

修正 Mohr-Coulomb 准则下倾斜基岩中 桩端极限承载力研究

胡嘉言¹, 曹志刚^{1*}, 蔡袁强^{1,2}, 许斌¹

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为计算倾斜岩面浅嵌岩桩极限承载力, 本文基于修正 Mohr-Coulomb 强度准则提出了倾斜岩面浅嵌岩桩桩端承载力计算方法。采用特征线法构建了桩端面以下塑性发展区, 考虑岩面倾斜角几何关系, 推导了倾斜岩面位移滑移场; 进一步通过黎曼不变量控制方程, 求解了倾斜岩面浅嵌岩桩基极限承载力公式。分析了倾斜岩面坡角、岩体完整性参数以及岩体内摩擦角等因素对桩端承载力的影响。结果表明: 浅嵌岩桩基嵌入深度达到极限嵌入比时, 桩基达到极限承载力; 当嵌入比大于极限嵌入比时, 桩端承载力系数不受倾斜坡角和嵌入比影响, 此时可按平地桩基进行分析计算; 极限嵌入比随倾斜坡角的增大呈幂函数增大, 且在岩石完整性较差时, 极限嵌入比随岩体内摩擦角的增大而显著增大; 当嵌入比小于极限嵌入比时, 桩端承载力系数随倾斜坡角的增大近似线性减小, 需考虑岩面倾角对桩基承载力的影响。

关键词: 桩端极限承载力; 修正 Mohr-Coulomb 准则; 浅嵌岩桩; 倾斜基岩; 极限嵌入比

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0368-09

Study on ultimate bearing capacity of pile tip in inclined rocks based on modified Mohr-Coulomb criterion

HU Jiayan¹, CAO Zhigang^{1*}, CAI Yuanqiang^{1,2}, XU Bin¹

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: In order to calculate the ultimate bearing capacity of shallow rock-socketed pile in inclined rocks, an analytical method for calculating the tip bearing capacity of a shallow rock-socketed pile in inclined rocks was proposed based on the modified Mohr-Coulomb strength criterion. The plastic zone below the pile tip was constructed by the characteristic line method. The displacement field of inclined rocks was derived considering the geometric relation. Combined with the Riemann's invariant governing equation, the ultimate bearing capacity formula of shallow rock-socketed pile foundation in inclined rocks was further solved. The influences of the inclined slope angle, the Geological Strength Index (GSI) and the friction angle on the bearing capacity of pile tip were analyzed. The results show that the ultimate bearing capacity of shallow rock-socketed pile is reached when the embedment depth reaches a limit embedment ratio. When the embedment ratio is greater than the limit embedment ratio, the load factor of pile tip is not affected by slope angle and embedment ratio, which can be calculated and analyzed according to a pile in flat rocks. The limit embedment ratio increases as a power function with the increase of the slope angle. When the rock integrity is poor, the limit embedment ratio increases significantly with the increase of the friction angle. When the limit embedment ratio is not reached, the load factor for the ultimate bearing capacity of the pile decreases approximately linearly with the increase of the slope angle, so the influence of the slope angle of the rock on the bearing capacity of the pile foundation should be considered.

Key words: ultimate bearing capacity of pile tip; modified Mohr-Coulomb criterion; shallow rock-socketed pile; inclined

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978611); 浙江省杰出青年基金资助项目 (LR21E080004); 浙江大学-浙江交工协同创新联合研究中心资助项目 (ZDJG2021011)。

作者简介: 胡嘉言 (1997—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: hujy558@163.com。

*通信作者: 曹志刚 (1983—), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授, 主要从事土动力学的研究。E-mail: caozhigang2011@zju.edu.cn。

rocks; limit embedment ratio

0 引言

山区高架桥、输电塔等基础设施桩基常建在倾斜岩石边坡中,深入研究岩体斜坡中桩基的承载能力对此类基础的设计至关重要。

对于岩石地基承载力求解问题,许多学者提出了多种方法对其进行研究。SERRANO 等^[1-3] 基于 Hoek-Brown 破坏准则,利用特征线法研究了岩石地基的极限承载力。为了将研究应用于高度破碎岩石介质(岩体完整性参数 $GSI \leq 25$),SERRANO 等^[4] 对原有模型进行了改进,在先前的假设与方法基础上加入了修正系数^[5],得到了更精确的极限承载力计算方法。YANG 等^[6-7] 基于极限分析的上限定理,在非线形准则下应用广义切线技术计算功和耗能,通过优化得到岩体中条形基础的极限承载力,并且考虑了超载和岩体自重的影响。GALINDO 等^[8] 基于修正 Mohr-Coulomb 破坏准则,采用特征线法计算了岩体中浅基础的极限承载力,并将所得解与之前以 Hoek-Brown 准则计算的解进行了比较,分析了两个准则中岩体完整性参数产生的不同影响以及强度曲线斜率演化的显著差异。

对于嵌岩桩基承载力,学者们开展了广泛研究。史佩栋等^[9] 通过分析现场实测资料和长期原位观测资料,揭示了嵌岩桩竖向荷载作用下桩端阻力分担荷载比与桩长径比之间的变化规律,讨论了嵌岩桩的合理嵌岩深度,提出了一种用经验参数确定嵌岩桩竖向承载力的计算公式。赵明华等^[10] 采用 Hoek-Brown 岩石强度准则,建立了嵌岩桩桩侧摩阻力模型和桩端阻力的计算公式,分析了岩体结构的完整性、岩块单轴抗压强度及三向应力等因素对嵌岩桩极限承载力的影响。张琦等^[11] 假定了岩体可能出现的极限状态,基于岩体二维、三维 Hoek-Brown 破坏准则提出了大直径嵌岩桩桩端岩体极限承载力的计算方法,并进一步研究了大直径嵌岩桩的尺寸效应。周洁等^[12] 综合分析了不同的嵌岩桩单桩竖向承载力计算方法的优缺点及其应用范围。SERRANO 等^[13-14] 提出了一种基于 Hoek-Brown 破坏准则的平地基岩中桩端极限承载力计算方法,通过施加形状因子考虑了桩的三维特征,并且发现嵌岩桩基存在 4 种不同类型的破坏模式。此后,SERRANO 等^[15] 将方法推广到修正 Hoek-Brown 破坏准则,求解平地基岩中嵌岩桩的极限承载力,并给出了极限承载力与修正系数的关系。CAI 等^[16]、

CAO 等^[17] 基于 Hoek-Brown 准则和修正 Hoek-Brown 准则计算了不同坡角下倾斜基岩中的嵌岩桩桩端极限承载力,在得到与平地基岩情况类似的 4 种破坏模式以外,发现了倾斜基岩中桩的第 5 种破坏模式——超浅嵌入(SS)破坏模式,并揭示了不同破坏模式下的桩基承载机理,但其承载力公式中 Hoek-Brown 准则参数的获取需借助较复杂的室内试验。

Mohr-Coulomb 强度准则因其参数易于获取,广泛应用于岩体地基承载特性研究中,但其未考虑到非线性对岩体强度的影响。基于此,SINGH 等^[18-19] 提出了非线性的修正 Mohr-Coulomb 破坏准则,保留了原始 Mohr-Coulomb 准则的强度参数,且可通过低围压下三轴试验得到高围压下岩体强度参数,更方便应用于嵌岩桩基承载力分析。当前尚缺乏基于修正 Mohr-Coulomb 破坏准则的倾斜岩面桩基承载力分析理论,基于上述强度准则推导倾斜岩面的桩基承载力计算方法,将有助于桩基承载力分析方法的进一步应用。

本文基于修正 Mohr-Coulomb 破坏准则描述岩体的强度,采用特征线法求解了岩石边坡中浅嵌岩桩桩端极限承载力计算公式,研究了不同坡角下桩基达到极限承载所需的极限嵌入比,并对倾斜坡角、岩体完整性参数(GSI)和内摩擦角等因素对桩端极限承载力的影响进行了分析,为倾斜岩面桩基承载力设计计算提供指导。

1 修正 Mohr-Coulomb 强度破坏准则

假设岩体为均匀且各向同性的连续介质,SINGH 等^[18-19] 提出岩体的非线性破坏准则如下:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{cj} + 2 \frac{\sin \varphi_j}{1 - \sin \varphi_j} \sigma_3 - \frac{\sin \varphi_j}{1 - \sin \varphi_j} \frac{\sigma_3^2}{\sigma_c} \quad (1)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为有效大主应力和小主应力; σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度; σ_{cj} 为节理岩石的单轴抗压强度; φ_j 为低围压下岩石试样由三轴强度试验得到的内摩擦角。

将式(1)左右两边同时除以 σ_c 可得:

$$\sigma_1^* - \sigma_3^* = \frac{\sigma_{cj}}{\sigma_c} + 2 \frac{\sin \varphi_j}{1 - \sin \varphi_j} \sigma_3^* - \frac{\sin \varphi_j}{1 - \sin \varphi_j} (\sigma_3^*)^2 \quad (2)$$

式中: $\sigma_1^* = \sigma_1 / \sigma_c$; $\sigma_3^* = \sigma_3 / \sigma_c$, 下文应力变量均以此法无量纲化。

令 $n_j = \frac{\sin \varphi_j}{1 - \sin \varphi_j}$, $r = \frac{\sigma_{cj}}{\sigma_c}$, 将式 (2) 进一步简

化为:

$$\sigma_1^* - \sigma_3^* = r + 2n_j \sigma_3^* - n_j (\sigma_3^*)^2 \quad (3)$$

利用 Mohr 应力圆中 Lambe 变量 $p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 和 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, 可将修正 Mohr-Coulomb 强度准则表示为以下形式:

$$2q^* = r + 2n_j(p^* - q^*) - n_j(p^* - q^*)^2 \quad (4)$$

$$2p^* = r + 2(n_j + 1)(p^* - q^*) - n_j(p^* - q^*)^2 \quad (5)$$

式中: $p^* = p/\sigma_c$; $q^* = q/\sigma_c$ 。

根据 SERRANO 等^[1] 对岩体瞬时内摩擦角 ρ 的定义:

$$\sin \rho = \frac{dq}{dp} \quad (6)$$

结合式 (4) ~ (5) 可以得到:

$$2q^* = r + n_j - \frac{1}{n_j} \left(\frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho} \right)^2 \quad (7)$$

$$2p^* = 2 + r + n_j - \frac{2}{n_j} \left(\frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho} \right) - \frac{1}{n_j} \left(\frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho} \right)^2 \quad (8)$$

$$\sin \rho = \frac{n_j(1 - \sigma_3^*)}{1 + n_j(1 - \sigma_3^*)} \quad (9)$$

由 SINGH 等^[19] 的研究可以得到:

$$n_j = n_0 + 1 - r \quad (10)$$

$$n_0 = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

式中: φ 表示低围压下完整岩石由三轴试验得到的内摩擦角 ($\sigma_3 \rightarrow 0$)。

因此有:

$$\sin \varphi_j = \frac{1 - r + n_0}{2 - r + n_0} \quad (12)$$

根据 GALINDO 等^[8], 修正 Mohr-Coulomb 强度准则的修正系数 r 为:

$$r = s^a \quad (13)$$

其中:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (15)$$

式中: s 为 Hoek-Brown 准则参数; a 为修正 Hoek-Brown 准则修正系数; GSI 为岩体完整性参数; D 表示岩体扰动因子, 取值范围一般在 0~1。

根据修正 Mohr-Coulomb 强度准则下的 Mohr 应力圆, 如图 1 所示, 可得出应力表达式, 并建立和桩基边界条件中的岩体瞬时内摩擦角 ρ 的联系:

$$\tau = q \cos \rho \quad (16)$$

$$\sigma = p - q \sin \rho \quad (17)$$

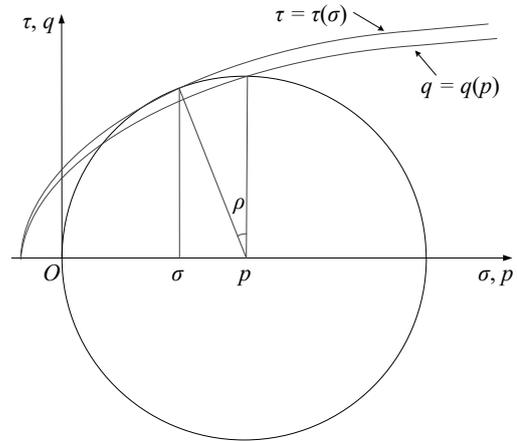


图 1 修正 Mohr-Coulomb 强度准则下的 Mohr 应力圆
Fig. 1 Mohr's stress circle for modified Mohr-Coulomb strength criterion

将式 (16) ~ (17) 与式 (7) ~ (9) 联立, 可以得到应力关于岩体瞬时内摩擦角 ρ 的表达式:

$$2\tau^* = \frac{r + 2n_j \sigma_3^* - n_j (\sigma_3^*)^2}{1 + n_j(1 - \sigma_3^*)} \sqrt{1 + 2n_j(1 - \sigma_3^*)} \quad (18)$$

$$2\sigma^* = \frac{r + 2n_j(1 + 2n_j) - 3n_j (\sigma_3^*)^2}{1 + n_j(1 - \sigma_3^*)} \quad (19)$$

其中:

$$\sigma_3^* = \frac{n_j - (n_j + 1) \sin \rho}{n_j(1 - \sin \rho)} \quad (20)$$

2 桩端极限承载力公式求解

CAI 等^[16] 总结出在倾斜基岩中桩基存在 5 种破坏模式, 分别为深嵌入轻覆载 (DL)、浅嵌入轻覆载 (SL)、深嵌入重覆载 (DH)、浅嵌入重覆载 (SH) 以及超浅嵌入 (SS)。根据嵌入深度的不同, DL 与 SL、DH 与 SH 的破坏模式可以相互转化。

桩基边界条件示意图如图 2 所示, 图 2 为 SS 破坏模式, 桩端荷载为 σ_h , 桩基嵌入岩石深度为 H_R , 桩径为 B_0 , 倾斜基岩坡角为 η , 此时桩基嵌入深度较浅, 嵌入比对桩基承载性能影响较大, 需进一步研究其特性。

根据塑性理论, 有以下几点假设: (1) 应力应变是共轴的, 即在 Mohr 应力平面中的轴线与应变增量平面的轴线相同; (2) 在修正 Mohr-Coulomb 强度准则下需要考虑破坏时关联塑性流动法则;

(3) 求解时先假定为平面应变进行二维分析, 在此基础上再进一步考虑桩基三维空间效应; (4) 岩石介质为均质、各向同性的理想塑性体; (5) 假设倾斜岩石边坡中的桩基不受惯性力和水力梯度的影响。

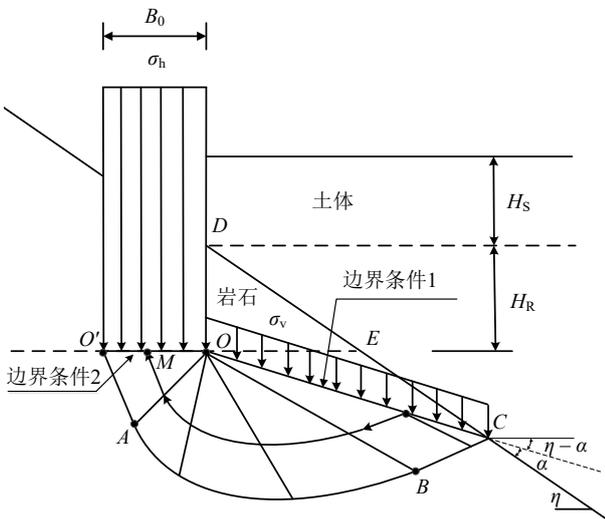


图 2 桩基边界条件示意图

Fig. 2 Illustration of boundary conditions for pile foundation

2.1 特征线法下黎曼不变量定义

求解倾斜基岩中嵌岩桩桩端极限承载力, 主要基于特征线法下的黎曼不变量控制方程。首先要确定出桩基边界条件 1 中的瞬时内摩擦角 ρ_1 , 然后利用特征线确定出边界条件 2 上的瞬时内摩擦角 ρ_2 , 最后根据实际条件参数求解出极限桩端承载力。

特征线法下对滑移线场采用的黎曼不变量方程为:

$$I(\rho_1) + \psi_1 = I(\rho_2) + \psi_2 \quad (21)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为边界条件 1 和边界条件 2 的瞬时内摩擦角; ψ_1 和 ψ_2 分别为边界条件 1 和边界条件 2 上大主应力与竖向纵轴的夹角。

令 $m = \sqrt{n_j(r + n_j)}$, 根据 GALINDO 等^[8] 对修正 Mohr-Coulomb 模型下黎曼不变量的定义:

$$I(\rho) = I_1(\rho) - \frac{1-2m}{2m} I_2(\rho) = \frac{(1+2m)^{1/2}}{2m} \ln \left[\frac{m \tan \frac{\rho}{2} - (m+1) + (1+2m)^{1/2}}{m \tan \frac{\rho}{2} - (m+1) - (1+2m)^{1/2}} \right] - \frac{1-2m}{2m} I_2(\rho) \quad (22)$$

其中 $I_2(\rho)$ 分 3 种情况:

$$I_2(\rho) = \begin{cases} \frac{1}{(1-2m)^{1/2}} \ln \left[\frac{m \tan \frac{\rho}{2} - (m-1) - (1-2m)^{1/2}}{m \tan \frac{\rho}{2} - (m-1) + (1-2m)^{1/2}} \right], & m < 1/2 \\ 2 \tan \left(\frac{\rho}{2} - \frac{\pi}{4} \right), & m = 1/2 \\ \frac{2}{(2m-1)^{1/2}} \arctan \left[\frac{m \tan \frac{\rho}{2} - (m-1)}{(2m-1)^{1/2}} \right], & m > 1/2 \end{cases} \quad (23)$$

2.2 承载力公式推导

如图 2 所示, 作用在边界条件 1 上的平均上覆荷载 h_m (无量纲) 为:

$$h_m = \frac{\gamma_R H_R}{2\sigma_c} + \frac{\gamma_S H_S}{\sigma_c} \quad (24)$$

式中: γ_R 为岩体重度; γ_S 为土体重度; H_R 为桩基嵌入岩石深度; H_S 为上覆土层厚度; σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度。

作用在边界条件 1 上的竖直应力 σ_v^* 为:

$$\sigma_v^* = h_m \cos(\eta - \alpha) \quad (25)$$

式中: η 为倾斜基岩坡面角度; α 为虚拟滑动面 (边界条件 1) 与倾斜坡面的夹角。

边界条件 1 上的正应力分量和切应力分量如下:

$$s_1^* = \sigma_v^* \cos(\eta - \alpha) = h_m \cos^2(\eta - \alpha) \quad (26)$$

$$t_1^* = \sigma_v^* \sin(\eta - \alpha) = h_m \sin(\eta - \alpha) \cos(\eta - \alpha) \quad (27)$$

为了确定边界条件 1 上的岩体瞬时内摩擦角 ρ_1 , 需要从 Mohr 应力圆中找出各参数间的关系 (边界条件 1 中 Mohr 应力圆示意图如图 3 所示), 得出边界条件 1 中的应力关系表达式:

$$t_1^2 + (p_1 - s_1)^2 = q_1^2 \quad (28)$$

式中: p_1 和 q_1 分别是边界条件 1 上的平均应力和应力圆半径; s_1 和 t_1 分别是边界条件 1 上的正应力和

切应力。

联立式(26)~(28), 可以将虚拟夹角 α 表示为:

$$\cos^2(\eta - \alpha) = \frac{(p_1^*)^2 - (q_1^*)^2}{2p_1^*h_m - h_m^2} \quad (29)$$

如图3所示, 边界条件1中大主应力与竖向纵轴的夹角 ψ_1 可以由如下关系表示:

$$\psi_1 = \frac{\pi}{2} - (\eta - \alpha) - \varepsilon \quad (30)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{h_m \sin(\eta - \alpha) \cos(\eta - \alpha)}{p_1^* - h_m \cos^2(\eta - \alpha)} \right] \quad (31)$$

式中: ε 为大主应力方向与边界条件1的夹角。

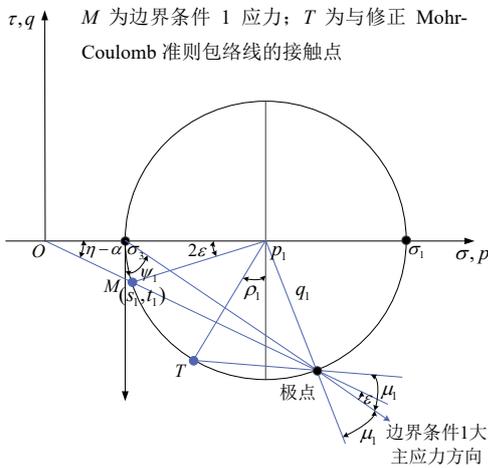


图3 边界条件1中 Mohr 应力圆示意图

Fig. 3 Mohr's stress circle for Boundary 1

由于边界条件2上的大主应力方向为竖直, 即大主应力与竖轴的夹角 $\psi_2 = 0$, 将 ψ_1 和边界条件1上黎曼不变量 $I(\rho_1)$ 代入式(21), 可以得到边界条件2上黎曼不变量 $I(\rho_2)$ 的值, 通过迭代运算可以进一步得到瞬时内摩擦角 ρ_2 的值:

$$\rho_2 = I^{-1}[I(\rho_1) + \psi_1] \quad (32)$$

式中: I^{-1} 为黎曼不变量 $I(\rho)$ 的反函数。

根据式(7)~(8), 可以得到边界条件2上的应力参数 p_2^* 、 q_2^* 。由于 $\psi_2 = 0$, 所以作用在边界条件2上的竖直应力与大主应力相等, 即:

$$\sigma_h^* = p_2^* + q_2^* \quad (33)$$

式中: σ_h^* 为桩端竖直应力(无量纲)。

考虑 DE BEER^[20] 提出的三维空间效应系数 s_β , 可以得到桩端极限承载力系数:

$$N_{\beta p} = s_\beta \sigma_h^* = s_\beta (p_2^* + q_2^*) \quad (34)$$

$$s_\beta = 1 + \tan \rho_m \quad (35)$$

式中: $N_{\beta p}$ 为桩端极限承载力系数; ρ_m 为岩体平均内摩擦角, 可以由下式确定^[13]:

$$\sin \rho_m = \frac{2}{\frac{1}{\sin \rho_1} + \frac{1}{\sin \rho_2}} \quad (36)$$

由此可以得到桩端极限承载力 σ_{hp} 的表达式:

$$\sigma_{hp} = \sigma_c N_{\beta p} = \sigma_c s_\beta (p_2^* + q_2^*) \quad (37)$$

式中: σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度; s_β 为桩基三维形状因子; p_2^* 和 q_2^* 分别是边界条件2上的平均应力和应力圆半径(无量纲)。

2.3 嵌入比推导

假设桩基嵌岩深度为 H_R , 桩径为 B_0 , 根据几何关系以及塑性区定义^[13], 嵌入比 n 的公式如下(见图2和图3):

$$n = \frac{H_R}{B_0} = \frac{OC \sin \alpha}{2OM \cos \eta} = \frac{\sin \alpha}{2 \cos \eta} \times \frac{OC}{OB} \times \frac{OB}{OA} \times \frac{OA}{OM} \quad (38)$$

$$\frac{OC}{OB} = \frac{2 \sin \mu_1 \cos \mu_1}{\sin(\mu_1 + \varepsilon)} \quad (39)$$

$$\frac{OB}{OA} = \sqrt{\frac{q_2 \cos \rho_2}{q_1 \cos \rho_1}} \quad (40)$$

$$\frac{OA}{OM} = \frac{1}{\sin \mu_2} \quad (41)$$

式中: μ_1 、 μ_2 表示特征线族1、2与大主应力之间的夹角, 分别为:

$$\mu_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho_1}{2} \quad (42)$$

$$\mu_2 = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho_2}{2} \quad (43)$$

整理得到桩基嵌入比的表达式为:

$$n = \frac{\sin \alpha \cos \mu_1 \sin \mu_1}{\cos \eta \sin(\mu_1 + \varepsilon) \sin \mu_2} \times \sqrt{\frac{\cos \rho_2 \left[r + n_j - \frac{1}{n_j} \left(\frac{\sin \rho_2}{1 - \sin \rho_2} \right)^2 \right]}{\cos \rho_1 \left[r + n_j - \frac{1}{n_j} \left(\frac{\sin \rho_1}{1 - \sin \rho_1} \right)^2 \right]}} \quad (44)$$

图 4 给出了不同倾斜坡面角度 η 下, 虚拟滑动面与倾斜坡面的夹角 α 和嵌岩桩嵌入比 n 之间的关系, 此时岩体完整性参数 $GSI = 70$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 。在不同平均上覆荷载 h_m 作用下, 嵌入比 n 随虚拟夹角 α 的增大而增大, 当夹角 α 增大到一定值时, 桩端达到极限承载, 此时的嵌入比被称为极限嵌入比, 用 n_L 表示。图 5 给出了不同平均上覆荷载下倾斜坡面角度 η 与极限嵌入比 n_L 关系图, 极限嵌入比 n_L 随平均上覆荷载的增大而减小, 随倾斜坡角的增大而呈幂函数增大。

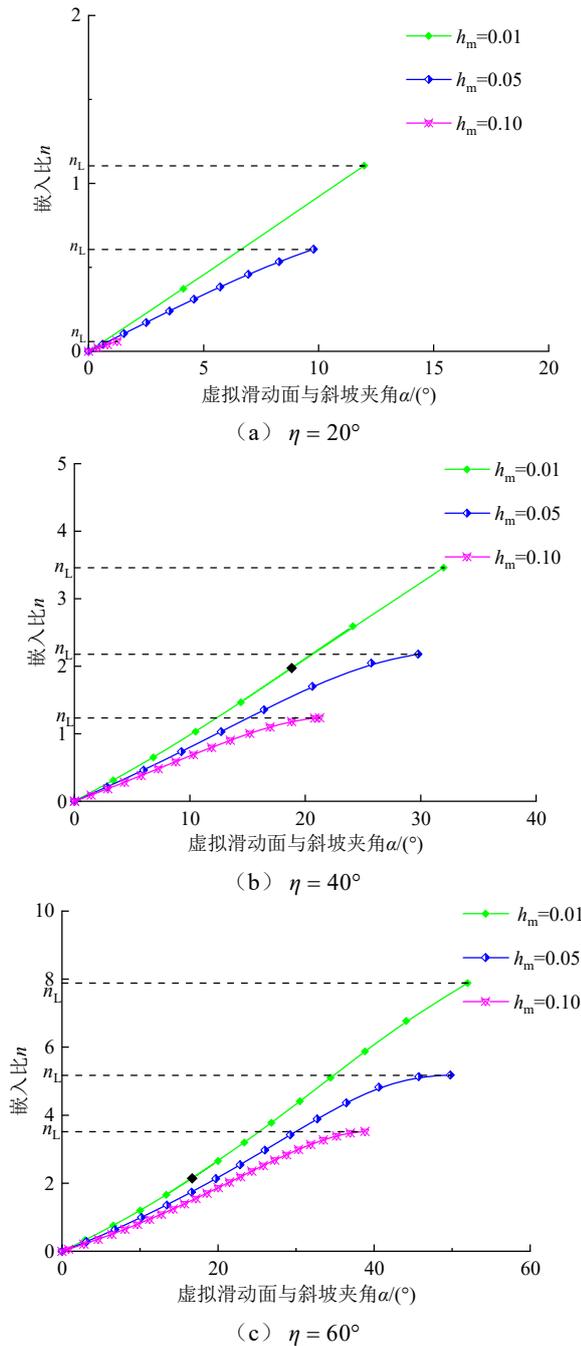


图 4 不同倾斜坡角下虚拟夹角 α 与嵌入比 n 关系图

Fig. 4 Relation between the virtual inclination angle and the embedment ratio for different slope angles

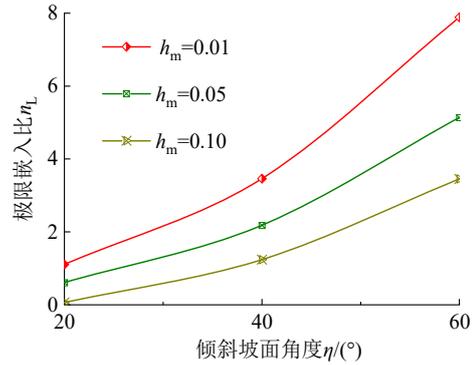


图 5 不同平均上覆荷载下倾斜坡面角度 η 与极限嵌入比 n_L 关系图

Fig. 5 Relation between the slope angle and the limit embedment ratio for different overburden pressure

考虑平均上覆荷载 $h_m = 0.01$, 图 6 给出了岩体内摩擦角 φ 与极限嵌入比 n_L 关系图。可以看出, 当内摩擦角为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时, 极限嵌入比随内摩擦角增大而增大, 在岩石完整性较差时增大更为显著; 极限嵌入比随着岩体完整性参数的增大而减小。

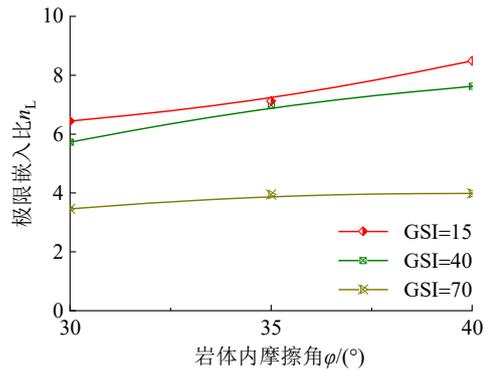


图 6 岩体内摩擦角 φ 与极限嵌入比 n_L 关系图

Fig. 6 Relation between the friction angle and the limit embedment ratio

3 承载力系数分析

为了更好地验证公式的可靠性, 使用 Plaxis 3D 建立相应的模型, 修正 Mohr-Coulomb 强度准则下倾斜基岩桩端承载力理论参数如表 1 所示。

表 1 修正 Mohr-Coulomb 强度准则下倾斜基岩桩端承载力理论参数

Table 1 Theoretical value of calculation parameters for modified Mohr-Coulomb strength criterion

倾斜坡角 $\eta/(^\circ)$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	岩体完整性参数 GSI	岩体重度 $\gamma_R/(kN/m^3)$	岩石单轴抗压强度 σ_c/MPa	桩端承载力系数 $N_{\beta P}$
20	30	70	25	2.5	4.14
40	30	70	25	2.5	3.03
60	30	70	25	2.5	1.58

假设桩的宽度 $B_0 = 1\text{m}$ ，嵌入深度 $H_R = 2\text{m}$ ，此时桩基嵌入比 $n = H_R / B_0 = 2$ 。根据上述条件和参数，当 $\eta = 20^\circ$ 时，桩端承载力系数 $N_{\beta P} = 4.14$ ，此时桩端极限承载力 $\sigma_{hp} = \sigma_c N_{\beta P} = 2.5 \times 4.14 = 10.36\text{MPa}$ ；同理当 $\eta = 40^\circ$ 时，桩端极限承载力 $\sigma_{hp} = \sigma_c N_{\beta P} = 2.5 \times 3.03 = 7.58\text{MPa}$ ；当 $\eta = 60^\circ$ 时，桩端极限承载力 $\sigma_{hp} = \sigma_c N_{\beta P} = 2.5 \times 1.58 = 3.95\text{MPa}$ 。

不同倾斜角度下有限元数值计算桩端位移云图如图 7 所示，当 $\eta = 20^\circ$ 时，桩端极限承载力为 10.8MPa ；当 $\eta = 40^\circ$ 时，桩端极限承载力为 8.2MPa ；当 $\eta = 60^\circ$ 时，桩端极限承载力为 4.0MPa 。桩端承载力理论计算值与有限元计算值对比如图 8 所示，通过比较分析可以得出，在不同坡角下理论计算值均小于有限元计算值，且误差小于 10% 。当坡角 $\eta = 20^\circ$ 时，理论解比有限元数值解小 0.44MPa ；当 $\eta = 40^\circ$ 时，理论解比有限元数值解小 0.62MPa ；当 $\eta = 60^\circ$ 时，理论解比有限元数值解小 0.05MPa 。

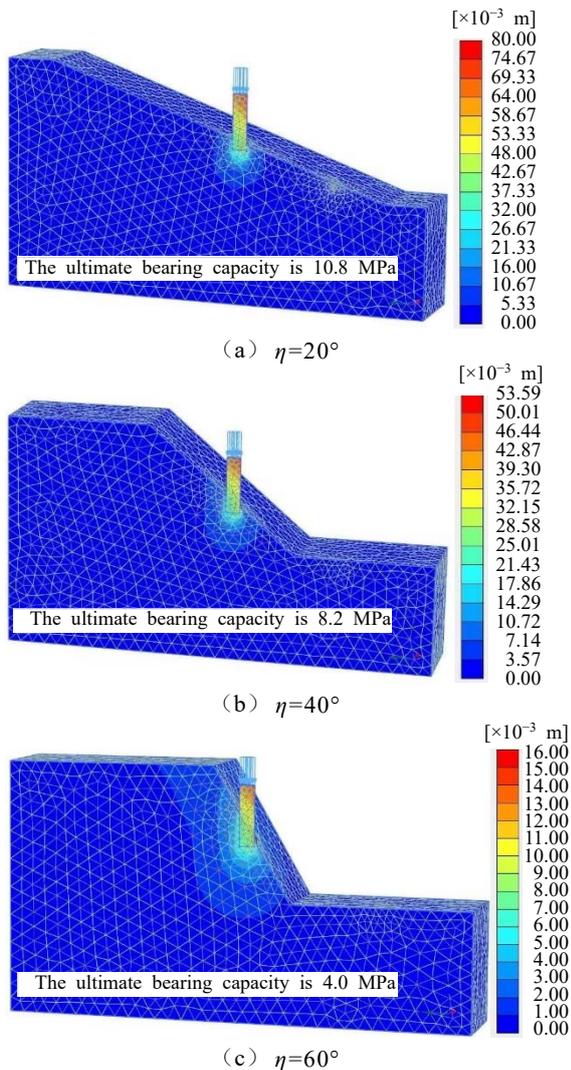


图 7 不同倾斜角度下有限元数值计算桩端位移云图

Fig. 7 Finite element method to calculate the tip displacement for different slope angles

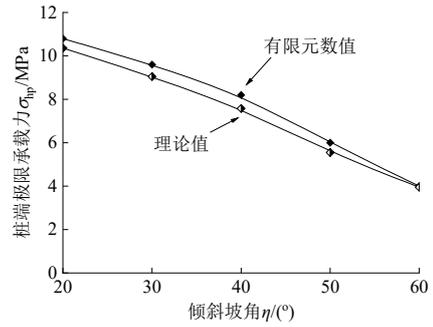


图 8 桩端承载力理论计算值与有限元计算值对比

Fig. 8 Comparison between theoretical and finite element calculation of tip bearing capacity

图 9 为不同岩体完整性参数 GSI 下嵌入比 n 与承载力系数 $N_{\beta P}$ 关系图。承载力系数随嵌入比增大而增大，当嵌入比达到极限值后，承载力系数不再增大。当倾斜坡角 η 不变时，随着岩体完整性参数的增大，桩端承载力系数加速增大。

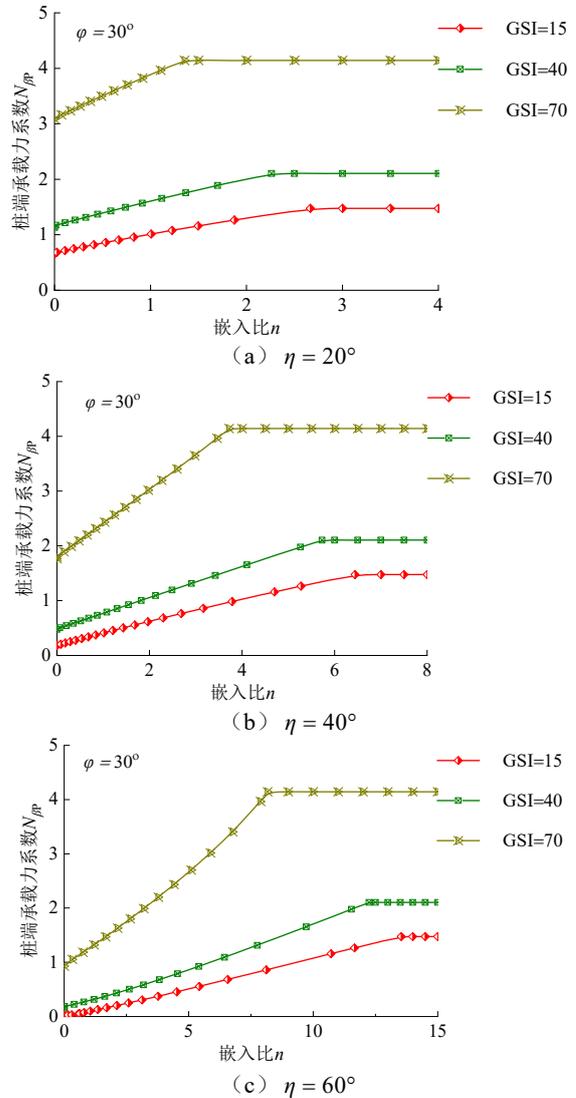


图 9 不同岩体完整性参数 GSI 下嵌入比 n 与承载力系数 $N_{\beta P}$ 关系图

Fig. 9 Relation between the load factor and the embedment ratio for different values of GSI

图 10 反映了相同嵌入比下桩端承载力系数 $N_{\beta P}$ 与倾斜坡角 η 的关系。嵌入比小于极限嵌入比时, 桩端承载力系数随倾斜坡角的增大近似线性减小; 当嵌入比大于极限嵌入比时, 桩端承载力系数不再受倾斜坡角和嵌入比的影响。

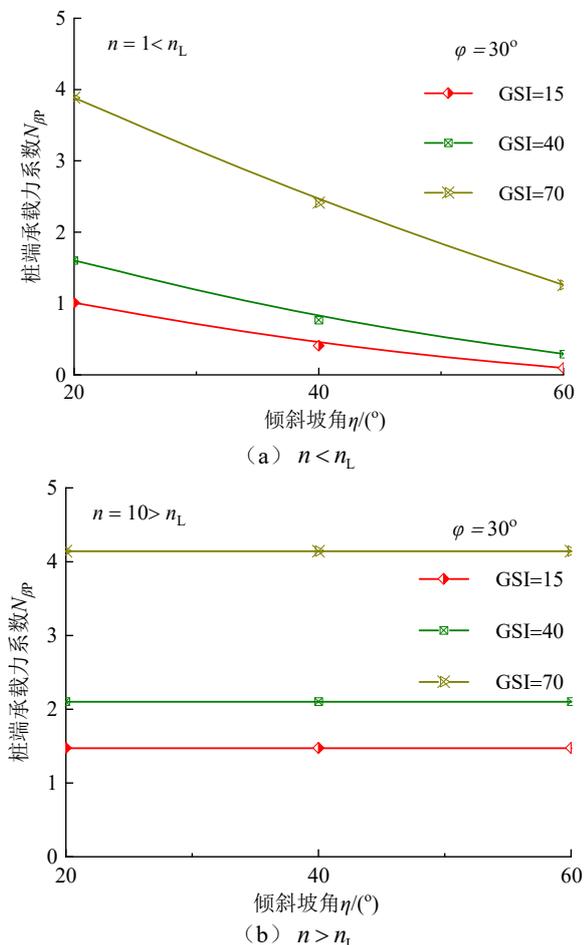


图 10 桩端承载力系数 $N_{\beta P}$ 与倾斜坡角 η 关系图

Fig. 10 Relation between the load factor and the slope angle

4 结 论

本文基于修正 Mohr-Coulomb 强度准则, 使用特征线法推导求解了倾斜岩质边坡中浅嵌岩桩的桩端极限承载力公式, 并研究了在不同倾斜基岩角度下岩体完整性参数、内摩擦角等对桩端承载力的影响。主要结论如下:

(1) 在超浅嵌入 (SS) 破坏模式下, 嵌岩桩存在一个极限嵌入比, 嵌入比达到极限嵌入比时, 桩基达到极限承载力; 当嵌入比大于极限嵌入比时, 桩端承载力系数不受倾斜坡角和嵌入比的影响, 此时可按平地基岩情况进行计算分析。

(2) 极限嵌入比随倾斜坡角的增大呈幂函数增大, 随岩体完整性参数的增大而减小; 岩石完整

性较差时, 极限嵌入比随岩体内摩擦角的增大而显著增大。

(3) 当嵌入比小于极限嵌入比时, 桩端承载力系数随倾斜坡角的增大近似线性减小, 需考虑岩面倾角变化对桩基承载力的影响。

参考文献

- [1] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 31(2): 93-106.
- [2] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass. Part I: Basic modes of failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3): 301-324.
- [3] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass. Part II: Determination procedure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3): 325-348.
- [4] SERRANO A, OLALLA C, GONZÁLEZ J. Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 1013-1018.
- [5] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI—2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445-463.
- [6] YANG X L, YIN J H. Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(4): 550-560.
- [7] YANG X L, YIN J H. Linear Mohr-Coulomb strength parameters from the non-linear Hoek-Brown rock masses[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2006, 41(8): 1000-1005.
- [8] GALINDO R A, SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity of rock masses based on modified Mohr-Coulomb strength criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93: 215-225.
- [9] 史佩栋, 梁晋渝. 嵌岩桩竖向承载力的研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 32-39.
- [10] SHI Peidong, LIANG Jinyu. Vertical bearing capacity of rock-socketed piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 32-39.
- [10] 赵明华, 雷勇, 马缤辉. 基于 Hoek-Brown 强度准则的

- 嵌岩桩极限承载力确定[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1058-1064, 1074.
- ZHAO Minghua, LEI Yong, MA Binhui. Determination of ultimate bearing capacity of rock-socketed pile based on H-B strength criterion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1058-1064, 1074.
- [11] 张琦, 刘军, 戴国亮, 等. 大直径嵌岩桩桩端极限承载力计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 118-124.
- ZHANG Qi, LIU Jun, DAI Guoliang, et al. Calculation methods for ultimate end bearing capacity of large diameter rock-socketed piles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(1): 118-124.
- [12] 周洁, 任君杰, 李泽垚, 等. 嵌岩桩单桩竖向承载力计算方法研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15301-15313.
- ZHOU Jie, REN Junjie, LI Zeyao, et al. Calculation method of vertical ultimate bearing capacity of rock-socketed pile[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15301-15313.
- [13] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock—part 1: theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(7): 833-846.
- [14] SERRANO A, OLALLA C. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock—part 2: application[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(7): 847-866.
- [15] SERRANO A, OLALLA C, GALINDO R A. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock based on the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 83-90.
- [16] CAI Y Q, XU B, CAO Z G, et al. Solution of the ultimate bearing capacity at the tip of a pile in inclined rocks based on the Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125(1): 104140.
- [17] CAO Z G, XU B, CAI Y Q, et al. Application of the modified Hoek-Brown criterion in the analysis of the ultimate bearing capacity at the tip of a pile in inclined rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 160: 105276.
- [18] SINGH M, RAJ A, SINGH B. Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48: 546-555.
- [19] SINGH M, SINGH B. Modified Mohr-Coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of jointed rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 51: 43-52.
- [20] DE BEER E E. Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand[J]. Géotechnique, 1970, 20(4): 387-411.