# 4 项目结构设计分析

由于本文的建筑模型进行了隔震处理，在设计时，确定了了两种模拟方案：

方案1：将上部隔震层简化为对下层的力，具体受力图如下图所示

方案2：利用Etabs摩擦摆隔震支座对建筑模型做隔振处理。

我们分别对方案1和方案2进行讨论分析

### 4.1 方案1分析

在建模分析时，我们采用国建筑科学研究院建筑工程软件研究所研发的工程管理软件PKPM建模，由于PKPM是分层建模，所以采用PKPM建模可以大大增加建模速度，PKPM模型图如下图4-1所示。在计算分析时我们使用PKPM中的SATWE模块，SATWE是专门为高层结构分析与设计而开发出来的基于壳元理论的三维组合结构有限元分析软件。未来保证分析的正确性，我们在SATWE计算完成以后，继续采用由美国CSI公司开发研制的房屋建筑[结构分析](https://baike.baidu.com/item/%E7%BB%93%E6%9E%84%E5%88%86%E6%9E%90" \t "https://baike.baidu.com/item/_blank)与设计软件ETABS,再次进行模型的有限元分析，ETABS已经有30余年的发展历史，也是国内外认可度较高的结构计算程序，在工程有限元分析领域，应用特别广泛。ETABS模型如下图4-2所示。

##### 4.2.1 无桁架建筑模型模拟结果：

为了确定两种软件模型的一致性，我们需要对两种模型做对比，我们主要通过对比两种软件的质量，周期，层间剪力，主要通过振型分解反应谱法的结果对比。为了确保准确性，我们要求，两种软件模拟结果在模型周期和质量上的误差在5%之内，层间剪力和位移误差在10%之内。

误差计算表达式为：

 (1)

上式中， ETABS：ETABS软件计算出的结果

SATWE：SATWE软件计算出的结果

d:表示误差值

两种模型质量对对比结果：

表4-0 结构质量计算结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| SATWE | | ETABS | | d(%) |
| 层号 | 质量(t) | 层号 | 质量(t) |
| 5 | 4475.0 | 5 | 4446.1 | 0.64 |
| 4 | 4920.4 | 4 | 4649.9 | 5.49 |
| 3 | 4227.0 | 3 | 4194.3 | 0.77 |
| 2 | 5451.4 | 2 | 5213.0 | 4.37 |
| 1 | 27549.7 | 1 | 28290.6 | 2.68 |
| 总质量 | 46623.543 | 总质量 | 46792.020 | 0.3 |

两种模型的数值模拟之后，其周期的对比：

表4-3 结构周期和振型计算结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| SATWE | | | | ETABS | | | |
| 振型号 | 周期(s) | 振型号 | 周期(s) | 振型号 | 周期(s) | 振型号 | 周期(s) |
| 1 | 0.4143 | 12 | 0.1209 | 1 | 0.383 | 12 | 0.13 |
| 2 | 0.3781 | 13 | 0.1199 | 2 | 0.344 | 13 | 0.127 |
| 3 | 0.3529 | 14 | 0.1160 | 3 | 0.319 | 14 | 0.124 |
| 4 | 0.2483 | 15 | 0.1128 | 4 | 0.253 | 15 | 0.121 |
| 5 | 0.2053 | 16 | 0.1104 | 5 | 0.226 | 16 | 0.117 |
| 6 | 0.1648 | 17 | 0.1082 | 6 | 0.179 | 17 | 0.115 |
| 7 | 0.1545 | 18 | 0.1061 | 7 | 0.163 | 18 | 0.109 |
| 8 | 0.1435 | 19 | 0.1003 | 8 | 0.159 | 19 | 0.106 |
| 9 | 0.1357 | 20 | 0.0985 | 9 | 0.14 | 20 | 0.103 |
| 10 | 0.1276 | 21 | 0.0972 | 10 | 0.137 | 21 | 0.101 |
| 11 | 0.1243 |  |  | 11 | 0.132 |  |  |

根据《高规》5.1.13条,各振型的参与质量之和不应小于总质量的90%。

SATWE中：

第 1 地震方向 EX 的有效质量系数为 94.46%,参与振型足够

第 2 地震方向 EY 的有效质量系数为 91.10%,参与振型足够

ETABS中：

第 1 地震方向 EX 的有效质量系数为 97.37%,参与振型足够

第 2 地震方向 EY 的有效质量系数为 98.72%,参与振型足够

表4-2 结构前三振型周期计算结果对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| SATWE | | ETABS | | d(%) |
| 振型号 | 周期 | 振型号 | 周期 |
| 1 | 0.4143 | 1 | 0.383 | 7.5 |
| 2 | 0.3781 | 2 | 0.343 | 9.2 |
| 3 | 0.3529 | 3 | 0.318 | 9.8 |

两种模型在数值模拟计算以后，其剪力的对比，具体见下表：

表4-3 Ex工况下作用下结构各层的剪重比

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 层号 | SATWE | | ETABS | | d(%) |
| 剪力 | 剪重比 | 剪力 | 剪重比 |
| 5 | 5635.1 | 10.77% | 4767.0 | 10.67% | 0.92 |
| 4 | 8856.0 | 9.43% | 8122.5 | 8.78% | 6.89 |
| 3 | 11398.5 | 8.37% | 10499.0 | 7.86% | 6.09 |
| 2 | 13640.2 | 7.15% | 12339.3 | 6.60% | 7.69 |
| 1 | 17909.6 | 3.84% | 15634.8 | 3.41% | 11.19 |

表4-3 Ey工况下作用下结构各层的剪重比

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 层号 | SATWE | | ETABS | | d(%) |
| 剪力 | 剪重比 | 剪力 | 剪重比 |
| 5 | 5719.4 | 11.84% | 5200.5 | 11.63% | 1.77 |
| 4 | 10090.8 | 10.74% | 9042.6 | 9.77% | 9.03 |
| 3 | 12946.4 | 9.50% | 11612.1 | 8.69% | 8.52 |
| 2 | 15294.0 | 8.02% | 13549.3 | 7.25% | 9.60 |
| 1 | 22263.8 | 4.78% | 18440.9 | 4.02% | 15.89 |

根据《抗规》5.2.5条规定，7度(0.10g)设防地区，水平地震影响系数最大值为0.08，X、Y向楼层剪重比不应小于1.60%。

由下表可见， X、Y向地震剪重比符合要求

上表中，第5层由于在SATWE的计算结果中用4个塔楼表示，所以在取该层的剪重比的时候，我们取该层中剪重比最小的一个塔楼的剪重比作为该层的剪重比。而在ETABS中，剪重比计算结果是第5层整层的剪重比，并没有细分为4个塔楼，所以，在第5层的剪重比误差计算可能与其他层的误差值有些差距。

剪重比最大误差：

两种模型在数值模拟以后其位移变化的对比：

表4-4 X向地震工况的位移

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 层号 | SATWE | | ETABS | |
| 最大位移 | 最大层间位移角 | 最大位移 | 最大层间位移角 |
| 5 | 5.86 | 1/2240 | 3.96 | 1/2523 |
| 4 | 4.63 | 1/3280 | 2.82 | 1/3514 |
| 3 | 3.52 | 1/3154 | 2.82 | 1/3551 |
| 2 | 2.33 | 1/3328 | 2.76 | 1/3617 |
| 1 | 0.47 | 1/9895 | 0.083 | 1/12026 |

表4-6 Y向地震工况的位移

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 层号 | SATWE | | ETABS | |
| 最大位移 | 最大层间位移角 | 最大位移 | 最大层间位移角 |
| 5 | 5.68 | 1/2371 | 4.05 | 1/2471 |
| 4 | 4.46 | 1/2818 | 3.1 | 1/3226 |
| 3 | 3.07 | 1/3279 | 2.73 | 1/3657 |
| 2 | 1.93 | 1/4454 | 2.0 | 1/5003 |
| 1 | 0.61 | 1/7582 | 1.08 | 1/9292 |

根据《高规》3.7.3条规定：对于高度不大于150m的框剪结构，按弹性方法计算的风荷载或多遇地震标准值作用下的楼层层间最大水平位移与层高之比△u／h不宜大于1/800，对于高度不小于250m的高层建筑，其楼层层间最大位移与层高之比△u／h不宜大于1/500，结构设定的限值为1/800，结构所有工况下最大层间位移角均满足规范要求。

由下上面表可知， X,Y向地震位移符合基本要求

4.2.2 小结：

小结：经过SATWE和ETABS的计算模拟，我们对两种软件的模拟结果进行对比分析。有如下发现：

1. SATWE和ETABS的模拟，都满足《抗规》关于第一水准‘小震不坏’的设计要求。
2. SATWE和ETABS模拟结果误差不大，说明两种软件建立的模型差别基本一致，两种软件都可以作为建模结构数值分析软件。

### 4.2 方案2 分析

由于SATWE中无法模拟滑动平板支座。所以我们用ETABS模拟带桁架的模型，滑动平板支座我们用Etabs中的摩擦摆隔震支座模拟。

##### 4.2.1 Etabs中的隔震支座的选择

CSI软件常见的隔震器有，橡胶隔震支座和摩擦摆隔震支座。

在ETABS中橡胶隔震支座模拟器包括：1.普通天然橡胶隔震器，2.铅芯橡胶隔震模拟器。橡胶支座具有完善且成熟的设立理论和实践。其生产工艺技术稳定，橡胶支座的应用，随着国家对抗震减灾措施的落实以及科学技术的发展，得到了大规模的广泛应用。因此橡胶隔震支座的应用也是最成熟最广泛的。

在ETABS中的摩擦摆隔震支座，具有竖向承载力高，水平容许位移大，周期可控，耐久性好等优点。在工程中应用中，摩擦摆隔震支座的关注度也越来越高，应用也越来越广泛。摩擦摆隔震支座的种类也随着研究的深入和技术的成熟越来越多。在ETABS程序中，为我们提供了3中常摩擦摆隔震支座模拟器，分别为：1 摩擦摆隔震支座(Friction Isolator)，双作用摩擦摆隔震支座(T/C Friction Isolator)，三重摩擦摆隔震支座(Triple Friction Isolator )

由于本建筑模型最上层是滑动层，位移较大。故我们选用ETABS中的摩擦摆隔震支座中的Friction Isolator。我们以产品型号为FPS-SX8000的摩擦摆隔震支座为例进行说明，支座产品参数如下表：

表4-6 摩擦摆隔震支座产品规格

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 支座型号 | | FPS-SX8000 |
| 摩擦曲率半径 | | 4.5 |
| 静摩擦系数 | | 0.03 |
| 动摩擦系数 | 慢速 | 0.085 |
| 快速 | 0.06 |
| 支座滑动位移/mm | | 200 |
| 竖向等效刚度kN/m | | 1E007 |
| 水平等效刚度kN/m | | 2977.78 |
| 等效阻 尼比kN s/m | | 0.26 |
| 滑动前刚度 kN/m | | 1200 |
| 摩擦系数变化参数 s/m | | 20 |

在本例中，我们采用Friction Isolator 连接单元模拟双向摩擦支座，具体参数输入，勾选U1,U2,U3如下 图4-1所示，然后对三个方向的属性分别进行定义。

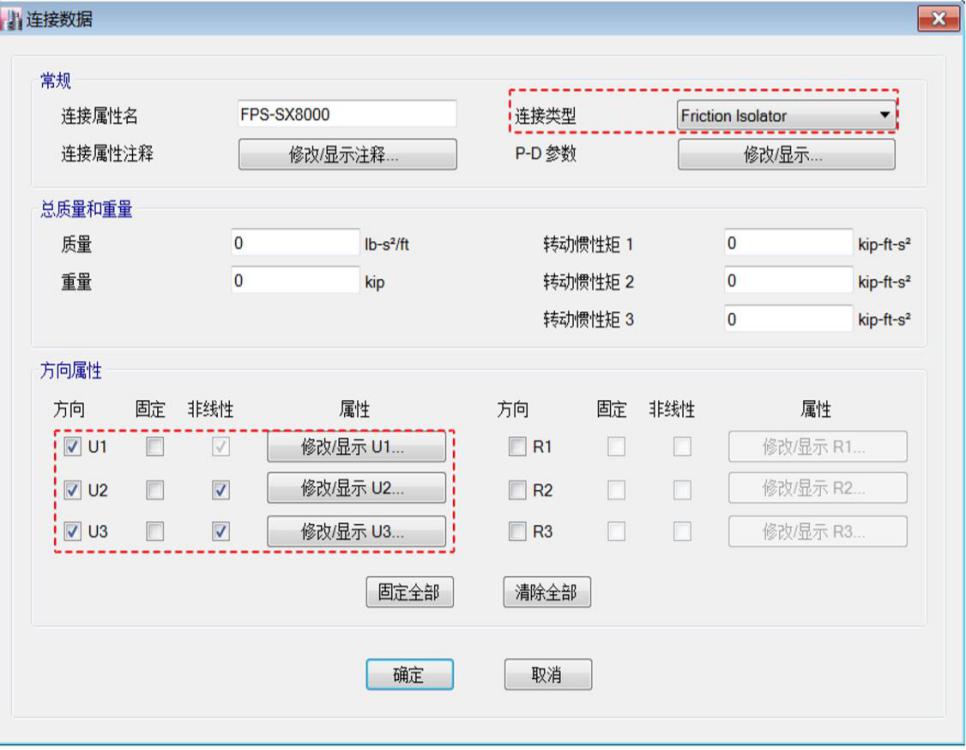


图4-1 摩擦摆隔震支座参数设置



图4-2 摩擦摆隔震支座U1方向参数设置

U1方向支座为轴向，，Friction Isolator 模拟器单元U1方向默认为非线性属性，具体如图4-2所示，当支座不承受任何轴向拉力时，即输入受拉时轴向刚度为0，而在本例中，线性属性有效刚度和非线性属性有效刚度均输入1e7

阻尼系数的作用是减轻分析中可能存在的数值振荡问题，在本例中我们设置阻尼系数为0，关于该系数取值的详情，可以参考《软件校验手册》。

U2和U3方向为支座的水平方向，其参数输入具体如下图4-3所示。由于本文的建模模型，最上层为滑动层，双向滑动。故U2方向的属性和U3方向的属性相同，参数输入也一致。

其中，线性分析中的有效刚度输入支座水平等效刚度，该值用于线性分析包括模态分析。

有效阻尼输入隔振器的有效阻尼值，该值主要体现线性分析中隔震器的能量耗散能力，和隔震器的剪切刚度相关，直接表现为线性分析中隔震器的隔震效果。这里需要注意：有效阻尼和隔振器的等效阻尼不一样，不能将两者混为一谈。由于隔震器一般采用非线性时程分析，此数值在非线性分析中不发挥作用，通常设置为0。

剪切变形位置：此处输入的数值为距离J端的绝对距离。J端指连接单元轴向，末端位置。一般输入0.

非线性工况分析时使用的属性，主要包含以下内容：

刚度：摩擦摆支座屈服前的刚度，本例中输入1200KN/m。

摩擦系数-慢和摩擦系数-快按照建筑模型使用的支座型号输入。

速率参数：该值用于描述摩擦系数随滑移速度变化的函数关系。速率参数的取值与支座承受压力及接触面条件等因素相关。

净摆半径：该值为实际的有效半径，即滑动面半径减去面到铰点距离。本例中，型号为FPS-SX8000 摩擦摆支座面为球面，故U2,U3方向半径是相等的;如果滑动面为柱，设置其中的一个方向摆半径为0。半径为0代表滑动面为平面，可用于模拟缝-摩擦行为，例如本文中的滑动平板支座。



图4-5 摩擦摆支座U2,U3方向参数设置

##### 4.2.2 带桁架建筑模型模拟结果

##### 对于带桁架的模型，其中的滑动平板支座。我们使用ETABS中的摩擦摆隔震支座模拟，由于是滑动平板支座，故Friction Isolator模拟器的参数具体设置见图4-5，图4-6，图4-7。

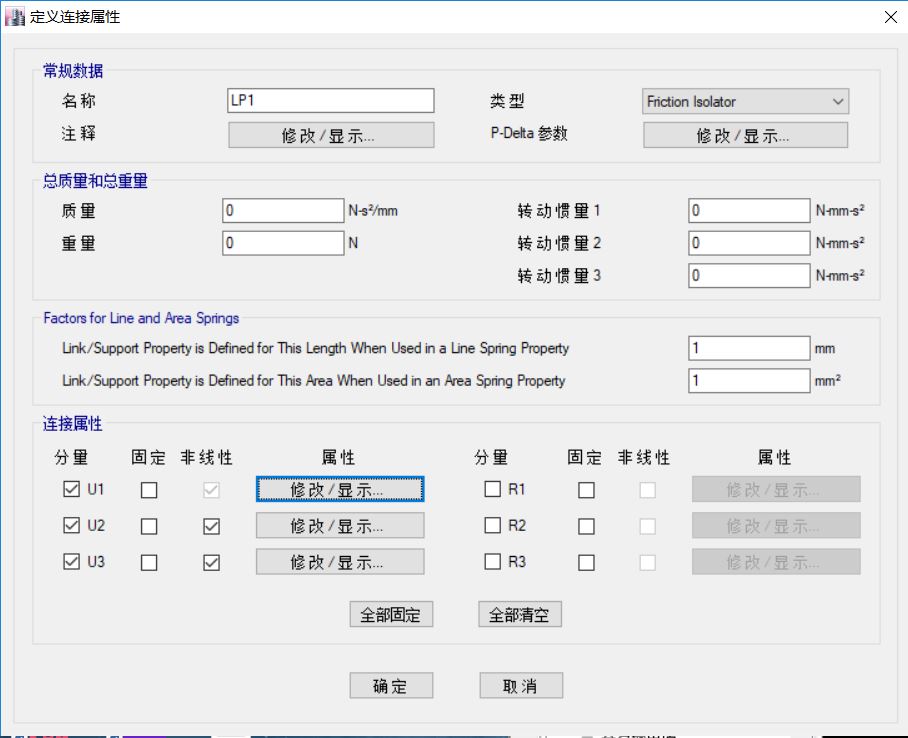


图4-5本案例中滑动平板支座模拟参数设置

其中有效刚度可以近似的等于滑动平板的刚度，摩擦系数按照滑动平板支座的真实摩擦系数取值，在水平面即U2、U3方向，由于滑动平板支座支撑面水平，故我们将净摆半径设置为0，速率参数我们取0.03，具体取值流程参见参考《软件校验手册》。



图4-6 滑动平板支座模拟U1方向参数



图4-7滑动平板支座的模拟U2,U3方向参数

由于在4.1节中，我们已经验证了ETABS和SATWE两种软件的正确性。为了方便对比方案1与方案2的模拟结果，我们用ETABS无桁架模型的模拟结果和ETABS带桁架模型的模拟结果进行对比。

对比误差计算表达式，我们用下式表示：

误差计算表达式为：

 (1)

上式中， ETABS\_W：ETABS\_W带桁架模型计算出的结果

ETABS\_Q：ETABS\_Q不带桁架模型计算出的结果

d:表示误差值

1. 带桁架模型模拟计算结果的周期：

计算结果表明，在ETABS带桁架的模拟结果中，各个方向的振型质量参与系数均大于90%，符合规范的要求，对于第一周期，带桁架模型的模拟结果和不带桁架模型模拟结果均小于《高规》规定的0.85，可以认为是符合要求，但是两种模型模拟结果的误差为100%

表：

前三阶振型图：

1. 带桁架模型模拟计算结果的剪力以及剪重比

计算结果表明，带桁架模型模拟结果的剪重比和不带桁架模型模拟结果的剪重比均满足《抗规》5.2.5条规定，7度(0.10g)设防地区，水平地震影响系数最大值为0.08，X、Y向楼层剪重比不应小于1.60%。的要求。但是就模拟结果而言，与理论推导的结果基本一致，在ETABS中用摩擦摆隔震支座模拟的结果更优，具有更优的抗震能力。

1. 位移

根据《高规》3.7.3条规定：对于高度不大于150m的框剪结构，按弹性方法计算的风荷载或多遇地震标准值作用下的楼层层间最大水平位移与层高之比△u／h不宜大于1/800，对于高度不小于250m的高层建筑，其楼层层间最大位移与层高之比△u／h不宜大于1/500，结构设定的限值为1/800。对模拟结果总结以后，可以发现，两种模型的模拟结果都满足规范的要求。

4.2节小结：

在本节内容中，我们主要讨论两种设计方案对比，经过对不同方案下模型的模拟，我们可以总结以下几点

1. 就设计方案而言，方案一和方案的结果均能满足规范的基本要求，保证结构第一水准“小震不倒”的设计要求。
2. 同过对方案1和方案2的对比，我们发现方案2，将滑动平板支座用ETABS中的摩擦摆隔震支座模拟，得到的模拟结果更加符合理论值。也就是说，将上部滑动层简化为恒定荷载的设计方案1，是存在设计缺陷的，在以后的工程实践中，不建议使用。

### 4.3 带桁架结构的弹性是时程分析

由于前面对结构进行了小震下的数值模拟，因此在此节，我们只做结构在中震（设防烈度）下的时程分析。

在不同地区，通过对大量的地震加速度谱统计回归，总结而得反应谱。反应谱地震计算，可以在统计意义上确保建筑物的真实抗震效果。对于结构规则，较底高度的建筑，反应谱法可以满足抗震设防要求。但是对于本文中的超限结构，不规则建筑物，使用振型分解反应谱法的结果并不保守，因为无法考虑高阶振型对建筑物的影响。因此，我们必须对不规则建筑物或超限建筑做补充计算，补充计算我们一般使用弹性时程分析法。而且高规[26]第 4.3.4 条文中第 3 条规定的建筑，则应该对结构进行多遇地震作用下的弹性时程补充计算。

由于本文的案例属于超限建筑，有薄弱层，因此，我们必须做弹性时程分析补充计算，以确保结构的抗震性能。

### 4.3.1 时程分析地震波的选取

根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）第 5.1.2 条的规定，采用时程分析法时， 应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线，其中实 际强震记录的数量不应少于总数的 2/3。 对于本结构的弹性时程分析，依据规范要求，在波形的数量上，采用2条天然波和1条人工拟合波。

并且选择的时程曲线应该和振型分解反应谱法使用的地震影响系数曲线在统计意义上相符，即：每条时程曲线计算所得的结构底部剪力均超过振型分解反应谱法计算结果的 65%，3 条时程曲线计算所得的结构底部剪力平均值大于振型分解反应谱法计算结果的 80%。

依据高规4.3.5，由于本工程建设在烈度为7度的地区，设计基本加速度取0.10g，峰值加速度为35(gal)；在地震波有效时长，依据高贵，地震波的有效持续时间不宜小于建筑结构基本自振周期的5倍和15s。针对本工程，结构的基本自振周期为7s左右，有效持持续时间不宜小于35s。关于地震波的频谱特性，依据规范，在结构主要振型所对应的周期上，波普转换后与规范反应谱正负相差不大于20%。

本文从太平洋地震工程研究中心地震数据库中选取三条地震波如下表所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 名称 | 时间 | 发生地点(采集台站) |
| IMPERIAL VALLEY | 5/19/1940 | EL CENTRO ARRAY #9, 270 (USGS STATION 117) |
| SAN FERNANDO | 02/09/1971 | SANTA FELICIA DAM, 172 (CDMG STATION 285) |
| COALINGA | 05/02/1983 | PARKFIELD - FAULT ZONE 12, 090 (CDMG STATION 36138) |

三条地震波的主方向波形图分别如下图4-8，图 4-9，图4-9所示

##### 4.3.2 设防地震弹性时程分析结果

##### 地震波验算。依据规范，每条时程曲线所模拟的结构基底剪力均应超过反应谱法计算结果的64%，3条时程曲线模拟所得的结构基地剪力平均值大于振型分解反应谱法计算结果的80%。从计算模拟的结果中提取不同时程函数模拟所得的结果，具体如下表所示：

表4-8 地震波验算结果

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 工况 | X向 | | Y向 | |
| 基地剪力 |  | 基地剪力 |  |
| 反应谱 | 14133 |  | 15269 |  |
|  | 13684 |  | 13290 |  |
|  | 11260 |  | 12254 |  |
|  | 15129 |  | 14351 |  |
|  |  |  |  |  |

从上表设防地震时程分析所得的结果中可知，时程分析所得的基底剪力均大于反应谱分析所得基底剪力的65%，且小于反应谱分析所得基底剪力的135%。三条时程曲线分析所得的平均基底剪力大于反应谱分析所得基底剪力的80%，小于反应谱剪力分析所得基底剪力的120%，因此我们所选的三条时程函数完全符合要求。

如下表4-10所示，列出了，不同时程函数下不同楼层的剪力

表4-10 时程分析所得楼层剪力

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 楼层 | 波1 | | 波2 | | 波3 | |
| Fx | Fy | Fx | Fy | Fx | Fy |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

其中，在U1方向，最大剪力为： KN，最大弯矩为： KN-mm；在U2方向最大剪力为： KN，最大弯矩为： KN-mm。

设防烈度下时辰分析位移结果：

弹性时程分析的位移如下图所示，由图我们可知层间最大位移角为 1/780，其结果满足规范要求的1/500的限值。

4.3小结：

在本节中我们通过对ETABS有桁架且有平板滑动支撑的模型做了设防地震下的时程分析。可以总结得出以下结论：

1. 在本小节，我们挑选了两条天然波和一条人工波对方案2的设计模型做了时程分析，得到分析结果符合抗震设防水准1的基本要求。
2. 在\*\*波下，楼层位移角最小。

##### 4.4 本章小结

在本章，我们主要做了以下工作：

1. 对方案1（不带桁架）的建筑模型，使用SATWE和ETABS进行了对比分析，得出SATWE和ETABS计算模拟所得的结果误差在合理范围之内，我们近似的可以认为两种数值分析软件对建筑模型的模拟基本一致。
2. 我们对方案2（带桁架）的建筑模型，使用ETABS中的摩擦摆隔震模拟器模拟平板滑动支座对模型进行了数值模拟，所得结果和方案1结果基本一致，但是方案2更加符合理论期望结果，方案2更加符合工程实际的情况。
3. 我们对方案2的设计，进行了弹性时程分析，所得结果符合规范要求，满足抗震设防水准1的要求。