

# 碎石土斜坡场地土体水平抗力分布模式研究

Study on Distribution Model of Horizontal Resistance of Soil Mass in Gravel Soil Slope Site

彭 麟<sup>1</sup>, 陈继彬<sup>2,3</sup>

(1. 江苏联合职业技术学院南京分院, 江苏 南京 210000; 2. 成都工业学院, 四川 成都 610031;  
3. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 碎石土斜坡场地因坡度不同, 水平抗力的大小差异明显, 斜坡坡度对土体水平抗力的影响能否保证工程结构安全稳定, 其如何弱化土体水平抗力的仍需探明。本文以碎石土斜坡土体为研究对象, 通过开展桩基室内水平静载荷试验, 深入分析不同坡度 (斜坡坡度  $0\sim 45^\circ$ ) 对桩侧土体水平抗力分布规律的影响。研究表明: 因不同深度土体抗力发挥程度的时效性, 土体抗力随深度、位移的分布形式可按土体进入极限抗力状态的不同分为三个阶段; 在抗力极值深度以上斜坡场地与水平场地下两者土体抗力极值比值近似  $1/1+\tan\theta$  关系, 以下近似为 1, 这也充分说明斜坡坡度对桩侧土体抵抗桩身变形能力具有弱化效应; 进一步参考坡度对桩侧土体抗力的变化的影响, 给出了各土体极限抗力  $p_u$  和土体抗力系数  $k_s$  等参数的取值方法。本研究对斜坡场地结构水平抗力计算的取值有一定的借鉴作用, 具有一定的实际价值。

**关键词:** 斜坡; 碎石土; 水平抗力; 坡度弱化效应

**中图分类号:** TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 06-0017-08

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.003

PENG Lin<sup>1</sup>, CHEN Jibin<sup>2,3</sup>

(1. Nanjing Branch of Jiangsu United Vocational and Technical College, Nanjing 210000, China;  
2. Chengdu Technological University, Chengdu, 610031;  
3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Due to different slopes of gravel soil slope site, the magnitude of horizontal resistance varies obviously. Whether the impact of slope slope on soil horizontal resistance can ensure the safety and stability of engineering structure and how to weaken soil horizontal resistance still need to be proved. Taking the gravelly soil slope soil as the research object, through the indoor horizontal static load test of pile foundation, this paper deeply analyzes the influence of different slope (slope slope  $0\sim 45^\circ$ ) on the distribution law of horizontal resistance of pile side soil. The tests reflect that the comprehensive distribution form of soil resistance with depth and displacement could be carved out three phases according to the different conditions of soil entering the limit resistance state, all of which have a certain timeliness due to the different depth of soil resistance; Above the extreme resistance depth, the ratio of the extreme resistance of the underground soil of the slope site and the horizontal field is approximately  $1/1+\tan\theta$ . And the following is approximately 1, which also

**作者简介:** 彭麟 (1980—), 本科, 高级工程师, 从事土木工程方向。

**通信作者:** 陈继彬 (1987—), 博士, 高级工程师, 研究方向为岩土工程。

**收稿日期:** 2023-02-21

## 岩土力学

fully shows that the slope gradient has a weakening effect on the resistance of soil around the pile to pile deformation; Further referring to the influence of slope on the change of soil resistance at the pile side, the value methods of soil ultimate resistance  $P_u$  and soil resistance coefficient  $k_s$  are given. This study has a certain reference value for the calculation of horizontal resistance of slope site structure, and has a certain practical value.

**Keywords:** slope; gravel soil; horizontal resistance; slope weakening effect

## 0 引言

我国西南地区 90% 以上输电线塔基础（桩基础）位于碎石土斜坡场地，桩周土体水平作用力及其水平抗力分布规律是岩土工程界的热点问题。

因斜坡坡度的影响，陡坡场地土体水平抗力的分布规律明显不同于半无限空间假定的水平场地。国外学者通过室内外模型试验、数值模拟等手段对不同坡度条件下砂土、黏性土的土体抗力提出了半经验计算公式<sup>[1-4]</sup>。我国现行标准<sup>[5-7]</sup>中以  $m$  值法为主估算各类土体的水平抗力，取值范围相对宽泛且建议值仅适用桩的泥面位移量小于 3 mm 这个位移极限。基于规范<sup>[5-7]</sup>的不足，研究人员结合大量的工程试验，建议了桩顶不同位移量时  $m$  值的（桩侧土体水平抗力系数比例系数）经验取值，并分析了桩身几何特征（桩径、桩长、桩型等）、桩周土性特性（密度、抗剪强度等）对  $m$  值取值的影响，进一步归纳出了  $m$  值与上述影响因素的关系表达式<sup>[8-16]</sup>，但研究成果仍主要以软黏土为主，且对于斜坡场地的研究成果仍较分散。对于斜坡场地条件，一般研究观点认为以水平场地的  $m$  值为基准乘以坡度修正系数，对于粘性土而言取为 0.3~0.6。该折减系数是否适用于碎石土斜坡场地条件下土体抗力分布规律和  $m$  值计算仍未有响应的研究和论证。

本文基于西南地区地形地貌特点，以输电线路桩基础为例，结合相似理论，设计并开展了 4 种坡度（0、15°、30°、45°）下室内模型桩水平载荷试验，分析不同荷载作用阶段坡度影响下桩侧土体水平抗力随桩深、桩顶位移的分布规律，并提出响应阶段的抗力分布计算方法及计算参数取值建议。研究成果旨在为斜坡场地基础设计提供理论借鉴，具有一定的实际工程价值。

## 1 室内模型试验方案

### 1.1 斜坡体模型设计

①试验坡度：0（水平场地）、15°、30°、45°。  
②试验土体：取自四川省理县薛城镇某斜坡，土体为稍密碎石土，粒径为 3~4 cm，颗粒间充填少许黏性土（见图 1a）。土体进行室内筛分后，确定级配比例配置土体： $d$ （颗粒直径） $\geq 2$  mm 比例 73.6%、 $d \geq 5$  mm 比例 60%、 $d \geq 20$  mm 比例 28.8%，配比后见图 1b，试验土体的物理力学参数参见表 1。



(a) 原位



(b) 制备后

图 1 坡体材料图  
Fig. 1 Soil material

表 1 碎石土物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	内聚力 /kPa	内摩擦角 /φ°	含水率 /%	最优含水率 /%	弹性模量 /MPa	密实度 /%
22	10	45.6	5.3	6.4	33.7	60

## 1.2 模型桩设计

综合下述 2 方面因素确定模型桩相似比为 10，其中：

①线塔工程桩基几何尺寸：桩宽 0.8~1.2 m，桩长 8~10 m，桩身材料 C25。

②室内试验台尺寸：试验在三维地质模拟试验室进行，其长、宽、高分布为 1.5 m、1.0 m、1.3 m。

依次设计模型桩见图 2，几何参数见表 2。试验桩用材料配合比为水泥（42.5 R）：砂：水 = 1：1.76：0.32。桩身密度 2.14 g/cm<sup>3</sup>、弹性模量为 27.83 MPa、单轴抗压强度为 49 MPa。

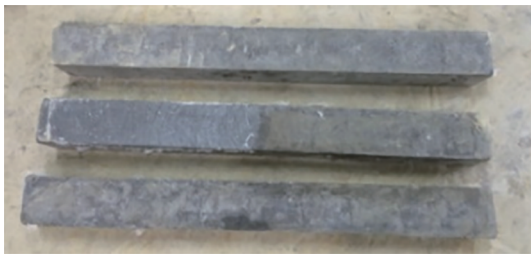


图 2 模型桩  
Fig. 1 Model pile

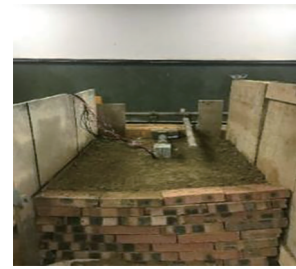
表 2 桩模型设计参数  
Table 2 Parameters of pile model

相似比	试验桩几何尺寸
$C_d = D_H/D_M = 10$	0.1 m
$C_L = L_H/L_M = 10$	1 m
$C_A = d_{H2}/d_{M2} = 100$	0.01 m <sup>2</sup>
$C_I = d_{H4}/d_{M4} = 10000$	$1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^4$

C 为相似比，d 为桩宽；L 为桩长；A 为桩截面面积；I 为桩截面惯性矩；H 为原型桩；M 为模型桩。

## 1.3 试验过程

(1) 模型搭建：首先在试验槽按 30 cm 间距标记填筑刻度，分层填筑分层夯实，并在预定深度埋设模型桩。填筑到设计标高后统一削坡，不同坡度试验模型参见图 3。



(a) 0°



(b) 15°



(c) 30°



(d) 45°

图 3 试验模型  
Fig. 3 Test model

(2) 监测点设置：埋桩的同时埋设监测元件，其中：①位移百分表分别布设在桩顶及桩身泥面位置（相距约 10 cm）；②土压力盒桩前、桩后随桩深共布设 8 只，布设深度见图 4 示意图（图 4 仅





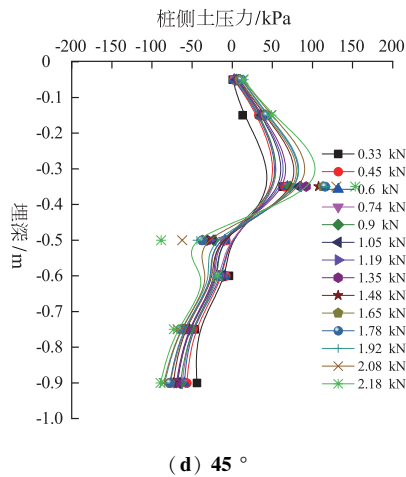


图 6 不同坡度桩侧土压力-桩深曲线

Fig. 6 Curve of earth pressure and pile depth with different slope

②至桩身挠曲拐点；③至桩底。其中，第一段抗

力随深度变化呈正比变化，第二、三段均呈反比，且抗力在 0.3~0.5 倍桩埋深及桩底达到极大值和极小值，在桩身挠曲拐点为 0，反映出桩侧土体抗力与桩身形变量直接相关，在桩身挠曲点位置位移为 0（抗力亦为 0），下部桩体发生向桩后的变形，桩后土体相应的发挥了一定抗力。

总体上，斜坡场地土体抗力随深度分布表述为下述 2 个层面：一是抗力大小，随斜坡坡度的增大非线性减小，陡坡（45°）较缓坡（15°）在相同深度处的抗力小 15%~30%，这一响应规律受埋深的影响而减弱；二是抗力最大值深度，随斜坡坡度的增大线性加深，斜坡坡度从 15°增加到 45°，抗力最大值深度从 0.3 m 埋深加深到 0.4 m。具体试验结果见表 3 所示。

表 3 不同埋深桩侧土体极限抗力

Table 3 Ultimate resistance of soil in different buried depth

深度	0		15°		30°		45°	
	pu0	pu0/ pu0	pu15	pu15/ pu0	pu30	pu30/ pu0	pu45	pu45/ pu0
0. 15 m	40	1	30	0. 75	24	0. 60	20	0. 50
0. 25 m	146	1	103	0. 71	91. 5	0. 63	70	0. 48
0. 4 m	200	1	150	0. 75	123	0. 62	100	0. 50
0. 5 m	254	1	197	0. 78	216	0. 85	190	0. 75
0. 7 m	308	1	299	0. 97	300	0. 97	250	0. 81
0. 85 m	362	1	360	0. 99	360	0. 99	360	0. 99
1 m	416	1	415	1. 00	415	1. 00	410	0. 99

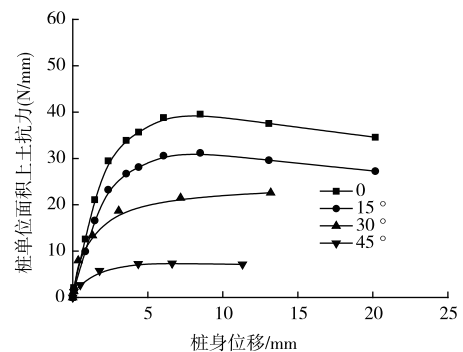
### 3 土体抗力随位移分布

抗力最大值深度至桩底段桩侧土体抗力逐渐减小且受坡度影响程度逐渐减弱，基于此，以桩身上部 3 处典型深度试验结果为例分析不同坡度桩侧土压力-位移两者相关关系。

图 7 为桩侧土体抗力-位移曲线，即  $p-y$  曲线，从曲线可见，桩侧土体抗力在不同深度均随位移均呈双曲线变化态势，先线性增大后逐渐趋于稳定而后达到极限抗力状态。不同深度具体表现如下：

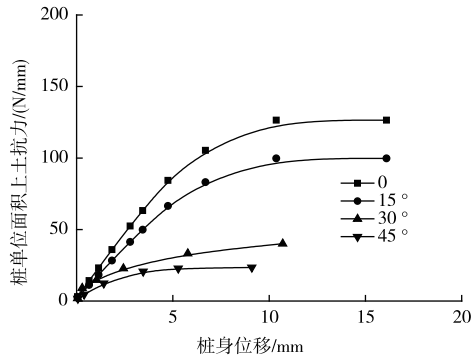
因斜坡坡度改变了桩基受力的半无限空间状态，浅层土体桩前提供抗力的范围减弱使其在较小荷载作用下即刻抗力极限状态；但随着深度的逐渐加深，桩前土体抵抗水平作用力的能力逐渐摆脱坡度的影响，同时受桩顶~泥面范围内作用的

水平推力向下传递深度的限制，在相同荷载等级条件时深层土体并不会与浅层土体同步进入极限抗力状态，如图 7c，该深度范围内  $p-y$  曲线始终为线性状态，但随桩顶作用荷载的增大会有进入极限状态的可能，说明土体抗力随深度增加其发挥的能力具有渐进性。

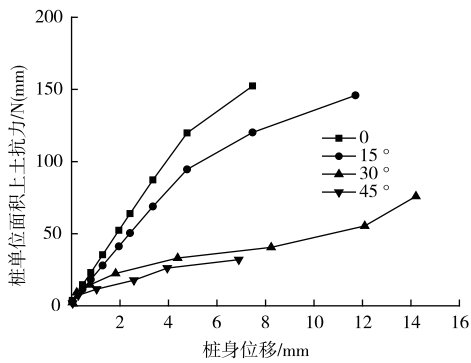


(a) 0. 15 m

岩土力学

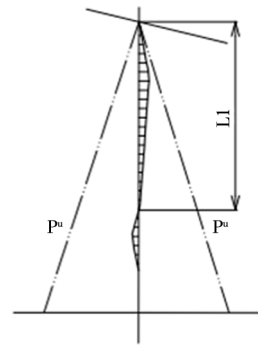


(b) 0.25 m

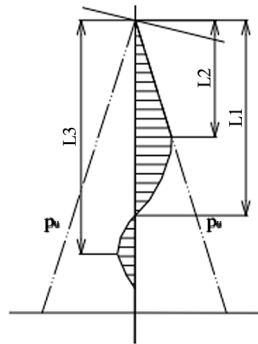


(c) 0.45 m

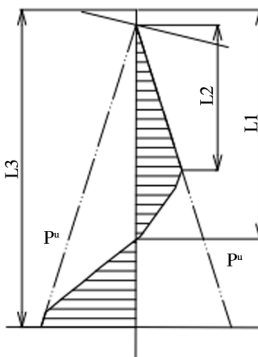
图 7 不同坡度桩侧土压力-位移曲线  
Fig. 7 Earth pressure displacement curve of pile side with different slope



(b) 桩前土体未达到极限抗力阶段



(c) 抗力零点上部土体达到极限抗力阶段



(d) 土体抗力达到极限土体抗力阶段

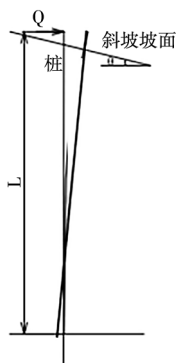
图 8 斜坡场地桩侧土体抗力的分布模式

Fig. 8 Distribution model of soil resistance along pile side of slope length

4 抗力分布模式及计算方法

4.1 分布模式

综合归纳斜坡场地桩侧土体水平抗力随深度、随荷载、随位移的变化规律，按桩侧土体是否进入极限状态将其分布模式为 3 个阶段，如图 8 所示。



(a) 基础 (桩) 水平受荷

(1) 图 8 (b)，桩顶~泥面范围内水平作用力  $Q$  小于土体临界荷载  $P_a$  时 (即  $Q < P_a$ )，桩侧土体水平抗力  $p$  线性增大，且桩埋深范围内均在土体极限抗力  $P_u$  包络线范围内；

(2) 图 8 (c)，当  $P_a \leq Q < P_u$ ，仅坡面至 0.3~0.5 倍桩埋深 (抗力最大值深度) 范围内，桩侧土体抗力达到或接近极限抗力状态，并随作用荷载的增大，极限状态深度范围逐渐加深；

(3) 图 8 (d),  $Q \geq P_u$ , 桩埋深范围土体抗力均达到极限抗力状态。

#### 4.2 计算方法

依据桩侧土体抗力分布模式, 做如下假设:

1)  $L$  表示桩长、 $d$  表示桩径 (宽), 桩底铰接而桩顶自由, 水平荷载  $Q$  作用在桩身泥面位置, 位移为  $y_0$ ; 2) 深度方向上, 土体水平抗力系数  $k_x$ 、极限土反力  $p_u$  均线性增大; 3)  $p$ - $y$  曲线为双曲线变化, 当土体进入极限抗力  $p_u$  后,  $p$  不随  $y$  的增大而明显增大; 4) 水平荷载作用下桩仅发生绕某点的

转动变形, 转动角度为  $w$ :  $\omega = \frac{y_0 - y}{L_1 - z}$  ( $w$  为桩身转角)。在本假定的基础之上, 分阶段提出分布模式的计算公式, 如下:

(1) 图 8 (b), 当  $Q < P_a$  时, 埋深范围内  $p < P_a$ , 则  $p$ :

$$p = k_x y = k_x [y_0 - \omega(L_1 - z)] \quad (2)$$

(2) 图 8 (c), 当  $P_a \leq Q < P_u$ , 坡面至 0.3~0.5 倍桩埋深 (抗力最大值深度) 范围  $L_2$  内,  $p \approx P_a$ ; 其他段  $p < P_a$ , 假设桩身转动变形深度为  $L_1$ , 则  $p$ :

$$p = \begin{cases} p_{u\theta} (0 < z < L_2) \\ p_u (z = L_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$p = k_x y = k_x [y_0 - \omega(L_1 - z)] (L_2 \leq z \leq L) \quad (4)$$

$p_{u\theta}$  为坡度影响弱化后的土体极限抗力; 设  $z = L_2$  时  $p_u = k_x y$ , 进而可计算出  $L_1$ 、 $L_2$ 。

(3) 8 (d),  $Q \geq P_u$ , 除桩弯曲转动点过渡段土体因桩身位移较小而  $p < P_a$ , 其他段  $p \approx P_a$ , 则  $p$ :

$$p = \begin{cases} p_{u\theta} (0 < z < L_2) \\ p_u (z = L_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$p = k_x y = k_x [y_0 - \omega(L_1 - z)] (L_3 \leq z \leq L) \quad (6)$$

$$p = -p_u (L_3 < z \leq L) \quad (7)$$

$L_1$ 、 $L_2$  计算可参照 (2) 中假设。当  $z = L_3$  时,  $p_u = -p_u$ , 可进一步计算出  $L_3$ 。

#### 4.3 参数确定

上述各式的求解关键是准确计算土体极限抗力  $p_u$  以及土体抗力系数  $k_x$ 。确定方法如下:

#### (1) $p_{u\theta}$ 的确定

从表 3 可见, 每一坡度下的  $p_{u\theta}$  ( $\theta = 15^\circ/30^\circ/45^\circ$ ) 与水平场地  $p_{u0}$  比值分 2 段:

① 坡面至 0.3~0.5 倍桩埋深  $L_2$ , 两者比值与斜坡坡度直接相关, 坡度  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  和  $45^\circ$  时, 其比值分别为 0.75, 0.61 和 0.49。可近似表述为式 8。

$$\frac{p_{u\theta}}{p_u} = \frac{1}{1 + \tan\theta} \quad (8)$$

② 0.3~0.5 倍桩埋深至桩底 (即  $L_3 \leq z \leq L_2$ ), 比值则为常数 1, 即斜坡坡度的影响可忽略不计。这说明斜坡坡度对桩侧土体水平抗力的影响具有深度效应, 到达一定深度后桩侧土体能够提供抗力的范围即恢复到水平半无限空间场地桩土, 可按水平场地的工况计算土体极限抗力。

#### (2) 土体抗力系数 $k_x$

根据 4.1 节假定 2), 土体抗力系数  $k_x$  可表述为  $k_x = mz$ 。规范<sup>[5]</sup>认为  $m$  值取值与实际荷载、允许位移相适应, 如果根据试验结果求桩的  $m$  值, 得到  $m$  值随泥面位移 ( $y_0$ ) 变化的关系曲线, 如

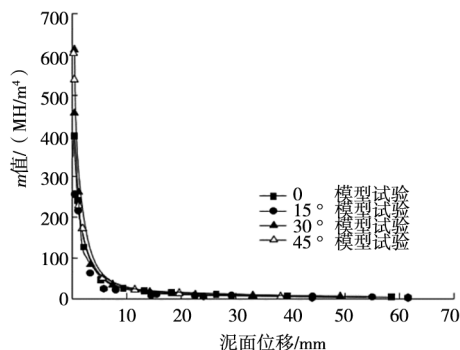


图 9  $m$  值随  $y_0$  变化曲线

Fig. 9 Curve between  $m$  value and mud surface displacement

图 9 所示。按试桩的地基土进行分类, 确定其  $m$  值的取值范围应为  $100 \sim 300 \text{ kN/m}^4$  (泥面位移  $y_0$  为  $1.5 \sim 3 \text{ mm}$ ), 但是从图 8 可见, 因为斜坡坡度的存在, 泥面处桩身发生  $3 \text{ mm}$  位移时计算得到的  $m$  值明显小于规范建议值明显要小。故而, 根据图 8 中  $m$  值随  $y_0$  变化表现出的幂函数衰减关系。进一步拟合得到其表达式为:

$$m = C_m \cdot \left(\frac{y_0}{b} \cdot 1000\right)^k \quad (9)$$

## 岩土力学

式中  $y_0/b$  为土体应变,  $b$  为桩宽 (或直径),  $C_m$  为土体发生单位应变时相应的  $m$  取值, 根据试验或经验确定。其中:

①  $k$  表示  $m$  值随  $y_0$  增大而减小的幅度, 本次试验所用碎石土  $k$  为  $-0.8 \sim -1$ ;

② 系数  $C_m$  与  $m$  值量纲相同。基于土体抗力定义, 对比斜坡场地同一深度  $C_{m1}$  斜坡与水平场地条件  $C_{m1}$  水平之间关系, 得到公式 6。

$$\frac{p_u}{p_{u\theta}} = \frac{m_{\text{水平}}}{m_{\text{斜坡}}} = \frac{C_{m1\text{水平}} \cdot \left(\frac{y_0}{b} \cdot 1000\right)^k}{C_{m1\text{斜坡}} \cdot \left(\frac{y_0}{b} \cdot 1000\right)^k} = \frac{C_{m1\text{水平}}}{C_{m1\text{斜坡}}} \quad (10)$$

根据桩顶位移计算  $m$  值, 最终计算公式可表示为:

$$m_{0 < l < z} = \frac{C_{m1\text{水平}}}{1 + \tan\theta} \cdot \left(\frac{y_0}{b} \cdot 1000\right) - 0.8 \sim -1.0 \quad (11)$$

## 5 结论

本文通过桩基静载荷试验研究碎石土斜坡土体水平抗力随深度、随荷载、随位移的变化特点, 进而归结出土体抗力的分布模式及计算公式。主要结论如下:

(1) 坡土体抗力随深度变化可分为线性增大段、波动增大-减小段、反向减小段, 呈上下小中间大的凸型; 而随位移变形呈双曲线变化; 土体抗力随深度上的发挥能力具渐次性;

(2) 土体抗力随深度、位移综合分布形式可以分为桩前土体未达到极限抗力阶段、抗力零点上部土体达到极限抗力阶段、土体抗力达到极限土体抗力阶段; 不同阶段主要计算参数均为土体极限抗力和土体抗力系数;

(3) 斜坡场地与水平场地下两者土体抗力极值比值在抗力最大值深度以上近似  $1/1+\tan\theta$  关系, 以下近似为 1, 这也充分说明斜坡坡度对桩侧土体抵抗桩身变形能力具有弱化效应;

(4) 斜坡碎石土场地水平受荷桩的  $m$  值随立面位移变化呈现幂函数衰减关系, 基于此对规范

计算  $m$  值公式进行修正来确定  $k_x$ 。

## 参 考 文 献

- [1] POULOS, H. G. Behavior of laterally loaded piles near a cut or slope [J]. Australian Geomechanics Journal. 1976, 6 (1), 6-12.
- [2] BOUFIA, A., BOUGUERRA, A. Odelisation en centrifugeuse du comportement d'un pieu flexible charge horizontalement a proximite d'un talus [J]. Canadian Geotechnical Journal. 1995. 32 (2), 324-335.
- [3] CHAE, K. S., UGAI, K., and WAKAI, A. Lateral resistance of short single piles and pile groups located near slopes [J]. International Journal of Geomechanics. 2004, 4 (2), 93-103.
- [4] RESEE L. C. R. F. Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading, 2nd Edition [M]. CRC Press. 2011.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50007-2011 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2011.
- [6] 中华人民共和国建设部. JGJ94-2008 建筑桩基技术规范 [S]. 北京. 中国建筑工业出版社. 2008
- [7] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册 (第五版) [M]. 中国工业建筑出版社. 2019.
- [8] GEORGIADIS M. Development of p-y curves for layered soils. In: Proceedings geotechnical practice in offshore engineering [C]. ASCE specialty conference. Austin. 1983, 536-45.
- [9] GEORGIADIS M, ANAGNOSTOPOULOS C, SAFLEKOU S. Interaction of laterally loaded piles. In: Proceedings Fondations Profondes [C]. Ponts et Chaussees, Paris. 1991, 177-84.
- [10] GEORGIADIS KONSTANTINOS, M. Georgiadis. Undrained Lateral Pile Response in Sloping Ground [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010, 15: 1488-1500.
- [11] Georgiadis. Konstantinos, Michael Georgiadis. Development of p-y curves for undrained response of piles near slopes [J]. Computers and Geotechnics, Texas. 2012, 40: 53-61.
- [12] Georgiadis Konstantinos. The effect of surcharge load on the lateral resistance of a row of piles in clay [C]. Conference: 8th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, At Delft, The Netherlands. 2014, Volume: 2.
- [13] 劳伟康, 周治国, 周立运. 水平推力桩在大位移情况下  $m$  值的确定 [J]. 岩土力学. 2008, (1): 192-196.

(下转第 133 页)



- 19 (4): 162-171.
- [10] 梁海峰, 李梓杨, 郭杰. 计及电动汽车充电需求的孤岛微网可靠性计算方法 [J]. 电力建设, 2020, 41 (11): 49-59.
- [11] 徐登辉, 王妍彦, 张有兵, 等. 不确定性环境下考虑信息失效的主动配电网可靠性评估 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (22): 134-142.
- [12] 林圣, 崔臻, 杨茜茜, 等. 地铁中压环网供电系统可靠性评估方法 [J]. 西南交通大学学报, 2020, 55 (6): 1155-1162.
- [13] 高崇, 曾广璇, 张俊潇, 等. 基于成功流法的配电信息物理系统可靠性评估 [J]. 电力建设, 2020, 41 (5): 58-64.
- [14] 刘艳茹, 刘洪, 谷毅, 等. 考虑多种终端配置的中低压配电网供电可靠性协同评估 [J]. 电力建设, 2022, 43 (2): 54-62.
- [15] 刘凯诚, 钟鸣, 曾平良, 等. 考虑分布式可再生能源和储能智能配电网可靠性评估综述 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (7): 1-11.
- [16] 吴晨曦, 陈泽昊, 张杰, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能的风力发电系统成本/供电可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (2): 62-71+75.

(上接第 24 页)

- [14] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 弃土堆填对斜坡输电线路塔桩地震反应的影响. 岩土力学 [J]. 岩土力学. 2015, 36 (8): 2277-2283.
- [15] 陈继彬. 碎石土斜坡土体水平抗力分布规律研究 [D]. 成都理工大学, 2017.
- [16] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴. 碎石土斜坡土体水平抗力分布规律研究 [J]. 工程地质学报. 2018, 26 (4): 959-968.
- [17] REESE L C, MATLOCK H. Non - dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth [C]. Proceedings, 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Austin, Texas. 1956, 1-23.
- [18] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design [M]. API Publishing Services, Washington, D. C. Texas, . 2001.
- [19] WEI DONG GUO. Laterally loaded rigid piles in cohesionless soil [J]. Can. Geotech. J. 2008, 45: 676 - 697.
- [20] 孙永鑫, 朱斌, 陈仁朋, 等. 无黏性土中桩基水平非线性地基反力系数研究 [J]. 海洋工程. 2014, 2 (32): 38-45.
- [21] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报. 2013, (1): 184-190.