

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.08.031

CPTU 确定饱和土体水平渗透系数的改进方法

李镜培^{1,2}, 李险峰^{1,2}, 张亚国^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土与地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要: 目前采用的球面流或半球面流模型所预测的饱和土体渗透系数普遍低于实测值, 为提高孔压静力触探(CPTU)测试技术确定饱和土体水平渗透系数的准确性, 针对初始超孔隙水压力的分布形式、孔压过滤环的位置和渗流模型3个主要问题, 在回顾前人方法基础上, 提出一种基于CPTU确定饱和土体水平渗透系数 k_h 的改进方法。根据已有研究成果, 将锥肩附近初始超孔隙水压力视为负指数型衰减分布, 结合圆柱面径向渗流模型, 推导出饱和土体水平渗透系数的计算公式, 应用算例验证了本文方法的合理性, 再结合上海某地的实测数据, 将本文方法与已有方法进行对比分析, 研究结果显示: 本文方法计算的渗透系数大于已有方法, 更接近室内渗透试验的结果; CPTU测试技术可用于连续且快速地计算饱和土体水平渗透系数。

关键词: 孔压静力触探; 饱和土体; 改进方法; 水平渗透系数

中图分类号: TU413

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)08-0185-04

A modified approach to determine horizontal permeability coefficient of saturated soils based on CPTU

LI Jingpei^{1, 2}, LI Xianfeng^{1, 2}, ZHANG Yaguo^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: To increase accuracy of estimating permeability coefficient of saturated soils using piezocone penetration tests (CPTU), taking account that the permeability coefficient of saturated soils estimated by the existing flow model to the spherical or the hemispherical surface is generally lower than the measured value, a modified approach was proposed, in which the initial excess pore water pressure, the location of filter element and seepage model were studied after the researches on evaluation of permeability coefficient of saturated soils were briefly reviewed. Based on the existing results, the initial excess pore water pressure around the shoulder of the cone was regarded as negative exponential attenuation distribution. Combined with the radial flow model to a cylindrical surface, the expression of horizontal permeability coefficient of saturated soils was derived. The comparison between the predicted and measured values demonstrates that the modified approach is reasonable and effective. The results show that the horizontal permeability coefficient determined by the modified approach is larger than that of previous approaches and more close to the corresponding measured value in laboratory tests. The horizontal permeability coefficient of saturated soils can be continuously and rapidly determined by CPTU.

Keywords: piezocone penetration test; saturated soils; modified approach; horizontal permeability coefficient

孔压静力触探(CPTU)测试技术是一种快速、经济、有效的原位测试方法, 在国际上广泛应用于岩土工程实践。CPTU测试技术能测出近乎连续的锥尖阻力 q_t , 侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_w 等参数, 可用于土分类、土工特性评价以及工程设计等^[1-2]。

由于孔压消散试验耗时长的缺点, 许多学者致力于用CPTU测试技术确定饱和土体的渗透系数。

其中大多数方法是经验性的, 比如利用CPTU划分土类的方法确定渗透系数的大致范围^[3]。而 Elsworth 等^[4-5]的方法(简称 Elsworth 方法)和 Chai 等^[6]的方法(简称 Chai 方法)采用位错理论结合球面流或半球面流模型, 推导出 CPTU 测试指标与渗透系数之间的理论关系式。

但是以 Elsworth 方法和 Chai 方法为代表的球面流和半球面流模型主要存在以下3个问题:

1) Chai 方法推导公式时, 假定初始超孔隙水压力呈幂函数分布的形式, 但该假定缺乏合理性, 初始超孔隙水压力为负指数型衰减分布更为合理^[7]。

收稿日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(41272288)

作者简介: 李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李险峰, 1431948@tongji.edu.cn

2) Elsworth 方法和 Chai 方法都没有指明实测孔隙水压力的位置, 即对孔压过滤环位于锥面 (u_1)、锥肩 (u_2) 和侧壁摩擦筒后部 (u_3) 时测得的孔压没有做区分^[1, 6], 这会影响计算结果的准确性。

3) Elsworth 方法和 Chai 方法计算的渗透系数是水平方向的^[6], 但是它们分别采用了球面流和半球面流模型的假定, 使得超静孔隙水压力的消散是沿垂直于球面方向, 而非沿水平方向^[1], 显然不太准确。

针对以上问题, 提出了一种假定锥肩附近初始超孔隙水压力符合负指数型衰减分布, 结合圆柱面径向渗流模型, 计算饱和土体水平渗透系数的改进方法。然后通过文献[6]中算例验算了本文方法的合理性, 最后根据上海某地的实测资料, 将本文方法与前人方法进行对比分析。

1 Elsworth 方法和 Chai 方法

为了基于 CPTU 测试技术更精确地计算饱和土体渗透系数, Elsworth 等^[4] 提出了一种基于位错理论结合球面流模型计算渗透系数的方法, 图 1 为位错理论基本概念图。

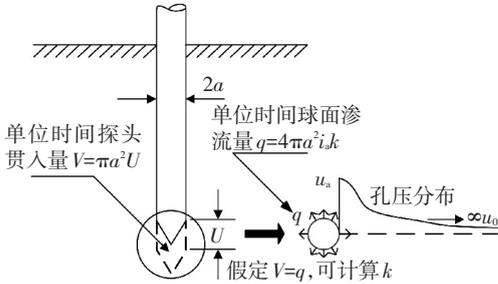


图 1 位错理论基本概念图^[6]

Fig.1 Basic concept of dislocation theory^[6]

该方法做出一系列假定^[8]: 1) 在孔压静力触探贯入过程中, 动态稳定的孔压水渗流形成的球形孔穴恰好能包裹整个探头; 2) 探头处形成的球形孔穴的直径等于探头的直径; 3) 连续性假设: 单位时间内孔穴的球形表面渗透流量等于探头贯入量; 4) 孔压静力触探贯入时在探头附近只形成正的超孔隙水孔压力, 在距探头很远处超孔压为零。

再结合达西定律, 推导出饱和土体渗透系数 k 的计算公式:

$$k = \frac{K_D U a \gamma_w}{4 \sigma'_{v0}}, K_D = \frac{4k \sigma'_{v0}}{U a \gamma_w} \quad (1)$$

其中 K_D 为无量纲渗透系数,

$$K_D = \frac{1}{B_q Q_t} \quad (2)$$

归一化锥尖阻力 Q_t 和孔压参数比 B_q :

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad (3)$$

$$B_q = \frac{u_a - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4)$$

式中: γ_w 为水的重度, σ_{v0} 、 σ'_{v0} 分别为上覆土层的总自重应力及有效自重应力, U 为探头贯入速度, a 为探头半径, q_t 为锥尖总阻力, u_a 、 u_0 分别为 CPTU 实测孔隙水压力和初始静止孔隙水压力。该方法只适用于部分排水情况的土体, 对应于 $B_q Q_t < 1.2$ 。

根据实测资料, Elsworth 等^[5] 修正了 K_D 和 CPTU 测试指标 $B_q Q_t$ 的关系, 见图 2, 得到如下等式:

$$K_D = \frac{0.62}{(B_q Q_t)^{1.6}} \quad (5)$$

通过 CPTU 测试指标 $B_q Q_t$ 可计算 K_D , 再根据式(1)可计算 k 。

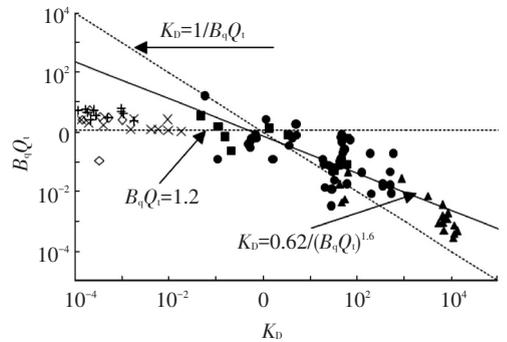


图 2 无量纲渗透系数 K_D 和测试指标 $B_q Q_t$ 的关系

Fig.2 Relationship between K_D and $B_q Q_t$ from CPTU test

基于 Elsworth 方法, Chai 等^[6] 提出了半球面流的假定, 推导出饱和土体渗透系数 k 的计算公式:

$$k = \frac{K_D U a \gamma_w}{2 \sigma'_{v0}} \quad (6)$$

对文献[5]中实测数据进行分析, 重新修正 K_D 和 $B_q Q_t$ 的关系, 提出了一种双线性模型, 即

$$K_D = \begin{cases} \frac{1}{B_q Q_t}, & B_q Q_t < 0.45; \\ \frac{0.044}{(B_q Q_t)^{4.91}}, & B_q Q_t \geq 0.45. \end{cases} \quad (7)$$

2 改进方法

Chai 方法在计算饱和土体渗透系数时, 假定初始超孔隙水压力的分布符合幂函数形式, 即

$$u - u_0 = (u_a - u_0) \frac{a}{r} \quad (8)$$

但研究发现^[9], 孔压静力触探过程中, 初始超孔隙水压力的分布符合负指数型衰减形式, 其表达式为

$$u - u_0 = (u_a - u_0) e^{-\beta(\frac{r}{a}-1)} \quad (9)$$

式中: r 为空间点与圆柱面的径向距离, $a < r < \infty$; u 为 r 处的孔压; β 为一正值, 其范围为 0.15~0.40, 马淑芝等^[10] 通过室内孔压静探模型槽试验认为 β 取 0.3

更合理,同时王君鹏等^[7]通过实测资料进一步验证其合理性,所以初始超孔隙水压力更符合负指数型衰减的分布形式。

式(9)中实测孔隙水压力 u_a 的大小与孔压过滤环的位置有关,见图 3,孔压过滤环对应不同位置时 u_a 分别为 u_1 、 u_2 、 u_3 ,而 Elsworth 方法和 Chai 方法并没有具体指明孔压过滤环的位置,会使计算结果不准确。由已有研究成果^[1]知,孔压过滤环位于锥肩时,超静孔隙水压力的消散应当沿孔压过滤环的径向方向流出,如图 4 所示,为沿圆柱面(孔压过滤环表面)的水平向消散,而无法向上流入探头内部,也无法向下流入圆锥头内。所以,考虑到实际工程中孔压过滤环一般位于锥肩处,采用圆柱面径向渗流模型能更准确地计算饱和土体的水平渗透系数。

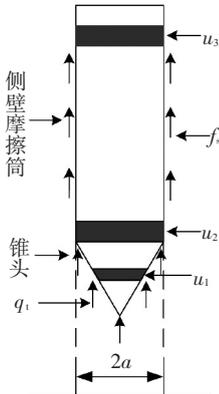


图 3 CPTU 孔压过滤环位置

Fig.3 Locations of filter element of CPTU probe

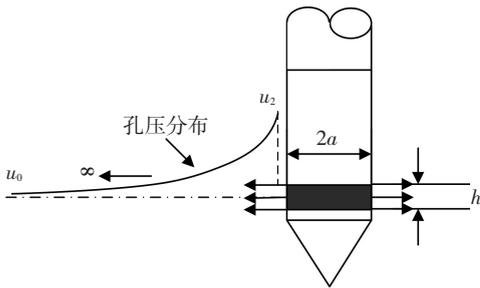


图 4 圆柱面流动^[1]

Fig.4 Cylindrical flow^[1]

根据上述说明,本文基于已有研究做出如下假定:

1) 孔压过滤环位于锥肩时,超静孔隙水压力的消散符合圆柱面径向渗流模型。那么,CPTU 实测孔隙水压力为

$$u_a = u_2. \quad (10)$$

2) 在孔压静力触探贯入过程中,锥肩附近初始超静孔隙水压力的分布为负指数型衰减形式。那么,结合式(9)和(10)可得圆柱面 $r=a$ 处的孔压梯度为

$$i_a = \frac{1}{\gamma_w} \frac{du}{dr} \Big|_{r=a} = \frac{\beta}{a} \frac{u_2 - u_0}{\gamma_w} = 0.3B_q Q_t \frac{\sigma'_{v0}}{a\gamma_w}. \quad (11)$$

3) 连续性假设,单位时间内通过半径为 a 的圆柱面的渗流量等于探头的体积贯入量,则存在:

$$2\pi a h k_h i_a = \pi a^2 U, \quad (12)$$

式中 h 为孔压过滤环厚度。

结合式(11)和(12),可推导出饱和土体水平渗透系数为

$$k_h = \frac{\pi a^2 U}{2\pi a h i_a} = \frac{a}{0.6h} K_D \frac{U a \gamma_w}{\sigma'_{v0}}. \quad (13)$$

对于国际标准规格的 CPTU 探头,探头直径为 $2a=35.7 \text{ mm}$,孔压过滤环厚度 $h=5 \text{ mm}$,则式(13)可化为

$$k_h = \frac{a}{0.6h} K_D \frac{U a \gamma_w}{\sigma'_{v0}} = 5.95 K_D \frac{U a \gamma_w}{\sigma'_{v0}}. \quad (14)$$

对比式(1)和(14)可知,本文方法的 K_D 约是 Elsworth 方法的 0.042 倍。根据文献[5]中实测数据,将其 K_D 乘以 0.042 可折减成本文方法对应的 K_D ,如图 5 所示。观察图 5,可得关系式:

$$K_D = \begin{cases} 0.1 / B_q Q_t, & B_q Q_t < 0.45; \\ 0.0044 / (B_q Q_t)^{4.91}, & B_q Q_t \geq 0.45. \end{cases} \quad (15)$$

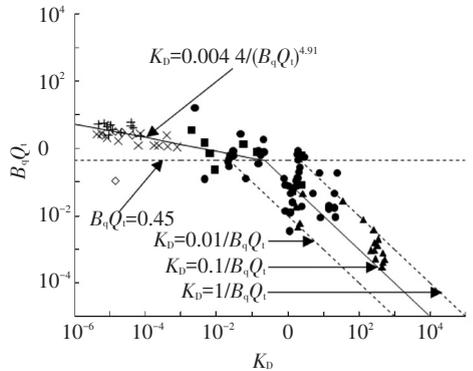


图 5 修正后无量纲渗透系数 K_D 和 $B_q Q_t$ 的双线性关系

Fig.5 Modified bi-linear relationship between K_D and $B_q Q_t$

由图 5 可知,式(15)在双对数坐标系中是两段直线,即 K_D 与 $B_q Q_t$ 之间呈双线性关系。考虑到在工程实践中,渗透系数的误差位于一个数量级范围内是可以接受的^[1],图中 $K_D = 0.01/B_q Q_t$ 和 $K_D = 1/B_q Q_t$ 分别为 $K_D = 0.1/B_q Q_t$ 一个数量级范围内的下限和上限。从图 5 还可看出,实测数据基本在误差允许范围内。

Elsworth 方法和 Chai 方法只考虑了孔压静力触探贯入过程中产生正的超静孔隙水压力的情况,适用性受到限制。由于本文方法是以 Elsworth 方法和 Chai 方法为基础,故而也仅适用于正常固结或轻微超固结的黏性土和松散的无黏性土。

3 算例分析

通过文献[6]中算例进行定量计算,将计算结果和已有方法进行对比分析。算例采用国际标准探头,其横

截面积为 $1\ 000\ \text{mm}^2$, 探头贯入速度 $U=20\ \text{mm/s}$, CPTU 测试指标 $B_q Q_t=3$, 超孔隙水压力 $u_a-u_0=300\ \text{kPa}$. 将 $B_q Q_t=3$ 代入式 (15), 得到 K_D 约为 2.00×10^{-5} , 再代入式 (14) 并结合已知条件, 可知本文方法计算的饱和土体水平渗透系数约为 $4.16 \times 10^{-9}\ \text{m/s}$. 由于 $B_q Q_t$ 为 3 大于 1.2, Elsworth 方法不适用, Chai 方法计算的结果约为 $3.50 \times 10^{-9}\ \text{m/s}$. 同时, 本文考虑到 K_D 和 $B_q Q_t$ 之间的双线性关系, 继续假定 $B_q Q_t=0.2$, $u_a-u_0=20\ \text{kPa}$, 其他条件同上, 同理可得本文方法计算的结果约为 $1.04 \times 10^{-4}\ \text{m/s}$, Elsworth 方法计算的结果约为 $7.12 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$, Chai 方法计算的结果约为 $8.74 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$.

由算例可知, 本文方法计算的结果与 Elsworth 方法和 Chai 方法基本一致, 和实际经验相符合. 本文方法计算结果比 Elsworth 方法和 Chai 方法计算结果都略大, 是 Chai 方法的 1.19 倍. 从已有资料^[1,7] 知, Elsworth 方法和 Chai 方法的计算结果普遍低于实测值. 所以, 本文方法能更准确地计算饱和土体的水平渗透系数.

4 工程应用

根据文献 [7] 中上海某地的实测数据, 应用 Chai 方法及本文方法分别计算了土体的渗透系数, 并与室内渗透试验的结果相比较, 结果见图 6.

本文方法的计算结果与室内渗透试验结果基本在一个数量级范围内, 只有小部分灰色淤泥质粉质粘土和青灰色砂质粉土的计算结果与室内渗流试验差异较大. 另外, 同一土层的渗透系数变化非常明显, 推测可能是因为同一土层中含有软弱夹层, 导致其渗透系数发生变化. 而室内渗透试验由于受到人为确定取样位置等因素的影响, 不能反映出这种连续地变化, 会导致较大的偏差.

5 结 论

1) 本文方法具有合理性, 计算的水平渗透系数大于已有方法, 是 Chai 方法的 1.19 倍, 更接近室内渗透试验的结果, 进一步提高了计算结果的准确性.

2) CPTU 测试技术可以连续且快速地计算饱和土体的水平渗透系数, 避免了室内渗透试验不连续和孔压消散试验耗时长缺点.

3) 本文方法适用于正常固结或轻微超固结的黏性土和松散的无黏性土.

参考文献

- [1] 邹海峰, 蔡国军, 刘松玉. 基于位错理论的饱和土渗流特性 CPTU 评价研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 519-528. DOI: 10.11779/CJGE201403015.
- [2] ZOU Haifeng, CAI Guojun, LIU Songyu. Evaluation of coefficient of permeability of saturated soils based on CPTU dislocation theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 519-528. DOI: 10.11779/CJGE201403015.
- [3] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776. LIU Songyu, CAI Guojun, ZOU Haifeng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765-1776.
- [4] ROBERTSON P K. Estimating in-situ soil permeability from CPT&CPTU[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10). Huntington Beach, California; California State Polytechnic University Pomona, 2010: 535-542.
- [5] ELSWORTH D, LEE D S. Permeability determination from on-the-fly piezocone sounding [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 643-653. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:5(643).
- [6] ELSWORTH D, LEE D S. Limits in determining permeability from on-the-fly CPTu sounding[J]. Géotechnique, 2007, 57(8): 679-686. DOI:10.1680/geot.2007.57.8.679.
- [7] CHAI J C, AGUNG P M A, HINO T, et al. Estimating hydraulic conductivity from piezocone soundings [J]. Géotechnique, 2011, 61(8): 1-10. DOI: 10.1680/geot.10.P.009.
- [8] 王君鹏, 沈水龙. 基于孔压静力触探确定土体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2013(11): 3335-3339. WANG Junpeng, SHEN Shuilong. Determination of permeability coefficient of soil based on CPTU[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(11): 3335-3339.
- [9] WANG J P, XU Y S, MA L, et al. An approach to evaluate hydraulic conductivity of soil based on CPTU test [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2013, 31(3): 242-253. DOI: 10.1080/1064119X.2012.676154.
- [10] 朱小林, 唐世栋. 利用孔隙水压力-静力触探探头估算软黏土固结系数的理论分析[J]. 工程勘察, 1986(6): 8-12, 23. ZHU Xiaolin, TANG Shidong. Theoretical analysis of the coefficient of consolidation in soft clay estimated by pore water pressure-cone of cone penetration test [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1986(6): 8-12, 23.
- [11] 马淑芝, 汤艳春, 孟高头, 等. 孔压静力触探测试机理、方法及工程应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. MA Shuzhi, TANG Yanchun, MENG Gaotou, et al. Mechanism, methods and engineering application of piezocone penetration tests [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007.

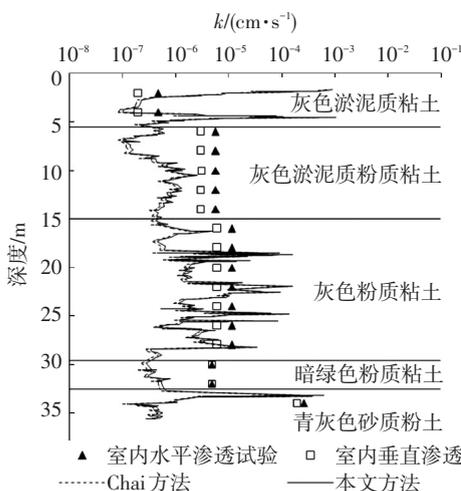


图 6 本文方法与 Chai 方法及室内试验结果的对比

Fig.6 Comparisons between results of modified approach, Chai's method and lab tests