文章编号： 1006-4710(2015)03-0295-06

基于蠕变试验的黄土高填方工后沉降规律数值研究

葛苗苗[1]，李宁[1]，郑建国[2]，朱才辉[1]，马旭东[1]

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所，陕西 西安 710048；2. 机械工业勘察设计研究院，陕西 西安 710043)

摘要： 为了研究黄土高填方工后沉降规律，开展一系列压实黄土一维固结蠕变试验，分析含水率及压实度对黄土蠕变特性的影响，验证了 Burger 蠕变模型在描述压实黄土应变与时间关系上的适用性，在该模型基础上，运用 FLAC3D 计算了黄土高填方工后沉降规律。结果表明：轴向加载瞬时，试样变形速率较大，随着时间的推移，变形速率减小并趋于稳定，压实黄土蠕变随含水率的提高而增加，随压实度的提高而减小。工后沉降对填料压实标准更敏感，在一定压实度和含水率范围内，工后沉降与含水率和压实度呈线性关系。可以通过高填方工后沉降速率和时间关系曲线上的拐点位置判断工后沉降稳定时间，填料压实度越低、含水率越大，拐点越靠后，沉降稳定的时间越长。

关键词： 压实黄土；固结蠕变试验；蠕变曲线；Burger 模型；数值分析；工后沉降

中图分类号： TV732.3　　**文献标志码：** A

Numerical analysis of the post-construction settlement regularity of loess-high filled embankment based on creep test

GE Miaomiao[1], LI Ning[1], ZHENG Jianguo[2], ZHU Caihui[1], MA Xudong[1]

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to study the post-construction settlement regularity of loess-high filled embankment, the author has conducted a series of uniaxial compression creep tests with compacted loess, analyzed the effect of the moisture content and compaction on creep properties of compacted loess. The applicability of Burger model on the relationship between strain and time of the compacted loess is verified. With this model as the constructive FLAC3D is used to calculate the settlement of post-construction of the loess high embankment. The results show that the deformation rate of the sample is larger at axial instant loading and as the time goes on, the deformation rate decreases and tends to be stable; with the moisture content the creep deformation of loess is increasing, the degree of compaction get lower with the improvement of compact degree. The post-construction settlement is more sensitive to the compaction standard of the loess. The post-construction settlement is a linear relation with moisture content and compaction degree within a certain range. The inflection point position on the v_s-t curve of high earth filling work post settlement can be used to estimate the stability time of the post-construction settlement. The lower of the compaction degree of filling materials, the higher moisture content of the filling materials will be, the more rear of the inflection point is, the longer of the post-construction settlement to stable will be.

Key words: compacted loess; consolidation creep test; creep curve; Burger model; numerical analysis; post-construction settlement

收稿日期： 2015-03-05

基金项目： 国家科技支撑计划资助项目(2013BAJ06B02)；国家自然科学基金资助项目(51179153,51308456)。

作者简介： 葛苗苗，女，博士生，研究方向为岩土工程数值仿真分析。E-mail：gemiaomiao163@163.com。

通讯作者： 李宁，男，教授，博导，研究方向为岩体动力学、冻土力学及隧洞边坡稳定性分析。
E-mail：ningli@xaut.edu.cn。

高填方的沉降问题一直是困扰工程界的难题，黄土高填方体通常为不同压实度和初始含水率下的重塑土，其沉降受施工工艺、气候因素、工期等各种因素的影响，而填料的压实度和含水率又是控制高填方沉降的重要因素，且高填方的工后沉降是一定上覆荷载下土体的长期变形，因此很有必要分析不同含水率及压实度下压实黄土填料的长期变形特性[1-11]。

随着计算机技术的发展，数值分析在岩土工程上的应用日趋成熟，FLAC3D、ABAQUS、PLAXIS等大型数值仿真软件均能对固结问题很好的进行模拟，而且数值计算能够考虑复杂地质环境对高填方地基的沉降的影响，目前已有学者通过数值方法对高填方沉降规律进行分析[12-15]。但对于较高的填方工程，其变形参数自下而上是变化的，若单纯的将填方体概化为一层，显然降低了计算精度，但考虑分层的时效变形参数又难以获取。因此，本文以西北某黄土高填方为背景，对压实黄土进行一维固结蠕变试验，分析压实黄土的长期变形特性并得到不同上覆荷载下压实黄土的时效变形参数，在考虑高填方体参数分层变化的情况下，运用FLAC3D分析了填料在不同含水率不同压实度下高填方的工后沉降变化规律，并对工后沉降的稳定进行判定。

1 压实黄土一维固结蠕变试验

1.1 土样性质

试验选取的黄土土样取自西北某黄土梁，取土深度为5.0～8.0 m，土样以粉土为主，辅以少量粉质粘土，结构疏松，强度低，且有一定湿陷性，试验土样基本物理参数见表1。

表1 土样物理性质指标

Tab.1 Physical properties of the loess samples

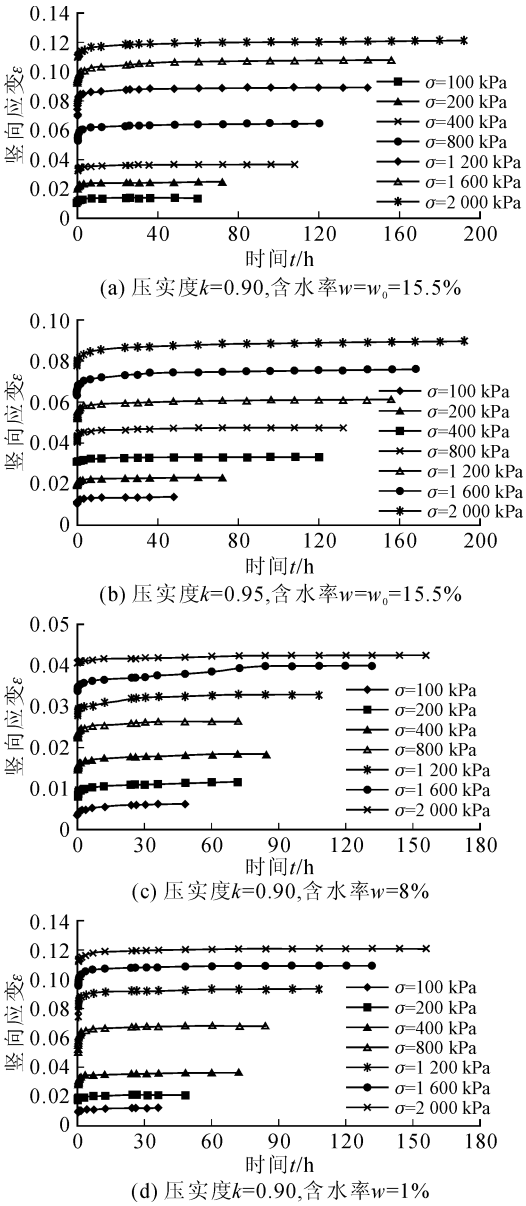
含水率 w/%	最优含水率 w_0/%	最大干密度 ρ_d/(g/cm^3)	液限 W_L/%	塑限 W_P/%	塑性指数 I_P	比重 G
12.3	15.5	1.72	28	20.4	7.6	2.70

1.2 试验方案

为了系统地研究含水率及压实度对黄土蠕变特性的影响，本文选取了8种试验方案：试样含水率 $w=w_0=15.5\%$ 时，压实度 k 分别为0.90、0.93、0.95、0.98以及试样压实度 $k=0.90$ 时，含水率 w 分别为8%、12%、17%、22%。试验采用WG型单杠杆固结仪，试样尺寸为圆柱形50 cm^2×2 cm。试样在25 kPa下预压稳定后，按照100 kPa→200 kPa→400 kPa→800 kPa→1 200 kPa→1 600 kPa→2 000 kPa进行逐级加载，加载的稳定标准为24 h竖向累计变形小于0.002 mm。为保证试验过程中，试样水分不被蒸发，试验过程中将压缩仪周围用湿毛巾裹住，并定期更换湿毛巾，以保证试样的含水率。

1.3 试验结果及分析

图1为本文压实黄土一维固结蠕变试验曲线，由于篇幅有限，在此本文只列出部分试验结果。



(a) 压实度k=0.90,含水率$w=w_0$=15.5%

(b) 压实度k=0.95,含水率$w=w_0$=15.5%

(c) 压实度k=0.90,含水率w=8%

(d) 压实度k=0.90,含水率w=1%

图1 压实黄土竖向应变-时间关系曲线

Fig.1 Curves of strain-time of compacted loess

从以上压实黄土的应变-时间关系曲线可以看出：①压实黄土蠕变曲线并未出现加速蠕变阶段，但都明显表现出初始蠕变和等速蠕变两个阶段；②每级轴向荷载加载瞬时，试样变形速率较大，随着时间的推移，变形速率逐渐减小，并趋于稳定，且轴向

荷载越大，稳定所需时间越长；③压实度和含水率对黄土长期的蠕变变形有很大影响，这是因为土是土骨架、水、气三相组成的松散颗粒集合体，压实度越高，试样土颗粒间的孔隙就越小，自由水也就相应较小，扩散膜厚度就越薄，土颗粒间的静电吸力就很大，在外荷载作用下，土颗粒间的相互作用很难被破坏，相应的，蠕变效应就越弱。同样的，同一压实度下含水率越高，土颗粒间自由水就越多，扩散膜的厚度就越厚，土颗粒间的相互作用就较弱，也越容易发生滑移和蠕动，蠕变效应就越明显。

2 Burger 模型验证及参数求取

Burger 模型是由 Maxwell 模型和 Kelvin 模型串联而成，其元件组合图形如图 2 所示。

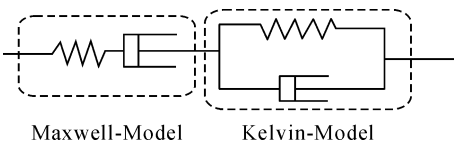


图 2 Burger 模型元件组合

Fig. 2 Component construction of Burger model

Burger 模型适合描述第三阶段以前的蠕变曲线，其蠕变方程如下：

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma_0}{E_M}+\frac{\sigma_0}{\eta_M}t+\frac{\sigma_0}{E_K}\left[1-\exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K}t\right)\right] \quad (1)$$

以本文含水率 $w=17.0\%$、$k=0.90$ 压实黄土的蠕变试验数据为依据，建立如式(1)的蠕变模型，利用 curve expert 软件对试验数据进行拟合，拟合所得参数见表 2。

表 2 Burger 蠕变模型参数拟合值

Tab. 2 Parameter of Burger model

σ/kPa	E_M/MPa	E_K/MPa	η_M/(MPa·h)	η_K/(MPa·h)	R^2
100	10.49	53.41	3 672.22	17.65	0.974 1
200	11.11	96.16	7 628.26	39.65	0.974 0
400	13.36	85.49	14 775.71	33.10	0.978 3
800	14.96	74.40	12 002.48	8.91	0.965 0
1 200	15.54	99.35	23 847.24	23.18	0.967 6
1 600	16.51	165.47	59 164.77	136.43	0.988 7
2 000	17.84	292.44	145 070.94	1 047.98	0.996 6

通过 Burger 模型的拟合参数，可得到不同竖向荷载下 Burger 模型的计算曲线，将其与试验结果的对比，如图 3 所示。由图可以看出，Burger 模型计算曲线与试验值能很好吻合，且表 2 的拟合参数精度很高，说明 Burger 模型可以很好地反映瞬时加载时刻以及长期荷载作用下压实黄土的长期变形效应，能够描述压实黄土应力-应变-时间特征，满足工程精度要求。

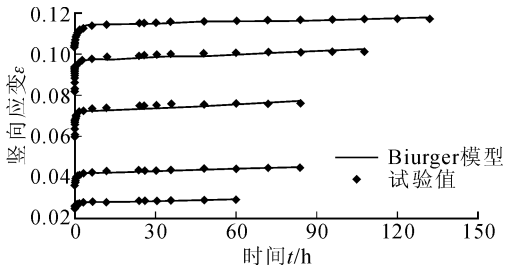


图 3 Burger 蠕变模型的验证

Fig. 3 Test of Burger model

3 黄土高填方工后沉降数值分析

第二节说明了 Burger 模型能够反映压实黄土应变与时间关系曲线的变化规律。因此，本节运用 FLAC3D 对某高填方建立三维模型，并采用 Burger 模型对文中的试验曲线进行拟合，得到不同含水率、不同压实度、不同荷载下高填方体的计算参数，运用 Burger 模型分析填料在不同含水率、不同压实度下的工后沉降规律。

3.1 计算模型及参数

图 4、图 5 分别为数值计算的地层分布和模型网格图，填方高度共 90 m。

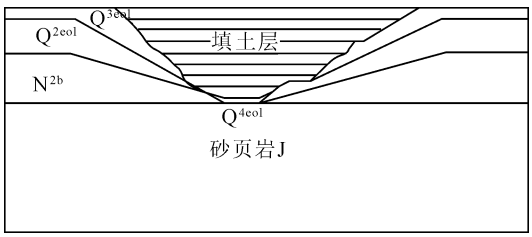


图 4 地层分布示意图

Fig. 4 Stratigraphic distribution diagram

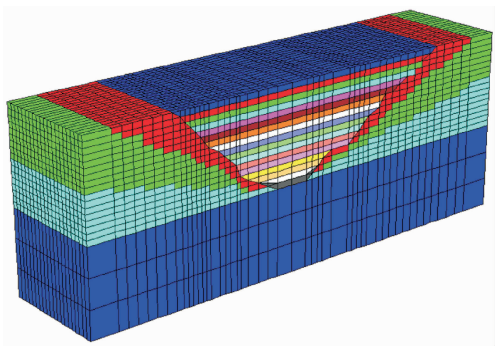


图 5 模型网格图

Fig. 5 Model grid

模型两侧和底部均取一倍的填方高度为研究范围，计算过程中，两侧进行法向约束，底部为固定约

束。基岩的变形及强度参数如表3所示，通过一维固结蠕变试验得到填料在不同情况下的压缩模量见表4。蠕变计算参数采用第二节方法拟合得来，其中切变模量按式(2)换算而来，体积模量按式(3)、(4)通过压缩模量换算而来，由于篇幅有限，文中只列出含水率 $w=12\%$、压实度 $k=0.90$ 时的蠕变计算参数，具体见表5。

本文填方体分为9层，每层填土的变形参数根据重度计算其上覆荷载，并与本文试验竖向应力进行对应，该竖向应力下的变形及蠕变参数即为数值计算该填土层的参数。数值分析方案与本文试验方案对应，共8种，具体见1.2节。工后沉降计算时长为30年，除谷底软弱覆盖层 Q^{4eol} 外，不考虑地基岩土层蠕变变形。

$$G=\frac{E_0}{2(1+\mu)} \tag{2}$$

$$K=\frac{E_0}{3(1-2\mu)} \tag{3}$$

$$E_0=\left(1-\frac{2\mu^2}{1-\mu}\right)E_s \tag{4}$$

其中：μ 为泊松比，取为0.32。

表3 各岩土层的物理力学参数

Tab.3 Physical and mechanical parameters of the base rock

岩土层	容重 $\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(°)$	压缩模量 E_s/MPa
Q^{4eol}	18.60	45	22	22.17
Q^{3eol}	19.50	70	26	36.23
Q^{2eol}	20.00	95	36	37.69
N^{2b}	21.20	90	20	38.15
J	22.00	80	18	301.90

表4 不同方案下高填方的压缩模量

Tab.4 The modulus of compression of loess-high filled embankment in different water content and pressure

竖向压力 σ/kPa	$k=0.90$，不同含水率 w 下的压缩模量 E_s/MPa				$w=15.5\%$，不同压实度 k 下的压缩模量 E_s/MPa			
	8%	12%	17%	22%	0.9	0.93	0.95	0.98
100	15.78	9.78	7.99	9.56	7.38	8.23	7.43	8.22
200	18.74	13.60	11.59	11.66	9.25	10.97	10.73	11.94
400	16.42	19.97	12.66	16.73	16.32	18.87	20.09	22.19
800	50.46	32.03	13.06	10.92	14.52	18.90	28.02	37.88
1 200	61.72	22.29	16.12	16.72	16.21	16.51	29.48	53.16
1 600	56.92	21.75	25.11	30.84	22.23	22.29	27.68	48.96
2 000	157.04	37.74	38.65	9.56	29.18	26.59	29.07	39.79

表5 填料含水率 $w=12\%$、压实度 $k=0.90$ 时 Burger 蠕变计算参数

Tab.5 The creep parameters of Burger model when $w=12\%$、$k=0.90$

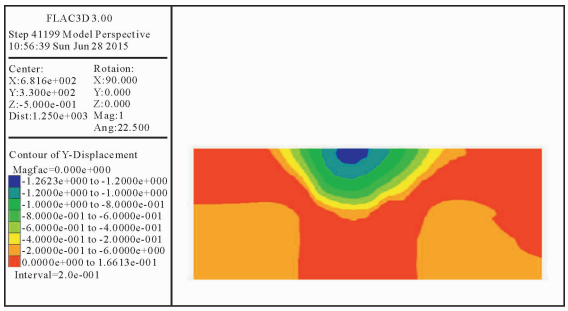
竖向压力 σ/kPa	G_M/MPa	η_M/(MPa·h)	G_K/MPa	η_K/(MPa·h)	拟合精度
100	4.69	5 184.84	30.18	49.23	0.976 6
200	5.25	9 761.00	36.77	52.04	0.976 4
400	6.39	17 637.90	63.53	82.13	0.976 5
800	8.52	25 207.30	80.37	101.86	0.977 2
1 200	10.03	33 462.40	46.62	52.46	0.974 4
1 600	9.91	42 149.00	50.01	77.93	0.988 3
2 000	9.73	121 985.00	108.80	995.68	0.997 7

3.2 计算结果分析

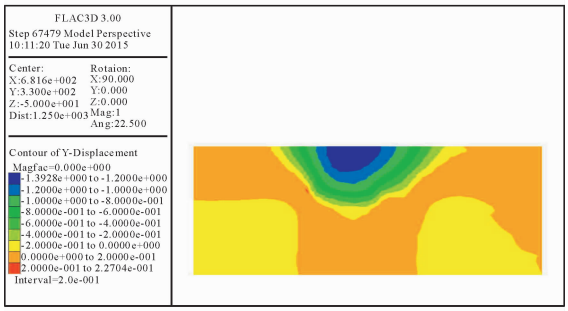
图6为填料含水率 $w=12\%$、压实度 $k=0.90$ 时，黄土高填方的工后不同时间的沉降云图，其他方案下不同工后时间沉降云图类似，在此不一一列出。

从以上计算结果可以看出，最大工后沉降发生在填方顶部，工后开始时，填方沉降速率较大，随着时间推移，沉降速率逐渐减小，最终趋于稳定。同时，从图7和图8曲线可以看出：①在饱和含水率范围内，随着填料含水率的增大，高填方工后沉降逐渐增大，含水率每增加一个百分点，高填方工后沉降增大3%～8%；随着压实标准的提高，工后沉降也逐渐减小，压实度每增大一个百分点，高填方工后沉降减小5%～8%。相比之下，填料压实度对黄土高填方工后沉降的影响更大；②图7和图8中曲线在3～4 a时出现拐点，之后曲线基本平直，说明该黄土高填方在工后3～4 a沉降趋于稳定，且含水率越高，压实度越低，拐点越靠后，稳定时间也越靠后。

图9和图10为该黄土高填方稳定时的工后沉降与填料含水率和压实度关系曲线，从图中可以看出，在一定含水率和压实度范围内，黄土高填方工后沉降与填料含水率和压实度可以用直线关系拟合，且拟合精度较高，具体可以用式(5)、式(6)表达。



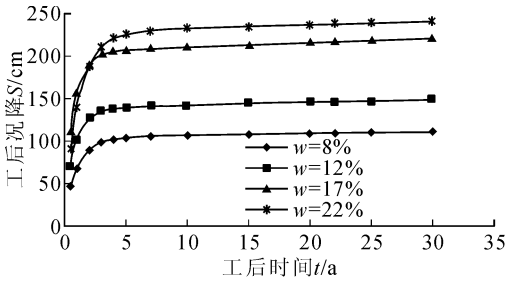
(a) t=2 a



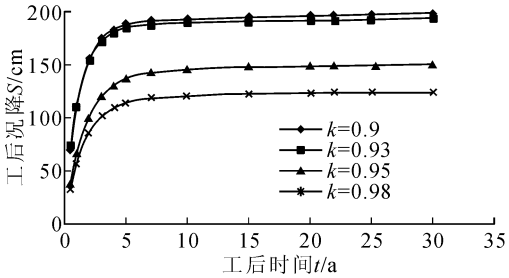
(b) t=5 a

图 6　高填方工后沉降云图(单位：m)

Fig. 6　The post-construction settlement cloud(unit：m)



(a) 不同含水率下高填方工后沉降历时曲线



(b) 不同压实标准下高填方工后沉降历时曲线

图 7　工后沉降和时间关系曲线

Fig. 7　The relationship between post-construction settlement and time

$$S = 9.4586w + 25.516 \tag{5}$$

$$S = -934.99k + 1\,028.5 \tag{6}$$

其中：S 为工后沉降(cm)；w、k 分别为填料的含水率(%)和压实度。

与本文试验结果相比，数值分析定量的刻画了填料含水率和压实标准对黄土高填方工后沉降的影响大小。同时，实际工程中，工后稳定评价是各类高填方的工程最为关注的问题，从本文的计算结果可以看出，沉降历时曲线的转折点是分析沉降稳定的一个关键点，在这个关键点前后，沉降速率发生了很大变化，因此可以通过沉降历时曲线上出现的拐点位置来判断高填方工后沉降的稳定时间，为后期高填方上部工程建设提供时间参考。同时拐点处的沉降速率也可以作为稳定评价标准的参考值，这对类似工程的沉降稳定时间的判断及稳定标准的确定提供了一个新方法。

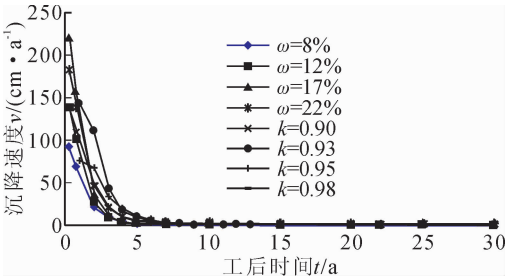


图 8　高填方工后沉降速率-时间关系曲线

Fig. 8　The relationship between post-construction settlement rate and time

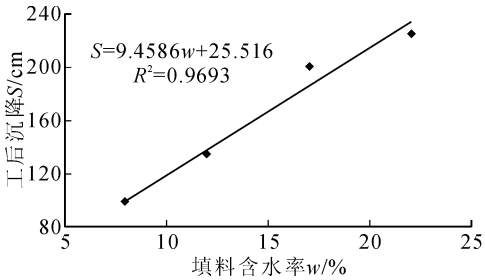


图 9　工后沉降与填料含水率关系曲线

Fig. 9　The relationship between post-construction settlement and water content of filling

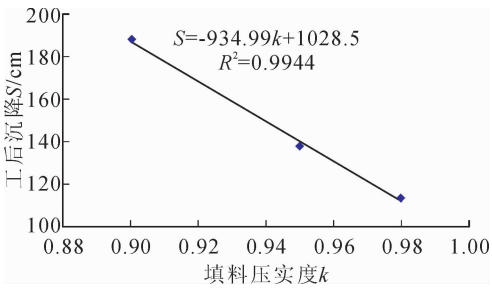


图 10　工后沉降与填料压实度关系曲线

Fig. 10　The relationship between post-construction settlement and compaction degree of filling

该黄土高填方填料含水率和压实度控制在12%和 0.93 左右，按照本章分析结果，在不考虑地基蠕变的情况下，预测高填方工后沉降可达 1.38 m，这比相同高度填方工程的现场监测结果大，原因主要有以下 2 点。

1）由于试验条件所限，本文击实试验为轻型击实试验，因此蠕变试验以及通过试验所得的蠕变参数均以轻型击实试验为基础，这和现场强夯施工结果有很大差距，一般的，重型击实试验所得到的最大干密度为轻型击实试验的1.05～1.08倍，也有甚至达到1.1倍。据此，本文数值计算填料干密度偏低，压实度并未达到现场施工的压实标准，导致计算结果偏大。

2）黄土高填方面积大，填土性质复杂，一般多为有钙质的杂填土，由于现场条件所致，本文试验黄土取自高填方接坡处一角，取土方量较小，且试验过程中对土样进行筛分，土样远远达不到现场填土的强度，导致黄土固结蠕变试验所得变形参数偏小，数值计算所得的结果就比现场监测结果大。

鉴于以上两个主要原因，本文的数值计算结果较类似工程的实际监测结果偏大。

4 结 论

本文通过试验研究了不同含水率及压实度下黄土的蠕变变形，验证了Burger模型在描述压实黄土应变-时间关系曲线上的适用性并得到压实黄土蠕变参数，运用FLAC3D对西北某黄土高填方工后沉降进行计算，得到以下主要结论：

1）在轴向荷载加载瞬时，压实黄土试样变形速率较大，随着时间的推移，变形速率逐渐减小，并趋于稳定，且其蠕变变形随含水率的提高而增加，随压实度的提高而减小。

2）Burger蠕变模型能很好描述压实黄土的应变-时间关系曲线。

3）在饱和含水率范围内，黄土高填方工后沉降随填料含水率提高而增加，随其压实标准提高而降低，但对填料压实度更加敏感，含水率每增加一个百分点，高填方工后沉降增大3%～8%；压实度每增大一个百分点，高填方工后沉降减小5%～8%，黄土高填方工后沉降与填料含水率和压实度间满足线性关系。

4）可以运用蠕变模型计算高填方工后沉降，得到工后沉降历时曲线，通过曲线拐点判断高填方工后沉降稳定时间。通过计算发现本文黄土高填方在工后4年左右趋于稳定，且含水率越高、压实度越低，沉降稳定时间越长。

参考文献：

[1] Bjerrum L. Engering geology of Norwegian normally consilidated marine clays as related to settlements of buildings [J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 83-118.

[2] 朱才辉，李宁，刘俊平. 压实Q3马兰黄土蠕变规律研究 [J]. 西安理工大学学报，2011，27(4)：392-399.
Zhu Caihui, Li Ning, Liu Junping. Research on the creep behavior of compacted Q3 Ma-Lan loss [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 392-399.

[3] 殷宗泽，张海波，朱俊高，等. 软土的次固结 [J]. 岩土工程学报，2003，25(5)：521-526.
Yin Zongze, Zhang Haibo, Zhu Jungao, et al. Secondary consolidation of soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521-526.

[4] 高彦斌，朱合华，叶观宝，等. 饱和软黏土一维次固结系数 C_a 值的试验研究 [J]. 岩土工程学报，2004，26(4)：460-463.
Gao Yanbin, Zhu Hehua, Ye Guanbao, et al. The investigation of the coefficient of secondary compression C_a in odometer test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 460-463.

[5] 廖红建，苏立君，白子博明，等. 次固结沉降对压缩时间曲线的影响研究 [J]. 岩土力学，2002，23(5)：537-540.
Liao Hongjian, Su Lijun, Baizi Boming, et al. Research on influence of secondary consolidation on sompression time curve [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 537-540.

[6] 张卫兵，谢永利，杨晓华. 压实黄土一维次固结特性研究 [J]. 岩土工程学报，2007，29(5)：765-768.
Zhang Weibing, Xie Yongli, Yang Xiaohua. Research on 1D secondary consolidation characteristic of compacted loss [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 765-768.

[7] 周秋娟，陈晓平. 软土蠕变特性试验研究 [J]. 岩土工程学报，2006，28(5)：626-629.
Zhou Qiujuan, Chen Xiaoping. Experimental study on creep characteristics of soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 626-629.

[8] 梅国雄，宰金珉，赵维炳，等. 考虑流变的沉降预测方法研究 [J]. 岩土工程学报，2004，26(3)：416-418.
Mei Guoxiong, Zai Jinmin, Zhao Weibing, et al. Settlement prediction method considering creep [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 416-418.

[9] Yin Zhenyu, Zhang Dongmei, Hicher P Y, et al. Modeling of time-dependent behaviour of soft soil using simple elasto-viscoplastic model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 880-888.

[10] 宋二祥，曹光栩. 山区高填方地基蠕变沉降特性及简化计算方法探讨 [J]. 岩土力学，2012，33(6)：1712-1718.
Song Erxiang, Cao Guangxu. Characteristics and simplified calculation method of creep settlement of high fill foundation in mountain area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1712-1718.

（下转第305页）

[6] Sun H Q, Shi Y N. An investigation on Hall-Petch relationship in electrodeposited nanocrystalline Cu-Ni-P alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2009, 25(3): 347-350.

[7] Wang H S, Chen H G, Gu J W, et al. Improvement in strength and thermal conductivity of powder metallurgy produced Cu-Ni-Si-Cr alloy by adjusting Ni/Si weight ratio and hot forging [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 633: 59-64.

[8] 豆志河，张延安，赫冀成，等. Cu-Cr 合金触头材料的研究进展 [J]. 材料导报，2005，19(10)：63-67.
Dou Zhihe, Zhang Yanan, He Jicheng, et al. Reasearch progress of Cu-Cr alloy contact material [J]. Materials Review, 2005, 19(10): 63-67.

[9] 陈文革，李永华，邵菲，等. 铬青铜和铜铬锆热处理前后的显微组织 [J]. 材料热处理学报，2011，32(8)：68-73.
Chen Wenge, Li Yonghua, Shao Fei, et al. Microstructure of QCr0.5 and Cu-Cr-Zr alloys before and after heat treatment [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(8): 68-73.

[10] 王强松，黄国兴，娄花芬，等. QCr0.8 铜合金的组织和性能 [J]. 材料热处理学报，2012，33(5)：95-100.
Wang Qiangsong, Huang Guoxing, Lou Huafen, et al. Microstructure and properties of QCr0.8 copper alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(5): 95-100.

[11] 张凌峰，熊毅，李炎，等. 不同温度时效对 QCr0.5 铜合金纳米相析出的影响 [J]. 材料热处理学报，2012，33(6)：47-50.
Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Li Yan, et al. Development of nano-scale precipitation in QCr0.5 copper alloy during aging at different temperatures [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(6): 47 -50.

[12] 冼爱平，朱耀宵. Cu-Cr 触头合金制备技术的发展 [J]. 金属学报，2003，393(3)：225-233.
Xian Aiping, Zhu Yaoxiao. The development of manufacture processing for Cu-Cr contact alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 393(3): 225-233.

[13] 胡特. 几种高强高导铜合金中析出强化相晶体学特征研究 [D]. 长沙：湖南大学，2014.
Hu Te. The research on crystallographic characteristics of sthengthening precipitates in some kinds of high strength and high conductivity copper alloys [D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[14] Wang Q J, Du Z Z, Luo L, et al. Fatigue properties of ultra-fine grain Cu-Cr alloy processed by equal-channel angular pressing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 526(11): 39-44.

[15] Bachmaier A, Rathmayr G B, Bartosik M, et al. New insights on the formation of supersaturated solid solutions in the Cu-Cr system deformed by high-pressure torsion [J]. Acta Materialia, 2014, 69(5): 301-313.

[16] 刘平，康布熙，曹兴国，等. 快速凝固 Cu-Cr 合金时效析出的共格强化效应 [J]. 金属学报，1999，35(6)：561-564.
Liu Ping, Kang Buxi, Cao Xingguo, et al. Conherent strengthening of aging procipitation in rapidly solidified Cu-Cr alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(6): 561-564.

（责任编辑　周蓓）

（上接第 300 页）

[11] 朱才辉. 深厚黄土地基上机场高填方沉降规律研究 [D]. 西安：西安理工大学，2011：109-111.
Zhu Caihui. Settlement regularity study of loess-high filled airport foundation with large thickness [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 109-111.

[12] 李荣建，邵生俊，赵树德. 三种地基沉降计算方法的灰色关联评价 [J]. 西安理工大学学报，2009，25(2)：164-168.
Li Rongjian, Shao Shengjun, Zhao Shude. GreyIncidence assessmenton three kindsof computational method of foundation settlement [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(2): 164 -168.

[13] 马南飞. 高速公路软土路基沉降规律监测及 FLAC 模拟 [J]. 西安科技大学学报，2007，27(2)：251-254.
Ma Nanfei. Monitoring and FLAC simulating on settlement laws of soft soil roadbed ofhighway [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(2): 251-254.

[14] 杨友辉. 高填方路基沉降变形规律及工后沉降控制标准研究 [D]. 重庆：重庆交通大学，2007：86-95.
Yang Youhui. Study on high subgrade settlement laws and post-load settlement control standard [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2007: 86-95.

[15] 葛栋林，史宏达. 考虑蠕变特性的斜坡堤软土地基变形数值分析 [J]. 海岸工程，2011，30(1)：1-7.
Ge Donglin, Shi Hongda. Numerical analysis on deformation in consideration of creep behavior of soft soil foundation under sloping breakwater [J]. Coastal Engineering, 2011, 30(1): 1-7.

（责任编辑　李斌）