

刘亚飞. 装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试研究[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 110–114. [Liu Yafei. Study on Seismic Bearing Capacity Test of Prefabricated Concrete Frame Structure System [J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 110–114]

装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试研究

刘亚飞

(成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000)

摘要: 为了提高装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力, 需要对承载力进行量化测试, 提出一种基于弹性模量荷载应力线性评估的装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法。构建装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的约束参量模型, 结合受力参量估计方法进行应力屈服响应评估, 测试装配式混凝土框架结构体系的抗震动态承载力, 采用屈服应力推服响应控制方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载和自适应控制, 测试式混凝土框架结构体系的抗震承载力和抗拉能力, 实现混凝土框架结构体系的抗震承载力参数的优化估计。测试结果表明, 采用该方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的准确性较高, 提高了建筑体的抗震力。

关键词: 装配式; 混凝土框架结构体系; 抗震承载力

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)01-0100-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.018

Study on Seismic Bearing Capacity Test of Prefabricated Concrete Frame Structure System

Liu Yafei

(The Engineering & Technology College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China)

Abstract: In order to improve the seismic bearing capacity of prefabricated concrete frame structure system, it is necessary to carry out quantitative test on the bearing capacity. A method for testing the seismic bearing capacity of an assembled concrete frame structure system based on linear evaluation of elastic modulus load stress is proposed. A constraint parameter model for seismic bearing capacity testing of fabricated concrete frame structure system is constructed. The stress yield response is evaluated with the method of force parameter estimation, and the seismic dynamic bearing capacity of the assembled concrete frame structure system is tested. The yield stress push-over response control method is used for the automatic loading and adaptive control of the seismic bearing capacity of the prefabricated concrete frame structure system, and the seismic and tensile capacity of the concrete frame structure system is tested. The optimum estimation of seismic bearing capacity

收稿日期: 2018-05-15

作者简介: 刘亚飞(1982-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 土木工程材料、基坑支护、边坡稳定、复杂地质情况的数值计算分析。

E-mail: lsa_lyf@sina.com.

parameters of concrete frame structure system is realized. The test results show that the accuracy of seismic bearing capacity test of prefabricated concrete frame structure system by this method is high and the seismic capacity of building body is improved.

Keywords: Prefabricated; Concrete frame structure system; Seismic bearing capacity

0 引言

我国房地产行业的快速发展, 建筑的种类和结构样式越来越多样化, 装配式混凝土框架结构作为一种新型建筑结构体系, 具有易控制、节能、施工周期短等特点, 装配式混凝土框架结构被广泛应用在现代建筑中, 装配式混凝土框架结构的安全性和抗震性受到人们的极大重视, 对装配式混凝土框架结构体系设计中, 需要进行装配式混凝土框架结构体系抗震安全性测试, 结合装配式混凝土框架的抗震测试, 提高抗震能力。进行装配式混凝土框架结构体系抗震承载力测试研究, 采用定量测试和抗拉力动态分析方法, 实现抗震承载力测试优化, 研究装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法, 在优化装配式混凝土框架结构体系设计中具有重要意义。本文提出一种基于弹性模量载荷应力线性评估的装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法结合受力参量估计方法进行应力屈服响应评估, 测试装配式混凝土框架结构体系的抗震动态承载力, 采用屈服应力推服响应控制方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载和自适应控制, 实现装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的优化测试, 最后进行仿真实验分析, 得出有效性结论。

1 抗震承载力控制模型及受力约束参量

1.1 装配式混凝土框架结构体系抗震承载力控制模型

本文研究装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试系统结构分析, 需要分析装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力受力结构模型, 结合约束控制和模糊自适应调度方法进行收敛评估, 在 CAD/CAM 平台上进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力系统的总体结构分析, 建立装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力机械荷载力学方程, 装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力在 5 轴坐标系中表现为一个连杆结构模型, 装

配式混凝土框架结构体系抗震受力模型表达为:

$$\begin{aligned} \max \Theta_{Q_k} &= \frac{a_{Q_k}}{a_{Q_k} + c_{Q_k}} \\ \max \Theta_{E_i} &= \frac{a_{E_i}}{a_{E_i} + c_{E_i}} \\ \max \Theta_{C_j} &= \frac{a_{C_j}}{a_{C_j} + c_{C_j}} \\ \text{s.t. } Q_i &\geq Q_{th} \\ E_i &\geq E_{th} \\ Q_{jk} &\geq 0, E_{jk} \geq 0, C_{jk} \geq 0 \\ \sum_{j=1}^{N_j} x_{jk} &= 1, \forall i, 1 \leq k \leq M, 1 \leq j \leq N_j \end{aligned} \quad (1)$$

上式中, Θ 称为建筑结构体离散元模型的贴近度, 选取的点和球心构成矢量, 得到装配式混凝土框架结构体系抗震承载约束对数参量集 $\{F_i, F_U\}$ 的关联度:

$$\begin{aligned} \mu_{B_i} &= a_{B_i} + b_{B_i} \Delta + c_{B_i} \Phi \\ \text{上式中 } a_{B_i} &= \frac{B_i}{B_U + B_v}, b_{B_i} = \frac{(B_u - B_i)(B_i - B_v)}{(B_U + B_v)B_i}, c_{B_i} = \frac{B_u B_v}{(B_U + B_v)B_i}, \Delta \text{ 为差异度系数, 随机平面的数学模} \\ &\text{性的应力屈服响应取值为 } [-1, 1], \Phi \text{ 为对立度系} \\ &\text{数, 取值为 } -1. \text{ 采用锚固的方式进行装配式混凝土框架结构的} \\ &\text{负荷加载, 分析了负荷加载下装配式混凝土框架结构的弹性模量、屈服强度: } d_e \text{ 和 } f_e. \text{ 得到装配式混凝土框架结构推覆截面轴力表达式为:} \end{aligned} \quad (2)$$

$$s(x) = [N(x), M(x)]^T \quad (3)$$

上式中, $N(x)$ 表示装配式混凝土框架结构屈服面本构变形增量, $M(x)$ 为抗震应力的屈服响应特征分布, 在截面弯矩约束下, 构建装配式混凝土框架结构抗震承载力的单元平衡方程, 依据 Euler-Bernoulli 梁理论, 得到装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力受力状态增量:

$$f_i = \frac{\Delta V_i}{V_{u1}} = \frac{V_{u1} - V_{u1}}{V_{u1}} \quad (4)$$

上式中, V_{u1} 表示装配式混凝土框架结构体系截面内力, V_{u1} 表示最大弹塑性顶点位移, ΔV_i 表示抗震承载力的屈服机制, 假定装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力足够大以保证不屈服,

对加固试件及对比试件进行预应力的受力情况测试^[4], 得到装配式混凝土框架结构的弹塑性位移为:

$$d_i = d_{ei} + d_{pi} \quad (5)$$

式中, d_{ei} 为装配式混凝土框架结构外核心区的应力分配系数, d_{pi} 表示钢筋弹性模量, 计算抗震承载力的受力情况分析模型:

$$D_e = \sum_i d_{ei} \quad (6)$$

结合受力参量估计方法进行应力屈服响应评估, 测试装配式混凝土框架结构体系的抗震动态承载力, 提高抗震能力。

1.2 受力约束参量分析

构建装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力节点本构关系模型, 进行结构力学分析, 装配式混凝土框架结构采用混凝土柱状结构设计, 考察混凝土柱钢带间距分布下在单元局部坐标系下的力学性能, 装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力内分布表示为:

$$e(x) = \sum_i d_{ei} D_s B(x) \cdot d_e \quad (7)$$

式中, $B(x)$ 表示装配式混凝土框架结构的几何变换矩阵, 为:

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 6\xi/L & 3\xi-1 & 0 & 6\xi/L & 3\xi-1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\xi \in [-1, 1]$, 表示装配式混凝土框架结构的抗震承载的线性插值分量, 变形增量。在水平荷载作用下, 在可行域 R^d 内分析装配式混凝土框架结构体系的剪应变特征量, 得到装配式混凝土框架结构抗震承载力的动力学控制方程为:

$$\begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_b & -c_b \\ -c_b & c_b + c_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式中, u_b 表示装配式混凝土框架结构的切线刚度, c_s 表示截面弹性内力增量, 取 SCBRB 构件混凝土, 得到强震下装配式混凝土框架结构体系的荷载为:

$$d_i = \begin{bmatrix} k_b & -k_b \\ -k_b & k_b + k_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_b \\ m_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_b \\ u_s \end{bmatrix} d_{ei} \quad (10)$$

预先设定装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力结构强度^[5], 装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力推覆侧向应力输出为:

$$x_{ij}' = x_i - \rho + j \frac{2\rho}{n} \quad (11)$$

式中, ρ 表示材料密度, x_i 为单独受轴力下的极限承载能力, 根据各支链在动/静平台之间的载荷比进行抗震承载应力测试, 提高装配式混凝土框架结构的动态响应能力。

2 抗震承载力测试优化

2.1 混凝土框架结构体系的抗震动态承载力评估

在上述构建装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的约束参量模型的基础上, 进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法优化设计^[6], 本文提出一种基于弹性模量载荷应力线性评估的装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法。结合受力参量估计方法进行应力屈服响应评估, 得到第 $n+1$ 、 n 时步内混凝土框架结构体系的抗震承载的徐变应变增量为:

$$d(t) = \begin{cases} \arctan\left\{\frac{X'_2(t)}{X'_1(t)}\right\}, & X'_1(t) > 0 \\ \arctan\left\{\frac{X'_2(t)}{X'_1(t)}\right\} + \pi, & X'_1(t) < 0, t=1, 2, \dots, T \\ \pi/2, & X'_1(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

采用屈服应力推服响应控制方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载和自适应控制, 在并联机构的拓扑结构中, 装配式混凝土框架结构体系抗疲劳断裂的安全允量条件下的状态量 ($x_0(x_0=[\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \theta_0])^T$), 得到装配式混凝土框架结构扰动控制的线性化方程为:

$$\begin{cases} mV\Delta\dot{\theta} = (c^\alpha q^S_M + P)\Delta\alpha + mgsin\theta\Delta\theta + P\Delta\delta_\varphi \\ \quad + m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + F_g \\ J_{z1}\Delta\ddot{\varphi} = -c^\alpha q^S_M(x_g - x^T)\Delta\alpha - qS_m m_{dk} l_k^2 \Delta\dot{\varphi}/V \\ \quad - P(x_R - x_T)\Delta\delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \Delta\delta_\varphi - \\ \quad m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi (x_R - x_T) - J_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + M_g \end{cases} \quad (13)$$

计算每条支链上装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力黏滞阻尼状态参数为 δ , δ 与状态 X_{RM} , V_{RM} , θ_P , w_P 是互不相关的, 用 $\Psi_2(d_2(t))$ 表示为矩阵 $L(Z_2 + Z_3)^{-1}L^T$ 与 $M^T(Z_2 + Z_3)^{-1}M^T$ 的 Bergmann 核, 由此判定装配式混凝土框架结构体系的抗震承载性能是否稳定, 判决方程为:

$$\left(\frac{1}{2}(u_A^+ - u_A^-) - \frac{1}{2}F_A, \frac{1}{2}(u_A^+ - u_A^-) - \frac{1}{2}(F_B + F_A)\right) \quad (14)$$

将混凝土框架结构体系抗震承载力的承载力测试问题转换为求超定方程的最优解问题,得到混凝土框架结构体系抗震承载力测试的收敛性评价规则如下:

$$\begin{aligned}
 N_{i,j} &= (f(A)_{i,1} \otimes f(B)_{1,j}) \oplus (f(A)_{i,2} \otimes f(B)_{2,j}) \oplus \dots \oplus (f(A)_{i,h} \otimes f(B)_{h,j}) \\
 &= ((K_A \cdot (A_{i,1} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot (B_{1,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \oplus \dots \oplus \\
 &\quad ((K_A \cdot (A_{i,h} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot (B_{h,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \\
 &= \sum_{u=1}^h ((K_A \cdot (A_{i,u} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (K_B \cdot (B_{u,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \bmod n \\
 &= \sum_{u=1}^h ((\frac{s \cdot l}{k_A^r} \cdot (A_{i,u} + rp) \cdot k_A^r \bmod n) \cdot (\frac{s \cdot l}{k_B^r} \cdot (B_{u,j} + rp) \cdot k_B^r \bmod n)) \bmod n \\
 &= (s \cdot l)^2 \sum_{u=1}^h ((A_{i,u} + rp) \cdot (B_{u,j} + rp)) \bmod n \\
 &= (s \cdot l)^2 \sum_{u=1}^h (A_{i,u} \cdot B_{u,j} + (A_{i,u} + B_{u,j}) \cdot rp + r^2 p^2) \bmod n
 \end{aligned} \quad (15)$$

根据稳定性判决条件,构建混凝土框架结构体系抗震承载力测试的控制模型和动力学模型,得到抗震承载力的输出动能 T 和势能 V :

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} M_{RL} \dot{X}_{RL}^2 + \frac{1}{2} M_{RR} \dot{X}_{RR}^2 + \frac{1}{2} J_{RL} \dot{\theta}_{RL}^2 + \frac{1}{2} J_{RR} \dot{\theta}_{RR}^2 \\
 &+ \frac{1}{2} M_P [(\dot{\theta}_P L \cos \theta_P + \dot{X}_{RM})^2 + (-\dot{\theta}_P L \sin \theta_P)^2] + \frac{1}{2} J_{P\theta} \dot{\theta}_P^2 \\
 &+ \frac{1}{2} J_{P\delta} \dot{\delta}^2
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$V = M_P g l \cos \theta_P \quad (17)$$

每次改变尺寸参数时,以载荷分离最大和抗拉能力可靠性评价最优为目标优化参考模型,进行混凝土框架结构体系的抗震动态承载力评估。

2.2 装配式混凝土框架结构的抗震承载力测试优化估计

采用拟线性评估方法估计装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力,采用 Kalman 滤波算法进行误差补偿和自适应调节,得到装配式混凝土框架结构的抗震承载力控制的平衡解满足:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq -2 \sum_{i=1}^n t_{i1} f_i(y_i(t)) [f_i(y_i(t)) - \rho_i y_i(t)] \\
 &\quad - 2 \sum_{i=1}^n t_{i2} f_i(y_i(t - \delta(t))) [f_i(y_i(t - \delta(t))) - \rho_i y_i(t - \delta(t))] \\
 &= -2 f^T(y(t)) T_1 f(y(t)) - 2 f^T(y(t - \delta(t))) T_2 f(y(t - \delta(t))) \\
 &\quad + 2 y^T(t) \Sigma T_1 f(y(t)) + 2 y^T(t - \delta(t)) \Sigma T_2 f(y(t - \delta(t)))
 \end{aligned} \quad (18)$$

结合约束条件,得到抗震承载力的约束进化方程描述为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 f(e, 0.5, \delta) \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 f(1, 0.25, \delta) + b u \end{cases} \quad (19)$$

式中, z_1, z_2 是断裂韧度约束参数, y 为载荷分离特征量,采用屈服应力推服响应控制方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载,建立动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (20)$$

式中:

$$\tau_{ij} = [\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (21)$$

忽略卸载柔度的扰动影响以及装配式混凝土框架结构体系的自身重力作用,有:

$$p g_i = 0 \quad (22)$$

根据上述分析,实现装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载和自适应控制,结合参数估计方法,实现装配式混凝土框架体系的抗震承载力测试。

3 实验测试分析

为了测试本文方法在实现装配式混凝土框架体系的抗震承载力测试中的应用性能,进行试件测试,测试中采用 CAD/CAM 数控仿真软件建立加载平台,采用有限元分析软件进行混凝土框架结构体系的抗震承载力的有限元分析,设定 $C_{1e} = 1.44$, $C_{2e} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_s = 1.3$,得到混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的参数分布值见表 1。

表 1 混凝土框架结构体系的抗震承载力参数

Table 1 Seismic bearing capacity parameters of concrete frame structure system

型号	特征周期/s	剪切波速/(m/s)	侧向卸荷/kPa
CM600×600	0.45	230	33.64
CM300×200	0.34	230	45.67
CM350×600	0.32	200	44.32
CM400×200	0.35	200	33.24
CM300×600	0.67	230	33.35
CM500×200	0.54	230	26.43
CM300×300	0.64	240	33.12

根据上述参数设计,进行抗震应力加载,得到抗震承载力的加载时域分布如图 1 所示。

以图 1 的数据为输入,测试式混凝土框架结构体系的抗震承载力和抗拉能力,实现混凝土框架结构体系的抗震承载力参数的优化估计,得到估计结果如图 2 所示。

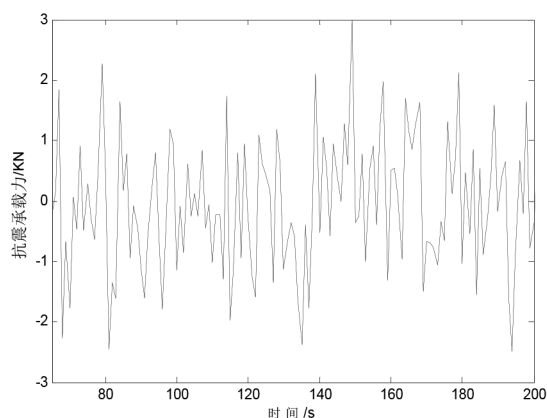


图1 抗震承载力的加载时域分布

Fig.1 Loading time domain distribution of seismic bearing capacity

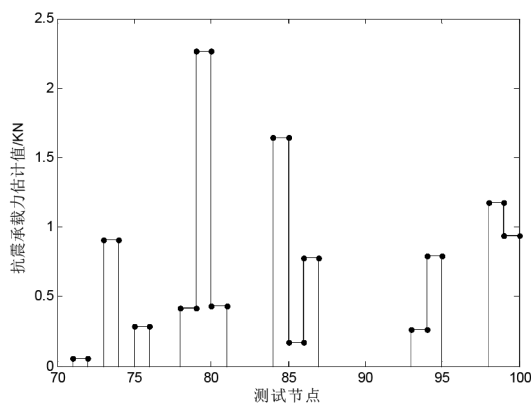


图2 抗震承载力参数的优化估计

Fig.2 Optimal estimation of seismic bearing capacity parameters

分析图2得知,本文方法能有效实现装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试,测试结果准确可靠。

4 结语

对装配式混凝土框架结构体系设计中,需要进行装配式混凝土框架结构体系抗震安全性测试,结合装配式混凝土框架的抗震测试,提高抗震能力。本文提出一种基于弹性模量载荷应力线性评

估的装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试方法。构建装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的约束参量模型,结合受力参量估计方法进行应力屈服响应评估,采用屈服应力推服响应控制方法进行装配式混凝土框架结构体系的抗震承载力的自动加载和自适应控制,测试式混凝土框架结构体系的抗震承载力和抗拉能力,实现混凝土框架结构体系的抗震承载力参数的优化估计。研究得知,本文方法对混凝土框架结构体系的抗震承载力测试的准确性较高。

参考文献:

- [1] 张波,杨勇,刘义,等. 预应力钢带加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 工程力学,2016,33(3): 104-111.
- [2] 周绪红,甘丹,刘界鹏,等. 方钢管约束钢筋混凝土轴压短柱试验研究与分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(2): 68-74.
- [3] 王刚. 高强箍筋约束混凝土柱轴压下约束效果的影响因素[J]. 工程抗震与加固改造,2014,36(2): 119-123.
- [4] 黄玲珠,林彬华,王士成. 测震台网实时波形数据质量自动监控[J]. 华南地震,2017,37(04): 20-25.
- [5] 寇佳亮,梁兴文,邓明科. 纤维增强混凝土剪力墙恢复力模型试验与理论研究 [J]. 土木工程学报,2013,46(10): 58-70.
- [6] 卜凡民,聂建国,樊健生. 高轴压比下中高剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013,34(4): 91-98.
- [7] Aviram A, Stojadinovic B, Parra-Montesinos G J. High-performance fiber-reinforced concrete bridge columns under bidirectional cyclic loading [J]. ACI Structural Journal, 2014,111(2):303-312.
- [8] 高盟,高广运,王滢,等. 均布突加荷载作用下圆柱形衬砌振动响应的解析解[J]. 岩土工程学报,2010,32(2): 237-242.
- [9] 耿方方,李亚东,赵昕,等. 节点域刚度对装配整体式混凝土框架结构抗震性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018,18(27):187-192.