



用十字板强度推算软黏土抗剪强度指标的方法及应用

闫澍旺¹, 封晓伟¹, 侯晋芳², 李 伟³

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 3. 天津港集团公司, 天津 300452)

摘 要: 天津港区地基土上覆较厚的软黏土层, 处于欠固结状态, 含水率高, 承载力低。在构筑物施工期稳定性分析中, 需要采用不排水强度指标。常用的几种抗剪强度指标中, 以十字板强度最为可靠。但由于十字板强度是土体各滑动面上的抗剪强度的较小值, 用于计算土坡稳定性计算常得出过于保守的不合理的结果。同时, 单一的十字板强度指标无法用于计算箱筒型基础的地基土压力及承载力。基于十字板强度随深度线性分布的规律及莫尔-库仑抗剪强度原理, 结合收集的大量的十字板强度实测数据, 通过回归统计分析推算出地基土的两个抗剪强度指标, 并将其应用于软黏土土坡的稳定分析及新型箱筒型基础稳定性的计算, 计算结果较为合理。

关键词: 软黏土; 十字板强度; 抗剪强度指标; 统计回归分析; 土坡稳定; 箱筒型基础

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1805-06

作者简介: 闫澍旺(1950-), 男, 天津人, 教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: yanshuwang@tju.edu.cn。

Deduction and application of strength parameters of soft clay by use of vane strength

YAN Shu-wang¹, FENG Xiao-wei¹, HOU Jin-fang², LI Wei³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Port Engineering Institute, Ltd., Tianjin 300222, China; 3. Tianjin Port Group, Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In Tianjin Port, the foundation soils are soft clay with underconsolidated condition, low bearing capacity and high water content. The vane strength is more frequently used among the currently used strength parameters in assessing the stability analysis of the structure during the construction stage. Research results have shown that the vane strength is smaller than compared with the strength on other shear surfaces. Furthermore, a single value of the vane strength can not meet the requirements for calculating the earth pressure and bearing capacity. A new approach which can deduce the two conventional strength parameters based on the linear distribution of vane strength along the depth and the Mohr-Coulomb strength mechanism is presented by use of the statistical regression methods. The deduced parameters have been used to calculate the stability of slopes and the cylindrical caisson foundations in Tianjin Port.

Key words: soft clay; vane strength; shear strength parameter; regression analysis; slope stability; cylindrical caisson foundation

0 引 言

天津港地基土以软黏土为主, 处于欠固结状态, 含水率高, 抗剪强度低^[1]。如何评价修建在软土地基上的构筑物的稳定性是非常重要的问题。研究表明, 不同计算模式和方法对地基稳定性安全系数的偏差远小于计算中采用的抗剪强度参数取值的影响^[2]。

英国等国家的地基规范明确规定, 对于黏土地基上的构筑物, 如开挖形成的土坡, 挡土墙和重力式结构等, 对其施工期的稳定性分析要采用不排水强度指标^[3]。天津港早期结构物的设计中一般采用直剪快剪强度指标, 后又较多地采用固结快剪强度指标。但前者因取样和试验时会对软黏土造成较大的扰动, 测定

的强度远低于土体的实际强度; 而后者由于天津港软土层为欠固结的土^[1], 从而高估了软黏土的强度。十字板强度是现场测试的强度, 因而比较接近土体的实际抗剪强度, 在工程中应用最广泛^[1]。但研究表明, 十字板强度实际上主要反映的是竖直面上的强度, 由于不排水强度取决于该面上的剪前法向有效应力, 竖直面上的剪前法向有效应力为小主应力, 因此该面上的不排水抗剪强度为强度中的小值^[2]。采用十字板强度计算的天津港地区的大多数安全土坡的安全系数都在 0.9 以下, 既不合理也不能达到港口工程地基规范规定的 1.1~1.3 的要求。同时, 对于新近采用的新型

箱筒型基础的地基土压力和承载力需用到黏聚力和内摩擦角两个强度参数,而十字板强度是地基中某点处的特征强度而非强度参数,因此不能直接用于计算土压力等稳定性问题。

天津港在发展建设过程中积累了大量的十字板实测资料。研究表明,土体的不排水强度随深度呈线性增长,表明其与有效上覆压力有线性关系,这与国内外大量的现场实测结果是一致的^[1-4]。本文基于 Mohr-Coulomb 抗剪强度原理,结合十字板强度与深度有线性关系的规律性,通过对大量十字板测试结果的回归统计分析,提出了可以推算出地基土的两个抗剪强度参数的方法。近年来提出一种新型箱筒型基础,与传统的重力式结构和深基础结构均不相同,虽然这种新型的箱筒型结构形式经室内和现场试验证明是成功的,但对于如何评估该结构的稳定性目前还缺少成熟的设计计算方法。本文首先应用由现场十字板强度推算了地基土的强度参数,并采用该参数计算了该地区若干软黏土土坡的安全系数,计算结果较为合理。同时应用于对筒型结构基础的承载能力、抗滑和抗倾能力的分析计算。

1 用十字板推算抗剪强度指标

1.1 十字板强度

通用的十字板板头由两片正交的矩形金属板组成,板的高宽比为 2:1,见图 1(a)。当转动插入土层中的十字板板头时,在土层中产生的破坏状态接近一个圆柱体,见图 1(b)。设剪切破坏时所施加的扭矩为 M ,则它应该等于剪切破坏圆柱面(包括侧面和上下面)上土的抗剪强度所产生的抗扭力矩,即

$$\begin{aligned} M &= \pi D H \cdot \frac{D}{2} \cdot \tau_{fv} + 2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{D}{3} \cdot \tau_{fh} \\ &= \frac{1}{2} \pi D^2 H \tau_{fv} + \frac{1}{6} \pi D^3 \tau_{fh} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, M 为剪切破坏时的扭力矩, τ_{fv} , τ_{fh} 分别为剪切破坏时土样圆柱体侧面和上下底面的抗剪强度, H 为十字板的高度, D 为十字板的直径。

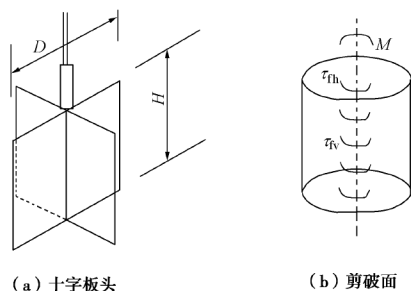


图 1 十字板及相应剪破面的受力状况

Fig. 1 Vane and load conditions of corresponding shear failure surface

在常规的十字板试验中假设 $\tau_{fv} = \tau_{fh} = c_u$, c_u 为现场测定的十字板强度,代入式(1)有

$$c_u = \frac{2M}{\pi D^2 (H + \frac{D}{3})} \quad (2)$$

由上可知,推算十字板强度过程中有两个假定:

①剪破面为一圆柱面,圆柱的直径和高度等于十字板的宽度和高度;②圆柱侧面和上、下底面的强度相等,且同时发挥。

十字板剪切试验由于简捷易操作,且大体上在原位应力状态下进行,已成为现场测定饱和软黏土不排水强度的常用方法。比伦提出当软黏土的塑性指数 I_p 大于 20 时,对十字板强度应进行修正^[2]。天津港的软黏土塑性指数在 22 左右,基本上不用进行修正。

对于正常固结的黏土,Skempton^[5-6]提出了不排水强度随有效上覆压力的经验公式

$$\frac{c_u}{\sigma_v} = 0.11 + 0.0037 I_p \quad (3)$$

图 2 给出了天津港地区地基土十字板强度的统计结果,可见在表层淤泥和淤泥质土层中,十字板强度随深度线性增长。

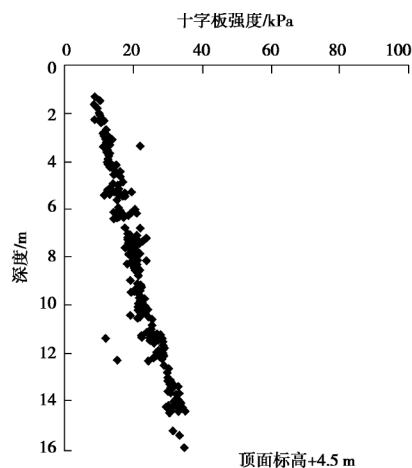


图 2 天津港区地基土十字板强度与深度关系

Fig. 2 Relationship between foundation soil vane strength and depth in Tianjin Port

实际上土体是各向异性的,上下面和侧面的强度是不同的。十字板带动圆柱体土柱旋转时,其所受到的剪应力由土柱的上、下底面和侧面所承担,而被十字板剪切的土柱的侧面积远大于上下底面的面积,后者(上下底面积之和)仅为前者的 17% 左右,因此根据式(1),十字板强度反映的主要是竖直面的抗剪强度。由于不排水强度取决于该面上的剪前法向有效应力,竖直面上的剪前有效固结压力为小主应力,因此,该面上的强度(即十字板强度)为各面强度中的小值。因此,如果在工程设计中采用十字板强度进行地基稳定性计算,计算结果将偏于保守,不能正确估计地基

的安全度。例如在边坡稳定分析中发现, 对于天津港许多实际上稳定的码头边坡工程, 采用十字板强度计算的安全系数往往小于 1.0。同时, 由于十字板强度是地基中某点处的特征强度, 而计算新型箱筒型基础的地基土压力和承载力需用到黏聚力和摩擦角两个强度指标, 因此不能直接用十字板强度计算土压力等稳定性问题。本文根据十字板强度随深度线性增加的特点, 依据土体强度的 Mohr-Coulomb 原理, 结合天津港在发展建设过程中积累了大量的十字板实测资料, 提出了通过对十字板测试结果的回归统计分析, 推算地基土的两个抗剪强度指标的方法, 可应用于新型箱筒型基础的稳定性和承载力的计算。

1.2 土体强度的 Mohr-Coulomb 原理

根据 Coulomb 抗剪强度公式 $\tau_f = \sigma' \tan \varphi + c$, 软黏土的抗剪强度由两部分组成 (图 3), 即摩擦强度 $\sigma' \tan \varphi$ 和黏聚强度 c [7-9]。

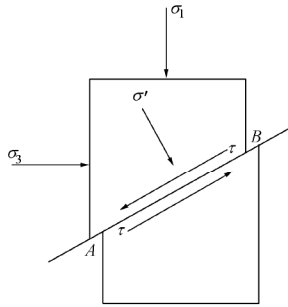


图 3 土单元体剪切破坏图

Fig. 3 Shear failure of a soil element

摩擦强度决定于剪切面上的有效法向应力 σ' 和摩擦系数 $\tan \varphi$, φ 为土的内摩擦角, 与颗粒的形状、大小、矿物组成及级配等因素有关; 细粒土的黏聚力 c 取决于土粒间的各种物理化学作用力, 包括库仑力 (静电力)、范德华力、胶结作用力等。摩擦强度与剪切面上的法向应力有关, 较大的法向应力将产生较大的摩擦强度, 黏聚力与法向应力无关。摩擦强度与黏聚强度共同发挥作用, 使土体的不同剪切面具有不同的抗剪能力。

因而, 十字板在剪切时, 形成图 1 所示的土柱, 在不同的固结度下, 土柱竖直面和水平面的强度是不同的, 分别为:

$$\tau_v = K_0 U_t \gamma' z \tan \varphi + c, \quad (4)$$

$$\tau_h = U_t \gamma' z \tan \varphi + c, \quad (5)$$

式中, τ_v 为竖直面上的抗剪强度, τ_h 为水平面上的抗剪强度, K_0 为土的侧压力系数, U_t 为土的平均固结度, γ' 为土的有效重度, z 为计算点深度。

1.3 用十字板指标推算土体抗剪强度指标统计回归分析

根据十字板随深度增加的特征, 如果有足够的测

试结果, 则可通过统计回归的方法推算出土体的抗剪强度指标。考虑土体竖直面和水平面的抗剪强度相同, 将式 (4) 和 (5) 代入式 (1) 中可得

$$M = \frac{1}{2} \pi D^2 H (K_0 U_t \gamma' z \tan \varphi + c) + \frac{1}{6} \pi D^3 (U_t \gamma' z \tan \varphi + c), \quad (6)$$

联立式 (2) 和 (6) 并化简有

$$c_u = \frac{K_0 H + \frac{1}{3} D}{H + \frac{1}{3} D} U_t \gamma' z \tan \varphi + c. \quad (7)$$

为进行统计回归, 令 $\bar{Y} = c_u$, $\bar{X} = z$,

$$a = \frac{K_0 H + \frac{1}{3} D}{H + \frac{1}{3} D} U_t \gamma' \tan \varphi, \quad b = c, \quad (8)$$

则可得到式 (7) 的线性回归方程标准形式

$$\bar{Y} = a \bar{X} + b. \quad (9)$$

式 (7) 中 D , H 和 γ' 都是已知的, 对于软黏土 K_0 一般在 0.62 左右且变化不大 [5], 因此可通过对工程实测的十字板强度进行统计回归, 建立起十字板强度 c_u 与深度 z 的线性方程, 直线方程的截距 b 就为黏聚力 c , 而内摩擦角 φ 可由斜率 a 求出。

上面方法求出的抗剪强度指标与十字板强度相比具有如下优点: ①考虑了土体竖直与水平方向强度的差异 (抗剪强度的各向异性); ②推算出黏聚力和内摩擦角两个抗剪强度指标, 可用于土压力和承载力计算; ③通过应用抗剪强度公式, 可合理估算土体任意剪切面上的强度, 用于土坡稳定计算更合理。

实际上, 除去上覆硬壳土层, 十字板强度与深度是呈线性分布的, 这一结论已被国内外大量的工程实践所证实 [6-7]。

根据天津港软土层的统计结果 (见图 2), 可得统计方程的标准形式为 $\bar{Y} = 1.6417 \bar{X} + 5.1454$, 数据点统计回归直线的相关系数 $r = 0.9725$, 根据数理统计理论, 数据符合线性的假定的置信度在 95% 以上。由式 (8) 可推算出强度指标: 内摩擦角 $\varphi \approx 15.7^\circ$, $c \approx 6.6 \text{ kPa}$ (小于常规的固结快剪指标) [1]。

2 天津港软黏土边坡稳定性分析

软黏土土坡稳定分析中的强度问题历来为许多学者所重视, 其中 Bishop 和 Bjerrum 这方面进行了许多工作, 指出在土坡短期稳定设计中由于孔隙水压力来不及消散, 应采用不排水强度指标计算 [5]。最初不排水强度指标多采用无侧限抗压强度或用三轴不排水强度, 1948 年卡德林创造了十字板现场试验方法, 获得了推广应用, 认为十字板强度特别适用于软黏土土坡计算。Bjerrum 在收集分析破坏实例基础上, 提出破

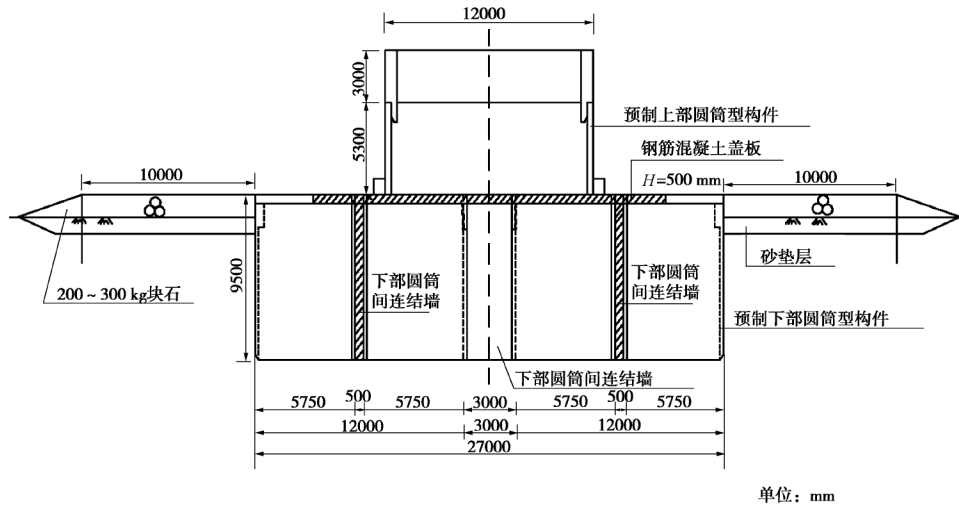


图 5 箱筒型基础防波堤结构断面图

Fig. 5 Profile of breakwater with cylindrical caisson foundation

3.1 基底抗滑稳定性计算

箱筒型基础的稳定性分析采用极限平衡法计算,

$$F_s = \frac{\text{抗滑力}}{\text{滑动力}} \quad (10)$$

(1) 抗滑力由主动土压力、被动土压力以及基底摩阻力来承担:

主动土压力

$$E_a = \frac{1}{2} \sigma_a z$$

$$= \frac{1}{2} [\gamma' z \tan^2(45^\circ - \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ - \varphi/2)] z, \quad (11)$$

则 $E_a = 106.6 \text{ kN}$; 被动土压力

$$E_p = \frac{1}{2} \sigma_p z$$

$$= \frac{1}{2} [\gamma' z \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2)] z, \quad (12)$$

则 $E_p = 516.0 \text{ kN}$; 总土压力 $E = L(E_p - E_a) = 8514 \text{ kN}$, 基底总摩阻力

$$f = 4\tau_f \pi r^2, \quad (13)$$

其中, $\tau_f = \gamma = 2.248x + 6.6344 = 2.248 \times 8.0 + 6.6344 = 24.62 \text{ kPa}$, 则 $f = 8527 \text{ kN}$; 那么抗滑力 $F_k = E + f = 17041 \text{ kN}$ 。

(2) 滑动力是由水平荷载引起的, 即滑动力 $F_h = P_w = 22 \times 307 \times 1.5 = 10131 \text{ kN}$, 其中, L 为基础长度, r 为箱筒型基础的圆筒半径, P_w 为箱筒型基础上部结构所受的水平力。

根据计算, 基底抗滑稳定安全系数 $F_s = F_k / F_h = 17041 / 10131 = 1.68$, 满足设计要求。

3.2 地基承载力计算

港工地基承载力计算中, 常用汉森公式计算地基的竖向极限承载力, 修正后的汉森公式为

$$q_u = c N_c s_c d_c i_c g_c b_c + q N_q s_q d_q i_q g_q b_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (14)$$

式中 B 为基础有效宽度; s_c, s_q, s_γ 为基础形状修正系数; i_c, i_q, i_γ 为荷载倾斜修正系数; d_c, d_q, d_γ 为基础埋深修正系数; g_c, g_q, g_γ 为地面倾斜修正系数; b_c, b_q, b_γ 为基底倾斜修正系数; N_c, N_q, N_γ 为承载力系数, 按土的内摩擦角从相关表格中查取。

地基极限承载力

$$Q_u = q_u B L, \quad (15)$$

基底竖向荷载包括基础自重和箱筒型基础深度范围内的土重。

由此, 根据汉森公式计算的极限承载力 $Q_u = 98515.7 \text{ kN}$, 基底竖向荷载 $Q_{bs} = 38410.5 \text{ kN}$, 安全系数为 2.56, 地基承载力满足设计要求。

3.3 基底抗倾覆验算

由于水平荷载的存在, 会对基底产生力矩, 因此需进行抗倾覆验算, 计算简图如图 6 所示。

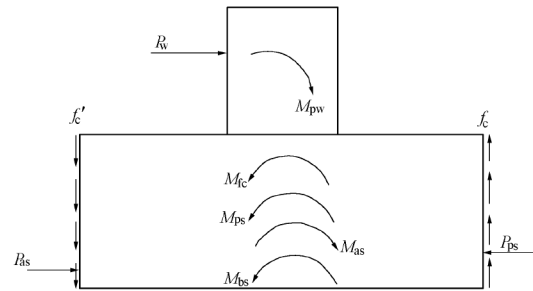


图 6 箱筒型基础抗倾覆验算简图

Fig. 6 Configuration of antidumping check for cylindrical caisson foundation

对基底左边界取矩, 图 6 中, M_{ps} 为被动土压力产生的力矩,

$$M_{ps} = \frac{1}{3} E_p L z_p; \quad (16)$$

M_{as} 为主动土压力产生的力矩,

$$M_{as} = \frac{1}{3} E_a L z_a ; \quad (17)$$

M_{fc} 为基础侧面与土体的摩擦力产生的力矩,

$$M_{fc} = B f_c ; \quad (18)$$

M_{bs} 为地基竖向力产生的力矩,

$$M_{bs} = \frac{1}{2} Q_{bs} B . \quad (19)$$

根据力矩平衡原理, 就可以求出极限状态下箱筒型基础可以承受的最大倾覆力矩 M_{pwu} , 即

$$M_{ps} + M_{fc} + M_{bs} - M_{as} = M_{pwu} , \quad (20)$$

其中, z_p 为被动土压力的作用深度, z_a 为主动土压力的作用深度, f_c 为箱筒型基础侧摩阻力。

由此计算出的最大倾覆力矩 $M_{pwu} = 430031.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 大于由水平荷载产生的力矩 $M_{pw} = 123294.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 安全系数 3.49, 满足地基抗倾覆要求。

综上, 采用十字板强度推算出的抗剪强度指标计算的新型箱筒型基础的基底抗滑稳定性、地基承载力及抗倾覆验算均满足要求, 表明该设计是合理的。

4 结 论

(1) 十字板强度未能反映实际滑动面的抗剪强度, 它表示的是土体竖直面强度, 是强度中的较小值, 因而直接采用十字板强度计算土坡稳定问题结果过于保守。

(2) 利用十字板强度与深度的线性关系, 结合土体的抗剪强度表达式, 考虑土体竖直和水平面抗剪强度的不同, 可以统计回归出土体的两个抗剪强度指标, 用于土坡施工期稳定计算较为合理。

(3) 十字板强度回归出的抗剪强度指标可用来计算于施工阶段的土压力计算, 解决了直接采用十字板强度无法计算土压力的难题, 可用于新型箱筒型基础防波堤的短期抗滑稳定性、承载力及抗倾覆的计算。

(4) 对于性质明显不同的相邻土层, 应采用本文方法进行分层统计分析, 以确定各层土的抗剪强度指标。

参考文献:

- [1] 侯 钊, 陈 环, 钱 征. 天津软土地基[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1987. (HOU Zhao, CHEN Huan, QIAN Zheng. Soft soil foundations in Tianjin[M]. Tianjin: Tianjin Scientific and Technical Press, 1987. (in Chinese))
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. (QIAN Jia-huan, Yin Zong-ze. Geotechnical engineering principle and calculation[M]. 2nd ed Beijing: China Water Power Press, 1996. (in Chinese))
- [3] BISHOP A W. The strength of soils as engineering material[J]. Geotechnique, 1966, 16: 91 - 128.
- [4] CRAIG R F. Soil mechanics[M]. Chapman & Hall, 1995.
- [5] SKEMPTON A W, SOWA V A. The behavior of saturated clays during sampling and testing[J]. Geotechnique, 1963, 13: 269 - 290.
- [6] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory[J]. Geotechnique, 1985, 35: 1 - 18.
- [7] BJERRUM L. Problem of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soil (collapsible, expansive and others)[C]// Proceeding 8th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, Moscow, 1973: 111 - 159.
- [8] 刘祖德, 陆士强, 包承纲, 等. 土的抗剪强度特性, 土的抗剪强度与本构关系学术会议水平发展报告之一[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(1): 106 - 119. (LIU Zu-de, LU Shi-qiang, BAO Cheng-gang, et al. Properties of soil shear strength, Academic conference development report on soil shear strength and constitutive relationship #1[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(1): 106 - 119. (in Chinese))
- [9] 刘祖德. 土的抗剪强度的取值标准问题[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(2): 11 - 19. (LIU Zu-de. Criterion of soil shear strength confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(2): 11 - 19. (in Chinese))
- [10] LEROUEIL S, La ROCHELLE, P. Remarks on the stability of temporary cuts[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990: 687 - 692.
- [11] 侯晋芳. 软黏土土坡稳定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (HOU Jin-fang. Stability analysis of soft clay slope[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [12] SKEMPTON A W. Vane tests in the alluvial plain of the River Forth near Grangemouth[J]. Geotechnique, 1948, 1: 111.
- [13] 魏汝龙, 张 凌. 稳定分析中的强度指标问题[J]. 岩土工程学报, 1993, 5(5): 24 - 30. (WEI Ru-long, ZHANG Ling. Strength parameters in the stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 5(5): 24 - 30. (in Chinese))
- [14] 陈愈炯, 吴有茗, 胡中雄, 等. 工程实践中土体抗剪强度的确定—土的抗剪强度与本构关系学术会议水平发展报告之四[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(1): 106 - 119. (CHEN Yu-jiong, WU You-ming, HU Zhong-xiong, et al. Determination of soil shear strength in the engineering practice—Academic conference development report on soil shear strength and constitutive relationship #4[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(1): 106 - 119. (in Chinese))