

山形鋼トラス鉄塔の減衰特性に関する研究

Study of the damping characteristics of the steel truss tower having the angle steel of equal lags

松田泰治*, 大塚久哲**, 宇野州彦***, 岡 延夫****, 松永 稔*****

Taiji Mazda, Hisanori Otsuka, Kunihiro Uno, Nobuo Oka, Minoru Matsunaga

*博(工) 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

**工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

***九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

****工博 日本鉄塔工業(株) 鉄塔・鉄構カンパニー 技術部長 (〒808-0023 北九州市若松区北浜1-7-1)

*****日本鉄塔工業(株) 鉄塔・鉄構カンパニー 技術部試験研究室長 (〒808-0023 北九州市若松区北浜1-7-1)

The steel truss tower having the angle steel of equal lags is jointed by bearing connection bolts. It seems that the damping performance of the steel tower becomes high when the load or input acceleration is increasing. However, research which considered the relation of the input acceleration level and the equivalent viscous damping ratio supposing a huge earthquake (like the Chi-Chi Earthquake) is seldom done until now. So this paper deals with the vibration tests and the analysis of earthquake response of the steel tower. From the experimental results, the increase of the damping ratio was confirmed. And from the dynamic response analysis, it was also shown clearly that input acceleration and damping ratio have correlation.

Key Words: The steel truss tower having the angle steel of equal lags, vibration test, earthquake response analysis, damping ratio

キーワード: 山形鋼トラス鉄塔, 振動実験, 地震応答解析, 減衰定数

1. はじめに

一般に, 送電鉄塔の構造断面は風荷重が支配的荷重となる。そのため, 我が国における送電鉄塔の設計の際には, 風荷重に関しては送電用支持物設計標準¹⁾において詳細な規定がなされている。しかし地震荷重に関しては特に規定がされておらず, 特殊な支持物などで地震荷重が支配的荷重となる場合に, 震度法によって耐震設計を行うことが示されているのみである。

しかしながら, 今日送電鉄塔は高電圧で大容量の電力を送電する必要性から大型化する傾向にあり, このような超高圧送電鉄塔においては, 地震荷重が支配的荷重となる場合が生じることが予想される。例えば1999年に発生した台湾集集地震では, 写真-1に示すような超高圧送電鉄塔が倒壊する被害があり, 文献^{2), 3)}により地震時の振動により倒壊した可能性が指摘されている。

我が国の送電鉄塔の耐震設計に関する設計基準としては, UHV送電用鉄塔・基礎耐震設計指針・同解説^{4), 5)}があり, UHV送電用鉄塔における減衰定数の想定について, 「鉄塔の安全性を論ずるような大地震時には鉄塔の変形も大きく, 従っ

てボルト接合による鉄塔構造物では, 接合部におけるボルトのすべりなどによる振動エネルギーの損失はかなり大きいと予想される。」と記載されている。

これを示す例として松岡の研究⁶⁾があり, 実規模山形鋼鉄塔の一方向加力実験での水平荷重によるたわみの実測値は, ボルト接合部でボルト径ごとのそれぞれ具体的なすべり量を仮定して弾性計算を行ったものと一致するということを示している。したがって支圧接合ボルトを用いた送電

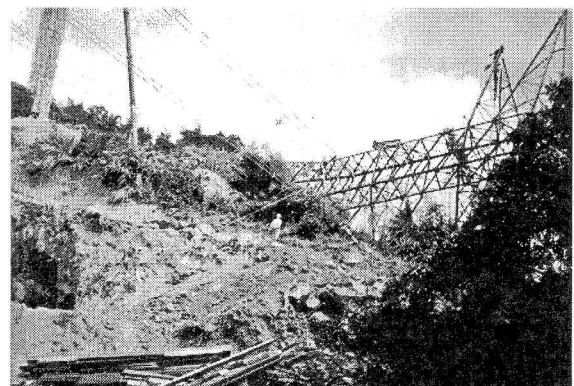


写真-1 倒壊した345kV超高圧送電鉄塔
(中寮～峨眉間の#203)

用山形鋼鉄塔は、ボルト接合部で生じるすべりなどにより、荷重や加速度の増加によって減衰性能が向上すると考えられる。また、沢辺ら⁷⁾は無線鉄塔に対して起振機の起振モーメントを段階的に増加させた漸増正弦波を入力させた実験を行い、入力振幅の増加に伴う減衰定数の増加を示している。小坪ら⁸⁾は、架渉線の架設前後で鉄塔に対してそれぞれ常時微動試験および起振機試験を実施し、減衰定数の変化を示している。

しかしながら、大地震時を想定した入力加速度レベルと等価粘性減衰定数の関係を検討した研究はこれまであまり行われていない。

そこで本研究では、地震時の入力加速度レベルによる減衰定数の変化に着目し、実験および解析を行った。まず山形鋼鉄塔の振動特性を把握することを目的として、実大鉄塔の切り出しモデルを用い、常時微動試験および強制加振試験を実施した。次に、この実験供試体の解析モデルを作成し、解析値と実験値との比較を行うことで地震応答解析における等価粘性減衰定数の探索を試みた。

2. 振動実験の概要

2.1 供試体概要および実験項目

実験に用いた供試体(山形鋼トラス鉄塔)を写真-2に、概略図を図-1にそれぞれ示す。供試体の塔高は2101.5mm(供試体頂部の錘の厚さ含む)で、1パネル250mmである。供試体は全てSS400の鋼材を用いている。供試体各部材の寸法諸元について表-1に示す。また各層に重量が196Nの錘を付加した。供試体とベースプレートは溶接されており、ベースプレートと振動台をボルトで固定した。なお、ボルトの締め付けトルクに関しては、送電鉄塔施工基準に従い、ボルトの呼び径による標準締め付けトルクで締め付けている。

実験では、基部から2層目、4層目、6層目、8層目にひずみ式の加速度計を加振方向に取り付けた。また8層目には加振方向に加え、加振直角方向にも加速度計を取り付けた。ただし常時微動試験では、加速度計は感度の高いサーボ型加速度計を用いた。また、基部と1層目の間の主柱材および斜材にひずみゲージを貼付した。さらに、振動台に加速度計と変位計を取り付けた。計測箇所を図-2に示す。

今回実施した実験は、常時微動試験、自由振動試験、ホワイトノイズ入力試験、正弦波加振試験、および地震波入力試験である。

2.2 入力地震波

台湾集集地震は現地時間の1999年9月21日午前1時47分、台湾の南投縣集集付近を震源として発生した地震である。既往研究^{2), 3)}では、倒壊した超高压送電鉄塔の耐震性を把

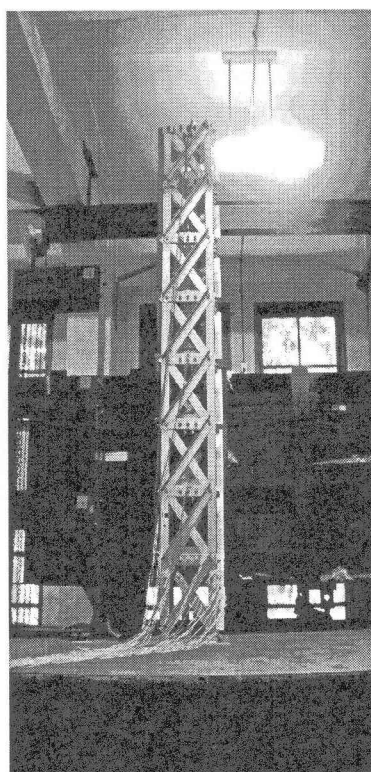


写真-2 実験供試体

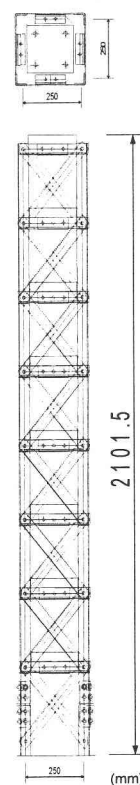


図-1 供試体概略図

表-1 供試体各部材の寸法諸元

部材名称	サイズ(mm)
主柱材	L45×4×1892
主柱材の繋ぎ	L45×4×156
斜材	L40×3×394
フラットバー	FB38×4.5×290
水平山形鋼	L40×3×130
ベースプレート	PL16×450×395
平面プレート	PL4.5×292×292
錘	PL32×200×200

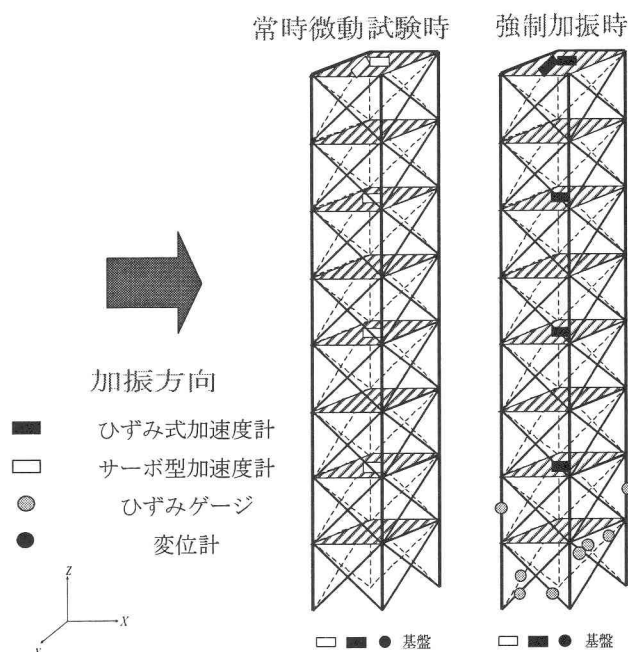


図-2 計測箇所

握することを目的として、台湾集集地震で観測されたCHY080, TCU068, およびTCU084を用いた解析を行っている。その際に、鉄塔の架線方向と南北方向のなす角は約37度であることから、観測波の加速度成分を鉄塔の主軸方向に合成している。本研究では、架線方向の合成波である、CHY080y, TCU068y, およびTCU084yを用いた。TCU084は、台湾集集地震で最大の加速度である989galが観測された地震波である。CHY080は、合成後のCHY080yの最大加速度が1123galとなり、台湾集集地震において観測された最大の加速度である989galより大きな加速度を示している。TCU068は、長周期成分が卓越した地震波である。

エル・セントロ(EL Centro)は1940年に発生したImperial Valley地震で得られた地震波である。今回はそのNS方向成分を用いた。

タフト(Taft)は1952年に発生したArvin-Tahachapi地震で得られた地震波である。今回はそのEW方向成分を用いた。

ここで、実験に用いた振動台の最大入力変位は±3cmと制約がある。一方、地震波の加速度波形を積分して変位波形にした際に最大変位が制限値を超える。したがって、バンドパスフィルターで地震波の長周期成分をカットし、最大変位が制限値以下となるように波形の調整を行い、入力地震波として用いている。

3. 振動実験結果

常時微動試験は、外力の無い状態で60秒間の微動を計測した。供試体頂部の応答加速度時刻歴からパワースペクトルを求めると、図-3のようになる。この結果から固有振動数は13.05Hzとなった。またHalf power methodにより求めた減衰定数は0.059%となった。

自由振動試験は、供試体に人力で約1cmの変形を与えた状態から一気に開放し、その後の減衰自由振動を計測した。試験の結果得られた供試体頂部の応答加速度時刻歴を図-4に示す。またパワースペクトルを求めると図-5のようになり、固有振動数は12.93Hz、減衰定数は0.435%となった。

ホワイトノイズ入力試験は、入力加速度の最大値を100gal刻みに増加させるように設定し入力を行った。試験結果を表-2に示す。またフーリエ振幅比を図-6に示す。このフーリエ振幅比は、振動台と供試体頂部で計測された加速度のフーリエ振幅スペクトルの比を示すものである。フーリエ振幅比で示すことにより、振動数領域での振動台の入力のばらつきの影響を除去した。表-2からわかるように、入力加速度の増加に伴い卓越振動数が長周期側(低振動数側)にシフトし、減衰が増加する傾向が認められた。

正弦波加振試験は、振動台に入力する加速度振幅を10galに設定した。共振点近傍の振動数が12.65Hzの正弦波を入

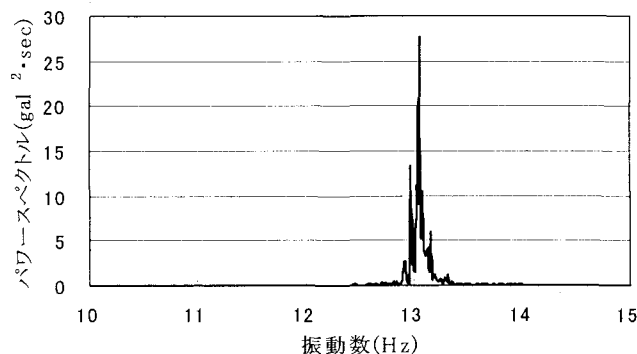


図-3 供試体頂部のパワースペクトル
(常時微動試験)

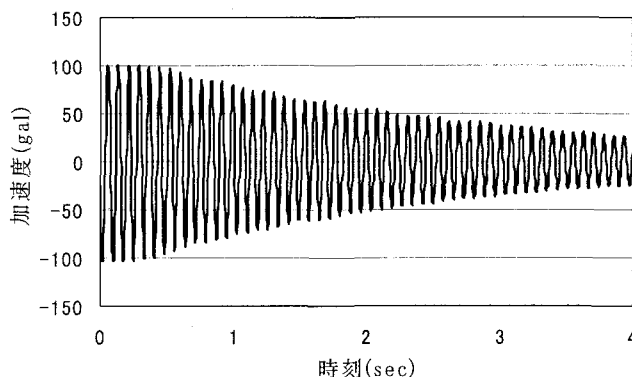


図-4 供試体頂部の応答加速度時刻歴
(自由振動試験)

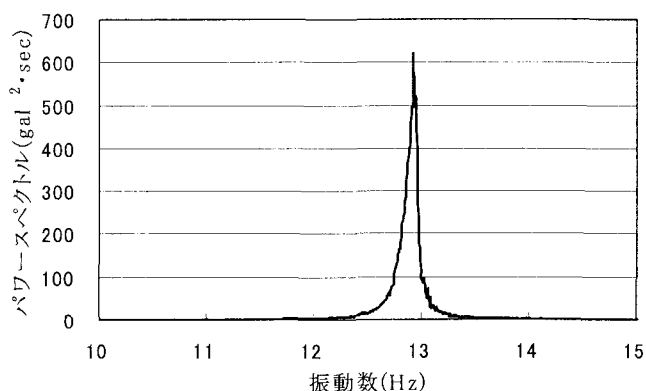
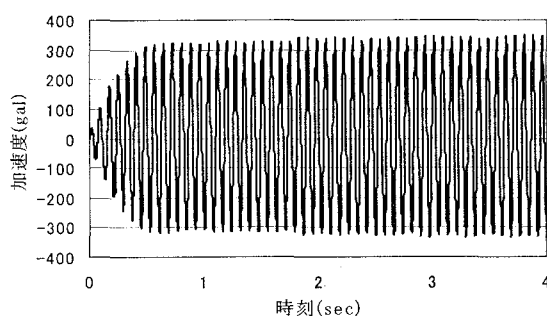
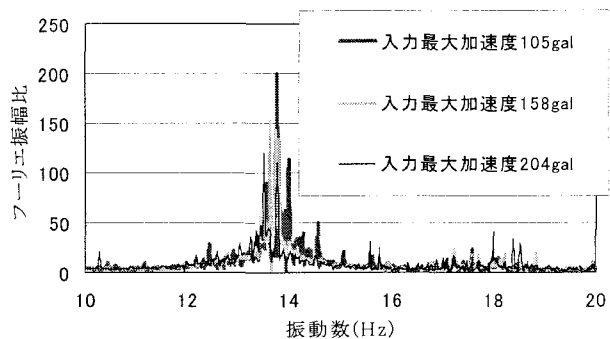


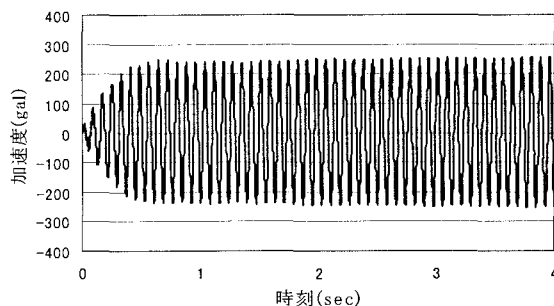
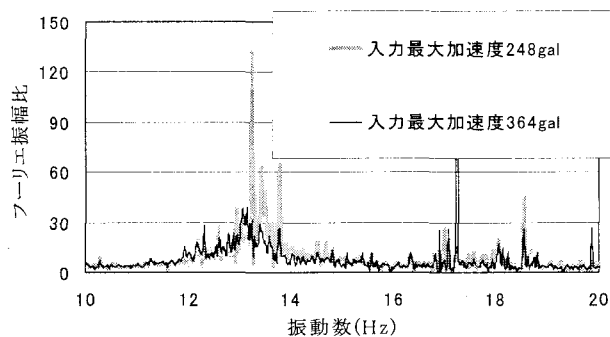
図-5 供試体頂部のパワースペクトル
(自由振動試験)

表-2 ホワイトノイズ入力試験結果

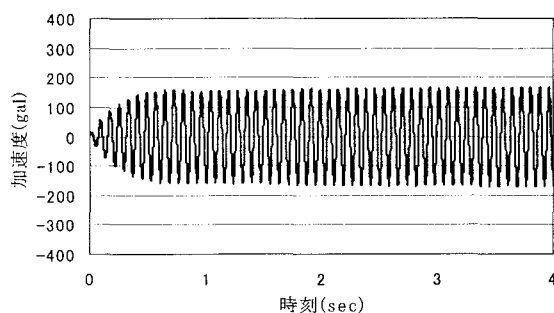
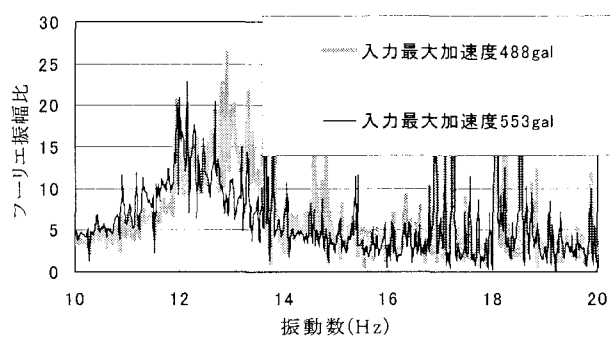
入力加速度の 最大値(gal)	頂部の応答加速度 の最大値(gal)	固有振動数(Hz)	減衰定数(参考値)(%)
105	206	13.7	0.3
158	640	13.6	0.3
204	853	13.5	0.4
248	1050	13.3	0.4
364	1330	13.1	1.3
488	1580	12.9	1.9
553	1390	12.2	2.2



(a) 8層目の応答加速度時刻歴



(b) 6層目の応答加速度時刻歴



(c) 4層目の応答加速度時刻歴

図-6 振動台と供試体頂部のフーリエ振幅比
(ホワイトノイズ入力試験)

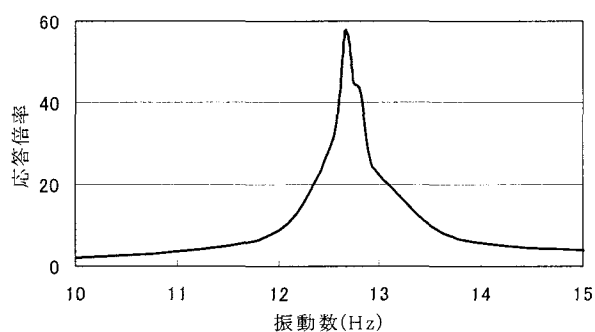
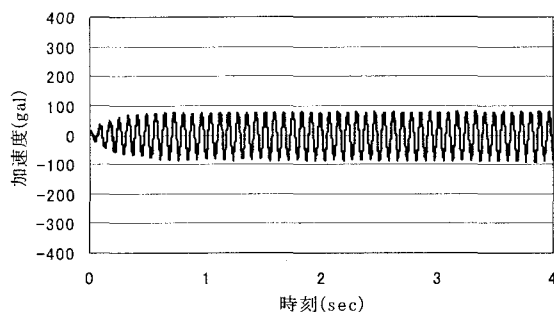


図-8 共振曲線 (正弦波加振試験)



(d) 2層目の応答加速度時刻歴

図-7 正弦波加振時の応答加速度時刻歴

力した際の供試体の2, 4, 6, 8層目の応答加速度時刻歴を図-7に示す。また、正弦波加振試験で得られた共振曲線を図-8に示す。図-8から、振動数が12.65Hzのときに最大応答倍率57.6を示した。また $1/\sqrt{2}$ 法から減衰定数を求めると、0.88%となった。

地震波入力試験では、地震波CHY080y, TCU068y, TCU084y, EL Centro -NS, Taft -EWの計5波を入力した。地震波入力試験に関しては、次節以降で動的応答解析を実施し実験の応答値との比較による検討を行ったので後述する。

以上、山形鋼トラス鉄塔の振動実験として、常時微動試

験、自由振動試験、ホワイトノイズ入力試験、正弦波加振試験、および地震波入力試験を実施した。振動実験より得られた知見を以下に示す。

- ・ 常時微動試験、自由振動試験、および正弦波加振試験を実施することにより、実験供試体の固有振動数および減衰定数を把握した。
- ・ ホワイトノイズ入力試験を実施することにより、入力加速度レベルの増加に伴って、固有振動数が低下する傾向を確認できた。また、試験から得られたフーリエ振幅比より、入力加速度レベルを増加させると固有振動数におけるフーリエ振幅比に基づく応答倍率が小さくなる傾向を確認できた。したがって等価粘性減衰定数が増加している傾向を確認できる。これは加速度レベルの増加に伴って、ボルト接合部で生じたすべり量が増加するためと考えられる。

4. 解析手法の概要

4.1 解析モデルおよびモデル化手法

解析モデルのモデル図を図-9に示す。解析モデルは実験供試体と同様、総重量が2.853kNである。

主要構造材である主柱材は3次元はり要素、斜材および水平材に関してはトラス要素として全て線形材料でモデル化を行った。ベースプレートに関しては、図に示しているような2本の3次元はり要素でモデル化した。また、ベースプレートと振動台を固定するボルトは、供試体の固有振動数と一致するようにばね定数を調節して、鉛直ばねでモデル化した。

質量に関しては、各層に集中質量として考慮している。主柱材や斜材、水平材に関しては、層境界で分割した。鍾

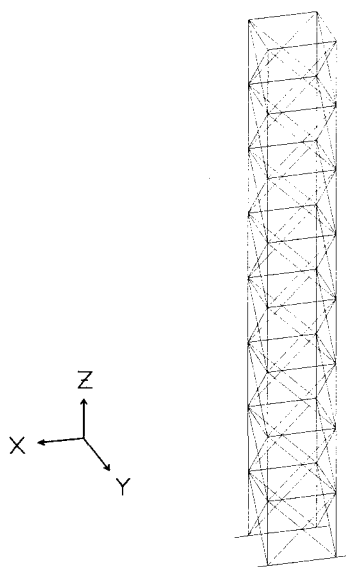


図-9 解析モデル図

に関しては、各層の隅角部に入力した。平面プレートに関しては、はり材端部および主柱材との接合部に入力した。

4.2 入力地震波およびその他の解析条件

動的応答解析で用いた地震波は、台湾集集地震で観測されたCHY080, TCU068およびTCU084の3波, EL Centro, Taftの計5波を入力した際に得られた振動台上の加速度である。

動的応答解析においては、固有値解析によりひずみエネルギー比例型のモード減衰定数を算出した。本研究では、部材は全て線形材料でモデル化しており、線形挙動時には剛性の変化が生じないため高次の振動モードは励起されない。したがって、有効質量の卓越したモード(本研究では、次節より1次モードと2次モード)より、Rayleigh減衰を定義した。

動的応答解析は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) による直接積分法で行った。また、解析するにあたり使用した解析ソフトは、汎用解析プログラム TDAPIII である。

表-3 固有値解析結果

モード	振動数(Hz)	有効質量比(%)
曲げ1次	12.65	57
曲げ2次	103.3	13
曲げ3次	262.1	2
曲げ4次	433.8	1
曲げ5次	642.4	2

1次モード (12.65Hz) 2次モード (103.3Hz)

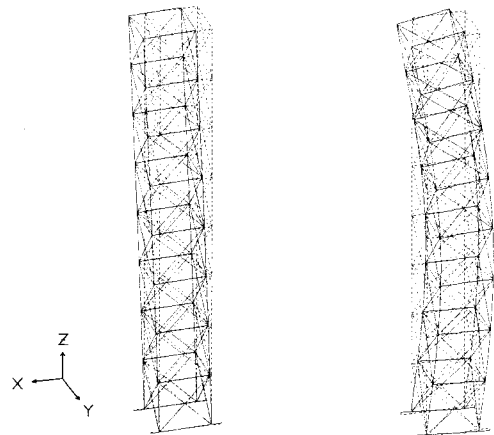
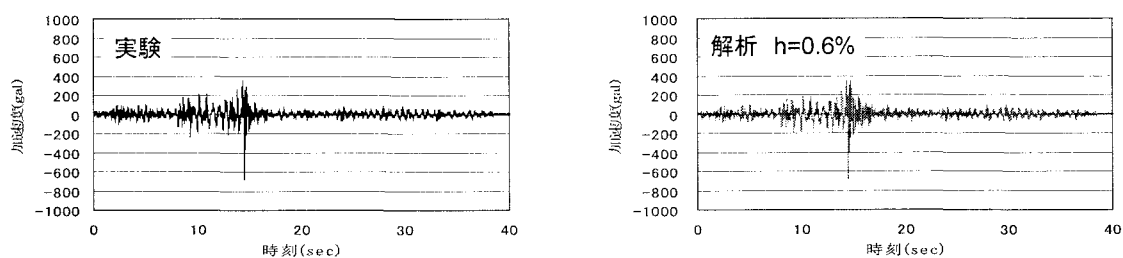


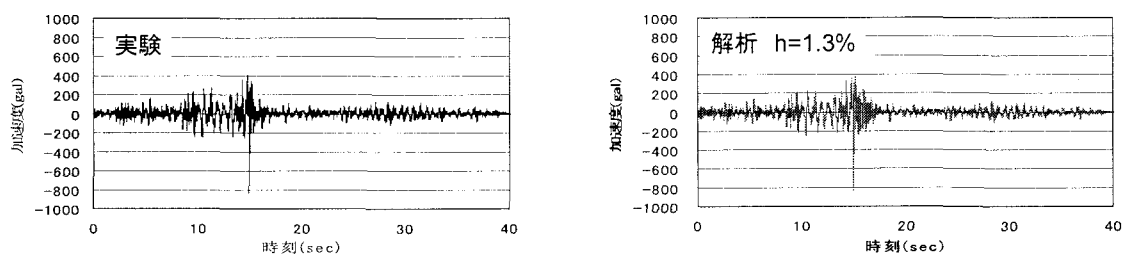
図-10 固有モード図

4.3 固有値解析

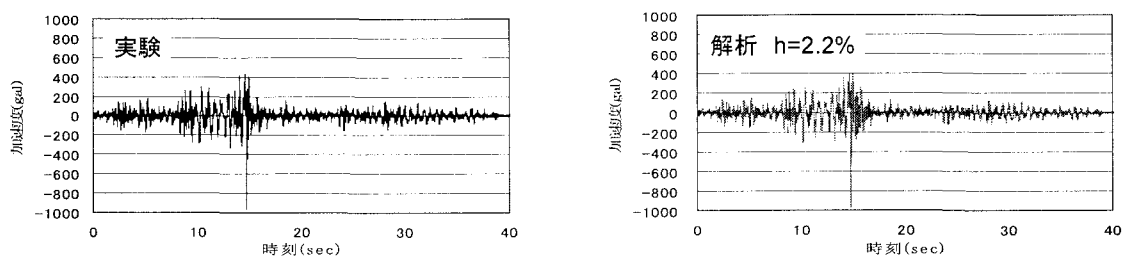
固有値解析によって得られた、曲げに関するモードの結果を表-3に示す。また、曲げ1次および2次の固有モード図を、図-10に示す。固有値解析の結果、有効質量比から1次モードが支配的な振動モードとなっている。



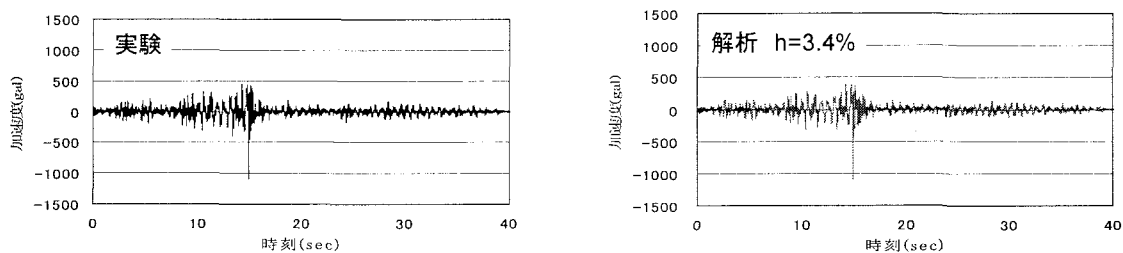
(a) 入力max 303gal (頂部応答max 684gal)



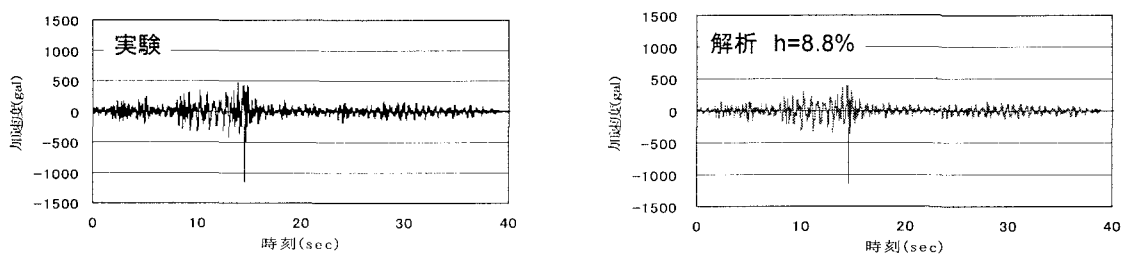
(b) 入力max 386gal (頂部応答max 833gal)



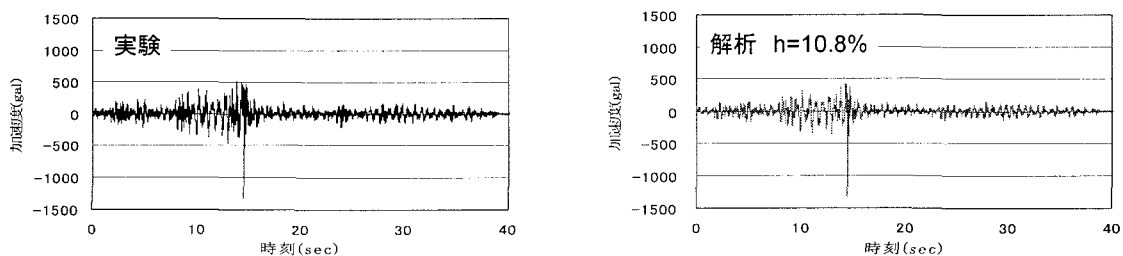
(c) 入力max 475gal (頂部応答max 966gal)



(d) 入力max 560gal (頂部応答max 1086gal)



(e) 入力max 683gal (頂部応答max 1159gal)



(f) 入力max 785gal (頂部応答max 1320gal)

図-11 実験および解析より得られたCHY080y入力時の供試体頂部応答加速度の比較

表-4 CHY080y 動的応答解析結果

入力加速度の最大値(gal)	頂部応答加速度の最大値(gal)	減衰定数(%)
303	684	0.6
386	833	1.3
475	966	2.2
560	1086	3.4
683	1159	8.8
785	1320	10.8

表-5 TCU068y 動的応答解析結果

入力加速度の最大値(gal)	頂部応答加速度の最大値(gal)	減衰定数(%)
190	437	0.7
287	736	0.8
389	872	1.7
481	1041	2.3
581	1210	5.8

表-6 TCU084y 動的応答解析結果

入力加速度の最大値(gal)	頂部応答加速度の最大値(gal)	減衰定数(%)
211	474	1.7
313	630	3.5
402	783	5.5
509	952	7.2
611	1093	8.4
703	1245	9.9
807	1382	13.0

表-7 EL Centro -NS 動的応答解析結果

入力加速度の最大値(gal)	頂部応答加速度の最大値(gal)	減衰定数(%)
388	793	1.6
445	889	1.7
703	1195	5.0

表-8 Taft -EW 動的応答解析結果

入力加速度の最大値(gal)	頂部応答加速度の最大値(gal)	減衰定数(%)
137	209	1.3
482	559	6.0

5. 地震応答解析における等価粘性減衰定数の探索

各地震波に対して動的応答解析を行い、振動実験で得られた結果と比較することにより、等価粘性減衰定数の探索を行った。ここでは、振動実験で得られた供試体頂部の加速度計で計測された応答加速度に着目した。その最大値が解析値と一致するよう、解析における減衰定数を0.1%毎に変化させた。また本研究では、最大値の一致のみでは波形全体の一致として不十分であると考え、最大値の一致を試みた後、以下のような確認を行った。実験および解析の応答時刻歴データからそれぞれフーリエスペクトルを求め、それらの比を取った際に鉄塔供試体に大きな影響を及ぼすような振動数領域においてほぼ1倍であれば、実験と解析でそれぞれ供試体に与えた地震エネルギーはほぼ同等とみなせると考えられる。今回、最大値を一致させた場合、両者のフーリエ振幅比はほぼ1倍であることを確認した。

地震波CHY080y, TCU068y, およびTCU084yは積分時間間隔0.005secで、EL Centro -NS, Taft -EWは0.02secでそ

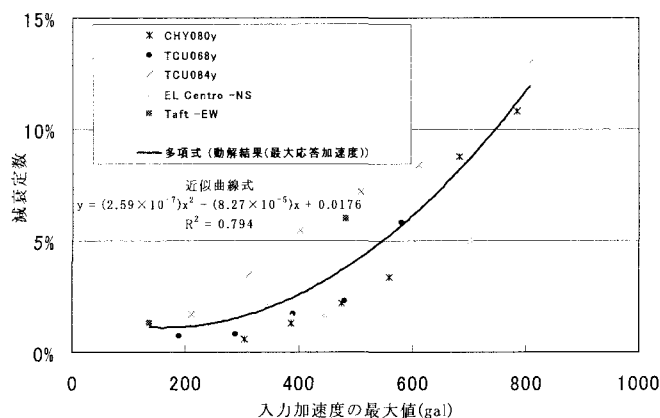


図-12 地震応答解析における等価粘性減衰定数の探索結果

れぞれ動的応答解析を行った。

例として、CHY080yの解析結果を図-11に示す。左側に実験で得られた供試体頂部の応答加速度時刻歴、右側に動的応答解析によって得られた応答加速度時刻歴を示している。図-11より、実験値と解析値がよく一致していることが確認できる。他の地震波に関しても同様の手法で解析を行った。動的応答解析の結果をまとめたものを表-4～表-8にそれぞれ示す。

動的応答解析を行った結果をまとめたものを図-12に示す。本節では、各地震波毎に動的応答解析による解析値と振動実験で得られた実験値との比較を行い、入力加速度の最大値と等価粘性減衰定数の関係を示したが、全ての地震波において、入力加速度レベルの増加に伴い等価粘性減衰定数が増加する傾向を確認した。また図-12より、地震波の種類を問わず、地震波の入力加速度レベルと等価粘性減衰定数に相関があることを確認した。

6. 結論

山形鋼トラス鉄塔は、ボルト接合部で生じるすべりなどにより、荷重や加速度の増加によって減衰特性が変化すると考えられる。したがって本研究では、地震時の入力加速度レベルによる減衰定数の変化に着目し、山形鋼トラス鉄塔の振動特性を把握することを目的とした各種振動実験を行った。またその結果を基に、地震応答解析における等価粘性減衰定数の探索を試みた。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) 常時微動試験、自由振動試験および正弦波加振試験により、実大鉄塔の切り出しモデルを用いた供試体の固有振動数および減衰定数を実験的に把握した。
- (2) ホワイトノイズ入力試験より、入力加速度レベルの増加に伴い、固有振動数が低下し減衰定数が増加することを実験的に明らかにした。

(3) 地震応答解析では計5波の地震波を用い解析を行い、解析により実験結果を模擬できることを確認した。また、解析結果と実験結果を比較することにより、地震波の入力加速度レベルと等価粘性減衰定数に相関があることを明らかにした。山形鋼トラス鉄塔は、地震時の応答加速度の増加により、見かけの等価粘性減衰定数が増加するものと判断される。

以上の結果を、実務における解析条件の設定の際に、地震動の入力レベルを考慮した山形鋼鉄塔の部材減衰として設定することで、より信頼性の高い評価結果が得られるものと考えられる。

今後は、この結果を踏まえて実規模の送電鉄塔の地震応答解析を行い、その影響を検討する予定である。

【謝辞】

本研究において、日本鉄塔工業㈱の荊尾治邦氏、また現在、北九州市役所の池田征司氏(研究当時、九州大学大学院工学府建設システム工学専攻)には貴重な御助言を賜った。さらに実験の実施にあたり、九州大学大学院工学研究院技官の山崎智彦氏には実験準備等の御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 電気学会, 電気規格調査会: 送電用支持物設計標準JEC-127-1979, 電気書院, 1980. 8
- 2) 松田泰治, 大塚久哲, 池田征司: 耐張型鉄塔の動的挙動に与える架渉線の影響評価〜台湾集集地震により倒壊した超高压送電鉄塔を対象として〜, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 343-352, 2003. 3
- 3) 松田泰治, 大塚久哲, 池田征司: 集集大地震により倒壊した超高压送電鉄塔の動的挙動に与える架渉線の幾何学的非線形性の影響評価, 第11回日本地震工学シンポジウム, No392, 2002. 11
- 4) 東京電力株式会社: UHV 送電用鉄塔・基礎耐震設計指針・同解説, 1984
- 5) 東京電力株式会社: UHV 送電用鉄塔・基礎耐震設計指針・同解説(参考資料), 1984
- 6) 松岡正矩: 実大鉄塔荷重試験について, 鉄塔 42 号, 1978
- 7) 沢辺幸夫, 奥田賢持, 志村一夫: 形鋼トラス鉄塔の構造実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 2033-2034, 1982
- 8) 小坪清真, 高西照彦, 鳥野清, 園田敏矢: 超高压送電鉄塔の動的実験とその耐震性に関する検討, 土木学会論文集, 第 333 号, pp. 59-69, 1983

(2003年9月12日 受付)