

1. 序論

道路や橋梁などの土木構造物は自然条件に常時さらされている。わが国では、とくに地震や台風などによる動外乱を受ける。特に長大鋼構造部材のような可撓性構造物の使用を計る場合、非線形振動挙動の把握が不可欠である。しかし、動外乱をうける非線形応答は不明瞭な点が多く、その特性はまだ十分に明らかにされていない。

一般に構造物の振動は、支承部や継手部の摩擦などによりエネルギーが逸散し減衰振動をおこす。しかし動外乱をうける非線形振動を解析する際、特に粘性減衰をどのように取り扱えばよいか明らかではない。そこで本研究では非線形振動応答についての実験データを詳細に検討し、その結果を基に粘性減衰を解析にいかに取り込むべきか検討する。

2. 数値解析法

一般的な構造物の動応答は、変位の形状並びにその振幅の時間的な変化を含むものである。この様な挙動を表すには、多自由度の変位座標によらなければならない。多自由度系では、系に作用する全ての力の直接的な釣り合いを求めることは困難であるため、離散的な要素に仮想変位の原理を適用することにより、運動支配方程式の定式化を行い、内力及び外力によってなされる仮想仕事の総和を零にすることによって、一要素における支配方程式を導く次に、これを有限要素法の概念に基づき全体系に拡張することにより、支配方程式(1)を得る。

$$[M]\{\Delta\ddot{D}\} + [C_n]\{\Delta\dot{D}\} + [K_n]\{\Delta D\} = \{\Delta F\} + \{F_n\} - \{R_n\} - \{I_n\} - \{A_n\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ ：節点集中質量マトリックス、 $[C_n]$ ：減衰マトリックス、 $[K_n]$ ：接線剛性係数マトリックス、 $\{F\}$ ：動外乱増分、 $\{F_n\}$ 、 $\{R_n\}$ 、 $\{I_n\}$ 、 $\{A_n\}$ ：n段階における動外乱、内力、慣性力及び減衰力である。速度項及び加速度項は線形加速度法を適用することによって求め、慣性力の補間は Newmark 法により行った。式(1)は微小増分内で線形仮定しているため、非線形領域において、変形後に生じる外力増分及び内力増分は零とはならず、残差不平衡力 $\{\Delta\Omega\}$ が生じる。

$$\{\Delta\Omega\} = \{\Delta F\} - \{\Delta R\} - \{\Delta I\} \quad (2)$$

この残差不平衡力は Newton-Raphson 法による逐次収束計算を行い、収束条件を 0.5%として処理した。減衰項は剛性の変化に対応して接線評価が可能となるレーリー減衰で評価した。

3. 模型実験と数値解析

3.1 基部加振試験概要

本研究で用いた解析法を検証するため、Buffalo 大学で行われた基部加振実験結果と本解析結果の比較を行った。Fig1 に実験装置の概略図を示す。

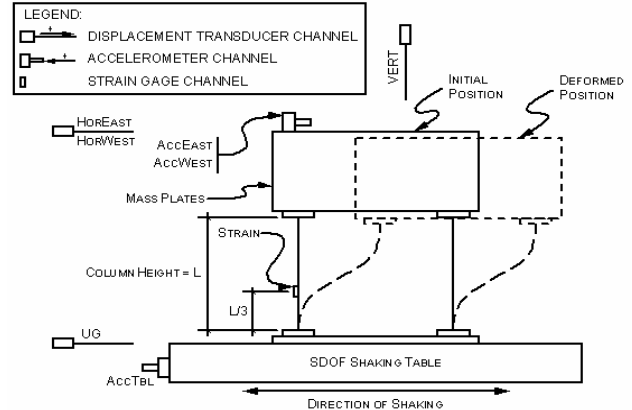


Fig.1 Schematic of Test Setup and Instrumentation

振動台は、四つのテフロンベアリング上に設置され、二つの油圧源吐出量 56.78l/min サーボバルブを有する 24.47kN 変位制御アクチュエーターによって加振する。実験は 14 の試験体について行われている。柱試験体の上部には質量板が載せられ、柱試験体と質量、振動台の間にこれらを固定するためのベースプレートが入れられている。柱試験体とベースプレートの接合部は、溶接による断面の欠損を避けるため、ろう接によって接合されている。また、柱に面外モーメントと捩れを生じさせないために、薄い鋼製の帯板で加振面外方向に綾構が取り付けられている。

試験体は、細長比 100, 150, 200 の 3 グループに分けられ、各グループに対して軸力比が設定されている。入力加速度は El Centro S00E-Imperial Valley Earthquake の波形を基に計算によって求めた各試験体の最大弾性応答のおよそ 2/3 の大きさから崩壊に至るまでをいくつかのレベルにわけ、段階的に大きくして入力されている。試験体の諸元を Table1 に示す。

Table 1 General Properties of Specimens Tested

Specimen	λ	Column		E (kgf/cm ²)	y (kgf/cm ²)	Mass (kg/col)
		height (cm)	width (cm)			
1	100	13.72	0.48	2.10×10^6	4365	36.63
2		13.74	0.49	2.10×10^6	4435	72.23
4		13.75	0.48	2.10×10^6	4393	96.03
5b		9.17	0.29	2.10×10^6	10151	96.03
6	150	41.24	0.94	2.10×10^6	3719	96.03
7		34.37	0.77	2.10×10^6	3915	96.03
8		27.45	0.60	2.10×10^6	4372	96.03
9		20.58	0.48	2.10×10^6	4381	96.03
10b	200	13.74	0.28	2.10×10^6	10970	48.58
11		54.95	0.94	2.10×10^6	3991	72.23
12		45.82	0.77	2.10×10^6	2985	72.23
13		36.61	0.60	2.10×10^6	4444	72.23
14		27.52	0.47	2.10×10^6	4587	72.23
15		18.28	0.31	2.10×10^6	2966	36.63

3.2 一自由度フレームの数値モデル化

構造物の力学的特性を十分に考慮した上で、耐震設計要項を勘案して一自由度フレームの数値モデル化を行った。解析モデル図を Fig.2 に示す。数値解析は部材軸方向に柱両端のベースプレートを 5 分割、柱を 20 分割、質量を 1 分割とし、断面をそれぞれ 50 分割して行った。柱間をつなぐ梁の役目となる質量は柱に比べて十分に大きな剛性を有し、その回転量は無視できる程小さいため境界条件は下端を固定、上端を回転拘束とした。

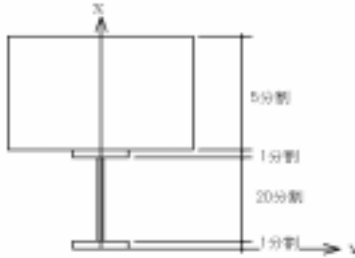


Fig.2 Numerical Modeling for Frame Structure

3.2 減衰係数の計測

減衰係数は、Fig. 1 に示してある質量上部に取り付けられた二つの変位計と加速度計で測定された自由振動応答波形から、Logarithmic Decrement Method で求められている。自由振動試験で得られた粘性減衰係数を Table 2 に示す。

Table.2 Damping Ratios from Free Vibration Tests

Specimen (%)	HorEast			HorWest			AccEast			AccWest		
	Interval			Interval			Interval			Interval		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
Spec. 1	0.469	0.587	0.649	0.469	0.587	0.649	0.474	0.528	0.769	0.326	0.528	0.687
Spec. 2	0.507	0.748	0.903	0.507	0.748	0.903	0.705	0.719	1.498	0.765	0.813	1.226
Spec. 4	--	--	--	--	--	--	1.870	2.033	1.345	1.870	2.033	0.496
Spec. 5b	--	--	--	3.318	1.971	1.145	3.227	3.677	1.613	3.740	2.710	1.613
Spec. 6	0.524	0.954	0.403	0.595	0.739	1.093	0.671	0.702	0.976	0.474	0.702	0.976
Spec. 7	--	--	--	--	--	--	0.935	1.620	1.226	0.935	1.620	1.226
Spec. 8	1.155	1.383	2.270	1.014	1.383	2.270	1.014	1.247	2.083	1.439	0.893	2.083
Spec. 9	0.857	1.039	1.970	1.028	1.113	1.951	0.990	1.206	1.379	0.990	1.206	1.379
Spec. 10b	--	--	--	2.772	1.870	1.613	2.678	2.033	4.371	2.678	2.033	1.613
Spec. 11	0.640	1.545	3.122	1.392	1.454	2.378	0.967	1.626	2.206	1.526	1.291	3.497
Spec. 12	0.994	1.378	1.991	1.013	1.326	1.991	0.893	1.576	1.161	0.893	1.161	1.576
Spec. 13	1.172	1.269	2.142	0.963	1.269	2.142	0.798	0.800	1.071	1.145	1.291	1.291
Spec. 14	1.324	1.460	2.159	1.401	1.522	2.026	1.951	1.613	1.839	2.344	1.613	1.839
Spec. 15	4.798	9.894	6.730	5.713	6.635	10.49	5.355	3.551	4.579	7.480	3.551	4.579

Table2 より、いくつかのケースでは第一インターバルから第三インターバルにかけて、自由振動振幅が小さくなるほど減衰係数の値は大きくなる傾向が見られるが測定器によってばらつきがありまた、一度減少した後増加するケースやその逆のケースもあるのでこれから特定の傾向を読み取ることは困難である。

3.4 実験結果と解析結果の比較

(1) 減衰係数の設定

自由振動試験で得られた減衰係数は弾性範囲内の挙動であっても異なった値を示すため一意的にその値を求めることは難しく、振動解析上でどのようにして減衰係数を与えるかは極めて難解な課題である。ここではまず、自由振動試験から得られた減衰係数の平均値を用いて応答シミュレーションを行った。その平均値を Table3 に示す。

Table3 Average Damping Ratios from Free Vibration Tests

Specimen	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 4	Spec. 5b	Spec. 6	Spec. 7	Spec. 8
(%)	0.560	0.837	1.608	2.557	0.734	1.260	1.520
Specimen	Spec. 9	Spec. 10b	Spec. 11	Spec. 12	Spec. 13	Spec. 14	Spec. 15
(%)	1.259	2.407	1.804	1.329	1.279	1.758	6.113

(2) 固有周期

自由振動試験からフーリエスペクトル解析によって求めた各試験体の固有周期と本解析モデルによる概算固有周期の比較を Table4 に示す。

Table4 Fundamental Period Comparison

Specimen	λ	Fundamental Period T		
		Experiment	Analysis	Error (%)
1	100	0.200	0.193	-3.55
2		0.272	0.269	-1.10
4		0.323	0.335	3.84
5b		0.698	0.766	9.77
6	150	0.430	0.435	1.05
7		0.490	0.512	4.45
8		0.655	0.659	0.56
9		0.760	0.736	-3.14
10b		0.727	0.784	7.77
11	200	0.597	0.594	-0.54
12		0.682	0.712	4.33
13		0.959	0.961	0.18
14		1.200	1.295	7.93
15		1.004	1.411	40.51

いくつかのケースを除く他の試験体の固有周期は、実験結果と解析結果の誤差 5%前後でほぼ一致している。試験体の誤差が大きくなる原因としては、柱の断面寸法が他の試験体に比べて小さいため、測定誤差の影響を大きく受けることが考えられる。また、柱とベースプレートの接合部はろう接によって接合されているので、隅肉による断面積増加が生じ、解析モデルより柱の有効高さが短くなることによって固有周期が理論値より低くなっている可能性がある。ほとんどの試験体の固有周期が実験値より大きく出ているのはこれが原因になっていると考えられる。

(3) 時刻歴応答曲線

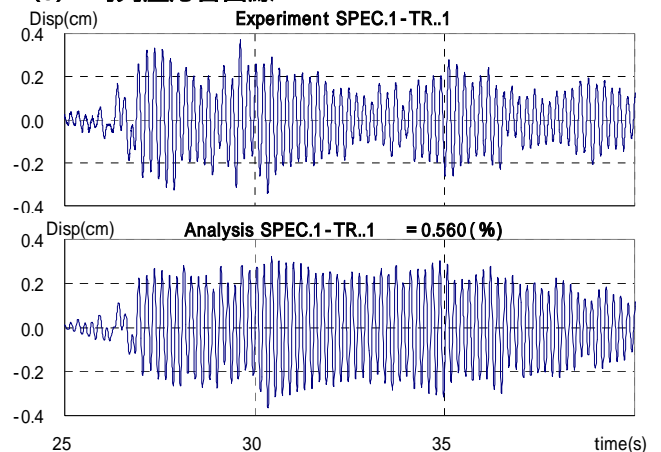


Fig.2 Disp-Time Response of Specimen 1-trial 1

Fig.2 に実験結果と解析結果で得られた時刻歴応答曲線を示す。ほとんどのケースで加振直後 5 秒周期程度まではほぼ同一の応答を見せ、実験結果と解析結果が大略一致している。しかしそれ以降で時間の経過とともに差が生じている。減衰係数は、Table2 に示すように弾性領域であっても種々の値を示す。自由振

動試験から得られた減衰係数の平均値を用いて、解析を行ったが、特に非線形領域における減衰係数の評価に疑問が残る。そこで、非線形挙動における減衰係数をどのように評価すればよいか検討した。

4 非線形挙動における粘性減衰の評価

非線形応答挙動における実験を基に非線形減衰の評価方法を検討する。そのためには、いかなる減衰係数を与えれば、実験の応答波形を忠実にシミュレーションできるかを検討しなければならない。そこで、第3章で用いた解析プログラムを用いて、実験結果をより忠実にシミュレーションする減衰係数の値を一定の方法で絞り込む。

4.1 絞り込み方法の設定

自由振動試験から得られた減衰係数をもとに次のように減衰係数の絞り込みを行う。また、その手順例図を Fig3 に示す。

- 1 自由振動試験から得られたすべての減衰係数 ($E\xi$) に対して解析を行う。
- 2 1 から得られた解析結果のうち最も実験結果に近い解析結果を与える減衰係数 ($\xi_{opt}^{(0)}$) を選出する。
- 3 得られた減衰係数 ($\xi_{opt}^{(0)}$) の+10%、-10%の値 ($\xi_{opt}^{(1)}$) で解析を行う。
- 4 3 で得られた二つの ($\xi_{opt}^{(1)}$) のうち、最も実験結果に近い解析結果を与える ($\xi_{opt}^{(1)}$) と ($\xi_{opt}^{(0)}$) の結果を比較し実験結果に近い方を ($\xi_{opt}^{(2)'}$) として選定する。同時に ($\xi_{opt}^{(1)}$) と ($\xi_{opt}^{(0)}$) の中間値 ($\xi_{opt}^{(2)}$) で解析を行う。
- 5 ($\xi_{opt}^{(2)}$) と ($\xi_{opt}^{(2)'}$) のうち最も実験結果に近い方を ($\xi_{opt}^{(3)}$) として選出する。同時に ($\xi_{opt}^{(2)}$) と ($\xi_{opt}^{(2)'}$) の中間値 ($\xi_{opt}^{(3)}$) で解析を行う。

以下 ($\xi_{opt}^{(n)'}$) と ($\xi_{opt}^{(n)}$) での解析結果に顕著な差が見られなくなるまで 5 を繰り返し、実験結果に近い方を ($A\xi$) として決定する。

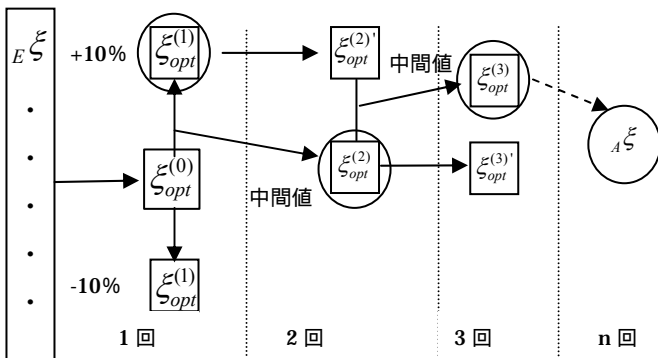


Fig3 The example of the selection method of Damping Ratio

4.2 実験応答波形との精度評価

4.1 で示した手順で減衰係数の値を絞り込んでいく際の評価基準として、以下に示す三つの基準を採用した。

(1)視覚評価：実験応答波形と解析応答波形を視覚によって評価する。この方法では視覚者によって評価が変わる可能性は否定できないが、波形全体の変化などの確認等には有効である。

(2)積分評価：実験及び解析の応答波形の積分値によって比較評価を行う。積分値は合成シンプソンの公式を利用し、実験応答波形と解析応答波形の誤差率によって比較評価を行った。

(3)振幅二乗平均平方根評価：実験及び解析の応答波形を振幅二乗平均平方根によって比較評価を行う。二乗平均平方根は統計値や確率変数の散らばり具合を表す数値である。(Root Mean Square)ランダム基部加振時の振幅値は正負にわたってさまざまな値を取る。よって統計的な処理を行い、振幅値を用いた評価法を検討する。

以上の評価方法により得られた減衰係数での時刻歴応答波形と実験応答波形、自由振動試験から得られた減衰係数の平均値での時刻歴応答曲線を Fig4 に示す。

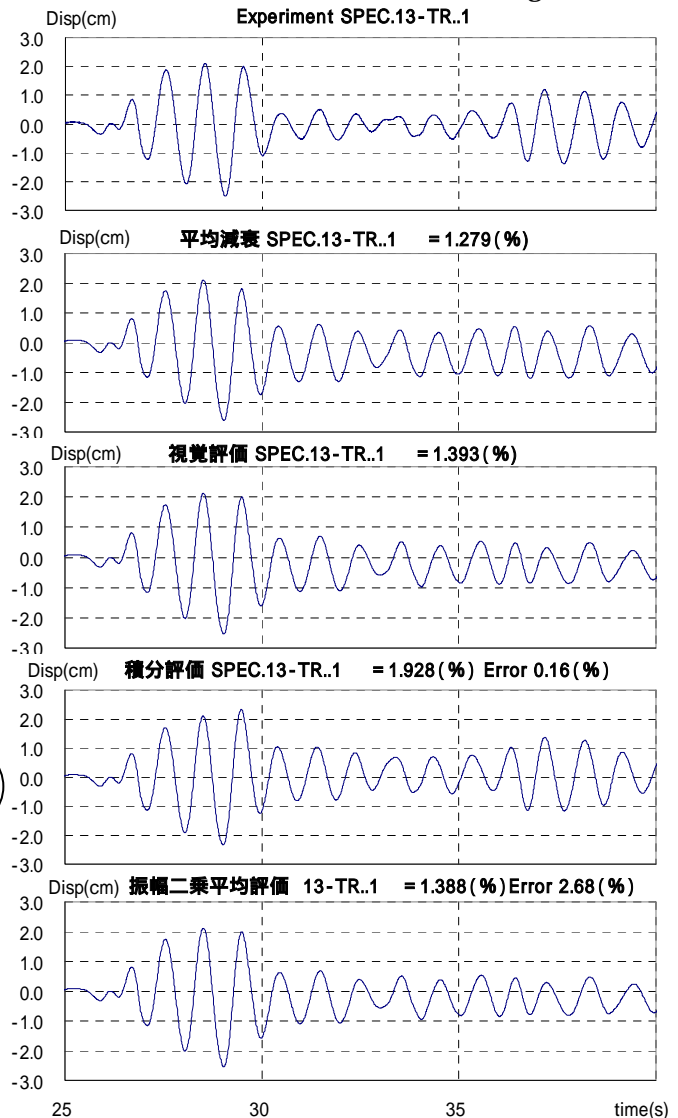


Fig4 Compare Experiment with Analysis of Damping Ratios

Fig4 より実験応答波形と各評価方法での解析応答波形はよい一致を示していることがわかる。また、積分評価と振幅二乗平均平方根評価では、誤差率を小さくしていくことによって応答波形全体の振幅が近づくことがわかった。よって自由振動試験から得られた減衰係数を初期入力値としてそれぞれの方法で評価し、減衰係数を絞り込んでいくこの手法が一つの妥当な手段であることが確認できる。

4.3 絞込み方法の拡張

これまでに行った絞込み手法では、自由振動試験から得られた減衰係数の内、最も実験応答波形とよく一致する減衰係数の $\pm 10\%$ 以内に最適な減衰係数が含まれるであろうと仮定した。しかし、その範囲を超えるようなケースがいくつか存在する。これらのケースについてより高い精度で減衰係数を絞り込むため、絞込み方法の拡張を行った。 $\pm 10\%$ 時と拡張時の応答波形と実験応答波形の比較を Fig5 に示す。

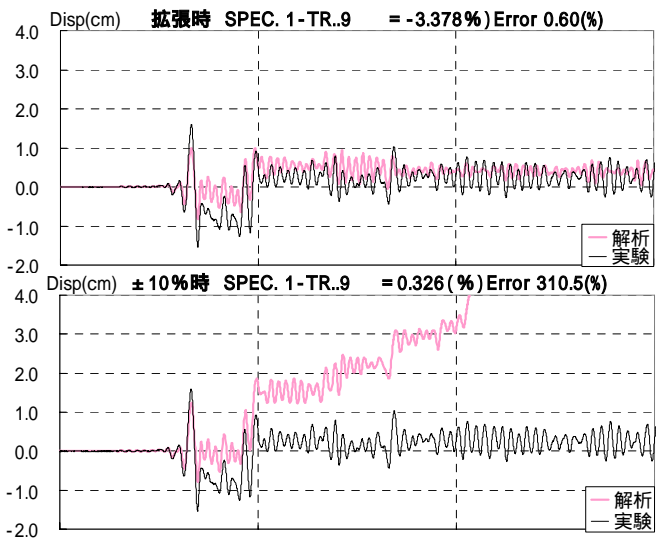


Fig5 Compare Experiment with Analysis of Damping Ratios

絞込み方法を拡張したことによって実験応答波形と解析応答波形がよく一致したことが確認できる。自由振動試験から得られた減衰係数をもとに積分評価、振幅二乗平均平方根評価を行うことによってある程度の精度を有した非線形振動応答における減衰作用の評価が可能であることがわかった。

5 まとめ

本解析で得られた減衰係数を用いて入力加速度、固有周期との関係性を検討する。最大入力加速度と減衰係数の関係を Fig6 に示す。

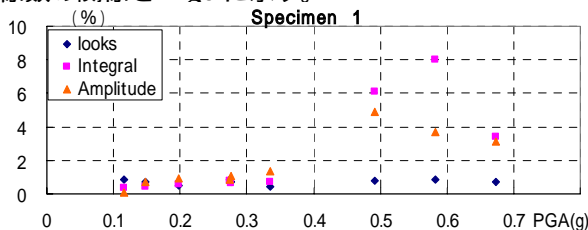


Fig6 (1) Peak Table Acceleration-Damping Ratios

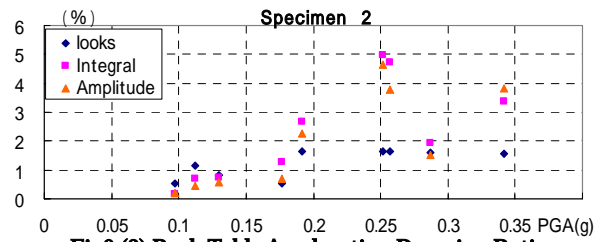


Fig6 (2) Peak Table Acceleration-Damping Ratios

最大入力加速度が増加するにつれて減衰係数の値も増加していくが、ある最大入力加速度を境に減衰係数の値が減少していく傾向が見られる。次に線形固有振動周期と減衰係数の関係を Fig7 に示す。

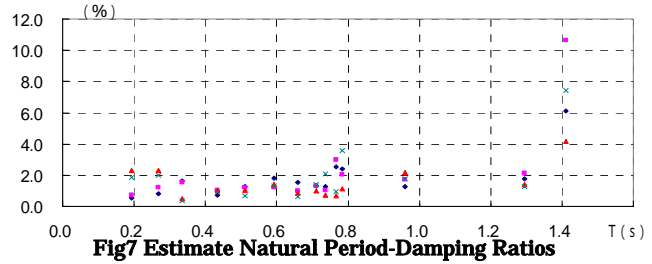


Fig7 Estimate Natural Period-Damping Ratios

線形固有振動周期が増加すると、減衰係数の値も増加する傾向が読み取れる。しかし、概算固有周期 1.4 (s) 付近の値は Specimen15-trial1 の値であり、模型実験中に加振後すぐに崩壊している試験体である。それらを取り除くと、一定の傾向をくみとることは困難である。固有周期と減衰係数の関係性を導くためにはより多くの実験データと非線形応答解析が必要であると思われる。

6 結論

実験応答波形と解析応答波形、固有周期の比較し、本解析手法がある程度の精度で一自由度フレームの弾塑性応答解析を行うことができることを確認した。実験応答波形と解析応答波形の比較、評価を行う方法を提案した。絞り込み方法を拡張することによってより高い精度で減衰係数の絞込みを行うことが可能であることが確認された。自由振動試験から得た減衰係数を基にこのような一定の絞込み方法を用いて、積分評価や振幅二乗平均平方根評価を行えば、実験応答波形を精度よくシュミレーションできることがわかった。

線形固有振動周期と減衰係数の関係では、線形固有振動周期が増加すると、減衰係数の値も増加する傾向が見られた。

最大入力加速度と減衰係数の比較では、最大入力加速度が増加するに従い減衰係数も増加していくが、ある点を越えると減少する傾向が見られた。

自由振動試験から得られた減衰係数の平均値と本解析によって得られた減衰係数の平均値の比較では、実験の平均値と解析の平均値がほぼ傾き一対一の比例関係にあることが確認できた。

7 参考文献

Darren Vian and Michel Bruneau: Tests to Structural Collapse of Single Degree of Freedom Frames Subjected to Earthquake Excitations, Journal of Structural Engineering, Vol. 129.