

黏土结构性对孔压静力触探结果的影响分析

加 瑞, 赵 栋, 雷华阳

An analysis of the influence of clay structure on piezocone penetration test results

JIA Rui, ZHAO Dong, and LEI Huayang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于层次聚类算法的孔压静力触探土体分类方法及试验研究

Soil classification method and experimental research on CPTU based on the hierarchical clustering algorithm

邱敏, 宋友建, 丛璐, 梅年峰, 王闫超 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 117-117

人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay

杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133

考虑土参数自相关距离影响的单桩可靠性设计方法

Pile reliability design considering the influence of soil auto-correlation distance

刘超, 袁颖, 左朝晖, 宁志杰, 周爱红 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 122-127

基于离散元法的砂石混合体直剪试验结果分析

An analysis of direct shear test results of sand-gravel mixture based on the discrete element method

苏永华, 王栋 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 97-104

基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析

An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test

杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 唐珏凌, 何宁 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 152-161

云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101-108



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209055

加瑞, 赵栋, 雷华阳. 黏土结构性对孔压静力触探结果的影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 80-88.

JIA Rui, ZHAO Dong, LEI Huayang. An analysis of the influence of clay structure on piezocone penetration test results[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 80-88.

黏土结构性对孔压静力触探结果的影响分析

加 瑞^{1,2}, 赵 栋^{1,2}, 雷华阳^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对目前黏土结构性对孔压静力触探结果的影响及其机理尚不是很清楚的问题, 首先在 ABAQUS 软件中对结构性剑桥模型进行了程序实现, 然后建立了孔压静力触探贯入结构性黏土的数值模型, 通过数值计算分析了黏土结构性对孔压静力触探结果的影响。数值计算结果表明: (1) 黏土的结构性会导致锥尖周围土体的偏应力增大, 由于锥尖附近土体的结构性损伤, 最大偏应力出现在距锥尖一定距离的右下方; (2) 表征结构性强度的参数——初始结构屈服应力 p'_{yi} 越大, 锥尖阻力 q_c 越大, 而表征结构性损伤速度的参数——结构性对流动法则影响参数 ω 越大, q_c 值越小; (3) p'_{yi} 值越大, 贯入停止时的超静孔隙水压力 u 越大, 而 ω 值越大, 贯入停止时的 u 值越小; (4) 经验圆锥系数 N_{qc} 随 p'_{yi} 增大明显减小, 随 ω 的增大略有减小。因此, 黏土的结构性强度及其损伤会明显影响孔压静力触探的测量结果, 基于锥尖阻力 q_c 估算结构性黏土的不排水抗剪强度 s_u 时应采用考虑结构性影响的经验圆锥系数 N_{qc} , 否则将会低估结构性黏土的 s_u 。研究结果可为孔压静力触探结果的分析 and 应用提供参考。

关键词: 黏土结构性; 孔压静力触探; 结构性剑桥模型; 锥尖阻力; 经验圆锥系数

中图分类号: TU442

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0080-09

An analysis of the influence of clay structure on piezocone penetration test results

JIA Rui^{1,2}, ZHAO Dong^{1,2}, LEI Huayang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The effect of clay structure on the piezocone penetration test results and its mechanism are not very clear, the structured Cam-clay model is firstly program-implemented in the ABAQUS software. Then, the numerical model of piezocone penetration into structured clay is established, and the effect of clay structure on piezocone penetration test results is analyzed through numerical simulation. The numerical calculation results show that (1) the clay structure causes the increase of deviatoric stress of the soils surrounding the cone tip, and the maximum deviatoric stress appears at the lower right at some distance from the cone tip due to the structural damage of the soils near the cone tip. (2) The larger the parameter p'_{yi} representing structural strength is, the larger the cone tip resistance q_c , and the larger the parameter w representing structural damage speed, the smaller the q_c .

收稿日期: 2022-09-25; 修订日期: 2022-11-21

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 天津市科技计划项目(21JCYBJC00380); 国家自然科学基金重大项目(51890911)

第一作者: 加瑞(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土与地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: jiarui@tju.edu.cn

value. (3) The larger the p'_{yi} value is, the larger the excess pore water pressure u when the penetration stops, and the larger the w value is, the smaller the u value when the penetration stops. (4) The value of the empirical cone factor N_{kt} decreases obviously with the increasing p'_{yi} , and decreases slightly with the increasing w . Therefore, the structural strength of clay and its damage will obviously affect the measurement results of the piezocone penetration test, and the empirical cone factor N_{kt} considering the structural effect should be used to estimate the undrained shear strength s_u of the structural clay based on the cone resistance q_c , otherwise, the s_u of the structural clay will be underestimated. The research results can provide reference for the analysis and application of piezocone penetration test results.

Keywords: clay structure; piezocone penetration test; structured Cam-clay model; cone resistance; empirical cone factor

孔压静力触探试验 (piezocone penetration test, CPTU) 是目前工程勘察中应用最为广泛的原位测试方法之一^[1-2], 其测试数据可用于土类划分^[3-4], 估算土体的超固结比^[5-6]、压缩模量^[7]、不排水抗剪强度^[8]和渗透系数^[9-10], 以及评价地基承载力和地基处理效果^[11-12]等。但目前关于 CPTU 测量结果与土体参数的经验公式大多适用于没有结构性或结构性很弱的土体^[13-14]。而结构性会影响 CPTU 贯入时土体的变形及破坏过程, 进而影响 CPTU 的测量结果。室内外试验和工程实践都表明天然沉积黏土具有一定的结构性, 与重塑土的力学特性有很大差异^[15-18]。因此, 有必要开展土体结构性对 CPTU 结果影响的研究, 为强结构性土体中 CPTU 测试数据的分析和应用提供理论指导。

已有学者通过试验和数值模拟开展了土体结构性对 CPTU 测量结果影响的研究。在试验研究方面, Lee 等^[19]用石膏和净砂混合制备人工胶结砂土, 通过室内模型试验研究了石膏掺量对锥尖阻力 (q_c) 和小应变剪切模量的影响; Gomez 等^[20]利用微生物诱导碳酸钙, 通过模型试验研究了方解石含量对 q_c 和侧壁摩阻力 (f_s) 的影响。张先伟等^[21]通过对比室内试验与 CPTU 原位测试结果指出由于贯入过程中土体结构的破损会使探头周围土体的渗透性迅速降低, 导致基于 CPTU 测试的结构性土的固结系数远小于室内试验的测量结果。在数值模拟方面, Liyanapathirana 等^[22-23]通过有限元数值模拟研究了结构性参数对经验圆锥系数 (N_{kt}) 的影响, 并分析了土体应变软化对 q_c 的影响; 刘笋等^[24]采用离散元模拟分析了结构性土的静力触探试验, 指出探杆的贯入会使土颗粒间的胶结发生破坏, 破坏形式主要有拉剪破坏和压剪破坏 2 种。

但目前关于黏土结构性对 CPTU 结果的影响及其机理尚不是很清楚。因此, 有必要开展黏土结构性对

CPTU 结果影响的研究, 为在强结构性黏土中 CPTU 测量结果的理解和应用提供参考。本文首先在 ABAQUS 软件中实现了结构性剑桥模型的 UMAT 二次开发并对其正确性进行了验证, 然后分析了 4 个结构性参数对 q_c 、超静孔隙水压力 (u) 以及 N_{kt} 的影响, 最后通过不同结构性参数时探头周围土体的应力应变分布情况分析了黏土的结构强度及其损伤对 q_c 的影响机理。

1 结构性剑桥模型的程序实现及验证

1.1 结构性剑桥模型介绍

根据结构性黏土的等向压缩特性, Carter 等^[25]在修正剑桥模型的基础上提出了结构性剑桥模型。模型中引入了 4 个结构性参数, 分别是反映结构性土体屈服面大小的参数——初始结构屈服应力 p'_{yi} 、反映等向压缩时结构性衰减快慢的参数——结构破损速率 b 、反映剪应力对塑性体积应变影响的参数——剪切引起结构破损参数 γ 和反映结构性对流动准则影响的参数 ω 。

结构性剑桥模型与修正剑桥模型的屈服面方程一致, 如下式所示:

$$f = q^2 - M^2 p' (p'_0 - p') \quad (1)$$

式中: p'_0 ——屈服面大小;

q ——偏应力/kPa;

p' ——平均有效应力/kPa;

M ——临界状态应力比。

硬化规律不仅与塑性体积应变 (ε'_v) 有关, 还与应力比 (η) 和参数 γ 有关, 如下式所示:

$$d\varepsilon'_v = (\lambda - \kappa) \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} + b \left(\Delta e + \frac{\gamma \eta \Delta e}{M - \eta} \right) \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (2)$$

式中: λ ——正常固结曲线 (normal consolidation line, NCL)

线在 $e-\ln p'$ 平面中的斜率;

κ ——卸载曲线在 $e-\ln p'$ 平面中的斜率;

p'_s ——当前屈服面的大小;

Δe ——当前应力状态下结构性土和重塑土的孔隙比差值;

η ——应力比, $\eta=q/p'$ 。

采用的流动准则为:

$$\frac{d\varepsilon_d^p}{d\varepsilon_v^p} = \frac{2\eta}{|M^2 - \eta^2| + \omega\eta^2} \left| 1 - \sqrt{\frac{p'_0}{p'_s}} \right| \quad (3)$$

式中: ε_d^p ——塑性偏应变。

体积应变增量($d\varepsilon_v$)由弹性体积应变、重塑土的塑性体积应变和结构性损伤引起的塑性体积应变 3 部分组成,如下式所示:

$$d\varepsilon_v = \frac{\kappa dp'}{(1+e)p'} + (\lambda - \kappa) \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} + b \left(\Delta e + \frac{\gamma\eta\Delta e}{M - \eta} \right) \frac{dp'_s}{(1+e)p'_s} \quad (4)$$

偏应变增量($d\varepsilon_d$)可由下式计算:

$$d\varepsilon_d = \frac{2(1+\nu)}{9(1-2\nu)} \frac{\kappa dq}{(1+e)p'} + \frac{2\eta d\varepsilon_v^p}{|M^2 - \eta^2| + \omega\eta^2} \left| 1 - \sqrt{\frac{p'_0}{p'_s}} \right| \quad (5)$$

式中: ν ——泊松比。

由式(5)可知,结构性土体要达到临界状态,不仅要求应力状态在临界状态线(critical state line, CSL)线上($\eta=M$),而且要求 $p'_0 = p'_s$ 。若应力状态在 CSL 线上时土体仍具有结构性,则应力状态沿着 CSL 线移动,直到土体结构性完全损伤($p'_0 = p'_s$),土体达到最终临界状态。

1.2 结构性剑桥模型的程序实现

ABAQUS 中提供了用户自定义材料属性的二次开发接口 UMAT, 基于 ABAQUS 软件对结构性剑桥模型进行了二次开发。UMAT 子程序需要实现 2 个功能: 一是对应力进行更新, 即根据 ABAQUS 主程序传入的应变增量计算应力增量; 二是给出弹塑性刚度矩阵, 用于主程序中总体刚度矩阵的计算。

本文采用的应力积分算法为完全隐式积分算法, 首先假定土体为弹性状态, 根据弹性刚度矩阵求出预测应力, 然后将预测应力代入到下式的屈服函数中:

$$f = \frac{q^2}{M^2} + p'(p' - p_c) \quad (6)$$

式中: p_c ——表征参考屈服面的大小。

若 $f < 0$, 则说明土体处于弹性状态, 应力更新正确; 若 $f > 0$, 则土体进入塑性状态, 需要求出塑性修正

后的应力状态。进入塑性阶段的应力计算公式如下:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma^e - D^e \Delta\varepsilon^p \quad (7)$$

式中: $\Delta\sigma^e$ ——弹性预测应力增量;

D^e ——弹性矩阵;

$\Delta\varepsilon^p$ ——塑性应变增量。

$\Delta\varepsilon^p$ 的计算公式如下:

$$\Delta\varepsilon^p = \Delta\gamma \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (8)$$

式中: $\Delta\gamma$ ——比例因子;

Q ——塑性势函数, 可以根据式(3)得出。

为了保证牛顿-拉夫逊迭代计算具有二阶收敛速率, 采用完全隐式算法时需要采用一致剪切模量, 其计算公式为:

$$D^{ep} = \frac{\partial T_{n+1}}{\partial \varepsilon_{n+1}} = I \otimes \frac{\partial p'_{n+1}}{\partial \varepsilon_{n+1}} + \sqrt{\frac{2}{3}} q \frac{\partial T_{n+1}^*}{\partial \varepsilon_{n+1}} + \sqrt{\frac{2}{3}} T_{n+1}^* \frac{\partial q_{n+1}}{\partial \varepsilon_{n+1}} \quad (9)$$

式中: D^{ep} ——弹塑性刚度矩阵;

I ——单位矩阵对应的四阶张量;

T_{n+1}^* ——单位剪应力矩阵对应的四阶张量;

T_{n+1} —— $n+1$ 增量步的应力;

p'_{n+1} —— $n+1$ 增量步的平均有效应力;

q_{n+1} —— $n+1$ 增量步的偏应力;

ε_{n+1} —— $n+1$ 增量步的应变。

根据式(8)、式(9)可以得到用于实现应力更新的迭代矩阵以及用于计算总体刚度矩阵的一致剪切模量矩阵, 从而实现了结构性剑桥模型的二次开发, 详细推导过程可以参考文献[26]。

1.3 UMAT 子程序的正确性验证

Burghignoli 等^[27]进行了结构性土的侧限压缩试验, 采用的土由天然 Avezzano 黏土、商业膨润土、普通 425 硅酸盐水泥和蒸馏水经过混匀、水化、固结形成, 属于人工结构性土。Lagioia 等^[28]采用天然灰屑岩进行了三轴排水剪切试验, 灰屑岩由海洋沉积形成, 粗颗粒之间存在钙质胶结, 为天然结构性土, 试验围压为 1 300 kPa。Adachi 等^[29]对天然沉积结构性黏土进行了三轴不排水剪切试验, 试验的初始应力状态为 $p'=46$ kPa, $q=0$ 。

Carter 等^[25]利用结构性剑桥模型对结构性黏土的侧限压缩试验、三轴排水剪切试验和三轴不排水剪切试验进行了公式计算预测, 并与室内试验结果进行对比, 验证了模型的正确性和合理性。为了验证结构性剑桥模型 UMAT 子程序的正确性, 本文对上述结构性土的侧限压缩、三轴排水剪切和三轴不排水剪切试

验进行了数值模拟, 采用的参数如表 1 所示, 并与模型公式计算结果进行了对比, 如图 1 所示。可以看出, 数值模拟结果与模型公式计算结果一致, 验证了结构性剑桥模型 UMAT 子程序的正确性。另外, 数值

模拟和公式计算结果与室内试验结果基本一致^[25], 表明本文采用的结构性剑桥模型可以较好地模拟结构性黏土的侧限压缩、三轴排水剪切和三轴不排水剪切特性。

表 1 结构性剑桥模型参数

Table 1 Structured cam-clay model parameters

参数	M	λ	κ	E/kPa	e_{ic}	ν	b	ω	γ	σ'_{vyi}/kPa	p'_{yi}/kPa
侧限压缩试验	1.50	0.505	0.020 0	—	5.383	—	0.7	—	0.5	430	—
三轴固结排水试验	1.50	0.208	—	76 923	2.383	0.13	30.0	4	2.1	—	2 400.0
三轴固结不排水试验	1.28	0.355	0.047 7	—	2.910	0.25	1.0	1	0.5	—	57.5
CPTU 贯入模拟	1.50	0.300	0.050 0	—	3.770	0.30	5.0	1	1.0	—	250.0

注: E 为弹性模量; e_{ic} 为重塑土正常固结曲线上 $p' = 1 \text{ kPa}$ 时的孔隙比; σ'_{vyi} 为一维固结试验中的竖向屈服有效应力; “—”表示参数不需要设置。

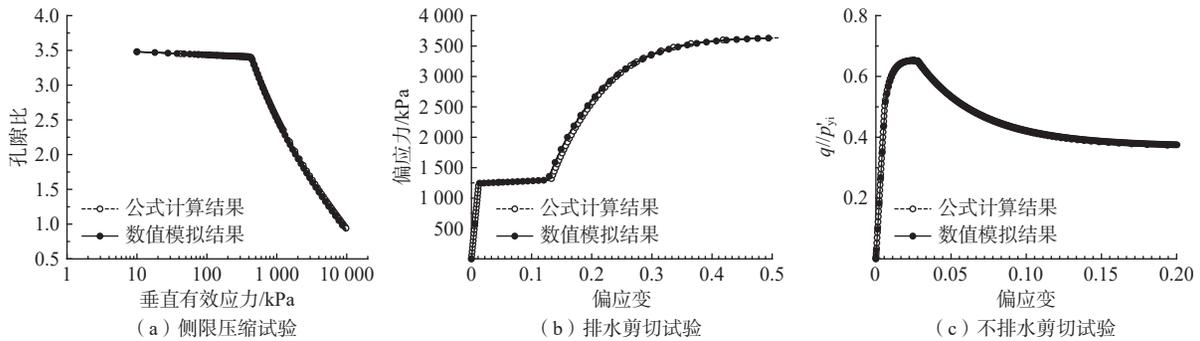


图 1 不同单元试验的数值模拟与公式计算结果

Fig. 1 Numerical simulation and formula calculation results of different element tests

2 模拟 CPTU 贯入的数值模型

CPTU 贯入可以简化为轴对称问题, 建立的数值模型如图 2 所示。半径为 0.5 m, 高度为 1 m, 上边界为自由边界, 右边界固定 x 轴方向位移, 下边界固定

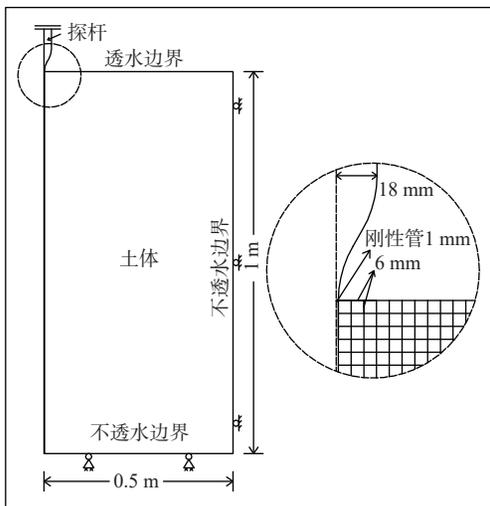


图 2 模拟 CPTU 贯入的数值模型简图

Fig. 2 Schematic diagram of the numerical model of simulating CPTU penetration

x 轴和 y 轴方向位移, 其中上边界为唯一的排水边界。土体单元采用可以计算孔压的 CAX4P。为了保证计算精度, 靠近探杆的网格尺寸为探头半径的 1/3。土体本构模型采用结构性剑桥模型。

探杆的直径为 3.57 cm, 长度为 1 m, 采用离散刚体进行模拟, 为了便于计算在探头转角处进行了光滑处理。通过位移控制加载, 贯入速度为 2 cm/s, 0.5 m 深度时停止贯入分析超静孔隙水压力的消散规律。为了防止贯入过程中土体朝对称轴方向移动, 在锥尖下部设置了一个半径为 1 mm 的刚性管。在刚性管与土体左边界、探杆与土体左边界和上边界设置了接触。模拟中忽略了探杆与土体之间的摩擦, 这会导致计算得到的锥尖阻力(q_c)和超静孔隙水压力(u)略小于实际值^[30]。

Liu 等^[31]指出结构性参数 b 的取值范围为 0 ~ 30; 结构性参数 ω 的取值范围为 0 ~ 4, 结构性参数 γ 的取值范围为 0 ~ 4; 本文 p'_{yi} 的取值范围为 1 ~ 2 倍的 p'_0 。CPTU 贯入模拟采用的结构性剑桥模型参数如表 1 所示。初始竖向应力为 200 kPa, 初始水平应力为 125 kPa, 对应的 p'_0 为 167 kPa。

3 结构性参数对 CPTU 结果的影响分析

通过改变结构性参数 p'_{yi} (167, 200, 225, 250, 300 kPa)、 b (0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 30.0)、 γ (0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00) 和 ω (0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00) 的大小, 系统分析黏土结构性对锥尖阻力 (q_c)、超静孔隙水压力 (u) 和经验圆锥系数 (N_{kt}) 的影响。在分析某一参数对结果的影响时, 其他参数保持不变, 如表 1 所示。

3.1 结构性参数对 q_c 的影响

图 3 为不同结构性参数时 q_c 随深度变化图。可以看到, 在贯入到大约 0.2 m 深度时 q_c 趋于稳定。参

数 p'_{yi} 越大, 稳定时的 q_c 值越大, 这是因为参数 p'_{yi} 越大, 土体结构性越强, 土体对锥尖会产生更大的阻力, 因此 q_c 越大; 参数 ω 越大, 在相同的偏应变下, 结构性损伤越快, 因此 q_c 值越小; 参数 b 和 γ 对 q_c 影响较小, 这是因为贯入是位移控制加载, 而参数 b 和 γ 对结构性强度及相同偏应变下的结构性损伤没有影响^[26]。Di Buò 等^[32] 对芬兰 5 个地点的结构性土进行了 CPTU 试验, 并通过室内试验确定了土体的结构性强度, 试验数据表明归一化锥尖阻力 (Q_c) 随着土体结构性的增强而增大。本文数值模拟结果与上述现场试验结果一致。

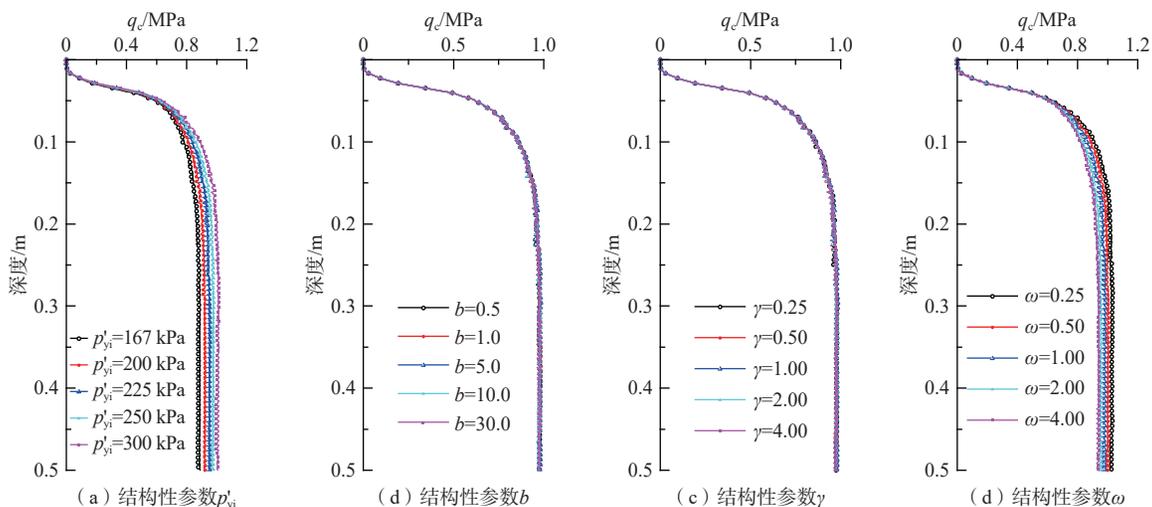


图 3 不同结构性参数时的 q_c 随深度变化图

Fig. 3 Variations of q_c with depth for different structural parameters

3.2 结构性参数对 u 的影响

由于黏土的渗透系数较小, 贯入时会产生超静孔隙水压力 (u)。图 4 为不同结构性参数时的探头附近最大超静孔隙水压力的消散曲线, 可以看到, 参数 p'_{yi} 越大, u 越大, 这是因为 p'_{yi} 越大, 发生屈服时的偏应变越大, 由于剪缩和结构性损伤引起的正孔隙水压力

产生的越慢, 贯入停止时 u 消散的时间越短, 因此 u 越大。参数 ω 越大, u 越小, 这是因为 ω 越大, 达到临界状态线后, 由于结构性损伤引起的正孔隙水压力产生的越快, 贯入停止时 u 消散的时间越长, 因此 u 越小。参数 b 和 γ 对 u 影响较小, 因为在相同偏应变下参数 b 和 γ 不会影响剪缩以及结构性损伤引起正孔隙水压

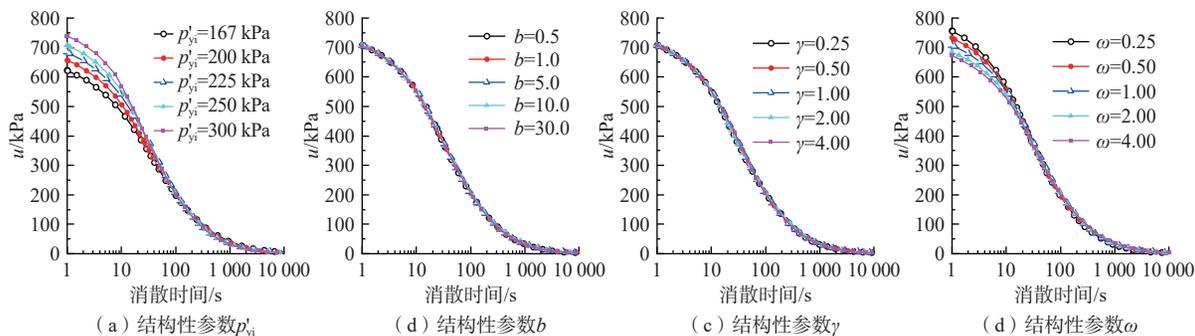


图 4 不同结构性参数时 u 的消散曲线

Fig. 4 Dissipation curve of u for different structural parameters

力产生的时间, 贯入停止时的 u 值也相同。

3.3 结构性参数对 N_{kt} 的影响

根据 CPTU 测量的 q_c 值, 可以通过下式计算黏土的不排水抗剪强度(s_u):

$$s_u = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{N_{kt}} \quad (10)$$

式中: σ'_{v0} ——竖向有效应力。

另外, 还可以通过 p'_{yi} 估算结构性黏土的 s_u , 如下式所示^[33]:

$$s_u = 0.3p'_{yi} \quad (11)$$

因此, 可由 CPTU 测量的 q_c 值和式(11)计算的 s_u 值, 根据式(10)得到不同结构性黏土的 N_{kt} 值。结构性参数 p'_{yi} 、 b 、 γ 和 ω 对 N_{kt} 的影响如图 5 所示。可以

看出, N_{kt} 随着 p'_{yi} 的增大而减小, 这是因为 p'_{yi} 越大, s_u 越大, 尽管 q_c 也随 p'_{yi} 的增加而增大, 但是 q_c 的增大幅度小于 s_u 的增大幅度, 导致 N_{kt} 随 p'_{yi} 的增大而减小; N_{kt} 随着 ω 的增大而减小, 这是因为虽然 ω 不影响 s_u 值, 但 ω 增大会导致 q_c 减小, 从而导致 N_{kt} 随 ω 的增大而减小; 参数 b 和 γ 对 N_{kt} 的大小基本没有影响, 这是因为这 2 个参数对 s_u 值和 q_c 值都没有影响。

在实际工程中, 基于 CPTU 测量的 q_c 值估算 s_u 时首先需要确定 N_{kt} 值。由本文研究可知, 如果在确定 N_{kt} 时不考虑黏土结构性的影响, 则采用的 N_{kt} 值可能会偏大, 从而会低估 s_u 值。因此, 在基于 q_c 值推求强结构性黏土的 s_u 值时, 应考虑黏土结构性对 N_{kt} 值的影响。

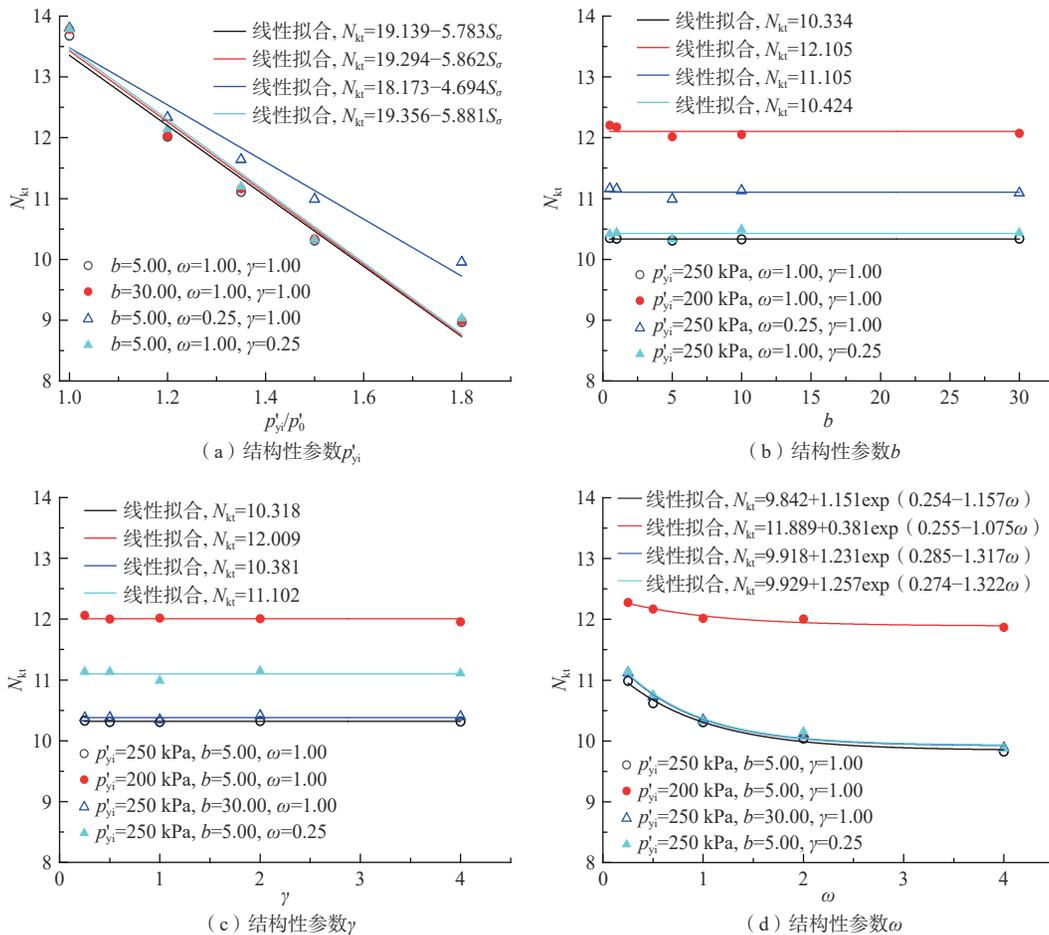


图 5 结构性参数对 N_{kt} 的影响

Fig. 5 Effects of structural parameters on N_{kt}

注: (a)图中 $S_\sigma = p'_{yi}/p'_0$

4 结构性对锥尖阻力的影响机理分析

图 6 为贯入到 0.5 m 深度时周围土体的典型偏应

力分布图。由图 6 可知, 最大偏应力出现在距锥尖一定距离的右下方, 而距离锥尖较远和较近土体的偏应力较小, 随着离锥尖的距离减小, 偏应力呈现先增大

后减小的变化规律。图中标红的 15 个单元(从远到近编号为 1—15)的偏应力和偏应变关系如图 7 所示,对于单元 1—6,土体处于弹性状态,偏应力随着偏应变的增加而线性增大;对于单元 7,偏应力达到最大;对于单元 8—12,由于结构性损伤,偏应力逐渐减小,体现了结构性土体的应变软化特性;单元 13—15 的偏应力稍有增大。

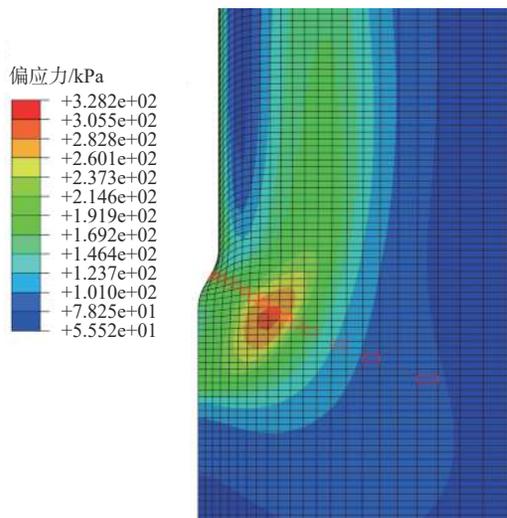


图 6 贯入到 0.5 m 深度时的偏应力分布

Fig. 6 Deviatoric stress distribution with penetration depth of 0.5 m

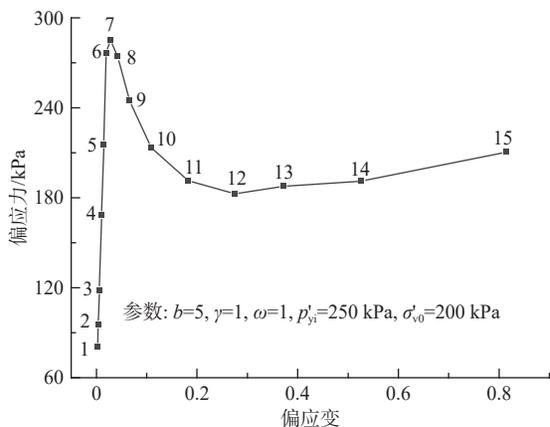
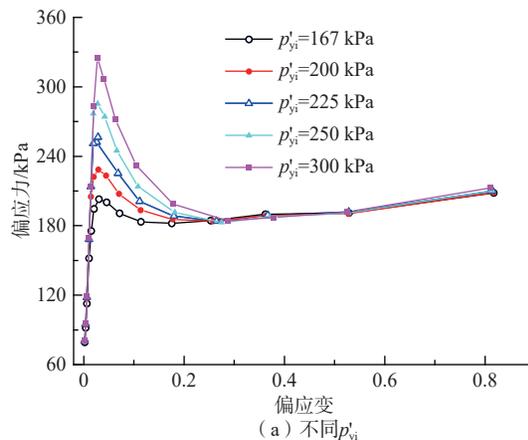


图 7 距锥尖不同距离单元的偏应力和偏应变

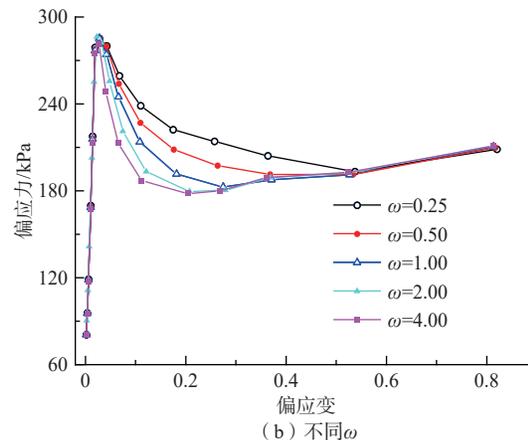
Fig. 7 Deviator stress and deviator strain of elements with different distance from the cone tip

p'_{yi}/p'_0 表征结构性的强弱, p'_{yi} 越大, 结构性越强; ω 表征结构性损伤的快慢, ω 越大, 相同偏应变下结构性损伤越快。图 8 为不同 p'_{yi} 和 ω 时离锥尖不同距离土体的 q 和 ϵ_{d0} 。可以看出, 参数 p'_{yi} 越大, 土体的结构屈服应力越大, 锥尖周围一定范围内土体的偏应力相对越大, 因此 q 值随 p'_{yi} 的增大而增大, 即 q 随结构性

强度的增大而增大; 参数 ω 越大, 土体超过结构屈服应力后的软化越快, 锥尖周围一定范围内土体的偏应力相对越小, 因此 q 值随 ω 的增大而减小, 即 q 随结构性损伤速度的增大而减小。由本文研究结果可知, 黏土的结构性强度及其损伤会影响 CPTU 的测量结果, 因此在对强结构性黏土中的 CPTU 测量结果进行分析和应用时应充分考虑黏土结构性的影响, 建立适用于强结构性黏土的 CPTU 测量结果与土体参数的经验公式。



(a) 不同 p'_{yi}



(b) 不同 ω

图 8 离锥尖不同距离土体偏应变和剪应力

Fig. 8 Shear stress and deviator strain of soils with different distance from the cone tip

5 结论

(1) q_c 随着表征结构性强弱的参数 p'_{yi} 的增大而增大, 这是因为 p'_{yi} 越大, 黏土结构性越强, 周围土体对锥尖会产生更大的阻力, 因此 q_c 值越大。 q_c 随着表征结构性损伤快慢的参数 ω 的增大而减小, 这是因为 ω 越大, 在相同偏应变下结构性损伤越快, 因此 q_c 值越小。

(2) u 随着 p'_{yi} 的增大而增大, 这是因为 p'_{yi} 越大, 发

生屈服时的偏应变越大, 由于剪缩和结构性损伤引起的正孔压产生的越慢, 因此贯入停止时的 u 值越大。 u 随着 ω 的增大而减小, 这是因为 ω 越大, 达到临界状态线后, 由于结构性损伤引起的正孔压产生的越快, 贯入停止时的 u 值越小。

(3) N_{kt} 随着 p'_{vi} 的增大而减小, 这是因为 p'_{vi} 越大, s_u 越大, 尽管 q_c 也随 p'_{vi} 的增加而增大, 但是 q_c 的增大幅度小于 s_u 的增大幅度; N_{kt} 随着 ω 的增大而减小, 因为 ω 增大会导致 q_c 减小, 但不影响 s_u 值。

(4) 参数 p'_{vi} 越大, 土体的结构屈服应力越大, 锥尖周围一定范围内土体的偏应力相对越大, 因此 q_c 随 p'_{vi} 的增大而增大; 参数 ω 越大, 土体超过结构屈服应力后的软化越快, 锥尖周围一定范围内土体的偏应力相对越小, 因此 q_c 随 ω 的增大而减小。所以可得 q_c 随结构性强度的增大而增大, 随结构性损伤速度的增大而减小。

参考文献 (References) :

- [1] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [2] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013. [LIU Songyu, CAI Guojun, TONG Liyuan. Theory and engineering application of modern multifunctional CPTU technology[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)]
- [3] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(1): 151 – 158.
- [4] 邱敏, 宋友建, 丛璐, 等. 基于层次聚类算法的孔压静力触探土体分类方法及试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 117 – 123. [QIU Min, SONG Youjian, CONG Lu, et al. Soil classification method and experimental research on CPTU based on the hierarchical clustering algorithm[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 117 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [5] SINGH V K, CHUNG S G. Evaluation of overconsolidation ratios from laboratory and in situ tests on Busan clay[J]. *Engineering Geology*, 2015, 199: 38 – 47.
- [6] 刘晓燕, 蔡国军, 邹海峰, 等. 基于 CPTU 数据融合技术的黏性土应力历史与强度特性评价研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1270 – 1278. [LIU Xiaoyan, CAI Guojun, ZOU Haifeng, et al. Prediction of stress history and strength of cohesive soils based on CPTU and data fusion techniques[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1270 – 1278. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘松玉, 蔡正银. 土工测试技术发展综述 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 151 – 165. [LIU Songyu, CAI Zhengyin. Review of the geotechnical testing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 151 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [8] CAI G J, LIU S Y, TONG L Y, et al. Field evaluation of undrained shear strength from piezocone penetration tests in soft marine clay[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2010, 28(2): 143 – 153.
- [9] CHAI Jinchun, HOSSAIN M J, YUAN Dajun, et al. Pore pressures induced by piezocone penetration[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(3): 540 – 550.
- [10] CECCATO F, SIMONINI P. Numerical study of partially drained penetration and pore pressure dissipation in piezocone test[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(1): 195 – 209.
- [11] 孙广利, 李广杰, 周景宏, 等. 长春硬塑状态老黏性土地基承载力 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(2): 591 – 595. [SUN Guangli, LI Guangjie, ZHOU Jinghong, et al. Foundation bearing capacity of Changchun hard plastic old clay[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2014, 44(2): 591 – 595. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 苏亮, 时伟, 水伟厚, 等. 高能级强夯法处理深厚吹填砂土地基现场试验 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(5): 1560 – 1569. [SU Liang, SHI Wei, SHUI Weihou, et al. Field test of high energy dynamic compaction on hydraulic sandy filling[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(5): 1560 – 1569. (in Chinese with English abstract)]
- [13] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—A unified approach[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(11): 1337 – 1355.
- [14] 么玉鹏, 姚坚毅, 唐世雄. 珠江口地区岩土层工程地质特征及物理力学性质研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 64 – 70. [YAO Yupeng, YAO Jianyi, TANG Shixiong. A study of the engineering geological characteristics and physicommechanical property of rock and soil layers in the Pearl River Mouth area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 64 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨爱武, 郑宇轩, 肖敏. 人工制备结构性软黏土长

- 期变形特性试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 133 - 140. [YANG Aiwu, ZHENG Yuxuan, XIAO Min. An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 133 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [16] JIA Rui, ZHENG Gang, LEI Huayang, et al. The effects of the depositional environment and post-depositional processes on the engineering properties of Quaternary clays in the Saga Plain[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(3): 1137 - 1152.
- [17] 杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯. 冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 57 - 65. [YANG Aiwu, WANG Binbin, ZHONG Xiaokai. Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 57 - 65. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 曹海莹, 郭毅磊, 杜量. 动、静载环境下界面土直剪试验 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(5): 1381 - 1390. [CAO Haiying, GUO Yilei, DU Liang. Direct shear test of soil interfacial layer under dynamic and static load[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2021, 51(5): 1381 - 1390. (in Chinese with English abstract)]
- [19] LEE M J, CHOO H, KIM J, et al. Effect of artificial cementation on cone tip resistance and small strain shear modulus of sand[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2011, 70: 193 - 201.
- [20] GOMEZ M G, DEJONG J T, ANDERSON C M. Effect of bio-cementation on geophysical and cone penetration measurements in sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(11): 1632 - 1646.
- [21] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 强结构性对湛江黏土地区 CPTU 原位测定结果的影响 [J]. *工程力学*, 2013, 30(2): 118 - 124. [ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Effect of strong structure on CPTU test results of Zhanjiang clay area[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2): 118 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [22] LIYANAPATHIRANA D S, CARTER J P, AIREY D W. Analysis of cone penetration using the structured Cam Clay model[C]//Auckland: Proceedings of the 9th Australia New Zealand Conference in Geomechanics, 2004, 1: 295 - 301.
- [23] LIYANAPATHIRANA D S. Numerical simulation of deep penetration of a piezocone in a strain-softening clay[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 10(2): 174 - 182.
- [24] 刘笋, 蒋明镜, 付昌, 等. 结构性砂土静力触探试验离散元分析 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 933 - 942. [LIU Sun, JIANG Mingjing, FU Chang, et al. Distinct element analysis of cone penetration tests in structured sand ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 933 - 942. (in Chinese with English abstract)]
- [25] CARTER J P, LIU M D. Review of the structured Cam Clay model[M]//JERRY A Y, VICTOR N K. Soil constitutive models: Evaluation, selection, and calibration. Austin: American Society of Civil Engineers, 2005: 99 - 132.
- [26] 赵栋. 土体结构性对孔压静力触探结果的影响及其机理研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022. [ZHAO Dong. Study on the influence of soil structure on piezocone penetration test results and its mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022. (in Chinese)]
- [27] BURGHIGNOLI A, MILIZAANO S, SOCCODATO F M. The effect of bond degradation in cemented clayey soils[C]//EVANGELISTA A, PICARELLI L. The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks. Rotterdam, Netherlands: A A Balkema Publishers, 1998: 465 - 472.
- [28] LAGIOIA R, NOVA R. An experimental and theoretical study of the behaviour of a calcarenite in triaxial compression[J]. *Géotechnique*, 1995, 45(4): 633 - 648.
- [29] ADACHI T, OKA F, HIRATA T, et al. Stress-strain behavior and yielding characteristics of eastern Osaka clay[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(3): 1 - 13.
- [30] CHAI Jinchun, SHENG Daichao, CARTER J P, et al. Coefficient of consolidation from non-standard piezocone dissipation curves[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 41: 13 - 22.
- [31] LIU M D, CARTER J P. A structured Cam Clay model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(6): 1313 - 1332.
- [32] DI BUÒ B, D'IGNAZIO M, SELÄNPÄÄ J, et al. Yield stress evaluation of Finnish clays based on analytical piezocone penetration test (CPTU) models[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(11): 1623 - 1638.
- [33] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(3): 329 - 378.