

某超长隔震结构建造过程非载荷变形模拟与监测

杜永峰^{1,2} 杜英满² 陈 斌³ (1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 防震减灾研究所,甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省城乡规划设计研究院,甘肃 兰州 730000)

[提 要] 针对超长复杂隔震结构在建造过程中出现的非载荷变形问题,考虑混凝土收缩应变和当量温差,对该类结构在建造过程中的温度效应进行有限元模拟,并对结构建造过程中由于温度变化和混凝土收缩导致橡胶隔震支座非载荷变形进行现场监测。通过数据对比分析,表明有限元模拟和现场监测结果基本吻合。结合某平面不规则超长隔震实际工程,总结了隔震支座变形和结构内力变化规律,探讨该结构在最不利温差工况下的隔震支座变形、底板的变形和内力,可以为超长隔震结构的设计和施工提供参考。

[关键词] 平面不规则结构; 隔震结构; 非载荷变形; 变形监测; 温度效应

[中图分类号] TU312+.1 [文献标识码] A

Non-load Deformation Simulation and Monitoring of A Super-long Isolated Structure in the Construction Process

Du Yong-feng^{1,2}, Du Ying-man², Chen Bin³ (1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, China; 3. Gansu Institute of Urban Planning and Design, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to the non-load deformation of the super-long complex isolated structure in the construction process, temperature effect of this kind of structure in the construction process is simulated by the finite element method, which takes into account of concrete shrinkage age curve and equivalent temperature differentials and the on-site monitoring of the rubber bearings non-load deformation due to temperature variations and concrete shrinkage in the construction process is implemented. The comparison of the data analysis shows that the results of the FEA simulation and on-site monitoring are basically consistent. Based on the engineering project of an irregular plane super-long isolated structure, the variation of the isolation bearing deformation and structural internal force is summarized, the bearing deformation displacement and deformation and internal forces of floors under the most adverse temperature difference case are discussed. It can provide a reference for the design and construction of the super-long isolated structure.

Keywords: irregular plane structure; base isolated structures; non-load deformation; deformation monitoring; temperature effect

E-mail: dym1217@163.com

1 引言

随着我国经济的迅速发展和城市建设的不断深入,在公共建筑和工业建筑中出现了较多结构形式复杂的超长隔震结构。在这类超长隔震结构中,频频出现施工阶段橡胶隔震支座发生较大侧向变形事例,成为困扰工程技术人员的一个突出问题。根据对部分超长隔震结构的长期监测^[1],初步判定这类

变形主要由混凝土收缩和温度变化引起,属于非载荷变形。变形过大不但会给用户带来不安全感,而且会影响隔震支座的稳定性,因而研究非载荷变形对超长隔震结构的影响非常重要。

王铁梦^[2]较早的建立了建筑结构的温度应力模型。傅学怡^[3]针对混凝土结构提出考虑混凝土收缩徐变时效特性并对后浇带结构的刚度随施工过程的形成过程进行模拟。王可怡等^[4]结合广东科学中心 E 区巨型钢框架结构的整个施工进度,对隔震支座的施工变形进行了监测,并对监测数据进行

[收稿日期] 2013-02-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50978130; 51178211)

处理与分析得出隔震支座服役变形与环境温度作用线性相关。文献 [5 ~ 6] 采用大型有限元分析软件 SAP2000 对超长混凝土结构隔震与非隔震下的温度应力进行分析比较。Ahmet Yakut 等^[7]研究了低温对橡胶隔震支座性能的影响。Ioannis VK 等^[8]研究了温度及其他因素影响下隔震支座的累积变形。

本文针对一平面不规则超长隔震结构在建造过程中的温度效应进行有限元模拟,结合该结构的建造进程,对由温度变化和混凝土收缩引起的建筑物纵向端部边缘和角部橡胶隔震支座变形进行现场监测,研究橡胶隔震支座变形随施工进程的变化关系以及隔震层梁的内力特点,探讨了该结构在最不利温差工况下的支座侧向变形及隔震层底板的变形和内力。

2 温差分析

混凝土结构服役期间的综合温差主要由季节温差和收缩当量温差两部分组成。

2.1 季节温差

季节温差一般取结构混凝土凝结硬化时的温度(初始温度)与使用期间温度极值的差值,由于混凝土材料的抗拉强度远小于其抗压强度,控制季节温差应取初始温度与使用期间所能达到的温度极小值的差值,即可取

$$\Delta T = T_{\max}(T_{\min}) - T_0 \quad (1)$$

式中 ΔT 为季节温差; T_0 为混凝土凝结硬化时的温度; T_{\max} 、 T_{\min} 分别为最热月与最冷月平均温度。

2.2 混凝土收缩当量温差

2.2.1 混凝土收缩分析

在 CEB-FIP(1990)^[9] 和《钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[10] 中,混凝土构件在未加载情况下的平均收缩(或膨胀)应变的计算式为:

$$\varepsilon_{cs} = (t - t_s) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_{cs}(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cs}(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cm0})] \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)}{0.035(2A_c/u)^2 + (t - t_s)} \right]^{0.5} = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (5)$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right], \quad 40\% \leq RH \leq 99\%$$

$$\beta_{RH} = 1.25, \quad RH > 99\%$$

式中 β_{sc} 取决于水泥品种:慢硬水泥取 4,普通水泥和快硬水泥取 5,快硬高强水泥取 8。 $h = 2A_c/u$, 为结构构件名义尺寸(mm) $h_0 = 100\text{mm}$; t 为计算考虑时刻的混凝土龄期(d) t_s 为混凝土开始收缩的龄期(d) $t_1 = 1\text{d}$; $t_s = 3\text{d}$; f_{cm} 为 C20 ~ C50 混凝土在 28 d 龄期时的平均立方体抗压强度(N/mm^2); $f_{cm0} = 10\text{N}/\text{mm}^2$; A_c 构件的横截面面积(mm^2); u 为与大气接触的构件截面周界长度(mm)。本工程年平均相对湿度 RH 取 60%,板: $h/h_0 = 200/100 = 2$, $h/h_0 = 150/100 = 1.5$; 梁: $h/h_0 = 300 \times 600 \times 2/1800 \times 100 = 2$; $h/h_0 = 300 \times 800 \times 2/2200 \times 100 = 2.2$; 统一取 $h/h_0 = 2$; 一般的硅酸盐类水泥 $\beta_{sc} = 5$,混凝土材料强度等级为 C30,由于在 CEB 里采用直径 $d = 150\text{mm}$,高 300mm 的圆柱体试块与我国采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体试块的差别,换算有 $f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8(\text{N}/\text{mm}^2)$,即

$$f_{cm} = 32\text{MPa}$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \left[1 - \left(\frac{60}{100} \right)^3 \right] = -1.215$$

$$\varepsilon_{cs}(f_{cm}) = [160 + 10 \times 5 \times (9 - 32/10)] \times 10^{-6} = 4.5 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cs0} = 4.5 \times 10^{-4} \times (-1.215) = 5.47 \times 10^{-4}$$

把以上数据代入式(5)得到收缩随时间变化的系数:

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - 3)/1}{350 \times 2^2 + (t - 3)/1} \right]^{0.5}$$

收缩系数随时间变化曲线如图 1 所示,可以看出混凝土收缩效应是一个长期过程,早期反应速率快,后期比较缓慢,在研究温度效应时不可忽略。

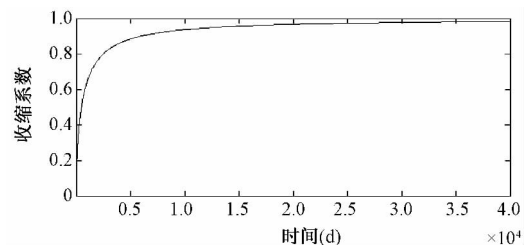


图 1 混凝土收缩应变龄期曲线 $\beta_s(t - t_s)$

Fig.1 Concrete shrinkage age curve $\beta_s(t - t_s)$

2.2.2 收缩当量温差

混凝土内部的水分蒸发可引起混凝土的体积收缩,这种收缩过程是由表及里逐步发展的。当混凝土内温度不均匀时,收缩变形也不均匀,这样就在混

凝土内部引起相当大的应力,从而导致混凝土的开裂。因此在计算混凝土的温度应力时必须考虑这个收缩因素。为了便于计算,可将收缩变形值换算成收缩当量温差,即将收缩产生的变形折算成引起混凝土相同变形所需的温度^[2]。

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n (1 - e^{-bt}) \quad (6)$$

式中 $\varepsilon_y(t)$ 为龄期 t 天时混凝土的收缩量; ε_y^0 为标准状态下混凝土的极限收缩值, $\varepsilon_y^0 = 3.24 \times 10^{-4}$; b 为经验系数一般取 0.01; 养护较差时取 0.03; $M_1, M_2 \cdots M_n$ 为考虑各种非标准条件的修正系数。

对于一般养护条件的标准状态混凝土,在计算混凝土极限收缩时,可取 $b = 0.01, \varepsilon_y^0 = 3.24 \times 10^{-4}$ 。因此标准状态下混凝土的最终收缩计算公式为:

$$\varepsilon_y(t) = 3.24 \times 10^{-4} \cdot M_1 \cdot M_2 \cdots M_n (1 - e^{-0.01t}) \quad (7)$$

收缩变形值计算的最终目的是要得到收缩应力,目前最常用的方法是将收缩应力的计算并入到温度应力的计算中,将所求得的混凝土收缩变形值除以混凝土的线膨胀系数得到等效温差 $\Delta T'$,即

$$\Delta T' = -\varepsilon_y(t) / \alpha \quad (8)$$

式中 α 为混凝土的线膨胀系数 $\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

2.3 综合温差

混凝土结构综合温差按下式计算:

$$T = \Delta T + \Delta T' \quad (9)$$

对一超长复杂隔震结构在建造全过程中的橡胶隔震支座变形进行现场跟踪监测,列出了其中的 5 次监测时当日环境平均温度,结合混凝土的收缩当量温差得到的综合温差如表 1 所示,本结构混凝土浇筑时合拢温度为 26°C 。

表 1 温度数据 ($^\circ\text{C}$)

Table 1 Temperature data ($^\circ\text{C}$)

量测序号	①	②	③	④	⑤
温度编号	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
当日平均气温	15.1	6.2	4.1	1.0	18
收缩当量温差	15.2	19.23	20	25.1	31.2
综合温差	26.1	39.23	42	50.17	39.2

2.4 结构最不利温差

考虑季节温度变化对结构物的影响时,均以结构物内的平均温度为依据。一般规定以最高与最低月平均温度的变化值作为年温度变化幅度。由于很

多工程在设计阶段不能预先确定混凝土的浇筑时间以及合拢温度,因此通常取该地区历史月平均最高气温与月平均最低气温之差作为最不利温差。

3 工程背景

3.1 结构形式

某平面不规则超长隔震实际工程,上部结构为全现浇混凝土框架,楼板为梁板体系。主体 6 层,长 99m,宽 68m,分为 1 号、2 号和 3 号 3 个塔楼,塔楼之间设置变形缝,隔震层采用大底板。采用 SAP2000 建立的有限元模型如图 2 所示。

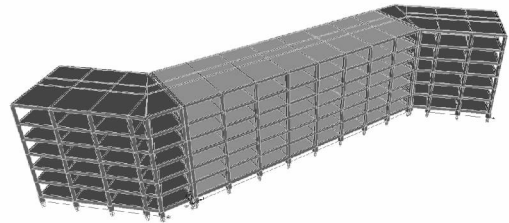


图 2 SAP2000 模型

Fig.2 SAP2000 model

3.2 工程参数

该结构梁、柱采用三维框架单元,楼板采用壳单元。上部结构柱截面 $700\text{mm} \times 700\text{mm}$,梁截面 $300\text{mm} \times 600\text{mm}$,板厚 150mm; 隔震层柱截面 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$,梁截面 $300\text{mm} \times 800\text{mm}$,板厚 200mm。混凝土采用 C30,弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$,泊松比 $\mu = 0.2$ 。采用的橡胶隔震支座的力学性能及参数如表 2 所示。

表 2 隔震支座力学性能

Table 2 Mechanical properties of rubber isolaters

型号	水平刚度(kN/mm)		等效阻尼比	
	$\gamma = 50\%$	$\gamma = 250\%$	$\gamma = 50\%$	$\gamma = 250\%$
GZY500	2050	1140	0.2	0.15
型号	水平刚度(kN/mm)		等效阻尼比	
	$\gamma = 50\%$	$\gamma = 100\%$	$\gamma = 50\%$	$\gamma = 100\%$
GZY600	2350	1800	0.2	0.15
GZY700	3000	2380	0.2	0.15
GZY800	3500	2720	0.2	0.15
GZP800	1860	1730	0.05	0.04

3.3 建造过程变形监测

该结构隔震支座在上部结构的施工过程中由于

环境温度改变和混凝土收缩等原因发生水平变形(如图3所示)并且建筑物纵向外端部的边缘隔震支座产生变形较大。此外结构中中部塔楼内设有两部电梯,但是施工人员误将电梯井曾一度直接与地面相接,结构建造过程中电梯井处这种隔震构造错误的做法反而为减小支座最大位移做出了贡献^[1]。



图3 变形监测

Fig.3 Deformation monitoring

基于上述情况,在该工程的建造过程中对隔震支座的变形进行监测,监测仪器为XL3403B2静态应变测量系统,包括XL2101B2/B2+系列静态电阻应变仪和电脑等。对变形较大的测点1和测点3支座(如图4所示)分别安装水平X向和水平Y向的位移计,为作比较在变形较小的2#楼中部柱支座测点2也同样安装了位移计。与此同时,还在这3个部位安置了温度计(如图3所示)。

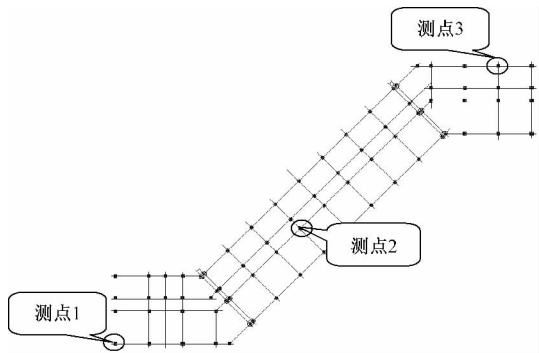


图4 较大变形测点布置图

Fig.4 The arrangement of the Large deformation measuring points

3.4 有限元模拟和监测位移对比

在超长结构中,升温时在结构中形成的内力对结构的影响部分能与结构的收缩相互抵消,因此升温对结构的影响远没有降温对结构的影响大,结构会由于降温的作用在楼板中形成较大的拉应力,所以在本文中主要考虑降温对于结构的影响。将结构建造过程中隔震支座变形监测时的环境温度结合混

凝土的收缩当量温差得到的综合温差作为负温差施加给模型,提取各个温差工况下3个测点纵向和横向的支座位移与现场监测结果进行比较。测点1和测点3的支座变形如图5和图6所示,可以看出隔震支座的水平位移变化有以下特点:

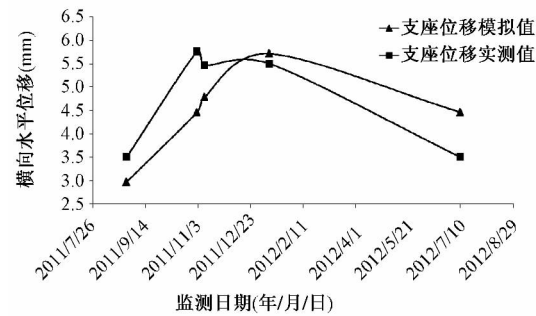
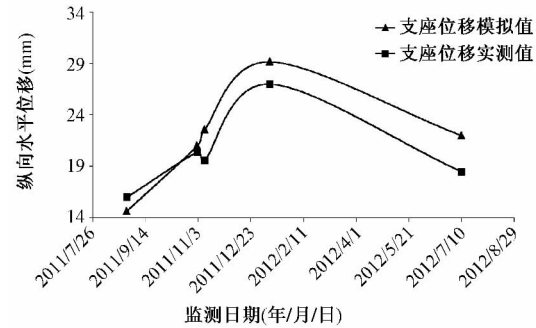


图5 测点1支座位移监测值和模拟值对比

Fig.5 The comparison of bearing displacement of the measuring point 1 between simulated values and monitoring values

(1) 纵向变形值较大,横向变形值较小。最大现场监测值纵向达到27mm,模拟值达到29.16mm;最大现场监测值横向达到5.5mm,模拟值达到5.7mm。

(2) 测点1和测点3均朝结构的中间位置(不动点附近^[11])方向产生变形,但是变形趋势基本一致。

(3) 隔震支座的变形初期变化较快,后期缓慢,并且随着建造过程中的温度改变变形有所恢复,但是收缩引起的变形是不可恢复的,当综合温差为39.2℃时,测点1现场实测纵向最大收缩变形移位为8.5mm,占总变形的31%。

测点2变形值较小,最大现场监测值纵向达到0.31mm,模拟值达到2.98mm;最大现场监测值横向达到0.39mm,模拟值达到0.095mm。变形趋势特点和测点1、3类似,支座变形位移如图7所示。

同时从Sap2000提取结构在建造过程中不同温

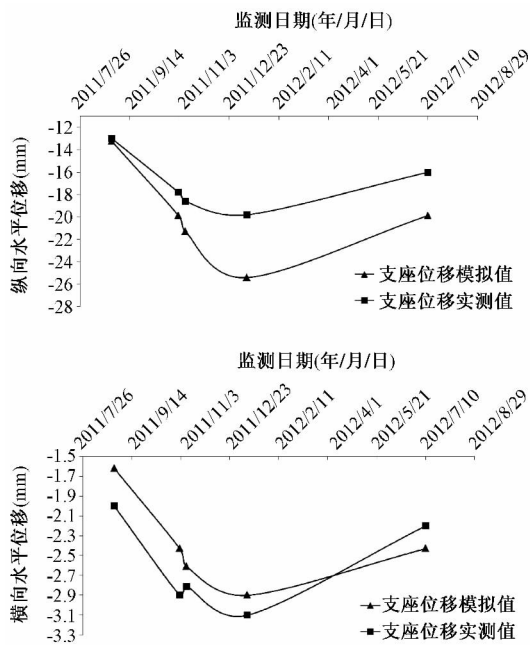


图 6 测点 3 支座位移监测值和模拟值对比
Fig. 6 The comparison of bearing displacement of the measuring point 3 between simulated values and monitoring values

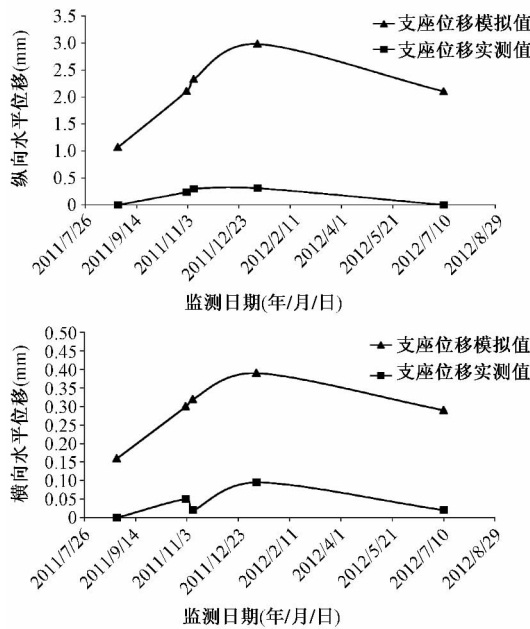


图 7 测点 2 支座位移监测值和模拟值对比
Fig. 7 The comparison of bearing displacement of the measuring point 2 between simulated values and monitoring values

差下各测点处隔震层纵向梁的最大轴力(如表 3 所示)。结合支座位移可以看出: 结构端部支座变形

大, 端部梁轴力小; 结构中部支座变形小, 中部梁轴力大。

表 3 梁的最大轴力(kN)

Table 3 The maximum axial force of the beam(kN)			
温度	测点 1	测点 2	测点 3
T_1	31.4	48.5	31.6
T_2	47.2	72.5	47.5
T_3	50.6	78.1	50.8
T_4	60.4	93.2	60.7
T_5	47.1	72.8	47.5

4 结构最不利温差下的变形

4.1 隔震支座最大变形限制

在超长和平面不规则的隔震结构中, 较大的支座侧移不但会影响结构外观, 更重要的是支座变形过大会导致支座处于偏压状态, 影响支座稳定性。根据《建筑抗震设计规范》^[12]有:

$$\frac{u_{\max}}{[u]} \leq 1 \quad (10)$$

式中 u_{\max} 为隔震支座在温差和收缩作用下的最大水平位移; $[u]$ 为隔震支座在罕遇地震作用下的水平位移限值, $[u] = \min\{0.55d, 3h_r\}$, d 为隔震支座的有效直径; h_r 为支座橡胶总厚度。

4.2 最不利温差下结构有限元分析

对于超长混凝土结构来说, 结构承受温度作用时可有多种工况, 但实际结构设计和建造时各种工况全部都加以考虑往往难以达到, 在实际工程中, 设计人员只需考虑引起最大内力的工况来计算结构的反应即结构最不利温差下的变形。表 4 是省气象局记录的该地区近 10 年的气象资料。该地区月平均气温最高值在 7 月份, 平均最高值为 34.9°C , 月平均气温最低值在 1 月份, 平均最低值为 -17.8°C , 可以得到最不利季节温差 $\Delta T = 34.9^{\circ}\text{C} - (-17.8)^{\circ}\text{C} = 52.7^{\circ}\text{C}$ 。

把最不利温差 $\Delta T = 52.7^{\circ}\text{C}$ 结合收缩当量温差 31.2°C 得到的综合温差 83.9°C 通过 SAP2000 对结构模型进行降温作用下的温度效应分析计算, 提取了最不利温差下变形较大的测点 1 和测点 3 隔震支座位移。测点 1 最大纵向水平位移为 47.1mm , 最大横向水平位移为 9.5mm ; 测点 3 最大纵向水平位移为 -42.5mm , 最大横向水平位移为 -5.2mm 。测

点1和测点3隔震支座的有效直径均为500mm,支座橡胶总厚度为96mm。由式(10)得:

$$[u] = \min\{0.55d, 3h\} = 275\text{mm}$$

测点1: 纵向 $\frac{u_{\max}}{[u]} = \frac{47.1}{275} = 0.17 < 1$

横向 $\frac{u_{\max}}{[u]} = \frac{9.5}{275} = 0.03 < 1$

测点3: 纵向 $\frac{u_{\max}}{[u]} = \frac{42.5}{275} = 0.15 < 1$

横向 $\frac{u_{\max}}{[u]} = \frac{5.2}{275} = 0.02 < 1$

即隔震支座在最不利温差下变形较大的测点1最大水平位移纵向为罕遇地震作用下水平位移的17%, 横向为3%; 测点3最大水平位移纵向为罕遇地震作用下水平位移的15%, 横向为2%, 满足位移限制要求。

表4 气象统计资料(°C)

Table 4 Meteorological statistics

月份	1	2	3	4	5	6
月平均气温	-6.6	-1.3	4.2	11.5	16.8	21.2
月平均最高气温	7.2	14.2	14.2	27.9	30.5	32.9
月平均最低气温	-17.8	-13.1	-9.6	-3.5	3.1	10.3
月份	7	8	9	10	11	12
月平均气温	22.8	21.1	15.6	9.7	2.5	-4.8
月平均最高气温	34.9	33.9	28.6	22.5	16.4	7.3
月平均最低气温	11.9	10.6	5.7	-1	-8.5	-14.6

对于隔震结构,由于其上部结构和基础之间被柔性隔震层隔离,下部结构竖向构件的侧移约束变小,整个结构在温度应力作用下更接近自由变形,且各楼层相对地基基础的位移基本相等。最不利温差下结构隔震层底板变形如图8所示,可以看出超长隔震结构在降温时楼板发生收缩,并且建筑物纵向向外端部的边缘收缩量较大。

建筑底部楼层受到基础的约束作用相对较强,当构件降温收缩时,受到外界的约束作用而产生较大的内力。最不利温差下底板内力如图9所示,因为该结构形式超长且不规则,在结构折角处出现了应力突增现象,在结构设计中应特别给予注意,如处理不当,会引起局部混凝土开裂现象,进而影响整体结构的正常使用。

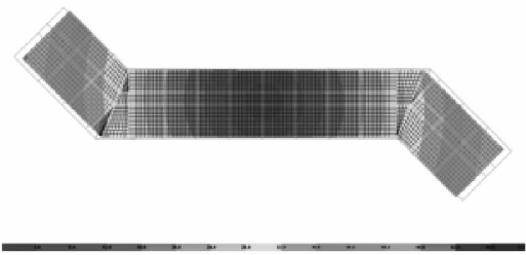


图8 底板变形图

Fig. 8 Floor deformation map

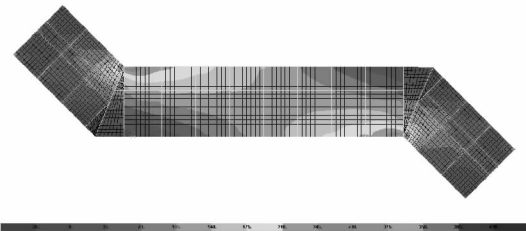


图9 底板内力图

Fig. 9 Temperature internal forces of base plate

5 结语

本文对某平面不规则超长隔震结构建造过程中的温度效应进行了有限元模拟,并对建造过程中出现的支座变形进行现场监测,对模拟和监测数据进行处理与分析得到以下结论:

(1) 结构纵向端部的隔震支座沿斜长方向的非荷载水平位移较大,横向水平位移较小。在最不利温差和收缩共同作用下,纵向端部隔震支座最大位移达到罕遇地震作用下设计水平位移的17%,表明超长隔震结构的支座非荷载变形不可忽视。

(2) 施工阶段隔震层处于露天环境中,温差较大,加之混凝土收缩变形主要发生在浇筑完成后的前期,所以隔震支座的非荷载变形主要发生在结构建造过程中。温差引起的隔震支座变形随环境温度而变化,但混凝土收缩引起的变形具有不可恢复性。对本文所监测的实际工程而言,由混凝土收缩所引起结构纵向端部隔震支座的收缩变形可达到非荷载变形的30%以上,因此超长隔震结构的混凝土收缩变形是其非荷载变形的重要组成部分。

参考文献(References):

[1] 李慧,谢文清,杜永峰,李万润. 某超长隔震结构在温度及收缩作用下的变形研究[J]. 工程抗震与加固改造 2013, 35(1): 40~44

Li Hui, Xie Wen-qing, Du Yong-feng, Li Wan-run. The

- Study of the Deformation of A Ultra-long Base Isolated Structure under the Temperature and Shrinkage [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(1): 40 ~ 44(in Chinese)
- [2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2001
Wang Tie-meng. Control of Cracking in Engineering Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press 2001(in Chinese)
- [3] 傅学怡. 混凝土结构温差收缩效应分析计算 [J]. 土木工程学报 2007, 40(10) : 50 ~ 59
Fu Xue-yi. Analysis and Calculation of Temperature Variation and Shrinkage Effects on RC Building Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10) : 50 ~ 59(in Chinese)
- [4] 王可怡, 陈大宾, 郭曼丽, 范雁. 隔震支座在钢结构施工过程中的变形与服役监测 [J]. 建筑结构, 2010, 40(8) : 49 ~ 52
Wang Ke-yi, Cheng Da-bin, Guo Man-li, Fan Yan. Study of Isolation Bearings Construction Deformation and Service Monitoring in E Area of GDSC [J]. Building Structure, 2010, 40(8) : 49 ~ 52(in Chinese)
- [5] 王琦明, 黎海南, 李慧, 杜永峰. 超长混凝土基础隔震结构温度应力分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(5) : 116 ~ 120
Wang Qi-ming, Li Hai-nan, Li Hui, Du Yong-feng. Analysis for Thermal Stress of the Overlong Base Isolation Concrete Structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting 2010, 32(5) : 116 ~ 120(in Chinese)
- [6] Du Y F, Li H. Behavior of Laminated Rubber Bearing under Low Temperature and Its Effect on Dynamic Reliability of Isolated Structure [A]. Proc. 4th Inte. Conf. Earthquake Engineering [C]. Taipei, October 2006
- [7] Ahmet Yaku, Joseph A Yura. Parameters Influencing Performance of Elastomeric Berings at Low Temperatures [J]. J Struct Engrg, 2002: 128
- [8] Ioannis V Kalpakidis, Michael C Constantinou, Andrew S Whittaker. Effects of Large Cumulative Travel on the Behavior of Lead-Rubber Seismic Isolation Bearing [J]. Struct Engrg, 2010
- [9] CEP-FIP MC90 Model Code for Concretes Structures [S]. 1990
- [10] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]
JTG D62-2004, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridge and Culverts [S] (in Chinese)
- [11] 吴波. 超长框架结构温度应力分析 [J]. 铁道标准设计, 1996, (2) : 31 ~ 34
Wu Bo. The Analysis of the Temperature Stress of Super-long Frame Structure [J]. Railway Standard Design, 1996, (2) : 31 ~ 34(in Chinese)
- [12] GB50012-2010, 建筑抗震设计规范 [S]
GB50012-2010, Code for Seismic Design of Buildings [S] (in Chinese)

[作者简介] 杜永峰(1962 ~) 男, 甘肃正宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程与减震控制研究

(上接第 104 页)

- [4] Duan M Z, Chen W F. Improved Simplified Method for Slab and Shore Load Analysis during Construction [R]. Project Report CE-STR-95-24, West Lafayette, Ind
- [5] 方东平, 耿川东, 祝宏毅 等. 施工期钢筋混凝土结构特性的计算研究 [J]. 土木工程学报 2000, 33(6)
Fang Dong-ping, Gen Chuan-dong, Zhu Hong-yi, et al. Analysis of Reinforced Concrete Structures during Construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6) : 57 ~ 62(in Chinese)
- [6] Beeby A W. The Forces in Backprops during Construction of Flat Slab Structures [A]. Proc ICE Struct Build [C]. 2001, 146(3) : 307 ~ 317
- [7] Pedro A. Calderón, Yezid A. Alvarado, Jose M. Adam. A New Simplified Procedure to Estimate Loads on Slabs and Shoring during the Construction of A Multistory Buildings [J]. Engineering Structures, 2011, 33(2011) : 1565 ~ 1575
- [8] Yezid A. Alvarado, Pedro A. Calderón, Isabel Gasch, et al. A Numerical Study into the Evolution of Loads on Shores and Slabs during Construction of Multisorey Buildings. Comparison of Partial Striking with Other Techniques [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (2010) : 3093 ~ 3102
- [9] Yezid A. Alvarado, Pedro A. Calderón, Jose M. Adam. An Experimental Study into the Evolution of Loads on Shores and Slabs during Construction of Multistory Buildings using Partial Striking [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 2132 ~ 2140

[作者简介] 杜永峰(1962 ~) 男, 甘肃正宁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程与减震控制研究