

文章编号:1673-2049(2016)04-0036-08

考虑层面滑移条件的软弱夹层极限荷载分析

殷 勇^{1,2}, 乔来军³, 周国庆¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 3. 中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司平顶山分公司, 河南 平顶山 467002)

摘要:针对现有岩土体中软弱夹层的极限荷载计算理论无法全面考虑层面滑移条件,且多数理论采用金属材料屈服准则,并不适用于具有内摩擦特性的岩土材料的问题,基于 Prandtl 塑性挤出破坏模式,采用主应力法和摩尔-库仑屈服准则,分析了 3 种层面滑移条件下软弱夹层极限荷载的变化规律及 3 种滑移条件的适用范围,得到了相应的极限荷载计算公式,并将其与薄层挤压理论及 Prandtl 理论进行了对比,指出了所述方法适用的夹层宽厚比范围。结果表明:软弱夹层的极限荷载随夹层宽厚比、强度参数、摩擦因数的增加而增大,但摩擦因数高于一定值以后极限荷载不再随之变化;夹层面滑移条件在强度较低时对极限荷载的影响不明显,极限荷载主要受夹层材料强度参数控制;软弱夹层强度逐渐提高时,夹层面的滑移条件对极限荷载的影响逐步变大,尤其在夹层宽厚比较大时更为显著;提出的极限荷载计算公式能较明确地反映夹层面滑移条件对极限荷载的影响,可以为岩土体中软弱夹层的稳定性分析提供参考。

关键词:软弱夹层;塑性挤出破坏;主应力法;屈服准则;滑移条件;极限荷载

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Ultimate Load Analysis of Soft Interlayer Considering Slip Plane Conditions

YIN Yong^{1,2}, QIAO Lai-jun³, ZHOU Guo-qing¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Civil Engineering Department, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China; 3. Pingdingshan Branch of Beijing Huayu Engineering Co., Ltd., Sino-coal International Engineering Group, Pingdingshan 467002, Henan, China)

Abstract: Aimed at the problems that some available calculation theories of ultimate load to soft interlayer could not fully take into account of the slip plane conditions and most of these theories adopted metal yielding criteria, not suit for geo-materials with internal friction characteristics, based on Prandtl's plastic extrusion failure mode, the variation law of ultimate load of soft interlayer under three slip conditions and the applicable scopes of these slip conditions were analyzed with the main stress method and the Mohr-Coulomb yielding criteria. Meanwhile, the relevant formulas for ultimate load were also deduced. The solutions were contrasted with those of thin-layer extrusion theory and Prandtl's squeezing theory, and the appropriate scope of flakiness ratios of the proposed method was also suggested. The results show that the ultimate load of soft interlayer is enhanced with the increment of flakiness ratio, strength parameter and

收稿日期:2016-02-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB026103)

作者简介:殷 勇(1980-),男,江苏盐城人,盐城工学院讲师,中国矿业大学工学博士研究生,E-mail:15252003639@126.com。

friction coefficient. However, as the friction coefficient increases to a certain value, the ultimate load will not be varied anymore. The effect of slip conditions on ultimate load is not obvious when the strength parameter is low, and the ultimate load is controlled mainly by strength parameters. While the strength of soft interlayer increasing gradually, the influence of slip conditions on ultimate load is enhanced steadily, it is even more significant especially with a higher value of flakiness ratio. The proposed formula can reflect the effect of surface slip conditions to the ultimate load of soft interlayer more definitely, and can contribute references to the stabilization analysis of soft interlayer in rock-soil mass.

Key words: soft interlayer; plastic extrusion failure; main stress method; yielding criteria; slip condition; ultimate load

0 引言

软弱夹层是广泛存在于岩土体中的一类地质构造,其厚度比相邻岩土层小且变化不均,从几厘米至数米都有。经过局部处理(如加筋垫层、换填)以后的软土地基或下卧浅层基岩的浅基础地基也会形成类似的软弱夹层结构。由于软弱夹层的力学性质明显低于相邻岩土层,其成为控制岩土体稳定的重要因素,在边坡、地基、地下隧道、采矿等工程中的研究逐渐引起重视。针对软弱夹层的研究目前多数是从结构面角度分析夹层的存在对拟建结构物的影响,如对边坡的稳定分析^[1]、对浅埋隧道的变形影响^[2]、对地下洞室围岩稳定影响^[3]等,而从软弱夹层自身承载稳定性角度进行的研究则不多见。

在基础工程中,浅部的软弱夹层可以采用换填、化学加固等地基处理的方法解决,但软弱夹层埋藏较深或不宜处理时,软弱夹层的承载特性对上部结构物稳定性的影响就显得至关重要。现有的软弱夹层极限荷载分析方法多数源自薄层金属材料轧制,本身存在屈服条件与岩土材料不符的问题。此外,软弱夹层宽厚比一般较大,极限状态时夹层面的滑移条件对其极限荷载的影响较为显著,现有的大部分极限荷载计算理论并未完全考虑到这方面的影响,而统一按照完全粗糙的层面摩擦条件建立分析模型。部分计算理论虽然考虑到不同的层面滑移条件,但在确定夹层面不同区段的滑移条件时带有较大的经验性,没有充分的计算依据,给软弱夹层的极限荷载计算带来较大的不确定性。因此,软弱夹层的极限荷载分析还需要考虑更为实用和可靠的方法。本文中拟采用 Prandtl 理论分析的基本模型,考虑挤压平面上的不同滑移条件,根据岩土材料的屈服条件和主应力法对软弱夹层的极限荷载进行分析,得到软弱夹层极限荷载的工程实用计算公式,并

与其他理论的解答进行对比。

1 软弱夹层的破坏模式

含有软弱夹层的地基,包括采用加筋垫层局部换填形成的软弱夹层结构,本质上属于层状非均质地基,对其极限荷载的求解是经典的岩土力学问题。在这方面目前常见的研究方法包括根据强度理论进行分析(极限平衡法、极限分析法、滑移线法等)和数值计算方法分析两大类。数值计算方法近年来虽然发展很快也很方便,但用于软弱夹层极限荷载分析仍存在大变形时极限状态评判标准不易确定、本构模型适用性窄的问题^[4]。按照强度理论计算非均质地基的极限荷载已经有不少理论公式提出^[5],这些公式在推导过程中假定非均质地基为上硬下软或上软下硬的结构,其破坏模式仍然为均质地基中的整体剪切破坏、局部剪切破坏、冲剪破坏 3 类,形成的理论公式多数是基于均质地基极限承载力公式进行修正得到,适用于软弱夹层较厚的层状地基。

实际上,除了根据 3 类常规破坏模式进行极限荷载的分析外,对于厚度相对较薄的软弱夹层,由于其力学性能一般显著低于邻近岩土层,因此极限状态下不能排除夹层沿上下岩土层面发生塑性挤出的破坏模式。中国《土工合成材料应用技术规范》(GB 50290—98)^[6]、《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T 225—98)^[7]、《化工建(构)筑物地基加筋垫层技术规程》(HG/T 20708—2011)^[8]对加筋垫层下的软弱夹层均提到塑性挤出破坏模式,要求按此破坏模式进行夹层的稳定性验算。孙广忠^[9]分析了岩体结构面内充填物厚度的力学效应,认为岩体内存在有厚层软弱夹层时,其破坏方式已不再是上覆岩块沿结构面滑移,而是软弱夹层以塑性流动方式沿夹层面挤出,从而导致岩体大规模破坏。张道宽^[10]对织物增强软土路基下薄层软土塑性挤

出的破坏模式进行了研究,认为宽厚比大于 $\sqrt{2}$ 可作为区分夹层塑性挤出破坏的粗略判别条件。Christopher 等^[11]在描述美国规范用于土工合成材料加固软土路堤的承载力验算时,认为下卧软土夹层相对堤宽较薄时应该考虑软土侧向挤出的破坏模式,而不能沿用传统的承载力计算方法。Azam 等^[12]对双层地基上条形基础承载力研究时也指出下卧基岩位置的变化会导致不同的地基破坏模式,从而影响地基的极限荷载。

对于软弱夹层发生塑性挤出的破坏模式,Prandtl^[13]首次对类似的夹层材料挤压问题进行了研究,提出了 2 个粗糙平面间塑性材料的挤压力解答。张国霞^[14]基于这一解答提出薄层挤压理论,王步云^[15]根据薄层挤压理论对加筋地基下软弱夹层的稳定性进行了分析,同时薄层挤压理论也被《化工(构)筑物地基加筋垫层技术规程》所采用。这些理论用于软弱夹层的极限荷载分析时均采用侧向塑性挤出的破坏模式,假定夹层面完全粗糙,但没有考虑夹层面滑移条件变化对夹层面剪应力分布及极限荷载的影响。

2 夹层结构的挤压问题

Prandtl 挤压理论针对刚塑性材料的平面应变问题,假定接触面完全粗糙,即夹层材料与上下刚性压板间完全粘着,没有相对滑动,压板界面上的剪应力为材料屈服强度,极限状态为材料发生塑性挤出破坏(图 1,其中, t 为软弱夹层厚度, b 为夹层宽度, \bar{P} 为平均极限荷载)。

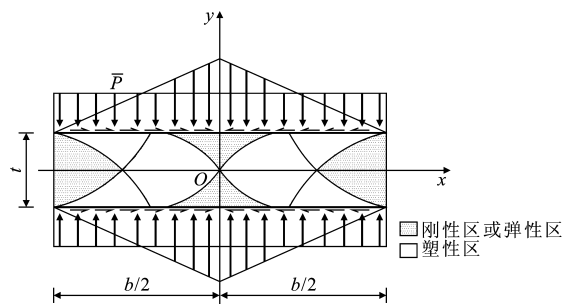


图 1 Prandtl 挤压模型

Fig. 1 Prandtl Squeezing Model

根据塑性极限平衡理论,由平衡方程及屈服条件解得板面竖向应力分量 σ_y 为^[13-14]

$$\sigma_y = -\frac{kx}{h} + C \quad (1)$$

式中: k 为材料屈服强度,对软土可取 $k=c$ (粘聚力); C 为常数项, $C=bc/t$; h 为挤压材料一半厚度,

即 $h=t/2$ 。

板下压力沿边缘至其中心呈三角形分布,压力分布线斜率为 $\Delta P/\Delta x = -2c/t$ 。

Hill^[16]根据水平推力与板面摩擦阻力相平衡的边界条件,假设板面完全粗糙且剪应力 τ 恒定 ($\tau=k$),得到挤压应力的一个解答为

$$\sigma_y = \frac{\pi k}{2} + \frac{k(b-2x)}{2h} \quad (2)$$

薄层挤压理论认为夹层边缘恒压段宽 b_0 范围内存在不受摩擦作用的恒压段,参考基底光滑的条形基础承载力算法,其极限压力采用 $P_0=(\pi+2)c$,向内 $b/2-b_0$ 段极限压力仍以 $-2c/t$ 的斜率增加至 P_m (图 2)。

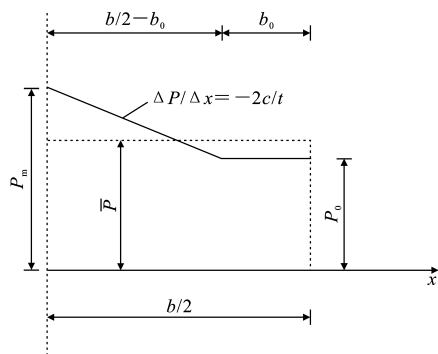


图 2 薄层挤压理论解答

Fig. 2 Solution of Thin-layer Squeezing Theory

不考虑上覆土重时,软弱夹层(内摩擦角 $\varphi=0^\circ$ 时)平均极限荷载 \bar{P} 为^[14]

$$\bar{P} = N_m c \quad (3)$$

式中: N_m 为承载力系数, $N_m = 2 + \pi + (2b - 4b_0)^2 / (bt)$ 。

此外,薄层挤压理论基于 Prandtl 解答还针对内摩擦角 $\varphi \neq 0^\circ$ 的软弱夹层极限荷载提出了相应的计算公式^[8,14]。由上述内容可以看出,薄层挤压理论改变了 Prandtl 挤压模型边缘的部分滑移条件,假设边缘存在部分恒压段建立了极限荷载的计算公式,然而对于边缘恒压段是否可以考虑为完全的光滑界面还不能证实,而且边缘恒压段宽 b_0 也是按照经验取值,没有进一步明确。实际上由式(3)可以看出,薄层挤压理论中板面恒压段的扩大会明显降低夹层的极限压力,反映了不同的滑移摩擦条件对极限压力的影响。文献[5]在几种常规地基承载力计算方法的讨论中也指出,不同的基底摩擦条件会对地基的极限承载力产生影响。另外,不少学者在金属板料成形过程中对类似的挤压模型采用不同的层面滑移条件进行了分析^[17-22],Estelle 等^[23]研究了 2

块透明圆板挤压薄橡皮泥材料过程中的板面滑移条件,这些成果虽考虑到不同的层面滑移条件,但在层面上仍采用位置相对固定的滑移摩擦条件,而且对挤压力求解采用金属材料适用的 Tresca 或 Mises 屈服准则,不适用于岩土材料。

以下围绕软弱夹层面不同的滑移条件,采用 Prandtl 平面应变挤压模型对软弱夹层的极限荷载问题进行分析。

3 不同滑移条件下的极限荷载分析

假定厚度为 h 、宽度为 b 的夹层材料位于 2 个刚性平板之间(图 3,其中 σ_x 为 x 方向的应力, τ_t 为静止摩擦力),夹层材料为不考虑自重的刚塑性材料,垂直于 x 轴的平面上所有点的应力 σ_x 均相同,取出一块微单元根据其水平方向平衡条件可得

$$h d\sigma_x + 2\tau_t dx = 0 \quad (4)$$

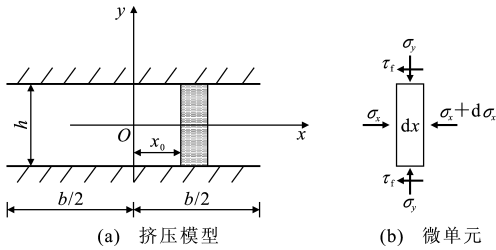


图3 软弱夹层挤压模型

Fig. 3 Squeezing Model of Soft Interlayer

采用工程塑性理论主应力法的基本假定^[24],简化 Mohr-Coulomb 屈服条件为

$$\sigma_y = m\sigma_x + \frac{2ccos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

即

$$d\sigma_y = m d\sigma_x \quad (5)$$

式中: $m = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$ 。

将式(5)代入式(4)得

$$d\sigma_y + \frac{2m\tau_t}{h} dx = 0 \quad (6)$$

式(6)为单元平衡的一般微分方程式,可以根据不同的层面滑移条件求解挤压应力 σ_y 。

(1)层面符合滑动摩擦滑移关系 $\tau_t = f\sigma_y$, f 为滑动摩擦因数。

根据式(6)可得

$$d\sigma_y + \frac{2fm\sigma_y}{h} dx = 0 \quad (7)$$

对式(7)进行积分后得到层面挤压应力

$$\sigma_y = c_1 e^{\frac{2fm}{h} x} \quad (8)$$

式中: c_1 为积分常数,可根据边界条件 $\sigma_x|_{x=b/2} = 0$ 及式(5)确定,由此可得 $c_1 = \frac{2ccos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} e^{\frac{fmb}{h}}$ 。

最终层面挤压应力为

$$\sigma_y = \frac{2ccos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} e^{\frac{fmb(b-2x)}{h}} \quad (9)$$

对式(9)层面挤压应力进行积分后可得到层面全部采用滑动摩擦滑移条件时夹层材料的极限荷载 P 为

$$P = \frac{2ccos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \frac{h}{fm} (e^{\frac{fmb}{h}} - 1) \quad (10)$$

(2)层面符合静止摩擦滑移关系 $\tau_t = c + \sigma_y \cdot \tan(\varphi)$, 即塑性挤出由夹层材料发生剪切破坏引起。

根据式(6)可得

$$h d\sigma_y + 2m(c + \sigma_y \tan(\varphi)) dx = 0 \quad (11)$$

对式(11)积分得到层面挤压应力为

$$\sigma_y = c_2 e^{-\frac{2m \tan(\varphi)x}{h}} - c \cot(\varphi) \quad (12)$$

式中: c_2 为积分常数。

由边界条件 $\sigma_x|_{x=b/2} = 0$ 及屈服条件式(5),解得积分常数 $c_2 = cm \cot(\varphi) e^{\frac{mb \tan(\varphi)}{h}}$, 层面挤压应力为

$$\sigma_y = c \cot(\varphi) [m e^{\frac{m \tan(\varphi)(b-2x)}{h}} - 1] \quad (13)$$

对式(13)压力积分后可得到层面全部采用静止摩擦滑移条件时夹层材料的极限荷载 P 为

$$P = c \cot(\varphi) [h \cot(\varphi) (e^{\frac{mb \tan(\varphi)}{h}} - 1) - b] \quad (14)$$

(3)层面符合混合滑移条件。

极限状态时软弱夹层发生向两侧的塑性流动,由于夹层面存在摩擦效应,两侧的滑动位移远大于中间部分,即中心轴附近存在不易沿夹层面滑动的粘滞区,如图 1 所示的刚性区或弹性区,同时层面间的摩擦力一旦超过材料的剪切强度,塑性流动时剪切滑移便在层面附近的材料中形成。因此,可以认为夹层发生侧向塑性挤出时中心轴附近的刚性区层面间属于静止摩擦滑移关系,其两侧一定范围至层面外缘属于滑动摩擦滑移关系。这一情形相当于层面的真实滑移条件由中心轴附近的静止摩擦滑移和两侧滑动摩擦滑移组合而成,材料的剪切强度是这 2 种滑移条件的分界值。根据滑移分界点处滑动摩擦力与材料剪切强度相等的关系,即 $f\sigma_y = c + \sigma_y \tan(\varphi)$, 可以解得分界点处竖向应力分量 σ_y 为

$$\sigma_y|_{x=x_0} = \frac{c}{f - \tan(\varphi)} \quad (15)$$

由式(15)及式(9)可知滑移条件的分界点位置 x_0 (距 y 轴距离)为

$$x_0 = \frac{b}{2} - h \ln\left(\frac{1 - \sin(\varphi)}{2f \cos(\varphi) - 2\sin(\varphi)}\right) / (2fm) \quad (16)$$

因此,采用混合滑移条件分析层面极限压力时,在 $x_0 \leq x \leq b/2$ 的层面范围内可以采用滑动摩擦滑移条件,该区域的挤压应力可采用式(9)计算;在 $0 \leq x \leq x_0$ 的层面范围内可以采用静止摩擦滑移条件,该区域的挤压应力分布可采用式(12)计算。为保证区段分界点处应力的一致性,对于 $0 \leq x \leq x_0$ 区段,利用式(15)作为边界条件,可得到式(12)的积分常数 c_2 为

$$c_2 = \frac{cf \cot(\varphi)}{f - \tan(\varphi)} e^{\left[\left(\frac{bm \tan(\varphi)}{h} - \frac{\tan(\varphi)}{f} \ln \left(\frac{1 - \sin(\varphi)}{2f \cos(\varphi) - 2\sin(\varphi)} \right) \right) \right]} \quad (17)$$

因此, $0 \leq x \leq x_0$ 区段的层面压力可按式(12)计算。最后,按 x_0 位置进行分段积分得到混合滑移条件下的层面极限荷载为

$$P = \frac{c_2 h}{m \tan(\varphi)} (1 - e^{\frac{-2m \tan(\varphi) x_0}{h}}) - 2c x_0 \cot(\varphi) + \frac{2ch \cos(\varphi)}{(1 - \sin(\varphi)) f m} [e^{\frac{fm(b-2x_0)}{h}} - 1] \quad (18)$$

值得注意的是,根据前述分析及式(15),(16)可知,混合滑移条件中 x_0 的确定只有在 $f > \tan(\varphi)$ 时才有意义,当 $f \leq \tan(\varphi)$ 即 $f\sigma_y \leq c + \tan(\varphi)\sigma_y$ 时,极限状态下只能发生沿夹层面的滑动摩擦滑移。

因此,对于 $f > \tan(\varphi)$ 且 $x_0 \leq 0$ 的情况,层面可全部按照滑动摩擦滑移条件考虑,由式(16)可知需要满足

$$\frac{b}{h} \leq \ln \left(\frac{1 - \sin(\varphi)}{2f \cos(\varphi) - 2\sin(\varphi)} \right) / (fm) \quad (19)$$

给定层面的滑动摩擦因数及软弱夹层的内摩擦角后只要软弱夹层的宽厚比在一定的范围内就可按照这种滑移关系进行极限压力的分析。对于 $f > \tan(\varphi)$ 且 $x_0 \geq b/2$ 的情况,层面上的滑移关系可全部按照静止摩擦滑移条件考虑,由式(16)可知此时需要满足的条件为

$$\ln \left(\frac{1 - \sin(\varphi)}{2f \cos(\varphi) - 2\sin(\varphi)} \right) \leq 0 \quad (20)$$

式(19),(20)分别对应了混合滑移条件的2种极端情况,对于中间存在弹性核或刚性核的塑性挤出情形,层面一般既有静止摩擦滑移条件又有滑动摩擦滑移条件存在,此时采用混合滑移条件分析夹层面极限压力比较符合实际。此外,前述各种夹层面滑移条件下求解极限压力及极限荷载的思路同样适用于无内摩擦的材料($\varphi = 0^\circ$)。

4 结果分析与讨论

由前述分析过程可以看出,软弱夹层的极限荷载主要受夹层宽厚比、材料强度参数、夹层面的摩擦

因数3类因素影响,实际工程中对于夹层宽厚比和强度参数均能获得较可靠的数据,但夹层面的摩擦因数是一个不易准确测得的参数,其取值受夹层上下岩土层性质与夹层自身性质的影响^[25-27]。文献[5]总结了常用的工程设计规范中土工结构物基底摩擦因数的取值情况,对于不同的土质,基底摩擦因数的变化范围一般在0.25~0.75之间。为便于分析比较,不失一般性,取软弱夹层厚度 $h = 2$ m,宽度 $b = 2 \sim 20$ m,软弱夹层与上下岩土层面的摩擦因数 $f = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 。为了反映夹层材料强度变化对极限荷载的影响,取软弱夹层 $c = 10$ kPa, $\varphi = 10^\circ, 13^\circ, 16^\circ, 19^\circ$ 逐步变化。

采用不同滑移条件计算的夹层面极限荷载如图4所示。由图4可知: $f = 0.2 \sim 1.0$ 的结果为本文方法解答,其中对于夹层面全部满足滑动摩擦滑移条件、全部满足静止摩擦滑移条件以及满足混合滑移条件的情形分别计算相应的极限荷载;同时对按薄层挤压理论(考虑土体内摩擦角)文献[8],[14],[15]、Prandtl 解答式(1)、Hill 解答式(2)计算的极限荷载进行对比。

由图4还可以看出,除了薄层挤压理论得到的部分极限荷载随宽厚比增加而有所减小外(宽厚比小于2),总体上各种方法解得的极限荷载均随软弱夹层的宽厚比增加而增大。

按本文方法计算软弱夹层极限荷载时,层面的滑移条件可首先根据宽厚比、强度参数、层面摩擦因数确定,在此基础上进一步得到其极限荷载。当夹层面摩擦因数 $f = 0.2$ 时,因在各种强度参数下夹层面全部符合滑动摩擦滑移条件,相应的极限荷载取值较低。随着夹层面摩擦因数增大,夹层面滑移条件由滑动摩擦滑移转变为混合滑移条件直至静止摩擦滑移条件,即在夹层面附近发生强度剪切破坏的情形逐步多于沿层面的滑动破坏,相应的极限荷载有不同程度的提高。由计算结果可以看出,在各强度参数和宽厚比条件下, f 达到0.6以上时极限荷载几乎不再随摩擦因数变化,此时层面全部产生静止摩擦滑移条件,层面摩擦因数不再对极限荷载有贡献,极限荷载由夹层强度及宽厚比控制。

此外,计算结果显示,随着软弱夹层强度的变化,层面滑移条件对极限荷载的影响程度并不相同。当软弱夹层材料强度参数较低时,其极限荷载受摩擦因数的影响并不显著[图4(a)],此时软弱夹层面多数符合静止摩擦滑移条件或混合滑移条件,相应的极限荷载主要取决于夹层材料的强度。当软弱夹

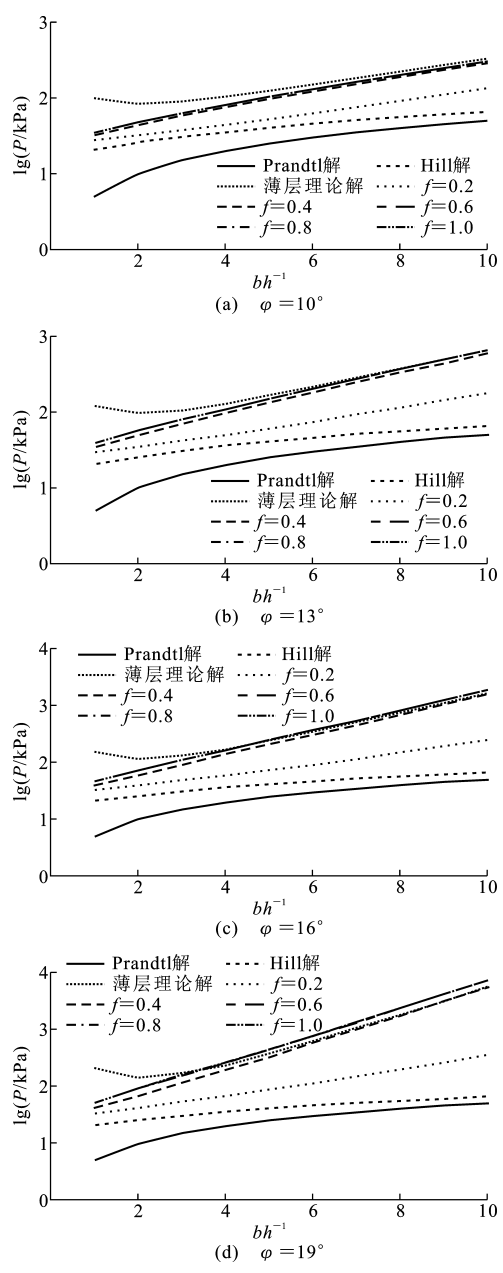


图 4 极限荷载随宽厚比及摩擦因数的变化
Fig. 4 Variations of Ultimate Loads with Aspect Ratios and Friction Factors

层的强度逐步提高时,不同摩擦因数条件下夹层面发生滑动摩擦滑移的情形逐步增加,此时软弱夹层面多数符合滑动摩擦滑移条件,相应的极限荷载受摩擦因数的影响逐渐增大,而且这一影响趋势随夹层宽厚比的增加逐步明显[图 4(d)]。

Prandtl 解答、Hill 解答及薄层挤压理论解答均假定层面完全粗糙,计算极限荷载时采用了恒定的夹层强度作为静止摩擦滑移条件。其中 Prandtl 解答、Hill 解答因未考虑土体内摩擦角,各种条件下计算结果相同且均偏小。薄层挤压理论解答在宽厚比大于 3 时与本文采用较高摩擦因数条件下的解答较

为一致,但当软弱夹层强度较低($\varphi=10^\circ$)时,薄层挤压理论计算结果略高于本文方法结果,当软弱夹层强度较高($\varphi=19^\circ$)时,薄层挤压理论计算结果略低于本文方法结果。随着软弱夹层强度的增加,本文采用较高夹层面摩擦因数的解答逐步高于薄层理论的结果,且其差值随材料强度的提高而变大,反映了夹层面滑移条件的变化对极限荷载的影响。

考虑到宽厚比小于 3 时本文解答与薄层挤压理论解答有较大的相对误差,且宽厚比越小, φ 值越低,差值越大(最大约 24%),因此本文计算方法适用于宽厚比大于 3 的软弱夹层。

5 工程案例

采用文献[14]中箱型基础下软弱夹层的工程参数,根据本文方法进行软弱夹层的极限荷载分析。该工程箱型基础宽度为 22 m,软弱下卧层至基底距离为 5 m,其间土重为 49.8 kPa。基底压力为 550 kPa,软弱夹层承载力为 230 kPa,相关计算参数见表 1^[14]。按常规软弱下卧层承载力验算方法可知该软弱下卧层顶面基底压力不能满足工程要求。按照本文软弱夹层的侧向挤出破坏模式进行承载力计算的结果对比如图 5 所示,其中考虑夹层面完全粗糙的薄层挤压理论解答即为文献中的结论(不计上覆土重)。

表 1 软弱夹层计算参数			
Tab. 1 Calculation Parameters of Soft Interlayer			
厚度/m	宽度/m	粘聚力 c_u /kPa	内摩擦角 $\varphi_u/(^\circ)$
4.5	22	120	10

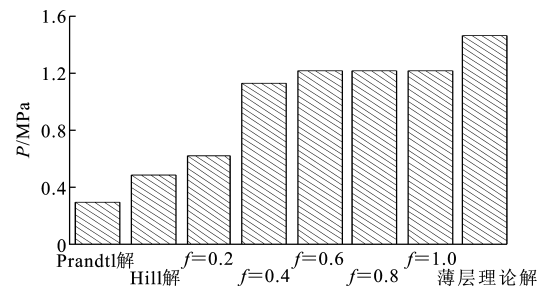


图 5 计算结果对比
Fig. 5 Comparison of Calculation Results

Prandtl 解答及 Hill 解答因不能考虑内摩擦角的影响,其计算值偏低。本文考虑夹层面滑移条件的解答随摩擦因数的增加而增大,夹层的挤出破坏模式由滑动摩擦滑移破坏($f=0.2$)逐步过渡到静止摩擦滑移破坏($f=0.6$),其极限荷载在 $f=0.6$ 时达到峰值并保持恒定。本文计算结果虽低于薄层挤压理论解答,但在不考虑上覆土重且夹层面按照

完全粗糙条件($f=1.0$)时,安全系数取 2.0,软弱夹层的极限荷载为 607.8 kPa,已经满足软弱夹层顶面计算压力 599.8 kPa 的要求。

因此,对于存在软弱夹层的地基稳定问题,软弱夹层的极限承载力验算宜考虑其塑性挤出破坏模式及夹层面的滑移条件,并采用相应的极限荷载分析方法进行承载力的验算,以便于地基的优化设计。

6 结 语

(1)基于软弱夹层的侧向塑性挤出破坏模式,建立了不同滑移条件下软弱夹层的极限荷载实用计算公式,同时分析了采用滑动摩擦滑移条件、静止摩擦滑移条件、混合滑移条件进行极限荷载求解的适用条件。

(2)对各种滑移条件下软弱夹层极限荷载计算结果的分析表明,软弱夹层的极限荷载随夹层宽厚比、强度参数、层面摩擦因数的增大而提高,但摩擦因数增加至 0.6 后对极限荷载没有影响。

(3)低强度的软弱夹层极限荷载受滑移条件的影响较小,其极限荷载主要受夹层强度控制;强度较高时其极限荷载受夹层面滑移条件影响变大,尤其是宽厚比尺度较大时不能忽视夹层面的粗糙程度对软弱夹层极限荷载的影响。

(4)通过与考虑夹层面完全粗糙的其他理论计算结果进行对比可知,本文方法适用于宽厚比大于 3 的软弱夹层极限荷载分析。所得结论可以为岩土体结构中软弱夹层的稳定性分析提供一定的参考,较之于薄层挤压理论、Prandtl 挤压理论等能更明确地考虑夹层面上的滑移条件对极限荷载的影响。

参考文献:

References:

[1] 王浩然,黄茂松,刘怡林.含软弱夹层边坡的三维稳定性极限分析[J].岩土力学,2013,34(增2):156-160.
WANG Hao-ran, HUANG Mao-song, LIU Yi-lin. Three-dimensional Stability Analysis of Slope with Weak Interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2):156-160.

[2] 吴旭平,杨新安,李亚翠,等.含软弱夹层浅埋隧道变形特性及控制指标研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):2685-2691.
WU Xu-ping, YANG Xin-an, LI Ya-cui, et al. Research on Control Indices and Deformation Characteristic of Shallow Tunnel with Weak Interlayer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2014,33(S1):2685-2691.

- [3] 张志强,李 宁,陈方方,等.不同应力环境中软弱夹层对洞室围岩稳定性影响研究[J].水力发电学报,2009,28(2):78-83,88.
ZHANG Zhi-qiang, LI Ning, CHEN Fang-fang, et al. Influence of Weak Interbedding on Stability and Safety of Underground in Different Confining Pressure Environment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2):78-83, 88.
- [4] 王立忠,舒 恒. Hill 稳定条件在有限元法计算地基承载力中的应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增1):3122-3131.
WANG Li-zhong, SHU Heng. Application of Hill's Stability Condition to Bearing Capacity Computation of Foundation with Finite Element Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):3122-3131.
- [5] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996.
QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical Principles and Calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996.
- [6] GB 50290—98,土工合成材料应用技术规范[S].
GB 50290—98, Technical Standard for Applications of Geosynthetics[S].
- [7] SL/T 225—98,水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S].
SL/T 225—98, Standard for Applications of Geosynthetics in Hydraulic and Hydro-power Engineering [S].
- [8] HG/T 20708—2011,化工建(构)筑物地基加筋垫层技术规程[S].
HG/T 20708—2011, Technical Regulation of Reinforced Cushion for Chemical Construction's Foundation[S].
- [9] 孙广忠.论岩体力学的地质基础[J].煤炭学报,1980(4):26-35.
SUN Guang-zhong. On Geological Foundations of Rock Mass Mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 1980(4):26-35.
- [10] 张道宽.土工织物加强软土路基的研究[D].北京:中国铁道部科学研究院,1987.
ZHANG Dao-kuan. Study on the Strengthening of Geotextile in Soft Soil Subgrade[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 1987.
- [11] CHRISTOPHER B R, HOLTZ R D, BERG R R. Geosynthetic Reinforced Embankments on Soft Foundations[C]//ASCE. Proceedings of Soft Ground Tech-

- nology Conference. Noordwijkerhout: ASCE, 2001; 206-236.
- [12] AZAM G, HSIEH C W, WANG M C. Performance of Strip Footing on Stratified Soil Deposit with Void[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(5): 753-772.
- [13] PRANDTL L. An Application Example of Theory on Henchyschen Plastic Equilibrium[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1923, 3(6): 401-406.
- [14] 张国霞. 箱形基础[M]//陈仲颐, 叶书麟. 基础工程学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
- ZHANG Guo-xia. Box Foundations [M]//CHEN Zhong-yi, YE Shu-lin. Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1991.
- [15] 王步云. 加筋砂石垫层在软弱地基中的应用[J]. 工程勘察, 2010(增1): 196-210.
- WANG Bu-yun. The Application of Reinforced Sand-gravel Cushion in Soft Soil Foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(S1): 196-210.
- [16] HILL R. The Mathematical Theory of Plasticity[M]. Oxford: Oxford University Press, 1950.
- [17] 汪大年. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- WANG Da-nian. Principles of Metal Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [18] 翁克索夫 E II. 塑性的工程理论[M]. 秦开宗, 译. 北京: 科学出版社, 1963.
- YHKCOB E II. Theory of Plasticity Engineering [M]. Translated by QIN Kai-zong. Beijing: Science Press, 1963.
- [19] PETERSEN S B, MARTINS P A F, BAY N. Friction in Bulk Metal Forming: A General Friction Model vs. the Law of Constant Friction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66(1): 186-194.
- [20] HUANG Z, LUCAS M, ADAMS M J. Modelling Wall Boundary Conditions in an Elasto-viscoplastic Material Forming Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 107(1): 267-275.
- [21] TAN X. Comparisons of Friction Models in Bulk Metal Forming[J]. Tribology International, 2002, 35(6): 385-393.
- [22] CAMACHO A M, TORRALVO A I, BERNAL C, et al. Investigations on Friction Factors in Metal Forming of Industrial Alloys[J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 564-572.
- [23] ESTELLE P, LANOS C, PERROT A, et al. Slipping Zone Location in Squeeze Flow[J]. Rheologica Acta, 2006, 45(4): 444-448.
- [24] 李立新, 胡盛德. 塑性力学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- LI Li-xin, HU Sheng-de. Plastic Mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [25] 殷 勇, 周国庆. 软弱夹层的极限荷载分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1035-1040, 1049.
- YIN Yong, ZHOU Guo-qing. Ultimate Load Analysis of Soft Interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1035-1040, 1049.
- [26] 王 睿, 张 嘎, 张建民. 降雨条件下含软弱夹层土坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1582-1587.
- WANG Rui, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Centrifuge Modeling of Rainfall-induced Deformation of Slopes with Weak Layers [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1582-1587.
- [27] 王义军, 李天斌, 王宝国. 某滑坡软弱夹层抗剪强度取值方法的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(4): 25-29.
- WANG Yi-jun, LI Tian-bin, WANG Bao-guo. The Research on the Selection of Shearing Strength for Weak Intercalated Layers in Certain Landslide [J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 25-29.