

部材破断を伴う構造物の動的解析における Rayleigh 減衰係数の設定方法に関する研究

大阪市立大学大学院 学生会員 ○山本 淳史
(株) ニュージェック 正会員 中西 泰之

大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司
京都大学大学院 正会員 松村 政秀

1. 研究背景および目的

兵庫県南部地震以降、構造物の地震時安全性の照査手法として動的解析による照査が実施されてきた。動的解析において、最大応答変位など構造物の振動応答は、運動方程式における減衰の設定の影響を受ける。減衰には Rayleigh 減衰が一般に用いられるが、その係数 α , β は初期剛性を用いた固有値解析結果から算定される。しかしながら、例えば地震時に部材が破断に至るなど振動モードが大きく変化する構造系に対する Rayleigh 減衰の適用性を検討した事例は少ない。そこで本研究では、部材破断により振動モードが変化する構造物を対象とした動的解析を実施し、Rayleigh 減衰の係数 α , β の設定が振動応答に与える影響を検討する。

2. Rayleigh 減衰の設定と解析ケース

Rayleigh 減衰では、減衰マトリクス $[C]$ が質量マトリクス $[M]$ および剛性マトリクス $[K]$ に比例すると仮定し、両者の線形和で近似される(式(1))。係数 α , β は固有値解析結果から算出した2つの卓越する振動モードの振動数 f_i , 減衰定数 h_i より式(2),(3)を用いて算定される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{4\pi f_1 f_2 (f_1 h_2 - f_2 h_1)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{f_1 h_1 - f_2 h_2}{\pi(f_1^2 - f_2^2)} \quad (3)$$

表-1 に解析ケースと Rayleigh 減衰の係数 α , β の設定方法を示す。 α_1 , β_1 は初期剛性を用いた固有値解析結果から算出される係数を、 α_2 , β_2 は部材破断後から算出される係数を表す。 RST は破断前後で係数 α , β を更新する解析手法であり、構造物の振動性状に応じた α , β を設定する。文献 1) において解析手法 RST の有効性が示されていることから、RST を基準とし、初期剛性より Rayleigh 減衰

を設定する KO1、部材破断後の剛性から Rayleigh 減衰を設定する KO2 の減衰のモデル化手法の応答に着目する。

3. 解析モデルとロックオフ要素

別途実施する振動台実験の供試体の寸法形状から設定したバネマスモデルの一例と部材破断前後の荷重-変位関係を図-1 に示す。部材破断は、ある荷重が作用するとそれ以降の剛性が 0 になるロックオフ要素を節点間に組み込んで考慮する。質点分布やロックオフ要素の配置位置が減衰のモデル化に与える影響を検討するため、図-1 (a) に示すように、節点 5,6 に大きな質量を有し、ばね要素 A にレベル 2 地震動の 70% 程度 (550gal 相当) で破断するロックオフ要素を配置するモデル mk56-kA による差異を検討するため、節点 2,4,6 に大きな質量を有し、ばね要素 A にロックオフ要素を配置するモデル m246-kA に、節点 2,5,6 に大きな質量を有し、ばね要素 E にロックオフ要素を配置するモデル m256-kE を設定する。なお、m45-kA の場合、ロックオフ要素を有する節点間の層間剛性 k_{12} は図-1 (c) に示す通り、部材破断前の初期剛性は $k_{12} = k + k_{KO}$

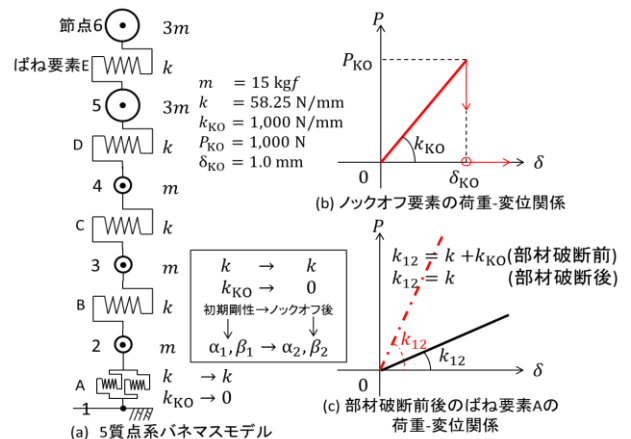


図-1 解析モデル(基本モデル m56-kA)

表-1 初期剛性を用いる固有値解析結果から算定される解析ケースと Rayleigh 減衰係数 α , β の設定

解析ケース	Rayleigh 減衰	備考
KO1	$[C] = \alpha_1[M] + \beta_1[K]$	係数 α_1 , β_1 を用いる (部材破断後も同じ係数を用いる)
RST	$[C] = \alpha_1[M] + \beta_1[K]$ $\rightarrow [C] = \alpha_2[M] + \beta_2[K]$	係数 α_1 , β_1 を、部材破断後の剛性を用いる固有値解析結果から算定される係数 α_2 , β_2 へと更新する。
KO2	$[C] = \alpha_2[M] + \beta_2[K]$	部材破断後に最大変位となることから、係数 α_2 , β_2 を用いる

であり、破断後は $k_{12}=k$ となる。本検討では、ロックオフ要素を配置しないケース(-kO)と比較を行い、部材破断を考慮する影響を考察する。入力地震動は道路橋示方書²⁾に示されるII種地盤に対する地震波II-II-2とし、相似則を考慮し時間軸を $1/\sqrt{10}$ に縮小する。

4. 解析結果

固有値解析結果を表-2に示す。各モデルとも、部材破断前後で卓越する振動モードおよび振動数が変化するため、破断前後で α , β の値も異なることがわかる。

次に、動的解析の結果を図-2および表-3にまとめる。

表-3よりロックオフ要素を有しないモデル(-kO)は各モデルとも最大変位をRSTより過小に評価することから、動的解析において部材破断を考慮する必要性が認められる。また、部材破断を考慮した各モデルとも最大変位は破断後に生じ、Rayleigh減衰の係数が異なっても頂部応答(節点6)の周期特性には顕著な差異は認められないが、最大変位はロックオフ要素をそれぞれ、最下層(要素A)に配置した場合にはKO1が過小に、最上層(要素E)に配置した場合にはKO2が過大に算定することがわかる。具体的には、表-3より最下層にロックオフ要素を有し質点分布が異なるm56-kA, m246-kAでは、頂部の最大変位は、RSTとKO2とではほぼ一致したが、RSTとKO1との差異はそれぞれ5.1%, 5.4%であった。一方、最上層にロックオフ要素を有するm256-kEでは、RSTとKO1が良好に一致したが、RSTとKO2は6.6%の差異が認められた。

5. 結論および今後の課題

部材破断を伴う構造物の動的解析を実施する場合のRayleigh減衰の係数 α , β の設定方法を検討した。主な結論は次の通りである。

- 1) 部材破断を考慮しない場合には最大応答を過小に算定することから、動的解析において部材破断を考察する必要がある。
- 2) 部材破断後に最大変位が得られたため、Rayleigh減

衰の係数の設置値の違いが最大変位に及ぼす影響は最大で6.6%であった。

ただし、本検討は限られた解析条件で得られた結果に基づいており、ロックオフ要素の配置位置や破断特性が異なる場合の検討、および本検討結果の妥当性を検証するための振動台実験の実施が必要である。

＜参考文献＞

- 1) 例えば、金田貴洋：鋼製ロックオフ部材の破断特性および免震高架橋への適用に関する研究、大阪市立大学大学院修士論文、2014
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V耐震設計編、2012.3

表-2 固有値解析結果および係数 α , β

	m56-kA		m246-kA		m256-kE	
	破断前	破断後	破断前	破断後	破断前	破断後
固有振動数 (Hz)	2.031	1.756	2.174	1.822	2.031	1.738
固有振動数 (Hz)	43.487	6.714	23.947	5.155	23.956	5.597
α	1.252	0.846	0.751	0.508	1.176	0.833
β	0.00061	0.00228	0.00037	0.00137	0.00061	0.00217

表-3 動的解析結果

解析モデル	減衰設定	頂部最大	頂部最大
		応答変位 $ \delta_{max} $ (mm)	応答変位の RSTとの差異(%)
m56-kA	RST	101.4	—
	KO1	96.2	-5.1
	KO2	101.7	+0.2
m56-kO	KO2	76.9	-24.2
	RST	126.3	—
m246-kA	KO1	119.5	-5.4
	KO2	126.3	0.0
m246-kO	KO2	95.3	-24.5
m256-kE	RST	75.4	—
	KO1	75.5	+0.1
	KO2	80.4	+6.6
m256-kO	KO2	73.9	-2.0

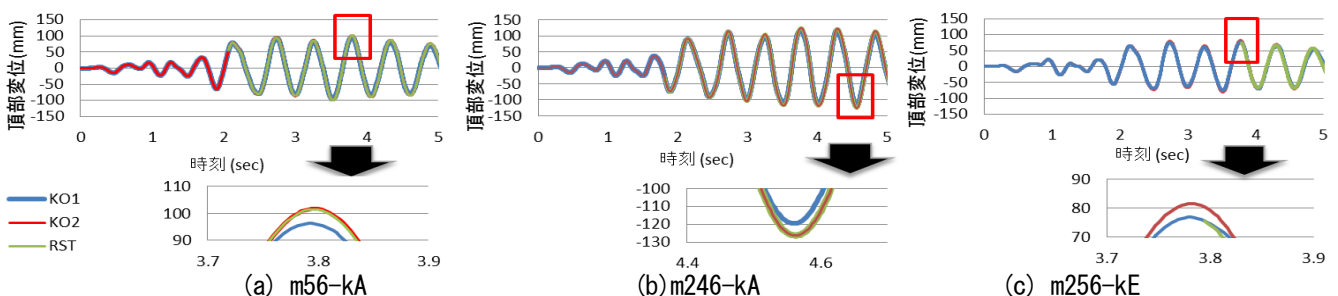


図-2 頂部(節点6)変位の時刻歴応答