

DOI: 10.11779/CJGE202005006

# 降雨对沟谷状黄土高填方地基增湿影响研究

朱才辉, 李 宁

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 研究高填方地基在降雨条件下的入渗规律和增湿变形问题, 对黄土沟壑区高填方的工后沉降形成机制探索和防排水设计具有重要意义。以某黄土高填方工程为背景, 开展了填方区原位沉降监测和非饱和土的水-力特性室内试验, 并基于流-固耦合数值方法, 研究了不同降雨类型和不同压实度下高填方地基的入渗规律和增湿变形特性。结果表明: ①黄土高填方地基因压实度不均和降雨类型差异, 降雨影响深度为地表下 2.0~7.0 m; ②强降雨(暴雨、大雨)引起的增湿变形比为 1.6%, 大于中雨的 1.2%和小雨的 0.3%, 不同压实度下( $\lambda$ 为 0.88, 0.93, 0.98)强降雨引起的填方体增湿变形比分别为 1.8%, 1.5%, 1.3%, 采取适当的防排水措施对减小高填方地基增湿沉降的具有重要意义; ③强降雨会引起填挖方交界面处产生过量的差异增湿沉降和剪切应变突变, 这是导致填挖方交界面处出现开裂和水毁的主要根源。

**关键词:** 高填方地基; 黄土沟壑区; 降雨入渗; 增湿变形

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)05-0845-10

**作者简介:** 朱才辉(1983—), 男, 陕西商南人, 博士, 副教授, 主要从事黄土力学与工程等方面的教学与研究工作。

E-mail: zhucaihui123@163.com。

## Moistening effects of high-fill embankment due to rainfall infiltration in loess gully region

ZHU Cai-hui, LI Ning

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Investigating the infiltration law and moistening deformation (MD) of high fill embankment (HFE) under rainfall infiltration (RI) conditions is of great significance for the exploration of the formation mechanism of post-construction settlement and the design of water drainage for high fill in the loess gully area. Based on a loess high fill project, the in-situ settlement monitoring of the fill area and the water-force characteristic experiments of unsaturated soil are carried out. The fluid-solid coupling numerical method is employed to study the infiltration law and MD characteristics of HFE under different rainfall types and compaction degrees. The results show that: (1) Because of the unevenness of compaction degree and rainfall type, the RI depth below the surface of HFE changes from 2.0 m to 7.0 m. (2) The MD ratio caused by heavy RI (storm, heavy rain) is 1.6%, which is greater than 1.2% of moderate rain and 0.3% of light rain. The MD ratios caused by heavy rainfall under different compaction degrees ( $\lambda=0.88, 0.93$  and  $0.98$ ) are 1.8%, 1.5% and 1.3%, respectively. It indicates that the appropriate waterproofing and drainage measures are important to reduce the MD of HFE. (3) Heavy RI can cause excessive MD differences and shear strain mutations at the interface of the fill and the original foundation, which are the main sources of cracking and water damage at the junction of the fill and the original foundation.

**Key words:** high-fill embankment; loess gully region; rainfall infiltration; moistening deformation

## 0 引 言

西部黄土沟壑区近年来的上山建城、平山造地工程已日渐增多, 由此引发的诸多填挖方工程设计和存在的岩土工程问题也日趋引起关注, 如黄土高填方地基压实工艺与工后长期变形的原位监测、预测方法等问题<sup>[1-5]</sup>, 沟壑区改造使水环境发生变化而诱发的水害及防治措施问题等进行了深入研究<sup>[6-8]</sup>。以某地区黄土

高填方为例<sup>[5]</sup>, 由于防排水措施未及时采用或失效, 在不均匀沉降区域及临近填挖交界的开裂处出现大量水毁(雨蚀、冲沟、陷坑)现象, 如图 1 所示。

上述由于降雨导致高填方地基不均匀沉陷和水毁

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678484); 国家留学基金委项目(CSC:201808610061); 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室(2019KJCXTD-12)

收稿日期: 2019-03-17

问题,引起学者广泛关注。文献[2, 7]针对某“填沟造地”工程的工后沉降和水分入渗后地基水分沿深度变化规律开展了大量原位监测研究,表明地表降雨和极端情况下地表积水导致水分向地基内入渗深度最大达 7.0 m,但对于降雨入渗引起的增湿变形及其他灾害问题未进行深入探讨。目前研究主要集中在对原状黄土地基或边坡的开展的原位浸水测试<sup>[9-11]</sup>和非饱和黄土在增减湿影响下的水-力特性室内试验<sup>[12-15]</sup>,文献[16~19]分别采用数值方法和模型试验方法研究了路基边坡在降雨入渗后的水分场分布规律及其开裂变形问题,上述研究在黄土填方边坡或路基挖方边坡工程中的应用较多,这些为深入认识非饱和黄土的变形机制和湿陷性黄土地基的设计理论提供了科学支撑,然而针对大体积黄土填方地基的降雨入渗规律、增湿变形特性及其存在的岩土工程灾害问题研究则不多,且对工程实际中的大量变形监测数据中关于降雨引起的增湿变形问题分析也较缺乏。



图1 某沟谷区黄土高填方地基裂缝及水毁现象

Fig. 1 Cracks and water damage of HFE in loess gully region

鉴于此,本文以某黄土高填方工程原位变形监测结果为背景,开展了大量的不同初始状态下非饱和黄土的水-力特性室内试验,并结合 GEO-Studio 流-固耦合数值分析程序,针对不同降雨类型、不同压实状态下的黄土高填方地基的增湿影响进行系统研究,并与实测资料进行对比,获取高填方降雨引起增湿特性的普适性规律,希望能够为高填方工程的防排水设计、工后沉降变形预测提供科学参考。

## 1 高填方地基降雨增湿影响原位监测

### 1.1 试验段工程背景

西部某黄土高填方机场拟建在黄土山梁上,填方最深处约 80 m,梁体自然宽度在 120 m 左右,长度约 3.2 km。场地中间有 2 条较大冲沟将场地分割。试验段位于某冲沟区域,该冲沟总体呈近南北走向,由东北向西南倾斜,沟谷纵坡降约 7.1%。试验段范围内沟长约 700 m,宽度 10~50 m,切割深度 50~100 m。试验段内地形起伏较大,冲沟发育,纵横切割,沟谷横截面上游呈“V”字形,下游呈“U”字形,沟谷两侧坡度为 40°~80°。站坪和联络道部位所在的上部

冲沟两侧,沟谷中裸露出来的土体分层从顶部至底部:①约 22 m 厚  $Q_3$  黄土;②约 10 m 厚  $Q_2$  黄土;③约 30 m 厚粉质黏土;④基岩为厚层砂页岩。该区属大陆性半干旱气候,降雨多集中在 6 月—9 月,约占年总降雨量的 60%以上。年最大降雨量为 744.8 mm,年最小降雨量 245.0 mm,多年年平均降水量约 500 mm,多年年平均蒸发量为 1837.9 mm。现场勘探深度内无地下水,推测其地下水在砂页岩层中,长期形成潜水或裂隙水。

试验段原地基采用 3000, 6000 kN·m 强夯的方法进行加固处理,局部采用碎石桩挤密加固,采用厂拌法施工,通过击实试验可得到填料  $Q_3$  黄土的最优含水率约为 12.5%~13.3%,最大干密度为 1.78~1.88 g/cm<sup>3</sup>,现场施工中实际采用的含水率为 13.0%~16.0%,略高于最优含水率的 0.5%~3.5%,实测压实度分布为 0.89~0.97,平均压实度为 0.93。

为了监控高填方地基在施工及工后期的变形,在填筑体边坡内部和填筑完成后的填方体表面布设了地表沉降监测点、深层沉降监测点等<sup>[5]</sup>,如图 2 所示。

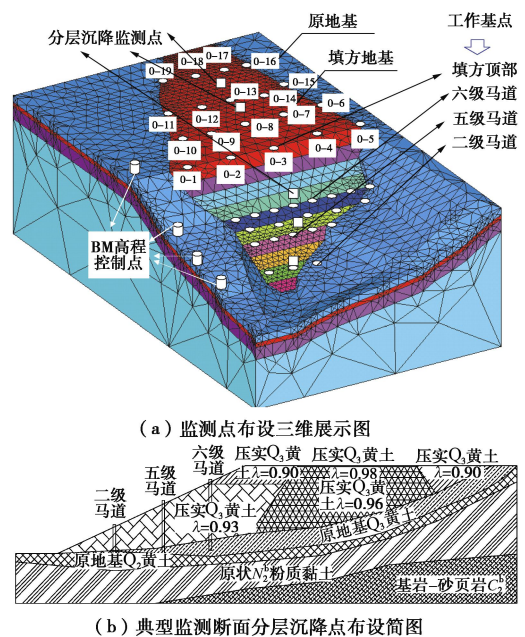


图2 某高填方地基变形监测点布设示意图

Fig. 2 Monitoring points of a loess HFE

### 1.2 增湿变形速率分析

该高填方竣工后,在填方边坡二级、五级、六级马道中部及填方设计高程顶部的填筑体内部分别布设了分层沉降和地表沉降监测点,将其地表沉降监测点、地表以下 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 3.5 m 处的工后沉降速率在降雨期和非降雨期进行对比,如图 3 所示(因篇幅受限,仅展示填方顶部监测结果)。

(1) 填方竣工后,在无外堆载作用下,填方体及

原地基沉降速率均呈缓慢减小趋势,但在 5 月—9 月的降雨期,地表及一定深度处填方土体沉降速率出现“突增”现象,表明降雨对高填方地基表面的“增湿”效应明显。经验表明,高填方地基采取强夯和碾压后,其湿陷性仍难以完全消除,主要是黄土内部大孔隙被压密后,仍有大量小孔隙难以被充分压密消除,降雨之后,水分仍能缓慢入渗至压实土内部,造成湿陷性恢复而产生自重作用下的增湿沉降。

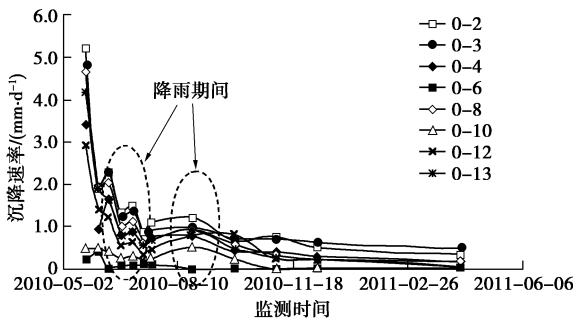


图 3 高填方顶部工后沉降速率曲线  
Fig. 3 Settlement rates of surface of HFE

(2)以高填方设计高程顶部的沉降速率特性为例分析,填方表面沉降速率由竣工初始阶段的最大值 5.3 mm/d 衰减至后期的 1.1 mm/d,但在 5 月—9 月降雨期间,沉降速率又“突增”至 2.4 mm/d,且填方表面以下约 3.5 m 的夯土层沉降速率也有明显的“突增”迹象,可推断:黄土高填方地表以下至少约 3.5 m 范围内的填土在降雨期间有明显的“增湿”现象,而降雨对原地基的增湿效果不显著,降雨入渗对地下水的补给效应较小。

### 1.3 降雨引起的增湿变形量估算分析

由于原位监测得到的沉降量中,既包括填筑体和原地基的长期蠕变压缩及超固结非饱和土的排气和弱排水固结变形<sup>[2,5,7]</sup>,很难将因降雨增湿引起的变形分离开。为了粗略得到降雨入渗引起高填方顶面的增湿变形量,抽取出监测数据中的无降雨影响下实测沉降速率  $v$  与其累计监测时间  $T$  曲线,并构建其函数关系:

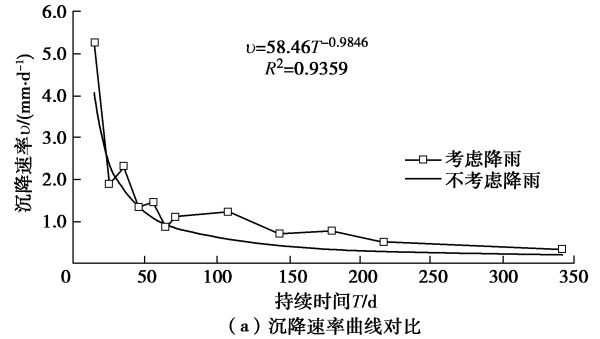
$$v = AT^\beta \quad (1)$$

式中,  $A, \beta$  为经验拟合参数,与填土、原地基压缩层厚度及施工工艺有关。

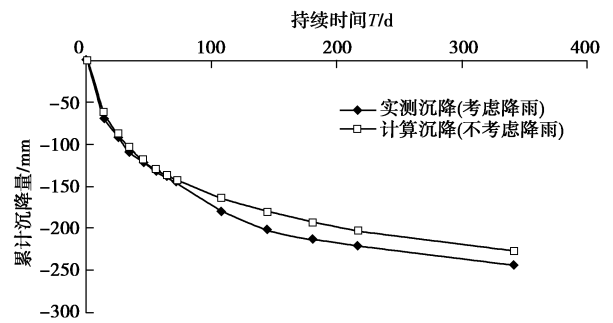
这样便可得到不考虑降雨影响下的沉降速率曲线与实测沉降速率曲线(即考虑降雨入渗影响的沉降速率历时曲线),见图 4(a)。根据式(1)可以逐段推算沉降量历时曲线  $S_{T_n}$ :

$$\left. \begin{aligned} S_{T_0} &= T_0 v_0, \\ S_{T_1} &= S_{T_0} + (T_1 - T_0) v_1, \\ \dots \\ S_{T_n} &= S_{T_{n-1}} + (T_n - T_{n-1}) v_{n-1}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中,  $S_{T_0}, S_{T_1}, S_{T_{n-1}}, S_{T_n}$  分别为监测总历时为  $T_0, T_1, T_{n-1}, T_n$  所对应的总沉降量(mm),  $v_0, v_1, v_{n-1}$  分别为监测总历时为  $T_0, T_1, T_{n-1}$  所对应的平均沉降速率(mm/d)。



(a) 沉降速率曲线对比



(b) 沉降历时曲线对比

图 4 有无降雨影响下的沉降速率及增湿变形曲线对比

Fig. 4 Settlement rates and MD curves by considering RI or not

以图 3 中的基点 0-2 为例,通过上述沉降速率与累计时间关系曲线(式(1))及沉降量推算公式(式(2)),可计算出在不考虑降雨影响与考虑降雨(实测)影响下的沉降历时曲线,见图 4(b)。从图 4 中的曲线进行对比可见:

(1)由于降雨入渗引起的增湿沉降速率及总沉降量历时曲线,与不考虑降雨影响下的规律曲线存在明显的差异,前者平均沉降速率及最终总沉降量明显大于后者。

(2)以文中方法,可粗略估算出不同空间位置处监测点的增湿变形量,通过针对该工程的二级、五级、六级马道及高填方顶部测点的反算得到考虑降雨后的地基增湿变形可达 30~50 mm,后期进一步监测数据表明,高填方中部局部积水较严重区域增湿变形达 100 mm,可见,高填方顶部由于降雨引起的增湿变形不容忽视,该估算方法在后期的填方顶部增补填方量的平衡计算及工后沉降的合理预测具有重要意义。

### 1.4 地基水分迁移规律及变形机制

为了进一步探查高填方地基内部水分的迁移规律,工后期在二级马道中部向地基深部钻孔(0~22.0 m 为填方体),22.0~25.0 m 为原地基土层,每隔 2.0~

3.0 m 布设水分传感器 TDR, 来监控地基内部水分的变化过程, 根据当地的降雨情况, 选取在中雨和小雨工况下的体积含水率监测结果, 见图 5。

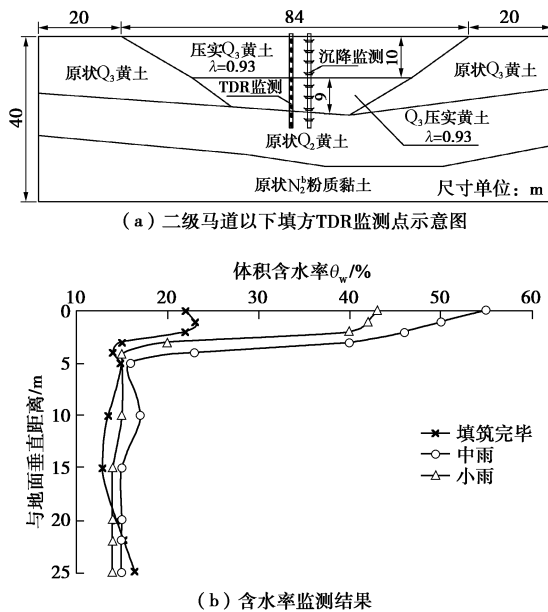


图 5 高填方地基深层含水率随深度变化曲线

Fig. 5 Variation of water content with depth of HFE

(1) 相对于填筑完毕后, 填筑体表面以下约 6.0 m 夯土层受到外界水环境变化的影响较为明显, 降雨期地表浅层 3.0 m 范围内水分入渗迅速增大, 体积含水率达 40%~55%, 最大增幅约为 32%; 地表以下约 3.0~6.5 m 深度土层含水率逐渐递减至 16.0% 左右, 深层土体的含水率相对于竣工后的含水率变化不大, 表明短期内降雨对地表以下约 6.0 m 的土层增湿效应明显, 对地下水的补给可能性较小。

(2) 结合高填方地基沉降监测资料, 笔者认为黄土高填方地基的沉降主要包括: ①原地基在上部高填方自重荷载下的排气、排水固结变形; ②填方体在自重下的小孔隙的持续压密和非饱和土的排气变形; ③地表降雨入渗引起填方顶面以下约 6.0 m 范围内的增湿变形。当黄土高填方采取了有效的防排水措施 (如沟壑底部采取盲沟排水, 填方坡面采取横向和纵向排水沟等), 第③部分的变形或可消除, 但工程监测表明, 防排水措施的失效后的持续降雨入渗, 可能会成为高填方地基出现不均匀沉降、水害甚至边坡失稳的重要原因。

## 2 地基土的物理力学特性

### 2.1 土水特征 SWCC 曲线试验

为了研究高填方地基在降雨入渗条件下的增湿变形特性, 通过对现场原状 Q<sub>3</sub> 黄土、Q<sub>2</sub> 黄土及粉质黏土 N<sub>2</sub><sup>b</sup>、不同压实度 Q<sub>3</sub> 黄土填料进行现场取样, 取样

深度约为地表以下 2~3 m, 然后进行制样, 开展室内相关试验, 其原状土样的常规物理指标见表 1。

表 1 高填方地基原状土物理指标

Table 1 Physical indices of undisturbed soil in HFE

土层名称	含水率 w/%	干密度 ρ <sub>d</sub> /(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比 e <sub>0</sub>	液限 w <sub>L</sub> /%	塑限 w <sub>p</sub> /%
Q <sub>3</sub> 黄土	13.3	1.48	0.826	24.9	16.0
Q <sub>2</sub> 黄土	21.9	1.65	0.656	28.8	17.3
粉质黏土	22.0	1.64	0.663	29.9	17.5

通过室内击实试验得到, 压实 Q<sub>3</sub> 黄土的最优含水率 w<sub>op</sub>=13.3%, 最大干密度 ρ<sub>dmax</sub>=1.88 g/cm<sup>3</sup>。基于 GCTS 公司生产的压力板仪来测定无荷载状态下, 原状 Q<sub>3</sub>、Q<sub>2</sub> 黄土和不同压实度 Q<sub>3</sub> 黄土 (压实度为 0.88, 0.90, 0.93, 0.95, 0.98) 的 SWCC 曲线 (考虑到工程实际以及大量关于非饱和黄土的土水特征研究结论, 一般压实土及天然黄土的基质吸力不超过 200 kPa, 本文仅开展基质吸力控制在 0~400 kPa 下的 SWCC 曲线试验); 同时通过室内变水头试验, 获取饱和状态下原状 Q<sub>3</sub> 黄土和不同压实度 Q<sub>3</sub> 黄土的饱和渗透系数 k<sub>s</sub>, 试验结果如图 6 所示。

为了便于描述 Q<sub>3</sub> 黄土的土水特征及后期数值分析计算, 根据 V-G 模型<sup>[20]</sup>来获取土水特征参数:

$$\left. \begin{aligned} \theta_w &= \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m}, \\ m &= 1 - \frac{1}{n}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,  $\theta_s$  为饱和体积含水率,  $\theta_r$  为残余体积含水率,  $a$  为与进气值有关的参数 (kPa),  $m$ ,  $n$  为 V-G 模型曲线形态有关的参数,  $\psi$  为基质吸力 (kPa)。

根据式 (3) 采用最小二乘法针对 SWCC 实测曲线进行曲线拟合, 可得到不同状态下黄土的土壤水分特征曲线 VG 模型参数如表 2 所示。

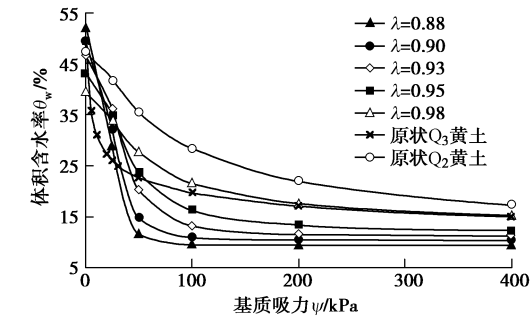
表 2 不同状态下黄土 V-G 模型参数

Table 2 V-G model parameters of compacted loess

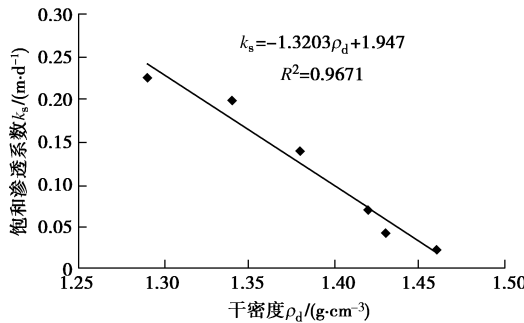
a /kPa	m	n	θ <sub>s</sub> /%	θ <sub>r</sub> /%	K <sub>s</sub> / (10 <sup>-6</sup> m·d <sup>-1</sup> )	ρ <sub>d</sub> / (g·cm <sup>-3</sup> )	λ
38.0	0.38	1.6	47.5	8.0	3000	1.65	原状 Q <sub>2</sub>
12.0	0.44	1.8	47.1	11.5	231000	1.48	原状 Q <sub>3</sub>
22.2	0.78	4.6	52.1	9.5	630	1.65	0.88
23.8	0.74	3.9	49.6	10.4	410	1.69	0.90
28.6	0.69	3.2	46.7	11.1	210	1.75	0.93
29.4	0.61	2.6	43.1	11.8	140	1.79	0.95
32.3	0.48	1.9	39.5	12.8	70	1.84	0.98

目前, 由于非饱和土渗透系数的测试方法不仅操作复杂, 试验周期长, 而且现有仪器的测量结果不一, 因此有学者提出了利用土水特征曲线间接得到非饱和

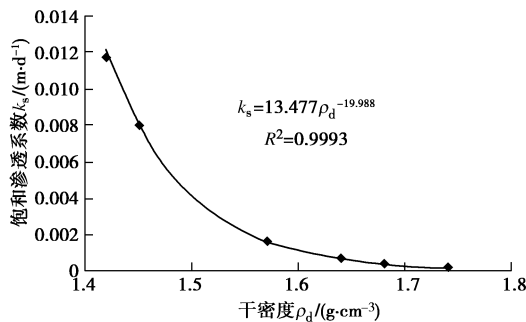
渗透系数方法, 可借鉴非饱和土渗流分析软件 GEO-seep/w 进行直接计算<sup>[21]</sup>。



(a) 不同初始状态下黄土SWCC曲线



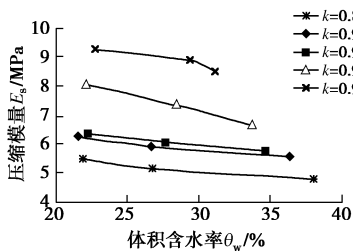
(b) 原状Q<sub>3</sub>黄土饱和渗透系数与干密度关系



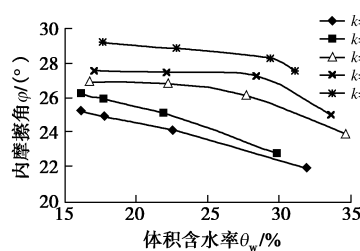
(c) 压实Q<sub>3</sub>黄土饱和渗透系数与干密度关系

图 6 黄土土水特征及渗透特性

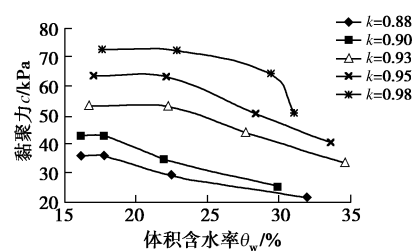
Fig. 6 Soil water characteristics of different types of loess



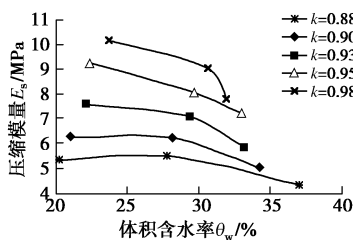
(a) 压缩模量(Q<sub>3</sub>压实黄土)



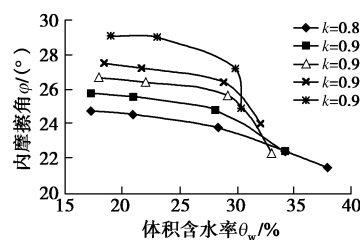
(b) 内摩擦角(Q<sub>3</sub>压实黄土)



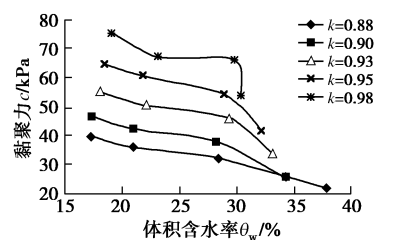
(c) 黏聚力(Q<sub>3</sub>压实黄土)



(d) 压缩模量(Q<sub>2</sub>压实黄土)



(e) 内摩擦角(Q<sub>2</sub>压实黄土)



(f) 黏聚力(Q<sub>2</sub>压实黄土)

图 7 增湿条件下压实黄土力学参数变化规律

Fig. 7 Mechanical parameters of compacted loess under moistening conditions

从图 6 及表 2 中大量试验结果的拟合所得参数可见, 非饱和 Q<sub>3</sub> 黄土的 SWCC 曲线的 V-G 模型参数中,  $\theta_r$ ,  $a$  随干密度增大而呈增大趋势,  $\theta_s$ ,  $n$  随干密度增大而呈减小趋势。

### 2.2 增湿后力学特性试验

通过室内常规单轴压缩试验(荷载强度为 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa)、直剪试验(荷载强度为 100, 200, 400 kPa) 得到原状 Q<sub>3</sub>、Q<sub>2</sub> 黄土及粉质黏土 N<sub>2</sub><sup>b</sup> 的天然状态和饱和状态下的压缩和抗剪强度指标等力学特性, 如表 3 所示。

表 3 原状土力学参数

Table 3 Mechanical parameters of undisturbed soil

土层	天然含水率				饱和状态	
	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$Es_{0.1-0.2}$ /MPa	泊松比 $\mu$	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
原状 Q <sub>2</sub> 黄土	56.8	22.5	7.4	0.35	37.3	19.1
原状 Q <sub>3</sub> 黄土	28.6	22.5	6.9	0.38	20.5	18.8
粉质黏土 N <sub>2</sub> <sup>b</sup>	108.2	20.7	6.5	0.33	83.8	18.8

同时, 开展不同压实度下、不同含水率下的 Q<sub>3</sub>、Q<sub>2</sub> 压实黄土固结压缩试验和抗剪强度试验, 得到不同含水率下的土体压缩模量  $Es_{0.1-0.2}$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  等参数的变化规律, 如图 7 所示。通过图 7 中的试验结果, 以压实度  $\lambda=0.93$  的 Q<sub>3</sub> 压实黄土试验结果为例, 采用最小二乘法曲线拟合, 得到其压缩模量  $E_s$ 、重度  $\gamma$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  等参数随着体积含水率  $\theta_w$  增加后的变化规律:

$$\left. \begin{aligned} c &= -8.9 \ln \theta_w + 42.11, \\ \varphi &= -1.94 \ln \theta_w + 34.62, \\ E_s &= -1.1 \ln \theta_w + 4.04, \\ \gamma &= 16.6 + 9.81 \theta_w. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

可见, 含水率的上升导致黄土的强度降低、抗变

形能力明显减弱，高填方地基降雨后出现的不均匀增湿沉降特征可根据上述水力特性参数，采用数值分析方法进行深入分析。需要特别说明的是：上述试验均为在排水条件下进行的，试验前后均需测得其含水率的变化程度，当含水率低于最优含水率时土体，试验后的含水率略低于试验前 0.1%~0.2%，可以认为不发生变化，可采用原始状态的含水率来获取压缩模量、抗剪强度指标与体积含水率之间的经验关系；当试验土样的含水率超过最优含水率时，加载期间及试验完成后，土样的体积含水率显然低于初始状态，式(4)中的体积含水率应是试验后的体积含水率。

### 3 降雨入渗对黄土高填方地基的影响

#### 3.1 水分场变化规律

根据本文研究工程背景中提供的该地区多年的水文资料统计可以得到各种雨型参数，包括降雨持时  $t$  和降雨强度  $q$ 。其中，暴雨参数 ( $t=0.4$  d、 $q=1.44$  m/d)，大雨参数 ( $t=2.0$  d、 $q=0.72$  m/d)，中雨参数 ( $t=5.0$  d、 $q=0.36$  m/d)，小雨参数 ( $t=15.0$  d、 $q=0.07$  m/d)，降雨期间不考虑蒸发现象。选取该机场高填方二级马道以下填方作为研究对象，采用 GEO-studio 软件中 seep/w 渗流程序建模，进行降雨入渗数值分析，有限元模型见图 8，为了分析降雨对填方体及挖方区域的渗透特性，特选取填方中部断面 A 和填挖交界面 B 两个部位的降雨入渗随深度变化规律进行深入分析。

上述模型中，填方体为平均压实度  $\lambda=0.93$  的 Q<sub>3</sub> 黄土，初始体积含水率为最优含水率 13.3% (理论体积含水率约为 20%)，针对填方完毕后初始状态及不同降雨工况进行渗流分析，上边界采用降雨入渗流量边界，模型左右和底部边界为不排水边界，模型中所采用的非饱和土的土水特征及渗流参数如表 2 所示。

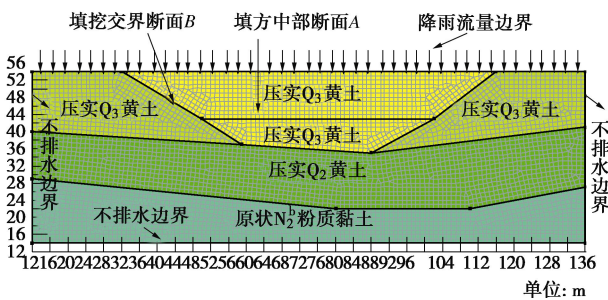


图 8 二级马道断面有限元网格

Fig. 8 Finite element model for section of second berm

#### (1) 暴雨工况

根据前文的暴雨工况下的降雨参数作为输入进行

渗流分析，得到暴雨渗流稳定后 A、B 断面处填方表面以下土层的体积含水率分布规律见图 9。

根据图 9 可得到如下结论：

a) 在暴雨工况下，当水分场稳定后，填方中部 A 断面以下土体的增湿影响深度为  $\Delta H_A=2.0$  m，最大体积含水率达 60%，浸润线最大深度为 2.0 m。

b) 填挖交界断面 B 的增湿影响深度为  $\Delta H_B=2.7$  m，最大体积含水率达 60%，浸润线出现在地表面，原地基土与压实土交界处的渗透性存在较大的差异 (相差  $10^3$  量级)，降雨更易沿着该区域入渗，由于其降雨量大小远大于土体的渗透系数，多余的水量难以入渗易形成地表径流，只有少部分地表积水引起入渗。

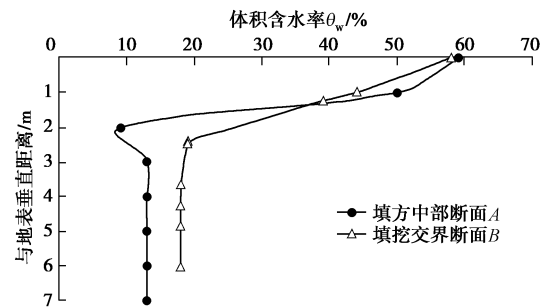


图 9 暴雨工况下高填方地基降雨入渗水分场分布

Fig. 9 Water content fields of HFE under storm

#### (2) 大雨工况

大雨工况下的高填方地基入渗情况见图 10。根据图 10 计算结果可知：

a) 在大雨工况下，当水分场稳定后，填方中部 A 断面以下土体的增湿影响深度为  $\Delta H_A=5.0$  m，最大体积含水率达 69%，浸润线最大深度为 6.0 m，入渗深度及含水率程度明显比暴雨工况下更深更大，表明当降雨量与土体的渗透系数更接近时，入渗效果更明显。

b) 填挖交界断面 B 的增湿影响深度为  $\Delta H_B=6.6$  m，最大体积含水率达 64%，浸润线深最大度为 7.4 m，表明填挖交界处的入渗深度受降雨影响更大。

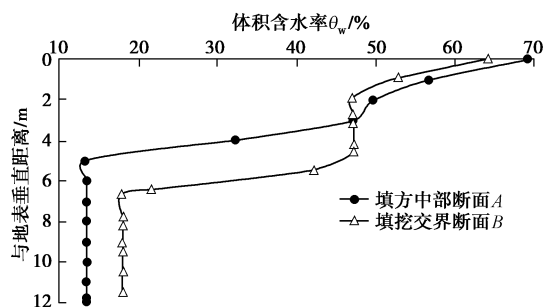


图 10 大雨工况下高填方地基降雨入渗水分场分布

Fig. 10 Water content fields of HFF under heavy rain

(3) 中雨工况

中雨工况下降雨入渗规律见图 11。通过图 11 可知: 在中雨工况下, 填方中部 A 断面以下土体的增湿影响深度为  $\Delta H_A=6.0$  m, 最大体积含水率达 64%, 浸润线最大深度为 5.4 m; 填挖交界断面 B 的增湿影响深度为  $\Delta H_B=7.0$  m, 最大体积含水率达 58%, 浸润线最大深度为 7.2 m, 中雨工况计算得到的入渗深度和含水率略小于大雨工况。数值分析所得到的地表以下体积含水率与实测结果规律基本一致, 但地表以下 5.4 m 范围内实测值略小于数值分析结果, 5.4 m 以下函数率略大于数值分析结果, 这可能与近地表的蒸发散失有关。

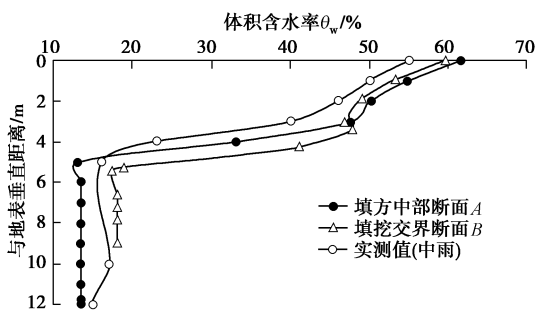


图 11 中雨工况下高填方地基降雨入渗水分场分布  
Fig. 11 Water content fields of HFF under moderate rain

(4) 小雨工况

小雨工况下降雨入渗规律见图 12。由图 12 可知: 在小雨工况下, 填方中部 A 断面以下土体的增湿影响深度  $\Delta H_A=4.0$  m, 最大体积含水率达 49%, 浸润线最大深度为 3.0 m; 而填挖交界断面 B 的增湿影响深度为  $\Delta H_B=5.5$  m, 最大体积含水率达 49%, 浸润线最大深度为 4.0 m, 由于小雨的总降雨量明显小于暴雨、大雨和中雨, 其增湿程度明显较小, 但由于降雨量小于土体的渗透系数, 其产生的余量将全部入渗至土体内部, 因而增湿深度反而略大于暴雨。小雨情况下的地表以下实测含水率随深度的变化曲线与计算值对比, 规律和量值也基本一致, 进一步表明, 数值分析结果能够近似反映实际降雨入渗效果。

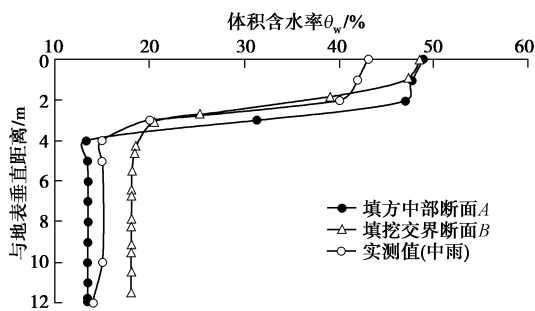


图 12 小雨工况下高填方地基降雨入渗水分场分布  
Fig. 12 Water content fields of HFF under light rain

3.2 降雨类型对高填方增湿变形及剪切应变的影响

在受到降雨入渗条件下, 压实黄土的变形模量及强度参数都有明显的降低趋势, 这是导致土体产生增湿变形和破坏的最终原因, 本文基于饱和-非饱和土的流-固耦合原理, 采用莫尔-库仑模型 (Mohr-Coulomb) 来模拟土体的力学响应。其中, 原地基土和填方压实土的参数见表 3, 压实黄土的力学参数随含水率的变化过程见式 (4)。由于在降雨入渗作用下高填方地基的水分场随深度呈非线性变化, 数值分析中, 通过提取降雨入渗稳定后的水分场下的土体单元的体积含水率, 按照式 (4) 来重新赋予土体单元在增湿后的力学参数, 重新计算应力-应变场, 从而达到计算增湿变形的过程。采用前文 GEO-seep/w 程序分析得到的水分场与 GEO-sigma/w 程序中的应力场进行流-固耦合分析, 计算由于土体增湿后产生的增量位移。计算过程可描述为:

- (1) 计算高填方施工完成后瞬间的水分场及其应力-应变场, 得到其初始流-固耦合场下的位移场  $S_0$ 。
- (2) 再计算降雨稳定后水分场下的耦合应力-应变场, 系统根据增湿后单元的含水率分布规律, 给土体单元重新赋予变形和强度参数, 得到其二次位移场  $S_1$ 。
- (3) 获取二次位移场  $S_1$  与初始位移场  $S_0$  的差值即为增湿变形场  $\Delta S$ , 从而直接得到降雨入渗产生的增湿沉降。

现以本工程实测断面为例, 采用上述分析方法, 可得到不同降雨工况下高填方地基的增湿变形及水平剪切应变等值线图, 见图 13, 14 (因篇幅限制进展展示暴雨工况)。

从图 13, 14 计算结果可知:

- (1) 在高填方中部 A 处, 在暴雨、大雨、中雨和小雨工况下增湿变形分别为 30.0, 82.0, 69.0, 10.4 mm。暴雨引起大面积的地表径流, 短时间内难以入渗到土体内部, 引起土体的湿化变化有限, 故产生的增湿变形较小; 当降雨入渗强度比较接近土体的渗透强度时, 且降雨强度相对较大和持续时间更长情况下, 这种雨型 (大雨、中雨) 的入渗深度和入渗量最为明显, 因此引起地基湿化变形也较大, 小雨的降雨量和强度不足以引起水分向土体深处入渗, 引起的增湿变形也最小。

- (2) 在高填方填挖交界 B 处, 暴雨、大雨、中雨和小雨工况下的湿化变形分别为 4.2, 3.3, 3.8, 0.6 mm, 与填方体增湿变形量对比可知, 原地基表面的沉降相对填方体较小, 二者的差异沉降最大超过 70 mm, 容易产生较大的水平剪应变, 图 14 中可见, 在填挖方交界面两侧存在正负剪切应变, 从而引起交界面处出现地层曲率突变, 这是引起填挖交界处出现不

均匀沉降裂缝的主要原因。

(3) 将计算结果与实测值进行对比可知, 实测二级马道填方表面不同位置处的增湿沉降约为 30~50 mm, 天然挖方地表沉降不超过 1 mm, 这与计算结果仍存在一定的差异, 但基本满足工程需求。

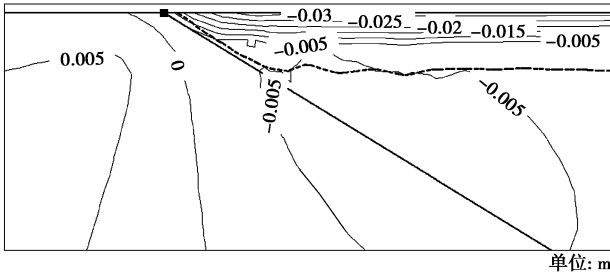


图 13 暴雨下填方地基增湿变形等值线图  
Fig. 13 Isogram of MD under rainstorm

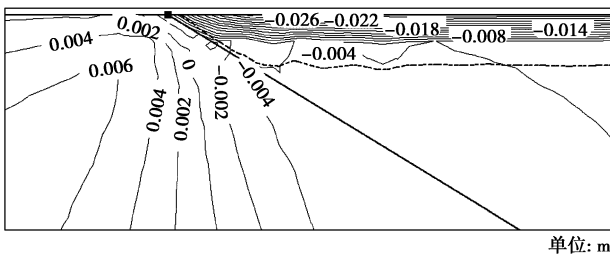


图 14 暴雨工况下填挖方交界处水平剪切应变等值线图  
Fig. 14 Isogram of gorizontal shear strain under rainstorm

### 3.3 填方压实度对增湿变形影响

工程实际中填方的压实度设计有高低之分, 由于不同压实度条件下的黄土其土水特征曲线、强度变形特性存在一定的差异, 降雨入渗后产生的增湿变形问题也存在一定的差异, 本节仍以实测断面为例, 研究高填方地基采取不同压实度填筑后, 在大雨条件下的增湿影响深度和湿化变形问题, 分析方法同上。图 15, 16 为压实度  $\lambda$  分别为 0.88, 0.98 情况下, 降雨入渗后高填方地基增湿沉降等值线图。综合图 12~16 及表 4, 可知:

(1) 定义填方体的增湿变形比  $\zeta = \text{增湿变形量} \Delta S / \text{增湿影响深度} \Delta H_A$ , 填方体在初始含水状态相同, 不同压实度 ( $\lambda=0.88, \lambda=0.93, \lambda=0.98$ ) 条件下, 因强降雨引起的填方体断面 A 及填挖交界断面 B 处的增湿沉降量, 均随着压实度的增大而明显降低, 压实度较低为  $\lambda=0.88$  时, 强降雨引起的地表增湿沉降约 10 cm, 增湿变形比  $\zeta=1.8\%$ ; 当压实度较高为  $\lambda=0.93$  时, 增湿沉降降低为约 8 cm, 增湿变形比  $\zeta=1.5\%$ ; 当压实度较高为  $\lambda=0.98$  时, 增湿沉降降低为约 7 cm, 增湿变形比  $\zeta=1.3\%$ , 可见适当增加地基的平均压实度能够有效降低因降雨入渗引起的增湿变

形, 而挖方区顶部的沉降不超过 1 cm。

(2) 随着降雨类型的变化, 暴雨、大雨等强降雨引起的填方地基顶部的增湿变形比平均为  $\zeta=1.6\%$ , 明显大于中雨的  $\zeta=1.2\%$ 、小雨的  $\zeta=0.3\%$ , 可见采取适当的防排水措施对减小高填方地基增湿沉降。

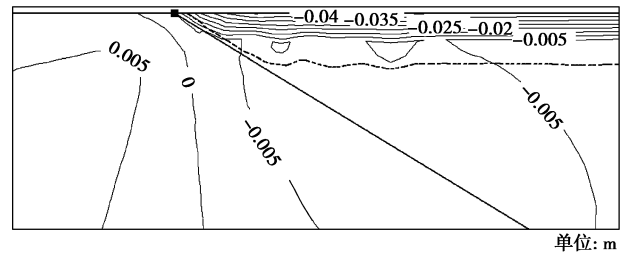


图 15 压实度  $\lambda=0.88$  时填方地基增湿变形等值线图 (暴雨工况)

Fig. 15 Isogram of MD of HFE when  $\lambda=0.88$  under rainstorm

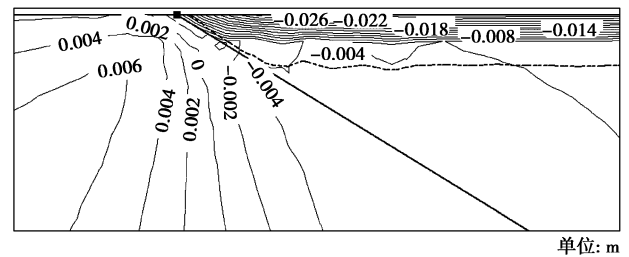


图 16 压实度  $\lambda=0.98$  时填方地基增湿变形等值线图 (暴雨工况)

Fig. 16 Isogram of MD of HFE when  $\lambda=0.98$  under rainstorm

表 4 不同压实度下地表增湿沉降量

Table 4 MD under different compaction degrees (mm)

雨型	$\lambda=0.88$		$\lambda=0.93$		$\lambda=0.98$	
	断面 A	断面 B	断面 A	断面 B	断面 A	断面 B
暴雨	35.8	5.0	30.0	4.2	25.8	3.5
大雨	98.8	4.8	81.9	3.8	68.9	2.6
中雨	82.9	4.0	68.8	3.3	57.8	1.8
小雨	12.9	0.8	10.4	0.6	8.8	0.5

## 4 结论与建议

本文通过原位监测、室内试验和数值分析针对黄土高填方在不同降雨条件、不同压实度下的增湿影响深度和湿化变形问题开展了相关研究。

(1) 实测资料表明, 黄土高填方因地表降雨增湿引起的沉降速率和总沉降量比无降雨工况下明显较大, 其影响深度最大约 6.0 m, 且在空间上分布不均, 增湿变形平均约 30~50 mm, 当填方顶部积水时, 增湿沉降则更大。

(2) 数值分析表明, 黄土高填方地基因压实度不均和降雨类型差异, 在未采取防排水措施之前, 填方



区降雨影响深度为地表下 2.0~7.0 m, 填挖交界区域受降雨影响深度则更大, 为地表以下 2.7~7.4 m, 其中大雨 (5 m) 和中雨 (6 m) 影响深度较大, 小雨 (4 m) 次之, 暴雨 (2 m) 影响最小。

(3) 强降雨 (暴雨、大雨) 引起的增湿变形比平均为 1.6%, 大于中雨的 1.2% 和小雨的 0.3%, 不同压实度下 ( $\lambda$  为 0.88, 0.93, 0.98) 强降雨引起的填方体增湿变形比分别为 1.8%, 1.5%, 1.3%。降雨强度和填土压实度均对高填方地基的增湿变形产生较大影响, 针对黄土高填方地基表面而言, 提高填筑体压实度并采取适当的防排水措施, 可有效降低高填方地基增湿沉降。

(4) 强降雨会引起填挖方交界面处产生过量的差异增湿沉降和剪切应变突变, 这是导致填挖方交界处出现开裂和水毁的主要根源, 建议对填挖交界处采取台阶式开挖和加密强夯筑施工, 并采取防渗土工布予以防渗加固。

#### 参考文献:

- [1] 徐明, 宋二祥. 高填方长期工后沉降研究的综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 786 - 789. (XU Ming, SONG Er-xiang. Review of long-term setting of high fills[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(6): 786 - 789. (in Chinese))
- [2] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 745 - 753. (GE Miao-miao, LI Ning, ZHANG Wei, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 745 - 753. (in Chinese))
- [3] 姚仰平, 祁生钧, 车力文. 高填方地基工后沉降计算[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 1 - 10. (YAO Yang-ping, QI Sheng-jun, CHE Li-wen. Computational method of post-construction settlement for high-fill embankments[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(3): 1 - 10. (in Chinese))
- [4] 罗汀, 刘引, 韩黎明, 等. 高填方机场工后沉降监测及数据分析[J]. 中国民航大学学报, 2017, 35(3): 27 - 32. (LUO Ting, LIU Yin, HAN Li-ming, et al. Post-construction settlement monitoring and data analysis of high filling engineering of airport[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2017, 35(3): 27 - 32. (in Chinese))
- [5] 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, 35(2): 293 - 301. (ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen. Spatiotemporal regularity analysis on the post-construction settlement of loess high filled foundation of Lüliang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293 - 301. (in Chinese))
- [6] 沈细中, 刘隆斌, 陈敏, 等. 恶劣环境条件下高填方设计关键技术问题[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(2): 67 - 72. (SHEN Xi-zhong, LIU Long-bin, CHEN Min, et al. Key technical issues in project design of tall earth fill under abominable surroundings[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(2): 67 - 72. (in Chinese))
- [7] 张继文, 于永堂, 李攀, 等. 黄土崩填沟高填方地下水监测与分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(4): 477 - 483. (ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang, LI Pan, et al. Groundwater monitoring and analysis of high fill foundation in loess hilly-gully region[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2016, 48(4): 477 - 483. (in Chinese))
- [8] 朱才辉, 李宁. 黄土高填方机场地基中暗穴扩展对道面变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 198 - 206. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Analysis of airstrip deformation due to expansion of hidden cavities in loess filled high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 198 - 206. (in Chinese))
- [9] TU X B, KWONG A K L, DAI F C, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. Engineering Geology, 2009, 105(1/2): 134 - 150.
- [10] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 382 - 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion test on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 382 - 389. (in Chinese))
- [11] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65 - 74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [12] 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 Compacted Loess Moistening Deformation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. (in Chinese))
- [13] ZHOU Y F, THAM L G, YAN W M, et al. Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration[J]. *Engineering Geology*, 2014, **183**: 31 - 38.
- [14] 杨校辉, 朱彦鹏, 周勇, 等. 山区机场高填方边坡滑移过程时空监测与稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(增刊 2): 3977 - 3990. (YANG Xiao-hui, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong, et al. Time-space monitoring and stability analysis of high fill slope slip process at a airport in mountain region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S2): 3977 - 3990. (in Chinese))
- [15] WU L Z, ZHOU Y, SUN P, et al. Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure[J]. *Catena*, 2017, **150**: 1 - 8.
- [16] ZHANG Ga, WANG Rui, QIAN Jiyun, et al. Effect study of cracks on behavior of soil slope under rainfall conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2012, **52**(4): 634 - 643.
- [17] NORAMBUENA-CONTRERAS J, ARBAT G, GARCÍA NIETO P J, et al. Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, **219**: 1843 - 1852.
- [18] 梁燕, 赵桂娟, 谢永利, 等. 黄土增湿变形的数值模型[J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, **24**(3): 43 - 46. (LIANG Yan, ZHAO Gui-juan, XIE Yong-li, et al. Numerical model of loess moistening deformation[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, **24**(3): 43 - 46. (in Chinese))
- [19] 吴文彪, 郑俊杰, 曹文昭. 考虑含水率影响的压实黄土路堤稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(增刊 1): 542 - 546. (WU Wen-biao, ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao. Study of stability of compacted loess embankment considering effect of water content[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(S1): 542 - 546. (in Chinese))
- [20] VAN Genuchten M. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, **44**(5): 892 - 898.
- [21] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(3): 521 - 532.

## 标准摘录：标点符号用法（GB/T 15834—2011） 冒号的定义与用法

### 1 定义

句内点号的一种，表示语段中提示下文或总结上文的停顿。

### 2 基本用法

#### 2.1 用于总说性或提示性词语（如“说”“例如”“证明”等）之后，表示提示下文。

示例 1：北京紫禁城有四座城门：午门、神武门、东华门和西华门。

示例 2：她高兴地说：“咱们去好好庆祝一下吧！”

示例 3：小王笑着点了点头：“我就是这么想的。”

示例 4：这一事实证明：人能创造环境，环境同样也能创造人。

#### 2.2 表示总结上文。

示例：张华上了大学，李萍进了技校，我当了工人：我们都有美好的前途。

#### 2.3 用在需要说明的词语之后，表示注释和说明。

示例 1：（本市将举办首届大型书市。）主办单位：市文化局；承办单位：市图书进出口公司；时间：8月15日—20日；地点：市体育馆观众休息厅。

示例 2：（做阅读理解题有两个办法。）办法之一：先读题干，再读原文，带着问题有针对性地读课文。办法之二：直接读原文，读完再做题，减少先入为主的干扰。

#### 2.4 用于书信、讲话稿中称谓语或称呼语之后。

示例 1：广平先生：……

示例 2：同志们、朋友们：……

#### 2.5 一个句子内部一般不应套用冒号。在列举式或条文式表述中，如不得不套用冒号时，宜另起段落来显示各个层次。

示例：第十条 遗产按照下列顺序继承：

第一顺序：配偶、子女、父母。

第二顺序：兄弟姐妹、祖父母、外祖父母。