

DOI: 10.11779/CJGE201603016

# 黄土贴坡高填方变形破坏机制研究

马 闫<sup>1, 2</sup>, 王家鼎<sup>\*1</sup>, 彭淑君<sup>3</sup>, 李 彬<sup>1</sup>

(1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 佐治亚理工大学土木与环境工程学院, 亚特兰大 GA30318;

3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 受地形条件限制, 黄土山区贴坡高填方工程近年逐渐增多并出现了一些失稳事故, 亟需对其变形破坏机制进行研究。以黄土梁地形上某机场建设工程中的失稳贴坡高填方为例, 通过现场详勘与工程地质调查, 分析并总结了这类边坡的结构特点及变形破坏的关键影响因素, 进而针对性的开展了压实黄土增湿变形试验、 $Q_2$  离石黄土高压湿陷试验、CTC 及 RTC 路径三轴试验, 结合现场资料与室内试验结果对其变形破坏机制进行了研究。结果表明: 下覆地形高差导致填方厚度差异, 进而引起的坡顶地面差异沉降裂缝是诱发后续变形破坏的必要条件。黄土贴坡高填方变形破坏机制可以概括为: 工后土体固结沉降、填土增湿及黄土高压湿陷沉降致裂→水分沿裂缝入渗软化土体→形成中部初始滑面→前部土体加载增湿破坏→后部土体卸荷增湿破坏→锁固段土体加载增湿破坏→滑面贯通整体失稳。该结果有助于加深对贴坡高填方变形破坏演化过程的认识, 可以为这类边坡的防治工作提供科学依据。

**关键词:** 黄土; 贴坡高填方; 高压湿陷; 应力路径; 变形破坏机制

中图分类号: P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2016)03 - 0518 - 11

作者简介: 马 闫(1989 - ), 男, 博士研究生, 研究方向为黄土工程地质性质。E-mail: myan1989@163.com。

## Deformation and failure mechanism of high sticking loess slope

MA Yan<sup>1, 2</sup>, WANG Jia-ding<sup>1</sup>, PENG Shu-jun<sup>3</sup>, LI Bin<sup>1</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University/ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Xi'an 710069, China; 2. School of Civil

and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA30318, USA; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil

Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Loess high sticking slopes have become a popular construction solution for engineering land in loess ridge landform area. The failures of those slopes have encouraged the studies on deformation and failure mechanisms of such artificial slopes. In this research, a high sticking slope failure is used as a case study. Based on the in-situ investigation and geological engineering survey, the stratigraphic structure features and impact factors of slope stability are analyzed. According to the analysis results, the corresponding laboratory tests are conducted, such as compacted loess wetting compression tests, deeply buried  $Q_2$  loess collapsibility tests, and loess triaxial tests with CTC and RTC stress paths. The deformation and failure mechanisms of high loess sticking slopes are studied from the in-situ and laboratory test data. The results indicate that the fluctuation of bed stratum causes various fill thicknesses, which further induce differential settlements and cracking on the slope shoulder. Water infiltration into the crack will then trigger deformation and failure. The failure mode of high sticking slopes is summarized: the differential settlement induced by consolidation of compacted loess and collapse of  $Q_2$  loess under high pressure causes cracks of slope shoulder→water infiltration into cracks softens the compacted loess→the initial sliding surface forms in the middle of slope→the front part of loess fails under wetting CTC stress path→the back part of loess fails under wetting RTC stress path→the locking section loess fails under wetting CTC stress path→the whole slope fails. These results are helpful for understanding the formation and evolution of failure of high loess sticking slopes, and may provide technical support to the treatment of loess slope stability.

**Key words:** loess; high sticking slope; high-pressure collapsibility; stress path; deformation and failure mechanism

## 0 引 言

随着中国西部大开发的不断深入, 近年来一大批长、大、高、难的工程项目陆续在黄土高原开工。延

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372269); 高等学校博士学科点  
专项科研基金项目(20116101130001)

收稿日期: 2015 - 01 - 29

\*通讯作者

安新区、兰州新区大规模的削山填沟造地工程, 以及黄土梁茆地形上的机场建设工程中都出现了大量利用贴坡填方补足工程用地的建设模式, 部分工程的贴坡填筑厚度达 50 m 以上, 其中一些坡体出现了变形破坏现象。由于黄土易受水分侵蚀, 黄土山区往往地形破碎沟壑纵横, 随着工程建设逐渐向高阶地和山区拓展, 受到地形条件的限制, 可以预见贴坡填方的填筑形式将在未来的黄土山区建设工程中大量出现, 亟需对其变形破坏机制进行研究。

张卫兵<sup>[1]</sup>, 宋焱勋等<sup>[2]</sup>, 李喜忠<sup>[3]</sup>研究认为黄土填方体的变形主要为沉降变形, 沉降分为施工期沉降和工后沉降, 施工期沉降可以通过超填来弥补, 所以工后沉降的影响最大, 而工后沉降变形引起的坡体内部应力变化是诱发坡体失稳的一大因素。胡小明等<sup>[4]</sup>, 张丽萍<sup>[5]</sup>, 胡长明等<sup>[6]</sup>通过试验研究认为土体压实度对沉降变形和强度有决定性的影响。黄土填方往往就地取材, 填方黄土会部分继承原状黄土的水敏感性, 胡小明等<sup>[4]</sup>, 谢妮等<sup>[7]</sup>, 赵彦旭<sup>[8]</sup>研究指出水分浸润对于填方土体沉降同样有着重要的影响。目前, 对于黄土填方稳定性的研究大都集中在填方土体本身的物理力学性质, 并认为填方土体的变形与破坏均由其自身性质所决定。

黄土贴坡填方高边坡不同于平缓地形上的填方高边坡。首先, 填方黄土即是沉降介质又是下覆地层的荷载, 因此工后沉降将由填方土体自身的压缩变形和下覆地基土的压缩变形两部分共同组成, 由于贴坡填方下覆地形为陡坡, 填方厚度随地形的差异将引起差异沉降。其次, 差异沉降将导致坡体内部和表面产生破坏, 破坏引起的裂缝将改变坡体的渗透性能, 加强水分浸润对土体强度性能的影响。第三, 击实黄土和原状黄土的力学性质差异将在交界面上产生应力集中(唐朝生等<sup>[9]</sup>, 胡长明等<sup>[10]</sup>), 进而影响滑面的产生和发展。

从这类边坡的自身特点出发, 基于在前人的研究成果和笔者对山西中西部某个已经出现变形破坏迹象的黄土贴坡填方高边坡的详细勘察工作, 根据坡体的地层结构、所处的地质环境、坡体的变形破坏特征, 分析了其变形破坏过程的影响因素。进而结合击实黄土增湿变形试验、高压下  $Q_2$  黄土湿陷试验、常规三轴压缩 (CTC) 应力路径以及减压三轴压缩 (RTC) 应力路径下的室内试验结果, 对黄土贴坡填方高边坡的变形破坏机制进行了分析研究。

## 1 滑坡实例介绍

朱才辉等<sup>[11]</sup>, 姚雪贵等<sup>[12]</sup>对该工程整体的施工工艺进行了详细介绍, 本文仅作简述: 填方土体取自附近山体, 主要为  $Q_3$  马兰黄土, 拌湿后进行分层碾压及夯实成型, 含水率控制在 13%~16% 之间, 虚填厚度为 1.0 m, 压实度控制在 0.95 左右, 对填筑前原地表的处理深度较浅, 仅去除表面植被层。朱才辉等<sup>[11]</sup>的监测结果(与本文研究区工法相同, 位置不同, 地基坡度较本文研究区小)表明, 填筑体的工后沉降仅占总沉降的 22%, 而下覆地基的沉降量占比达 78%, 可见填方施工质量比较理想。

本文研究区为满足跑道和土面区宽度需要, 对原有黄土梁进行了削方, 最大削方高度为 31.4 m, 并在其两侧进行了贴坡填方, 最大填方厚度为 56.8 m。原黄土梁两侧为马兰黄土与离石黄土组成的二元结构坡体, 坡脚处为地表水汇聚带和地下水排泄带—马群沟, 受到水流侵蚀作用马兰黄土层在近坡脚处尖灭, 填筑前挖除了沟中的淤积土, 使得下覆  $Q_2$  离石黄土出露, 填方前整体坡形为上缓下陡的凸坡。填方后整体坡率为 1:2.2, 贴坡填方体地层结构见图 1。

该边坡于 2011 年 3 月填筑完成, 随后近 1 年时间里逐渐由坡前向坡后发育 3 道裂缝(位置见图 1, 2,

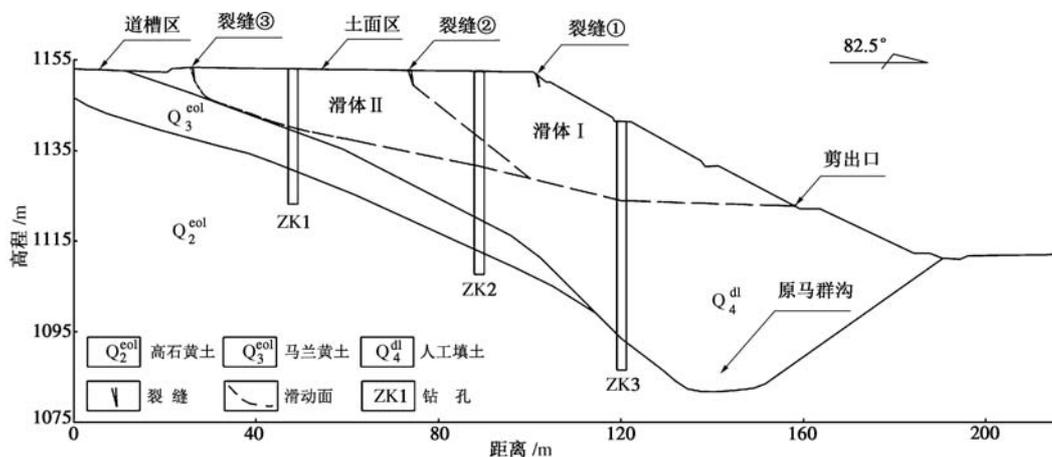


图 1 研究区典型工程地质剖面图

Fig. 1 Typical engineering geological profile of research area



特征见图3),最终在坡体前部距坡顶面垂直距离30m处发育一条剪出口。裂缝在坡体倾向上的发育过程如下所述:2011年6月裂缝①位置发现细小裂缝,之后一直未有明显发展,2011年8月发现坡顶地面出现裂缝,最初发育在裂缝②位置,9月中旬裂缝②逐渐闭合,③位置出现裂缝并逐步扩展,10月下旬坡体前缘出现剪出口。2012年3月进场详勘,经钻探和挖探揭露出两道滑面和两个滑体,分别以裂缝②和裂缝③为后壁(见图1)。裂缝在坡体走向上的展布特征如下所述:2012年3月末,延伸超过7.5m的裂缝已经发展出14条,其中最长的延伸82m,裂缝两端地面垂向错落2~8cm不等,裂缝水平宽度4~15cm不等,利用RTK进行了地形图测量及裂缝定位,并将其与施工方提供的填挖方设计图相叠,得到图2。从图2中裂缝展布情况可以看出,裂缝整体沿着填挖方交界展布,第4至第7条剖面线间150m的范围内裂缝不发育,这一段的原地形为两个黄土梁间的浅沟,填方后沿勘探剖面线走向均为等厚的填土。

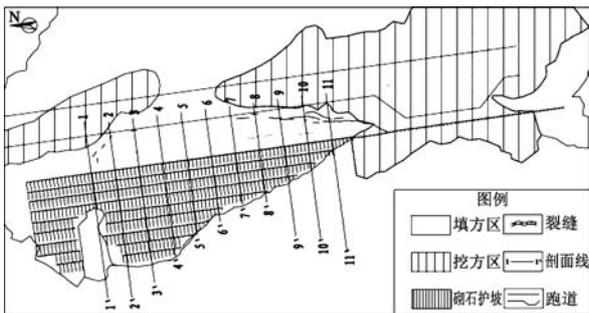


图2 研究区工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plan of research area



图3 坡体顶面地表裂缝展布及地下裂缝发育情况

Fig. 3 Layout of cracks on slope top and development of underground cracks

## 2 试验与结果分析

### 2.1 边坡变形破坏影响因素初判

填方边坡变形主要由工后沉降所引起,填方黄土既是沉降介质又是下覆地层的荷载,因此工后沉降将

由填方土体自身的压缩变形和下覆地基土的压缩变形组成。根据文献[11]的监测结果,该工程的工后沉降主要由地基原状黄土沉降变形所引起,地基原状黄土的受力变形性质是重要的影响因素;另外,填方体压缩变形的占比也达到了20%以上,因此击实黄土的压缩性质也不容忽视;考虑到黄土的水敏感性,还需注意由水引起的变形突变性质,如地基原状黄土和压实黄土的湿陷性或增湿变形性质。由于贴坡填方下覆地形为陡坡,填方厚度随地形的差异将引起沉降介质厚度的差异及对下覆地基荷载的差异,进而将引起沉降差异。差异沉降引起的坡体内部和表面破裂将为水分浸入提供通道,会进一步改变坡体的含水状态。在含水率增加的情况下土体强度参数的变化将直接影响坡体的稳定性。另外,坡体裂缝的发展过程以及勘察揭示的滑面位置暗示了滑坡形成发展过程中不同位置的滑面经历了不同的应力路径,应力路径对土体强度参数同样具有重要影响(图4,5)。



图4 8-8'剖面后缘裂缝地表宽度和错距

Fig. 4 Width and height difference of cracks on slope top surface (8-8' section)



图5 剪出口探槽中揭示的滑带及擦痕面

Fig. 5 Slip soil and slickenside at the front of the unstable slope

### 2.2 土样基础物理指标

基于上述分析,对填方击实黄土和下覆离石黄土进行了取样,填方土体取样点位于土面区地下5~6m,受1.0m的虚填厚度影响,在探井中每隔60~80cm即可见到明显的碾压分层界面,界面上下的土体密实程度差异较大,故分别在界面以下和以上20cm处取样,同时还对在建填方工程中待填的散土进行取样,离石黄土的取样点位于填方区西侧的黄土梁中下部,取土深度为16m及20m。土样基础物理指标见下表1。对散土样开展了6组重型击实试验,填土均值击实曲线见图6,最优含水率为14.1%,最大干密度为1.88

表 1 土体基础物理指标

Table 1 Physical properties of loess samples

土样	含水率 $w/\%$	土粒重度 $G_s$	天然密度 $\rho$ $/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d$ $/(g \cdot cm^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 $e$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	类别
离石黄土	10.4	2.70	1.69	1.53	36.6	0.77	26.4	14.9	11.5	粉质黏土
碾压界面	12.6	2.71	1.90	1.69	59.9	0.60	27.4	15.2	12.2	粉质黏土
上下土样	14.3	2.71	2.06	1.79	76.8	0.51	27.7	15.4	12.3	粉质黏土

$g/cm^3$ , 计算得碾压分界面以下填土压实度为 95.2%, 分界面以上填土压实度为 89.9%, 填筑质量较好。

### 2.3 击实黄土压缩特性及含水率的影响试验

黄土骨架颗粒及胶结物中含有一定量的易溶盐和可溶盐, 加之黄土特殊的架空孔隙结构, 使得黄土具有遇水易沉陷的特性。张苏民等<sup>[13-14]</sup>, 张茂花等<sup>[15]</sup>对原状黄土的增湿试验结果表明, 湿陷变形不只发生在完全饱和和情况下, 增湿过程中即可产生较大的沉降变形。黄土经重塑压实后物质成分不变, 结构虽然遭到破坏, 但其破坏程度将受到压实度和制样含水率的影响<sup>[16]</sup>, 伍石生等<sup>[17]</sup>, 张丽萍<sup>[5]</sup>对压实黄土的湿陷试验结果表明, 压实度不足的重塑黄土同样具有湿陷特性。

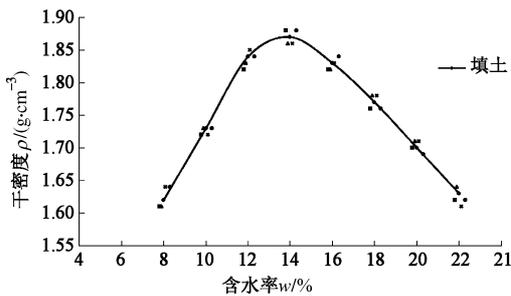
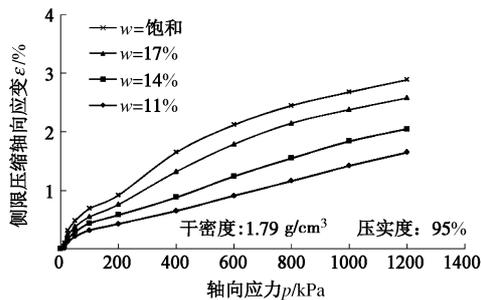
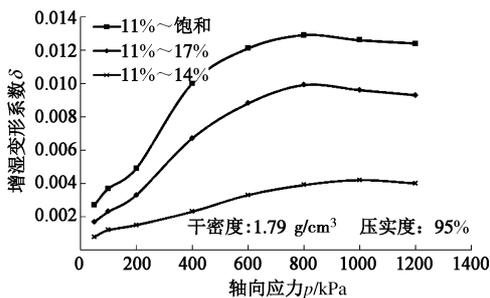


图 6 填土击实试验均值曲线

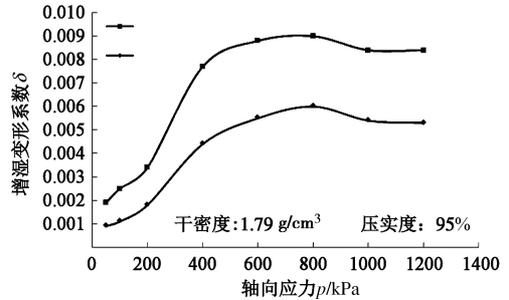
Fig. 6 Compaction curve of backfill loess



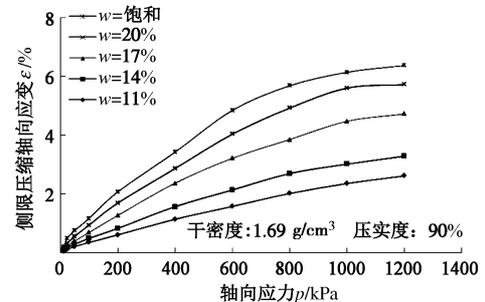
(a) 95%压实黄土不同含水率下  $\epsilon - p$  曲线



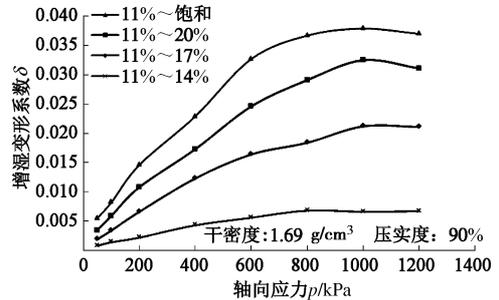
(b) 95%压实黄土增湿  $\delta - p$  曲线 ( $w_0=11\%$ )



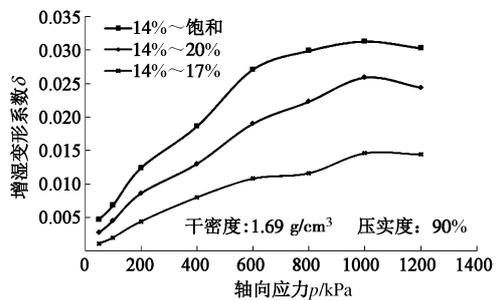
(c) 95%压实黄土增湿  $\delta - p$  曲线 ( $w_0=14\%$ )



(d) 90%压实黄土不同含水率下  $\epsilon - p$  曲线



(e) 90%压实黄土增湿  $\delta - p$  曲线 ( $w_0=11\%$ )



(f) 90%压实黄土增湿  $\delta - p$  曲线 ( $w_0=14\%$ )

图 7 压实黄土压缩特性及增湿变形特性曲线

Fig. 7 Compressive strain and wetting compression coefficient versus vertical stress

由于研究区的填方厚度大于文献[11]的研究区, 填方体自身的沉降变形将在工后沉降中占更大的比重, 同时考虑到填筑位置地下水的淤积和地表水分下渗将使土体含水率升高, 击实黄土沉降稳定后的增湿

变形特性也将对最终沉降量有重要影响。因此开展了不同含水率、不同压实度重塑黄土的压缩特性试验。压实度与原位土样相对应,分别为95%和90%,试样初始含水率从11%开始每增加3%为一级,直至饱和含水率,轴向压力10级分别为:12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 kPa, 试样面积50 cm<sup>2</sup>, 高度2 cm。测量土样在各级压力下的压缩变形量,计算相同压力下不同含水率土样间的变形差作为相应 $\Delta w$ 的增湿变形量,再除以试样原始高度得到增湿变形系数 $\delta$ , 所得结果见图7。

压实黄土在一定压力下压缩稳定后再增湿均表现出附加沉降变形性质;增湿变形系数 $\delta$ 随着含水率增量的增大而增大,随着干密度的增大而减小。对比图7(b)和7(c)可看出,95%压实度下,增湿变形系数 $\delta$ 随压力的发展均是先在低压力下平缓增长,当压力大于200 kPa的门槛值后开始急剧上涨,含水率增量越低达到 $\delta$ 峰值的压力越小,发展到峰值后随着压力的增长, $\delta$ 在高含水率增量下表现出下降的趋势,在低含水率增量下表现出平缓发展趋势;若以1.5%的增湿变形量为湿陷性判别标准,则本试验中95%压实度的黄土未表现出湿陷性。

对比图7(e)、7(f)可见,90%压实度下,增湿变形系数 $\delta$ 随压力的发展在低压力下即开始急剧上涨,压力门槛值下降到50~100 kPa之间,含水率增量与 $\delta$ 峰值对应压力之间的关系减弱,达到峰值后 $\delta$ 随压力的发展同样仅在高含水率增量下表现出下降趋势,低含水率下平缓发展。若以1.5%的增湿变形量为湿陷性判别标准,90%压实度的黄土,从 $w_0=11%$ 开始增湿时,在 $\sigma_v > 200$  kPa后表现出饱和湿陷性, $\delta_{\max} = 0.038$ ;  $\sigma_v > 400$  kPa后表现出含水率11%~20%的增湿湿陷性, $\delta_{\max} = 0.033$ ;  $\sigma_v > 600$  kPa后表现出含水率11%~17%的增湿湿陷性, $\delta_{\max} = 0.018$ ,含水率从11%增湿至14%时不湿陷。从 $w_0=14%$ 开始增湿时,当 $\sigma_v > 400$  kPa后表现出饱和湿陷性, $\delta_{\max} = 0.031$ ;  $\sigma_v > 600$  kPa后表现出含水率14%~20%的增湿湿陷性, $\delta_{\max} = 0.026$ ,含水率从14%增湿至17%时不湿陷。整体上, $w_0=14%$ 在各级压力下的增湿变形系数均小于 $w_0=11%$ ,即随着初始含水率的增加湿陷性质减弱,随着轴向压力的增大,引起压实黄土发生湿陷所需的 $\Delta w$ 减小。

综上,考虑到56.8 m的最大填方厚度,以及前述由于虚填厚度较大引起的压实度分异性,另外根据张贵发等<sup>[18]</sup>的研究成果,由于重塑黄土的触变性,随着压实龄期的增长,压实黄土的湿陷性将增加。因此,压实度相对较低土层在高压下压缩稳定后的浸水湿陷性质,可能会引起较大而且不均匀的工后沉降。

## 2.4 高压下黄土湿陷试验

雷祥义<sup>[19]</sup>、高国瑞<sup>[20]</sup>的研究指出:黄土湿陷是架空孔隙结构在力与水的共同作用下崩溃的结果。在此基础上发展起来的黄土湿陷性结构学说进一步总结了架空孔隙结构崩溃的影响因素,得到了广泛的认可。由于以往黄土地区的工程中,以湿陷性黄土为地基的建构筑物普遍较小、基底压力较低,而基底压力较大的工程和对沉降量控制较为严格的工程,一般会利用桩基础将基底压力传递至工程性能较为良好的地层,或将基底压力以摩擦桩的形式在深度方向上分散施加给黄土地层。因此,可以说以往对黄土湿陷性的认识大都基于浅层黄土在中低压力下的湿陷性质,一般认为深层的Q<sub>2</sub>离石黄土在不具有湿陷性。

本工程的特殊性在于:巨厚的压实黄土填方将使作用于原状黄土层上的基底压力大于1 MPa,这在以往工程中是非常少见的,原本位于浅层的原状黄土在如此巨大的压力下将表现出极高的欠固结性,会产生非常大的压缩变形。由于填筑过程比较缓慢,大部分的固结变形将表现为施工期沉降变形,对工后的坡体变形稳定影响不大,所以原状黄土的工后沉降可能会由环境改变(高压与水)诱发的突变性质(湿陷或增湿变形)所引起。方祥位等<sup>[21]</sup>研究者指出了Q<sub>2</sub>离石黄土在大压力下具有一定的湿陷性,谢定义<sup>[22]</sup>还指出大型工程用常规压力去评价Q<sub>2</sub>黄土湿陷性是危险的。因此,针对该场地Q<sub>2</sub>离石黄土开展了单线法高压湿陷试验,湿陷系数随压力发展曲线及湿陷后微观结构SEM图像见图8,对Q<sub>2</sub>离石黄土高压湿陷机理做了简要分析,限于本文的主题和篇幅这里仅作简述。

从 $\delta_s - P$ 曲线可见,若以 $\delta_s=0.015$ 为判别标准,Q<sub>2</sub>离石黄土在低压力段(0~400 kPa)仅具有饱和增湿变形性质而不具有湿陷性,500~600 kPa湿陷系数开始超过0.015,600 kPa后湿陷系数急剧上升,800~1000 kPa达到峰值 $\delta_{s\max}=0.041$ ,1000 kPa之后 $\delta_s$ 开始急剧下降,至1400 kPa达到湿陷终止压力,1600 kPa下 $\delta_s$ 平均仅为0.0025,不再具有湿陷性。整体上,该场地Q<sub>2</sub>离石黄呈现出低压下(<500 kPa)不发生湿陷、中高压下(600~1200 kPa)湿陷性明显、极高压力下湿陷性消除的规律。从各级压力下的SEM图像可以看出,在中、低压力下黄土对于水与压力作用的响应仅限于孔隙结构的调整,即结构学说中的架空孔隙崩溃,而崩溃过程的本质就是组成架空孔隙的颗粒在崩溃后充填原有孔隙空间、宏观上土体体积缩小的过程。若以文献<sup>[19]</sup>的标准,600 kPa下架空孔隙崩溃过程已经基本完毕仅剩余小、微孔隙;但从800,1000 kPa下的SEM图像可见一些低压力下未见的细小颗粒,使得小、微孔隙进一步被填充;进一步观察1400 kPa

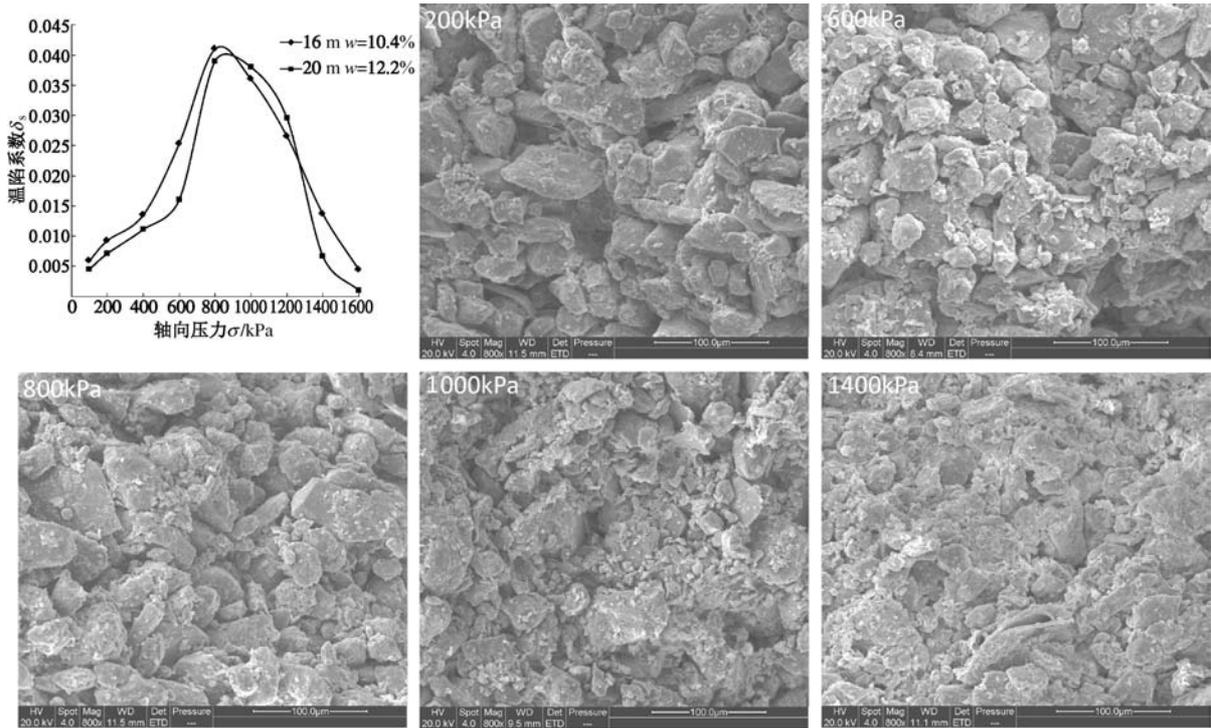


图 8 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷系数随压力发展曲线及湿陷后微结构 SEM 图像

Fig. 8 Q<sub>2</sub> Loess collapsibility coefficient versus vertical stress and microstructural SEM pictures after collapse

下的 SEM 图像可见大量的细小颗粒已经将绝大多数的小微孔隙充填。

因此可以推论, Q<sub>2</sub> 离石黄土在高压下的湿陷性问题, 关键在于水与高压共同作用下的黄土颗粒破碎。黄土沉积速率极低, 任何一层黄土在沉积之后都会经历漫长的同生作用和后生作用过程, 在这一过程中黏土颗粒会凝聚形成强度较大的团粒。高国瑞<sup>[20]</sup>的研究中也注意到了团粒作为骨架颗粒的存在, 但是他认为团粒在一般工程荷载下浸水并不变形和溃散, 进而得出了连接点的数目和强度决定架空结构体系强度, 而黏土团粒不影响架空孔隙结构强度的结论, 这样的结论显然受到了低压工况的时代背景限制。通过本次实验结果和 SEM 图像分析, 认为 Q<sub>2</sub> 离石黄土在高压下具有湿陷性质, 湿陷的产生是由于黏土团粒在高压与水的共同作用下发生破碎, 并进一步充填小、微孔隙所引起。

由于原状离石黄土位于沟底, 位于填筑前的地下水排泄带, 因此填筑完成后的第一个丰水期 Q<sub>2</sub> 离石黄土将在高压和水的作用下产生湿陷沉降, 并且会由于上覆压力的不同产生差异湿陷沉降。

### 2.5 应力路径和含水率对击实黄土强度的影响试验

滑面并非在很短的时间内形成, 从各裂缝及剪出口发展的先后顺序可以判断, 滑坡发展演化的过程中: 差异沉降裂缝—水分入渗—土体软化破坏—滑面发展—水分进一步浸入, 将是一个循环的过程, 在这一过程中潜在滑面上应力路径以及水分的影响至关重要。

针对 95% 压实度的重塑黄土开展了 4 级含水率 (11%, 14%, 17%, 饱和)、两种应力路径 (CTC、RTC, 见图 9) 的三轴试验。试样高度 10 cm, 直径 5 cm, 干密度 1.79 g/cm<sup>3</sup>, 轴向压力  $\sigma_a$  按 10, 20, 30 m 上覆土层压力分别设为 200, 400, 600 kPa, 固结主应力比  $\sigma_c/\sigma_a = 0.6$ , 相应的周围压力  $\sigma_c$  分别为 120, 240, 360 kPa。试样从  $(\sigma_a, \sigma_c)$  为 (0, 0) 状态开始偏压固结, 加压速率为 1 kPa/min, 以  $\Delta\sigma_c = 0.6\Delta\sigma_a$  为比例分别提高轴向压力与周围压力, 试样固结稳定标准为每小时轴向应变小于等于 0.5%, 而后开展两种路径的三轴压缩试验, 轴压增大及围压减小的速率均为 1 kPa/min, 试验终止标准为土样破坏或轴向应变达到 20%, 试验仪器为大陆动力学国家重点实验室的 GDS 高级动态三轴测试系统。

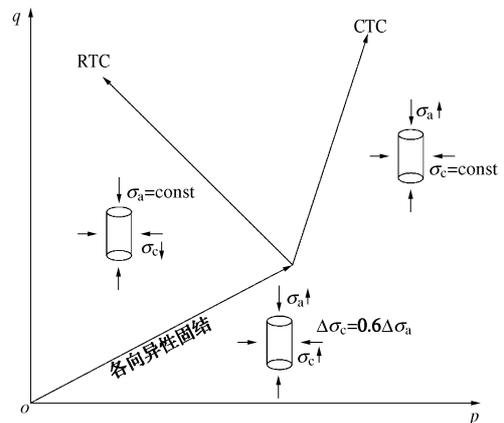


图 9 三轴试验应力路径示意图

Fig. 9 Stress paths of triaxial tests

由于土样在高围压和剪切作用下将发生排水，并且应变局部化会影响剪切带的孔隙比，这些都不同程度上影响着土样破坏时剪切带的含水率，因此无法准确判断和测量。而填方施工中填筑土体的初始含水率  $w_0$  可以得到有效的控制，因此绘制了试验所得不同应力路径下强度参数随土样初始含水率变化结果，见图 10。压实黄土 CTC 路径下的黏聚力在各级含水率下均大于 RTC 路径，黏聚力随着含水率的增加而减小且降幅较大，两种路径下的黏聚力差值随含水率的增加而减小，饱和状态下两种应力路径的黏聚力基本相同；压实黄土 CTC 路径下的摩擦角在各级含水率下均小于 RTC 路径，摩擦角同样随着含水率的增加逐渐减小且降幅较小，两种路径下的黏聚力差值随含水率的增加基本保持稳定。

由于压实黄土在 CTC 应力路径下均表现为应变

硬化型曲线，已有较多研究成果，故不再赘述。图 11 是 RTC 应力路径试验获得的偏应力 - 应变曲线，可以看出在 RTC 应力路径下不同的应力 - 含水状态组合表现出不同的应变发展趋势。低围压低含水率状态时，土样应变趋势表现为软化型，在很低的应变下即产生破坏且破坏过程非常迅速，如图 11 (a) 中  $\sigma_3=120$  kPa 和  $\sigma_3=240$  kPa 时的发展过程。低围压高含水率状态时，土样同样表现为应变软化型，但产生破坏的应变门槛值更大，破坏后应变发展速度也随着含水率的增大而减缓，如图 11 (d) 中  $w=14\%$  和  $w=17\%$  时的发展过程。高围压低含水率状态下，仅在 11% 含水率时表现出微弱的软化趋势，破坏应变门槛值更大达到 13% 左右，破坏后的应变速率相比其它表现出软化趋势的围压 - 含水率组合状态下的应变速率要小。中等围压、中等含水率状态时，除应变 17%~20% 的过程变形速

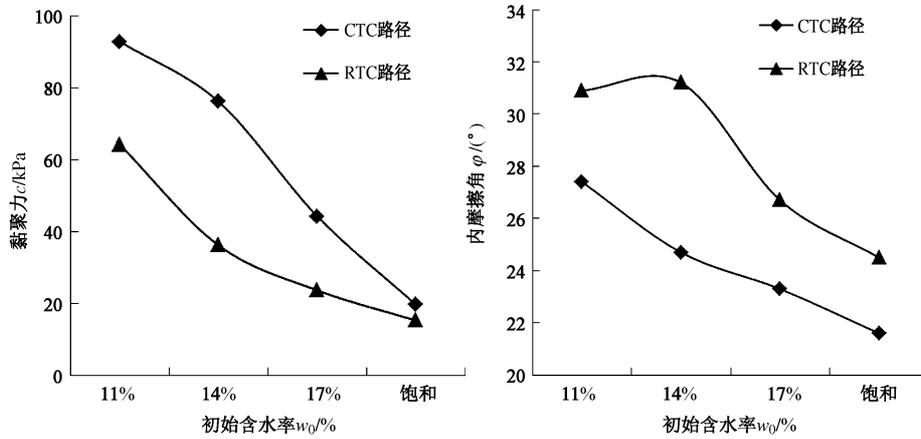


图 10 CTC 及 RTC 路径下强度参数随初始含水率变化曲线

Fig. 10  $c, \phi$  versus initial water content for CTC and RTC stress paths

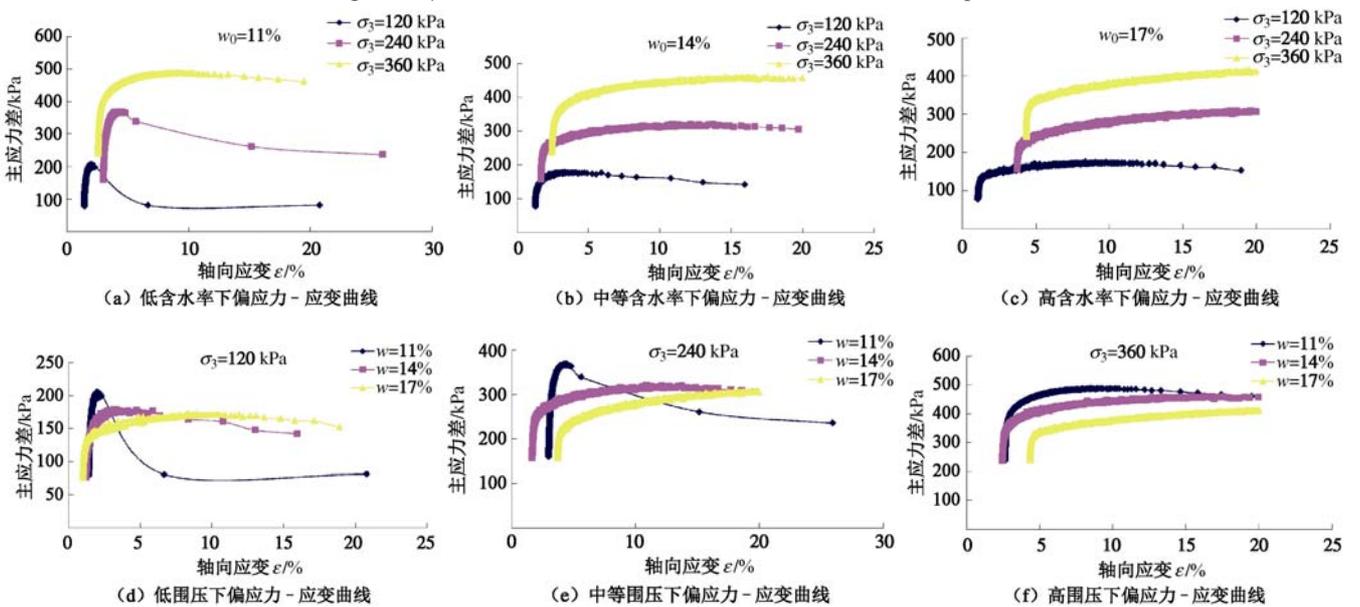


图 11 RTC 应力路径试验各围压与含水率组合状态偏应力 - 应变曲线

Fig. 11 Deviatoric stress-axial strain curves of loess under RTC stress paths with different  $\sigma_c - w$  combinations

度有所加快, 土体已经基本呈现出应变硬化状态。高围压高含水率状态时, 应力-应变曲线则完全呈现出硬化型趋势。

整体上, 从低围压低含水率状态到高围压高含水率状态, 压实黄土的偏应力-应变过程逐渐由应变软化型向应变硬化型转变, 土样从较低应变下即产生软化破坏的状态, 过渡为较高的应变门槛值才产生软化破坏, 最终软化现象消失彻底转变为应变硬化状态。

## 3 讨 论

### 3.1 坡顶地面裂缝与工后沉降

第1道坡顶地面裂缝出现在填筑完成3个月后, 发育在坡肩附近; 进入雨季坡顶地面出现第2道裂缝, 发育在土面区; 最终发育的第3道裂缝均沿着填挖方交界展布, 且在连续填方位置不发育。从各裂缝发育的时间和位置可以讨论其成因。

从图12可以看出, 裂缝①发育的位置下部为贴坡填方前原状黄土坡体的变坡点, 填方后变坡点两侧的填方厚度差异较大, 根据前述试验结果可以推论填方厚度越大沉降也会越大, 差异沉降将导致土体内部产生剪切应力, 由其引起的变形从深部积累至地表, 并由塑性变形转变为断裂破坏, 并最终表现为坡顶地面裂缝。

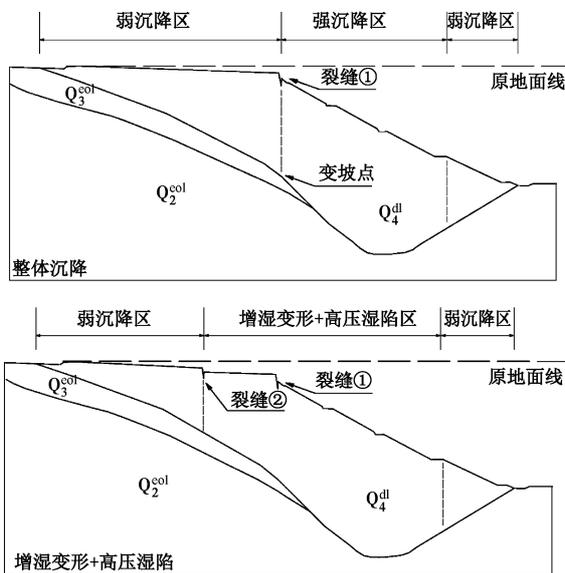


图12 坡顶地面裂缝与工后沉降关系示意图

Fig. 12 Relationship between cracks on slope top surface and post-construction settlement

裂缝②发育在8月份的丰水期, 填方土体掩埋的马群沟是附近地下水的排泄带, 填方土体阻碍了地下水的排泄将使局部土体含水率增高, 根据前述试验结果, 填方土体在增湿条件下将出现进一步沉降, 沉降量随压力增大而增大。裂缝②发育的位置下部填方厚

度为25.6 m, 填方土体密度以 $2.06 \text{ g/cm}^3$ 计, 可算出上覆填土的土压力为527 kPa, 压力已经基本达到了下覆原状黄土高压湿陷系数急剧上涨的压力门槛值(见图8), 该位置两侧将产生差异湿陷沉降。压实黄土增湿变形和 $Q_2$ 离石黄高压湿陷变形使裂缝②两侧土体差异沉降加大, 导致裂缝②形成。

### 3.2 滑面的形成和发展过程

黄土经碾压和夯实后孔隙结构被破坏, 孔隙连通性下降渗透性降低, 而坡顶面裂缝的形成将加强填方体的渗透性能, 增强水分浸入对土体强度和变形性质的影响。由于坡顶面的排水设计, 坡肩处略低于坡后缘, 加之填土表面经过碾压和夯实渗透率低且没有植被, 裂缝②后部土面区将成为汇水面, 降雨会在坡顶形成面流流向前缘, 至裂缝②处灌入坡体内部。水分灌入后会软化裂缝尖端及两侧的土体, 使裂缝进一步加深和拓展, 形成滑体I的后壁。

水分浸入与滑体I的滑面发展交替进行, 这一过程中由于上部滑面已形成的土体仅剩残余强度承载力下降, 因此作用在未破裂区的荷载将增加, 土体受力路径相当于常规三轴压缩(CTC)路径, 根据前述试验结果, 水分的浸入使得土体强度参数下降, 两个因素共同作用促使滑体I的滑面不断发展。

随着滑体I的滑面发展, 滑体I将向前部蠕动, 这一过程等效于对滑体II卸荷, 受力路径上相当于轴向压力不变而侧向压力降低的减压三轴压缩(RTC)路径, 同时由于从裂缝②灌入的水分会进一步向周围扩散, 土体含水率增加的情况下土体强度参数下降, 卸荷与土体增湿导致滑体II的滑面形成并逐渐向后发展, 逐步发展至地表形成裂缝③, 裂缝③的出现预示着滑体II的滑面已经贯通。

经过不断演化, 滑面主体部分形成后仅剩前端锁固段抵抗坡体失稳, 由于已经破裂形成滑面的土体仅具有残余强度, 无法发挥原有的抗滑能力, 使作用于锁固段的压力随着滑面的发展而急剧增加, 同时水分浸润使得土体强度参数下降, 锁固段土体最终在荷载增加与水分浸润的共同作用下发生剪切破坏, 滑面贯通形成前缘剪出口, 坡体进入蠕动阶段, 后缘裂缝③进一步扩展。滑面形成演化过程及相应的受力路径示意图见图13和图14。

### 3.3 黄土贴坡高填方变形破坏机制

通过对该贴坡高填方黄土边坡变形破坏特征与发展过程的分析 and 总结, 认为坡体所处的地质环境、工程地质条件、填土和下覆原状黄土的力学性质、以及坡体变形发展过程中的应力路径, 综合作用诱发了该边坡的变形破坏。进而开展了相应的压实土增湿压

缩试验、 $Q_2$  离石黄土高压湿陷试验和 SEM 扫描、以及 CTC 与 RTC 应力路径下的三轴试验，基于试验结果，分析得出了黄土贴坡高填方的变形破坏机制。

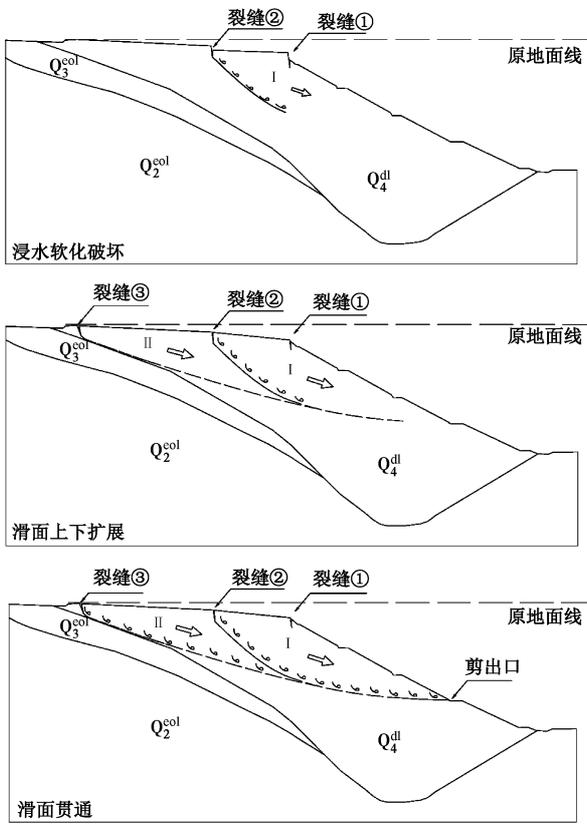


图 13 滑面形成演化过程示意图

Fig. 13 Formation and evolution process of sliding surface

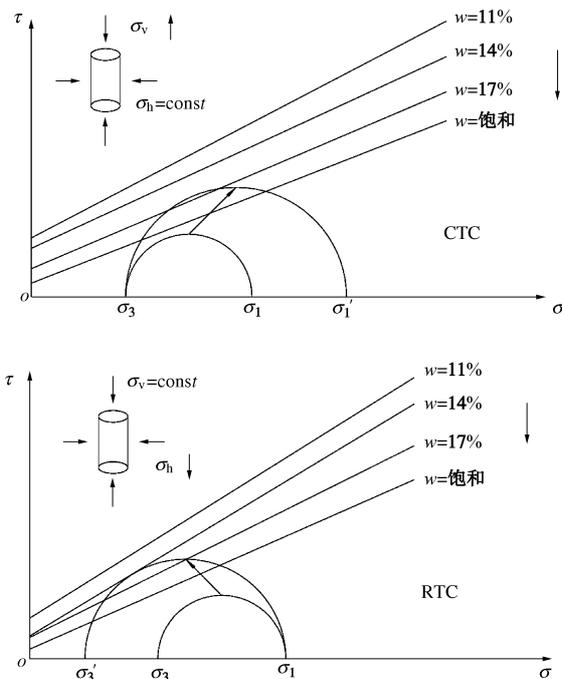


图 14 滑面形成演化过程受力路径示意图

Fig. 14 Stress paths of sliding surface formation and evolution process

首先，填方黄土体即是沉降介质又是下覆地层的荷载，填方厚度越大其自身沉降量越大，同时对下覆土层的荷载也越大，由此引起的下覆黄土层沉降量也就越大。在没有外部水分影响的情况下，沉降量的大小完全取决于填方厚度，而填方前的陡坡地形引起了填方厚度差异，最终表现为沉降差异使坡肩产生裂缝。

第二，由于填土阻断了原有的地下水排泄通道，水分淤积使得坡体中下部土层含水率升高，引起压实黄土的增湿变形以及下覆原状黄土的高压湿陷变形，由于高压湿陷变形具有压力门槛值，填方厚度差异的影响再次体现在高压湿陷的沉降差异上，诱发坡顶地面产生新的裂缝。

第三，裂缝的产生改变了坡体的渗透性能，雨季时水分沿裂缝大量灌入使得裂缝尖端及两侧土体软化，裂缝得以加深和扩展，逐渐形成初始滑面。初始滑面形成后，将同时向上和向下扩展。

第四，滑面向下发展的过程属于加载过程，由于已经破裂的土体仅具有残余强度无法再发挥原有的承载能力，随着滑面的发展作用于潜在滑面土体上的荷载逐渐增加，在水分浸入软化土体的作用下相互促进发展。滑面向上发展的过程属于卸荷过程，由于滑面向下发展的过程中下部土体将发生蠕变，相当于对上部土体卸荷，随着卸荷幅度的增大以及水分浸润软化，土体将发生破坏形成滑面，这一过程将交替进行至地表，形成滑坡后缘裂缝。

最后，已经形成的滑面从滑坡后缘裂缝直通前缘锁固段土体，在水分浸润与加载过程共同作用下锁固段土体破坏，滑面贯通使坡体整体失稳并向前蠕变，坡体前缘土体剪出，后缘裂缝加宽并横向扩展。

#### 4 结论与展望

本研究通过现场详勘与工程地质分析，确定了黄土贴坡高填方变形破坏的影响因素，进而针对各因素开展了相应的室内试验进行定量研究，获得了一些认识，最后基于现场与室内试验结果分析了这类边坡变形破坏机制，结论如下：

(1)黄土贴坡高填方最主要的特点是填方厚度随下覆坡体地形的变化而产生差异，由于填方体既是沉降介质又是荷载，其厚差异将导致沉降差异进而引起坡顶地表产生裂缝，而裂缝是诱发后续变形破坏的必要条件。

(2)黄土压实度不足的情况下具有增湿变形性质；高压下  $Q_2$  离石黄土由于颗粒破碎而具有湿陷性质；增湿变形量和高压湿陷变形量均受到压力也即填方厚度的控制，可引起差异沉降。

(3) 压实黄土的强度参数在 CTC 路径和 RTC 路径下均随着含水率的增大而减小。水分沿裂缝的入渗使坡体中部产生初始滑面, 初始滑面形成后将同时向上和向下扩展, 滑面向下扩展的过程属于加载增湿破坏过程, 向上扩展的过程属于卸荷增湿破坏过程, 水分浸润使土体软化加速了滑面的发展。

(4) 黄土贴坡高填方变形破坏机制可以概括为: 填土及下覆原状土工后沉降导致坡肩开裂→填土增湿沉降及原状土高压湿陷诱发坡肩进一步开裂→水分沿裂缝入渗软化土体→中部初始滑面形成→水分进一步浸润→前部土体加载增湿破坏→后部土体卸荷增湿破坏→锁固段土体加载增湿破坏→滑面贯通整体失稳。

本文研究中仅考虑了单向增湿过程对土体强度衰减的影响, 由于黄土地区降雨集中旱季雨季区别明显, 长期来看干湿循环作用对土体强度衰减的影响不容忽视, 有待于进一步研究。基于本文的研究, 可以发现这类边坡的变形破坏主要在于沉降致裂后水分浸润使土体软化而引起, 由于贴坡填方工程的特殊性, 其工后差异沉降不可避免, 因此防治这类边坡变形破坏关键在于对差异沉降和坡肩裂缝的监测和控制, 须及时挖除裂缝并对差异沉降进行超填, 防止过水通道的形成, 可在很大程度上避免坡体失稳。

**致 谢:** 感谢西安科技大学王念秦教授对本文现场工作的建议和指导, 感谢国家留学基金对本文的支持。

#### 参考文献:

- [1] 张卫兵. 黄土高填方路堤沉降变形规律与计算方法的研究[D]. 西安: 长安大学, 2007. (ZHANG Wei-bing. Study on settlement deformation laws and calculation method of high loess filled embankment[D]. Xi'an: Chang-an University, 2007. (in Chinese))
- [2] 宋焱勋, 彭建兵, 张 骏. 黄土填方高边坡变形破坏机制分析[J]. 工程地质学报, 2008(5): 620 - 624. (SONG Yan-xun, PENG Jian-bing, ZHANG Jun. Deformation mechanism of high loess embankment slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2008(5): 620 - 624. (in Chinese))
- [3] 李喜忠. 斜坡高填方黄土路基破坏机理与加固措施[J]. 北方交通, 2013(9): 28 - 31. (LI Xi-zhong. Study on failure mechanism and reinforcement technology of high earth fill loess sub-grade on the slope[J]. North Transportation, 2013(9): 28 - 31. (in Chinese))
- [4] 胡小明, 余学明. 高填方黄土路堤的最优填筑密度分区研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(1): 40 - 43. (HU Xiao-ming, YU Xue-ming. Research on distributing zones of optimum filling density in high loess embankment[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2002, 34(1): 40 - 43. (in Chinese))
- [5] 张丽萍. 黄土高路堤稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2005. (ZHANG Li-ping. Study on stability of high loess filled embankment[D]. Xi'an: Chang-an University, 2005. (in Chinese))
- [6] 胡长明, 梅 源, 王雪艳. 吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J]. 工程力学, 2013, 10: 108 - 114. (HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Deformation and shear strength characteristic of compacted Malan loess in Lv-liang region[J]. Engineering Mechanics, 2013, 10: 108 - 114. (in Chinese))
- [7] 谢 妮, 邹维列, 严秋荣, 等. 黄土路基边坡降雨响应的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009(4): 31 - 36. (XIE Ni, ZOU Wei-lie, YAN Qiu-rong, et al. Experimental research on respond of a loess subgrade slope to artificial rainfall[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2009(4): 31 - 36. (in Chinese))
- [8] 赵彦旭. 压实黄土增湿变形的非饱和土力学研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010. (ZHAO Yan-xu. Unsaturated soil mechanics characteristics of compacted loess moistening deformation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese))
- [9] 唐朝生, 刘义怀, 施 斌, 等. 新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2007(2): 13 - 17. (TANG Chao-sheng, LIU Yi-huai, SHI Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007(2): 13 - 17. (in Chinese))
- [10] 胡长明, 梅 源, 刘增荣, 等. 湿陷性黄土高贴坡变形模式和稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(12): 2585 - 2592. (HU Chang-ming, MEI Yuan, LIU Zeng-rong, et al. Deformation mode and stability analysis of high sticking slope of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(12): 2585 - 2592. (in Chinese))
- [11] 朱才辉, 李 宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013(2): 293 - 301. (ZHU Chai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of LÜ-Liang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(2): 293 - 301. (in Chinese))

- [12] 姚雪贵, 杨彪, 雷愿锋, 等. 冲击压实法在湿陷性黄土高填方地基处理中的试验观测[J]. 工程建设, 2011(2): 38 - 39, 51. (YAO Xue-gui, YANG Biao, LEI Yuan-feng, et al. Testing and measuring of impact compaction method for collapsible loess high-fill foundation treatment[J]. Engineering Construction, 2011(2): 38 - 39, 51. (in Chinese))
- [13] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q<sub>3</sub>)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 21 - 31. (ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. The deformation characteristics of collapsible loess during wetting process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 21 - 31. (in Chinese))
- [14] 张苏民, 张炜. 减湿和增湿时黄土的湿陷性[J]. 岩土工程学报, 1992(1): 57 - 61. (ZHANG Su-min, ZHANG Wei. The collapsibility of loess during demisting and moistening process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992(1): 57 - 61. (in Chinese))
- [15] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J]. 岩土力学, 2005(9): 1363 - 1368. (ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Characteristics of collapsibility coefficient curves of loess during moistening and demisting process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(9): 1363 - 1368. (in Chinese))
- [16] 陈存礼, 蒋雪, 杨炯, 等. 结构性对压实黄土侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(9): 1939 - 1944. (Influence of soil structure on confined compression behavior of compacted loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(9): 1939 - 1944. (in Chinese))
- [17] 伍石生, 武建民, 戴经梁. 压实黄土湿陷变形问题的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997(3): 1 - 3. (WU Shi-sheng, WU Jian-min, DAI Jing-liang. Study on wetting collapse compacted loess[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997(3): 1 - 3. (in Chinese))
- [18] 张贵发, 邱慧玲. 龄期对压实黄土湿陷性影响的试验[J]. 水资源与水工程学报, 1990(4): 66 - 68. (ZHANG Gui-fa, QIU Hui-ling. The tests on influence of collapsibility of compacted loess age[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 1990(4): 66 - 68. (in Chinese))
- [19] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987(12): 1309 - 1318. (LEI Xiang-yi. The porosity type and collapsibility of Chinese loess[J]. Science in China (Ser. B), 1987(12): 1309 - 1318. (in Chinese))
- [20] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990(4): 1 - 10. (GAO Guo-rui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990(4): 1 - 10. (in Chinese))
- [21] 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷变形特性研究[J]. 岩土力学, 2013(增刊 2): 115 - 120. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, LI Chun-hai, et al. Collapsible deformation properties of Q<sub>2</sub> loess in Pucheng of Shaanxi province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(S2): 115 - 120. (in Chinese))
- [22] 谢定义. 试论中国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(1): 3 - 13. (in Chinese))