

南水北调高填方渠道沉降过程计算方法研究

张 宇, 陈善雄, 余 飞, 熊署丹, 戴张俊

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 高填方渠道的沉降变化过程在南水北调工程中是难以预估的, 借助 ANSYS 有限元, 研究填高 H 、弹性模量 E 、泊松比 μ 等因素对渠道沉降的影响规律, 提出侧向变形修正系数 K_1 与附加沉降修正系数 K_2 , 并修正填土在加载过程中的压缩模量, 在分层总和法的基础上, 建立一种适用于高填方渠道沉降变化过程的计算方法。渠道在分级荷载 P_i 的施加过程中, 主要以固结沉降 S_j 为主, 当分级荷载 P_i 保持不变时, 主要产生蠕变变形 S_s 。该方法的计算参数较少, 且考虑侧向变形、附加沉降、以及压缩模量随深度变化等产生的影响, 可合理地计算出高填方渠道, 从开始填筑直至工后沉降稳定期间的沉降变化过程与沉降总量。基于本文的计算方法, 在 Matlab7.0 上编制可视化的应用程序, 并合理地模拟和预测高填方渠道在分级加载下的沉降变化过程, 为高填方渠道的设计和施工提供一种快捷实用的指导方法。

关键词: 土力学; 南水北调工程; 高填方渠道; 填筑体; 地基层; 分层总和法

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)增 2-4367-08

CALCULATION METHOD STUDY OF SETTLEMENT PROCESS OF HIGH FILLING CHANNELS IN SOUTH-TO-NORTH WATER DIVERSION PROJECT

ZHANG Yu, CHEN Shanxiong, YU Fei, XIONG Shudan, DAI Zhangjun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The settlement process of high fill channel is difficult to predict in the south-to-north water diversion project. The influence of filling height H , elastic modulus E and Poisson's ratio μ on the channel were clarified with ANSYS FEM. The lateral deformation correction coefficient K_1 and the additional settlement correction coefficient K_2 were proposed, and the compression modulus of filled soil was corrected during the loading process. And a calculation method which was applicable to the settlement process of high fill channel was established on the basis of layered summation method. The settlement of channel based mainly on the consolidation settlement S_j in the process of grading load P_i which mainly produce creep deformation S_s when the grading load P_i remains constant. The method has less calculating parameters, and the impact of the lateral deformation, the additional settlement and the compression modulus changing with depth are considered. The settlement process and the total settlement, which start from the channel filling until stable during the post-construction settlement, could be properly calculated out by the method. A visualization application was compiled based on the calculation method in Matlab7.0, which could reasonably simulate and predict the settlement process of high fill channel under the application of grading load, and provide a quick and practical guidance for the design and construction of high fill

收稿日期: 2013-10-10; **修回日期:** 2013-12-10

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB10B02)

作者简介: 张 宇(1987-), 男, 2010 年毕业于西南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事特殊土工程特性方面的研究工作。E-mail: jordanzhy@163.com。通讯作者: 陈善雄(1965-), 男, 现任研究员。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.122

channel.

Key words : soil mechanics ; south-to-north water diversion project ; high filling channels ; filling body ; foundation ; the layered summation method

1 引言

南水北调中线工程中填方高度大于 6 m 的渠段共长约 144 km,高填方渠道主要由填筑体与地基层组成。高填方渠道沉降过程的预估是设计和施工中的技术难题,亟需提供一种计算方法,用于模拟和预测高填方渠道填筑体在分级填筑荷载下的沉降变化过程,作为高填方渠道设计与施工的指导工具。

目前,利用现场沉降观测资料的沉降曲线去拟合最终沉降量和工后沉降量的方法在高铁沉降评估中应用较多,但周期太长、费用太高、拓展应用较差;刘奉银等^[1]采用一维固结理论^[2]分层计算了黄土高填方路堤的沉降变形,但并未考虑土体的侧向变形;殷宗泽等^[3]采用比奥固结理论对沪宁高速公路进行非线性有限元计算分析,并考虑了路堤的侧向变形,但却未考虑路堤中土体模量随填筑高度增加后产生的变化,这样将产生一定误差;何兆益和周虎鑫^[4]采用三维有限元分析了高填方路堤填筑体的沉降变化,但只考虑了填筑体的固结沉降,忽略了路堤工后的沉降变化,从而不能很好地反映路堤在整个沉降过程中的变化情况。上述研究成果对路堤沉降过程的计算具有一定的指导意义,但是对于由粉质黏土分级填筑而成的高填方渠道还存在一定的局限性。

高填方渠道沉降的特点:填筑体的沉降是由 2 种因素造成的,第 1 种是由土层在填筑过程中产生固结沉降,第 2 种是在自重作用下产生的蠕变变形。填筑体与地基层在沉降过程中都将发生侧向变形;填筑体的填筑过程是一个逐级加载的过程,填土的压缩指标在不断变化;填筑体施工完成后,将在渠道的内侧边坡铺设水泥面板作为渠道蓄水后的防渗衬砌结构,而工后蓄水和面板荷载将引起渠道的附加沉降。

根据以上特点,本文以实际工程为依托,开展了大量的 ANSYS 有限元计算,研究填高 H 、弹性模量 E 、泊松比 μ 等因素对渠道沉降的影响规律,并提出了侧向变形修正系数 K_1 与附加沉降修正系数 K_2 ,且修正了填土在加载过程中的压缩模量,而

后借鉴传统的分层总和法^[5],建立了一种可模拟和预测高填方渠道沉降变化过程的实用计算方法,并基于该方法在 Matlab7.0 编制了可视化的应用程序,合理地模拟和预测了 TS93+890-94+000 右岸渠段的高填方渠道在分级加载下的沉降发展过程,为南水北调中高填方渠道的设计和施工提供了一种快捷实用的指导方法。

2 有限元计算模型简介

本文将借助 ANSYS 有限元方法进行计算分析,以南水北调中线工程中 TS95+670-95+770 右岸渠段的实际施工图为基础,建立了一系列不同填土高度 H 的计算模型,并在面板与填筑体之间增设接触单元,增强了渠道计算的适应性,ANSYS 有限元计算模型如图 1 所示。对于无侧限的情形,即放空填筑体所有节点的水平位移约束,只需设置合理的边界条件($U_x = 0, U_y = 0$);对于有侧限的情形,使填筑体中所有节点的水平位移 $U_x = 0$ 即可,且同时添加合理的边界条件($U_x = 0, U_y = 0$);这里仅考虑填筑体中心自身的压缩变形,暂不考虑地基的变形。为消除计算方法和计算参数选取带来的误差,均采用 D-P 模型进行计算,且选择高精度的 8 节点平面四边形单元作为模型的材料单元,材料模型计算力学参数如表 1 所示。

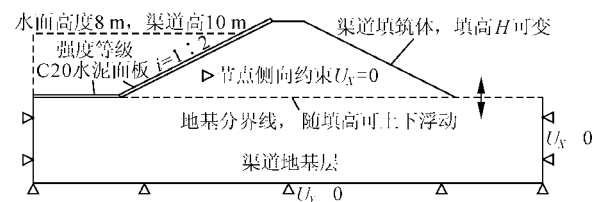


图 1 ANSYS 有限元计算模型

Fig.1 FEM calculation model in ANSYS

表 1 材料模型计算力学参数

Table 1 Mechanical parameters of material model

材料类型	位置	压缩模量 E_s / MPa	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / ($^\circ$)
粉质黏土	地基层	23	2 020	42.0	25.0
压实性粉质黏土	填筑体	22	2 010	36.6	17.6

3 高填方渠道沉降计算影响因素分析

3.1 侧向变形对渠道沉降计算的影响

传统的分层总和法是针对半无限空间，假定土体处于完全侧限状态^[6]，不发生侧向变形，只有竖向压缩，从而使沉降计算比实际情况偏小。于是本文定义侧向变形修正系数 K_1 ，即无侧限下的沉降 ($S_{0\text{无侧限}}$) 与有侧限下的沉降 ($S_{0\text{有侧限}}$) 之比，以实现在沉降计算中考虑土体的侧向变形的影响：

$$K_1 = \frac{S_{0\text{无侧限}}}{S_{0\text{有侧限}}} = f_1(H, E, \mu) \quad (1)$$

对于高填方渠道填筑体而言，影响沉降修正系数 K_1 的因素较多，根据实际情况，本文主要考虑填高 H 、密实程度(弹性模量 E 指标)、软弱程度(泊松比 μ) 3 种因素带来的影响，变量因素的计算范围如表 2 所示。

表 2 变量因素的计算范围

Table 2 Calculation range of related variables

弹性模量 E/MPa	填高 H/m	泊松比 μ
20 ~ 40	7 ~ 12	0.25 ~ 0.35

本文借助 ANSYS 有限元，以实际施工图为基础，建立了一系列不同填土高度 H 的计算模型，当固定填土的弹性模量 $E = 30 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ 时，通过 ANSYS 有限元可分别计算出在不同填高 H 下的 $S_{0\text{无侧限}}$ 与 $S_{0\text{有侧限}}$ ，便可得出二者在不同填高 H 下的比值(即侧向变形修正系数 K_1)，进而可得出填高 H 与侧向变形修正系数 K_1 的相关关系(见图 2(a))；当选用填高 $H = 9 \text{ m}$ 的计算模型时，并固定填土的弹性模量 $E = 30 \text{ MPa}$ ，便可通过 ANSYS 分别计算出在不同泊松比 μ 下的 $S_{0\text{无侧限}}$ 与 $S_{0\text{有侧限}}$ ，进而可得出泊松比 μ 与 K_1 的相关关系(见图 2(b))；同理，当选用填高 $H = 9 \text{ m}$ 的计算模型，并固定填土的泊松比 $\mu = 0.3$ ，便可得出弹性模量 E 与 K_1 的相关关系(见图 2(c))。

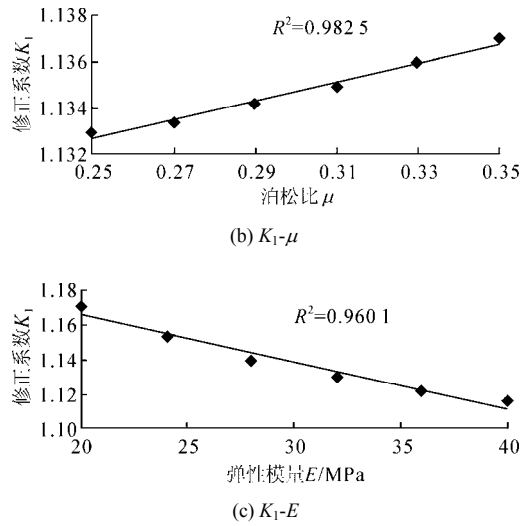
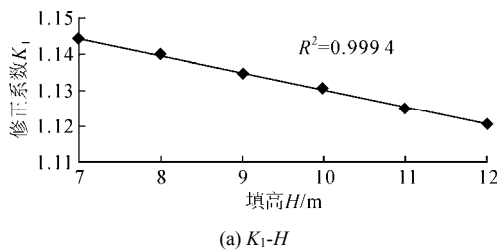


图 2 H, μ, E 与修正系数 K_1 的相关关系

Fig.2 Relationships between H, μ, E and correction factor K_1

由图 2(a)可知，渠道填筑填高 H 与沉降修正系数 K_1 呈良好的线性负相关，渠道填筑高度越高，修正系数 K_1 越小；这主要是因为当填筑体的高度 H 较小时，填筑体处于近似弹性变形阶段，随着填高 H 的增大，填筑体下部土体的弹性区域在高应力作用下逐渐被打破，出现了塑性变形区域且呈逐渐增大趋势，从而导致土体的侧向变形也在不断增大；当渠道高度 $H = 7 \sim 12 \text{ m}$ 时，修正系数 $K_1 = 1.1445 \sim 1.1204$ 。

由图 2(b)可知，泊松比与沉降修正系数 K_1 呈良好的线性正相关，泊松比越大，修正系数 K_1 越大；当泊松比 $\mu = 0.25 \sim 0.35$ 时，修正系数 $K_1 = 1.1329 \sim 1.1370$ 。

由图 2(c)可知，弹性模量与沉降修正系数 K_1 呈良好的线性负相关，弹性模量越大，修正系数 K_1 越小；当 $E = 20 \sim 40 \text{ MPa}$ 时， $K_1 = 1.1711 \sim 1.1163$ 。

综上所述，考虑渠道填筑体侧向变形影响的沉降修正系数 K_1 分别与 H, E, μ 呈一定线性相关关系。利用多元函数线性回归分析方法，可得

$$K_1 = 1.2497 - 0.005H + 0.0411\mu - 0.0027E \quad (2)$$

3.2 蓄水与面板荷载对渠道沉降计算的影响

高填方渠道边坡填筑体施工完成后，将在渠道的内侧边坡铺设水泥面板作为渠道蓄水后的防渗衬砌结构，而工后蓄水和面板荷载引起的附加沉降问题是传统的分层总和法难以考虑的。因此本文定义了附加荷载修正系数 K_2 ，即渠道在有附加荷载时的沉降 $S_{0\text{附加荷载}}$ 与未施加蓄水和面板荷载时的沉降 S_0

之比，以实现在沉降计算中考虑蓄水和面板等附加荷载的影响。

根据节 3.1 的分析结果，同样借助 ANSYS 有限元方法，建立附加荷载修正系数 K_2 与填土高度 H 、土体弹性模量 E 、泊松比 μ 的函数关系：

$$K_2 = \frac{S_{0\text{附加荷载}}}{S_0} = f_2(H, E, \mu) \quad (3)$$

在 ANSYS 有限元中，当固定填土的弹性模量 $E = 30 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ 时，通过 ANSYS 有限元可分别计算出在不同填高 H 下的 $S_{0\text{附加荷载}}$ 与 S_0 ，便可得出二者在不同填高 H 下的比值(即附加荷载修正系数 K_2)，进而可得出填高 H 与附加沉降修正系数 K_2 的相关关系(见图 3(a))；当选用填高 $H = 9 \text{ m}$ 的计算模型时，并固定填土的弹性模量 $E = 30 \text{ MPa}$ ，便可通过 ANSYS 分别计算出在不同泊松比 μ 下的 $S_{0\text{附加荷载}}$ 与 S_0 ，进而可得出泊松比 μ 与 K_2 的相关关系(见图 3(b))；同理，当选用填高 $H = 9 \text{ m}$ 的计算模型时，并固定填土的泊松比 $\mu = 0.3$ ，便可得出弹性模量 E 与 K_2 的相关关系(见图 3(c))。

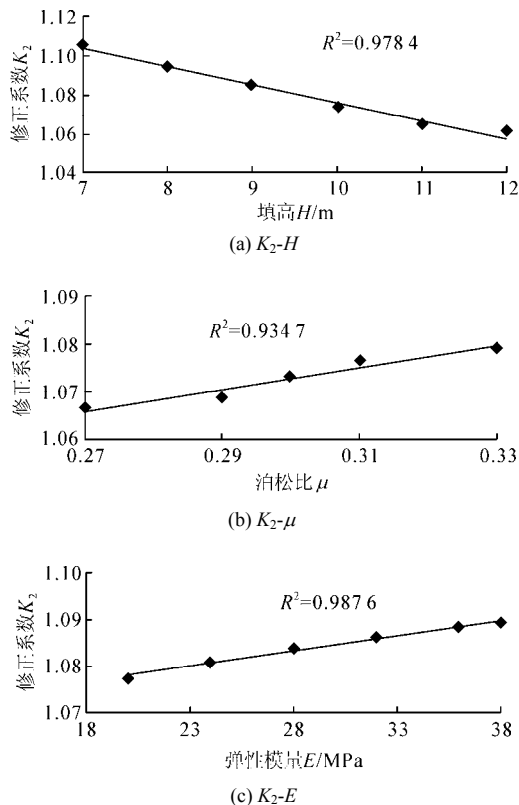


图 3 H, μ, E 与修正系数 K_2 的相关关系

Fig.3 Relationships between H, μ, E and correction factor K_2

由图 3 可知，渠道填高 H 与沉降修正系数 K_2 呈良好的线性负相关， H 越高， K_2 越小，当 $H = 7 \sim$

12 m 时， $K_2 = 1.1053 \sim 1.0616$ ；泊松比 μ 与 K_2 呈良好的线性正相关， μ 越大， K_2 越大，当 $\mu = 0.27 \sim 0.33$ 时， $K_2 = 1.0666 \sim 1.0792$ ；弹性模量 E 与 K_2 呈良好的线性正相关， E 越大， K_2 越大，当 $E = 20 \sim 38 \text{ MPa}$ 时，修正系数 $K_2 = 1.0733 \sim 1.0892$ 。

因此，利用多元函数线性回归分析方法，可得到 K_2 与 H, E, μ 的相关关系：

$$K_2 = 1.0904 - 0.0103H + 0.2295\mu + 0.0005E \quad (4)$$

3.3 压缩模量对渠道沉降计算的影响

一般的分层总和法假定地基土是均匀的，同一土层的压缩模量不随深度的变化发生变化，这容易使沉降计算产生较大的误差。因为高填方渠道填筑体在填土过程中，渠道填方的压缩模量并不是常量，越靠近底部，所受应力较大，压缩模量较大；越靠近顶部，所受应力较小，相应的模量也较小。根据邓文龙和周正茂^[7]的研究，可知压缩模量随应力的变化规律：

$$E_{si} = \left[\frac{E_{1-2}}{144.3} - \ln\left(\frac{\sigma_{zi}}{144.3}\right) \right] \sigma_{zi} \quad (5)$$

$$\sigma_{zi} = \gamma_{\text{平均}} \frac{H_i}{2} + \sum_{j=i+1}^n \gamma_{\text{平均}} H_j \quad (6)$$

式中： E_{si} 为渠道填筑体第 i 层的压缩模量； E_{1-2} 为填筑体在 $100 \sim 200 \text{ kPa}$ 压力时的压缩模量； σ_{zi} 为填筑体第 i 层的平均自重应力与平均附加应力之和^[8]； $\gamma_{\text{平均}}$ 为填筑体的平均容重； n 为计算层至顶层临空面的总层数； H_i, H_j 分别为填筑体第 i, j 层的厚度。

因此，通过室内试验获得填筑体土层的 E_{1-2} 后，便可按相应的应力水平对第 i 层的压缩模量 E_{si} 进行修正。

4 高填方渠道沉降过程计算方法

高填方渠道的沉降是由 2 种因素造成的：(1) 土层在填筑过程中产生固结沉降 S_j ；(2) 土层自重作用下产生的蠕变变形 S_s ，如图 4 所示。

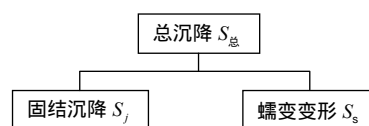


图 4 总沉降组成示意图

Fig.4 Schematic diagram of settlement composition

4.1 固结沉降计算方法

借鉴传统分层总和法的分层计算思想，将高填方渠道填筑体与地基层各自分成 n 层进行计算。每层渠道填方或地基层看作 1 个计算层，并将其上覆土体视为荷载。那么第 i 层的变形值为

$$\Delta S_i = \varepsilon_i H_i = \frac{\Delta \sigma_i}{E_{si}} H_i \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_i = \sigma_{zi} - \sigma_{ci} = \sum_{j=i+1}^n \gamma_{\text{平均}} H_j \quad (8)$$

式中： $\Delta \sigma_i$ 为上覆荷载在第 i 层产生的附加应力， σ_{ci} 为第 i 层的平均自重应力。

高填方渠道填筑体的填方荷载是逐级施加的，施工到某一层时所引起的填筑体自身和地基层的压缩变形是由每层填土荷载作用于其下各填筑土层和地基层土层所产生的变形总和，这属于分级沉降量叠加问题，做如下假定：

- (1) 每级填方荷载引起的固结沉降过程是单独进行的。
- (2) 每级荷载是瞬时施加的。
- (3) 采用填筑体和地基层中心线上的附加应力分别计算二者的固结沉降。

根据式(1)，(5)~(7)及以上假定，便可建立起关于渠道填筑体在任意一级填土荷载作用下，考虑侧向变形、蓄水与面板荷载、土体模量变化的固结沉降计算方法，计算原理如图 5 所示。

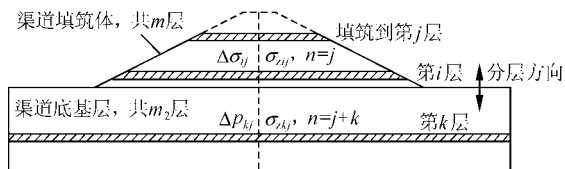


图 5 高填方渠道固结沉降计算原理示意图

Fig.5 Layout of consolidation settlement calculation principle of high filling channels

固结沉降计算方法为

$$\left. \begin{aligned} S_{j-1} &= \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\Delta \sigma_{ij}}{\left[\frac{E_{i-2}}{144.3} - \ln \left(\frac{\sigma_{zij}}{144.3} \right) \right]} H_i \sigma_{zij} \\ S_{j-2} &= \sum_{j=2}^m \sum_{k=1}^{m_2} \frac{\Delta p_{kj}}{\left[\frac{E_{k-2}}{144.3} - \ln \left(\frac{\sigma_{zjk}}{144.3} \right) \right]} H_k \sigma_{zjk} \\ S_j &= K_1 K_2 (S_{j-1} + S_{j-2}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： S_j 为填筑到第 j 层时的总固结沉降量； S_{j-1} 为填筑到第 j 层时填筑体的固结沉降量； S_{j-2} 为填筑到第 j 层时地基层的固结沉降量； $\Delta \sigma_{ij}$ 为填筑到第 j 层时，引起填筑体中第 i 层填土的附加应力； Δp_{kj} 为填筑到第 j 层时，引起地基层中第 k 层土体的附加应力； σ_{zij} 为填筑到第 j 层时，第 i 层填土体所受竖向应力，此时式(2)的计算总层数 $n=j$ ； σ_{zjk} 为填筑到第 j 层时，地基层中第 k 层土体所受竖向应力，此时式(2)的计算总层数 $n=j+k$ ； m 为渠道填方的总层数； m_2 为地基层的总层数。

4.2 蠕变变形计算方法

对于高填方渠道而言，蠕变变形是工后变形的主要组成部分。关于蠕变变形的一般计算方法有 C. B. Crawford^[9]的压缩试验图，L. Bjerrum^[10]的等时 e - $\lg t$ 曲线，J. H. Yin 和 J. Graham^[11]的流变模型等。本文将借鉴应用较广的 Bjerrum 公式，并结合以上结果，建立可考虑侧向变形、蓄水与面板荷载等影响的蠕变变形计算公式，用于高填方渠道的蠕变变形计算：

$$\left. \begin{aligned} S_{s-1} &= \sum_{i=1}^m \frac{H_i}{1+e_i} C_{ai} \lg \frac{t_2}{t_1} \\ S_{s-2} &= \sum_{k=1}^{m_2} \frac{H_k}{1+e_k} C_{ak} \lg \frac{t_2}{t_1} \\ S_s &= K_1 K_2 (S_{s-1} + S_{s-2}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： S_s 为蠕变变形总量； S_{s-1} 为填筑体的蠕变变形； S_{s-2} 为地基层的蠕变变形； C_{ai} 为填筑体第 i 层填土的次固结系数； C_{ak} 为地基层第 k 层的次固结系数； e_i, e_k 分别为填筑体第 i, k 层填土的孔隙比； t_1 为填土次固结(蠕变变形)的起始时刻； t_2 为填土蠕变变形计算时刻。

由于次固结系数 C_{ai} 较难准确地测得，而压缩指数 C_c 较易获得，且二者存在良好的线性关系^[12]，即 $C_{ai}/C_c = 0.022 \pm 0.001$ ，因此可利用 C_c 取代 C_{ai} 进行蠕变变形计算。

4.3 分级加载过程计算方法的实现

填筑体一般是分级填筑的，且每增加一层填土荷载后，需达到规定的压实度后才能继续填筑下一层，因此每级填土荷载施工完成后都存在一段施工间歇期。由于蠕变变形是一直存在的，只是在渠道填筑期间，在某一分级荷载 P_i 的施加过程中，主要以固结沉降 S_j 为主，当分级荷载 P_i 保持不变时，渠

道主要产生蠕变变形 S_s 。分级荷载下的时间-荷载-沉降量示意图如图 6 所示, 分级荷载下渠道沉降计算流程图如图 7 所示。

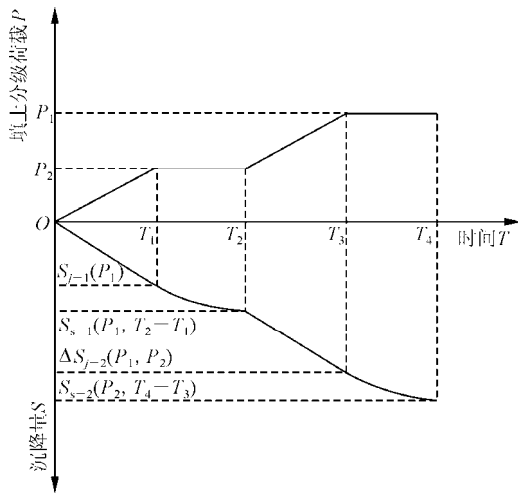


图 6 分级荷载下的时间-荷载-沉降量示意图

Fig.6 Schematic diagram of time-load-settlement under grading loads

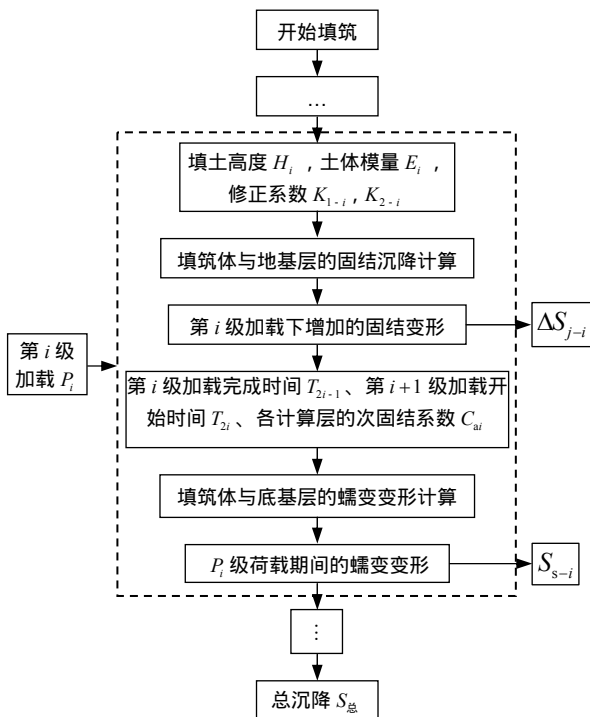


图 7 分级荷载下渠道沉降计算流程图

Fig.7 Calculation flowchart of channel sedimentation under grading loads

从图 6, 7 中可看出, 高填方渠道沉降过程计算方法的计算思路: 在某一分级荷载 P_i 下发生的沉降量分为荷载 P_i 填筑期间增加的固结变形 ΔS_{j-i} 与荷载 P_i 稳定时间下 ($T_{2i} - T_{2i-1}$) 产生的蠕变变形 S_{s-i} , 最后依次叠加所有分级荷载下的沉降量即可得到总沉

降量为

$$S_{\text{总}} = S_{j-1} + S_{s-1} + \dots + K_{1-i} K_{2-i} \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{j-1} \frac{\Delta p_{ij}}{E_{sij}} H_i + \sum_{i=1}^m \frac{H_i}{1+e_i} C_{ai} \lg \frac{t_{i+1}}{t_i} \right) + \dots + S_{j-n} + S_{s-n} \quad (11)$$

5 工程实例

在南水北调中线工程中, 取 TS93+890-94+000 右岸渠段的 TS93+960 断面为例, 填筑体高度 $H = 15 \text{ m}$, 顶宽 $a = 5 \text{ m}$, 坡比为 1:3, 地基层计算深度为 40 m, 填筑体的施工进度为 8 d/m, 施工间歇期为 8 d。分别通过 ANSYS 有限元与本文提出沉降过程计算方法, 计算出高填方渠道填筑体在 1000 d 内发生的整个沉降变化过程, 并对该渠道从开始填筑直至工后沉降稳定期间的沉降变化情况进行具体分析。

基于以上关于沉降过程的计算思路与流程, 在 Matlab7.0 工作平台上, 进行可视化编程^[13]。设置了一系列参数列表, 可供设计和施工人员快捷、方便地输入相关计算参数。运行开始后, 便可得到高填方渠道在分级填筑下的沉降变化过程曲线。

为了在 ANSYS 有限元中模拟出高填方渠道在填筑过程中产生的固结沉降与工后随时间产生的蠕变变形, 继续采用节 2 中介绍的 ANSYS 有限元计算模型, 但这里的本构模型采用广义开尔文流变模型(K-H 模型):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_1} t\right) \right] \quad (12)$$

式中: ε 为应变, η_1 为黏滞系数, t 为时间。K-H 模型示意图如图 8 所示。该模型可反映初始的瞬时弹性变形阶段, 且随后的蠕变变形也会随时间逐渐趋于稳定。

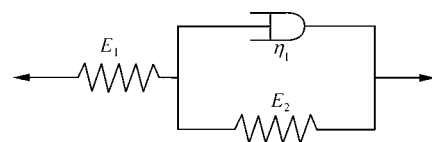


图 8 K-H 模型示意图

Fig.8 Sketch of K-H model

ANSYS 有限元流变模型与本文提出的沉降过

程计算方法，所使用的相关材料的计算参数均通过室内基本物理力学试验获得，如表 3 所示，2 种方法的计算结果对比图如图 9 所示。

表 3 材料参数
Table 3 Material parameters

材料	容重 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	E_s / MPa	E_1 / MPa	E_2 / MPa	η_1 / ($10^9 \text{ Pa} \cdot \text{d}$)	孔隙 比 e	C_c	μ
填筑体	19.72	20	62.5	7.0	1.2	0.665	0.15	0.28
地基层	19.82	23	87.5	8.4	1.6	0.633	0.10	0.26

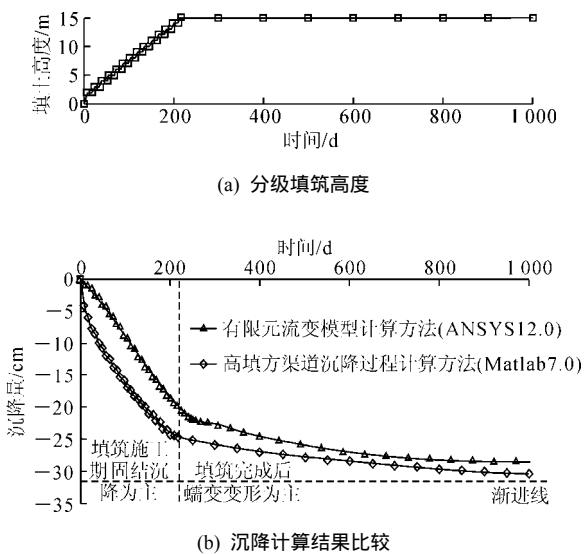


图 9 2 种方法的计算结果对比图

Fig.9 Comparison of calculated results by two kind of methods

由图 9 可知，在该高填方渠道填筑体的施工期间，分别采用 ANSYS 有限元与本文提出的沉降过程计算方法，二者计算结果相近，沉降变化规律相似，均能反映渠道在填筑过程中沉降量逐渐增大、沉降速率逐渐减小的特征，且主要以固结沉降为主，施工间歇期间产生的蠕变变形较小；当填筑体施工完成后，渠道主要以蠕变变形为主，且 2 种方法均能反映后期蠕变变形逐渐收敛的特征；相对于 ANSYS 有限元流变模型计算出的沉降，本文方法计算出的沉降稍大些，这主要是由于 2 种计算方法选取的材料参数不同，而室内试验结果的误差会对相关参数产生一定的影响，因此存在一定的差异性，但从设计角度上来看，本文方法较有限元方法偏于安全。

ANSYS 有限元软件在公路路堤、土石坝中应用得较为成熟，且可揭示其沉降变形的一般规律，但

对于南水北调工程中的设计和施工人员，数值模拟软件应用起来往往不是很方便，而通过自编的可视化程序，能简便、合理地预测高填方渠道的沉降变形规律。

6 结 论

本文以南水北调中线工程的高填方渠段为依托，借助 ANSYS 有限元，建立了截面形式可变的高填方渠道计算模型，通过大量的数值计算，讨论了填高 H 、弹性模量 E 、泊松比 μ 等因素对渠道沉降的影响规律，据此建立了一种适用于高填方渠道沉降变化过程的计算方法，得出的主要结论如下：

(1) 本文提出的侧向变形修正系数 K_1 分别与填高 H 、弹性模量 E 均呈线性负相关，与泊松比 μ 呈线性正相关；附加沉降修正系数 K_2 ，分别与弹性模量 E 、泊松比 μ 均呈线性正相关，与填高 H 呈线性负相关；填筑体在填土过程中，越靠近底部，压缩模量 E_s 较大，越靠近顶部，压缩模量 E_s 较小，而本文则合理地将前人的方法应用到了高填方渠道中，在获得填土的 E_{1-2} 后，便可在填土的加载过程中，按相应的应力水平对压缩模量 E_s 进行修正。

(2) 渠道填筑施工期间，在分级荷载 P_i 的施加过程中，主要以固结沉降 S_j 为主，当分级荷载 P_i 保持不变时，渠道主要产生蠕变变形 S_s ；本文借鉴传统的分层总和法，建立的可模拟和预测高填方渠道在分级加载下沉降过程的实用计算方法，仅需通过室内试验获得土层的泊松比 μ 、压缩指数 C_c 、初始孔隙比 e 、100 ~ 200 kPa 压力范围内的压缩模量值 E_{1-2} 、平均容重 $\gamma_{平均}$ 这 5 个参数，便可合理地计算出高填方渠道从开始填筑直至工后沉降稳定期间的沉降变化过程与沉降总量。

(3) 基于高填方渠道沉降过程计算方法，在 Matlab7.0 中编制可视化应用程序，可合理地模拟和预测高填方渠道在分级加载下沉降变化过程，为南水北调中高填方渠道的设计和施工人员提供了一种快捷实用的指导工具。

参考文献(References)：

[1] 刘奉银, 赵 然, 谢定义, 等. 黄土高填方路堤沉降分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2003, 23(6): 23-28. (LIU Fengyin, ZHAO

- Ran ,XIE Dingyi ,et al. Settlement of loess-filled highway embankment[J]. Journal of Chang'an University : Natural Science , 2003 , 23(6) : 23 – 28.(in Chinese)
- [2] 顾淦臣. 土坝设计[M]. 北京: 中国工业出版社, 1963 : 273 – 279. (GU Gancheng. Dam design[M]. Beijing :China Industry Press ,1963 : 273 – 279.(in Chinese))
- [3] 殷宗泽, 朱 泓, 吴 钰. 沪宁高速公路地基沉降有限元计算分析[J]. 水利水电科技进展, 1998 , 18(2) : 22 – 26.(YIN Zongze , ZHU Hong , WU Yu. Finite element analysis of foundation settlement of Shanghai——Nanjing expressway embankment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources , 1998 , 18(2) : 22 – 26.(in Chinese))
- [4] 何兆益, 周虎鑫. 高填方路堤填筑体沉降的三维有限元分析[J]. 重庆交通学院学报, 2000 , 19(3) : 58 – 62.(HE Zhaoyi , ZHOU Huxin. 3D finite element analysis of subsidence on high embankment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute , 2000 , 19(3) : 58 – 62.(in Chinese))
- [5] 周汉荣. 土力学与地基基础[M]. 武汉 :武汉工业大学出版社, 1996 : 45 – 48.(ZHOU Hanrong. Soil mechanics and foundation[M]. Wuhan : Wuhan University of Technology Press , 1996 : 45 – 48.(in Chinese))
- [6] 王铁行, 赵树德. 计算地基沉降分层总和法缺陷分析及其改进[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996 , 28(2) : 179 – 182.(WANG Tiehang , ZHAO Shude. Analysis and amendment of layer-wise summation method for calculation setting of ground[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology , 1996 , 28(2) : 179 – 182. (in Chinese))
- [7] 邓文龙, 周正茂. 土的压缩模量 E_s 的一种取值方法[J]. 工业建筑, 1996 , 26(10) : 34 – 36.(DENG Wenlong , ZHOU Zhengmao. A calculation method for soil modulus of compressibility(E_s)[J]. Industrial Construction , 1996 , 26(10) : 34 – 36.(in Chinese))
- [8] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996 : 169 – 177.(QIAN Jiahuan , YIN Zongze. Geotextile principle in the calculation[M]. 2nd ed. Beijing : China Water Power Press , 1996 : 169 – 177.(in Chinese))
- [9] CRAWFORD C B. Interpretation of the consolidation tests[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div , 1964 , 90(5) : 87 – 102.
- [10] BJERRUM L. Embankments on soft ground[C]// Proceedings of Spresial Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structure. [S. l.] : ASCE , 1972 : 1 – 54.
- [11] YIN J H , GRAHAM J. Elastic visco-plastic modeling of one-dimensional consolidation[J]. Geotechnique , 1996 , 46(3) : 515 – 527.
- [12] MESRI G , GODLEWSKI P M. Time and stress compressibility interrelationship[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division , 1977 , 103(5) : 417 – 430.
- [13] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008 : 24 – 41.(XUE Dingyu , CHEN Yangquan. Advanced applied mathematical problem solution with MATLAB[M]. Beijing : Tsinghua University Press , 2008 : 24 – 41.(in Chinese))