

第1章 绪论

1.1 问题的提出

岩溶又称为喀斯特,是水对可溶性岩石(碳酸盐类岩、硫酸盐类岩、卤素岩等)进行以化学腐蚀作用为特征,并包括水的机械侵蚀和崩塌作用,物质的携出、转移和再沉积的综合地质作用,以及由这种作用产生的现象的统称^[1]。

岩溶作为一种特殊地质现象,其发育特征具有很强的区域性,广州地区岩溶是在广花盆地有利地质构造背景、地层条件和气象水文地质条件下形成的,属隐伏型岩溶。众所周知,广州轨道交通各线均不同程度地穿越岩溶地质区,其中广州轨道交通2、8号线北延段、3号线机场段、5号线、6号线和广佛轻轨均大规模地穿过石灰岩分布区域,沿线地下水丰富,岩溶洞穴十分发育。许多溶洞分布在轨道交通隧道底部,有的以单个溶洞的方式存在,有的呈串珠型,充填、半充填和无充填情况均有,基岩面落差很大,岩溶规模之大在国内外城市轨道交通建设中极为罕见^[2]。

岩溶地质灾害对轨道交通隧道工程的影响广泛存在,主要有以下几个方面^[3-6]:

①溶洞的存在使地基承载力减小,增加了围岩的不稳定因素,降低了结构的安全可靠度,溶洞顶板坍塌会造成盾构的沉陷,带来严重后果。

②隧道顶部溶隙与地面漏斗、地表水系相连通,贯通坍塌可上延至地面,使地表产生较大沉降。

③隧洞切穿岩溶有压管流通道或暗河出现突水,涌水将洞内堆积物携出造成突泥、淹井等安全事故,造成人员伤亡。

④地下洞体的存在使隧洞部分悬空,隧道底部溶洞充填物厚度大且松软,暗河水流给隧道基底处理造成困难。

⑤洞穴堆积物松软易坍塌下沉,使洞穴周边地层产生应力重分布,应力变化对隧道结构受力不利。

⑥富含可溶性物质的岩溶水在隧道周边流动,可侵蚀隧道及支护结构,影响隧道的使用寿命。

在溶洞大量存在的岩溶地区修建轨道交通隧道,其地基稳定性及隧道工程在施工和运营过程中的安全问题,是岩土工程师们非常关注且迫切需要解决的一项课题。本书依托广州轨道交通建设,结合广州区域地质环境和广州轨道交通沿线岩溶发育的特征,考虑轨道交通建设施工过程,分析溶洞对地基稳定性及承载力的影响,研究轨道交通岩溶地基加固范围和处理新工艺,探索新型环保可持续的加固新材料,达到良好的技术经济效果,对丰富和发展我国轨道交通的设计与施工方法,具有重要的指导意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩溶隧道工程地质研究现状

19世纪末,南斯拉夫学者 J. 斯维奇 (Cvijic) 研究了喀斯特高原的奇特地貌,并把这种地貌叫作喀斯特 (Karst) 地貌。1893 年,他在《喀斯特现象》中阐述的喀斯特侵蚀-溶蚀作用形成机制被绝大多数学者采纳^[7]。

1933 年,苏联的舍维亚科夫院士发起召开了第一届全苏喀斯特会议,标志着岩溶问题第一次受到学术界的重视,拉开了研究岩溶问题的序幕。1958 年,苏联科学院成立了喀斯特地质和地理研究所,该机构继续研究了岩溶发育的条件和规律,开创了勘探研究岩溶的地球物理方法,特别是电法勘探得到很大发展^[8]。

1971 年,英国的 D. C. Ford 在研究了欧洲和北美的 500 多个溶洞后,提出溶洞发育主要分成三种情况:充气带溶洞、深饱水带溶洞的水面型溶洞和承压水溶洞。他认为不同类型溶洞的形成与岩层倾角有关^[9]。

1972 年史密斯 (D. I. Smith) 等提出了外成喀斯特地貌演化数学模型,利用数学方法建立了喀斯特地貌发育与动力、形态因素的模型^[10]。

1973 年在德国首次举行了主题为“与可溶岩有关的工程地质问题”的国际讨论会,之后有关岩溶灾害的研究迅速发展起来^[11]。

1988 年怀特 (W. B. White) 在史密斯的喀斯特地貌演化动力模型的基础上,又提出喀斯特地形发育速率过程模型^[12]。

在我国,1961 年中国科学院就召开了新中国成立以来的全国研究大会,总结了以往的研究工作,初步指出了今后研究的方向;1966 年,召开的全国岩溶学术会议决定把喀斯特改称“岩溶”,确定了岩溶学的基本问题和研究方向^[13]。20 世

纪五六十年代,我国铁路系统对岩溶展开了较为系统的研究。结合我国西南部广复线、枝柳线、贵昆线、湘黔线等实际工程建设,积累了大量经验。而近年来,各种研究也随着我国基础设施的建设而展开^[14-15]。

王建秀等^[16]对岩溶的突水模式进行了研究,把岩溶突水分为渗漏水型、施工穿越阻水型、施工揭露充水岩溶管道网络型、水力劈裂型和底膨破坏型,并进行了大型地下工程岩溶涌(突)水防治研究程式分析。

叶英^[17]将掌子面超前地质预报方法按距离以100 m为界分为长距离与短距离预报,长距离预报方法包括TSP地震预报法、TRT反射地震层析成像方法、VSP负视速度法、水平超前钻探,短程预报则包括GPR地质雷达法、BEAM法、HSP水平声波剖面法等。

刘瑞琪^[18]结合大连轨道交通一期工程,对溶洞位置超前探测的多种方法进行了论述,指出应看到各种预报手段的局限性,确保地质预报资料的准确,从而制订具体有效的处治措施。

总之,经过长期的理论研究和实际工程经验,关于岩溶地质的发育机制、溶洞的成因的讨论尚未完全解决。但是,岩溶地质的发展是由空间、时间、动力作用(包括溶蚀、侵蚀、重力作用等)等不同因素迭加的结果,这一结论已经被大多数学者所接受。

至于岩溶地区的溶洞超前探测,在科学技术不断发展的条件下,在隧道轨道交通工程中的应用越来越普遍,探测方法也越来越多。但目前的探测技术仍然存在着许多问题,每一种方法都有它的局限性,各种方法由于具有不同的特点、影响因素、判据解释,因此在具体应用时应注意选取,有时需要采用多种方式相结合,以保证预报的准确性。

1.2.2 岩溶地基稳定性分析研究现状

目前,在理论公式计算方面对岩溶地基稳定性的评价可以分为两个方面:一是从顶板的安全厚度来评价其稳定性,其主要根据《工程地质手册》^[19]或《岩土工程手册》^[20]中的经验公式计算,若工程实际中顶板的厚度大于这个安全厚度,则认为顶板是稳定的;二是从地基极限承载力的角度出发评价其稳定性,其主要依据传统的求解地基承载力的计算方法,当岩溶地基上的荷载小于极限承载力时,则认为地基是稳定的。

以《工程地质手册》和《岩土工程手册》中所推荐的计算方法为代表的经验法推荐的验算顶板安全厚度的经验公式主要有:

①坍塌堵塞法:适用于顶板为中厚层、薄层、裂隙发育、易风化的软弱岩层。该方法认为顶板坍塌至一定高度时,溶洞空间自行填满,此时对地基的影响不再

考虑,塌落高度即可作为顶板安全厚度,这种方法要用到岩石的松散系数(松散系数只能根据经验取值),且没有考虑外部荷载的作用,因此此评价方法过于简化。

②梁板简化算法:适用于顶板岩层比较完整、强度较高、层理厚且顶板厚度和裂隙分布已知情况。当顶板跨中存在裂缝但支座处坚固完整时,可假定为悬臂梁计算;当顶板较完整但支座处存在裂隙时,可假定为简支梁计算;当顶板和支座处均较完整时,可假定为两端固定梁计算。该方法的缺点在于没有考虑岩土体的塑性发展阶段,但是在弹性力学范围内,该方法提出了顶板的简化模式,并且考虑其抗剪及抗拉应力的强度准则,如果所取的计算模型较为符合实际情况,其结果是具有一定的参考价值的,有关学者对这种方法也做了更进一步的研究。

③普氏压力拱分析法:适用于顶板风化破碎的岩层,这种方法认为在洞体的围岩中可以形成自然平衡拱(破裂拱、压力拱),溶洞顶板的安全厚度是由破裂拱高加上部荷载作用所需的厚度得到的,并考虑一定的安全系数^[21]。由于破裂拱高是采用溶洞大小和岩石内摩擦角的参数由经验公式计算得到,所考虑的岩石力学参数有限,导致某些地质情况下计算误差较大。

除了以上手册中参考的顶板安全厚度的计算方法外,传统的被广泛应用的方法还有顶板厚跨比法、安全距离估算法、太沙基理论分析法、荷载传递线交汇法、散体理论中的经验公式法、坍塌平衡法等^[22-23]。

从岩溶地基极限承载力的角度来评价其稳定性,可以借鉴无溶洞的地基极限承载力计算方法,主要有极限平衡法、滑移线法和极限分析法。由于这些计算方法的理论基础复杂,计算过程繁琐,加之有限元等数值计算手段的兴起,因此在岩溶地基承载力的求解中发展较少,在无溶洞地基极限承载力的研究中较为完善。

①极限平衡法:假设地基的破坏模式由刚性体或刚塑性体组成,将其离散为多个隔离体,并假设在隔离体的边界上达到塑性极限平衡状态,根据静力平衡原理求导地基极限承载力。早在1920年普朗特(Prandtl)首先导出了不考虑土体自重,且基底面光滑无摩擦时,条形基础下地基极限承载力的表达式^[24]。在普朗特公式的基础上,不少学者进一步做了不同形式的修正,以便在工程实践中加以利用。雷斯诺(Reissner)推导出了埋置深度为 D 的条形基础的极限承载力公式^[24];太沙基(Terzaghi)^[25]推导出了考虑地基土自重影响的极限承载力公式,用三个土的承载力系数表示出来;梅耶霍夫(Meyerhof)^[26-28]将基础底面以上土体抗剪强度的影响考虑在内,推导出了深基础以及考虑偏心荷载和倾斜荷载作用下的地基承载力公式;维西克(Vesic)^[29]提出了地基土破坏模式的刚度指标,将整体剪切破坏形态下的极限承载力公式也用在局部或冲剪破坏时承载力的计算中。

②滑移线法:将塑性区内各点最大剪应力方向作为切线连接起来,在岩土受力体中构造滑移线网,利用滑移线的性质和边界条件可得出塑性区的应力、位移与速度场的分布,在基础范围内的边界应力即为极限承载力^[30]。由于滑移线法没有考虑相容速度场条件,忽略了土的应力-应变关系,考虑的也只是基础附近的部分土体的应力场,因此得到的解答不一定是正确解,也不能确定是上限解还是下限解,且构造滑移线网求解平衡微分方程较为复杂,限制了其在工程中的应用。

③极限分析法:在20世纪50年代由Drucker和Prager^[31-32]运用到土力学中,现在已广泛应用到地基和土工的各种稳定问题中。极限分析法包括上限解和下限解。上限理论是先构造地基运动许可速度场,即可能的破坏机构,若外荷载在可能的破坏机构上所做的功率大于零,且与破坏机构的内部耗散功率相等,则这个外荷载是真实极限荷载的上限解;下限理论是先构造静力许可应力场,它应满足土体内应力平衡条件和边界条件,同时又要使地基中任何一点的应力不得超过土的屈服条件,与此许可应力场相平衡的外荷载是真实极限荷载的下限解。

1975年,W. F. Chen^[33]在《极限分析与土体塑性》中系统阐述了极限分析理论在土工问题中的运用,认为极限分析法不必对约束塑流(弹塑性)全过程进行完整分析,为直接计算破坏荷载提供了一个有效方法,并详述了求解各种土工问题包括各种形状基础下地基承载力的方法。

20世纪80年代,S. W. Sloan^[34-35]采用有限元法解决基于线性规划的极限分析上限解和下限解,并得到了满意的计算程序,为其在岩土工程领域的应用奠定了理论基础。利用极限分析数值解法,Shiau等^[36]研究了条形荷载下黏土上方为砂土的地基极限承载力,Hjiaj等^[37]研究了考虑荷载偏心距和倾斜条件下条形基础的地基极限承载力,Merifielda等^[38]分析了Hoek Brown屈服准则下的浅基础岩石地基极限承载力。

上述方法,在求解建筑结构的地基承载力、边坡稳定方面得到了大量的研究和应用,但在轨道交通、隧道工程方面的研究较少。近年来,极限分析法在岩溶地基极限承载力的研究方面也逐渐发展起来。M. C. Wang^[39]等针对条形基础正下方存在圆形空洞的问题,构造了三组破坏机构,利用极限分析上限法求解出三组极限荷载的表达式,并通过图表比较了不同深度下的地基承载力,发现空洞埋深越大,极限承载力越高。刘辉等^[40]也研究了同样的问题,不同的是他提出了一个更为复杂的满足运动许可条件的破坏模式,来计算不同区域的耗散功率和外力功率,并利用数学优化方法对地基承载力目标函数进行优化求解得到上限解,分析了不同顶板厚度、不同空洞直径下的地基承载力变化趋势和随顶板厚度的加大其破坏模式的演变。由此可以看出极限分析方法在求解岩溶区地基承载力问题的可能性。

近年来,许多在理论公式计算方面比较新颖的方法被引入到岩溶地基稳定性的研究当中,使得研究方法更加完善:

王建秀等^[41]在分析岩溶塌陷机制的基础上,提出了“盖层土体-薄顶板无充填溶洞力学系统”,重点分析了盖层土体和薄顶板之间的应力传递过程,并考虑了气、水的物质质量传输产生的水压力的作用,引入强度判据分析顶板坍塌稳定性。

程晔等^[42]综合运用系统理论中的多级模糊评判理论、系统层次分析方法(AHP)和灰色关联分析方法,对溶洞特征影响因素和顶板岩层影响因素进行权值分配,根据最大隶属度原则,对溶洞顶板稳定性进行评价,为实际工程决策提供了可靠的结论。

刘之葵等^[43]将桩基下存在溶洞的稳定性问题简化为弹性体中存在一个圆形空洞,并利用弹性力学中齐尔西解答对围岩的应力分布进行了求解,建立在格里菲斯破坏准则的基础上分析围岩稳定性,得出了基础底面尺寸、溶洞顶板厚度、跨度对地基的稳定性影响很大这一结论。

赵明华等^[44]将顶板看作受力梁,将桩端阻力简化为作用在梁上的均布荷载,根据顶板破坏的不连续、不均匀、不规则的特性,引进尖点突变理论,建立势函数和分叉集方程,由此确定出极限承载力和顶板安全厚度。

刘铁雄^[45]结合溶洞顶板承受圆形桩基荷载的实际边界条件,对顶板施加不同的约束控制,提出了不同形状下的梁板力学模型,并运用弹性力学和材料力学的基本公式,结合相应的强度理论,得出了相应的应力、应变的表达式,进一步丰富了梁板理论在顶板稳定性评价中的应用。

宋战平等^[46]首先分析了隧道和溶洞之间岩层的坍塌机理,提出了悬臂岩梁模型、悬臂岩板模型和四边固支弹性板模型,采用弹性理论对不同模型的受力状态进行了研究,最终计算得到隧道底板的最小安全厚度,他在考虑荷载情况时,主要简化为集中力或均布力,这与隧道内实际存在的荷载不符。

综上所述,从顶板安全厚度的角度评价岩溶地基稳定性,所采用的经验公式等方法是将顶板简化为梁、板、拱等结构模型,其理论基础是结构力学和弹性力学的相关内容;而从岩溶地基极限承载力的角度评价其稳定性,可以采用传统的地基承载力计算方法,其理论基础是岩土塑性力学的相关内容。从理论基础来看,后者是建立在岩土弹塑性变形和破坏准则的基础上的,更加符合岩土体的受力特点,本书将采用极限分析上限有限元理论,对隐伏型岩溶隧道地基极限承载力展开研究,故在下一节对极限分析上限法研究进展及在隧道稳定性分析中的应用现状进行专门综述。

1.2.3 极限分析上限法在隧道稳定性分析中的应用现状

(1) 极限分析上限法的研究进展

塑性极限分析方法首创于20世纪20年代。1936年苏联学者格涅兹捷夫提出了杆系结构和混凝土结构极限承载能力时的上、下限准则,首次完整地描述了结构极限分析理论^[47];到了50年代,Drucker, Prager, Greenberg等^[48]把静力场和速度场结合起来提出了极值理论,建立了完整的塑性极限分析理论,并对理想弹塑性模型的平面和空间问题的上、下限定理进行了研究,而Hill^[49]则用理想刚塑性模型对最大塑性功原理和最小塑性功原理进行了论证。这样,塑性极限分析可直接采用理想刚塑性模型使问题进一步得到简化。

1970年,Lysmer^[50]首次将有限元法引入极限分析中,运用线性规划的数值方法求解了土力学问题。1975年,Chen^[33]在其书中进一步阐述了极限分析的理论。此后,Bottero^[51]等在利用有限元进行塑性极限分析方面也做了大量工作。

Sloan等学者^[52-60]将土力学中的极限分析与有限元法相结合。Sloan等^[53-54]所提出的基于线性规划的塑性极限分析上、下限方法理论体系,大大推动了塑性极限分析方法在岩土工程领域的应用。不过,此时建立的极限分析有限元模型均在最后转化为数学上的线性规划模型。对于岩土中常用的摩尔-库仑屈服准则,需要引入大量的临时变量和约束条件进行线性化处理。此后,Sloan^[60]采用了屈服准则不再线性化的非线性规划模型的塑性极限分析。

极限分析上限有限元常采用三节点三角形单元,该单元塑性应变率在单元内部为常量,对于土体内摩擦角较大的情形,破坏往往发生在剪切带,低阶单元模拟精度很低。Yu和Sloan^[61]提出将高阶的六节点三角形单元应用于上限有限元,通过分析不排水条件下地基极限承载力问题,说明该单元能很好地适应塑性应变较大的情况,使得不刻意设置结构化的网格也能达到较好的上限解精度。后来,Makrodimopoulos和Martin^[62]将高阶的六节点三角形单元应用于上限有限元,通过多个经典算例分析论证了上限解精度方面的优势。之后,他们利用摩尔-库仑屈服准则的特点,将上限有限元转化为易于求解的二阶锥规划模型^[63]。

国内的许多学者也对塑性极限分析法开展了研究。杨小礼等^[64-65]对塑性极限分析上限法在土木工程问题中的应用做了探讨。王均星等^[66-70]借助有限单元法和线性规划,建立了边坡稳定的数学规划模型,可以求出安全系数的上、下限解。李泽等^[71-72]考虑了孔隙水压力,并结合塑性极限分析下限法理论、有限元离散技术以及非线性数学规划手段对岩质边坡进行稳定性分析。Chen等^[73]采用刚体元离散土体,提出了考虑孔隙水压力条件下的刚体有限元上限分析法。杨洪杰等^[74]将下限分析运用于岩土工程问题中,分别考虑了摩尔-库仑屈服准则的

内切圆、等面积圆和外切 Drucker-Prager 屈服准则(D-P 屈服准则)条件下三维地基承载力和边坡极限荷载的课题,并且采用非线性规划中的序列二次规划算法求解问题。杨峰等^[75]研究了基于线性规划模型的极限分析上限有限元的实现方法和编程流程,同时对六节点单元和屈服准则线性化引入的辅助参数取值对上限解的影响作了对比分析^[76]。

有限元法被引入塑性极限分析领域,解决了复杂条件下构造静力许可场和运动许可速度场的困难。数学优化模型也能从成千上万的约束方程和决策变量中寻求问题的最优解。同时随着计算机硬件水平的不断提升,为解决复杂条件下大规模的塑性极限分析提供了技术条件。

(2) 隧道稳定性的极限分析上限法应用研究

极限分析上限法是进行岩土工程稳定性分析的有效手段,尤其在边坡稳定性课题的研究中最为多见,不过对于隧道稳定性方面的研究近年来才逐渐增多,现有文献报道简述如下:

Atkinson 等^[77]采用极限分析上限法对无黏性土地层圆形隧道发生失稳的临界状态的支护反力进行了研究,其假定隧道拱部破坏模式仅为一个简单的楔形体。

Leca 等^[78]构造了砂土地层隧道掌子面的三维破坏模式,利用极限分析上限法考虑地表均布荷载和土体自重对于稳定性的影响,获得了计算图表。Soubra 等^[79-80]通过将掌子面前方的两个锥形体之间的过渡圆滑,对 Leca 等^[78]提出的破坏模式进行了改进并得到较优的上限解。

Subrin 等^[81-82]采用极限分析上限法研究浅埋隧道掌子面三维稳定性问题,并提出一种形状类似于牛角的掌子面三维破坏模式。

Davis 等^[83]利用四种浅埋隧道破坏模式,采用上限法对黏土地层不排水条件下浅埋隧道的稳定性问题进行了研究。

杨峰等^[84]构建出两种浅埋矩形隧道破坏模式,利用上限法计算围岩压力;随后,又构造出浅埋隧道工作面网状的刚性滑块体系破坏模式,利用上限法求解工作面支护反力^[85]。黄茂松等^[86]采用多滑块上限法对非均质黏土地基隧道环向开挖面稳定性进行分析。

上述隧道围岩稳定性分析采用的极限分析上限法预先构造运动许可的速度场(破坏模式),可称为刚性块体上限法。当模型边界和地层条件复杂多变时,构造破坏模式变得相当困难。此时,采用与有限元手段相结合的极限分析上限法(即上限有限元法)成为首选方法。目前利用上限有限元法在隧道稳定性方面的研究报道如下:

Sloan 等^[87]利用极限分析上、下限有限元法,研究了地层不排水且抗剪强度随埋深线性增加条件下浅埋矩形隧道的稳定性问题。

姜功良^[88]应用极限分析理论的上限原理及有限元法求解隧道的稳定系数。

Augarde 等^[89]利用极限分析上、下限有限元法,获得了二维平面应变条件下浅埋隧道掌子面稳定性系数图表。

Wilson 等^[90]利用极限分析上下限有限元法研究了不排水条件下双平行方形隧道的稳定性。

Yamamoto 等^[91]利用极限分析上、下限有限元法研究了地表超载作用下圆形隧道地层稳定性问题,列出了稳定性计算图表。之后,他们又针对地表超载作用下的平行隧道地层稳定性进行计算分析,讨论了隧道间距对地层稳定性的影响^[92]。

综上所述:极限分析上限有限元用于隧道围岩稳定性分析是非常适用的。因为它避开了岩土材料应力应变关系,同时稳定性问题转换为数学规划模型,可直接获取塑性流动发生时的临界状态信息。

对于含溶洞的隧道地基承载力问题,受限于模型的几何边界条件,极限分析上限有限元法无疑是有效的研究手段。不过该法的数值计算实现过程较复杂,目前也没有成熟的软件可用。

1.2.4 岩溶隧道数值分析研究现状

各种数值模拟的方法主要包括有限差分法、边界元法(BEM)、离散元法(DEM)和有限元法(FEM),其中有限元法在实际中的应用最为广泛。现在常用的有限元软件有多种,比如 ABAQUS、FLAC、MIDAS 等。有限元是将研究对象离散化为较小的单元,然后选择位移模式,分析单元的受力情况,从而计算节点等效荷载,最终化零为整得出整个研究对象的分析结果。目前,国内外许多学者大都结合工程实际,采用数值计算手段对岩溶地基稳定性进行专门的研究,得到了一些有益的结论:

邹成杰等^[93-94]以鲁布革水电站为依托工程,分析了不同洞径的圆形隐伏溶洞对隧道位移的影响。分析认为,近水平向溶洞对隧道周边位移的影响最为不利。

史世雍等^[95]运用 ANSYS 软件分析了不同尺度顶部溶洞对夏家庙隧道围岩位移和应力的影响;模拟了岩溶区隧道实际开挖过程,分析了施工过程中隧道顶底板最大、最小主应力的变化规律,并对比了隧道顶部不同溶洞尺寸和不同溶洞距离对顶底板应力的影响,不同剖面处所产生的影响程度是不同的,顶板稳定性也不相同,最后将数值计算得到的拱顶位移与实测数据进行了对比,两者的规律比较吻合。

李宁等^[96]针对穿越岩溶区的不同洞跨比的城门洞型隧道围岩应力和位移进

行了系统的研究,并与武都水库导流洞原位测试进行对比,两者支护结构的应力、应变趋势较为吻合。

赵公明^[97]利用 FLAC-3D 软件,结合广州轨道交通九号线项目,针对溶洞不同尺寸、在不同位置、洞内不同填充物性质、不同地下水位,研究了溶洞对轨道交通隧道开挖力学性质的影响。

赵明介等^[98-99]运用二维弹塑性有限元分析研究了隧道底部、上部、侧部不同大小、不同距离的溶洞分布对隧道围岩周边变形的影响,得出了溶洞的位置、大小和距离对围岩稳定性的影响规律。

彭川^[100]针对跨越溶洞区并采用双排桩、承台、支撑墙组合结构支护方案的隧道利用 ANSYS 软件进行了数值分析,对白须公隧道进口处治结构进行了评价,指出初期支护拱角与支撑墙连接部分压应力较大。

王华牢等^[101]在现场实地调查和室内岩石力学试验的基础上,通过 Hoek Brown 的 GSI 方法获得岩石力学参数,并根据隧道工程的地质条件、溶洞分布和支护结构等情况建立三维有限元模型,并选取影响溶洞顶板稳定的五个因素(顶板厚度、弹性模量、溶洞宽度、高度、覆盖土层厚度)进行正交试验分析,采用正交极差分析原理,得到了各因素对顶板中心下沉位移、拉应力和压应力的影响程度的排序。

Yang 等^[102-104]针对岩溶区溶洞上覆残积土地层的稳定性问题,提出了两种失稳模式,一种是考察溶洞发展过程中拱形的形成及其应力变化;一种是考察地表土到顶板塑性区的发展过程,采用有限元法分析不同内摩擦角下溶洞直径变化时的土层稳定性问题,并得到了计算图表。在此基础上,引入强度折减法还得到了无量纲稳定系数与潜在溶洞几何尺寸的关系图表,图表中包含内摩擦角的影响,并且在工程实际中得到应用。

刘悟辉等^[105]利用有限差分法软件 FLAC,采用 D-P 屈服准则,对高速公路下伏溶洞的实际工况建立了三维弹塑性模型,在路基表面施加汽车荷载,计算结果表明溶洞存在的情况下路基和溶洞上部土层会产生较大的塑性变形,随着溶洞顶板厚度的加大,路基变形减小,并对注浆填充溶洞的处治措施进行了模拟,对比分析证明路基变形大大减小,注浆效果明显。

曹文贵等^[106]分析了数值流形方法具有两套分析网格在处理开挖问题上的优势,并采用流形单元法评价公路路基岩溶顶板稳定性,引入强度折减技术,以顶板内塑性区贯通作为破坏标准,最终求得安全系数,结合实际工程,分析了溶洞顶板跨度、顶板厚度对安全系数的影响,确定了顶板安全厚度,成功应用于实际且效果良好。

胡庆国等^[107]针对条形基础下的矩形溶洞,采用 ANSYS 中的平面应变单元和 D-P 屈服准则,主要通过基底压力和基底位移的关系曲线来确定岩溶地基的极

限承载力,分析了极限承载力与各影响因素之间的关系,并得出结论:一定范围内的溶洞顶板厚度不变,当顶板跨度从 B 增加到 $4B$ 时,地基承载力降低 $1/3$;当跨度一定时,地基承载力随溶洞顶板厚度的增加而增加。

阳军生等^[108]使用 ABAQUS 软件,对圆形基础下存在圆柱形溶洞建立轴对称模型,采用四边形单元,土体材料采用 D-P 屈服准则,对模型先施加初始应力,然后逐步施加基底荷载,综合运用三种极限承载力的确定方法,取其中的最小值作为地基承载力。分析中考虑了不同的地质强度指标(GSI)对地基承载力的影响,最终给出了地基承载力与各个影响因素下的关系图表。

M. C. Wang 等^[109-111]采用有限元法假定土体为理想弹塑性体,并服从 D-P 屈服准则,分析了不同条件下的空洞上方的地基承载力,包括空洞大小、土体特性、地基宽度、空洞位置等因素的影响,得到了相应的计算图表,可以利用计算图表拟合得到地基承载力,并且将得到的计算结果与模型试验结果进行对比分析以验证其有效性。

以上文献凡是有限元分析的均采用的是 D-P 屈服准则,而邓楚键等^[112]认为在有限元极限分析中屈服准则的不同计算结果差别比较大,在实际问题中选择相匹配的屈服准则才能得到比较精确的结果。

1.2.5 岩溶隧道模型试验研究现状

对岩溶顶板进行稳定性评价最直观的方法是采用载荷试验法^[113],即在溶洞顶板上逐级施加荷载,通过测量元件测得应变和变形数据,并可以观察破坏形式和顺序,但是受到现场地质情况和外界条件的限制,往往不能测得有效数据,而且规模大、周期长、投入高,在实际应用中受到限制。模型试验可以将现场发生的现象在试验室再现出来,对试验中的主要因素进行独立控制,具有省时、省力的特点。由于模型试验严格依据相似理论,在试验室能有效地控制试验参数不受自然条件的限制,因而大大提高了分析的精度。对于岩溶塌陷机制,国内外学者所做的工作主要有^[114]:

日本学者 Nogushi, 俄罗斯学者 Khomenko V. P.、Neschetkin O. B.、Anikeev, A. V., 美国学者 Ralph J. Hodek、Thomas M. Tharp 先后采用物理模型试验,系统研究了非黏性土潜蚀塌陷的过程,建立了非黏性土特征与岩溶塌陷的关系。

国外一些学者还尝试采用岩土工程离心机进行塌陷试验,如: Sterling 和 Ronayne 试验了洞穴上覆黏土层的沉陷,但没有测量黏土的强度,也没有把结果推广到其他土层条件;在 Sterling 的基础上, Craig 用离心模型研究了黏土直接覆盖洞穴或黏土-砂层-洞穴的条件,建立起无量纲的安全系数(VS)的极限值,指出塌陷与土层强度、土层厚度、其他上覆荷载以及洞穴开口直径有关,然后运用

他的无量纲比率,可以推广到其他没有专门模拟的土层条件;Borms 和 Bennermark、Marir 专门研究了上覆软土“突入”隧道造成地面下沉塌陷问题;Howell 和 Jenkins(1984)模拟研究了英国岩盐洞穴的上覆砂层塌陷;Abdulla 和 Goodings 运用离心机塌陷破坏机理和导致塌陷的临界组合条件,重点研究了上覆在洞穴上方的弱固结砂层的塌陷破坏与洞穴开口大小、洞穴自身强度、弱固结砂层强度厚度、上覆砂层的厚度、以及地表荷载的关系。

孙金辉^[115]以 1:1 模型试验,考察了覆盖型岩溶塌陷的原理,以阀门模拟基岩裂隙的大小,以不同速度的水滴降落模拟降水过程,考察侵水的侵蚀及溶洞的形成过程,得出最终塌陷所需的条件。他指出对于覆盖层岩溶确实存在临界裂隙宽度,但是塌陷的决定因素在于土体的性质,为注浆加固等措施提供了理论依据。

任新红等^[116]以模型试验研究了覆盖型岩溶中裂隙开度对岩溶塌陷的影响。他们选择和现场相同的粉质黏土以及覆盖层厚度、密实度等参数,合理设置了渗流条件、降水和地下水位的控制装置以及裂隙的控制装置,得出了在现场条件下裂隙开度的变化规律。

目前,地下工程模型试验研究开展比较多,但是模拟岩溶区地基及围岩稳定性的模型试验不多,国内外学者所做的工作主要有:

赵明阶等^[117-118]利用相似模型试验,研究了隧道顶部不同距离溶洞以及溶洞尺寸对隧道稳定性的影响。研究表明隧道顶部溶洞距离越小,断面开挖位移增量越大,开挖后的流变位移释放率与距离没有明显的关系。

肖学仁^[119]采用溶洞模型试验,分别设计了水中溶洞、土中溶洞和石膏中溶洞模型,探讨了电测深法对溶洞探测的可行性。他还采用模型试验,检测了裂隙灰岩模型注浆效果,研究了注浆效果随时间的效果变化。

刘铁雄等^[120-121]等首先根据相似理论采用正交试验确定了溶洞顶板灰岩的模拟材料,所用砂、水泥、石膏的质量比为 5:0.5:0.5,自制了一种模拟桩基础荷载作用下的溶洞顶板的试验装置,装置可以采集荷载和位移数据,将顶板简化成两端自由、两端简支的矩形板,对三组不同长度和厚度的顶板进行了静载破坏试验,分析了顶板由弹性到塑性到破坏的三个阶段,最终得到了对应的原型的极限承载力。同样采用此试验系统,根据不同的模拟材料的配比,又进行了 4 批共 27 组试件的静载破坏试验,对试验结果综合分析,得到了计算顶板厚度的半经验半理论公式。其试验中仅仅将岩溶顶板简化为矩形板,与实际情况下顶板的形状和复杂的边界条件不符。

针对诺丁汉市市中心软弱砂岩地层中存在数量较多的人工挖掘的洞室,并带来了大量的地质灾害,Waltham 等^[122]在现场进行了完整的荷载试验,并在试验室内利用石膏材料来模拟砂岩,在洞室顶部施加荷载直至顶板破坏,得到了顶板的

破坏形状和极限荷载,模型试验中考虑了顶板的厚度、洞穴的跨度、偏心荷载、以及荷载分布形式的影响,并利用FLAC软件进行数值分析,综合对比各种分析手段的结果得出,当洞室顶板宽度为4 m时,顶板的厚度从1 m变为3 m,其承载力由2 MPa提高到8 MPa,当洞室的跨度增大时顶板承载力减小。试验中仅仅采用石膏材料模拟砂岩,相似材料的配制简单,很难使实际情况下的地层符合相似理论的要求。

张楠^[123]以河砂、水泥、石膏为相似材料确定了6组配比试验,通过对相似系数的计算选取了其中一种模拟弱风化灰岩的材料,以此材料模拟隧道围岩制作模型,采用立式台架在顶部逐级施加竖向荷载,分别模拟的隧道顶部、底部、侧面存在溶洞的情况,最终得到了隧道破坏的发展过程,量测系统测得了隧道拱顶、边墙和底板处的应变值,以此来评价围岩稳定性。试验表明,溶洞位于隧道顶部对拱顶沉降影响较大,对边墙和底板影响不明显;溶洞位于隧道底部对围岩影响较小,围岩破坏形状不受影响;溶洞位于隧道侧面对围岩稳定性影响显著,中间岩柱应力集中成为薄弱部位,溶洞的失稳往往诱导隧道围岩的失稳破坏。试验采用的是平面应力模型,在地表进行加载,这与实际的边界条件及荷载情况差别较大。

1.2.6 轨道交通隧道溶洞处治技术研究现状

1973年,国际工程地质协会在西德汉诺威举行了主题为“岩溶塌陷与沉陷:与可溶岩有关的工程地质问题”的国际讨论会,会议对欧洲蒸发岩地区的地面塌陷、溶洞分布规律和防治技术进行了探讨。之后先后在美国宾夕法尼亚、佛罗里达州等地举行了岩溶塌陷和岩溶的工程与环境影响多学科国际研讨会。从2001年开始,美国地质调查局岩溶爱好者专题小组每年都召开一次学术论坛,讨论岩溶区的环境与工程问题^[124]。

与此同时,各种相关的出版物也相继出现。1996年,美国的George Sowers^[125]编写了*Building on Sinkholes: Design and Construction of Foundations in Karst Terrain*,介绍了岩溶区上建筑物基础设计与施工问题。2004年,英国的Tony Waltham^[126]等专家编写了*SINKHOLES and SUBSIDENCE: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*介绍了岩溶隐患的机理和防治措施。

国内方面,2009年,陈国亮^[127]将相关国内国外重要刊物或者会议上的论文收录到《岩溶工程论文集》一书中,除了对溶洞顶板安全厚度、坍塌高度、模型试验等进行了介绍外,也对岩溶地区水害、地面塌陷以及它们的治理技术进行了论述。

黄建明^[128]指出应综合考虑溶洞的位置、跨度、覆盖层高度 H 、松弛高度 h_0 、

围岩性质等来确定溶洞的处理原则。对隧道平面内的溶洞,当 $H - h_0 \leq 3$ m 或 $H - h_0 > 3$ m 且 $\frac{\text{围岩抗拉强度 } f_t}{\text{计算所得压应力 } \sigma} < 2$ 时应做处理;若 $\frac{\text{围岩抗拉强度 } f_t}{\text{计算所得压应力 } \sigma} \geq 2$, 则不做处理。对于隧道平面外的,当其松弛范围在隧洞周围 3 m 以内才做处理。对于土洞,由于其容易坍落,需要处理。

黄焰等^[129]分析了广州轨道交通 2 号线三元里折返线 1 号竖井工程的涌水问题。认为这是由于承压水压力过大,击穿了竖井底部覆盖土层而发生的。对溶洞采用水泥砂浆或水泥浆填充,对溶沟、溶斗采用高压劈裂注浆填充,切断水的渗流路径,然后在基底下 3 m 及基坑两侧 2 m 范围内做高压旋喷桩形成止水帷幕,双管齐下。经过钻孔抽芯检验,取得了良好的处治效果。

杨育僧等^[130]等以广州轨道交通 5 号线工程为基础,对溶洞的大小、分布及填充情况、溶洞处理及盾构掘进技术措施进行深入研究。对大于 2 m 以上的无填充溶洞和半填充溶洞,采用先填砂处理,后注浆加固的处理方法;对小于 2 m 的无填充溶洞和半填充溶洞,直接注浆;全填充溶洞处理则采用 PVC 袖阀管注浆工艺进行填充加固。

刘瑞琪^[131]针对大连轨道交通 2 号线松江路站—东纬路站区间,武卫星等^[132]针对武汉轨道交通 2 号线广埠屯—光谷广场站区间,侯文华^[133]以深圳轨道交通 3 号线为工程背景均按照“引”、“堵”、“越”、“绕”的原则,采用灌注浆等措施对轨道交通溶洞进行了处理,取得了不错的效果。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本书从极限分析方法、有限元数值分析、室内试验、模型试验和现场原位试验入手,主要研究隐伏型岩溶地基稳定性问题及充填处理新材料与新工艺,主要研究内容包括以下几个方面。

(1) 广州轨道交通隧道所在岩溶区域的地质、地貌特征及空间分布规律

通过收集整理广州轨道交通隧道既有勘察成果,研究岩溶发育的区域地质特征、地貌特征及空间分布规律,分析总结当溶(土)洞位于隧道下方时的岩溶空间分布规律,提出用于极限分析和进行模型试验的概化模型。

(2) 隐伏型岩溶地基稳定性相似模型试验研究

根据相似原理,结合地质概化模型,制作模拟试验模型,主要研究内容为:

①对隧道底部分布单个圆形溶(土)洞情况,通过逐级增加施工荷载(盾构机荷载),研究岩溶地基渐进性破坏特点,并得到导致地基失稳的破坏荷载或极限荷载,并求出安全系数。

②对隧道底部分布形状不规则溶(土)洞情况,通过逐级增加施工荷载(盾构机荷载),研究岩溶地基渐进性破坏特点,并得到导致地基失稳的破坏荷载或极限荷载,并求出安全系数。

③对隧道底部分布串珠型溶(土)洞情况,通过逐级增加施工荷载(盾构机荷载),研究岩溶地基渐进性破坏特点,并得到导致地基失稳的破坏荷载或极限荷载,并求出安全系数。

(3) 岩溶地基失稳的极限分析

在极限分析上限有限元理论基础上,编制二维岩溶隧道地基极限承载力求解程序;针对破坏模式可能出现难以精确模拟的剪切带问题,提出了一种基于单元耗散能密度判定指标的网格自适应加密方法并编程实现。应用该程序对轨道交通隧道在岩土层中掘进时,对于底部存在单个溶(土)洞而且形状规则的情况、底部存在单个溶(土)洞形状不规则,或虽然形状规则,但土质不均,以及溶洞分布复杂比如串珠型溶洞等情况的岩溶隧道地基极限承载力展开多工况计算分析,分析地基极限承载力及破坏模式的变化规律,并与模型试验结果进行对比。

(4) 岩溶对盾构隧道开挖过程影响的数值分析

对于轨道交通隧道线路通过岩溶段,当轨道交通隧道在岩土层中进行盾构掘进时,岩溶土洞的大小、位置、与隧道间的径距以及岩溶土洞的形状等因素对轨道交通盾构具体的施工过程以及施工过程对围岩稳定性的影响,采用商用有限元软件建立三维数值模型,模拟施工进程,分析岩溶地基的稳定和变形规律。

(5) 新型经济注浆材料试验研究

针对广州轨道交通沿线岩溶工程地质、水文地质特征,分析不同状况下需进行岩溶处理的范围和深度,就地取材,开展新型廉价注浆材料的配浆工艺、注浆工艺的试验研究。在此基础上,采用数值分析方法分别模拟无溶洞,溶洞不处理,充填黏土水泥浆液处理,充填纯水泥浆处理四种情况对溶洞处治前、后的应力、应变、位移及塑性区范围进行深入分析,研究轨道交通岩溶地基承载力和稳定性是否满足要求,并对治理方案的效果作出评价。

1.3.2 研究思路与方法

长期以来,基于不同的学科性质、研究尺度和切入点,对地质对象的研究分为两大类:一是以地学基础性理论研究为主,偏重于研究地质事件的时间序列,注重于地质历史的重建和支配地球变化的一般规律的探究,寻求对地球变革原因

的理解；或合二为一、综合研究地球构造、岩溶形成的时间和空间分布规律。二是以工程技术人员为主，注重于研究对象的力学行为、工程性质、岩土体的加固与改良。工程地质和岩土工程分属两大学科领域，前者属于地质学范畴，后者属于土木工程范畴，这两大学科又有许多共同的内容，在城市地域单元内开展工程地质和岩土工程研究，两大学科之间有许多碰撞和磨擦，如何将土木工程、岩土工程和工程地质进行有机融合，更好地为城市规划和建设服务，既是从事城市建设的工程师们面临的实践课题，也是许多专家学者一直探索的重要课题。近年来，科学技术和工程建设的发展促进了社会分工和学科细化，也加剧了多源知识、多种手段、多尺度综合集成研究的进展。

本书在上述思路的指导下，从宏观着眼，分析广花盆地岩溶的形成及发育规律与分布特征，通过模型试验和数值方法来分析隐伏型岩溶地基的稳定性及其对轨道交通隧道的影响，并积极寻求对该类地质灾害的处治措施。

本书依托广州轨道交通岩溶区域轨道交通建设项目，在充分收集、整理和消化已有基础地质研究与勘察资料的基础上，针对隐伏型岩溶地基稳定性这一关键问题，以广花盆地—广州市轨道交通沿线岩溶为研究对象，运用地质学、构造地质学、工程地质学、岩体力学、工程力学、统计学、数值分析等理论，以理论与实践相结合、采用室内模型试验、理论分析与数值模拟相结合、室内材料试验和大规模现场原型工艺试验与数值分析相结合、生产与科研相结合等综合性研究方法开展系统的研究工作。

第2章 广州轨道交通岩溶发育区域地质环境条件分析

2.1 概述

广州地区岩溶主要分布在广州西北的广花盆地内,是在有利的地层条件、地质构造条件和水文地质条件下形成的,为隐伏型岩溶^[134],其主要形式是溶洞和土洞,由此引起的岩溶现象表现为地面塌陷、地面下沉、涌水、涌泥等。广州轨道交通建成或正在建设的线路中大部分线路穿过石灰岩分布区域,沿线地下水丰富,岩溶洞穴十分发育,对线路的走向、敷设方式和施工工法的选择造成极大困难,也增加了工程设计、施工的难度和费用。

长期以来,地学工作者以基础性理论研究为主,偏重于地质历史的重建,注重于支配地球变化的一般规律的探究^[135-136];工程技术人员则注重于研究其工程性质、岩土体的加固与改良。本章试图从地质环境演化的角度对广花盆地中岩溶的时空变异特征进行研究,查明岩溶的形成条件、分布规律和特征,为城市规划、建设,特别是为地下隧道施工风险防范提供科学依据。

2.2 岩溶形成条件分析

广州市轨道交通沿线岩溶分布规律与发育程度主要受岩性、地质构造、地下水位变化等因素的控制。岩溶形成条件包括地层、地质构造、气象与水文地质条件等。岩溶是浅层地下空间开发利用的主要影响因素^[137]。因此,查明岩溶的形成条件、分布规律和特征,对于选线、基础与主体结构形式、隧道的施工方法等的确定有重要意义。