

风雨操场建筑基于中震性能设计的抗震分析*

乐风江¹, 段一非¹, 肖明², 季欢欢³

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 十堰市公路养护中心, 湖北 十堰 442011;

3. 新疆凯盛建材设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 目前,我国对风雨操场类建筑结构的设计,是以小震弹性计算结构的内力和变形,再辅之以各种抗震技术措施以考虑大震影响,对于其中震及大震作用下的抗震性能不够明确.本文以某单层带附属框架的风雨操场小震弹性设计模型为基准,分别进行中震不屈服和中震弹性设计,比较三种设计方法由性能目标不同所引起的构件配筋变化及抗震性能差别.研究认为:基于中震性能设计的风雨操场建筑较小震弹性设计结构总配筋量有所增加,更能保证中震可修、大震不倒的设防要求.

关键词: 风雨操场;中震性能设计;小震弹性设计;抗震性能

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2021.01.28.0001

中图分类号: TU245.2; TU399 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2022)01-0088-06

引文格式: 乐风江, 段一非, 肖明, 季欢欢. 风雨操场建筑基于中震性能设计的抗震分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 88-93.

英文引文格式: YUE Fengjiang, DUAN Yifei, XIAO Ming, JI Huanhuan. Aseismic analysis of gymnasium based on performance design method under moderate earthquake[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 88-93.

Aseismic Analysis of Gymnasium Based on Performance Design Method under Moderate Earthquake

YUE Fengjiang¹, DUAN Yifei¹, XIAO Ming², JI Huanhuan³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Shiyan Road Maintenance Center, Shiyan Hubei 442011, China;

3. Xinjiang Kaisheng Building Materials Designing Institute(Co., Ltd.), Urumqi Xinjiang 830000, China)

Abstract: At present, structure design method of gymnasiums in China calculates the internal force and deformation of structure by elastic design under minor earthquake. The method considers major earthquakes by various seismic technical measures, but not verify seismic performance under the action of moderate and major earthquakes. In this paper, based on the minor earthquake elastic design model of a single-storey gymnasiums with attached frame, the moderate earthquake non-yielding design and moderate earthquake elastic design were carried out, and the variation of reinforcement and the difference of seismic performance were compared caused by the different performance objectives of the three design methods. The research shows that the reinforcement amount of structure with the gymnasiums was increased based on the design of moderate earthquake performance, compared to the minor earthquake elastic design of that. The former can better guarantee the fortification requirements of mendable under moderate earthquakes and no collapse under major earthquakes.

Key words: gymnasium; the performance-based design method under moderate earthquake; the elastic design method under minor earthquake; seismic performance

0 引言

我国现行的结构抗震设计是基于能力设计的小震弹性设计法,对于风雨操场这一类建筑结构一般不做大震下的结构分析与验算.风雨操场类建筑通常采用上部网架下部混凝土框架的混合结构体系,对这种结构体系如果只进行小震下的弹性设计,由于结构空旷和两种结构体系的混合,其中震和大震作用下的抗震性能较为复杂,可靠性难以保证.

* 收稿日期: 2021-01-28

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2016D01C064).

作者简介: 乐风江(1965-),男,副教授,硕士生导师,主要从事工程结构抗震的研究, E-mail: yuefjzsj@126.com.

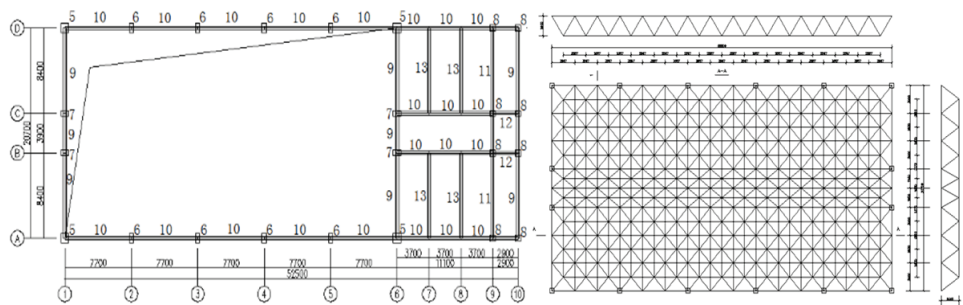
中震设计是比小震设计更为全面地考虑性能设计的一种设计方法,在国外规范如美国UBC94、新西兰NZS4203、日本BSL、欧洲Eurocode 8中被广泛运用^[1-3]。随着国内基于性能设计理论体系的完善,我国GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》(以下简称《抗规》)^[4]引入两种设防烈度地震下的性能设计方法——中震弹性设计和中震不屈服设计。中震弹性设计指的是取设防烈度地震影响系数计算结构的内力和构件承载力,按不考虑地震效应调整的设计值复核。中震不屈服设计指的是取设防烈度地震影响系数,不考虑地震作用效应的调整,对结构构件承载力按标准值进行复核。按中震弹性设计时,取消了内力调整系数,保留荷载分项系数,材料强度按照材料的设计强度取值,这种设计方法保留了结构的安全可靠度,构件在中震下处于弹性状态。采用中震不屈服设计方法时,设计的构件在设防烈度地震影响系数作用下通常会达到弹性的极限状态,结构设计使用的钢筋、混凝土等材料取材料强度的标准值^[5-6]。对中震设计是否能够提高结构抗震性能,国内学者有着不同看法^[7-10]。同时,中震性能设计尚未在风雨操场类结构设计中得到应用,中震性能设计对该结构体系的合理性研究也较少见。中震性能设计相比小震弹性设计能否有效保证风雨操场类建筑结构的大震性能,从而为结构设计者找到一种在中震、大震下抗震性能更加明确和较为方便的设计方法,值得进一步研究。

本文选取单层带附属框架的风雨操场建筑结构,通过小震弹性设计、中震弹性设计及中震不屈服设计分别建立有限元模型,进行动力弹塑性时程分析,对比其动力响应以研判结构的抗震性能。

1 风雨操场混合结构设计

1.1 工程概况

新疆某单层带附属框架风雨操场结构,比赛大厅部分层高8.1 m,附属框架部分首层层高4.2 m,二层层高3.9 m。屋盖采用上弦支承正放四角锥网架结构。乙类设防,抗震设防烈度为8度(0.3 g),第三组,场地类别为Ⅱ类。整体结构采用YJK结构设计软件按小震设计法进行设计,并按《抗规》通过抗震技术措施以满足中震、大震性能要求,其模型简称为M1,网架部分采用MST2010进行满应力优化设计后导入YJK模型。结构平面布置如图1所示,梁、柱、网架杆件截面尺寸见表1。混凝土强度等级为C30,箍筋和纵筋采用HRB400,网架钢管采用Q235-B。计算得到M1的横向最大层间位移角:1/650(第2层);纵向最大层间位移角:1/576(第2层)。



(a) 1层结构平面布置(2层相同) (b) 网架结构布置

图1 结构平面布置

表1 M1、M2、M3构件截面尺寸

名称	编号	M1截面尺寸/mm	M2、M3截面尺寸/mm	名称	编号	M1截面尺寸/mm	M2、M3截面尺寸/mm
钢管	1	60×3.50		框架梁	9	350×800	350×750
	2	76×4.00	同M1		10	350×650	300×600
	3	89×4.00			11	300×650	
	4	114×4.50			12	300×600	同M1
框架柱	5	1 000×1 000	900×900	13	300×500		
	6	900×1 000	800×900				
	7	900×800	同M1				
	8	800×800					

风雨操场建筑的大空间结构部分,法向刚度较为柔弱。采用小震弹性设计时,由于对中震、大震性能的判断依据不足,常常凭经验采用较大的柱截面尺寸,认为以此可以提高对大震性能的保证,但通常会导致柱轴压

比和配筋率较低. 为了充分说明中震设计的可行性, 在保证模型小震弹性位移角不小于1/550的同时, 对梁柱截面尺寸进行调整, 以适当增加柱轴压比、减小柱截面而改善结构的经济性和美观性为目的, 进行中震性能设计, 中震弹性设计模型简称M2, 中震不屈服设计模型简称M3, 截面尺寸见表1, M2、M3构件截面尺寸一致. 计算得到M2、M3模型小震作用下的横向(X向)最大层间位移角: 1/615(第2层); 纵向(Y向)最大层间位移角: 1/551(第2层), 更接近于位移角限值1/550.

1.2 工程量分析

由于不同性能目标下楼板的工程量基本相同, 因此只统计梁、柱的工程量, 钢筋用量如表2所示.

表 2 下部框架钢筋用量统计

	M1钢筋用量	M2钢筋用量		M3钢筋用量	
	合计/kg	合计/kg	变化率/%	合计/kg	变化率/%
第一层梁	10 360	11 787	13.8	11 057	6.73
第二层梁	10 163	11 249	10.7	10 477	3.1
合计	20 523	23 036	12.2	21 534	4.92
第一层柱	16 640	16 345	-1.8	19 750	18.7
第二层柱	9 973	15 412	54.5	10 641	6.7
合计	26 613	31 757	19.3	30 391	14.2

由表2可知, M2相比M1梁钢筋用量增加12.2%, 柱钢筋用量增加19.3%, M3相比M1梁钢筋用量增加4.92%, 柱钢筋用量增加14.2%, 截面配筋率均有所增加, 其中: M2的第一层柱钢筋用量相比M1减少了1.8%, 第二层柱钢筋用量增加高达54.5%. 这是由于与小震弹性设计相比, 中震弹性设计取消了构件的内力调整系数, 实际上相当于取消了“强柱弱梁”“强剪弱弯”等抗震概念设计所要求的内力调整^[7], 从而导致一层梁配筋反而增加, 一层柱配筋甚至略有减小; 另外, 中震弹性设计采用设防地震烈度值, 相当于放大了2.85倍地震作用, 因此二层柱配筋大幅度增加. 在局部构件截面减小的情况下, 中震弹性设计较小震弹性设计钢筋用量增加小于20%, 中震不屈服设计较小震弹性设计钢筋用量增加小于15%, 均可在工程应用中实现, 中震性能设计用于风雨操场类结构经济上可行.

2 有限元分析

2.1 模型建立

利用YJK-ABAQUS接口程序将建立的模型转为ABAQUS有限元模型, 梁、柱构件及网架杆件采用三维梁单元B32模拟, 楼板采用壳单元S4R模拟, 混凝土本构采用我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[11]建议的混凝土单轴本构模型, 钢材本构采用理想弹塑性模型, 结构三维有限元分析模型如图2所示. 两个软件算得的M1、M2、M3的总质量差值分别为0.352%、0.706%和0.573%; 前六阶周期差值小于6%, 验证了从YJK转入ABAQUS模型的可靠性, 结构周期对比见表3.

表 3 结构周期对比

振型	小震弹性	小震弹性	中震弹性	中震弹性	中震不屈服	中震不屈服
	YJK	ABAQUS	YJK	ABAQUS	YJK	ABAQUS
	计算周期	计算周期	计算周期	计算周期	计算周期	计算周期
一阶X向平动	0.321 6	0.318 0	0.303 2	0.301 1	0.303 5	0.301 3
一阶Y向平动	0.301 7	0.295 3	0.281 0	0.280 5	0.281 3	0.280 7
一阶扭转	0.293 4	0.283 6	0.266 0	0.265 2	0.266 5	0.265 6
二阶X向平动	0.234 2	0.225 4	0.209 0	0.203 6	0.209 3	0.205 2
二阶Y向平动	0.220 4	0.213 6	0.197 7	0.186 5	0.198 0	0.187 0
二阶扭转	0.198 0	0.168 5	0.165 2	0.165 0	0.165 6	0.165 1

2.2 地震波选择

根据《抗规》建议选波方法, 选取3条地震波: 1条人工波(Ren01波), 2条天然波(Chi-Chi2977波、Northridge 969波), 考虑多向地震作用, 按地震动最大峰值加速度比例为沿结构弱轴方向: 沿结构强轴方向: 沿结构竖向=

1 : 0.85 : 0.65调整, 并分别对地震波进行归一化处理, 三条地震动反应谱与规范谱对比如图3所示. 可以看出模型地震波规范谱曲线与时程反应谱曲线在所对应的结构前三阶振型周期点上相差均小于20%.

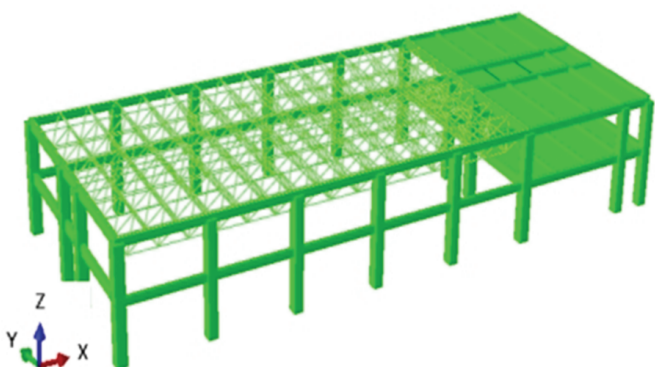


图 2 结构三维有限元分析模型

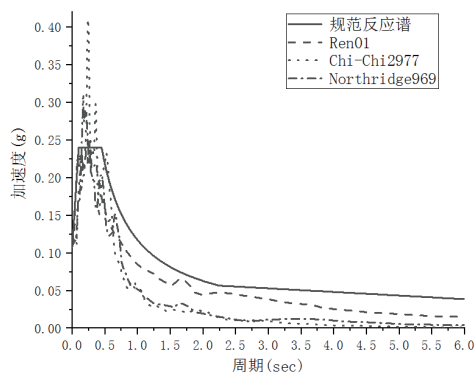


图 3 地震动反应谱及规范反应谱

3 抗震性能评估

3.1 性能评估标准

为能够全面评估小震弹性、中震不屈服、中震弹性设计结构在中震和大震作用下的抗震性能, 本文从结构整体性能和局部构件性能两方面综合评估. 层间位移角与结构的破坏程度有较好的相关性, 《抗规》规定钢筋混凝土框架结构弹性层间位移角限值为1/550, 并在附录M中给出了小震、中震、大震实现抗震性能要求的位移角参考指标, 其中: 中震作用下要求性能3、4分别小于2倍和3倍弹性位移角限值, 大震作用下性能3、4分别小于4倍弹性位移角限值和不大0.9倍塑性位移角限值; 丁世伟等^[12]基于《混凝土结构设计规范》中的损伤演化系数提出了混凝土构件损伤性能评估标准与评估方法, 将其转化为ABAQUS损伤因子所对应标准见表4.

表 4 混凝土构件损伤性能评价标准

性能指标	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
ϵ_c	[0, $0.8\epsilon_{c,r}$]	[$0.8\epsilon_{c,r}$, $1.0\epsilon_{c,r}$]	[$1.0\epsilon_{c,r}$, $1.3\epsilon_{c,r}$]	[$1.3\epsilon_{c,r}$, $1.7\epsilon_{c,r}$]	[$1.7\epsilon_{c,r}$, $2.0\epsilon_{c,r}$]	[$2.0\epsilon_{c,r}$, ∞]
d	[0, 0.254]	[0.254, 0.325]	[0.325, 0.423]	[0.423, 0.531]	[0.531, 0.593]	[0.593, 1.0]

3.2 中震作用下的分析结果

中震作用分析时输入的地震波加速度峰值PGA取300 gal (cm/s^2), 计算得到M1、M2和M3下部结构在3条地震波作用下平均最大层间位移角分别为1/318、1/459和1/444, 其弱轴Y方向平均最大层剪力及平均倾覆弯矩如图4、图5所示, 网架平均竖向位移分别为0.044 5 m、0.049 0 m和0.048 9 m, 局部构件损伤状态见表5, 混凝土梁损伤平均值分别为0.123、0.100和0.105, 混凝土柱损伤平均值分别为0.069、0.032和0.032.

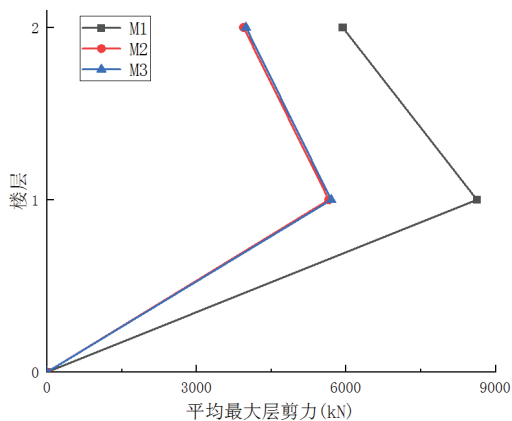


图 4 中震作用下Y向平均最大层剪力

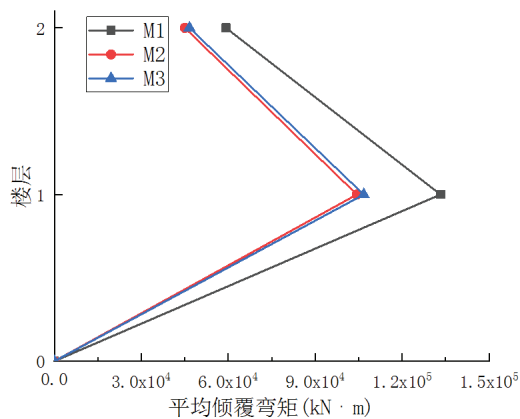


图 5 中震作用下Y向平均倾覆弯矩

表 5 中震作用下构件性能状态统计

构件类型		无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
M1	梁	78%	5.4%	11.8%	4.4%	1.4%	0
	柱	100%	0	0	0	0	0
M2	梁	81.4%	2.4%	6.9%	9.3%	0	0
	柱	100%	0	0	0	0	0
M3	梁	80.4%	1%	5.4%	13.2%	0	0
	柱	100%	0	0	0	0	0

中震作用下, M1的平均最大层间位移角小于2倍弹性位移角限值, 满足性能3要求, 而M2和M3的平均最大层间位移角仅为M1的0.7倍, 远小于M1的结构响应, 说明经中震性能设计的模型提高了结构的中震性能. 由图4、图5可知, M2和M3的结构Y方向平均最大层剪力与平均倾覆弯矩基本一致, M1的两项指标相较于M2、M3偏大, 说明经中震性能设计的结构减弱了地震作用对其影响. M2、M3的网架竖向位移较M1增加了11%, 由于网架竖向变形受下部结构刚度影响, 中震作用下, 三个模型结构塑性变形较小, 仍基本处于弹性阶段, M1的下部结构构件截面比M2、M3大, 结构刚度相对较大, 对网架结构的约束作用较强, 因而竖向位移较小. 通过表5从构件层次进行性能评估, 可以发现M1、M2和M3的混凝土柱均为无损伤性能状态, 但M1的柱损伤平均值超过M2、M3的2倍; M1有1.4%的混凝土梁进入比较严重损坏. M2、M3最大损坏程度仅为中度损坏, M2、M3中度损坏状态梁的数量达到M1的2~3倍, 但梁的损伤平均值却比较接近. 三个模型均能达到中震性能要求.

3.3 大震作用下的分析结果

大震输入的地震波加速度峰值PGA取510 gal (cm/s^2), 计算得到M1、M2和M3下部结构在3条地震波作用下平均最大层间位移角分别为1/157、1/236和1/228, 其弱轴Y方向平均最大层剪力及平均倾覆弯矩如图6、图7所示, 网架平均竖向位移分别为0.067 0 m、0.057 9 m和0.057 6 m, 局部构件损伤状态见表6, 混凝土梁损伤平均值分别为0.212、0.146和0.155, 混凝土柱损伤平均值分别为0.167 3、0.082和0.087.

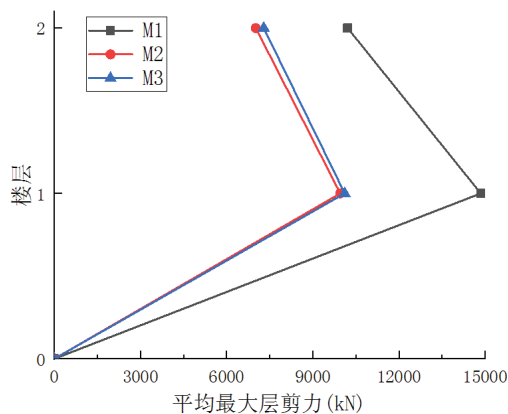


图 6 大震作用下Y向平均最大层剪力

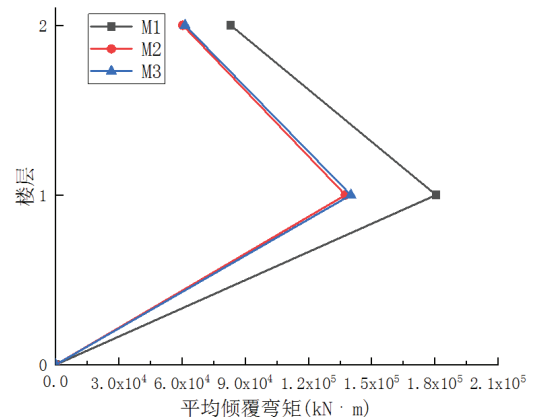


图 7 大震作用下Y向平均倾覆弯矩

大震作用下, M1、M2和M3下部结构基本呈现与中震作用下一致的规律, M1的平均最大层间位移角小于4倍弹性位移角限值, 具有明显的塑性变形, 而M2和M3的平均最大层间位移角约为M1的0.67倍, 远小于M1的结构响应, 满足“大震不倒”的设防要求. 由图6、图7可知, M2和M3的平均最大层剪力与平均倾覆弯矩基本一致, M1的两项指标同样大于M2、M3, 说明经中震性能设计的结构减弱了地震作用对其影响. 上部网架结构在大震作用下呈现出与中震作用下相反的规律, M2、M3的网架竖向位移较M1减少了14%, 这是由于大震作用下, 结构进入塑性, 结构刚度发生退化, 此时M1下部混凝土框架结构刚度小于M2、M3, 对网架的支承约束作用较弱所致. 从表6局部构件性能可以发现, 大震作用下, M1的柱构件出现中等损坏状态, 而M2、M3在构件截面减小的情况下依旧保证全部为无损伤状态, M1柱损伤平均值同样为M2、M3的2倍; 三种模型的梁构件均出现严重损坏状态, 但M1梁损伤平均值远大于M2、M3, M1的梁构件整体损坏程度基本大于M2、M3, 仅中度损坏状态构件竖向小于M2、M3, 中震设计具有更好的大震性能.

表 6 大震作用下构件性能状态统计

	构件类型	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	比较严重损坏	严重损坏
M1	梁	67.2%	8.3%	12.7%	5%	4.4%	2.4%
	柱	77.1%	12.5%	9%	1.4%	0	0
M2	梁	80.4%	1.5%	4.4%	10.7%	1.5%	1.5%
	柱	100%	0	0	0	0	0
M3	梁	78.4%	2%	1%	14.2%	2.9%	1.5%
	柱	100%	0	0	0	0	0

4 结论

基于中震性能设计的单层带附属框架的风雨操场建筑结构相较小震弹性设计,结构总配筋用量增加不大,中震作用下,结构层间位移角更小,中震性能可以得到有效保证;大震作用下,结构层间位移角及梁柱损伤平均值远小于小震弹性设计,可以提高结构的大震性能.将中震弹性设计和中震不屈服设计应用于风雨操场建筑有助于保证结构的中震、大震性能,并能满足实际工程中的实用性和经济性.

参考文献:

- [1] 王亚勇,郭子雄,吕西林.建筑抗震设计中地震作用取值:主要国家抗震规范比较[J].建筑科学,1999,5:36-39+55.
- [2] 李慧.中、美、欧、日建筑抗震规范地震作用对比研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [3] European Committee for Standardization. Eurocode 8: design of structures for earthquake: EN 1998—1—2010[S]. Berlin: Springer-Verlag, 2014.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] Applied Technology Council. A critical review of current approaches to earthquake resistant design: ATC-34[S]. Redwood: Applied Technology Council, 1995.
- [6] 肖明.基于中震性能设计的风雨操场建筑抗震分析[D].乌鲁木齐:新疆大学,2019.
- [7] 王亚勇,岳茂光,李宏男,等.基于不同性能目标的RC结构抗震设计的效益分析[J].土木工程学报,2008,3:37-45.
- [8] 周颖,吕西林.中震弹性设计与中震不屈服设计的理解及实施[J].结构工程师,2008,24(6):1-5+12.
- [9] 张航,宋文晶,梁志远,等.不同抗震性能目标下的超限结构内力设计值对比分析[J].建筑结构,2013,43(S1):603-605.
- [10] 韩小雷,刘颖,侯兆熔,等.基于构件性能评估的RC框架结构中震与小震设计对比研究[J].建筑结构,2020,50(10):39-43+27.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 丁世伟,张慎,王杰,等.基于损伤的构件抗震性能评价方法研究与软件开发[J].建筑结构,2016,46(6):36-42.

责任编辑:张自强