

愛媛大学工学部 フェロー 大久保 禎二 パシフィックコンサルタンツ 正 渡邊 誠晶
愛媛大学大学院 学 〇好竹 亮介

1. まえがき

本研究は線形および非線形挙動状態にある多質点系構造物の最適耐震設計問題に関して、各部材の剛性係数 k および減衰装置の減衰定数 c を設計変数として考慮し、その最適解を実験計画法および双対法を複合して用いることにより、能率的に決定する方法について研究を行ったものである。これまでこのような構造物の最適耐震設計法として、構造物の動的挙動および目的関数の設計変数に関する感度係数を求め、数理計画法の手法を用いて設計変数の改良を繰り返すことによりその最適値を求める方法が研究されている。この方法では初期値に依存する局所的な最適解の決定を比較的能率的に行うことが出来るが、全域的な最適解を決定するためには、種々の初期値から得た最適解を比較検討することが必要となる。これに対し本研究の方法では、多質点系構造物の地震動による各質点間の最大相対変位 $\delta_{\max}$ および各部材の最大応力度 $\sigma_{\max}$ の推定式を k および c の比較的少数の離散的な組み合わせにおける $\delta_{\max}$ および $\sigma_{\max}$ の値を用いて実験計画法により導入し、これらの推定式群を用いて $\delta_{\max}$ および $\sigma_{\max}$ の制約条件式を表現し、目的関数である総製作費を減少させるように k および c の改良を繰り返すことにより最適解を決定するものであり、全域的な最適解を比較的少量の計算で能率的に決定することが出来るものである。最適耐震設計例として1～4質点系構造物の線形及び非線形最適耐震設計を行い、本研究で提案している設計法の信頼性、効率性などについて検討を行ったが、ここでは2質点構造物の線形および非線形最適設計例について述べる。

2. 多質点系構造物の地震動による線形・非線形挙動の解析

多質点系構造物の地震動による各質点間の最大相対変位 $\delta_{\max}$ および各部材の最大応力度 $\sigma_{\max}$ は直接積分法により計算している。直接積分法にはWilsonの θ 法を用い、入力地震波として兵庫県南部地震の実地震動波を用いている。なお非線形応答解析に用いる部材の復元力-変位曲線として図2に示す関係を用いている。

3. 実験計画法による応答値の推定式の導入

多質点系構造物の各部材の剛性係数 k および減衰定数 c を因子(設計変数)として考慮し、2.で述べた動的応答解析法により得られた各質点間の最大相対変位 $\delta_{\max}$ を特性値とし、実験計画法を用いて $\delta_{\max}$ の推定式を導入した。推定式を導入するにあたって、各因子(k および c)の離散レベルとして3個の水準を考慮し、直交表に表示されている各因子の水準の組み合わせについて2.で述べた動的解析により $\delta_{\max}$ を求め、得られた $\delta_{\max}$ の分散分析を行い、Chebyshevの直交多項式を用いて推定式を導入した。この場合、1質点系構造物では9回の解析(実験)値を使用する $L_9(3^4)$ 直交表を用い、2、3、4質点系では27回の解析(実験)値を用いる表1の $L_{27}(3^{13})$ 直交表を用い、 $\delta_{\max}$ の推定式を導入した。 k と c の全ての離散的な水準の組み合わせは1質点系で9個、2質点系で81個、3質点系で273個、4質点系で6561個となるが、これらの応答値を統計的手法を用いることにより、27回のわずかの解析(実験)結果を用いて精度よく推定することができる。つぎに、各部材の地震動による最大応力度 $\sigma_{\max}$ の推定式は、各質点間の $\delta_{\max}$ の推定式に、各部材の k および断面係数に関する係数を乗ずることにより容易に導入することができる。

4. 最適耐震設計問題の定式化および最適解の決定

3.で導入した $\delta_{\max}$ および $\sigma_{\max}$ の推定式を用いて、各質点間の最大相対変位 $\delta_{\max}$ および各部材の最大応力度 $\sigma_{\max}$ の制約条件式を k と c の関数として表現し、多質点系構造物の総製作費を最小とする最適な k および c を決定する最適設計問題を定式化した。この最適設計問題をラグランジュ関数を用いた双対法により解き、 k および c の改良解を決定し

表1 $L_{27}(3^{13})$ 直交表

No.	1	2		12	13
1	1	1		1	1
2	1	1		2	2
3	1	1		3	3
4	1	2		3	3
.....					
24	3	2		1	3
25	3	3		1	3
26	3	3		2	1
27	3	3		3	2

(表中の1,2,3は水準値1,2,3を示す)

た。 k および c の改良解を決定する過程で $\delta_{\max}$ および $\sigma_{\max}$ の k および c に関する偏微分係数が必要となるが、これらの値は3.で導入した $\delta_{\max}$ および $\sigma_{\max}$ の推定式を k および c について偏微分することにより容易に求められる。なおある因子(設計変数)の改良解が仮定した水準の上限値あるいは下限値を超える場合には、その因子の新たな3水準値として隣接した領域の値を仮定し、実験計画法により新たな推定式を求め k および c の改良を繰り返す。このような改良を反復することにより、最終的な k および c の最適解を決定することができる。

5. 最適耐震設計例

上記の2、3、4で開発した最適耐震設計システムを用いて、種々の多質点系構造物の製作費を最小にする耐震設計を行った。図1に示す2質点系構造物で鋼部材の相対価格として700000/ton、減衰装置の相対価格として0.1%の減衰効果をあげるのに40000と仮定した。部材1、2のバネ定数が復元力の大きさに関係なく一定、すなわち線形挙動をするものとした場合、制約条件として $\delta_{\max} = 3\text{cm}$ 、 $\sigma_{\max} = 3.75\text{tf/cm}^2$ と仮定すると、 k_1, k_2, c_1, c_2 を5回改良した後、それぞれの最適値として $k_{1\text{opt}} = 45.821\text{tf/cm}$ 、 $k_{2\text{opt}} = 28.945\text{tf/cm}$ 、 $c_{1\text{opt}} = 0.0424$ 、 $c_{2\text{opt}} = 0.003$ 、最小総製作費 $W_{\text{opt}} = 315.893$ を得た。この設計問題では変位の制約条件がアクティブな制約条件となっている。最適解における $\delta_{\max}$ の解析(実験)値と推定式より得られた推定値との誤差は0.7%であった。 k_1, k_2, c_1, c_2 の3水準の改良過程を表2に示す。

次に、図1に示す2質点系構造物において、部材1、2のバネ定数が図2に示すように非線形挙動をするものとした場合、制約条件として $\delta_{\max} = 3\text{cm}$ のみを仮定すると、 k_1, k_2, c_1, c_2 を2回改良した後、それぞれの最適値として $k_{1\text{opt}} = 57.954\text{tf/cm}$ 、 $k_{2\text{opt}} = 35.809\text{tf/cm}$ 、 $c_{1\text{opt}} = 0.0225$ 、 $c_{2\text{opt}} = 0.003$ 、最小総製作費 $W_{\text{opt}} = 212.627$ を得た。最適解における $\delta_{\max}$ の解析(実験)値および推定式より得られた推定値との誤差は2.2%であった。 k_1, k_2, c_1, c_2 の3水準の改良過程を表3に示す。

線形挙動および非線形挙動の場合の最適解を比較すると、線形挙動の場合は減衰定数 c を大きくする方が、また非線形挙動の場合は剛性係数 k を大きくする方がより経済的であることを示している。

6. 結論

上記の最適耐震設計法を用いて1~4質点系構造物の種々の設計条件における最適設計問題を解き次のような結論を得た。①いかなる初期水準値からでも5~16回の改良で k および c の最適解を能率的に決定することができ、きわめて汎用性のある最適耐震設計法であることが明らかとなった。② $\delta_{\max}$ や $\sigma_{\max}$ 等、動的挙動の推定式の精度を多少犠牲にしても、初期に仮定する設計変数の3水準値の範囲をある程度大きく設定し、改良解が得られるにしたがい3水準値の範囲を改良解の近傍に狭めていくことにより、推定式の導入回数を減少させることができ、かつ能率的に全域的な最適解を決定することができる。③線形挙動および非線形挙動の場合の最適解を比較すると、線形挙動の場合は減衰定数 c を大きくする方が、また非線形挙動の場合は剛性係数 k を大きくする方がより経済的であることを示している。

参考文献) 大崎順彦：建築振動理論、彰国社、1996 田口玄一：実験計画法、丸善、1998

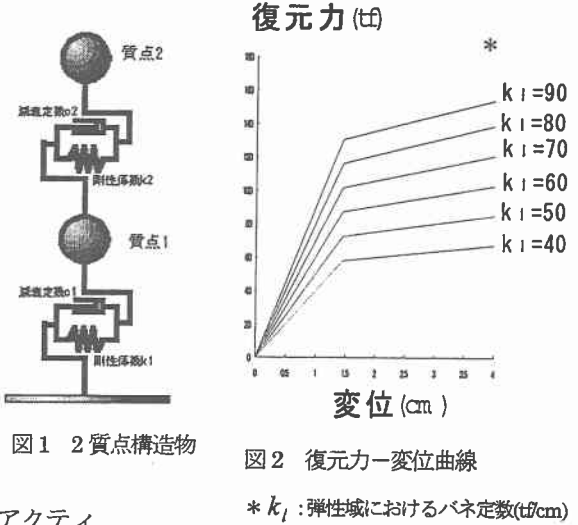


図1 2質点構造物

図2 復元力-変位曲線

* k_i : 弾性域におけるバネ定数(tf/cm)

表2 線形3水準の改良過程

	1			2			3		
k1	10	30	50	30	40	50	30	40	50
k2	10	30	50	20	30	40	20	30	40
c1	0.01	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
c2	0.01	0.02	0.03	0.003	0.003	0.013	0.003	0.003	0.013
	4			5					
k1	30	40	50	35	45	55			
k2	20	30	40	15	25	35			
c1	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05			
c2	0.003	0.003	0.013	0.003	0.003	0.013			

表3 非線形3水準の改良過程

	1回目			2回目		
k1	40	60	80	45	55	65
k2	35	55	75	35	40	45
c1	0.01	0.03	0.05	0.02	0.03	0.04
c2	0.005	0.015	0.025	0.003	0.006	0.009