

超前地质预报系统的提出及其发展方向

罗利锐^{1,2}, 刘志刚³, 闫怡冲⁴

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088;
3. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘 要: 总结了超前地质预报的作用和发展现状, 分析了超前地质预报认识上的误区和各种探测设备存在的问题。提出了超前地质预报系统的概念, 阐述了隧道所在地区地质分析技术、隧道不良地质体超前预报技术、重大施工地质灾害临近警报技术包含的内容。系统的工作步骤为, 利用地质分析技术结论以及地质复杂程度分级标准对探测区段的围岩进行地质复杂程度分级, 针对不同级别的地质复杂程度, 制定与其对应的超前地质预报系统方案, 并注意现场工作中动态控制的应用。以厦门海底隧道 F₃ 风化深槽为例, 对超前地质预报系统的内容及工作步骤进行了应用。提出了超前地质预报系统的发展方向。研究旨在完善超前地质预报工作, 使超前地质预报结果在现场施工过程中能真正起到指导性的作用, 最大程度地减少地质灾害造成的人员伤亡和财产损失。

关 键 词: 超前地质预报系统; 地质复杂程度分级; 地质灾害; 地质分析技术

中图分类号: U 456.3+3

文献标识码: A

The concept and development of geological prediction system

LUO Li-rui^{1,2}, LIU Zhi-gang³, YAN Yi-chong⁴

(1. Central Research Institute of Beijing and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China; 2. China Jingye Engineering Corporation Limited, Beijing 100088, China; 3. Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The function and development of geological prediction are summarized. The misunderstanding of geological prediction and problems of various instruments are analyzed. The concept of geological prediction system is proposed. The contents of geological analysis technology of the tunnel area, prediction technology of bad geological bodies, and warning technology for close major geological disasters are illuminated. The steps of geological prediction system are as follows: the geological factors are classified by intricacy according to the conclusions of geological analysis technology and standards for intricacy classification of geological factors; different programs of geological prediction system are formulated for different geological intricacy degrees; and dynamic control on the site is considered. The geological prediction system is applied to an example of F₃ weathered slots of Xiamen subsea tunnel. Finally, the development trend of geological prediction system is put forward. The purpose of this research is to improve the geological prediction work, make the geological prediction results really play a guiding role in the construction process on the site, so as to decrease the investment and casualties of the project to the best extent.

Key words: geological prediction system; geological intricacy classification; geological disaster; geological analysis technology

1 超前地质预报的作用

地下工程的施工过程中, 由于施工掌子面前方的地质情况不明, 经常会因遇到断层破碎带、岩溶发育带、高地应力带和高瓦斯带等不良地质体, 从而导致坍塌~塌方、大涌水~突泥突水、煤与瓦斯突出、岩爆和冲击地压等地质灾害发生。在高山峡

谷、大埋深等复杂地质条件地区更是如此。为了减少地质灾害的发生, 隧道施工就必须对施工掌子面前方围岩的地质条件有着充分的了解并做出快速反应, 及时采取有效措施, 防止灾害的发生。单纯依靠工程勘探工作, 其精度无法满足施工阶段的要求, 于是, 作为隧道施工必要工序的超前地质预报工作就显得意义重大。

2 超前地质预报的研究现状

国内外隧道超前地质预报技术的开发与应用时间不长, 正处于一个发展中状态, 存在很多不成熟的地方。目前工程中常用的技术有地质调查法、地球物理方法、超前钻探方法。

地质调查法是根据隧道已有勘探资料、地表补充地质调查资料, 通过地层层序对比、地层分界线及构造线地下和地表相关性分析、断层要素与隧道几何参数的相关性分析、临近隧道内不良地质体的前兆分析等, 利用常规地质理论、地质作图和趋势分析等, 推测开挖工作面前方可能存在不良地质体的一种超前地质预报方法, 常用的有断层参数法、地面地质体投射法、地质素描预测法、不良地质前兆预测法等^[1-2]。

地球物理方法常见的有 TSP、TGP、TST、GPR、红外探测、陆地声纳等技术^[3-7], 目前应用较多的是 TSP 超前预报方法。

TSP 超前预报方法 (tunnel seismic prediction) 是由瑞士 Amberg 测量技术公司上世纪 90 年代初开发的用于隧道超前预报的技术。中国先后引进了该公司的 TSP202、TSP203、TSP200 超前预报系统, 特别是铁路系统引进数量较多, 由于设备的研发依据是地震反射波原理, 所以用来预报掌子面前方结构面平直的不良地质体(断层、节理)效果较好。

超前钻探方法是预报不良地质体最直接、最有效的手段。通常有取芯和不取芯两种钻探法。取芯钻探的缺点是设备昂贵, 所用时间较长, 容易卡钻, 需要操作人员有着较高的钻探技术, 优点是所取芯样对于预报不良地质体的类型有着非常重要的作用, 在岩溶地区靠近不良地质体时必须采用取芯钻探。不取芯钻探所用时间较短, 对钻探技术要求也不是太高, 主要依据钻进速度和钻孔出水量来推断不良地质体特征, 该方法对于断层水的推断效果较好, 但在岩溶隧道中依据钻进速度和出水量很难区分暗河和岩溶淤泥带, 必须进行取芯钻探。

3 超前地质预报的主要问题

3.1 对超前地质预报工作的误解, 没有超前地质预报系统的完整概念

目前, 设计、监理、施工单位以及部分地质预报人员对超前地质预报工作存在着一些误解, 具体表现为认识上的不全面, 其中较为普遍的认识就是使用一种或几种物探手段对掌子面前方进行预报便是超前地质预报, 而没有把超前地质预报工作作为

一个系统来处理, 特别是地质方法的欠缺, 造成预报精度很低, 很难满足施工需要, 甚至造成超前地质预报工作与现场施工之间的恶性循环。

3.2 各种物探方法存在的问题

(1) 地震反射波方法。利用该原理的设备主要有瑞士 TSP 系列、国产 TGP 系列, 目前主要用于隧道长距离预报。该方法存在的主要问题有: ①处理结果的多样性。主要表现为对同一个原始数据进行处理, 频率、数据长度、纵波和横波的斜率等参数选取的数值不一样, 最后的处理结果相差很大, 是目前预报精度偏低的一个主要原因; ②原始数据的不合格。目前, 由于超前地质预报队伍中有很多非物探、地质专业的人员, 对现场地质条件不了解, 以及对工作的不重视, 例如炮眼不标准, 雷管不符合要求, 现场准备工作不充分, 致使很难取得合格的原始数据。

(2) 电磁反射波方法。利用该原理的设备主要有地质雷达系列, 目前主要用于隧道短距离预报。该方法主要存在的问题有: ①现场受金属、管线、以及探测岩面不平整的影响, 造成探测结果中干扰因素太多; ②不同探测人员由于对探测参数理解深度不同, 以及对现场地质条件熟悉程度不同, 参数设置有误, 造成预报结果不准确。

(3) 红外探测方法。利用该原理的仪器主要有红外探测仪系列, 该类仪器在煤矿中应用较多, 应用在隧道里的主要问题有: 探测时现场干扰因素太多, 例如大型作业机械、照明灯具、通风管、台车等, 与不良地质体的辐射能量叠加在一起, 对探测结果造成误导。此外, 无法定量推测水压、水量。

所以对于目前各种设备存在的问题, 仅仅采用预报人员带着设备直接去现场进行探测方式, 其预报精度根本达不到施工的要求, 必须对这种预报方式有着客观的认识。

4 超前地质预报系统的提出及工作流程

4.1 超前地质预报系统的提出

超前地质预报系统是在上述问题的基础上, 把超前地质预报工作作为一个整体来考虑, 建立起一种与隧道地质复杂程度分级相对应的预报系统, 完整的系统包括隧道所在地区地质分析技术、隧道不良地质体超前预报技术、重大施工地质灾害临近警报技术 3 大部分。

隧道所在地区地质分析技术, 是以隧道所在地区的区域地质资料、详细的地质勘探资料、深入的

地面地质调查为基础,通过区域不良地质分析方法,宏观预报洞体施工可能存在的不良地质类型、规模、粗略位置和方向,宏观预报施工地质灾害的类型和发生的可能性^[8]。只有在地质构造分析原则的指导下,才能更准确、更有效地实施不良地质体超前预报和施工地质灾害监测、判断及临近警报等后续预报工作。这一步工作对于超前地质预报起着指路灯的作用,但目前普遍没有引起重视。它与前述的地质调查法并不一样,是在具体预报工作之前,对隧道所在地区地质构造的一种宏观把握。

地质分析需要达到的目标如下:弄清隧道洞身特别是能够引发施工地质灾害的主要不良地质类型、发育程度、大致位置、空间分布规律、分布方位特征、隧道洞身主要施工地质灾害与主要不良地质的关系。

隧道不良地质体超前预报依据方法不同,分为地质调查方法超前地质预报、地球物理方法超前地质预报和超前钻探地质预报 3 种预报形式。地质方法超前地质预报目前常见的有断层参数法、地面地质体投射法、地质素描预测法、不良地质前兆预测法等;地球物理探测方法超前地质预报目前常用的设备有 TSP、TGP、TST 探测仪器及地质雷达、红外探测仪等;超前钻探地质预报是隧道不良地质体超前预报技术的主要组成部分,具有不可替代的作用,特别是在岩溶隧道的地质预报中。超前钻探既对隧道洞身地质方法、地球物理探测方法超前地质预报进行验证,又为施工地质灾害临近警报提供信息。

施工地质灾害临近警报技术即隧道施工地质灾害监测、判断和临近警报技术,它是在隧道所在地区地质分析和隧道不良地质体地质、地球物理探测、超前钻探预报的基础上进行的工作,将预报的不良地质体转化为对应的地质灾害,这是超前地质预报系统的第 3 道工序。主要包括:施工地质灾害的地质环境监测技术、施工地质灾害发生可能性及危害程度的判断技术两个方面。

(1) 施工地质灾害的地质环境监测技术

这是施工地质灾害临近警报技术的基础工作,也是第 1 步工作。主要包括:坍塌、塌方的鉴定区分技术,涌泥、突泥鉴定区分技术,涌水、突水鉴定区分技术,瓦斯涌出和煤与瓦斯突出的鉴定区分技术,岩爆与冲击地压发生的鉴定区分技术。

(2) 施工地质灾害能否发生的可能性及危害

程度的判断技术

这是施工地质灾害警报技术中最为关键的技术,也是第 2 步工作。主要包括:坍塌与塌方、涌泥与突泥、涌水与突水、煤与瓦斯突出和岩爆与冲击地压等重大施工地质灾害发生的可能性及危害程度的一系列判断技术。

当靠近地质分析预报技术、隧道不良地质体预报技术共同预报出的不良地质体时,应该密切关注其特征,确定出发生地质灾害可能性的大小及危害程度,如果可能性较大或者危害程度较高,应及时向施工单位发出地质灾害临近警报书。

4.2 超前地质预报系统的工作流程

(1) 利用隧道所在地区地质分析技术得出的结论,对探测区域按照地质复杂程度分级标准进行分级,地质复杂程度等级分为复杂、较复杂、中等复杂、简单 4 级,分级标准详见《铁路隧道超前地质预报技术指南》^[9]。

(2) 依据预报区段的地质复杂程度,建立与其相对应预报工作内容,工作流程见图 1。

①对于复杂、较复杂等级的预报区段,应建立完善的预报方法,首先采用长距离的地质预报法和地球物理探测法进行预报,地质方法有断层参数法、地面地质体投射法,地球物理探测法主要利用 TSP、TGP 设备进行探测。如果两种预报方法结果一致,则对开挖前方不良地质体的位置、规模、构造特征做出第 1 阶段的定量分析,如果结果不一致,则应分别建立标准,做出第 1 阶段的定量分析结果;其次,在靠近不良地质体时,采用短距离的地质预报方法和地球物理探测法进行预报,地质方法有地质素描预测法、不良地质前兆预测法,地球物理探测法主要有地质雷达、红外探测仪等。预报的目的是验证第 1 阶段的分析结果,做出第 2 阶段的定量分析结果,并画出开挖前方不良地质体可能的位置及平面构造;然后,依据做出的不良地质体的位置及平面构造图,制定合理的钻孔布置方案,采用超前钻探地质预报方法对做出的预报结果进行验证及纠正;最后,对于验证后的不良地质体进行分析,确定其可能发生的地质灾害类型。发生灾害的可能性及危害程度,及时向施工单位发出地质灾害临近警报书。

②对于中等复杂等级的预报区段,采用长距离的地质预报法和地球物理探测法进行预报,对开挖前方不良地质体的位置、规模、构造特征做出第 1

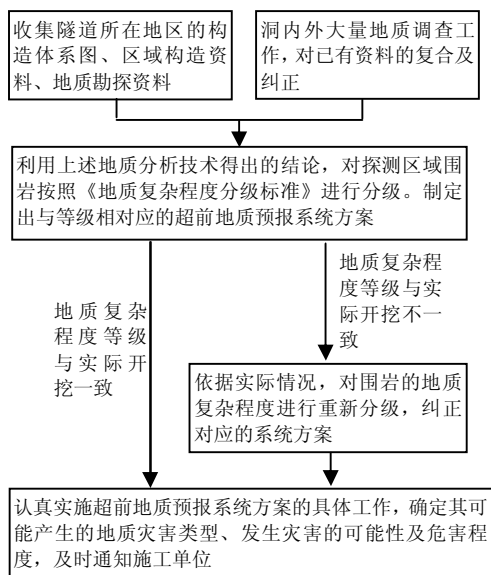


图 1 超前地质预报系统的工作流程

Fig.1 The steps of geological prediction system

阶段的定量分析，在靠近不良地质体时，采用短距离的地质预报法和地球物理探测法进行预报，验证第 1 阶段的分析结果，做出第 2 阶段的定量分析，最后，对于可能产生的地质灾害类型，发生灾害的可能性及危害程度通知施工单位，密切注意地质复杂程度等级的变化。

③对于简单等级的预报区段，采用长距离的地球物理探测法进行预报，对于可能发生的地质灾害类型、发生灾害的可能性及危害程度通知施工单位引起注意，注意地质复杂程度等级的变化。

4.3 超前地质预报系统的动态控制

由于地质条件的复杂性以及所做预报工作的有限性，依据地质分析技术进行分级的预报区段与围岩的实际复杂程度难免存在不同之处，所以对于地质复杂程度等级一定要实行动态控制，随着隧道的开挖，认真做好掌子面地质素描工作，分析围岩的实际复杂程度和预报的差异，并及时修改地质复杂等级以及对应的超前地质预报系统方案。

5 厦门海底隧道 F₃ 风化深槽应用

在设计图上服务隧道 F₃ 风化深槽在纵断面上大体呈“V”字型与隧道相交，影响范围宽约为 94 m，里程 NK10+708~NK10+614，覆盖层为 45.31~47.18 m，最大水深约 11 m，拱顶最大静水压力为 0.56 MPa。

F₃ 风化深槽走向为 NNW345°左右，这类断层和节理先后经历了新华夏系晚期反扭平移、北北西系压性压缩、华夏式张扭性斜滑，由于其形成时间较长，且以张扭性质为主，可能会形成大的富水断

层，在洞内外大量的地质调查中发现，同一走向的节理和小断层较为常见，对它们构造特征的研究，有助于推断 F₃ 风化深槽的基本性质。

通过地质分析得出 F₃ 风化深槽的地质复杂程度为复杂级，应当引起高度的重视，采用与复杂等级相对应的预报系统方案对其进行预报。

考虑到隧道处于海底的实际情况，现场采用 4 种方法进行预报^[10]，各种预报方法结果见表 1。其中地质钻机 3 个钻探孔的综合取芯结果见表 2。

表 1 各种预报方法的结果

Table 1 The results of various predict methods

预报方法	预报里程	预报内容
TSP	NK10+696~NK10+666	围岩较差、破碎、多水、稳定性较差，易坍塌，估计总体为 V 级围岩
超前钻探	NK10+704~NK10+676	节理发育，属于 W ₃ 强风化花岗闪长岩，出水量较大，部分区段含辉绿岩岩脉
地质雷达	NK10+705~NK10+698	多水，弱风化~强风化，稳定性差，易坍塌，估计为 V 级围岩
红外探水	NK10+704~NK10+684	有水

表 2 地质钻探结果

Table 2 The results of geological drilling

编号	区段	各区段岩性、风化程度、出水量
1	NK10+712~704	节理较发育，出水量较小，属于 W ₁ 微风化花岗闪长岩，取芯率较高。
2	NK10+704~698	节理发育，属于 W ₃ 强风化花岗闪长岩，芯样为砂砾状，出水量较大，含 1.5 m 棕黄色泥质夹层。
3	NK10+698~693	围岩整体比较破碎，属于 W ₃ 强风化辉绿岩，节理发育，出水量大。
4	NK10+693~686.5	节理发育，属于 W ₃ 强风化花岗闪长岩，芯样呈棕黄色，出水量大，含 1.5 m 全风化泥质夹层。
5	NK10+686.5~676	节理发育，属于 W ₃ 强风化花岗闪长岩，呈灰白色，部分区段含辉绿岩，出水量大，取芯率低。

超前地质预报总体成果

(1) 围岩状况

根据以上超前地质预报方法，得出结果：掌子面前方从 NK10+700 之后围岩明显变差，节理发育，部分区段为全风化花岗闪长岩，存在辉绿岩岩脉。

(2) 出水状况统计

前方 NK10+696 以后，出水量迅速增大，在钻探中，1[#]孔出水量约为 3.6 m³/m/d，2[#]孔出水量约为 2.3 m³/m/d，3[#]孔出水量约为 2.2 m³/m/d。

依据预报的总体结果，可能发生的地质灾害类型有塌方和大涌水。且发生灾害的可能性较大，对隧道的危害程度较高，施工中必须采取预防措施。现场采用了管棚和帷幕注浆的预防措施，有效地阻

止了地质灾害的发生。

6 超前地质预报系统的发展方向

(1) 完善超前地质预报工作的整体性、系统性
重视超前地质预报的整体性和系统性, 将具体工作落实到实践中, 包括: 施工现场应该将超前地质预报作为施工工序中一个必做的工作; 加强配合, 给现场地质调查人员提供充足的工作时间; 保证现场得到合格的原始数据, 提高探测的预报精度; 施工现场一定要重视预报结果, 特别是一些大的不良地质体, 提高警惕, 做好预防措施。

(2) 超前地质预报新方法、应用新技术的研究
在超前地质预报系统路线的指导下, 努力研究新方法、新技术, 特别是各种预报方法的现场实际应用技术, 不断提高预报的精度。

(3) 超前地质预报成果在施工现场的广泛应用
由于现场施工和管理人员多是非地质专业人员, 对超前地质预报成果的灵活应用存在着一定的难度, 所以, 要使超前地质预报的成果能够在实践中得到较好的应用, 就应该由超前地质预报专家研发一些成果集成软件, 使得预报结果能够对现场施工起到指导性的作用。

参考文献

- [1] 刘志刚, 刘秀峰. 断层参数预测法预报隧道断层[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1547—1550.
LIU Zhi-gang, LIU Xiu-feng. Determination of tunnel fault by the method of fault parameter forecast[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1547—1550.
- [2] 刘志刚, 赵勇. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [3] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297—1307.
LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1297—1307.
- [4] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12—15.
HE Fa-liang, LI Cang-song. Development of geological forecast in tunnel construction[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2001, 38(3): 12—15.
- [5] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460—464.
ZHAO Yong-gui, LIU Hao, SUN Yu, et al. Research progress in tunnel geological advanced prediction[J]. **Progress in Geophysics**, 2003, 18(3): 460—464.
- [6] BROOKS J W. Applications of GPR technology to humanitarian demining operations in Cambodia: Some lessons learned[R]. [S.l.]: Brooks Enterprises International, Inc., 1996: 1—9.
- [7] 罗利锐, 刘志刚, 陈文涛, 等. 红外探测技术在海底隧道地质预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 8(4): 775—780.
LUO Li-rui, LIU Zhi-gang, Chen Wen-tao. et al. Application of infrared acquisition technology in geological prediction of sub-sea tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2010, 8(4): 775—780.
- [8] 罗利锐, 刘志刚, 耿彦生, 等. 宏观地质预报在厦门海底隧道中的应用[J]. 山东大学学报, 2009, 39(增刊2): 45—50.
LUO Li-rui, LIU Zhi-gang, GENG Yan-sheng. et al. Application of macro geological prediction to Xiamen subsea tunnel[J]. **Journal of Shandong University**, 2009, 39(Supp.2): 45—50.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁建设[2008]-105 铁路隧道超前地质预报技术指南[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [10] 罗利锐, 刘志刚. 超前地质预报在翔安海底隧道中的应用[J]. 铁道工程学报, 2009, 130(7): 80—83.
LUO Li-rui, LIU Zhi-gang. Application of the geological prediction in advance in construction of Xiang'an submarine tunnel[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2009, 130(7): 80—83.