

ダイナミック・マス用いたモード制御システムにおけるエネルギー評価
VE 一定スペクトルを用いたエネルギー評価

Energy evaluation for mode control systems using dynamic mass

Energy evaluation using Certain VE spectrum

○藤田雄一郎³, 古橋剛¹, 石丸辰治², 登坂遼太郎³

*Yuichiro Fujita³, Takeshi Furuhashi¹, Shinji Ishimaru², Ryotaro Tosaka³

We prove the effectiveness of Dynamic Mass which can be adjusted to M section of the vibration equation. We evaluate and compare no mode control models and mode control models using energy evaluation by a Certain VE spectrum.

1. はじめに

今日、制震設計では一般的に粘性ダンパーを取り付けることによる振動方程式の C 項の調整, またブレースや弾塑性ダンパーを取り付けることによる K 項の調整により設計が行われているが, 近年 M 項を調整することができるダイナミック・マス (以降 D.M.) ダンパーが提案され (古橋・石丸), 注目を集めている。

しかし, D.M. の効果を実感的に理解することは難しく, 地震波によって効果が異なるため, 設計例がまだ少ないのが現状である。

応答の評価にあたっては, 最大値が許容値以内であっても長時間または多数回の揺れが生じることにより部材が損傷する場合もあり, 最大応答値のみの評価では安全性の完全な評価にはならない。

そこで本論では, D.M. を用いたモード制御システムについてエネルギーという観点から評価する。

2. 観測地震波による時刻歴エネルギー解析評価

一般的なエネルギーの釣合式は(1)式であるが, D.M. を付加すると入力ベクトル i が低減されて入力低減ベクトル η となり, エネルギーの釣合式は(2)式となる。

$$\int_0^t \dot{x}^T M \ddot{x} dt + \int_0^t \dot{x}^T C \dot{x} dt + \int_0^t \dot{x}^T K x dt = - \int_0^t \dot{x}^T M i \ddot{y} dt \quad (1)$$

$$\int_0^t \dot{x}^T M \ddot{x} dt + \int_0^t \dot{x}^T C \dot{x} dt + \int_0^t \dot{x}^T K x dt = - \int_0^t \dot{x}^T M \eta \ddot{y} dt \quad (2)$$

このエネルギーの釣合式を用いて, 時刻歴に運動エネルギー, 減衰エネルギー, 弾性ひずみエネルギー, 入力エネルギーを解析的に計算することができる。

Figure1 は非制震モデルと完全モード制御モデル (Table1) を C2: JMA-KOBE NS 波により比較したグラフであるが完全モード制御システムを用いたことにより, エネルギーが減少していることがわかる。

一方, Figure2 は非制震モデルと完全モード制御モデルを C4: TAFT EW 波により比較したグラフであるが完全モード制御システムを用いたのにも関わらず, エネルギーが

増加していることがわかる。

このように, エネルギーは地震波により異なり, 観測地震波による時刻歴エネルギー解析ではモード制御システムを評価することはできない。

Table1 Modal parameter

非制震					完全モード制御				
FL	質量	D.M.	初期剛性	減衰係数	FL	質量	D.M.	初期剛性	減衰係数
	t	t	kN/m	kNs/m		t	t	kN/m	kNs/m
10	1000.0	0	800000.0	4000.0	10	1000.0	0	800000.0	4000.0
9	1000.0	0	800000.0	4000.0	9	1000.0	500	800000.0	4000.0
8	1000.0	0	800000.0	4000.0	8	1000.0	1333	800000.0	4000.0
7	1000.0	0	850000.0	4250.0	7	1000.0	2656	850000.0	4250.0
6	1000.0	0	850000.0	4250.0	6	1000.0	4200	850000.0	4250.0
5	1000.0	0	850000.0	4250.0	5	1000.0	6063	850000.0	4250.0
4	1000.0	0	900000.0	4500.0	4	1000.0	8735	900000.0	4500.0
3	1000.0	0	900000.0	4500.0	3	1000.0	11347	900000.0	4500.0
2	1000.0	0	900000.0	4500.0	2	1000.0	14268	900000.0	4500.0
1	1000.0	0	900000.0	4500.0	1	1000.0	17504	900000.0	4500.0

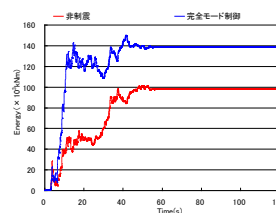
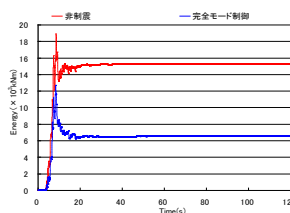


Figure1 C2: JMA-KOBE

Figure2 C4: TAFT EW

3. VE スペクトルから見るエネルギー

エネルギーは(3)式で示すように V_E と質量に依存している。D.M. は有効質量を低減させる効果があるためエネルギーを抑えることができるはずであるが, V_E の影響により, 前述した C4: TAFT EW WAVE のように D.M. を付加することで逆にエネルギーが増加する場合もある。

V_E スペクトルについて検討する。Figure3 に示すのは C2: JMA-KOBE NS WAVE の V_E スペクトル ($h=0.05, 0.1, 0.2$) と C4: TAFT EW WAVE の V_E スペクトル ($h=0.05, 0.1, 0.2$) であるが, V_E は周期に依存していることがわかる。また, D.M. を付加すると構造体の固有周期が伸びるため, それぞれのモデルの固有周期によって V_E が変化し, エネルギーに影響を及ぼしたと考えられる。

したがって, 周期に依存した評価ではどのような V_E スペクトルを持つ地震波が来るか分からない限り評価することはできない。

$$E_j = \frac{1}{2} \overline{M}_j (V_{Ej})^2 \quad (3)$$

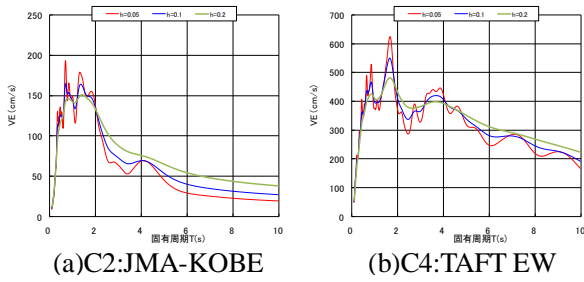


Figure3 VE spectrum

4. VE 一定スペクトルより求めるエネルギー評価

周期に依存しない V_E スペクトルによる評価が必要であるため、秋山が提案する V_E 一定のエネルギースペクトル (Figure4) から計算で求めたエネルギーによる評価を行う。ただし、スペクトルレベルは Table2 のように分けられる。

手順としては次に示す通りである。まず、モードごとに固有周期を算出し、 V_E スペクトルより V_E を求める。次に、(3)式を用いてモードごとのエネルギーを計算し、全て足し合わせれば設計用の総入力エネルギーが求められる。

岩盤種別	s_{ST} (m/s)	s_{BT} (m/s)	ΔH (m)	V_s (km/s)	V_{SB} (km/s)	H (km)	N値
I	400	400	30	0.5	3	3	$60 \leq N$
II	300	300					$30 \leq N < 60$
III	200	200	100	1.5			$10 \leq N < 30$
IV	100	100					$N \leq 10$

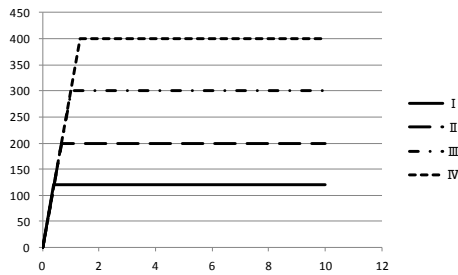


Figure4 VE spectrum

5. D. M. を用いたモード制御システムの比較

設計用エネルギーを用いて非制震、擬似モード制御システム、完全モード制御システムを比較する。構造物パラメータ及び結果は Table3 の通りである。ただし、本論ではシステムの比較を行うため、Table2 に示す V_E スペクトルレベルの影響をさほど受けないので、周期一定域の広いレベル I を用いることにする。 ΣE は各モデルの総入力エネルギーであるが、モード制御システムを採用することにより、エネルギーが低減されていることがわかる。また、D. M. 量、設置総数ともに多く付加している完全モード制御の方が擬似モード制御よりエネルギー低減が大きいこ

とがわかる。これは、D. M. を多く付加した方が、入力低減効果が大きく、刺激関数が低下し有効質量が小さくなるためである。したがって、モード制御システムがエネルギー評価において有効であると言える。

Table3 energy analysis

構造物パラメータ					出力データ					
FL	質量 t	D.M. t	初期剛性 kN/m	減衰係数 kNs/m	mode	T_0 (s)	h_0	EFM (t)	V_E (m/s)	E (kN·m)
10	1000.0	0	800000.0	4000.0	1	1.417	0.011	8415.24	120.00	60589739
2	0.485	0.032	950.47	120.00	2	0.485	0.032	950.47	120.00	6843372
9	1000.0	0	800000.0	4000.0	3	0.296	0.053	317.50	88.67	1248226
8	1000.0	0	800000.0	4000.0	4	0.215	0.073	148.85	64.43	308926
7	1000.0	0	850000.0	4250.0	5	0.173	0.091	78.50	51.92	105797
6	1000.0	0	850000.0	4250.0	6	0.147	0.107	42.72	44.12	41580
5	1000.0	0	850000.0	4250.0	7	0.130	0.121	24.76	39.03	18857
4	1000.0	0	900000.0	4500.0	8	0.120	0.131	12.29	36.02	7972
3	1000.0	0	900000.0	4500.0	9	0.113	0.139	5.73	33.87	3286
2	1000.0	0	900000.0	4500.0	10	0.108	0.146	3.96	32.36	2073
1	1000.0	0	900000.0	4500.0						

ΣE 69169829 kN·m

構造物パラメータ					出力データ					
FL	質量 t	D.M. t	初期剛性 kN/m	減衰係数 kNs/m	mode	T_0 (s)	h_0	EFM (t)	V_E (m/s)	E (kN·m)
10	1000.0	0	800000.0	4000.0	1	1.473	0.011	7895.60	120.00	56848326
2	0.668	0.024	15.65	120.00	2	0.668	0.024	15.65	120.00	112659
9	1000.0	0	800000.0	4000.0	3	0.353	0.028	38.04	120.00	273914
8	1000.0	0	800000.0	4000.0	4	0.423	0.037	62.92	120.00	453053
7	1000.0	0	850000.0	4250.0	5	0.301	0.052	19.96	90.26	81303
6	1000.0	0	850000.0	4250.0	6	0.207	0.076	34.55	61.96	66316
5	1000.0	0	850000.0	4250.0	7	0.180	0.098	21.00	47.89	24078
4	1000.0	0	900000.0	4500.0	8	0.133	0.118	11.15	39.97	8910
3	1000.0	2856	900000.0	4500.0	9	0.119	0.132	4.60	35.81	2950
2	1000.0	6123	900000.0	4500.0	10	0.111	0.141	1.82	33.34	1011
1	1000.0	9688	900000.0	4500.0						

ΣE 57872519 kN·m

構造物パラメータ					出力データ					
FL	質量 t	D.M. t	初期剛性 kN/m	減衰係数 kNs/m	mode	T_0 (s)	h_0	EFM (t)	V_E (m/s)	E (kN·m)
10	1000.0	0	800000.0	4000.0	1	1.576	0.010	6909.11	120.00	49745624
2	0.876	0.018	0.00	120.00	2	0.876	0.018	0.00	120.00	0
9	1000.0	500	800000.0	4000.0	3	0.791	0.020	0.00	120.00	0
8	1000.0	1333	800000.0	4000.0	4	0.706	0.022	0.00	120.00	0
7	1000.0	2656	850000.0	4250.0	5	0.619	0.025	0.00	120.00	0
6	1000.0	4200	850000.0	4250.0	6	0.531	0.030	0.00	120.00	0
5	1000.0	6063	850000.0	4250.0	7	0.442	0.036	0.00	120.00	0
4	1000.0	8735	900000.0	4500.0	8	0.351	0.045	0.00	105.37	0
3	1000.0	11347	900000.0	4500.0	9	0.257	0.061	0.00	76.95	0
2	1000.0	14268	900000.0	4500.0	10	0.157	0.100	0.00	47.12	0
1	1000.0	17504	900000.0	4500.0						

ΣE 49745624 kN·m

6. まとめ

観測地震波による時刻歴エネルギー解析評価では周期の影響を受け、地震波によって大小関係が異なるため、固有周期の異なるシステムを評価及び比較できないことを示した。また、 V_E スペクトルより計算でエネルギーを求める方法により、モード制御法を用いた各システムを評価し、比較することができることを示した。さらに、その設計用エネルギーを用いることでモード制御システムの有効性を示した。

7. 参考文献

- 1) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999. 11
- 2) 古橋剛，石丸辰治：慣性接続要素によるモード分離：慣性接続要素による応答制御に関する研究その 1，日本建築学会構造系論文，第 55-62 巻，第 576 号，2004. 2
- 3) 古橋剛，石丸辰治：慣性接続要素による多質点振動系の応答制御：慣性接続要素による応答制御に関する研究その 2，日本建築学会構造系論文，第 83-90 巻，第 601 号，2006. 3