

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

珠江口地区岩土层工程地质特征及物理力学性质研究

么玉鹏,姚坚毅,唐世雄

A study of the engineering geological characteristics and physico-mechanical property of rock and soil layers in the Pearl River mouth area

YAO Yupeng, YAO Jianyi, and TANG Shixiong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106046

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 onCPTU 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

衡水湖地区湿地湖泊相黏土工程地质特性研究

\${suggestArticle.titleEn} 朱楠, 刘春原, 王文静, 赵献辉 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 125-132

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials 刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel 刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture 邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting 张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79–79



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106046

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 physico-mechanical property of rock and soil layers in the Pearl River mouth area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 64-70.

珠江口地区岩土层工程地质特征及 物理力学性质研究

么玉鹏,姚坚毅,唐世雄 (中交公路规划设计院有限公司,北京 100010)

摘要:基于港珠澳大桥、深中通道、虎门大桥等工程的精细化勘察成果,分析了珠江口地区岩土层地质特性,区内岩土层 可划分为淤泥质软土层、黏土粉质黏土层、中粗砂层、残积土层、不同程度风化基岩共5大层,结合区内水动力环境、沉积 物类型、钻孔对比及地质剖面,将研究区划分为河口砂质沉积区、潮流型泥质沉积区、泥砂混合沉积区、浅海泥砂混合沉 积区等4类。珠江口地区岩土层的物性参数特征研究表明,随着深度增大,岩土层含水率降低,快剪黏聚力增大,压缩系数 减小,压缩模量增大;原状土十字板抗剪强度 *C*u 与软土含水率 w 呈幂函数相关,与压缩模量 *E*s、快剪黏聚力 *c* 呈线性正相 关;孔压静力触探试验比贯入阻力 *p*s 与含水率 w 呈对数相关,与压缩系数 *a*₁₋₂ 呈幂函数相关,与黏性土、砂类土的快剪黏 聚力 *c* 呈线性正相关,得到的经验公式可为珠江口地区类似场地工程建设提供参考。 关键词:珠江口;沉积分区;物理力学指标;十字板试验;孔压静力触探试验 中图分类号; P642.13 文献标志码; A 文章编号: 1000-3665(2022)02-0064-07

A study of the engineering geological characteristics and physicomechanical property of rock and soil layers in the Pearl River mouth area

YAO Yupeng, YAO Jianyi, TANG Shixiong (CCCC Highway Consultants Co. Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: Based on the geological survey results along the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, the Shenzhen-Zhongshan Bridge, and the Humen Bridge, geological characteristics of the rock and soil layers in the Pearl River Mouth areas are analyzed. The rock and soil layers can be divided into five layers: silty soft soil layer, clay silty clay layer, medium-coarse sand layer, residual soil layer and weathered rocks. Combined with the hydrodynamic environment, sediment types, borehole comparison and geological section, the study area can be divided into four types of sedimentary areas: the estuary sandy sedimentary area, tidal mud sedimentary area, mud-sand mixed sedimentary area and shallow sea mud-sand mixed sedimentary area. The physical properties are examined, with the increase of depth, the moisture content decreases, the fast shear cohesion increases, the compression coefficient decreases, and the compression modulus increases. The vane strength has the power function correlation with water content, the linear positive correlation with compression modulus and fast shear cohesion. The specific penetration resistance of CPTU has the logarithmic correlation with water content, power function correlation with

compression coefficient, and linear positive correlation with fast shear cohesion. The empirical formula can provide references for the construction of similar sites in the Pearl River Mouth area.

Keywords: the Pearl River Mouth; sedimentary zoning; physical and mechanical indicators; vane shear test; CPTU

珠江口位于珠江三角洲伶仃洋海域,处于海陆交 互地带,水域地形总体北高南低,水动力条件强,由虎 门向南发育有矾石水道、伶仃水道以及数个纵向的潮 滩和沙坝,形成两深槽三浅水的地形特征。海底表层 为晚第四纪沉积的巨厚淤泥层,地质环境复杂,区内 已兴建有港珠澳大桥、深中通道、虎门大桥等多座大 型交通工程。

目前已有学者对珠江口地区地质特征及物理力 学特征开展了相关研究,石要红等^[1] 根据 40 个观测站 和1个钻孔资料将珠江口划分为3个工程地质区,并 对各区工程地质条件和稳定性进行了评价。王文介^[2] 基于珠江口水动力特征和沉积作用分析,将珠江口地 区的沉积相进行了划分。甘宇等^[3]分析了深中通道 沿线软土沉积层的沉积环境、物理力学指标特征和原 位测试特性。段伟等^[4] 以港珠澳大桥岛隧工程 CPTU 测试数据为依据,建立了比贯入阻力 *p*_s与 SPT、剪切 波速的相关关系。

总体来看,在精细化勘察的基础上,珠江口地区 工程地质特征的研究工作还相对欠缺,岩土层物理力 学指标、原位测试指标及指标之间的相关性关系还有 待总结。本文基于港珠澳大桥、深中通道和虎门大桥 等项目大量精细化勘察数据,对珠江口地区岩土层工 程地质特征和物理力学特征进行研究,得出相关性公 式,以期为后续相似场地工程建设提供参考。

1 岩土层工程地质特征

>228

项目钻探工作主要选用带波浪补偿系统的海洋 钻机及自升式平台进行钻进,能有效避免波浪对样品 的扰动。基于钻探、土工试验、原位测试等多种手段 的勘察成果,将珠江口水域地层自上而下分为淤泥质 软土层、黏土及粉质黏土层、中粗砂层、残积土层、不同风 化程度基岩共5大层,各层厚度及分布状况如表1所示。

Table 1 Geotechnical unit of the Fearr River Mouth area and then over an distribution				
大单元层	土类	标高/m	厚度/m	水平分布情况
1	淤泥、淤泥质软土	-62.6 ~ 0.61	5.2 ~ 57.6	全区连续分布,西侧较厚,东侧较薄
$(2)_1$	黏土层、粉细砂	_	0 ~ 7.6	薄层,局部、断续分布
$(2)_2$	粉质黏土为主	-58 ~ -21	10 ~ 30	分布面积广,局部缺失
3)	密实中、粗砾砂	-129.9 ~ -9.78	1.7 ~ 90	连续分布,南侧、西侧发育,东北侧薄
4)	残积层/砂质黏性土	_	-	局部分布,不连续
	混合片岩	岩面-81~-57,局部深槽-129~-74	-	未揭穿,分段连续分布
Ē	混合花岗岩	岩面-80~-65,局部深槽-127~-80	_	未揭穿,分段连续分布
1.1.1				

岩面-80.7~-12.2,局部深槽-127~-80

表 1 珠江口岩土单元及总体分布情况

① 淤泥质软土层在全区连续分布,为全新世海相 沉积物(Q^m₄),岩性主要为淤泥、淤泥质粉质黏土,局 部夹粉砂、细砂、中粗砂等。岩性软弱,多呈流塑状, 高压缩性,厚度集中在 10~48 m,最大厚度可达 57.6 m。

花岗岩

侏罗系下统

② 黏土、粉质黏土层在港珠澳大桥全线发育,向 北至深中通道处逐渐减薄,断续发育,至虎门大桥零 星出露。为晚更新世中期海相冲积物(Q^{al}),岩性主要 为粉质黏土、淤泥质黏土和软一可塑状黏土,夹有粉 砂一中砂透镜体,部分地段黏土与粉细砂呈互层状。

③ 中粗砂层为晚更新世早期河流相冲积物,主要 由中密一密实砂类土组成,偶夹透镜状的软一可塑状 粉质黏土和密实圆砾土。该层在港珠澳大桥全线分 布,厚度10~50m不等,局部凹槽处厚度达80m 以上。深中通道砂层变薄,局部缺失,其中西侧桥梁 段厚度较大,最大厚约34m,东侧岛隧段厚度较薄,厚 度2~20m不等。

未揭穿,分段连续分布

分布于两侧岸坡

④ 残积土层为基岩风化的残积物,呈硬一半硬砂 质黏性土状,在珠江口南部湾口和北侧虎门大桥水域 零星发育,主要见于珠海近岸处。在珠江口中部分布 较广,尤其靠近东岸侧,厚度可达13m以上,在西侧 不发育。

⑤区内基岩为震旦系(Z)片岩、混合片岩、混合

片麻岩、混合花岗岩、黑云斜长片麻岩,燕山第三期 (γ₅⁽³⁾)细一粗粒斑状花岗岩,燕山期(γ)石英岩等。其 中以花岗岩及混合片岩最为发育,在全区广泛分布, 其余岩性则零星分布。

2 沉积特征及沉积分区

选择港珠澳大桥、深中通道及虎门大桥具有代表 性的钻孔,基于土层的地质特征、成因时代及物理力 学特征,绘制2个层序地层剖面(图1、图2),同时结 合港珠澳大桥、深中通道及虎门大桥3个工程的纵向 地质剖面,对珠江口沉积特征进行分析。



図1 环江口地区架空法庁地法司间(1-1) Fig. 1 Typical sequence stratigraphic section of the Pearl River Mouth area (1-1')

根据 1-1'地层剖面,珠江口东侧区域,港珠澳大桥基岩埋深总体在 60 m 以下,深中通道和虎门大桥埋 深 20 m 左右即可见岩,虎门大桥局部基岩无覆盖层直 接出露地表。基岩之上发育砂土、黏土、粉质黏土,顶部覆盖淤泥,砂层粒度呈现下粗上细特征,越靠近 上游,沉积物厚度越薄,土层类型也逐渐减少。龙云 作等^[5] 根据生物种属、地貌特征认为该处潮流作用显 著大于径流作用,由此可见物源主要来源于外海,由 于潮流作用逐渐向内陆沉积,显示出以潮流作用力为 主的沉积特征。

根据 2-2'地层剖面, 珠江口西侧区域, 下游港珠 澳大桥基岩埋深 12.6~50 m, 黏土、粉质黏土较发育, 砂层相对较薄。中游深中通道基岩埋深 40~60 m, 在 河口强水流动力条件下, 表层淤泥之下沉积物基本全 部为砂类土, 厚度大, 且总体呈现出下部粗、上部细和



Fig. 2 Typical sequence stratigraphic section of the Pearl River Mouth area (2-2')

近岸粗、远岸细的特征,原因是洪奇沥等支流携带大量的泥砂注入珠江口,入湾后因水动力骤降而发生沉积,河流动力离岸越远动力越小,导致不同粒度砂层出现沉积分异作用,重颗粒先发生沉积,沉积在近岸,轻颗粒后发生沉积,沉积在远岸。

综上可以看出,珠江口东侧沉积物呈现下粗上 细、自下而上由粗砾砂一中细砂一黏土一淤泥的变化 过程,符合以潮流力为主的沉积序列特征。西侧受支 流水动力作用,呈现近岸为粗颗粒、远岸为细颗粒的 河流动力为主的分异沉积特征。结合陈耀泰¹⁰的地 质分区,基于研究区水动力环境、沉积物类型、层序 对比及工程地质断面分析,将珠江口地区划分为4类 沉积区,即河口砂质沉积区、潮流型泥质沉积区、泥 砂混合沉积区、浅海泥砂混合沉积区(图 3)。

(1)河口砂质沉积区。位于珠江口西侧,深中通 道 K15+500 至西岸终点,向南范围逐渐缩小,至港珠 澳大桥处为 K33+300 到西人工岛终点。受洪奇沥等 支流强水流动力作用,泥沙自河道快速进入珠江口, 受河道展宽及潮流力影响,流速迅速减缓,产生机械 分异沉降,较粗的砂质颗粒先行沉积,沉积物向湾内 粒度逐渐变细,最终逐渐过渡为粉质黏土、黏土类沉积。

(2)潮流型泥质沉积区。分布于珠江口中东侧大部分区域,深中通道处分布于东岸至 K15+500,港珠澳大桥处位于香港机场起点至 K28+800。受潮流力和河



流径流共同作用,以潮流力为主。总体水深较浅,细 粒沉积物淤积强烈,黏土层较为发育,而砂层除在潮 道、河道及冲刷槽较粗较厚外,整体相对较薄。沉积 物靠近外海粒度较粗,朝向内陆粒度变细。在珠江口 中部,由于潮流力作用减弱,出现薄层黏土层、砂层互 层的现象,反映了较弱的往复水动力特征。

(3) 泥砂混合沉积区。位于河流力作用为主沉积

区和潮流力为主沉积区之间,呈条带状分布,为河口 砂质沉积区和潮流型泥质沉积区两种沉积作用的混 合过渡类型,表现为沉积物类型多、层薄、分布杂乱, 互为夹层及尖灭,规律性差。

(4)浅海泥砂混合沉积区。根据陈耀泰^[5]沉积分 区范围,位于香港一大屿岛南部区域,主要受陆架海 水回流及微弱沿岸流的作用,泥砂含量较少,沉积作 用微弱。

3 物理力学特征分析

以港珠澳大桥和深中通道土工试验指标及原位 测试指标为依据,综合分析珠江口地区各土层的物理 力学特征。土工试验在现场土工试验室进行,各项试 验指标均严格执行《公路土工试验规程》(JTG E40— 2007)、《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)等 技术标准和要求。

3.1 物理力学指标随深度变化特征

港珠澳大桥和深中通道典型的样品物理力学参数如图 4 所示。研究区岩土层的含水率主要分布在 27%~97%之间,其中深中通道土层含水率分布范围 较宽,而港珠澳大桥土层含水率分布范围较窄。淤泥 质土含水率高,分布于 30%~97%,黏土、粉质黏土、 残积土及全强风化岩的含水率较低,分布范围窄,集 中在 20%~40%。随着深度增大,岩土层含水率呈降 低的趋势。





土层快剪黏聚力随深度变化离散性较大,但总体随着深度的增加,黏聚力呈线性增大的趋势,岩土层 黏聚力以0~30kPa居多,黏土、粉质黏土黏聚力在16~ 53 kPa之间,不同样品的差异性大,说明该层不均匀 性较大。

淤泥质土压缩系数分布于 0.5~3.0之间, 随深度

增加,压缩系数呈减小趋势;黏土、粉质黏土、残积 土、全强风化岩压缩系数主要分布在 0.1~0.8之间, 随深度增加压缩系数变化不大。这说明黏土、粉质黏 土等已经完成了初步固结,不同样品压缩性相差不 大,而淤泥质土由于未完成固结,不同样品压缩特性 的差异较大。 压缩模量主体分布于 0~10 MPa 之间, 随深度增加呈增大趋势。黏土的压缩模量明显大于淤泥质土、粉质黏土、残积土及全强风化岩, 说明黏土的土质相对坚硬, 难以被压缩。

3.2 软土十字板剪切特性

在港珠澳大桥及深中通道工程勘察中均对软土 开展了十字板剪切试验,试验仪器为LMC-D310型静 探微机,能够实时显示并记录土层的剪切数据,剪切 传力装置采用国内标准率定合格的电测式十字板板 头,板头规格:高度100 mm、宽度50 mm。测试参数 包括原状土不排水抗剪强度、重塑土不排水抗剪强度、 测点深度^[7-9],相关试验结果如图5、图6、图7 所示。

由图 5 可知,研究区软土含水率分布在 45%~ 95%之间,原状土十字板抗剪强度主要分布在 3~17 kPa之间,最大可达 43.3 kPa。随着原状土十字板抗剪 强度 C_u的增大,土层含水率 w 呈幂函数形式降低,关 系式为 w=110.5C_u^{-0.285}。



图 5 原状土十字板抗剪强度与含水率关系 Fig. 5 Relationship between the vane strength and water content of the undisturbed soil

由图 6 可知,软土压缩模量主要集中在 1.2~2.2 MPa,最大可达 4.0 MPa,原状土十字板抗剪强度 *C*_u主要分布在 1.8~15.8 kPa 之间,最大达 71.6 kPa,原 状土十字板抗剪强度 *C*_u与土的压缩模量呈显著线性 正相关,关系式为 *E*_s=0.037 5*C*_u+1.45。





Fig. 6 Relationship between the vane strength and compression modulus of the undisturbed soil

由图 7 可知,软土快剪黏聚力以 3~10 kPa 为主, 原状土十字板抗剪强度 C_u主要分布于 2.7~15.2 kPa 之间,原状土十字板抗剪强度 C_u与土的快剪黏聚力 呈线性正相关,关系式为 *c*=0.223C_u+4.39。



Fig. 7 Relationship between the vane strength and cohesion force of the undisturbed soil

3.3 岩土层孔压静力触探试验特征

港珠澳大桥 CPTU测试采用荷兰辉固重型 SEACALF系统,可提供10T以上的反力,探头采用辉 固截面积为15 cm²的三桥电测探头,操作程序满足 (ISSMGE, 1999)发布的国际参考实验规程以及修正 的BS1377(BSI, 1990)标准^[9,11]。深中通道 CPTU测试 采用磐索 PeneVector-IIIA 型海床式孔压静力触探系 统,水下设备自重22T,探头采用截面积为10 cm²的 三桥电测探头,操作程序满足(ISSMGE, 1999)发布的 国际参考实验规程。

孔压静力触探试验可提供锥尖阻力 q_c 、侧摩阻力 f_s 、孔隙水压力 u、比贯入阻力 p_s 、孔压参数比 B_q 、摩 阻比 R_f 等多类参数^[9-11],相关试验结果如图 8、图 9、图 10 所示。

由图 8 可知,含水率与比贯入阻力 p_s呈对数相 关,关系式为 w=-11.19ln(p_s)+44.14,相关系数为 0.55。 随着比贯入阻力 p_s增大,淤泥质土含水率由 94.5% 迅 速降低至 31.7%, p_s分布于 0~1 MPa之间;黏性土含 水率呈下降趋势,但下降趋势减缓,离散性变大,比贯 入阻力的范围分布于 1~5 MPa之间。砂类土含水率



Fig. 8 Relationship between the specific penetration resistance and water content

随着 p_s 增大呈缓慢下降的趋势,含水率变化不大,但 p_s 离散性大,分布于 2~14 MPa 之间。

由图 9 可知, 压缩系数与比贯入阻力 p_s 呈幂函数 相关, 关系式为 $a_{1-2}=0.535 p_s^{-0.538}$ 。随着 p_s 由 0 增至 2 MPa, 淤泥质土压缩系数由 2.9 迅速降至 0.46, 深中 通道样品压缩系数变化范围更大。黏土、粉质黏土主 要分布在曲线转折端, 随着 p_s 增大呈缓慢减小趋势, 离散性变大; 砂类土的压缩系数普遍小于 0.5, 且随着 p_s 的增大缓慢降低, 总体变化不大。





由图 10 可知, 黏性土、砂类土的快剪黏聚力 c 与 比贯入阻力 p_s 均呈线性正相关, 其中黏性土 c 与 p_s 的 关系式为 c=12.47 p_s+3.54, 即随着 p_s 增大, 快剪黏聚力 c 增大, 相关系数为 0.61; 砂类土 c 与 p_s 的关系式为 c=0.33 p_s+9.75, 即随着 p_s 增大, 黏聚力 c 增大, 相关系 数为 0.68。





4 结论

(1)基于港珠澳大桥、深中通道、虎门大桥等项目 的勘察成果对珠江口地区岩土层发育及分布特征进 行了分析,珠江口地区地层自上而下可以分为淤泥质 软土层、黏土及粉质黏土层、中粗砂层、残积土层、不 同风化程度基岩共5层。 (2)珠江口东侧沉积物呈下粗上细、自下而上由 粗砾砂一中细砂一黏土一淤泥的递变过程,符合以潮 流力为主的沉积特征;西侧受支流水动力作用,呈现 近岸为粗颗粒、远岸为细颗粒的以河流动力为主的沉 积分异特征。

(3)结合研究区水动力环境、沉积物类型、钻孔对 比及工程地质剖面分析,将珠江口水域划分为河口砂 质沉积区、潮流型泥质沉积区、泥砂混合沉积区、浅 海泥砂混合沉积区共4类沉积区,研究了各类沉积区 的沉积物特征,划定了不同类型沉积区的分布范围。

(4)随着深度增大,岩土层含水率降低,快剪黏聚 力增大且离散性增大,压缩系数减小,压缩模量增大。

(5)原状土十字板抗剪强度与含水率呈幂函数相关,与软土压缩模量呈显著线性正相关,与软土快剪 黏聚力呈线性正相关。

(6)含水率与 CPTU 试验比贯入阻力呈对数相关, 压缩系数与比贯入阻力呈幂函数相关; 黏性土、砂类 土的快剪黏聚力与比贯入阻力均呈线性正相关。

参考文献(References):

- [1] 石要红,曾宁烽,陈太浩,等.珠江口内伶仃岛以北水 域海底工程地质条件评价[J].地质通报,2005,24 (10/11):1052-1059.[SHI Yaohong, ZENG Ningfeng, CHEN Taihao, et al. Evaluation of sub marine engineering-geological conditions in the sea area north of Neilingding Island at the Pearl River Mouth, Guangdong China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(10/11): 1052-1059. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王文介.珠江口的沉积作用和沉积相[J]. 沉积学报, 1985, 3(2): 129 - 140. [WANG Wenjie. Sedimentation and Sedimentary Faces of the Zhujiang Mouth[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(2): 129 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 甘宇,任士房,吴刚,等. 深中通道软土工程特性研究[C]//2018年全国工程勘察学术大会论文集. 2018.
 [GAN Yu, REN Shifang, WU Gang, et al. The research of soft soil engineering characteristics in Shenzhen-Zhongshan Link[C]//Geotechnical Investigation & Surveying. 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 段伟,蔡国军,刘松玉,等.基于CPTU测试的港珠澳大桥砂土液化评价方法研究[J].岩土工程学报,2017,39(增刊2):236-239.[DUAN Wei, CAI Guojun, LIU Songyu, et al. Evaluation method for sand liquefaction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge based on CPTU tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

2017, 39(Sup 2): 236 – 239. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 龙云作, 霍春兰, 杨胜雄. 珠江三角洲现代沉积环境及 沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(4):
 15 - 27. [LONG Yunzuo, HUO Chunlan, YANG Shengxiong. Modern Sedimentary Environment and Characteristics of the Zhujiang River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(4): 15 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈耀泰.珠江口沉积分区[J].中山大学学报(自然科学版),1995(3):109-114. [CHEN Yaotai. Sedimentation divisions of Pearl River Mouth[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1995(3):109-114. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 祝刘文,杜宇.CPTU数据与其它原位测试试验的相关 性分析[J].水运工程,2013(7):22-25. [ZHU Liuwen, DU Yu. Correlation analysis of CPTU and other in-situ testing[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(7):22 -25. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨爱武,陈立杰,吴磊.循环荷载作用下软黏土十字板 强度劣化与微结构演化关联性分析[J].水文地质工 程地质,2016,43(6):66-73.[YANG Aiwu, CHEN Lijie, WU Lei. The relevance analysis between deterioration of vane shear strength and evolution of

microstructure of soft clay under cyclic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 66 – 73. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路工程 地质原位测试规程: JTG 3223-2021[S].北京:人民交 通出版社, 2021. [CCCC First Highway Consultants Co. Ltd. Code for in-situ testing of highway engineering geology: JTG 3223-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2021. (in Chinese)]
- [10] 居俊,刘松玉,刘志彬,等. 基于CPTU孔压消散试验的 欠固结土OCR计算方法[J].东南大学学报(自然科学 版), 2011, 41(3): 642 - 646. [JU Jun, LIU Songyu, LIU Zhibin, et al. OCR evaluation method of underconsolidated soil through CPTU pore pressure dissipation test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(3): 642 - 646. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李小雪,彭祖武,滕伟福. CPTU试验在土体动力学参数计算中的应用研究[J].水文地质工程地质, 2013, 40
 (3): 84 88. [LI Xiaoxue, PENG Zuwu, TENG Weifu. Analyses of calculating soil kinetic parameters with CPTU testing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 84 - 88. (in Chinese with English abstract)]

编辑:张明霞