

DOI: 10.11779/CJGE201403015

基于位错理论的饱和土渗流特性 CPTU 评价研究

邹海峰, 蔡国军*, 刘松玉

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 孔压静力触探 (CPTU) 测试数据通常用于土层划分和岩土工程设计参数评价。国际上 CPTU 测试技术的最新进展之一在于采用测得的锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力快速、连续地获得饱和土的渗透系数, 以避免孔压消散试验费时的缺点。首先简要回顾了基于 CPTU 测试资料确定饱和土渗透系数的研究成果, 并进行了分析与改进, 提出了基于位错理论和圆柱面径向流模型的水平向渗透系数预测新方法。选取典型场地进行了 CPTU 测试, 并在黏性土地采用薄壁取土器获得无扰动的原状试样, 进行室内水平向渗透试验, 在无黏性土地上进行现场钻孔抽水试验。以室内渗透试验和现场抽水试验的结果为参考, 对 3 种基于 CPTU 连续评价饱和土渗透系数的方法进行了对比分析。研究表明, 位错理论适用于评价饱和土的原位渗透系数, 然而准确性与所采用的渗流模型有关。对国际标准 CPTU 探头, 孔压过滤环位于锥肩 (u_2) 位置时, 采用圆柱面的径向流模型能够获得最为准确的水平向渗透系数预测结果, 采用球面流或半球面流模型时趋于低估土层的渗透性。

关键词: 孔压静力触探; 孔压; 渗透系数; 位错理论

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)03-0519-10

作者简介: 邹海峰(1988-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事现代原位测试孔压静力触探技术等方面的研究。

Email: zhf0728@gmail.com。

Evaluation of coefficient of permeability of saturated soils based on CPTU dislocation theory

ZOU Hai-feng, CAI Guo-jun, LIU Song-yu

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The parameters obtained from measurements during piezocone penetration tests (CPTU) are commonly used for soil profiling and geostatigraphy as well as the assessment of geotechnical design. Since a dissipation test often takes significant time, efforts have been made to continuously evaluate the coefficient of permeability of saturated soils using the measured cone tip resistance, sleeve friction and pore water pressure. In this study, the researches on evaluation of the coefficient of permeability of saturated soils are briefly reviewed and analyzed. Two novel methods based on the dislocation theory and the cylindrical flow model to estimate in-situ horizontal permeability are suggested. Piezocone penetration tests are conducted at typical sites. Horizontal permeability tests in laboratory on undisturbed samples of cohesive soils from high-quality thin-wall samplers and field pumping tests in borehole on cohesionless soils are also performed. A total of five methods are used to estimate the coefficient of permeability of soils, and the results are compared with those from laboratory and field tests. It is concluded that the values of coefficient of permeability evaluated from the proposed methods are more representative of the laboratory and field values than those evaluated using the available alternative methods. The dislocation theory can be used to estimate the coefficient of permeability of soils, but the accuracy depends on the flow model in porous media. For a standard cone with pore pressure element located at the shoulder of cone penetrometer (u_2 position), the radial flow normal to a cylindrical surface can support the best prediction of in-situ permeability.

Key words: piezocone penetration test (CPTU); pore pressure; coefficient of permeability; dislocation theory

0 引 言

孔压静力触探 (CPTU) 测试技术是一种快速、经济和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 测试技术提供近乎连续的锥尖阻

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202203, 41330641); 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ01B02); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-0118); 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目 (201353); 中央高校基本科研业务费资助项目 (2242013R30014)

收稿日期: 2013-08-23

*通讯作者

力 q_1 , 侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 等参数, 可用于土分类、土工特性评价以及工程设计等^[1-3]。在黏性土中的孔压消散试验可用于原位评估饱和土固结渗透特征, 通常采用固结理论解对孔压消散数据进行解译^[4-7]。

早期利用 CPTU 求解水平向渗透系数 k_h 的方法, 主要集中在建立其与孔压消散试验获得水平向固结系数的关系^[8-11]。然而孔压消散试验通常需要花费大量时间, 因此新的研究趋势在于直接采用 CPTU 测试参数来评价土层的渗透系数^[12-15], 同时充分利用 CPTU 测试资料的连续性。利用 CPTU 测试数据连续评价渗透系数的方法可分为经验性和半理论半经验性两大类^[16]。经验性方法利用土类给出渗透系数的大致取值^[2, 13], 而半理论半经验性方法则采用位错理论, 推导 CPTU 测试指标与渗透系数之间的理论关系式, 然后根据渗透系数实测资料进行修正。

首先简要回顾了基于 CPTU 位错理论确定饱和土渗透系数的研究成果, 提出了基于位错理论采用 CPTU 测试资料预测饱和土渗透系数的新方法, 然后根据典型场地 CPTU 测试结果加以验证, 研究了 CPTU 测试技术在连续评价饱和土渗透系数中的应用。

1 位错理论方法综述

位错理论的概念由意大利数学家和物理学家 Volterra^[17]提出, 最初主要用于材料科学中, 描述晶体材料的内部微观缺陷, 并解释范性变形中的力学问题。Cleary^[17]最早将位错理论用于分析饱和多孔介质中由于运动点错位所引起的超静孔隙水压力分布规律。Elsworth^[18-19]其后采用位错理论求解了 CPTU 探头贯入过程中超静孔隙水压力的分布规律, 指出超静孔隙水压力与贯入速率和固结系数有关。当其他参数不变时, 超静孔隙水压力的产生速度随着贯入速率的增大而增大, 随固结系数的增大而减小。同时考虑部分排水条件, Elsworth^[19]得到了锥尖阻力与固结系数之间的关系。

其后 Elsworth 等^[14]提出了采用 CPTU 测试指标归一化锥尖阻力 $Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0}$, 孔压参数比 $B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0})$ 联合有效内摩擦角 φ 求解部分排水条件下渗透系数的表达式, 见表 1, 式中 σ_{v0} 和 σ'_{v0} 分别为总上覆应力和有效上覆应力; u_0 为静水压力。

Elsworth 等^[15]采用 CPTU 测试指标 $B_q Q_t$ 确定了部分排水条件的取值范围, 并提出了直接采用指标 $B_q Q_t$ 确定原位渗透系数的方法, 该方法避免了室内试验确定的有效内摩擦角 φ 步骤。

对部分排水条件, Elsworth 等^[14-15]提出探头贯入引起孔隙水压力的改变可以通过在饱和多孔介质中有

限单元的运动体积错位近似模拟, 基本概念如图 1 所示。

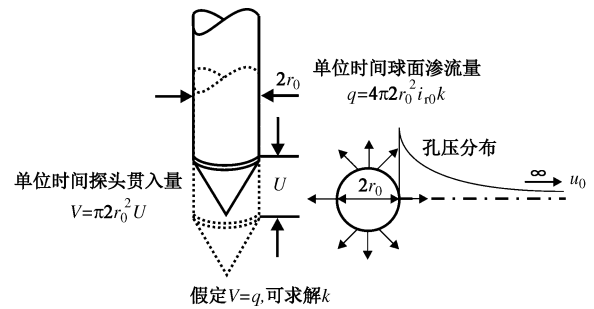


图 1 Elsworth 和 Lee 位错理论基本概念图^[16]

Fig. 1 Basic concept of Elsworth and Lee's method^[16]

探头周围稳定流体应力分布可认为等价于流体以球形孔穴连续注入多孔介质中产生的应力场, 且单位时间的流体注入常量等于单位时间下探头的贯入体积。Elsworth 等^[14-15]假定流量 q 大致上呈球形消散, 则单位时间内探头周围流体沿球面径向渗流量为

$$q = 4\pi r_0^2 i_{r_0} k \quad (1)$$

单位时间内探头的贯入量为

$$V = \pi r_0^2 U \quad (2)$$

式中, r_0 为探头半径, i_{r_0} 为探头半径处的孔压梯度, k 为渗透系数, U 为探头贯入速率。若在球体内部不存在流体的残留, 对球形对称流问题的求解导出如下关系式:

$$u_2 - u_0 = U \gamma_w r_0 / (4k) \quad (3)$$

式中, γ_w 为水的重度。

Elsworth 等^[14-15]定义无量纲渗透系数 K_D :

$$K_D = \frac{4k\sigma'_{v0}}{U\gamma_w r_0} \quad (4)$$

则 K_D 与 CPTU 测试指标 Q_t 和 B_q 存在如下关系式:

$$B_q Q_t = \frac{u_2 - u_0}{\sigma'_{v0}} = \frac{U\gamma_w r_0}{4k\sigma'_{v0}} = \frac{1}{K_D} \quad (5)$$

Elsworth 等^[15]研究指出, 式 (5) 在工程实践中并未提供最佳的拟合曲线, 因此进行了改进, 提出采用下式时更为准确:

$$K_D = \frac{\alpha}{(B_q Q_t)^\beta} \quad (6)$$

式中, α 与 β 为经验常量, $\alpha = 0.62$, $\beta = 1.6$ 。

Elsworth 等^[15]理论推导指出, 对以标准速率 $U = 2$ cm/s 贯入的 CPTU 探头, 贯入过程中部分排水与不排水的分界线在 $1.2 < B_q Q_t < 5.6$, $0.3 < F_r Q_t < 0.7$ 和 $4.0 < B_q / F_r < 8.0$ 之间, 因此建议式 (6) 应用于 $B_q Q_t < 1.2$, 大致对应于渗透系数 $k = 1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ m/s^[15]。

Elsworth 等^[15]同时指出, 因采用了球面流模型,

计算时所采用的贯入孔隙水压力 u 并不特指所测试的位置, 也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 时测得的孔压并不做区分, 不同部位的孔压过滤环见图 2。

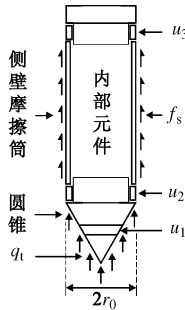


图 2 CPTU 孔压过滤环位置^[2-3]

Fig. 2 Locations of filter element of CPTU probe^[2-3]

Chai 等^[16]对 Elsworth 等的的数据进行了分析, 对其方法进行了改进, 扩展至不排水黏土中, 并提出应采用半球面流的假定 (本文称为 Chai 等方法), 所推导的无量纲渗透系数 (记为 K'_D) 计算公式如下:

$$K'_D = \frac{2k\sigma'_{v0}}{U\gamma_w r_0} \quad (7)$$

Chai 等^[16]提出, K'_D 与 CPTU 测试指标之间的关系仍然可用 $K'_D = \alpha / (B_q Q_t)^\beta$ 来计算, 对 $B_q Q_t < 0.45$, 取值 $\alpha = \beta = 1$; 而对 $B_q Q_t > 0.45$ 的土层, 则经验常量取 $\alpha = 0.044$, $\beta = 4.91$ 。Chai 等^[16]指出尽管原 Elsworth 和 Lee 方法中, 并未指示所计算的渗透系数 k 的方向, 然而实际上 K_D 仍然主要受到土层水平向渗透系数的控制, 因此所计算的应当为水平向渗透系数 k_h 。

对比式 (4) 和式 (7) 可知, 无量纲渗透系数 K'_D 与 Elsworth 等方法中的 K_D 计算公式略有区别, 由于采用了半球面流模型, 因此采用 k_h 反演计算时, 两者之间存在如下关系式: $K'_D = K_D/2$ 。

表 1 总结了 Elsworth 和 Lee 与 Chai 等提出的无量纲渗透系数 K_D 评价方法。值得指出的是, 表 1 的方法均假定 CPTU 探头的贯入产生正的超静孔隙水压力, 而对强超固结黏土和致密砂土, 探头贯入可能引起周围土体剪胀, 从而导致正超静孔隙水压力的降低, 甚至产生负值。因此表 1 中的所有方法均仅适用于松散的无黏性土与正常固结或轻微超固结的黏性土。

2 分析与评价

Elsworth 等方法^[14-15]采用位错理论, 引入了球面流假定, 具有较强的理论基础, 对不排水与部分排水条件进行了区分, 且利用了 CPTU 实测孔压的灵敏性; 其缺陷在于建立计算模型时引入了假定条件, 所推导

的渗透系数计算公式与实际数据存在一定的误差, 因此需要经过修正。Chai 等^[16]对 Elsworth 等方法进行了改进, 首先修正采用了半球面流模型, $K'_D = K_D/2$; 其次, 将 Elsworth 等方法扩展至不排水的黏性土中。然而无论是 Elsworth 等方法或 Chai 等方法, 对部分排水条件, 理论推导的无量纲渗透系数均不能与实际资料达到理想的符合。

表 1 无量纲渗透系数评价方法

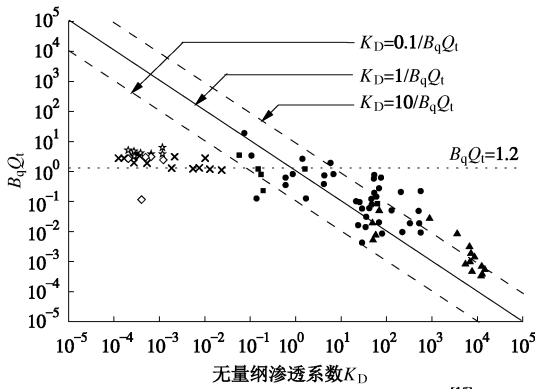
Table 1 Evaluation of dimensionless coefficient of permeability

方程式	常量取值	适用范围	文献来源
$K_D = \alpha / (B_q Q_t)^\beta$	$\alpha = \beta = 1$	$B_q Q_t < 1.2$	[15] (理论推导)
	$\alpha = 0.62, \beta = 1.6$	$B_q Q_t < 1.2$	[15] (经验修正)
$K'_D = \alpha / (B_q Q_t)^\beta$	$\alpha = 1, \beta = 1$	$B_q Q_t < 0.45$	[16] (理论推导)
	$\alpha = 0.044, \beta = 4.91$	$B_q Q_t \geq 0.45$	[16] (经验拟合)
$K_D = \frac{1}{Q_t \left[1 + \frac{1}{Q_t} - \frac{F_r}{\tan \varphi} \right]}$	φ 为土的内摩擦角	$10^{-7} < k < 10^{-4}$ (m/s)	[14] (理论推导)
$K_D = \frac{1}{B_q \left[\frac{F_r}{\tan \varphi} - 1 + B_q \right]}$			

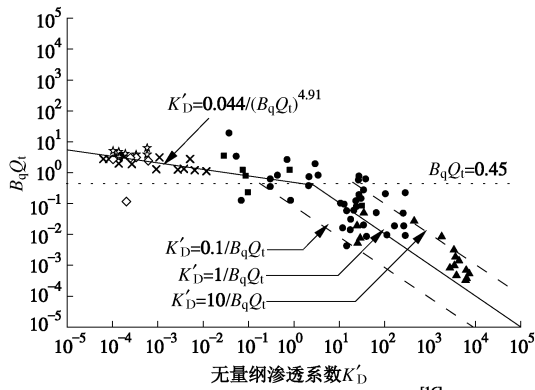
图 3 (a) 为 Elsworth 等所推导的无量纲渗透系数 K_D 计算方法, 该方法仅适用于 $B_q Q_t < 1.2$ 的条件。工程实践中, 渗透系数的误差位于一个数量级范围内时是可以接受的^[2], 而图 3 (a) 中约 26% 的数据点超出曲线 $K_D = 1 / (B_q Q_t)$ 附近一个数量级的范围, 误差较大。整体而言, 约 30% 的数据位于曲线 $K_D = 1 / (B_q Q_t)$ 的下方, 趋于高估土层的渗透系数; 约 70% 的数据位于曲线 $K_D = 1 / (B_q Q_t)$ 的上方, 趋于低估土层的渗透系数。

图 3 (b) 为 Chai 等^[16]所推导的无量纲渗透系数 K'_D 计算方法, 该方法对部分排水条件限定为 $B_q Q_t < 0.45$, 采用 $K'_D = 1 / (B_q Q_t)$ 计算; 对 $B_q Q_t > 0.45$ 时采用统计拟合得到 $K'_D - B_q Q_t$ 的经验关系式。对 $B_q Q_t < 0.45$, 23% 的数据点超出 $K'_D = 1 / (B_q Q_t)$ 的一个数量级误差范围。整体而言, 约 32% 的数据点位于曲线 $K'_D = 1 / (B_q Q_t)$ 的下方, 趋于高估土层的渗透系数; 约 68% 的数据点位于曲线 $K'_D = 1 / (B_q Q_t)$ 的上方, 趋于低估土层的渗透系数。

因此 Elsworth 和 Lee 以及 Chai 等理论推导的无量纲渗透系数表达式与实践资料存在一定的误差, 两者均趋于低估部分排水条件下土层的水平向渗透系数, 需要进行经验或理论修正。此外, 相对而言, Chai 等方法较 Elsworth 等方法略微精确一些^[15-16]。



(a) Elsworth和Lee理论推导的\$K_D\$计算方法^[15]



(b) Chai等理论推导的\$K'_D\$计算方法^[16]

图3 无量纲渗透系数与\$B_q Q_t\$关系

Fig. 3 Relationship between dimensionless permeability index and \$B_q Q_t\$

3 圆柱面径向渗流模型

Elsworth 等方法或 Chai 等方法均采用了球面流（或半球面流）的假定，使得超静孔隙水压力的消散并非沿水平方向，而是沿垂直于球面的流动方向。因此球面流模型可能较适用于孔压过滤环位于锥面（\$u_1\$）位置时所测得的孔压，对于孔压过滤环位于锥肩（\$u_2\$）位置时，超静孔隙水压力的消散既无法向上流入探头内部，同时也无法向下流入圆锥头内，此时孔隙水应当为沿孔压过滤环的径向方向流出，如图4所示，因此为沿圆柱面（孔压过滤环表面）的水平向消散，也即这一模型满足孔压消散主要发生在水平方向的结论，与已有的研究成果^[5-9]相符合。

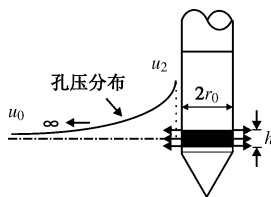


图4 圆柱面流动

Fig. 4 Cylindrical flow

对无穷远处超静孔隙水压力为 \$\Delta u_2=0\$，根据线弹性的位错理论^[14, 19]，探头附近孔隙水压力的分布可以采用下式描述：

$$u - u_0 = (u_2 - u_0) r_0 / r \quad (8)$$

式中，\$r\$ 为空间点与圆柱面的径向距离，\$r_0 < r < \infty\$，\$u\$ 为 \$r\$ 处的孔压。则圆柱面 \$r=r_0\$ 处的孔压梯度为

$$i_{r_0} = \frac{1}{\gamma_w} \left. \frac{du}{dr} \right|_{r=r_0} = \frac{u_2 - u_0}{r_0 \gamma_w} = B_q Q_t \frac{\sigma'_{v0}}{r_0 \gamma_w} \quad (9)$$

假定单位时间内通过半径为 \$r_0\$ 的圆柱面的渗流量等于探头的体积贯入量，则存在如下关系：

$$2\pi r_0 h \cdot k_h \cdot i_{r_0} = \pi r_0^2 U \quad (10)$$

式中，\$h\$ 为孔压过滤环厚度，根据式（9）与式（10）可得

$$k_h = \frac{\pi r_0^2 U}{2\pi r_0 h i_{r_0}} = \frac{U r_0}{2h} \cdot \frac{1}{i_{r_0}} = \frac{r_0}{2h} \cdot \frac{1}{B_q Q_t} \cdot \frac{U r_0 \gamma_w}{\sigma'_{v0}} \quad (11)$$

为与 Elsworth 等方法和 Chai 等方法中的 \$K_D\$ 和 \$K'_D\$ 作出区分，同时保证双对数坐标下无量纲渗透系数与 \$B_q Q_t\$ 之间的线性关系，定义 \$K''_D = 1/(B_q Q_t)\$，则

$$k_h = K''_D \cdot \frac{r_0}{2h} \cdot \frac{U r_0 \gamma_w}{\sigma'_{v0}} \quad (12)$$

对比式（11）与式（4），\$K''_D\$ 与 Elsworth 等方法中的 \$K_D\$ 之间存在如下关系：

$$K''_D = \frac{h}{2r_0} K_D \quad (13)$$

对于孔压过滤环位于 \$u_2\$ 位置时，圆柱面流假定条件下，\$K''_D\$ 应折减为球面流模型下 \$K_D\$ 的 \$h/2r_0\$。对符合国际规格^[20]的 CPTU 探头，探头直径 \$2r_0=35.7\$ mm，孔压过滤环厚度 \$h=5\$ mm，则 \$K''_D=0.14K_D\$。

若 Elsworth 等所采用的测试资料均来源于符合国际规格规格的 CPTU 测试，对其测试资料中的 \$K_D\$ 进行修正，得到 \$K''_D\$ 与 \$B_q Q_t\$ 之间的关系如图5所示。从图5中可以看出，对 \$B_q Q_t < 0.35\$，约18%的数据点超出曲线 \$K''_D = 1/(B_q Q_t)\$ 附近一个数量级的范围，低于 Elsworth 等方法与 Chai 等方法的预测误差，因此相对而言，本文提出的曲线更能准确描述渗透系数随 CPTU 指标 \$B_q Q_t\$ 的变化趋势。整体而言，约42%的数据位于曲线 \$K''_D = 1/(B_q Q_t)\$ 的上方，约58%的数据位于曲线 \$K''_D = 1/(B_q Q_t)\$ 的下方，也即曲线 \$K''_D = 1/(B_q Q_t)\$ 大致位于数据点的中部，相比 Elsworth 等方法与 Chai 等方法而言预测结果更为精确。因此，本文提出的拟合曲线比原 Elsworth 等方法与 Chai 等方法中的拟合效果更好，表明圆柱面径向流模型更适合采用孔压 \$u_2\$ 评估饱和土的原位水平向渗透系数 \$k_h\$。

根据图5，拟合得到如下关系式：

$$K_D'' = \begin{cases} \frac{1}{B_q Q_t} & B_q Q_t < 0.35 \\ \frac{0.017}{(B_q Q_t)^{4.64}} & B_q Q_t > 0.35 \end{cases} \quad (14)$$

在对图 5 数据分析时, 不排水与部分排水的边界线对于 $K_D''-B_q Q_t$ 关系式具有较大的影响。Elsworth 等^[15] 提出 $B_q Q_t < 1.2$ 可作为两者的界限, 然而从图 3 (a)、(b) 和图 5 中均可看出, 当 $0.35 < B_q Q_t < 1.2$ 时, 无量纲渗透系数 (K_D , K_D' 或 K_D'') 与 $B_q Q_t$ 较大程度地偏离了反比例关系, 与部分排水条件下理论推导的计算公式存在偏差。因此在对图 5 的数据进行拟合时, 不排水与部分排水边界线的选择具有一定程度的主观性。研究发现图 5 中的数据点大致分布在以 $(\lg K_D'' = -6.6, \lg B_q Q_t = -13.4)$ 坐标为圆心, 以 $13.2 < R < 15.2$ 为半径的同心圆范围内, 如图 6 所示, 方程式如下:

$$(\lg K_D'' + 6.6)^2 + [\lg(B_q Q_t) + 13.4]^2 = R^2 \quad (15)$$

式中, $13.2 < R < 15.2$, 取 $R = 14.2$ 可得最佳拟合。

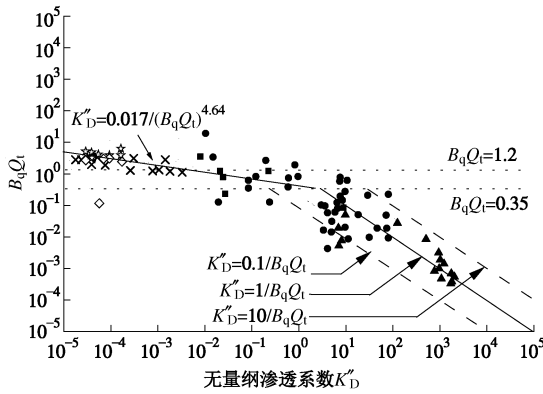


图 5 无量纲系数 K_D'' 与 $B_q Q_t$ 关系^[15]

Fig. 5 Relationship between K_D'' and $B_q Q_t$ ^[15]

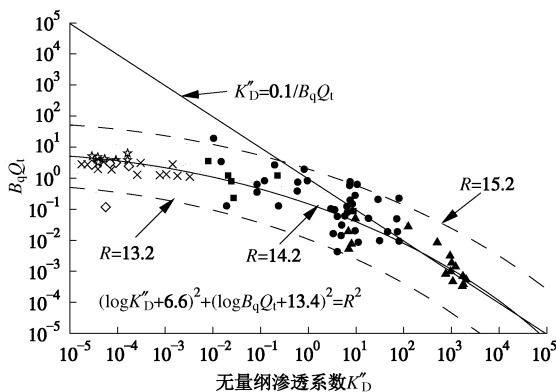


图 6 K_D'' 与 $B_q Q_t$ 同心圆分布规律^[15]

Fig. 6 Distribution of K_D'' and $B_q Q_t$ on concentric circles^[15]

分析式 (14), 可以看出本文所提出的水平向渗透系数评估方法与 Elsworth 等方法、Chai 等方法的最大区别在于引入了变量孔压过滤环厚度 h , 而研究表明

孔压过滤环厚度 h 对 CPTU 测试孔压指标的影响不应被忽略, 其原因在于: ①贯入过程中 CPTU 探头附近存在急剧变化的孔压应力场^[2,21-23], 使得不同厚度的孔压过滤环所测得孔压值受到显著影响; ②孔压过滤环的厚度影响着孔压的聚集与消散, 较厚的孔压过滤环具有较强的透水能力, 影响着 CPTU 探头贯入过程中的超净孔隙水压力。也即孔压过滤环厚度 h 与 CPTU 指标 B_q 存在相关性, 这一因素应当在 CPTU 测试数据的解译中得到考虑。

研究表明^[3,24-25], CPTU 贯入过程中的排水条件受到贯入速率和土体级配的影响。对松散的粉土和粉砂等土层而言, 标准贯入速率下仍然可能产生正的超净孔隙水压力, 然而孔压参数比 B_q 可能非常小, 通常 $B_q < 0.01$, 此时需要从两方面保证 CPTU 孔压测试的精度: ①CPTU 测试前孔压过滤环的完全饱和; ②CPTU 测试后地下水位线的测定。

4 试验概况

4.1 试验场地

在江苏典型地质成因的试验场地进行了 CPTU 测试, 地下水位线位于 0~5 m 深度范围内, 测试深度范围为 12~40 m。每个 CPTU 测试孔附近进行了钻孔取样和相应的室内试验, 并确定地下水位, 相邻的 CPTU 孔和对比钻孔之间距离不超过 5 m, 可以利用现场钻探资料、室内土工试验资料和 CPTU 测试资料进行对比和验证, 建立 CPTU 数据与渗透系数之间的相关关系。测试结果来自于江苏 7 个试验场地, 地质成因包括海相、冲积相、漫滩相与废黄河泛滥沉积相等。所研究土层的主要物理力学指标见表 2。

4.2 CPTU 试验设备

多功能 CPTU 试验采用美国原装进口多功能数字式车载 CPTU 系统, 配备了最新的多功能测试探头。探头规格符合国际标准: 锥角为 60° , 锥底直径为 35.7 mm, 锥底截面积为 10 cm^2 , 侧壁摩擦筒表面积为 150 cm^2 , 孔压测试元件厚度为 5 mm, 位于锥肩 (u_2 位置)。贯入速率为 2 cm/s, 沿深度每 5 cm 测试一组读数。贯入过程中连续测读锥尖阻力 q_t , 侧壁摩擦力 f_s , 孔隙水压力 u_2 。测试步骤参考国际土力学和岩土工程学会 (ISSMGE) 制定的《国际静力触探测试参考测试规程》^[20]。

为保证孔压 u_2 的准确性与精确性, CPTU 孔压过滤环在试验前抽真空 24 h, 然后浸泡在脱气甘油中密封, 现场试验时先用饱和装置将安装了孔压过滤环的 CPTU 探头抽真空 1 h, 保证整体的饱和度。由于孔压参数比 B_q 对地下水位敏感, 因此 CPTU 测试后, 测量 CPTU 钻孔中的地下水位线。

典型的黏土和粉土地 CPTU 测试结果分别如图 7, 8 所示。饱和淤泥具有很大的超静孔隙水压力, 粉质黏土中实测孔压则有所降低, 而在致密粉细砂中的贯入引起剪胀现象, 使得实测孔压低于静水压力。

表 2 场地及基本土性描述

Table 2 Soil properties and description of sites

试验场地	主要土层	地质成因	渗透系数 $k_f/(m \cdot s^{-1})$
南京—禄口国际机场	粉质黏土: 均匀, 稍密, 很湿, 软塑—可塑, 层厚 0.8~1.8 m	秦淮河冲积相	$1.08 \times 10^{-8} \sim 4.12 \times 10^{-7}$
	淤泥质粉质黏土: 软塑—流塑, 含腐植物, 层厚 8.9~15.4 m		$1.90 \times 10^{-9} \sim 1.51 \times 10^{-8}$
	粉质黏土: 可塑, 夹粉土, 近互层状态, 层厚 1.0~4.4 m		$3.40 \times 10^{-8} \sim 4.43 \times 10^{-7}$
南京—长江四桥	粉质黏土, 层厚 0.90~2.40 m, 平均层厚 1.70 m	长江漫滩相	$3.56 \times 10^{-8} \sim 1.86 \times 10^{-7}$
	淤泥质粉质黏土, 层厚 0.90~2.35 m, 平均层厚 1.50 m		$1.89 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-6}$
	粉砂, 层厚 2.60~7.25 m, 平均层厚 5.95 m		$4.39 \times 10^{-6} \sim 1.29 \times 10^{-4}$
	粉砂, 层厚 9.50~12.50 m, 平均层厚 11.00 m		$2.38 \times 10^{-6} \sim 6.78 \times 10^{-4}$
	细砂, 层厚 3.20~9.30 m, 平均层厚 7.50 m		$1.39 \times 10^{-5} \sim 3.56 \times 10^{-3}$
南京—金融城	中砂, 层厚 5.70~6.70 m, 平均层厚 6.30 m		$5.72 \times 10^{-4} \sim 9.46 \times 10^{-3}$
	粉质黏土: 褐黄色, 软—可塑, 厚度 0.90~3.50 m	长江漫滩相	$7.02 \times 10^{-8} \sim 8.49 \times 10^{-7}$
	淤泥质粉质黏土: 灰—灰黑色, 流塑, 夹薄层粉砂, 厚度 4.2~28.5 m		$3.43 \times 10^{-9} \sim 3.05 \times 10^{-7}$
粉质黏土夹粉土: 灰褐色, 软塑, 含腐植质, 厚度 1.60~19.4 m	$9.12 \times 10^{-8} \sim 1.50 \times 10^{-6}$		
连云港—S226 省道	黏土: 软塑—可塑, 厚度 1.80~6.00 m, 平均 3.21 m	海相	$1.08 \times 10^{-8} \sim 1.16 \times 10^{-7}$
	淤泥: 流塑, 局部为淤泥质黏土, 厚度 16.00~21.70 m, 平均 18.86 m		$4.51 \times 10^{-11} \sim 2.64 \times 10^{-8}$
	黏土、粉质黏土: 可塑, 厚度 0.30~25.50 m, 平均 4.79 m		$1.52 \times 10^{-9} \sim 5.98 \times 10^{-7}$
连云港—洋桥徐圩变电站	黏土: 很湿—饱和, 软塑—流塑, 厚度 1.10~2.80 m	海相	$4.73 \times 10^{-9} \sim 5.84 \times 10^{-8}$
	淤泥: 饱和, 流塑, 下部接近淤泥质黏土, 厚度 12.7~15.2 m		$1.28 \times 10^{-10} \sim 2.12 \times 10^{-9}$
	粉质黏土夹粉土: 粉质黏土很湿, 可塑—软塑, 粉土很湿, 稍密, 颗粒组成均匀, 粉土单层厚度约为 0.1~0.2 m, 层厚度 0.8~3.7 m		$4.35 \times 10^{-8} \sim 3.17 \times 10^{-6}$
	粉砂: 饱和, 中密为主, 颗粒组成较均匀, 层厚度 1.0~6.7 m		$8.07 \times 10^{-5} \sim 4.35 \times 10^{-4}$
盐城—临海高等级公路	粉土: 湿, 松散—稍密, 局部中密, 具中等—中等偏低压缩性, 厚度 0.5~6.3 m	海相	$4.83 \times 10^{-8} \sim 3.75 \times 10^{-7}$
	淤泥质粉质黏土: 流塑, 局部地段夹粉砂、粉土薄层, 厚度 0.5~6.6 m		$4.51 \times 10^{-9} \sim 2.64 \times 10^{-8}$
	粉土: 湿, 局部饱和, 稍密状态为主, 局部中密, 层厚 0.7~14.2 m		$1.96 \times 10^{-9} \sim 2.52 \times 10^{-7}$
	粉土夹粉砂: 湿, 局部饱和, 中密为主, 局部稍密、密实, 含黏性土及粉砂薄层, 局部地段呈粉砂与黏性土互层状, 中等—低压缩性, 厚度 34.6 m		$3.87 \times 10^{-5} \sim 7.32 \times 10^{-4}$
宿迁—宿新高速公路	粉土: 软塑, 稍密, 局部夹流塑状粉质黏土透晶体, 层厚 3.2~5.6 m	废黄河泛滥沉积相	$2.15 \times 10^{-7} \sim 3.44 \times 10^{-6}$
	粉土: 软塑—硬塑, 稍密—中密, 局部夹粉砂薄层, 层厚 6.1~10.5 m		$4.65 \times 10^{-7} \sim 4.43 \times 10^{-5}$

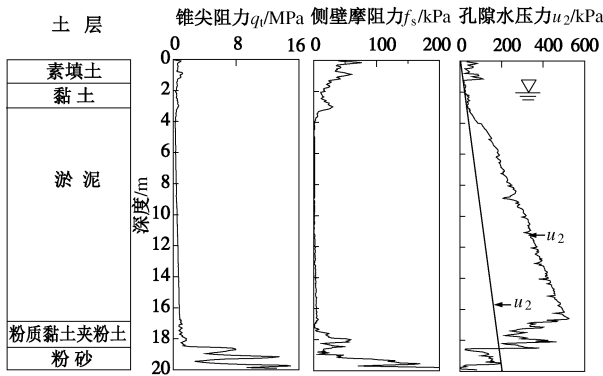


图 7 典型连云港场地 CPTU 测试剖面 (黏土)

Fig. 7 Typical results of piezocone tests at Lianyungang site

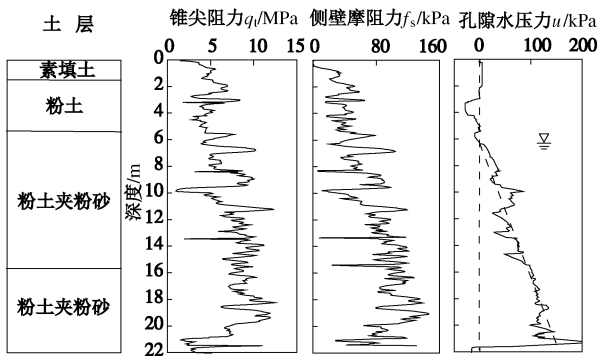


图 8 典型宿迁场地 CPTU 测试剖面 (粉土)

Fig. 8 Typical results of piezocone tests at Suqian site

4.3 渗透系数测定

对低渗透性的黏性土, 采用薄壁取土器获得无扰动原状土样, 参考文献[26]所规定的变水头渗透试验步骤, 测定土样的水平向渗透系数。

对无黏性土, 由于难以获得无扰动试样, 因此采用钻孔抽水试验测定土层原位水平向渗透系数, 测试步骤参考文献[27]。

5 渗流特性预测结果分析

以室内水平向渗透试验与现场钻孔抽水试验得到的 k_h 值为参考, 对 Elsworth 等方法、Chai 等方法和本文所提出的方法进行分析, 研究其准确性。CPTU 测试指标易受到土层分界面的影响, 表现出过渡层效应[2-3]。当土层位于由无黏性土过渡至黏性土的区域, 当 CPTU 探头贯入时, 排水条件处于由部分排水变化至不排水的过渡区内, 也即黏土附近存在透水边界, 使得贯入产生的超静孔隙水压力偏小, 则孔压参数比 B_q 偏小, 从而产生误差, 因此本文对位于过渡层区土层中的 CPTU 测试数据予以剔除, 以降低测试误差, 同时根据钻孔深度取 CPTU 测试指标 (B_q, Q_t) 剖面的平均值用于分析, 以减小土层空间变异性的影响。

5.1 Elsworth 等方法

对所研究的粉砂、细砂与中砂, 采用 Elsworth 等方法计算得到水平向渗透系数 k_h , 并与现场抽水试验

测得的 k_h 值进行对比分析, 共计数据点 42 个。

图 9 给出了根据实测 k_h 反演得到的 K_D 与 CPTU 指标 $B_q Q_t$ 之间的关系。对 $B_q Q_t < 1.2$, 双对数坐标下数据点离散分布在 Elsworth 和 Lee 所提出的曲线附近, 其中 $K_D = 1/(B_q Q_t)$ 所对应的曲线与数据点变化趋势匹配效果较差, 位于大部分数据点的下部; 修正的曲线 $K_D = 0.62/(B_q Q_t)^{1.6}$ 与数据点变化趋势较符合, 然而同样位于大部分数据点的下部。因此, Elsworth 等方法将趋于低估无量纲渗透系数, 从而使得基于 CPTU 测试的饱和土水平向渗透系数评估值低于实际值。

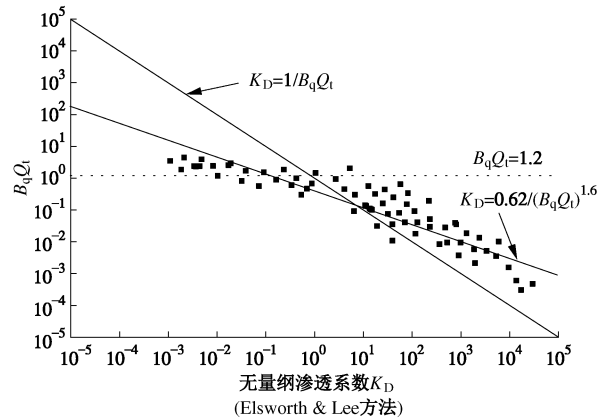


图 9 反演 K_D 与 $B_q Q_t$ 的关系

Fig. 9 Relationship between K_D from back-calculation and $B_q Q_t$

图 10 给出了 Elsworth 等方法所预测的 k_h 值与实测 k_h 值之间的对比关系, 双对数坐标下直线 $y=x$ 对应于 k_h 实测值与 k_h 预测值相等, 数据点接近于 $y=x$ 的程度可描述方法的准确性。可以看出两种方法准确性有所差异。理论推导的公式 $K_D = 1/(B_q Q_t)$ 用于计算渗透系数时存在较大的误差, 所预测的 k_h 均低于实测水平向渗透系数, 低估了土层的渗透系数。经过修正后的公式 $K_D = 0.62/(B_q Q_t)^{1.6}$ 所计算的 k_h 更符合工程实践的资料, 约 14% 的数据点位于直线 $y=x$ 的上方, 71% 的数据点位于直线 $y=x$ 的下方, 因此, 相对而言, 经过修正后的公式更为接近实测值。

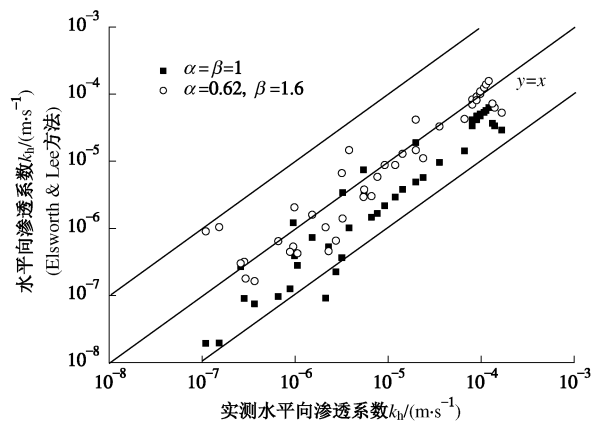


图 10 实测 k_h 与 Elsworth 和 Lee 方法计算 k_h 对比

Fig. 10 Comparison between measured values of k_h and those by Elsworth and Lee's method

整体而言，图 10 中 90%的数据位于直线 $y=x$ 附近，且误差在一个数量级的范围内，表明 Elsworth 等所采用的位错理论一定程度的适用性，可相对准确的预测土层水平向渗透系数。对 Elsworth 和 Lee 理论推导的公式进行修正后能更准确的预测 k_h ，然而与实测 k_h 相比，两种方法均低估了土层渗透性。

5.2 Chai 等方法

图 11 给出了根据实测 k_h 反演得到的 K'_D 与 CPTU 指标 B_qQ_t 之间的关系，所有的数据点均离散分布于 Chai 等方法所提出的曲线附近。Chai 等方法描述了数据点的变化趋势，然而较大程度的偏离最佳拟合曲线。在所有的数据点中，80%反演计算得到的 K'_D 大于根据 CPTU 指标 B_qQ_t 预测的值，表明采用 Chai 等方法所研究土层中预测 k_h 时可能存在一定的误差。

图 12 为 Chai 等方法所计算得到的 k_h 与实测 k_h 的对比关系，共计 102 个数据点，96%的数据点均位于双对数坐标下直线 $y=x$ 的附近， k_h 的误差不超过 1 个数量级；其中约 15%的数据位于直线 $y=x$ 的上方，其他 81%的数据均位于直线 $y=x$ 的下方，因此 Chai 等方法所预测的 k_h 同样略微低于实际值，也即趋于低估饱和土的渗透性。

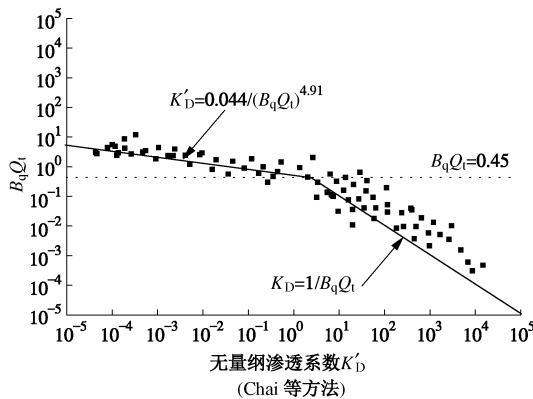


图 11 反演 K'_D 与 B_qQ_t 的关系

Fig. 11 Relationship between K'_D from back-calculation and B_qQ_t

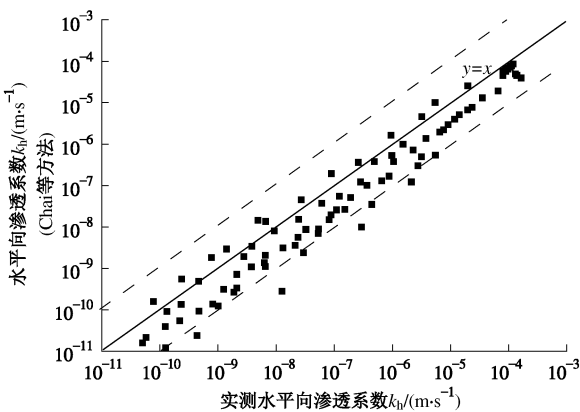


图 12 实测 k_h 与 Chai 等方法计算 k_h 对比

Fig. 12 Comparison between measured values of k_h and those by Chai's method

5.3 本文方法

本文提出了两种基于 CPTU 测试的饱和土渗透系数计算方法，其一采用理论推导了部分排水条件下无量纲渗透系数 K''_D 的表达式与计算方法，并采用经验拟合的方法建立了不排水条件下 K''_D 与 B_qQ_t 之间的关系式，统一公式为 $K''_D = a/(B_qQ_t)^b$ ；其二采用经验拟合的方法，以同心圆曲线拟合了 K''_D 与 B_qQ_t 之间的关系，该方法无需区分部分排水与不排水的边界线，降低了经验拟合过程中由于主观因素所引起的误差。

图 13 表示了根据实测 k_h 反演得到的 K''_D 与 CPTU 指标 B_qQ_t 之间的关系，所有的数据点均分布于本文方法所提出的曲线附近。对 $B_qQ_t < 0.35$ ，理论推导的关系式 $K''_D = 1/(B_qQ_t)$ 能更为符合工程实践数据，表明圆柱面径向渗流模型更符合水平向渗透特征。

整体上，无论对 $K''_D = a/(B_qQ_t)^b$ 或同心圆曲线而言，所有的数据点均大致均匀分布在曲线的两侧。对 $B_qQ_t < 0.01$ 和 $B_qQ_t > 0.90$ ，本文提出的两种方法能得到一致的结果；而对 $0.01 < B_qQ_t < 0.90$ ，曲线 $K''_D = a/(B_qQ_t)^b$ 计算的结果略大于圆弧曲线计算值，两者存在误差。

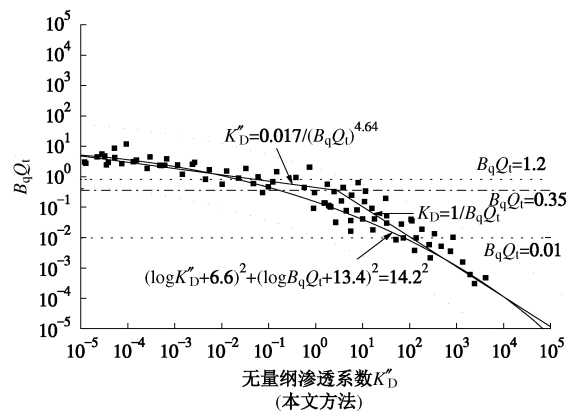


图 13 反演 K''_D 与 B_qQ_t 的关系

Fig. 13 Relationship between K''_D from back-calculation and B_qQ_t

图 14 给出了本文两种方法所计算得到的 k_h 与实测 k_h 的对比关系，共计 102 个数据点。从图 14 可以看出，两种方法得到的 k_h 值基本相同。所有的数据点均位于直线 $y=x$ 附近，所预测的 k_h 与室内水平向渗透试验和现场抽水试验得到的 k_h 相比，误差位于 1 个数量级内；其中约 59%的数据点位于 $y=x$ 的下部，41%的数据点位于 $y=x$ 的上部，这一分布相对优于 Elsworth 等方法与 Chai 等方法计算得到的结果，因此本文所提出的方法应当具有更高的可靠性。

对比式 (10) 与式 (15)，可以看出采用 CPTU 预测 k_h 时，对部分排水条件，本文方法的计算结果约为 Chai 等方法计算结果的 $r_0/h=3.57$ 倍；对比图 12 与图 14，则对不排水条件，本文方法预测的 k_h 约为 Chai 等方法预测 k_h 的 1.0~2.5 倍。对孔隙水沿圆锥头呈半

球面流出的模型, 渗透系数在竖直方向的分量应大于其在水平方向的分量, 也即 Chai 等方法所计算的渗透系数应当在更大程度上受土层竖直向渗透特性的影响, 而本文方法所计算的渗透系数则完全表征了土层的水平向渗透特征。Jamiołkowski 等^[28]提出对软黏土水平向渗透系数 k_h 与竖向渗透系数 k_v 之间的比值范围, 如表 3 所示, 可以看出本文方法所计算的结果 1.0~2.5 倍于 Chai 等方法计算结果是合理的。

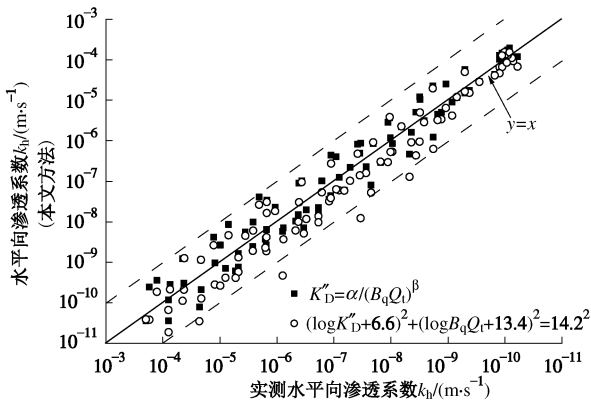


图 14 实测 k_h 与本文方法计算 k_h 对比

Fig. 14 Comparison between measured values of k_h and those by proposed methods

表 3 软土原位测试的 k_h/k_v 值可能的变化范围^[28]

Table 3 Range of possible field values of k_h/k_v for soft clay^[28]

软土性质	k_h/k_v
无宏观组构, 或存在轻微宏观组构, 基本均质沉积	1~1.5
相当好到好的宏观组构发展, 如具有不连续透镜体和渗透层的沉积土	2~4
具有连续渗透层的沉积土	3~15

6 结 论

研究了 CPTU 指标用于评价饱和土的渗流特性, 得出了如下结论:

(1) CPTU 测试技术能提供连续、高分辨率和高精度的贯入孔压, 可用于连续和快速评价饱和土的原位水平向渗透系数, 避免了孔压消散试验费时的缺点, 具有广阔的工程应用前景。

(2) 位错理论将探头周围孔隙水的渗流量等价于探头贯入产生的体积改变量, 通过不同的渗流模型描述孔隙水的渗流规律, 可准确预测土层的原位渗透系数。

(3) 沿圆柱面的径向渗流模型结合位错理论能推导出准确的水平向渗透系数 k_h 计算方法, 预测结果与工程实践相符合, 具有更高的准确性; 而球面流或半球面流的渗流模型较大程度上受到竖向渗透特征的影响,

所预测的 k_h 普遍低于实测值。

参考文献:

- [1] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553 - 556. (LIU Song-yu, WU Yan-kai. On the state - of - art and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553 - 556. (in Chinese))
- [2] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [3] 蔡国军. 现代数字式多功能 CPTU 技术理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (CAI Guo-jun. Study on theory and engineering application of digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU) [D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese))
- [4] TORSTENSSON B A. The pore pressure probe[C]// Geotechnical Meeting, Norwegian Geotechnical Society. Oslo, 1977.
- [5] LEVADOUX J N, BALIGH M M. Consolidation after undrained piezocone penetration I: Prediction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(7): 707 - 726.
- [6] BALIGH M M, LEVADOUX J N. Consolidation after undrained piezocone penetration II: Interpretation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(7): 727 - 745.
- [7] HOULSBY G T, TEH C I. Analysis of the piezocone in clay[C]// Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1. Orlando: Balkema Pub, Rotterdam, 1988, 2: 777 - 783.
- [8] BALIGH M M, LEVADOUX J N. Pore pressure dissipation after cone penetration[R]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass, R80-11. 1980.
- [9] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于孔压静力触探的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 846 - 857. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of Lianyungang marine clay based on piezocone penetration test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 846 - 857. (in Chinese))
- [10] LEROUEIL S, JAMIOLKOWSKI M. Exploration of soft soil and determination of design parameters[C]// Proceedings GeoCoast'91, Yokohama, Japan, Port and Harbour Research

- Institute. Hasaki, 1991, 2: 969 - 998.
- [11] ROBERTSON P K, SULLY J P, WOELLER D J, LUNNE T, POWELL J J M, GILLESPIE D G. Estimating coefficient of consolidation from piezocone test[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, **29**(4): 539 - 550.
- [12] RANDOLPH M F, WROTH C P. An analytical solution for the consolidation around a driven pile[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1979, **3**(3): 217 - 229.
- [13] 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, 2010: 535 - 542.
- [14] 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.
- [15] ELSWORTH D, LEE D S. Limits in determining permeability from on-the-fly uCPT Sounding[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(8): 769 - 685.
- [16] CHAI J C, AGUNG P M A, HINO T, et al. Estimation hydraulic conductivity from piezocone soundings[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(8): 699 - 708.
- [17] CLEARY M P. Fundamental solutions for a fluid-saturated porous solid[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1977, **13**: 785 - 806.
- [18] ELSWORTH D. Dislocation analysis of penetration in saturated porous media[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1991, **117**(2): 391 - 408.
- [19] ELSWORTH D. Analysis of piezocone data using dislocation based methods[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **119**(10): 1601 - 1623.
- [20] ISSMFE APPENDIX A. International reference test procedure for cone penetration test (CPT)[R]. Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils—TC 16, with Reference to Test Procedures, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Information, 1989, 7: 6 - 16.
- [21] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Use of piezometer cone data[C]// *Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ'86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*. Blacksburg, 1986: 1263 - 1280.
- [22] WHITTLE A J, AUBENY C P. Pore pressure fields around piezocone penetrometers installed in clay[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Cairns, 1991: 285 - 290.
- [23] SONG C R, VOYIADJIS G Z. Pore pressure response of saturated soils around a penetrating object[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, **32**: 37 - 46.
- [24] DEJONG J T, JAEGER R A, BOULANGER R W, RANDOLPH M F, WAHL D A J. Variable penetration rate cone testing for characterization of intermediate soils[C]// *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, ISC 4*, London: Taylor & Francis Group, 2013: 25 - 42.
- [25] YI J T, GOH S H, LEE F H, RANDOLPH M F. A numerical study of cone penetration in fine-grained soils allowing for consolidation effects[J]. *Géotechnique*, 2012, **62**(8): 707 - 719.
- [26] GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (GB/T 50145 — 2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [27] SL 320—2005 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (SL 320—2005 Code of pumping test in borehole for water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [28] JAMIOLKOWSKI M, LADD C C, GERMAINE J T, et al. New developments in field and laboratory testing of soils[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Francisco, 1985: 57 - 153.