

王培先,王超,彭立顺.强震环境下带钢避难建筑抗震模型设计[J].地震工程学报,2018,40(2):213-218.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.213

WANG Peixian, WANG Chao, PENG Lishun. Aseismic Model Design of Steel Strip Refuge Buildings Under Strong Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 213-218. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.213

强震环境下带钢避难建筑抗震模型设计^①

王培先¹, 王超², 彭立顺³

(1. 惠州市广播电视大学, 广东 惠州 516007; 2. 兰州石化职业技术学院土木工程系, 甘肃 兰州 730060;
3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 避难建筑通常采用置换混凝土方法抗震, 建筑对高强度地震的抗震性能差。因此提出高强度地震下带钢避难建筑抗震设计方法, 采用复杂网络带钢避难建筑加固模型对加固前建筑的混凝土强度与荷载能力进行计算, 增大框架柱截面, 提升带钢避难建筑荷载。采用复合墙体受力加固模型提升建筑墙体抗震性。对加固后建筑模型的坍塌风险评估时, 采用带钢避难建筑坍塌的全概率衡量加固后建筑在设计使用年限内的抗坍塌安全性。设计使用年限内加固后的带钢避难建筑的强震CRC超出概率是 $P(IM > CRC)$, 确保其在高强度地震下具有较高的抗震性能。实验结果说明, 所提方法下的带钢避难建筑在遇到强震情况时具有较高的抗震性能。

关键词: 高强度地震; 复杂网络; 带钢避难建筑; 荷载; 抗震性能; 坍塌风险评估

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0213-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.213

Aseismic Model Design of Steel Strip Refuge Buildings Under Strong Earthquakes

WANG Peixian¹, WANG Chao², PENG Lishun³

(1. Huizhou Radio and Television University, Huizhou 516007, Guangdong, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou 730060, Gansu, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Refuge buildings often adopt the concrete replacement method to resist earthquakes, which results in a poor seismic performance when the buildings are subjected to strong earthquakes. Therefore, this study investigates the aseismic design method for steel strip refuge buildings under strong earthquakes. A complex network strip steel refuge building reinforcement model was adopted to calculate the strength and load capacity of a reinforced concrete before reinforcement. The section of the frame column was enlarged, and the load of the refuge building was increased. The earthquake resistance of the building wall was improved by a composite wall reinforcement model. When evaluating the collapse risk assessment of the reinforced building model,

① 收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家档案局科技项目(2017-X-43)

作者简介: 王培先(1976-), 男, 云南罗平人, 讲师, 工程师, 国家注册一级建造师, 研究方向: 建筑与土木工程研究方向。

E-mail: yunfang21@163.com。

the full probability of collapse of steel strip refuge building was used to measure the collapse safety of the building during its design life. The experimental results show that the seismic performance of steel strip refuge buildings designed with the proposed method is relatively high when subjected to strong earthquakes.

Key words: high intensity earthquake; complex network; strip steel shelters; load; seismic performance; collapse risk assessment

0 引言

目前我国城市建设呈现飞速发展趋势,人口与建筑物存在高度集中的现象,遇到高强度地震会产生严重的人员伤亡和损失。因此带钢避难建筑的安全性成为抗震建筑领域研究的热点。采用合理方法提高带钢避难建筑的抗震性具有重要的应用意义^[1]。当前带钢避难建筑多采用置换混凝土方法进行抗震设计,存在承受抗震性低、经济损失高的问题。因此对带钢避难所进行改进设计是非常必要的^[2]。本文提出一种适用于高强度地震下的带钢避难建筑抗震设计方法,可增强高强度地震下带钢避难建筑自身的承受力,减少人员伤亡及财产损失。

1 高强度地震下带钢避难建筑抗震设计

1.1 复杂网络带钢避难建筑相关模型设计

经过对随机地震功率参数数据的详细解析,依据随机地震功率数据解析情况,本文针对高强度地震下的带钢避难建筑设计了复杂网络加固模型。

模型设定带钢避难建筑原始结构承载的负荷是第一次受力,经过加固的建筑承载的负荷是第二次受力^[3]。因为在对带钢避难建筑加固之前就已经产生应力轻微变形的情景^[3],但加固后的新结构仅在承载负荷变动时才开始受力,所以新增加固部分的应力与应变性略微低于原始结构。

带钢避难建筑结构的加固过程是二次组合结构设计过程,结合面的传递剪力是原始结构与加固部分是否可以结合在一起的关键。一般来说,一次整浇混凝土的抗震效果大于带钢避难建筑中混凝土结合面的抗震能力^[4],带钢避难建筑经过二次组合结构会使其结构承载能力减少。为了使带钢避难建筑的改进与加固具有针对性,一定要精准地检测两者的抗震能力。带钢避难建筑结构加固构造、施工特点和设定楼面活荷载标准受其特征以及受力因素的影响。对某地区带钢避难建筑楼面荷载能力进行解析,具体数值如表1所列。

表1 楼面荷载标准值

序号	荷载分类	标准值/(kN·m ⁻²)
1	办公	2.1
2	楼梯	2.6
3	会议室	2.1
4	电梯	3.6
5	库房	5.1
6	阳台	2.6
7	卫生间	2.1
8	机房	7.1
9	走廊	2.6
10	SPECT	5.1

针对带钢避难建筑在复杂网络中的描述,本文对加固前带钢避难建筑里面混凝土强度与荷载能力进行精准的解析与计算^[5]。带钢避难建筑中一般低层框架柱都有轴压比超过限制的现象,所以在二次融合时,为了提升荷载需求,要恰当加大框架柱截面^[6]。把结构干扰分子加入功率谱密度函数,得出式(1):

$$S_0 = \frac{1 + 4e_n^2 \frac{\beta^2}{\beta R_n^2}}{\left(1 - \frac{\beta^2}{\beta R_n^2}\right) + 4e_n^2 \frac{\beta^2}{\beta R_n^2}} \quad (1)$$

式中: β 、 R_n 、 n 以及 e 分别为基岩特点的普参数、谱强度因子、地震动大小程度以及地表覆土层卓越频率。通过式(1)组建复杂网络带钢避难建筑加固模型A,并且针对地震周期模拟为:

$$A = \sqrt{\frac{2}{\beta R_0^2}} \exp\left(-\frac{\beta^2 + e^2}{R_0^2}\right) = \sqrt{\frac{2}{\beta R_0^2}} \exp\left(-\frac{\beta^2 + e^2}{R_0^2}\right) \quad (2)$$

需要注意的是在结构角移动比较明显的节点,模型要保证结构体系与荷载能力,在抗侧力构件最低的基础上经过加固,可以让模型更加直观地模拟结构受力特征。通过对无楼板约束的剪力墙刚度消减来优化模型。针对地震功率拟合,本文利用最小二乘法^[7]得到带钢避难建筑在强震下的抗毁能力估计模型估计函数:

$$S(\bar{\omega}) = \frac{A + 4\lambda_i^2 \alpha^2 / \alpha_i^2}{(A - \alpha^2 / \alpha_i^2) + \lambda_n^2 \alpha^2 / \alpha_i^2} \times \frac{\alpha^2 / \alpha_m^2}{(A - \alpha^2 / \alpha_m^2) + \lambda_m^2 \alpha^2 / \alpha_m^2} S_0 \quad (3)$$

式中: α_n 、 α_m 分别是随机进程里地震干扰系数的最大值及最小值; λ 是时间间隔。分析以上公式, 采用静力弹塑性分析方式对带钢避难建筑在强震作用中的抗毁能力进行推导以及计算。不计带钢避难建筑内部结构干扰要素的情形下, 通过带钢避难建筑抗毁能力估计模型对其抗毁系数随机均值谱情形进行估算, 虽然有一部分的结果稍微大于规范谱, 但整体趋势不变。

抗震数随机均值谱和规范值谱比较曲线见图 1。

1.2 强震情况下复合墙体受力分析图解

带钢避难建筑的复合墙体中含有独特的结构特征, 建筑体系的分构件含有优越的弹、塑性以及防破性, 这些特性在强震中可以发挥其核心影响^[8]。这些都说明带钢避难建筑估计模型能够保证建筑墙体

在不一样的受力情形下均可得到准确的检测计算结果。通过复杂网络带钢避难建筑在强震下的加固估算估计模型, 可以对其在强震情况下的受力经过和受力特征实行解析与评估, 设计强震情况下复合墙体受力分析图解(图 2)。

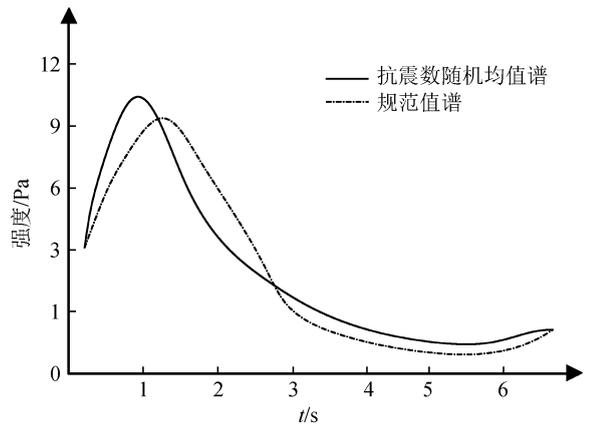


图 1 抗震数随机均值与规范值谱比较曲线
Fig.1 Comparison between stochastic mean value and code value of seismic numbers

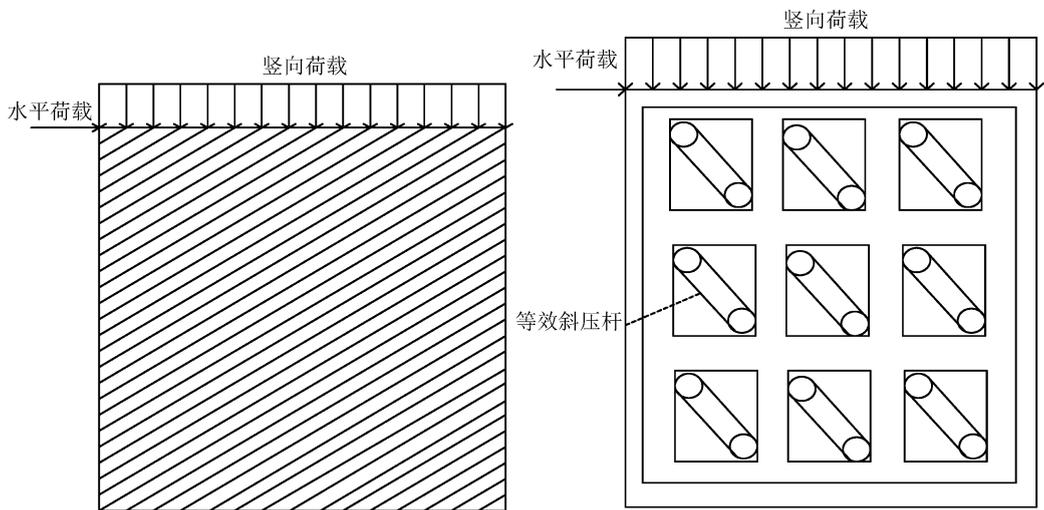


图 2 强震情况下复合墙体受力图解

Fig.2 Stress diagram of composite wall under strong earthquake

分析图 2 可以得, 竖向压应力是破坏带钢避难建筑抗震性能的重要原因。为了保证建筑墙体平面的稳定性, 需要在墙体顶部增加水平荷载, 利用千斤顶在带钢避难建筑上增加分配梁, 通过在模型上二次分配顶部暗梁, 在墙体两边增加支柱可以改善相关性能^[9]。

1.3 性能评估模型设计

上一小节中实现了复杂网络带钢避难建筑的加固处理, 本节对加固后带钢避难建筑的坍塌风险实施评估, 以提高建筑应对高强度地震的抗震性能。

通过建筑物坍塌易损性解析得到, 加固后的带钢避难建筑在遇到地震情况下发生坍塌的条件概率 $P(\text{collapse} | IM)$ 或抗地震坍塌能力 CRC 的概率密度分布^[10]。因为加固后的带钢避难建筑抗震设计还需评估在使用年限 (Y 年) 内出现坍塌的全概率, 所以还要考虑使用年限内遇到强震的概率^[11]。经过解析地震危险性, 用 $P(IM)$ 代表设计使用年限 (Y 年) 内加固后的带钢避难建筑遇到强震 IM 的概率密度。利用设计使用年限 (Y 年) 内加固后的带钢避难建筑坍塌的全概率衡量加固后建

筑在设计使用年限(Y 年)内的抗坍塌安全性^[12],如下式所示:

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(\text{collapse} | IM) P(IM) dIM \quad (4)$$

加固后的带钢避难建筑在设计使用年限(Y 年)内发生地震坍塌的概率用 $P(\text{collapse in } Y \text{ years})$ 表示;通过地震危险性解析可以得到^[14],设计使用年限(Y 年)内加固后的带钢避难建筑遇到强震强度 IM 的概率为 $P(IM)$ 。

综上所述可得,通过加固后的带钢避难建筑坍塌易损性解析得到其抗坍塌能力 CRC ;通过地震危险性解析得到设计使用年限(Y 年)内强震需求 IM ,这两个可以作为随机变量^[15]。因加固后的带钢避难建筑坍塌等同其抗坍塌能力 CRC ,但小于强震需求 IM 的概率。加固后的带钢避难建筑在设计使用年限 Y 年内的地震坍塌概率见式(5):

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(CRC) P(IM > CRC) dCRC \quad (5)$$

分析式(5)可得,加固后的带钢避难建筑抗坍

塌能力 $P(CRC)$ 与 CRC 的概率密度相同,通过解析坍塌易损性可得 CRC 积聚概率分布函数确定。设计使用年限(Y 年)内加固后的带钢避难建筑的强震 CRC 超出概率是 $P(IM > CRC)$,确保其在高强度地震下具有较高的抗震性能。

2 实验分析

实验采用模拟地震毁坏危险性的方法,验证本文方法下某带钢避难建筑的抗震能力。为了模拟加固后的带钢避难建筑在强震情况下的承受能力,实验模拟某实际的建筑底层墙体做仿真实验的实验墙体。解析该建筑采用本文设计方法前的承受能力后,对其抗震性能进行提升设计,再解析本文方法设计后的建筑承受情况。在实验中,设置建筑模型参数为:弹性层间角位移限值为 $1/800$,弹塑性层间角位移限值为 $1/100$,建筑墙体抗压程度为 29.6 N/mm^2 。整体带钢避难建筑结构的最大高宽比参数如表 2 所列。在抗震能力评估的加载过程中,利用轴压比控制加载强度,其轴压比限值范围设置为 $0.75 \sim 1.25$ 。

表 2 整体带钢避难建筑结构的最大高宽比

Table 2 Maximum height-width ratio of the whole steel strip refuge building structure

结构体系	非抗震设计		抗震设防烈度						
	A 级	B 级	Ⅵ度、Ⅶ度		Ⅷ度		Ⅸ度		
			A 级	B 级	A 级	B 级	A 级	B 级	
整体建筑 模型结构	框架、板柱-剪力墙	5	-	4	-	3	-	2	-
	框架-剪力墙	5							
	剪力墙	6	6	6	7	5	6	4	-
	筒中筒、框架-核心筒	6		6		5		4	

在带钢避难建筑构件里,因框架梁刚度的改变非常细小,所以采用本文设计方法加固框架梁后其刚度改变带来的干扰可以不用考虑。但带钢避难建筑加固后设防烈度改变幅度过大,加大带钢避难建

筑抗震效果以及承载力不能仅仅依靠钢板,因此可利用粘贴钢板和角钢二者融合的加固形式提升建筑的抗震性能。实验带钢避难建筑结构部分构建粘钢情况如表 3 所列。

表 3 部分建筑构件粘钢情况

Table 3 Bonded steel plate of some building members

位置	缺筋位置	缺筋量 /mm ²	粘钢规格 /mm	块数 /块	粘钢面积 /m ²	粘钢用量 /($\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
轴 A-B	左支座	1653	-4 \times 210	2	133 000	495
	右支座	1112	-4 \times 130	1	68 920	256
	跨中	1145	-4 \times 220	2	68 680	823.5
轴 B-C	左支座	956	-4 \times 270	2	79 290	275.6
	右支座	952	-4 \times 130	1	159 000	250.6
	跨中	823	-4 \times 250	2	1 870	559
轴 C-D	左支座	953	-4 \times 210	2	16 500	469.2
	右支座	1175	-4 \times 270	1	85 780	25
	跨中	1146	-4 \times 130	2	46 890	46.2

为了预测本文设计方法加固后的带钢避难建筑的抗震效果,实验基于表 3 中的建筑构件粘钢设置情况,针对强震中实验带钢避难建筑的损失情况和地震的危险性实行预测。依据带钢避难建筑损失程度结果准确得出其抗震能力数值以及客观叙述,这样就可以实时对带钢避难建筑进行加固。但还应考虑带钢避难建筑在其设计基准期中可能遇到的地震作用对其抗震能力的干扰。将高强度地震作用下采用本文设计方法前、后实验带钢避难建筑的方向位移角绘成曲线(图 3)。

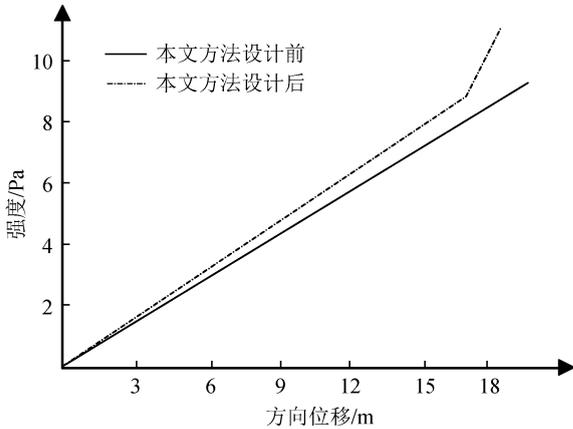


图 3 高强度地震作用下本文方法设计前、后方向位移结果

Fig.3 Directional displacement before and after the design of the proposed method under the action of high intensity earthquake

分析图 3 可以看到,采用本文方法设计前、后,在带钢避难建筑结构高强度地震作用下其位移角度以及位移强度变化均呈直线变化,其偏差均明显增大,这样导致带钢避难建筑结构方向扭曲,位移结

果达不到预期的需求。对于这种状况,为了达到强震情况中带钢避难建筑加固稳定,需要将建筑其加固成框架体系。实验统计本文设计方法和传统置换混凝土方法下高强度地震下实验带钢避难建筑的损失程度,结果用图 4 描述。

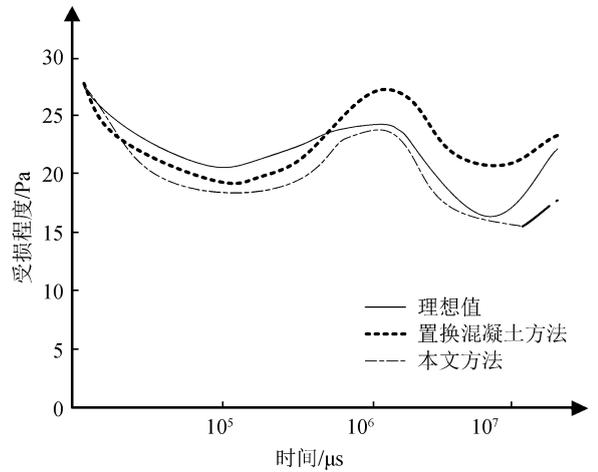


图 4 建筑受损程度评估结果

Fig.4 Assessment of the damage degree on the building

图 4 可以清晰反映出,采用本文设计方法,在强震下实验带钢避难建筑损失程度低于置换混凝土方法,并且本文方法评估的建筑受损程度同理想值更为接近。说明本文方法能够对高强度地震下带钢避难建筑受损程度进行准确评估,同时还能降低建筑受损程度,提高高强度地震下带钢避难建筑的抗震性能。

实验检测到本文设计方法下带钢避难建筑结构以及不同建筑结构在差异地震作用下的抗震指数,结果如表 4 所列。

在强震作用下,复合建筑墙体内部斜压杆往往

表 4 建筑结构抗震能力预测结果

Table 4 Prediction results of seismic capacity of building structure

结构类型	地震作用				
	设防烈度	遭遇烈度	Ⅵ	Ⅸ	Ⅹ
钢筋混凝土	0.078	0.199	0.225	0.346	0.545
框架结构	0.077	0.179	0.299	0.473	0.723
砌体	0.064	0.202	0.322	0.449	0.652
本文方法下的建筑结构	0.095	0.235	0.399	0.578	0.799

由于刚度过大导致其承担了绝大部分的地震力而首先遭到破坏,其次复合墙体的外框架因为刚度较小使得整个外部钢结构框架变形较大,导致建筑墙体结构迅速破坏。分析表 4 中的数据可以得到,在设防烈度大于遭遇烈度的情况下,通过本文设计方法二次融合加固后的带钢避难建筑结构在强震地震

危险性处境中拥有比较好的相应抗震能力;而在两者比较接近时加固后的带钢避难建筑同样拥有比较好的相应抗震能力。当地震强度为Ⅸ度的情况下,本文方法加固后的带钢避难建筑拥有完全的抗震能力;当地震强度为Ⅹ度情况下,本文方法加固后的带钢避难建筑拥有中度的抗震能力;当地震强度为Ⅵ

的情况下,本文方法加固后的带钢避难建筑拥有达到符合标准的抗震能力。

通过上述实验的验证分析可得,本文方法可以提高高强度地震下带钢避难建筑的承受力,确保建筑达到符合国家标准的抗震能力。

3 结论

本文提出了高强度地震下带钢避难建筑设计方法,采用复杂网络带钢避难建筑加固模型对带钢避难建筑进行加固设计,对加固后的建筑模型进行坍塌风险评估。实验结果验证在高强度地震下本文方法可以准确评估带钢避难建筑的受损程度,降低建筑受损程度及建筑结构方向扭曲程度,同时可以提高带钢避难建筑的承受力,使建筑具有较高的抗震性能,确保建筑达到符合国家标准的抗震能力。

参考文献(References)

- [1] 么伦强,牛志伟,侯世超.地震高烈度区尾矿坝抗震有限元分析[J].水利水电技术,2017,48(2):45-49.
YAO Lunqiang, NIU Zhiwei, HOU Shichao. Seismic Finite Element Analysis on Tailings Dam in High Seismic Intensity Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2):45-49.
- [2] 姜连艳.从抗震设防类别探讨室内地震应急避难场所的选择[J].震灾防御技术,2017,12(1):203-209.
JIANG Lianyan. Selection of Indoor Emergency Shelter for Earthquake Disaster Based on the Seismic Fortification Category for Structures[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(1):203-209.
- [3] 苏成,黄志坚,刘小路.高层建筑地震作用计算的时域显式随机模拟法[J].建筑结构学报,2015,36(1):13-22.
SU Cheng, HUANG Zhijian, LIU Xiaolu. Time-domain Explicit Random Simulation Method for Seismic Analysis of Tall Buildings[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1):13-22.
- [4] 王珊,张郁山.各类抗震设计规范对设计地震动时程规定的对比分析[J].中国地震,2017,33(1):56-67.
WANG Shan, ZHANG Yushan. Comparison of Various Seismic Design Codes on Design Ground Motion Time History[J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(1):56-67.
- [5] 张萌,潘华,李金臣.美国建筑抗震设计的法规体系与设计地震动的确定[J].震灾防御技术,2017,12(2):306-318.
ZHANG Meng, PAN Hua, LI Jinchen. Building Anti-seismic Design Regulations in the United States and Its Approach to Ground Motion Design[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(2):306-318.
- [6] 闫亚汐,刘君阳,栾力文,等.大空间结构抗震加固方法分析研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(1):113-117.
YAN Yaxi, LIU Junyang, LUAN Liwen, et al. Reserch on the

- the Seismic Strengthening Methods of Large Space Building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(1):113-117.
- [7] 马怀发,张坤,王立涛.混凝土坝抗震安全评价指标和方法研究[J].水利水电技术,2017,48(5):110-119.
MA Huaiifa, ZHANG Kun, WANG Litao. A Preliminary Study on Performance-based Seismic Safety Evaluation Index of Concrete Dams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5):110-119.
- [8] 肖遥,张郁山,靳超宇.高层建筑时程分析中地震动时程选择和修改方法研究[J].震灾防御技术,2014,9(3):400-410.
XIAO Yao, ZHANG Yushan, JIN Chaoyu. Study on Ground Motion Selection and Modification Methods in Time History Analysis of High-rise Buildings[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(3):400-410.
- [9] 杜雷功,席燕林.严寒强震区特高拱坝筑坝关键技术难题及应对措施[J].水利水电技术,2017,48(10):10-17.
DU Leigong, XI Yanlin. Key Technologies and Countermeasures for Construction of Super-high Arch Dam in Severe Cold and Strong Seismic Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(10):10-17.
- [10] 吴耀华,岳清瑞,曾滨,等.工业建筑装配式围护墙结构的抗震设计研究[J].工业建筑,2017,47(4):166-169.
WU Yaohua, YUE Qingrui, ZENG Bin, et al. Research on Seismic Design of Prefabricated Enclosure Wall for Industrial Buildings[J]. Industrial Construction, 2017, 47(4):166-169.
- [11] 苏晨辉,宋志强,曹伟,等.河床式水电站厂房地震响应软弱基岩弹模敏感性分析[J].水利水电技术,2017,48(11):69-74.
SU Chenhui, SONG Zhiqiang, CAO Wei, et al. Analysis on Sensitivity of Soft Rock Foundation Elastic Modulus on Seismic Response of Run-of-River Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11):69-74.
- [12] 熊焰,梁芳,乔永军,等.北京市地震应急避难场所减灾能力评价体系的研究[J].震灾防御技术,2014,9(4):921-931.
XIONG Yan, LIANG Fang, QIAO Yongjun, et al. Mitigation Capabilities Evaluation System of Beijing Earthquake Emergency Shelters[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(4):921-931.
- [13] HWANG B, SHIM J H, LEE M G, et al. Technical Developments and Trends of Earthquake Resisting High-Strength Reinforcing Steel Bars [J]. Taehan-Kumsok-Hakhoe-Chi = Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 2016, 54(12):862-874.
- [14] DUBINA D, STRATAN A, VULCU C, et al. High Strength Steel in Seismic Resistant Building Frames [J]. Steel Construction, 2015, 7(3):173-177.
- [15] LEPAGE A, TAVALLALI H, PUJOL S, et al. High-Performance Steel Bars and Fibers as Concrete Reinforcement for Seismic-Resistant Frames [J]. Advances in Civil Engineering, 2014, 12(5):127-139.