

国家自然科学基金 (41372289) 资助
山东科技大学科研创新团队支持计划资助
山东科技大学著作出版基金资助

膨胀性黄土隧道 变形特性及其支护技术

王清标 路 刚 李方东 著
吕荣山 白 云 张军贤



中国建材工业出版社

国家自然科学基金(41372289)资助
山东科技大学科研创新团队支持计划资助
山东科技大学著作出版基金资助

膨胀性黄土隧道变形特性及其 支护技术

王清标 路 刚 李方东 著
吕荣山 白 云 张军贤

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

膨胀性黄土隧道变形特性及其支护技术 / 王清标等

著. —北京: 中国建材工业出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-5160-1292-5

I. ①膨… II. ①王… III. ①土膨胀性—土质隧道—
变形—研究②土膨胀性—土质隧道—支撑—研究 IV.
①U459.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 237182 号

内 容 简 介

本书共十章, 采用理论分析、室内试验、现场试验、监控量测、数值模拟等研究方法与手段, 研究了膨胀性黄土隧道的变形特性及支护技术。第一章介绍了膨胀性黄土概况、工程特性以及膨胀性黄土隧道国内外研究现状; 第二章至第四章, 分析了膨胀性黄土隧道围岩变形破坏模式、变形原因和变形特征; 第五章介绍了几种比较常用的隧道超前地质预报方法; 第六章分析了膨胀性黄土隧道沉降特性及其控制技术; 第七章分析了膨胀性黄土隧道支护技术; 第八章至第九章以小河沟隧道为工程案例分析了膨胀性黄土隧道支护技术及其隧道监控量测技术; 第十章简要分析了我国膨胀性黄土隧道建设所面临的问题与发展展望。

本书结构体系完整, 逻辑合理, 论述清晰, 内容丰富, 创新性强, 实用价值大, 可为从事膨胀性黄土隧道规划、勘察、设计、施工、监测和安全运行管理的专家、学者和工程技术人员提供参考。

膨胀性黄土隧道变形特性及其支护技术

王清标 路 刚 李方东 吕荣山 白 云 张军贤著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 10.25

字 数: 351 千字

版 次: 2015 年 11 月第 1 版

印 次: 2015 年 11 月第 1 次

定 价: 128.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 公众微信号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

我国黄土区域不但分布广泛，青海、宁夏、甘肃、山西、陕西、河南、山东等省均有分布，而且黄土面积覆盖率大，总面积占国土面积的6.7%，高达64万多平方公里，并且大部分为膨胀性黄土。在膨胀性黄土隧道建设过程中，掌子面失稳、塌方及底鼓等工程地质灾害时有发生，危害愈来愈严重，因此，极有必要开展膨胀性黄土隧道变形特性、失稳演化机理以及支护技术研究。

本书第一章详细分析了膨胀性黄土概况、物理力学特性、工程特性、国内外研究现状、隧道变形特点、支护方法等；第二章分析了膨胀性黄土隧道围岩变形破坏原因、破坏模式、破坏准则和破坏特征；第三章分析了膨胀性黄土隧道变形影响因素；第四章分析了隧道建设期变形破坏的特征、模式以及危害，提出了黄土隧道深浅埋鉴定依据，分析了深、浅埋黄土隧道的变形特性；第五章分析了隧道超前地质预报技术；第六章分析了膨胀性黄土隧道沉降变形理论、变形规律、影响因素及控制标准与控制技术；第七章详细分析隧道支护原理以及支护结构与围岩相互作用的机理，并着重介绍了膨胀性黄土隧道钢架作用机理；第八章详细分析了小河沟隧道施工组织设计以及施工技术方案；第九章以小河沟隧道为案例，分析了隧道量测内容和方法；第十章简要分析了我国膨胀性黄土隧道建设所面临的问题与发展展望。

本著作依托中铁十四局承建的太原至兴县铁路，借鉴有关学者、工程技术人员的研究成果，提炼、凝结而成。在写作过程中，王其升高工、盛春革高工、胡世权教授级高工、王永余高工等给予了大量的帮助，在此表示深深的谢意！同时，对于在写作过程中参考到的文献作者和单位表示衷心的感谢！

由于学识水平有限，工程实践经验不够丰富，书中难免出现疏漏、不妥甚至错误之处，敬请批评指正，以利学习和改进，不胜感激！

作者

2015年9月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 膨胀性黄土概况	(1)
1.1.1 膨胀性黄土的分布	(1)
1.1.2 膨胀性黄土的成因	(2)
1.1.3 膨胀性黄土地层划分	(3)
1.1.4 膨胀性黄土的基本特征	(3)
1.2 膨胀性黄土的物理力学特性	(9)
1.2.1 物理特性	(9)
1.2.2 力学特性	(9)
1.3 膨胀性黄土的工程特性	(10)
1.3.1 黄土隧道围岩压力特征	(10)
1.3.2 物理力学参数	(10)
1.3.3 膨胀性黄土围岩强度特征	(12)
1.3.4 膨胀性黄土变形特征	(18)
1.3.5 构造特性	(22)
1.3.6 黄土隧道初期支护的变形特征	(27)
1.4 膨胀性黄土隧道的研究现状	(28)
1.4.1 国外膨胀性黄土隧道研究现状	(28)
1.4.2 国内膨胀性黄土隧道研究现状	(28)
1.5 膨胀性黄土隧道变形特点	(29)
1.5.1 隧道变形的原因分析	(30)
1.5.2 隧道变形引发的事故特征	(34)
1.6 膨胀性黄土隧道支护方法选择	(35)
1.7 膨胀性黄土隧道支护技术研究的任务和意义	(36)
1.7.1 研究任务	(36)
1.7.2 研究意义	(36)
参考文献	(36)
2 膨胀性黄土隧道围岩变形	(39)
2.1 隧道围岩变形及破坏分析	(39)
2.1.1 围岩失稳变形原因	(39)

2.1.2	岩性的作用 ^[5]	(41)
2.1.3	地下水的影响 ^[6-7]	(41)
2.1.4	埋深的影响	(41)
2.1.5	施工因素的影响	(42)
2.2	围岩破坏模式	(42)
2.2.1	隧道围岩的局部塌陷	(42)
2.2.2	隧道围岩的拱形塌方	(42)
2.2.3	隧道围岩的异形破坏	(43)
2.2.4	隧道围岩的岩爆	(43)
2.3	围岩破坏准则	(44)
2.4	膨胀性黄土隧道围岩变形特性 ^[20]	(44)
2.4.1	黄土围岩结构	(45)
2.4.2	黄土围岩结构变形特征 ^[22]	(45)
2.4.3	黄土隧道围岩变形分类 ^[23]	(46)
2.4.4	黄土隧道围岩应力重分布 ^[24]	(47)
	参考文献	(50)
3	膨胀性黄土隧道变形原因分析	(52)
3.1	水对黄土隧道变形的影响 ^[1-3]	(52)
3.2	围岩特性对黄土隧道变形的影响 ^[4-7]	(53)
3.3	初期支护对黄土隧道变形的影响 ^[8-9]	(53)
3.4	施工工艺对黄土隧道变形的影响 ^[10-12]	(54)
3.5	黄土隧道围岩受力的弹塑性理论解析 ^[13-14]	(54)
3.5.1	弹性理论解析	(54)
3.5.2	弹塑性理论解析	(55)
	参考文献	(56)
4	膨胀性黄土隧道变形特性	(58)
4.1	建设期变形破坏的特征	(58)
4.2	建设期变形破坏的模式	(59)
4.3	建设期变形破坏的危害	(61)
4.4	深埋黄土隧道的变形特性	(61)
4.4.1	隧道拱顶及拱脚变形特点	(61)
4.4.2	深埋膨胀性黄土隧道相对收敛变形特点	(62)
4.5	浅埋黄土隧道的变形特性	(62)
4.5.1	洞内变形对比分析	(62)
4.5.2	拱顶及地表沉降对比分析	(63)
	参考文献	(65)

5	膨胀性黄土隧道超前地质预报	(67)
5.1	常用的超前地质预报分类	(67)
5.1.1	地质分析法	(67)
5.1.2	超前勘探预报法	(69)
5.1.3	地球物理方法	(71)
5.2	超前地质预报的目的	(72)
5.3	超前地质预报包含的主要内容	(73)
5.4	超前地质预报存在的主要问题	(73)
5.4.1	缺乏超前地质预报完整概念	(73)
5.4.2	常见探测方法存在的问题	(74)
	参考文献	(75)
6	膨胀性黄土隧道沉降及防治	(77)
6.1	地表沉降变形理论及预估方法	(77)
6.1.1	经验法预测	(77)
6.1.2	理论预测法	(78)
6.2	隧道沉降的主要因素	(79)
6.3	隧道地表沉降控制技术与标准	(81)
6.3.1	隧道地表沉降控制技术	(81)
6.3.2	隧道地表沉降控制标准	(83)
6.4	施工工艺的优化 ^[21-22]	(84)
6.5	地表沉降规律分析	(85)
6.6	地表沉降控制标准 ^[23]	(85)
6.6.1	控制开挖进尺及步长	(85)
6.6.2	仰拱、衬砌控制沉降	(86)
6.6.3	防排水	(86)
6.6.4	支护体系的施作要点	(86)
6.6.5	预留变形量	(87)
6.6.6	二次衬砌拱顶注浆	(87)
6.6.7	隧道底处理	(87)
6.7	初期支护	(88)
6.7.1	喷混凝土	(88)
6.7.2	锚杆	(91)
6.7.3	钢筋网	(93)
6.7.4	钢架	(93)
	参考文献	(93)

7 膨胀性黄土隧道支护研究	(96)
7.1 支护原理分析	(96)
7.1.1 锚杆力学特性分析	(96)
7.1.2 喷射混凝土力学特性分析	(97)
7.1.3 复合衬砌结构安全性分析	(99)
7.2 支护与围岩相互作用研究	(100)
7.2.1 膨胀性黄土隧道围岩特征曲线	(100)
7.2.2 喷射混凝土的支护特征曲线 ^[18]	(103)
7.2.3 型钢钢架的支护特征曲线 ^[19]	(103)
7.2.4 格栅钢架的支护特征曲线 ^[22]	(105)
7.2.5 组合支护体系与围岩相互作用研究 ^[24]	(105)
7.3 膨胀性黄土隧道钢架作用机理分析及效果评价	(107)
7.3.1 喷射混凝土早期强度与弹模试验 ^[30-32]	(107)
7.3.2 钢架作用机理分析 ^[36]	(111)
参考文献	(115)
8 小河沟黄土隧道支护方法	(117)
8.1 工程概况	(117)
8.1.1 工程重难点	(117)
8.1.2 水文气象条件	(118)
8.1.3 安全预测评价及重难点对策	(118)
8.2 小河沟隧道施工组织设计研究	(119)
8.2.1 地质概况	(119)
8.2.2 设计原则 ^[1-2]	(119)
8.2.3 隧道设计类型及结构形式	(120)
8.3 小河沟隧道施工技术选择	(121)
8.3.1 施工工艺选择	(121)
8.3.2 施工技术难点和特点 ^[3-5]	(121)
8.4 超前支护	(122)
8.4.1 超前小导管	(122)
8.4.2 长管棚施工	(125)
8.5 初期支护	(127)
8.5.1 砂浆锚杆	(127)
8.5.2 中空注浆锚杆	(128)
8.5.3 钢筋网	(128)
8.5.4 钢拱架施工	(128)
8.6 防排水工程	(131)

8.6.1	透水盲管施工	(131)
8.6.2	防水层施工	(131)
8.6.3	结构防水	(133)
8.7	拱墙二次衬砌	(134)
8.7.1	施工准备	(136)
8.7.2	施工测量	(136)
8.7.3	钢筋制作与安装	(136)
8.7.4	台车定位	(136)
8.7.5	混凝土的运输、灌注和振捣	(137)
8.7.6	脱模养护	(137)
8.7.7	拱顶回填压浆	(138)
8.8	仰拱及填充	(138)
8.8.1	施工前控制	(138)
8.8.2	施工过程中控制	(139)
8.8.3	施工后控制	(139)
	参考文献	(139)
9	小河沟隧道监控量测	(141)
9.1	监控量测情况	(141)
9.2	监控量测措施	(144)
9.2.1	监控量测项目	(144)
9.2.2	隧道洞内、洞外观察	(145)
9.2.3	净空水平收敛量测及拱顶下沉量测	(145)
	参考文献	(147)
10	我国膨胀性黄土隧道建设发展趋势	(149)
10.1	我国膨胀性黄土隧道建设面临的问题	(149)
10.2	膨胀性黄土隧道发展趋势及展望	(149)
	参考文献	(150)

1 绪 论

1.1 膨胀性黄土概况

1.1.1 膨胀性黄土的分布

黄土是指第四纪形成的黄色粉砂质土状松散堆积物，具有特殊的成分以及性质，这使得黄土在工程地质中具备特殊的地位与影响，同时，黄土的地理分布在地球上也存在特殊的规律性。

纵观整个世界，黄土主要集中在中纬度的地区，这里的多为大陆性气候，气温较高，并且水分含量少，包括有草原、森林以及荒漠等，荒漠占大部分。在欧洲和北美洲等地区，北部边界大部分与冰川的南部分相连接，多数分布在美国、加拿大、德国、法国、比利时、荷兰、中欧和东欧各国、苏联白俄罗斯和乌克兰等地；在亚洲以及南美洲多数是沙漠和戈壁滩，主要分布在中国、伊朗、前苏联的中亚地区、阿根廷；在北非和南半球的新西兰、澳大利亚，黄土呈零星分布^[1]。

在我们国家，黄土分布相当的广泛，我国黄土主要分布在北纬 $30^{\circ} \sim 48^{\circ}$ 间，呈自西而东的条形地带，面积约 63.1 万平方公里，占全国土地面积的 6.7%。黄土高原、华北平原以及东北的南部是主要的黄土集聚区。黄土高原总面积达到了 27 万平方公里，占到了总分布的四分之三以上，从西边的贺兰山，东到太行山，向北到达长城边界，向南到秦岭，几乎全部是黄土的范围，分布面积广，厚度大，集聚了各个地质时期形成的黄土地层，具有很高的研究价值^[2,3]。

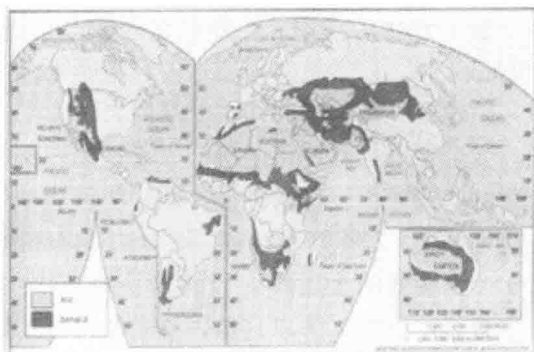


图 1-1 世界黄土分布图^[6]

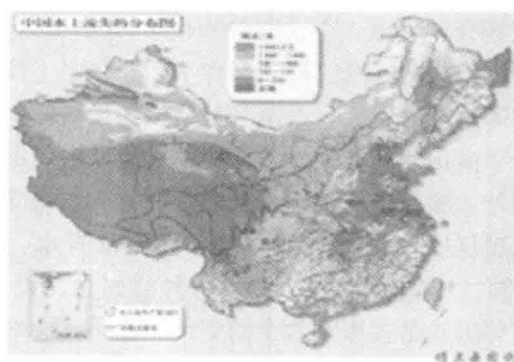


图 1-2 中国的黄土分布图^[7]

依照我国各个地方黄土的特点，大体上可以划分为三大分区^[4,5]：

1. 西北内陆盆地地区

这一地区位于青海湖的西边,包括甘肃的河西走廊地带、青海省的西北地区以及新疆的整个地区。这个地区的黄土出现片状的构造,主要出现在高度较低的丘陵上,有些山坡上也有分布,并且海拔超过 3000 米的青藏高原地区也发现了黄土的分布。在那些冲积平原地段,黄土地层分布较广,并且这一地区的黄土厚度一般都在 20m 和 30m 左右。

2. 东部山前丘陵及平原区

这一地区主要位于东北大兴安岭和太行山的东侧,例如:东北松辽平原、辽西冀北山地、华北平原和山东低山丘陵地区。位于哈尔滨南边,沈阳的北边的平原区多黄土分布,这一地区有很多的冲积平原和湿地,并且从表面就可以发现有明显的黄土存在。在大兴安岭和长白山的原始森林中很容易就可以发现裸露的黄土,并且在这一地区的黄土厚度分布不是很均匀:中部地区,厚度达到了 20~50m,而在周边地区仅仅只有 10m 或者还要小;也有极少的地区厚度超过 50m。辽西冀北山地的黄土和黄土状土层主要散布在西拉木伦河、老哈河、大凌河、滦河、永定河等河流的中上游,或堆积于河谷阶地,或覆盖于山丘坡面,多呈零散的片状,局部为连续的盖层,一般厚 10~20m,最大 30~40m。

3. 中部中游黄土地区

这一地区北靠长城,南到秦岭,东起太行山向西到达青海省的青海湖,这一广袤的地区除去中间小山脉(吕梁山、黄龙山等),基本全部是黄土的覆盖区,并且这里的黄土多是连续的,中间很少有间断,特别是位于黄土高原的晋西、陕北、陇东、陇中等地,累计的厚度超过了一百米,并且在局部还有更厚的土层,同时,这里是全球黄土厚度最大的地段。

这一地段存在的黄土各有特色。在海拔较低地区和海拔高的地区都会有黄土的存在,在黄土高原的西部海拔一般都会超过 2000m,黄土高原的东南地区,由于地势降低,黄土所处的位置也降到了 1000m 之下,而在黄土高原的东部地区仅仅只有 1000m,甚至几百米。这一地区黄土的分布还受到坡向影响,像如在山西高原的芦芽山荷叶坪,在山的西侧山坡上黄土则位于 2000m 的高度,而东北仅仅只有 1800m,并且黄土的厚度也逐渐变小。

1.1.2 膨胀性黄土的成因

引起膨胀性土产生变形的因素有很多,并且它们之间的关系是十分复杂的。膨胀土变形表现有两种形式^[8]:膨胀和收缩。这一过程是由于黄土经水的渗透,土颗粒之间相互挤压,导致形状的改变,最后保持平衡。膨胀土发生收缩和膨胀,最本质的原因是由自身所具有的内部结构决定的。但是这种结构在发生改变时,必须满足一定的条件,也就是说,当膨胀土处于满足变形的条件下才会发生形状或者结构的改变。在这里我们将这些因素进行进一步的划分,膨胀土的结构是决定性因素,水是导致变形的必要条件,这两种条件缺一不可。如果这里仅仅具有膨胀土的结构,而没有水,土也不会产生“胀”,没有“胀”也就不会有“缩”。而像如温度、湿度等环境因素,以及黄土所处地区的土层和土质结构等地形因素,这些因素都会影响黄土的变形,但是不会对其产生直接的影响,所以这些因素是间接影响因素^[9]。膨胀土发生变形,必须直接因素和间接因素同时满足。

我们在地球上发现的土,各有各的特点。在众多种类的土体中,只有黏性土是可以在满足一定的条件下产生体积胀大和缩小,最具有代表性是膨胀土。不管是其他类型胀缩土体,

还是像如黄土高原地区的膨胀土,能够引起变形的直接原因和间接原因都是不同的,尤其是所处的外在环境有差异的黄土。因此,引起膨胀土发生变形的原因千差万别,造就了膨胀土发生变形的性质和特征也相差很大。

1.1.3 膨胀性黄土地层划分

黄土起源于距离现在 200 万年左右的第四纪,经过长时间的堆积,以及各种地质作用,慢慢形成了黄土,并且每一段时期都有新黄土的形成。研究者们将这些不同时期的黄土分为四种:早更新世古黄土、中更新世老黄土,晚更新世新黄土以及次生黄土^[10]。古黄土沉积于早更新世,埋藏于地表数十米以下,其沉积厚度一般为 40~60m;老黄土沉积于中更新世时期,其厚度多随基岩地形的不同有厚有薄;新黄土沉积于晚更新世,多分布于平坦塬面和川台地区,沉积厚度在山区平均为 10m 左右,丘陵区达 20m 山坡一般为 6~7m;次生黄土堆积于年代晚的土层,这些土层因为形成的时间较短,并且没有进行压实,所以土质疏松,例如:谷坡、坡麓、沟底等地的黄土。

1.1.4 膨胀性黄土的基本特征

在实际的建筑工程中,黄土的特性是非常显著的,主要有:胀缩性、裂隙性、超固结性、崩解特性、强度衰减特性、风化特性等,这些特征的存在表明了,土体属于黏性土,并且液限较高,所以黄土具有特殊的特征^[11]:吸水膨胀,失水收缩。在交通设施高速发展的今天,经常会在膨胀性土的地质中进行隧道施工,所以,为了施工能够成功的进行,要对膨胀性土的各种特性进行详细的研究和分析,例如:物理特性、力学特性等。这些研究的进行,将有利于降低施工中容易产生的灾害和危险,并且有利于节省材料,减少消耗。

1. 黄土的成分特征

黄土的成分特征包括三个方面:①颗粒特征,②矿物特征,③化学特征。

黄土的颗粒含有多种^[12]:主要包括细砂、粉土、黏粒等,这些粉粒中,含有较多的粉粒直径超过 0.075mm 的颗粒,这些颗粒的质量占整个黄土总量的二分之一。通过试验的方法对黄土中的成分进行分析,发现黄土中含有的颗粒包括两种:砂质粉土和粘质粉土。颗粒直径小于 0.005mm 的是砂质粉土,其含量较少,仅仅只有 10%,粘质粉土的颗粒直径也小于 0.005mm,但是含量较砂质粉土的含量较多,多于十分之一。黄土位于不同的地区,所处的环境不同,形成条件也不相同,从而将会形成不同的土层。从黄土高原的不同地区选取黄土块,观察其剖面,会发现不同层的出现;然后按照西北向东南走向,黄土颗粒粒径将会逐渐变小,并且地层从下往上逐渐变粗,含有的矿物颗粒逐渐变多。如果黄土中含有较多的黏粒,对于隧道的稳定是十分有利的,因为黄土颗粒之间的粘聚力增大,增加围岩强度。

黄土含有很多的成分,其中也有多种矿物,按照粗细可分为^[13]:粗矿物和细粒矿物。粗矿物多为规则的棱角状晶体;细粒矿物多以伊利石、蒙脱石等黏土矿物为主;这其中占据首位的是石英、长石和云母,占有整个重量的五分之四,其中最多的是石英,超过总量的二分之一,其次是超过总量 30% 的长石,云母虽然相比其他的矿物含量多,但是仅仅占总量的 10% 甚至更少,其他的 20% 含有的物质偏杂,主要是黏土、辉石、角闪石等,也含有一定量的稀有元素。根据现在的研究结果,我们可以知道,研究人员已经在黄土中发现了 60 余种矿物成分。

黄土保持自己稳定的关键因素是石英、长石、云母三大矿物之间的相互连接,相反,伊利石、蒙脱石是亲水成分遇水容易发生湿陷,是造成隧道出现灾害最主要的因素。

黄土的化学成分主要有 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO 及 Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O 等,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 的含量占 73% 左右;黄土容易遇水发生反应,是因为在土中含有一些亲水的易溶盐,并且这些易溶盐物质具有区域性的特征。黄土中含有较多的碳酸钙盐,约占总量的四分之一。

2. 黄土的结构特征

我们通常说的黄土的结构,一般是说土体的组成、矿物成分、形状、颗粒排列顺序、颗粒之间的缝隙,以及各个颗粒之间的连接等。黄土的这些特征是黄土在成土的过程中经过大量的地质作用而形成的,所以能够反映成土时期的自然环境、化学变化、物理变化以及生物变化等现象。黄土的微观结构主要是与土体的颗粒形态、胶结程度和孔隙特征有关。

石英和长石是黄土骨架中最主要的两种颗粒:骨架颗粒和碎屑颗粒。水云母和方解石紧随其后。黄土的骨架颗粒主要有三类:颗粒状、簇状和胶凝状;碎屑颗粒的粒径位于 $0.01 \sim 0.025\text{mm}$ 之间,并且颗粒含量占总含量的一半还要多,排列比较杂乱,没有什么规则。在我们国家,各个地区的黄土骨架构成是不同的,西北地区以单粒为主,而在陕西、山西黄土高原地区,则以簇状颗粒为主。土体颗粒之间的连接式是决定土体强度的主要决定因素。在黄土中,胶结强度高的是黏土颗粒以及一些容易与水发生反应的盐类颗粒,还有一些腐植元素等。这些物质的存在决定了黄土内部结构的接触方式:架空、镶嵌和胶结。架空接触在力学行为中是一种结构体之间的两点相接或者是点与面相接,相连接的面积仅仅只有点的大小,发挥胶结作用小。镶嵌,从字面意思就可以知道,两者之间是两个面相互接触,接触面积较大,颗粒之间的空隙少,连结程度高;相比于以上两种接触,胶结接触是通过媒介体进行连接的,一般是利用填充的粘胶颗粒进行连接,颗粒之间空隙被粘胶颗粒填满,所以胶结程度高。黄土的骨架就是通过以上三种连接方式将颗粒之间的空隙连接在一块的。残积、坡积土与现有的黄土的特征不同,它们属于次生黄土的一种,具有斑状结构,空隙较大,具有更加复杂的形状。通过高倍镜对黄土结构进行观察,将会发现不同地区黄土的结构是不同的。经过调查发现:西北地区的黄土颗粒接触主要是架空接触,南方多为镶嵌接触,我国由北向南,颗粒接触逐渐由架空接触过渡为镶嵌接触^[14]。

黄土土体并不是十分的密实,期间含有大大小小很多的孔隙,孔隙率达到 50%。这些孔隙大小不一,一般将孔隙进行大小之分。小孔主要是一些小的地下昆虫啮取的巢穴;大孔是一些木本植物的根茎由于生长而产生的^[15]。这些孔洞存在对土体的胀缩性和湿陷性都会产生影响;同样,黄土的这些特点也是黄土与其他土体区别的主要判据。在很多大孔隙的周围或者是空隙本身的洞壁多含有碳酸钙类物质,这种物质是十分稳定的;架空孔隙产生的主要原因是因为骨架颗粒之间的堆积。孔隙的直径大小与构成空隙的空隙相比较是不在一个级别的,它要远远超出粒径的长度,遇水后,空隙周围的颗粒掉入空隙的内部,随着数量的增多,就造成了表面土体的塌陷。颗粒的排列有两种排列方式:在空间上呈现镶嵌排列,将原先存在的颗粒间的缝隙进行堵塞;在平面上,颗粒排列呈齿状排列;这两种排列方式是黄土最常见的排列方式,这样的排列使得土体较稳定。

综上,膨胀土本身的结构是土体发生胀缩的主要原因,结构的牢固关系着土体胀缩的趋

势。而且膨胀土的胀缩性也会使土体产生裂隙,同样,对于裂隙的尺寸也会产生影响。土体的胀缩性、裂隙性和超固结性是相互影响的。胀缩性是裂隙产生最主要的源头。研究发现,土体发生胀缩必定会引起土体强度的改变,因为土体发生胀缩后,原有的土体的密实程度被破坏,出现裂缝,这样水分就可以通过裂缝进入土体的内部,水进入后就会与土体再次发生反应,进一步产生裂隙,如此循环;最重要因素就是土体的裂隙性,裂隙是促使土体再次发生变化的助推剂。

(1) 膨胀土的胀缩性

从黄土土质角度看,膨胀土含有伊利石、蒙脱石等易与水发生反应的矿物,与水反应后,土体发生膨胀,增大了土体的体积。这是因为水进入后,土的湿度比原有的要大很多,土体中的蒙脱石和伊利石与水发生反应,土体发生膨胀,这样就会对工程产生危害,例如:道路路基中发生膨胀将会使路面出现隆起的现象,如果在楼房、道路等的地基中发生膨胀,将会严重破坏地基,建筑物的稳定也将得不到保障。土体内部的膨胀力比较抽象,最好的办法就是根据力的相互作用原理,对其外部进行施压,在施压过程中检测到的反抗作用力就是膨胀力。吸水膨胀,失水收缩。并且在土体变化的过程中,都会伴有裂隙的产生。与土体膨胀相同,土体收缩会对地基产生影响,会使道路产生陷落或者开裂等破坏。

水通过裂隙进入土体,引起土体的胀缩,破坏了土体原有的应力平衡,是土发生胀缩的主要原因。那么,如果要土体积无变化,不发生膨胀与收缩现象,就需要假设在没有水介质参与其中,只有膨胀土,亦或是膨胀土-水所形成的体系中的水不发生迁移。有时,在土体中尽管有水流动,并且同时受到外部荷载的约束,胀缩现象就不会发生。但是,值得注意的是,即使膨胀力未能突破外荷载的束缚,但是在土体中依然存在着膨胀的潜力。等待外荷载在一定条件下突然卸载,或者是膨胀力突破了外荷载的束缚,则强大的膨胀力即刻突显。相似地,如果该体系中的水含量十分少,此时水含量即使再迁移变化,对原土体的收缩影响也是微不足道的,但是,该体系此时一但吸水,则膨胀将会十分剧烈。

通过上面的分析可以发现,土体中含水的多少是膨胀土发生体积变化的最重要的因素。但是,水含量变化的过程又是个极为复杂的过程,这一过程既包括物理变化又包括化学变化,并且这两种变化都会导致应力的改变。这一变化主要是受土颗粒的组成和微观结构的影响,同时,周边环境也是影响土体变化的重要原因。土体发生体积胀缩的原因主要包括:地表水与地下水的动态变化、气候的变化、土体中水的渗漏、热传导等。

所谓物理-化学-力学效应^[16],即膨胀土中的黏土矿物中含有的许多矿物具有较强的结合水的能力,例如,蒙脱石、伊利石和多水高岭石,其中蒙脱石的作用尤为明显。黏土矿物的组成特性、各组分含量、颗粒连接特点是膨胀土发生膨胀的主要原因。连接特点是膨胀土发生体积变化的物理特点,当其中渗入极性分子或者电解质的化学物质时,物理膨胀机理与化学膨胀机理二者发生体系内部的力学作用效应,从而形成上述提到的物理-化学-力学效应问题。

相同地,膨胀岩土膨胀性能亦与其中的矿物成分有很大的关系,另外其中的结构连结类型及其密实情况也是不容忽视。其中,土体之间的连接主要是胶结连接,胶结连接是主要的连接,这种连接程度越高,就越容易受到胶结程度的影响,土体越不容易发生体积变化。在力的作用下,产生的扩容膨胀又恰好改变连结强度、结构密实程度。若扩容膨胀效应对连

结强度、密实程度影响不明显时,则以物质自身引起的膨胀效应为主;如果力学作用过于强烈,导致原体系的连结遭到破坏时,则物化膨胀影响程度会进一步加大。

(2) 膨胀土的裂隙性^[17-20]

多裂隙性是各个地区的膨胀性土最常见的特性,在裂隙产生的过程中以及在体积发生变化的过程中,在裂隙的表面都会发生变化,使原先平衡的应力场发生改变,尽管最后也达到一定的平衡,但是这种物理变化将会严重破坏膨胀土支撑强度,造成原本强度高的土体强度降低。很长的一段时间内,膨胀土一直是岩土界研究的核心内容,但是因为膨胀土变化存在很大的随机特征,造成了如今对膨胀土的研究缓慢的局面。

膨胀土的土体内部存在有很多裂隙,这些裂隙纵横交错,根据形成裂隙的原因对其进行分类,包括两种:原生裂隙和次生裂隙;对次生裂隙进行细分:风化裂隙、减荷裂隙、斜坡裂隙和滑坡裂隙等。原生裂隙在土体内具有潜伏性,不容易被发现,由于其尺寸很小,通常要借助显微镜等高倍放大仪器进行观察。次生裂隙的形状尺寸不同于其他的裂隙,一般情况下,次生裂隙的尺寸是非常大的,并且形状相同,多为张开状,用肉眼就可以观测。原生裂隙形成后将会进一步发展为次生裂隙,所以,次生裂隙会拥有一些原生裂隙的性质。

在土体的竖直方向上存在的裂隙,往往是在张力作用下形成的,这些张力是由于土产生膨胀或收缩引起的,或者是土本身的构造应力引起;水平裂隙是由水平应力引起,这种力是土体在进行沉积的过程中以及土体发生体积膨胀的过程中形成的。在裂隙性的表面也存在很多黏性土,白色,遇水易发生软化反应。这些特征的存在,就使得裂隙的组成和形成较复杂,并且含有特殊的构成,具有的物理特性和化学特性都是特有的,这些特有的性质都会对黄土隧道以及其他的建筑工程产生影响。

多数膨胀土体中都存在有多条裂隙形成的裂隙带或者裂隙网,这就使得土体内部存在有各种各样的裂隙结构体。通常情况下,从各个方向上裂隙纵横交错,从表面上看,裂隙的形状是不规则的,并且在裂隙的端部有很多分叉。在土体内部,数量最多的裂隙是网格状的,这些裂隙将土体进行分割,使土体产生了一些形态不同的块状结构,主要包括:柱体、块体以及鳞片状等,这些土块之间也不是连续的。位于同等级别的土体,块体之间的间距是相同的。

在如今的开挖或者修建工程中发现:土中的裂隙是不规则的,没有什么规律可循,基本全是有数条小的裂隙,交织在一块,组成的裂隙网,然后就使得黄土块的形状各异。

由于膨胀土易受到风化作用的影响,使得膨胀土不断发生膨胀作用,这些变化的产生促进了裂隙在各个方向的延伸,土中原先存在的裂隙尺寸不继续增大,并产生了一些小的裂隙。因为受力不等,同时地质不同,裂隙作用在形成的过程中,往往会在主裂隙周边引申出一些小的裂隙。

膨胀土中因为有裂隙的存在,导致了土体原有的性质消失,例如:均一性和连续性,这些变化的出现,是由于膨胀土原先各向同性中的抗剪性能出现了变化,并且在裂隙的端部以及一些浅层裂隙的部位容易产生应力集中的现象,含有一定的强度的软弱带。因为土体中含有许多裂隙,因为这些原因使得这种土体容易被切割机切碎,并且由于风化作用的影响,又促使出现了新的裂缝,新裂缝的出现,进一步使土体破碎的进程变快,这种条件下,膨胀土就具有在自然条件下破碎的条件。裂隙不断变化和出现使得外界的水分更容易进入土体的

内部,有利于土中水分的不断循环;土中水分的增多对于土体产生很大影响,首先,促进了膨胀土的变形,间接上促进了土体的松散程度的增加;其次,水分的渗入,使土体中亲水成分与水发生化学反应,形成了伊利石和蒙脱石等遇水膨胀的成分。随着时间的推移,化学风化作用进入尾声,这时在裂缝面上将会有活跃的变化,通常会产生灰白色的蒙脱石,并且呈现块状聚集。显然,这些矿物颗粒的出现,使得膨胀土更容易与水发生反应,最明显的现象就是,裂隙面上的水位要比同一高度的土面裂隙高。同时,膨胀破碎的能力变大,使得土体的不稳定结构加剧。

在膨胀土中并不是所有的裂隙的形状尺寸都是相同的,它们之间各不相同。这些裂缝的形成要经过漫长的时期,一般是伴随着土体的形成,经过各种作用而形成。当然,不可避免的是,膨胀土固有的膨胀和收缩的特性是其存在最主要的原因,进一步说就是,吸水膨胀,失水收缩,并经过压缩和风化,使原先紧密的土体发生收缩或者膨胀,也就产生了裂隙。同时,裂隙的形成,便于土体进一步被风化,并且为水分进入地层产生了条件,如此长期的积累,就使得裂隙扩展收缩,出现不同程度的变形。除了膨胀土自身结构的原因,时间和气候也是不能忽视的影响因素。在进行开挖时,土体的应力平衡被打破,也进一步促进了土体裂隙的发展。

(3) 膨胀土的超固结性

我国境内的黄土多数具有超固结性的特点。超固结性指:在土体形成的过程中,其受到大于当前土体上部承受的压力大小,并且土体达到完全固结。这一性能由下列因素造成^[9]:

①在土体形成的阶段内,由于受到水流的冲刷使得上部的土体受到冲刷,最后使得上部土层的压力逐渐减小,进而产生膨胀土的固结。

②随着时间的推移,原先的地下水逐渐减少,地下水位降低,土层受到水流下渗产生的冲刷,最终导致土体的超固结。

③在土层形成的过程中,土体的上部受到冰川作用,过大的荷载对其进行压实,当冰川融化后,导致卸荷,产生膨胀土的超固结。

④土中水分受到风化作用,其发生蒸发,导致土体中含水量降低,膨胀土干缩,土体之间的裂隙被压实,但是原先的上部压力并没有发生变化,引起土体的固结。

⑤土中的黏性物质和土中的水分之间发生物理化学作用(如阳离子交换、化学结晶等),最终导致土体产生超固结。

总之,导致膨胀土的超固结因素非常多,通常,由上述某一因素就可以导致其形成,但是有时候却是上述多个因素造成的。除了上述因素外,人为因素也是不可避免的,像如路基土的压实等工程就是人为施加压力,促使土体的固结。这种土体和普通固结土相比是存在优越性的,这种土的结构较普通固结土完整,抗压缩及抗剪切能力较强,但如果压力达到强度极限时,土体将迅速破坏。

3. 地质特征

在我国的很多地区都有黄土的分布,由于受外界不同环境的影响,使得黄土埋藏深度、土层厚度、沉积特性等都不相同,但仍具有相同的特征^[21]:

(1) 黄灰色、棕黄色是黄土的主色调。

(2) 黄土主要由颗粒极小的粉状颗粒组成。

(3) 干燥或半干燥条件下, 通过目测就可见到土体颗粒之间存在的空隙, 这些孔隙尺寸和形状都是不同的, 有些直径较大的孔隙也可以称为孔洞。

(4) 含大量含钙的成分或者是黄土内核, 在竖直方向上有显著裂隙呈现。

4. 节理特征

黄土性质比较疏松、特殊, 在竖直方向上有显著裂隙发育, 水平方向上没有层理出现。这种现象的出现主要受到重力的影响。干燥环境下, 节理比较坚硬, 遇水极易剥落和侵蚀, 容易导致坍塌^[7]。将黄土中发育节理分为可见节理和不可见节理, 根据形成的原因又可以把可见节理分为: 原生节理、风化节理、滑塌节理、湿陷节理、构造节理等。

黄土土体的构造特点包括三部分: 土层层理特点、裂隙特点进而大孔隙的特点。土体之间由于有很对裂缝使一个整体的土体出现了断裂, 也就是非连续。研究者很早就对黄土中的垂直节理进行了研究, 这些节理是由于黄土遭受侵蚀产生坍塌引起的。随着隧道的修建, 人们又发现了斜节理, 即构造节理。黄土中发育有大量的可见节理, 按成因可分为: 原生节理、风化节理、滑塌节理、湿陷节理、卸荷节理、构造节理等, 其中构造节理是在黄土的特征中发挥最大的作用。

在方向上, 原生节理有竖向的, 也有横向的, 还有斜着的节理。竖向的节理垂直于黄土层, 并且多与黄土的多空隙和固结程度有关, 这就行成了垂直节理; 与土层近似平行的节理, 是横向的节理; 有的节理与黄土土层斜着相交, 也就形成了斜节理, 这种节理的结构面常常弯曲, 呈不规则状。一般不会切入黄土层中。马兰黄土中含有很多斜节理, 没有特别规则的形状, 节理表面不平滑, 有张开的也有闭合的, 间距达到了几个厘米; 原生节理中多含有垂直节理和水平节理, 呈块状和柱状, 表面不粗糙, 且肉眼不可见。

黄土在外界环境满足的条件下, 经常会出现滑坡和崩塌, 并且滑移面往往位于一个节理面上, 我们称这种节理为滑塌节理, 这种节理的存在是滑塌产生的主要原因, 这种裂隙是非闭合的, 这种节理的表面常常会留下滑塌的痕迹; 黄土与水作用, 在地表形成漏斗和陷穴, 也就形成了湿陷节理区域, 在这个区域的边缘位置分布有湿陷节理, 但湿陷节理区域通常只是占有黄土的一小部分。卸荷节理是一种张节理, 节理面弯曲与地形的起伏状态大致一致, 是黄土应力释放的引起的空间膨胀的结果。掌子面向前开挖的过程中, 原先的应力平衡被破坏, 产生应力释放, 这样就造成隧洞顶和隧道两侧产生应力释放, 形成卸荷节理, 这种节理的产生容易引起隧道的坍塌, 所以隧洞开挖之后必须及时按照规范和设计进行支护。

黄土中的裂隙, 是通过漫长的地应力作用而引起的, 具有一定的方向性, 在黄土高原地区南北走向的裂隙和东北走向的裂隙是土体中最常见的。地表状态和地貌特征对其影响很小。常常在黄土的每层土体中都会有节理存在, 是洞穴、井和盲沟形成的前提条件, 也是它们的雏形。这些节理土体中分布不是很稠密, 同一地区的节理是该地区构造应力的产物。黄土构造节理在隧洞的轴线方向和垂直隧洞的方向存在较多, 并且具有较大倾斜坡度, 往往呈现叉形。

5. 工程特征

湿陷性是膨胀土独有的工程性质, 具体是指土体中有水渗入时, 土体中的亲水成分迅速与水发生反应, 导致结构破坏, 并且出现明显的沉降现象。这种沉降现象被称为湿陷性, 研究人员将黄土的湿陷性分为自重湿陷性和非自重湿陷性。在没有施加外力的情况下, 黄土遇