

立体停车结构抗震性能及水平阻尼支撑参数优化*

贺拥军^{1†}, 龚子彻¹, 周绪红²

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:将原研发的水平阻尼支撑应用于高层立体停车结构,以框架停车区平面剪切角及升降区平面剪切角在水平激励下的峰值响应为性能指标,使用 ANSYS 软件的 APDL 语言建立了参数化车库-阻尼器模型,通过动力时程分析,研究了支撑杆件布置方案、黏弹性材料的阻尼系数与损耗因子变化对水平阻尼支撑响应控制效果的影响,经比较分析后确定了优化后的水平阻尼支撑参数.结果表明,当支撑杆布置选取最优方案,黏弹性材料阻尼系数取 200 kN·s/m、损耗因子取 5.0 时,在不同二维地震波作用下,结构的停车区平面剪切角峰值分别下降了 65.67%、51.72%、51.59%,升降区平面剪切角峰值分别减少了 73.23%、72.51%、75.36%,结构平面内梁柱变形同步性增强,升降设备工作环境稳定性明显提升,水平阻尼支撑工作状态良好.研究结果对黏弹性阻尼器应用于高层立体停车结构以及高层立体车库设计具有指导意义.

关键词:立体车库;黏弹性阻尼器;响应控制;参数优化

中图分类号:TU311.41;TU355

文献标志码:A

Seismic Performance of Tridimensional Parking Structure and Parameter Optimization of Horizontal Damping Support

HE Yongjun^{1†}, GONG Ziche¹, ZHOU Xuhong²

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The originally developed horizontal damping support was applied to the high-rise tridimensional parking structure. The plane shear angle of the parking zone and lifting zone under the horizontal excitation was taken as the performance index. A parametric model of a 15-floors tridimensional parking structure was established by APDL language of ANSYS. Based on the dynamic time history analysis, the effects of the supporting bar layout, damping coefficient and energy loss coefficient of the visco-elastic material on response control of horizontal damping support were studied. After comparison and analysis, the optimal level of horizontal damping support parameters was determined. The results showed that when the optimal supporting bar layout was applied, the damping coefficient was 200 kN·s/m, energy loss coefficient was 5.0, and the peak plane shear angle of the parking zone under different two-dimensional seismic waves was decreased by 65.67%, 51.72% and 51.59% respectively, while the peak plane shear angle of the lifting zone was reduced by 73.23%, 72.51% and 75.36%. Meanwhile, the synchronization of the beam and

* 收稿日期:2016-12-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701202), National Key Research and Development Program of China(2016YFC0701202); 湖南省高校科技创新团队滚动资助计划项目(湘财教指(2015)616号), Aid Program for Science and Technology Innovative Research Team in Higher Educational Institutions of Hunan Province(湘财教指(2015)616号)

作者简介:贺拥军(1970—),男,湖南宁乡人,湖南大学教授,博士生导师

†通讯联系人, E-mail:hyj087@163.com.

column deformation in the structure plane was enhanced, the working environment stability of the lifting equipment was improved significantly, and the horizontal damping support was in good working condition. The results provide significant guideline for the application of visco-elastic damper to the high-rise parking structure and the design of high-rise tridimensional parking structure.

Key words: tridimensional parking structure; visco-elastic damper; response control; parameter optimization

垂直升降型电梯式高层立体停车结构具有占地面积小、车辆存取时间短、存车安全(防盗)等特点,是目前大中城市解决停车问题的首选方案^[1-2]. 高层立体停车结构一般均采用钢构架结构,为降低层高,一般不设置楼板构件.同时由于中部升降通道的存在,导致梁柱构件平面内约束刚度不足,在水平荷载作用下,梁柱构件存在平面内变形不同步的问题,导致升降、横移设备丧失稳定的工作环境而发生故障^[3-4].如何在保留高层立体停车结构空间布置灵活的前提下,提高其平面内梁柱间约束刚度,增强平面内梁柱变形同步性,成为发展高层立体停车库的重要问题.

本文将原研发的水平阻尼支撑^[5]应用于高层立体停车结构,对结构在阻尼支撑控制下的响应进行了分析.根据阻尼器工作原理,建立其理论模型,使用 ANSYS 对阻尼器进行建模,并使用 APDL 语言建立了 15 层立体停车库有限元模型,通过研究阻尼器不同参数设置对高层立体停车结构响应控制效果的影响,确定阻尼器的最优支撑杆布置形式、黏弹性材料阻尼系数及损耗因子.

1 水平阻尼支撑工作原理

1.1 水平阻尼支撑布置与构造细节

单个水平阻尼支撑由三根支撑杆与一个中心阻尼器构成,安装于框架平面四顶角处,其三根支撑杆的一端分别通过连接节点与钢框架的中柱、角柱及钢框架边梁相连,在平面内形成 Y 型水平支撑.三根支撑杆的另一端与一填充了黏弹性材料的中心阻尼器相连接.当框架出现平面内变形时,支撑杆与中心阻尼器连接处的黏弹性材料随之发生剪切变形,产生控制力并沿支撑杆传递,使结构的平面内变形得到控制.其形式如图 1 所示.

中心阻尼器包括一个由上下盖板及 3 块 V 型约束板焊接成的钢外筒,钢外筒内置有与 3 根支撑杆相连接的 3 块内接板,在内接板与钢外筒间填充

黏弹性材料层,使内接板、黏弹性材料层与钢外筒连接为整体,其具体构造如图 2 所示.

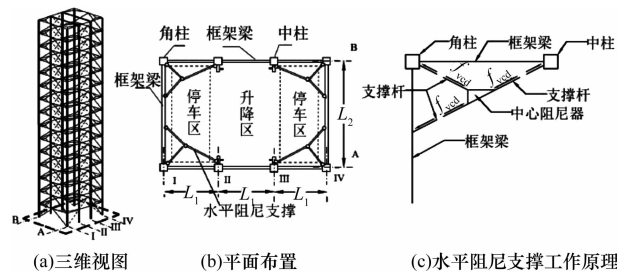


图 1 水平阻尼支撑布置示意图

Fig.1 Diagram of horizontal damping support

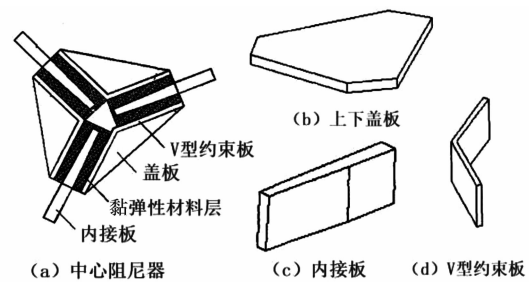


图 2 中心阻尼器结构示意图

Fig.2 Diagram of the structure of central damper

1.2 水平阻尼支撑力学模型

关于黏弹性阻尼器的力学模型,已有国内外学者进行了研究,提出了相关的分析模型^[6-7].Kelvin 模型适用于储能模量较高的黏弹性材料,符合本文中所使用的材料特征,且计算较为简便,因此采用 Kelvin 模型作为计算模型.文献中给出的黏弹性阻尼器滞回响应公式为:

$$f_{\text{ved}}(t) = \frac{1}{\eta} \cdot C \cdot u(t) + C \cdot \dot{u}(t). \quad (1)$$

式中: $f_{\text{ved}}(t)$ 为黏弹性阻尼器在 t 时刻的剪力; η 为黏弹性材料的损耗因子; C 为黏弹性材料的黏滞阻尼系数; $u(t)$ 为黏弹性阻尼器在 t 时刻的位移.

1.3 结构整体动力方程

在加入阻尼器控制后,结构的承受水平动力荷载的运动方程可表示为:

$$\{M_s + M_d\} \ddot{u}(t) + \{C_s + C_d\} \dot{u}(t) +$$

$$\{K_s + K_d\}u(t) = -F_h \quad (2)$$

式中: M_s 、 C_s 和 K_s 分别为结构的质量、阻尼、刚度矩阵; F_h 为外部水平荷载矩阵; M_d 、 C_d 和 K_d 分别为由黏弹性阻尼器所附加的质量、阻尼、刚度矩阵; $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 和 $\ddot{u}(t)$ 分别为结构在外部荷载下的位移、速度和加速度响应矩阵。

通过设置黏弹性阻尼器在结构体系上附加阻尼矩阵、刚度矩阵, 可以使得结构响应相应减小, 达到减震控制的作用^[8]。

2 整体结构基本抗震性能

2.1 结构分析模型

设置阻尼器的研究对象为垂直升降型电梯式高层立体停车结构, 具体形式及平面布置如图 1 所示, 由角柱、中柱、框架梁、斜撑构成钢框架结构。根据常用车辆的基本尺寸, 并考虑到车辆进出需求, 确定结构的层高为 2.2 m, 停车区、升降区宽度 $L_1 = 2.2$ m, 进深 $L_2 = 5.1$ m, 结构共 15 层, 总高度为 33 m。中柱、角柱均采用热轧 H 型钢, 型号 H250 mm × 300 mm × 8 mm × 10 mm; 横梁采用热轧 H 型钢, 型号 H100 mm × 100 mm × 6 mm × 8 mm; 斜撑采用圆形钢管, 型号为 $\Phi 108$ mm × 6 mm。所有结构构件均采用 Q345(16Mn) 钢材, 屈服强度 345 MPa。密度均为 7 850 kg/m³, 弹性模量均为 216 GPa。

根据结构车辆储存情况, 考虑车辆自重、支承

托板、围护墙板与提升电机的重量, 取车辆自重为 20 kN, 选择动力放大系数为 1.5, 支承托板、围护墙板与提升电机的重量合计取 4 kN, 将竖向荷载简化为作用在各层柱节点的竖向集中荷载^[9]。综合考虑, 在各层柱节点上施加 8 kN 的竖向集中荷载。

使用 ANSYS 建立结构计算模型。角柱、中柱、框架梁采用 BEAM188 单元; 斜撑采用 LINK8 单元。梁柱间的连接选用刚接, 斜撑与梁柱间的连接选用铰接, 柱底部与基础间的连接选用刚接。钢材的本构关系选用经典的双线性随动强化模型(BKIN)。黏弹阻尼器采用基于 Kelvin 模型的复合弹簧阻尼单元, 使用 COMBIN14 单元进行模拟^[10-11]。

2.2 基本抗震性能

由于本文主要研究设置阻尼器后结构的减震效果, 因此选取了抗震分析中较为常用的 2 条天然地震波, 二维 El-Centro (EL) 地震波与二维天津 (TJ) 波(无竖向输入), 与 1 条依据 GB 50011—2010 中规范反应谱生成的二维人工地震波(RG)。采用 II 类场地, 设防烈度为 8 度(0.2g)^[12]。在结构设置阻尼支撑前、设置阻尼支撑后分别进行水平激励下的弹性时程分析。取前 10 s 进行计算, 步长 0.02 s。

2.2.1 响应输入特性

经过有限元软件计算得到结构的基本周期为 1.27 s, 3 条地震波的反应谱与时程曲线如图 3 所示。

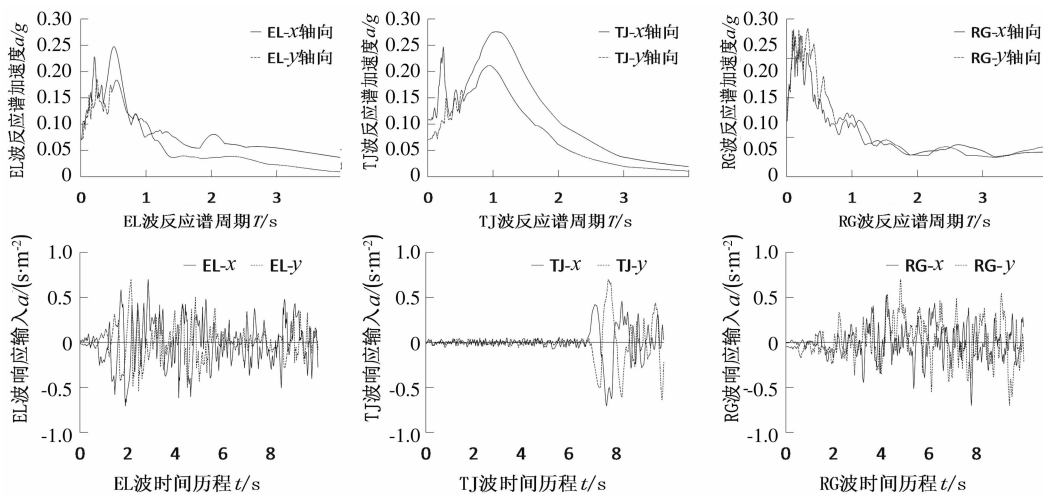


图 3 地震波响应谱与时程曲线

Fig.3 Seismic response spectrum and time history curve

2.2.2 性能指标

在二维地震输入下, 考虑框架平面变形对升降、横移机构的影响, 定义性能指标升降区平面剪

切角 Φ_x 、 Φ_y , 停车区平面剪切角 Φ_T , 其具体定义如图 4 所示。

定义参数控制率 ϵ , 其值为各层响应峰值的减

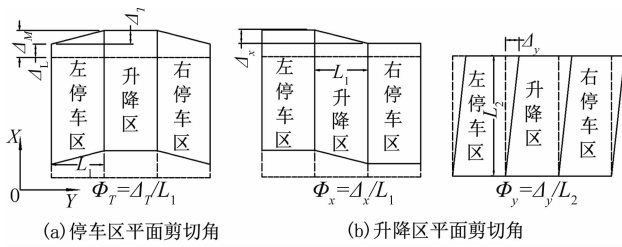


图4 性能指标示意图

Fig.4 Diagram of performance index

少率.

$$\epsilon = \frac{|\Delta_{\text{无阻尼器}}| - |\Delta_{\text{有阻尼器}}|}{|\Delta_{\text{无阻尼器}}|}$$

式中: $|\Delta_{\text{无阻尼器}}|$ 为未安装阻尼器的峰值响应; $|\Delta_{\text{有阻尼器}}|$ 为安装阻尼器后的峰值响应.

2.2.3 支撑杆布置参数

阻尼支撑的响应控制效果受到支撑杆布置方案的影响,为便于描述支撑杆布置方案,引入参数 α, β, λ . α 为中心阻尼器形心到左边框梁距离 X_1 与停车区宽度 L_1 比值; β 为中心阻尼器形心到上边框梁距离 X_2 与支撑杆连接点到上边框梁距离 X_3 比值; λ 为 X_3 与进深长度 L_2 比值,如图 5 所示.

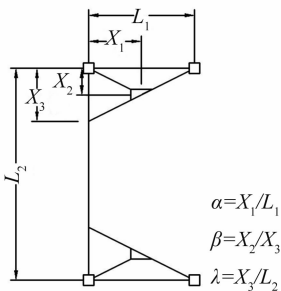


图5 阻尼器布置参数示意图

Fig.5 Parameters of supporting bar layout

2.2.4 结构响应控制效果

为分析阻尼器响应控制效果,首先计算结构在设置阻尼支撑前的升降区平面剪切角峰值,框架平面升降区与停车区相对位移峰值的计算结果如图 6 和图 7 所示.

如图 6 所示,设置阻尼器前,在不同二维地震波下,结构升降区平面剪切角分别在 12 层、15 层、14 层处达到峰值,同时升降区平面剪切角 Φ_y 峰值增长速度远大于 Φ_x ,这是由于 X 轴方向上的层间三角斜撑增强了框架在 XOZ 平面内的刚度,使得 X 轴方向上的横梁相对位移减小;而在 Y 轴方向,由于斜撑主要集中布置于中部升降区,对框架在 YOZ 平面内的刚度影响较小,从图 7 中可看到,在不同二维地震波作用下,停车区平面剪切角峰值均出现在

结构的第 12 层处.综合考虑以上因素,选取结构各层 Y 轴方向升降区平面剪切角 Φ_y 峰值控制率和停车区平面剪切角 Φ_T 峰值控制率为主要控制指标.

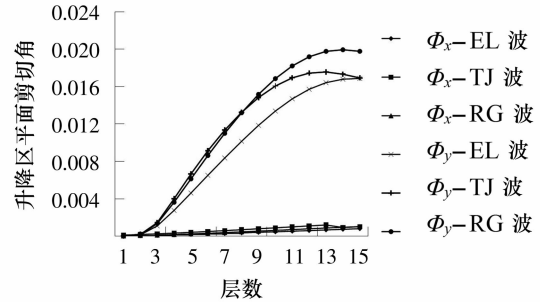


图6 无阻尼器下 Φ_x, Φ_y 峰值

Fig.6 Peak value of Φ_x and Φ_y without damper

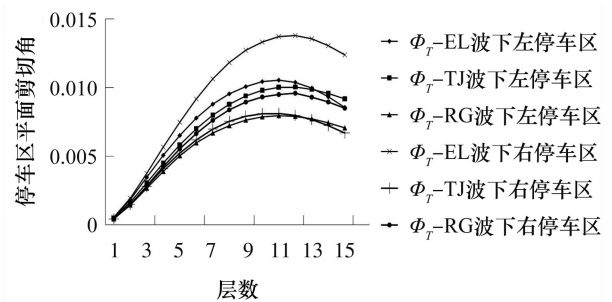


图7 无阻尼器下 Φ_T 峰值

Fig.7 Peak value of Φ_T without damper

在立体停车结构各层平面内以中心对称方式设置 4 个水平阻尼支撑,初步取支撑杆布置参数为 $\lambda = 1/3, \alpha = 1/2, \beta = 1/2$;设置黏弹性材料阻尼系数 C 为 $50 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$,损耗因子 η 取 1.0.经二维弹性时程分析,得到设置阻尼支撑后的结构响应控制率,见表 1.

表 1 阻尼支撑响应控制率

Tab.1 Response control rate of horizontal damping support

响应输入	Φ_y 峰值 (无控)	Φ_y 峰值 (有控)	控制率 $\epsilon/\%$	Φ_T 峰值 (无控)	Φ_T 峰值 (有控)	控制率 $\epsilon/\%$
EL 波	0.016 86	0.008 51	49.52	0.013 79	0.007 92	42.55
TJ 波	0.017 55	0.010 87	38.07	0.010 03	0.007 82	22.03
RG 波	0.019 93	0.009 94	50.10	0.009 49	0.006 52	31.30

分析表 1 数据后可知,在设置阻尼支撑后,在不同二维地震激励下,结构升降区平面剪切角 Φ_y 与停车区平面剪切角 Φ_T 显著下降,结构平面内变形同步性明显增加,体现出阻尼支撑具有良好的响应控制作用.

3 阻尼支撑参数分析

为深入研究各单项参数对结构减震效率的影响,同时提高参数优化效率,依次变更各单项参数,将每次得到的最大减震率所对应的单项参数值代

入下一项参数优化研究中,以此类推,最终得到整体参数优化结果。

3.1 支撑杆布置参数分析

由于阻尼支撑的响应控制效果受到支撑杆布置方案的影响,为探究最优的支撑杆布置方案,设置了 12 组支撑杆布置参数,见表 2。

表 2 支撑杆布置参数方案

Tab.2 Layout schemes of supporting bar

方案编号	λ	α	β	方案编号	λ	α	β
1	1/4	1/3	1/3	7	1/3	1/3	1/2
2	1/4	1/2	1/2	8	1/3	1/2	1/3
3	1/4	1/3	1/2	9	1/2	1/3	1/3
4	1/4	1/2	1/3	10	1/2	1/2	1/2
5	1/3	1/3	1/3	11	1/2	1/3	1/2
6	1/3	1/2	1/2	12	1/2	1/2	1/3

取黏弹性材料阻尼系数 C 为 $50 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 损耗因子 η 取为 1.0, 通过对比不同参数设置方案的响

应控制效果,得到较优的支撑杆布置方案.经过二维弹性时程分析后,得到各方案响应控制率见表 3。

分析表 3 数据后可发现,在 α 和 β 取值相同的情况下,随着 λ 值的上升,升降区平面剪切角控制率及停车区间相对位移控制率都呈现出整体上升的趋势;在 EL 波下, $\lambda=1/2$ 的各项方案中,方案 10~12 的两项控制率均超过 50%,体现出阻尼器具有良好的响应控制作用.在 λ 值相同的情况下,比较各方案,可发现当支撑杆采取 $\alpha=1/2, \beta=1/2$ 的配置方案时,结构的响应控制率达到峰值,在 $\lambda=1/2$ 时,升降区平面剪切角控制率分别达到 60.99%、51.12%、61.05%, 停车区平面剪切角控制率分别达到 57.43%、33.64%、36.05%, 结构平面内刚度得到显著提升.由于该支撑设置方案相对突出的控制率,采取该方案进行下一步分析。

表 3 不同支撑杆布置方案下阻尼支撑响应控制率

Tab.3 Response control rates under different layout schemes

响应输入:EL	Φ_y 峰值	控制率 $\epsilon/\%$	Φ_T 峰值	控制率 $\epsilon/\%$	响应输入:TJ	Φ_y 峰值	控制率 $\epsilon/\%$	Φ_T 峰值	控制率 $\epsilon/\%$	响应输入:RG	Φ_y 峰值	控制率 $\epsilon/\%$	Φ_T 峰值	控制率 $\epsilon/\%$
无控	0.016 86	—	0.013 79	—	无控	0.017 55	—	0.010 03	—	无控	0.019 93	—	0.009 49	—
方案 1	0.014 24	15.55	0.012 35	10.43	方案 1	0.015 85	9.69	0.009 62	4.09	方案 1	0.016 88	15.32	0.008 42	11.34
方案 2	0.011 09	34.26	0.010 34	24.97	方案 2	0.013 33	24.07	0.008 82	12.04	方案 2	0.013 07	34.42	0.007 06	25.59
方案 3	0.012 44	26.21	0.011 23	18.54	方案 3	0.014 49	17.43	0.009 22	8.10	方案 3	0.014 71	26.23	0.007 67	19.20
方案 4	0.012 73	24.50	0.011 42	17.19	方案 4	0.014 73	16.09	0.009 29	7.36	方案 4	0.015 06	24.46	0.007 79	17.90
方案 5	0.012 61	25.21	0.010 94	20.65	方案 5	0.014 68	16.36	0.009 20	8.30	方案 5	0.014 91	25.23	0.007 49	21.11
方案 6	0.008 51	49.52	0.007 92	42.55	方案 6	0.010 87	38.07	0.007 82	22.03	方案 6	0.009 95	50.10	0.006 52	31.30
方案 7	0.010 36	38.59	0.009 31	32.47	方案 7	0.012 82	26.97	0.008 56	14.64	方案 7	0.012 25	38.53	0.006 76	28.80
方案 8	0.010 36	38.55	0.009 32	32.42	方案 8	0.012 82	26.94	0.008 57	14.59	方案 8	0.012 26	38.49	0.006 76	28.76
方案 9	0.010 34	38.70	0.008 78	36.28	方案 9	0.012 83	26.91	0.008 43	15.96	方案 9	0.012 24	38.62	0.006 74	28.96
方案 10	0.006 58	60.99	0.005 87	57.43	方案 10	0.008 58	51.12	0.006 65	33.64	方案 10	0.007 77	61.05	0.006 07	36.05
方案 11	0.008 09	52.04	0.006 98	50.34	方案 11	0.010 47	40.37	0.007 50	25.27	方案 11	0.009 49	52.39	0.006 41	32.48
方案 12	0.007 99	52.61	0.006 91	50.86	方案 12	0.010 35	41.01	0.007 45	25.72	方案 12	0.009 38	52.92	0.006 39	32.65

3.2 黏弹性材料参数分析

3.2.1 阻尼系数

黏弹性材料性能将影响阻尼支撑工作效果,其参数包括阻尼系数 C 与损耗因子 η 两部分,首先讨论阻尼系数对响应控制率的影响.采用上节分析得到的最优支撑布置方案,考虑目前工程中应用的黏弹性材料参数^[13],设置阻尼系数 C 为 10、20、50、80、100、200、500、1 000 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$, 损耗因子 η 取为 1.0, 经过二维弹性时程分析后,得到了不同阻尼系数下的结构响应控制率,如图 8 所示。

分析图 8 数据可发现,在黏弹性材料的阻尼系数从 10 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ 增长至 100 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ 的过程中,结构的各项响应控制率大幅提高,体现出设置阻尼器对各项位移指标都有良好的控制效果.在 EL 波

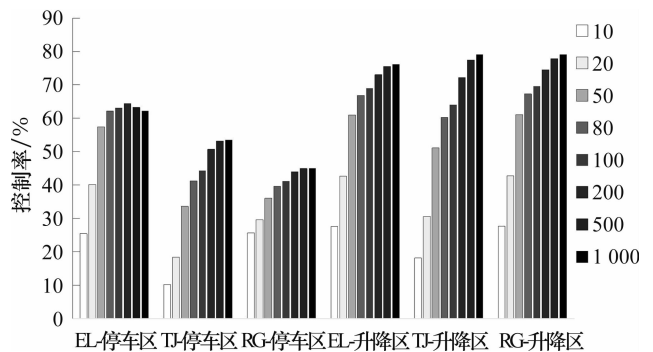


图 8 不同阻尼系数下响应控制率

Fig.8 Response control rates under different damping coefficients

下,当阻尼系数达到 1 000 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ 时,升降区平面剪切角控制率达到 76.16%;而停车区平面剪切角控制率则在阻尼系数取 200 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ 时达到峰

值 64.35%，之后随着阻尼系数上升，停车区平面剪切角控制率开始略微下降；而在天津波与人工波下，当阻尼系数大于 200 kN·s/m 时，尽管各项控制率仍在增加，但速度十分缓慢，增加阻尼系数对响应控制率的影响并不明显。

综合考虑各项响应控制率随阻尼系数的变化趋势，确定最优阻尼系数 C 为 200 kN·s/m，该设置下，框架停车区平面剪切角控制率分别达到 64.35%、50.70%、43.96%，升降区平面剪切角控制率分别达到 73.05%、72.21%、74.52%，从整体控制效果来分析，对提高结构的平面内刚度作用十分显著。

3.2.2 损耗因子

进一步讨论损耗因子 η 对响应控制率的影响，考虑目前常用的黏弹性材料损耗因子 η 的取值范围为 0.2~5.0，取阻尼系数 C 为 200 kN·s/m，设置损耗因子 η 为 0.2、0.5、1.0、2.0、5.0，经过二维弹性时程分析后，得到不同损耗因子下的结构响应控制率，如图 9 所示。

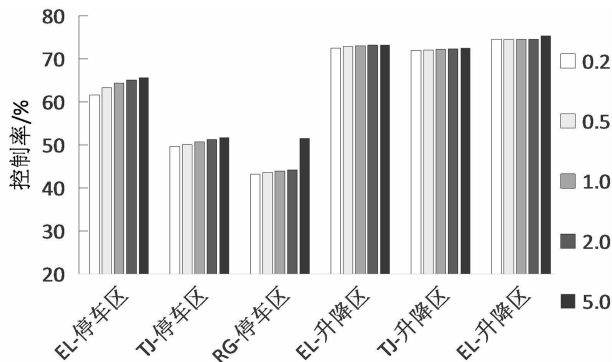


图 9 不同损耗因子下响应控制率

Fig.9 Response control rates under different energy loss coefficients

从图 9 中可以得到，随着黏弹性材料损耗因子 η 的提升，停车区平面剪切角控制率有一定增加；同时升降区平面剪切角控制率虽然也在上升，但提高幅度非常小。当 $\eta=5.0$ 时，结构在不同二维地震波作用下的框架停车区平面剪切角峰值分别下降了 65.67%、51.72%、51.59%，升降区平面剪切角峰值分别减小了 73.23%、72.51%、75.36%。考虑到这一现象，在选择黏弹性材料时，应尽量选择损耗因子 η 较大的材料，从而改善水平阻尼支撑的工作性能。

4 优化设置下结构响应分析

采用 $\lambda=1/2, \alpha=1/2, \beta=1/2$ 的支撑角度设置方案，黏弹性材料阻尼系数取 200 kN·s/m，损耗

因子 η 取为 5.0。在 EL 波输入下，选取结构在无阻尼器控制下降降区平面剪切角 Φ_y 达到峰值的第 15 层，停车区平面剪切角 Φ_T 达到峰值的第 12 层右侧，对比在最优阻尼支撑设置下的结构时程曲线，结果如图 10 和图 11 所示。

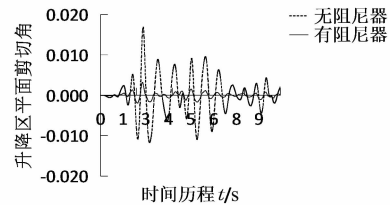


图 10 第 15 层升降区 Φ_y 值

Fig.10 Value of Φ_y at 15th layer in Y axis direction

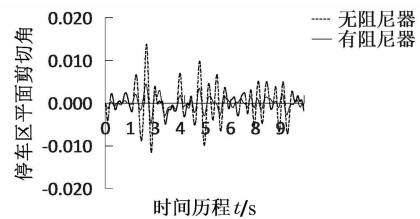


图 11 第 12 层右侧 Φ_T 值

Fig.11 Value of Φ_T of 12th layer on the right side

分析图 10 和图 11 可发现，加入阻尼器后结构的响应在时程上大幅减小，在全阶段都有明显的控制效果，说明水平阻尼支撑能够有效工作，起到增强框架平面内刚度的效果。

阻尼支撑的控制力由黏弹性材料发生剪切变形时产生的剪力提供，由弹性力与阻尼力两部分组成，其中阻尼力与能量耗散相关。为讨论阻尼支撑的耗能效果，计算在 EL 波输入下，采用优化设置时，作用于各层阻尼器支撑杆上的阻尼力峰值，结果见表 4。

表 4 EL 波下各层支撑杆阻尼力峰值

Tab.4 Peak value of the damping force on the supporting bar under EL wave

层数	阻尼力峰值/N	层数	阻尼力峰值/N	层数	阻尼力峰值/N
1	1 097.19	6	2 958.08	11	4 261.73
2	1 786.34	7	3 039.16	12	4 370.62
3	1 711.72	8	3 211.66	13	4 544.07
4	2 328.66	9	3 662.45	14	4 985.72
5	2 739.02	10	4 025.08	15	5 582.44

分析表 4 得到，阻尼力峰值范围从 1.097 kN 到 5.58 kN 不等，选取第 5 层的阻尼器 997 单元，绘制其滞回曲线，如图 12 所示。

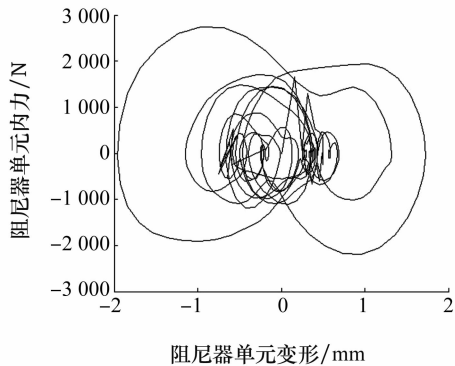


图 12 阻尼器单元 997 滞回曲线

Fig.12 Hysteretic curve of damper element 997

观察图 12 可以得出,阻尼器单元滞回曲线饱满,位移峰值达到 2 mm,阻尼力峰值达到 2.7 kN,阻尼支撑的耗能性能得到了较好的发挥。

5 结 论

本文探讨了水平阻尼支撑应用于高层立体停车结构的参数优化,分析了不同支撑杆布置方案、阻尼系数与损耗因子对阻尼支撑响应控制效果的影响,并讨论了阻尼支撑在参数优化后的工作性能,得到以下主要结论:

1) 设置水平阻尼支撑能显著减小框架停车区平面剪切角与升降区平面剪切角,增强立体停车结构的平面内刚度,提高平面内梁柱变形同步性,保持升降、横移设备的稳定工作环境。

2) 在支撑杆布置参数 α 、 β 、 λ 中, λ 值对阻尼支撑工作效果影响最为显著,在 $1/4 \sim 1/2$ 范围内,随着 λ 值上升,阻尼支撑控制效果增强;阻尼系数对工作效果的影响在 C 小于 $200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 时最明显,控制率 ϵ 随阻尼系数上升而迅速增加,大于 $200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 后变化缓慢;提高损耗因子 η 能提高控制率。

3) 在采取 $\lambda=1/2$ 、 $\alpha=1/2$ 、 $\beta=1/2$ 、 $C=200 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 、 $\eta=5.0$ 的最优设置下,阻尼支撑表现出优良的响应控制性能,证明了该设计的合理性。

参考文献

[1] 贺拥军,杨承超,周绪红,等.立体车库的结构形式及应用与发展[J].建筑科学与工程学报,2009,26(4):30-34.
HE Y J, YANG C C, ZHOU X H, et al. Structural forms, application and development of three-dimensional garages[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 30-34. (In Chinese)

[2] 刘晓娟,潘宏侠.垂直升降式立体车库系统设计与研究[J].机械设计与制造,2011(5):48-50.
LIU X J, PAN H X. Design and research for vertical garage system of lifting type[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(5): 48-50. (In Chinese)

[3] 贺拥军,刘小华,周绪红.车辆横移过程中高层立体停车结构动力响应分析[J].建筑科学与工程学报,2015,32(5):32-38.
HE Y J, LIU X H, ZHOU X H. Dynamic response analysis of high-rise tridimensional parking structure during horizontal transfer process of vehicle [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 32-38. (In Chinese)

[4] 贺拥军,刘小华,周绪红.仿竹筒式立体停车结构的环箍层布置研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(4):1-7.
HE Y J, LIU X H, ZHOU X H. Research on arrangement of hoop-layers of imitating bamboo drum type tridimensional parking structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(4): 1-7. (In Chinese)

[5] 许红胜,周绪红,贺拥军.立体停车库钢构架水平阻尼支撑:200910226691.6 [P].2010-06-30.
XU H S, ZHOU X H, HE Y J. Horizontal damping support for the steel frame of tridimensional parking structure: 200910226691.6 [P]. 2010-06-30. (In Chinese)

[6] 徐赵东,周洲,赵鸿铁,等.黏弹性阻尼器的计算模型[J].工程力学,2001,18(6):88-93.
XU Z D, ZHOU Z, ZHAO H T, et al. Calculation model of visco-elastic damper [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(6): 88-93. (In Chinese)

[7] CORTÉS F, ELEJABARRIETA M J. Computational methods for complex eigenproblems in finite element analysis of structural systems with viscoelastic damping treatments [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(9): 6448-6462.

[8] 汪志昊,陈政清.高层建筑加强层黏滞阻尼系统的优化分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2010,37(9):7-11.
WANG Z H, CHEN Z Q. Optimization analysis of the outrigger damping system for high-rise building [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(9): 7-11. (In Chinese)

[9] 贺拥军,周绪红,唐家云.四边形筒式钢构架立体停车结构的横隔设置研究[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):25-31.
HE Y J, ZHOU X H, TANG J Y. Research on diaphragm arrangement of quadrangular tube-type steel frame tridimensional parking structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(3): 25-31. (In Chinese)

[10] 薛素铤,凌和海.黏弹性阻尼器在网架结构减震控制中的优化设置[J].建筑结构学报,2007,28(4):51-57.
XUE S D, LING H H. Optimum installation of viscoelastic dampers in space frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 51-57. (In Chinese)

[11] 邓涛.黏弹性阻尼器减震性能研究与优化分析[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2005:27-29.
DENG T. The research on a seismic behavior and the optimal analysis of viscoelastic dampers [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2005: 27-29. (In Chinese)

[12] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:24-28.
GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 24-28. (In Chinese)

[13] 周颖,李锐,吕西林.黏弹性阻尼器性能试验研究及参数识别[J].结构工程师,2013,29(1):83-91.
ZHOU Y, LI R, LÜ X L. Experimental study and parameter identification of visco-elastic damper [J]. Structural Engineers, 2013, 29(1): 83-91. (In Chinese)