

张燕,刘涛.体育场震后修复再建中混凝土结构消能减震设计研究[J].地震工程学报,2019,41(1):16-22.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.016

ZHANG Yan,LIU Tao.Energy Dissipation Design for the Concrete Structures in a Stadium in Post-earthquake Restoration and Reconstruction[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(1):16-22.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.016

体育场震后修复再建中混凝土结构 消能减震设计研究

张 燕¹, 刘 涛²

(1. 武汉大学体育部, 湖北 武汉 430072; 2. 华中师范大学, 湖北 武汉 430072)

摘要:以往是用高层建筑防屈曲支撑的混凝土减震加固方法,以加固震后体育场混凝土结构的防屈曲支撑力为重点,存在的问题是未考虑结构不同部位节点的防屈曲消能减震支撑性能,加固效果差,需要深入研究混凝土结构建筑加固措施,提高震后体育场修复质量。研究采用基于性能和需求的消能减震设计方法,合理布置混凝土的消能支撑结构,在混凝土结构中底层节点设置防屈曲消能减震支撑,其他节点设置黏滞阻尼器,获取最佳阻尼器设置方案,提高结构减震加固效果。仿真实验说明,EL-Centro(NS)地震波和 Newhall 地震波情况下,所研究方法设计的消能减震新结构平均顶点侧移值分别比原结构小 62 mm 和 110 mm;在不同震级的情况下,节点间位移角新结构小于原结构,说明该方法设计的体育场修复中混凝土结构减震稳定性强,是一种有效的减震加固方法。

关键词:震后; 体育场; 修复施工; 减震加固; 消能减震

中图分类号: TU3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0016-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.016

Energy Dissipation Design for the Concrete Structures in a Stadium in Post-earthquake Restoration and Reconstruction

ZHANG Yan¹, LIU Tao²

(1. Department of Physical Education, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. Central China Normal University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: Previous seismic retrofitting methods for high-rise buildings have focused on the strengthening of the buckling-resistant bracing of the concrete structures in the post-earthquake stadium; however, they seldom consider the energy dissipation performance of joints in different parts of the structure, resulting in a poor strengthening effect. It is necessary to study the measures for strengthening the concrete structures to improve the restoration quality of the post-earthquake stadium. In this study, the energy dissipation brace structure of concrete is reasonably arranged using the performance- and demand-based energy dissipation design methods. The

收稿日期:2018-03-27

基金项目:湖北省自然科学基金(150713670109348);湖北省教育科学规划 2017 年度课题(2017GB002)

第一作者简介:张 燕(1966-),女,山东青岛人,硕士,副教授,研究方向为建筑防震,体育教育。E-mail:Yanzhang666@163.com。

buckling-resistant energy dissipation braces are installed at joints on the bottom floor of the concrete structure, and viscous dampers are installed at other joints to improve the seismic absorption and reinforcement effect of the structure. The simulation results denoted that the average top drifts of the new energy dissipation structure designed by this method was 62 and 110 mm smaller than those of the original structure under EL-Centro (NS) and Newhall waves, respectively; under earthquakes of different magnitudes, the displacement angle between the nodes of the new structure was smaller than that in the original structure. The concrete structure designed using the proposed method exhibited strong seismic absorption stability, indicating that the proposed energy-dissipating design method is effective in seismic reduction and structural reinforcement.

Keywords: post-earthquake; stadium; restoration and construction; seismic retrofit; seismic reduction and energy dissipation

0 引言

近几十年,全球地震灾害频发,经济损失、社会损失不可忽视。体育场作为公众聚集场所,修复的安全工作成为重中之重,体育场重建过程中设防标准有所提高^[1],并且采用不同的加固设计结构,提高体育场结构的性能。

文献[2]采用基于高层建筑防屈曲支撑的减震性能方法,在混凝土建筑中加入防屈支撑,通过该支撑增强建筑物的抗震性能。该方法虽然在小震情况下抗震性能良好,但当处于大震情况时,会导致体育场建筑物特别大的位移角变化,对震后体育场结构的修复效果差。文献[3]提出基于性能的框架结构隔震加固方法,该方法主要通过隔振技术加固震后体育场混凝土结构,对结构进行动力弹塑性时程分析,但该方法没有考虑等效阻尼比在结构中的影响,侧向位移受地震影响较大。

本文研究了一种混凝土结构消能减震方法,合理布置混凝土的消能支撑结构,在混凝土结构中底层节点设置防屈曲消能减震支撑,其他节点设置黏滞阻尼器,获取最佳阻尼器设置方案,提高结构减震加固效果。仿真实验说明,所设计的减震方法在体育场修复中混凝土减震结构稳定性强,是一种有效的减震加固方法。

1 震后体育场修复施工中混凝土结构减震加固设计

1.1 消能减震设计思路及评估方法

(1) 通过评估体育场中待减震加固的结构,判定整体结构的概况。采用消能减震技术提升基本震后体育场混凝土结构的设防烈度^[4]。

(2) 在三维空间计算模型确定下,建立合理的

人工地震波,采用时程分析法运算得到结构的震后响应情况^[5]。

(3) 当附加阻尼器产生效果时,明确大震情况下体育场混凝土结构各节点间的位移值。确定各个结构节点间的阻尼力最大值以及支撑刚度等参数,其主要是通过已知的性能目标得到^[6]。下列公式描述的是各个节点阻尼器的基本情况:

$$\lambda_i = H_{di} / (J_{di} \Delta_i) = \Delta_{di} / \Delta_i \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\pi \alpha_{di}}{2(1 - \lambda_i)} \quad (2)$$

$$H_{di} = \theta \times P_i \quad (3)$$

其中: J_{di} 和 H_{di} 分别是多个阻尼器建立的第 i 个体育场混凝土结构节点的弹性刚度和阻尼器的预期阻尼值; Δ_i 和 Δ_{di} 分别是第 i 个结构节点互相位移峰值和在多个消能支撑下,阻尼器符合设定的阻尼力时所需的相对位移^[7]; θ 是每个节点间的剪力和阻尼力相比得到的值; P_i 代表第 i 个节点的节点剪力; α_{di} 是第 i 个结构节点阻尼器消耗能力后获取的预期附加等效阻尼比; λ_i 是第 i 个结构节点中设置消能支撑中的阻尼器符合规定阻尼值情况下的相对位移与此节点和相邻节点位移最大值相比得到的值。阻尼器的数量与参数通过各个节点间的阻尼力、结构的主要形式进行设定^[8]。

(4) 将阻尼器添加到体育场混凝土结构的三维空间模型中。将防屈曲耗能添加到体育场混凝土结构的底层节点,在其他节点外添加黏滞阻尼器,并要求阻尼器基本处于对称状态,同时设立阻尼器的位置要接近四周。

(5) 判定减震效果,阻尼器的最大出力和支撑刚度大小主要根据大震和小震计算出的参照结果得到,依据抗震设计规范^[9],得到等效阻尼比的运算方法,通过下列公式获取等效阻尼比 α_{di} :

$$L_{ci} = 4 \sum_{j=1}^{n_i} H_{d(ij),\max} \Delta_{(ij),\max} \quad (4)$$

$$L_c = \sum_{i=1}^m L_{ci} \quad (5)$$

$$L_s = \frac{1}{2} \sum H_i O_i \quad (6)$$

$$\alpha_{di} = \frac{L_c}{4\pi L_s} \quad (7)$$

其中： $\Delta_{(ij),\max}$ 和 $H_{d(ij),\max}$ 是第 i 层第 j 个消能器滞回环位移最大值和阻尼器出力最大值； L_{ci} 是预计结构位移^[10]，第 i 层全部消能器消耗的能量； L_c 是在 7 天中基于预计结构位移，获取的全部消能器消耗能量； H_i 和 O_i 分别为节点 i 水平条件下产生的地震标准值和其相对于地面的位移； L_s 和 α_{di} 分别是含有消能器的结构依据预期位移得到应变能的和与能量耗散设备的等效阻尼比； n_i 和 m 分别是阻尼器的数量和阻尼器装置的节点数。

(6) 如果通过步骤(5)得到的结果不符合要求^[11]，可以通过改变消能支撑的力学参数改善结果，例如改变某个节点的阻尼器数量，反复进行步骤(4)和(5)。

(7) 当各个节点间的位移角和剪力等减震结果符合小震情况下的要求时，则计算大震情况下体育场混凝土结构的减震结果。当不符合要求时，通过改变阻尼器的个数和参数、支撑参数以及结构的杆件位置，循环步骤(5)以及以后的步骤，当完全符合要求时结束^[12]。

(8) 在阻尼器的配置符合要求的前提下，研究阻尼器支撑点柱子的内力是否符合规范，当不符合规范时，通过改变柱子的横截面和含有的钢筋数量或直径改变其内力，并达到要求值。

(9) 当发生大震时，不用考虑消能减震支撑的静力刚度值，采用等效阻尼比计算方法计算消能减震结构的弹性，通过对其计算的全部值研究体育场混凝土结构的静力弹塑性。

通过以上步骤建立消能减震支撑设计方案，合理的布置消能支撑能够提高减震结构的效果，低层节点加入防屈曲耗能^[13]，其他节点添加下面的黏滞阻尼器，获取更加牢固的消能减震结构。

1.2 设置黏滞阻尼器

本文采用的用作消能支撑的阻尼器连接方式是斜向以及人字形支撑。三根 H 型钢(一根水平方向和两根斜向)，两个黏滞阻尼器均为水平方向，限位滑动装置，橡胶支座两个组合在一起形成人字形消

能支撑。橡胶支座作为位移形阻尼器确保结构支撑平面的稳定^[14]。

消能支撑设置在合理的位置能够更好地完善震后体育场混凝土结构的消能减震效果，但是连接消能支撑的结构遭到损坏时，其不能很好地起到消能作用。本文将所有体育场混凝土结构的消能支撑连接点的位置四周用钢板加固^[15]，利用混凝土将缝隙填满。描述阻尼力的计算公式如式(8)：

$$G_d = M_v \text{Sgn}(I) |I|^{\gamma} \alpha_{di} \quad (8)$$

其中： M_v 是根据需要设计的阻尼常数($\text{kN}/(\text{mm}/\text{s})^r$)； G_d 是阻尼力强度值； I 和 γ 分别是阻尼器的活塞与阻尼器外壳的相对运动速度和依照设计需求设计的速度指数，其值在 0.1 ~ 1.0 之间，本文选取其值是 0.3。 γ 选取的数值很小，主要是为了阻尼力在速度小的前期增长的速度大，速度大的尾期增长的速度小。如果阻尼力的速度高于预期的速度最大值，相对的阻尼力会破坏混凝土结构连接点。

大震情况下，为了提高体育场的抗震性，要求体育场混凝土结构的期望消能支撑能够增加接近 30% 的附加等效阻尼比，并且阻尼器的出力基本实现设计值最大化。起初假设各个层之间都有阻尼器，通过下列公式计算结构 i 点单方向的阻尼力最大值 G_{id} ：

$$G_{id} = \alpha \omega_d P_i \quad (9)$$

其中： ω_d 和 P_i 分别是附加等效阻尼比的附加值和小震中第 i 个节点的节点间剪力； α 值的范围是 5 ~ 10，若各个层均有阻尼器，则 α 取值为 5。

通过粗略的计算得到设有阻尼器的消能支撑估计参数是 $\gamma = 0.3$ ，设定 $L_d = 175 \text{ kN}/\text{mm}$ 是阻尼器 X、Y 方向的原始刚度。阻尼器轴向原始刚度和斜向刚度连接刚度 X 向的比值为斜向支撑组合刚度：

$$L_b = \frac{G_d \cos^2 \beta_i}{1/L_d + \gamma G_{id}} \quad (10)$$

其中： β_i 是框架梁和斜撑之间的夹角； L_b 是斜向支撑刚度值； L_d 是混凝土立方体的抗压强度数值。由于体育场混凝土结构中底层节点属于最脆弱的节点，往上脆弱程度会依次减少，因此通常可设置体育场混凝土结构中底层节点的 XY 方向阻尼器数量为 8，上层节点的 XY 方向设置阻尼器的数量为 6。

2 实验分析

2.1 非线性时程分析

为了验证本文方法的有效性，通过 EL-Centro

(NS)地震波、Newhall 地震波分析采用本文方法建立的某震后体育场修复施工中的混凝土减震新结构和原结构非线性动力,该体育场要求的最低抗震阻

尼比是 10%,检测采用本文方法构建的新结构和原结构在两种不同地震波下的顶点侧移情况,分别用图 1 和图 2 描述。

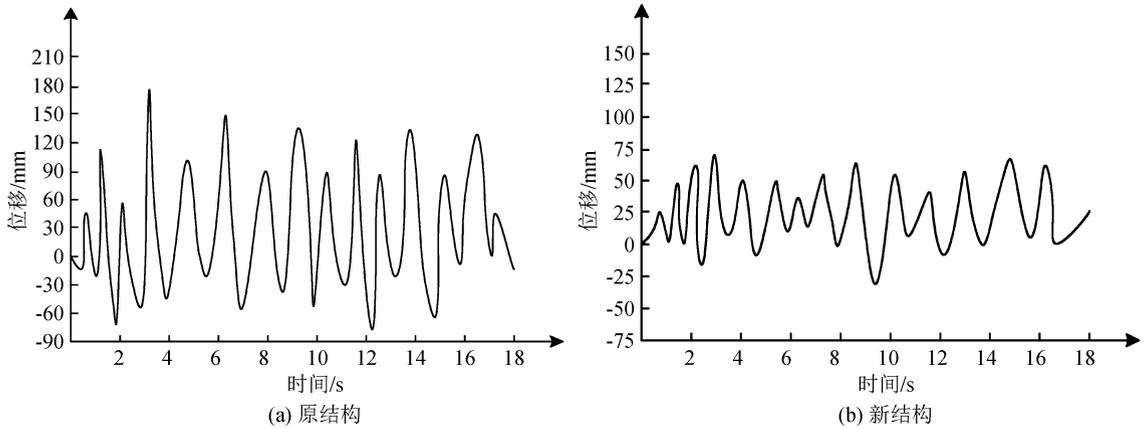


图 1 EL-Centro (NS)下原结构和新结构顶点侧移

Fig.1 Top drift of the original structure and the new structure under EL-Centro wave (NS)

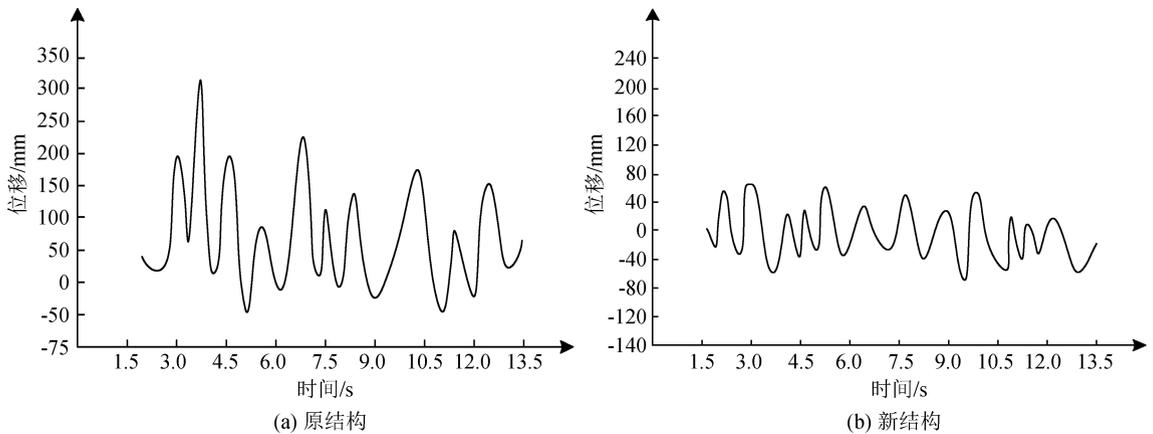


图 2 Newhall (0 °C)下原结构和新结构顶点侧移

Fig.2 Top drift of the original structure and the new structure under Newhall wave (0 °C)

对比分析图 1 和图 2 得到:在 EL-Centro(NS)及 Newhall 地震波作用下,原结构和新结构顶点均有明显的侧移情况,但是新结构的侧移程度明显比原结构小,EL-Centro(NS)地震波情况下,原结构与新结构的顶点侧移最大值分别是 180 mm 和 74 mm,二者相差 106 mm,平均位移分别是 90 mm 和 28 mm,二者相差 62 mm。Newhall 地震波情况下,原结构与新结构的顶点侧移最大值分别是 310 mm 和 75 mm,二者相差 235 mm,平均位移分别是 150 mm 和 40 mm,二者相差 110 mm。分析这些数据可以说明,本文加固设计方法在不同地震作用下,可大大降低震后体育场修复中混凝土结构的节点侧移,提高结构的稳定性。

2.2 不同震况下结构不同方向的时程响应

为了验证本文方法设计的震后体育场混凝土结

构在不同地震情况下不同方向的时程响应情况,实验设定 60 gal \times 1.23 和 180 gal \times 1.23 分别为时程分析过程中的 8 度小震和大震的输入峰值加速度,实验体育场混凝土结构弹性阻尼比是 6%。将未采用本文设计方法添加阻尼的体育场结构作为原结构,用 UA0 表示,采用本文方法添加阻尼器消能减震支撑结构的体育场结构为新结构,用 UA1 表示。在新结构中设置消能支撑体系,设置 6 个防屈曲耗能支撑在底层节点,设置 40 个黏滞阻尼器在节点 2~7 中。

在 8 度小震和 8 度大震情况下,X、Y 方向输入拟合某体育场特征周期 0.5 s 的人工时程和 EL Centno 时程,运算该体育场结构结构地震响应。得到原结构和新结构种各节点的位移角以及相邻节点间位移角的平均值如表 1 所列。

表 1 节点间位移角平均值

Table 1 Average value of internode drift ratio

震级	节点	UA0(L1)节点间位移角/rad		UA1(L2)节点间位移角/rad		节点间位移角比(L2-L1)/L1	
		X 向	Y 向	X 向	Y 向	X 向/%	Y 向/%
小震	7	1/1776	1/1971	1/1832	1/1726	-3	14
	6	1/838	1/869	1/872	1/831	-4	4
	5	1/634	1/643	1/1113	1/926	-43	-30
	4	1/556	1/561	1/951	1/864	-41	-35
	3	1/531	1/538	1/941	1/893	-43	-39
	2	1/515	1/537	1/874	1/849	-41	-37
	1	1/829	1/876	1/1291	1/1316	-36	-33
大震	7	1/326	1/314	1/289	1/356	12	-12
	6	1/196	1/177	1/191	1/191	-6	-7
	5	1/145	1/131	1/206	1/194	-30	-32
	4	1/151	1/131	1/194	1/172	-22	-24
	3	1/137	1/95	1/201	1/174	-33	-45
	2	1/135	1/92	1/193	1/196	-29	-53
	1	1/169	1/145	1/225	1/233	-25	-60

分析表 1 可得:通过本文方法中的阻尼比式(7)运算出新结构在小震和大震情况下的等效阻尼比是 19%和 13%,都高于实验体育场的最低抗震阻尼比

10%,说明本文方法设计体育场混凝土结构稳定性满足要求。

图 3 和图 4 描述的是 8 度小震和大震原结构和

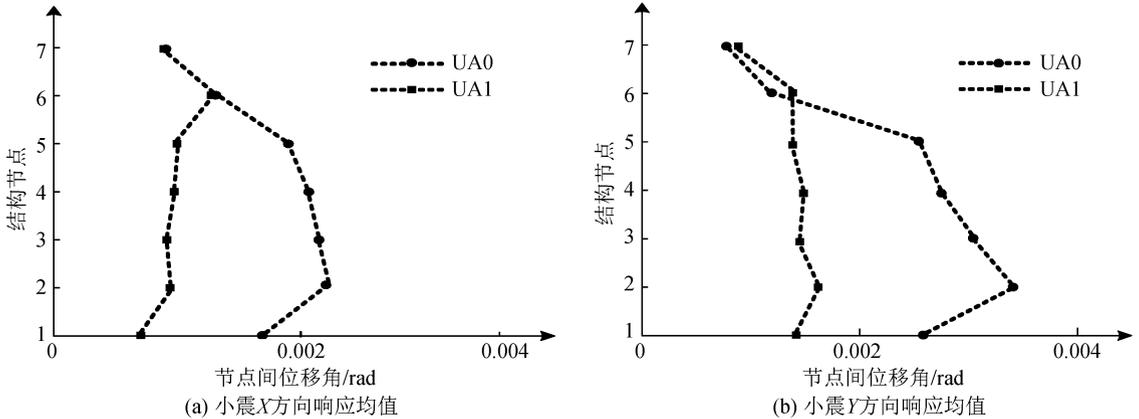


图 3 8 度小震 X、Y 方向响应均值

Fig.3 Mean response in X and Y directions under minor earthquake of 8 degree

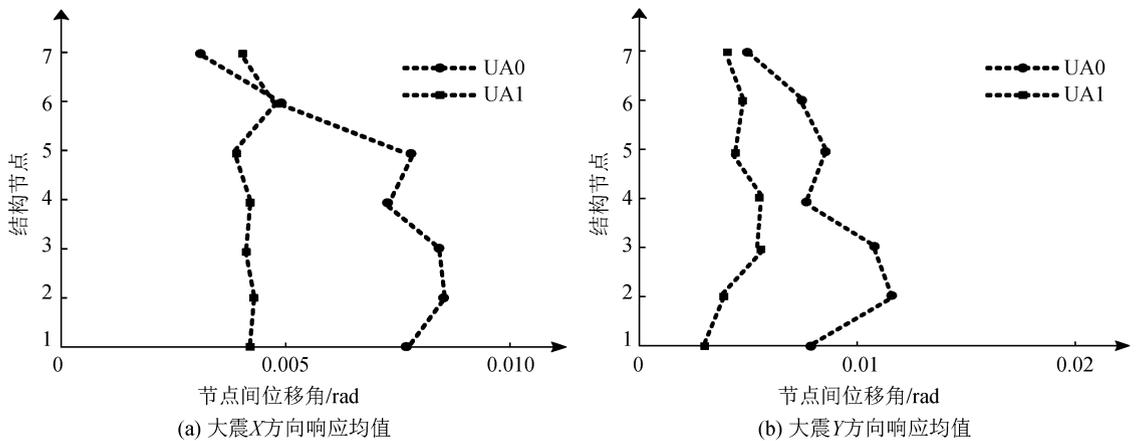


图 4 8 度大震 X、Y 方向响应均值

Fig.4 Mean response in X and Y directions under rare earthquake of 8 degree

新结构 X、Y 向的响应均值对比曲线。

分析图 3 和图 4 得到:采用本文方法设计的减震新结构和原结构比较,在 8 度小震以及大震 X、Y 方向时新结构的最小、最大节点位移角都高于原结构;8 度小震时新结构节点的 X、Y 方向的位移角最高分别是节点 6 和节点 2 对应的 X、Y 向位移 0.001 1、0.001 2,而该种情况下原结构的节点间位移角最高都是节点 2 对应的 X 向和 Y 向位移角,分别是 0.001 9、0.001 86,对比可得该种情况下本文方法设计的体育场新结构的节点间最高位移角低于原结构,稳定性更高。

8 度大震新结构节点的 X、Y 方向位移角最高是节点 6 和节点 4 对应的 X、Y 向位移角 0.001 1、0.005 8,而该种情况下原结构的节点间位移角最高都是节点 2 对应的 X 向和 Y 向位移角,分别是 0.007、0.108 6。对比可得该种情况下本文方法设计的体育场新结构的节点间最高位移角低于原结构,稳定性更高。

综合分析以上实验结果说明,在不同的地震波下本文方法构建的体育场修复施工中混凝土结构的节点侧移小,不同的地震强度下本文方法设计的混凝土结构节点间位移角低,结构抗震性能强。

3 结论

为了提高震后体育场修复施工中混凝土结构的稳定性和抗震性能,文章采用基于性能和需求的消能减震设计方法,合理布置消能支撑结构和阻尼器,耗散地震产生的震力,向下转移能量,使上部结构受力小,提高薄弱层的抗震能力。实验分析得到不同的地震波下采用本文方法设计的新结构侧移明显低于原结构,不同的地震强度下本文方法设计的混凝土结构节点间位移角低,结构抗震性能强,说明新结构更加稳定,具备较强的抗震性能。

参考文献(References)

[1] 王艳云,叶献国,蒋庆,等.基于性能的钢筋混凝土框架结构震后损失评估[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):16-20.
WANG Yanyun, YE Xianguo, JIANG Qing, et al. Performance-based Seismic Loss Assessment in RC Structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(5): 16-20.

[2] 于敬海,陈险连.某高层建筑采用防屈曲支撑的减震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(2):121-125.
YU Jinghai, CHEN Jianlian. Research on Damping Performance

of a High-rise Building with BRB[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(2): 121-125.

[3] 杨峰斌,晋娟茹,陈雪君.混凝土结构加固设计方法优选[J].施工技术,2016,45(21):22-24.
YANG Fengbin, JIN Juanru, CHEN Xuejun. Concrete Structure Reinforcement Design Method Preference[J]. Construction Technology, 2016, 45(21): 22-24.

[4] 张瑞甫,曹森,唐和生,等.3·11大地震中大空间结构破坏主因及加固对策[J].结构工程师,2015,31(2):21-27.
ZHANG Ruifu, CAO Miao, TANG Hesheng, et al. Study on the Joint Damage and Retrofitting of a Large Span Structure after the Great East Japan Earthquake[J]. Structural Engineers, 2015, 31(2): 21-27.

[5] 肖珍珍,王登根,陈建叶,等.碾压混凝土高拱坝坝肩稳定及坝体开裂静动力分析[J].岩土力学,2015,36(12):3541-3547, 3575.
XIAO Zhenzhen, WANG Dengyin, CHEN Jianye, et al. Static and Dynamic Analyses of Abutment Stability and Dam Cracking of a Roller-compacted Concrete High-arch Dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3541-3547, 3575.

[6] 冷捷,刘文渊,王卫,等.形状记忆金属自复位钢框架抗震性能分析[J].工程抗震与加固改造,2017,39(2):129-135.
LENG Jie, LIU Wenyuan, WANG Wei, et al. Seismic Behavior Analysis of Self-Centering Steel Frame with Shape Memory Alloy[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 129-135.

[7] 周颖,李宏拙,邢丽丽.混合控制消能减震伸臂桁架上海中心抗震性能研究[J].振动与冲击,2016,35(21):188-195, 228.
ZHOU Ying, LI Hongmiao, XING Lili. Aseismic Performance of Shanghai Center with Hybrid Control Energy Dissipation Outriggers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(21): 188-195, 228.

[8] 孙欣,丁建国,朱炜.基于优化模糊控制规则的磁流变阻尼减震结构地震反应分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(1):51-57, 63.
SUN Xin, DING Jianguo, ZHU Wei. Seismic Response Control of the Structure with Smart Mitigation System Using Magnetorheological Fluid Dampers Based on Optimizing Fuzzy Control Rules[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(1): 51-57, 63.

[9] 杜永峰,祁磊,黄小宁,等.基于变形和能量双参数损伤的消能摇摆架-框架结构抗震性能分析[J].工业建筑,2016,46(10):59-64, 88.
DU Yongfeng, QI Lei, HUANG Xiaoning, et al. Aseismic Performance Analysis of Energy-dissipation Light Weight Rocking Frame Structure Based on Deformation and Energy Damage[J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 59-64, 88.

[10] 夏建中.无粘结钢绞线体外预应力加固钢筋混凝土梁设计计算方法探讨[J].四川建筑科学研究,2017,43(3):46-48.
XIA Jianzhong. Discussion on Reinforced Concrete Beams

- Strengthened by External Prestressing with Non-binding Stranded Steel Wire [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43 (3):46-48.
- [11] 李红,刘胜春.增大截面法加固钢筋混凝土构件的正截面承载力研究[J].北京交通大学学报,2015,39(4):96-100.
- LI Hong, LIU Shengchun. Research on Cross-section Capacity of Reinforced Concrete Member Strengthened by Increasing-Section Method [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(4):96-100.
- [12] 郑晓芬,孙汇涓,汪英俊,等.屈曲约束支撑-不规则混凝土结构体系的弹塑性地震反应分析[J].结构工程师,2016,32(4):139-146.
- ZHENG Xiaofen, SUN Huijuan, WANG Yingjun, et al. Elasto-Plastic Seismic Response Analysis of an Asymmetric-plan Reinforced Concrete Frame with Buckling-restrained Braces [J]. Structural Engineers, 2016, 32(4):139-146.
- [13] ANDERLINI E, FOREHAND D I M, STANSELL P, et al. Control of a Point Absorber Using Reinforcement Learning [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1681-1690.
- [14] LIN P C, CONG Y H, ZHANG B Y. Fluorinated Liquid Crystalline Surfactants for Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(12):4187-4199.
- [15] 赵祥,刘忠华,王社良,等.多维地震作用下大跨空间结构的减震控制分析[J].地震工程学报,2018,40(3):398-405.
- ZHAO Xiang, LIU Zhonghua, WANG Sheliang, et al. Seismic Control Analysis of Large-span Space Structures under Multi-dimensional Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3):398-405.