

多层房屋自振周期的比较

COMPARISON OF NATURAL PERIODS FOR MULTI-STORY BUILDINGS

黄培正 曹玉彪

建筑物的抗震验算，一般是按照规范公式作静力学分析，或采用动力学分析法。房屋自振周期是动力学特性的一个主要因素。这个因素不仅控制着结构的抗震反应性能，而且影响到房屋结构的造价。

按照规范的验算方法，用一般的近似公式求得基本自振周期后，即可确定地震的基底剪切力和剪切力分布。这种静力学的验算方法比较简单易行，但也难免疏漏。实际上计算出来的基底剪切力比真正地震时产生的基底剪切力低得多，而且差异的程度不一，视结构刚度不同和场地地基不同的反应而定。然而，根据震害观察的结果，按照规范设计出来的房屋一般均具有相当程度的抗震能力。

动力学分析验算法比较复杂，但也比较科学。若数学模型的假设和场地的动力学特性测定均比较接近实际，则所得自振周期也会比较准确。不过数学模型的假设还是带有主观成分的。此外，根据弹性理论计算出来的层间剪切力和所得的构件内力和变形都很大，超过了合理设计的经济范围，所以需要利用延性系数 (ductility factor) 进一步作主观的调整。尽管如此，动力学分析法的应用确有其一定的价值，尤其对于规范范围以外的建筑物，无可否认是一种十分有效的方法。

抗震强度验算法至今还没有发展到一般科学的严谨阶段，它仍然是一种因人而异的“艺术”。如果一幢房屋由几位工程师设计，就会出现不同的结果。在这种情况下，对一些已建成的房屋比较其固有周期和所用钢材的数量是有参考价值的。这些数据如表 I 所示。表中列出两种周期，一种是设计计算而得，另一种是在房屋建成后用仪器测出。后者是建筑物在微振状态下的周期，一般比计算出来的略小，因为计算时没有

考虑到非结构构件所产生影响的因素。测试房屋的工作实际上相当费力和费时，美国有些地方已成立正式组织着手进行此工作。但目前已经过测试并已将其数据进行过整理的房屋仍很少。

对动力学分析的程序，一般规范都没有明文规定。例如，在美国一般所用的1979年统一建筑规范 (Uniform Building Code, 简称 UBC) 中，也仅提出简略的规定。如第2312 (i) 代用方法的条文中，仅提及可用动力学分析的方法来确定水平方向的地震负荷及其分布；在应用这种分析方法时，必须考虑结构的动力学特性，如此而已。在只有概念而没有细节规定的情况下，工程师就只能依靠自己的经验和判断了。

美国加州是常发生大地震的地区，而学校和医院都属于重要的建筑物，所以对抗震的要求比普通房屋严格。目的是要保护儿童、青年和病者、以及在地震发生后保证医院设备的完整。因此加州政府专为学校和医院的建筑订立了两种规范。该规范部分地引用 UBC 中可资遵循者，另一部分作了修改和补充，制订了设计和施工标准较严格的规范。有关学校建筑的条文列为 Title 21，有关医院的列为 Title 22。

加州政府现行的和经草拟后即将公布的规范中，对动力学分析验算方法有以下几项重要规定：

(1) 必须考虑下列两种不同强度的地震：第一种是“最大可能的地震” (maximum probable earthquake)。即建筑物在一百年内可能遭遇到的最强烈地震。在这样强震作用下，设计出来的房屋主要结构不能有严重的损坏；第二种地震是“最大可信的地震” (maximum credible earthquake)，即任何时期内相信在该场地上会发生的最强烈地震。为了抗御这种最大可信的地震房屋结构应该有足够的延性，在该种

黄培正 美洲华侨工程科技学会会员，结构工程师。

曹玉彪 结构工程师。

地震的作用下要保证结构不致倒塌。

在美国,一般假定房屋的可用寿命不超过百年。实际经济寿命比此更短。在假设百年最大地震时,应以其可能发生的百分率计算。同一地质断层上,最大可信地震的计算期限和地震强度比最大可能地震大,但房屋常常建在不止一个断层的附近,而与各断层的距离又不相同,所以要分别考虑每一个断层对该房屋的影响后,方可决定用哪种地震强度计算为宜。

(2) 规定了两种动力学分析方法。一种是按照时程 (time-histories); 另一种是按照响应谱 (response spectra)。如果采用加速响应震谱,则在将算出的载荷用以计算构件内力时,可先用适当的延性系数予以折减。

在这条规定中,主要的问题是怎样选用所谓适当的延性系数。柱子与梁的延性系数是不相同的,弯矩和剪切力的延性系数也有差别。有些工程师用单一的延性系数来修正响应谱上的曲线,然后取降低了的加速度值 (acceleration value) 进行设计,结果构件的安全系数参差不齐,既不符合经济的要求,也不一定能保证抗震安全。

(3) 规定应考虑所有超过0.05秒周期的振动模式 (mode of vibration)。

此周期0.05秒的下限是从分析高层结构的经验中得来的。但对一些中低层房屋结构是否需作如此考虑,尚不敢肯定,因为对中低层房屋,现在还很少应用动力学方法进行分析。

(4) 规定由动力学分析计算出来的基底剪切力不能小于按照规范准静态分析法 (code static force analysis) 公式计算结果的80%。

准静态分析法公式是一种综合的经验公式,可以保证一定的合理范围,故所得结果不致脱离实际太远。动力学分析法中利用计算机计算出来的结果,常常会出现一种不正常的现象。这种现象当然与输入的数学模型的精确度有关。此外,响应谱上的曲线并不平滑,到处是峭峰深谷,很容易将高峰调整到深谷里,结果可能会调整出一个较弱的结构。其次,这一规定隐含地说明计算的程序是先用准静态公式计算,再用动力学分析的方法检验,而并非采用动力学分析方法的计算结果直接进行构件截面设计。此外,这一条规定没有明文指出层剪切力也应符合80%的要求。

(5) 规定指出用动力学分析法验算时,在最大可能地震时构件强度应有下列安全系数:

$$1.2DL + 0.5LL + EQ$$

$$\text{或 } 0.8DL + EQ$$

EQ代表地震载荷 (earthquake load)

DL代表恒载荷 (dead load)

LL代表横向载荷 (lateral load)

(6) 规定指出在最大可信地震时,延性抗弯框架 (ductile moment frame) 的设计必须符合下列方程的要求:

$$R_x - \frac{\sum_{i=x}^n P_i \Delta_i}{H_x} \geq Q_x$$

R_x 为在 x 层造成倒塌机制 (collapse mechanism) 的剪切力;

P_i 为在 i 层的垂直载荷;

Δ_i 为从 $(i-1)$ 层到 i 层的水平位移;

H_x 为 x 层的高度;

Q_x 为 x 层在最大可信地震时产生的剪切力。

此条规定保证在最大可信地震时所产生的水平位移与承受垂直载荷时节点转动所产生的水平位移叠加在一起时,结构仍然有足够的刚度以防 $P-\Delta$ 效应导致房屋倒塌。

按照美国加利福尼亚州政府规范验算高层学校和医院的建筑物的情况并不多。大城市里的高层建筑设计者一般是各自为政的。不过设计的过程大体上需符合以上规范的要求。下面试看表 I 中第11幢房屋验算的过程。

这幢地面上44层的房屋 (彩图) 基本上按照1965年 UBC 的规范先作了静力学的分析,不过将顶层的剪切力分配由规定的10%增至15%。基底剪切力计算所得值约等于建筑物总重的2%。在计算倾覆弯矩时,并未按照规范进行折减。此外,在计算建筑物的扭转反应时,在实际计算的偏心距上又加上了房屋相应边长5%的扭转值。风载荷按照规范的规定计算,在底层是17.5 (psf),顶层是40 (psf)。

按照规范的准静态公式计算设计出来的结构是初步作为动力学分析所用的模型。经过动力学分析验算后,发现这幢建筑物结构的刚度太差。主要的原因是在估算结构刚度时,没有考虑混凝土楼板隔墙和梁柱节点所增加的刚度。所以第一振动模式的周期大至7.84秒。即使是第六振动模式,周期仍有0.83秒之多。后来将一些构件的截面增大,并经过调整重新估算结构刚度后,结构的地震响应大为改善。

最后,由动力学分析计算所得的地震剪切力比按规范计算出来的剪切力大了好几倍。由此所得的构件内力当然很大,远远超过了材料的屈服极限而出现脆性链。因此,对各类构件都需要考虑其延性系数。由动力学分析验算所得的梁的最高延性系数要求为6.9,柱为2.3;最后分析验算梁的延性系数要求减至4.9,柱则减至1.1。

表 I 的数据中,有一些取自作者所设计的房屋,有一些取自同行所设计的房屋。这些房屋有些已经建成十几年,其中一些数据已不易获取,不得已只好任其空着。表中所列房屋一般属于延性钢框架结构;层数是包括地面上和地面下的总和。一般地面上第一层的高度比其他各层大。框架外墙一般是金属或混凝土预制挂板,镶上玻璃窗;金属挂板重量较轻。这里介绍几幢建筑物的主要特点并简单说明如下:

表 1

房号	层数	尺寸(英尺、英寸)			层高(英尺、英寸)		基底剪力系数(设计)		周期(秒)(设计)			周期(秒)(实测)			对称与否	骨架	砌墙	设计规范	建设地点	附注	
		宽	长	高	地面	其他	纵向	横向	纵向	横向	扭转	纵向	横向	扭转							
1	15	86'-4"	230'-2"	193'-6"	13'-4"	13'-4"	.035	.035				1.31	1.50		对称	金属		旧金山	旧金山	规范最小值为0.035	
2	21	150'-0"	400'-0"	283'-5"	18'-0"	13'-9"	.035	.035							对称	金属	26	UBC	旧金山	框架与剪力墙	
3	11	61'-0"	160'-0"	561'-0"	20'-0"	12'-6"	.026	.026	5.11	5.11		3.9	3.85		L形	金属	33	UBC	旧金山	旧金山规范最小值为0.026	
4	12	78'-0"	118'-0"	515'-0"	12'-5"	12'-1"	.030	.030	4.97	4.85		3.9	3.5		对称	金属	27		洛杉矶		
5	32	88'-11"	123'-5"	338'-0"	10'-2"	10'-2"	.030	.030	3.89	1.53		3.4	1.9		对称	金属	17		洛杉矶	公寓, 钢管结构	
6	19	58'-0"	121'-0"	229'-10"	23'-8"	11'-4"	.060	0.60							对称	混凝土		新西兰	新西兰	规范最小值为0.06	
7	25	55'-0"	125'-0"	300'-0"	15'-0"	12'-9"	.040								对称						
8	53			700'-0"		13'-3"	.020	.020	6.8	7.17					对称	大理石			旧金山		
9	43								3.66	3.66					对称				南美洲		
10	19			315'-0"	17'-6"	17'-6"	.027	.027	3.69	4.19					对称	金属	31		旧金山	各为重型设备	
11	51	170'-0"	220'-0"	593'-0"			.020	.020	6.17	5.66	6.93				不对称	混凝土		UBC	旧金山		
12	49	122'-3"	180'-0"	561'-0"	11'-10"	12'-0"	.021	0.26	5.41	5.09	5.13				大体对称	混凝土		1976 UBC	旧金山	纯框架与偏心支撑框架	
13	20	251'-8"	331'-2"	201'-6"	12'-9"	10'-6"	.032	.032	3.23	1.82	2.22				不对称	混凝土			旧金山	旧金山	纵向一般支撑框架
14	33			458'	21'	13'-6"	.028	.028	5.7	5.5					对称	混凝土			旧金山	旧金山	
15	17			224'	18'-4"	12'-8"	.028	.028	3.5	3.5					对称	薄砖			旧金山	旧金山	
16	12			153'	17'	12'-3"	.047	.047	2.0	1.9					对称	玻璃纤维混凝土		UBC	加州	公寓	
17	19			242'	21'-6"	12'	.027	.027	3.1	3.1					对称	玻璃纤维混凝土			旧金山	旧金山	
18	15			206'	21'	12'-3"	.041	.041	3.1	3.1					对称	玻璃纤维混凝土		UBC	Oakland		
19	30			418'	21'	12'-6"	.033	.040	5.0	4.1					对称	混凝土			旧金山	旧金山	
20	43			811'	11'	13'-6"	.029	.056	3.1	3.1		2.9	2.9		对称	混凝土			旧金山	旧金山	动力分析数值为0.056
21	25	112'	116'	350'	25'	15'-6"	(.023)	(.023)	3.6	3.9					对称	混凝土	19		旧金山	旧金山	
22	17	140'	161'	236'	28'-0"	13'-0"	.025	.010	1.1	3.2					对称	金属	17		旧金山	旧金山	纵向支撑框架
23	16	150'	163'	208'	13'	13'	(.023)	(.023)	2.8	2.8					对称	混凝土	18		旧金山	旧金山	
24	15			186'	12'-6"	12'-6"	(.034)	(.034)	2.6	2.6					L形	混凝土	22	76 UBC	San Jose		

第1幢和第3幢房屋设计所用的基底剪力系数为0.035和0.026, 这是规范规定的最小值。

第2幢房屋采用纯框架。按照规范的规定, 基底剪力系数最小值为0.025。后来加上了剪力墙, 故将设计的基底剪力系数实际增至0.035。

第5幢房屋是一所公寓。垂直载荷比较小, 钢材用量特别少, 主要原因是采用了钢管结构。钢管结构在高层建筑的抗震用钢量方面一般比其他类型结构少。

第6幢房屋系建造在强烈的地震地区新西兰。当地规范的最低地震系数规定得特别大。

第10幢房屋是电话公司的一幢仪器设备楼。从立面看, 地面以上有18层, 但里面实际是9层, 即两层框架组成一层楼, 这是因为在地震时仪器设备位移不能太大, 所以每层楼多加一根梁, 同时又可以减小柱高, 这样就增加了框架的刚度(见彩色图)。

第12幢和第11幢是同一组高层建筑物, 外表相似, 但是建成的时间相隔十多年。第12幢的结构在横向采用了最近发明的偏心支撑体系(eccentric brace system)。偏心支撑的中心线有意设在梁和柱的中心线相交点之外的梁上。这种偏心支撑框架的延性比一般支撑框架(normal braced frame)大得多, 可与延性框架媲美, 但前者位移却比后者小得多, 这是一种相当理想的抗震结构体系。

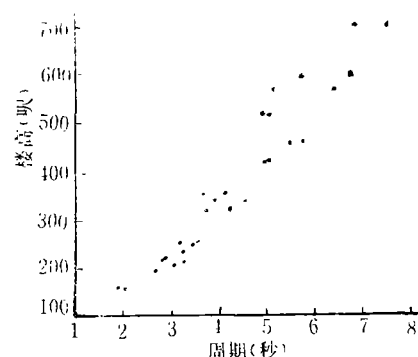
第13幢是一个旅馆。地面以上为17层, 地下为3层。里面有很大的空间, 在此空间内由地面至楼高15层都没有楼板。建筑的平面近似三角形。一边的外墙从第7层倾斜而上至屋顶; 其他两边从第2层起为一

般支撑框架的结构, 沿两边均有楼板。这两边框架的最高两层组成了一个一边倾斜、不对称的大拱形桁架。这是一个比较特别的建筑物(见彩色图)。

第20幢房屋从立面来看是一个三角形。设计所用的基底剪力系数采用动力学分析的结果, 比规范规定的数值大(见彩色图)。

第21、23、24这三幢房屋的基底剪力系数是规范规定的最小值。设计工程师研究了动力学分析数据后, 将基底剪力系数略微增加才开始设计构件。

尽管以上的房屋面积和材料不同, 设计的程序不一, 但是如果我们将设计出来的纯框架楼高与周期加以比较, 即可看出一定的关系(如图)。



图