

I -18 五重の塔に対する耐震性能の検討（その2）

高知高専建設システム工学科

吉川 正昭

1. はじめに

五重の塔の耐震性^{1)~4)}については、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から建物として人が住むとか、仕事をするという実用的な建物ではない）。

これらの知見を踏まえ、五重の塔のバネー質点系モデルへの置換法とそのモデル化による応答性状を調べるために、芸予地震時に高知市の地表で観測された地震動を用いて⁵⁾、五重の塔を曲げ系とせん断系の多質点にモデル化（複雑な剛性を倍と半分、減衰定数を3%と15%とした可変剛性、可変減衰を考えた）して地震応答解析を行い、応答加速度、断面力などを求め、考察を加えた。

2. 解析方法と解析条件

解析対象を Fig. 2.1 に示し、モデル図を Fig. 2.2 に示す。せん断系（せん断変形が卓越する系）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。

3. 入力地震波と解析種類

入力地震波は安芸灘を震央とする芸予地震（2001. 3. 24）の高知市で観測されたNS成分を用いる。時刻歴波形の主要動部最大加速度を示す前後約10秒間を抽出し、最大加速度100galとし、解析入力地震波とする。パワースペクトルより、卓越周期は1次で約0.64secで2次は約0.21secとなる。塔の固有周期が長周期であるのに対し短周期側にある。

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（可変剛性、可変減衰抵抗の手法）を適用する。せん断（ K_s ）または曲げ剛性（ K_m ）が精度よく計算した値（Fig. 2.2の中央に示した値）に対し、地震時に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る。このときのばねを $1/2K_s$ または $1/2K_m$ 、減衰定数を15%と考える。また、逆に $2K_s$ または $2K_m$ 、減衰定数を3%にする場合も考える。解析の種類を Table 3.1 に示す。同表の6種類の剛性に減衰定数3%、15%を用いて固有値解析、地震応答解析を行う。

4. 固有値解析

固有値解析結果の代表例として、曲げ系（ K_m ）の固有周期とモード（1~5次）と5次モード（2次元化したモード）を Fig. 4.1 (a), (b) に示す。5次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。宙吊りの心柱が振り子作用¹⁾で制振効果があるとは考えていない。

5. 地震応答解析

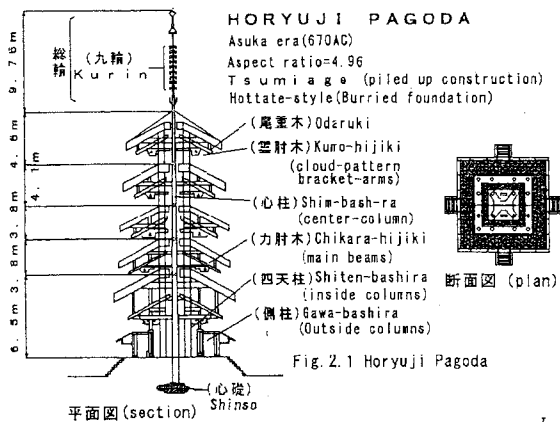
曲げ系、せん断系の最上階の地震応答加速度と変位の最大応答値を1/2, K, 2K（減衰3%と15%）について Table 5.1 に示す。代表例として応答変位の時刻歴波動を Fig. 5.1, 2 に示し、最大応答加速度、変位、転倒モーメント、せん断力、ベースシア係数の各階の最大応答包絡線分布（減衰15%）を Fig. 5.3, 4 に示す。

6. まとめ

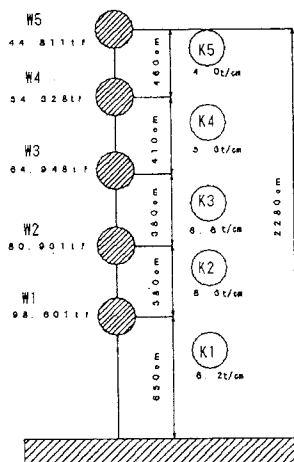
せん断系の方が曲げ系より減衰が大きくなると応答加速度も小さくなり、剛性が低下するとせん断系モデルの方が応答加速度は小さくなる。曲げ系の方がせん断系の波形より高振動数で振動している。以上の結果より、せん断系でモデル化した方が剛性が低下し、減衰が増える耐震性を有する五重の塔を表現しやすいと考える。現段階では観測データを持たないのでシミュレーションによる手法を用いた。柱に遊びがある複雑な挙動を、せん断系と曲げ系の2つのモデル化により解析した。両者の固有モード系は同じになるが、固有周期をほぼ同じにすることは難しく、今後の課題である。

参考文献

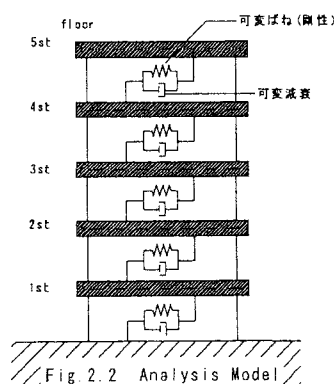
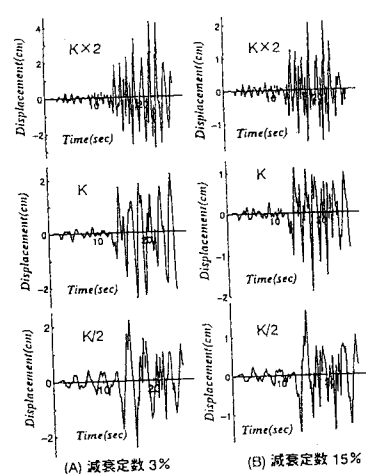
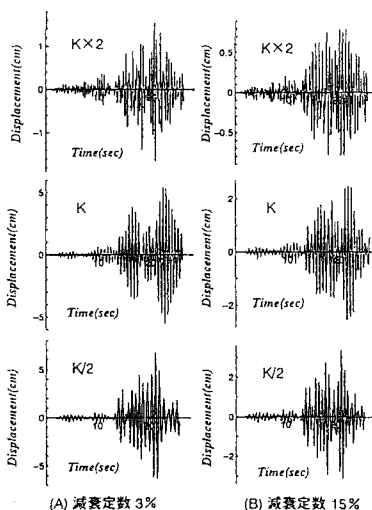
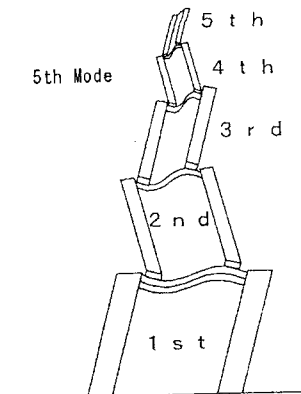
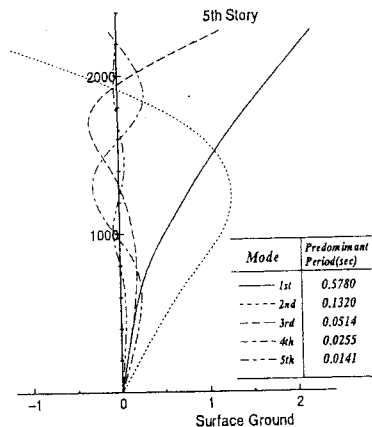
- 1) 五重の塔はなぜ倒れないのか？. 新潮選書
- 2) 西岡常一：木のいのち木のこころ。草思社, 1993. p. 28
- 3) 大塚将, 川井伸泰, 安井健治, ○吉川正昭：転がり振り子による制振システム—パッシブからアクティブ制振への移行—, 振動制御コロキウム（第2回）講演論文集, 土木学会構造工学委員会, pp87~94, 1993. 8.
- 4) 大塚将, 川井伸泰, 安井健治, ○吉川正昭：転がり振り子による制振—可変ゲイン制御による制振効果—振動制御コロキウム（第3回）講演論文集 B, 土木学会構造工学委員会, pp99~106, 1995. 8.
- 5) 吉川正昭, 秋友福太郎：五重の塔に対する耐震性能の検討, 土木学会技術研究発表会講演概要集, pp. 64~65, 2004. . .



精密解	階	剛性	2倍	階	剛性	1/2倍	階	剛性
曲げ (Km)	5	9.00E+09	曲げ (2Km)	5	1.80E+10	曲げ (1/2Km)	5	4.50E+09
	4	1.90E+10		4	3.80E+10		4	9.50E+09
	3	3.00E+10		3	6.00E+10		3	1.50E+10
	2	4.10E+10		2	8.20E+10		2	2.05E+10
	1	5.00E+10		1	1.00E+11		1	2.50E+10
せん断 (Ks)	5	4.00	せん断 (2Ks)	5	8.00	せん断 (1/2Ks)	5	2.00
	4	5.30		4	10.60		4	2.65
	3	6.60		3	13.20		3	3.30
	2	8.30		2	16.60		2	4.15
	1	6.20		1	12.40		1	3.10



番号	支点	重量 (tf)	高さ (cm)	せん断ばね (tf/cm)	減衰定数 (1/sec)	ゆがみ剛性 (tf/cm)
5	W5	44.811	460	4.0	3%	9.0e9
4	W4	54.328	410	5.3		1.9e10
3	W3	64.948	380	6.6	or	3.0e10
2	W2	80.931	380	8.3		4.1e10
1	W1	98.601	650	6.2	15%	5.0e10

Table. 5. 1 Max.Response of Accel. and Disp.

	剛性	減衰定数	5階の最大加速度(gal)	最大変位(cm)
曲げ (Km)	1/2 倍	3%	443.713	21.265
		15%	260.786	21.575
	精密解	3%	633.006	23.225
		15%	287.922	22.384
	2 倍	3%	409.053	20.685
		15%	205.885	21.651
せん断 (Ks)	1/2 倍	3%	31.784	21.920
		15%	10.737	21.250
	精密解	3%	87.158	21.350
		15%	29.550	18.350
	2 倍	3%	210.849	22.690
		15%	12.753	21.450

