

文章编号: 1006 - 544X (2006) 04 - 0506 - 05

桂林岩溶区岩土工程勘察中几个问题的探讨

刘之葵^{1, 2a}, 梁金城^{2b}, 朱寿增^{2a}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083; 2. 桂林工学院 a. 土木工程系, b. 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

摘 要: 在桂林岩溶区的岩土工程勘察中, 地基稳定性评价应注意考虑溶洞或土洞的规模尺寸、形态、洞内充填物、地下水等因素的影响; 石灰岩、粘性土、粉土的地基承载力应采用多种方法综合取值, 要敢于打破经验方法的束缚; 在地下水位变化较大的地方, 应按分层总和法进行地基土的变形计算; 岩溶地基处理, 应注重重新处理方法和新施工工艺的尝试和运用。

关键词: 岩土工程勘察; 地基稳定性; 地基承载力; 岩溶地基处理; 桂林

中图分类号: TU457; TU471

文献标志码: A

桂林是我国岩溶最发育的地区之一, 岩溶区的岩土工程勘察工作, 有其自身的特点和要求。勘察成果质量将直接影响到建筑物地基基础设计, 也关系到工程建设的可行性、安全性及工程造价等。因此, 提高岩土工程勘察质量具有重要的现实意义。下面就桂林岩溶区岩土工程勘察过程中的一些问题进行探讨。

1 地基稳定性分析评价

岩溶地区发育有大量对地基稳定性有着重要影响的溶洞、土洞等不良地质现象, 溶洞、土洞在人为或自然因素的诱发下, 易使地基产生塌陷失稳, 影响建筑物的安全稳定, 因此, 场地稳定性正确分析评价在岩溶地区显得尤为重要。

在桂林市的岩土工程勘察实践中, 对岩溶地基稳定性的评价主要有以下 3 种方法: (1) 对岩溶地基的影响因素作定性评价; (2) 依据《工程地质手册》^[1]或《岩土工程手册》^[2]中所推荐的经验公式, 进行相关验算的评价方法; (3) 依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007 - 2002)^[3]或《岩土工程勘察规范》(GB 50021 - 2001)^[4]中有关规定的評價方法。这些方法手段在工程实践中被广泛运用, 但在运用过程中, 应注意它们的适用性和使用条件, 若不能够了解或把握, 就不能很好地对岩溶地基稳定

性作出客观正确的评价。

文献 [1, 2] 中所推荐的经验公式主要是: (1) 根据溶洞顶板坍塌自行填塞洞体所需厚度进行计算; (2) 根据顶板裂隙分布情况, 分别对其进行抗弯、抗剪验算; (3) 根据极限平衡条件, 按顶板能抵抗受荷载剪切的厚度计算; (4) 根据普氏压力拱高度计算。它们都有具体的计算公式, 方便简单, 计算能得出明确的结果, 因此在人们的印象中, 可能会认为这些方法是定量评价方法。其实它们只是半定量评价方法, 其计算的结果有时与实际有较大的出入。首先它们都是一些经验性公式, 计算公式在推导过程中, 受力条件作了一些简化; 其次, 在这些公式中, 要求有溶洞 (土洞) 的尺寸大小、埋藏深度等计算参数, 但在工程实践中, 就目前的技术条件和水平, 要想很准确地获取这些参数数据, 有一定的难度, 一般还是依据工程地质剖面图 (或工程地质柱状图) 来推断溶洞 (土洞) 的尺寸、形状和位置, 而工程地质剖面图中溶洞 (土洞) 的形状、尺寸, 带有较大的人为主观推断因素, 这将影响岩溶稳定性计算评价的结果。尽管目前已有地质雷达 (CT) 进行地下岩溶探测的技术, 但受条件所限, 在桂林市的场地岩土工程勘察中还用得不多, 建议以后在岩土工程勘察中, 多加强这方面的工作, 尤其在重要工程、大型工程或岩溶强发育地段。

收稿日期: 2005 - 08 - 03

基金项目: 广西科学基金资助项目 (桂科计 [2002] 29); 广西教育厅科研项目 (桂教科研 [2004] 20)

作者简介: 刘之葵 (1968 -), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 岩土工程及地质灾害防治。

在《建筑地基基础设计规范》^[3]的第 6.5.2 条或《岩土工程勘察规范》^[4] (以下均简称《规范》) 的第 5.1.10 条第一款均规定: “在岩溶地区, 当基础底面以下的土层厚度大于 3 倍独立基础底宽, 或大于 6 倍条形基础底宽, 且在使用期间不具形成土洞条件时, 可不考虑岩溶对地基稳定性的影响。”此条规定简单明了, 使用方便。但实际上在文献 [3] 规定厚度以下的溶洞或土洞对地基稳定性还是有影响的, 仅考虑基础底面以下的土层厚度是不够的, 规范规定没有考虑以下几个因素的影响:

(1) 下伏溶洞或土洞的规模尺寸、形状。对于小规模跨度的溶洞或土洞, 对地基稳定的影响不大, 可以运用以上《规范》中的规定。若溶洞或土洞的跨度较大, 即使符合规定的土层厚度, 则也可能导致地基塌陷失稳, 因此还需要辅助其它的方法进行稳定性判别。此外, 溶洞或土洞的横断面形状对岩溶地基的稳定性也有影响, 因不规则形状的溶洞或土洞周边易产生应力集中, 一般来说, 圆形或近圆形的溶洞或土洞较不规则形状的溶洞或土洞更稳定。

(2) 地下水的存在及其水位。若存在地下水且地下水位在土洞所处位置的范围内上下波动, 则不利于土洞的稳定, 并有可能使规定厚度以下的土洞向上坍塌失稳, 进而影响上部地基的稳定。对于由砂、粉土等组成的岩溶地基, 如桂林漓江一级阶地, 很多地基即使符合《规范》中的厚度规定, 也常发生地基塌陷, 这主要是由于砂、粉土的内聚力较低, 若遇上久旱突降暴雨, 地下水位迅速上升, 则进一步降低了地基土的抗剪强度。

(3) 土洞内的充填物。对于土洞地基而言, 洞内是否有充填物, 对于地基稳定性有着重要的影响, 但对于溶洞地基的影响则相对较小。例如, 桂林岩溶地区红粘土地基中发育的土洞, 常常可以看到被软、流塑粘性土充填的情形, 此时, 可大大地增加土洞的稳定性。

2 几种主要地基持力层的地基承载力确定

地基承载力确定是岩土工程勘察的重要内容之一。桂林岩溶区的岩石地基主要为石灰岩, 土层地基主要为粘土、粉质粘土、粉土以及漓江阶

地形成的砂、砾石、卵石等。当地已有相对成熟的地基承载力确定方法, 但对于以下几种岩(土)层地基承载力的确定有待进一步探讨和完善。

2.1 石灰岩地基承载力

桂林岩溶发育区的基岩大多为泥盆系融县组灰岩, 岩石质纯层厚、致密坚硬, 其中以微风化状态的石灰岩居多, 许多建筑选此层作为桩端持力层。在桂林市的岩土工程勘察报告中, 对微风化状态石灰岩的地基承载力特征值, 目前大多建议为 4 000 kPa, 这也是多年来一直形成的经验习惯, 可能是缘于《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7 - 89) 中附录五的规定, 即微风化硬质岩石的承载力标准值 4 000 kPa, 而桂林泥盆系融县组石灰岩正好属于微风化硬质岩石, 那么就取其下限值 4 000 kPa。

对微风化状态石灰岩的地基承载力建议取为 4 000 kPa, 在多数情况下应该是偏保守的。桂林市已有的石灰岩饱和单轴抗压强度试验结果显示, 大多数微风化石灰岩饱和单轴抗压强度 f_{rk} 值为 30 ~ 80 MPa, 根据文献 [3] 中的第 5.2.6 条, 岩石地基承载力特征值 $f_a = \gamma \cdot f_{rk}$, 桂林微风化状态石灰岩的岩体一般较完整, 折减系数 γ 可取 0.2 ~ 0.5, 由此可知, 微风化灰岩的地基承载力应该在 6 000 kPa 以上。考虑到桂林不同场地石灰岩的差异性, 依据岩石饱和单轴抗压强度试验结果, 要求有足够的样品数量, 才能保证结果的可靠性。若条件许可的话, 建议进行岩石基载荷试验, 以获得相对可靠的结果, 但在石灰岩地基进行载荷试验, 目前在桂林基本上还是空白。

总体来说, 桂林石灰岩地基承载力应当从岩溶发育程度和完整岩体厚度结合岩石的抗压强度来确定。前面讨论的是桂林地区广泛存在的微风化状态石灰岩的地基承载力, 若对于强风化或中等风化状态石灰岩的地基承载力, 则仍可参照《建筑地基基础设计规范》(GBJ 7 - 89) 中附表 5 - 1 的规定, 即强风化石灰岩的地基承载力为 500 ~ 1 000 kPa, 中等风化石灰岩的地基承载力为 1 500 ~ 2 500 kPa; 当结合岩石饱和单轴抗压强度确定地基承载力特征值 f_a 时 (即 $f_a = \gamma \cdot f_{rk}$), γ 的取值范围较大, 根据岩石完整程度取值为 0.1 ~ 0.5, 可见 γ 对岩石地基承载力特征值 f_a 的影响很大。因此, 岩石的完整程度确定很重要, 过去有人仅仅根据野外钻探的岩芯完整情况来判断, 带有人为主观性和不可靠

性. 其实, 石灰岩的完整程度的准确确定, 应该先测定岩体弹性纵波速度 V_{pm} 和岩石弹性纵波速度 V_{pr} , 得到岩体的完整性指数 K_v 值 ($K_v = P_{pm}^2 / P_{pr}^2$), 然后按照《工程岩体分级标准》(GB 50218 - 94) 的第 3.4.4 条确定; 或根据岩体的体积节理数, 按照该规范第 3.4.3 条确定, 但其准确性要稍差. 因此, 在工程勘察中, 尤其是采用石灰岩作为桩基础的持力层时, 为准确确定石灰岩地基承载力特征值, 建议进行石灰岩的声波测试工作.

2.2 粘性土、粉土的地基承载力

桂林岩溶地基中, 广泛地分布粘土、粉质粘土以及漓江冲积阶地中的粉土, 对这些地基土承载力的确定, 一般有载荷试验、野外原位测试查表、室内土工试验结果查表、抗剪强度理论计算、当地经验等. 但在桂林地区, 这几种方法确定的地基承载力有时差别很大 (表 1), 尤其是根据抗剪强度理论计算的结果, 与野外原位测试查表、室内土工试验结果查表的相差较大. 对于粉土, 由于其内摩擦角较高, 依据规范理论计算得到的地基承载力很高, 但据野外标贯试验查表得到的地基承载力却较低, 两者相差较大, 此外, 漓江阶地中的粉、细砂也存在类似的情况. 为此, 有条件的地方, 建议多进行载荷试验, 并与多种方法进行综合对比, 以取得相对可靠的地基承载力值.

在桂林市的东部, 例如三里店一带, 常分布有含卵石粘土或含卵石粉质粘土, 该层土呈硬塑或坚硬状态, 其组成中一般含有 10% ~ 40% 的强风化或中风化卵石, 卵石成分多为砂岩、粉砂岩. 该层土的成因也一直存在争议, 有的认为是冲、洪积, 有的认为是第四纪冰积物, 也有干脆称为

“不明成因堆积物”. 至于它的成因, 对地基承载力确定的影响可能不是太大, 问题的关键是采用何种手段方法确定其地基承载力才是合理的, 因为它既不能按粘性土来确定, 也不能按卵石来确定. 由于土中含有大量的卵石, 采取土样进行室内土工试验以及现场标准贯入试验都很困难, 且试验结果的可靠性也不高, 尤其是室内剪切试验和压缩试验会受到很大影响, 又如进行标贯试验时若遇上粒径大一点的中风化卵石, 标贯锤击数就失真, 有时还会损坏贯入器靴; 若采用动力触探试验, 由于试验对象是含卵石粘性土, 不属于卵石, 有关的手册中只有用动探试验结果查卵石、碎石的承载力表, 而用其表来查含卵石粘性土地基承载力是否妥当, 值得商榷和探讨. 对于该层土的地基承载力和压缩模量确定, 目前大部分技术人员这样处理: 根据同样稠度状态的土的地基承载力和压缩模量, 考虑到含有卵石, 适当予以提高, 至于提高多少, 就只能凭个人经验, 并没有一个客观的标准. 对于该层地基承载力的确定, 目前还只能是依据动力触探试验或标准贯入试验, 并可在该层进行一些载荷试验或旁压试验, 进行综合对比, 以便将来能建立根据动力触探试验可查的桂林市含卵石粘性土地基承载力表.

另外有一点值得注意的是: 当按原位测试 (如标准贯入试验锤击数) 确定地基承载力时, 一般要求先对试验锤击数进行修正, 然后再根据修正结果查表. 由于桂林粘性土、砂土成因的多样化, 导致标贯试验结果有时较离散, 此时若仍按 $N = \mu - 1.645$ 修正结果查表求地基承载力, 会得出较实际偏低的结果, 因此, 在工程实践运用

表 1 不同方法确定的地基承载力对比

Table 1 Comparison of foundation bearing capacity determined by different methods

| | | kPa | | | |
|-----------------------|--------|--------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| 工程名称 | 土层 | 方法 1 | 方法 2 | | 方法 3 |
| | | 《地基规范》 (GBJ 7 - 89) 承载力设计 值 f_k | 按《高层建筑岩土工程勘察规范》 (JGJ 72 - 2004) | | 土工试验 查表 f_k |
| | | | 极限承载 力值 P_u | 承载力设计值 $f = P_u / k (K=2 \sim 3)$ | |
| 石油六公司住宅楼 | 硬塑粘土 | 373 | 843 | 422 ~ 281 | 177 |
| 橡胶机械厂大楼 | 硬塑粘土 | 286 | 581 | 291 ~ 194 | 174 |
| 工学院教学楼 | 硬塑粉质粘土 | 271 | 686 | 343 ~ 229 | 252 |
| 工学院教学楼 | 硬塑粘土 | 216 | 433 | 217 ~ 144 | 180 |
| 市区多个工程 ^[5] | 密实粉土 | 410 | 1438 | 719 ~ 479 | 271 |

注: 计算中假设采用条形基础, 基础宽度为 1.5 ~ 1.8 m, 埋深 1.0 ~ 1.5 m

时,需考虑分层的合理性、样本的数量、标准差等方面因素,使用时应慎重,并尽量增加标贯试验数量。

在新的国家标准《建筑地基基础设计规范》^[3]中,各种据以可查的岩(土)层地基承载力表被取消,新规范只提供地基承载力确定的基本方法和原则,这主要是考虑到全国各地地基岩(土)层的成因、成分、结构、形成年代存在差异,尤其是一些特殊性土,如果用同一种标准指标来查表确定其承载力欠妥当。目前,在桂林市的岩土工程勘察中,载荷试验、静力触探试验、旁压试验、原位十字板剪切试验等资料数据还很少,如条件许可的话,以后应多进行这方面的试验,并与现有常用的标准贯入试验、动力触探试验、室内土工试验结果进行对比和分析,以取得相对可靠的地基承载力值,提出适合桂林岩溶地基承载力的确定原则、方法手段、据以可查的地基承载力表,为下一步制定地方建筑地基基础设计规范提供科学依据。

3 地基变形验算

目前,大多数工程设计人员都是按照文献[3]中第 5.3.5 条进行地基变形计算,俗称规范法,此方法最大的一个缺陷是没有考虑地下水位变化对地基变形的影响。桂林属亚热带气候,降水量较丰富,并具有降水相对集中的特点,地下水位变化较大且受降水量影响。当地基土层中地下水位有较大的改变时,文献[3]中的 5.3.5 公式中所有的计算参数均无变化,据文献[3]第 5.3.6 条得出的地基变形计算深度 z_n 也无变化,计算得出的地基沉降也就没有变化,这显然不太合理。地下水位下降,将导致地基土体中的有效应力增加,地基沉降将增大,尤其是漓江阶地中分布的松散粉土、粉砂,由于地下水位升降引起地基产生的变形是不能忽略的。此时,可按分层总和法进行地基土的变形计算^[6],这样,当地下水位发生改变时,地基土体中的附加应力和自重应力、地基土的沉降量 s 也随之改变,这样可能更符合实际。

在按分层总和法进行地基土变形计算的同时,建议也按照规范法进行地基变形计算,最终建筑物的变形验算结果,建议取两者的大值。

还有一点易忽略的是,一般情况下,岩土工程勘察报告提供的压缩模量 E_s 值是在压应力为 100 ~ 200 kPa 范围内的计算值。以 100 ~ 200 kPa 压力范围内的 E_s 值来计算地基变形沉降,对中层建筑较合理,但对于高层建筑以及桩基下地基,其压力范围可能超过 100 ~ 200 kPa,因此应该用其实际压力,即取该层地基土在自重压力至自重压力加附加压力作用时的压缩模量 E_s 值,可根据室内土工压缩试验结果 $e-p$ 曲线计算得到。

4 岩溶地基处理

岩溶区存在的溶洞、土洞或岩溶塌陷将严重影响建筑地基的稳定性,降低地基的承载能力或加大地基的沉降变形。对存在的溶洞、土洞或岩溶塌陷进行地基处理,可避免其对建筑地基所造成的不利影响。目前桂林岩溶地基处理主要采用以下措施。

挖填:对于埋藏不深的溶洞或土洞,采取直接开挖,清除洞内软土后,换上好的土或砂、石。

灌填(浆):对于埋藏较深、洞径大的土洞,在洞体范围的顶部地基基坑面上钻孔,可采用多个钻孔(至少 2 个以上),将砂或砾石灌入洞内,然后灌入水泥浆,或直接灌入混凝土。

梁板跨越或调整柱距:对埋置较深和直径较小的溶洞、土洞或塌陷,且洞体(塌陷体)周边土体的承载力和稳定性较好时,可在洞顶(塌陷体)上部用梁板跨越,或者调整结构的柱距,对洞体本身不再处理。

从已有调查的桂林市建筑物开裂原因来看,绝大部分是由于地表水及地下水的缘故,地表水下渗或地下水的升降对土体发生潜蚀作用而形成土洞、塌陷,引起地基变形。例如,某学院教四楼联合教室的基础突然下塌,使基础与上部墙体脱离达 5 cm,其原因是隔壁的厕所与化粪池长期漏水使地基红粘土湿化、软化直至流失所致^[7]。因此,在岩溶地基处理中,应做好地表水疏流、防渗等工作,而这方面工作往往易被忽略。

桂林岩溶地基处理,已经积累了很多的成功经验,但在以下方面还可以进一步探讨和完善:

(1) 改变有些设计人员只重视处理后的质量检验,而忽视设计施工前试验工作的情形。

(2) 地基处理的措施相对单一,有些地基处

理方法在桂林还用得很少. 例如可尝试采用 CFG 科学依据.

桩处理塌陷地基, 积累用高压旋喷处理溶洞地基的经验.

(3) 施工工艺方面, 例如在溶洞灌浆中如何有效地避免漏浆, 特别是在某些串珠状岩溶溶洞地段堵漏问题, 应积极探讨有效可行的方法. 目前国内已有采用袋装粘土及水泥填堵溶洞及防渗堵漏的成功经验.

(4) 岩溶地基处理效果检验方面, 手段还相对单一. 例如检验灌浆处理岩溶塌陷地基, 目前大多采用轻便触探或动力触探, 严格来说, 触探只能检验处理后地基的相对均匀程度, 并不能确定灌浆地基的承载力.

5 结束语

(1) 桂林岩溶区场地稳定性分析和评价, 应注意各种评价方法的适用性和使用条件, 尽量采用多种方法手段加以评价.

(2) 对于桂林岩溶区的石灰岩、粘性土、粉土的地基承载力确定, 应采用多种方法综合取值, 要敢于打破地基承载力经验方法的束缚, 建议多进行载荷试验, 并综合对比以积累经验, 为下一步制定广西 (桂林) 建筑地基基础设计规范提供

(3) 考虑到桂林降水相对集中的特点, 地下水位有时变化较大, 建议在地下水位变化较大的地方, 除按规范方法进行地基的变形验算外, 还应按分层总和法进行地基土的变形验算.

(4) 在地基处理实践中, 应注意在地基处理措施、施工工艺、处理效果检验等方面积累经验, 提高地基处理质量.

参考文献:

- [1] 工程地质手册编写委员会, 工程地质手册 (第三版) [K]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [2] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册 [K]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [3] GB 50007 - 2002, 建筑地基基础设计规范 [S].
- [4] GB 50021 - 2001, 岩土工程勘察规范 [S].
- [5] 方宗正. 桂林漓江阶地含粘性土粉砂的承载力 [J]. 桂林工学院学报, 1997, 17 (3): 257 - 260.
- [6] 华南理工大学, 东南大学, 浙江大学, 等. 地基及基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 78 - 81.
- [7] 李忠铭. 强岩溶发育区某些岩土工程问题——桂林市岩土工程的部分总结 (三) [J]. 桂林工学院学报, 2003, 23 (4): 426 - 434.

Investigations of geotechnical engineering in Guilin karst region

LU Zhi-kui^{1, 2a}, LANG Jin-cheng^{2b}, ZHU Shou-zeng^{2a}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. a. Department of Civil Engineering, b. Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In the investigation of geotechnical engineering in Guilin karst region, the influence factors of scale, dimension, shape, filling, groundwater of cave and soil cave should be taken into account in the appraisal of ground stability. There are various methods for the determination of bearing capacity for limestone, cohesive soil and silty soil. When the groundwater level changes much, the "layerwise summation method" can be used in the calculation of foundation settlement. In the process of karst ground treatment, new treatment methods and techniques can be applied.

Key words: investigation of geotechnical engineering; ground stability; bearing capacity of foundation; karst ground treatment; Guilin