

doi: 10.7690/bgzdh.2014.05.003

导弹无依托发射场坪极限承载力影响因素敏感性分析

程洪杰¹, 赵媛²

(1. 西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2. 第二炮兵工程大学理学院, 西安 710075)

摘要: 为评估发射场坪的强度稳定性, 提出研究发射场坪的极限承载力快速评估技术。在分析地基承载力计算模式的基础上, 分析计算内聚力、内摩擦角以及上覆层厚度对极限承载力的敏感度, 给出作业场坪极限承载力随敏感参数变化的规律; 同时设计正交试验模型, 并对承载力影响因素的敏感性做出合理分析。分析结果表明: 上覆层和地基土体内聚力取值的变化对地基极限承载力的敏感性受内摩擦角取值影响, 内摩擦角越小, 内聚力敏感系数越大; 上覆层厚度变化对承载力敏感性系数受土体内摩擦角取值的变化影响较小; 土体内摩擦角取值变化对极限承载力的影响明显高于上覆层厚度变化以及内聚力变化对承载力的影响。

关键词: 无依托发射; 极限承载力; 正交分析法; 敏感性分析

中图分类号: TJ768.1 **文献标志码:** A

Sensitivity Analysis on Factor of Ultimate Bearing Capacity of Unsupported Random Launching Site

Cheng Hongjie¹, Zhao Yuan²

(1. College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Department of Science, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710075, China)

Abstract: To evaluate the intensity stability of operation site, the fast evaluation technique is put forward to study the ultimate bearing capacity of launching site. Based on the analysis of bearing capacity computation pattern, the sensitivity expression of cohesion force, internal friction angle and super stratum thickness to limiting bearing capacity is analyzed and calculated, and the influence regularities of the ultimate bearing capacity of operation site, due to the sensitive parameters, is provided. Simultaneously, the influence factor sensitivity is analyzed reasonably by orthogonality test model. Analysis result shows, for the ultimate bearing capacity sensitivity which generated by cohesive force, which has the regularity that smaller internal friction angle will lead to bigger sensitivity coefficient. Comparably, the sensitivity to variable of super stratum thickness suffers less influence by the value of internal friction angle, and the influence degree which brought by the variable of internal friction angle is obviously higher than the variable of super stratum thickness and internal cohesive force.

Keywords: unsupported random launching; ultimate bearing capacity; orthogonality analysis method; sensitivity analysis

0 引言

目前, 无依托发射已经成为国内外陆基机动导弹的重要发展方向。所谓无依托发射, 就是导弹发射不再依托预有准备的发射场地, 而是随机选择场坪发射, 这就要求发射阵地应具有一定的承载力^[1]。在导弹快速无依托发射时, 必须确保场坪能够承受在导弹发射过程中的各种载荷, 而由于场坪工程性质的不确定性, 其极限承载力受多种因素影响。目前对发射场坪的承载力评估主要采用大范围原位测量技术, 但受作战时间影响, 不适合无依托快速发射; 因此, 笔者提出研究发射场坪的极限承载力快速评估技术, 通过对影响地基极限承载力的因素进行敏感性分析, 探寻地基极限承载力随敏感因素的变化规律, 并依托正交试验方法定性地区分出各影响因素的敏感性差异, 为快速评估场坪极限承载力的参数选取提供了依据。

1 参数敏感度分析方法

在对导弹无依托发射场坪极限承载力的影响因

素进行分析时, 由于土体材料参数的不确定性, 致使承载力分析模型具有一定的不确定度。针对不确定性, 在对发射场坪进行极限承载力检测与评估时, 把分析重点定位在对场坪承载力影响较为敏感的因素分析上, 找出各参数的“变异”对地基极限承载力影响的大小和规律。

设有一系统, 影响参数为 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$, 系统特性为 $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 在给定某一基准状态 $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 下, 系统特性为 $F^* = f(X^*)$ 。当各参数在其“变异”范围内变化时, 对由于参数“变异”引起的系统特性 F 偏离基准状态 F^* 的趋势和程度的分析方法称为参数敏感性分析^[2]。在分析某参数对系统特性的影响时, 常采用单因素分析思想, 即令该参数在可能范围内变化, 而其他参数基准值暂且固定不变, 此时系统可表示为:

$$F^* = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_i, x_{i+1}^*, \dots, x_n^*) \quad (1)$$

收稿日期: 2013-12-14; 修回日期: 2014-01-25

作者简介: 程洪杰(1978—), 男, 山东人, 硕士, 副教授, 从事兵器发射理论与技术、计算机数控技术研究。

在实际中，决定系统特性的参数往往是不同的物理量，单位不统一，为比较系统特性对各个参数敏感程度的大小，通常在无量纲化处理的基础上，通过绘制相对误差 $\delta_F = \Delta F / F^*$ 与 $\delta_x = \Delta x_i / x_i^*$ 之间的关系曲线，并将曲线切线斜率的绝对值定义为敏感度函数，如下：

$$\alpha(x_i^*, \Delta x_i) = |\delta_F / \delta_x| = \left| \Delta F / F^* \right| / \left| \Delta x_i / x_i^* \right| \quad (2)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n$ ，在给定 Δx_i 的基础上，便可以计算出敏感度函数值，敏感度函数值越大，则系统特性对该参数越敏感。

2 发射场坪极限承载力参数敏感性分析

针对导弹发射过程中发射车支腿对地荷载模式，为准确判定地基承载能力，在考虑基底平面以上土层的抗剪能力的基础上，笔者曾推导了地基极限承载力的表达式 (3)，使得地基极限承载力计算结果更加符合工程实际。

$$p_u = \gamma R (\tan^5 \alpha - \tan \alpha) + 2c (\tan^3 \alpha + \tan \alpha) + \gamma_0 d_0 \tan^4 \alpha + c_0 d_0 \frac{\tan^2 \alpha}{2R} \quad (3)$$

式中： p_u 为地基极限荷载； α 为滑动面与大主应力作用平面的夹角， $\alpha = \pi/4 + \varphi/2$ ； γ_0 为上覆层天然重度； c_0 为上覆层内聚力； γ 为地基土的天然重度； φ 为内摩擦角； c 为内聚力； R 为发射车支腿盘的半径。

在分析土性参数对极限承载力的敏感性影响时，从极限承载力计算公式 (3) 来看，与发射场坪承载力相关的因素包括土性参数 γ 、 c 、 φ ，上覆层厚度 d_0 以及圆形基础荷载半径 R 。除了 R ，其余参数项均具有不确定性。另外，土体重度变异一般较小，在单因素分析中没有予以考虑。依据公式 (2)，求解建立各影响因素敏感度函数表达式：

$$\alpha(c^*, \Delta c) = \left| \frac{\Delta P_u}{P_u^*} \right| / \left| \frac{\Delta c}{c^*} \right| = \frac{2(\tan^3 \alpha + \tan \alpha) \cdot c^*}{P_u^*} \quad (4)$$

$$\alpha(c_0^*, \Delta c_0) = \left| \frac{\Delta P_u}{P_u^*} \right| / \left| \frac{\Delta c_0}{c_0^*} \right| = \frac{d_0 \tan^2 \alpha \cdot c_0^*}{2R \cdot P_u^*} \quad (5)$$

$$\alpha(\varphi^*, \Delta \varphi) = \frac{\left| \Delta P_u \right|}{P_u^*} \cdot \frac{\varphi^*}{\left| \Delta \varphi \right|} \quad (6)$$

$$\alpha(d_0^*, \Delta d_0) = \left| \Delta P_u / P_u^* \right| / \left| \Delta d_0 / d_0^* \right| = \frac{\gamma_0 \tan^4 \alpha + c_0 \tan^2 \alpha}{2R \cdot d_0^*} \quad (7)$$

从式 (4)~式 (7) 可以看出，土体的内聚力、上覆层厚度对极限承载力的敏感性影响完全取决于其基准值大小，与变异无关；而土体内摩擦角对极限

承载力的影响不仅取决于基准值，而且与内摩擦角的变化有关。

在分析无依托发射场坪承载力影响因素，进行参数敏感度计算时，选择算例 $c_0=23 \text{ kPa}$ ， $\varphi_0=10^\circ$ ， $\gamma_0=18.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $c=15 \text{ kPa}$ ， $\varphi=4^\circ$ ， $\gamma=16 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ；圆形基础半径 $R=0.375 \text{ m}$ ，硬壳层厚度 $d_0=2.5 \text{ m}$ 。

2.1 上覆层内聚力 c_0 对承载力敏感性分析

根据土性参数，结合式 (3)、式 (5)，给出了上覆层内聚力 c_0 取不同参数时，在 $\varphi=4^\circ$ 时土体上覆层内聚力敏感参数 $\alpha(c_0^*, \Delta c_0)$ 与上覆层内聚力标准值之间以及敏感参数 $\alpha(c_0^*, \Delta c_0)$ 与土体内摩擦角 φ 的关系曲线，分别如图 1、图 2 所示。

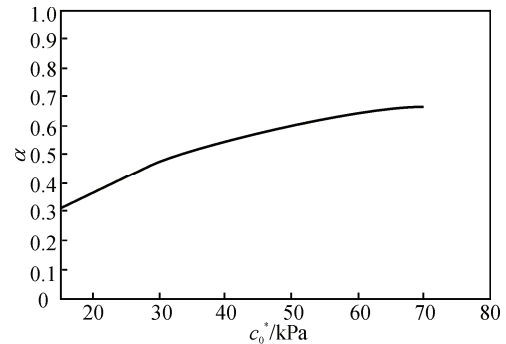


图 1 $\alpha(c_0^*, \Delta c_0) - c_0^*$ 关系曲线 ($\varphi = 4^\circ$)

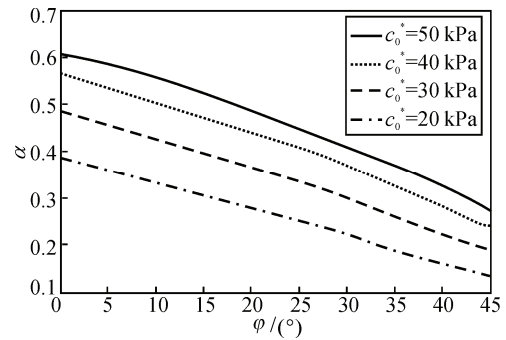


图 2 $\alpha(c_0^*, \Delta c_0) - \varphi$ 关系曲线

从图 1 和图 2 可以看出，当土体的内摩擦角一定时，随着上覆层内聚力的增加，敏感系数逐渐增大，但敏感系数变化不是很大；随着内摩擦角的不断增大，土体内聚力对极限承载力影响的敏感系数逐渐减小。

2.2 地基土体内聚力 c 对承载力敏感性分析

图 3 给出了地基土体内聚力 c 取不同参数时，土体内聚力敏感参数 $\alpha(c^*, \Delta c)$ 与土体内摩擦角 φ 的关系曲线。

从图 3 可以看出，地基土体内聚力对极限承载力影响的敏感系数随内摩擦角的变化趋势和上覆层

内聚力敏感系数随内摩擦角的变化趋势相同，均为随着内摩擦角的增大，敏感系数减小；当固定内摩擦角时，地基土体内聚力越大，其对地基极限承载力的影响敏感性越大。

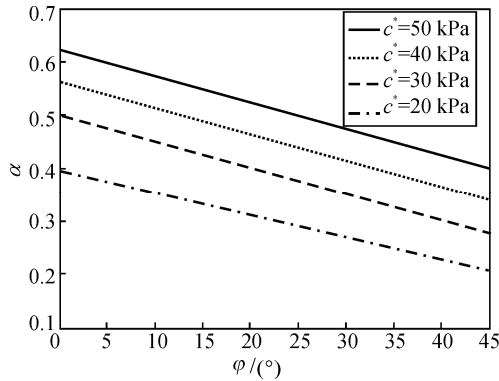


图 3 $\alpha(c^*, \Delta c) - \varphi$ 关系曲线

2.3 地基土内摩擦角 φ 对承载力敏感性分析

图 4 给出了在土体抗剪强度指标基准值 $c_0^* = 23 \text{ kPa}$ 、 $c^* = 15 \text{ kPa}$ 、 φ^* 的基准值分别取 $\varphi^* = 4^\circ, 12^\circ, 20^\circ, 28^\circ$ 时，根据式 (3)、式 (6) 计算得到的 $\alpha(\varphi^*, \Delta\varphi) - \Delta\varphi$ 之间的关系曲线。

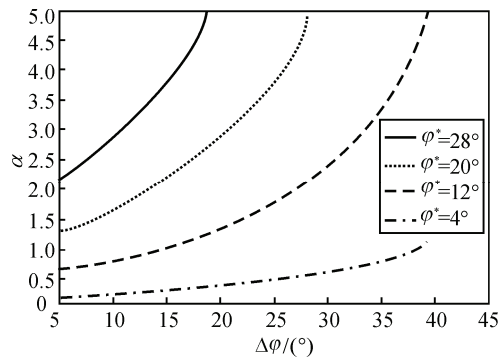


图 4 $\alpha(\varphi^*, \Delta\varphi) - \Delta\varphi$ 关系曲线

从图 4 计算结果可以看出，当土体抗剪强度指标的基准值一定时，内摩擦角的变化对极限承载力的影响非常敏感，并且随着内摩擦角变化值的增大，敏感系数显著增大；同时，在相同增量下，内摩擦角的基准值越大，其对承载力的影响越敏感；因此，内摩擦角的取值对极限承载力计算影响较大，其基准值越大，造成的偏差越大。

2.4 上覆层厚度 d_0 对承载力敏感性分析

图 5 给出了土体抗剪强度指标取基准值，根据式 (3)、式 (7) 计算得到的上覆层厚度取不同数值时的 $\alpha(d_0^*, \Delta d_0) - d_0^*$ 关系曲线。图 6 给出了上覆层厚度敏感性函数 $\alpha(d_0^*, \Delta d_0)$ 与土体内摩擦角 φ 的关系曲线。

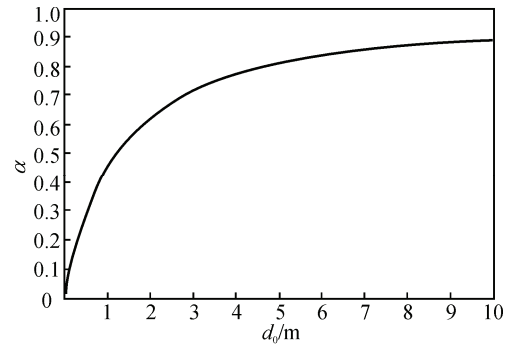


图 5 $\alpha(d_0^*, \Delta d_0) - d_0^*$ 关系曲线

从图 5 计算结果可以看出，当土体抗剪强度指标一定时，随着上覆层厚度的增加，敏感系数逐渐增大，并且敏感系数变化较为明显，但当上覆层厚度增加到一定程度时，敏感系数变化曲线趋缓。

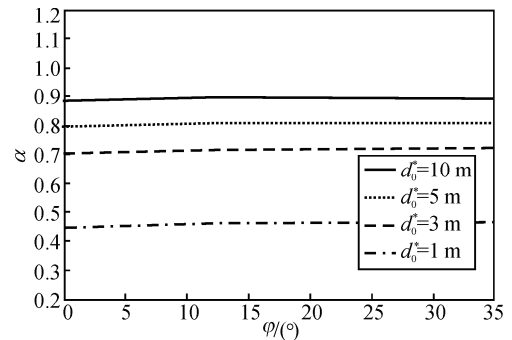


图 6 $\alpha(d_0^*, \Delta d_0) - \varphi$ 关系曲线

从图 6 来看，在内摩擦角固定时，上覆层厚度越大，其对地基承载力影响的敏感性越强，但上覆层厚度敏感性受地基土体内摩擦角影响较小，曲线变化不明显；因此，在对发射场坪强度评估时，必须考虑上覆层的厚度影响。

3 极限承载力影响因素正交试验分析

由于敏感度分析方法只是给出了各显著性影响因素的数值增减对极限承载力的影响程度^[3-4]，但为了定性地区分出各影响因素的敏感性差异，针对影响起重机作业场坪极限承载力的各因素大都具有随机性、可变性和模糊性等不确定特点，还应当以模型分析和正交试验分析为手段，采用多因素正交分析法进一步对各参数的敏感性大小进行计算。

根据计算公式 (3)，影响发射场坪极限承载力的主要因素包含：上覆层内聚力 c_0 、内摩擦角 φ_0 、天然重度 γ_0 ，地基土内摩擦角 φ 、内聚力 c 、重度 γ ，以及上覆层厚度 d_0 。为评价各因素的影响显著性，采用极差 R_j 来进行评价，如果极差计算结果越大，说明该因素水平的改变对试验结果影响越大，即极差越大的因素就是影响最显著的因素，极差较小的

因素为对试验结果影响较为次要的因素^[5]。

考虑这 7 种参数变化,对发射场坪极限承载力进行正交试验设计。假定这几种因素之间无交互作用,并且各参数取值概化为高、中、低 3 种因素水平并随机排列,参数取值范围以及随机确定的各因

素水平次序如表 1 所示。

根据敏感因素数量和因素水平,假定各因素间无交互作用,根据正交试验设计,选用 $L_{18}(3^7)$ 正交表,按照表 1 设定的方案,以地基极限承载力为考察对象,建立正交设计计算方案,计算结果如表 2。

表 1 敏感因素取值水平

| 水平 | 上覆层参数 | | | | 地基层参数 | | |
|----|----------------------|-----------------------------|---|-------------------|--------------------|---------------------------|---|
| | 内聚力 c_0/kPa | 内摩擦角 $\varphi_0/(\text{°})$ | 重度 $\gamma_0/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 厚度 d_0/m | 内聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| 1 | 15 | 15 | 22 | 2 | 20 | 35 | 15 |
| 2 | 50 | 10 | 12 | 1 | 10 | 15 | 20 |
| 3 | 30 | 5 | 17 | 3 | 40 | 5 | 10 |

表 2 正交设计计算方案及结果

| 序号 | 内聚力 c_0/kPa | 内摩擦角 $\varphi_0/(\text{°})$ | 重度 $\gamma_0/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 厚度 d_0/m | 内聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 地基极限荷载 P_u/kN |
|----|----------------------|-----------------------------|---|-------------------|--------------------|---------------------------|---|------------------------|
| 1 | 15 | 15 | 22 | 2 | 20 | 35 | 15 | 1 239.8 |
| 2 | 15 | 10 | 12 | 1 | 10 | 15 | 20 | 156.5 |
| 3 | 15 | 5 | 17 | 3 | 40 | 5 | 10 | 335.0 |
| 4 | 30 | 15 | 22 | 1 | 10 | 5 | 10 | 127.2 |
| 5 | 30 | 10 | 12 | 3 | 40 | 35 | 15 | 1 779.1 |
| 6 | 30 | 5 | 17 | 2 | 20 | 15 | 20 | 389.6 |
| 7 | 50 | 15 | 12 | 2 | 40 | 15 | 10 | 580.6 |
| 8 | 50 | 10 | 17 | 1 | 20 | 5 | 15 | 199.7 |
| 9 | 50 | 5 | 22 | 3 | 10 | 35 | 20 | 1 980.3 |
| 10 | 15 | 15 | 17 | 3 | 10 | 15 | 15 | 330.6 |
| 11 | 15 | 10 | 22 | 2 | 40 | 5 | 20 | 686.6 |
| 12 | 15 | 5 | 12 | 1 | 20 | 35 | 10 | 289.5 |
| 13 | 30 | 15 | 12 | 3 | 20 | 5 | 20 | 1 021.9 |
| 14 | 30 | 10 | 17 | 2 | 10 | 35 | 10 | 1 021.9 |
| 15 | 30 | 5 | 22 | 1 | 40 | 15 | 15 | 424.8 |
| 16 | 50 | 15 | 17 | 1 | 40 | 35 | 20 | 1 373.9 |
| 17 | 50 | 10 | 22 | 3 | 20 | 15 | 10 | 671.4 |
| 18 | 50 | 5 | 12 | 2 | 10 | 5 | 15 | 239.3 |

根据极差计算公式:

$$R_j = \max\{F_{1j}, F_{2j}, F_{3j}\} - \min\{F_{1j}, F_{2j}, F_{3j}\} \quad (8)$$

可计算各参数极差分析如表 3 所示,从表中可

以看出,影响地基极限承载力的 7 个计算参数中,参数敏感性从大至小依次为:地基层内摩擦角、上覆层厚度、上覆层内聚力、地基层内聚力、上覆层重度、地基层重度、上覆层内摩擦角。

表 3 敏感因素极差分析

| 参数 | 内聚力 c_0/kPa | 内摩擦角 $\varphi_0/(\text{°})$ | 重度 $\gamma_0/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | 厚度 d_0/m | 内聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ |
|----------|---|-----------------------------|---|-------------------|--------------------|---------------------------|---|
| F_{1j} | 508.7 | 656.9 | 791.2 | 629.1 | 579.4 | 1 346.9 | 702.2 |
| F_{2j} | 840.9 | 688.7 | 621.9 | 494.8 | 642.6 | 425.6 | 748.9 |
| F_{3j} | 672.0 | 675.9 | 608.5 | 897.7 | 799.5 | 249.0 | 570.5 |
| R_j | 332.2 | 31.8 | 182.7 | 402.9 | 220.1 | 1 097.9 | 178.4 |
| 敏感性 | $\varphi > d_0 > c_0 > c > \gamma_0 > \gamma > \varphi_0$ | | | | | | |

4 结论

通过上述分析发现:上覆层和地基土体内聚力取值的变化对地基极限承载力的敏感性受内摩擦角取值影响,内摩擦角越小,内聚力敏感系数越大;上覆层厚度变化对承载力敏感性系数受土体内摩擦角取值的变化影响较小,曲线变化不明显;土体内摩擦角取值变化对极限承载力的影响明显要高于上覆层厚度变化以及内聚力变化对承载力的影响。

同时,根据正交试验分析可以发现,上覆层结构参数 d_0 对发射场坪承载力影响显著。而在各项材料参数中, φ 对发射场坪承载力的影响最为显著; c_0 和 c 居其次,但影响程度相对较小; γ_0 、 γ 、 φ_0 的影响更小,常可忽略不计。这一结论对导弹无依托发射场坪的强度快速评估技术尤为重要,面对众多

不确定因素,在承载力检测与评定中无须同等对待,而应将主要精力放在对阵地承载力影响显著的因素分析上。

参考文献:

- [1] 占金春. 非预设发射阵地承载力建模分析与检测技术研究[D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2011: 10-11.
- [2] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996: 68-69.
- [3] 钟岱辉. 地基极限承载力的参数敏感性分析[J]. 工业建筑, 2005, 35: 479-481.
- [4] 余明, 毕义明, 邓鹏华. 地基动能反卫星作战能力需求研究[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 1-3.
- [5] 张旭辉, 龚晓南, 徐日庆. 边坡稳定影响因素敏感性的正交法计算分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 36-39.