

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220516004

基于相似理论的岩石地基材料制作及模型基础 抗拔试验*

邱昊茨¹, 张文翔², 奚邦禄³, 陆洲², 崔强⁴, 张振华³, 汪俊杰³

(1. 国网泉州供电公司, 福建泉州 362000; 2. 中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建福州 350003;
3. 合肥工业大学土木与水利工程学院土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009;
4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100000)

摘要: 为探究岩石地基中挖孔基础的承载力特征和地基破坏模式, 以重晶石粉、铁粉和石英砂为骨料, 水和石膏为胶结剂, 黏土为增塑剂配置岩石相似材料, 应用正交设计方法, 以胶结物/骨料质量比(因素A)、胶结物含水率(因素B)、骨料细颗粒(铁粉+重晶石粉)占比(因素C)、细颗粒骨料铁粉占比(因素D)为4个因素, 共16组材料配比方案, 开展相关试验测定了各组材料的密度、黏聚力、内摩擦角、抗压强度、弹性模量等参数指标, 并研究了相似材料物理力学参数与影响因素之间的变化规律; 而后选取3种代表性相似材料开展了岩石挖孔基础抗拔承载特性的室内模型试验。结果表明:(1)对于相似材料密度, 因素C影响最大; 对于试样黏聚力和抗压强度, 因素B影响最大; 对于内摩擦角, 因素C影响最大; 对于弹性模量, 因素A和因素B影响最大;(2)地基岩体破坏面呈现为沿着一定角度的开口向地面延伸的线性破坏面, 且该破坏角随材料内摩擦角增大而减小, 在规范中假定的45°附近变化;(3)依据抗拔承载力计算得到的相似材料等代极限剪切强度随单轴抗压强度增大而增大, 约为单轴抗压强的0.027。

关键词: 正交设计; 相似材料; 挖孔基础; 抗拔试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-1160-09

Fabrication of Rock Foundation Materials and Uplift Test of Model Foundation Based on Similarity Theory

QIU Haoci¹, ZHANG Wenxiang², XI Banglu³, LU Zhou², CUI Qiang⁴,
ZHANG Zhenhua³, WANG Junjie³

(1. State Grid Fujian Quanzhou Electric Power Supply Company, Quanzhou 362000, China; 2. Power China Fujian Electric Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. Anhui Engineering Technology Research Center for Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China)

Abstract: In this paper the rock similar materials were configured in which barite powder, iron powder and quartz sand were used as aggregates, while the water and gypsum were used as cementing

* 收稿日期:2022-05-16;修回日期:2022-07-19

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目(521330210078)、国家自然科学基金(51979068)、中央高校基本科研业务费专项资金(JZ2021HGTA0154, PA2021GDSK0079)、中国电建集团横向课题(W2021JSFW1106)资助

作者简介: 邱昊茨(1990—),男,工程师,硕士研究生。主要从事输变电工程项目与技术管理。E-mail:402619692@qq.com

通讯作者: 张文翔(1988—),男,高级工程师,硕士。主要从事输变电工程设计。E-mail:495529242@qq.com

agents, and red clay was used as a plasticizer. Using the orthogonal design method, the proportion of cement / aggregate mass ratio (factor A), cement moisture content (factor B), aggregate fine particle (iron powder + barite powder) (factor C) and fine particle aggregate iron powder (factor D) were selected as the four factors. A total of 16 groups of material proportion schemes were employed to make the similar materials, whose density, cohesion, internal friction angle, compressive strength, elastic modulus were tested and the effects of the four factors on the physical and mechanical behavior were analyzed; Then, three representative similar materials were selected to make the rock ground, on which the indoor model pull-out test of digging hold foundation was carried out, aiming to study the bearing capacity characteristics and foundation failure mode of digging hold foundation in rock ground. The results show that: (1) Factor C has the greatest influence on the density of similar materials. Factor B has the greatest influence on the cohesion and compressive strength of the sample. Factor C has the greatest influence on the internal friction angle. For elastic modulus, Factor A and Factor B have the greatest influence; (2) The failure surface is a linear failure surface extending to the ground at a certain angle, and the failure angle decreases with an increasing internal friction angle, which changes near 45° assumed in the code; (3) The equivalent ultimate shear strength of similar materials, calculated according to the pull-out capacity, increases with the increase in uniaxial compressive strength, which is about 0.027 of the uniaxial compressive strength.

Keywords: orthogonal design; similar materials; digging hole foundation; pull-out test

0 引言

随着我国经济的发展,输电线路建设规模不断加大,越来越多的输电线路建设在山地或者高大山岭中。我国山区架空输电线路普遍以岩石地基为主,当遇到全或强风化类岩基时,工程中常采用挖孔基础^[1]。与其他行业基础不同的是,架空输电线路基础的设计主要受上拔稳定性控制,工程中常用上拔荷载-位移曲线获取基础抗拔承载力,如 F. K Chin 等^[2-12]、崔强等^[1,13]基于大量的现场试验数据,分析了基础荷载一位移曲线变化特征,分别建立了无黏性土、黏性土、黄土、碎石土和强风化岩石地基中基础的上拔荷载-位移曲线模型,其研究成果已应用于工程实际,并取得了良好的实践效果。然而现场试验一则成本昂贵,二则测试控制难度大,无法更好地探测到埋入基础内土体破坏模式的演变过程,尤其针对岩石地基更是难上加难。现有规范中假设破坏模式为从基础底部 45° 角直线延伸到地基表面的破坏面(图 1)^[14]。而相关文献证明^[1,15]实际的破坏面与垂直方向的夹角并非定值,而是与基础的深宽比有关。现场试验中测试分析难度大,实际上拔破坏面的形态及趋势走向一直是工程中亟待解决的技术难题之一。

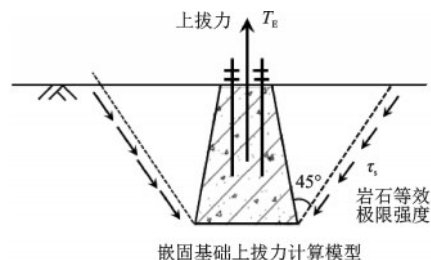


图 1 规范中基础破坏模式^[14]

Fig.1 Foundation failure model in the standard^[14]

针对上述问题,一种可行的方法是采用岩石相似材料开展室内挖孔基础上拔承载试验。室内模型试验具有性价比高,重复性好,可分析破坏模式等优点,其中岩石相似材料的配制与选取是开展岩石地基中挖孔基础上拔试验的基础。关于岩石相似材料的研制,学者们已进行了大量相关研究^[16-22]。韩伯鲤等^[16]研制的 MIB 性新型地质模型材料具有高容重、低弹模、低强度特性,王汉鹏等^[18]配制的 IBSCM 相似材料可模拟大部分的岩体材料,具有性价比高、性能稳定等优点,宁奕冰等^[19]通过添加红黏土可配制不同岩性的相似材料。此外,岩石相似材料已广泛应用于我国岩体工程模型试验研究中,如地下洞室群三维地质力学模型试验^[17]、底摩擦物理模型试验^[19]等。然而少有学者采用岩石相似材料开展挖孔基础承载试验,探究岩石地基中

挖孔基础的上拔承载特性及其破坏模式,为工程设计施工提供参考。

为此本文以重晶石粉、铁粉和石英砂为骨料,水和石膏为胶结剂,黏土为增塑剂,应用正交试验方法设计了一组岩石相似材料的配比试验,依据试验结果分析配比参数对相似材料物理力学指标的影响规律;而后选取3种代表性相似材料开展岩石挖孔基础抗拔承载试验,分析挖孔基础的承载力特征及地基破坏模式。研究成果丰富了岩石相似材料配比理论,同时也为岩石地基中挖孔基础抗拔承载力的设计提供参考。

1 试验材料

1.1 正交试验设计方法

参照宁奕冰等^[19]研究成果,以重晶石粉、铁粉、石英砂为骨料,水和石膏为胶结剂,黏土为增塑剂,同时为防止在混合料搅拌及制样过程中材料凝固过快,添加石膏质量3‰的石膏缓凝剂为添加剂^[14]。其中重晶石粉粒径12 μm,铁粉粒径为150 μm,石英砂粒径为200~420 μm,红黏土粒径为420 μm。

试验选用正交试验设计方法,在设计中选取胶结物/骨料质量比(因素A)、胶结物含水率(因素B)、骨料细颗粒(铁粉+重晶石粉)质量比(因素C)、细颗粒骨料铁粉质量比(因素D)作为主要影响因素。研究表明^[19]红黏土对试样力学指标影响较小,因此试验中取黏土在骨料中占比为10%,其余配比参考文献^[19]扩充选取,见表1。

1.2 试样制作

根据正交设计方案配制混合料,在搅拌机中搅拌均匀,而后加入纯水并继续搅拌;拌合完成后,将拌合料依次装入模具后人工充分振捣直至密实,拌合料装入量应稍多于试样体积;充分捣实完成后在模具顶部安装压盖并进行加压整平,使得试样达到预设尺寸;加压完成后在常温下静置1 h后即可拆模。模具在填入拌合料之前内壁涂有脱模剂,以方便养护结束后脱样。脱模后的试样在常温下养护7 d即可进行试验,共制作16组样,每组9个共计144个样,如图2所示。

表1 相似材料配比方案

Table 1 Test schemes of similar materials

| 组数 | 因素A | 因素B | 因素C | 因素D |
|----|------------|------------|------------------|------------------|
| | 胶结物/ 骨料 | 胶结物 含水率 | (铁粉+重晶 石粉)/骨料 | 铁粉/(铁粉+ 重晶石粉) |
| 1 | 0.24 | 0.41 | 0.60 | 0.40 |
| 2 | 0.24 | 0.44 | 0.70 | 0.10 |
| 3 | 0.24 | 0.47 | 0.80 | 0.20 |
| 4 | 0.24 | 0.50 | 0.90 | 0.30 |
| 5 | 0.28 | 0.41 | 0.70 | 0.40 |
| 6 | 0.28 | 0.44 | 0.80 | 0.30 |
| 7 | 0.28 | 0.47 | 0.90 | 0.20 |
| 8 | 0.28 | 0.50 | 0.60 | 0.10 |
| 9 | 0.32 | 0.41 | 0.80 | 0.10 |
| 10 | 0.32 | 0.44 | 0.90 | 0.40 |
| 11 | 0.32 | 0.47 | 0.60 | 0.30 |
| 12 | 0.32 | 0.50 | 0.70 | 0.20 |
| 13 | 0.36 | 0.41 | 0.90 | 0.10 |
| 14 | 0.36 | 0.44 | 0.60 | 0.20 |
| 15 | 0.36 | 0.47 | 0.70 | 0.30 |
| 16 | 0.36 | 0.50 | 0.80 | 0.40 |

注:制样时石膏粉中添加质量为石膏粉质量0.3%的石膏缓凝剂,红黏土占骨料质量为10%



图2 养护中的试样

Fig.2 Sample in curing

1.3 材料特性

对每组试样的密度、黏聚力、内摩擦角、抗压强度与弹性模量分别进行测试,结果见表2。相似材料的各个物理力学参数分布范围如下:密度为2 480~2 910 kg/m³,黏聚力为0.08~7.95 MPa,内摩擦角为38°~62°,抗压强度为2.1~11.6 MPa,弹性模量为139~2 548.5 MPa。相似材料的物理力学参数分布较广,可以满足不同类型岩石的物理模型试验对相似材料物理力学参数的要求。

1.4 材料配比影响分析

图3~图7所示为根据表2绘制的相似材料物理力学参数影响直观分析图,用以分析各影响因素

表2 相似材料配比正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results of similar material ratio

| 组数 | 密度/(g·cm ⁻³) | 黏聚力/MPa | 内摩擦角/(°) | 单轴抗压/MPa | 弹性模量/MPa |
|----|--------------------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 2.52 | 7.95 | 38 | 11.6 | 2 548.5 |
| 2 | 2.56 | 3.12 | 44 | 5.22 | 1 950.5 |
| 3 | 2.8 | 2.78 | 56 | 2.1 | 438 |
| 4 | 2.91 | 0.3 | 60 | 2.41 | 301 |
| 5 | 2.73 | 4.26 | 55 | 11.49 | 1 974 |
| 6 | 2.76 | 4.93 | 51 | 9.3 | 1 756 |
| 7 | 2.82 | 0.08 | 62 | 10.6 | 1 724 |
| 8 | 2.5 | 2.43 | 51 | 2.19 | 366 |
| 9 | 2.64 | 5.07 | 50 | 9.53 | 1 190 |
| 10 | 2.88 | 2.83 | 56 | 2.98 | 577.5 |
| 11 | 2.54 | 1.14 | 59 | 2.42 | 247 |
| 12 | 2.48 | 2.22 | 51 | 7.2 | 1 627 |
| 13 | 2.66 | 4.05 | 50 | 7.85 | 804 |
| 14 | 2.49 | 5.26 | 41 | 2.8 | 139 |
| 15 | 2.6 | 2.17 | 49 | 7.21 | 308 |
| 16 | 2.57 | 0.54 | 56 | 1.81 | 241.5 |

对相似材料物理力学参数的影响规律。

1.4.1 密度

每组多个试样经充分振捣密度较为接近,试样密度主要取决于配比方案,因此可取平均密度^[19]进行分析(图3)。可知试样密度与胶结物/骨料质量比呈负相关,与胶结物含水率、骨料细颗粒质量比和细颗粒铁粉质量比正相关。在充分振捣后,材料密度取决于原材料比重和试样密实度,如细颗粒中铁粉与重晶石粉粒径相近,但铁粉比重大于重晶石粉,因此试样密度随细颗粒中铁粉占比增加而增加;胶结物含水率和细骨料细颗粒含量会影响试样的密实度,细颗粒含量越多,试样密实度高,密度大,且可能存在与土类似的最佳含水率(47%),使得试样密度随胶结物含水率呈现先增加后下降趋势。

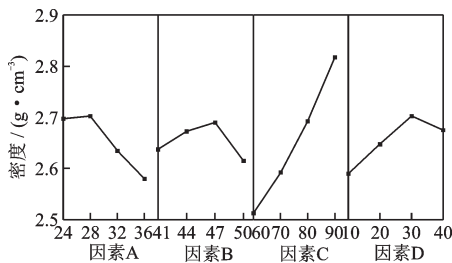


图3 各因素对材料密度影响规律

Fig.3 Influence of various factors on material density

1.4.2 黏聚力

由图4可知,试样黏聚力主要取决于胶结物含水率,随着胶结物含水率、骨料中细颗粒质量比和细颗粒骨料铁粉质量比增加而下降。这是因为试样中胶结物将试样中骨料胶结在一起,试样剪切破坏时胶结强度对黏聚力影响显著。胶结物含水率越高,胶结物强度越低,从而显著影响试样黏聚力。其次试样黏聚力随着骨料细颗粒占比增大而呈现下降趋势,这可能是因为细颗粒粒径与石膏粉类似,细颗粒与石膏粉混合后会降低石膏胶结物强度。

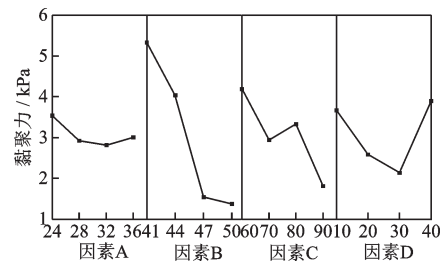


图4 各因素对材料黏聚力的影响规律

Fig.4 Influence of various factors on cohesion

1.4.3 内摩擦角

由图5可知,试样内摩擦角随胶结物含水率(因素B)、骨料细颗粒质量比(因素C)增加而增加。试样内摩擦角应主要受试样密实度影响。随着胶结含水率增加以及细颗粒含量增大,试样密实度更高,内摩擦角更大,因此各因素对试样内摩擦角的影响规律与对材料密度(图3)的影响规律较为类似。

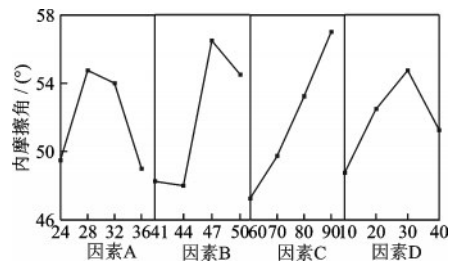


图5 各因素对材料内摩擦角的影响规律

Fig.5 Influence of various factors on internal friction angle

1.4.4 抗压强度

对比图3和图6可知,各因素对试样抗压强度的影响规律与对黏聚力的影响规律较为类似,即试

样抗压强度主要取决于胶结物强度,因此呈现随着胶结物含水率、骨料细颗粒质量比和细骨料铁粉质量比增加而下降的变化趋势。

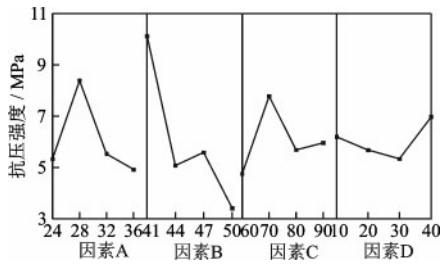


图6 各因素对材料抗压强度的影响规律

Fig.6 Influence of various factors on compressive strength

1.4.5 弹性模量

由图7可知,相似材料弹性模量主要取决于胶结/骨料质量比和胶结物含水率,且随着胶结/骨料质量比、胶结物含水率增大而减小。试样中石膏弹性模量低于石英砂等骨料,因此胶结/骨料占比越大,试样弹性模量越低;此外胶结物含水率越高,胶结强度低,加载前期试样中易出现少量胶结破坏引起位移,进而降低弹性模量。

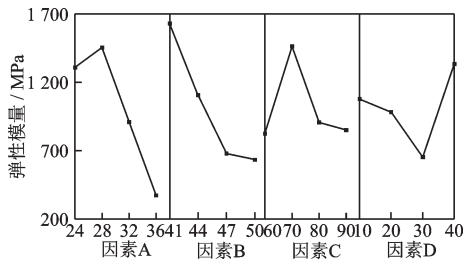


图7 各因素对材料弹性模量的影响规律

Fig.7 Influence of various factors on elastic modulus

1.4.6 极差分析

极差分析法被广泛应用于岩石相似材料正交配比的敏感性分析中,计算最大值与最小值之差即为该因素对应该物理学参数的极差^[19]。极差越大则该因素对该物理学参数的影响效果越显著。表3汇总了各因素下相似材料物理学参数的极差分析,为更好地表征各因素的影响大小,对极差值进行归一化处理(以最小极差值为基准),如图8所示。可以更加清晰地看出对于相似材料密度,因素C影响最大;对于试样黏聚力和抗压强度,因素B影响最大,对于内摩擦角,因素C影响最大,对于弹性模量,因素A和因素B影响最大。

表3 各因素极差分析

Table 3 Range analysis of each factor

| | 因素A | 因素B | 因素C | 因素D |
|------|-----------|--------|---------|---------|
| 密度 | 0.122 5 | 0.075 | 0.305 | 0.112 5 |
| 黏聚力 | 0.722 5 | 3.96 | 2.38 | 1.76 |
| 内摩擦角 | 5.75 | 8.5 | 9.75 | 6 |
| 抗压强度 | 3.477 5 | 6.715 | 3.027 5 | 1.635 |
| 弹性模量 | 1 081.875 | 995.25 | 639.75 | 682.375 |

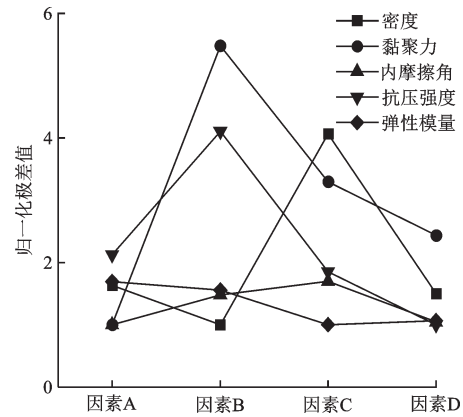


图8 各因素归一化极差值

Fig.8 Normalized range of each factor

2 模型试验

2.1 材料特性模型试验相似理论

物理模型试验以显示原理为基础,通过建立研究对象和模型之间的相似关系,以保证模型试验中所反映的物理现象与原型相似^[23]。在挖孔基础抗拔试验中,取几何相似比 C_L 为 n ,容重相似比为1,则可推导原型试验与模型试验中参数相似比见表4。

表4 相似比尺间关系

Table 4 Relationship between similarity scales

| 物理量 | 量纲 | 相似比尺 | 相似比 |
|-----------------|-----------|--------------|-------|
| 尺寸 L | L | C_L | n |
| 重度 γ | FL^{-3} | C_γ | 1 |
| 黏聚力 c | FL^{-2} | C_c | n |
| 内摩擦角 φ | 1 | C_φ | 1 |
| 弹性模量 E | FL^{-2} | C_E | n |
| 抗压强度 σ_c | FL^{-2} | C_σ | n |
| 应变 ϵ | 1 | C_ϵ | 1 |
| 位移 d | L | C_d | n |
| 力 F | F | C_F | n^3 |

2.2 材料特性模型试验相似理论

图9所示为本文模型试验设备。首先采用图9(a)中基础模具,浇筑混凝土基础(C60混凝土,以防止上拔基础中基础破坏),基础上径141 mm,下径为235 mm,高为353 mm(取几何相似系数 $n=8.5$,对应原型基础为 $1.2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 3\text{ m}$ 圆台基础),基础埋置于地基表层,以模拟规范中假设工况。而后将基础悬吊于模型箱中(图9(b)),浇筑相似搅拌均匀后的岩石相似材料,每个相似材料地基尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ (图9(c))。试验浇筑完成后养护1周进行加载,试验加载装置由千斤顶、上横梁(自由)、下横梁(固定)组成(图9(d)),试验中通过两侧千斤顶对上横梁施加恒定荷载进行上拔加载(图9(e)),试验过程中通过力传感器和百分表记录上拔荷载和上拔位移。在本文配比方案中选取3种代表性相似材料(相似材料第10组,第12组,第14组)开展挖孔基础模型试验,3种相似材料内摩擦角、抗压强度等参数逐渐变化,可用以探究地基强度对破坏模式的影响规律。

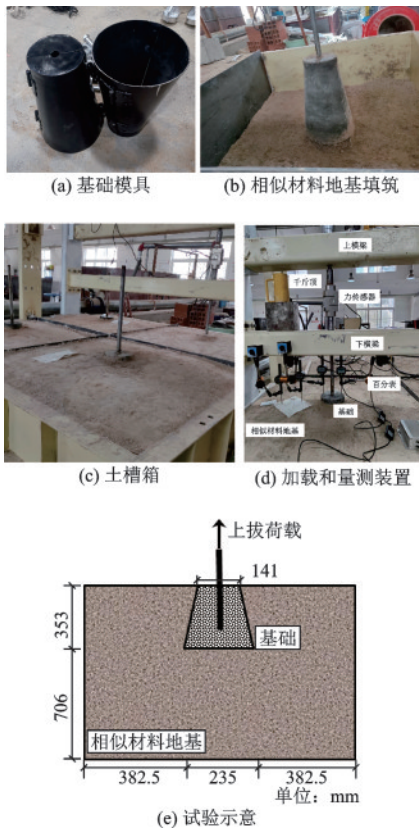


图9 Test apparatus (mm)

3 试验结果

3.1 荷载位移曲线

图10所示为挖孔基础在3种不同地基中加的荷载位移曲线。由图可知,不同地基下的荷载位移曲线发展趋势较为类似,与现场试验中荷载位移曲线规律基本一致^[13]。初始加载时,位移与荷载间近似线性增加;随着荷载继续增加,每级荷载稳定所需位移逐渐增加,荷载位移曲线呈现非线性增长趋势;荷载加载到峰值时,位移持续增加无法稳定,可以认为此时地基破坏。地基破坏时对应的极限荷载分别为22.56、30.02、16.05 kN。

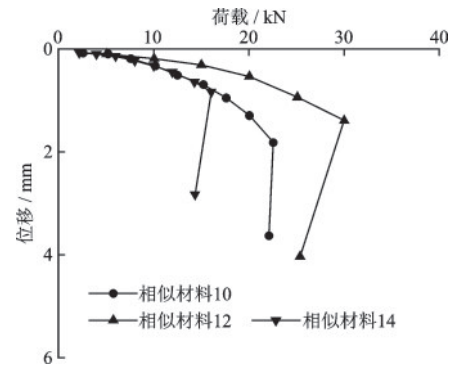


Fig.10 Load-settlement curves

3.2 地基破坏模式

图11所示为挖孔基础在3种不同地基中加载至破坏阶段时的岩体裂缝分布情况,在裂缝附近涂上白色涂料可以清晰地观测到裂缝,同时对裂缝进行二值化处理得到更为清晰地裂缝情况。可以发现在现场和模型试验中表面裂纹分为径向裂纹和环向裂纹两种形式,环向裂纹为地基破坏主裂纹。现场试验中^[13]基础周围先出现径向裂纹,逐渐径向裂纹向外扩展延伸,最后形成贯通的环向裂纹,地基体被拔起;而模型试验是径向裂纹自环向裂纹起向外发散。这是因为现场试验尺度较大,地基不均匀且内部存在裂隙,加载过程中地基首先被压缩破坏,而后带动地基整体拔出;而模型试验尺度较小,试样均匀且内部不存在裂隙,基础上拔时,由于地基相似材料的抗压强度远大于材料的抗剪和抗拉强度,即基础带动周围相似材料被整体拔出,拔出

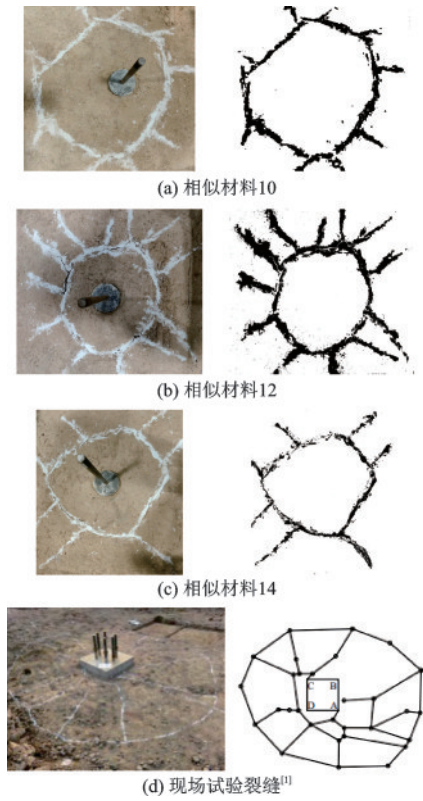


图 11 地基破坏模式

Fig.11 Ground failure model

过程中引起周边地基变形而产生裂缝。

3.3 地基破坏面

图 12 所示为基础整体拔出后拔出地基的剖面图和俯视图(相似材料 14)。由图可知,拔出后的地基呈圆台形,基础破坏面呈现沿着一定角度的开口向地面延伸的线性破坏面,与已有规范^[14]较为一致。考虑圆台表面并非完美圆形,如图 12 中长径达 34.3 cm,短径为 28.4 cm,因此统计环向裂纹周长用于计算等效直径,并利用该等效直径计算破坏角与规范对比。计算结果见表 5,可以发现不同地基相似材料其破坏倾角不同,但都在规范值(45°)附近变化。总结破坏角与相似材料内摩擦角关系如图 13 所示,可以发现破坏角随地基相似材料内摩擦角增大而降低的演化趋势。

3.4 等代抗剪强度

根据现行规范^[14],岩石嵌固基础抗拔承载力可采用下式计算:

$$\gamma_f T_E = \pi h_0 \tau_s (D + h_0) + G_f \quad (1)$$

式中, τ_s 为等代极限剪切强度; G_f 为基础自重; h_0 为

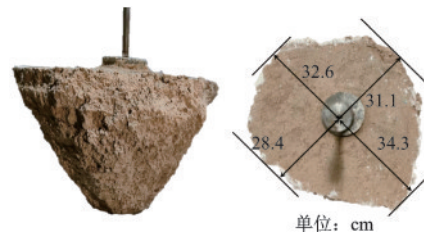


图 12 典型破坏面

Fig.12 Typical failure surface

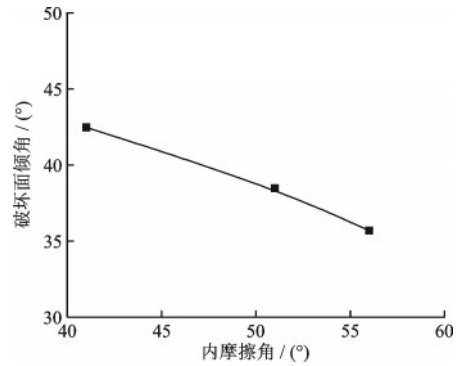


图 13 破坏面倾角—内摩擦角关系

Fig.13 Relationship between the failure angle and internal friction angle

表 5 环向裂纹信息

Table 5 Information of circumferential crack perimeter

| 相似材料组数 | 材料 10 | 材料 12 | 材料 14 |
|---------------------|--------|--------|--------|
| 环向裂纹周长/cm | 194 | 208 | 230 |
| 等效直径/cm | 61.78 | 66.24 | 73.25 |
| 侧面积/cm ² | 14 140 | 15 890 | 18 900 |
| 等效破坏角/(°) | 35.7 | 38.5 | 42.5 |

基础高度; D 为基础底径; $\gamma_f T_E$ 为抗拔承载力。

据此采用试验中抗拔承载力计算相似材料等代极限强度,并与单轴抗压强度对比,如图 14 所示。可以发现相似材料等代极限剪切强度和单轴抗压强度有较好的相关性,等代极限剪切强度随单轴抗压强度

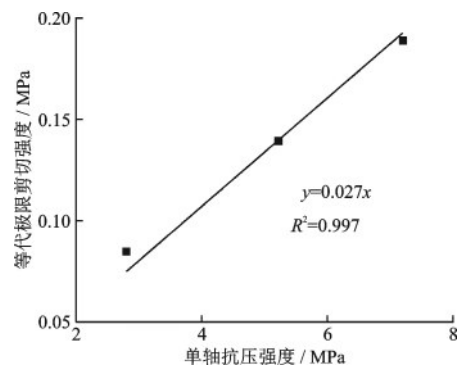


图 14 抗拔承载力

Fig.14 Uplift bearing capacity

增大而增大,拟合斜率为0.027,表明本文中相似材料等代极限剪切强度约为单轴抗压强度的0.027。

4 结 论

本文以重晶石粉、铁粉和石英砂为骨料,水和石膏为胶结剂,黏土为增塑剂配置岩石相似材料,应用正交设计方法,研究了配置方案与相似材料物理力学性质之间的变化规律;而后选取4种代表性相似材料开展了岩石挖孔基础抗拔承载特性的室内模型试验,对岩石地基中挖孔基础的承载力特征和地基破坏模式进行分析,主要结论如下:

(1)对于相似材料密度,因素C影响最大;对于试样黏聚力和抗压强度,因素B影响最大;对于内摩擦角,因素C影响最大;对于弹性模量,因素A和因素B影响最大。

(2)现场试验尺度大且基础周围地基不均匀,因此基础周围先出现径向裂缝,逐渐径向裂缝向外扩展延伸,最后形成贯通的环向裂缝,地基体被拔起;而模型试验尺寸小且地基材料均匀,试验中径向裂缝自环向裂缝起向外发散。

(3)地基岩体破坏面呈现为沿着一定角度的开口向地面延伸的线性破坏面,且该破坏角随材料内摩擦角增大而减小,在规范中假定的 45° 附近变化。

(4)依据抗拔承载力计算得到的相似材料等代极限剪切强度随单轴抗压强度增大而增大,约为单轴抗压强的0.027。

参考文献:

- [1] 崔强,孟宪乔,杨少春.扩径率与入岩深度对岩基挖孔基础抗拔承载特性影响的试验研究[J].岩土力学,2016,37(增2):195-202.
Cui Q, Meng X Q, Yang S C. Experimental investigation of influence of embedment depth in rock and expanding ratio upon ultimate uplift resistance of hole digging foundation in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 195-202. (in Chinese)
- [2] Chin F K. Estimation of the ultimate load of piles not carried to failure[C]//Proceedings of the 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering. Singapore: [s. n.], 1970: 81-90.
- [3] Phoon K K. Modeling and simulation of stochastic data

[C]//GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. Reston: ASCE, 2006.

- [4] Qian Z Z, Lu X L, Tong R M. Uplift load-movement response of bell pier foundations in Gobi gravel[J]. Geotechnical Engineering, 2014, 167(4): 380-389.
- [5] 许宏发,钱七虎,金丰年.描述抗拔桩荷载-位移曲线的幂函数模型[J].岩土工程学报,2000,22(5):622-624.
Xu H F, Qian Q H, Jin F N. Power function model to describe load-displacement curve of tension pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 622-624. (in Chinese)
- [6] 党发宁,刘娜,何文安.西安地区单桩荷载传递双曲线模型与工程应用[J].岩土工程学报,2007,29(9):1428-1432.
Dang F N, Liu N, He W A. Hyperbolic model of load transfer method for single pile in Xi'an area and its engineering application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1428-1432. (in Chinese)
- [7] 李森,唐孟雄.抗拔桩荷载-位移曲线拟合模型的比较分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(4):735-739.
Li S, Tang M X. Contrast analysis on prediction models for load-displacement curve of uplift pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 735-739. (in Chinese)
- [8] 蒋建平,高广运,刘文白.扩底桩上拔荷载-位移曲线的Richards模型拟合研究[J].工程力学,2009,26(5):189-201.
Jiang J P, Gao G Y, Liu W B. Application of Richards model in the fitting of uplift load versus uplift displacement curve of belled pile[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5): 189-201. (in Chinese)
- [9] 唐小松,李典庆,周创兵,等.基于Copula函数的基桩荷载-位移双曲线概率分析[J].岩土力学,2012,33(1):171-178.
Tang X S, Li D Q, Zhou C B, et al. Probabilistic analysis of load-displacement hyperbolic curves of single pile using Copula[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 171-178. (in Chinese)
- [10] 鲁先龙,乾增珍,崔强.黄土地基掏挖扩底基础抗拔试验研究[J].岩土力学,2014,35(3):647-652.
Lu X L, Qian Z Z, Cui Q. Experimental investigation on uplift behavior of belled piers in loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 647-652. (in Chinese)

- [11] 鲁先龙, 乾增珍, 童瑞铭, 等. 戈壁地基扩底掏挖基础抗拔试验及其位移计算[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1871-1877.
Lu X L, Qian Z Z, Tong R M, et al. Uplift field tests and displacement prediction on belled piers in gobi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7):1871-1877. (in Chinese)
- [12] 郭楠, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 软岩地基中大直径布袋桩抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增2): 603-609.
Guo N, Chen Z H, Huang X F, et al. Experimental study of large-diameter bag uplift pile in soft rock foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 2): 603-609. (in Chinese)
- [13] 崔强, 程永锋, 鲁先龙, 等. 强风化岩中挖孔基础抗拔试验及荷载位移曲线模型参数研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4597-4604, 4616.
Cui Q, Chen Y F, Lu X L, et al. In-situ pull-out test and parametric study of load-displacement model for hole digging foundation in the strong weathered rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4597-4604, 4616. (in Chinese)
- [14] 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [15] 崔强, 周亚辉, 童瑞铭, 等. 上拔扩底基础与地基土体承载特性差异性分析[J]. 岩土力学, 2016, 7(增2): 476-482.
Cui Q, Zhou Y H, Tong R M, et al. Difference analysis of uplift resistance characteristics between spread footing and foundation soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 7(Sup2):476-482. (in Chinese)
- [16] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 新型地质力学模型材料(MIB)[J]. 武汉水利电力学院学报, 1983(1): 11-17.
Han B L, Zhang W C, Yang C F. New geomechanical Model materials (MIB)[J]. Journal of Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Power, 1983(1): 11-17. (in Chinese)
- [17] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48-51.
Ma F P, Li Z K, Luo G F. NIOS model material and its application in Geomechanical Similarity Model Test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 48-51. (in Chinese)
- [18] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847.
Wang H P, Li S C, Zhang Q Y, et al. Development of a new Geomechanical similar material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847. (in Chinese)
- [19] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.
Ning Y B, Tang H M, Zhang B C, et al. Study on ratio of similar materials in rock based on orthogonal design and application of physical model test of bottom friction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020. (in Chinese)
- [20] 张宁, 李术才, 李明田, 等. 新型岩石相似材料的研制[J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 149-154.
Zhang N, Li S C, Li M T, et al. Development of new rock similar materials[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(4): 149-154. (in Chinese)
- [21] 李童悦, 赵佳美, 周洪正. 基于正交设计的岩石相似材料配比试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 143-147.
Li T Y, Zhao J M, Zhou H Z. Mixture proportioning tests of rock similar material based on the orthogonal methods[J]. Journal of Water Resources and Construction Engineering, 2018, 16(4): 143-147. (in Chinese)
- [22] 詹志发, 贺建先, 郑博文, 等. 边坡模型相似材料配比试验研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1236-1243.
Zhan Z F, He J X, Zheng B W, et al. Experimental study on similar material proportion of slope model[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1236-1243. (in Chinese)
- [23] 蔡国军, 黄润秋, 严明, 等. 反倾向边坡开挖变形破裂响应的物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 811-817.
Cai G J, Huang R Q, Yan M, et al. Physical simulation study on deformation and failure response of an anti-inclined slope during excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 811-817. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)