

斜坡场地上岩基承载力的计算和提高方法

俞海波

重庆市涪陵建设工程质量监督检测中心有限公司 重庆 408099

【摘要】：在许多山地城市（如重庆），由于地形起伏，建筑物基础基底标高很多时候并不在同一标高上，有时甚至需要将部分基础支承在岩质斜坡场地上，相对于平坦的岩质场地来说，斜坡场地上岩基承载力的确定将面临许多困难。对这类基础设计，不仅需要准确计算确定斜坡场地上岩基承载力，同时还需要保证斜坡在基础作用下的稳定性。本文首先讨论岩石受压的破坏模式以及岩基承载力的影响因素，然后讨论斜坡场地上岩基承载力的计算方法，最后提出通过设置预应力锚杆的方法对基础周边的斜坡岩体进行加固，对斜坡岩体施加一定的围压，从而提高斜坡场地上岩基承载力以及斜坡的稳定性。

【关键词】：斜坡场地；基岩；承载力

Calculation and Improvement Method of Rock Foundation Bearing Capacity on Slope Site

Haibo Yu

Chongqing Fuling Construction Engineering Quality Supervision and Testing Center Co., Ltd., Chongqing 408099

Abstract: In many mountain cities (such as Chongqing), due to the undulating terrain, the elevation of the foundation of the building is often not on the same elevation, and sometimes even part of the foundation needs to be supported on the rocky slope site, compared with the flat rock site, the determination of the rock foundation bearing capacity on the slope site will face many difficulties. For such foundation design, it is not only necessary to accurately calculate and determine the bearing capacity of the rock foundation on the slope site, but also to ensure the stability of the slope under the action of the foundation. This paper first discusses the failure mode of rock compression and the influencing factors of rock base bearing capacity, then analyzes the calculation method of rock foundation bearing capacity on the slope site, and finally proposes to strengthen the slope rock mass around the foundation by setting prestress anchor rods, and apply a certain surrounding pressure to the slope rock mass, thereby improving the rock foundation bearing capacity on the slope site and the stability of the slope.

Keywords: slope site; bedrock; bearing capacity

1 岩石力学性质及岩体强度

影响岩石力学性质的因素包括矿物成分、岩石结构构造、水、温度、风化程度、围压以及加载速率等。这些因素中，“围压”可通过施工工艺和施工顺序进行人为调节，改善岩石的受力状态，从而增强岩石的峰值强度、岩石破坏时的变形量以及岩石延性，尤其是在三轴压缩条件下，岩石的强度、变形和弹性极限都将显著增大。

对于岩石地基，岩基除失稳破坏外，岩石地基在外荷载作用下的破坏形式主要有开裂破坏、压碎破坏、劈裂破坏、冲切破坏以及整体剪切破坏。在进行工程设计时，首先需通过岩石地基的性质来评估岩基的破坏模式，再进行岩基设计。

岩基设计的对象往往并不是“岩石”，而是“岩体”。对于岩体来说，由于岩体中存在一定程度和数量的裂隙或结构面，则岩体的强度则由岩块的强度和结构面的强度及其组合方式共同控制。如果岩体中结构面不发育，即岩体完整时，则岩体强度大致等于岩块强度；相反，如果岩体中结构面发育，结构面强度较低时，则岩体强度由结构面控制。因此，在确定岩基的承载力时，需要在勘察阶段掌握结构面的力学性质，鉴定岩石的地质名称和风化程度，划分岩石的坚硬程度、完整程度

和岩石基本质量等级，并对岩石进行尽可能详细的描述。只有在勘察阶段充分揭示岩基的力学性质，才能为岩基承载力的准确确定提供保障。

2 岩基承载力的确定方法

工程中，常使用经验法、室内单轴压缩试压法、现场载荷试验法和理论公式法来确定岩基承载力。这四种方法确定的岩基承载力差别较大，实际运用时，需结合场地的工程地质情况、建筑物的重要性等级以及基础荷载大小等条件进行选取。

2.1 经验法

经验法是根据岩石类别和风化程度等情况确定岩石承载力，但这种方法确定的岩石承载力在不同地区、不同行业规范中均具有很大的取值范围，确定的岩石承载力较为粗略，只能运用于初步设计阶段的岩石承载力取值。

2.2 室内单轴压缩试压法

对完整、较完整和较破碎的岩石地基承载力特征值，可根据室内饱和单轴抗压强度按下列公式进行计算：

$$f_a = \psi_r f_{rk} \quad (1)$$

$$f_{rk} = \psi f_{rm} \quad (2)$$

$$\psi = 1 - (1.704/n^{1/2} + 4.678/n^2) \delta \quad (3)$$

式中： f_a 为岩石地基承载力特征值，kPa； f_{rk} 为岩石饱和单轴抗压强度标准值，kPa； ψ_r 为折减系数，根据岩体完整程度以及结构面的间距、宽度、产状和组合，由地方经验确定；无经验时，对完整岩体可取 0.5，对较完整岩体可取 0.2~0.5，对较破碎岩体可取 0.1~0.2；折减系数值为考虑施工因素及建筑物使用后风化作用的继续，对于黏土质岩，在确保施工期及使用期不致遭水浸泡时，也可采用天然湿度的试样，不进行饱和处理。 f_{rm} 岩石饱和单轴抗压强度平均值，kPa； ψ 为统计修正系数； n 为试样个数， $n \geq 6$ ； δ 为变异系数。

室内单轴压缩试压法确定的岩石地基承载力，不仅要求岩石试样具备一定的代表性，还要求试样满足一定的数量，而且折减系数 ψ_r 的取值严重依赖经验，依然是一种较为粗略的方法，运用于实际设计时，可对相关参数偏保守取值。

2.3 现场载荷试验法

对破碎、极破碎的岩石地基承载力特征值，可根据平板载荷试验确定。对于完整、较完整、较破碎的岩石地基承载力特征值可按《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011 附录 H 岩石地基载荷试验方法确定，试验要点如下：

采用圆形刚性承压板，直径为 300mm。当岩石埋藏深度较大时，可采用钢筋混凝土桩，但桩周需采取措施以消除桩身与土之间的摩擦力；测量系统的初始稳定读数观测应在加压前，每隔 10min 读数一次，连续三次读数不变可开始试验；加载应采用单循环加载，荷载逐级递增直到破坏，然后分级卸载；加载时，每一级加载值应为预估设计荷载的 1/5，以后每级荷载应为预估设计荷载的 1/10；沉降量测读应在加载后立即进行，以后每 10min 读数一次；连续三次读数之差均不大于 0.01mm，可视为达到稳定标准，可施加下一级荷载。

加载过程中出现下述现象之一时，即可终止加载：①沉降量读数不断变化，在 24h 内，沉降速率有增大的趋势。②压力加不上或勉强加上而不能保持稳定。（注：若限于加载能力，荷载也应增加到不少于设计要求的两倍。）

卸载及卸载观测应符合下列规定：①每级卸载为加载的两倍，如为奇数，每一级可为 3 倍。②每级卸载后，隔 10min 测读一次，测读三次后可卸下一级荷载。③全部卸载后，可测读到半小时回弹量小于 0.01mm 时，即认为达到稳定。

岩石地基承载力的确定应符合下列规定：①对应于 $p-s$ 曲线上起始直线段的终点为比例界限。符合终止加载条件的前一级荷载为极限荷载。将极限荷载除以 3 的安全系数，所得值与对应于比例界限的荷载值比较，取小值。②每个场地载荷试验的数量不应少于 3 个，取最小值作为岩石地基承载力特征值。

③岩石地基承载力不进行深宽修正。

2.4 理论公式法

根据岩基的极限承载力计算公式，并考虑安全系数 F （一般取 2~3，可保证地基沉降不影响建筑物的安全和正常使用；对于恒载最大活载的组合情形，可取安全系数为 3，当组合中包括风荷载和地震作用时，可取安全系数为 2），即可得到岩石地基的容许承载力 q_a 。

2.4.1 理论公式 1（不考虑岩基自重的地基承载力容许值）

破碎岩体的地基极限承载力计算可采用与土力学类似的方法，根据滑移面形状和破坏岩基的运动模式，首先将基底岩体划分为主动和被动楔形体，再进行极限平衡分析。计算时，若岩基岩体破碎且不存在由结构面形成的优势滑动面，应采用破碎岩体的抗剪强度参数；若岩基中存在由结构面形成的优势滑动面，则需采用该结构面的抗剪强度参数。在此基础上，考虑安全系数，即可得到岩石地基的容许承载力 q_a ，见公式(4)。

$$q_a = C_{fl} s^{1/2} \sigma_{ci} [1 + (m_b s^{1/2} + 1)^{1/2}] / F \quad (4)$$

式中： C_{fl} 为考虑基础形状因素的修正系数；条形基础 ($l/b > 6$)，取 1.0；矩形基础 ($l/b = 2$)，取 1.12；矩形基础 ($l/b = 5$)，取 1.05；方形基础，取 1.25；圆形基础，取 1.2； σ_{ci} 为完整岩石单轴抗压强度，MPa； s 、 m_b 为表示岩体特性的半经验参数。

2.4.2 理论公式 2（考虑岩基自重的地基承载力容许值）

对较完整的岩体，可采用 BELL 极限承载力计算公式，并考虑安全系数，即可得到岩石地基的容许承载力 q_a ，见公式(5)。BELL 极限承载力计算公式考虑了主动区的岩基自重，同时也可计算基础具有埋深和岩基表面存在荷载的情况。

$$q_a = (0.5 \gamma b N_\gamma + c N_c + q_s N_q) / F \quad (5)$$

式中： γ 为岩体重度，kN/m³； b 为基础宽度，m； c 为基岩粘聚力，kPa； q_s 为作用在岩基表面的均布荷载，kPa； N_γ 、 N_c 、 N_q 为承载力系数。

2.4.3 理论公式 3（太沙基公式、科茨公式）

由于岩体内存在一定规模和程度的节理裂隙，是一种非均质体，岩体的破坏由节理裂隙的发育程度控制。可将岩体等效成一个连续均质体，其力学性质由弹塑性本构关系来描述，如果取得能综合反映岩体抗剪强度性质的粘聚力 C 和内摩擦角 Φ ，则可运用下列计算公式(6)或公式(7)对岩石地基极限承载力进行初步计算分析。

$$\text{太沙基公式: } P_u = 0.5 \gamma b (k^6 - 1) + 5 C k^4 + q k^5 \quad (6)$$

$$\text{科茨公式: } P_u = 0.5 \gamma b k^6 + C (k^4 - 1) \cot \Phi + q k^4 \quad (7)$$

式中： $k = \tan(45^\circ + \Phi/2)$ ； C 、 Φ 为岩体粘聚力与内摩擦角； γ 为岩体容重； b 为基础底面宽度； q 为基础旁压荷载， $q = \gamma_0 d$ ， d 为基础埋深。

由于这四种方法确定的岩基承载力差异较大,实际运用过程中,对于重要的建筑物基础设计,可采用四种方法计算的较小值来确定岩基承载力。

3 斜坡场地上岩基承载力的计算

对于斜坡上的岩基,临空面的存在在一定程度上造成岩基“围压”的减小,相比于平坦场地,则需对岩基承载力进行适当的折减或修正,才能运用于岩质斜坡的岩基承载力计算。对于坡角小于 $\Phi/2$ 的斜坡,地基的容许荷载一般由地基承载力和容许沉降共同控制;对于坡角大于 $\Phi/2$ 的斜坡,地基的容许荷载一般由斜坡的稳定性控制,地基承载力一般不起控制作用。

当斜坡场地中的岩体较完整、结构面结合程度较好且无外倾结构面时,岩质斜坡场地的地基容许承载力可以采用公式(8)。值得注意的是,该公式未考虑斜坡内的岩体结构面抗剪强度、产状以及地下水的作用。

$$q_d = (C_{f1}cN_{cq} + 0.5\gamma bC_{f2}N_{\gamma q})/F \quad (8)$$

式中: C_{f1} 、 C_{f2} 为基础形状修正系数; N_{cq} 、 $N_{\gamma q}$ 为承载力系数;坡角越小、基础埋深较大时,则 $N_{\gamma q}$ 越大;坡角越小、斜坡高度越小、基础埋深较大时,则 N_{cq} 越大。

当斜坡场地中的岩体中存在影响斜坡稳定性的外倾结构面,在确定地基容许承载力时,为考虑其不利影响以及保证斜坡的稳定性,需结合工程实际,对地基容许承载力进行适当折减或修正。

4 预应力锚杆对斜坡场地上岩基承载力的提高作用

在实际工程设计中,应避免将重要建(构)筑物的基础布置在斜坡潜在滑塌体上。当无法避免时,除了增加基础埋深,将建(构)筑物的荷载直接传至足够深度的稳定岩体中,还可以运用预应力锚杆来加固基础临空侧的岩体,施加一定的“围压”,以提高斜坡场地上岩基承载力以及斜坡的稳定性。预应力锚杆一端需锚固到稳定岩层中,另一端则锚固在临空侧岩体表面,为使基础持力层岩体具有更好的传力性能,提高其整体性,条件具备时,可配合注浆工艺进行相应加固。注浆时,需根据岩体情况,正确选择注浆材料、注浆方法和注浆压力等。预应力锚杆所施加的“围压”的存在,在一定程度上减小了岩基临空区域的不利影响,如果在预应力锚杆设计时,给予其足够的安全系数,则斜坡场地的岩基承载力则可参照平坦场地上的岩基承载力确定方法进行计算分析。值得注意的是,由于预应力锚杆的作用是施加“围压”,因此,预应力锚杆挡墙接触的岩体需采取避免风化脱落导致墙背虚空的措施,并在满足规

范规定的前提下,适当减小预应力锚杆的间距,保证“围压”的有效性,但对于永久性斜坡场地,同时需考虑岩基承载力可能随时间流失强度降低的影响。

在进行预应力锚杆的设计时,为使斜坡场地上建(构)筑物基础周围的岩体处于近似“静止岩土压力”的应力场,首先需要确定岩质斜坡的侧向主动岩土压力,然后参考岩质边坡主动岩石压力修正系数 β_1 对其进行修正的方法,得到斜坡场地上的“修正主动岩土压力”,可近似认为岩体此时处于“静止岩土压力”的应力场。

当需要在条状突出的山嘴、高耸孤立的山丘、非岩石和强风化岩石的陡坡、河岸和斜坡边缘等不利地段建造丙类及丙类以上建筑时,除保证其在地震作用下的稳定性外,尚应估计不利地段对设计地震动参数可能产生的放大作用,其水平地震影响系数最大值应乘以增大系数。其值应根据不利地段的具体情况确定,在1.1~1.6范围内采用。此时,需重点复核地基基础在临空侧方向的抗滑移能力,必要时,可使用基础锚杆等方式提高基础的抗滑移能力。

5 结论与建议

(1) 在确定岩基承载力前,需在地基勘察阶段准确确定岩块和结构面的力学参数,预估岩基的破坏模式,评估影响岩基承载力的不利因素;

(2) 工程中,常使用经验法、室内单轴压缩试压法、现场载荷试验法和理论公式法来确定岩基承载力。这四种方法确定的岩基承载力差别较大,实际运用时,对于重要的建筑物,可采用四种方法计算的较小值来确定岩基承载力;

(3) 当斜坡场地中的岩体较完整、结构面结合程度较好且无需考虑结构面和地下水的影响时,可采用理论公式计算岩质斜坡场地的地基容许承载力;当斜坡场地中的岩体中存在影响斜坡稳定性的外倾结构面时,需结合工程实际,对地基容许承载力进行适当折减或修正;

(4) 在实际工程设计中,岩质斜坡场地上的基础应尽量埋入一定深度的稳定岩体中,现场条件不允许时,可通过设置预应力锚杆(必要时,可配合注浆施工),在提高岩质斜坡场地上基础的岩基承载力的同时,提高斜坡的稳定性。为保证预应力锚杆所施加的“围压”的有效性,需采取有效措施防止预应力锚杆挡墙墙背岩体由于风化等原因脱落造成虚空。当地基基础在临空侧方向的抗滑移能力较低时,可使用基础锚杆等有效措施提高基础的抗滑移能力。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家标准.建筑地基基础设计规范 GB50007-2011 [S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 中华人民共和国国家标准.建筑抗震设计规范 GB 50011-2010(2016 年版)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.

- [3] 中华人民共和国国家标准.岩土工程勘察规范 GB 50021-2001[S](2009 年版).北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [4] 中华人民共和国国家标准.建筑边坡工程技术规范 GB 50330-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [5] 中华人民共和国国家标准.建筑边坡工程鉴定与加固技术规范 GB 50843-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [6] 吴顺川,李利平,张晓平.岩石力学[M].北京:高等教育出版社,2021.
- [7] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2013.
- [8] 程良奎,范景伦,李成江,等.岩土锚固与喷射混凝土支护工程设计施工指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [9] 俞海波.格构式锚杆(索)挡土墙设计优化、检测及鉴定技术分析[J].工程建设标准化,2021,36(22):201-202.