

生土窑居参数灵敏度分析的新方法

郭平功^{1,2}, 童丽萍¹

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南城建学院土木工程系, 河南 平顶山 467036)

摘要:生土窑居广泛分布于 64 万平方公里的黄土高原, 黄土土质千差万别, 窑居构造尺寸无一雷同, 均体现出随机性, 适合从可靠度方面分析黄土材料、窑居尺寸对生土窑居可靠性的影响, 即对各参数的灵敏度进行分析。提出了标准差区间梯度法, 把随机变量分为抗力项和荷载项, 依次分析各随机变量在标准差区间上的结构响应, 每个标准差区间上结构响应的梯度用于比较灵敏度的大小。对河南三门峡陕县的生土窑居参数的灵敏度进行了分析, 表明该地区生土窑居的可靠性较高, 内摩擦角和窑跨的灵敏度较小, 粘聚力和窑腿宽度的灵敏度最大, 是影响抗灾可靠性的关键因素。

关键词:标准差区间; 梯度; 灵敏度; 粘聚力; 窑腿宽度

中图分类号: TU761.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0216-06

生土窑居是在原始黄土中挖凿而形成的穴居居住形式, 以纯原状土拱作为窑居的自支撑结构, 没有栋梁支撑, 也没有其它支护。生土窑居依地形而建, 根据其所处地形不同, 可分为两种类型: 一种是在黄土崖上开挖, 称为靠崖窑; 一种是在黄土塬(面积较广的平地)上, 垂直向下挖一个长方形的深坑, 然后再从坑的四壁平行于地面挖凿窑室, 形成一座“地下四合院”, 称为地坑窑。生土窑居既适应复杂的地形, 又适应黄土高原严寒酷暑的气候, 窑居内冬暖夏凉, 是原生态的节能建筑^[1]。这种具有中国特色的绿色建筑, 即使在地震带, 也具有较高的可靠性, 如宁夏西吉苏堡乡的一座靠崖窑, 经过 1920 年海原大地震后完好无损, 继续使用 50 年后, 又经历 1970 年西吉地震, 仍安然无恙^[2]。在窑居区, 有较多的在役时间超过一个世纪的生土窑居, 充分说明了其可靠性之高。

影响生土窑居可靠性的因素主要有两类: 土体力学参数和窑居的几何尺寸参数。土体力学参数与所使用的土体本构模型有关, 如采用 M-C 模型, 则主要是粘聚力和内摩擦角; 几何尺寸参数主要为窑腿宽度、覆土厚度和窑室跨度等, 窑居各部位示意图见图 1。

各参数为影响生土窑居可靠性的随机变量, 对可靠指标的影响程度为其灵敏度, 用灵敏度因子表示。可靠指标的灵敏度排序是重要的, 因为找出灵敏度较大的随机变量后, 就可以在生土窑居的设计时, 对关键的参数进行控制, 以保证结构足够的抗灾可靠性; 在维护生态窑居时, 重点修复、加固关键的部位; 在进行可靠度评估时, 可以把灵敏度较小的随机变量作为定值考虑, 减小工作量。

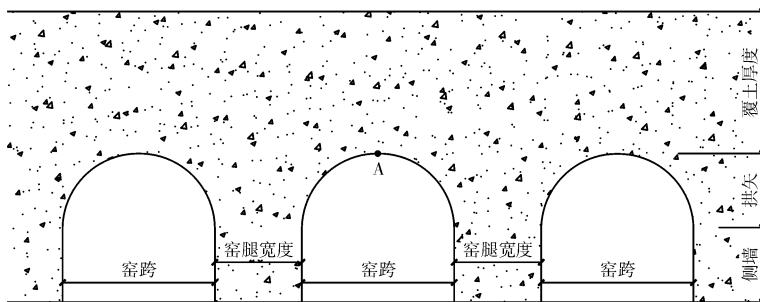


图 1 生土窑居各部位示意图

Fig. 1 Sketch map of earth-sheltered dwelling

灵敏度通常是在得到结构的可靠指标后取得的, 可靠指标的求解方法有改进的一次二阶矩法、二次二阶矩法、响应面法和 Monte Carlo 法等^[3-5], 所得的灵敏度因子是在结构的最可能失效点处随机变量

收稿日期: 2012-06-29 修改稿日期: 2013-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978233)

作者简介: 郭平功(1982-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事建筑结构的可靠度研究。

对可靠指标的影响程度,最可能失效点在不同的可靠度求解方法、不同的随机变量组合情况下不完全一样,对应的灵敏度也有差别,故很难求得各随机变量的精确灵敏度因子,但更应该关注的是各随机变量的相对灵敏度大小,即找到关键的随机变量.上述灵敏度因子是在进行可靠指标求解之后得到,在之前并不知道各随机变量对可靠指标影响的相对性大小.目前,国内外有关生土窑居的可靠度研究中,仅文献[6]对其进行了分析,但只考虑了窑跨和窑腿宽度两个随机变量,且所得灵敏度因子是在进行较复杂的可靠度分析后求得.

本文探讨在可靠指标求解之前进行各随机变量灵敏度的排序,同时分析随着各随机变量取值的不同,灵敏度的变化情况,并应用于生土窑居随机变量的灵敏度比较和寻找关键的随机变量.拟采用的随机变量灵敏度比较方法为标准差区间梯度法.

1 标准差区间梯度法

1.1 实施过程

标准差区间梯度法的实施过程:(1)基于概率统计得出各随机变量的平均值和标准差;(2)把随机变量分为抗力项和荷载项,如某随机变量减小,结构趋向于极限状态,则为抗力项,如某随机变量增大,结构趋向于极限状态,则为荷载项;(3)如果结构不存在已知的功能函数,用位移或塑性应变等表示结构趋向极限状态的情况,位移或塑性应变的绝对值越大,表示结构越接近或已达到极限状态,位移或塑性应变可由显示表达,也可由有限元分析计算得出.功能函数的结果、位移或塑性应变称为结构的响应;(4)选择某一个随机变量分析,其它随机变量取为平均值,如该随机变量为抗力项,则每次在平均值的基础上减去 h 倍标准差($h=0, 1, 2, 3, \dots$)进行计算或有限元分析,得到结构的响应;如果该随机变量为荷载项,在每次在平均值的基础上加上 h 倍标准差,其它相同.按照该方法逐一完成各随机变量的分析;(5)以 h 为横坐标、结构响应为纵坐标,画出随着各随机变量的变化,结构响应的变化图.相邻两个 h 间的结构响应的斜率,称为结构响应的标准差区间梯度,斜率的绝对值越大,则该随机变量对可靠性的影响越大.

1.2 算例

为了探讨标准差区间梯度法的适用性,用下面的算例验证.

算例:失效函数有 6 个相互独立的正态随机变量,且包含对数运算,其中各随机变量的数字特征见表 1,极限状态方程为

$$Z=g(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)=2.5-x_1[x_2/(1+x_3)]x_4\log[(x_5+x_6)/x_5]=0$$
 (1)

其中: x_3, x_5 为抗力项, x_1, x_2, x_4, x_6 为荷载项.按照前述的标准差区间梯度法,可得到 Z 随着各随机变量变化的趋势图,如图 2 所示.

由图 2 可知,在每个标准差区间,随机变量 x_2 斜率的绝对值最大,即 x_2 的灵敏度最大, x_6 次之, x_4, x_5 的灵敏度最小, x_1, x_3 的灵敏度居中,在 3 倍标准差以内, x_1, x_3 的灵敏度几乎相等,超过 3 倍标准差时, x_3 的灵敏度稍大.

图 3 为常规可靠度分析得到的在验算点的各随机变量的灵敏度^[7],与本文的分析结果一致,说明标准差区间梯度法是可行的.

算例的验算点及所处的标准差区间如表 2 所示,如关于荷载项 x_2 的验算点为 0.554,所处的区间为平均值加上 2 倍标准差到 3 倍标准差之间,即所处标准差区间为[2, 3].

由表 2 可知,灵敏度较大的 x_2, x_6 的验算点与平均值的“距离”较远,该“距离”以其标准差为度量单位,这也是可靠度分析的一般规律,即验算点离灵敏度较大的随机变量的平均值“距离”较远.在用图 3 对比各随机变量在验算点的灵敏度时,应与验算点所对应的标准差区间对应,如 x_2 与 x_3 的灵敏度对比时,使用 x_2 在区间[2,

表 1 算例中各随机变量的数字特征

Tab. 1 Statistical parameters of random variables in example

随机变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
平均值	1.000	0.396	1.190	168	3.720	0.350
变异系数	0.10	0.25	0.15	0.05	0.05	0.20

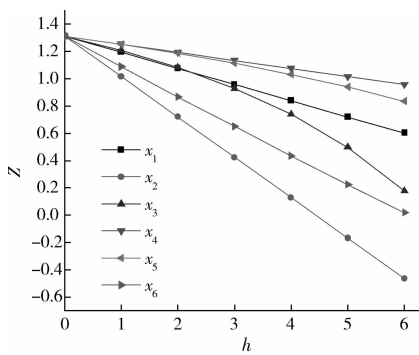


图 2 不同随机变量下的结构响应
Fig. 2 Response of structure under different random variables

3]的梯度与 x_3 在区间 $[0, 1]$ 的梯度对比. 应注意到在不同的标准差区间, 同一个随机变量的梯度可能是不同的, 如算例中 x_3 随机变量, 这是因为结构响应与该随机变量为非线性关系.

2 生土窑居随机变量的灵敏度比较

2.1 随机变量的数字特征

不管是土体力学参数随机变量还是窑居几何尺寸参数随机变量, 都与生土窑居所在的地域密切相关. 根据课题组在河南三门峡市陕县的调研、实地测绘和试验, 并经数理统计, 得到土体力学参数中的粘聚力、内摩擦角和窑居几何参数中的窑腿宽度、窑跨、覆土厚度均为正态分布, 其平均值和标准差如表 3 所示. 土体物理力学参数中的变形模量、泊松比、容重和窑居几何参数中的侧墙高度、拱矢, 其标准差均较小, 故可作为常量参数, 取其平均值, 见表 4.

陕塬(河南陕县所处的黄土塬)为非湿陷性黄土, 且在营造生土窑居时, 可避开黄土节理、裂隙发育的地段, 故本文不考虑黄土的湿陷性、黄土节理和裂隙发育的影响. 在日常的维护中, 可用除草、碾压等措施防范雨水的下渗, 且陕塬的降雨量较小, 故本文不考虑雨水下渗的影响.

确定生土窑居的随机变量后, 还需求出其响应, 生土窑居没有已知的功能函数, 故需经过有限元分析得出其响应, 本文用 Abaqus 软件建立生土窑居的有限元模型.

2.2 生土窑居的有限元模型

由文献可知^[8], 生土窑居可按平面应变问题研究. 选取三联孔模型, 每孔窑室的尺寸相同, 中间主窑两侧的窑腿宽度相同. 为减少计算量, 取对称的一半模型进行有限元建模, 模型的尺寸大于 5 倍以上窑室的尺寸, 根据圣维南原理, 模型总尺寸的选取是足够的. 由于模型较大, 图 4 中截取的是有窑洞的部分. 图 4a 中窑洞未开挖, 初始应力场为土体自重应力场.

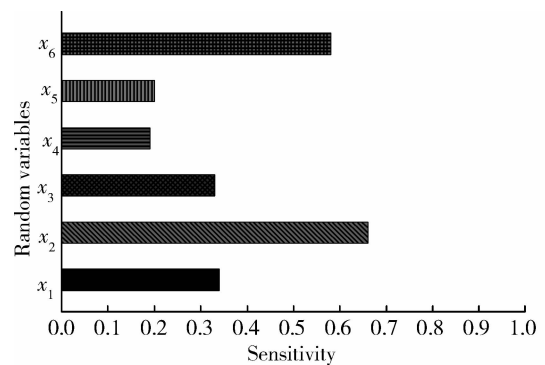


图 3 各随机变量的灵敏度

Fig. 3 Sensitivity coefficients of random variables

表 2 算例的验算点及所处标准差区间

Tab. 2 Design point of example and its position in standard deviation interval

随机变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
验算点	1.082	0.554	1.052	171.7	3.640	0.443
所处区间	$[0, 1]$	$[2, 3]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[1, 2]$

表 3 生土窑居随机变量的数字特征

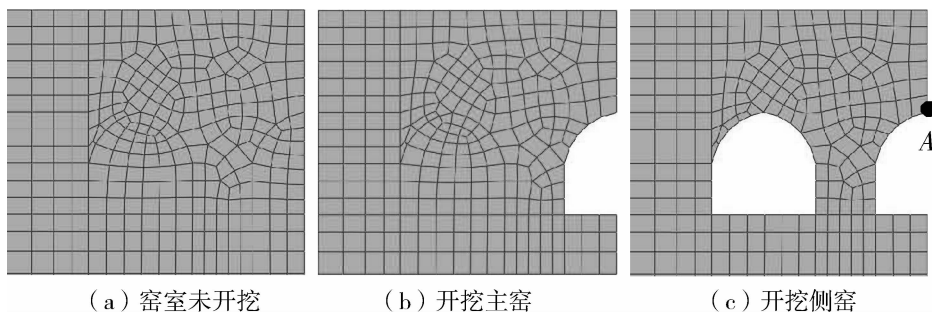
Tab. 3 Statistical parameters of random variables in loess cave dwellings

随机变量	土体力学参数		窑居几何参数		
	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / °	窑腿宽度 / m	窑跨 / m	覆土厚度 / m
平均值	51.8	28.1	1.76	3.08	2.87
标准差	5.18	2.81	0.319	0.173	0.680

表 4 生土窑居的常量参数

Tab. 4 Constant parameters of loess cave dwellings

土体物理力学参数			窑居几何参数	
变形模量 / MPa	泊松比	容重 / (kN · m ⁻³)	侧墙高度 / m	拱矢 / m
51.5	0.25	16.1	1.50	1.50



(a) 窑室未开挖

(b) 开挖主窑

(c) 开挖侧窑

图 4 有限元分析模型

Fig. 4 Model of finite element analysis

生土窑居的营造不同于一般建筑,它不是加荷,而是经历了卸荷-加荷的过程.窑室的开挖使初始的自重应力场发生了应力重分布,并且各窑室的开挖不是同时完成的,有的经历数年,本文先开挖主窑,如图4b所示,然后进行两侧窑室的开挖,如图4c所示.窑室开挖完成后,施加地面均布荷载 $4 \text{ kN/m}^2 \times 1.4 = 5.6 \text{ kN/m}^2$,其中1.4为可变荷载分项系数,标准值取 4 kN/m^2 是考虑到地面经常有车辆行驶或停留,参考《建筑结构荷载规范》GB50009—2001(2006年版)中关于楼面作为汽车通道及停车库的荷载取值.

由于土体的内摩擦角大于 22° ,土体的失效准则采用 M-C 准则^[9]更为合适,可用下式表述

$$\frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + (\cos \theta_0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_0 \sin \varphi) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

其中: I_1 为第一应力张量不变量; J_2 为第二应力偏量不变量; θ_0 为罗德角.Abaqus 软件中的 M-C 模型是对经典 M-C 模型的改进,经典 M-C 屈服面存在尖角,尖角处会出现塑性流动方向不唯一的现象,导致数值计算的繁琐、收敛缓慢,Abaqus 采用了连续光滑的椭圆函数作为塑性势面,克服了上述问题.

靠近窑室的部分网格划分的较密,离得越远网格划分越粗.模型右侧为对称约束,底部固定竖向约束,左侧固定水平约束.

随机变量中粘聚力、内摩擦角、窑腿宽度均为抗力项,建立有限元模型时参数为平均值减去 h 倍标准差;窑跨、覆土厚度为荷载项,建立有限元模型时参数为平均值加上 h 倍标准差.依次分析每个随机变量,其他参数取平均值,每次分析都重新建立有限元模型,得出窑居的响应.本文的响应选用中间主窑拱顶(图1、图4中的A点)的竖向位移,其值越大表示窑居越来越趋向于或达到极限状态.

2.3 灵敏度比较

拱顶(A点)的竖向位移与各随机变量的关系如图5所示,竖向位移以向下为正.

图5中, h 的最大值为6,但对应于随机变量粘聚力和窑腿宽度的竖向位移没有数值点,因为粘聚力平均值减去6倍标准差后,有限元计算不收敛;窑腿宽度平均值减去6倍标准差后为负值,不符实际.

从总体上看,粘聚力和窑腿宽度的灵敏度最大,内摩擦角和窑室跨度的灵敏度最小,覆土厚度的稍大.在标准差区间 $[0, 4]$,窑腿宽度的灵敏度均大于粘聚力,在区间 $[4, 5]$,后者的灵敏度大于前者.在2倍标准差以内,窑腿宽度的灵敏度变化较小,在2倍标准差以外,灵敏度迅速增加,可把2倍标准差对应的窑腿宽度1.1m作为拐点,在设计生土窑居时,窑腿宽度要尽可能比1.1m大,对于窑腿宽度小于1.1m的现存窑居,要特别注意维护和加固.在3倍标准差以内,粘聚力的灵敏度几乎为零,超过3倍标准差时,则迅速增加,所以设计生土窑居时,所处区域的黄土粘聚力不宜低于36.3 kPa.在3倍标准差以内,覆土厚度的灵敏度较小,3倍标准差以外,灵敏度有一定增大.在4倍标准差以内,内摩擦角和窑跨的灵敏度几乎为零,说明内摩擦角的变化对土体承载力的影响较小,窑跨的灵敏度较小是与其较小的变异性一致的,说明平均值为3.08m的窑跨是可靠的.

根据验算点与灵敏度的关系:验算点离灵敏度较大的随机变量的平均值“距离”较远,粘聚力和窑腿宽度的灵敏度较大,则验算点离其平均值较远,即验算点在较大的标准差区间;可推测在验算点进行灵敏度排序时,应采用粘聚力和窑腿宽度在较大标准差区间的梯度,而其它随机变量应采用较小标准差区间的梯度,此时前者更大,后者更小.

由图5可知,除窑腿宽度外,在3倍标准差以内,拱顶竖向位移很小,表明陕县生土窑居的强度储备较高,同时需更严格地控制窑腿宽度,减小其变异性.

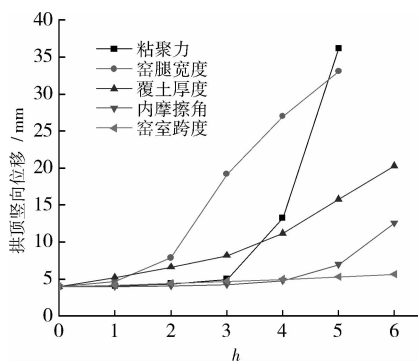


图5 拱顶竖向位移与各随机变量关系图

Fig. 5 Relation between vertical displacement of arch top and random variables

粘聚力(c)和窑腿宽度(W)相对灵敏度较大,为深入分析二者与拱顶竖向位移(y)的关系,对其进行曲线拟合,结果如图6所示。

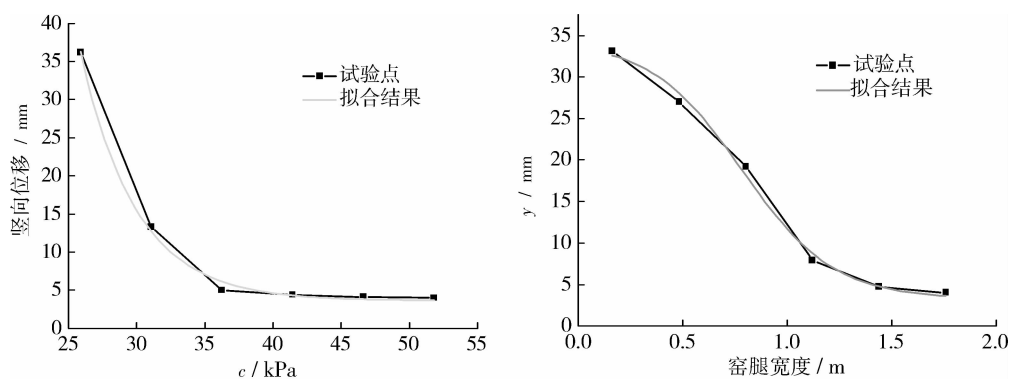


图6 y 与 c 、 W 的关系及曲线拟合

Fig. 6 The fitting curve between y and c , W

图6中的试验点为 c 、 W 的平均值点及平均值减去 h 倍标准差($h=1, 2, 3, 4, 5$),拟合曲线均为高度非线性的函数,表明竖向位移与粘聚力和窑腿宽度间的关系是高度非线性的;与图5比较,图6更清晰表现了 y 随着 c 、 W 的增加减小的情况;在 c 大于36.3 kPa时,位移曲线趋向于平缓,且其值接近于0,36.3 kPa与平均值51.8 kPa仍相距较远,说明有较高的粘聚力储备;而 W 大于1.5 m时,位移曲线才趋向于平缓,与平均值1.76 m很接近,说明陕县生土窑居的窑腿宽度平均值偏小,强度储备低;由于 c 、 W 均为抗力项,所以图6中 c 、 W 的最大值点均为其平均值,而对应的 y 最小。由图6可见,用标准差区间的梯度替代 y 对 c 、 W 的导数虽不精确,但完全可用来对各参数的灵敏度排序。

3 结 论

本文从可靠度方面分析了影响生土窑居可靠性的因素,首次提出了随机变量灵敏度比较的标准差区间梯度法,具有普适性。该方法不需知道结构的功能函数,在可靠指标求解之前可得到各随机变量的灵敏度相对大小,并得出灵敏度随着随机变量的增大或减少的变化趋势,比传统的在仅验算点对比随机变量的灵敏度更有意义。并把该方法应用于河南陕县生土窑居的随机变量分析,分析的随机变量有黄土力学参数中的粘聚力和内摩擦角,窑居几何参数中的窑跨、窑腿宽度和覆土厚度,所得结论如下:

- (1)河南陕县生土窑居的强度储备较高,可靠性较高。
- (2)随机变量中粘聚力和窑腿宽度的灵敏度最大,是影响生土窑居可靠性的关键因素。
- (3)粘聚力的影响为自然因素,河南陕县的黄土土质十分适合营造生土窑居,在其他区域营造生土窑居时,黄土的粘聚力不宜低于36.3 kPa。除保证强度外,生土窑居不应建在易滑坡地带。
- (4)河南陕县生土窑居的窑腿宽度变异性较大,营造新的生土窑居时,应尽可能使用较宽的窑腿,对于现有的窑腿较窄的生土窑居,应注意维护和加固。
- (5)本文中窑跨对可靠性的影响较小,前提是陕县的生土窑居跨度变异性较小,在平均值3.08 m上下浮动的范围很小,说明跨度选取是合理的,既有足够的生活空间,又保证了安全。

参考文献 References

- [1] FULLER M L, CLAPP F G. Loess and rock dwellings of Shensi, China[J]. Geographical Review, 1924, 14(2): 215-226.
- [2] 陈国兴, 张克绪, 谢君斐. 黄土崖窑洞抗震性能分析[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1995, 28(1): 15-22.
CHEN Guo-xing, ZHANG Ke-xu, XIE Jun-fei. Seismic performance analysis of the cave dwelling on the loess precipice[J]. Journal of Harbin Architecture & Civil Engineering Institute, 1995, 28(1): 15-22.
- [3] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems

- [J]. *Structural Safety*, 1990, 7(1): 57-66.
- [4] 张明. 结构可靠度分析:方法与程序[M]. 北京:科学出版社, 2009.
ZHANG Ming. *Structural reliability analysis: methods and procedures*[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [5] HASOFER A M, LIND N C. Exact and invariant second-moment code format[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1974, 100(1): 111-121.
- [6] 童丽萍, 柳帅军. 减法负荷生土地坑窑结构的非线性有限元分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(2): 14-20.
TONG Li-ping, LIU Shuai-jun. Structural nonlinear finite element analysis for subtraction load underground cave dwelling [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2011, 28(2): 14-20.
- [7] 兰成明, 李惠. 基于 PSO 的结构可靠度及随机变量敏感性分析[J]. *西安建筑科技大学学报:自然科学版*, 2006, 38(5): 614-618.
LAN Cheng-ming, LI Hui. Structural reliability and sensitivity analysis of random variables based on PSO[J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition*, 2006, 38(5): 614-618.
- [9] 童丽萍, 韩翠萍. 传统生土窑洞的土拱结构体系[J]. *施工技术*, 2008, 37(6): 113-115, 118.
TONG Li-ping, HAN Cui-ping. Earth-arched structural systems of primitive earth-sheltered dwelling[J]. *Construction Technology*, 2008, 37(6): 113-115, 118.
- [9] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
FEI Kang, ZHANG Jian-wei. The application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010.

A new method of parameters' sensitivity analysis for earth-sheltered dwellings

GUO Ping-gong^{1, 2}, TONG Li-ping¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Department of Civil Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: Earth-sheltered dwellings are widely distributed on Loess Plateau that is about 640 thousand square kilometers. The property of loess and geometric size of dwellings are very different, which are all random. It's appropriate to analyse the influence of loess property and geometric size in reliability aspect, in other words, to analyse the sensitivity of every random variables. Method of standard deviation interval's gradient is proposed. The random variables are divided to resistance terms and load terms. The structural response is analyzed on standard deviation intervals with every random variable, and the gradient of structural response on each standard deviation interval is used to evaluate the sensitivity of random variables. The random variables research of earth-sheltered dwellings in Shanxian County, Henan Province shows that the disaster resistant reliability is high; the sensitivity of internal friction angle and span of cave are the smallest; and the sensitivity of cohesion and cave leg width are the biggest, which are the key factor of disaster resistant reliability.

Key words: *standard deviation interval; gradient; sensitivity; cohesion; cave leg width*