

素人の地震・耐震考①「地震と五重塔」

【1】序論

(1)はじめに

残念ながら日本は世界の中でも有数の地震国である。そこで地震に関する情報を取り纏めて集約して見ます。序論では地震に関する各種情報について調査し、続いて少し深掘して地震学等に言及、最後によく話題になる「五重塔が何故地震に強いのか」について考察して見ます。建物の耐震設計等についてはやや専門的になるのでここでは割愛します。

(2)各種地震情報

1)世界と日本の地震分布

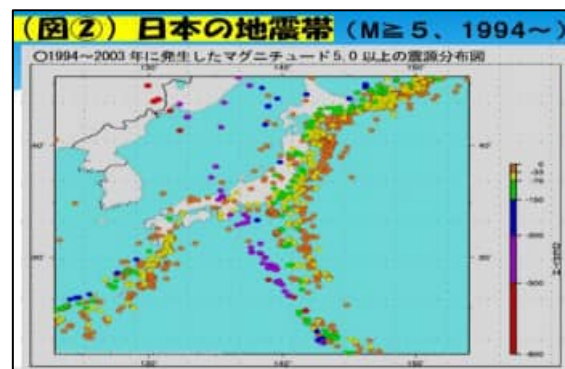
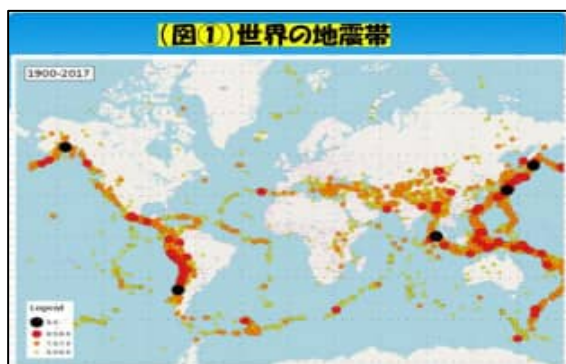
地震と火山の分布はほぼ同一である。主要な地震発生原因が両者ともに地球表層下部にあるマントル(マグマ)の対流によって地球表層が移動する事による地殻の歪開放が原因由。

地震の分布はマグマの吹き出し口である海洋中心部と海底地殻がマントル対流で移動して沈み込む海溝部に位置する大陸側と島部分である。世界と日本の主要な地震分布を図①、図②に示す。日本で1995年以降に震度7以上の被害をもたらした地震を図③に示す。

(3)地震の気象庁用語他

気象庁他の地震用語は以下の通り

- 1)地震規模(M): 地震のエネルギー指標を表す(図④)
- 2)震度階: 被害地における地震揺れの大きさを表す(図⑤)
- 3)地震被害の大きさ: 地震震度階と被害レベル(図⑥)
- 4)地震波の種類: 実体波と表面波
- 5)警報算定用地震波: P波(縦波)とS波(横波)



(図3) 日本の被害巨大地震 (震度 ≥ 7, ~1995)
下表に追加 (2024.1.1: 能登半島地震 M7.6)

最大震度7を観測した地震	マグニチュード	死者(人)	負傷者(人)
1995年1月17日 阪神・淡路大震災	M7.3	6434 (死者6434)	4万3792
2004年10月23日 新潟県中越地震	M6.8	68	4805
2011年3月11日 東日本大震災	M9.0	1万9729 (死者1万9729)	6233
2016年4月16日 熊本地震	M7.3	273	2809
2018年9月6日 北海道胆振東部地震	M6.7	43	782

気象庁提供。気象庁・気象庁気象研究所の資料を基にYahoo!ニュース制作(2021年12月)

(図4) 地震規模(M:マグニチュード)
地震規模指標(Mが1増える)とエネルギーは32倍
1) マグニチュード(M)

マグニチュードの目安	
マグニチュード	呼び名
(8以上)	(巨大地震)
7~	大地震
5~7	中地震
3~5	小地震
1~3	微小地震
1未満	極微小地震

(図5) 震度階と被害状況 (1996以前)
※1996年以降: 震度5.6に強弱2段階設定
1996年9月30日以前

震度	周囲の様子と被害
震度0 (無感)	地震計(震度計)が検知し、人は揺れを感じない。
震度1 (微感)	静止している人や特に注意している人だけに感じられる。
震度2 (軽感)	人に感じられ、椅子などがわずかに動く。
震度3 (弱感)	家が揺れ、戸・障子などが音を立てる。
震度4 (中感)	家が激しく揺れ、8分目くらいまで入れた水が容器からあふれ出る。
震度5 (強感)	壁が割れ、煙突が壊れたりする。
震度6 (烈感)	家が倒れる割合が30%以下で、屋敷れ、地割れが起こる。
震度7 (激感)	家屋の30%以上が倒れ、山崩れや地割れができる。

(図6) 震度階と被害状況 (1996以降)

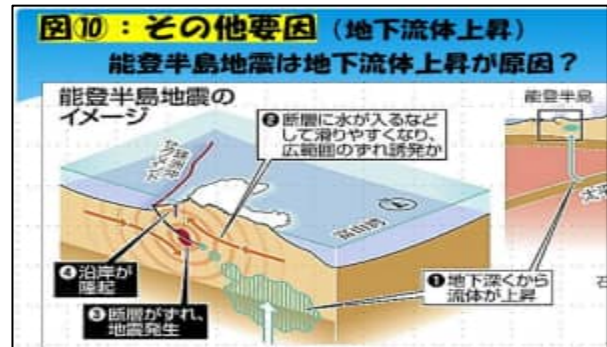
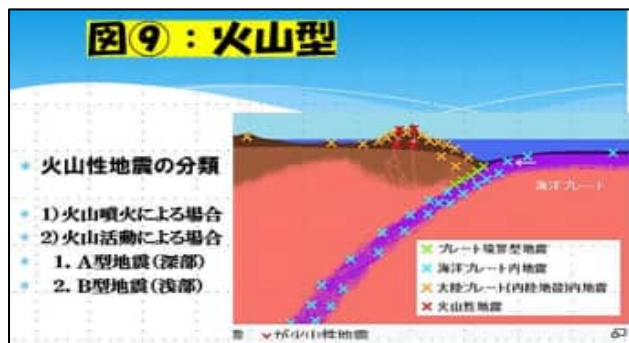
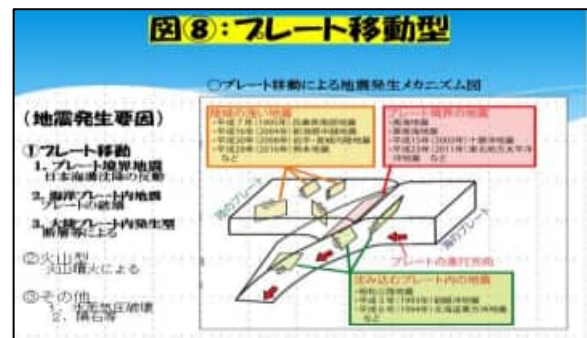
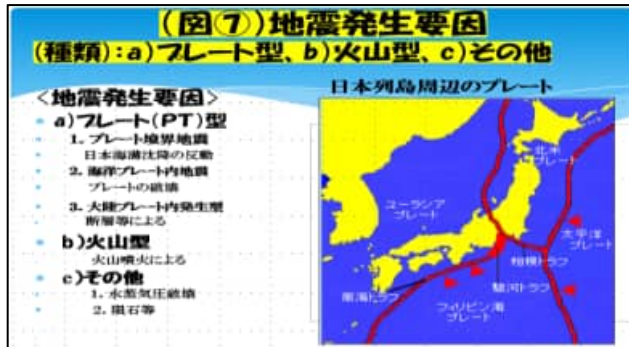
震度	震度階	周囲の様子と被害
0	無感	地震計(震度計)が検知し、人は揺れを感じない。
1	微感	静止している人や特に注意している人だけに感じられる。
2	軽感	人に感じられ椅子などがわずかに揺れる。
3	弱感	家が揺れ、戸・障子などが音を立てる。
4	中感	家が激震、歩行中に揺れを感じる。エレベーターが停止。
5	強震弱	歩行に支障、木造の壁が割れる。吊物が大きく揺れる。
5	強震強	歩行中断、木造壁・柱の破壊、RC造壁柱の亀裂、棚落下。
6	烈震弱	立姿勢困難、家具転倒多、木造倒壊、RC造壁柱破壊、巻木折損。
6	烈震強	立姿勢不可、家屋倒壊が30%以下でがけ崩れ地割れが起きる。倒木。
7	激震	家屋の30%以上が倒壊、やが崩れ地割れができる。

[2]地震学

(1)地震発生要因

地震発生要因は基本的には海洋プレート移動が原因であるが敢て分ければ

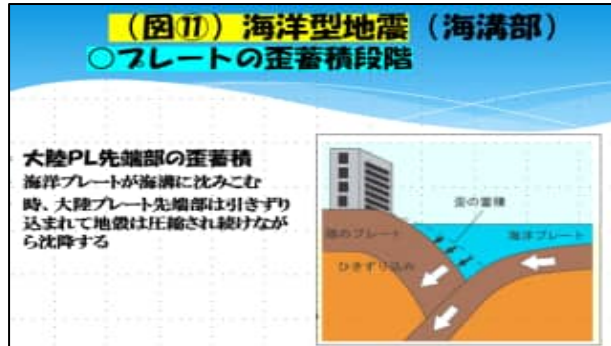
- 1) 海洋プレート移動による地震発生
- 2) 火山型：火山性の地震（プレート移動による間接的原因）
- 3) その他要因によるもの：例えば地下蒸気の上昇によるもの（能登半島沖地震）



(2)地震発生メカニズム

海洋型地震(図⑪、⑫)と内陸型地震(図⑬～⑮)に分けた時の発生メカニズムを以下に示す。

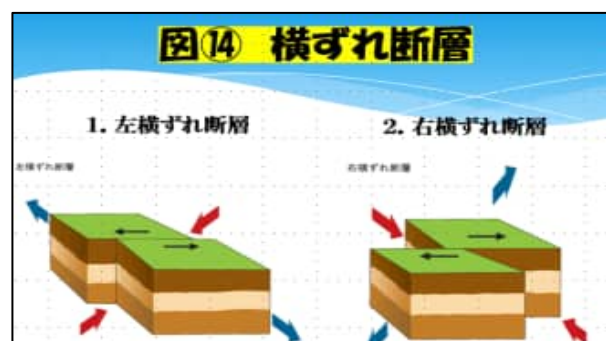
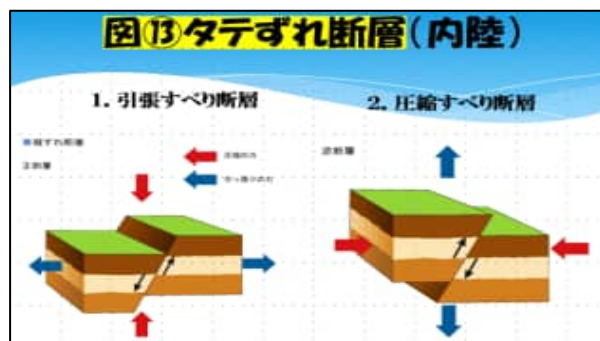
1) 海洋型地震発生メカニズム



2) 内陸型地震発生メカニズム(断層)

内陸型地震は内陸地盤の地滑り破壊により発生する。

1. プレート移動による引張力と圧縮力で地盤に歪が生じて限界に達すると断層滑りにより地震が発生する。
2. 断層破壊を生じる硬くて脆い地盤は深さ15～20kmの比較的浅い地盤で起きる。
3. 断層による地震種類
 - ①縦ずれ断層地震：プレート移動による内陸地盤の引張破壊
 - ②横ずれ断層：プレート移動による内陸地盤の圧縮破壊

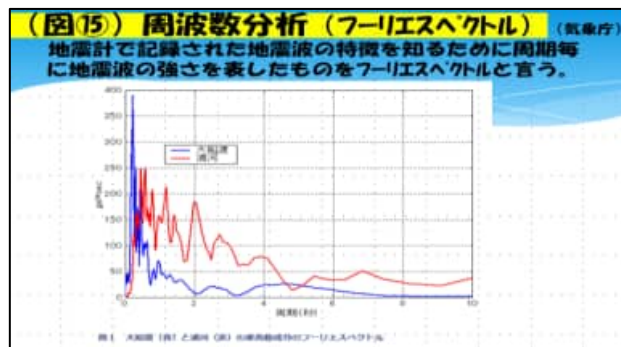


(3)地震動解析

1)地震波分析(周波数分析:フーリエスペクトル解析)

地震計で採取された地震波のフーリエスペクトル解析を行い当該地震の特徴を調べる。

フーリエスペクトルとは地震波の周波数分析を行い当該地震の卓越周期を求める事を言う。(図⑮)
地震の卓越周期を分析して建物が地震と共振しないように建築構造物を設計する事を耐震設計と言う。地震動の卓越周期(T)は一般的に短周期($T \leq 1$ 秒)～長周期($T \geq 5$ 秒)と分類(図⑯)



(図⑯) 地震動の卓越周期
長周期・短周期の目安

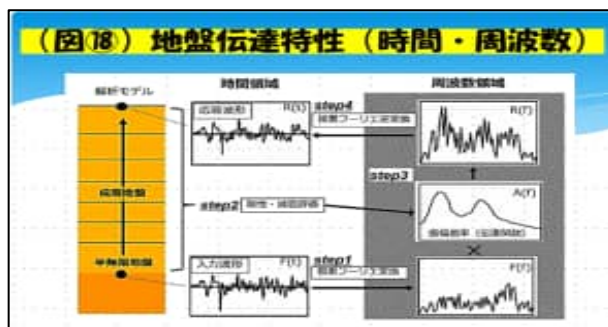
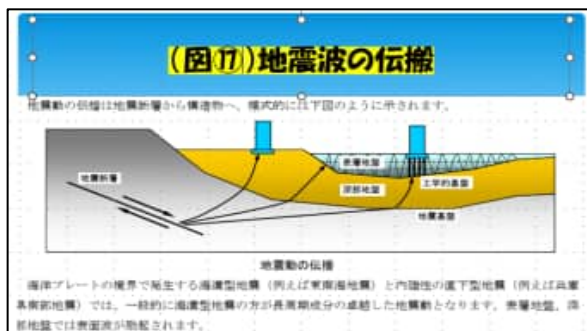
地震動と周期の関係

名称	周期
極短周期	0.5秒以下
短周期	0.5～1.0秒
やや短周期	1.0～2.0秒
やや長周期	2.0～5.0秒
長周期	5.0秒以上

2)地震波の伝搬特性

地震が発生して震源から当該建物のある地盤までの伝搬経路イメージを図⑰に示す。

建物到達地震波は伝搬途中地盤の影響を受けて地震波の卓越周期が決まります。その地盤の影響度合いを調べたものが地盤伝搬特性です。(図⑱)



3)地震動の種類

地震動の地盤伝搬で最近問題になっているのは長周期地震動(図⑲)です。伝搬途中の地盤で地震波卓越周期が引き延ばされて長周期化すると超高層建物は固有周期が長周期であるため建物の水平方向の揺れ変位が大きくなるので制振装置等で対応が必要です。

長周期建物の水平方向変形量は建物の速度応答スペクトルにより図⑳のように分類されます。



(図⑳) 長周期地震動階級分類(速度 sva)

表1 長周期地震動階級を与える絶対速度応答スペクトル Sva(減衰定数 5%)の範囲

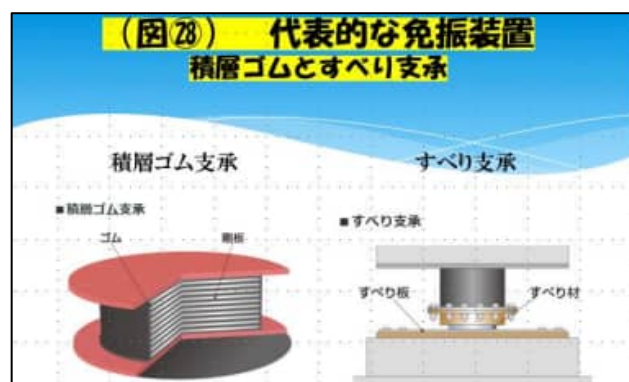
長周期地震動階級	絶対速度応答スペクトル Sva(減衰定数 5%)の範囲 (対象周期 T: 1.5 秒 < T < 8.0 秒)
長周期地震動階級 1	5 cm/s ≤ Sva < 15 cm/s
長周期地震動階級 2	15 cm/s ≤ Sva < 50 cm/s
長周期地震動階級 3	50 cm/s ≤ Sva < 100 cm/s
長周期地震動階級 4	100 cm/s ≤ Sva

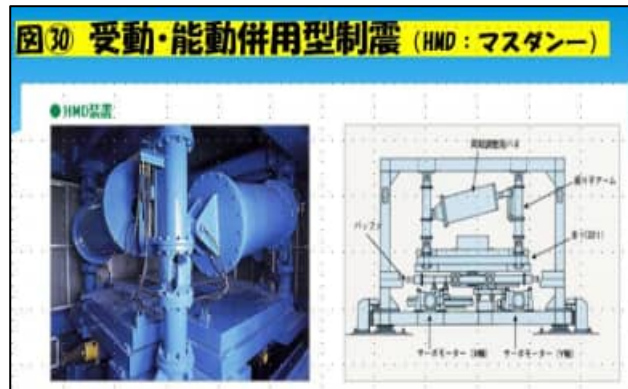
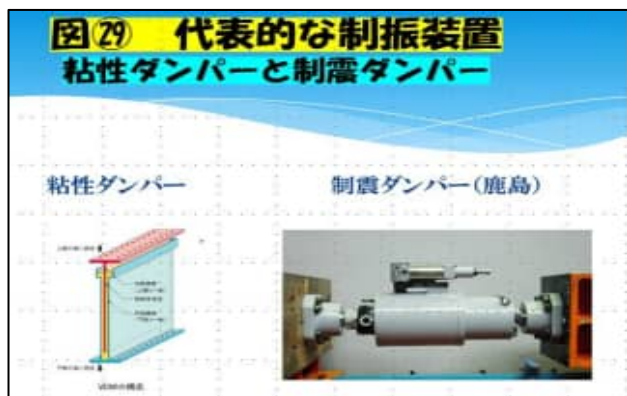
※周期 1.6 秒から 7.8 秒において、0.2 秒刻みで計算する

(4)地震予知

地震予知は非常に困難な課題だと思います。地球内部のマントル対流によって海洋プレートが海溝部へ沈み込む部位で大陸側地殻が跳ね上がったり、大陸側内部が圧縮歪・引張歪を受けて、地盤がいつ破壊するかは不確定要因が多すぎて地震発生を科学的に予知する事は不可能に近い。従って過去の地震から発生頻度・再来年数を統計的にある幅を以て予測する方法しかない。(他には過去の地震調査・活断層調査・海溝付近の歪調査が有る。)確率論的予測方法として図㉑はM≥6弱地震)が今後30年以内に発生する確率分布を、図㉒はその確率の計算手法を示す。

尚、M≥6程度の地震の発生30分程前から岩盤破壊による電磁気学的異常が発生する事が京大梅野研究室で東日本・三陸沖・熊本等の地震で観測された本当の意味で地震予知と言える手法が研究されている事は嬉しいことです。(図㉓、)東日本大地震の場合(図㉔)のように天空電離層の異常と日本海溝部での異常が観測されている事は貴重である。但しM≥6地震で電離層と断層部位で電離の異常が地震発生前に確認できた場合に適用できる。(恐らく大部分に適用可)





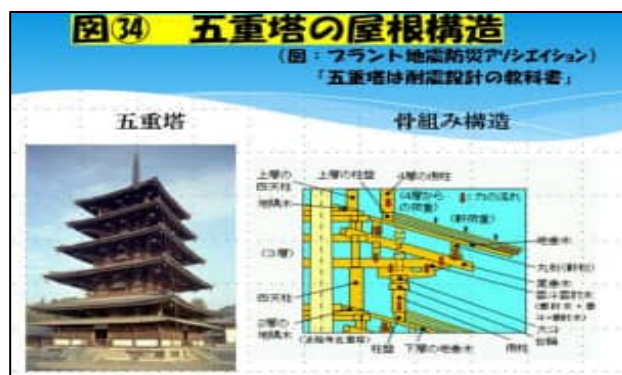
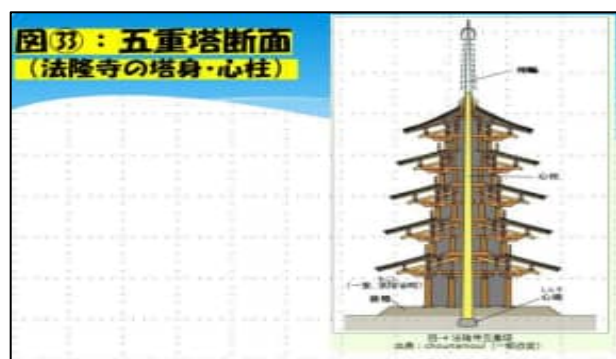
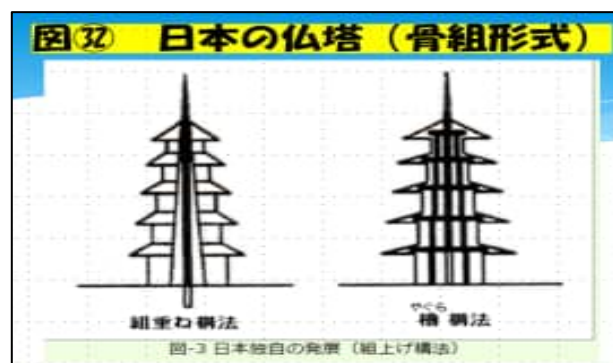
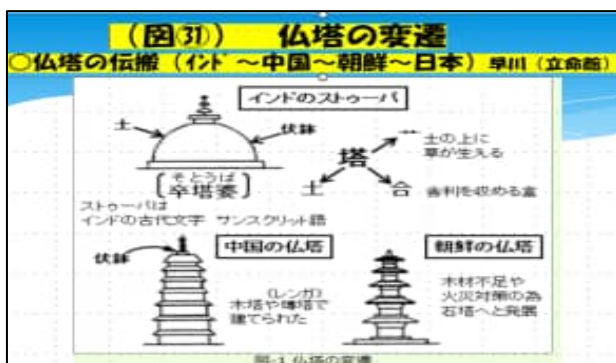
[4] 五重塔はなぜ地震に強い？

(1) はじめに

不思議な事に過去の地震で寺院の塔状型構造物(例:五重塔)は意外と倒壊を免れている。考えられる理由として単純に心柱が制振装置として働いていると推測していましたが今回の調査で五重塔が木造構造物である事と各層の骨組みが柔構造である事が耐震構造として大きく寄与している事が判明しました。以下に五重塔について地震構造解析結果と柔構造骨組み概要を示す。

(2) 仏塔の変遷と五重塔骨組み構造

五重塔の耐震論に入る前に、仏塔がどのような変遷を経て伝搬されて来たのか(図③①、③②)に示す。お釈迦さまが逝去された時(BC486)、インドでは仏舎利(釈迦の遺骨)を納める仏舎利塔はストゥーパ(舎利を納めた塚:卒塔婆)と呼ばれ頂部に暑さ除けの笠(相輪)が有る。中国へ伝搬されるとストゥーパは卒塔婆と訳されレンガ造の塔になり韓国では石造が主流となり日本へ伝搬されると木造骨組みの檼構法の塔状構造物となった。五重塔の断面を図③③に示す。また屋根構造詳細を図③④にします。



(4) 五重塔構造解析(例)

五重塔の地震応答解析結果を図③⑤、③⑥に示す。

1次固有周期 T (卓越周期:1次モード)がスレンダーな頭身なので $T=1.5$ 秒とかなり長周期なので制震効果が無ければ塔頂の変異はかなり大きくなる。地震時の塔の振動状態を図③⑦に示す。心柱の制震効果を見ると図③⑧の通り足元免震効果は少ないと思われる。また心柱は上部から吊下げ構造ではないので釣鐘のようにマスダンパーとしての制震効果は少ない。但し、3次、4次モードの塔体の浮き上がり防止効果があり転倒防止に有効である。(図③⑨)地震に対して有効なのは心柱でなく、五重塔の地震に対して効果があるのは図(④⑩、④⑪、④⑫)に示す通り木造骨組みが柔構造であることが全て良い効果を生んでいる。

図35 五重塔の振動解析例 (T社)

表-3 解析による固有周期
Table 3 Natural period
by eigenvalue analysis

次数	固有周期 (sec)
1次	1.477
2次	0.577
3次	0.291
4次	0.194
5次	0.153

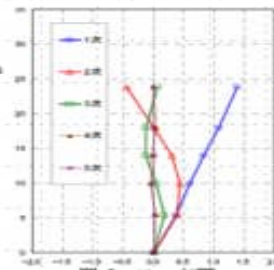


図-6 モード図
Fig.6 Mode figure

図36 五重塔の振動モード (5質点系)

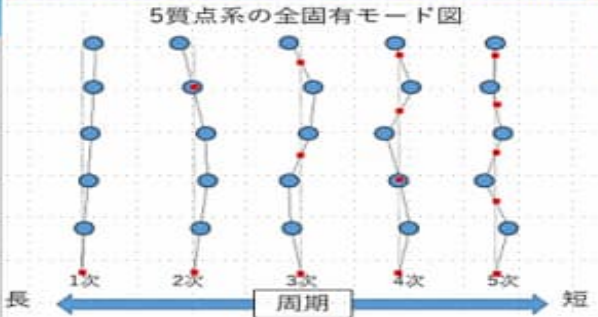


図37: 地震時の変形モード図

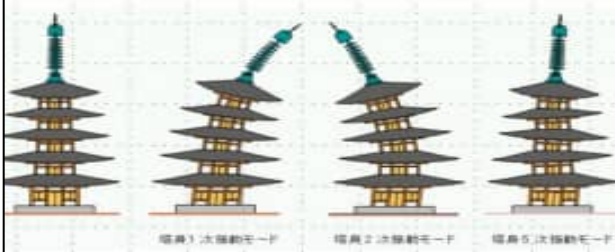


図38 心柱の地震効果は？

①心柱の制震・制震効果は不十分 (1次モード)

五重塔心柱の質量制震は微小・底部すべり免振は不完全 (1. 心柱は吊下げでない。2. 心柱の底部はロープでない)

※ハルカス・スカイタワーは質量制震「マスダンパー」を採用

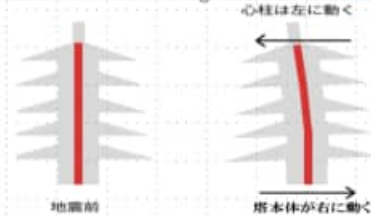


図39: 心柱に塔体浮上り防止効果有り(3.4次モード)



図40: 五重塔柔構造骨組み (応答低減)

①地震エネルギー吸収 (柔構造・長周期化)

(大屋根) 回転慣性による免振 (柱) ロッキング 長周期化で剪断力の低下 (軒組物) 鉛直変形でエネルギー吸収 (間柱) 剪断変形エネルギー吸収

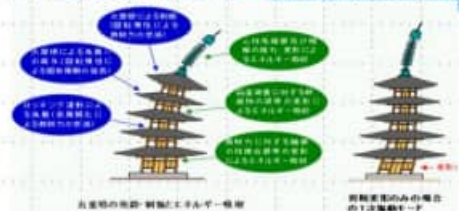


図41 五重塔地震時の変形特性

1. 曲げ変形: 軸部 (変形小) 屋根組 (角変位有り)
2. 剪断変形: 軸部 (平行四辺形変位) 屋根組 (変形小)



(図42) 五重塔耐震まとめ (五重塔は柔構造)



図40: 五重塔柔構造骨組み (応答低減)

①地震エネルギー吸収 (柔構造・長周期化)

(大屋根) 回転慣性による免振 (柱) ロッキング 長周期化で剪断力の低下
(軒組物) 鉛直変形でエネルギー吸収 (間柱) 剪断変形エネルギー吸収

