

# 基于地基实际应力状态的堤防极限平衡分析

李春意<sup>1,2</sup>, 曾甄<sup>3</sup>, 温晓贵<sup>1,2</sup>, 蒋熠诚<sup>1,2</sup>, 邢恩达<sup>3</sup>, 周建<sup>1,2\*</sup>

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;

2. 浙江大学 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

**摘要:** 基于软土地基上筑堤对土体强度的影响, 有效固结应力法以竖向附加应力计算土体的抗剪强度增量, 因其简单实用已较多应用于软土地基稳定性分析中。该方法假设堤防荷载下土体处于  $K_0$  应力状态, 与土体实际所受单向应力状态不符; 基于该法的稳定性计算方法还忽略了剪应力变化及坡脚外侧区域对稳定性的影响。本文从土体抗剪强度和堤防稳定性分析两个层面改进有效固结应力法: 通过应力状态分析得到基于实际应力状态的剪应力和抗剪强度变化, 进而将各个区域的抗滑力矩和滑动力矩纳入稳定性分析体系。假想算例与工程实例分析表明, 改进方法得到的安全系数大于有效固结应力法, 更加符合工程实际。

**关键词:** 软土地基; 堤防; 附加应力; 稳定性分析; 有效固结应力法; 不等向固结

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0107-09

## Ultimate equilibrium analysis of embankment based on actual stress states of soil foundation

LI Chun-yi<sup>1,2</sup>, ZENG Zhen<sup>3</sup>, WEN Xiao-gui<sup>1,2</sup>, JIANG Yi-cheng<sup>1,2</sup>, XING En-da<sup>3</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2\*</sup>

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

2. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310002, Zhejiang, China)

**Abstract:** Based on the influence of embankment construction on soil strength on soft soil foundation, the effective consolidation stress method calculates the increase in shear strength of soil using vertical superimposed stress. Due to its simplicity and practicality, it has been widely used in stability analysis of soft soil foundation. This method assumes that the soil is in the  $K_0$  condition stress state under the embankment load, which is inconsistent with the actual stress state of the soil. The stability calculation method based on it also ignores the influence of shear stress changes and the outer area of the slope foot on stability. In this work, the effective consolidation stress method was improved from two aspects: shear strength and stability safety factor calculation. Initially, changes in shear stress and shear strength based on the actual stress state are determined through stress state analysis. Subsequently, the anti-sliding moment and sliding moment of each area were integrated into the stability analysis system. The case analysis shows that the results of the improved method surpass those of the effective consolidation stress method and align more closely with the engineering reality.

**Key words:** soft soil foundation; embankment; superimposed stress; stability analysis; effective consolidation stress method; anisotropic consolidation

## 0 引言

软土地基天然含水率较大、强度低, 堤防填筑时常采用地基处理方式进行加固, 并用有效固结应力法计算加固后地基土体的强度增长和稳定情

况<sup>[1]</sup>。该方法可以考虑荷载作用下土体应力状态及有效固结应力的变化, 公式简明、计算简单, 已纳入相关工程规范<sup>[2-3]</sup>, 在加筋垫层、分阶段填筑和真空预压等地基的强度增长和稳定分析<sup>[4-6]</sup>中应用广泛。

收稿日期: 2023-04-05

基金项目: 浙江省水利厅科技项目 (RA2012)。

作者简介: 李春意 (1997—), 女, 重庆梁平人, 硕士, 主要从事软基处理相关研究工作。E-mail: 11cylcy@foxmail.com。

\*通信作者: 周建 (1970—), 女, 湖北浠水人, 博士, 教授, 主要从事软黏土力学、地基处理、土工数值分析等方面的研究。

E-mail: zjclim@zju.edu.cn。

近年来,沿海软土地基上开展了大量堤防提标加固工程,应相关规范<sup>[3,7]</sup>与多地设计指南<sup>[8-9]</sup>的生态与景观要求,常采用多级或多功能景观平台<sup>[10]</sup>,这类堤防坡度缓、断面大,既有原有结构,又有新增结构,地基部分也需要部分或全部加强。这类堤防堤身和地基的应力状态复杂,潜在滑动面范围大。

为了反映不同应力状态下土体固结对稳定性的影响,有学者认为可以根据实际受力情况,开展不同类型的室内试验<sup>[11-13]</sup>,计算时堤防不同区域分别选用不同的抗剪强度指标。这样不仅对试验设备、试验种类和试验数量要求较高,室内试验也不一定真实反映土体实际受力特点。近年来有学者研究了附加应力与工程稳定性的关系,如周勇等<sup>[14]</sup>、李元勋等<sup>[15]</sup>、王邓崑等<sup>[16-17]</sup>,计算桩锚支护边坡的稳定性时,通过附加应力形式施加锚杆预应力,阐明了土体应力状态对边坡稳定的作用和意义,但这些研究中还未涉及堤防荷载施加引起的附加应力。

为提高堤防的抗滑稳定性,常在坡脚处进行地基加固,现有稳定计算中一般不考虑这部分土体因地基处理引起的强度增长,但对于软土地基或缓坡堤防,由于滑动面范围较广,该区域土体对堤防整体稳定的影响不能忽略,它不仅具有抗滑作用,对滑动力矩也有贡献,仅考虑土体抗剪强度的提高偏不安全。

本文首先分析了有效固结应力法在堤防工程中的局限性,基于堤防荷载下地基附加应力分布,提出基于地基实际固结应力状态的土体抗剪强度增量计算方法,从抗剪强度和稳定性计算两个角度对现有的有效固结应力法进行改进,并结合工程案例对堤防的稳定性进行对比分析。本文研究针对堤防提标加固这类多级平台和多种地基处理的复杂情况,提出的稳定性分析方法有很强的实用价值,对类似工程也有很好的指导意义。

## 1 有效固结应力法的适用性

为考虑填筑荷载下地基排水固结后的强度增长,沈珠江<sup>[1]</sup>提出用有效固结应力法计算,公式如下:

$$\Delta\tau = \Delta\sigma'_c \tan\varphi \quad (1)$$

式中:  $\Delta\tau$  表示土体的强度增量;  $\Delta\sigma'_c$  表示土体破坏前的有效固结应力增量;  $\varphi$  为有效固结应力法对应的内摩擦角。该方法的关键是确定土体破坏前的有效固结应力  $\sigma'_c$ , 即土体是在该应力状态下发生破坏的<sup>[18]</sup>。沈珠江<sup>[1]</sup>认为在填筑加载时,可以将大主应力  $\sigma'_1$  视为竖向有效应力,则有效固结应力增量  $\Delta\sigma'_c$  可用大主应力增量  $\Delta\sigma'_1$  和侧压力系数  $K_0$  表示,即

$\Delta\sigma'_c = (1 + K_0)\Delta\sigma'_1/2$ , 进而得到公路标准<sup>[2]</sup>和建筑地基规范<sup>[19]</sup>推荐的有效固结应力法计算公式,即:

$$\Delta\tau_t = \Delta\sigma_z U_t \tan\varphi_{cu} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\tau_t$  表示  $t$  时刻土体的抗剪强度增量;  $\Delta\sigma_z$  为竖向应力;  $U_t$  为  $t$  时刻土体的固结度;  $\varphi_{cu}$  为固结不排水内摩擦角。

但该方法推导时的应力状态和变形假设与一些实际工程情况不相符。涂园等<sup>[18]</sup>研究发现有效固结应力法计算公式(2)的推导过程采用了  $K_0$  固结条件,即假设地基土体仅存在竖向变形,未发生侧向变形(应变  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ),大面积堆载预压下的天然地基可以视为符合该应用条件。某公路软土地基的现场监测数据显示,经排水板处理的填筑前期的最大侧向变形增量与路中沉降增量之比为 60%~100%,停载预压阶段则为 15%~30%<sup>[20]</sup>。可见软土堤防地基的侧向变形较大( $\varepsilon_x \neq 0, \varepsilon_y = 0$ ),这与  $K_0$  固结条件下土体不发生侧向变形的条件明显不符。另外,堤防地基属平面应变问题,地基土体处于三向应力状态,各向应力不相等( $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$ ), $K_0$  应力状态土体水平向应力相等( $\sigma_x = \sigma_y$ ),二者应力状态差异较大(见图1)。我国现有软土路基和堤防规范<sup>[2-3]</sup>未考虑到三向应力状态与  $K_0$  应力状态的差异,而是直接沿用了建筑地基规范<sup>[19]</sup>的计算方法。

另外,有效固结应力法将地基视为半无限空间体,土体处于  $K_0$  应力状态,各个位置土体的水平向应力相等,抗剪强度增量由竖向附加应力  $\Delta\sigma_z$  唯一确定。对实际堤防工程而言,土体各向应力  $\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_z$ 、 $\Delta\tau_{xz}$  均随位置变化,有效固结应力法计算公式不能反映堤防荷载下水平向附加应力  $\Delta\sigma_x$  与切向附加应力  $\Delta\tau_{xz}$  对强度的影响。

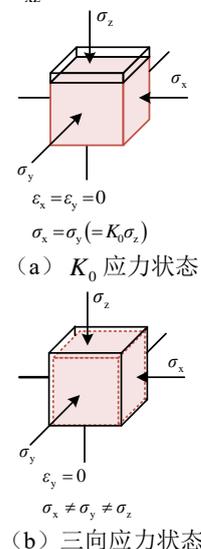


图1 不同固结条件下的应力状态

Fig. 1 Stress states under different consolidation conditions

## 2 瑞典圆弧法计算稳定的局限性

工程中常用瑞典圆弧法进行边坡稳定性分析, 该方法忽略土条间相互作用力, 瑞典圆弧法如图 2 所示, 图中  $\sigma_z$  为  $z$  方向附加应力,  $\sigma_i$  为  $i$  土条滑动面正应力,  $\tau_i$  为滑动面剪应力,  $b$  为土条宽度。软土地基上堤防潜在滑动面为 midpoint 圆弧面, 即滑面与边坡的下交点在边坡坡脚以外<sup>[21]</sup>。为便于描述, 本文将堤防分为地基 (I) 和填土 (II) 两部分, 其中坡脚外侧区用  $I_1$  表示。

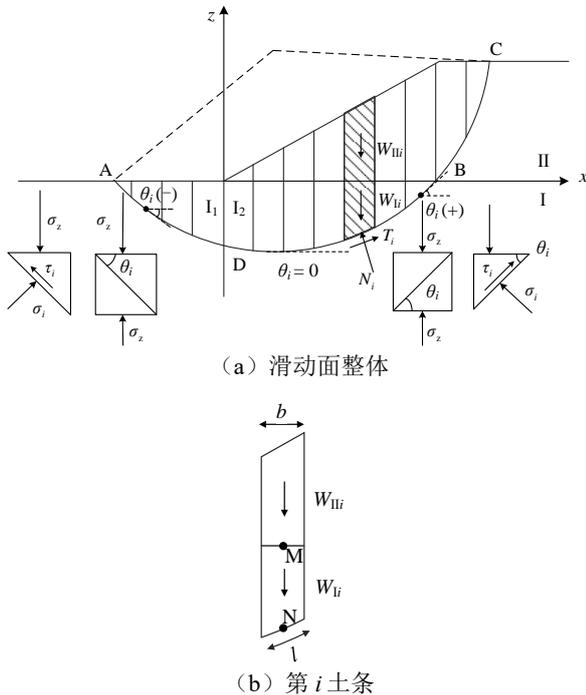


图 2 瑞典圆弧法示意图

Fig. 2 Diagram of Swedish circle method

极限平衡法中一般将安全系数  $F_s$  定义为总抗滑力矩  $MT$  与总滑动力矩  $MS$  之比。为考虑地基固结对稳定性的影响, 由有效固结应力法得到抗剪强度增量, 然后计算该强度增量对抗滑力矩的作用。抗滑力矩增量  $\Delta MT_i$  表示为:

$$\Delta MT_i = \Delta \tau_{fi} l R = U_i \Delta \sigma_z \tan \varphi_{cu} l R \quad (3)$$

式中:  $\Delta \tau_{fi}$  为  $i$  土条抗剪强度;  $U_i$  为土条底部固结度, %;  $l$  为每一滑弧的长度, m;  $R$  为  $i$  土条底部中点与滑弧圆心间的距离, m。

规范中的抗滑力矩增量表达形式为:

$$\Delta MT_i = U_i W_{II} \tan \varphi_{cu} R \quad (4)$$

式中:  $W_{II}$  为  $i$  土条地面以上部分的质量。代入得到如下安全系数计算公式:

$$F'_s = \frac{\sum MT_i + \sum \Delta MT_i}{\sum MS_i} = \frac{\sum_A^B (c_{1i} l_i + W_{II} \cos \theta_i \tan \varphi_{cu} + U_i W_{II} \tan \varphi_{cu}) + \sum_B^C (c_{2i} l_i + W_{II} \cos \theta_i \tan \varphi_{2i})}{\sum_A^B (W_I + W_{II})_i \sin \theta_i + \sum_B^C W_{II} \sin \theta_i} \quad (5)$$

式中:  $F'_s$  为有效固结应力法表示的安全系数;  $MT_i$  为  $i$  土条抗滑力矩;  $MS_i$  为  $i$  土条滑动力矩;  $W_{II}$  为  $i$  土条地面以下部分的质量;  $c_{1i}$ 、 $\varphi_{1i}$  与  $c_{2i}$ 、 $\varphi_{2i}$  分别为地基与填土的不排水强度指标, 相关规范<sup>[2-3]</sup> 分别建议采用快剪试验与不固结不排水试验取得, 理论上不固结不排水内摩擦角为 0, 若采用该试验指标将使分项  $W_{II} \cos \theta_i \tan \varphi_{cu} = 0$ , 故本文采用快剪试验指标;  $\varphi_{cu}$  为地基的固结不排水内摩擦角;  $l_i$  为  $i$  土条底部长度;  $\theta_i$  为土条底部中点处滑动面方向与水平向夹角。

从式 (3) 到规范中的式 (4), 实际上存在一个演变过程, 弄清楚这一过程是分析当前考虑强度增长的瑞典圆弧法合理性的前提, 以下进行详细说明。

根据图 2 (b), 上部填土与下部地基的界面处一点  $M$  受到的竖向附加应力  $\Delta \sigma_z$  可表示为土条重量与滑弧长度之比  $W_{II} / l_i \cos \theta_i$  (由  $W_{II} / b$ ,  $b = l_i \cos \theta_i$  得到)。不考虑填土重量在地基中的扩散时, 滑动面上  $N$  点竖向附加应力  $\Delta \sigma_z$  与  $M$  点相等。若将  $N$  点的法向应力增量  $\Delta \sigma_i$  与竖向附加应力  $\Delta \sigma_z$  混淆, 应用时乘以  $\cos \theta_i$ , 并忽略填土重量在地基中的扩散, 式 (3) 则演变为式 (4)。沈珠江<sup>[1]</sup> 已强调了式 (3) 乘以  $\cos \theta_i$  的错误性, 我们还应注意到忽略填土重量扩散是不合理的<sup>[22]</sup>。对于土条的地基部分 ( $I_i$ ), 上部填土 ( $II_i$ ) 是局部荷载, 不仅  $i$  土条上部填土的自重应力传递到该土条底面时会产生扩散作用, 相邻土条重量同样可以通过应力扩散传递至该土条底面。

图 2 (a) 中坡脚外侧  $AD$  段同样可以证明忽略应力扩散对于安全系数计算的影响: 该土体没有受到上部  $II$  区域填筑荷载的直接作用, 而是通过侧向应力作用提高了土体的抗剪强度,  $AD$  段强度增长对地基抗滑的贡献是式 (4) 中无法考虑的。如果坡脚处是多级平台,  $I_1$  区域范围更大, 忽略该部分土体抗剪强度增长将会带来较大误差, 特别是坡脚部分被加固后的计算误差就更大了。

因此,抗滑力矩增量应改为用堤防填土传递至土条底面的附加应力表示。

此外伴随地基土体抗剪强度增加,土体剪应力也发生了相应变化,影响堤防的整体稳定。当前考虑强度增长的安全系数公式,式(5)中只考虑了抗滑力矩变化,却忽略了滑动力矩相应变化的事实。

可见稳定性分析时,基于实际应力状态,采用附加应力取代填土重量来计算抗滑力矩增量既符合填土应力扩散、滑动力矩变化的实际情况,也不会忽略坡脚外侧区域抗剪强度增长。

### 3 基于实际应力状态的稳定分析

鉴于上述有效固结应力法在软土地基堤防工程稳定性分析中的不足,本文拟从抗剪强度和稳定性计算两方面进行改进,研究填筑荷载产生的附加应力对滑动面上土体剪应力与抗剪强度的影响,在稳定性分析中考虑附加应力作用下的剪应力变化和坡脚外侧I<sub>1</sub>区域的抗剪强度的提高。

#### 3.1 抗剪强度计算

首先对滑动面破坏前土体的受力状态进行分析。滑动面土体的受力状态见图2,其中第*i*段滑弧中点M处的切线与*x*轴夹角为 $\theta_i$  ( $0 \leq |\theta_i| < 90^\circ$ ), $\theta_i$ 以绕*x*轴逆时针方向转动为正,反之为负。

不计土条间的相互作用力,则任一点处土体的初始应力 $\sigma_x = 0$ ,  $\tau_{xz} = 0$ <sup>[16]</sup>,应力圆可由图3~4中的圆1表示,该点的应力状态可由初始应力状态点旋转 $2\theta_i$ 得到,旋转方向与 $\theta_i$ 的正负一致。此时的正应力、剪应力为:

$$\tau_i = \frac{\sigma_z}{2} \sin 2\theta_i = \sigma_z \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (6)$$

$$\sigma_i = \frac{\sigma_z}{2} + \frac{\sigma_z}{2} \cos 2\theta_i = \sigma_z \cos^2 \theta_i \quad (7)$$

梯形荷载下该点处将产生水平向、竖向、切向的附加应力 $\Delta\sigma_x$ 、 $\Delta\sigma_z$ 、 $\Delta\tau_{xz}$ ,可由均布与三角形分布的条形荷载叠加计算而得<sup>[23]</sup>。地基土体受到附加应力时滑动面各点的应力状态并不相同,王邓崧等<sup>[16]</sup>就坡脚圆(此时均有 $\theta_i > 0$ )下的应力与抗剪强度进行了分析,由于图2中的中点圆弧存在 $\theta_i < 0$ 区段,此时得到的作用面与应力分量均与 $\theta_i > 0$ 时不相同,因此本文分别分析了该区段单个方向附加应力作用下应力及强度的变化,再运用应力叠加法得到附加应力共同作用下的解答。

#### (1) 水平向附加应力作用

当只考虑土体中的水平向附加应力时,则有 $\sigma'_x = \sigma_x + \Delta\sigma_x$ ,  $\Delta\sigma_z = 0$ ,  $\Delta\tau_{xz} = 0$ ,单元体的应力圆由圆1变为圆2,如图3所示。值得注意的是,本节使用“'”(撇号上标)仅起到区分应力作用前后的应力与强度变化的作用,不代表有效应力。

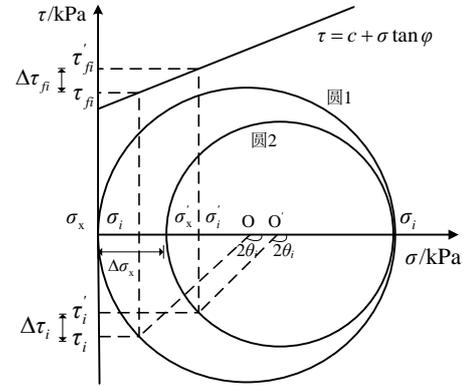


图3 水平向附加应力对应力圆的改变

Fig. 3 Stress circle changed by horizontal superimposed stress

可以得到土条底部土体单元体剪应力变化量及正应力变化量为:

$$\Delta\tau_i = -\Delta\sigma_x \sin \theta_i \cos \theta \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_x \sin^2 \theta_i \quad (9)$$

进而可以得到抗剪强度变化:

$$\Delta\tau_{fi} = \Delta\sigma_x \sin^2 \theta_i \tan \phi \quad (10)$$

#### (2) 竖向附加应力作用

当只考虑土体中的竖向附加应力时,即 $\sigma'_z = \sigma_z + \Delta\sigma_z$ ,  $\Delta\sigma_x = 0$ ,  $\Delta\tau_{xz} = 0$ ,单元体的应力圆由圆1变为圆2,如图4所示。

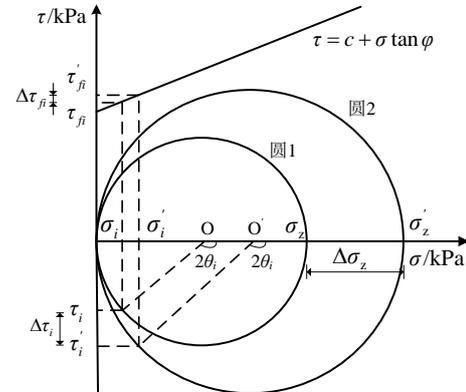


图4 竖向附加应力对应力圆的改变

Fig. 4 Stress circle changed by vertical superimposed stress

此时土体剪应力与抗剪强度变化为:

$$\Delta\tau_i = \Delta\sigma_z \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{fi} = \Delta\sigma_z \cos^2 \theta_i \tan \varphi \quad (12)$$

(3) 切向附加应力作用

当只考虑土体中的切向附加应力  $\tau_{xz}$  时, 则有  $\Delta\sigma_x = 0$ ,  $\Delta\sigma_z = 0$ , 单元体的应力圆由圆 1 变为圆 2, 如图 5 所示。

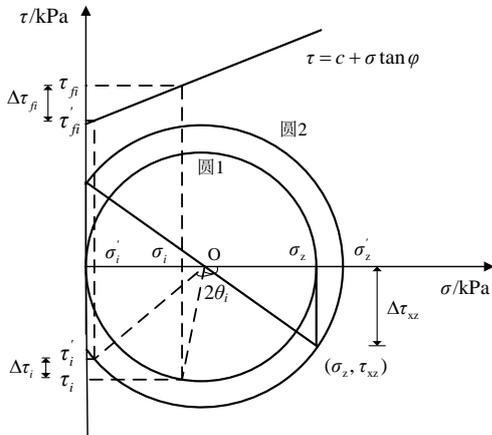


图 5 切向附加应力对应力圆的改变

Fig. 5 Stress circle changed by tangential superimposed stress

假设单元体只受到切向附加应力作用, 同理可得土体剪应力与抗剪强度变化, 即:

$$\Delta\tau_i = -\Delta\tau_{xz} \cos 2\theta_i \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{fi} = \tau_{xz} \sin 2\theta_i \tan \varphi \quad (14)$$

(4) 三向应力叠加

堤防工程地基土体一般受到上部梯形荷载作用, 既有附加正应力, 也有切向附加应力, 用应力叠加法即可得到土体剪应力与抗剪强度变化:

$$\Delta\tau_i = (\Delta\sigma_z - \Delta\sigma_x) \sin \theta_i \cos \theta_i - \tau_{xz} \cos 2\theta_i \quad (15)$$

$$\Delta\tau_{fi} = (\Delta\sigma_x \sin^2 \theta_i + \Delta\sigma_z \cos^2 \theta_i + \tau_{xz} \sin 2\theta_i) \tan \varphi \quad (16)$$

上述抗剪强度增量由固结不排水试验的强度指标表示。此时应力状态由圆 1 变为圆 3, 见图 6。以上推导了  $\theta_i < 0$  时的情况,  $\theta_i > 0$  时应力状态的变化见图 7, 推导过程与上述相同。

土体的抗剪强度由其受力状态决定, 上述改进的抗剪强度能反映土体真实应力状态的变化。对比式 (2) 与式 (16) 可以发现, 有效固结应力法的抗剪强度增量由式 (2) 的竖向附加应力唯一确定, 忽略了水平向应力及切向附加应力变化对抗剪强度的影响, 同时该公式仅适用于  $K_0$  固结条件;

相比较而言, 式 (16) 的抗剪强度增量由荷载下各方向的应力共同决定, 更加符合工程实际情况。

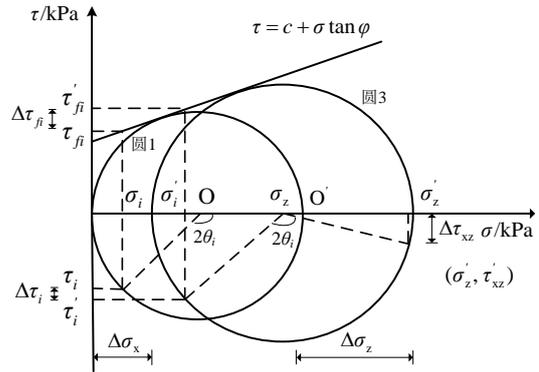


图 6 附加正应力与附加剪应力对应力圆的改变 ( $\theta_i < 0$ )

Fig. 6 Stress circle changed by superimposed stress ( $\theta_i < 0$ )

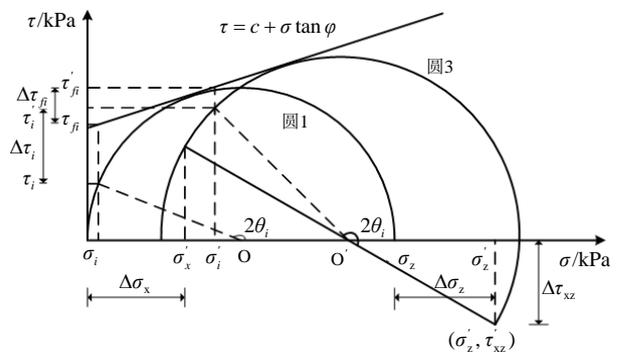


图 7 附加正应力与附加剪应力对应力圆的改变 ( $\theta_i > 0$ )

Fig. 7 Stress circle changed by superimposed stress ( $\theta_i > 0$ )

3.2 稳定性计算

上述计算可以得到堤防荷载下地基中任一点处抗剪强度的变化, 这样就可以用实际的抗剪强度计算其稳定性, 这样的计算优点表现为:

(1) 基于实际应力状态的土体抗剪强度增量

分析可知, 式 (5) 忽略了应力扩散作用, 使抗滑力矩结果偏离实际, 也无法考虑坡脚外侧区域抗剪强度的变化。如果用上述基于地基土体实际应力状态的抗剪强度增量式 (15) ~ (16) 计算堤防的稳定性, 就可以真实反映应力扩散下地基土体中各部分对稳定性的影响。这样的计算分析在考虑堤防经受复杂的上部荷载作用, 或地基土体经受不同地基处理或复杂应力历史情况下更有优势, 也更能反映实际情况。

(2) 考虑剪应力变化对稳定的影响

采用式 (5) 进行稳定性分析时, 滑动力矩部分没有考虑剪应力的变化。事实上, 剪应力变化随固结度变化引起的滑动力矩增量为:

$$\Delta MS_i = U_i \Delta\tau_i l_i R \quad (17)$$

则改进的稳定计算为:

$$F'_s = \frac{\sum_A^B (c_{1i} l_i + W_{li} \cos \theta_i \tan \varphi_{1i} + U_i \Delta \tau_{fi} l_i) + \sum_B^C (c_{2i} l_i + W_{li} \cos \theta_i \tan \varphi_{2i})}{\sum_A^B [(W_{li} + W_{li}) \sin \theta_i + U_i \Delta \tau_{fi} l_i] + \sum_B^C W_{li} \sin \theta_i} \quad (18)$$

式中:  $c_i$ 、 $\varphi_i$  为地基与填土的不排水指标, 用快剪试验得到;  $U_i$  为土条底面的固结度, 以  $U_i \Delta \tau_{fi} l_i R$  计算抗滑力矩增量, 以式 (17) 计算滑动力矩增量。

上文论述了考虑土体强度增长时, 用附加应力进行稳定性分析的必要性。本文方法分别考虑了附加应力对抗滑力矩与滑动力矩的影响, 增量均由地基土体受到的附加应力决定, 可见本文方法除了符合上部荷载的应力扩散效应, 以及能考虑土体真实的应力状态外, 还能考虑坡脚处  $I_1$  区域土体强度增长对稳定的贡献, 并将剪应力变化的影响纳入到稳定计算中。

## 4 分析与验证

根据本文方法用 MATLAB 编制了稳定性分析程序, 程序由计算安全系数的主程序和计算附加应力的函数程序组成, 使用枚举法搜索滑裂面, 得到滑裂面为 midpoint 圆弧面的局部极小值。

### 4.1 理想算例分析

对软土地基的某堤防进行分析, 设计填筑高度  $H=6\text{m}$ , 两侧坡度分别为  $1:1.5$  与  $1:2$ , 参数选取按图 8 取值。地下水位与地基表面平齐。

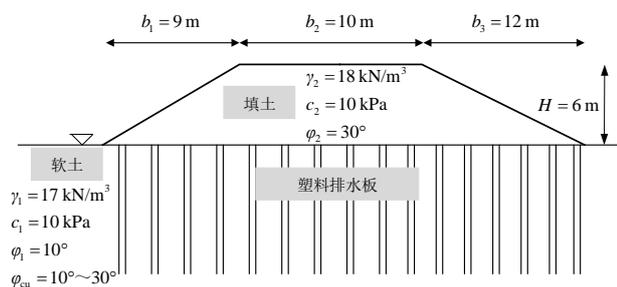


图 8 堤防模型图

Fig. 8 Embankment model diagram

为了初步验证本程序的可靠性, 用本程序、Geo-Slope、理正边坡软件分别计算瑞典圆弧法的安全系数, 如表 1 所示, 对比可见本程序的计算误差很小。

固结度与固结不排水内摩擦角是考虑强度增长的稳定性分析的关键因素, 而地基土体不同,  $\varphi_{cu}$  则不相同。图 9 比较了不同  $\varphi_{cu}$  下安全系数随固结

度变化的情况。

表 1 瑞典圆弧法的安全系数

Table 1 Safety factors of Swedish circle method

序号	土层参数		安全系数			
	$c_1/\text{kPa}$	$\varphi_1/(\text{°})$	Geo-Slope	理正边坡	本程序	误差/%
A1	10	5	0.837	0.832	0.826	-1.03
A2	10	10	1.050	1.051	1.040	-1.01
A3	10	15	1.254	1.248	1.236	-1.21
A4	10	20	1.441	1.434	1.418	-1.38

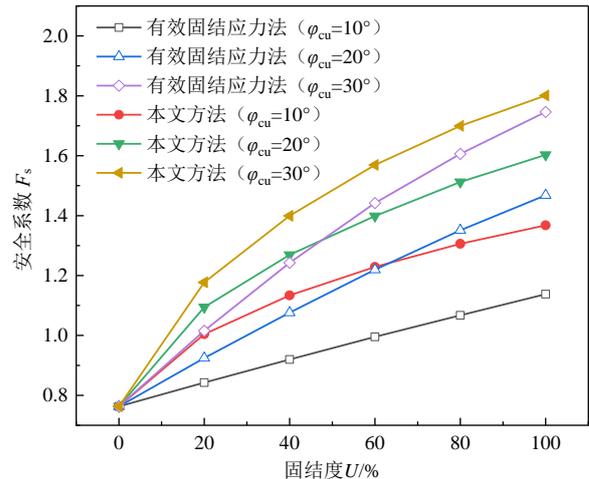


图 9 安全系数随地基土固结度与内摩擦角的变化

Fig. 9 Variation of safety factor with degree of consolidation and internal friction angle

其他条件相同时, 本文方法的安全系数大于有效固结应力法; 各方法的安全系数均随固结度、固结不排水内摩擦角的增大而增大, 有效固结应力法增长速率基本稳定, 本文方法增长速率逐渐变缓。二者增长速率的差异使得安全系数差距先增大后减小, 固结度达到 100% 时, 两方法的安全系数最高可相差 20% ( $\varphi_{cu}=10^\circ$ )。另外, 对比不同固结不排水内摩擦角  $\varphi_{cu}$  下的安全系数可知,  $\varphi_{cu}$  对安全系数影响显著。固结度均为 100% 时,  $\varphi_{cu}$  每提高  $10^\circ$ , 有效固结应力法安全系数提高 19%~29%, 本文方法安全系数提高 12%~17%。

以上分析表明, 强度指标 (本算例中主要指  $\varphi_{cu}$ ) 取值的精度对安全系数的结果有较大影响, 若计算时采用了偏大的  $\varphi_{cu}$ , 结果将偏于不安全。故分析时需获得准确的土体强度指标, 但这在实践中存在困难。所以对于强度指标离散性较大的试验结果, 有必要采取统计分析手段, 排除试验扰动、非均匀性等因素的干扰。

### 4.2 工程实例分析

现针对实际工程进行稳定性分析, 该项目为某排水固结法处理的沿海堤防, 堤防案例典型简化断

面如图 10 所示, 土体的力学指标见表 2, 地基浅层软土参数相近, 视为均质土层, 计算时取其平均值。该工程右侧采用挡土墙加固, 因此本文仅分析左侧边坡稳定性。

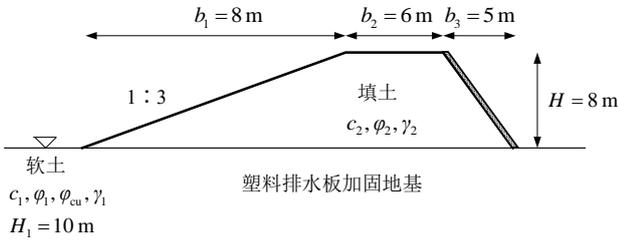


图 10 堤防案例典型简化断面

Fig. 10 Typical simplified cross-section of embankment

表 2 土体的力学指标

Table 2 Mechanical properties of soils

土层	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	固结不排水内摩擦角 $\varphi_{cu}/(\text{°})$	天然重度/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	饱和重度/ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
填土	10	30	—	18.0	20
软土	8	5	15	16.5	17

假设内摩擦角不随固结度增长而变化, 图 11 是本案例安全系数随地基土固结度的变化。其他条件一定时, 两个方法的安全系数均随固结度增长而提高。根据该工程堤顶处的加载时程曲线与沉降-时间曲线, 通过曲线拟合法<sup>[24]</sup> 反分析得到该工程施工结束后地基的平均固结度为 54%~62%。

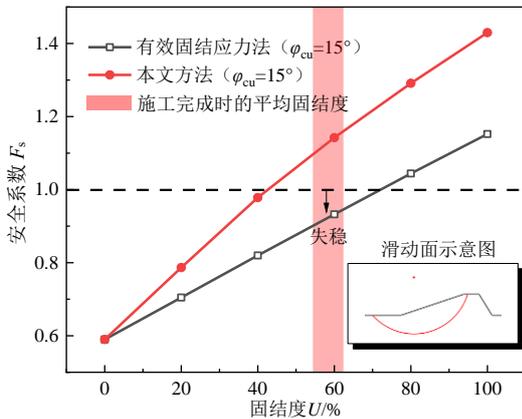


图 11 安全系数随地基土固结度的变化

Fig. 11 Variation of safety factor with degree of consolidation

在该固结度范围内, 有效固结应力法所得安全系数小于 1, 将发生失稳。但是根据工程实际, 该工程施工工期维持稳定状态。这一矛盾是长期困扰工程技术人员的问题之一, 之前大多研究人员将原因归结于取土或室内试验扰动试样导致的土体强度降低<sup>[25]</sup>, 认为不同计算方法导致的偏差对结果影响较小<sup>[26]</sup>。本案例显示, 有效固结应力法低估了堤防边坡的稳定性安全系数, 二者的安全系数分别为

0.932 与 1.142 ( $U = 60\%$  时), 有效固结应力法的安全系数偏小 23%。这说明不同计算方法对安全系数的偏差也会产生较大影响, 而本文方法更接近实际。

## 5 结 论

在堤防工程施工及运行过程中, 由于附加应力的影响, 地基土体处于三向应力状态, 附加应力作用下土体的应力状态是影响其整体稳定性的关键因素。基于实际应力状态, 本文从抗剪强度和安全系数计算两个角度改进了考虑强度增长的稳定性计算方法。从假想模型与实际案例的分析中得出结论:

(1) 计算结果显示有效固结应力法结果偏小, 这解释了工程案例中有效固结应力法下安全系数小于 1 而工程保持稳定的原因。本文方法考虑了堤防地基的实际应力状态, 并全面考虑了不同区域以及剪应力变化的影响, 结果更接近实际, 建议结合工程具体情况加以运用。

(2) 考虑土体强度增长时, 强度指标取值的精度对安全系数的结果影响较大, 若计算时采用了偏大的固结不排水内摩擦角, 结果将偏于不安全。故分析时需依据实际取值, 对于强度指标离散性较大的试验结果, 有必要采取统计分析手段, 排除试验扰动、非均匀性等因素的干扰。

(3) 不管采用哪种方法, 安全系数随固结度增长均有了较大提高, 这说明了工程中采用排水固结地基处理方法的有效性以及在软土地基稳定性计算中考虑固结的必要性。此外, 本文的计算方法仅围绕一个工程实例, 有待结合更多算例与工程实践进行分析验证。

## 参考文献

[1] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100-111.  
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 100-111.

[2] 中华人民共和国交通运输部. 公路软土地基路堤设计与施工技术细则: JTG/T D31-02-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground: JTG/T D31-02-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海岸软土地基堤坝工程技术规范: GB/T 50943—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Levee Engineering on Soft Ground in Coast Area: GB/T 50943—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [4] 徐超, 曾庆元, 汪天池. 基于有效固结应力法的加筋垫层路堤稳定性计算方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(9): 1298-1303.  
XU Chao, ZENG Qing-yuan, WANG Tian-chi. Application of effective consolidation stress method to stability analysis of reinforced embankment over soft foundation soils[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(9): 1298-1303.
- [5] 曹宇春. 固结后软黏土不排水抗剪强度简化计算方法比较[J]. 土木工程学报, 2014, 47(10): 107-116.  
CAO Yu-chun. A comparison of simplified calculation methods of undrained shear strength of soft clays after consolidation[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(10): 107-116.
- [6] 徐宏, 邓学均, 齐永正, 等. 真空预压排水固结软土强度增长规律性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 285-290.  
XU Hong, DENG Xue-jun, QI Yong-zheng, et al. Development of shear strength of soft clay under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 285-290.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海堤工程设计规范: GB/T 51015—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Sea Dike Project: GB/T 51015—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [8] 浙江省水利厅. 浙江省海塘安澜千亿工程建设技术指南[Z]. 2021.  
Department of Water Resources of Zhejiang Province. Technical Guidelines for Seawall Anlan Billion Project of Zhejiang Province[Z]. 2021.
- [9] 广东省质量技术监督局. 广东省海堤工程设计导则(试行): DB 44/T182—2004[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.  
Guangdong Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Design Guide for Coastal Levee Project of Guangdong Province: DB 44/T182—2004[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.
- [10] 曹坤. 关于海塘消浪平台兼做观景平台的探讨: 以崇明环岛景观道一期工程(老滬港-八一路)为例[J]. 城市道桥与防洪, 2019(6): 167-171, 185, 20.  
CAO Kun. Discussion on seawall wave platform concurrently as landscape platform[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(6): 167-171, 185, 20.
- [11] LADD C C. Stability evaluation during staged construction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(4): 540-615.
- [12] KOUTSOFTAS D C, LADD C C. Design strengths for an offshore clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 337-355.
- [13] 林孔锚. 预压地基的强度增长与稳定计算问题[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 93-96.  
LIN Kong-zi. Strength increase and stability analysis of preloading foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 93-96.
- [14] 周勇, 令永强, 杨校辉. 考虑附加应力作用的桩锚支护结构稳定性与位移关系研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2913-2921.  
ZHOU Yong, LING Yong-qiang, YANG Xiao-hui. Relationship between the displacement and stability of pile anchor retaining structure considering additional stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2913-2921.
- [15] 李元勋, 朱彦鹏, 王邓嵎. 预应力作用下深基坑桩锚支护结构整体稳定性分析研究[J]. 工程力学, 2017, 34(11): 167-174, 239.  
LI Yuan-xun, ZHU Yan-peng, WANG Deng-qun. Analysis of global stability of prestressed pile-anchor supporting structures in deep excavation[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(11): 167-174, 239.
- [16] 王邓嵎, 朱彦鹏. 附加应力法在预应力锚杆支护结构稳定性分析中的应用[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 196-202.  
WANG Deng-qun, ZHU Yan-peng. Additional stress apply to analyzing the stability of prestressed anchor support[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 196-202.
- [17] 王邓嵎, 朱彦鹏. 考虑预应力的锚杆支护结构的稳定性

- 计算[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 125-128.
- WANG Deng-qun, ZHU Yan-peng. Calculation of stability of anchor support considering prestress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 125-128.
- [18] 涂园, 王奎华, 周建, 等. 有效应力法和有效固结压力法在预压地基强度计算中的应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 645-654.
- TU Yuan, WANG Kui-hua, ZHOU Jian, et al. Application of effective stress method and effective consolidation stress method for strength calculation in preloading ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 645-654.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [20] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 不同方式处理后软土地基侧向变形规律[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 340-347.
- CHEN Ji-bin, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin, et al. Lateral deformation law of soft soil subgrade treated by different modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 340-347.
- [21] 张天宝. 土坡稳定分析圆弧法的数值解研究[J]. 工程科学与技术, 1978, 10(增刊 1): 97-122.
- ZHANG Tian-bao. Study on numerical solution of circular arc method for soil slope stability analysis[J]. Advanced Engineering Sciences, 1978, 10(S1): 97-122.
- [22] 徐少曼, 洪昌华. 考虑加筋垫层的堤坝下软基稳定分析法[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 88-92.
- XU Shao-man, HONG Chang-hua. A stability analysis method for soft subgrade under embankment considering strengthened cushion[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 88-92.
- [23] 赵成刚, 白冰, 等. 土力学原理[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2017: 127-133.
- ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, et al. Fundamentals of Soil Mechanics[M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2017: 127-133.
- [24] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1053-1058.
- PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1053-1058.
- [25] 陈环, 吴景海. “基坑支护结构上的水和土压力”的讨论之二[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 511-512.
- CHEN Huan, WU Jing-hai. Discussion on “water and earth pressure on foundation pit supporting structure” (II)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 511-512.
- [26] 闫澍旺, 封晓伟, 侯晋芳, 等. 用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1805-1810.
- YAN Shu-wang, FENG Xiao-wei, HOU Jin-fang, et al. Deduction and application of strength parameters of soft clay by use of vane strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1805-1810.