定性を持っているといえ、構造技術者として、その不確定性に対処する方策を常に考える必要がある。

2. 地震外力の不確定性

地震の不確定性は古くて新しい問題である。地震

3. 構造物の動的挙動の不確定性

構造物の動的挙動の不確定性に関しては、材料の

不確定性に基づく信頼性解析に基づく検討はあるものの、定量的評価が可能な構造物レベルのデータが圧倒的に不足しているのが現状である。筆者らは、E-ディフェンスを用いて16体のRC柱供試体の一斉加振実験を行い、応答が非線形領域に入った100%地震動加振1回目の実験結果を基に、16体の供試体の応答加速度、応答変位などに関し、動的非線形応答の不確定性について定量的な評価を試みた²⁾。その結果、応答変位の最大応答変位の変動係数は、ほぼ入力・システムのばらつきと同程度であり、非線形・動的挙動であることを考えると、そのばらつきは大きくない。これは最大応答変位の領域では既に構造物が大きく非線形化しているものの、荷重-変位関係の骨格曲線はばらつきが小さく、履歴減衰の効果もあって、構造物の動的挙動が安定していると考ええる。一方、残留変形に関しては、最大応答変位と比べて約4倍程度変動係数が大きい。これは損傷発生後の履歴応答の不確定性に起因するものと考ええる。

4. 剛構造と柔構造

(1) 剛構造

柱、梁を剛に緊結すると同時に耐震壁や筋交いを用いて構造物全体の変形をできるだけ抑えるという考え方は、剛構造の考え方にに基づくものであり、1923年の関東大震災でも、この設計思想に基づく旧日本興業銀行の建物が無被害であったこともあり、我が国の耐震構造学の基礎が剛構造に基づき確立された。

(2) 柔構造

構造物はその固有の周期があり、周期の短い低層の剛な構造物には、上記の地震動の性質から大きな破壊力が作用するが、硬質地盤上の周期の長い高層ビルには、その構造に十分な変形性能を与えることにより、小さな破壊力しか作用しない。これが超高層ビルの実現を可能とした「柔構造」の考え方である。

小堀らが制震構造を提唱した際³⁾、制震とは地震応答を制御するような性質を建築物に与えることであり、条件として次の4つを挙げた。①地震動のエネルギー伝達経路自体を遮断する。②地震のもつ振動数帯から制震系の固有振動数帯をisolateする。③非線形特性を与えて非定常非共振系とする。④エネルギー吸収機構を利用する。現在の免震構造の究

極の姿は上記①であるが可能ではないため、振動系の長周期化を図り一次共振をかわすという意味で②に依存し、④を援用している。柔構造は固い地盤に基礎を置く構造物を念頭においているという意味で、比較的短周期成分の帯域を含む地震動を想定しているが、制震構造は、地震動そのものが極めて不明確で分からないという前提に立ち、そのために地震応答をコントロールするという性質を構造物に積極的に与えることを目的としている。

5. 地震外力に鈍感な構造の提案

1章で述べた通り、科学の飛躍的な進展は、その時代背景も大きな要因となっている。耐震工学において、大震災が新しいパラダイムの形成の要因となることは少なくない。1923年関東大震災を期に確立した震度法や剛構造、1995年阪神大震災を期にその利用が進んだ免制震構造（柔構造）が挙げられるが、2011年東日本大震災を期に生まれるパラダイムとして、筆者らは地震外力に鈍感な構造（鈍構造）の形成による既存枠組みの再構築であると考ええる。鈍構造とは、地震外力の不確定性を認識した上で、その特性が想定と異なったとしても、大きく損傷するに至らない構造を指す。以下に鈍構造を実現するための様々な方法論を示す。これらは従来異なる枠組みの知識、技術であったが、鈍構造という新しいパラダイムにより再構成され、同じ枠組みで議論することを可能とする。

(1) 材料からのアプローチ

不確定な外乱に鈍感であるためのひとつの方法は、構造物が外力の不確定幅を圧倒する性能を保有することである。いわば超弾性構造の創造である^{例え4)}。これを実現する手法は様々な考えられるが、最も直接的な方法としては材料の性能を圧倒的に向上させることである。従来の構造技術の発展も、材料開発に負うところが多い。

一方、損傷しても気づかない（重大時に陥らない）ことも鈍感の特性の一つである。近年自己修復型材料の開発が積極的に進められているが⁵⁾、これらの材料を効果的に利用できる構造を作り出すことも、鈍構造実現の一つの方法であろう。

もちろん土木構造物は大規模構造であるが故に、基本的には地球上に多く存在する材料（FeやSi、Cなどの元素）を用いてきた。このような制約のもとで構造使用材料の性能を向上させていくこと、ある

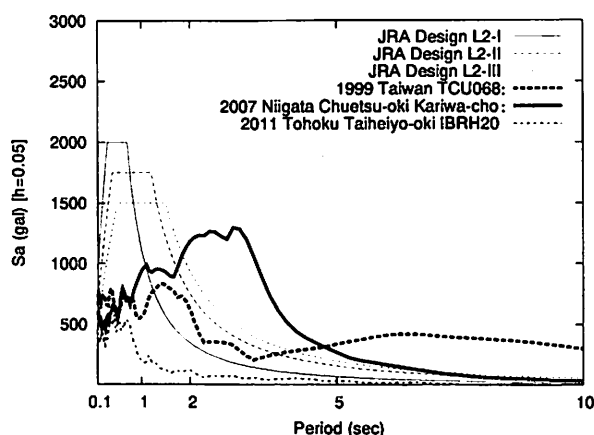


図-1 長周期地震記録と道示スペクトルの比較

いは少量の高性能材料により構造全体の性能を向上させることが今後の材料開発を進める上で重要と考えられる。

(2) 構造制御技術からのアプローチ

前章で述べた通り、制震は地震動の不確定性を認識した上での技術であり、構造制御技術が鈍構造を実現する上で重要な知見を与えてくれることは疑う余地もない。

免震はまさに外乱である地震から構造物を免れることを期待した構造であり、外乱に鈍感な構造の実現事例である。しかし橋梁構造に対する免震技術の適用は、既存の支承部を免震支承に置き換えたものがほとんどであり、地震時変形の増大にジョイント部が対応できるためにも2秒程度に周期を設定された構造が多い。あくまで構造物が地震のもつ振動数帯から外れていることが鈍構造であることの前提条件であるものの、地震動の不確定性を考えると2秒程度にも大きなパワーを有する地震動は過去の地震記録でも明らかであり(図-1)、そのような地震動に対しても鈍感であるための超長周期免震を可能とする技術開発を進める必要がある。

また制震技術も現在はダンパーなど単に減衰を付与する技術の採用が中心であるが、パッシブ制震装置の特性を構造物全体系の応答低減の観点から検討するなど⁶⁾、不確定な外乱に鈍感であるためにも、計測技術やアクティブ/パッシブ制震技術を積極的に活用することは有用である。

(3) 構造形態からのアプローチ

構造形態とは構造物の「かたち」と「ありさま」を表す言葉であり、空間を成立させている骨格そのものと、そこに内在する力が共存した言葉である。構造形態はその材料や我々が有する技術と密接な関

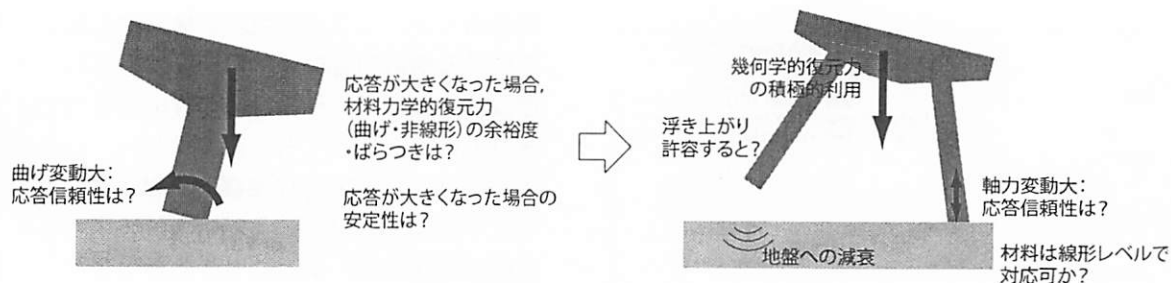
係があるが、ここでは現在の構造物の構造形態を決定づける構造的骨格(力学)を考える⁷⁾。現在の構造設計において、その構造的骨格は重力により支配されていると言っても過言ではない。しかし現在は耐震設計において弾性地震荷重は2Gレベルであり、もはや重力(1G)を越えているにも関わらず、構造形態は旧態依然、重力に対する形からなら変化していない。また、先の材料・構造制御技術からのアプローチを実現するためにも、既存の構造形態のままでは中途半端な性能向上に留まる可能性も高い。地震工学者は構造形態に対して以前より責任を持っていることを自覚する必要がある、構造デザインの思考の背後に存在する構造と形態の連関性を考えると、不確定地震動に対応した力学的骨格から、新しい形態、造形が生まれてくるのは自然である。

6. 橋梁構造システムによる鈍構造の実現

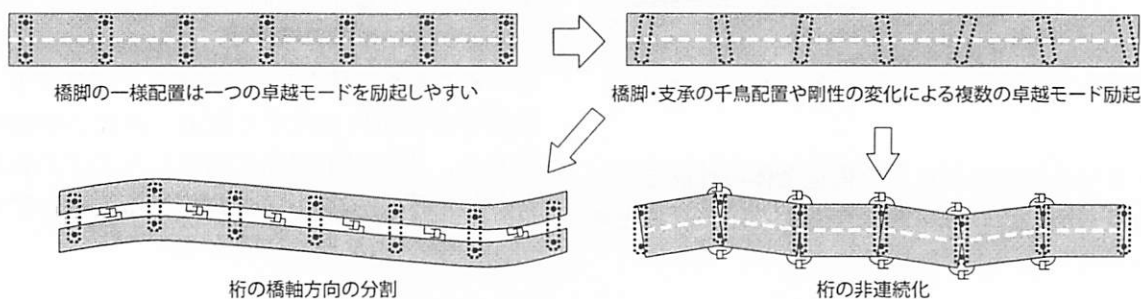
本章では、前章で示した鈍構造を橋梁構造システムで実現する方策について、いくつかのアイデアを示す(図-2)。

都市内高速道路高架橋は、高架橋下の道路等の制約により、単柱式橋脚が採用される場合が多いが、水平方向の地震力に対しては、柱基部での曲げ抵抗しか期待できないこと、大変形するとP-Δ効果により不安定となること、またその基部の損傷が橋梁の崩壊にも繋がるため、地震外力に対して不適当な構造形態であると言わざるを得ない。より構造形態の工夫により、材料特性の信頼性も著しく落ちる強非線形挙動を期待しないレベルで、不確定性の高い地震外力に対応することも期待できる。

また、橋梁システムは線状構造であり、桁を支持する橋脚も、同じ形式が連続することが多い。しかしながら、この一様な構造システムは解析を簡易にする利点はあるものの、単一の卓越モードを励起しやすく、想定した地震動に対して最適な設計をしたとしても、その地震動特性が変化すると、応答は大きくなる可能性は高い。平均的な応答レベルは大きくなったとしても、地震動特性の変化に過敏に反応しないよう、複数の卓越モードの励起を促す構造システムを検討すべきである。構造全体系の応答レベルを下げるためには、卓越モードの分散を図るとともに、減衰性能を向上させることも重要である。ダンパー等の減衰機構を設置するためには、相対変形が生じることが必要となるが、従来の橋梁構造では、支承部周りに限定され、それ故、長大橋梁では



部分構造による対応 (橋脚構造の例)



全体構造による対応 (橋脚・支承剛性変化と桁の橋軸直角方向剛性の低減)

図-2 橋脚構造システムによる鈍構造への対応

必要となるダンパーの容量、ストローク等が大きくなりすぎる問題もあった。橋桁は橋軸直角方向の剛性が高く、橋脚や支承特性を変化させたとしても、振動モードの分散を実現しにくい。そこで桁の非連続化や橋軸方向の分割等により、橋軸直角方向剛性を低減させ、新たに相対変形が発生する箇所を増やし、小容量の減衰機構を増やすことも効果的である。

7. まとめ

本論文では、耐震工学において新たなパラダイムシフトとなり得る概念として鈍構造を提案し、材料、構造制御技術、構造形態の観点から、その実現方法・課題について整理した。また橋梁構造の特徴を踏まえ、鈍構造を実現する数種のアイディアを示した。鈍構造は、分断化された各専門領域の知識を再構成しうる概念として、飛躍的な耐震工学の発展を実現しうる可能性を持っていると考える。

謝辞： 外乱に対する鈍感構造の提案に関する内容は、2008年に秋山充良先生（当時東北大学，現早稲田大学），小国健二先生（当時東京大学，現慶応大学），本田利器先生（東京大学），庄司学先生（筑波大学）と集中的に耐震構造系の将来課題を議論して得た結果である。その議論の場を提供いただいた

堀宗朗先生（東京大学）を含め、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kuhn, T., The Structure of Scientific Revelutions, University of Chicago Press, 1962. (中山茂訳：科学革命の構造，みすず書房，1971)。
- 2) 高橋良和・小林望：縮小RC模型16体一斉加振実験による地震応答の不確定性評価，第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2011.7.
- 3) 小堀鐸二・南井良一郎：制震系の解析（制震構造に関する研究1），日本建築学会論文報告集，Vol.66，1960.10.
- 4) Akiyama, M., et. al. Flexural Strength of Prestressed Reinforced Concrete Piles Using High-Strength Material, Proc. of 3rd fib congress, CD-ROM (ID:17), 2010.
- 5) Ahn, T-H. and Kishi, T., Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.171-186, 2010.
- 6) 阿部雅人・藤野陽三：高架橋構造全体系の耐震性能の向上を考えたパッシブ制震装置の最適化，土木学会論文集，No.605, I-45, pp.241-252, 1998.10.
- 7) 久保田善明，橋梁形式の構造形態操作に関する基礎的研究，土木学会論文集D Vol. 66 No. 1, pp. 64-76, 2009.