

砂质土隧道围岩

力学参数及分级方法研究

SHAZHITU SUIDAO WEIYAN

LIXUE CANSHU JI FENJI FANGFA YANJIU

王玉锁 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

砂质土隧道围岩力学参数及 分级方法研究

王玉锁 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

砂质土隧道围岩力学参数及分级方法研究 / 王玉锁
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.1
ISBN 978-7-5643-0552-9

I. ①砂… II. ①王… III. ①砂土—隧道工程—围岩—岩石力学—参数—研究②砂土—隧道工程—围岩分类—研究 IV. ①U451

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 009103 号

砂质土隧道围岩力学参数及分级方法研究

王玉锁 著

*

责任编辑 高 平

特邀编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 10

字数: 250 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0552-9

定价: 28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

目前我国正处于基础设施建设的大发展时期,各种交通土建工程如高速公路、高速铁路、城市地铁等的建设已全面展开。在隧道及地下工程中所面临的安全、环境、经济和人文等各种问题也越来越多,对能保证以上问题解决的各种规范和标准的要求也越来越高,许多目前应用的技术规范都面临着技术更新和完善的问题。由于我国目前所使用的有关隧道及地下工程围岩分级标准中,对土质隧道围岩分级所使用的指标大多是定性的,在使用上具有主观性,分级的准确性较差。提出明确的、能较全面反映围岩稳定性的、易于操作的土质隧道围岩分级指标,是迫切需要解决的问题。因此,本书针对土质隧道围岩分级中亟待解决的几个重点问题,对砂质土围岩分级体系进行了系统的研究,其工作具体体现在以下几个方面:

1. 通过对国内外大量砂质土围岩分级指标资料的调研和统计分析,建立了比较符合工程实际的砂质土围岩分级指标体系,并给出了各指标的获取方法。

2. 以砂质土围岩自稳性为研究基础,通过室内土工试验,利用数理统计和数据曲线图的方法,研究了砂质土围岩分级指标的各种组合情况对力学指标的影响规律,得出了利用围岩分级指标值来评定力学指标值的方法。在此基础上,将分级指标值进行了分段组合。

3. 提出了能综合反映砂质土围岩力学性能的砂质土围岩基本质量指标 SBQ 的定义。根据土工试验结果,利用数据曲线图、回归分析及聚类分析等数理统计方法,研究了 SBQ 值与砂质土围岩基本分级指标以及砂质土围岩力学参数之间的关系,得到了利用基本分级指标组合预测 SBQ 值,以及利用 SBQ 值来预测砂质土围岩物理力学指标值的定量表达式。

4. 提出利用砂质土围岩基本质量指标 SBQ 值作为评定基准,将分级指标值分段组合进行自稳性分组。以弹性力学中洞室开挖跨度与洞室周边位移的基尔西公式为理论依据,通过有限差分法数值模拟、相似模型试验等方法,获得了砂质土围岩自稳性。

5. 将所得的各组围岩自稳跨度数值与现行规范所提供的围岩分级标准对应,得到了砂质土围岩分级理论标准。将指标组合分组与理论标准对应,得到了砂质土围岩组合定性分级实用标准;根据土工试验结果,提出利用 SBQ 值作为稳定性分级的判别基准,得到了砂质土围岩综合定量分级实用标准。

6. 通过大量资料调研及室内土工试验,得到了砂质土各级围岩物理力学指标值。

7. 基于双车道公路隧道围岩自稳性研究成果,通过对国内相关资料的调研分析及数值模拟分析,经过计算调整,确定了一套砂质土双车道公路隧道的设计参数。

8. 根据调研资料,对砂质土围岩分级方法的正确性进行了验证。

本书的成稿,是在王明年教授的悉心指导下完成的,书中的研究和撰写等各个阶段都凝聚着王老师大量的心血和精力。在此,对老师致以最诚挚的敬意和衷心的感谢!感谢关宝树教授、钟新樵教授及四川省交通厅公路规划勘察设计研究院的李玉文院长、王凌云总工、江中平工程师、钟勇工程师在项目研究期间的大力支持,使得项目研究顺利开展。感谢高波教授、何川教授、杨其新教授、张志强教授、漆泰岳教授对项目研究及写作的指导。感谢陈炜韬博士、魏龙海博士、刘大刚博士、张建国博士、时亚昕博士、赵东平博士、郭军博士、郭春博士、于丽博士、路军富博士、童建军硕士、李培楠硕士、刘彪硕士、房敦敏硕士、李海军硕士、王铭硕士、周仁强硕士、陶德敬硕士、李强硕士、欧阳院平硕士、郦亚军硕士、宋南涛硕士、俞尚宇硕士等同门师兄弟,感谢他们在本项目研究中的帮助和关心!同时,也感谢本书所引参考文献的作者们!

限于水平和精力,本书所研究内容尚需进一步研究深化,欢迎广大读者提出批评和指正。

著 者

2008 年 12 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 砂质土围岩分级研究现状	8
1.3 砂质土围岩分级研究的薄弱环节及存在的问题	18
1.4 本书研究的主要内容	19
1.5 本书研究的技术路线与主要研究方法	19
第 2 章 砂质土围岩分级指标体系研究	22
2.1 砂质土围岩分级指标的选取	23
2.2 分级指标获取方法	26
2.3 本章小结	31
第 3 章 砂质土围岩力学性能研究	33
3.1 土工试验设计	33
3.2 基本分级指标对砂质土力学参数的影响	35
3.3 基本分级指标值的组合	50
3.4 本章小结	52
第 4 章 砂质土围岩基本质量指标 SBQ	54
4.1 基本思路	54
4.2 砂质土围岩基本质量指标 SBQ 的提出	55
4.3 SBQ 与基本分级指标关系的试验研究	56
4.4 砂质土围岩力学指标与 SBQ 的关系	67
4.5 本章小结	72

第 5 章 砂质土围岩自稳性研究.....74

5.1 砂质土围岩自稳性机理研究75

5.2 隧道失稳位移判据探讨76

5.3 砂质土围岩自稳性分组77

5.4 数值模拟分析80

5.5 相似模型试验分析94

5.6 本章小结98

第 6 章 砂质土围岩分级方法研究100

6.1 砂质土围岩分级理论标准建立101

6.2 砂质土围岩分级组合标准建立102

6.3 砂质土围岩分级综合标准建立103

6.4 砂质土围岩分级修正方法103

6.5 本章小结104

第 7 章 砂质土围岩物理力学指标值研究105

7.1 调研资料分析105

7.2 室内试验结果分析107

7.3 *SBQ* 预测结果分析111

7.4 砂质土围岩物理力学指标值112

7.5 本章小结113

第 8 章 砂质土围岩分级方法的验证114

8.1 定性组合分级方法检验114

8.2 定量综合分级方法检验120

8.3 本章小结122

第 9 章 砂质土隧道设计参数研究123

9.1 双车道公路隧道设计参数确定原则123

9.2 双车道砂质土公路隧道各级围岩下的设计参数确定125

9.3 双车道公路隧道各级围岩下初期支护参数的确定126

9.4 本章小结130

结 论131

附录 试验组合及试验结果135

参考文献142

第 1 章

绪 论

1.1 研究的背景及意义

我国现行《公路隧道设计规范》(JTJ D70—2004)对岩石隧道围岩采用了《工程岩体分级标准》(GB 50218—94)的分级方法。它是针对岩石隧道及其他地下工程提出的,不包括土体围岩分级。为了适应公路隧道的实际情况和需要,将土体围岩分级引入进来,将围岩级别共分六级。其中土体围岩分级引用了《铁路隧道设计规范》(TB 10003)的相关内容,但这种分级方法经验的成分较大,有一定的人为因素和不确定性,在实际应用中存在不少的问题^[1, 2]。为完善解决现行《公路隧道设计规范》中存在的问题,交通运输部科技教育司批准立项“公路隧道围岩分级指标体系与动态分类方法研究”科技项目,由西南交通大学主持研究,参加单位有四川省交通厅公路规划勘察设计研究院。

本书所研究的内容是该课题的一个子项目。

目前我国正处于基础设施建设的大发展时期,各种交通土建工程如高速公路、高速铁路、城市地铁等的建设已全面展开。在隧道及地下工程中所面临的安全、环境、经济和人文等各种问题也越来越多,对能保证以上问题解决的各种规范和标准的要求也越来越高,许多目前应用的技术规范都面临着技术更新和完善的问题^[3, 4]。由于我国目前所使用的有关隧道及地下工程围岩分级基准中,对土质隧道围岩分级所使用的指标大多是定性的,在使用上具有主观性,分级的准确性较差。提出明确的、能较全面反映围岩稳定性的、易于操作的土质隧道围岩分级指标,是迫切需要解决的问题^[1, 2, 5]。该问题的解决,对土质隧道工程的安全有效施工和避免不必要的投资具有重大的作用,同时,也是我国隧道及地下工程科研的一个重大完善和补充。

土质隧道围岩分级,在我国还没有进行专门深入或明确的研究。在我国目前的隧道及地

下工程围岩分级中,虽对土质隧道围岩分类作了规定,但所用的分类指标多是定性的,尽管也采用了弹性波速度这一定量指标,但在实际应用中存在不少困难^[6]。国内对土质隧道围岩研究工作进行得很少。这一直是我国隧道及地下工程围岩分类或分级工作中的缺憾。我国隧道及地下工程数目众多,虽说完全的土质隧道并没有像岩质隧道那样多见,但少量的或不多见的土质隧道在设计和施工时却往往成为整个隧道工程的难点和关键问题。在修建铁路、公路隧道时,在洞口浅埋段、断层内、全风化及强风化岩体中,常常遇到土质围岩(碎石土、砂性土、黏性土、类土岩等)。这些围岩虽在整个隧道长度中所占的比例少,但由于目前规范中围岩分类方法所涉及的土体无明确的定量分类指标,只凭定性指标来判断,有很大的主观性,很多土质围岩隧道在施工中会发生大的塌方,在建成后二次衬砌也会产生后续裂缝,造成工程的损害,给国家和人民的生命财产带来很大的损失。在设计、施工中对土质围岩作出准确的评估是极为重要的,特别是在开挖空间不能维持、开挖难以进行时,对于不得不进行再开挖的极差土质岩层应在选线阶段避开。此外,为了竭力抑制围岩松弛,防止坍塌、围岩挤入,甚至产生流动现象的发展,即使在施工过程中也能迅速地预测围岩破坏的过程,并恰当地反馈到设计、施工中是非常必要的^[7-39]。为此,正确地预测设计和施工阶段土质围岩的破坏程度的评价标准是必要的。《公路隧道设计规范》(2004)中的“公路隧道围岩分级方法”未能具体标示土质围岩的分级方法。本书为了确定土质围岩的评估方法,收集了相应的施工实例进行分析,提出分级标准的几个方案,研究的目的是以这些资料为基础,深化实例分析,按分级标准提出公路隧道设计和施工阶段土质围岩的评估方案。而土质隧道围岩按土的工程地质定义,又包括很多情况,如《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中根据颗粒粒径及塑性指数将土分为碎石土、砂土、粉土及黏性土等^[40],可见土质隧道围岩所包含的范畴很广,并且许多破碎软弱围岩和土质围岩在隧道围岩稳定性方面的力学形态和破坏机理相同,都能划归于土质围岩范畴。而在土质隧道围岩中,又根据力学形态上的差异,可分为两大类:一类是呈松散介质力学形态的散粒土质隧道围岩,包括碎石土和砂土隧道围岩;而另一类是弹塑性变形较大,可以按连续介质力学理论分析研究的黏土质隧道围岩,如粉土、黏性土和类似具有膨胀性的类黏性土隧道围岩。这两种类型的土质隧道由于力学形态上的差别,应分开来研究^[41, 42, 43]。

隧道及地下工程中,涉及的砂质土围岩十分常见。目前我国各大城市修建的地下工程中,几乎都会遇到砂质土围岩情况。

如北京地铁“复一八”线大北窑—热电厂区间隧道,采用浅埋暗挖法施工。自区间隔断门向西施工时遇到饱和状态的自稳能力极差的粉细砂层,经扰动即成流砂状^[44]。北京地铁 10 号线双井站—劲松站区间,全长 808.638 m,由左、右两座分离式标准双线区间隧道组成。区间隧道穿越地层主要为砂土、粉土、黏土及拱顶砂式圆砾层,土层自稳能力差,很难形成自然应力拱,易坍塌;同时,由于地下水的作用,砂层易发生涌水、涌砂等现象,施工时必须做好加固、稳砂及降水措施。区间隧道采用暗挖法施工方案^[45]。西直门站—动物园站区间隧道处于西直门外大街下方。该区间段隧道左右线全部穿越砂卵石地层。砂卵石地层是一种典型的力学不稳定地层,颗粒之间空隙大,黏聚力小,颗粒之间点对点传力,地层反应灵敏,稍微受到扰动就很容易破坏原来的相对稳定平衡状态而坍塌,引起较大的围岩扰动,使开挖面和洞壁都失去约束而产生不稳定^[46]。北京地铁 10 号线一期工程苏州街站,车站形式为两端双层暗挖,中间单层暗挖单柱双跨侧式车站。车站总长 195 m。车站通过主要地层从上至

下分别为粉质黏土层、粉土层、圆砾卵石层、中粗砂层、粉细砂层、粉质黏土层、卵石圆砾层,基底位于卵石圆砾层。车站施工采用矿山法全暗挖施作^[47]。北京地区采用盾构穿越柳西线和京九线两条铁路大动脉时,同时拟建管线主要位于砂卵石层中。穿越区域地质情况从地面向下依次为碎石填土层、轻亚黏土填土至中亚黏土填土层、细砂粉砂层和砂卵石层。盾构推进断面基本为全断面砂卵石。盾构机覆土 6.75 m,其中盾构机顶部 2~3 m 为细砂粉砂层^[48]。北京市凉水河南岸污水盾构隧道工程,覆土厚度为 5.7~8.1 m。盾构隧道断面内无地下水,微湿。盾构主要在新近沉积的全断面及部分断面砂卵石、圆砾石层中推进^[49]。

深圳地铁大剧院—科学馆区间位于市中心深南大道下。隧道采用浅埋暗挖法施工。区间隧道在 SK3+850~SK4+040 段穿越流塑及可塑状砂质黏性土层^[50]。深圳地铁侨城东至华侨城区间隧道设计为左、右线并行隧道,隧道设计开挖宽度为 6.3 m,开挖高度为 6.61 m。隧道施工采取矿山法正台阶法施工。根据侨城东站工程地质勘测报告给出的工程地质条件评价为:本场地为中等复杂场地,河身在小沙河段及砂层段地层主要为第四系残积层及花岗岩全风化层。围岩易产生坍塌、片状脱落^[51]。深圳地铁香蜜湖—车公庙区间隧道位于深南大道的中央及北侧的绿化带下,全长 1 101.38 m。覆土厚度为 8.7~10.9 m,断面为马蹄形,复合式衬砌,宽 6.36 m,高 6.66 m。区间采用暗挖法施工。区间中有三段长约 642 m 洞顶为较厚的富水砂层段。地层自上至下分别为:人工堆积层素填土冲积、海积层黏性土混砂砾,夹薄层砂;冲积、海积层砂类土,松散至中密,局部密实,结构松散,含水丰富,工程地质条件极差;残积层、花岗岩全风化带结构松散,扰动后结构破坏,遇水易软化,强风化带扰动后遇水成砂砾状^[52]。深圳地铁侨城东站站后折返线穿越的地层主要以全风化花岗岩、砾质黏性土和砂质黏性土为主,部分地段拱部有砂层。这些地层松散,黏接性差,自稳性差,弱透水性,遇水软化变为流塑状。站后折返隧道围岩等级均为 V 级,属于软弱围岩^[53]。深圳地铁一期工程科学馆—华强路区间隧道,长 790.7 m (双线),呈两平行直线。暗挖法施工,洞顶覆盖土层厚 9.84~14.13 m,土层为第四系全新统人工堆积层、海积冲积层及第四系中统残积层,均属于 II 类围岩的富水软弱地层;隧道下伏燕山期花岗岩,第四系残积层包括砂质黏性土、砾质黏性土^[54]。深圳市向西路人行地道位于探南东路和向西路交汇处。人行地道主通道全长 50 m,穿越第四系冲积层,开挖断面的拱部为淤泥质粉质黏土层和粉质黏土层,拱部以下为中、粗和细砂层。隧道结构为割圆拱形,其拱顶覆土厚 4.3~5.3 m,开挖跨度和高度分别为 7.35 m 和 4.65 m。隧道采用 CD 工法开挖,属超浅埋暗挖。支护形式为复合式衬砌结构^[55]。深圳市中信地下商场 B 区为超浅埋暗挖大跨度平顶直墙隧道。隧道位于深南大道与上步快速路交汇处以南,横穿上步快速路,隧道开挖断面宽 27.7 m,高 6.45 m,埋深 4~5 m,全长 56.56 m,整个结构为单层框式钢筋混凝土结构。该隧道主要穿越地层为人工素填土层、饱和中砂层、黏土层,且地下水丰富^[56]。

杭州解放路延伸工程一标段始于建国路和解放路交叉口,其中隧道全长 706 m,为上、下行分离式小间距隧道,双向四车道。隧道覆土厚度 5.0~5.3 m,隧道洞身穿越土层主要为砂质粉土夹粉砂,弱透水性,中密状为主,薄层状构造,下部多夹粉砂、细砂薄层。土体渗透性相对较好,土层饱和水情况下,扰动易液化,另外若出现流砂、管涌均会造成开挖面失稳。下卧层主要为砂质粉土层^[57]。杭州市庆春路—新华路地道工程采用浅埋暗挖法进行施工,该工程“周边环境复杂、施工场地狭窄、技术难度大、施工组织困难、安全风险大”,是杭州地下工程中最难、最复杂的项目之一。隧道洞身穿越土层主要为砂质粉土夹粉砂,弱透水性,

中密状为主,薄层状构造,下部多夹粉砂、细砂薄层。隧道下卧层主要为砂质粉土层^[58]。杭州市解放路隧道穿越沪杭铁路段,共长41.6 m。隧道由两座小间距(隔墙厚仅75 cm)隧道组成,为双向四车道,采用暗挖法施工。隧道所穿越地层为砂质粉土夹砂层,地下水位埋深较低且极其丰富,隧道开挖过程中极易发生涌水、涌砂、坍塌等事故^[59]。

上海市共和新路高架工程中山北路站至延长路站区间隧道联络通道及泵站位于两站区间隧道中部。周围地层以粉土和粉细砂为主,含承压水,扰动后极易形成流砂^[60]。上海大连路越江隧道联络通道是在含饱和承压水的砂性土层中进行施工的,因而极具风险性^[61]。

成都市南部新区A6、A10线电力隧道下穿天府大道工程,设计采用浅埋暗挖法进行施工。该电力隧道全长110 m,埋深10 m左右。隧道主要穿越砂卵石地层^[62]。

广州地铁5号线的珠江新城—猎德区间为5号线仅有的两个暗挖矿山区间之一,全长1466.769 m(双线)。拱顶穿过中粗砂层、冲洪积粉质黏土层、硬塑状残积粉质黏土层、全风化及强风化泥质粉砂岩。洞身范围大部分为全风化及强风化泥质粉砂岩,拱顶以上存在大量中粗砂层,砂层的最大厚度约为3 m,总体属于Ⅵ级围岩。隧道拱顶以上砂层较厚,渗透系数很大,隧道开挖过程中稍有不慎,即会造成涌水涌砂、土层坍塌,导致地道及路面出现较大程度的沉降^[63]。广州地铁体育西路至体育中心区间全长708 m,北段120 m穿过60 m宽的天河路,与体育中心站相接,埋深7 m。隧道在饱和粉砂层、硬塑黏土层中穿过,其中饱和砂层位于隧道拱顶以下2 m范围^[64]。广州轨道交通4号线大学城专线新造站至市莲路区间位于广州市新造镇曾边村,为矿山法施工暗挖隧道,长917.4 m。工程设3个竖井。本区间风化基岩埋深较深,表层多分布有较厚的坡、残积土层,局部低洼沟谷分布有少量软土。主要为软弱混合岩粉砂质黏性土层,该层表现为白色,软塑状,含水丰富,含砂率高,黏性很差,孔隙率达到0.9%;自稳能力差,井壁暴露后马上坍塌;自稳时间短,承载能力差,遇水后几分钟便软化崩解;触变性强,施工扰动易液化,由于地下水的渗流而导致竖井涌砂,井壁后背坍塌,形成空腔;暗挖隧道167 m位于可塑残积砂质黏性土层中^[65]。广州地铁2号线新(港东站)—磨(礞沙站)区间,隧道设计为两条单线隧道,净间距为25 m,暗挖区间长80 m,埋深约5 m。隧道在粉砂及粗砂层中穿过^[66]。

南京地铁1号线张府园—三山街区间隧道全长805 m,根据地铁工程系统设计,需要在上、下行隧道之间修建一条联络通道,该通道距离张府园站430 m处,通道拱顶埋深13.2 m,通道宽3.3 m、高3.6 m、长17.2 m,主要起紧急连通作用。通道开挖地层以粉质黏土和粉细砂为主,地层土质均匀、透水性强、孔隙比大、含水率高、强度低,在动力作用下易产生液化现象,属于流砂地层,承载力低,无法自稳^[67]。

重庆市主城区排水工程是通过世界银行贷款修建的,该工程计划总投资27亿元人民币,工程完成后将从根本上解决重庆主城区污水处理问题,对保证三峡库区环境有十分重要的作用。重庆市主城区排水工程CQWW2.01标段57~61隧洞埋深8~10 m,开挖断面呈直边墙半圆拱形,高宽约3 m。隧洞围岩及上覆岩土为砂质黏土,采用人工挖凿。由于砂质黏土自承能力差、遇水极易软化,在隧洞施工期间很容易出现隧洞变形和地面沉降^[68]。

长沙市芙蓉南路电缆隧道H标段主隧道全长1183.98 m,埋深20.5~31.4 m,共设置竖井4个。其中8号措施井深33 m,依次穿过回填土、粉质黏土夹卵石层、中至粗砂层、砾砂至圆砾层、粉质黏土层和强风化泥质砂岩层:中至粗砂层,湿至饱和,稍密至中密,含少量黏性;砾砂至圆砾层,湿至饱和,中密,卵石含量一般占35%~65%,多为亚圆形,粒径2~

15 cm, 其余为中至粗砂, 局部含少量黏性土, 属极松软的地层^[69]。

早在 20 世纪 70 年代, 哈尔滨市沿城市主轴修建了一条人防隧道(简称 7381 人防工程), 该工程是按照当时的地铁标准设计和施工的, 是运用矿山法施工建造的, 隧道结构是单洞双线“马蹄形”断面, 车站为单层三联拱形式, 结构限界满足当时的地铁技术标准。隧道埋深 15~26 m, 土质以粉质黏土为主, 间或有细砂。细砂层厚度分布不均, 0.3~6.1 m, 干、中密。地层物理力学特性较好, 地下水水位低于洞体埋深, 有利于地下洞室的施工、稳定^[70]。

尼泊尔巴格玛迪环保隧道工程是用来解决该国最大的佛教圣地一条内河水质污染问题的环保配套工程, 也是该国首都加德满都市的一项重要市政工程, 一直受到国际环保组织和尼泊尔各级政府的极大关注。我国萍乡矿业集团于 2000 年 5 月在尼泊尔承建了巴格玛迪环保隧道工程。该隧道处于松散砂质地层中, 隧道底板约 1.5 m 以下为流砂含水层。特殊的地质条件和当地人、财、物条件的限制, 给工程施工带来了极大的困难^[71]。

砂质土围岩不仅在城市地下工程中常见, 而且在各种公路、铁路及水利工程中也是很多见的。

如宝兰二线天兰段新松树湾隧道位于甘肃省定西地区陇西县境内, 所穿大营梁为渭河水系和祖厉河水系的分水岭。隧道范围揭示的地层为上更新统风积黏质黄土, 中、下更新统滨湖相杂色砂黏土和老黄土。其中隧道通过长度长、对工程影响大的杂色砂黏土: 灰色、灰黑色为主, 土质不均, 具有层理, 结构紧密, 粉粒为主, 夹砂层及砂、砾石透镜体, 含有机质及盐碱, 局部见有贝壳碎屑。土体工程性质差: 半干硬至硬塑者, II 级普通土, II 类围岩; 软塑及流塑者, I 级松土, I 类围岩。新松树湾隧道出口端为杂色砂黏土地层。在隧道施工 I 类围岩段和 II 类围岩段时, 都存在杂色砂黏土围岩开挖暴露软化松胀及量测的洞内收敛值较大等问题^[72]。

罗家山隧道位于宝兰二线 DK1 268+036~DK1 269+381 处, 全长 1 345 m, 为单线铁路隧道。罗家山隧道出口与渭河河滩高差为 15 m。由地质揭露判明, 洞口拱部山体围岩为松散的粉砂、卵石结合体, 厚 4 m。原为渭河古河床, 其上部覆盖 1 m 左右的黄土层。为保证隧道施工能正常进行, 对洞口边脚部位进行清理, 在清理过程中, 洞口上部的粉砂、卵石发生坍塌, 迫使施工暂停^[73]。

我国西北地区, 风积砂地层较多, 当新建的铁路隧道通过风积砂地层时, 在施工上会遇到不少难题。目前, 正在修建的丰准线和神朔线上有好几座隧道程度不同地通过风积砂地层。其中最典型的是神朔线上的杏树岭隧道。风积砂地段的隧道施工技术在我国铁路系统中还没有成型的方案。杏树岭隧道位于神朔线北段, 全长 463 m, 覆盖层厚度为 15~30 m, 属浅埋。除出口约有 20 m 黏砂土外, 其余均为风积粉细砂层, 属 I 类围岩。砂的颗粒细而均匀, 大多集中在 0.05~0.1 mm, 属粉细砂, 级配很差, 孔隙比大, 开挖扰动后呈松散状, 无黏结力, 自稳能力差。隧道上弧导开挖后, 地表有明显的沉降^[74]。

新杏树岭隧道位于神(神木)朔(朔州)铁路复线神木北至神池南段, 全长 241 m。该隧道位于中低山黄羊城沟峡谷区, 沟谷发育。洞身穿越山梁上部为半固定砂地, 风积细砂厚度大于 30 m。地质情况: 细砂、黄土质黏砂土、粉砂, 属 VI 级围岩^[75]。

新东沟 1 号隧道位于神朔复线神木北至神池段, 全长 326 m。隧道穿越 I~IV 类围岩, 其中 I 类围岩段长 117 m, 洞顶覆盖层 5~17 m, 为第四系全新统风积砂, 呈淡黄色、褐黄色, 颗粒成分以石英、长石为主, 稍湿至潮湿, I 级松土, $\delta_0 = 100 \text{ kPa}$ 。开挖后土体自稳能力差,

易坍塌,地面沉降量难以控制^[76]。

经棚隧道位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗经棚东侧,是国道 306 线控制工程。隧道全长 290 m。隧道开挖净空宽×高为 12.38 m×9.31 m。隧道洞身处在风积砂丘中,最大埋深约 34 m;隧道通过地区上层为第四系上更新统地层,下部为燕山中期花岗岩,由进口向出口依次为粉砂层、细砂层、中砂层,局部见基岩风化壳出露^[77]。

大连大窑湾疏港高速公路位于大连市开发区,是建设中的中国最大的国际深水中转港之一——大窑湾港和沈(阳)大(连)、丹(东)大(连)高速公路连接的枢纽工程,该工程路线全长 28.44 km,总投资 6.2 亿元人民币。大连大窑湾疏港高速公路松树岭隧道进出口洞口段埋深 10 m 左右,设计为曲边墙三心圆弧拱形式,分离式单向三车道,设计时速 120 km。开挖断面高 10 m、宽 18.4 m,为大跨度开挖断面结构形式。隧道围岩及其上覆盖层为砂质黏土。由于砂质黏土自承能力差、遇水极易软化,在隧道施工期间很容易出现围岩变形和地表下沉^[78]。

城陵矶长江穿越隧道为西气东输忠—武区段工程长江水下隧道部分,是万里长江第一长隧道,该工程位于城陵矶下游约 4 km 处,过江隧道全长 2 756.4 m,先由南北两岸施作竖井到达隧道设计高程再进行隧道施工。南岸竖井直径 7.5 m、深 35.5 m,设计第四纪含水砂层采用沉井法施工,嵌入基岩 2.0 m,沉井段共 23.5 m 深,其余 12 m 段采用矿山法施工。施工时当沉井沉至 20.8 m 接近基岩时下沉极其困难,为此在刃脚距基岩平均 1.3 m 处提前封底,封底后采用注浆堵水加固砾砂、卵石层地层,采用矿山法施工^[79]。

长沙市某电缆隧道全长 993 m,除部分斜井段外全部为暗挖,采用新奥法进行施工。该隧道平均埋深 17 m。隧道要穿越 3.7 m 深的砂砾层^[80]。

西安至安康线是新建单线 I 级电气化铁路。王家堂隧道位于 DKZ03+748~DK204+045 段,全长 297 m。隧道从片岩逐渐过渡到粉砂层;出口端 182 m 处在志留系下统片岩之中。接下 40 m 隧道拱顶、拱部在粉砂层中而边墙和隧肩处在片岩之中;出口段 75 m 隧道处在粉砂层中。粉砂层为旬河古河道沉积物,含泥量 5%~10%。潮湿,有少量毛细水活动,属 I 类围岩,结构松散,自稳能力差,一经扰动即滑坍,极不稳定。处理不好,在开挖过程中常出现变形失稳涌出。在无预防整治措施的情况下将破坏支护,危及设备、人员安全,严重的通天冒顶,处理十分困难^[81]。

厦门翔安海底隧道全长 5 900 余米,是我国第一条海底隧道。隧道出口端穿越 300 多米长的浅滩砂层段。暗挖隧道穿越饱水的海滨砾砂层,施工存在许多难题,其中主要的难点,就在于饱水砾砂层孔隙率大,渗透系数大,处理措施不当,就会发生涌水涌砂,连通大海的灭顶之灾^[82]。

乌鞘岭特长隧道进口端为第四系全新统冲、洪积黏质黄土浅埋段,隧道覆盖层厚 7~14 m,洞身穿过段主要为现代河床冲积、洪积层和山坡坡积层,由黏质黄土、卵石土、碎石土组成。围岩地质差,地下水丰富,突水、突泥、滑塌、变形、塌陷现象极易发生^[83]。

酒泉冰沟电站位于甘肃省酒泉地区,引水隧道全长 7 100 m,其中 4 630 m 穿过酒泉砂砾层带^[84]。

老爷岭隧道全长 3 958 m,为宝中线六大控制隧道之一。该隧道进口 DK150-I+856~DK151-I+930 段为砂砾地段,该段围岩除少量为钙质胶结外,大部分为泥质胶结,较为松弛,设计判断大部分为 IV 类软弱围岩。钻眼放炮的渣体为以砂砾石为主的松散体,粗粒状^[85]。

梧桐山下行隧道,是沟通深圳、盐田港、香港的一条咽喉要道,全长2 370.41 m,设计为双车道。隧道进口端覆盖层厚11~20 m,属浅埋,其中38 m长出现了砂层,厚0~6 m,主要成分为粗砂,含粒径2~3 cm的砾石,在隧道施工中极易发生塌方^[86]。

老鸦峡隧道左洞长2 835 m,右洞长2 830 m,是青海省马平高速公路的重点控制工程,施工的第八合同段为出口段。出口段地层为砂卵石层,内部多处采空区,隧道出口于该层或其下部穿过。怎样快速、安全地进洞是本隧道施工的重点和难点^[87]。

西气东输工程潜江—湘潭支线某长江穿越隧道主要是由南、北两岸竖井和中间隧道组成。其中南岸竖井深35.50 m,北岸竖井深67.55 m,穿越隧道长约2 700 m。竖井上部采用沉井法施工,下部采用矿山法施工,竖井间穿越隧道北段采用矿山法施工,南段采用盾构法施工。淹井事故发生在北岸竖井,该竖井主要穿越的地层自上而下依次为:粉质黏土,粉砂,细砂角砾,全、强风化带,中风化带及微风化带绿泥质石板岩^[88]。

南水北调工程作为世界上最大的水资源配置工程之一,将是解决北方地区缺水的有效措施,中线工程负担着向干旱最严重的河南、河北、北京、天津等地区供水的任务。穿黄工程是中线输水的关键工程,作为输水方案之一的隧道工程,其开挖外径近10 m,双线,拟采用盾构法施工。穿黄隧道地基砂层厚一般为30~70 m,主要为第四系全新统冲积层,并可细分为几个亚层。自上而下为:粉细砂,厚8~13 m;细砂夹少量中砂,厚3~18 m;中细砂层,厚5~56 m,属于易液化的砂土范围。根据测定,砂层的相对密度平均在0.70以上,属密实状态^[89]。

本桓公路新建八盘岭隧道工程位于辽宁本溪满族自治县泉水镇与田师傅镇之间,全长1 850 m。由于洞顶覆盖层薄,设10 m明洞。其进洞段围岩为强风化灰岩坡积而成的黄褐色碎石土,结构松散,其间夹杂砂土^[90]。

神盘隧道位于陕西省神木县境内,隧道全长240 m,穿越地层为粉土、古土壤与粉质土互层、砂层、粉土与红黏土互层,该隧道有85 m穿越地层为砂质低液限黏土夹砂层,且砂层位于拱顶1~2 m,土质松散,稳定性差,极易造成坍塌^[91]。

湖南省某电缆隧道工程属城网改造项目,起于芙蓉变电站,顺芙蓉中路、芙蓉南路,经新中路立交桥,过京广铁路,沿长沙大道,止于长沙大道友谊路,主隧道全长6 988 m。其中主隧道净宽2.2 m,净高2.73 m,开挖宽度3.0 m,开挖高度3.44 m。本工程斜井穿越的地层为人工回填土,淤泥及淤泥质土,第四系冲积层粉质黏土,第四系冲积层的砾砂、圆砾、中粗砂及卵石层,第三系统性至白垩系强风化泥质粉砂岩,其中第四系冲积层的砾砂、圆砾、中粗砂及卵石层垂直厚度达10 m以上。斜井施工进入该段地层后,由于土体自稳能力差,拱部和边墙塌方严重,随时有大塌方的危险^[92]。

武汉长江隧道工程为双孔四车道的公路隧道,隧道长3 270 m。从本工程场地的地质特征、钻孔柱状图与室内常规试验结果可以看出,武汉长江隧道工程沿线场址都分布有厚度不等的全新世粉质黏土和砂层,沉积物厚度大,且江北、长江河道和江南两岸场地上部(20 m以内埋深)均发育粉土、粉细砂、细砂^[93]。

日本在东名高速公路改建工程的大井松田—御殿场段新建9座三车道断面的隧道。其中,自御殿场的所领第一、第二隧道位于覆盖层浅的未固结软弱砂土地层中,工作面自稳困难^[94]。

日本的舞子隧道是一座3.3 km长的三车道双孔公路隧道,位于本州岛—四国桥梁工程的神户—鸣门线路神户端垂水交汇处以及与明石海峡大桥相连的舞子高架桥之间。隧道大约有

四分之一的长度穿过称之为大阪组的非黏结砂和砾石地层。此隧道主要用喷锚施工法进行开挖^[95]。

日本在神户市的西北神地区修建的阪神高速公路北神户线，是为沟通地区与地区之间及地区与城市间的交通而修建的一条公路。井吹隧道位于该线的起点处，全长为 195 m，开挖断面为 207.3 m²。地层为土砂覆盖层，只有 19 m。隧道采用暗挖双孔的形式施工。地质主要是以第三纪鲜新世—第四纪洪积世的大阪层群（砂、砾、黏土层）厚层分布，在丘陵台地的地表为堆积层（黏土与砂砾瓦层）分布。同时在两洞口附近山腰覆盖的是岩锥堆积层（黏土夹砂层、砂砾层）。隧道开挖主要是在大阪层群砂砾层内。在砂层和黏土层中的 N 值，50% 以上是未固结层。在隧道的中下部范围内，于这种砂砾层中多数含有直径为 5~50 mm 的圆形燧石，而基岩是以粗砂为主，同时也含有相当成分的黏性土。拱部则以粉砂为主体，并多半含有细砂成分。然而，预料几乎是不会有涌水的威胁^[96]。

目前，我国正处于基础设施建设发展的高峰，各种高速交通设施正在或有待建设，其间必然会遇到比以前地质条件更加复杂的情况。如台湾新建的高速铁路，其中由台湾高铁公司负责修建的 330 km 高速铁路中，隧道有 44 座，其中除一条长 2 149 m 的迴龙隧道外，均属软弱地层，主要组成为卵砾石及胶结软弱的砂泥层。这些软弱地质常是往年在定线规划时避开的，以降低施工的风险，故施工经验甚少^[97]。而所参考的国内外类似地质情况的围岩分类方法都不适用于此。所以针对上述地质情况制定了一个新的区别于一般岩体围岩的分级方法^[98]。由此可见，围岩分级应是一个完善的体系，应尽可能包括各种地质情况。况且，围岩分级并非完全是围岩稳定性的分级，还涉及支护结构设计参数的确定、工程定额的制定，甚至还涉及工程完成后的维修和养护工作。在这方面，日本走在了前面，日本国铁中已有较完善的、明确的土质隧道围岩分类^[99]。

从以上分析可以看出，砂质土围岩的范围很广，研究砂质土围岩分级是对当前我国有关规范的有力补充，并且对世界范围内的隧道及地下工程稳定性研究工作可以起到承前启后的作用。这也说明，我国有必要进行砂质土围岩采用定量指标方法进行分级的研究。

1.2 砂质土围岩分级研究现状

1.2.1 砂质土围岩物理力学指标值研究现状

1. 岩土工程勘察中砂质土工程参数的评定方法

岩土工程勘察中砂质土工程的力学指标主要包括承载力、压缩模量（或变形模量）和抗剪强度。

砂土工程参数的评定在岩土工程勘察中是个难题。其原因在于要采取保持天然孔隙比和原状结构的砂土土样是非常困难的。通过原位测试评定砂土的工程参数是唯一可行的途径。砂土中常用的原位测试有标准贯入试验（SPT）和静力触探试验（CPT）。通常的研究方法是建立利用 SPT 的 N 值和 CPT 的 q_c 值评定砂土的相对密实度 D_r 、内摩擦角 φ 和压缩模量 E_s 。

或变形模量 E 的经验关系^[100]。

现行求取粉土、砂土压缩模量的方法有两种：一种是野外取原样进行室内试验，另一种是通过原位测试的方法（标准贯入试验、静力触探试验）求得。其中使用标贯击数法求得压缩模量是一种间接方法，由于室内试验方法要经过从现场到实验室开土一系列过程，粉土、砂土的原状结构不同程度地遭到破坏，从而改变了其压缩模量的真实可靠性。所以，除特殊要求的工程外，均采用标贯击数来间接取得粉土、砂土的压缩模量^[101]。

静力触探的重要应用之一是确定砂土的相对密实度和内摩擦角。沟通 q_c - φ 关系的方法途径各异，但归纳起来无非有 3 种：① 建立 q_c - $\bar{\sigma}_v$ - D_r ($\bar{\sigma}_v$ 为有效覆盖层压力) 曲线图，进而用 D_r - φ 图确定 φ ，如 Schmertmann(1977) 以及 Iumme 和 Christoffersen(1983) 等；② 用 q_c - $\bar{\sigma}_v$ - D_r 曲线确定 φ ，如 Robertson 和 Campanella (1983)；③ 直接建立 q_c - φ 关系曲线。前面两种方法均牵涉到难以测定的砂土重度，尤其是水下土重度的问题。另外， q_c 与 D_r 或 γ_d 的关系还因饱和与非饱和而不同。所以，如果仅仅为估计 φ ，使用前两种方法反而不如第③种方法简便可靠^[102, 103]。

在建立 N 与 φ 的相关关系方面，国内外有很多经验公式和相应表格。吉布斯和霍尔兹^[104] (1957) 对砂土 N 与 φ 进行统计建立相关方程，并结合砂土粒度和覆土层有效压力 ($\bar{\sigma}_v$) 给出了 N - $\bar{\sigma}_v$ - φ 表格。

黄涛^[101] (1997) 通过对现行确定粉土、砂土压缩模量方法的利弊进行分析，提出了一种使用标贯击数（标准值）直接确定粉土、砂土压缩模量 $E_{1.2}$ （标准值）的方法。艾军等^[105] (1993) 通过大量有关风化砂砾土的物理力学性质的试验，对风化砂砾土的强度与含水量、重度的关系及风化砂砾土在不同含砾量时的最大干重度与最佳含水量的关系和塑性指数对风化砂砾土最大干重度的影响进行了研究，得到了几个物理力学指标值之间的定量关系。王晓峰^[106] (1994) 对齐齐哈尔城区风成砂土的物理力学指标进行了统计与分析，提出了齐齐哈尔城区风成砂土的物理力学指标的特征值，建立了天然含水量与天然重度的回归方程，提出了已知天然含水量确定风成砂土天然孔隙比及天然重度的经验关系表。朱小林^[100] (1995) 提出了由标准贯入试验 (SPT) 和静力触探试验 (CPT) 估算上海砂土的岩土参数（相对密实度 D_r 、内摩擦角 φ 和压缩模量 E_s ）的方法。杜学玲等人^[107] (2000) 通过室内系列化的直剪试验和静力触探模拟试验，对沙漠砂的抗剪强度特征取得了规律性的认识，并建立了砂土内摩擦角与锥尖阻力之间的经验关系。研究认为：非饱和砂内摩擦角 φ 与相对密实度 D_r 和含水量 w 的关系均很密切，应进行二元回归分析；而饱和砂则可看做仅随 D_r 增加而增大。陈洪凯等^[108] (2000) 基于对重庆库区侏罗系泥岩典型风化松散土体大量的室内敏感性测试成果，比较详细地分析了天然重度、强度参数、渗透系数与含水量之间的基本关系，探讨了 C 、 φ 随天然重度及含水量之间的变化特性。陈继等^[109] (2002) 在对塔克拉玛干沙漠砂大量现场原位试验、室内大型原位模拟试验的基础上，提出了用静力触探方法 (CPT) 和标贯法 (SPT) 获取沙漠砂变形模量的经验公式 q_c - E_0 和 N - E_0 ，并把经验公式表格化。杨小荟等^[110] (2005) 通过野外勘察和大量物理力学性质试验研究结果表明，沙漠砂力学性质的变化主要受干密度和含水量的影响：干密度越大，含水量越小，其力学性质越好。王淑云等^[111] (2005) 分析了几组原状、重塑和配制土样的静三轴试验结果，认为颗粒级配和结构性是影响粉砂应力-应变关系和强度特性的两个主要因素。杜学玲等^[112] (2005) 为了在沙漠地基勘察中推广应用静力触探技术，在控制相对密度和含水量的条件下，进行了一系列室内大、中型槽原位测试模拟试验及相关

土工试验,取得了塔克拉玛干沙漠静力触探指标 q_c 、标准贯入试验锤击数 N 和抗剪强度指标 φ 的一系列有效数对,并进行了线性回归,建立了 q_c - φ 和 N - φ 之间的相关关系,且论证了二者之间的协调性。万志杰^[113] (2005) 利用砂砾石的物性指标评价其力学指标的方法在中小型水利水电工程地质勘察中具有较为广阔的应用前景,对中小型水利水电工程地质勘察具有积极的指导意义。

砂质土力学指标主要是通过现场力学试验来确定的,但现场力学试验受时间、地点、环境、交通、经费、土体自身结构、试验设备及试验技术等条件的限制,往往无法在现场进行,且试验结果较分散,离散性较大。而常规简易土工试验设备简单、费用低廉、技术难度小,时间、地点、环境、交通等外界条件对试验结果的影响不大。故采用由常规简易土工试验得出的物性指标评价需由现场力学试验方可确定的力学指标,在工程地质勘察中,不失为一种行之有效的手段。这是因为,组成砂质土的粗颗粒物质在从物源区向下游的搬运、沉积过程中,软质成分的粗大颗粒因冲刷、磨蚀作用而难以堆积下来,除特殊情况外,绝大部分粗大颗粒成分均为硬质岩石,这些粗大硬质岩石颗粒其本身的力学参数都很高,故造成砂质土力学参数差异的主要因素是土体的物性状态,即密实度和颗粒级配情况。而颗粒级配即粗粒、细粒相对含量又体现在密实度的变化上,因此粒径接近的砂质土体力学参数的高低,主要取决于密实度的大小。鉴于砂质土的承载力随密实度的变化而变化,密实度在现场测试比较困难,大多由动探试验确定,通过收集砂质土的动探击数 ($N_{63.5}$) 与其孔隙比 (e) 资料,建立二者之间的相关关系,确定其相关方程。砂质土体压缩模量或变形模量的获得,大多数是依据荷载试验,但荷载试验外界条件及代表性等有限制,故在岩土勘察中常利用动探资料来间接评价。通过收集动探击数与由荷载试验求得的压缩模量或变形模量资料进行相关分析,建立压缩模量或变形模量与动探击数 ($N_{63.5}$) 之间的相关关系,确定其相关方程。结合孔隙比与干密度之间的关系式,即可获得它们与干密度之间的相关关系式。砂质土的力学指标与其物性指标密切相关:级配良好的砂质土,其内摩擦角随密实度的增大而增大;级配不连续的土,内摩擦角除与密实度关系密切外,细粒含量对土体的内摩擦角也有影响。级配良好的砂质土,由于粒间接触多,比均匀土颗粒之间的咬合作用强,其内摩擦角比均匀土大,且其内摩擦角随密实度的增大而增大;级配不连续的砂质土,除密实度外,粗粒含量对土体的内摩擦角也有影响。荷兰兹和艾利斯对黏土质砂砾石或河床砂砾石三轴试验结果得出:当粗粒含量在 65% 范围内时,摩擦角系数随粗粒 (>5 mm) 含量增加而增大,超过 65% 则有下降趋势。国内的大量研究亦表明:当粗粒含量在 60%~70% 范围内时,其内摩擦角最大。这是因为当粗粒含量达 60%~70% 时,土体级配最优,其干密度较大;当粗粒含量偏高时,虽然土体骨架颗粒坚固,但骨架间的孔隙因细粒含量低而得不到足够的充填,致使土体的密实度降低,颗粒间接触面积减少而土的抗剪强度降低。反之当土体内细粒含量偏高时,土体缺乏足够坚固的骨架结构,也不可能出现较高的抗剪强度。已有研究表明,当粗粒含量小于 30% 时其强度由细粒填料控制^[114-118]。

2. 根据工程岩体分级选择岩体力学参数的研究

现行的《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004) 及《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005 J 449—2005) 中都提供了推荐的各级围岩的物理力学指标标准值,在数值大小上,两种