

文章编号: 1000 - 7598 (2013) 07 - 1931 - 06

湛江组结构性黏土区域微观结构特性研究

沈建华¹, 汪 稔¹, 郑 邴¹, 韩健庄², 陈晓东²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 广东省湛江地质工程勘察院, 广东 湛江 524043)

摘 要: 形成于早更新世的湛江组地层广泛分布于雷州半岛地区, 其最为典型的灰色黏土因具有强结构性, 在实际工程中出现了一系列岩土工程问题, 为众多学者所关注。根据地层学研究结果, 雷州半岛各区域的湛江组灰色黏土具有不同沉积环境。由于地质成因的差异, 灰色黏土在不同区域表现出不同的工程特性。工程实际中, 灰色黏土工程特性的区域性, 使得工程界及研究者对于该土层的工程力学效益更是难以掌握。利用 X 射线衍射试验及电镜扫描试验, 研究了不同区域灰色黏土的矿物成分及含量、微结构等微观结构特性。结果表明: 不同沉积环境灰色黏土矿物成分及含量存在区域性差异, 各矿物成分按照不同比例组合, 形成的土体微结构区域特性明显。灰色黏土具有强结构性微观机制的揭示及区域差异性的分析, 有利于对该层黏土的全面认知和利用。

关 键 词: 湛江组; 结构性黏土; 强结构性; 微观结构; 区域性

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

Research on regional microstructure characteristics of structural clay of Zhanjiang formation

SHEN Jian-hua¹, WANG Ren¹, ZHENG Yun¹, HAN Jian-zhuang², CHEN Xiao-dong²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Guangdong Zhanjiang Geo-Engineering Investigation Institute, Zhanjiang, Guangdong 524043, China)

Abstract: Zhanjiang formation formed in early Pleistocene is widely distributed in Leizhou peninsula in China. The most typical gray clay of Zhanjiang formation is known as its strong structural performance and had produced a series of geotechnical engineering problems in actual engineering. According to the stratigraphic research, this typical gray clay of Zhanjiang formation has different sedimentary environments and compositions in different areas of Leizhou peninsula. Thus, the differences of geologic origin make the engineering properties of gray clay changing with the area. In the actual projects, it is difficult for engineers and researchers to master the engineering mechanics effect of gray clay due to its regional characteristics. Some tests by X-ray diffraction and scanning electron microscope (SEM) are carried out to study the microstructure characteristics of gray clay such as mineral composition and its content, and microstructure in different areas. The results show that there are differences of mineral composition and its content. Different proportions of mineral composition compose different microstructures of gray clay which have obviously regional characteristics. The revelations of micromechanism of gray clay which lead to its strong structural performance and the analysis of its regional characteristics make for cognition and use of this clay.

Key words: Zhanjiang formation; structural clay; strong structural performance; microstructure; regional characteristics

1 引 言

湛江组灰色黏土呈薄层状, 往往含有不同数量的有机质、炭化木屑, 水平层理、微层理发育, 层面上往往有一层极薄 (一般小于 1 mm) 的粉砂或细砂, 软硬不均, 含水率高, 黏性强, 孔隙比大,

具有强结构性。灰色黏土在不同区域, 厚度、埋深均有较大差别, 给实际工程的勘察、设计、施工带来了一系列岩土工程问题^[1-6]。据调查: 湛江市区的海滨造船厂、洪江制药厂、港湾医院等单位, 20 世纪 60 - 70 年代建于结构性黏土上的部分房屋因受其影响, 墙体均出现了不同程度的开裂。建于

收稿日期: 2012-06-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41072240); 中国科学院岩土力学与工程国家重点实验室资助项目(No. Y110061Q02); 国家自然科学基金面上项目(No. 41172286)。

第一作者简介: 沈建华, 女, 1980 年, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: sjh200404@126.com

1984 年的湛江市人民大道，灰色黏土为路基的上路面，经过晴、雨天影响后发生变形，多处黏土路堑边坡大雨后发生了滑坡；基坑开挖，容易出现垮塌事件；甚至，挖掘钻机施工过程中出现突然掉钻的现象^[4-6]。1999 年在琼州海峡铁路轮渡工程北港（湛江侧）防波堤进行爆炸挤淤施工中，爆填施工抛石层未能达到原设计标高，而南港却能按原始设计正常施工。后经研究发现，主要原因是防波堤下卧软土层具有较强结构性所致^[7-8]。

研究表明：形成于早更新世湛江组地层，遍布于整个雷州半岛，以陆相沉积为主的河控三角洲相沉积层。灰色黏土是岛内分布最广的土体之一，广泛出露于地表或下伏第四系全新统土体或中更新统土体之下，为各种工程活动的主要载体，即岩土界所关注的湛江组结构性黏土。林晓东^[9]和梁俊平^[10]从地层学上分析，雷州半岛各区域湛江组灰色黏土具有不同的沉积环境。而土体沉积环境及物质成分是影响其工程特性的主要因素^[11]。因此，灰色黏土的工程特性存在区域性，忽略湛江组灰色黏土的区域性特点将对工程实践造成较大的困惑及损失。

本文立足于湛江组地层在不同区域沉积环境的差异性，采用 X 射线衍射试验及电镜扫描试验，研究了不同区域灰色黏土的微观结构特性。

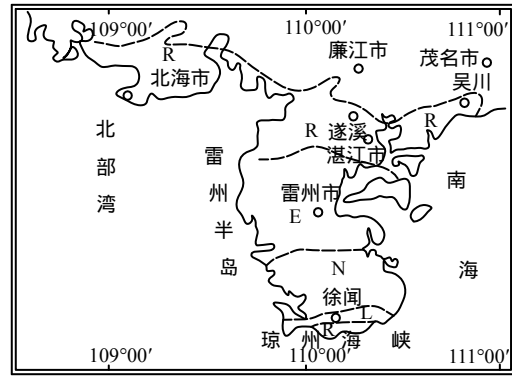
2 湛江组地层沉积环境

湛江组地层分布于整个雷州半岛，岩性和沉积相特征区域差异较大，各区所揭露的地层厚度、岩性均不一致，上覆地层多为松散物，加之各单位所掌握的实测资料较为分散且研究程度有限，因此，多年来对湛江组地层沉积相问题均未达成统一认识。

文献[9]中根据矿物成分、形态及表面微结构特征、粒度分析、微量元素分析、微体古生物分析等将雷州半岛地区湛江组地层自北向南依次划分为雷北河流相、河口相、浅海相、滨海相、雷南河流相沉积，具体划分如图 1 所示。

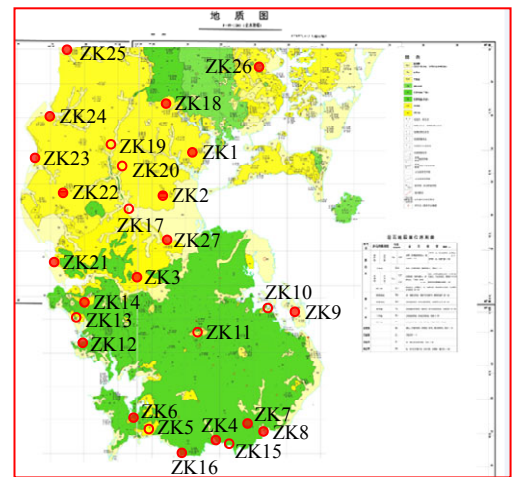
3 工程钻探及取样

为研究湛江组灰色黏土在不同区域内工程特性，根据图 1 中湛江组地层沉积相的渐变及分布区域的划分情况，结合雷州半岛的地形地貌、区域地质构造^[12-14]等因素，在不同沉积相分布区域内布置相应的地层钻孔，进行灰色黏土层的鉴别及取样。图 2 为具体钻孔布置平面图。



注：R - 河流相；E - 河口相；N - 浅海相；L - 滨海相

图 1 雷州半岛湛江组地层分布及沉积相
Fig.1 Zhanjiang formation sedimentary facies on Leiqiu peninsula



注：● 控制孔；○ 鉴别孔。施工中部分钻孔位置稍有偏离

图 2 地质钻孔布置图
Fig.2 Arrangement plan of geological drill holes

由于结构性黏土对取样要求较高，为避免取样过程中对土体结构的破坏，采用不锈钢敞口薄壁取土器进行取样，取土器内径为 100 mm，壁厚为 2 mm，刃角为 60°，长度为 300 mm，上端用螺丝与钻杆连接，设有排气（水）孔和球形阀，以便在取样时释放气、水压力、阻挡水的重新进入，并在上提时在土样上方保持真空。由于湛江组地层上覆地层多为北海组的砂与砾石，容易造成钻孔坍塌，回转钻进过程中采用泥浆护壁，取样时快速静压，将取土器连续地压入到预定深度。土样取出后，为防止水分散失，利用石蜡将其密封。但土样装运及切样过程中难免对土体结构性产生一定的影响。

4 土体微观结构试验

土体微观结构的研究能够从本质上揭示土体宏观力学特性的变化机制，而土体成因、物质成分是

影响其微结构类型的主要因素。湛江组灰色黏土在雷州半岛范围内，沉积环境呈区域性变化，黏土微观结构特性是否存在差异性进而产生宏观性质的差别。为了回答这个问题，笔者开展了不同沉积环境下湛江组灰色黏土微观结构试验，以全面了解其区域特性。本次试验在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。

4.1 结构性黏土物相分析

X 射线衍射物相分析是矿物鉴定最主要、也最具本质性的鉴定方法，主要根据不同矿物的一系列特性晶面的衍射数据进行分析判断。文中利用 X 射线粉晶试样试验区分原生矿物与黏土矿物，利用定向薄膜试样试验具体分析黏土矿物的类型及含量。

4.1.1 粉晶试样试验

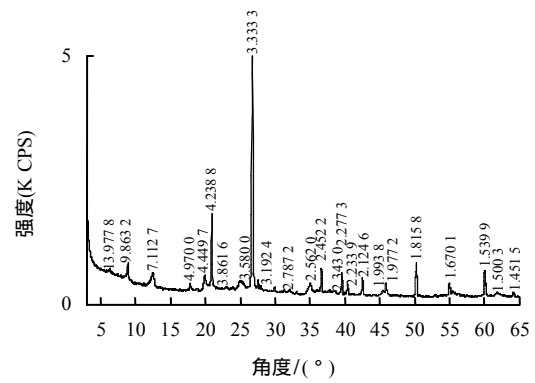
粉晶试样的制备 将开有试样孔的载样玻璃片，放在一片平整玻璃片上，向试样孔中填入经过风干磨细（过 0.05 mm 筛）的土样，使其厚度略高于试样孔，盖上一块平整的玻璃片，用手按压，将试样压实，压平后移去上下玻璃片，用软毛刷扫除试样孔周围多余的土样后，放入 X 衍射仪上进行试验，所得结果即为全样粉晶分析结果。本次试验不同沉积相共进行 15 组 X 射线粉晶试样分析，不同区域结构性黏土典型的图谱如图 3 所示。

表 1 列出了本次试验不同沉积相灰色黏土所含矿物的主要类型及含量。

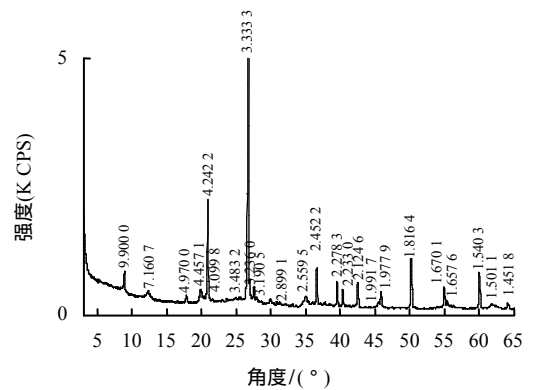
从表中可以看出：不同沉积相灰色黏土的原生主要矿物成分均为石英、长石。从河口相开始逐渐往浅海相、雷南河流相黏土中均含有少量的黄铁矿，雷南河流相还含有极少量的方解石。原生矿物的含量从雷北河流相→河口相→浅海相→雷南河流相逐渐减少。由于原生矿物是岩石经过物理风化后的产物，其主要的特点是颗粒粗大，物理、化学性质稳定或较稳定，具有较强的抗水性及抗风化能力，亲水性弱或较弱。因此，原生矿物对土体工程地质性质的影响程度要远小于次生矿物及有机质。黏土矿物为灰色黏土中主要的次生矿物，其含量的变化与原生矿物的变化规律相反，平均含量为 43%，是组成黏粒的主要成分，影响土体工程地质性质的主要因素，不同黏土矿物其晶格架构不同，对土体性质的影响也不同。因此，对黏土矿物的具体类型及含量进行了定向薄膜试样试验。

4.1.2 定向薄膜试样试验

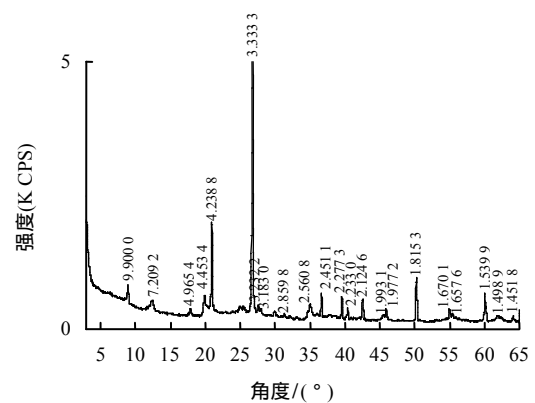
由于多数黏土矿物在 X 射线衍射图谱上均存在相同或相近的衍射峰，本次试验采用定向片衍射试验分析并采用乙二醇晶层扩张法进行对比分析。



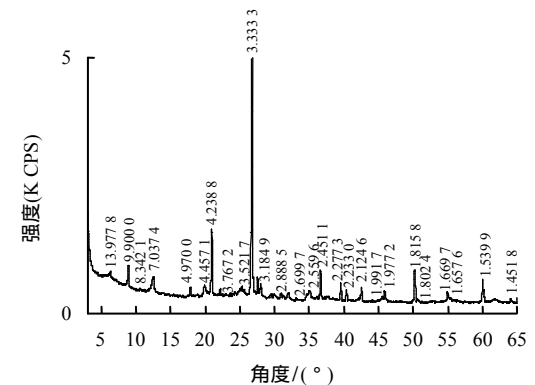
(a) Z26 雷北河流相



(b) Z3 河口相



(c) Z10 浅海相



(d) Z15 雷南河流相

图 3 不同沉积相灰色黏土典型 X 射线衍射图谱
Fig.3 Typical X-ray diffraction atlas of gray clay in different facies

表1 灰色黏土的矿物类型及含量

沉积相	样品编号	矿物类型及含量/%				
		石英	长石	黄铁矿	方解石	黏土矿物
雷北河流相	ZK24	66	11	0	0	23
	ZK25	62	9	0	0	29
	ZK26	42	5	2	0	51
	ZK18	63	4	2	0	31
	均值	58.3	7.3	1	0	33.5
	ZK19	45	4	2	0	49
	ZK20-4	58	6	2	0	34
河口相	ZK20-12	47	5	2	0	46
	ZK23	57	8	0	0	35
	ZK1	36	3	2	0	59
	ZK2	55	5	2	0	38
	ZK3	50	4	2	0	44
	均值	49.7	5	1.7	0	43.6
	ZK10	45	4	2	0	49
浅海相	ZK15	38	7	2	2	51
	ZK4	37	6	2	2	53
雷南河流相	ZK4-21	53	6	2	2	37
	均值	42.7	6.3	2	2	47

试样制备：试验提取小于 2 μm 粒径样品，拌制成充分分散的稀悬液，用滴管吸取若干滴悬液滴在玻璃片上铺成一定大小的面积，制成黏土矿物定向薄片，同时采用乙二醇处理制成对比定向片试验，综合判定黏土矿物的类型及含量。表 2 中列出黏土矿物类型及含量。

表2 灰色黏土的黏土矿物类型及含量

沉积相	样品编号	黏土矿物类型及含量/%			
		蒙脱石	绿泥石	伊利石	高岭石
雷北河流相	ZK24	15	25	35	25
	ZK25	15	10	35	40
	ZK26	25	10	25	40
	ZK18	10	0	30	60
	均值	16.3	11.3	31.3	41.3
	ZK19	25	20	35	20
	ZK20-4	15	10	40	35
河口相	ZK20-12	35	15	30	20
	ZK23	15	20	40	25
	ZK1	10	25	40	25
	ZK2	20	15	35	30
	ZK3	20	10	35	35
	均值	20	16.4	36.4	27.1
	ZK10	20	10	40	30
浅海相	ZK15	20	20	40	20
	ZK4	25	20	30	25
雷南河流相	ZK4-21	15	20	40	25
	均值	20	20	36.7	23.3

从表中可以看出：不同沉积相灰色黏土的黏土矿物类型相同，均为蒙脱石、绿泥石、伊利石及高岭石，各黏土矿物按不同比例组合，蒙脱石、伊利

石在不同环境下含量基本稳定，含量均值占黏土矿物的 55%以上，仅雷北河流相含量稍小；绿泥石的含量由河流相→河口相→浅海相先增大后减小的趋势；高岭石含量随着沉积相的变化产生较大幅度的递变，由雷北河流相→河口相→浅海相→雷南河流相逐渐减小。

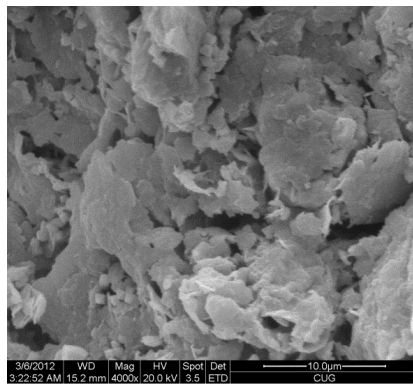
不同沉积区域灰色黏土的黏土矿物类型基本相同，但由于沉积环境的不同，黏土矿物之间组合比例不同，并通过不同的连结方式将土的各结构单元体结合起来，形成了具有一定空间排列规律、孔隙特性的土体微结构。

4.2 土体微结构试验

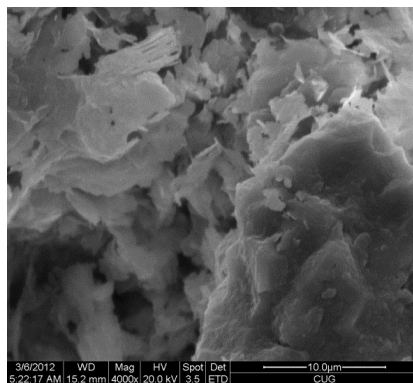
不同沉积相中黏土矿物按照不同比例组合，形成的土微结构也不尽相同，为寻找土体微结构特征及区域性，本次试验对不同沉积环境下 15 组灰色黏土进行电镜扫描试验，以观察不同区域土体微结构类型，判定影响其工程性质的微观机制。

试样的制备：本次试验的样品脱水采用冷冻干燥法，事先将原状土样用细钢丝锯切成 1 cm×1 cm×1 cm 左右的土块，将其在液氮（沸点 -196℃）中快速冷冻 15 min，使土中液体成为不具膨胀性的非结晶态冰，然后在 -50℃ 状态下用英国爱德华冷干机抽真空 8 h 以上，使土中非结晶的冰冷升华，从而达到土样既干燥又不变形的目的，可以避免土体结构破坏，得出较可靠的电镜扫描结果。图 4 为本次试验不同沉积区域灰色黏土典型的电镜扫描图。

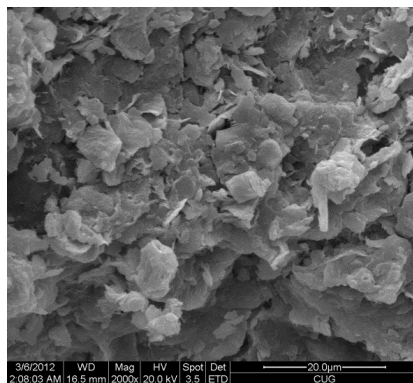
图片中高岭石由于在水中直接沉积而成，具有完好的假六方片状晶形，颗粒细小，成平行连生的不规则大片；蒙脱石聚集成厚度不一的团块或花絮状集合体，片体较厚；绿泥石以片状或叠片状形态存在；伊利石呈片状出现。黏土矿物片多数以点-点、边-边及边-面接触，根据矿物分析可知，伊利石、蒙脱石为不同沉积相的主要的黏土矿物，此类矿物形成的结构比较疏松、孔隙率大，类似蜂窝状的链状结构。对比各沉积相中灰色黏土的微结构形态，雷北河流相灰色黏土结构较为均匀，大孔隙分布较少，类似开放式的蜂窝状结构；河口相沉积结构性黏土较雷北河流相孔隙更大，结构疏松，孔隙连通性较好，形成的蜂窝状结构较为疏松；浅海相沉积及雷南河流相结构性黏土在原生矿物及次生黏土矿物总含量相近，由于次生黏土矿物高岭石及绿泥石含量的差别，使得浅海相孔隙分布均匀，但孔隙连通性差，且局部孔隙较大，类似开放式的蜂窝状结构，雷南河流相片状黏土矿物面-面接触为主，结构较为密实，形成类似于封闭式的蜂窝结构。



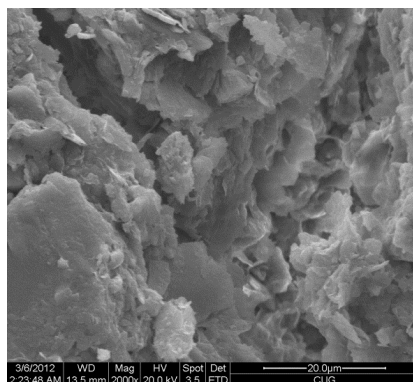
(a) 雷北河流相(ZK26)



(b) 河口相(ZK20)



(c) 浅海相(ZK10)



(d) 雷南河流相(ZK15)

图 4 不同沉积相灰色黏土典型的扫描电镜图

Fig.4 Typical SEM images of gray clay

综上所述，灰色黏土的蜂窝状微结构是其具有强结构性的微观结构特性，不同区域微结构上细微

的差异，是影响其区域特性的主要因素，表现为宏观力学效应的区域性。不同区域灰色黏土的宏观力学特性（强度、变形等）有待后续进一步研究。

5 结 论

(1) 湛江组地层分布于整个雷州半岛，沉积相特征区域差异明显，雷州半岛从北往南湛江组地层沉积相可划分为雷北河流相、河口相、浅海相、滨海相、雷南河流相。

(2) 湛江组灰色黏土层在不同沉积相中矿物类型基本相同。原生矿物主要为石英、长石，其含量由雷北河流相→河口相→浅海相→雷南河流相逐渐减少；次生矿物主要为黏土矿物，平均含量为 43%，是组成黏粒的主要矿物成分，其主要类型有：蒙脱石、绿泥石、伊利石、高岭石。

(3) 伊利石、蒙脱石为不同沉积相的主要的黏土矿物（平均含量大于 55%），黏土矿物片多数以点-点、边-边及边-面接触，形成了结构比较疏松、孔隙率大的蜂窝状结构，但不同沉积环境中黏土矿物按不同比例组合，形成的灰色黏土微结构在孔隙大小及孔隙连通性上仍有较大差别。

(4) 蜂窝状结构是黏性土的主要微结构类型，结构比较松散，土体孔隙比较大，灵敏度高，易压缩。从微观结构角度说明了湛江组灰色黏土具有强结构性的微观机制，并且由于沉积条件的不同，微结构的类型具有区域性，在不同区域内结构性强度随之改变，进而说明了土体微观结构机制受到沉积环境的影响，是影响土体工程特性的主要因素之一。

进一步研究将从湛江组结构性黏土的微观结构区域特性对宏观物理力学性质的影响及两者相互关系、空间分布规律等方面进行研究，以全面了解结构性黏土的区域特性。由于滨海相所取结构性黏土样品扰动程度较大，试验结果可信度不高，因此，文中未涉及此项试验结果的分析。

参 考 文 献

- [1] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 34 - 45.
LI Zuo-qin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 34 - 45.
- [2] 谭罗荣, 张梅英. 一种特殊土微观结构特性的研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 26 - 35.

- TAN Luo-rong, ZHANG Mei-ying. The research on microscopic structure properties of a particular soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(2): 26 - 35.
- [3] 张诚厚. 两种结构性黏土的土工特性[J]. 水利水运科学研究, 1983, (4): 65 - 71.
- [4] 姚珩珩, 夏远野, 刘胜娥. 海口地区第四系湛江组灰色黏土的工程地质特性[J]. 港工技术, 2001, (6): 54 - 55.
- XIA Heng-heng, XIA Yuan-ye, LIU Sheng-e. The engineering geology of gray clay of Zhanjiang group of quaternary system in Haikou district[J]. **Port Engineering Technology**, 2001, (6): 54 - 55.
- [5] 陈书荣. 湛江灰色黏土的工程特性[J]. 西部探矿工程, 2006, (6): 30 - 31.
- [6] 吴卫华. 关于湛江灰色黏土的几个岩土工程问题[J]. 城市勘测, 2002, (4): 43 - 44.
- [7] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 湛江海域结构性海洋土的工程特性及其微观机制[J]. 水利学报, 2002, (9): 82 - 88.
- KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Engineering properties and micro-mechanism of structural marine soil in Zhanjiang sea area[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (9): 82 - 88.
- [8] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1879 - 1884.
- TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1879 - 1884.
- [9] 林晓东, 宗永强. 湛江组沉积相特征[J]. 地层学杂志, 1990, 14(3): 195 - 202.
- LIN Xiao-dong, ZONG Yong-qiang. Sedimentary facies of the Zhanjiang Formation[J]. **Journal of Stratigraphy**, 1990, 14(3): 195 - 202.
- [10] 梁俊平. 广东省湛江地区第四纪更新世地层[J]. 广东地质, 1992, 7(4): 21 - 34.
- LIANG Jun-ping. Quaternary pleistocene strata in Zhanjiang area of Guangdong province[J]. **Guangdong Geology**, 1992, 7(4): 21 - 34.
- [11] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥, 等. 黏土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, (10): 43 - 47.
- GONG Xiao-nan, XIONG Chuan-xiang, XIANG Ke-xiang, et al. The formation of clay structure and its influence on mechanical characteristics of clay[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2000, (10): 43 - 47.
- [12] 广东省地质矿产局. 中华人民共和国湛江综合区域地质调查报告(1:50000)[R]. 广东: [s. n.], 1989.
- [13] 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等. 雷琼第四纪火山岩[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1 - 7.
- [14] 李建生. 雷州半岛地区第四纪环境演变[J]. 海洋科学, 1990, (2): 40 - 44.
- LI Jian-sheng. The quaternary environment evolution of the Leizhou peninsula area, China[J]. **Marine Sciences**, 1990, (2): 40 - 44.

GB/T 50783-2012 复合地基技术规范

著译者: 浙江省住房和城乡建设厅, 32 开本, 200 页, 平装, 定价: 38 元, 出版单位: 中国建筑工业出版社, 版次: 第一版, 出版时间: 2013 年 4 月, 标准书号: 1580177.974, 征订号: J1653。

内容简介: 本规范由中华人民共和国住房和城乡建设部第 1486 号公告发布, 编号为 GB/T 50783-2012, 自 2012 年 12 月 1 日起实施。本规范适用于复合地基的设计、施工及质量检验。

目录: 第 1 章 总则; 第 2 章 术语和符号; 第 3 章 基本规定; 第 4 章 复合地基勘察要点; 第 5 章 复合地基计算; 第 6 章 深层搅拌桩复合地基; 第 7 章 高压旋喷桩复合地基; 第 8 章 灰土挤密桩复合地基; 第 9 章 夯实水泥土桩复合地基; 第 10 章 石灰桩复合地基; 第 11 章 挤密砂石桩复合地基; 第 12 章 置换砂石桩复合地基; 第 13 章 强夯置换墩复合地基; 第 14 章 刚性桩复合地基; 第 15 章 长-短桩复合地基; 第 16 章 桩网复合地基; 第 17 章 复合地基监测与检测要点。

读者对象: 本规范面向复合地基的设计、施工及质量检验人员等。

(摘自 中国建筑书店)