第43卷 第5期	中国岩溶	Vol. 43 No. 5
2024年10月	CARSOLOGICA SINICA	Oct. 2024

马琳. 岩溶区软基高层建筑的沉降变形预警[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1179-1186. DOI: 10.11932/karst20240513

# 岩溶区软基高层建筑的沉降变形预警

# 马琳

(杨凌职业技术学院建筑工程分院,陕西 咸阳 712100)

**摘** 要:为合理保证岩溶区软基高层建筑的运营安全,文章以建筑沉降变形监测成果为实例基础,在 建筑变形特征及成因分析基础上,通过稳定性、极限变形及变形速率3类判据综合实现其预警研究。 结果表明:岩溶区软基高层建筑具有特殊的沉降特征,地基土和地下水变化是其出现沉降或差异沉 降的主要影响因素;同时,不同判据的预警结果存在一定差异,按照不利原则,综合确定3个监测点 的预警等级为Ⅲ级,该建筑沉降危害程度一般,但不仅需加强监测频率,观测其后续变化趋势,还应 采取加固措施。

关键词:岩溶区;高层建筑;沉降变形特征;稳定性判据;极限变形判据;变形速率判据;沉降预警 创新点:以岩溶区软基高层建筑为工程背景,在建筑变形特征及成因分析基础上,通过稳定性、极限 变形及变形速率3类判据确保预警结果的准确性。

中图分类号:TU470;P642.25 文献标识码:A 文章编号:1001-4810(2024)05-1179-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 0 引 言

近年,中国建筑行业发展快速,特殊地质条件下 的建筑物也越来越多,开展特殊基础条件下的变形 预警研究显得格外重要<sup>[1-2]</sup>。目前,沈阳等<sup>[3]</sup>对钢平 台的预警指标进行了细化研究;左自波等<sup>[4]</sup>开展了 超高层的安全监测及预警指标分析。上述研究虽取 得了相应成果,但均未涉及基于变形监测成果基础 上的建筑预警研究,即该方面研究仍有拓展空间。

同时,岩溶区高层建筑越来越多,其相关研究也 较多,如肖鸿斌等<sup>[5]</sup>对串珠状溶洞区的建筑基础进 行了设计分析;曹贤发等<sup>[6]</sup>评价了岩溶区的地基岩 溶发育程度;李想等<sup>[7]</sup>对岩溶区的建筑桩基进行优 化。上述研究充分说明开展此研究是十分必要的。

根据代长生<sup>[8]</sup>、耿海深等<sup>[9]</sup>及李晓斌<sup>[10]</sup>的研究成 果,欲实现岩土领域的变形预警研究,其判据应采用 多类判据。因此,本文以岩溶区软基高层建筑为工 程背景,通过稳定性、极限变形及变形速率3类判据 综合实现其沉降变形预警研究,以期为建筑沉降危 害程度评价及其加固处理提供理论指导。

# 1 基本原理

以建筑沉降变形数据为基础,先开展其变形特 征分析;其次,分别构建稳定性判据、极限变形判据 及变形速率判据,并以其开展建筑沉降变形的预警 研究。文中变形特征只进行统计分析,理论并不复 杂,下文重点对3个判据的构建过程进行详细叙述。

#### 1.1 稳定性判据的构建

尖点突变分析可有效解决事物不连续突变问题, 已被广泛应用于岩土领域的稳定性评价过程中,因

资助项目:杨凌职业技术学院 2024 年校内基金项目(ZK24-12)

作者简介:马琳(1980-),女,副教授,主要从事传统建筑设计及理论、建筑施工技术等研究、教学工作。E-mail:ml202203@163.com。

收稿日期: 2023-03-31

在尖点突变分析的应用过程中,先将其标准函 数表示为:

$$V(t) = t^4 + qt^2 + pt$$
 (1)

式中:V(t)为标准函数;t为时间参数;q、p为突变特征参数。

以高层建筑沉降变形数据为基础,利用拟合软件可实现式(1)的拟合处理,即可得到突变特征参数 q、p,再以其计算出突变特征值 *Δ*:

$$\Delta = 8q^3 + 27p^2 \tag{2}$$

通过⊿值开展高层建筑沉降变形的稳定性评 价,即:

①若⊿值>0,高层建筑沉降变形属于稳定状态。

②若⊿值=0,高层建筑沉降变形的稳定性属临 界稳定状态。

③若⊿值<0,高层建筑沉降变形属于不稳定 状态。

根据⊿值的评价标准及文献 [11] 的研究成果, 当⊿值>0时,其值越大,高层建筑沉降变形的稳定 性相对越好,即可以此为依据,实现不同监测点间的 稳定程度排序。

#### 1.2 极限变形判据的构建

一般来说,若某监测点要出现变形破坏,那么其 变形值要达到一定程度,即存在极限变形值*S*,且不 同监测点的值存在一定差异;同时,若现有变形值*S*, 越小,即其与*S*,值的间距越大,那么其剩余变形量相 对也越大,就具相对更好的稳定状态,因此,以此两 变形值为基础,构建出极限变形判据条件下的评价 指标*F*.;

$$F_s = S_t / S_j \tag{3}$$

*F*,值越小,其对应危险性相对也越弱,即预警等级也相对越低。

同时,提出利用双曲线模型求解极限变形值 *S<sub>j</sub>* 值<sup>[12]</sup>,其表达式为:

$$y_l = t/(a+bt) \tag{4}$$

式中: y<sub>l</sub> 为沉降变形拟合值; t 为时间变量; a、b 为拟 合参数。当 t 值趋近于正无穷大时, y<sub>l</sub> 值趋近于极大 值 1/b, 因此, 将 1/b 值作为 S<sub>i</sub> 值。

#### 1.3 变形速率判据的构建

变形速率值一般较小,且具较强的波动性,其预 警判据难以通过预测等手段实现;同时,考虑到重标 极差法(Rescaled Variance Statistic, V/S)具有较强的 趋势判断能力,从而提出以其构建高层建筑沉降变 形的变形速率判据<sup>[13]</sup>。

V/S 分析属传统重标极差分析方法的改进型,其 具更优的趋势判断能力;结合其基本原理,将其统计 量参数(V/S),表示为:

$$\left(\frac{V}{S}\right)_{n} = \frac{1}{ns^{2}} \left[\sum_{k=1}^{n} \left(\sum_{t=1}^{k} (x_{t} - x')\right)^{2}\right] - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^{n} \sum_{t=1}^{k} (x_{t} - x')\right)^{2}$$
(5)

式中: *n* 为子序列长度; *s*<sup>2</sup> 为子序列方差值; *x*<sub>i</sub> 为对应 节点处的变形值; *k* 为子序列节点序号; *x* '为子序列均值。 (*V*/*S*)<sub>*n*</sub> 与 *n* 具一一对应关系,可改变 *n* 值,得到若干 散点(*n*,(*V*/*S*)<sub>*n*</sub>),且两者具下述函数关系:

$$\lg(V/S)_n = 2H \cdot \lg n + C \tag{6}$$

式中:H为Hurst指数;C为拟合常数。

通过 H 值大小,即可开展建筑变形速率的趋势 评价,标准为:

当*H*值大于零,小于 0.5 时,建筑变形速率具减 小趋势,其危险性及预警等级相对越低。

当*H*值等于 0.5 时,建筑变形速率序列具混沌特征,无法判断其趋势性。

当 H 值大于 0.5, 小于 1.0 时, 建筑变形速率具增 加趋势, 其危险性及预警等级相对越高。

同时, H值与 0.5 的差值 c 越大, 其趋势性相对越强, 因此, 以 c 值构建趋势等级划分标准(表 1)。

#### 1.4 沉降预警体系的构建

结合以往工程经验,将高层建筑沉降变形的预 警等级划分为4级,所用判据为稳定性判据、极限变 形判据及变形速率判据,最终预警等级按3类判据 中的最不利判据确定。经统计,得到预警等级的详 细划分标准如表2所示。

# 2 实例分析

#### 2.1 工程概况

#### 2.1.1 建筑基本信息

某建筑的用地面积约 4630 m<sup>2</sup>, 设计地下 1 层,

#### 表 1 趋势等级划分标准

Table 1 Grading standard of trend

趋势等级	1级	2级	3级
c值范围	<i>c</i> <0.15	0.15≤ <i>c</i> <0.35	<i>c</i> ≥0.35

#### 表 2 高层建筑沉降变形预警等级划分标准

Table 2 Classification standard for early warning of settlement and deformation of high-rise buildings

预警分级	I级一绿色	Ⅱ级—黄色	Ⅲ级—橙色	Ⅳ级一红色
稳定性判据	稳定状态	稳定状态	稳定状态	不稳定状态
极限变形判据	$F_s \leq 0.50$	$0.50 < F_s \le 0.65$	$0.65 < F_s \le 0.80$	$F_{s} > 0.80$
变形速率判据	下降趋势	上升趋势,且趋势 等级为1级	上升趋势,且趋势 等级为2级	上升趋势,且趋势 等级为3级
建议措施	建筑沉降危害程度轻微, 其现有稳定性较好,无需 采取任何措施	建筑沉降危害程度较小, 需加强监测频率,观测其 后续变化趋势	建筑沉降危害程度一般,不仅 需加强监测频率,观测其后续 变化趋势;还应采取加固措施	建筑沉降危害程度较高,不仅 需加强监测频率,观测其后续 变化趋势;还应立即撤出建筑 内人员,并采取加固措施

注: 以3类预警判据中的最不利分级为最终预警等级。

Note: The most unfavorable classification among the three types of early-warning criteria is determined as the final early-warning grade.

地上 25 层, 其中, 地下层高度为 4.5 m, 地上层层高 3 m, 建筑总高度 77.5 m, 属高层建筑。

该建筑平面近似呈正方形状(图1),形态较为规则,其抗震设防属标准类,建筑结构安全等级属二级,基础设计等级为甲级,基础形式为筏板基础,总体工程重要性较高。

2.1.2 项目区地质条件

结合勘察成果,项目区地质条件为:

(1)地形地貌 项目区具阶地地貌,高程介于756~759 m,整体地势较为平坦。

(2)地层岩性 在勘察阶段,区内浅表层主要为 填土,杂色,结构松散,广泛分布于场区范围内,厚度 主要介于 1~2 m;其下土层主要是黏土层,棕黄色,以 可塑状为主,夹砂少量碎块石,其碎块石含量一般少 于 10%,母岩成分较为混杂,该层分布厚度 7~11 m; 下覆基岩主要为二叠系上统灰岩,灰白色,强风化— 中风化,岩芯短柱状,具有溶蚀发育特征,锤击声较 脆,强度较高。各类地层的物理力学参数见表 3。

(3)地质构造 项目区位于大褶皱构造翼部,整 体构造相对较为单一,且临近无断层等构造通过,具 有较好的场地稳定性。

(4)水文地质条件 场区多年平均降雨量为 1107.27 mm,附近未见明显地表水体发育,临近局部 洼地存在一定的小水塘,水深相对较浅,季节变幅也 较大;地下水主要为溶隙水,存在于下覆基岩溶穴中,



Fig. 1 Plane of the building

富集特征差异明显。

据上所述,建筑基础下覆地层主要为黏土层和 灰岩层,两者具有独特的工程性质,总体均是不利, 因此,再对两类地层的工程性质进行详述:

(1)软基性质特征 下覆软土厚度 7~11 m 不等, 且基覆界面存在起伏特征,因此,一方面基础持力层 工程性质相对较弱,具低强度、高压缩性,另一方面, 基础持力层的均匀性相对较差,其后续易出现差异 沉降。

(2)基岩溶蚀特征 据现场钻孔成果,区内基岩

#### 中国岩溶

.. \_ . ....

表 3 地层彻理刀字奓数						
	Table 3         Physical and mechanical parameters of the strata					
地层岩性	重度/kN·m <sup>-3</sup>	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	
填土	19.0	10	0.20	7.62	8.89	
黏土	20.0	10	0.44	5.85	5.13	
溶蚀灰岩	22.1	9 300	0.70	21 000	26.79	
灰岩	24.8	10300	0.29	23 000	33.11	

岩芯均存在不同程度的溶蚀现象,经统计得到线溶 蚀率介于 5.9%~43.7%,平均值为 27.8%,因而工作区 属强溶蚀带,易引发沉降问题。

#### 2.2 建筑变形特征及成因分析

2.2.1 现场变形发育特征

(1)裂缝变形特征

在房屋初步建成以后,其各部位出现明显的裂 缝发育,其发育特性如下:

①剪力墙裂缝发育特征 剪力墙裂缝主要发育 在南、北两侧剪力墙上,且具方向性,其中,北墙裂缝 多位于西侧,南墙裂缝多位于东侧。经统计,南墙裂 缝长度平均值为 2.35 m,宽度平均值为 1.84 mm,倾 角平均值为 45.27°;北墙裂缝长度平均值为 2.54 m, 宽度平均值为 2.03 mm,倾角平均值为 46.04°;两者 对比,以北墙剪力墙的裂缝发育更为显著,且结合裂 缝位置分布特征,得出离最大沉降位置越远,其裂缝 发育程度越高。

②筏板裂缝发育特征 一般来说,剪力墙裂缝 发育至筏板处或不及处就会终止,但也存在几条裂 缝贯穿了整个底板,形成了比较完整的贯通面。

③地面裂缝发育特征 地面裂缝一般发育在结构应力较大处,如边墙与筏板连接处,其延伸长度一般较大,多介于 3.5~6.8 m,宽度 2~4 cm。

结合地质条件及裂缝发育特征,得出建筑物变形已较为显著,其成因是由地基沉降引起的。

(2)沉降变形特征

为充分掌握建筑物沉降特征,沿建筑物轮廓布 设了 8 个监测点(图 1),监测成果按 2 d 一次统计,共 计得到 35 期沉降变形监测成果。

首先,统计得到 8 个监测点的最终沉降值如图 2 示。由图 2 可知,各监测点的沉降差异显著,变化范围为 22.76~56.27 mm,具有显著的沉降特征。一般来说,沉降变形越大,其对应危险性相对越高,因此,





限于篇幅,确定以最大的3个沉降监测点开展后续 分析及预警,即以JC3–JC5监测点的成果作为后续 分析的数据来源。

其次,对 JC3-JC5 监测点的变形时间曲线进行统计。由图 3 可知,随时间持续,3 个监测点的沉降具持续增加趋势,且形态具"陡—缓—陡"的特征。



图 3 沉降变形的时间曲线



为进一步掌握 JC3–JC5 监测点的变形特征,再 对其变形速率进行特征参数统计,其中,JC3 监测点 的变形速率范围为 0.10~3.29 mm·2d<sup>-1</sup>,平均值为 1.37 mm·2d<sup>-1</sup>; JC4 监测点的变形速率范围为 0.09~3.63 mm·2d<sup>-1</sup>,平均值为 1.61 mm·2d<sup>-1</sup>; JC5 监测点的变形速 率范围为 0.08~4.31 mm·2d<sup>-1</sup>,平均值为 1.31 mm·2d<sup>-1</sup>。 3 个监测点的沉降变形速率具较大的波动特征。

#### 2.2.2 沉降变形成因

结合项目实际,将其沉降变形成因总结为地基

土的影响成因和地下水变化的影响成因。

(1)地基土的影响成因

由图 4 可知, 基础持力层为软土, 且其厚度分布 较大, 具高含水率、高渗透性等特征, 物理力学性质 较差, 现场虽已采取部分换填处理, 但在上部建筑物 施工后, 下部黏土层会出现压缩固结, 造成沉降变形; 同时, 由于软土厚度分布差异显著, 不同沉降监测点 的沉降值存在差异。



## 图 4 建筑地层剖面示意图 Fig. 4 Section of the building strata

下覆灰岩溶蚀程度显著,受建筑物自重影响,会导致一些溶蚀较强带出现破坏,进而转变为建筑物 沉降变形;由于溶蚀发育存在较大差异,也会一定程 度上影响建筑物的差异沉降。 其东侧黏土层较厚,中部存在灰岩凸出特征,西 侧黏土层相对较薄,结合实测结果,东、西侧监测点 的沉降值更大、中部更小的特征与其匹配,由此也侧 面说明,地基土是建筑物出现差异沉降的主要原因。

(2)地下水变化的影响成因

区内地下水的季节性变化较大,地下水波动对 建筑物沉降也具有较大影响,主要表现为:低水位期 间的沉降速率比高水位期间的沉降速率大,其差异 可达 1.52~1.94 倍,由此说明地下水也是建筑物沉降 的重要诱因。

## 2.3 建筑沉降变形预警

#### 2.3.1 稳定性判据结果

通过尖点突变分析开展沉降变形的稳定性评价, 经统计得到稳定性判据的结果如表 4 所示。据表 4, 在尖点突变分析过程中, 3 个监测点的拟合度介于 0.957~0.965, 均较趋近于 1, 说明其拟合过程较优, 所 得突变特征参数具有较高的可信度; 同时, 3 个监测 点的 *d* 值均大于 0, 说明其均属于稳定状态, 并按照 *d* 值大小进行稳定性程度排序为 JC4 监测点 > JC3 监测点 > JC5 监测点。

Table 4     Results obtained by stability criterion							
收测占护具	拟合结果	突变特征参数		稳定性评价			
监测点编写	拟合方程	拟合度	<i>q</i> 值	<i>p</i> 值	⊿值	状态类型	稳定程度排序
JC3监测点	$y=t^4-289t^2+12\ 258t$	0.957	-289	12258	3.864×10 <sup>9</sup>	稳定	2
JC4监测点	$y=t^4-314t^2+12\ 794t$	0.965	-314	12794	4.172×10 <sup>9</sup>	稳定	1
JC5监测点	$v=t^4-319t^2+12312t$	0.961	-319	12312	3.833×10 <sup>9</sup>	稳定	3

表 4 稳定性判据的结果 Table 4 Results obtained by stability criteri

按照表 2 中的预警等级划分标准,在稳定性判据条件下,该建筑物的沉降变形预警等级属 I 级-Ⅲ级。

2.3.2 极限变形判据结果

由表 5 可知, 在极限变形值的求解过程中, 3 个 监测点的拟合度介于 0.921~0.948, 也具较优的拟合 效果, 得到评价指标 F<sub>s</sub>的范围为 0.61~0.74, 其对应 预警程度由大到小的顺序为: JC3 监测点>JC4 监测 点>JC5 监测点; 同时, 结合表 2 中的预警等级划分 标准, 在极限变形判据条件下, 该建筑物的沉降变形 预警等级属 Ⅱ-Ⅲ级, 其中, JC5 监测点的预警等级属 Ⅱ级,其余2个监测点属Ⅲ级。

#### 2.3.3 变形速率判据结果

由表 6 可知, 3 个监测点在 V/S 分析过程中, 拟 合度范围介于 0.936~0.954, Hurst 指数值均小于 0.5, 建筑沉降变形速率具减小趋势, 且结合表 1, 得出 JC3 监测点的趋势等级属 2 级, 其余 2 个监测点的趋 势等级属 1 级, 并按照 Hurst 指数值大小排序, 得到 3 个监测点的预警程度排序为: JC4 监测点>JC5 监 测点>JC3 监测点。

同时,结合表2中的预警等级划分标准,在极限变形判据条件下,该建筑物的沉降变形预警等级均

表 5 极限变形判据的结果

Table 5Results obtained by ultimate deformation criterion							
监测点编号	拟合方程	拟合度	极限累计值/mm	现有累计值/mm	分级指标 $F_s$	预警等级	排序
JC3监测点	y=t/(0.0515+0.0154t)	0.921	64.80	47.95	0.74	Ⅲ级	1
JC4监测点	y=t/(0.0507+0.0123t)	0.948	81.55	56.27	0.69	Ⅲ级	2
JC5监测点	y=t/(0.0488+0.0133t)	0.937	75.20	45.87	0.61	Ⅱ级	3

表 6 变形速率判据的结果

Table 6 Results obtained by deformation rate criterion

评价指标	JC3监测点	JC4监测点	JC5监测点
Hurst指数	0.424	0.486	0.453
置信区间	[0.386, 0.451]	[0.449, 0.518]	[0.415, 0.486]
拟合度	0.954	0.936	0.942

#### 属I级。

#### 2.3.4 预警结果的综合分析

在前述 3 类判据基础上, 将各监测点的预测结 果综合统计。由表 7 可知, 不同判据在不同监测项 目中的适用性存在一定差异, 充分说明构建多判据 实现建筑沉降变形预警研究的必要性。

表 7 建筑沉降变形的综合预警结果 Table 7 Comprehensive results of the early warning of building

settlement and	deformation
----------------	-------------

_				
	监测点编号	JC3监测点	JC4监测点	JC5监测点
	稳定性判据	I–Ⅲ级	I–Ⅲ级	I–Ⅲ级
	极限变形判据	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅱ级
	变形速率判据	I 级	I 级	I 级
	综合等级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级

按照不利原则,综合确定3个监测点的预警等 级为Ⅲ级,该建筑沉降危害程度一般,不仅需加强监 测频率,观测其后续变化趋势,还应采取加固措施。

#### 3 结论与建议

(1)岩溶区软基地区的建筑变形具有其特殊性, 其裂缝、变形特征显著,尤其以沉降变形较为明显, 其主要影响因素主要包括地基土影响成因和地下水 变化影响成因。

(2)通过稳定性判据、极限变形判据及变形速率 判据的综合预警研究,得出不同判据的预警存在一 定差异,按照不利原则,综合确定3个监测点的预警 等级为Ⅲ级。 (3)建议在目前现场地质条件及变形监测成果 开展的预警研究基础上进一步探索其变形防治措施, 以切实保证后续建筑物的运营安全。

#### 参考文献

- [1] 石晟, 杜东升, 徐敬海, 王曙光. 基础隔震结构基于实时监测数 据的多级预警及其在南京博物院老大殿中的应用[J]. 建筑结 构学报, 2022, 43(4): 47-57.
  - SHI Sheng, DU Dongsheng, XU Jinghai, WANG Shuguang.
    Multi-level early-warning system for base-isolated structures based on real-time monitoring data and its application on the Old Hall of Nanjing Museum[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(4): 47-57.
- [2] 沈阳,徐磊,郑冠雨,章超,匡志平.考虑风险因素耦合的超高
   层施工预警方法研究[J].郑州大学学报(工学版),2021,42(4):98-104,110.

SHEN Yang, XU Lei, ZHENG Guanyu, ZHANG Chao, KUANG Zhiping. Research on early-warning method for super high-rise building construction considering coupling effect of risk factors [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2021, 42(4): 98-104, 110.

- [3] 沈阳,徐磊,王少纯.基于风险管理的整体钢平台变形预警指标研究[J].中国安全科学学报,2021,31(6):56-63.
   SHEN Yang, XU Lei, WANG Shaochun. Research on early-warning index for deformation of integrated scaffolding and formwork with steel platform based on risk management[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 56-63.
- [4] 左自波, 潘曦, 黄玉林, 汪小林, 张龙龙. 超高层 ICCP 安全监测
   与控制的预警指标研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1):
   53-60.

ZUO Zibo, PAN Xi, HUANG Yulin, WANG Xiaolin, ZHANG Longlong. Early warning indicators for safety monitoring and control of super high-rise ICCP[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 53-60.

[5] 肖鸿斌,金耀岷.深埋串珠状溶洞的超高层基础设计案例分析

[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 382-390.

XIAO Hongbin, JIN Yaomin. Case study on super high-rise foundation design of the deep-buried beaded karst cave[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 382-390.

- [6] 曹贤发,刘玉康,刘之葵,张炳辉.基于强溶蚀带特征的地基岩 溶发育程度评价方法[J].中国岩溶, 2020, 39(4): 577-583.
   CAO Xianfa, LIU Yukang, LIU Zhikui, ZHANG Binghui. Evaluation method of development degree based on features of intense dissolution layer[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 577-583.
- [7] 李想, 尹骥, 卫佳琦, 韦马季. 深覆盖岩溶地区高层建筑桩基优 化实践[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 591-599.
  LI Xiang, YIN Ji, WEI Jiaqi, WEI Maji. Optimization of pile foundation for high-rise buildings in deep-covered karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 591-599.
  [8] 代长生. 基于变形数据分解处理的基坑危险性潜势分级研究
- [18] 代代生. 基于变形数据分解处理的基功泡险性格势分级研究
   [J]. 地质与勘探, 2022, 58(6): 1271-1280.
   DAI Changsheng. Hazard potential classification of foundation pit based on deformation data decomposition[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(6): 1271-1280.
- [9] 耿海深, 吕文斌, 栗燊, 蒋国良. 滑坡失稳机理分析及预警预 测研究[J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2021, 57(6): 103-109.

GENG Haishen, LYU Wenbin, LI Shen, JIANG Guoliang.

Mechanism analysis and early warning prediction of landslide instability[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 103-109.

 [10] 李晓斌. 软岩隧道大变形预警分级研究及发展趋势[J]. 地质 与勘探, 2021, 57(5): 1149-1157.
 LI Xiaobin. Early warning classification of large deformation in soft rock tunnels and its development trend[J]. Geology and

Exploration, 2021, 57(5): 1149-1157.
[11] 宁波, 刘玉健, 王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势 分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(5): 515-519.
NING Bo, LIU Yujian, WANG Andong. Stability evaluation and development trend analysis of giant ancient landslide[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(5): 515-519.

- [12] 薛晓辉,周玲,秦爱红. 库岸涉水滑坡危险性现状分析与预测 评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 169-175. XUE Xiaohui, ZHOU Ling, QIN Aihong. Status analysis and prediction assessment on risk of wading landslide on reservoir bank[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 169-175.
- [13] 邓小鹏. 基于信息分解的滑坡变形稳定性评价及预警分析[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 101-107.
   DENG Xiaopeng. Landslide deformation stability evaluation and early warning analysis based on information decomposition[J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 101-107.

# Early warning of settlement and deformation of high-rise buildings on soft foundations in karst areas

#### MA Lin

(Architectural Engineering Branch, Yangling Vocational & Technical College, Xianyang, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** The background of this article pertains to a high-rise building project, which encompasses a building land area of about 4,630 m<sup>2</sup> and features a roughly square shape in its plane. The safety classification of the building structure is designated as Level 2, while the foundation design is categorized as Level A. The foundation form is raft foundation. This building project is of high engineering importance. According to the survey results, underlying strata of the building foundation are mainly composed of clay and limestone layers, each possessing distinct engineering properties that are generally unfavorable. In addition, the average annual rainfall in the project area is 1,107.27 mm, and the dissolution effect of the bedrock will continue. Even worse, the building has already undergone unfavorable deformation. Therefore, to ensure the safe operation of the building, it is necessary to conduct research on early warning of its settlement and deformation.

In this study, a total of three types of warning criteria were constructed, namely, stability criterion, ultimate deformation criterion, and deformation rate criterion. Among them, the implementation of stability criterion involves sharp point mutation analysis. This technique derived mutation characteristic values from sharp point mutation analysis of building settlement data and used these values to assess the stable state of building settlement. The ultimate deformation criterion was calculated with the use of the ultimate displacement formula to obtain the ultimate deformation value. This value was then combined with existing monitoring data to construct corresponding criterion indicators. The implementation of the deformation rate criterion was conducted with the rescaled range method, which calculated the Hurst index through rescaled range analysis of building settlement data. This analysis evaluated the

development trend of building settlement and deformation. Giving the differing emphases of the three criteria, the early warning level of building settlement and deformation, determined based on principle of unfavorable conditions, is deemed reasonable and accurate through comparative analysis.

According to the analysis results, there is a significant difference in settlement and deformation among the monitoring points of the building, with a range of 22.76–56.27 mm, indicating notable settlement characteristics. The primary causes of this settlement are the soil and groundwater conditions of foundation. In the process of early warning of building settlement and deformation, the analysis mainly focuses on monitoring points JC3–JC5. The stability criterion shows that the  $\triangle$  values of the three monitoring points are all greater than 0, indicating that they are all in a stable state, and their corresponding early warning levels of settlement and deformation fall into Levels I–III. The range of evaluation indicators for ultimate deformation criterion is from 0.61 to 0.74, corresponding to the early warning Levels II–III of settlement and deformation, that is, the early warning level of JC5 monitoring point falls into Level II, and the other two monitoring points are Level III. The deformation rate criterion shows that the Hurst index values of the three deformation. The trend level of JC3 monitoring point is Level 2, while that of the other two monitoring points is Level 1. By comparison, based on the principle of unfavorable conditions, the early warning level of the three monitoring points is determined to be Level III. Therefore, the degree of settlement hazard for this building is moderate. It is necessary to not only increase the monitoring frequency to observe subsequent changes but also to take reinforcement measures.

Through this study, a novel approach has been developed for the early warning of building settlement and deformation. This method offers a theoretical basis for ensuring the safe operation of buildings in later stages and holds significant practical implications.

**Key words** karst area, high-rise building, settlement and deformation characteristics, stability criterion, ultimate deformation criterion, deformation rate criterion, settlement warning

(编辑 黄晨晖)