中国応県木塔の地震応答特性に関する研究

東京都立大学大学院　（学生会員）　○何　　勇
首都大学東京　都市環境学部　（フェロー）　岩楯　敞広
首都大学東京　都市環境学部　（会員）　小田　義也

1.研究背景・目的

中国山西省応県（図1)の仏宮寺釈迦塔（別名：応県木塔）は、西暦1056年に建設された。世界で現存する最も古い木造の高層塔建築の１つである。過去に地震や戦禍等により大きな被害を受けており、また、今後、大地震が発生する可能性が極めて高く、歴史的文化遺産である応県木塔の保存と継承を図るために、応県木塔の耐震安全性を検討することが緊急の課題である。本研究は首都大学と上海交通大学の国際共同研究の一環として、常時微動観測、地震観測（地震計の設置）および地震応答解析により地盤、木塔の応答特性と耐震性を評価し、耐震補強の有無、修繕工事の必要性の基礎資料を得ることを目的としている。

2.研究項目

(1) 常時微動観測による応県木塔および周辺地盤の応答特性の評価。
(2) 地震観測による基礎データを提供する。
(3) 応県木塔の地震時応答特性の評価。

3.方法と結果

3.1 常時微動観測による応県木塔および周辺地盤の応答特性の評価：

(1) 応県木塔において（図3.1)、24時間観測を行い、各成分のスペクトル及び水平成分 (H) と上下成分 (V) の時間変動について考察した。その結果は、周波数特性についてはどの成分[NS(図3.2)、EW、 UD] においても24時間での観測値（卓越振動数）はほぼ一致している。この結果により得られた定常性を保った卓越振動数データから木塔の微小振動レベルの木塔の振動特性を評価するできることを確認した．

(2) 木塔を対象に各層で同時常時微動観測（図3.1)を行い、固有振動数と増幅特性を求めた結果建物の１次、２次、３次卓越振動数（f1=0.68Hz,f2=1.86Hz,f3=3.13Hz）が得られた。さらに、各卓越振動数（NS,EW成分）を用いて振動モード図を作った（図 3.3 ）。 この結果、NS方向とEW方向の卓越振動数振動モード（図3.3)はほぼ同じとなった。

(3) 佛宮寺内 (100mx150m) の地盤を、 20mx20m に分割し、合計30点で常時微動観測を行った。表層地盤の卓越振動数 (NS:2.6Hz-3.0Hz,EW:2.6Hz-3.3Hz,UD:2.5Hz-3.5Hz) を得られた（図3.4)、これらの結果から、地盤の卓越振動数はNS方向、EW方向でほぼ同じとなった。

3.2 応県木塔の地震時の応答特性の評価

(1) 応県木塔の観測図を用いて、詳細の３次元モデル（要素数24000)を作成。固有振動数解析行い、１次、２次、３次固有振動数と振動モードを求めって、常時微動結果と比較した（表3.1)、良い対応を得られた。モデルの妥当性を確認した。

(2)3次元モデルに逗子で観測された実地震波形(M＝5)を用いて、地震応答解析を実施し、木塔の応答（最大応力と変形）を求めた（図 3.5 、図 3.6 ）。 最大応力と最大変形を評価した。木塔の２層での最大応力分布図 3.5 に示している。図 3.6 に木塔の最大変形せん断一次振動 (NS 、EW、ねじれ）であり、各モードと最大変形は２層で発生している。この結果は木塔の現在被害パターンと対応しめした。

以上の結果は、耐震補強及び修繕工事のための基礎資料として有益なものと考える。

キーワード　　常時微動観測　地震観測　応県木塔　地震応答解析
連絡先：　東京都八王子市南大沢 1-1　　0426-77-1111（内線4585）

図 1　中国山西省応県位置図

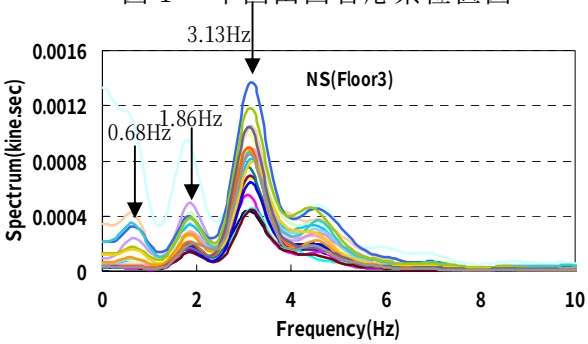

図 3.2 24時間常時微動観測スペクトル(NS)

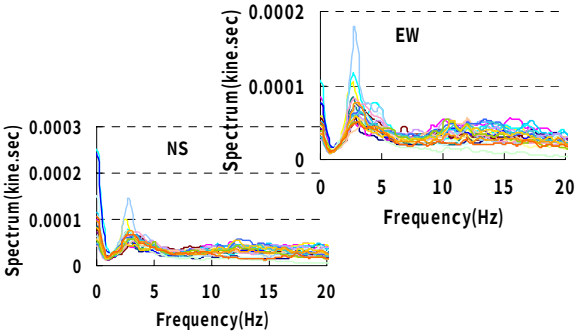

図 3.4 表層地盤卓越振動数分布図

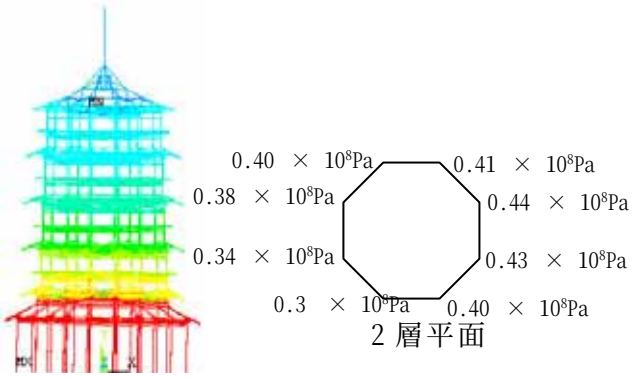

図 3-5 最大応力図

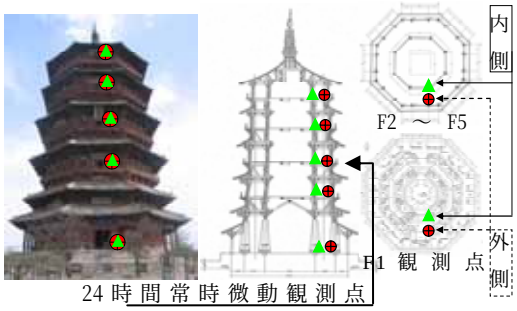

図 3.1　各層で同時常時微動観測点

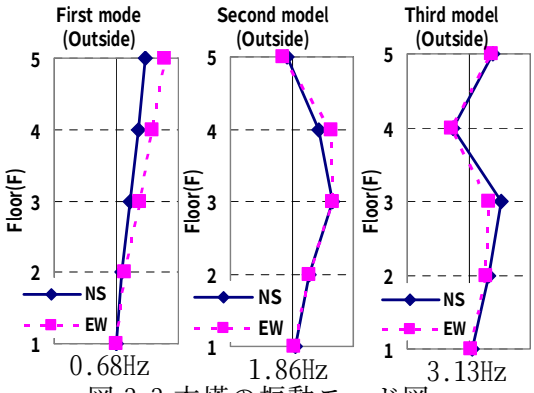

図 3.3 木塔の振動モード図

表 3-1 木塔の卓越振動数と解析値の比較

モード	観測値（Hz）		解析値
	NS 外側	NS 内側	NS
1 次	0.68	0.68	0.59
2 次	1.86	1.86	1.82
3 次	3.13	3.13	3.23
	NS 外側	NS 内側	NS
1 次	0.78	0.78	0.68
2 次	1.86	1.86	1.87
3 次	3.13	3.03	3.30

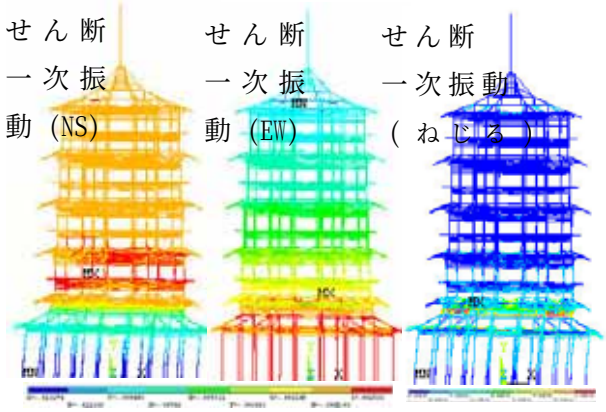

図 3-6 最大変形モード

参考文献：

1）岩楯敞広、小田義也など、逗子地域の表層地盤の応答特性に関する研究 [C]，第11回日本地震工学シンポジューム　2003年12月

2) Li Tieying 、Wei Jianwei 、ZhangShanyuan　Li Shiwen 、APPRAISAL ON THE　TRUCTURE OF THE YINGXIAN WOODEN TOWER, Vol. 22 Sup. June 2005