

王新妮, 吴海波. 钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1018-1023. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1018

WANG Xinni, WU Haibo. Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1018-1023. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1018

## 钢筋混凝土建筑在连续震动下的 壁板结构破坏程度分析<sup>①</sup>

王新妮, 吴海波

(内蒙古交通职业技术学院, 内蒙古 赤峰 024005)

**摘要:** 计算连续震动下钢筋混凝土建筑的壁板结构破坏程度需要对大量数据进行回归计算, 不能快速、有效地确定壁板承载力, 因此提出一种新型钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析方法。通过确定混凝土建筑材料、钢筋材料、壁板截面与单元材料等属性参数, 完成钢筋混凝土壁板结构有限元建模; 通过对连续震动下破坏壁板结构的内、外力分析, 确定壁板结构总体破坏程度。设计对比实验结果表明, 应用新型壁板结构破坏程度分析方法能有效确定壁板抗剪承载力和抗弯承载力, 避免因壁板结构失去支撑力, 而造成建筑损坏现象发生。

**关键词:** 钢筋混凝土; 建筑设施; 连续震动; 壁板结构; 破坏程度; 分析研究

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1018-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1018

## Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration

WANG Xinni, WU Haibo

(Inner Mongolia Vocational and Technical College of Communications, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** To analyze the degree of damage to panel structures in reinforced concrete structures under continuous vibration we need to perform regression calculations on a large amount of data; therefore, we cannot determine the bearing capacity of such panels quickly and effectively enough to avoid building damage. Here to simplify the calculation process in the traditional method, a new method for analyzing the degree of damage to panel structures in reinforced concrete structures under continuous vibration is proposed. The parameters of the building materials, reinforcing material, panel cross-section, and unit material were determined and a finite element model of the reinforced concrete panel structure established. Through analysis of the internal and external forces that destroy panel structures under continuous vibration, the overall degree of failure of the panel was determined. The experiment results show that this new method can effectively determine the shear bearing capacity and flexural bearing capacity of panels, and thereby help avoid

① 收稿日期: 2016-08-20

基金项目: 中国科学院自动化研究所批准基金项目(61403376)

作者简介: 王新妮(1986—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 讲师, 研究方向: 建筑工程管理、建筑技术。E-mail: 2364730613@qq.com。

通信作者: 吴海波(1982—), 男, 内蒙古赤峰人, 讲师, 研究方向: 建筑力学与结构, 建筑技术。

building damage due to panel structures losing their supporting force.

**Key words:** reinforced concrete; building facilities; continuous vibration; panel structure; damage degree; analysis and research

## 0 引言

当前多通过绘制建筑 IDA 曲线分析钢筋混凝土建筑在震动下的壁板结构破坏程度,但在连续震动下,IDA 曲线的绘制过程需要通过强度与需求指标获取最佳参数,并根据最佳参数确定曲线中各点所在位置。这种方法在使用过程中需整理大量数据,并根据整理结果做回归分析<sup>[1-2]</sup>。数据整理过程的耗时较长,且对每一截面层次的参数公式都要进行详细计算。大量、多次的数学计算导致很难在短时间内完成连续震动下钢筋混凝土建筑壁板结构的破坏程度分析,易因壁板结构失去支撑力而出现建筑物损坏现象<sup>[3-4]</sup>。

本文提出一种钢筋混凝土壁板结构的有限元建模方法,仅需依靠混凝土建筑材料、钢筋材料、截面与单元材料三大属性的确定即可完成,可有效缓解传统方法分析钢筋混凝土建筑在连续震动下壁板结构破坏程度的计算压力。根据已搭建完成的有限元模型,分析连续震动下破坏壁板结构的内、外力条件,得出钢筋混凝土建筑在连续震动下壁板结构的总体破坏程度。

## 1 钢筋混凝土壁板结构有限元建模

依靠混凝土建筑材料、钢筋材料、壁板截面与单元材料三大属性的确定来完成钢筋混凝土壁板结构有限元模型的建立。具体搭建过程如下。

### 1.1 确定混凝土建筑材料属性

混凝土材料属性可用混凝土本构关系的单轴模型来描述。在连续震动的情况下其承受单调压力时属性发生改变<sup>[5-6]</sup>。此过程中,依靠应力关系习变曲线确定其属性,具体变化趋势如图 1 所示。

### 1.2 确定钢筋材料属性

钢筋材料属性可用显式模型来描述。在连续震动下钢筋材料抖动幅度明显增加,钢筋材料属性变化趋势和反复加载实验结果保持一致。反复加载实验中,变量属性可用应力-应变关系表示,具体关系可描述为:

$$\mu = \beta\eta + \frac{(1-\beta)\eta}{[1+(\eta)^R]^{\frac{1}{R}}} \quad (1)$$

其中: $\beta$  代表应变硬化率; $\eta$ 、 $\mu$  分别为描述标准化应

变、应力的重要指标,其可描述为:

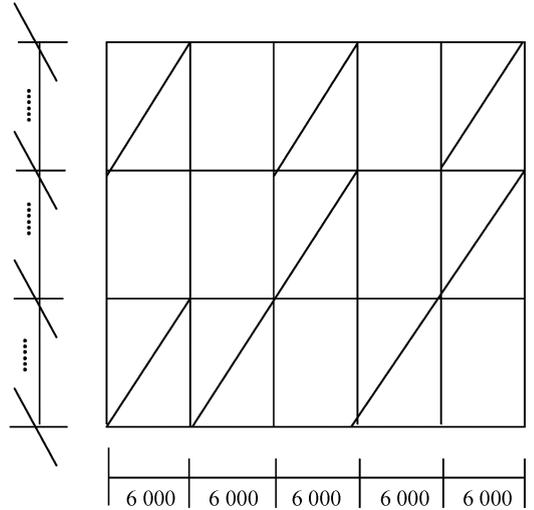


图 1 应力关系习变曲线图

Fig.1 Change curve of stress

$$\eta = \frac{\eta_0 - \eta_r}{\eta_0 - \eta_r}; \mu = \frac{\mu_0 - \mu_r}{\mu_0 - \mu_r} \quad (2)$$

其中: $\eta_0$ 、 $\eta_r$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu_r$  分别代表当反复加载实验次数为 0、 $r$  时应变、应力指标的具体数值。 $R$  代表控制参数,从弹性到塑性变化过程对应力-应变关系曲线产生控制作用,可描述为:

$$R = R_0 - \frac{\beta_1 \vartheta}{\beta_2 + \vartheta} = R_0 \left( 1 - \frac{CR_1 \vartheta}{CR_2 + \vartheta} \right) \quad (3)$$

式中: $\vartheta$  是描述循环应变差的专有指标; $C$  代表自然描述常数; $R_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  均由反复加载实验确定; $CR_1$ 、 $CR_2$  为固定常数项,通常情况下取  $CR_1 = 0.92$ 、 $CR_2 = 0.2$ 。联立式(1)~(3)可确定钢筋材料属性。

### 1.3 确定壁板截面与单元材料属性

在连续震动下钢筋混凝土建筑单元材料与壁板截面间产生纵向分割力<sup>[7-8]</sup>。将壁板截面作为变形主体,在截面上分割单元材料,通过单元材料的受力状态分析确定壁板截面与单元材料属性。设壁板截面上单元材料应变表示为:

$$\xi = \xi_0 + y\varphi \quad (4)$$

其中: $\xi_0$  描述壁板截面上单元材料的中性轴应变; $y$  代表单元材料与中心轴间的距离; $\varphi$  代表壁板截面曲率。设  $L$  表示壁板截面与单元材料属性,忽略连续震动下壁板发生的轻微位移,则壁板截面与单元材料属性可表示为:

$$L = 0.92\mu + 0.2\alpha^2 df \quad (5)$$

式中： $\mu$  代表钢筋材料属性； $\alpha$  代表单元材料滑移参数； $df$  用于描述单元材料的滑移强度。

#### 1.4 有限元建模

上述三步骤可确定混凝土建筑材料属性、钢筋材料属性、壁板截面与单元材料属性，再通过有限元分析软件 SAP2000 对连续震动下钢筋混凝土壁板结构各材料属性数值进行模拟，从而完成有限元模型的建立。

## 2 连续震动下壁板结构破坏程度分析

根据钢筋混凝土壁板结构有限元建模可详细了解其内在结构。基于此，对连续震动下壁板结构破坏程度进行内、外力分析如下。

### 2.1 连续震动下破坏壁板结构内力分析

在连续震动条件下钢筋混凝土建筑壁板结构会受到局部破坏，破坏荷载力在其余壁板结构上会进行重新分配。为了解剩余壁板结构和原壁板结构的内力破坏程度，在保持其他层结构不变的前提下移除最底层至第 4 层的角柱、长边中柱及内柱，同时对所有壁板破坏程度进行静力分析<sup>[9]</sup>（也叫做连续震动下破坏壁板结构内力分析）。根据壁板结构的破坏程度完成内力分析，进而判断出壁板结构的剩余支撑力水平（图 2）。

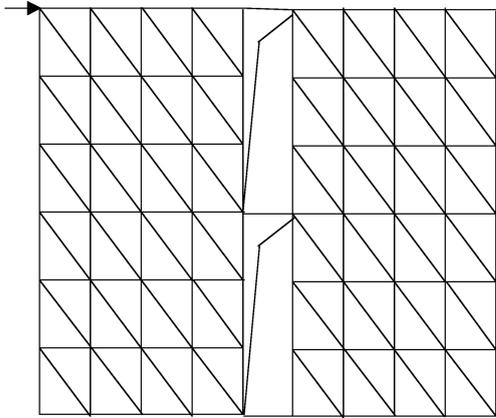


图 2 连续震动下破坏壁板结构内力分析图  
Fig.2 Internal force on the panel structure under continuous vibration

### 2.2 连续震动下破坏壁板结构外力分析

在连续震动条件下对钢筋混凝土建筑壁板结构破坏程度进行外力分析时需要移除壁板结构的底层内柱<sup>[10-11]</sup>。在移除内柱过程中，柱底、柱中和柱顶所受外力会发生变化，具体变化趋势如表 1 所列。

其中  $M_2$  代表沿纵轴方向的剪力。

分析表 1 可知，内柱移除后，柱顶、柱中、柱底的轴力明显变小。由此可知，在连续震动条件下，及时对壁板结构破坏程度进行外力分析可有效避免壁板弯曲现象出现。

表 1 柱底、柱中和柱顶所受外力变化趋势表

Table 1 Change trend of the external force on the bottom, middle part, and top of column

杆件编号	杆件位置	$M_2 / (\text{kN} \cdot \text{m})$		
		柱顶	柱中	柱底
1	原结构	22.9	7.4	11.5
	去柱后	1.3	1.9	2.3
2	原结构	-6.4	0.9	7.8
	去柱后	-8.2	0.5	8.7
3	原结构	-8.8	0.7	9.7
	去柱后	-11.9	0.8	14.4
4	原结构	-11.5	0.9	13.8
	去柱后	-21.9	3.3	28.2

### 2.3 确定壁板结构总体破坏程度

在连续震动条件下完成对钢筋混凝土建筑壁板结构破坏程度的内、外力分析后，在钢筋混凝土壁板结构有限元模型基础上，结合具体内、外力分析结果可确定壁板结构总体破坏程度（图 3）<sup>[12]</sup>。

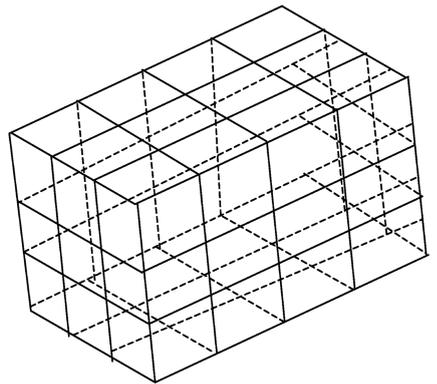


图 3 壁板结构总体破坏程度展示图  
Fig.3 Overall damage of panel structure

图 3 中每个顶点表示连续震动下破坏壁板结构内力分析；每条边表示连续震动下破坏壁板结构外力分析。设  $f$  代表内力分析， $d$  代表外力分析，则壁板结构总体破坏程度可表示为：

$$f = R \left[ \frac{2\vartheta}{L} - \left( \frac{\vartheta}{L} \right)^2 \right], \vartheta \leq L$$

$$d = \frac{R - R_0}{L - \vartheta} (\eta_0 - \eta_r), \vartheta \leq L, \eta_r \leq \eta_0 \quad (6)$$

$$A = 0.92 \left( \frac{\vartheta}{L} \right)^2 + 0.2f \cdot d, \left( \frac{\vartheta}{L} \right)^2 \leq f \cdot d$$

其中： $A$  代表壁板结构总体破坏程度； $f \cdot d$  代表内力分

析、外力分析间的相互作用。根据上述公式完成钢筋混凝土建筑在连续震动下壁板结构破坏程度分析。

### 3 实验结果与分析

为验证新型钢筋混凝土建筑在连续震动下壁板结构破坏程度分析方法的有效性,在同一幢钢筋混凝土建筑上取两个质量、大小都相同的方形建筑块作为实验材料。随机选取一块作为实验组,另一块作为对照组。实验开始前先对两组实验对象的相关实验参数进行设定。

#### 3.1 实验参数设定

表 2 中极限弯矩、极限剪力为在连续震动条件下壁抗剪承受力、抗弯承受力的极值;极限弯矩

DCR、极限剪力 DCR 为根据抗剪承受力、抗弯承受力极值计算得来的固定数值,其无单位。真实弯矩、真实剪力是在保证壁板损坏程度在可控范围内的前提下,壁抗剪承受力、抗弯承受力的取值范围,是本次实验所施加的外力。为保证实验公平性,实验组与对照组建筑残块的所有实验参数均保持一致。

#### 3.2 确定壁板抗剪承载力对比

壁板抗剪承载力是确定壁板结构破坏程度的重要指标,该项指标与  $PUD$  值成正比。 $PUD$  代表壁板在连续震动情况下发生的形变量,其与真实剪力存在正比关系,真实剪力越大, $PUD$  值大,壁板抗剪承载力越低。如不及时确定壁板抗剪承载力,极易造成壁板损坏,进而导致钢筋混凝土建筑坍塌。

表 2 实验参数设定表

Table 2 Experimental parameters

参数名称	极限弯矩/(kN·m)	极限弯矩 DCR	极限剪力/kN	极限剪力 DCR	真实弯矩/(kN·m)	真实剪力/kN
实验组	109.58	$1.97 \times 10^{-7}$	200.56	$1.58 \times 10^{-5}$	94.77~105.49	102.36~189.24
对照组	109.58	$1.97 \times 10^{-7}$	200.56	$1.58 \times 10^{-5}$	94.77~105.49	102.36~189.24

本次实验采用普通壁板结构破坏程度分析方法确定对照组钢筋混凝土建筑残块的壁板抗剪承载力;采用新型壁板结构破坏程度分析方法确定实验组钢筋混凝土建筑残块的壁板抗剪承载力。具体实

验结果如图 4 所示。

图中用实验组、对照组曲线与  $PUD$  曲线间的距离来确定壁板抗剪承载力的有效性,距离越近其有效性越高。分析图 4(a)可知,在连续震动条件下,

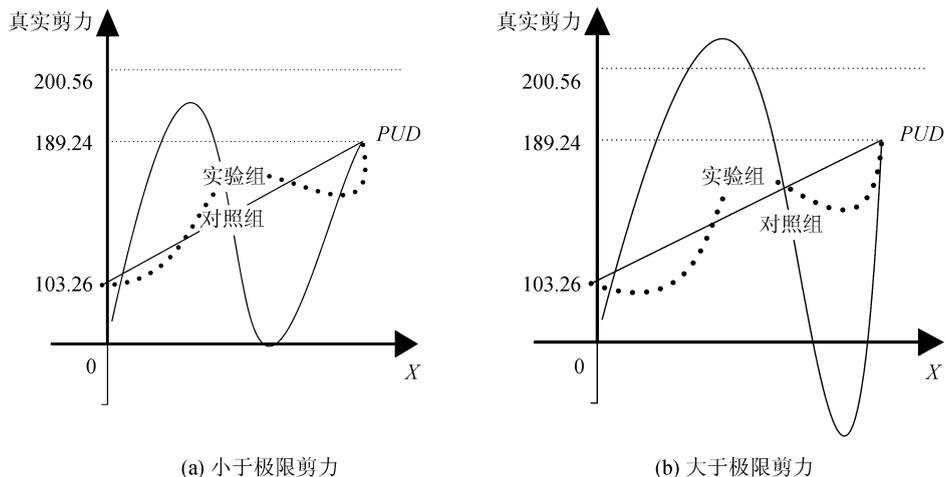


图 4 确定壁板抗剪承载力对比图

Fig.4 Comparison between shear bearing capacity of panel structure

当真实剪力小于极限剪力时,随着剪力的提升, $PUD$  值提升,代表壁板抗剪承载力降低。根据两条曲线的分布情况可知,实验组方法所确定的壁板抗剪能力始终分布在  $PUD$  曲线附近,而对照组曲线与  $PUD$  曲线距离较远。这也证明对照组方法不能有效确定壁板抗剪承载力,使用此方法时应及时注意壁板损坏程度。

分析图 4(b)可知,在连续震动条件下当真实剪力超过极限剪力时,随着剪力的提升, $PUD$  值提升。根据实验组、对照组曲线的分布情况可知,实验组方法所确定的壁板抗剪能力始终分布在  $PUD$  曲线附近,而对照组曲线与  $PUD$  曲线距离较远,最大值超过了最大剪力,最小值也低于零。这也证明对照组方法在确定壁板抗剪承载力方面存在很大欠缺。

### 3.3 确定壁板抗弯承载力对比

壁板抗剪承载力是确定壁板结构破坏程度的重要指标。该项指标变化趋势由  $RVS$  来反映,当真实弯矩增加时  $RVS$  增加,反之则  $RVS$  减小。如不能有效确定壁板的抗弯承载力则壁板易发生折断现象,使壁板结构失去支撑力,从而造成建筑损坏现象

发生。

本次实验采用普通壁板结构破坏程度分析方法确定对照组钢筋混凝土建筑残块的壁板抗弯承载力;采用新型壁板结构破坏程度分析方法确定实验组钢筋混凝土建筑残块的壁板抗弯承载力。具体实验结果如图 5 所示。

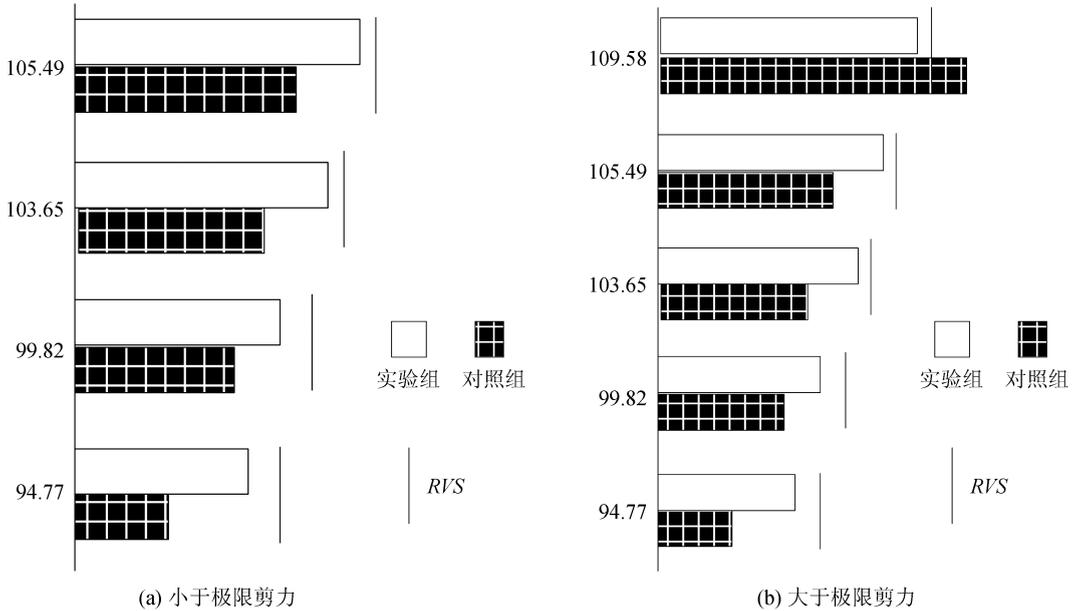


图 5 确定壁板抗弯承载力对比图

Fig.5 Comparison between flexural bearing capacity of panel structure

图 5 中用  $RVS$  与方框间距离来确定抗弯承载力的有效性,距离越近代表有效性越高,但其一旦超过  $RVS$  竖线,则不具备有效性。分析图 5(a)可知,在连续震动条件下,当真实弯矩小于极限弯矩时实验组方法所确定的壁板抗弯承载力始终距离  $RVS$  竖线很近,而对照组确定的壁板抗弯承载力与  $RVS$  竖线距离较远。这也证明对照组方法不能有效确定壁板抗弯承载力,使用时应及时注意壁板损坏程度。

分析图 5(b)可知,在连续震动条件下,当真实弯矩大于极限弯矩时对照组方法所确定的壁板抗弯承载力超过  $RVS$  竖线,因此其确定结果不具备有效性。这也证明对照组方法在确定壁板抗弯承载力方面,确实存在很大欠缺。

通过上述实验证明,新型钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析方法与普通方法相比,可有效确定壁板抗剪承载力和抗弯承载力,避免因壁板结构失去支撑力而造成建筑损坏现象发生。

## 4 结束语

上述研究在原有分析方法基础上建立新型新型

钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析方法,简化了计算过程,并通过对比实验的方式证明新方法确实具备实用价值。

## 参考文献(References)

- [1] 董伟,徐博瀚,王立成.工程事故案例分析在钢筋混凝土结构课程中的引入与运用[J].高等建筑教育,2017,26(3):47-50.  
DONG Wei, XU Bohan, WANG Licheng. Introduction and Application of Engineering Accident Case Analysis in the Teaching Process of Reinforced Concrete Structure Course[J]. Journal of Architectural Education in Institutions of Higher Learning, 2017, 26(3): 47-50.
- [2] 相军.钢筋混凝土建筑抗连续震动壁板结构分析[J].科学技术与工程,2016,16(32):283-287.  
XIANG Jun. Reinforced Concrete Construction Continuous Vibration Resistance Wall Structure Analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(32): 283-287.
- [3] 赵雄飞,陈开圣.干湿循环条件下红粘土的胀缩变形特性研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(1):132-135.  
ZHAO Xiongfei, CHEN Kaisheng. Study on the Swell & Shrinking Deformation Characteristics of Red Clay under the Condition of Dry-Wet Circulation[J]. Journal of Guizhou Uni-

- versity (Natural Science), 2016, 33(1):132-135.
- [4] 杨磊, 申波, 周世明, 等. 新型斜柱转换结构的抗震性能分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(6):67-70, 108.  
YANG Lei, SHEN Bo, ZHOU Shiming, et al. Different Limb Thickness Ratio on Seismic Performance of New Type Inclined Column Transferring Structure[J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2016, 33(6):67-70, 108.
- [5] 郑睿, 于虹. 钢筋混凝土建筑结构的抗震性能分析与实验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(1):45-48.  
ZHENG Rui, YU Hong. Seismic Performance Analysis and Experimental Study of Reinforced Concrete Building Structure[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2017, 38(1):45-48.
- [6] 李勇, 张维维, 袁佳慧, 等. 潜流带水流特性及氮素运移转化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):1-7.  
LI Yong, ZHANG Weiwei, YUAN Jiahui, et al. Research Advances in Flow Patterns and Nitrogen Transformation in Hyporheic Zones[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1):1-7.
- [7] 王浩, 李易, 陆新征, 等. 单层钢筋混凝土框架结构水平向连续倒塌试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(10):65-72.  
WANG Hao, LI Yi, LU Xinzheng, et al. Experimental Investigation on Horizontal Progressive Collapse of One-story Reinforced Concrete Frame[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(10):65-72.
- [8] 官文然, 吴振强, 李海波, 等. 飞行器壁板结构热屈曲分析与试验研究进展[J]. 强度与环境, 2016, 43(4):9-16.  
GONG Wenran, WU Zhenqiang, LI Haibo, et al. Review of the Investigation on Thermal Buckling Analysis and Experiment for Aircraft Panel Structures[J]. Structure & Environment Engineering, 2016, 43(4):9-16.
- [9] 肖飞, 原崇新, 丛晶洁. 复合材料加筋壁板结构件 VARI 液体成型工艺计算模拟[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4):47-54.  
XIAO Fei, YUAN Chongxin, CONG Jingjie. Computational Simulation of VARI Fluid Process Molding for Stiffened Panel Structural Composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4):47-54.
- [10] ZHONG J, GARDONI P, ROSOWSKY D. Stiffness Degradation and Time to Cracking of Cover Concrete in Reinforced Concrete Structures Subject to Corrosion[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2015, 136(2):209-219.
- [11] 戴波, 陈波. 基于混沌的大坝监测序列小波 RBF 神经网络预测模型[J]. 水利水电技术, 2016, 47(2):80-85.  
DAI Bo, CHEN Bo. Chaos-based Dam Monitoring Sequence Wavelet RBF Neural Network Prediction Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(2):80-85.
- [12] 闫园园, 张胤, 胡峥嵘. 基于支持向量机方法的抗滑桩优化设计及在边坡稳定性分析中的应用[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11):125-128, 135.  
YAN Yuanyuan, ZHANG Yin, HU Zhengrong. Support Vector Machine (SVM)-based Optimum Design of Anti-slide Pile and Its Application to Analysis of Slope Stability[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(11):125-128, 135.