

非線形動的解析における粘性減衰のモデル化に関する一考察

小倉裕介¹・運上茂樹²

¹正会員 修(工) 独立行政法人 土木研究所 耐震研究グループ 耐震チーム 交流研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

²正会員 工博 独立行政法人 土木研究所 耐震研究グループ 耐震チーム 上席研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

※著者の小倉は、(株)ワイ・テックから出向

1. はじめに

道路橋示方書¹⁾では、地震時の挙動が複雑な橋梁に対しては動的照査法により照査を行うこととされ、構造系が単純で1次振動モードが卓越する橋梁以外の、ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋や免震橋、ラーメン橋などの形式の橋梁が地震時の挙動が複雑な橋梁に分類される。動的照査法では一般に部材の力学的非線形特性を考慮した非線形動的解析が行われるが、この場合には構造物を適切にモデル化することが重要となる。

ここで構造物の減衰特性には、部材の非線形挙動に伴う履歴減衰、部材の粘性抵抗により生じる粘性減衰、振動エネルギーの地下逸散などがあるが、一

般にはある一定量の減衰定数を設定する場合が多い。解析上は履歴減衰以外の減衰を粘性減衰でモデル化し、ひずみエネルギー比例減衰法の仮定により得られた各次モード減衰定数から、それを近似したRayleigh型減衰マトリックス、または、ひずみエネルギー比例減衰の各モード減衰に等価な粘性減衰マトリックスなどが用いられる。このうち数値計算の安定性や減衰マトリックスが対角化されることによる解析スピードの向上などの理由により、Rayleigh型減衰の使用実績が多い。

これらの粘性減衰モデルは、もともと線形振動において提案されたものであり、非線形動的解析に適用した場合の解析精度についても、いくつかの研究が行われている²⁾³⁾⁴⁾ものの、粘性減衰の設定方法に

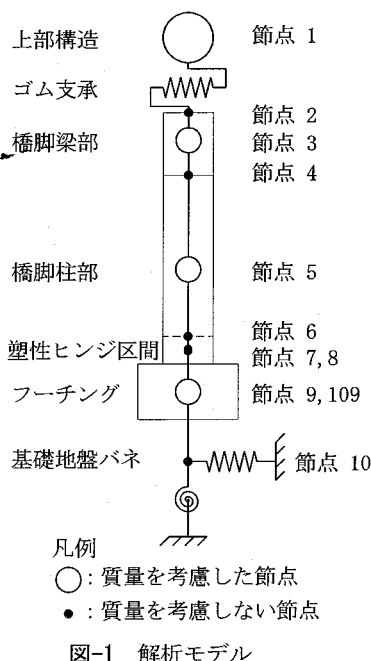


表-1 構造諸元

(a) 節点の諸元			(b) はり要素の諸元			
節点 番号	座標 [m]	節点重量 [kN]	節点番号		弾性係数 [kN/m ²]	断面2次 [m ⁴]
1	2.500	6301.4	4	5	25000000	5.066
2	0.000	-	5	6	25000000	5.066
3	-1.104	1372.0	2	3	剛体	
4	-2.500	-	3	4		
5	-6.250	2021.7	6	7		
6	-8.900	-	8	109		
7	-9.450	-	109	10		
8	-9.450	-				
109	-11.100	-	(c) 塑性ヒンジ回転バネの降伏点			
9	-11.100	3894.5	降伏曲げモーメント		52575 [kNm]	
10	-13.872	-	降伏回転角		0.003449 [rad]	

(d) バネ要素の諸元					
節点番号		自由度	バネ剛性	備考	
1		2	水平	23614 [kN/m]	ゴム支承
7		8	水平	10000000000 [kN/m]	塑性ヒンジ
7		8	回転	15242740 [kNm/rad]	
9		109	水平	10000000000 [kN/m]	仮想バネ
10		固定	水平	2451736 [kN/m]	基礎地盤
10		固定	回転	31837601 [kNm/rad]	バネ

表-2 固有振動解析結果

	初期剛性モード		増分形降伏剛性モード	
	1次	2次	1次	2次
固有周期 [s]	1.21	0.26	133.97	0.43
減衰定数	0.06	0.11	0.02	0.04
刺激係数	1.09	1.41	—	—
有効質量比	0.56	0.25	—	—

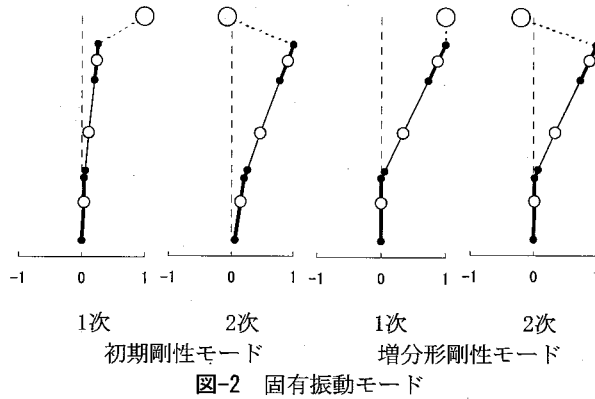


図-2 固有振動モード

については十分に確立していないのが現状である。そこで本研究では、ゴム支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋梁を対象に、粘性減衰のモデル化が非線形動的応答に及ぼす影響について解析的に検討を行ったものである。

2. 解析モデル

解析対象はゴム支承により上部構造を支持したRC橋脚の単柱モデルとし、図-1のようにモデル化した。解析モデルの諸元を表-1に示す。橋梁の非線形性は橋脚基部の塑性ヒンジ区間中央に配置した塑性ヒンジ回転バネのみに考慮し、降伏後の剛性は初期剛性の1/10000とした。初期剛性は橋脚の降伏時の割線剛性とした。履歴特性はTakedaモデルを用い、除荷剛性低下指数 α の値は0.5とした。塑性ヒンジ回転バネの降伏曲げモーメントは塑性ヒンジ区間の下端において降伏曲げモーメントとなるように補正を行っているため、部材の降伏曲げモーメント M_y より小さくなる。橋脚柱部の部材は弾性は要素とし、橋脚梁部、塑性ヒンジ区間、フーチングは剛体とした。質量は上部構造、橋脚梁部中央、橋脚柱部中央およびフーチングのみに集中して配置したが、剛体処理の制約から塑性ヒンジ節点8の作用力を検討するため、フーチングの質量を節点9に持たせ、フーチング位置の節点109間を剛性の大きい仮想水平バネで繋いだ。また塑性ヒンジ位置の節点7-8間の水平方向も同一変位とするため仮想水平バネを配置した。上部構造と橋脚天端にはゴム支承水平バネで繋ぎ、フーチングは水平、回転方向の基礎地盤バネにより支持した。ひずみエネルギー比例減衰定数を算

表-3 Rayleigh減衰係数

考慮するモード次数	1次, 2次	1次, 4次
質量マトリックスにかかる係数 α	0.361228	0.584262
剛性マトリックスにかかる係数 β	0.008724	0.000498

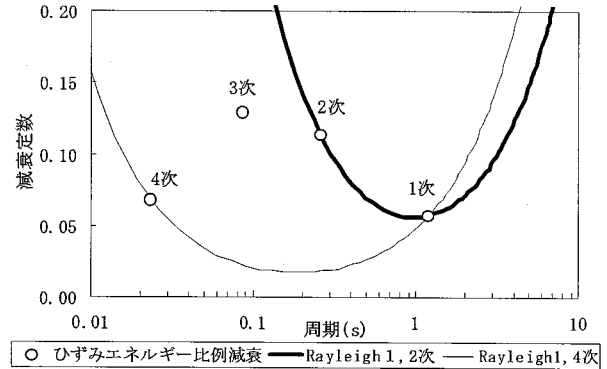


図-3 Rayleigh減衰係数の設定

出するための各部材の減衰定数は、ゴム支承4%、橋脚躯体および塑性ヒンジ2%、基礎地盤バネ20%とした。

3. 減衰力ベクトル形状の比較

時々刻々剛性が変化する非線形動的応答において、粘性減衰モデルにより減衰力はどうのような影響を受けるのかについて、ここでは、解析モデルの初期剛性時および増分形の降伏後剛性時の固有振動ベクトルから各粘性減衰マトリックスと乗じた減衰力ベクトル形状を比較し、粘性減衰モデルによる減衰力の特徴を明らかにすることを試みた。

(1) 固有振動解析

解析モデルについて塑性ヒンジの回転バネ剛性が初期剛性、およびその1/10000の剛性となる降伏後の増分形剛性としたケースについて固有振動解析を行った。固有振動解析結果を表-2、最大変位を1に正規化した固有振動モードベクトルを図-2に示す。初期剛性の主要な振動モードであるゴム支承が変位する1次モードでは、周期1.21秒、ひずみエネルギー比例減衰定数は6%となり、橋脚が変位する2次モードでは周期0.26秒、減衰定数は11%となった。一方、増分形の降伏後剛性では、塑性ヒンジ部分が鋭角に折れ曲がるような振動モードとなり、1次モードは周期134秒に長周期化し、2次モードは周期0.43秒となった。1次モードの周期は降伏後の塑性ヒンジ剛性の仮定により決定される計算上の値となる。降伏後の増分形におけるひずみエネルギー比例減衰定数は、1次モードで2%、2次モードで4%となった。

表-4 運動方程式のマトリックス
(a)初期剛性における剛性マトリックス[K]

		×10 ⁶ (単位: kN, m)									
節点	自由度	1	3	5	7	8	9				
		水平	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平
1	水平	0.02	-0.02	0.03	0	0	0	0	0	0	0
3	水平	-0.02	28.85	94.25	-28.82	54.04	0	0	0	0	0
	回転	0.03	94.25	342.18	-94.27	142.99	0	0	0	0	0
5	水平	0	-28.82	-94.27	110.49	54.17	-81.67	153.13	0	0	0
	回転	0	54.04	142.99	54.17	326.28	-108.22	155.11	0	0	0
7	水平	0	0	0	-81.67	-108.22	10081.7	-153.13	-10000.0	0	0
	回転	0	0	0	153.13	155.11	-153.13	350.16	0	-15.24	0
8	水平	0	0	0	0	0	-10000.0	0	20002.5	16510.8	-10000.0
	回転	0	0	0	0	0	0	-15.24	16510.8	27320.0	-16500.0
9	水平	0	0	0	0	0	0	-10000.0	-16500.0	10000.0	0

(b)質量マトリックス[M]

		(単位: t, m)									
節点	自由度	1	3	5	7	8	9				
		水平	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平
1	水平	643.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	水平	0	140.0	0	0	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	水平	0	0	0	206.3	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	水平	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	水平	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	水平	0	0	0	0	0	0	0	0	0	397.4

(c)モード減衰マトリックス[C] (ひずみエネルギー比例減衰全モード次数を考慮)

		(単位: kN, m)									
節点	自由度	1	3	5	7	8	9				
		水平	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平
1	水平	436.8	-178.3	0	-90.9	0	0	0	0	0	-13.4
3	水平	-178.3	1691.2	0	-1819.7	0	0	0	0	0	88.3
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	水平	-90.9	-1819.7	0	5469.7	0	0	0	0	0	-2410.8
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	水平	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	水平	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	回転	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	水平	-13.4	88.3	0	-2410.8	0	0	0	0	0	8761.5

(d)Rayleigh減衰マトリックス[C] (ひずみエネルギー比例減衰1次, 2次モードを考慮)

		×10 ³ (単位: kN, m)									
節点	自由度	1	3	5	7	8	9				
		水平	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平	回転	水平
1	水平	0.4	-0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0
3	水平	-0.2	251.7	822.2	-251.4	471.4	0	0	0	0	0
	回転	0.2	822.2	2985.2	-822.5	1247.5	0	0	0	0	0
5	水平	0	-251.4	-822.5	964.0	472.6	-712.5	1335.9	0	0	0
	回転	0	471.4	1247.5	472.6	2846.5	-944.1	1353.2	0	0	0
7	水平	0	0	0	-712.5	-944.1	87952.5	-1335.9	-87240.0	0	0
	回転	0	0	0	1335.9	1353.2	-1335.9	3054.8	0	-133.0	0
8	水平	0	0	0	0	0	-87240.0	0	174501.0	144041.0	-87240.0
	回転	0	0	0	0	0	0	-133.0	144041.0	238340.0	-143946.0
9	水平	0	0	0	0	0	0	0	-87240.0	-143946.0	87240.0

(2) 粘性減衰マトリックスの作成方法

a) モード減衰に等価な粘性減衰マトリックス

Cloughの方法により各次モードのひずみエネルギー
一比例減衰定数から構造全体の粘性減衰マトリク
スを作成する方法である。

$$[C] = [M][\zeta][\phi]^T [M] \quad (1)$$

$$[\phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$$

$$[\zeta] = \begin{bmatrix} \zeta_1 & & 0 \\ & \zeta_2 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & \zeta_n \end{bmatrix}$$

$$\zeta_i = 2h_i\omega_i/m_i$$

ここで,

[C]: 減衰マトリックス

[M]: 質量マトリックス

n: モード次数

ϕ_i : i次モードベクトル

h_i : i次モードの減衰定数

ω_i : i 次モードの固有角振動数

m_i : i 次モードのモード質量

式(1)より、減衰マトリックスは、質量をもつ節点の自由度およびその連成項に数値が入ったものになる。一般にはこれをひずみエネルギー比例減衰と呼ぶ場合があるが、弾性振動モードに限定したひずみエネルギー比例減衰をモデル化していることから、ここでは単にモード減衰と呼ぶこととする。

また、非線形動的解析において厳密な粘性減衰を求めることは困難であるが、降伏後の増分形の剛性を用いた運動方程式におけるひずみエネルギー比例減衰から(1)式により粘性減衰マトリックスを作成し、降伏後の増分形運動方程式による粘性減衰のひとつの指標とした。ここでは、これを降伏瞬間剛性モード減衰と呼ぶこととする。

b) Rayleigh型減衰

Rayleigh型減衰は、次式のように粘性減衰マトリックス $[C]$ を質量マトリックス $[M]$ と剛性マトリックス $[K]$ の線形結合として表したものである。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

α 、 β はRayleigh減衰係数であり、対象とする橋の振動の卓越する2つの固有振動モード i 次、 j 次の固有角振動数 ω_i 、 ω_j とひずみエネルギー比例減衰定数により次式にて求める。

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1/\omega_j & 1/\omega_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \end{Bmatrix}$$

表-3に本解析モデルで計算したRayleigh減衰係数を示し、図-3に各次モードのひずみエネルギー比例減衰とRayleigh型減衰の周期-減衰定数の関係をプロットする。本解析モデルにおいては、卓越する振動モードは1次、2次モードとなるが、ここでは1次、4次モードとした場合の結果についても示している。松田ら⁴⁾はRayleigh減衰係数の設定方法として周期を1次モード固有周期と0.02秒、減衰定数 h_i 、 h_j をともに1次モードの減衰定数とすることを提案しており、この1次、4次モードのRayleigh型減衰は松田らの提案する方法とほぼ同様の減衰マトリックスとなる。このとき、剛性マトリックスにかかる係数は、1次、2次モードを考慮した場合の6%程度に低減している。

また、Rayleigh型減衰では、時々刻々変化する剛性マトリックスから式(2)を用いて増分形の減衰マトリックスを計算して解析する方法が考えられる。ここではこれを瞬間剛性Rayleigh型減衰と呼ぶ。このときのRayleigh減衰係数としては初期剛性により

設定したものを用いる。瞬間剛性Rayleigh型減衰では、橋脚が降伏し長周期化した増分形モードにおいても、図-3のRayleigh型減衰の減衰定数-周期関係を用いた減衰定数により解析を行うことができるが、初期剛性によるRayleigh型減衰定数を、降伏後の振動モードに適用することになり、物理的な意味づけが明らかでない。

次に、初期剛性マトリックス、質量マトリックス、モード減衰マトリックスおよび初期剛性モードの1次、2次を考慮したRayleigh型減衰マトリックスの数値を表-4に示す。モード減衰マトリックスは、前述したように集中質量を考慮した自由度において数値が存在するのに対して、Rayleigh型減衰では剛性マトリックスと同様に対角に数値が入り、2つの減衰モデルでマトリックス内の数値分布が大きく異なることがわかる。

(3) 粘性減衰力ベクトル形状

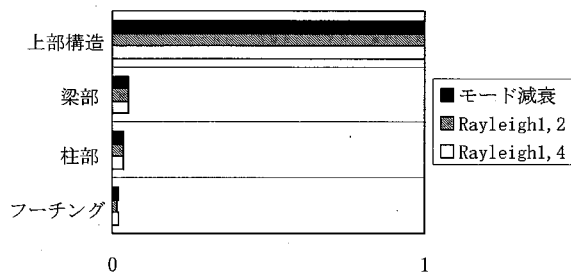
粘性減衰力ベクトルは、(1)で求めた固有振動ベクトルと(2)で求めた各減衰マトリックスより求めることができる。 i 次モードの固有振動モード $\{\phi_i\}$ と粘性減衰マトリックス $[C]$ より、次式のように i 次モードの粘性減衰力ベクトル $\{F_D\}$ が求められる。

$$\{F_D\} = [C]\{\phi_i\} \quad (3)$$

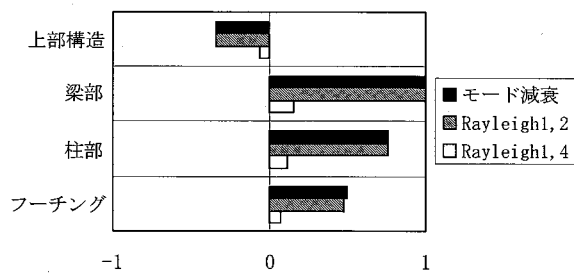
減衰力ベクトル形状が同じであれば、粘性減衰モデルの減衰特性は等価であると考えられることができる。

まず、弾性振動における減衰力ベクトルを検討する。初期剛性による1次、2次モードベクトルから求めた水平方向減衰力ベクトル形状を図-4(a)(b)に示す。ここでは、減衰マトリックスのモデルによる減衰力ベクトル形状の比較を目的としたため、減衰力ベクトルの値は、各図の最大値を1に正規化したものを用いている。これによると弾性振動時においては、モード減衰と1次、2次モードを考慮したRayleigh減衰の減衰力ベクトルは一致していることがわかる。なお、1次、4次モードを考慮したRayleigh型減衰では、図-3に示したように卓越する2次モードの固有周期の減衰定数がひずみエネルギー比例減衰定数より小さくなっているため、2次モードの減衰力を小さく評価していることから減衰力ベクトルが小さくなっている。

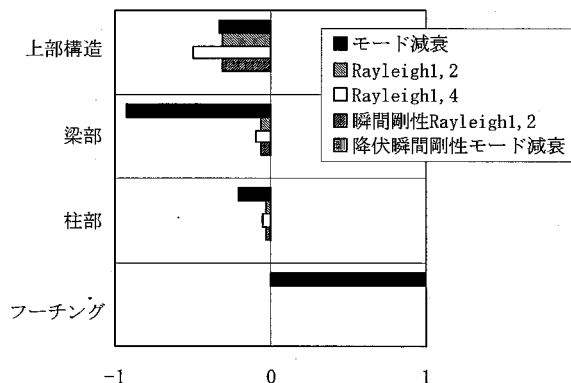
次に、降伏後の増分形の1次、2次振動モードにおける水平方向、モーメント減衰力ベクトルを図-4(c)~(f)に示す。弾性振動時には各減衰モデルで一致していた水平方向減衰力ベクトルが、図-4(c)(d)の降伏後の振動においては異なる形状を示しており、モ



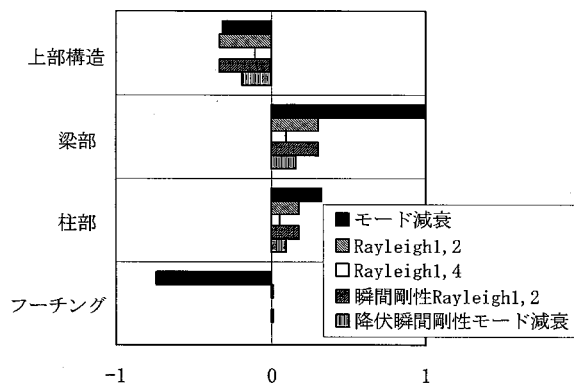
(a) 初期剛性1次モード (水平力ベクトル)



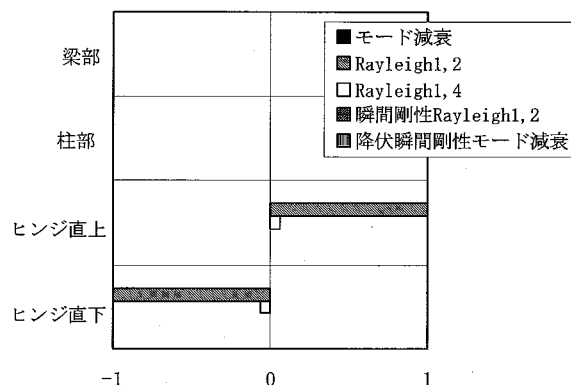
(b) 初期剛性2次モード (水平力ベクトル)



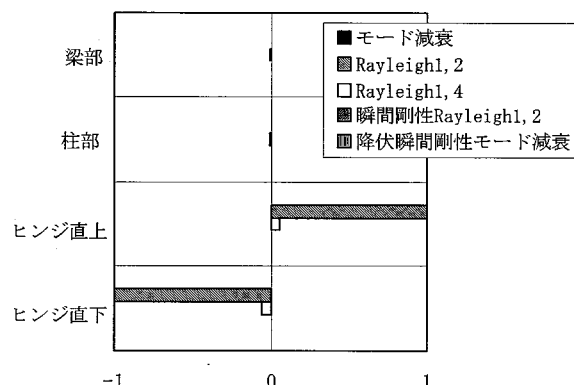
(c) 降伏後増分形剛性1次モード (水平力ベクトル)



(d) 降伏後増分形剛性2次モード (水平力ベクトル)



(e) 降伏後増分形剛性1次モード (モーメントベクトル)



(f) 降伏後増分形剛性2次モード (モーメントベクトル)

図-4 減衰力ベクトル形状の比較

ード減衰では橋脚梁部、フーチングに大きな減衰力が作用している。また図-4(e)(f)のモーメント減衰力ベクトルでは、1次、2次モードを考慮したRayleigh型減衰において塑性ヒンジ上下節点にモーメント符号が逆向きの減衰力が発生していることがわかる。モード減衰では回転方向の自由度に減衰項がないため、このようなモーメント減衰力は生じない。このような降伏後の減衰力ベクトルは計算上生じるものであり、物理的な意味づけは明らかではない。

これらの減衰力の差が生じる原因は、(2)で作成した減衰マトリックスが弾性振動のモードベクトル形状において想定した減衰定数となるよう設定されているためである。ここで、1次、2次モードを考慮

したRayleigh型減衰におけるモーメント減衰力を検討するため、表-4(c)の節点7の回転自由度の項の減衰マトリックスと、図-2の固有振動モードベクトルを用いて、塑性ヒンジ回転バネの直上節点（節点7）におけるモーメント減衰力の計算結果を表-5に示す。表-5(a)に示す初期剛性振動モードでは、1次、2次モードとも各項における減衰力が合計値ではキャンセルされてほぼ0になっているが、表-5(b)に示す降伏後増分形剛性振動モードではモード形状が初期剛性とは異なるため、モーメント減衰力は1次モードで-14069、2次モードで-15510の値がキャンセルされずに残留していることがわかる。表-5の各節点自由度における減衰力の絶対値が大きいほど、こ

表-5 塑性ヒンジ直上節点（節点7）における
モーメント減衰力ベクトルの計算
(a)初期剛性振動モード

節点	自由度	1次モード		2次モード	
		モードベクトル	減衰力	モードベクトル	減衰力
1	水平	1.000	0	-0.073	0
3	水平	0.234	0	1.000	0
	回転	-0.025	0	-0.095	0
5	水平	0.110	147549	0.518	691857
	回転	-0.022	-30384	-0.090	-122429
7	水平	0.044	-58514	0.243	-324742
	回転	-0.020	-59732	-0.082	-250024
8	水平	0.044	0	0.243	0
	回転	-0.008	1081	-0.040	5336
9	水平	0.030	0	0.177	0
合計			0		-1

(b)降伏後増分形剛性振動モード

節点	自由度	1次モード		2次モード	
		モードベクトル	減衰力	モードベクトル	減衰力
1	水平	1.000	0	-0.235	0
3	水平	0.883	0	1.000	0
	回転	-0.106	0	-0.117	0
5	水平	0.339	452357	0.396	528790
	回転	-0.106	-143182	-0.118	-160000
7	水平	0.000	-6	0.016	-21590
	回転	-0.106	-323239	-0.119	-363000
8	水平	0.000	0	0.016	0
	回転	0.000	0	-0.002	289
9	水平	0.000	0	0.013	0
合計			-14069		-15510

のキャンセルされずに残留するモーメント減衰力が大きくなることから、剛性マトリックスにかかるRayleigh減衰係数 β が大きくなるほど粘性減衰マトリックス内の数値が大きくなり、塑性ヒンジ節点に付加されるモーメント減衰力も大きくなる。1次、4次モードを考慮したRayleigh型減衰では表-3に示したように剛性マトリックスにかかる係数が1次、2次モードを考慮した値より6%に低減するため、図-4(e)(f)のモーメント減衰力も6%に低減している。本解析では、降伏後の増分形剛性を初期剛性の1/10000としているが、この比率を更に小さくして完全弾塑性バネに近づけても降伏後の振動モード形状はほぼ同様になるため、減衰力ベクトルの形状は変わらない。

瞬間剛性Rayleigh型減衰では、塑性ヒンジの降伏により固有振動モード形状が変化した場合においても、増分形の降伏剛性を用いて粘性減衰マトリックスを新たに設定するため、塑性ヒンジにモーメント減衰力が付加されない。図-4(e)(f)に示すように瞬間剛性Rayleigh型減衰では、塑性ヒンジのモーメント減衰力が生じていない。

また、降伏瞬間剛性モード減衰の減衰力ベクトル

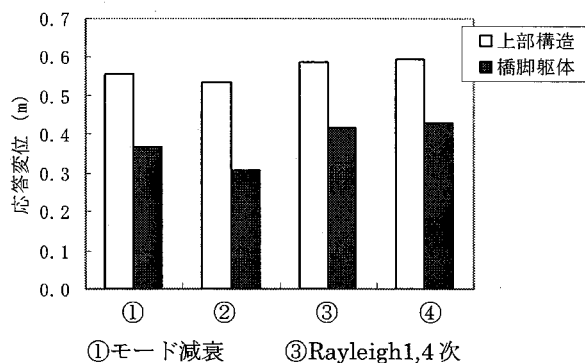


図-5 上部構造および橋脚躯体の最大応答変位

は、1次モードでは減衰力ベクトルはほぼ0であり、2次モードでは、モード減衰や1次、2次モードを考慮したRayleigh型減衰より60%以上低減している。したがって、Rayleigh型減衰だけでなくモード減衰においても降伏後の減衰を大きく評価している可能性があるが、非線形動的解析に用いる粘性減衰の正解値を求めることは困難であり、ここでは減衰力ベクトルを比較するにとどめる。

4. 非線形動的解析による比較

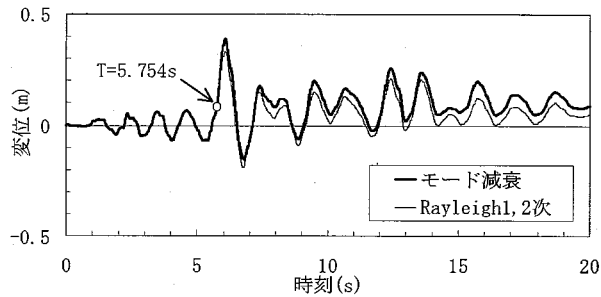
次に、これらの粘性減衰モデルを用いた解析モデルの非線形動的解析を行い、減衰モデルの違いによる非線形動的応答への影響を検討する。

(1) 解析条件

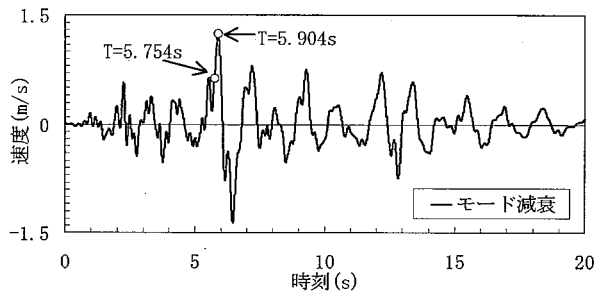
入力地震動は、道路橋示方書のⅡ種地盤用レベル2タイプⅡ地震動の鷹取駅周辺地盤上NS方向のスペクトル調整波形を用い、主要な地震入力のある前半20秒間の解析を行った。運動方程式の積分方法は、Newmark β 法 ($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔は1/500秒とした。粘性減衰マトリックスは、モード減衰のケース、Rayleigh型減衰のうち1次、2次モード、および1次、4次モードを考慮したケース、瞬間剛性Rayleigh型減衰の1次、2次モードを考慮したケースについて検討した。

(2) 応答変位および速度

図-5に各減衰モデルによる上部構造および橋脚天端の最大応答変位を比較する。モード減衰のケースと比較して1次、2次モードを考慮したRayleigh型減衰では応答変位が小さくなり、橋脚躯体の変位は16%減少している。その他の減衰モデルでは応答変位が大きくなり、橋脚躯体の変位は14%~17%増加している。このように粘性減衰の設定方法の違いによ



(a) 橋脚天端(節点2)応答変位時刻歴



(b) 橋脚梁部(節点3)応答速度時刻歴

図-6 時刻歴応答

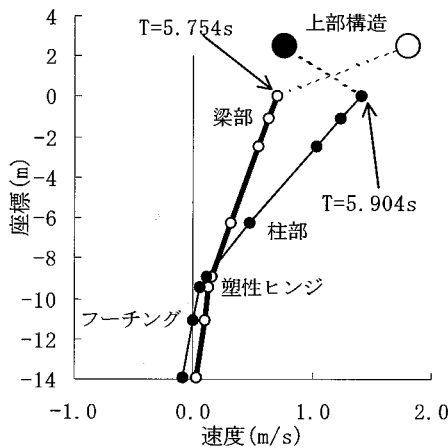
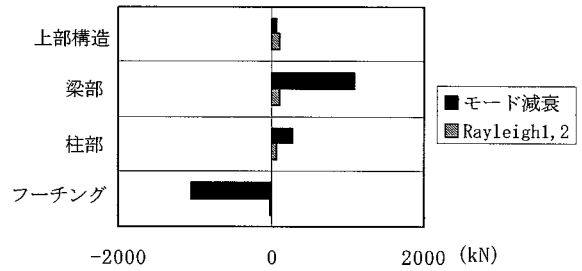


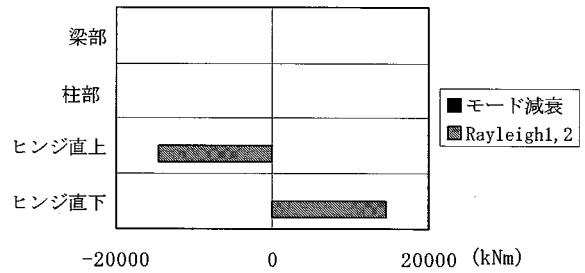
図-7 降伏直前および降伏後の応答速度分布

り、橋脚躯体の応答値には最大40%程度のばらつきが見られる。

このうちモード減衰および1次、2次モードを考慮したRayleigh型減衰の橋脚天端(節点2)の変位時刻歴を図-6(a)に示す。両ケースとも、時刻5.754秒で塑性ヒンジが降伏し、それ以降の時刻において応答変位に差が生じている。また、モード減衰のケースにおける橋脚梁部(節点3)の速度時刻歴を図-6(b)に示す。降伏直後の最大速度は時刻5.904秒で発生している。ここで降伏時および降伏直後の最大速度時の速度分布を図-7に示す。速度分布の形状より、降伏直後から最大速度発生時刻にかけては塑性ヒンジが回転変形していることがわかる。また、ここには示していないがRayleigh型減衰では時刻5.898秒において降伏直後の最大速度が発生している。



(a) 水平力ベクトル



(b) モーメントベクトル

図-8 動的解析における減衰力ベクトル

(モード減衰 時刻5.904s, Rayleigh減衰 時刻5.898s)

(3) 減衰力ベクトル

次に、降伏直後の最大応答速度時における速度ベクトルと減衰力ベクトルを図-8に示す。図-8(a)に示すように、モード減衰では橋脚梁部とフーチングに約1000kNの減衰力が水平方向に作用し、図-8(b)に示すように1次、2次モードのRayleigh型減衰では、塑性ヒンジに約14500kNmのモーメント減衰力が作用している。これは図-4(c)～(f)で検討した減衰力ベクトルと同様の傾向となる結果である。

(4) 曲げモーメント分布

このような減衰モデルによる減衰力ベクトルの違いが耐震設計に与える影響を検討するため、降伏直後の最大速度時における橋脚の曲げモーメント分布および塑性ヒンジバネの曲げモーメントを図-9に示す。塑性ヒンジ回転バネの曲げモーメントは解析モデルで示した補正により部材の降伏曲げモーメント M_y より小さくなっている。図-9(a)のモード減衰では、橋脚梁部およびフーチング位置に表-5で示した水平方向の減衰力が付加され、同位置の曲げモーメントの勾配が変化している。

Rayleigh型減衰では塑性ヒンジにモーメント減衰力が約14500kNm付加されているため、塑性ヒンジ区間部材の曲げモーメントが塑性ヒンジ回転バネの曲げモーメントを22%程度上回る結果となっている。このため、塑性ヒンジ区間の直上部材が計算上降伏曲げモーメントを上回り塑性ヒンジ以外の部材で塑

性化する結果となり、支承にはモーメント減衰力を橋脚高さで除したせん断力分が大きめに作用することになる。ここには示していないが、1次、4次モードのRayleigh型減衰や、瞬間剛性Rayleigh型減衰では図-4(e)(f)に示したように塑性ヒンジにモーメント減衰力が付加されないため、図-9(b)のような曲げモーメントの分布にはならない。このようにRayleigh粘性減衰の設定方法によっては橋脚の変位を小さく、橋脚の塑性ヒンジ区間以外や支承の断面力を大きく評価する可能性がある。

5. まとめ

粘性減衰は構造物の減衰現象を総じて表すために仮定される減衰モデルであるため、非線形動的解析に用いる粘性減衰の正解値を追及することは困難と考えられる。しかしながら、粘性減衰モデルの設定によっては動的照査法による設計に影響を及ぼす非線形動的解析結果の違いが見られる場合があるため、これらの現象を把握して設計に用いる必要がある。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) 弾性時の振動モードにおいて整合性をもつ粘性減衰マトリックスによる解析では、降伏後に振動モード形状の変化が生じると想定外の減衰力ベクトルが作用する。
- 2) ひずみエネルギー比例減衰を等価にモデル化したモード減衰においては、降伏後に橋脚梁部、フーチングに他の減衰モデルと比較して大きな減衰力が作用する。
- 3) Rayleigh型減衰では、剛性マトリックスにかかる係数が大きいほど、降伏後の塑性ヒンジに大きなモーメント減衰力が作用する。このため本解析においては橋脚躯体の変位がモード減衰と比較して16%小さめの応答となっている。また橋脚躯体の曲げモーメントが塑性ヒンジバネの曲げモーメントを22%程度上回るため橋脚の塑性ヒンジ区間以外の部材や支承の断面力を大きめに評価する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書同解説V耐震設計編，平成14年3月

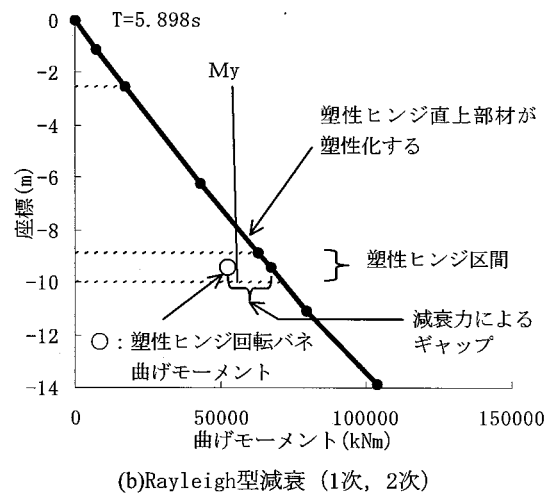
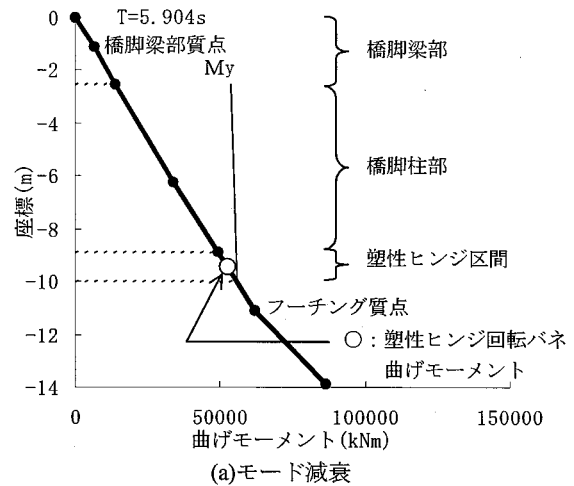


図-9 部材および塑性ヒンジの曲げモーメント分布

- 2) 矢部：粘性減衰のモデル化の違いが非線形応答に与える影響，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，p.101-108，2000年12月
- 3) 室野，滝沢，畠中，棚村：構造物の非線形動的解析における減衰マトリックスの設定に関する検討，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，p.115-122，2000年12月
- 4) 松田，大塚，山田：ゴム支承を用いた反力分散構造の減衰設定に関する一考察，第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，p.411-416，2003年1月