

一种施工期间堤防稳定性分析方法

高 峰

(武汉大学, 湖北武汉 430072)

摘 要: 在 Hilf 分析法的基础上, 对 Hilf 分析法进行了改进。将孔隙气压力和孔隙水压力作为独立变量, 推导了孔隙气压和孔隙水压计算表达式。给出了考虑强度随孔隙气压和孔隙水压力变化的填土堤防强度随固结度增加而增长的饱和土堤防稳定性分析方法。计算结果表明随着基质吸力的增加, 计算所得的稳定安全系数随之增加, 忽略孔隙气压的作用所得的软土堤防的稳定安全系数偏大。当 φ^b 等于 φ' 时, 孔隙气压对抗剪力没有影响, 此时计算所得的安全系数相同。因此施工期间软土地区堤防既要考虑孔隙气压和孔隙水压对堤防稳定性的影响, 同时也要考虑地基固结提高对堤防稳定性的影响。

关 键 词: 孔隙气压; 孔隙水压力; 防洪大堤; 稳定性

中图分类号: TU 471.8

文献标识码: A

An analysis method of stability of embankment during construction period

GAO Feng

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Some improvements are made based on the Hilf method. The pore air pressure and pore water pressure can be calculated regarding the pore air pressure and pore water pressure as independent variables. The analysis method of stability on the strengthen of embankment with clotty is given when the pore air pressure and pore water pressure are all taken into account. The results show that the stability coefficient increases with the enhance of matric suction; and once the pore air pressure is ignored, the stability coefficient a little bigger than it is in fact. The pore air pressure has no influence on the resistance of shearing. when φ^b is equal to φ' ; and the calculated stability coefficient is the same. Not only the pore air pressure and pore water pressure must be taken into account; but also the adding of clotty of ground is considered when the stability of embankment is analyzed during the construction period.

Key words: pore air pressure; pore water pressure; breakwater embankment; stability

1 前 言

软土地基天然含水量高、强度低、压缩性大、透水性差, 在这种地段修筑堤防工程, 堤防稳定性就成为施工期间的首要控制目标, 因此, 抗剪强度的合理取值直接关系到软土堤防的安全性。软基之上的路堤防有两个基本特点: 其一, 软土堤防为饱和软粘土, 其强度取值要符合饱和土力学理论。软土堤防在堤防填土荷载的作用下, 地基土的抗剪强度随固结度的增长而增加, 施工期间要合理地估算预压固结引起地基强度的增长值; 其二, 软土堤防之上的堤防是由固、气、水三相体组成, 其强度取值要符合非饱和土力学理论。非饱和土堤防在施工

期间填筑速率比较快, 由于气相的存在, 其强度随孔隙气压和孔隙水压的变化。

为了合理地确定压实填土的强度, Hilf^[1]于 1948 年提出了在压实填土上施加总应力引起空隙压力变化的计算方法。Hilf 利用一维固结试验成果、Boyle 定律和 Henry 定律, 建立了在排水条件下, 空隙气压和土体体积变化之间的关系。Hilf 在推导过程中, 假设孔隙气压与孔隙水压力变化相同。对于低塑性土而言, 这种假定是合理的, 然而, 对于高塑性土而言, 这种差别随着塑性的增加而增加, 对于粘性土, 这种差别可达到几个大气压。

到目前为止, 还没有人将施工期间填土堤防的孔隙气压和孔隙水压力变化考虑到堤防稳定性计算

中去,更不用说在同一个稳定计算断面,将饱和与非饱和两种不相同的状态条件同时进行考虑,计算堤防的稳定安全性。本文首先将孔隙气压力和孔隙水压力视为独立的变量,对 Hilf 方法进行了改进,然后给出了考虑强度随孔隙气压和孔隙水压力变化的填土堤防和强度随固结度增加而增长的饱和土堤防的稳定性分析方法。

2 Hilf 分析方法

Hilf 用一维固结试验模拟填土不排水加载路径,每一次施加荷载的结果是土的体积变化。如果已知空气初始体积,最后的空隙空气压力就能够计算出来。为此,作如下假定:

- (1) 加载期间只发生垂直应变;
 - (2) 初始孔隙水压力被假定为大气压力(1013 Pa);
 - (3) 土的体积变化是由于空气的压缩和空气在水中的溶解;
 - (4) 不考虑空隙气压和空隙水压力的消散;
 - (5) 不考虑水蒸气压力和温度的影响;
 - (6) 空隙水压力的变化等于空隙气压力的变化。
- 填土中自由空气和溶解空气的初始体积为

$$V_{a0} = [(1 - S_0)n_0 + hS_0n_0]v_0 \quad (1)$$

式中: V_{a0} 为初始孔隙空气体积; S_0 为初始饱和度; n_0 为初始孔隙比; V_0 初始土的体积; h 为 Henry 空气溶解系数,常温下近似等于 0.02; $(1 - S_0)n_0$ 为自由空气体积; hS_0n_0 为溶解空气体积; 初始空隙空气压力 V_{a0} 假定为大气压力。

在施加荷载后,最后的空气体积为

$$V_{af} = [(1 - S_0)n_0 + hS_0n_0 - \Delta n]V_0 \quad (2)$$

式中: V_{af} 为最终孔隙空气体积; Δn 孔隙比的变化。最后的孔隙空气压力可表达为

$$\bar{u}_{af} = \bar{u}_{a0} + \Delta u_a \quad (3)$$

式中: $\bar{u}_{af}$ 绝对初始孔隙空气压力; $\bar{u}_{a0}$ 为绝对最终孔隙空气压力; Δu_a 为绝对空隙空气压力的变化。

试验前后土中气体满足 Boyle 定律:

$$\bar{u}_{a0}V_{a0} = \bar{u}_{af}V_{af} \quad (4)$$

孔隙气压可以从上式得到:

$$\Delta u_a = \bar{u}_{a0}\Delta n / [(1 - S_0)n_0 + hS_0n_0 - \Delta n] \quad (5)$$

式(5)表达了土的体积变化、空隙比变化和空隙气压的变化这几个变量之间的关系。

有一个极限状态条件存在,即在刚进入饱和状态时,土的体积变化等于土中自由空气的初始体积:

$$\Delta n = (1 - S_0)n_0 \quad (6)$$

超越这一点,土体体积不再发生变化,将自由空气体积变化代入上式中,可得到达到饱和条件必需的空隙空气压力变化 Δu_{as}

$$\Delta u_{as} = (1 - S_0)u_{a0} / (S_0h) \quad (7)$$

引入土的体积压缩系数概念 m_v ,可以得到割线孔隙空气压力参数 $B'_{ah} = \Delta \bar{u}_{a0} / \Delta \sigma_y$

$$B'_{ah} = 1 / [1 + (1 - S_0 + hS_0)n_0 / (\bar{u}_{a0} + \Delta \bar{u}_a)m_v] \quad (8)$$

3 改进的 Hilf 分析方法

为了能够预估不排水加压情况下作为独立变量的孔隙气压力和孔隙水压力,必须对 Hilf 分析方法改进,用以确定总应力和孔隙气压的关系。典型的孔隙压力与总应力关系曲线形状和特征如图 1 所示。

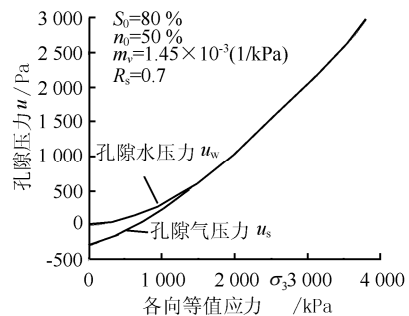


图 1 总应力与孔隙水压、总应力与孔隙气压关系
Fig.1 Relationship between total stress and pore water pressure, pore air pressure

根据空隙水压力和总应力关系曲线图形状和特征,对空隙水压力和总应力关系曲线可作以下两点假设:

(1) 该曲线是二次曲线;

(2) 当土达到饱和时,总应力的变化、空隙气压力的变化和空隙水压力的变化都相等。这意味着当土达到饱和时,总应力和空隙压力的关系曲线的斜率为 1.0。

如果空隙水压力和总应力关系曲线是二次曲线,则有

$$u_w = A\sigma^2 + B\sigma + C \quad (9)$$

式(10)中: A 、 B 、 C 为特定边界条件下的常数值。当总应力为零时, 常数 C 等于初始空隙水压力, 即

$$C = (u_a - u_w)_0 \quad (10)$$

当土接近饱和时, 总应力可以写为 σ_s , 空隙水压力为 u_{ws} , 且 $u_{as} = u_{ws}$, 空隙压力可设定为 u_s , 达到饱和时, 有

$$u_s = A\sigma_s + B\sigma_s + (u_a - u_w)_0 \quad (11)$$

达到饱和时, 空隙水压力和总应力关系曲线的斜率为 1.0 (此时 $du_s/d\sigma = 1$), 即

$$du_s/d\sigma = 2A\sigma_s + B = 1.0 \quad (12)$$

$$\text{或} \quad B = 1 - 2A\sigma_s \quad (13)$$

将 B 代入 (11) 中, 可求得常数 A :

$$A = [\sigma_s - u_s + (u_a - u_w)_0] / \sigma_s^2 \quad (14)$$

由 A 可以计算常数 B 的值:

$$B = 1 - 2[\sigma_s - u_s + (u_a - u_w)_0] / \sigma_s^2 \quad (15)$$

可以得到空隙水压力和总应力关系的一般表达式:

$$u_w = \left\{ [\sigma_s - u_s + (u_a - u_w)_0] / \sigma_s^2 \right\} \sigma^2 + \left\{ 1 - 2[\sigma_s - u_s + (u_a - u_w)_0] / \sigma_s^2 \right\} \sigma + (u_a - u_w)_0 \quad (16)$$

式中: σ_s 为进入饱和时应力; u_s 为进入饱和时空隙水压力; $(u_a - u_w)_0$ 为初始基质吸力。孔隙气压力由式 (8) 确定; 孔隙水压力可由式 (16) 确定。孔隙气压和孔隙水压影响非饱和堤防的抗剪强度, 从而影响软土堤防的安全系数。

4 软土地基抗剪强度增长的预估

抗剪强度的合理取值直接关系到软土堤防的安全性, 软土堤防在堤防填土荷载的作用下, 地基土的抗剪强度随固结时间的增长而增加。然而固结与抗剪强度两者之间的变化关系往往是比较复杂的, 影响因素众多。但对于饱和粘性土来说, 这些因素的影响都集中反映在单元土体受剪切过程中引起的孔隙水压力与有效应力的差异上^[2-5]。由于地基土在剪切前的固结压力、固结程度和排水条件的差异, 在剪切过程中将产生不同的孔隙水压力和有效应力, 引起抗剪强度增量加, 另外, 在一定条件下, 由于剪切蠕变, 还可能导致抗剪强度的衰减。因此,

地基中某一点在某一时刻的抗剪强度 τ_f 可表为

$$\tau_f = \tau_{f0} + \Delta\tau_{fc} - \Delta\tau_{fr} \quad (17)$$

式中: τ_{f0} 为地基中某点在加荷之前的天然抗剪强度, 可用十字板或无侧限抗压强度试验或三轴不排水剪切试验测定; $\Delta\tau_{fc}$ 为由于固结而增长的抗剪强度增量; $\Delta\tau_{fr}$ 为由于剪切蠕变而引起的抗剪强度衰减。

上式只是堤防抗剪强度值的概念性表述, 实际上, $\Delta\tau_{fr}$ 值就难以计算确定。为了考虑 $\Delta\tau_{fr}$ 效应, 通常将上式简化为

$$\tau_f = \eta(\tau_{f0} + \Delta\tau_{fc}) \quad (18)$$

式中: η 为考虑剪切蠕变及其它因素对强度影响的折减系数, 一般在 0.75~0.95 之间。当土的抗剪强度较低, 荷载较大时, 剪应力较大, 剪切蠕变效应较大, 则 η 应取较低值; 反之, 取较高值。事实上, η 的取值还应与时间有关。王盛源^[6]在第四届塑料板排水法加固软基技术研讨会上, 发表论文指出“排水体施工前后对土体扰动造成土体强度降低达 50%”。这时若堆载预压, η 值显著应取较小值, 在预压后期, η 值应有所增加。对于因排水固结而增长的抗剪强度增量 $\Delta\tau_{fr}$ 的计算方法有按单轴无侧限抗压强度或不排水抗剪强度计算, Skempton 经验公式法、含水量法、天然地基十字板强度推算法等许多种, 这里主要介绍有效应力法。

用一维固结理论计算分级加荷条件下的固结度, 再按有效应力法计算地基的强度:

$$\tau_f = \eta \left[\tau_{f0} + \left(\frac{\sin \phi' \cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \right) U \Delta\sigma_i \right] \quad (19)$$

式中: ϕ' 为土层的有效内摩擦角, U 为地基中的平均固结度; $\Delta\sigma_i$ 为荷载所引起的地基中某点的最大主应力增量, 由土体非线性比奥固结平面有限元分析给出。

式 (19) 中的强度参数 ϕ' 与剪切过程中引起的孔隙水压力无关。有效应力法在理论上是好的, 它可以利用实测的孔隙水压力来计算有效最大主应力增量 $\Delta\sigma_i$, 而且是对某一点进行计算的, 这便于和原位实测强度进行比较。大量的工程实践证明^[7-10], 地基内不同深度处固结度之间的差异是比较明显的, 与同一时刻地基平均固结度相比较, 其差值均在 10% 以内, 因此在计算时提出假设各点都采用同一的平均固结度来计算地基土体在固结过程中的强度增长。

5 某软土地区防洪大堤稳定性分析

某软土地区防洪大堤稳定性分析中,采用 Hilf 分析法,将堤防孔隙气压和孔隙水压作为独立变量来分析,利用非饱和土抗剪强度公式确定堤防土的强度,软土地基的抗剪强度利用饱和土理论获得,并考虑抗剪强度随固结度增加而提高,用简化 Bishop 圆弧法计算软土堤防的安全系数。

(1) 软基分析参数

软基计算参数如表 1 所示,根据不同的计算内容及要求选用。

表 1 计算断面计算指标

Table 1 Calculation index for computation cross-section

土层名称	厚度 H/m	压缩模量 E_s/MPa	固结系数 $C_v/(\text{cm}^2/\text{s})$	凝聚力 C_u/kPa	湿密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$
灰褐色黏土	1.40	7.11	5.35×10^{-3}	46.65	1.91
灰色淤泥质粉土	8.60	1.72	1.04×10^{-3}	14.97	1.69
淤泥质粉质黏土	1.00	5.92	8.72×10^{-3}	25.15	1.91
淤泥质粉质黏土	1.10	3.71	1.12×10^{-3}	27.60	1.82
灰色淤泥质粉土	3.20	2.18	3.04×10^{-3}	27.60	1.69
灰绿色粉质黏土	2.80	10.08	3.63×10^{-3}	50.00	1.82
灰绿色黏土	10.74	10.08	3.63×10^{-3}	140.75	2.04

(2) 软基强度分析成果

图 2 为计算断面固结度与时间关系曲线。填土

表 3 堤防填土参数

Table 3 Parameters of embankment fill

土层名称	高度 h/m	宽度 b/m	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{cm}^3)$	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	有效凝聚力 c'/kPa	初始饱和度 $S/(\%)$	初始基质吸 S_u/kPa	体积变化系数 $m_v/(1/\text{kPa})$
黏土	5.4	26.0	19.5	30	20	80	150	46.65

应用非饱和土抗剪强度的一般表达式来分析对于不同的孔隙气压、孔隙水压和 φ^b 值对土体抗剪强度的变化,并将此法应用于软土堤防的稳定计算中。非饱和土的抗剪强度的一般表达式:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (20)$$

(4) 计算结果

以计算断面为例,采用程序 REAME,对软土堤防的稳定性进行计算分析。计算分析中堤防填土的抗剪力利用改进 Hilf 分析法求出,软土的抗剪力利用饱和土理论获得。基质吸力 φ^b 在 $0 \sim 30^{\circ}$ 范围内选取。

至设计高程经历 203 d,固结度为 48.78%,经 637 d 时间,固结度为 79.30%。

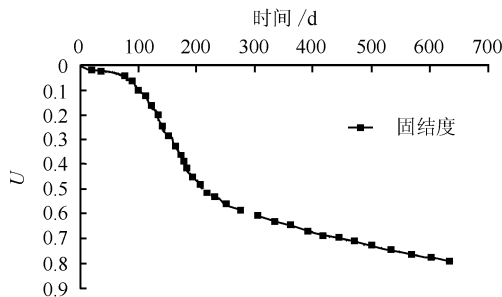


图 2 计算断面固结度与时间关系曲线

Fig.2 Curves of consolidation degree of vs. times along computation cross-section

计算断面在设计填土高度作用下,经历 203 d,固结度 48.78%时,各部位的强度增长值分别列于表 2。

表 2 计算断面各部位强度增长值表(单位: kPa)

Table 2 Values of strength growth along computation cross-section (unit: kPa)

位置	I 区	II 区	III 区
土层 1	11.81	5.91	0
土层 2	12.82	6.41	0
土层 3	12.56	6.28	0
土层 4	12.56	6.28	0
土层 5	12.56	6.28	0
土层 6	11.59	5.80	0

(3) 填土堤防分析参数

堤防填土参数如表 3 所示:

当孔隙气压值由 Hilf 分析确定时,计算结果下表 4 所示:

表 4 计算断面填土 4.9 m 时堤防安全系数

Table 4 Safety factors of embankment with 4.9 m high fill

φ^b	抗剪力表达式	安全系数
0°	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi'$	1.174
$10^{\circ} \sim 20^{\circ}$	$\tau = c' + \sigma_n \tan \varphi' + u_a (\tan \varphi' - \tan \varphi^b) - u_w \tan \varphi^b$	1.235~1.378
30°	$\tau = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \varphi'$	1.452

当孔隙气压值等于零时,计算结果如表 5 所示:

表 5 计算断面填土 4.9 米时堤防安全系数 ($u_s=0$)

Table 5 Safety factors of embankment with 4.9 m high

fill($u_s=0$)		
φ^b	抗剪力表达式	安全系数
0°	$\tau = c' + \sigma_n \tan \varphi'$	1.214
162		岩 土
30°	$\tau = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \varphi'$	1.452

6 结 论

从以上分析结果可看出，引入孔隙气压对堤防的稳定分析有较大的影响。随着基质吸力的增加，计算所得的稳定安全系数随之增加，忽略孔隙气压的作用所得的软土堤防的稳定安全系数偏大。当基质吸力 φ^b 等于 φ' 时，孔隙气压对抗剪力没有影响，此时计算所得的安全系数相同。因此施工期间软土地区高速公路堤防既要考虑孔隙气压和孔隙水压对堤防稳定性的影响，同时也要考虑地基固结提高对堤防稳定性的影响。

参 考 文 献

- [1] HILF J. Estimating construction pore pressure parameters for unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1948, 17(3): 313—404.
- [2] FREDLUND D G, MORGENSTER N R. Construction relations for volume change in unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1976, 13(3): 261—276.
- [3] FREDLUND D G, MORGENSTER N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**. 1978. 13(3): 313—321.
- [4] 王盛源, 周春儿, 关锦荷, 等. 塑料排水板的软基加固功能[C]//中国土木工程学会第四届塑料排水板加固软基技术研讨会论文集. 广州: [s.n.] , 1999: 131—139.
- [5] FREDLUND D G, MORGENSTER N R. Construction relations for volume change in unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1976, 13(3): 261—276.
- [6] 王盛源, 周春儿, 关锦荷, 等. 塑料排水板的软基加固功能[C]//中国土木工程学会第四届塑料排水板加固软基技术研讨会论文集. 广州: [s.n.] , 1999: 131—139.
- [7] AL-HOMOUD A S, TANASH N. Monitoring and analysis of settlement and stability of an embankment dam constructed in stages on soft ground. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2001, 59(4): 259—284.
- [8] 魏汝龙, 我国沿海软粘土特性及工程问题[J]. 水利水运科学研究, 1985, (3): 109—120.
- [9] 冯晓腊, 陈加红, 黄靖贤. 软土地基施工期稳定性评价方法的探讨. 水文地质工程地质, 1992, 19(2): 18—21.
- [10] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.