

支承部特性を変化させることによる 鈍構造実現に向けた基礎的検討

高橋良和¹・山崎伸介²・野呂直以³

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

²正会員 工修 新日鉄エンジニアリング 技術開発第一研究所（〒293-0011 千葉県富津市新富20-1）

³正会員 工修 新日鉄エンジニアリング 建築・鋼構造事業部（〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1）

1. はじめに

東日本大震災以降の耐震工学におけるパラダイムシフトとなり得る概念として、「地震外力に鈍感な構造（鈍構造）」が提案されている¹⁾。構造設計において考えるべき荷重の中で、偶発荷重である地震荷重は特に不確実性が高いことはいままでもない。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。鈍構造は、地震外力に鈍感であることで、構造物本来の能力を発揮できる力となる、という思想である。本論文では、橋梁構造において支承部特性を変化させ、設計指標に応答値の変動係数を小さくすることを選択することにより、如何に構造設計による鈍構造を実現するか、考察するものである。

2. 鈍構造（機能損失に対して鈍感な構造）

鈍構造とは、「構造物が提供する機能の損失に対して鈍感な構造」を意味する。構造物に作用する地震荷重は、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ものの、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、圧倒的に不確実性を持っているといえる。また、構造物自身の非線形動的挙動に関しても、不確実性を有していることは言うまでもない。このような不確実性を有する外力・構造物に対し、構造物の性能を変化させることで高橋は鈍構造を実現するた

めの方法論を、次の4つに分類した。

- (1) 材料からのアプローチ
- (2) 構造制御技術からのアプローチ
- (3) 構造形態からのアプローチ
- (4) 構造計画・設計からのアプローチ

(1)材料からのアプローチとは、外力の不確定幅を圧倒する性能を保有させるため、材料技術による超弾性構造を目指す方法と、自己修復型材料などにより損傷しても機能を失うほどの大事にいたらないことを目指す方法などがある。(2)構造制御技術からのアプローチは、免制震技術による方法、(3)構造形態からのアプローチとは、横向き・繰り返し・動的などの地震荷重に対する構造的骨格を考えることにより、新しい構造形態を生み出すことによる方法である。(4)構造計画・設計からのアプローチは、旧来と同じ技術を用いたとしても、計画・設計で設定する計画理念・設計目標（性能）の設定によって、鈍構造を目指そうというものである。本論文は、この(4)のアプローチを実践、検討することが目的である。

3. 構造計画・設計による鈍構造の検討

(1) 道路橋示方書における鈍構造

道路橋示方書²⁾によると、耐震設計の基本は、「設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを目的として行う。」ことである。また、その解説において、地震後の道路ネットワークの確保等の観点から橋としての機能の回復が速やかに行い得ることが特に求められる橋に対しては、耐震設計では考慮していないが

想定されうる地震に伴って生じるリスクについて検討することにもなっており、構造計画の観点から、仮に橋に機能的な損失が生じて、できる限り早期に復旧できるような構造形式を採用しておくことも重要であることが述べられている。まさにこれは、構造計画・設計による鈍構造の一つの形態である。

(2) 鈍構造における設計指標

動的照査法による耐震性能を検討するに当たっては、通常3波形程度の地震動に対し、その応答値の平均で照査することが一般である。これは、時刻歴応答解析においては、同じ加速度応答スペクトル特性を有する地震動であっても、位相特性の違い等によって応答解析値に差異が生じるためである。そして、例えば鉄筋コンクリート橋脚に対する照査では、動的解析により算出される諸量が、許容応力度「以下」となることを照査する。すなわち、3波形異なる地震動を用いたとしても、照査においては応答値の平均値だけしか用いられない。

本論文で提案しようとするのは、平均値だけでなく、応答値のばらつき（分散、変動係数）を積極的に利用し、地震動特性の変化に鈍感な構造（応答値の変動が小さいこと）を実現しようというものである（図-1）。一般に、変動が小さいことと、平均値が小さいことは全く関係がない。つまり変動が小さい構造では、通常の耐震設計の指標となる平均値が大きくなることも予想されるが、応答の平均値が大きいくことにに対しては、従来技術（強度を大きくすることなど）で対応することが可能であると考えられる。

4. ケーススタディ概要

(1) 設計対象橋梁

設計対象である橋梁は都市内高架橋であり、3つの橋脚が支えるシステムを考える（図-2）。橋桁は単純桁であるが、免震支承により支持されている。また、桁間には連結ダンパー（塑性型）を2本設置する。モデル両側にも桁が連なることを考え、システムとしては、橋脚3本、橋桁4個、免震支承4セット、連結ダンパー3セットから構成される。

ここで、設計パラメータは免震支承の摩擦係数（0.05、0.1）、桁固有周期（1、2、3、4秒）、そして連結ダンパーの1本あたりの降伏強度（なし、100、225kN）である。本研究では簡単のため、橋脚および橋桁は線形とする。

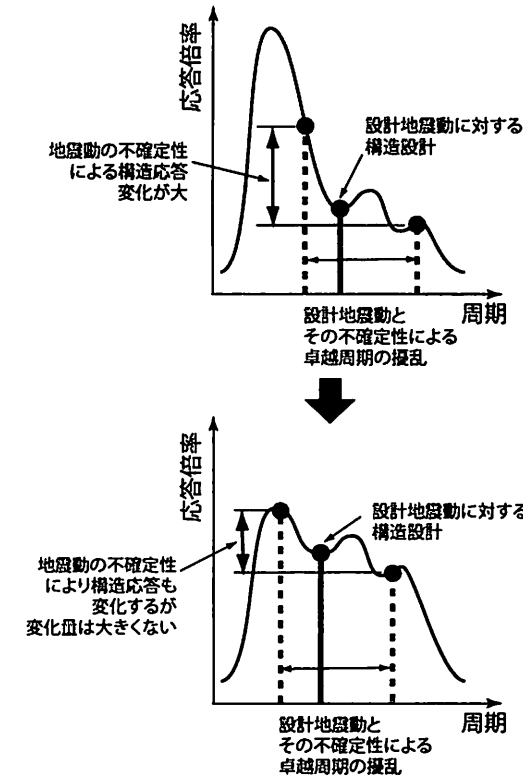


図-1 地震動特性の変化に対する鈍構造

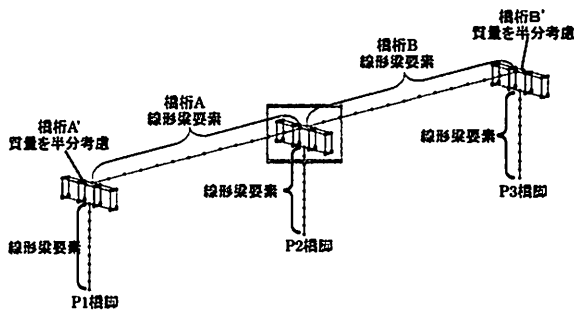


図-2 解析対象橋梁モデル

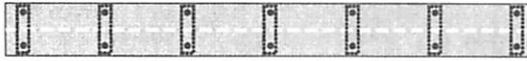
(2) 設計目標

複数の入力地震動に対し、免震効果指標の変動係数が小さくなる組み合わせを探索することを設計目標とする。特に、支承部構造（周期特性、減衰性能）を変化させることにより、鈍構造を実現することを考える（図-3）。

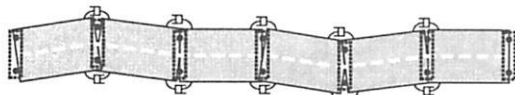
例えば、免震効果指標として橋脚のせん断力を考える。ある設計パラメータの組み合わせに関し、3波の入力地震動による動的解析を行い、3本の橋脚のせん断力3ケース、計9個のせん断力を得る。この9つのデータより、変動係数（＝標準偏差／平均値）を算出し、全ケース（12,288通り）を比較することにより、設計パラメータを決定する。

表-1 全解析ケースにおける橋脚せん断力の変動係数最小ケース

隣接A' 桁支承		A 桁支承		B 桁支承		隣接B' 桁支承		桁連結材 降伏荷重 (kN)
周期	摩擦係数	周期	摩擦係数	周期	摩擦係数	周期	摩擦係数	
T(s)	μ	T(s)	μ	T(s)	μ	T(s)	μ	
3	0.05	4	0.1	3	0.05	4	0.1	なし



全ての橋桁の支承周期が同一だと、一つの卓越モードを励起しやすい



支承周期特性を変化させることで、異なる振動モードを励起

図-3 解析対象橋梁モデル

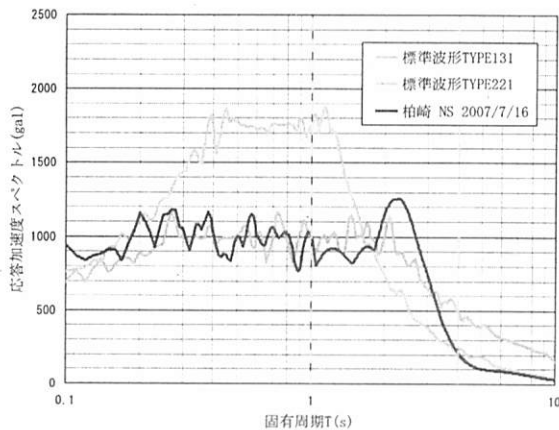


図-4 設計地震動の周期特性

(3) 設計地震動

極端な周期特性を有する入力地震動による影響を検討するため、設計入力地震動として、レベル2タイプ1Ⅲ種地盤用、レベル2タイプ2Ⅱ種地盤用、そして2007年新潟県中越沖地震柏崎記録を用いることとする。これら設計地震動の応答スペクトルを図-4に示す。

5. 橋脚せん断力に着目した検討結果

(1) 全ケースにおける変動係数のばらつき

解析結果の一例として、全解析ケースにおける橋

脚せん断力の変動係数を図-5に示す。図中の各点が1ケースを示し、その色が連結ダンパーの降伏強度を示している（赤、青、黄はそれぞれダンパー無し、100kN、225kN）。これより、解析ケースによって、変動係数が0.004程度から0.9程度まで、大きく異なることが分かる。また、最小の変動係数を示すケースは連結ダンパー無しの範囲にある。全ケース変動ケース最小時のパラメータ組み合わせを表-1に示す。この表が示すことは、桁周期や支承摩擦係数がばらばらであることであり、このような設計は従来の設計目標では出てこないものである。また変動係数最小ケースは連結ダンパー無しの場合であったが、図-5にから分かるように、減衰が大きくなるにつれて、ばらつきも小さくなる傾向がある。

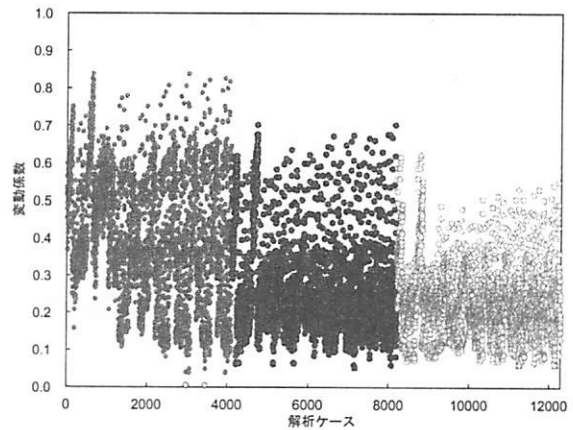


図-5 全解析ケースにおける橋脚せん断力の変動係数
(横軸は解析ケース番号)

(2) 桁固有周期特性の組み合わせ

ここでは、全ての支承摩擦係数を0.05に固定し、桁固有周期特性の組み合わせの影響について考察する。それぞれの桁固有周期を変化させた結果を図-6～図-8に示す。

まず、従来設計でよく見られる、各桁周期が同じ場合を図-6に示す。これより、桁周期が長くなるにつれて変動係数が単調減少していること、また連結ダンパーによる減衰力付与が変動係数を小さくすることに寄与していないことが分かる。

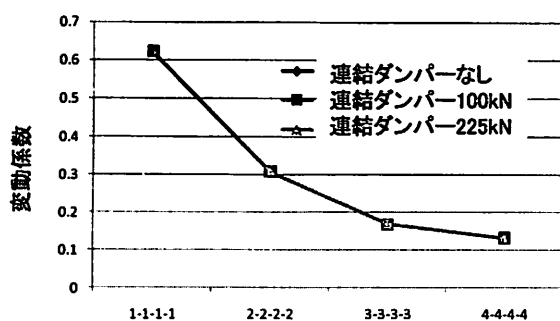


図-6 桁固有周期が全て同じ

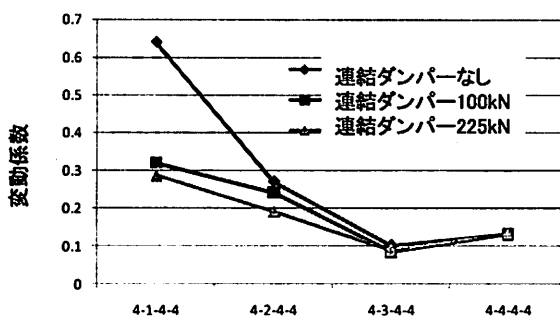


図-7 4つのうち1つ桁固有周期が異なる場合

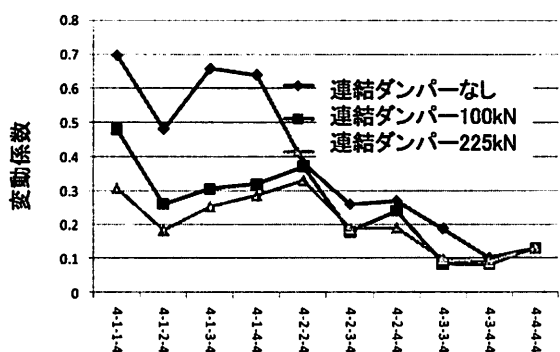


図-8 4つのうち2つ支承固有周期が異なる場合

次に、4つのうち1つの桁固有周期を変動させた場合を図-7に示すが、その傾向は図-6とは異なっている。大きく周期特性が異なるものが挿入されることで、大きく応答は乱れる(変動する)が、減衰効果の付与により安定化すること、異種の振動特性が同質化すると変動係数も小さくなり、またダンパーにより減衰付与効果も小さくなる。本検討事例では、変動係数最小となる組み合わせは、1つだけやや周期が異なるケースであった。

図-8に4つのうち中間の2つの桁固有周期を変動させた場合を示す。この場合もやや周期が異なる桁

を挿入した方が、結果として変動係数が小さくなっている。

(3) 地震動別の平均橋脚せん断力の変動

図-9に、橋脚せん断力の平均値が、地震動によりどのように変化するかを示している。これまで示してきたように、全ての桁振動特性が同じであるよりも、やや周期の異なる桁を混ぜることで小さな変動係数を得ることができた。柏崎波のように、必ずしも最小値を得るパラメータ選択ではないものの、本検討事例では、結果的に3波平均も小さい結果となった。

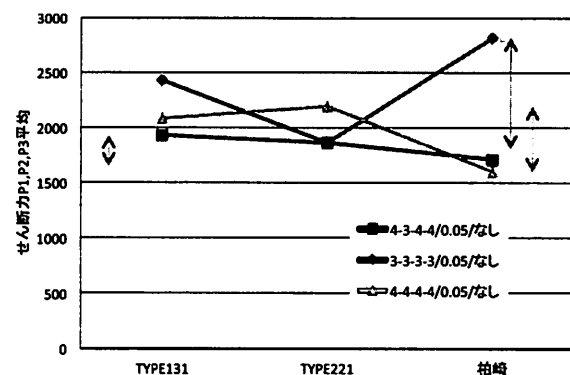


図-9 地震動別の平均せん断力の変動

6. まとめ

本研究では、設計指標として変動係数を選択することにより、構造設計による鈍構造実現の可能性について検討した。

鈍構造は、地震動の不確定性に対する構造技術側の戦略として適しているだけでなく、従来設計手法では選択されることが少ない、構造特性に変化を持たせた構造が、「よい構造」として選択されうる可能性を示し、新たな構造形態の創出にも寄与することができると考える。

参考文献

- 1) 高橋良和：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，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，pp.29-32，2011。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2012。