

ダンパーの履歴特性のばらつきに基づく 応答のばらつきの評価に関する一考察

有馬 俊¹・江口 康平²・大住 道生³

¹正会員 （国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

²正会員 博（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員（同上）

³正会員 修（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員（同上）

1. はじめに

既設橋の耐震補強等において、支承部を構成する部材として支承本体にエネルギー吸収を図る部材（ダンパー）を追加する事例がある。ダンパーは、道路橋の技術基準である道路橋示方書¹⁾（以下、道示）やその解説書である便覧に具体的な照査方法（以下、みなし規定）が示されていない部材である。道示では、橋の要求性能を所要の信頼性で満足することを適切な知見に基づき証明することを求めており、みなし規定のない部材を含む橋の設計についても同様に証明する必要がある。

道示に基づく橋に要求する性能の一つに、耐荷性能がある。そして、耐荷性能の照査では、構造に依存する不確実性を考慮しており、その内の一つに、履歴特性をモデル化する際に各種の依存性による影響を考慮したとしても実態との乖離が避けられないことの影響や、その他の影響により生じる実態との乖離（以降、履歴特性のばらつき）に基づく橋の応答のばらつきがある。一方、この応答のばらつきを評価するための具体的な方法は道示に示されていない。このため、開発者や設計者が個別に検証してこの応答のばらつきによる影響を評価することになるが、その評価の妥当性を判断することは難しい。部材の履歴特性のばらつきに基づく橋の応答のばらつきに着目した研究には、支承本体でエネルギー吸収を図る免震支承を対象とした研究事例^{2,3)}はあるものの、ダンパーを対象とした研究事例⁴⁾は少ないことに加えて、道示に基づき体系的に整理されたものはない。

そこで、本稿では、支承部にダンパーを用いる桁

橋を対象に、履歴特性のばらつきに基づく橋の応答のばらつきを評価する方法を提案した。あわせて、本方法に従い、具体的に履歴特性を仮定したダンパーを対象に試算した結果を示す。

2. 応答のばらつきの評価方法の提案

道示に基づく耐荷性能の照査では、部材の状態を代表できる指標値（応答）と、限界状態を超えないとみなせる指標値（制限値）の比較により保証する部材の状態に基づき、橋の状態を保証する。橋の応答は、橋を構成する各部材の構造特性に依存することから、部材の履歴特性にばらつきがあることで、橋の応答もばらつく。このため、この応答のばらつきを評価していく必要がある。

一方、橋の応答のばらつきを評価する際に要求される安全余裕を確保するための汎用的な方法は、道示に示されていない。このため、みなし規定のない部材では、「当該橋の条件に応じて、要求する事項を満たすとみなしてよい方法として規定されている方法に従う場合に確保される性能と同等以上の性能を実現できることを一つの目安として要求性能が満足されることを証明」^{5)p21)}することが求められる。

検討対象である支承部にダンパーを用いる桁橋は、支承部でエネルギー吸収を図る橋である。同様に支承部でエネルギー吸収を図る橋として、道示には免震橋（「支承による橋の固有周期の適度な長周期化及び支承のエネルギー吸収の両方の効果による部材応答の低減を耐震設計において考慮する橋。また、その効果を発揮する支承を免震支承という。」^{1)p2)}）の設計が具体的な照査基準とともに規定され

ている。このため、免震橋の設計における支承部の要求性能に基づいて、橋の応答のばらつきを評価する方法を検討する。

図-1に、免震橋における橋の状態（応答）とその構成要素を示す。橋の状態（応答）は各部材の状態（応答）によって評価されるが、これらの状態（応答）は、地震動に対する減衰応答の運動方程式に基づき一体で評価される。また、減衰力及び復元力は、粘性減衰、剛性及び履歴減衰といった各部材の履歴特性に依存して評価される。各履歴特性をモデル化するには、それぞれ不確実性を適切に考慮する必要があるが、H30道路橋支承便覧⁶⁾（以下、支承便覧）より考察すると、免震支承では次のように不確実性が考慮されていると考えられる。

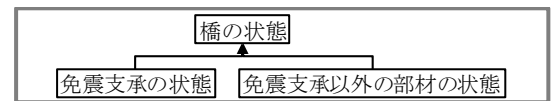
- ・粘性減衰：橋の応答が安全側の評価となるように、粘性減衰はゼロとモデル化している。
- ・剛性：応答解析の不確実性に含めて剛性のばらつきの影響を考慮している。また、品質管理では、履歴を代表する指標として等価剛性を設定し、これが設計値±10%となるように管理している。
- ・履歴減衰：橋の応答が安全側の評価となるように、エネルギー吸収量が小さくなる履歴にモデル化している。また、品質管理では、減衰特性を代表する指標として等価減衰定数を設定し、これが設計値以上となるように管理している。

また、制限値を設定する際にも次のように不確実性は考慮されていると考えられる。

- ・制限値（限界状態2，3）：設定した履歴特性のモデルで減衰特性及び部材の抵抗力を安全側に評価できる限界の状態として、限界状態2及び3の制限値を設定している。

ダンパーもこれと同様に、粘性減衰、剛性及び履歴減衰の不確実性を評価してモデル化するとともに、制限値を設定することで、免震支承と同じ信頼性で、応答のばらつきも含めた部材の評価ができると考えられる。なお、履歴及び減衰特性を代表する指標は、対象とするダンパーの履歴特性に応じて適切に設定する必要があると考えられる。

以上より、支承部にダンパーを用いる桁橋に対して、応答のばらつきを評価する方法として、免震橋の設計における支承部の要求性能と同等の信頼性を達成するように、応答のばらつきも含めて部材を評価（履歴特性のモデル化、制限値の設定）する方法を提案する。すなわち、履歴特性のばらつきに基づく応答のばらつきが、免震支承を設置した場合と同等の信頼性となるようにダンパーを評価することで、免震橋と同等の橋の性能水準が達成されるとみなす



各部材の状態（応答）は、地震動に対する減衰応答の運動方程式に基づき一体で評価

$$\underbrace{[M]\{\ddot{x}\}}_{\text{慣性力}} + \underbrace{[C]\{\dot{x}\}}_{\text{減衰力}} + \underbrace{[K]\{x\}}_{\text{復元力}} = - \sum_i \underbrace{[M]\{I^i\}}_{\text{外力(慣性力)}} \underbrace{\ddot{x}_g}_{\text{地盤の入力加速度}}$$

【他凡例】
 x : 変位, $\dot{x}$: 速度
 $\ddot{x}$: 加速度, i : 加振方向
 ・各部材の履歴特性
 ・それぞれ不確実性を考慮

図-1 橋の状態（応答）と構成要素

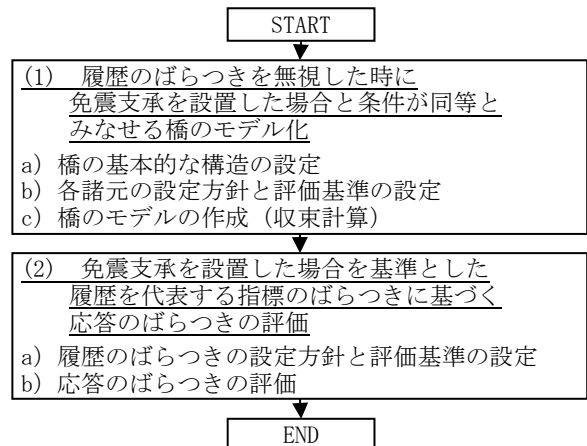


図-2 履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきの評価手順

方法を提案する。

以降では、提案する手法に基づき、部材の評価の一部である履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきが、免震支承を設置した場合と同等の信頼性であるか判断するための評価手順を提案するとともに試算を示す。その他の履歴特性を構成する要素のモデル化や制限値は適切に設定されていることを前提として、これらの設定をするための具体的な方法については、本稿では扱わない。

3. 履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきの評価手順

図-2に、提案する履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきの評価手順を示す。(1)履歴のばらつきを無視した時に免震支承を設置した場合と条件が同等とみなせる橋のモデル化、(2)免震支承を設置した場合を基準とした履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきの評価を行う。各手順の詳細は、以降の各項で試算とともに示す。なお、試算では、簡易に設定している部分と、実務上適当となるように代表させた条件で設定している部分があり、その妥当性については引き続き検討していく必要がある。

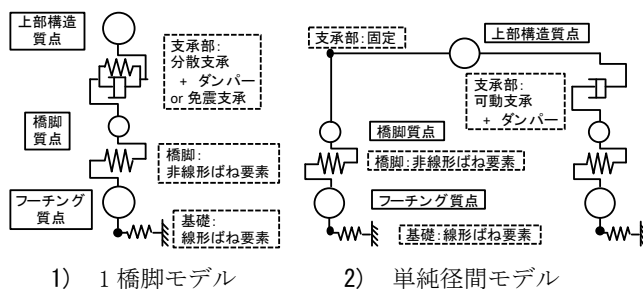


図-3 橋の解析モデル

(1) 履歴のばらつきを無視した時に
免震支承を設置した場合と条件が同等と
みなせる橋のモデル化

a) 橋の基本的な構造の設定

応答は、橋の構造に依存するが、橋の構造は個別の条件により様々である。また、支承部にダンパーを用いる桁橋における支点条件は、全ての支承部が弾性支持、又は、一つが固定支持でその他が可動支持又は弾性支持とすることが多い。以上を踏まえて、試算で対象とする橋の構造は、支点条件に着目して、次の2種類の代表モデルとした。

- ・1橋脚モデル：全ての支承部が弾性支持であり、全ての支承部にダンパーを設置する場合を想定して、1橋脚を取り出した代表モデル。
- ・単純径間モデル：一つが固定支持でその他が可動支持であり、可動支持部にダンパーを設置する場合を想定して、1径間を取り出した代表モデル。

図-3に、試算に用いた1橋脚モデルと単純径間モデルの解析モデルを示す。解析モデルは、道示の標準的な手法である骨組みモデルを用いて、上部構造、RC橋脚、フーチングをそれぞれ1質点に仮定してモデル化した。RC橋脚は、Takedaモデルの履歴特性のばね要素でモデル化した。基礎は、線形のばね要素でモデル化した。

支承部は、免震支承とダンパーを対象とした。免震橋では一般に全ての支点部に免震支承を設定するため、免震支承は1橋脚モデルのみを対象に、単純径間モデルのダンパーの応答を評価する際もこのケースを基準とした。ダンパーは、様々な材料や構造を用いた製品が開発されているが、試算では、橋への適用実績を踏まえて、摩擦型、速度べき乗依存型、鋼材降伏型の履歴特性を有するダンパー（以下、摩擦ダンパー、粘性ダンパー、鋼材ダンパー）を対象に仮定したモデルを対象とした。図-4に、試算に用いたダンパーの履歴モデルを示す。

b) 各諸元の設定方針と評価基準の設定

各諸元は、上部構造重量、橋脚高さ、橋脚の履歴特性、フーチング重量、地盤ばねをパラメータに設定したモデルに対して、橋の応答が目標とする値未

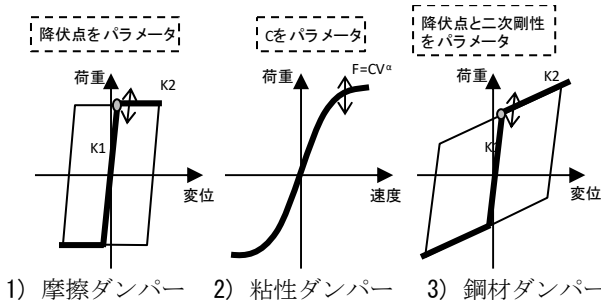


図-4 ダンパーの履歴モデル

表-1 地盤のばね定数

	I 種地盤	II 種地盤	III 種地盤	備考
想定する基礎形式	直接基礎	場所打ち杭	場所打ち杭	
Ass (kN/m)	3.242×10^6	2.763×10^6	2.762×10^6	水平

表-2 質点重量

モデル	項目	値	備考
1 橋脚モデル	上部構造重量(kN)	6330	
	橋脚重量(kN)	1697	
	フーチング重量(kN)	3894	
単純径間モデル	上部構造重量(kN)	8000	
	橋脚重量(kN)	1956	2 質点共通
	フーチング重量(kN)	3894	2 質点共通

満となるように支承部を設定することで作成できる。試算では、橋の構造2種類（1橋脚モデル、単純径間モデル）ごとに、地盤種別3種（I 種、II 種、III 種）と1次の振動モードの固有周期2種（標準加速度応答スペクトルが一定の域、固有周期が長くなると下降する域）を組み合わせた6種類の振動特性を対象に各諸元を設定した。以下にその理由を示す。

- ・地盤種別：道示に基づく設計では、地震動の特性値は、耐震設計上の地盤種別として地盤を3種類に分類した上で、標準加速度応答スペクトル（橋の固有周期と応答加速度の関係）で設定している。
- ・1次の振動モードの固有周期：標準加速度応答スペクトルは、橋の固有周期が長くなると増加する域、一定の域、下降する域の3つに区分できる。また、桁橋では、一般的に1次の固有振動モードが卓越する。さらに、支承部でエネルギー吸収を図る場合では、1次の固有周期は、標準加速度応答スペクトルが一定の域と固有周期が長くなると下降する域となることが多い。

各振動特性となるモデルは、支承と橋脚の剛性比は7.0、橋脚の降伏変位と終局変位の比は7.0、各種地盤種別の地盤ばねと各質点重量は表-1及び表-2に示す一定値に、橋脚の降伏震度(0.1~1.3)をパラメータに設定したモデルに対して、橋の応答が目標とする値未満となるように支承部を設定して作成した。ただし、条件設定が難しい一部の条件では、道示の適用条件とは異なる設定で作成した。

条件の異なる各支承部は、同等の性能を発揮する条件となるように、橋の限界状態を代表する工学的

指標が同等となることを目安に作成できる。試算では、後述するようにL2地震動タイプⅠの加速度波形3波による最大応答の平均値で各応答を評価しているが、各支承部の履歴モデルを設定する際は、1波目による支承部の水平変位及び橋脚の曲げ変位の最大値が同等となるように設定した。以下に、各支承部の履歴モデルの具体的な設定方法を示す。

- ・分散支承及び免震支承： 支承便覧に示される積層ゴム支承及び高減衰積層ゴム支承を対象に、支承幅（500～900mm）、二次形状係数（3～35）をパラメータとして変位依存型のバイリニア型履歴特性のばね要素でモデル化。支承の二次形状係数は、一般的な範囲（4～10程度）を超えるケースがあるが、目標の応答に近くなるように設定。
- ・摩擦ダンパー： 一次剛性（ $K_1=10^7\text{kN/m}$ ）、二次剛性比（ $K_2/K_1=10^{-5}$ ）を一定に、降伏点をパラメータとした、変位依存型のバイリニア型履歴特性のばね要素でモデル化。
- ・粘性ダンパー： $\alpha=0.22$ を一定に、減衰係数 C をパラメータとして、速度依存型の粘性要素（ $F=C \times V^\alpha$ ）でモデル化。
- ・鋼材ダンパー： 一次剛性（ $K_1=10^6\text{kN/m}$ ）を一定に、降伏点及び二次剛性比（ $K_2/K_1=10^{-2}$ 又は 10^{-3} ）をパラメータとした、変位依存型のバイリニア型履歴特性のばね要素でモデル化。

また、免震橋の設計では、下部構造の塑性化が免震支承のエネルギー吸収の確実性に影響を及ぼさないことを前提として、橋脚をRC橋脚とする場合は限定的な塑性化に留めることで、支承部とRC橋脚に同時にエネルギー吸収を図る設計が示されている。これを参考に、試算では、橋脚はRC橋脚を対象として、橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件と限定的な塑性化の範囲に抑える条件の2種類の橋脚条件を対象とした。免震橋では、橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える目的が免震支承のエネルギー吸収の確実性に影響を及ぼさないことであることを踏まえて、支承部と橋脚の履歴吸収エネルギーの比率が、免震支承のケースと同等以上となることを条件とした。そのため、試算では、橋脚の変位が基準とした免震支承のケースと同等となるように設定した時の、各ケースの支承部と橋脚のエネルギー吸収の関係の確認まで行った。基準とした免震支承のケースの橋脚の変位は、H14道示⁷⁾の免震橋の設計で要求されるRC橋脚の許容塑性率に準じて、「 $((\text{終局変位}-\text{降伏変位})/2\alpha)+\text{降伏変位}$ 、 $\alpha=1.5$ 」で設定した。

単純径間モデルの支承部を固定とした橋脚（ダン

パーを設置しない橋脚）の目標変位は、ダンパーを設置する橋脚とは異なる条件で設定した。支承部を固定とした橋脚の目標変位は、ダンパーを設置する橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件とした時では、H14道示の免震橋の設計で要求されるRC橋脚の許容塑性率を参考に「 $((\text{終局変位}-\text{降伏変位})/2\alpha)+\text{降伏変位}$ 、 $\alpha=1.5$ 」で設定した。ダンパーを設置する橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件とした時では、H14道示の通常のRC橋脚の設計で要求される許容塑性率を参考に「 $((\text{終局変位}-\text{降伏変位})/\alpha)+\text{降伏変位}$ 、 $\alpha=1.5$ 」で設定した。なお、ダンパーを設置する橋脚における支承部と橋脚間のエネルギー吸収の関係は確認しているが、ダンパーを設置する橋脚と支承部を固定とした橋脚間のエネルギー吸収の関係は確認していない。

c) 橋のモデルの作成（収束計算）

設定した評価基準に適合するように諸元を変更して収束計算（解析）を行い、各諸元を設定する。

解析は、道示の標準的な手法である動的解析とした。応答は、道示に示されるL2地震動の加速度波形を入力地震動とした時刻歴応答解析により、3波の最大応答値の平均値で評価する。道示に基づく設計では、L2地震動にはタイプⅠとタイプⅡの2種類を対象に両方で照査する必要があるが、試算ではタイプⅠのみを対象とした。解析コードにはTDAP-Ⅲを用いて、数値積分法はニューマーク β 法（ $\beta=1/4$ ）、積分時間間隔は1/500秒とした。

減衰は、道示に示される方法に基づき、構造要素の減衰定数を道示V表-解5.2.1の値で設定するとともに、固有値解析及びひずみエネルギー比例減衰法により得られた橋のモード減衰定数を近似するように、Rayleigh型減衰でモデル化した。ここで、固有値解析では、今回のモデルの範囲では、ダンパーを無視すると、減衰定数の大きい基礎と比べて減衰定数の小さい分散支承や橋脚のひずみエネルギーが大きくなるため、減衰が小さく設定されることとなり、橋の応答が安全側に評価できると考えられることから、ダンパーはないものと仮定した。

また、試算では、各振動特性を代表するケース1つずつの6ケースを作成して応答のばらつきを評価することとした。すなわち、2種類の橋脚条件、2種類の橋のモデルごとの6種類の振動特性、橋のモデルに応じて3又は4種類の支承条件の合計84ケースを作成した。

表-3に、橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件（ケース1～12）及び橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件（ケース1'～12'）の各ケースの代表

表-3 各ケースの代表諸元

1) 橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件 (共通, 免震支承)

ケース	橋のモデル (共通)	橋の振動特性 (共通)		橋脚の降伏震度 (共通)		免震支承		
		地盤条件	固有周期	弾性又は可動側	固定側	支承幅 (mm)	二次形状係数	等価剛性 (kN/m)
1	1 橋脚 モデル	I 種	ピーク域	1.3	-	780	26	112,033
2			下降域	0.9	-	680	10	37,309
3		II 種	ピーク域	1.2	-	750	12	48,717
4			下降域	0.8	-	650	5	19,771
5		III 種	ピーク域	1.1	-	700	7	26,694
6			下降域	1.1	-	620	3	10,860
7	単純径間 モデル	I 種	ピーク域	0.4	0.6	-	-	-
8			下降域	0.3	0.4	-	-	-
9		II 種	ピーク域	0.3	0.5	-	-	-
10			下降域	0.4	0.4	-	-	-
11		III 種	ピーク域	0.3	0.5	-	-	-
12			下降域	0.3	0.4	-	-	-

2) 橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件 (分散支承, 摩擦ダンパー, 粘性ダンパー, 鋼材ダンパー)

ケース	分散支承			摩擦ダンパー	粘性ダンパー		鋼材ダンパー	
	支承幅 (mm)	二次形状係数	等価剛性 (kN/m)	降伏強度 (kN)	粘性係数	0.5m/s 時の抵抗 (kN)	降伏強度 (kN)	二次剛性比
1	850	28	120,417	1550	1980	1700	1900	0.01
2	770	11	43,596	800	932	800	1400	0.01
3	870	14	59,133	1300	1514	1300	1600	0.01
4	720	5	19,636	500	582	500	1200	0.001
5	860	7	28,446	1250	1398	1200	1400	0.01
6	830	3	11,482	600	699	600	1000	0.01
7	-	-	-	550	815	700	550	0.01
8	-	-	-	400	524	450	500	0.01
9	-	-	-	250	349	300	350	0.01
10	-	-	-	300	349	300	350	0.001
11	-	-	-	450	582	500	450	0.001
12	-	-	-	200	233	200	250	0.001

3) 橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件 (共通, 免震支承)

ケース	橋のモデル (共通)	橋の振動特性 (共通)		橋脚の降伏震度 (共通)		免震支承		
		地盤条件	固有周期	弾性又は可動側	固定側	支承幅 (mm)	二次形状係数	等価剛性 (kN/m)
1'	1 橋脚 モデル	I 種	ピーク域	0.6	-	630	35	114,375
2'			下降域	0.5	-	570	16	46,813
3'		II 種	ピーク域	0.7	-	620	19	62,310
4'			下降域	0.4	-	500	7	19,070
5'		III 種	ピーク域	0.5	-	580	9	25,661
6'			下降域	0.4	-	520	4	10,958
7'	単純径間 モデル	I 種	ピーク域	0.2	0.4	-	-	-
8'			下降域	0.2	0.3	-	-	-
9'		II 種	ピーク域	0.2	0.4	-	-	-
10'			下降域	0.2	0.3	-	-	-
11'		III 種	ピーク域	0.2	0.4	-	-	-
12'			下降域	0.1	0.3	-	-	-

4) 橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件 (分散支承, 摩擦ダンパー, 粘性ダンパー, 鋼材ダンパー)

ケース	分散支承			摩擦ダンパー	粘性ダンパー		鋼材ダンパー	
	支承幅 (mm)	二次形状係数	等価剛性 (kN/m)	降伏強度 (kN)	粘性係数	0.5m/s 時の抵抗 (kN)	降伏強度 (kN)	二次剛性比
1'	810	27	109,350	950	1258	1080	1000	0.01
2'	620	16	48,050	550	745	640	900	0.01
3'	690	17	59,513	830	1072	920	900	0.01
4'	570	7	20,306	480	699	600	500	0.0001
5'	600	10	28,571	900	1188	1020	1150	0.01
6'	540	4	11,391	640	722	620	1000	0.01
7'	-	-	-	500	815	700	520	0.01
8'	-	-	-	300	408	350	250	0.01
9'	-	-	-	270	349	300	320	0.001
10'	-	-	-	200	233	200	330	0.001
11'	-	-	-	550	815	700	600	0.001
12'	-	-	-	300	396	340	300	0.001

諸元を示す。また、図-5に、代表ケースとして、橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件の1橋脚モデル (ケース1~6) の免震支承の各ケースの1次モードの固有周期を、レベル2地震動タイプ I の標準加速

度応答スペクトルにプロットしたものを示す。

橋脚の応答を限定的な塑性化に抑える条件 (ケース1'~12') では、前述の通り橋脚の目標変位を設定した時の支承部と橋脚のエネルギー吸収の関係の確

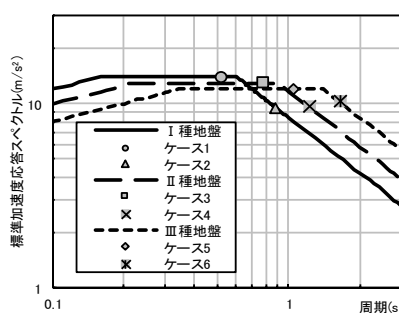
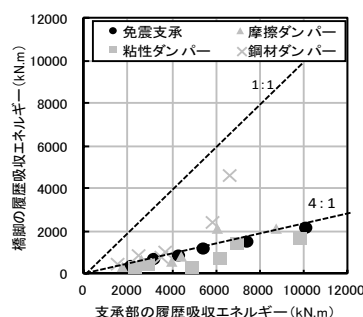
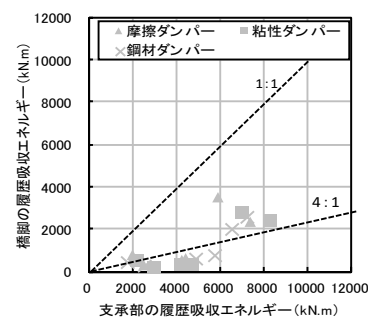


図-5 レベル2地震動タイプIの標準加速度
応答スペクトルと免震支承のケースの固有周期



1) ケース 1' ~ 6'



2) ケース 7' ~ 12'

図-6 支承部と橋脚の履歴吸収エネルギー

認まで行った。図-6に、各ケースの支承部と橋脚の履歴吸収エネルギーの関係を示す。

まず、1橋脚モデル（ケース1'~6'）に着目する。免震支承のケースでは、支承部と橋脚のエネルギー吸収の比率が4:1程度であった。ダンパーのケースでは、殆どのケースでこの比率が4以上:1となったが、摩擦及び鋼材ダンパーの一部のケースではこの比率が4以下:1となった。すなわち、粘性ダンパーのケースでは、免震支承のケースと同等の支承部によるエネルギー吸収率を確保されているが、摩擦及び鋼材ダンパーのケースでは、免震支承のケースと同等の支承部によるエネルギー吸収率を確保されていない場合がある。

続いて、単純径間モデル（ケース7'~12'）に着目する。全ての種類のダンパーの一部のケースで支承部と橋脚のエネルギー吸収の比率が4以下:1となった。すなわち、全ての種類のダンパーのケースで、免震支承のケースと同等の支承部によるエネルギー吸収率を確保されていない場合がある。

以上の結果より、橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件とするケースは、今回検討した条件の範囲では、全ての種類のダンパーのケースで、免震支承のケースで確保される支承部のエネルギー吸収の確実性が確保できない場合があることが確認された。このため、免震支承のケースで確保される支承部のエネルギー吸収の確実性が確保できるようなダンパーのケースを作成するには、条件の変更による再検討が必要であるが、今回は試算のため収束計算は行っていない。

(2) 免震支承を設置した場合を基準とした 履歴を代表する指標のばらつきに基づく 応答のばらつきの評価

a) 履歴のばらつきの設定方針と評価基準

履歴特性を代表する指標は、品質管理により一定の範囲の水準に管理されることを前提とした。応答のばらつきは、設計値の履歴モデルのケースに、品質管理で定まる上下限の履歴となるモデルの2ケー

スを加えた3ケースを対象に評価する。試算では、各支承部の品質管理で定まる上下限の履歴となるモデルは、次のように設定した。

- ・免震支承：支承便覧に基づき、等価剛性が設計値に対して $\pm 10\%$ となるように設定。具体的には、設計値で設定した等価剛性の算出に用いた有効設計変位と、同じ有効設計変位を用いて算出される等価剛性が、設計値の等価剛性の $\pm 10\%$ となる履歴モデルとなるように、二次形状係数をパラメータに設定。
- ・摩擦ダンパー及び鋼材ダンパー：剛性を一定として、降伏点が $\pm 10\%$ となるように設定。
- ・粘性ダンパー：減衰抵抗力が $\pm 10\%$ となるように、 $\alpha = 0.22$ を一定として、減衰係数Cを設計値 $\pm 10\%$ で設定。

ここで、1橋脚モデルで支承部にダンパーを用いたケースでは、支承部は分散支承とダンパーの2種類の部材で構成しているが、免震支承のケースと応答のばらつきを比較する上では、分散支承とダンパーを一体とした支承部の履歴のばらつきとして評価する必要がある。ただし、試算では、履歴モデル上はダンパーのみにばらつきを考慮した。

また、応答のばらつきは、信頼性を評価する単位に対して、支承部のみにばらつきを考慮した時の「橋全体の応答を代表する工学的指標の標準偏差」で評価し、これを比較することで免震支承のケースと同等の応答の信頼性を確保できるか判断した。ここで、信頼性を評価する単位は、免震橋の設計では、橋の振動特性に応じて部材の評価（履歴特性のモデル化、制限値の設定）における不確実性の考慮の方法を変えていないことから、全ての振動特性を網羅した橋のモデルの単位（前述の6種類の振動特性をまとめた単位）で信頼性が評価されていると考えられる。これを参考に、試算では、信頼性を評価する単位は、全ての振動特性を網羅した橋のモデルの単位で評価することとした。すなわち、応答の標準偏差は、橋脚の条件及び橋のモデルが異なる条件ごとに、6種類の振動特性（ケース1~6、ケース7~12、

ケース1'～6'，ケース7'～12'）を一つの単位として，支承部の履歴特性のみにばらつき3種（設計値と品質管理で定まる上下限）を考慮して算出される18個の応答より評価した．

また，橋全体の応答を代表する工学的指標として，支承部の相対変位，橋脚の曲げ変位に着目した．なお，橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件のケース（ケース1～12）についても，同じ様に橋脚の曲げ変位を整理した．また，橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件のケース（ケース1'～12'）は，前述の通り収束計算まで行って検討ケースを作成していないが，本ケースも対象に整理した．

b) 応答のばらつきの評価

設定した評価基準により，履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきを評価する．解析方法は，「(1) c) 橋のモデルの作成（収束計算）」で述べた方法と同じとした．減衰モデルもここで設定した値と同じ値を用いた．

図-7及び図-8に，支承部の相対変位及び橋脚の曲げ変位の，「設計モデルによる応答値」に対する「履歴をばらつかせた時の応答値」の比率が，それぞれ正規分布にばらつくと仮定した確率密度を示す．また，表-4に，この比率の平均値と標準偏差を示す．

まず，橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件の1橋脚モデル（ケース1～6）及び単純径間モデル（ケース7～12）に着目する．支承部の相対変位及び橋脚の曲げ変位の標準偏差について，1橋脚モデルの免震支承のケースと各ダンパーのケースを比べると，両者ともダンパーのケースの標準偏差の方が小さい．これより，今回検討した条件で，免震支承のケースと同等の応答の信頼性を確保できることが確認された．

次に，橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件の1橋脚モデル（ケース1'～6'）及び単純径間モデル（ケース7'～12'）に着目する．支承部の相対変位の標準偏差について，1橋脚モデルの免震支承のケースと各ダンパーのケースを比べると，ダンパーのケースの標準偏差の方が小さい．一方，橋脚の曲げ変位の標準偏差について，免震支承のケースとダンパーのケースを比べると，ダンパーのケースの標準偏差の方が大きい．これより，今回検討した条件では，全ての種類のダンパーのケースの橋脚の応答において，免震支承のケースと同等の信頼性が確保できないことが確認された．

以上の試算より，今回検討した条件では，橋脚の応答を弾性範囲に抑える条件の場合は，履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答は免震支承の場合

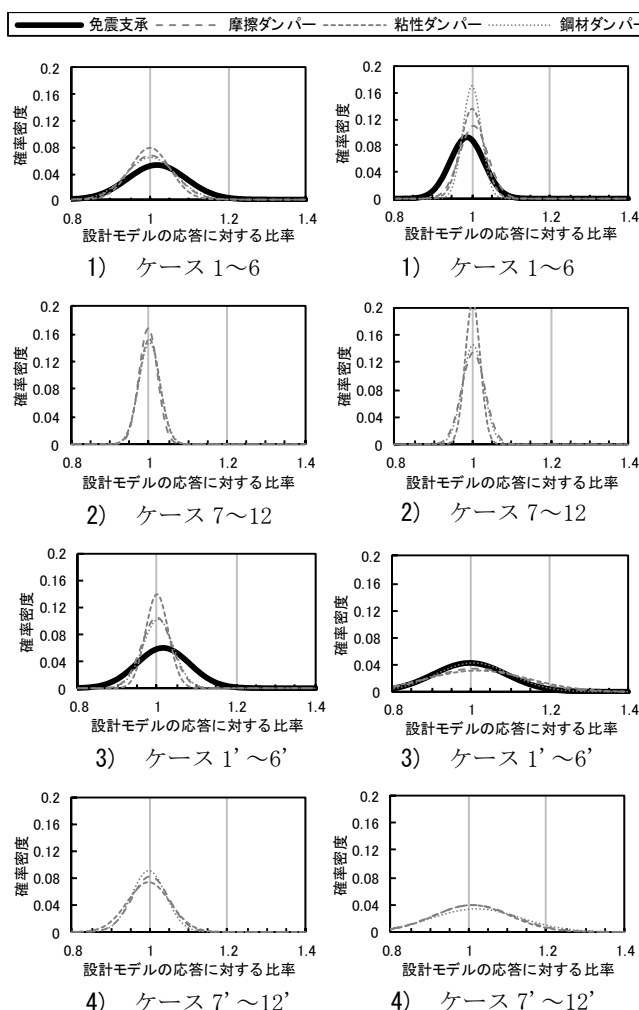


図-7 支承部の相対変位の確率密度

図-8 橋脚の曲げ変位の確率密度

表-4 各応答の平均値と標準偏差

1) ケース1～6

	支承部の相対変位		橋脚の曲げ変位	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
免震支承	1.02	0.07	0.99	0.04
摩擦ダンパー	1.00	0.06	1.00	0.04
粘性ダンパー	1.00	0.05	1.00	0.04
鋼材ダンパー	1.00	0.06	1.00	0.03

2) ケース7～12

	支承部の相対変位		橋脚の曲げ変位	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
摩擦ダンパー	1.00	0.02	1.00	0.03
粘性ダンパー	1.00	0.03	1.00	0.02
鋼材ダンパー	1.00	0.03	1.00	0.03

3) ケース1'～6'

	支承部の相対変位		橋脚の曲げ変位	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
免震支承	1.01	0.07	1.00	0.09
摩擦ダンパー	1.00	0.05	1.01	0.10
粘性ダンパー	1.00	0.05	1.01	0.10
鋼材ダンパー	1.00	0.04	1.01	0.11

4) ケース7'～12'

	支承部の相対変位		橋脚の曲げ変位	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
摩擦ダンパー	1.00	0.04	1.01	0.12
粘性ダンパー	1.00	0.03	1.02	0.13
鋼材ダンパー	1.00	0.04	1.01	0.10

※着色部は，基準とした免震支承のケース以上の標準偏差

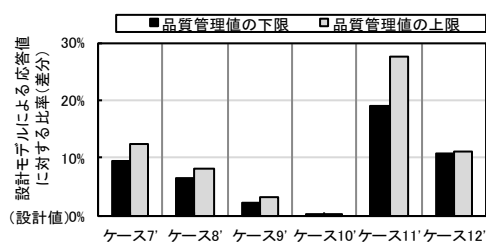


図-9 ケース 7'～12' の粘性ダンパーのケースにおける橋脚の曲げ変位

と同等以上の信頼性であるといえる。一方、橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件の場合は、履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答は免震支承の場合と同等以上の信頼性が確保できていないといえる。このため、本ケースについては、免震支承のケースと同等の応答の信頼性を確保するためには条件の変更による再検討が必要である。

最後に、標準偏差（ばらつき）が最も大きくなった、橋脚の応答を限定的な塑性化の範囲に抑える条件の単純径間モデル（ケース7'～12'）の粘性ダンパーの橋脚曲げ変位に着目する。図-9に、「設計モデルによる応答値」に対する「設計モデルによる応答値」と「履歴をばらつかせた時の応答値」の差の絶対値の比率を示す。この比率について、振動特性ごと（各ケース間）の値を比較すると、その差は異なることがわかる。また、同じ振動特性（同じケース）の品質管理値の上下限の履歴となるモデルとした時の両者の値を比較すると、1%未満の差（ケース9', 10', 12'）～8%程度の差（ケース11'）でばらつきがあった。品質管理値の上下限の履歴となるモデルは、その平均が設計モデルとなるように設定しているものの、このように設計モデルの応答に対する差にはばらつきがみられた。試算では、振動特性は代表1ケースによる検討であり、応答のばらつきが大きさが異なる要因や、振動特性ごとの応答のばらつきの傾向を推定するには至らなかった。これら进行分析するには、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本稿では、支承部にダンパーを用いる桁橋を対象に、橋の応答のばらつきの評価に基づきダンパーに求められる履歴特性のばらつきの水準を評価する方法を提案し、具体的に履歴特性を仮定したダンパーを対象として、応答のばらつきの評価手順を試算とともに示した。なお、本検討は以下を前提に行った。

- ・支承部でエネルギー吸収を図る橋としてみなし規定のある免震支承の設計では、応答のばらつきも含めて部材を評価している。
- ・部材の履歴特性のばらつきに基づく橋の応答のば

らつきが、免震支承を設置した場合と同等となるようにダンパーを評価することで、免震橋と同等の橋の性能水準が達成される。

提案した方法に基づく試算から、以下の知見が得られた。

- ・部材の評価の一部である履歴を代表する指標のばらつきに基づく応答のばらつきについて、免震支承を設置した場合の信頼性と比較することで、評価することができた。
- ・試算では、支承部の履歴曲線の設定や地盤条件及び固有周期に応じて、支承部及び橋脚の応答のばらつきが異なる結果が得られた。この要因を分析するには、さらなる検討が必要であることが確認された。

なお、試算に用いた橋の諸元は、簡易又は実務上適当となるように代表させた条件で設定している部分があり、その妥当性は検証できていない。今後は、適切な条件（諸元）の設定について検討を行うとともに留意事項を整理し、履歴特性のばらつきに基づく応答のばらつきを評価する方法の一つとして確立するため検討を進めていきたい。

謝辞：本研究にあたって、国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター熊本地震復旧対策研究室の西田室長、宮原主任研究員より資料の提供及び助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2017.11.
- 2) 足立幸郎：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究，博士学位論文，京都大学，2002.1
- 3) 高橋宏和，岡田太賀雄，大住道生，星隈順一：免震支承と橋脚のエネルギー吸収割合が免震橋の動的応答のばらつきに及ぼす影響，第17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，2016.7.
- 4) 有馬 俊，澤田 守，大住 道生：粘性ダンパーの抵抗特性のばらつきに着目した耐震設計に関する試算，土木学会第75回年次学術講演会講演概要集，2020.9
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，2017.11.
- 6) (社) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2018.12.
- 7) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2002.3.