

DOI: 10.11779/CJGE2018S1035

# 黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法

孔 洋<sup>1</sup>, 阮怀宁<sup>1</sup>, 黄雪峰<sup>2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 沟谷型黄土高填方工程地基沉降控制问题既是重点也是难点, 针对黄土丘陵沟壑区压实回填土地基沉降计算方法研究较少。通过室内人工配制试样与回填场地原位探井取样开展了一系列室内高、中、低压侧限压缩固结试验, 探究了压实回填土的变形特性, 基于割线模量法与分层总和法研究路径的不同提出了一种改进的沉降计算方法, 对比分析了填筑体在不同计算方法下的最终沉降量差异。试验结果发现, 采用基于 Gunary 模型非线性垂直压应力-压应变关系表示的割线模量法, 计算所得的最终沉降量数值比分层总和法计算值偏小, 两者偏差在 4.8%之内。压实回填试验场地的实测压实度基本稳定在 (70±5)%, 通过提出的计算方法预测回填场地 33 m 深填方填筑体在水环境未变化时产生的总压缩固结沉降变形量为 1523.2 mm, 填方区的地基沉降量非常大, 填方区的基础设施建设应在地基充分固结变形稳定后, 同时, 高填方施工应严格控制压实度, 努力提升施工质量。该计算方法是对割线模量法沉降计算体系的有益补充, 其计算结果可供实际工程建设参考。

**关键词:** 黄土; 丘陵沟壑区; 回填土; 高填方; 地基沉降

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)S1 - 0218 - 06

**作者简介:** 孔 洋(1989 - ), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事特殊土工程性状与节理岩体力学特性方面的研究。E-mail: gongzuo99033@163.com。

## Method for calculating foundation settlement of compacted backfill in hilly and gully regions of loess

KONG Yang<sup>1</sup>, RUAN Huai-ning<sup>1</sup>, HUANG Xue-feng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The problem of foundation settlement control of high loess filled projects is important and difficult. Because of the lack of researches on methods for calculating settlement of compacted backfill foundation of high embankments in hilly and gully regions of loess, a series of indoor confined consolidation experiments using indoor artificial test samples and field samples are carried out. The deformation characteristics of compacted backfill loess are studied. Based on the different research paths of the secant modulus method and the stratified summation method, a modified foundation settlement method is proposed. The differences of the final settlements under different methods are compared and analyzed. The results show that the calculated values by the secant modulus method based on the vertical stress - strain relation of Gunary Model are smaller than those based on the stratified method, and the difference range is within 4.8%. The compactness of backfill loess is basically stable in (70±5)%. In fact, it is a very low compactness. The final compression and consolidation settlement of the 33 m-deep test site is predicted by the proposed method, and it is 1523.2 mm. The infrastructure construction in backfill area should be carried out after full consolidation of the foundation. In the meanwhile, the compactness should be strictly controlled during construction of high embankments, and the quality of construction should be improved. The new foundation settlement is a useful supplement to the computational system of secant modulus method in settlement calculation, and the calculated results are available to guide the construction and design of practical projects.

**Key words:** loess; hilly and gully region; backfill; high embankment; foundation settlement

## 0 引 言

黄土丘陵沟壑是黄土高原典型的地貌类型, 其形态有长条形梁状丘陵、圆形或者椭圆形的峁状丘陵。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2016B43414)

收稿日期: 2017 - 06 - 11

黄土丘陵沟壑第一副区主要分布在陕西延安以北及山西、内蒙古等省(区),地形以梁峁状丘陵为主,地形破碎,沟壑纵横,沟壑密度达  $3\sim 7 \text{ km}^2/\text{km}^2$ ,沟道多呈“U”字型或“V”字型<sup>[1]</sup>。陕西省延安市处于典型黄土丘陵沟壑区,为解决城建建设用地的匮乏,地方政府提出了“削山填沟,上山造地”的战略<sup>[2]</sup>。

“削山填沟”造地必然伴随着大量的沟谷型黄土高填方工程,高填方工程填筑技术与沉降量控制即是重点也是难点,其中压实回填土地基沉降计算方法理论与实践研究较为重要。

近年来,国内学者对重塑或压实黄土压缩特性进行了大量有益研究,但在回填压实黄土应力-应变关系方面的研究仍相对不足。刘保健等<sup>[3]</sup>、张茂花等<sup>[4]</sup>认为侧限条件下重塑黄土的应力-应变关系符合双曲线形式;陈开圣等<sup>[5]</sup>认为压实黄土在侧限条件下,垂直压应力-应变关系符合幂函数形式;胡长明等<sup>[6]</sup>研究了吕梁地区压实马兰黄土,垂直压应力-应变关系沿用了幂函数形式;黄雪峰等<sup>[7]</sup>通过大量的室内试验证明,既有常用的双曲线模型与幂函数形式不适用于压实黄土,基于系统试验与理论分析提出了可表征压实黄土侧限压缩条件下垂直压应力-应变关系的 Gunary 模型形式。

目前,常用的地基沉降计算方法有单向压缩法、规范法、考虑先期固结应力的沉降算法、半经验法、修正系数法和黄文熙三向应力法等<sup>[8-13]</sup>,但适用于高、中、低压实度等各工况的压实黄土地基沉降计算方法研究相对较少。基于现场原位监测与沉降量-时间经验公式的沉降预测方法,可较准确的预测填方区地基总沉降量或工后沉降量数值,但需耗费大量人力物力。

本文依托延安新区沟谷型黄土高填方工程项目,开展了一系列室内侧限压缩固结试验,引入 Gunary 模型表征压实回填黄土垂直压应力-应变的非线性关系,在分析割线模量法与分层总和法差异的基础上对黄土丘陵沟壑区沟谷型黄土高填方工程中压实回填土地基沉降计算方法开展了系统研究,提出了一种改进的地基沉降计算方法,并给出了某高填方工程的沉降量预测值。

## 1 垂直压应力与割线模量关系

试验用两批土样均取自延安新区,第一批土样为袋装重塑  $Q_2$ 、 $Q_3$  黄土,该批次土样为削坡开挖过程中形成的松散扰动土样,各三袋;第二批土样为浸水试验场地原位探井取样,该试验场地在取土样与埋设监测仪器等工作完成后将进行压实黄土地基的原位浸水试验,该浸水试验不属于本文探究的内容,故具体

内容不再赘述。在已回填压实完成的现场浸水试验场地代表性位置人工开挖 4 个探井,探井直径为 1.2 m,在探井深度方向每隔 1 m 取  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的立方样用于室内物理力学试验。其中, $\#1\sim\#3$  探井取土深度为 20 m, $\#4$  探井取土深度为 33 m,探井两侧取平行样,共计标准试样 186 件。通过常规密度试验、含水率试验等得到试验土样初始物理性质如表 1 所示。其中: $w$  表示含水率, $\rho_d$  表示干密度, $w_p$  表示塑限, $w_L$  表示液限, $I_p$  表示塑性指数, $G_s$  表示土粒比重。

表 1 试样初始物理性质

Table 1 Initial physical properties of loess samples

批次	类别	$w$ /%	$\rho_d$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$w_p$ /%	$w_L$ /%	$I_p$	$G_s$
1	$Q_2$	9.9~11.4	1.43~1.62	17.9	32.2	14.3	2.72
	$Q_3$	8.3~12.7	1.35~1.51	17.3	31.1	13.8	2.71
2	$Q_2$	9.5~18.0	1.34~1.46	17.6	31.6	14.0	2.72
	$Q_3$	11.7~13.2	1.29~1.38	17.1	30.7	13.6	2.71

通过 6 组室内标准重型击实试验,得到延安地区  $Q_2$  黄土的最优含水率是 13.4%,最大干密度是  $1.92 \text{ g/cm}^3$ ;  $Q_3$  黄土的最优含水率是 13.5%,最大干密度是  $1.82 \text{ g/cm}^3$ 。针对延安新区百米填方高度的实际情况,设计室内一维侧限压缩固结试验的 11 级加载顺序为 25, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2000 kPa,试验包含 3 种含水率情况(11.4%, 13.5%, 15.6%)与 4 种压实度情况(70%, 80%, 85%, 90%)的高压固结试验,共计 12 组,含 156 件试样。在高压固结试验完成之后进行增湿试验,以反映水环境变化时对填筑体的影响。

定义  $E_{soi} = p_i / \varepsilon_{si}$  为侧限压缩固结试验下的割线模量, $\varepsilon_{si}$  为  $p_i$  作用下的累计总应变。

本文采用侧限条件下 Gunary 模型压实马兰黄土垂直压应力-垂直压应变关系,表示  $E_{soi} - p_i$  关系如下所示<sup>[7]</sup>:

$$E_{soi} = a + bp_i + c\sqrt{p_i} \quad (1)$$

式中  $a$ ,  $b$ ,  $c$  是某特定压实度与含水率工况下试验数据拟合参数; $a$  值即当垂直压应力趋近于零时的初始割线模量; $c$  值越小,曲线越接近于线性关系, $c$  值越大,曲线越接近于非线性关系;计算时应将垂直压应力和割线模量除以大气压力以无量纲化,无量纲化的具体方法详见文献[14]。

式(1)包含了线性  $E_{soi} - p_i$  关系(例如:双曲线模型,此时  $c=0$ )与非线性  $E_{soi} - p_i$  关系(例如:幂函数形式)两种情况,本文整理压实马兰黄土在最优含水率  $w=13.5\%$  条件下的试验数据,并重点对比常用幂函数形式  $E_{soi} - p_i$  非线性关系形式如图 1 所示。

其中,  $w$  表示含水率,  $K$  表示压实度。

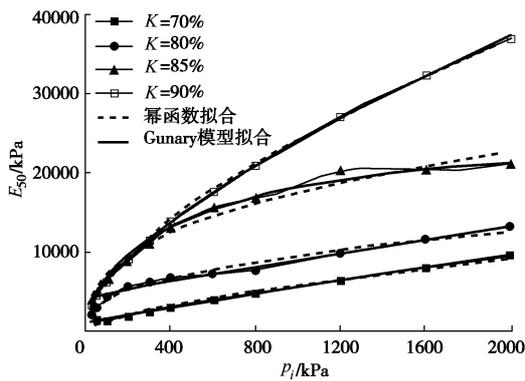


图1  $w=13.5\%$ ,  $E_{soi} - p_i$  曲线

Fig. 1 Relationship between  $E_{soi}$  and  $p_i$  while  $w=13.5\%$

由图1可以看出式(1)可较好的表示割线模量随垂直压应力的变化关系,其相关系数高于幂函数形式,说明在非线形压实黄土应力-应变关系表示方面, Gunary 模型优于幂函数形式。

## 2 改进的沉降计算方法

基于  $e - p$  曲线的分层总和法是各种地基规范推荐的地基沉降量计算基本方法,割线模量是魏汝龙教授提出的一种应用范围较广的地基沉降计算新方法<sup>[15-16]</sup>。割线模量法与基于  $e - p$  曲线的分层总和法相比,其在计算时其不受压实回填土体初始孔隙比  $e_0$  的影响,并便于电算,同时,割线模量法与分层综合法等地基沉降计算方法虽基于相同的试验数据,但由于计算路径的不同,其最终计算结果略有差异<sup>[16]</sup>。

### 2.1 分层总和法与割线模量法

人工配制或者现场实地取得的压实土样在高压固结仪上进行逐级加压,测定每一级垂直压应力  $p_i$  作用下压实土样的压缩变形量,侧限条件下压实土样孔隙比的变化如图2所示。

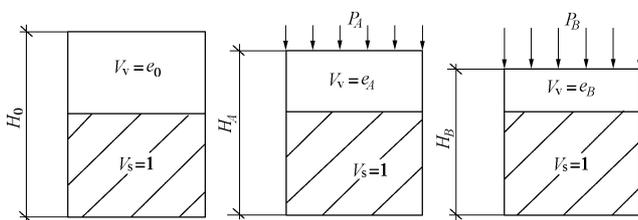


图2 侧限条件下压实土样孔隙比的变化

Fig. 2 Variation of void ratio of compacted loess under confined conditions

由于初始孔隙比  $e_0$  为

$$e_0 = \frac{G_s(1+w_0)\rho_w}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

式中,  $G_s$ ,  $w_0$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_0$  分别为土粒相对密度、压实

土样初始含水率、水的密度、压实土样初始密度。

根据土体孔隙比的概念及土粒体积  $V_s$  不会发生变化,可以得到侧限条件下压实土样孔隙比  $e_i$  为

$$e_i = e_0 - \frac{\Delta H_i}{H_0}(1 + e_0) \quad (3)$$

式中,  $e_0$ ,  $\Delta H_i$ ,  $H_0$  分别为压实土样初始孔隙比、垂直压应力  $p_i$  作用下压实土样的稳定压缩量、压实土样初始高度。

以  $H_0$  为初始值即以  $p_0=0$  kPa 为初始应力状态计算,  $H_0 \rightarrow H_A$ 、 $H_0 \rightarrow H_B$  的垂直压应变分别为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{sA} &= \frac{H_0 - H_A}{H_0} \\ \varepsilon_{sB} &= \frac{H_0 - H_B}{H_0} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{H_A - H_B}{H_0} \quad (5)$$

以  $H_A$  为初始值即以  $p_A$  为初始应力状态计算,  $p_A \rightarrow p_B$  即为初始应力状态  $\rightarrow$  初始应力与附加应力之和的状态, 则

$$\varepsilon'_s = \frac{H_A - H_B}{H_A} \quad (6)$$

其中  $H_0 > H_A$ , 则由于初始应力状态定义的不同, 由式(5)计算所得垂直压应变  $\Delta \varepsilon_s$  小于由式(6)计算所得垂直压应变  $\varepsilon'_s$ 。

由土层压缩量  $S = \varepsilon \times H$  可得

$$\left. \begin{aligned} S_{es} &= \Delta \varepsilon_s H_A = \frac{H_A}{H_0}(H_A - H_B) \\ S'_{es} &= \varepsilon'_s H_A = (H_A - H_B) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中  $H_0 > H_A$ , 则由于初始应力状态定义的不同, 由式(5)计算所得土层压缩量  $S_{es}$  小于由式(6)计算所得土层压缩量  $S'_{es}$ 。

由土工试验标准方法 (GBT 50213—1999) 可知, 分层总和法计算土体各分层压缩变形量时, 是以  $p_A$  为初始自重应力状态计算, 即符合式(7)中式(2)情况, 所求得为土层在附加应力  $p_B - p_A$  作用下的压缩变形量, 总沉降量为各分层沉降量的总和。

魏如龙、刘保健等分别于 1980, 1999 年给出了分层综合法与割线模量法的差异值, 相关论述未包含压实黄土, 垂直压应力-压应变关系亦采用双曲线模型, 故笔者根据前述研究结果得到压实黄土基于 Gunary 模型的割线模量法土层沉降量计算公式, 即

$$\begin{aligned} \Delta S_s &= \Delta \varepsilon_s H_s \\ &= \frac{\Delta p}{E_{soj} E_{soi}} a H_s + \frac{p_j \sqrt{p_i} - p_i \sqrt{p_j}}{E_{soj} E_{soi}} c H_s \quad (8) \end{aligned}$$

式中  $a, b, c$  是某特定压实度与含水率工况下试验数据拟合参数;  $H_s$  为土层的高度;  $p_i$  为该土层所受的自重应力,  $p_j$  为该土层所受的自重应力与附加应力之和。

## 2.2 割线模量修正系数

丁洲祥等<sup>[15]</sup>、杨晶等<sup>[16]</sup>基于工程应变的参考构型, 认为割线模量沉降计算方法以  $H_0$  为初始值即以  $p_0=0$  kPa 为初始应力状态计算, 但是某分层在未加荷载时的厚度  $H_0$  很难确定, 其应该包含回弹变形等, 因此认为割线模量法的计算值在不同程度上小于分层总和法的计算值, 一些学者通过引入修正系数对割线模量法进行改进, 但是, 此种方法是否适用于压实黄土有待探讨。

对比分析式 (7) 上下两式, 引入修正系数  $\alpha$ , 即

$$\alpha = \frac{H_0}{H_A} = \frac{1}{1 - \varepsilon_{sA}} \quad (9)$$

可使

$$S'_{es} = \alpha S_{es} \quad (10)$$

即, 通过引入修正系数  $\alpha$  可得到基于分层总和法的土层压缩变形量。

本文对压实 Q<sub>3</sub> 黄土 12 份试验资料进行分析, 得到其填筑体的  $1/\alpha$  随填筑深度的变化规律如图 3 所示。土样编号参照表 2。

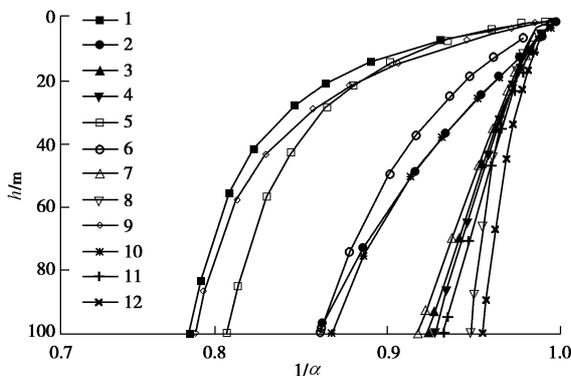


图 3  $1/\alpha$  随填筑深度的变化规律

Fig. 3 Variation of reciprocal of modified parameter with depth

如图 3 所示, 各种压实土样的  $1/\alpha$  随着填筑深度增大呈现逐渐减小的规律, 其减小程度随压实度、含水率的不同相差较大; 总体上, 压实度越小,  $1/\alpha$  随填筑深度的减小幅度越大。其中, 土样 1 ( $w=15.6\%$ ,  $K=70\%$ ) 随填筑深度的减小幅度最大, 其次为土样 9 ( $w=11.4\%$ ,  $K=70\%$ )、土样 5 ( $w=13.5\%$ ,  $K=70\%$ )。这说明低压实度黄土在最优含水率时  $1/\alpha$  随填筑深度的减小幅度最小, 最优含水率右侧比最优含水率左侧的  $1/\alpha$  随填筑深度的减小幅度大; 用未修正割线模量

法对低压实度黄土进行沉降计算时, 可能由于忽略修正系数  $\alpha$  而造成较大的计算偏差。

## 2.3 沉降计算值对比分析

对 1~12 号土样, 分别采用分层总和法、基于 Gunary 模型的割线模量法及修正割线模量法求解 100 m 填筑深度的最终沉降量如表 2 所示。其中:  $w, K$  分别表示填筑黄土含水率、压实度,  $S'_{es}, S_{es}, \delta$  分别表示分层总和法求得的最终沉降量、割线模量法求得的最终沉降量、两类计算方法的相对误差,  $\alpha, S_{res}, \delta'$  分别表示割线模量修正系数、修正割线法求得的总最终沉降量、修正割线模量法与分层总和法相对误差。

表 2 沉降计算值对比分析

编号	$w$ /%	$K$ /%	$S'_{es}$ /m	$S_{es}$ /m	$\delta$ /%	$a$	$S_{res}$ /%	$\delta'$ /%
1	15.6	70	1.919	1.843	-4.0	1.138	2.097	9.2
2	15.6	80	2.050	2.006	-2.2	1.059	2.124	3.6
3	15.6	85	1.021	0.971	-4.8	1.034	1.004	-1.6
4	15.6	90	0.894	0.876	-2.0	1.032	0.904	1.1
5	13.5	70	1.791	1.725	-3.7	1.121	1.934	8.0
6	13.5	80	1.665	1.731	4.0	1.070	1.852	11.2
7	13.5	85	1.060	1.064	0.3	1.058	1.125	6.1
8	13.5	90	0.479	0.477	-0.6	1.029	0.490	2.3
9	11.4	70	2.122	2.119	-0.1	1.126	2.386	12.5
10	11.4	80	1.854	1.884	1.6	1.050	1.979	6.7
11	11.4	85	0.872	0.861	-1.3	1.031	0.888	1.7
12	11.4	90	0.478	0.471	-1.5	1.022	0.482	0.7

如表 2 所示, 对于压实黄土, 采用割线模量法计算所得的最终沉降量比分层总和法计算值偏小, 两者偏差在 4.8% 之内; 修正系数为各分层修正系数的平均值, 由表 2 可以清楚的看到, 修正后的最终沉降量明显增大, 完全大于分层总和法, 从物理意义上讲不符合实际情况; 笔者通过各分层修正系数与分层沉降量, 求得每层修正后的沉降计算值, 累加后发现所得结果仍然大于常规分层总和法, 证明修正系数这个概念在压实黄土高填方中是不适用的; 同一含水率情况下, 压实度对沉降量影响非常显著, 由于现有压实机具与施工条件的影响, 很难保证全部填筑土体达到高压实度, 经笔者调研, 大部分高型及超高型黄土高填方平均压实度仅为 70% 左右, 因此低压实度沉降量分析显得尤为重要。由表 2 可以看出, 总的最终沉降量从小到大的含水率次序为 13.5%, 11.4%, 15.6%, 因此, 仍需选取最优含水率及略低于最优含水率的数值作为实际施工所控制含水率。

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

延安新区某黄土高填方场地填筑前的沟谷最大深度为 38 m, 原始地基是中更新统风积黄土+基岩。填方工程在填筑过程中就近取材, 土样主要取自周围削山造地形成的松散土。填方场地填土覆盖于原黄土之

上, 该黄土高填方场地的地质断面如图 4 所示<sup>[17]</sup>。

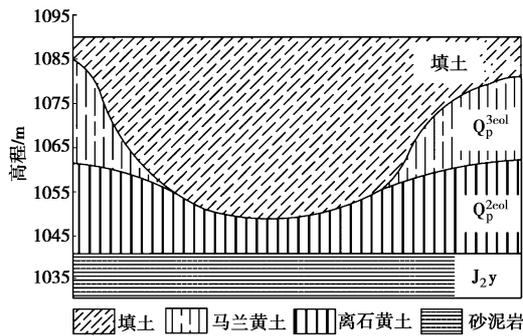


图 4 某黄土高填方场地地质断面图

Fig. 4 Sketch of geological section of loess embankment site

### 3.2 土样物理性质随埋深的变化规律

在填方场地取得#1~#4 探井土样, 由于#4 探井取样深度较深, 对其进行了重点试验, 第二批土样的分层含水率  $w$ 、干密度  $\rho_d$  沿深度  $h$  方向的变化规律如图 5 所示。

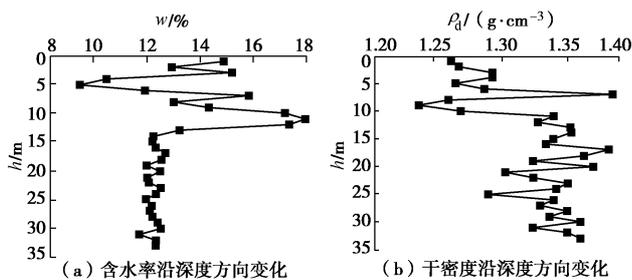


图 5 #4 探井土样物理性质沿深度方向的变化规律

Fig. 5 Variation of physical properties of soil along depth direction in exploratory well No. 4

如图 5 所示:

(1) 探井 1~12 m 深度范围内, 土样颜色较深, 土样密度变化较大,  $Q_3$  黄土部分夹杂, 总体上满足定义  $Q_2$  黄土的条件; 12~33 m 深度范围内土样黄褐色, 土质不均匀,  $Q_2$  黄土零星掺杂, 主要为  $Q_3$  黄土。

(2) 1~12 m 深度范围内的  $Q_2$  黄土土样, 含水率沿深度的变化极不规律, 波动较大; 10~12 m 深度范围内含水率突然增大, 可能与填筑时用水量有关; 13~33 m 范围内的  $Q_2$  黄土土样, 其含水率沿深度方向基本稳定在  $(12.0 \pm 0.5)\%$ , 可能与土样在较大上覆荷载作用下水分的稳定性渗透有关。

(3) 现场压实土样的压实度基本稳定在  $(70 \pm 5)\%$ , 可以看出试样的实际压实度是非常低的, 低压实度会发生非常大的压缩固结变形量, 当降水、地面渗水等水环境变化时, 亦可能会发生极大的湿陷性变形, 因此, 回填区场地短期内不适于工程建设。

对于 1~33 m 全深度范围内的土样, 本文采用室内压缩固结试验研究土样的变形特性, 本次试验的最

大加载为 600 kPa, 相关试验操作参照土工试验规程。

### 3.3 沉降量计算

上文指出浸水试验场地填筑体压实度较低, 土体压缩性较高, 极易发生较大的后期压缩固结沉降, 为指导施工, 室内试验预测 33 m 高填方填筑体总固结沉降变形量为 1523.2 mm, 试验场地附近压实度约为  $(70 \pm 5)\%$ , 压实度是极低的, 因此产生的沉降变形量较大。预测值可为现场地基稳定性评价标准提供参照, 新区建设将压实度控制放在首要位置, 全面改善压实质量。填方区在短期内应避免任何建设项目。

## 4 结 论

结合典型黄土丘陵沟壑区暨延安新区沟谷型黄土高填方工程, 基于室内人工配制试样与回填场地实地探井取样进行了一系列室内侧限压缩固结试验, 通过分析分层总和法与割线模量法的研究路径异同点对黄土丘陵沟壑地区压实回填土地基沉降计算方法开展了系统研究。得出以下几点肤浅认识:

(1) 对于回填压实黄土, Gunary 模型非线性应力-应变关系表征形式优于既有常用的双曲线模型、幂函数等。

(2) 采用基于 Gunary 模型非线性应力-应变关系形式的割线模量法计算所得的最终沉降量比分层总和法计算值偏小, 两者偏差在 4.8% 之内; 割线模量法与分层总和法的差异源于初始状态的定义不同。

(3) 实测某高填方工程填筑体压实度较低, 基本稳定在  $(70 \pm 5)\%$ , 通过本文所提出的计算方法预测试验场地 33 m 高填方填筑体在未浸水前产生的总压缩固结沉降变形量为 1523.2 mm, 可见填方区的变形量非常大, 填方区的基础设施建设应在充分固结变形稳定后。同时, 实际施工应严格控制压实度, 努力提升施工质量。

(4) 本文提出的计算方法是对割线模量法沉降计算体系的有益补充, 其计算结果可供实际工程建设参考。

### 参考文献:

- [1] 常茂德, 郑新民, 柏跃勤, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域坝系相对稳定及水土资源开发利用研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007. (CHANG Mao-de, ZHENG Xin-min, BAI Yue-qin, et al. Study on the relative stability of the dam system and the development and utilization of water and soil resources in the small watershed of the loess hilly gully region[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2007. (in Chinese))

- [2] 蔡怀恩, 张继文, 秦广平. 浅谈延安黄土丘陵沟壑区地形地貌及工程地质分区[J]. 土木工程学报, 2015(增刊 2): 386 - 390. (CAI Huai-en, ZHANG Ji-wen, QIN Guang-ping. Simple discuss on topography and engineering geology zoning in loess hilly gully region of Yan'an[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(S2): 386 - 390. (in Chinese))
- [3] 刘保健, 张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 37 - 41. (LIU Bao-jian, ZHANG Jun-li. Application and analyzing method for soil compression test[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 37 - 41, 100. (in Chinese))
- [4] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的压缩变形特性分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 50 - 55. (ZHANG Mao-hua, XIE Yong-li, LIU Bao-jian. Analysis of compression deformation characteristics of loess during moistening and demostening process[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 22(3): 50 - 55. (in Chinese))
- [5] 陈开圣, 沙爱民. 压实黄土变形特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1023 - 1029. (CHEN Kai-sheng, SHA Ai-min. Study of deformation characteristic of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1023 - 1029. (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, 30(10): 108 - 114. (HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Deformation and shearing strength characteristic of compacted Malan loess in Lvliang region[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 108 - 114. (in Chinese))
- [7] 黄雪峰, 孔 洋, 李旭东, 等. 压实黄土变形特性研究与应用[J]. 岩土力学, 2014(增刊 2): 37 - 44. (HUANG Xue-feng, KONG Yang, LI Xu-dong, et al. Study and application of deformation characteristics of compacted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(S2): 37 - 44. (in Chinese))
- [8] 张 俊. 高填方黄土路基沉降规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. (ZHANG Jun. Study on settlement law of high filled subgrade[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese))
- [9] 资建民. 高填方路基快速施工与沉降控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. (ZI Jian-min. Research on rapid construction and settlement control of high filled subgrade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [10] 崔晓如. 高填方路基沉降变形分析与预测及其控制标准研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010. (CUI Xiao-ru. Study on settlement of high embankment on analysis and forecast and settlement control standards[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese))
- [11] LANCELLOTTA R, PREZIOSI L. A general nonlinear mathematical model for soil consolidation problems[J]. International Journal of Engineering Science, 1997, 35(10): 1045 - 1063.
- [12] BASMA A A, KALLAS N. Modeling soil collapse by artificial neural networks[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(3): 427 - 438.
- [13] 杨 晶, 白晓红. 压实黄土非线性压缩应力 - 应变关系在地基沉降计算中的应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1002 - 1008. (YANG Jing, BAI Xiao-hong. Nonlinear compression stress-strain relationship of compacted loess and its application to calculation of foundation settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1002 - 1008. (in Chinese))
- [14] MEERSCHAERT M M. Mathematical modeling fourth edition[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [15] 丁洲祥, 龚晓南, 李又云, 等. 割线模量法在沉降计算中存在的问题及改进探讨[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 313 - 316. (DING Zhou-xiang, GONG Xiao-nan, LI You-yun, et al. Study on some problems of settlement calculation with secant modulus method and its modification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 313 - 316. (in Chinese))
- [16] 杨 晶, 白晓红. 对采用割线模量法进行沉降计算所存在问题的探讨[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(3): 274 - 277. (YANG Jing, BAI Xiao-hong. Study on some problems of settlement calculation with secant modulus method[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(3): 274 - 277. (in Chinese))
- [17] 董 琪, 段 旭, 李 阳, 等. 黄土沟壑高填方工后 12 个月沉降变形规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 89 - 95, 105. (DONG Qi, DUAN Xu, LI Yang, et al. Subsidence deformation law of high embankment after 12 months in loess ravine[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 89 - 95, 105. (in Chinese))