

黄土隧道的主要地质灾害类型

周尚国

(中国地质大学 研究生院, 武汉 430074)

[摘要]黄土是第四纪大陆松散堆积物,黄土隧道具有明显的黄土工程特性。颗粒组成、含水量、微观结构、孔隙比(率)、粘粒含量、人工活动等是决定黄土的基本工程地质特征的基本因素。水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱强度降低,使得黄土具有湿陷性等特殊工程地质特性;物理地质作用、地震作用、水作用和综合作用产生黄土隧道主要工程地质灾害;水对黄土具有特殊的意义。

[关键词]黄土隧道 工程地质灾害 含水量

[中图分类号]P642.13 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)02-0103-05

中国黄土分布面积广、厚度大、层位齐全,具有特殊成分和工程地质特性。在特殊的自然条件和地质构造背景下,黄土区形成了台、塬、梁、峁、阶地等地形地貌,在这些切割强烈、地形起伏较大的黄土区,近年来随着国家基本建设力度的加大和西部大开发的深入,在原有铁路隧道的经验基础上,陆续修建了一些高等级黄土公路隧道、铁路隧道,如312国道陕西彬县段隧道,甘肃饒(口)兰(州)高速公路新庄岭隧道、神(木)延(安)铁路寺则河隧道(全长6216m),在高速公路(铁路)大跨度黄土隧道施工技术取得突破性进展。这些在黄土地层中修建的隧道由于一系列技术要求和条件限制,明显区别于山岭隧道和南方土质隧道,具有典型的黄土工程特性,产生的一些新的工程地质灾害往往凭施工经验,因此有必要研究黄土隧道可能产生的工程地质灾害,为隧道设计、施工提供新的依据。

1 黄土的基本工程特性

1.1 黄土的含义及成因

黄土是第四纪干旱和半干旱气候条件下形成的一种特殊的大陆松散沉积物,并在古地形基础上继承性堆积形成幔覆结构。典型黄土具有以下特征:颜色多呈黄色、淡灰黄色和褐黄色,以粉粒成分为主,结构均匀无层理,疏松具大空隙,垂直节理发育,富含碳酸盐,具有湿陷性^[1]。黄土成因假说较多,

归结起来主要有三个:风成说,水成说和多种成因说。以风成说的证据和支持者最多,按此假说,黄土是一类特殊介质的土体,以风力搬运、堆积未经次生扰动的、无层理的黄色粉质含碳酸盐并具有大空隙的第四纪土状沉积物。黄土按成因可分为原生黄土和次生黄土;原生黄土是不具层理的风成黄土,常含有古土壤、钙质结核等,岩性均匀、不含砂砾夹层;次生黄土经过流水冲刷、搬运和重新沉积而形成的,一般具有层理,并含有沙砾,细沙砾。

1.2 黄土的成分和结构

黄土成分以粉土为主,包含细砂、粉土、粘粒等,粒经大于0.075mm的颗粒含量不超过全重的50%。据粒组含量可分为砂质粉土(粒经小于0.005mm的颗粒,含量不超过全重的10%)和粘质粉土(粒经小于0.005mm的颗粒,含量超过全重的10%);并且黄土颗粒组成由西、北向东、南逐渐变细。黄土矿物成分较复杂,粗矿物一般为次棱角状到棱角状矿物晶体;细粒矿物以伊利石、蒙脱石等粘土矿物为主;化学成分主要有SiO₂, Al₂O₃, CaO及Fe₂O₃, MgO等,并含有碳酸盐等易溶盐类,而且其含量区域性变化较明显。

黄土的结构取决于粗颗粒配置、接触的关系,孔隙的类型和大小,胶联结构的类型、状态及特征。原生黄土中粗颗粒以支架接触、镶嵌接触和分散接触等关系构成黄土的基本骨架,决定着黄土结构的稳

[收稿日期]2007-01-12; **[修订日期]**2007-02-05; **[责任编辑]**陈仁俊。

[作者简介]周尚国(1962年—),男,1983年毕业于中南大学,教授级高工,现主要从事矿产勘查与工程勘查工作。

定性;黄土孔隙率高达40%~50%,发育为粒间小孔和各种特有的大孔隙(如虫孔,植物根孔,裂隙,封闭空洞,潜蚀空洞等),直接影响黄土的压缩性和湿陷性;水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱强度降低。残积坡积等次生黄土多具不等粒“斑状”结构,大孔隙多,形状复杂。原生黄土则具直立性,小孔隙发育多,无层理,柱状节理发育,地层边缘常成直立陡壁。

1.3 黄土的基本工程地质特征

黄土颗粒粒径集中在0.075~0.005mm间,砂粒级含量决定黄土粗细变化的主要原因。颗粒组成、含水量、微观结构、孔隙比(率)、粘粒含量、人工活动等是决定黄土的基本工程地质特征的基本因素。

1.3.1 物理力学性质

黄土一般天然密度为 $1.13 \sim 2.21 (\times 10^3 \text{kg/m}^3)$,干密度 $1.02 \sim 1.87 (\times 10^3 \text{kg/m}^3)$,天然含水量5%~30%,孔隙比0.8~1.2,比重2.61~2.72,工程中一般按粉土、粉质粘土对待^[2]。

黄土的基本物理力学性质由西而东、由北而南有规律变化:容重逐渐增大、含水量增高,孔隙比降低、湿陷性减弱;随深度的变化规律一般是:比重变化不大,容重和干密度随深度而变大,孔隙比随深度而变小。

孔隙比和干密度的大小对黄土压缩性和湿陷性有很大影响,干密度呈反相关,孔隙比呈正相关;含水量大小对黄土的湿陷性有很大影响,含水量大黄土的湿陷性相对较弱。

1.3.2 压缩性

我国黄土多属于中等、中等偏高压缩性, $a_{1-2} = 0.1 \sim 0.6 \text{MPa}^{-1}$,粘粒含量较多时呈低压缩性。黄土压缩性呈现两个变化趋势:一是地质年代稍早的 Q_2 和 Q_3^1 黄土,固结度稍高,多为中等偏低或低压缩性,而 Q_3 晚期和 Q_4 黄土多为中等偏高压缩性;二是受颗粒分布和含水量变化的影响,粘粒含量较高、含水量较低时黄土具有较好的抗压缩性。黄土压缩性总体上由北向南逐渐降低。

1.3.3 湿陷性

湿陷性是黄土在自重压力或外力荷载压力不变的情况下,仅仅由于湿度(含水量)的增加而产生的急骤显著附加下沉,从而引起地面的变形和建筑物破坏的性能,由湿陷系数,自重湿陷量,总湿陷量等指标表征,宏观表现为浸水后沉降量显著增大。湿

陷性地层主要是晚更新世 Q_3 马兰黄土和全新世 Q_4 新近堆积黄土,分布在广大的黄土塬和黄土梁的表层,河谷阶地。湿陷性总的特点是:由北向南湿陷性变化是弱-强-弱,阶地上马兰黄土湿陷性偏弱,塬区马兰黄土湿陷性最强,但湿陷性土层深度较浅,而梁峁区是湿陷土层厚、湿陷性较强的地区;另外厚层状坡积黄土湿陷性也较高。

黄土的疏松多孔结构,尤其是结构性孔隙是黄土湿陷性的必要条件;黄土中的不抗水粒间胶结是黄土湿陷性的充分条件;水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱强度降低,并且其削弱程度随水量的大小成比例变化,这是黄土湿陷性的本质。另外可溶盐等对黄土湿陷性也有一定程度的影响。

1.3.4 击实性

黄土击实性是指黄土在一定外力冲击作用下密度、含水量、强度等物理力学性质随冲击强度而变化的特性。一般冲击强度大时密度增大、含水量降低、强度提高。在同一功能的击实作用下,最初土的干容重,随含水量的增加而增大;改变击实功,最优含水量和最大击实密度也发生变化,击实功大能克服更大的摩擦阻力,所以最大干容重增大而最优含水量降低。

1.3.5 黄土的抗剪强度

黄土抗剪强度是指黄土抵抗剪切破坏作用的能力。黄土中含有相当数量的粘土和盐类,使黄土颗粒有一定程度的胶结,从而具有相当的原始内聚力,法向压力不大时抗剪强度与法向压力成正比;超过原始内聚力后抗剪强度显著降低。当黄土的含水量低于塑限,水分变化对强度影响很大,随含水量的增加,土的内摩擦角和内聚力都降低较多;但当含水量大于塑限,含水量对抗剪强度的影响减小;土的含水量相同时,则土的干重度越大,其抗剪强度也越高。黄土浸水过程中,湿陷处于发展期,此时土的抗剪强度降低最多,但当湿陷压密过程已基本结束时,土的含水量虽高,但此时土的抗剪强度却高于湿陷过程相应值。

1.3.6 黄土的水理性

黄土矿物中含有伊利石,蒙脱石等粘土矿物,这些粘土矿物(尤其是伊利石)具有较好的亲水性^[4],在受水浸润后与水发生作用形成空洞,是导致湿陷的主要原因之一;

水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱

强度降低,并且其削弱程度随水量的大小成比例变化;

黄土中的柱状节理发育,粉粒吸水性较差,故而黄土具有较好的渗透性,地表水迅速下渗至泥岩或砂岩层以泉水形式流到沟谷。渗透性使黄土多处于干燥状态,具有较高的强度;

饱和黄土长期处于水浸泡环境,土颗粒之间的联结逐渐被破坏,尤其当黄土中砂质成分较多时,黄土呈现出一定的水崩解性。

2 黄土道路隧道的主要工程地质灾害

2.1 物理地质作用产生的灾害

物理地质作用是指塑造地壳面貌的自然地质作用,包括内力与外力地质作用。黄土区物理地质作用主要有:构造运动,剥蚀,搬运,沉积作用等。在黄土地区修建道路隧道,或多或少会受到物理地质作用并产生一定的工程地质灾害,概括起来主要有:

2.1.1 塌方,塌顶,坍塌

黄土垂直节理发育,彼此在水平方向的连接力较弱,黄土隧道一般按疏松石质隧道的普氏理论计算、设计。在干燥时,黄土的强度较高,衬砌受力较小;遇水后颗粒联结力削弱,黄土强度随之降低,此时极易引起衬砌受力不均匀,并且由于隧道表层黄土厚度分布多不均匀,从而在黄土梁峁区隧道易成偏心压力,成为偏压隧道,造成塌方等地质灾害。位于陕西省子长县内的神(木)延(安)铁路羊马河隧道(黄土质),全长3810m,隧道出口段210m地面坡垂直隧道中线自左向右倾斜,坡度1:0.5~1:1.5,拱肩至地表垂直距离为6~12m,地表为风积黄土,隧道为老黄土,引起隧道受力不均匀,使支护受偏压,影响正常使用,威胁行驶安全。后采用钢筋管棚、土体注浆、重新配载等工程措施加固,保证安全行驶。

2.1.2 滑坡、滑塌

隧道洞口及隧道表层斜坡地段均可能产生滑坡、滑塌。表层斜坡地段具有黄土高边坡特征,同时又是受人为改变较大的自然边坡,坡体内应力大小和方向均发生了变化,经过反复干湿膨胀收缩,发生裂隙,在雨水的催化作用下容易产生滑坡、滑塌等工程地质灾害。

洞口段往往形成实际上的黄土高边坡,在干燥时强度较高,具有较好的自稳性;遇水后强度降低,随降雨入渗量增加,边坡土体含水量逐渐增大,其塑性破坏域不断扩大,变形破坏过程为坡体蠕滑→后缘拉裂→变形扩展→剪出口形成→坡体滑塌^[3]。

另外,洞口洞脸及附近长期干燥失水发生收缩,风化剥落,造成裂纹、剥落掉块;开挖减荷及边坡重力使节理张开或产生新的裂缝,造成节理坍塌;雨水从坡上下来直接冲刷或进入鸟洞、鼠洞、根孔等空洞,不断扩大造成坍塌,或入洞浸泡洞壁造成坍塌。

黄土底部风化基岩层,相对隔水,若黄土倾向坡外,则边坡易沿基岩面滑动。

2.1.3 洞内风积尘土

黄土区风大,土颗粒小易起尘,而隧道里面风速减小,大量尘土吹入隧洞长时间滞留在路面、侧墙、顶棚,引起路面、侧墙积灰,积灰超过一定厚度时影响交通。路面积灰掩埋行车道界限,使车轮打滑;侧墙积灰掩盖隧道内标志,增加土压力,顶棚积灰影响视距、视线。

2.2 地震作用产生的灾害

地震作用引起黄土层剧烈运动使得结构更加松散,稳定性降低。黄土区地震波卓越周期一般为0.15~0.30s地震波传播速度为150~600m/s。地震在黄土地区分布极不均匀,近山一带活动性较强,如靠近六盘山的宁夏海原1920年发生8.5级大地震;地震基本烈度跨越VI~IX度区,地震有一定的活动性。故而地震对黄土隧道破坏性较大,应引起足够重视。

2.2.1 破坏黄土的天然直立性

黄土具有良好的天然直立性,甘肃会宁一个粮仓窑洞,最大跨度9.4m(相当于铁路双线隧道跨度),没有加固,修建上百年还可安全使用。地震作用使得原本可以自立的黄土陡坡在地震波冲击下摇晃松动、坍塌倾倒;地震波引起水平冲击作用,增大隧道的侧压力,破坏洞壁的稳定性,甚至影响隧道拱的受力,造成塌顶塌洞。

2.2.2 地震使高边坡滑塌

地震使隧道坡体最大主应力和剪应力明显增大,应力集中带的范围扩大,坡体塑性区迅速扩大,黄土自身的粘聚力明显不足以抵抗,产生大面积的高边坡滑塌。

2.2.3 砂土液化

傍山隧道,土质为低液限粉土、粉质土、砂类土时,在地震力作用下,实际水压力急剧上升,土颗粒间的有效应力降低;当实际水压力与总压力相等时,土颗粒处于悬浮状态,黄土承载力急剧减小,在地表反映为喷砂冒水,地面沉降。

2.3 水作用产生的灾害

黄土区降水量较小,年降水量一般为205~

860mm,由北向南总体呈现逐步增大;降水主要集中在7、8、9三个月,约占全年的60%以上,故而夏季雨水多、易成灾。

2.3.1 地表冲刷、水土流失

多年气象资料表明,黄土区雨水集中在7、8、9三个月且分布极不均匀。集中降雨冲击、松动并携带大量表层黄土向底处流动,改变了隧道覆盖层的厚度、地形地貌,造成隧道受力变化甚至引起偏压。地表冲刷、流失水土还可能携带砂土掩挡隧道洞口或在隧洞内堆积成灾。水流还可冲裂黄土护坡,引起开裂、剥落。

2.3.2 隧道湿水

黄土具有特殊的性质,颗粒吸水性较差,渗透性较好。雨水除大量随地表迅速流走外,一部分以潜水形式入渗到黄土层中,下渗到隧道内表面,造成隧道潮湿、甚至积水;坡角潮湿易风化剥落进而悬空坍塌。甘肃陇西马河镇新松树湾隧道^[4],岩性为上更新统风积粉质黄土,下、中更新统冲洪积杂色砂粘土;黄土具Ⅱ级自重湿陷性;建成后拱顶、边墙接缝、墙角等处出现渗水,实测隧道内渗水量达 $18.83\text{m}^3/\text{d}$,严重影响隧道的正常使用。

2.3.3 下伏洞穴

湿陷性黄土地区,尤其在隧道地表地形起伏多变、地表水易汇集的地方,由于地表水(雨水、农灌水)的汇集,水流沿着黄土的垂直节理和大空隙向内部渗透、潜流,溶解黄土中易溶盐,破坏黄土的天然结构,导致土体不断崩解、水流带走颗粒,形成大小不等的暗沟、暗穴、陷穴,这些洞穴可分为竖井状陷穴、漏斗状陷穴、串珠状陷穴和暗穴四类,是黄土隧道的重要隐患^[5]。

2.3.1 腐蚀钢材、混凝土

黄土地下水矿化度一般不高,但部分地区地下水具有弱侵蚀性。甘肃陇西马河镇新松树湾隧道实测地下水具有弱侵蚀性,对隧道衬砌钢材、混凝土具有一定的破坏作用。

2.4 综合作用产生的灾害

2.4.1 湿陷性

研究表明粘粒含量及赋存状态是影响黄土湿陷性的主要因素,在一定压力作用下黄土受水浸湿后其弦线模量降低导致明显附加沉降,隧道覆盖层产生湿陷易引起土体局部不稳、应力集中;隧洞里道路产生湿陷,造成路面不平,影响交通;隧道本身土体具湿陷时,其危险性最大。

2.4.2 冻害

我国陇东陕北黄土区最大冻深1m左右,在隧道路面、侧墙均可产生一定程度的冻害,长期的冻融作用会引起衬砌松动。

2.4.3 路基路面下沉

由于密实度不够或大量积水,使得路基黄土滑移,孔隙减小,造成路基路面下沉。

2.4.4 岩溶及膨胀性

黄土地区下伏基岩砂岩、泥岩坚硬,但碳酸岩由于自然条件和人为活动的影响,尤其是规律采排地下水,使岩溶地下水位下降形成岩溶塌陷。

第三系砂岩与泥岩互层,在局部具有弱膨胀性。

3 黄土道路隧道工程地质灾害的主要防治措施

3.1 防排结合

黄土地区缺水,但由于降雨集中而使水往往具有一定的危害。一般可在隧道洞口设截水洞、护坡,洞内设排水沟,增设防渗层等,并合理输导、排泄隧道覆盖土层地表水,消除或减小水的破坏作用。

3.2 合理衬砌

黄土具有良好的天然直立性,黄土隧道相当于疏松石质隧道,一般衬砌厚度不大,仅0.5m左右。挖掉不稳定土体,改变土质、合理施工,合理衬砌,在最弱的地方加大衬砌、消除偏压;同时加强施工工程地质勘察,及时改善衬砌。

3.3 选择原生黄土

原生黄土具有良好的天然直立性,在干燥时一般处于稳定状态,隧道应选择原生黄土充分利用黄土的自稳性,既安全又经济。实践表明只能在原状土中成功开挖黄土洞室并保持较长时间。

3.4 消除黄土湿陷性

采取工程措施(如夯实、换土、预载、预浸水等)增加土密度,减小孔隙率,提高弦线模量,消除黄土湿陷性。

3.5 加固洞口

洞口加固包括:a)加强洞脸工程,在洞口10m以内设计砖、石或钢筋混凝土洞脸,在外部设防水冲沟,在内部与土体紧密连接成整体;b)加强地面排水工程,在洞顶设截水沟、土埂等将雨水引离洞口,在洞口坡面设护面堵塞夯实孔洞和裂隙。同时进行生态防护工程。

4 结论

黄土是第四纪大陆松散堆积物,与人类活动密

切相关,近年来陆续修建了一些黄土道路隧道,黄土隧道施工技术取得突破性进展。而黄土地层中修建的隧道明显区别于山岭隧道和南方土质隧道,具有明显的黄土工程特性。

1. 黄土具有湿陷性等特殊工程地质特性,这是黄土隧道的首要难题。黄土分布广,颗粒细,孔隙率高,物理力学性质不均匀,压缩性、湿陷性等与土的含水量有密切关系;颗粒组成、含水量、微观结构、孔隙比(率)、粘粒含量、人工活动等是决定黄土的基本工程地质特征的基本因素。

2. 水胶联合是黄土颗粒之间的主要联结形式,在干燥时赋予黄土相当高的强度,但遇水后联结削弱强度降低,并且其削弱程度随水量的大小成比例变化;黄土中含有相当数量的粘土和盐类,使黄土颗粒有一定程度的胶结,从而具有相当的原始内聚力;

3. 黄土地区的工程地质灾害主要由物理地质作用、地震作用、水作用和综合作用产生,以水作用

与物理地质作用的综合效应对隧道的威胁最大;

4. 原生黄土垂直节理发育,具有良好的天然直立性,在干燥时一般处于稳定状态,隧道应选择原生黄土充分利用黄土的自稳性

5. 黄土隧道一般按疏松石质隧道的普氏理论计算、设计。工程中应采取一定的工程措施以保证隧道的安全。

[参考文献]

- [1] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.
- [2] 倪万魁,韩启龙. 黄土土性参数的统计分析[J]. 工程地质学报,2001(1):62~67.
- [3] 倪万魁,刘东燕,张永兴. 黄土高边坡变形破坏机理的数值模拟研究[J]. 工程地质学报,2002(10):291~295.
- [4] 陈鹤,乔春生. 富水黄土隧道初期支护监控及分析[J]. 西部探矿工程,2003(1):105~106.
- [5] 元晓贵,王爱涛. 简述高速公路地质灾害危险性的评估[J]. 公路,2000(9):61~63.

MAIN GEOLOGY DISASTERS TYPE OF LOESS TUNNEL

ZHOU Shang - guo

(China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: Loess is considered a kind of mainland loose accumulation in the Quaternary Period in the paper. The Loess tunnels obviously have the loess engineering characteristic. The basic actors, which are Particulate matter, Moisture content, Microstructure, Interstitial, Clay content, Manual work, determine the basic loess engineering characteristic. The water gum consociation is the main coupling form of the loess particulate, which give the very high strength in loess when loess is dry, but the coupling weakens after meeting water and the strength lowers. This is the main cause which makes loess wet collapsing. Physics geology functions, earthquake functions, the functions of water with synthesize functions are the main creation of engineering geology disasters in tunnel in loess. The water seriously impair to the loess tunnel.

Key words: Loess Tunnel, Engineering geology disaster, Moisture content