

I-40 五重塔に対する耐震性能評価

高知工業高等専門学校建設システム工学科 吉川 正昭
高知工科大学社会システム工学科 ○宮地 ひかり

1. はじめに

五重塔は地震に強い制震性を持つ木構造の特性を示す、きわめて大きい変形に耐える性質を持っている(接合部の遊びによって、ある限度を超えた力が働いてもすぐには壊れず十分に變形しうる能力がある)。木の組物が特徴的であり、振動を緩和する性質を持っている(組物が大きなエネルギーを吸収し、減衰効果が大きい)。すなわち、塔は単位面積当たりの木材の使用量が非常に多く、水平力に対する抵抗力が大きい構造になっている(地震力に抵抗する部材要素が多い。五重の塔の中の空間は狭いので建物として人が住む、仕事をするなどという実用的な建物ではない)。五重の塔の耐震性^{1)~5)}は、1/5 模型の振動実験⁶⁾や津観音五重塔の地震観測⁷⁾から、2次の固有モードが卓越することが分かっている。

これらの知見を踏まえ、五重塔のモデル化による応答性状を調べるために、観測波を用いて、五重塔を曲げ系とせん断系の多質点にモデル化(剛性と1/10の剛性)して固有値と地震応答解析を行い、固有モード、最大応答包絡線、応答加速度波形とパワースペクトルなどを求め、考察を加えた。

2. 解析方法と解析条件

解析対象をFig.2(a)に示し、5質点モデル図をFig.2(b)に示す。せん断系の剛性マトリックスは、対角項および隣接する2項からなる3項の帯状マトリックスとなり、それ以外の項は0となる。耐震壁、煙突、柱伸縮を伴う高層ラーメンなどのように全体としての曲げ変形が卓越する系(曲げ系)では、梁要素(部材長 l 、曲げ合成EIの変位と回転角で表す)の剛性を用いるので、位置が離れた層の間の連成が無視できず曲げ変形を示す。解析で概算を繰り返し、せん断・曲げばね剛性を求めたあと非線形を考慮して、1/10の剛性、Ks2、km2を求めた。減衰定数はいずれも15%とした。

2.1 入力地震波と解析種類

入力地震波は福岡県西方沖を震源とする福岡県西方沖地震(2005.3.20)の平戸市で観測されたEW成分を用いる。時刻歴波形の最大加速度を示す前後約10秒間の主要動部(最大加速度355.8gal)を抽出し、最大加速度100galとして、入力地震波とする。せん断系変形と曲げ変形が卓越するそれぞれ5質点モデルのせん断(Ks1)または曲げ剛性(Km1)と、塔は変形のため剛性が低くなり、木組継手などのこすれ合いにより減衰定数が大きくなると考え、1/10Ks1または1/10Km1、減衰定数を15%にし、4種類の解析をTable2.1に示す。木組が複雑なため、剛性を正確に求めることは難しく、簡易な静的手法によっている。

3. 結果および考察

3.1 固有値解析

Fig3.1.1の5次モード(2次元化したモード)は理想の減衰形状でスネークダンス¹⁾といわれている。固有値解析結果の代表例として、せん断系(Ks1)と曲げ系(Km1)の固有周期と固有振動数、モード(1~5次)をFig.3.1.2(a), (b)に示す。Ks1の1次モードは腹部が大きく振動しゆっくりとした揺れであり、塔頂の振動は小さく速く揺れる。Km2においても2次モードも大きく、逆位相に振動している。両方とも2次モードが大きいことが分かる。

3.2 地震応答解析

入力波、2層、5層の加速度時刻歴応答波形とフーリエ・パワースペクトル(Ks1, Km1)をFig.3.2.1(a), (b)に示す。曲げ系(Km1)、せん断系(Ks1)の最上層の応答加速度と変位の最大応答値をTable.3.2に示し、最大応答変位の応答包絡線をFig.3.2.2(a), (b)に示す。曲げ系の方がせん断系の加速度波形より高振動で振動している。せん断系の方が曲げ系より応答加速度と変位も小さくなり、剛性が低下しても同様である。

4. まとめ

せん断系でモデル化した方の剛性が低下し、減衰が増える耐震性を有する五重の塔を表現しやすいと考える。現段階では強震観測データを持たないのでシミュレーションによる手法を用いた。柱に遊びがある複雑な挙動を、せん断系と曲げ系の2つのモデル化により解析した。両者の固有モード、固有周期をほぼ同じにすることは難しい。今後の課題として、1/5 模型振動実験(人工模擬地震波による地震応答解析)などを参照にして、ケーススタディを行いたい。

参考文献

- 1) 上田篤著：五重の塔はなぜ倒れないか、新潮選書、1996.02
- 2) 西岡常一：木のいのち木のこころ、草思社、1993.p.28
- 3) 大塚将、川井伸泰、安井健治、○吉川正昭：転がり振り子による制振システム—パッシブからアクティブ制振への移行—、振動制御コロキウム(第2回)講演論文集、土木学会構造工学委員会、pp87~94、1993.8.
- 4) 大塚将、川井伸泰、安井健治、○吉川正昭：転がり振り子による制振—可変ゲイン制御による制振効果—振動制御コロキウム(第3回)講演論文集 B、土木学会構造工学委員会、pp99~106、1995.8.
- 5) 吉川正昭：五重の塔に対する耐震性能の検討(その2) 土木学会技術研究発表会講演概要集、pp.36~37、2005
- 6) 河合直人、箕輪親宏：五重塔5分の1模型の振動実験、JAEF、NO.2、pp.12~14、2005.7

7) 藤田香織, 花里利一, 坂本功: 伝統的木造五重塔の振動特性に関する研究その3 津観音五重塔の地震観測, 日本建築学会大会学術講演概要集(東海), pp.465~466, 2003.9

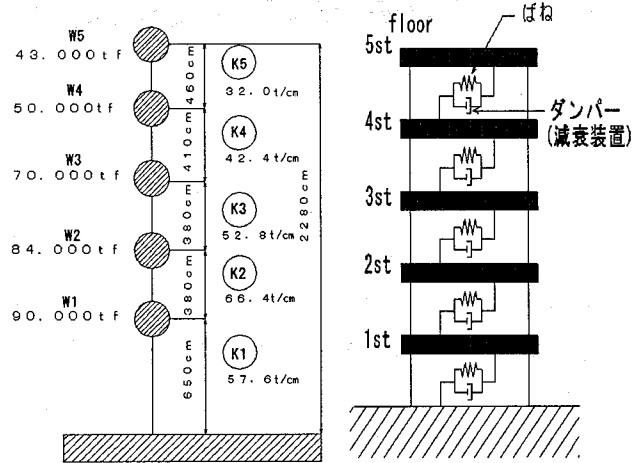
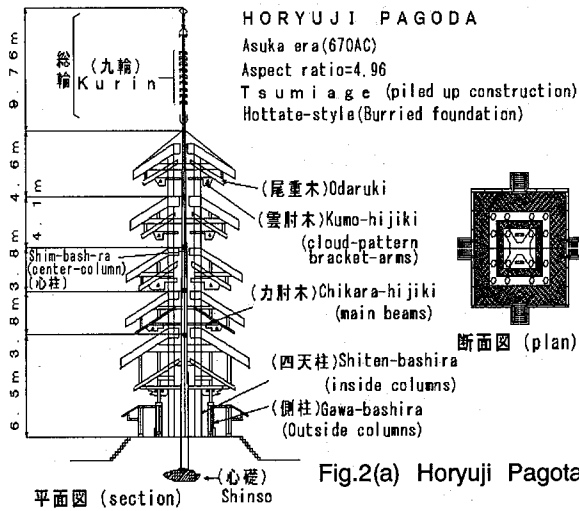


Table.2.1 Case of Analysis

質点	重量 (tf)	層高 (cm)	せん断 Ks1	層	せん断ばね (tf/cm)	せん断 Ks2 (1/10Ks1)	層	せん断ばね (tf/cm)
W5	43.000	450	せん断 Ks1	5	32.00	せん断 Ks2 (1/10Ks1)	5	4.00
W4	50.000	410		4	42.40		4	5.30
W3	70.000	380		3	52.80		3	5.10
W2	84.000	380		2	66.40		2	7.50
W1	90.000	650		1	57.60		1	6.20
質点	重量 (tf)	層高 (cm)	曲げ Km1	層	曲げ剛性 (tf/cm ²)	曲げ Km2 (1/10Km1)	層	曲げ剛性 (tf/cm ²)
W5	43.000	450	曲げ Km1	5	4.50E+10	曲げ Km2 (1/10Km1)	5	3.59E+09
W4	50.000	410		4	9.50E+10		4	7.58E+09
W3	70.000	380		3	1.50E+11		3	1.47E+10
W2	84.000	380		2	2.05E+11		2	2.27E+10
W1	90.000	650		1	2.50E+11		1	3.33E+10

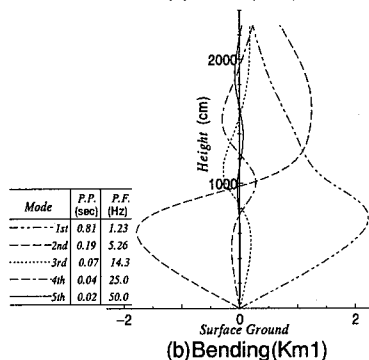
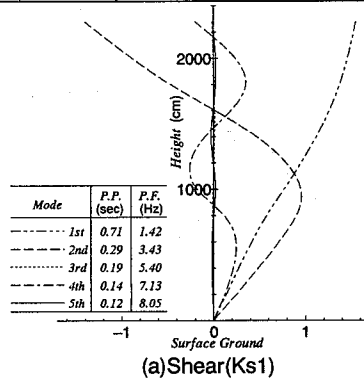
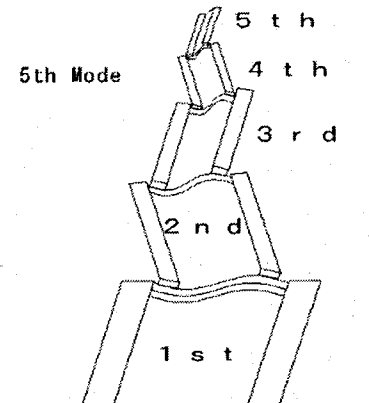


Fig.3.1.2 Mode

Table.3.2 Max Response of Accel. And Disp.

	せん断ばね / 曲げ剛性	最大加速度 5層, (gal)	最大変位 (cm)
せん断(Ks)	Ks1	52.641	0.356
	Ks2	11.229	1.261
曲げ(Km)	Km1	182.724	0.512
	Km2	67.566	1.733

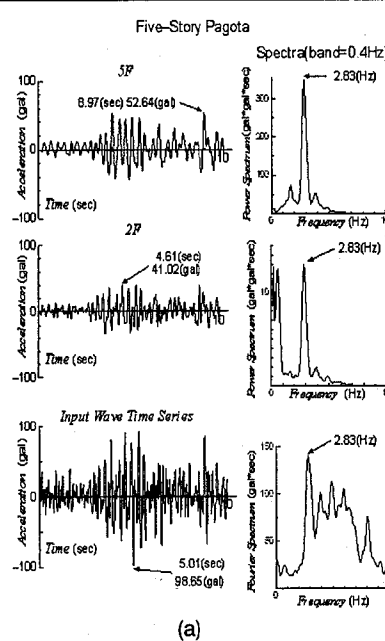


Fig.3.1.1 Snake Dance Model

Fig.3.2.1 Response Acceleration and Power Spectra

(a) Shear(Ks1)

(b) Bending(Km1)

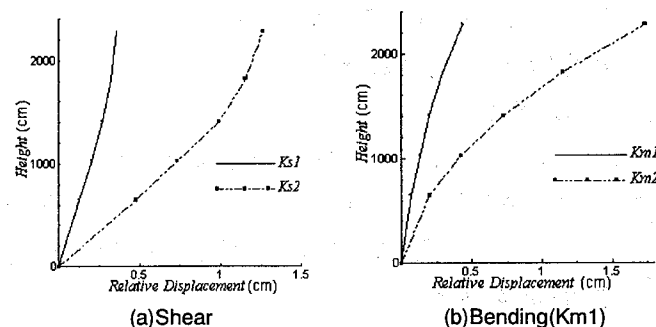


Fig.3.2.2 Enveloped Curve of Maximum Response