

赵邵华,苏永华.强震后高层建筑结构变形监测精度提高的研究[J].地震工程学报,2020,42(1):230-235.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.230

ZHAO Shaohua, SU Yonghua. Improvement of the Deformation Monitoring Precision for High-rise Buildings after Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 230-235.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.230

# 强震后高层建筑结构变形监测精度提高的研究

赵邵华<sup>1</sup>, 苏永华<sup>2</sup>

(1. 湖南城建职业技术学院 建筑工程系, 湖南 湘潭 411101; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为解决强震作用后倾斜高层建筑结构监测存在的精度低、用时长等问题,提出高精度强震作用后倾斜高层建筑结构形变监测方法。通过确定回归平面强震后倾斜高层建筑结构的法线倾斜值、倾斜角与倾斜方向,来确定强震作用后倾斜高层建筑结构形变情况,完成强震作用后倾斜高层建筑结构的形变监测。使用 BXJC 1.0 软件进行建筑高层建筑形变模拟实验,在建筑高层附近设定四个基准点,基于建筑高层的底部每个立柱中近似等高方位设定 16 个形变监测结构点,实验发现:所提方法监测误差小精度高,监测误差最大值为 0.05%,且监测用时较短,证明此方法进行监测的可行性。

**关键词:**强震; 倾斜高层; 形变监测

中图分类号: TU196

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0230-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.230

## Improvement of the Deformation Monitoring Precision for High-rise Buildings after Strong Earthquakes

ZHAO Shaohua<sup>1</sup>, SU Yonghua<sup>2</sup>

(1. Department of Architecture and Civil Engineering, Hunan Urban Construct College, Xiangtan 411101, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

**Abstract:** A high-precision monitoring method of structural deformation of inclined high-rise buildings after strong earthquake is proposed to solve the problems of real-time monitoring of inclined high-rise buildings after strong earthquakes; such problems include low precision and long time consumption. The structural deformation of the building under a strong earthquake is determined by defining the normal inclination value, inclination angle, and tilt direction of the inclined high-rise building after a strong earthquake in a regression plane. Then, deformation monitoring of the inclined high-rise building after a strong earthquake is completed. The deformation simulation experiment of the building is conducted by using BXJC 1.0 software. Four reference points are set near the building, and 16 deformation monitoring points are set on each column at the bot-

tom of the building. The proposed method has the advantages of small error (the maximum monitoring error is 0.05%), high precision, and short monitoring time. Thus, the method can be used for real-time monitoring.

**Keywords:** strong earthquake; inclined high-rise building; deformation monitoring

## 0 引言

高层倾斜建筑结构在长期的使用过程中,由于受到地质条件变动、地震等因素的干扰,导致建筑结构损伤逐渐增多,抵抗力低下,在面对破坏性地震时抵御性能变弱。倾斜即为建筑结构顶部与底部未能处于相同垂直线中,导致建筑结构存在形变<sup>[1]</sup>。强震作用后倾斜高层建筑结构形变监测是对倾斜高层建筑结构中结构点实行周期性反复监测,以此得到相关监测信息,对检测信息采用相应方法进行形变分析,获取强震作用后倾斜高层建筑结构形变信息。随着自然灾害出现的频率越来越高,高层建筑结构形变对建筑物的使用寿命存在较大影响,同时也严重威胁着人们的生命财产安全。所以,高精度的建筑物结构形变监测是目前建筑研究领域关注的热点问题<sup>[2]</sup>。

文献[3]提出基于有限元技术的建筑物变形模拟方法,该方法没有考虑建筑物实际建筑年限对其本身的影响作用,整体效率稍低;文献[4]在输入地震波作用下的震陷情况进行了数值模拟试验,该方法虽然能够进行建筑结构的形变监测,但针对较大建筑结构的形变检测较为困难,监测应用存在一定局限;文献[5]提出采用 IBIS-S 系统对超高层建筑物进行连续形变监测,并融合时序 InSAR 技术提取监测过程中高层建筑的形变信息。该方法可以监测大型结构形变情况,但该方法的监测精度会随监测距离的增加而逐渐降低。

基于上述问题的存在,本文提出新的强震作用后倾斜高层建筑结构形变监测方法,对地震灾害后倾斜高层建筑结构进行高精度监测,获取强震作用后倾斜高层建筑结构形变数据,采用倾斜形变分析模型等方法进行分析等,实现强震作用后高层建筑结构倾斜形变监测,以期为灾害研究、建筑研究等领域提供形变分析技术支持。

## 1 倾斜高层建筑结构形变监测方法

### 1.1 不同结构点测量

为了获取强震作用后倾斜高层建筑结构数据,在大于三个固定参考点的帮助下,测量强震作用后倾斜建筑结构点数据。多次测量强震作用后倾斜建

筑结构点数据后获取建筑结构点坐标,将测量点设置为测量站点,以下简称站点,得出换测量点(即换站)前后坐标系位移的长度与方向,将新站点测量的数值变换至原站点坐标系里<sup>[6]</sup>。换站测量实现步骤为:

(1) 若在换站时,只存在平移换站,强震作用后倾斜建筑结构点每个坐标轴方向不存在变动。

若在第一站点,测量强震作用后倾斜高层建筑结构形变的结构点 F 坐标是  $(x_0, y_0, z_0)$ , F 点和第一站原点 R 之间的间隔是  $P_0$ , 角度是  $(\epsilon_0, \varphi_0, \varphi_0)$ , 则:

$$x_0 = P_0 \cdot \sin\varphi_0 \cdot \cos\epsilon_0 \quad (1)$$

$$y_0 = P_0 \cdot \sin\varphi_0 \cdot \sin\epsilon_0 \quad (2)$$

$$z_0 = P_0 \cdot \sin\varphi_0 \quad (3)$$

经过换站,若处于第 2 站点,强震作用后倾斜建筑结构点 F 坐标是  $(x_1, y_1, z_1)$ 。将 F 点与 2 站原点 R 之间的测量距离设成  $P_1$ , 角度设成  $(\epsilon_1, \varphi_1, \varphi_1)$ , 那么:

$$x_1 = P_1 \cdot \sin\varphi_1 \cdot \cos\epsilon_1 \quad (4)$$

$$y_1 = P_1 \cdot \sin\varphi_1 \cdot \sin\epsilon_1 \quad (5)$$

$$z_1 = P_1 \cdot \sin\varphi_1 \quad (6)$$

由于测量点 F 的空间绝对坐标是固定的,那么 F 点相对坐标在换站(1—2)时,间隔变化值  $\Delta F(\Delta x_F, \Delta y_F, \Delta z_F)$  依次是:

$$\Delta x_F = x_1 - x_0 = F_1 \cdot \sin\varphi_1 \cdot \cos\epsilon_1 - F_0 \cdot \sin\varphi_0 \cdot \cos\epsilon_0 \quad (7)$$

$$\Delta y_F = y_1 - y_0 = F_1 \cdot \sin\epsilon_1 \cdot \cos\varphi_1 - F_0 \cdot \sin\epsilon_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (8)$$

$$\Delta z_F = z_1 - z_0 = F_1 \cdot \cos\varphi_1 - F_0 \cdot \cos\varphi_0 \quad (9)$$

(2) 若换站时,测量点只围绕坐标系原点转动,原点方位不存在变动

若处于第一站点,测量结构点 F 坐标是  $(x_0, y_0, z_0)$ , F 点和第一站原点 R 测量间隔是  $P_0$ , 角度是  $\epsilon_0, \varphi_0, \varphi_0$ , 那么式(1)~式(3)依然成立<sup>[7]</sup>。

若换站之后坐标系(2 站)围绕原点 R 变换成  $(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ , 那么换站后,强震作用后倾斜建筑结构点 F 的新相对坐标 F 是  $(x'_1, y'_1, z'_1)$ , 那么:

$$x'_1 = P_0 \cdot \sin(\varphi_0 + \xi_{Fz}) \cdot \cos(\epsilon_0 + \xi_{Fx}) \quad (10)$$

$$y'_1 = P_0 \cdot \sin(\varphi_0 + \xi_{Fz}) \cdot \sin(\epsilon_0 + \xi_{Fx}) \quad (11)$$

$$z'_1 = P_0 \cdot \cos(\varphi_0 + \xi_{Fz}) \quad (12)$$

并且经过换站,  $F$  点新坐标都可以显示, 则  $(x''_1, y'_1, z'_1)$  并非未知。

若经过换站的新坐标系  $R'$  里测量强震作用后倾斜高层建筑结构点是  $q'(x'_1, y'_1, z'_1)$ , 坐标轴夹角是  $(\epsilon_q, \varphi_q, \varphi_q)$ , 那么把它变换至原坐标系  $R$  里的坐标是  $(x, y, z)$ , 夹角是  $(\epsilon, \phi, \varphi)$ , 则:

$$x = x' - Px \quad (13)$$

$$y = y' - Py \quad (14)$$

$$z = z' - Pz \quad (15)$$

$$\epsilon = \epsilon_q - \epsilon_x \quad (16)$$

$$\phi = \phi_q - \phi_y \quad (17)$$

$$\varphi = \varphi_q - \varphi_z \quad (18)$$

经上述过程, 换站后监测的强震作用后倾斜建筑结构点能够采用式(13)~式(18)变换至原坐标系里, 最终获取每个结构点间方位信息<sup>[8]</sup>。

## 1.2 倾斜形变分析模型

传统监测建筑结构形变的方法采用对比监测点非一致坐标结果的形式, 提取建筑结构的垂直沉降值、水平位移值以及倾斜形变值<sup>[9]</sup>。其中, 倾斜形变值需要设定倾斜监测点(建筑顶层)进行倾斜监测, 之后通过倾斜监测点监测结果的运算获取形变值<sup>[10,11]</sup>。采用倾斜形变分析模型, 基于不同测量点换站监测采集到的倾斜高层建筑结构数据, 分析地  
震作用后倾斜高层建筑结构的倾斜值、倾斜角与倾斜方向<sup>[12]</sup>。

### 1.2.1 设置回归平面

假定在倾斜高层建筑物结构上设置  $M$  个形变监测点, 换站监测采集的强震作用后倾斜高层建筑结构数据实行三维坐标检测, 获取坐标点  $(x, y, z)$ , 使用该坐标点能够拟合出回归平面:

$$Bx + Cy + Dz + E = 0 \quad (19)$$

式中: 设  $B, C, D$ , 为强震作用后倾斜高层建筑结构平面方程式的系数,  $E$  代表常数。变换公式(19), 则:

$$z = -\left(\frac{B}{D}x + \frac{C}{D}y + \frac{E}{D}\right) \quad (20)$$

假设变换后系数  $B' = -\frac{B}{D}, C' = -\frac{C}{D}, E' = -\frac{E}{D}$ , 则:

$$z = B'x + C'y + E' \quad (21)$$

在回归平面中, 每个倾斜高层建筑结构形变点的高程残差  $U_{z_j}$  为:

$$U_{z_j} = B'x_j + C'y_j + E', j = 1, 2, \dots, M \quad (22)$$

以矩阵的形式描述公式(22), 则:

$$U_{z_j} = \begin{bmatrix} U_{z_1} \\ U_{z_2} \\ \vdots \\ U_{z_M} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M & y_M & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B' \\ C' \\ D' \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$Y = \begin{bmatrix} B' \\ C' \\ D' \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_M \end{bmatrix}$$

按照最小二乘概念, 当残差平方和较小时, 解向量是:

$$X = (X^T X)^{-1} (X^T Z) \quad (24)$$

通过确定  $B', C', D'$  即可确定该回归平面方程的系数和常数。

### 1.2.2 倾斜形变状态的确定方法

通过回归平面的系数  $B, C, D$  和  $B', C'$  便能判断此回归平面的法线向量方向角、法线的倾角值以及倾斜方向, 按照此类参数便可分析强震作用后倾斜高层建筑结构形变情况<sup>[13-14]</sup>。

假定强震作用后倾斜高层建筑形变结构的法线向量和  $x, y, z$  轴的夹角依次是  $\epsilon, \phi, \varphi$ 。那么:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \arccos(B / \sqrt{B^2 + C^2 + D^2}) = \\ &\arccos(B' / \sqrt{B'^2 + C'^2 + 1}) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \arccos(C / \sqrt{B^2 + C^2 + D^2}) = \\ &\arccos(B' / \sqrt{B'^2 + C'^2 + 1}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \arccos(D / \sqrt{B^2 + C^2 + D^2}) = \\ &\arccos(B' / \sqrt{B'^2 + C'^2 + 1}) \end{aligned} \quad (27)$$

在三个夹角中,  $\epsilon$  角用于判断强震作用后倾斜高层建筑结构倾斜值,  $\phi, \varphi$  角用于判断强震作用后倾斜高层建筑物结构倾斜的方向, 根据此组参数便可完成强震作用后倾斜高层建筑物结构形变监测<sup>[15]</sup>。

## 2 监测实例分析

### 2.1 监测环境

在 2008 年 5 月 12 日汶川地震后, 以周边的某高层楼房为例, 该楼房一共 20 层, 属于倾斜高层建筑结构, 层高为 3.2 m, 柱主要截面尺寸是 600 m × 700 m 与 600 m × 800 m。4 层以下的混凝土强度等级是 C<sub>40</sub>, 4 层之上的混凝土强度等级是 C<sub>30</sub>。图 1 为汶川地震的加速度波图。

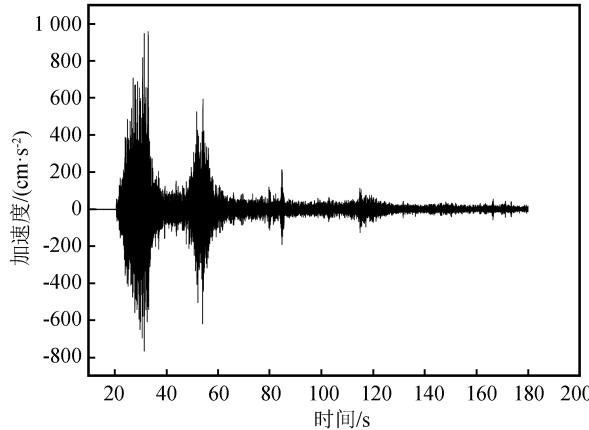


图 1 地震动加速度时程

Fig.1 Acceleration time history of ground motion

利用 1.1 中的监测方法,对该高层建筑的倾斜情况进行监测,在高层建筑附近设定四个基准点,基于高层建筑楼房的底部每个立柱中近似等高方位设定 16 个形变监测结构点,如图 2 所示。

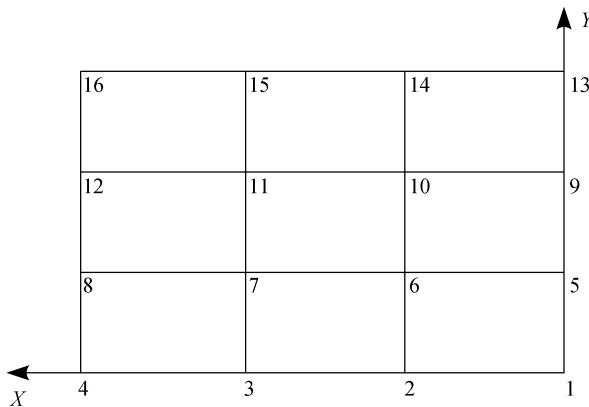


图 2 形变监测点设定详情

Fig.2 Setting details of deformation monitoring points

## 2.2 采用本文方法得到的监测结果

对该高层建筑实行 16 次形变监测,每个结构点的平面坐标( $x, y$ )如表 1 所示。

设定两组监测实验,1 至 6 次为一组,7 至 16 次为二组,多次监测下的倾斜高层建筑结构形变值如表 2 所列。

基于表 2 形变值分析强震作用后倾斜高层结构点回归平面的每个特征值( $\epsilon, \phi, \varphi$ )形变状态如表 3 所示。

根据表 3 可知,在 1~6 次监测中,该建筑高层在强震作用后的形变值为  $90^\circ 60' 59''$ 、 $90^\circ 60' 46''$ 、 $14''$ ;在 7~18 次的监测中,该建筑高层在强震作用后的形变值为  $135^\circ 60' 31''$ 、 $136^\circ 1' 46''$ 、 $18''$ 。

## 2.3 本文方法的监测性能对比验证

为了验证本文 1.2 节中倾斜形变分析模型的准

确性,将本文方法的分析监测结果与文献[3]方法、文献[4]方法以及文献[5]方法进行监测误差比较。使用 BXJC 1.0 软件进行不同方法的高层建筑形变监测性能测试,以验证不同方法的监测效果,得到对比结果如图 3 所示。

表 1 每个结构点监测坐标详情

Table 1 Details of monitoring coordinates for each structural point

| 结构点编码 | X 轴    | Y 轴    |
|-------|--------|--------|
| 1     | 0.1    | 0.1    |
| 2     | 0.1    | 9.622  |
| 3     | 0.1    | 19.244 |
| 4     | 0.1    | 28.825 |
| 5     | 9.611  | 0.1    |
| 6     | 9.616  | 9.613  |
| 7     | 9.621  | 19.242 |
| 8     | 9.612  | 28.837 |
| 9     | 19.221 | 0.1    |
| 10    | 19.227 | 9.621  |
| 11    | 19.225 | 19.24  |
| 12    | 28.831 | 28.84  |
| 13    | 28.831 | 0.1    |
| 14    | 28.836 | 9.631  |
| 15    | 25.841 | 19.231 |
| 16    | 28.835 | 28.832 |

表 2 实验组结构点形变值

Table 2 Deformation value of structural points for each experimental group

| 结构点编码 | 一组  | 二组  |
|-------|-----|-----|
| 1     | 2.9 | 3.2 |
| 2     | 3.5 | 3.6 |
| 3     | 4.1 | 4.2 |
| 4     | 4.7 | 4.8 |
| 5     | 3.0 | 3.6 |
| 6     | 3.6 | 4.2 |
| 7     | 4.2 | 4.8 |
| 8     | 4.9 | 5.3 |
| 9     | 3.1 | 3.8 |
| 10    | 3.7 | 4.8 |
| 11    | 4.3 | 5.4 |
| 12    | 4.9 | 5.9 |
| 13    | 3.1 | 4.8 |
| 14    | 3.6 | 5.3 |
| 15    | 4.1 | 5.9 |
| 16    | 5.0 | 6.5 |

表 3 实验组回归平面特征值

Table 3 Eigenvalues of regression planes for each experimental group

| 组别 | $\epsilon$ |     |     | $\Phi$ |     |     | $\Delta\varphi$ |
|----|------------|-----|-----|--------|-----|-----|-----------------|
|    | (°)        | (') | (") | (°)    | (') | (") |                 |
| 一组 | 90         | 60  | 59  | 90     | 60  | 46  | 14              |
| 二组 | 135        | 60  | 31  | 136    | 1   | 46  | 18              |

根据图 3 可知,在强震作用后,对该建筑高层进行的 18 次形变实时监测中,当监测次数为 2 时,本

文方法的监测误差约为 0.046%，文献[3]方法监测误差约为 0.052%，文献[4]方法监测误差约为 0.048%，文献[5]方法监测误差约为 0.047%；当监测次数为 10 时，本文方法的监测误差约为 0.018%，文献[3]方法监测误差约为 0.022%，文献[4]方法监测误差约为 0.021%，文献[5]方法监测误差约为 0.025%；本文方法的检测误差较小，证明本文方法的监测结果准确度较高。

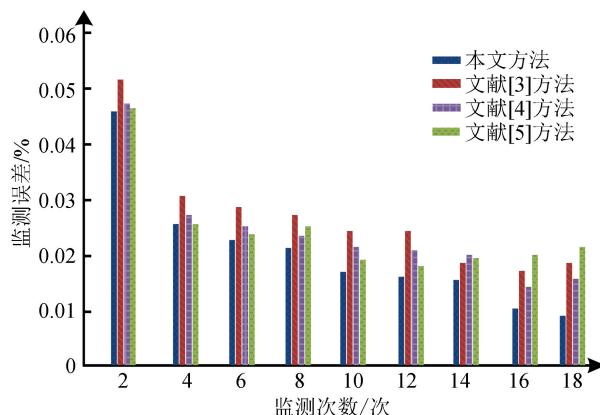


图 3 不同方法方法监测误差测试结果

Fig.3 Test results of monitoring errors by different methods

为进一步验证本文方法的优势，对本文方法、文献[3]方法、文献[4]方法和文献[5]方法在进行监测时的时间消耗进行了对比，对比结果如图 4 所示。

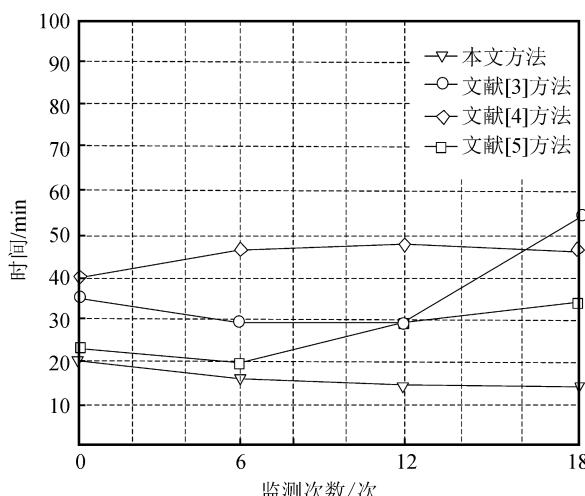


图 4 不同方法监测耗时对比结果

Fig.4 Comparisons between monitoring time of different methods

分析图 4 可知，当监测次数为 6 时，本文方法监测的时间为 18 min，文献[3]方法的监测时间为 30 min，文献[4]方法的监测时间为 48 min，文献[5]方法的监测时间为 20 min，当监测次数为 18 时，本文方法监测的时间为 17 min，文献[3]方法的

监测时间为 55 min，文献[4]方法的监测时间为 48 mim，文献[5]方法的监测时间为 32 min；本文方法监测耗时最短，且整体走势为下降趋势，说明本文方法进行实时监测具有一定的可行性。

### 3 结论

本文提出强震作用后倾斜高层建筑形变监测方法，在大于三个固定参考点的前提下，采用倾斜形变模型分析，通过确定回归平面强震后倾斜高层建筑结构的法线倾斜值、倾斜角与倾斜方向，确定强震作用后倾斜高层建筑结构形变情况。以 2008 年汶川地震作为地震测试对象，以周边的某高层楼房为研究目标，多次监测后分析本文所提方法的监测效果，并与文献中的方法进行对比，实验结果表明，本文方法监测性能相比其他方法而言，具有监测精度高，耗时短的优势，可为强震后建筑结构形变监测工作提供初步参考借鉴，但仍需后续进行更多的现场验证才能实现实际应用。

### 参考文献(References)

- [1] 刘炼雄,胡昌华,何川,等.一种基于移动像机的大型结构件形变监测方法[J].中国测试,2017,43(5):11-14,19.  
LIU Lianxiong,HU Changhua,HE Chuan,et al.A Large-scale Structure Deformation Monitoring Method Based on Mobile Digital Camera[J].China Measurement & Testing,2017,43(5):11-14,19.
- [2] 许立强.混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估[J].地震工程学报,2018,40(1):14-19,47.  
XU Liqiang.Evaluation of Earthquake Damage and Anti-destruction Ability of Concrete High-rise Building Structures[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):14-19,47.
- [3] 刘成清,罗馨怡,马开强.竖向荷载作用下高层建筑斜交网格筒结构外鼓侧移研究[J].钢结构,2017,32(11):74-79.  
LIU Chengqing,LUO Xinyi,MA Kaiqiang.Research on Bulge Displacement of High-rise Diagrid Tube Structure under Vertical Loads[J].Steel Construction,2017,32(11):74-79.
- [4] 徐进,陈卓识,孙锐.液化土层上建筑物不均匀震陷的数值研究[J].地震工程与工程振动,2017,37(4):158-164.  
XU Jin,CHEN Zhuoshi,SUN Rui.Numerical Study on Earthquake-induced Uneven Settlement of Liquefiable Soil Layers [J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2017,37(4):158-164.
- [5] 周吕,文学霖,杨飞,等.微变形雷达系统超高层建筑物变形监测[J].测绘通报,2018(S1):176-178,234.  
Zhou Lu,WEN Xuelin,YANG Fei,et al.Deformation Monitoring of Super High-rise Buildings in Micro-deformation Radar System[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2018(S1):176-178,234.

- [6] 刘泉声,蒋亚龙,何军.非连续变形分析的精度改进方法及研究  
趋势[J].岩土力学,2017,38(6):1746-1761.  
LIU Quansheng, JIANG Yalong, HE Jun. Precision Improvement Methods and Research Trends of Discontinuous Deformation Analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1746-1761.
- [7] 李广洲,谭平,李祥秀,等.飞机撞击某隔震办公楼的研究[J].  
华南地震,2015,35(4):17-24.  
LI Guangzhou, TAN Ping, LIXiangxiu, et al. Study on the Plane Crash on an Isolated Office Building[J]. South China Journal of Seismology, 2015, 35(4): 17-24.
- [8] 傅学怡,邸博,吴兵,等.高层、超高层建筑结构设计调平法及其  
应用[J].建筑结构学报,2018,39(5):84-90.  
FU Xueyi, DI Bo, WU Bing, et al. Research and Application of Level Adjustment Method for Structural Design of High-rise Building[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 84-90.
- [9] 张伟光,杨长德,王鹏.基于地震波法的底板破坏区域探测技术  
及应用[J].中国安全生产科学技术,2016,12(6):77-81.  
ZHANG Weiguang, YANG Changde, WANG Peng. Detection-Technology of Floor Damage Area Based on Seismic Wave Method and Its Application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(6): 77-81.
- [10] 崔路苗,郜志宇.地震区居民建筑钢结构极限承载力测试与分  
析[J].地震工程学报,2018,40(1):54-59.  
CUI Lumiao, BU Zhiyu. Test and Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Residential Building Steel Structures in Seismic Areas [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 54-59.
- [11] 张爱军,程选生,刘博,等.不同类型混凝土贮液结构液-固耦合  
弹塑性地震响应[J].建筑结构学报,2016,37(S1):227-232.  
ZHANG Aijun, CHENG Xuansheng, LIU Bo, et al. Liquid-solid Coupled Elasto-plastic Seismic Response of Different Concrete Liquid-storage Structures [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 227-232.
- [12] LI L L, ZHANG Z J, ZHANG P, et al. Deformation Behaviors of Cu Bicrystals with an Inclined Twin Boundary at Multiple Scales[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(7): 698-702.
- [13] 王明珉,王源,朱立刚,等.超高层建筑竖向地震响应的特点与  
应对方法[J].建筑结构,2019,49(22):34-38,45.  
WANG Mingmin, WANG Yuan, ZHU Ligang, et al. Characteristics and Countermeasures of Vertical Seismic Response for Super High-rise Buildings[J]. Building Structure, 2019, 49(22): 34-38, 45.
- [14] TU R, LIU J H, LU C X, et al. Cooperating the BDS, GPS,  
GLONASS and Strong-motion Observations for Real-time Deformation Monitoring[J]. Geophysical Journal International, 2017, 209(3): 1408-1417.
- [15] 孙岳阳,赵新铭,赵林,等.压型钢板-轻骨料混凝土组合楼板  
受弯承载力试验研究[J].建筑结构,2017,47(16):70-73,29.  
SUN Yueyang, ZHAO Xinming, ZHAO Lin, et al. Experimental Study on Flexural Bearing Capacity of Profiled Steel Sheet-light-weight Aggregate Concrete Composite Slabs[J]. Building Structure, 2017, 47(16): 70-73, 29.