

探讨湛江组薄层状黏性土承载力的取值问题

艾康洪, 揭江

广东省地质局第四地质大队, 广东 湛江
Email: aikanghong2011@126.com

收稿日期: 2021年5月2日; 录用日期: 2021年5月16日; 发布日期: 2021年5月28日

摘要

通过分析湛江组薄层状黏性土的物理力学性质, 比较标准贯入试验、土工试验、轻型动力触探试验等不同测试手段所得承载力特征值的差异, 并分析其产生差异的原因, 进而阐述在岩土工程勘察和地基基础施工时需要注意的问题, 避免因人为因素影响而误判湛江组薄层状黏性土的承载力特征值。

关键词

薄层状黏性土, 承载力, 标准贯入, 土工试验, 轻型动力触探

Discussion on Bearing Capacity of Thin Cohesive Soil in Zhanjiang Formation

Kanghong Ai, Ji Jiang

The 4th Geological Brigade of Guangdong Provincial Geological Bureau, Zhanjiang Guangdong
Email: aikanghong2011@126.com

Received: May 2nd, 2021; accepted: May 16th, 2021; published: May 28th, 2021

Abstract

Based on the analysis of the physical and mechanical properties of the thin layered cohesive soil in the Zhanjiang formation, the differences of the characteristic values of the bearing capacity obtained from the standard penetration test, geotechnical test and light dynamic penetration test are compared. The paper also analyzes the reasons for the differences, and then expounds the problems that should be paid attention to in geotechnical engineering investigation and foundation construction, so as to avoid misjudging the bearing capacity characteristic value of the thin layer cohesive soil of the Zhanjiang formation due to the influence of human factors.

Keywords

Thin Layered Cohesive Soil, Bearing Capacity, Standard Penetration, Geotechnical Test, Light Dynamic Penetration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷州半岛地区第四系早更新统湛江组属三角洲相沉积, 与下伏下洋组呈平行不整合接触; 自廉江市南部遂溪大断裂往南的整个雷州半岛均有分布, 主要被中更新统至全新统地层所覆盖, 地表出露比较零散, 出露面积约 586.91 km² [1]; 岩性为黏土、粉质黏土、砾砂、粗砂、中砂、细砂、粉土不等厚互层, 局部夹 1~3 层玄武岩; 顶板埋深 0.00~152.02 m, 层厚 0.00~254.00 m, 其厚度自北向南逐渐增厚, 从几米渐变为百多米; 沉积韵律明显, 从下而上可分为多个由粗至细的沉积韵律。而薄层状黏性土是湛江组具有独特性质的地层之一, 其在湛江组地层中广泛分布, 而且都是在湛江组上部出现, 埋藏较浅, 总体上东厚西薄。

2. 薄层状黏性土特征及主要测试方法

2.1. 薄层状黏性土特征

薄层状黏性土的岩性为黏土和粉质黏土, 薄层状黏性土之所以要与其它黏性土区分, 是因为其发育较特殊的微结构——近水平微薄层理, 少量层理不平整(如微波状层理、包卷层理、变形层理等), 层厚仅 1~8 mm, 且层面夹大量细砂和粉砂。该层是在水流缓慢、水深加大的情况下沉积形成的, 沉积物以黏粒和粉粒为主, 而其间受潮汐影响间歇性地沉积了大量的细砂粒和粉砂粒, 但沉积砂粒不成层, 因而形成薄层状黏性土特殊的内部层理特征[2]。由此致使该类土体的空隙体积相对较大, 其物理力学特性也就不同于一般黏性土。薄层状黏性土颜色以灰~深灰色为主, 顶部常见杂色风化壳, 一般呈可塑状, 上部局部为软塑, 下部局部为硬塑, 呈中~高压缩性, 局部夹铁皮层或间夹薄层中粗砂。一般在 40 m 深度范围内可见 1~3 层薄层状黏性土, 顶板埋深 0.30~66.40 m, 单层厚 0.20~36.50 m [3], 其孔隙比和液性指数普遍较大。

2.2. 薄层状黏性土力学性质测试方法

1) 土工试验设备及测试方法

薄层状黏性土现场采样一般采用 XY-1 型液压工程勘察钻机, 泥浆护壁回转钻进至预定采样深度后清理残渣, 然后采用 TB75 敞口薄壁取土器采取原状土样。对所取土样按照《土工试验方法标准》进行室内试验[4], 其中: 物理性质试验包括天然土重度、天然含水率、比重、天然孔隙比、界限含水率试验以及土样颗粒分析试验等; 天然含水率试验采用烘干法, 天然重度试验采用环刀法, 土粒比重试验采用比重瓶法进行测试; 界限含水率采用液塑限联合测定法测定, 在含水率与圆锥下沉深度的关系图上取下沉深度为 2 mm 所对应的含水率为塑限, 下沉深度为 17 mm 所对应的含水率为液限, 取值以百分数表示, 准确至 0.1%。压缩试验采用全自动固结仪, 试验高度为 20 mm。用涂有凡士林的环刀切取原状软土, 制

成固结土样, 放置在固结仪上, 之后分别施加 25、50、100、200、400 kPa 的固结压力, 采用快速固结法进行试验。

2) 标准贯入试验设备及方法

标准贯入试验是在现场测定土层的地基承载力的方法之一, 试验设备主要有: ① XY-1 型液压钻机; ② 标贯试验穿心锤, 质量为 63.5 kg, 落距为 76 cm; ③ 标贯试验触探杆, 直径为 $\phi 42$ mm; ④ 贯入器对开管, 长度 > 500 mm, 外径为 51 mm, 内径为 35 mm; ⑤ 贯入器管靴, 长度为 50~76 mm, 刃口角度 18° ~ 20° , 刃口单刃厚度 2.5 mm。标准贯入试验测试方法: ① 试验孔采用回转钻进, 当孔壁不稳定时, 采用泥浆护壁, 钻至试验标高以上 15 cm 处, 清除孔底残土后再进行试验; ② 采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击, 并减小导向杆与锤间的摩阻力, 避免锤击时的偏心侧向晃动, 保持贯入器、探杆、导向杆联接后的垂直度, 锤击速率小于 30 击/min; ③ 贯入器打入土中 15 cm 后, 开始记录每打入 10 cm 的锤击数, 累计打入 30 cm 的锤击数为标准贯入试验实测锤击数(N)。标准贯入试验杆长校正击数(N')由下式计算: $N = \alpha N'$, 式中: α 为杆长校正系数, 按《广东省建筑地基基础设计规范》(DBJ 15-31-2016)附录表 L.0.1 执行, 当杆长大于 39 m 时, 校正系数统一取 0.52 [5]。

3) 轻型动力触探试验设备及方法

轻型动力触探试验是提供浅基础地基承载力的方法, 也是检验基底是否存在下卧软层的手段, 轻型动力触探试验一般适用于深度小于 4 m 的土层。试验设备主要有: ① 穿心锤, 质量为 10 kg, 落距为 50 cm; ② 触探杆, 为直径 $\phi 25$ mm 的金属管, 每根长 1.0~1.5 m; ③ 探头, 为金属实心圆柱圆锥, 其中上部衔接触探杆有 6 mm 长为圆柱状(直径 $\phi 40$ mm)、下部 36 mm 长为圆锥(锥角 60°)。现场轻型动力触探试验方法如下: ① 根据场地情况进行选点开挖, 挖至勘察设计确定的持力层; ② 将探头和探杆安装好, 保持探杆垂直, 然后对该持力层连续向下贯击, 穿心锤落距为 50.0 ± 2.0 cm, 使其自由下落; ③ 及时记录贯入深度, 记录每贯入 30 cm 的锤击数(N_{10}), 在地层较硬、锤击数较多时, 采用分段记录, 以每贯入 10 cm 记录一次相应的锤击数, 整理资料时按 30 cm 所需的击数作为指标; ④ 当贯入 30 cm 的锤击数超过 50 击或贯入 10 cm 的锤击数超过 30 击时, 即终止试验。

3. 薄层状黏性土主要物理力学性质

3.1. 土工测试指标

1) 区域性物理力学指标

根据珠江三角洲及周边地区地面沉降地质灾害监测(雷州半岛地区)项目[6], 雷州半岛地区湛江组薄层状黏性土的状态可分为软塑、可塑和硬塑三种, 该项目将薄层状黏性土分为软土和非软土两块进行统计。

软塑薄层状黏性土(软土层)的主要物理力学指标值: 液性指数 0.94~1.17 (平均值 1.08), 孔隙比 0.993~1.393 (平均值 1.203), 含水率 4.40%~47.80% (平均值 43.25%), 压缩系数 $0.50\sim 0.97$ MPa^{-1} (平均值 0.79 MPa^{-1}), 压缩模量 2.30~3.90 MPa (平均值 2.90 MPa), 黏聚力 6.50~28.60 kPa (平均值 14.75 kPa), 内摩擦角 $2.10^{\circ}\sim 8.00^{\circ}$ (平均值 4.00°)。

可塑~硬塑薄层状黏性土的主要物理力学指标值: 液性指数 $-0.24\sim 3.26$ (平均值 0.74), 孔隙比 0.176~1.740 (平均值 1.090), 含水率 12.%~91.2% (平均值 39.4%), 压缩系数 0.05~1.52 (平均值 0.45), 内摩擦角 $1.0^{\circ}\sim 39.0^{\circ}$ (平均值 13.6°), 黏聚力 0.0~131.8 kPa (平均值 23.4 kPa)。

同为湛江组老黏性土, 一般黏性土的液性指数为 $-0.61\sim 2.71$ (平均值 0.49, 比薄层状黏性土小 34%), 孔隙比 0.311~2.000 (平均值 0.917, 比薄层状黏性土小 16%)。

2) 典型场地物理力学指标

根据中海油湛江某公司 80 万吨/年重交沥青升级技术改造项目岩土工程勘察资料[7], 薄层状黏性土的土工试验样本数共 124 个, 其中在软土层中的样本数 2 个, 在非软土层中 30 m 以浅样本数为 70 个、30 m 以深样本数 52 个。物理力学指标统计结果如下。

软土层主要物理力学指标值: 液性指数 1.232~1.248 (平均值 1.240), 孔隙比 1.010~1.045 (平均值 1.028), 含水率 37.0%~38.1% (平均值 37.6%), 压缩系数 0.56~0.68 MPa⁻¹ (平均值 0.62 MPa⁻¹), 压缩模量 3.00~3.62 MPa (平均值 3.31 MPa), 黏聚力 4.50~10.50 kPa (平均值 7.50 kPa), 内摩擦角 3.10°~3.30° (平均值 3.20°)。

非软土层 30m 以浅主要物理力学指标值: 液性指数 0.146~ 1.258 (平均值 0.709), 孔隙比 0.710~1.715 (平均值 1.265), 含水率 24.1~60.7% (平均值 44.7%), 压缩系数 0.13~ 1.15 MPa⁻¹ (平均值 0.51 MPa⁻¹), 压缩模量 2.00~18.85 MPa (平均值 5.66 MPa), 黏聚力 5.30~48.40 kPa (平均值 22.42 kPa), 内摩擦角 3.60°~28.00° (平均值 10.29°)。

非软土层 30 m 以深主要物理力学指标值: 液性指数-0.330~0.975 (平均值 0.528), 孔隙比 0.604~1.518 (平均值 1.227), 含水率 19.7%~53.7% (平均值 43.1%), 压缩系数 0.05~0.63 MPa⁻¹ (平均值 0.36 MPa⁻¹), 压缩模量 3.37~32.42 MPa (平均值 7.77 MPa), 黏聚力 15.30~224.20 kPa (平均值 35.82 kPa), 内摩擦角 5.30°~22.00° (平均值 12.57°)。

以现行建筑地基基础设计规范[5]为依据判断其状态如下: ① 软土部分, 液性指数平均值为 1.240, 状态为流塑; ② 非软土层 30 m 以浅部分, 液性指数平均值为 0.709, 状态为可塑, 临界软塑状态; ③ 非软土层 30 m 以深部分, 液性指数平均值为 0.528, 状态为可塑。根据野外勘察情况来看, 软土的实际状态应为软塑, 非软土层 30 m 以浅的可塑状态也未接近临界软塑状态, 显然, 室内测试的薄层状黏性土液性指数值偏大。

3) 液性指数和孔隙比偏大的原因

从野外编录来看, 薄层状黏性土近水平微薄层理厚仅 1~8 mm, 且层面夹粉细砂, 因而总体来看其含水空隙会比一般黏性土的要大。

从概念上看, 土的孔隙比(e)是土中孔隙体积(V_v)与土中固相骨架体积(V_s)的比值, 即 $e = V_v/V_s$, 显然, 薄层状黏性土的特殊层理特征使其孔隙比要比一般黏性土的大。

雷州半岛地区的薄层状黏性土均在地下水位以下, 其层理间的粉细砂含大量重力水, 因而总体上来讲其含水量(W)也会比一般黏性土的要大。而液性指数(I_L)的计算公式为: $I_L = (W - W_p)/(W_L - W_p)$, 该类土在未经扰动之前, 其液限(W_L)和塑限(W_p)与一般黏性土无大的差别, 因此在含水量偏大的情况下其液性指数也偏大, 但原状的薄层状黏性土的力学性质则与一般黏性土差别不大。

3.2. 标准贯入试验成果

根据中海油湛江某公司 80 万吨/年重交沥青升级技术改造项目岩土工程勘察资料[7], 薄层状黏性土的标贯试验样本数共 1096 个, 其中, 标贯试验呈软塑状(杆长校正后标贯击数小于 4 击)的样本数 79 个, 可塑~硬塑状的标贯样本数为 1017 个。统计结果如下。

软塑状薄层黏性土层标贯试验统计成果: 实测击数 3~6 击, 平均 4.6 击, 标准值 3.7 击, 变异系数 0.140, 样本数据稳定性好; 杆长校正击数 2.2~3.9 击, 平均 3.2 击, 标准值 2.6 击, 变异系数 0.124, 样本数据稳定性好。

可塑~硬塑状薄层黏性土层标贯试验统计结果: 实测击数 5~27 击, 平均 9.5 击, 标准值 9.0 击, 变异系数 0.251, 样本数据稳定性较好; 杆长校正击数 4.0~14.0 击, 平均 5.7 击, 标准值 5.4 击, 变异系数 0.200, 样本数据稳定性较好。

结合勘察资料可知, 薄层状黏性土基本以可塑状态为主, 软塑状的薄层状黏性土(软土)仅在该层局部

的顶部出现, 而硬塑状的薄层状黏性土也仅在该层局部的底部出现。

统计该目标贯试验实测击数与深度变化规律详见图 1, 标贯实测击数(y)与深度(x)呈线性关系, 即标贯实测击数随深度的增加而增大, 其回归方程为 $y = 0.2615x + 1.9529$ 。

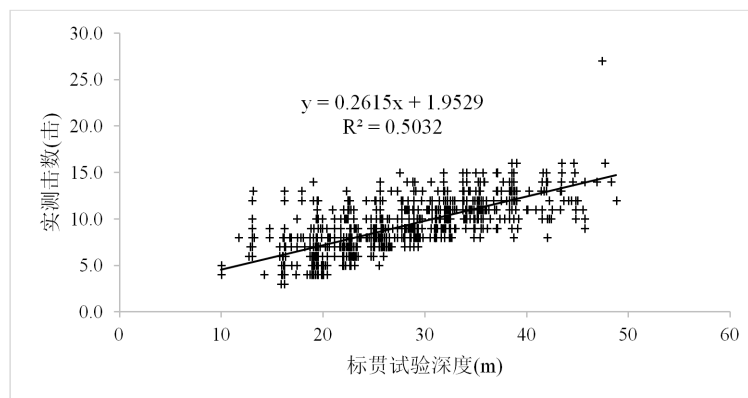


Figure 1. Variation trend of the number of hits (y) measured in standard penetration test with depth (x)

图 1. 标贯试验实测击数(y)随深度(x)变化趋势

经检验, 该回归方程的显著程度较高, 相关系数(R)为 0.709。但在软塑状地层或在可塑~硬塑状地层中, 经杆长校正的标贯击数与深度的相关程度不高, 即同一状态层的校正标贯击数受深度因素的影响不大。

3.3. 轻便触探试验成果

根据遂溪县镇村生活污水处理及配套管网工程项目为例[8], 基坑开挖后的薄层状黏性土直接暴露地表, 通过对 1.80 m 以浅表层进行轻型动力触探试验, 发现顶部 1 m 左右呈软塑状态, 力学性质较差, 探测击数 N_{10} 标准值为 5~7 击(详见表 1); 1.0~1.8 m 深度的力学性质较好, N_{10} 标准值为 14~17 击。

Table 1. Statistical Table of light dynamic penetration test results

表 1. 轻型动力触探试验成果统计表

| 统计值 | 试验深度(m) | | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | 0~0.3 | 0.3~0.6 | 0.6~0.9 | 0.9~1.2 | 1.2~1.5 | 1.5~1.8 | |
| 探测击数 N_{10} (击) | 最小值 | 4 | 7 | 9 | 12 | 17 | 20 |
| | 最大值 | 12 | 13 | 20 | 32 | 35 | 30 |
| | 平均值 | 8 | 11 | 16 | 25 | 26 | 26 |
| | 标准差 | 2.745 | 2.224 | 3.768 | 7.521 | 6.548 | 3.568 |
| | 变异系数 | 0.349 | 0.207 | 0.236 | 0.307 | 0.249 | 0.136 |
| | 标准值 | 5 | 5 | 7 | 14 | 18 | 17 |
| 承载力特征值的 经验值 f_k (kPa) | 最小值 | 54 | 58 | 66 | 82 | 116 | 140 |
| | 最大值 | 82 | 88 | 140 | 236 | 236 | 220 |
| | 平均值 | 65 | 76 | 110 | 177 | 178 | 190 |
| | 标准差 | 10.59 | 11.192 | 25.448 | 58.194 | 44.478 | 28.466 |
| | 变异系数 | 0.164 | 0.148 | 0.231 | 0.329 | 0.251 | 0.15 |
| | 标准值 | 56 | 61 | 88 | 150 | 157 | 166 |

在 3 m 深度内的标贯试验击数为 3~5 击, 呈软塑~可塑状态, 由此判定的力学性质要比轻探试验判定的结果稍好些。

在 3 m 深度内的液性指数为 0.970, 以此确定的状态为软塑, 已临界流塑状态, 由此判定的力学性质则要比轻探试验判定的结果要差。

4. 不同测试方法对承载力判定的差异性

4.1. 从区域数据看土工、标贯试验判定的承载力差异

以珠江三角洲及周边地区地面沉降地质灾害监测(雷州半岛地区)项目[6]为例。

1) 软塑状态薄层状黏性土

土工试验: 液性指数 0.94~1.17 (平均值 1.08), 孔隙比 0.993~1.393 (平均值 1.203), 按现行规范[5]查得其承载力特征值 < 100 kPa。

标贯试验: 标贯实测击数在 1~4 击之间, 平均值为 2 击, 查得其承载力特征值 < 100 kPa。

2) 可塑 - 硬塑状态薄层状黏性土

土工试验: 液性指数-0.24~3.26 (平均值 0.70), 孔隙比 0.176~1.740 (平均值 1.090), 查得其承载力特征值为 116 kPa。

标贯试验: 标贯实测击数在 3~26 击之间, 平均值为 10 击(经杆长校正后平均值为 5.3 击), 查得其承载力特征值 163 kPa。

综上所述: 对软塑薄层状黏性土, 通过土工试验成果和标贯试验成果判定的承载力特征值相差不大。对可塑~硬塑薄层状黏性土, 通过土工试验成果和标贯试验成果判定的承载力特征值相差较大, 由土工试验判定的结果落在了软土范畴, 很显然与实际情况不符。

4.2. 从场地实例看土工、标贯、轻探试验判定的承载力差异

以遂溪县镇村生活污水处理及配套管网工程项目[8]为例, 对 6 m 深度内薄层状黏性土进行承载力判定。

土工试验: 液性指数 0.43~1.00 (平均值 0.80), 孔隙比 1.205~1.274 (平均值 1.241), 查得其承载力特征值为<100 kPa。

标贯试验: 标贯击数在 3~7 击之间, 平均值为 4.7 击, 查得其承载力特征值 143 kPa。

轻探试验: 探测击数在 4~35 击之间, 平均值为 18.7 击, 查得其承载力特征值 130 kPa。

很显然, 由土工试验判定的结果偏差极大, 与实际情况不符。标贯试验和轻探试验判定的结果比较接近, 后者比前者略微偏小。

4.3. 承载力判定差异的原因分析

显然, 针对薄层状黏性土层, 以标准贯入试验、土工试验和轻型动力触探试验三种方法来判定的地基承载力有较大的差异。初步分析原因如下: 1) 薄层状黏性土微薄层理面夹有大量细砂和粉砂致使其孔隙体积偏大, 其微薄层理之间的空隙也是较好的含水微结构, 当它处在饱水带时含水量较高, 而其液限和塑限实验并无异常, 因而含水量越大其液性指数也就越大。2) 虽然薄层状黏性土的孔隙比和液性指数都较大, 但这并不代表其力学性质就一定弱, 因为其所含水分并非均匀地分布于土体之中, 有相当部分水分是集中在层面之间的空隙中, 它们在和黏土颗粒搅和之前, 是不会影响土体抵抗外力的能力的, 因此, 由土工试验测出的孔隙比、液性指数来判定该层土的承载力会偏低。3) 标贯试验是在土体未经扰动的状态下进行的原位测试, 按现行规范判定的承载力一般比较成熟可靠。4) 轻型动力触探主要用于基

坑底部 2 m 以内土层的测试, 由于基坑开挖对坑底表土极易造成扰动, 而薄层状黏性土对扰动非常敏感, 即坑底表土的承载力极易因扰动而降低, 因此, 在基坑底进行的轻型动力触探试验所反映的顶部 1 m 左右力学性质较差的情况应该与实际相符, 但可能与基坑开挖前工程地质勘察所提供的结果不一致。

5. 工程地质勘察及地基基础施工需注意的问题

1) 薄层状黏性土在浅部的软土部分由于厚度较小、分布范围不广, 勘察过程中采用的原位测试、取样测试等手段对该软弱层容易跳空, 在资料整理时往往会忽略该软弱层的存在。因此, 遇到薄层状黏性土时, 应严格按勘察规范要求进行相关试验, 上部要加密测试手段以控制分层, 并获取其相关参数。

2) 薄层状黏性土的工程性能虽然有别于一般的黏性土, 但其状态以可塑状居多, 可选作为多层建筑物的地基基础持力层。应注意其软弱部分的分布范围, 尽量避免基础落在软弱土顶部附近, 以防止地基基础产生过大沉降。

3) 对 30 m 以浅薄层状黏性土层, 应以标贯试验成果为主判定其承载力。

4) 对 30 m 以深薄层状黏性土层, 应结合标贯和土工试验成果综合判定其承载力。

5) 基坑开挖将薄层状黏性土直接暴露地表时, 该层容易被扰动致使其承载力大幅降低。因此, 基坑现场应对顶部 2 m 的薄层状黏性土层进行轻型动力触探试验, 并根据触探成果修正其承载力。

6) 桩基施工会对薄层状黏性土产生一定的扰动而使其承载力有所降低, 采用该层作桩端持力层时需通过试桩修正相关参数。

参考文献

- [1] 揭江, 罗树文, 陆巍峰, 等. 粤北岩溶石山地区和雷州半岛地区地下水资源勘查监测报告(雷州半岛地区) [R]. 广州: 广东省地质局, 2011.
- [2] 揭江. 浅析湛江组薄层状黏性土的物理力学性质[J]. 广东地质, 2000, 15(1): 52-56.
- [3] 揭江, 魏凤英, 王双, 等. 珠江三角洲地区地面沉降调查报告[R]. 湛江: 广东省地质局第四地质大队, 2015.
- [4] 蔡正银, 王芳, 高长胜, 等. GBT 50123-2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [5] 方小舟, 唐孟雄, 等. DBJ 15-31-2016 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [6] 杨群兴, 黎贵勇, 何超树, 等. 珠江三角洲及周边地区地面沉降地质灾害监测成果报告(雷州半岛地区) [R]. 湛江: 广东省地质局, 2014.
- [7] 刘煜, 魏凤英, 杨瑞生, 等. 中海石油湛江燃料油有限公司 80 万吨/年重交沥青升级技术改造项目岩土工程勘察报告[R]. 湛江: 湛江粤西地质工程勘察院, 2013.
- [8] 谭妃艳, 朱奋, 揭江, 等. 遂溪县镇村生活污水处理及配套管网工程项目某镇的岩土工程勘察[R]. 湛江: 湛江粤西地质工程勘察院, 2020.