

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0825

碎石土及碎石土-基岩地基斜坡场地 m 值研究

李晓明¹, 赵庆斌¹, 杨祈敏¹, 赵其华², 丁梓涵²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 成都理工大学 环境与土木工程学院 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 四川山区输电线路常在陡峻斜坡走线, 碎石土、基岩二元结构地层分布普遍。针对此类场地和地基, 斜坡桩基水平抗力系数的比例系数 m 取值是陡峻边坡输电线路铁塔桩基设计中亟待解决的问题。根据单桩水平静载试验获取 m 值, 采取现场试验、室内模型试验、数值模拟 3 种方法进行综合分析, 研究了陡峻边坡碎石土、碎石土-基岩地基桩基水平作用力参数 m 值的变化规律、影响因素及取值。得出以下结论: 斜坡场地 m 值随坡度的增大呈线性减小, 且碎石土地基减小幅度大于碎石土-基岩地基; 对 m 值影响程度最重要的因素依次为场地坡度、土体密实度、桩长、桩径; 提出陡峻边坡碎石土、碎石土-基岩场地考虑以上重要影响因子的 m 值估算公式, 并给出了修正系数。

关 键 词: 斜坡场地; 碎石土; 地基水平抗力系数的比例系数 m 值; 单桩水平载荷试验

中图分类号: TU 471

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 04-1327-10

Determination of coefficient m for foundation on a gravel soil-bedrock slope

LI Xiao-ming¹, ZHAO Qing-bin¹, YANG Qi-min¹, ZHAO Qi-hua², DING Zi-han²

(1. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., (SEDC), Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Transmission line in Sichuan mountainous area always layout in steep slope, where Gravel soil and bedrock dual structure formation are common in the region. As such, proportional coefficient m of ground horizontal resistance coefficient is the problems to be settled urgently in the design of transmission line tower pile foundation in the steep slope. m value is obtained by the static horizontal loading test of single pile. Three methods including field experiment, indoor model test, and numerical simulation are used to investigate the changing rules, influence factors and accessor methods of the m value. The results indicate m value of slope site decreases linearly with the increase of slope, and the decrease of m in gravel soil is greater than in the gravel soil-bedrock foundation. The most influencing factors on m value are ground slope, soil compactness, pile length and pile diameter. The proposed prediction formula considers impact factors of m value of the gravel soil, gravel soil and bedrock in slope site, and provides the correction coefficient.

Keywords: slope site; gravelly soil; proportional coefficient of ground horizontal resistance coefficient m value; horizontal load tests of single pile

1 引 言

桩基设计常会采用基于弹性地基反力法的 m 法, 其中地基水平抗力系数的比例系数 m 值一般按照规范推荐值^[1]结合经验确定, 但经验值均来自于平坦场地单桩水平静载试验所积累的数据, 当直接用于陡峻边坡输电铁塔桩基水平力计算时, 其安全性、适合性和经济性等并不能保证。同时, 现行规

范中根据液限及密实程度将黏土、砂土等的经验 m 值进行了划分, 而对碎石类土经验取值的范围较大^[2]。目前对 m 值的研究多基于平原^[3]、滨海^[4]、码头及基坑等地基的桩基础, 地基土多为软土^[5]、黏性土^[6]、粉土、砂土^[7]等地基, 但针对我国西南山区碎石土以及碎石土-基岩地基的研究甚少。因此, 规范推荐的碎石土经验值会造成设计人员在参考取值时差异性和任意性较大, 且对于斜坡场地时

收稿日期: 2016-04-20

第一作者简介: 李晓明, 男, 1972 年生, 学士, 高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事岩土工程勘察方面的工作。E-mail: xlcys@qq.com
通讯作者: 赵其华, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程、地质工程方面的研究工作。E-mail: zqh310@qq.com

的适用性还有待考量。

为填补这一空白，本文以四川山区输电线路实际走线中常见的地形地貌及地基类型即碎石土、碎石土-基岩地基斜坡场地桩水平作用力参数 m 值为研究对象，进行单桩水平静载试验，采取现场试验、室内模型试验、数值模拟等多种手段方法，对斜坡桩基参数 m 值的变化规律、影响因素及取值进行研究。

2 现场单桩水平载荷试验

2.1 场地岩土条件

根据四川地区斜坡场地常见岩土条件，本次现场试验场地选择在四川理县下孟乡山体斜坡，地层为二元结构，上部为稍密-中密碎石土，厚度约 10 m，下部为中风化变质砂岩。通过一系列物理力学试验得到试验场地碎石土物理力学参数，如表 1 所示。

表 1 试验场地碎石土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of gravel soil in experimental site

重度 γ (kN/m^3)	含水率 ω (%)	最优含水率 ω_{opt} (%)	最大干密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	现场直剪		室内大三轴剪切	
				黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
22	6.3	8.5	2.38	8	54	10	45.57

2.2 试验方案

现场试验共进行 14 根单桩水平静载试验(桩位如图 1 所示)，均为混凝土人工挖孔灌注桩。其中 1[#]~8[#]桩位于碎石土地基，拟分别进行 0°、15°、30°、45°坡试验，9[#]~14[#]桩位于碎石土-基岩场地，拟分别进行 15°、30°、45°坡试验。每个坡度试桩 2 根。试验前对场地坡度进行复测，由于场地限制及施工因素，得出碎石土设计 0°坡场地的实际坡度为 33°。

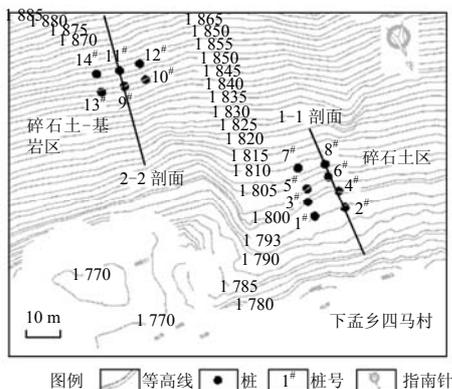


图 1 试验桩布置图

Fig.1 The arrangement of the test pile

试桩桩径为 1 m、桩长为 10.5 m、出露 0.5 m。桩身混凝土强度等级为 C25，桩身配筋采用 30 ϕ 28 mm 的 HRB400 钢筋作为主筋通长配置。试桩的成孔、灌注施工以及试验方案严格按照规范的规定制定。

桩顶水平加载装置及反力装置由油压千斤顶、桩后混凝土反力墙实现，加载方式采用慢速维持荷载法。

2.3 监测元件布设

本次试验采用百分表采集桩顶水平位移(桩顶及桩顶向下 50 mm 两处上下布设)、测斜管采集桩身水平位移(垂直加载方向桩身左右两侧对称布设)、钢筋计采集桩身轴向拉压应变(平行加载方向桩身前后两侧对称布设)，土压力盒测定桩前后土压力(平行加载方向桩身前后两侧土体中对称布设)，布设方案见图 2。

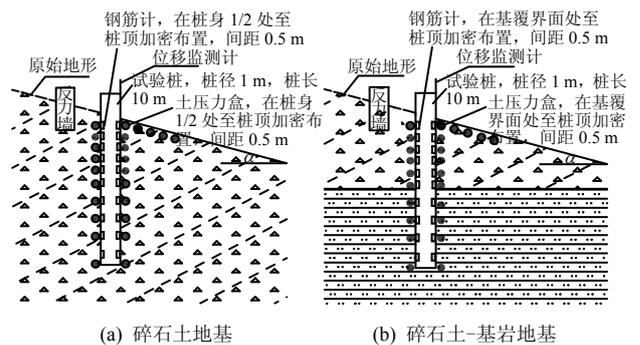


图 2 监测元件埋设示意图

Fig.2 Schematic diagram of the layout of the monitoring sensors

2.4 现场试验成果

根据桩顶上、下两个百分表测试数据，按规范要求^[1-2]，作出桩顶位水平移随荷载的变化曲线 ($x-H$) 及桩顶水平位移梯度曲线 ($\Delta x-\Delta H$)，并由此确定临界荷载 H_{cr} 及对应的位移 x_{cr} ，和极限荷载 H_u 及对应的位移 x_u ，如图 3、4 所示。

按规范要求^[1-2]，各级荷载下的 m 值为

$$m = \frac{H_{cr} v_x}{x_{cr}} \frac{5}{3} \frac{2}{b_0(EI)^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

式中： H_{cr} 、 x_{cr} 为临界荷载和对应地面处的水平位移； b_0 为桩身计算宽度 (m)； v_x 为桩顶水平位移系数； EI 为桩身刚度。

按照相同的方法将 1[#]~8[#]桩试验得到的 H_{cr} 、 x_0 及对应的 m 值结果列于表 2。

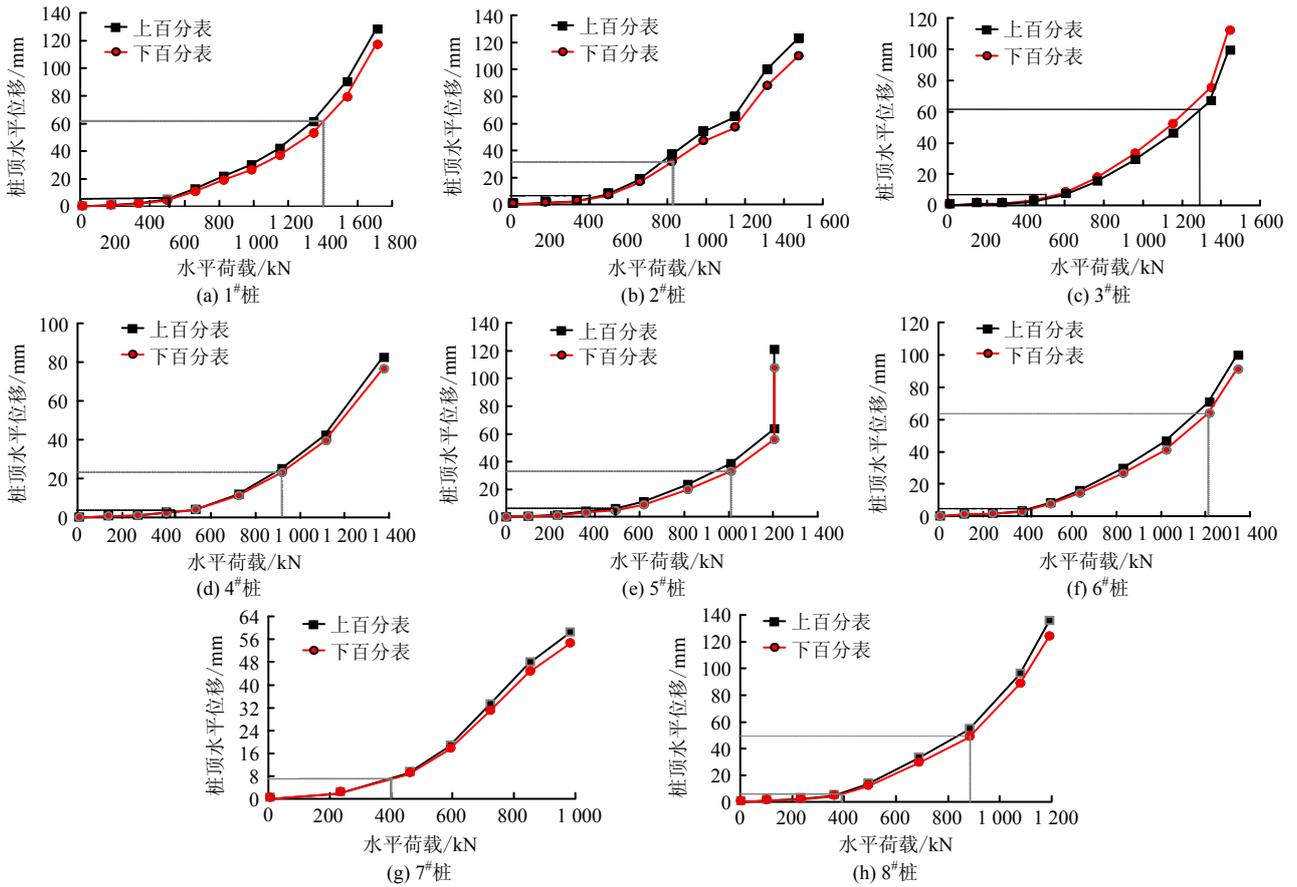


图 3 1#~8#桩桩顶位移随荷载的变化曲线

Fig.3 Displacement-load curves for top of piles #1-#8

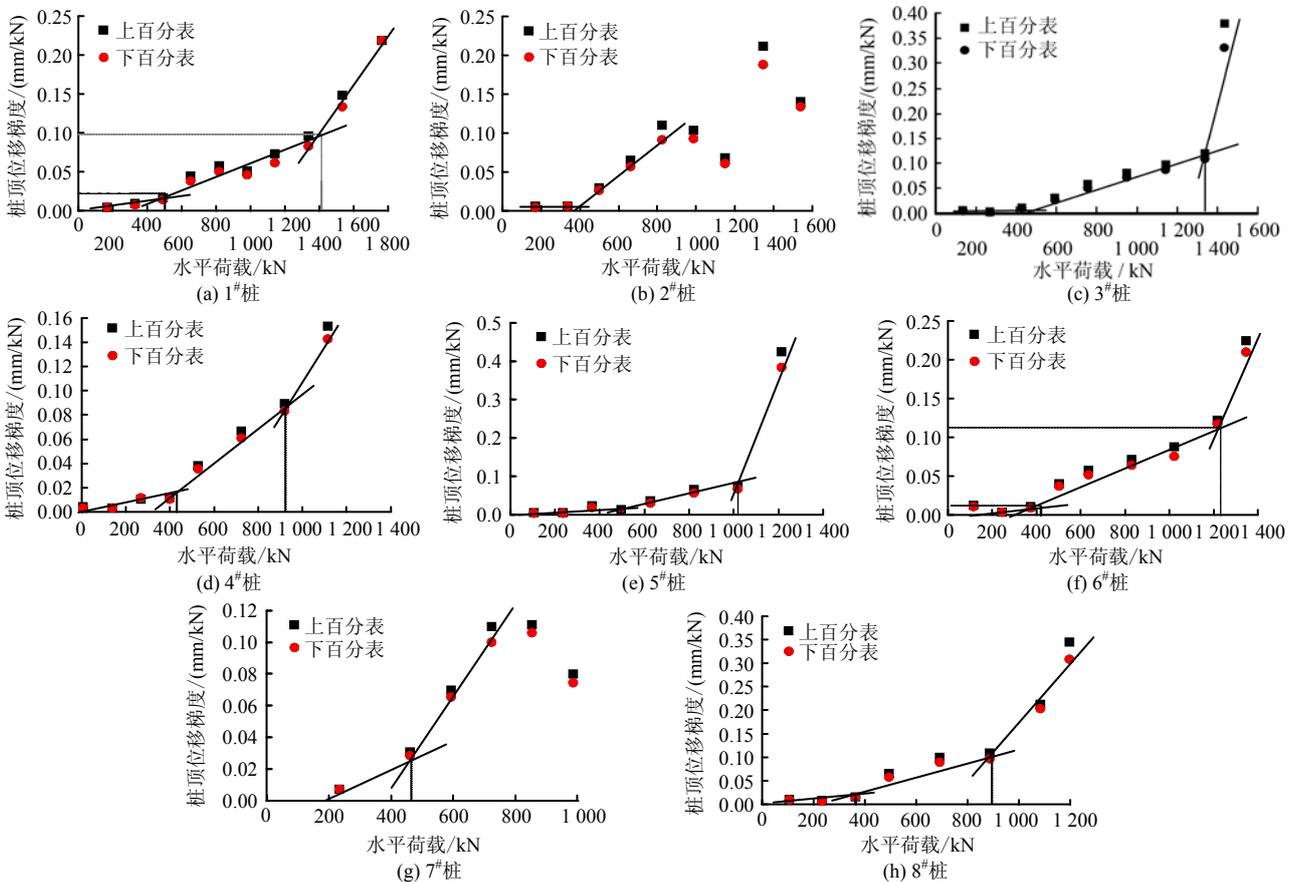


图 4 1#~8#桩桩顶水平位移梯度曲线

Fig.4 Displacement-gradient curves for top of piles #1-#8

表2 单桩水平荷载试验结果统计
Table 2 Results of horizontal load tests on a single pile

桩号	坡度 / (°)	水平承载力/kN		水平位移/mm		m 值 / (MN/m ⁴)
		H _{cr}	H _u	x _{cr}	x _u	
1	33	510	1 400	5.10	60.00	51.10
2	33	400	1 140	4.10	56.23	49.16
3	15	476	1 300	3.63	62.52	80.45
4	15	420	920	3.00	23.00	89.76
5	30	490	1 010	4.70	32.80	55.90
6	30	406	1 200	4.01	63.50	52.28
7	45	400	717	7.00	30.00	20.16
8	45	370	880	5.50	48.00	26.46

将1#~8#不同坡度间的2根桩基础的m值求平均值,得出碎石土地m值与场地坡度的关系曲线,如图5所示。

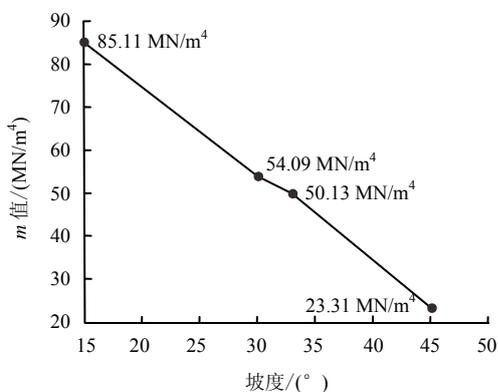


图5 碎石土地m值-坡度变化曲线
Fig.5 Curve of the m-slope gradient for a gravel soil site

从图中可看出, m值随着坡度的增大近似线性减小, 坡度每增大15°, m值减小约55%。

为了更清晰地研究坡度对桩-土相互作用的影响, 以相同荷载(977 kN)为基准, 得到桩顶位移、桩前土压力、桩身弯矩随坡度变化关系曲线如图6~8所示。

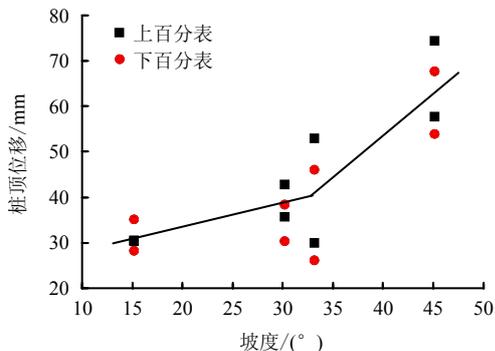


图6 桩顶位移-坡度关系曲线
Fig.6 Curves of the displacement of pile top vs. slope gradient

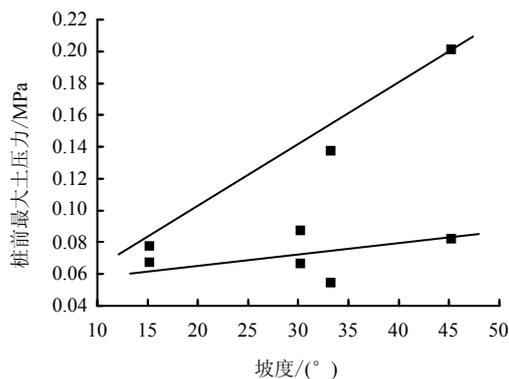


图7 桩前最大土压力变化值-坡度关系曲线
Fig.7 Curve of maximum soil pressure-slope gradient before pile

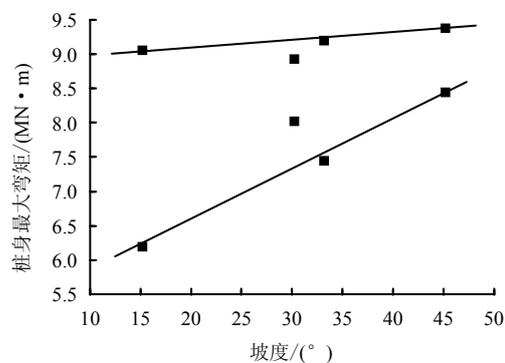


图8 桩身最大弯矩-坡度关系曲线
Fig.8 Curves of the maximum bending moment of pile-slope gradient

由图6~8可知, 相同外荷载作用下, 桩顶位移、桩前最大土压力变化值及桩身最大弯矩均随坡度的增大明显增大。

通过9#~14#桩碎石土-基岩边坡单桩水平静载试验, 将不同坡度间的2根桩基础的承载力、m值求得平均值后进行对比分析, 结果见图9。

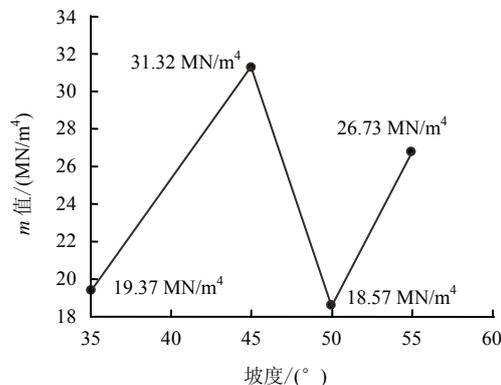


图9 碎石土-基岩地基m值-坡度变化曲线
Fig.9 Curve of the m-slope gradient for a gravel soil-rock sites

由于斜坡场地碎石土-基岩地基桩基础施工难度,使得不同坡度的桩长以及嵌岩比不同,从而影响了 m 值与坡度的关系并不明显。

为了探讨桩底自由或嵌固对桩身水平承载力和 m 值的影响,选取坡度一致、桩长相近的碎石土地和碎石土-基岩场地的桩基础进行对比,见表 3。结果表明,坡度一致、桩长相近的桩基础,碎石土-基岩场地临界荷载、极限荷载略小,而 m 值相对较大。

表 3 不同场地桩基础承载特性对比
Table 3 Load-bearing characteristics of pile foundation at different sites

地基类型	桩号	桩长 /m	桩径 /m	临界荷载均值 /kN	极限荷载均值 /kN	m 值 /(MN/m^4)
碎石土	7/8	10.5	1	385	798.5	23.31
碎石土-基岩	11/12	9.0/10.0	1	324	714.0	31.32

3 室内模型试验

室内模型试验由于具有与实际工况相近、边界条件可控、土体性质可控、加载及测量较简便等优点,广泛应用于与现场试验协同分析。

3.1 试验方案

室内模型试验分别改变碎石土、碎石土-基岩两种场地模型的坡度 (15° 、 30° 、 45°),进行单桩水平静载荷试验,研究桩-土水平作用参数 m 值。

监测方案为桩顶布设百分表、桩身粘贴电阻应变片、桩前后岩土体中埋设土压力盒。试验模型如图 10 所示。



图 10 室内试验模型
Fig.10 Model test in laboratory

3.2 模型材料

地基模型尺寸为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.3\text{ m}$ (长 \times 宽 \times

高),土体采用碎石土和细粒黏性土配合土样,采用分层填筑,填筑到设计标高后刷坡到预定坡度。下部基岩采用砌砖进行模拟,高度为 0.4 m 。基岩中部预留孔洞,将预制桩插入孔洞内,并在周围浇筑混凝土来模拟嵌岩桩。

桩体模型由高强度水泥砂浆和钢筋制成。碎石土地模型桩桩径为 0.1 m 、桩长为 1 m 、外露 0.1 m 。采用 4 根直径 6 mm 的钢筋作为主筋布设和直径 2 mm 钢丝作为箍筋间距 10 cm 布置,配筋率 0.67% 。碎石土-基岩场地模型桩桩径为 0.14 m 、桩长为 1.4 m 、外露 0.1 m 、嵌岩 0.4 m 。采用 4 根直径 8 mm 的钢筋作为主筋布设和直径 6 mm 钢筋作为箍筋间距 10 cm 布置,配筋率 0.79% 。

3.3 成果分析

作出碎石土、碎石土-基岩场地桩前土体坡度分别为 15° 、 30° 、 45° 时的 m 值随坡度的变化曲线,如图 11 所示。

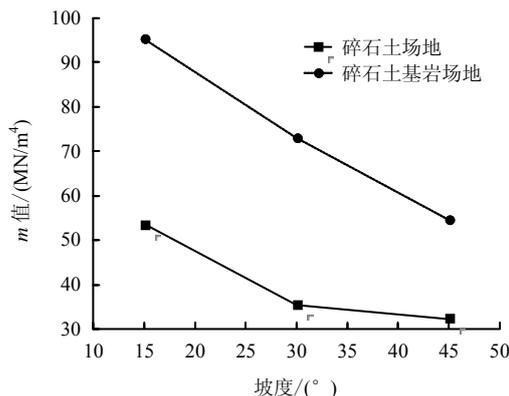


图 11 不同场地 m 值-坡度曲线
Fig.11 Curves of the m -slope gradient for different sites

由图可得, m 值随斜坡坡度的增大而减小。碎石土地坡度每增大 15° , m 值平均减小约为 20% ,碎石土-基岩场地坡度每增加 15° , m 值平均减小约 22% 。同时得出,不同坡度碎石土-基岩场地的 m 值均大于碎石土地,说明桩基础嵌固作用对 m 值具有积极的影响。

4 数值模拟

由于试验施工难度大、操作耗时费力,数值模拟成为常用的研究方法。本次研究通过建立桩-土概化模型,进行多因素单一控制变量的 m 值影响因素研究。

数值模拟方案设计地基类型为碎石土、碎石土-基岩两种,坡度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 4 种。碎石土

斜坡场地分别改变场地坡度、桩长、桩径、荷载加载点位置、碎石土密实度及桩身强度 6 个因素，共建立模型 44 个。碎石土-基岩斜坡场地分别改变场地坡度、桩径、桩长及桩身嵌岩比 4 个因素，共建立模型 32 个。

4.1 模型建立及参数取值

计算程序采用 Flac^{3D} 数值模拟软件，选用摩尔-库仑弹塑性模型。为了满足桩-土水平作用的半无限空间体假设^[8]，本次数值模拟设计模型长 100 m，宽 40 m，桩底距模型底面高度为 30 m。基准模型桩身尺寸与现场试验一致，桩长为 10.5 m，出露 0.5 m，桩径为 1 m，数值模型见图 12。

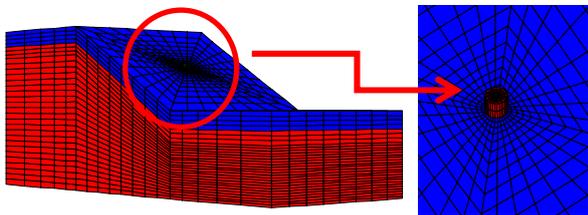


图 12 基准模型图

Fig.12 Benchmark model

根据四川地区崩坡积碎石土和基岩物理力学特征，采用计算参数见表 4，其中当改变碎石土密实度时，增加稍密、密实两种方案，改变桩身刚度时，按混凝土强度等级增加 C30、C35 两种方案。

表 4 模型材料计算参数

Table 4 Model material parameters for calculation

材料	ρ /(g/cm ³)	c /kPa	ϕ /(°)	K /MPa	G /MPa	
桩	C25	2.40	1 000	50	4 878	5 084
	C30	2.42	1 200	52	9 342	11 661
	C35	2.46	1 300	54	16 738	21 403
碎石土	稍密	1.80	5	25	6	3
	中密	2.20	7	40	25	25
	密实	2.50	9	45	71	36
砂岩	2.65	20 000	42	46 296	56 818	

注：K 为体积模量；G 为剪切模量。

4.2 成果分析

根据规范推荐公式计算得到 76 个概化数值模型的地基水平抗力系数的比例系数 m 值，由此得到场地坡度、地基类型、桩长、桩径、桩顶加荷位置、土体密实度、桩身强度、桩身嵌岩比对 m 值的影响规律如图 13 所示。其中，碎石土密实度是综合密度、内摩擦角、黏聚力等多因素的土体参数表现，为了便于分析，此处以碎石土密度为定量代表值。

由图 13 可知，相同荷载作用下，坡度越平缓、桩长越长、桩径越大、土体越密实、桩身强度越弱、

加载位置距桩顶距离越远、嵌岩比越大，会导致桩-土水平作用参数 m 值越大。由图 13(a)、13(g)可得，相同条件下桩底嵌固时 m 值大于桩底自由的情况，且随着坡度的增大，桩底嵌固时 m 值减小幅度小于桩底自由的情况。

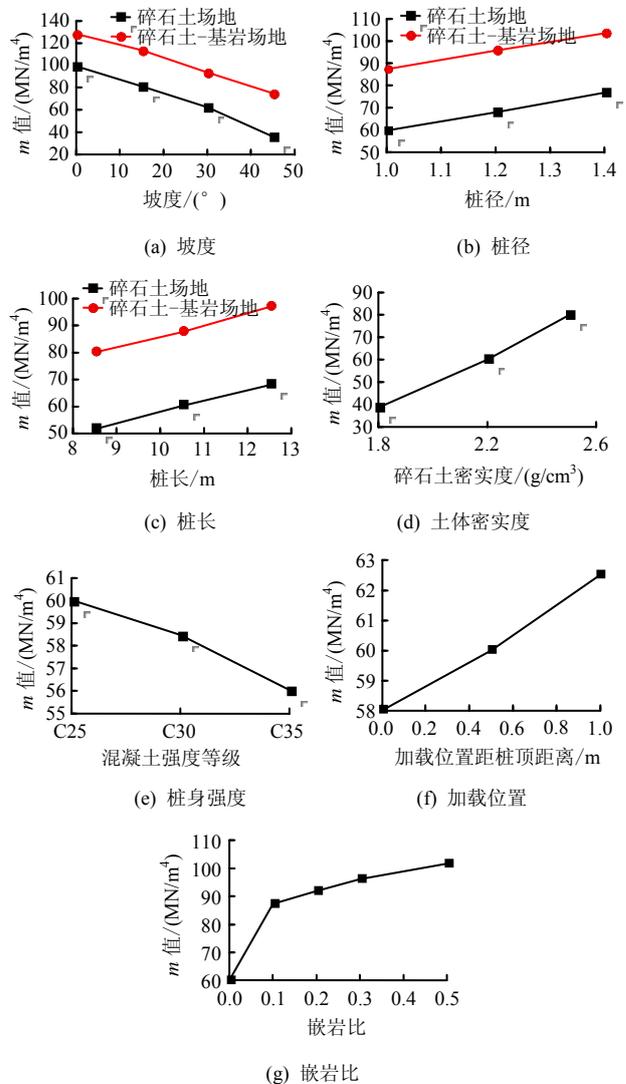


图 13 各因素对 m 值影响

Fig.13 The influence of various factors on the m value

坡度每增加 15°，碎石土场地 m 值减小 31%，基岩场地 m 值减小 17%；桩径每增大 0.2 m，碎石土场地 m 值增大 13%，基岩场地 m 值增大 9%；桩长每增大 2 m，碎石土场地 m 值增大 15.5%，基岩场地 m 值增大 10%；土体密实度每由稍密增加到中密再到密实，碎石土场地 m 值增大 43%；桩身混凝土强度每增大一个等级，碎石土场地 m 值减小 3.3%；桩顶加载位置从桩顶每向下移动 0.5 m，碎石土场地 m 值增大 3.8%；桩身嵌岩比例每增加 10%，基岩场地 m 值平均增大 13%，初始嵌岩时 m

值增大幅度较大。

4.3 灰色关联度分析

m 值的影响因子很多，主要分为两个方面，一是外力作用效果，体现在水平荷载的施加方式、水平位移的变化情况；二是桩体和土体的性质，且二者形成一个十分复杂的桩-土水平作用体系，难以具体量化分析。因此，采用灰色关联度分析上述因子对 m 值取值的影响程度。

选择上述 7 个影响因子组成比较序列 y_i ，将数值模拟中根据规范得出的 m 值作为参考序列构成 y_0 。令 m 值为参考序列，影响因子作为比较序列，可以求得各因子与 m 值的灰色关联度，见表 5。

由表 4 可得，对 m 值影响程度由大到小排序依次为：坡度>密实度>桩长>桩径>嵌岩比>加载位置>桩身强度。其中前 4 个因子是地形条件、土体密实度和桩身尺寸 3 个方面最具代表性的性质。

表 5 各因子与 m 值的灰色关联度

Table 5 The grey correlation degree between each factor and the m value

影响因子	坡度	桩长	桩径	加载位置	嵌岩比	土体密实度	桩身强度
关联度	0.747	0.691	0.688	0.604	0.633	0.711	0.578

5 斜坡场地 m 值的取值研究

本次研究所采用的现场试验、室内模型试验、数值模拟 3 种方法均是基于单桩水平静载试验，因此，按照规范^[1-2]中单桩水平静载试验确定 m 值的方法，求取地面以下主要影响深度即 $2(d+1)m$ 范围内的综合 m 值 (d 为桩径)，进行对比分析见图 14。

碎石土-基岩场地现场试验由于桩长以及嵌岩比不同导致 m 值随坡度的变化关系不明显，因此不纳入量化分析，数值模拟与室内模型试验成果如图 15 所示。

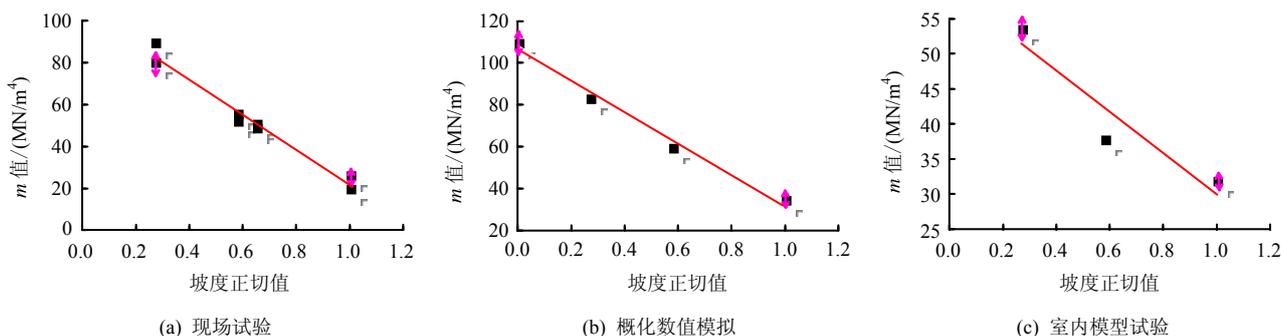


图 14 碎石土斜坡场地 m 值线性拟合
Fig.14 Linear fitting of m value at gravel soil site

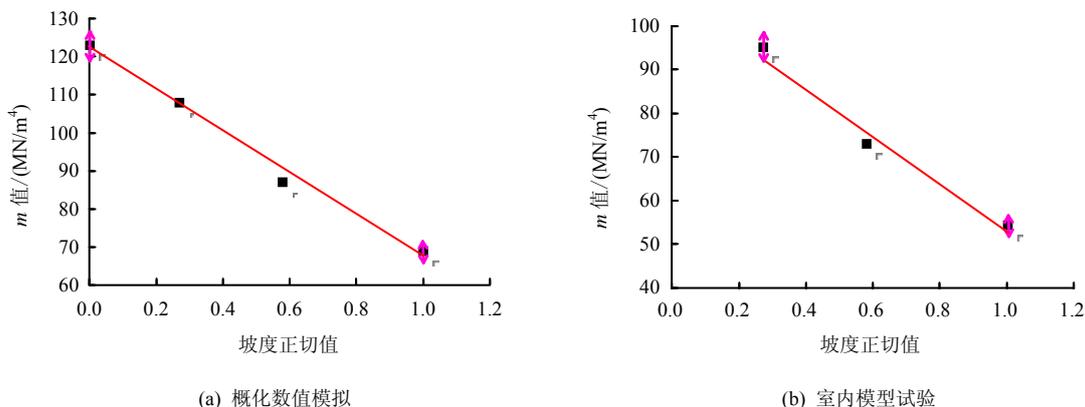


图 15 碎石土-基岩斜坡场地 m 值线性拟合
Fig.15 Linear fitting of m value at gravel soil-rock sites

综合以上成果表明，斜坡场地 m 值随坡度 θ 的增大呈线性减小，综合现场试验和数值模拟成果，对线性拟合公式进行平均取值，得出碎石土地场 m

值按照 $m = 106 - 79 \tan \theta$ 进行取值；碎石土-基岩场地 m 值按照 $m = 122 - 54 \tan \theta$ 进行取值。本式为根据斜坡场地坡度 θ 估算 m 值的简易一元一次方程，

θ 为现场水平静载试验桩前 5 倍桩径宽度范围内的平均坡度 ($^{\circ}$), 适用范围为 $0^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。

前述灰色关联度研究得出, 在诸多 m 值影响因素中, 除了坡度, 土性参数、桩长、桩径对 m 值的影响程度也较大。因此, 针对以上公式。提出考虑重要影响因素在内的修正系数, 分析如下:

5.1 土性参数调整系数 n_1

选取数值模拟中不同场地坡度情况下改变土性参数 (密度、内摩擦角、黏聚力) 的计算成果, 得出 m 值随土性参数变化曲线如图 16 所示。

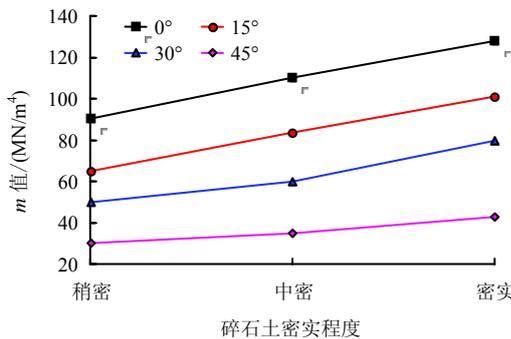


图 16 m 值-碎石土密实程度变化曲线

Fig.16 Curves of m value-gravel soil compaction degree

根据《建筑桩基技术规范》^[2]说明, 碎石土密实程度一般为中密或密实, 因此, 给出了土体密实度的调整系数: 以中密碎石土为基准, 碎石土呈密实状态时, m 值估算公式需乘 1.116 的调整系数; 若遇到碎石土呈稍密状态的特殊情况时, m 值估算公式需乘 0.91 的调整系数。

5.2 桩长调整系数 n_2

选取数值模拟中不同场地坡度情况下改变桩长 (8、10、12 m) 的计算成果, 得出 m 值随桩长变化曲线如图 17 所示。

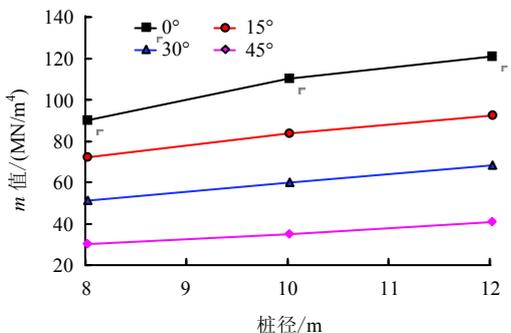


图 17 m 值-桩长变化曲线

Fig.17 Curves of m value-pile length

根据《架空送电线路基础设计技术规定》^[9],

灌注桩桩长不小于 5 m, 基于此给出了桩长的调整系数: 基于本次研究, 以桩长 10.5 m 出露 0.5 m 为基准, 在 8.5~12.5 m 桩长范围内, 桩长每增加 1 m, m 值估算公式需乘 1.064 的调整系数; 桩长每减小 1 m, m 值估算公式需乘 0.923 的调整系数。

5.3 桩径调整系数 n_3

选取数值模拟中不同场地坡度情况下改变桩径 (1.0、1.2、1.4 m) 的计算成果, 得出 m 值随桩径变化曲线如图 18 所示。

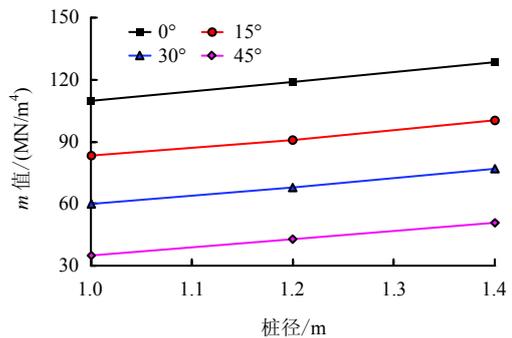


图 18 m 值-桩径变化曲线

Fig.18 Curves of m value-pile diameter

根据《架空送电线路基础设计技术规定》^[9], 灌注桩桩径一般为 0.6~1.8 m, 基于此给出了桩径的调整系数: 基于本次研究, 以桩径 1 m 为基准, 在 1.0~1.4 m 桩径范围内, 桩径每增加 0.1 m, m 值估算公式需乘 1.065 的调整系数。

5.4 嵌岩比调整系数 n_4

选取数值模拟中不同场地坡度情况下, 桩长为 10.5 m, 桩径为 1 m 时, 分别改变桩身嵌岩比 (0.1、0.2、0.3、0.5) 的计算成果, 得出不同嵌岩比的情况下 m 值的变化值, 如图 19 所示。

根据《建筑桩基技术规范》^[2]规定, 嵌岩桩的嵌岩深度应综合荷载、上覆土层、基岩、桩径、桩长诸因素确定; 对于嵌入倾斜的完整和较完整基岩的全断面深度不宜小于 0.4 d 且不小于 0.5 m, 倾斜度大于 30% 的中风化基岩, 宜根据倾斜度及岩石完整性适当加大嵌岩深度。因此, 本次研究的桩身最小嵌岩深度定为 1 m。基于此给出了嵌岩比的调整系数: 以嵌岩比 0.1 为基准, 在嵌岩比 0.1~0.5 的范围内, 嵌岩比值每增大 10%, m 值估算公式需乘 1.03~1.06 的调整系数, 坡度小时, 调整系数取小值, 坡度大时取大值。

5.5 估算公式及调整系数验证

通过现场试验、室内模型试验、实体数值模拟、

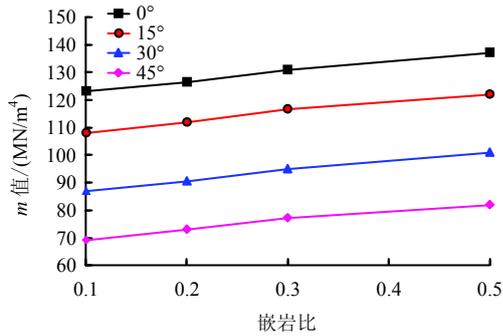


图 19 m 值-嵌岩比变化曲线
Fig.19 Curves of m value-rock socketed proportion

概化数值模拟 4 种方法，提出以桩长 10.5 m、桩径 1 m 为参考基准改变坡度的 m 值简化估算公式，考虑土性参数、桩长、桩径、嵌岩比等影响因素的修正系数：

$$m_1 = n_1 n_2 n_3 (106 - 79 \tan \theta) \quad (2)$$

$$m_2 = n_1 n_3 n_4 (122 - 54 \tan \theta) \quad (3)$$

式中： m_1 适用于碎石土地地； m_2 适用于碎石土-基岩场地 (MN/m^4)； θ 为场地坡度； n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别为土性参数、桩长、桩径、嵌岩比的修正系数，修正系数取值见表 6。

表 6 m 值简化估算公式修正系数

Table 6 Correction coefficient of m value for the simplified estimation formula

调整系数	基准条件	基准值	调整条件及调整值			
			碎石土 密实度 (稍密/密实)	桩长 每减小/ 增加 1 m	桩径 每增加 0.1 m	嵌岩比 每增加 10%
n_1	碎石土 密实度 (中密)	1	0.911/1.116			
n_2	桩长 10.5 m	1		0.923/1.064		
n_3	桩径 1 m	1			1.065	
n_4	嵌岩比 0.1	1				1.03~1.06

利用式 (2)、(3) 进行 m 值估算，其结果与现场实测值、概化数值模拟结果相比较，平均误差为 2.75%，认为考虑修正系数后的 m 值估算公式较为合理，可为此类场地地基及桩基设计提供参考。

6 结论及建议

(1) 此次研究采用单桩水平静载试验，采用桩基现场试验、室内模型试验、数值模拟等多种手段方法进行综合分析，相互印证补充，研究了斜坡场

地碎石土、碎石土-基岩地基桩水平作用力参数 m 值的变化规律和影响因素。

(2) 提出了斜坡场地碎石土、碎石土-基岩地基 m 值考虑修正系数的估算公式，并给出了相应的修正系数。

(3) 估算公式及修正系数建立在水平场地基础上，而水平场地计算得到的 m 值基本符合《建筑桩基技术规范》经验值，因此，坡度及其他重要因素对 m 值的影响可为后续研究提供依据，斜坡场地 m 值的取值可作为规范的补充和细化。

(4) 由于斜坡场地碎石土的差异性和复杂性，以上估算公式及修正系数仅适用于本次试验场地及类似场地，对于其他区域的碎石土地基或其他类土，还需进一步推广验证。

参考文献

[1] 中华人民共和国建设部. 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.
The Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTC D63-2007 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[2] 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.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ94-2008 Building pile foundation technical specification[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[3] 马志涛. 水平荷载下桩基受力特性研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 546-551.
MA Zhi-tao. Study on behavior of pile foundation under lateral loading[J]. **Journal of Hohai University (Natural Science Edition)**, 2006, 34(5): 546-551.

[4] 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, 29(1): 192-196.
LAO Wei-kang, ZHOU Zhi-guo, ZHOU Li-yun. Analysis of m value for lateral loaded pile under large deflection[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 192-196.

[5] 王钰, 林军, 陈锦剑, 等. 软土地基中 PHC 管桩水平受荷性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1): 39-42.
WANG Yu, LIN Jun, CHEN Jin-jian, et al. Field test for

- the behavior of pre-stressed pipe piles in soft subsoil under lateral load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp. 1): 39–42.
- [6] 刘腊腊, 胡建平. 单桩水平静载试验及成果参数取值探讨[J]. 天津城市建设学院学报, 2009, 15(4): 268–270. LIU La-la, HU Jian-ping. Level of single pile static load test and the results of parameter selection[J]. **Journal of Tianjin Institute of Urban Construction**, 2009, 15(4): 268–270.
- [7] 李俊, 强士中, 李小珍. 地基系数的比例系数 m 的确定[J]. 铁道标准设计, 2004, (11): 83–85. LI Jun, QIANG Shi-zhong, LI Xiao-zhen. The determination of foundation coefficient of the proportional coefficient m [J]. **Railway Standard Design**, 2004, (11): 83–85.
- [8] 陈育民, 徐鼎平. FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. CHEN Yu-min, XU Ding-ping. The foundation and engineering example of FLAC^{3D}[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [9] 东北电力设计院. DL/T5219–2005 架空送电线路基础设计技术规定[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. Northeast Electric Power Design Institute. DL/T5219–2005 Technical regulation for designing foundation of overhead transmission line[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
-
- 上接第 1316 页
- [8] 周健, 姚志雄, 张刚. 管涌发生发展过程的细观试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 842–848. ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Meso-laboratory study on initiation and evolution of piping[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering** 2007, 3(5): 842–848.
- [9] 倪小东, 王媛, 王飞. 管涌的砂槽试验研究及颗粒流模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(6): 51–58. NI Xiao-dong, WANG Yuan, WANG Fei. Study on piping by sand-bank model and simulation by PFC^{3D}[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2009, 41(6): 51–58.
- [10] 周健, 姚志雄, 张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977–981. ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 977–981.
- [11] 周健, 姚志雄, 白彦峰, 等. 砂土管涌的细观机理研究[J]. 同济大学学报, 2008, 36(6): 733–737. ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, BAI Yan-feng, et al. Meso-mechanical study on piping in sandy soils[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2008, 36(6): 733–737.
- [12] HAGERTY D J, ANDREA CURINI. Impoundment failure seepage analyses[J]. **Environmental and Engineering Geoscience**, 2004, 10(1): 57–68.
- [13] 付宏渊, 吴胜军, 王桂尧. 荷载作用引起砂土渗透性变化的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3677–3681. FU Hong-yuan, WU Sheng-jun, WANG Gui-yao. Experimental study of influence of compressive stress on water permeability of sands soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3677–3681.
- [14] 孔令伟, 李新明, 田湖南. 砂土渗透系数的细粒效应与其状态参数关联性[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 21–26. KONG Ling-wei, LI Xin-ming, TIAN Hu-nan. Effect of fines content on permeability coefficient of sand and its correlation with state parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 21–26.
- [15] 国家技术监督局. GB/T15406–94 土工仪器的基本参数及通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994. The State Bureau of Technology Supervision. GB/T15406–94 Primary paramteres and general technical specification for geotechnical apparatus[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [16] 南京水利科学研究所. SL237–014–1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237–014–1999. Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.