

# 南水北调高填方渠道附加应力计算方法研究

张 宇, 余 飞, 陈善雄, 戴张俊, 熊署丹

(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:** 由于高填方渠道的截面形式(填高  $H$ 、坡比  $i$ )对填筑体与地基层的附加应力具有较大影响;借助 ANSYS 有限元,建立截面形式可变的计算模型,发现高填方渠道填筑体中心线上各土层真实的附加应力  $P$  低于理论值  $\gamma H$ ,提出高填方渠道填筑体附加应力修正系数  $K$  与地基层附加应力比  $K_p$ ,并明确填筑体的坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 对其附加应力修正系数  $K$  的影响规律,以及坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 、相对深度  $N_Z$ 对地基层附加应力比  $K_p$ 的影响规律,据此,建立适用于高填方渠道填筑体与地基层附加应力的计算方法;研究结果表明,通过本文建立的附加应力计算方法,仅需知道渠道填筑体的坡比  $i$ 、顶宽  $a$ 、填高  $H$ 、重度  $\gamma$  等关键参数,便可准确合理地计算出高填方渠道中心线上,各填土层的附加应力  $P$  与地基层中不同深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$ ,这对高填方渠道沉降过程的计算具有一定的实际意义。

**关键词:** 土力学;南水北调工程;高填方渠道;填筑体;地基层;附加应力;有限元

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)增 1-3169-07

## CALCULATION METHOD STUDY OF ADDITIONAL STRESS OF HIGH FILLING CHANNELS OF THE NORTH WATER TRANSFER PROJECT

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

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

**Abstract:** Due to the section form of the high filling channels has a great influence on the additional stress of filling body and foundation. A mechanism that the real additional stress below the theoretical value of each soil layer at the center line of high filling channel's filling body was uncovered through the ANSYS FEM, after a calculation model with a variable section form was established. The additional stress correction coefficient of the filling body and additional stress ratio of the foundation in the high filling channels were proposed. The effects of the filling body's slope ratio and high aspect ratio to its additional stress correction coefficient and the slope ratio, high aspect ratio and relative depth to the foundation's additional stress ratio were both clarified. And a calculation method for the additional stress of the filling body and the foundation of the high filling channels was established accordingly. The study result shows that, it could easily and accurately calculated out the additional stress of each filled soil and the additional stress of different depths in the foundation at the center line of the channels by the calculation method, which only needed to know the slope ratio, top width, filling height, and specific weight of the filling body. And it has an important guiding significance to calculate the settlement process for the high filling

**收稿日期:** 2014-03-04; **修回日期:** 2014-08-05

**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,博士,现任研究员、博士生导师。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0199

channels in the North Water Transfer Project.

**Key words :** soil mechanics ; the North Water Transfer project ; high filling channels ; filling body ; foundation layers ; additional stress ; finite element

### 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。当前高填方渠道设计中关于沉降的计算方法,仍多采用分层总和法,而附加应力的计算是首要条件。

由于高填方渠道填筑体是分层填筑的,每一层既是压缩体,也是荷载,从而在已筑筑体中将产生附加应力。建筑地基设计中计算附加应力,一般是采用 Boussinesq 和应力扩散等传统的计算方法<sup>[1-2]</sup>,对于高填方渠道填筑体而言,2 种方法均可将渠道填筑体沿高度方向均分为若  $N$  层(第  $i$  层的层高为  $H_i$ ),计算每一层填土对填筑体底面产生的附加应力,然后再逐层叠加,见图 1,2 所示。其中, Boussinesq 法是基于半无限空间的,而填筑体并不是半无限体,填筑体两侧的边坡存在边界效应,若按 Boussinesq 法计算边坡处分层土体对填筑体底面产生的附加应力,势必导致结果大于实际情况,分层叠加后将加剧计算偏差。应力扩散法是以一定的应力扩散角,将每层土体的荷载均匀地扩散到填筑体底面,而填筑体底面的附加应力通常是呈盆状分布的,这必然导致计算结果小于实际情况,分层叠加后亦将加剧计算偏差。

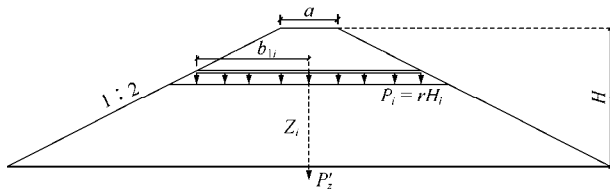


图 1 Boussinesq 计算理论示意图

Fig.1 Sketch of Boussinesq calculation theory

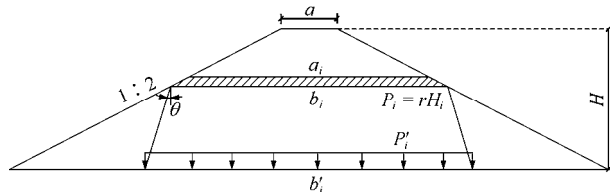


图 2 应力扩散计算理论示意图

Fig.2 Sketch of stress-diffusion calculation theory

以往研究对公路路堤<sup>[3-7]</sup>和土石坝<sup>[8-10]</sup>的应力变形规律探讨得较多。陈义军等<sup>[3]</sup>利用非线性有限元

研究了山区公路斜坡填筑路堤的应力形变特征;陈仁朋等<sup>[5]</sup>采用弹塑性有限元分析了加筋路堤的受力机制;景宏君等<sup>[6]</sup>采用室内试验与数值模拟相结合的方法,研究了高路堤的应力分区;R. W. Clough 和 R. J. Woodward<sup>[8]</sup>首次将有限元法用于分析土石坝的应力变形;F. H. Kulhawy 和 J. M. Duncan<sup>[9]</sup>对 Oroville 大坝做了大量的非线性有限元计算分析;殷宗泽<sup>[10]</sup>通过非线性有限元方法研究了高土石坝的应力与变形;杨锡武和张永兴<sup>[11]</sup>通过模型试验对公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法开展了一定的研究;蒋关鲁等<sup>[12]</sup>采用弹性理论和数值模拟相结合的手段,对路桥交界处地基附加应力计算方法进行了探讨。

以上研究成果对高填方渠道附加应力的计算具有一定的参考意义,但并不完全适用于高填方渠道,且基本没有过细地考虑过填筑体的截面形式(坡高  $H$ 、坡比  $i$ ),对填筑体与地基层中附加应力的影响。因此,本文以实际工程为依托,开展了大量的 ANSYS 有限元计算,理清了高填方填筑体中心线上各填土层的附加应力在不同的截面形式(坡高  $H$ 、坡比  $i$ )影响下的变化规律,以及地基层中心线上的附加应力在不同截面形式影响下随深度的衰减规律。且提出了填筑体附加应力修正系数  $K$  与地基层附加应力比  $K_p$ 。据此,建立了适用于填筑体与地基层附加应力的简便计算方法。并基于该方法,准确且合理地计算出了 TS93+890 ~ TS94+000 右岸渠段的高填方渠道断面中心线上的附加应力,这对南水北调工程中高填方渠道的沉降计算具有一定的实际意义。

### 2 填筑体附加应力分布特征及其影响因素

#### 2.1 填筑体附加应力产生机制

高填方渠道中填方既是承重体,同时又是荷载。就简单的上、下两层填方来讲,上层填方是荷载,而下层填方是承重体,从而导致上层填方必然在已填筑好的土层中产生一定的附加应力。

渠道填筑体在填筑过程中,是一个逐级加载的过程,随着填土逐渐增加,填筑体中心沉降量较大,

两侧逐渐减小，从而导致填筑体两侧的斜坡体对其中心主体，在接触面处产生一定的向上剪切阻力，如图 3 所示。从而可知，渠道填筑体对底面产生的附加应力  $P$  小于自重应力理论值  $\gamma H$ 。

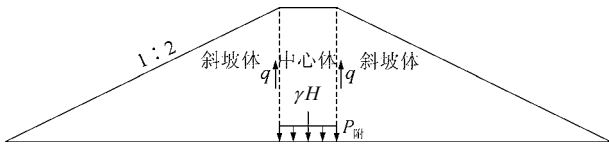


图 3 填筑体内附加应力示意图

Fig.3 Sketch of additional stress in filling body

### 2.2 填筑体附加应力分布特征

取坡高  $H = 12\text{ m}$ 、坡比  $i = 1/2$ ，地基层深度  $Z = 50\text{ m}$  的渠道断面，利用 ANSYS 有限元可得填筑体竖直方向附加应力分布，如图 4 所示；填筑体底面附加应力分布形式，以及填筑体中心线上各填土层的附加应力  $P$  与自重应力理论值  $\gamma H$  差别见图 5 所示。

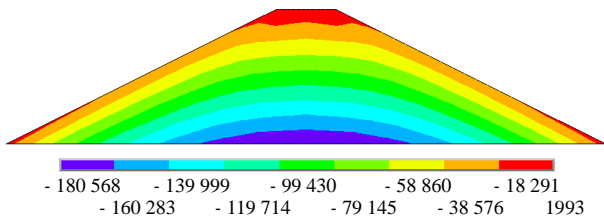


图 4 填筑体附加应力分布图(单位：kPa)

Fig.4 Distribution of additional stress in filling body(unit：kPa)

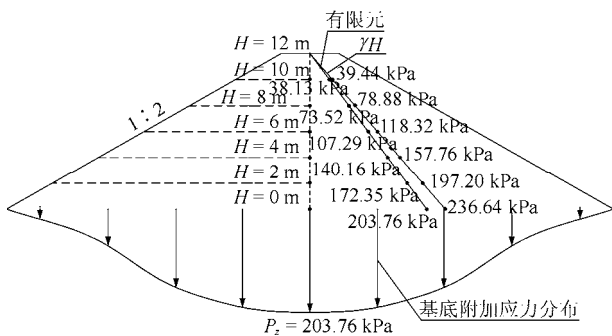


图 5 填筑体底面附加应力分布与中心线上附加应力的对比图

Fig.5 Distributions of additional stress at the bottom and comparison of additional stresses at the centerline of filling body

据图 4 可知：填筑体顶部的应力较小，随着填土层深度的增加，应力逐渐增大；对于同一填土层，中部的应力较大，两侧离中部越远，应力越小。

据图 5 可知：沿着渠道填筑体的中心线，有限元计算出的附加应力小于相同高度下的理论值

$\gamma H$ ，进而验证了节 2.1 中附加应力产生的机制；且填筑体底面附加应力呈某种盆状分布形式。

### 2.3 附加应力影响因素

通过上文分析可知，高填方渠道的附加应力主要是受填筑体截面形式(坡高  $H$ 、坡比  $i$ )以及深度  $Z$  的影响和控制；由于高速公路、铁路等一般梯形填筑体的顶面宽度  $a$  是固定的，因此为了统一量纲，定义高宽比  $N_H = H/a$ 、相对深度  $N_Z = Z/a$ 。

由于渠道填筑体并不处于半无限空间里，进而可知填筑体的坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$  对其中心线上不同高度处的附加应力  $P$  具有较大影响；特此定义填筑体附加应力修正系数  $K$ ，即填筑体中高度  $H$  处的附加应力  $P$  与理论  $\gamma H$  的比值，见下式：

$$K = P / (\gamma H) = f_0(N_H, i) \tag{1}$$

由于填筑体的截面形式( $i, N_H$ )将影响基底附加应力的分布形式，且地基层中的附加应力将随深度逐步衰减；特此定义附加应力比  $K_p$ ，即在渠道中心线上地基层中某一深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$  与基底处最大附加应力  $P_{z-\max}$  之比，见下式：

$$K_p = P_z / P_{z-\max} = f_1(N_H, i, N_Z) \tag{2}$$

## 3 高填方渠道附加应力数值分析方案

### 3.1 计算模型

以南水北调中线工程中 TS95+670 ~ TS95+770 右岸渠段的实际施工图为基础，为了进一步研究渠道的不同断面形式对渠道填筑体与地基层中心线上的附加应力产生的影响，在 ANSYS 有限元软件中建立了截面形式可变的计算模型，增强了渠道计算的适应性(见图 6)。有限计算分析过程中，在地基层两侧设置水平位移约束( $U_x = 0$ )，底面设置了竖向位移约束后( $U_y = 0$ )，地基层与填筑体临空面为自由边界。根据实际工程情况，讨论不同的坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 、相对深度  $N_Z$  等因素对高填方渠道附加应力带来的影响(见表 1)。

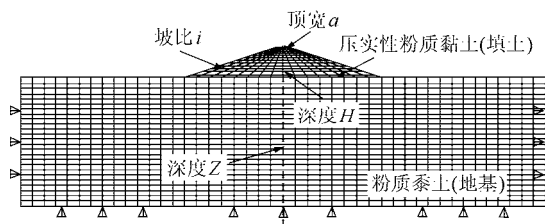


图 6 高填方渠道计算模型网格划分图

Fig.6 Meshing model of high filling channels

表1 相关变量因素的计算范围

Table 1 Calculation ranges of the related variables

| 坡比 $i$  | 高宽比 $N_H$ | 相对深度 $N_Z$ |
|---------|-----------|------------|
| 1 1~1.3 | 0.4~3.4   | 0~10       |

### 3.2 材料模型

为消除计算方法、计算参数选取上带来的误差，采用 Drucker-Prager 材料模型开展数值计算，且选择高精度的八节点平面四边形单元作为模型的材料单元，可反映这个渠道在沉降变形过程中应力与应变关系的非线性。根据土样物理力学特性试验得到的计算参数见表2。

表2 材料模型物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of material model

| 材料类型    | $E_s /$<br>MPa | $E /$<br>MPa | $\rho /$<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $c /$<br>kPa | $\varphi /$<br>( $^\circ$ ) | $\mu$ |
|---------|----------------|--------------|---|--------------|-----------------------------|-------|
| 粉质黏土    | 23             | 87.5         | 1900  | 42.0         | 25.0                        | 0.26  |
| 压实性粉质黏土 | 22             | 62.5         | 1800  | 36.6         | 17.6                        | 0.28  |

## 4 高填方渠道附加应力计算方法研究

### 4.1 填筑体附加应力的计算方法

#### 4.1.1 坡比 $i$ 对附加应力的影响规律

根据 ANSYS 有限元的计算结果，对于高宽比  $N_H = 2.4$  ( $H$  达到 12 m)，不同坡比  $i$  对填筑体附加应力修正系数  $K$  的影响规律，见图7所示。

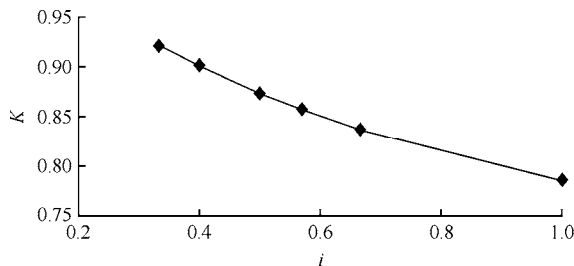


图7 坡比  $i$  与修正系数  $K$  的关系曲线

Fig.7 Relationship curve between slope ratio  $i$  and correction factor  $K$

据图7可知，当高宽比  $N_H$  一定时，坡比  $i$  越小，即斜坡越平缓，附加应力修正系数  $K$  越大，当坡比  $i$  趋于 0 时，则可认为渠道填筑体的中心体处于半无限空间，此时的修正系数  $K$  应当为 1；而当坡比  $i$  越大，即斜坡越陡，两侧的斜坡体对中心体的剪切阻力将逐渐增大，附加应力修正系数  $K$  将逐渐减小，且收敛于定值。

#### 4.1.2 高宽比 $N_H$ 对附加应力的影响规律

根据 ANSYS 有限元的计算结果，对于坡比  $i = 1.2$ ，不同高宽比  $N_H$  对填筑体附加应力修正系数  $K$  的影响规律见图8。

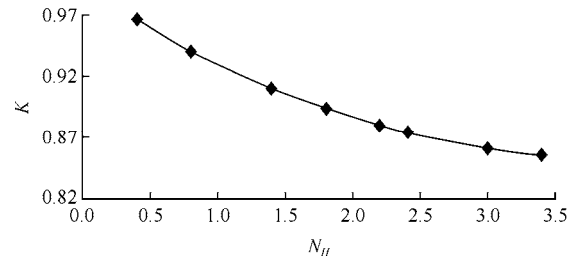


图8 高宽比  $N_H$  与修正系数  $K$  的关系曲线

Fig.8 Relationship curve between aspect ratio  $N_H$  and correction factor  $K$

据图8可知，当填筑体坡比  $i$  一定时，高宽比  $N_H$  越小，附加应力修正系数  $K$  越大，当高宽比  $N_H$  趋于 0 时，可认为渠道填筑体的中心体处于半无限空间，此时的修正系数  $K$  应当为 1；而当高宽比  $N_H$  越大，即填筑体越高，两侧的斜坡体也越大，此时两侧斜坡体对中心体的剪切阻力将逐渐增大，附加应力修正系数  $K$  将逐渐减小，且收敛于定值。

#### 4.1.3 修正计算方法

根据以上分析可知，填筑体附加应力修正系数  $K$  分别与坡比  $i$  和高宽比  $N_H$  均呈一定的双曲线关系。利用 Matlab，经过多元非线性回归分析，得出坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 、修正系数  $K$  在空间中的曲面关系以及回归公式见图9与下式：

$$K = \frac{1 + 0.086 \cdot 2N_H}{1 + 0.117 \cdot 1N_H} \cdot \frac{1 + 0.206 \cdot 5i}{1 + 0.355 \cdot 8i} \quad (3)$$

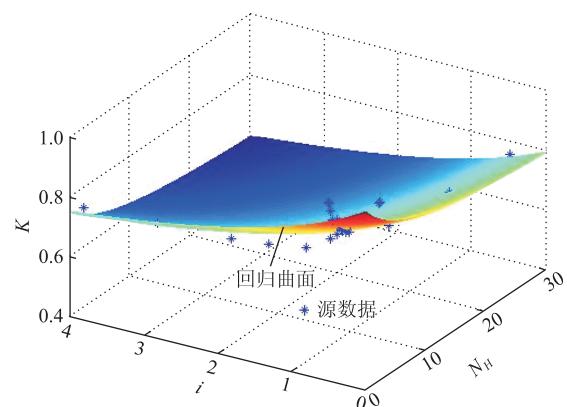


图9 修正系数  $K$  的源数据与回归曲面

Fig.9 Test source data and regression surfaces of correction factor  $K$

据图9可知，空间上的曲面从修正系数  $K = 1$  的点，沿坡比  $i$  与高宽比  $N_H$  的2个方向逐渐下降，最终收敛于一定平面；式(3)的相关系数  $R = 0.97$ ，拟

合残差平方和  $r^2 = 0.015$ ；公式中坡比  $i$  的适用范围为 1.0 ~ 10.0，高宽比  $N_H$  的适用范围为 0.001 ~ 20.0。

据此可得，高填方渠道在任意断面形式下，填筑体中心线上不同高度处的附加应力  $P$  的修正计算公式见下式：

$$P = K\gamma_{\text{平均}}H \tag{4}$$

### 4.2 地基层附加应力的计算方法

#### 4.2.1 坡比 $i$ 对附加应力的影响规律

根据 ANSYS 有限元的计算结果，对于高宽比  $N_H = 2.4$ ，探讨坡比  $i$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律，结果见图 10 所示。

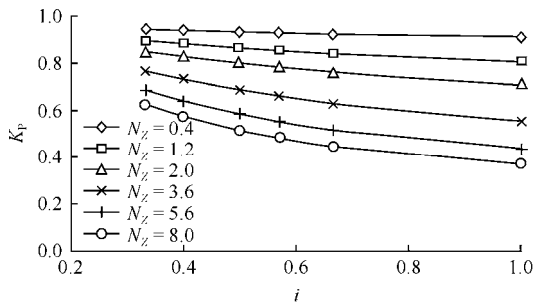


图 10 坡比  $i$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律

Fig.10 Influences of slope ratio  $i$  on additional stress ratio  $K_p$

据图 10 可知，相对深度  $N_z$  一定，附加应力比  $K_p$  随  $i$  的增大而减小，且逐渐收敛于一定值，当相对深度  $N_z$  越大，曲线下落越快；当  $i$  越小，渠道填筑体将趋于一层无限宽填土，属半无限空间，此时地基层中不同深度下的附加应力都应相等，即附加应力比  $K_p$  都趋于 1.0。

#### 4.2.2 高宽比 $N_H$ 对附加应力的影响规律

根据 ANSYS 有限元的计算结果，对于坡比  $i = 1.0$ ，探讨高宽比  $N_H$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律，结果见图 11。

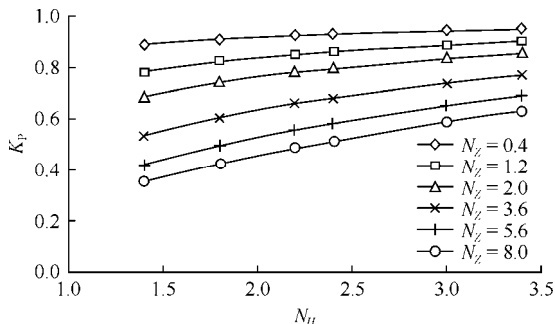


图 11 高宽比  $N_H$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律

Fig.11 Influences of aspect ratio  $N_H$  on additional stress ratio  $K_p$

据图 11 可知，相对深度  $N_z$  一定，附加应力比  $K_p$  随高宽比  $N_H$  的增大而增大，且逐渐收敛于 1.0，

当相对深度  $N_z$  越小，曲线上升得越快；当高宽比  $N_H$  越大，渠道填筑体将趋于一层无限宽填土，属半无限空间，可知此时附加应力比  $K_p$  都趋于 1.0。

#### 4.2.3 附加应力随相对深度 $N_z$ 的衰减规律

根据 ANSYS 有限元的计算结果，对于高宽比  $N_H = 2.4$ ，在不同坡比  $i$  的影响下，附加应力比  $K_p$  随相对深度  $N_z$  的衰减规律如图 12 所示；对于坡比  $i = 1.0$ ，在高宽比  $N_H$  的影响下，附加应力比  $K_p$  随相对深度  $N_z$  的衰减规律如图 13 所示。

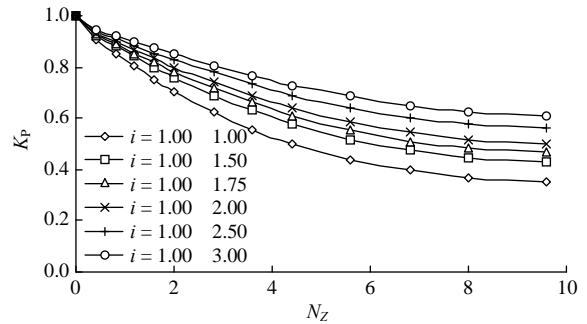


图 12 不同坡比  $i$  下相对深度  $N_z$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律

Fig.12 Influences of relative depth  $N_z$  on additional stress ratio  $K_p$  under different slope ratio  $i$  values

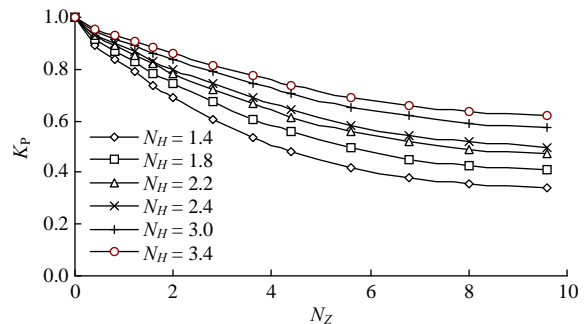


图 13 不同高宽比  $N_H$  下相对深度  $N_z$  对附加应力比  $K_p$  的影响规律

Fig.13 Influences of relative depth  $N_z$  on additional stress ratio  $K_p$  under different aspect ratio  $N_H$  values

据图 12 可知，坡比  $i$  一定，附加应力比  $K_p$  ( $K_{p,max} = 1$ ) 随相对深度  $N_z$  的增大而减小，且逐渐收敛， $i$  越大，即斜坡越陡，曲线下落越快；由于在相同的高宽比  $N_H$  下，当  $i$  越小，即斜坡体越大，作用于基底的附加应力就越大，从而导致相同的相对深度  $N_z$  下的附加应力比  $K_p$  较大。

据图 13 可知，高宽比  $N_H$  一定，附加应力比  $K_p$  ( $K_{p,max} = 1$ ) 随相对深度  $N_z$  的增大而减小，且逐渐收敛，高宽比  $N_H$  越大，即填筑体越高，曲线下落越慢；由于在相同的  $i$  下，当高宽比  $N_H$  越大，即填筑体越高，作用于基底的附加应力就越大，从而导致相同相对深度  $N_z$  下的附加应力  $K_p$  较大。

### 4.2.4 附加应力计算方法

综上所述，附加应力比  $K_p$  与相对深度  $N_z$  呈一定的指数关系，且分别与高宽比  $N_H$ 、坡比  $i$  之间呈一定的双曲线关系。经过多元非线性回归分析，可得出坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 、相对深度  $N_z$ 、附加应力比  $K$  在空间中的曲面关系以及回归公式见图 14 与下式：

$$K_p = \frac{N_H + 1}{N_H + e^{0.1469N_z}} \frac{N_z i + 1}{N_z i e^{0.0456N_z} + 1} \quad (5)$$

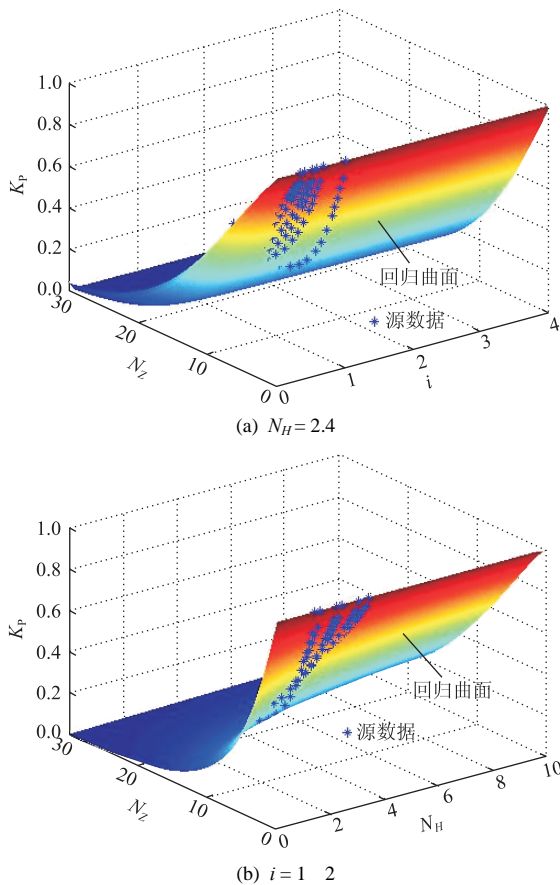


图 14 附加应力比  $K_p$  的源数据与回归曲面

Fig.14 Test source data and regression surfaces of additional stress ratio  $K_p$

据图 14 可知，随着坡比  $i$  的减小或高宽比  $N_H$  的增大，空间曲面均上升且收敛于附加应力比  $K_p = 1$  的平面，随着相对深度  $N_z$  的增大，空间曲面下降收敛于附加应力比  $K_p = 0$  的平面，且 3 种因素中相对深度  $N_z$  对空间曲面的发展影响最大；式(5)的相关系数  $R = 0.95$ ，拟合残差平方和  $r^2 = 0.5$ ； $i$  的适用范围为  $1 \sim 0.5 \sim 1 \sim 10$ ，高宽比  $N_H$  的适用范围为  $0.001 \sim 20$ ，相对深度  $N_z$  的适用范围为  $0 \sim 30$ 。

据此可得，高填方渠道在任意断面形式下，地基中心线上不同深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$  的计算公式为

$$P_z = K_p P = K_p K \gamma_{平均} H \quad (6)$$

## 5 工程实例分析

在南水北调中线工程中，取 TS93+890 ~ TS94+000 右岸渠道的某一高填方渠道断面为例，填筑体高度  $H = 15 \text{ m}$ ，顶宽  $a = 5 \text{ m}$ ，坡比  $i = 1 \sim 3$ ，地基层计算深度  $Z = 100 \text{ m}$ ，分别通过 ANSYS 有限元方法与本文提出的附加应力计算方法，计算填筑体中心线上各填土层的附加应力  $P$  与地基层中心线上不同深度处的附加应力  $P_z$ ，并对该渠道附加应力的变化情况进行具体地分析。

有限元方法仍然采用 D-P 模型，相关计算参数见表 2。2 种方法的计算结果，详见图 15，16。

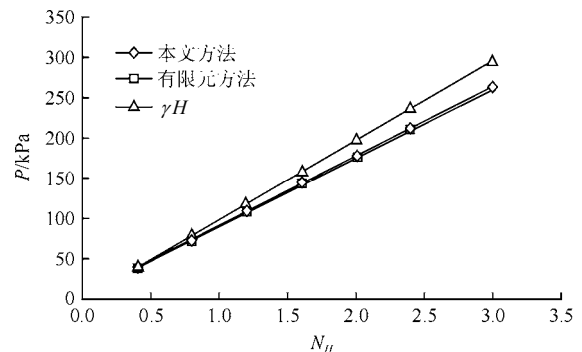


图 15 填筑体中不同填土层的附加应力  $P$

Fig.15 Additional stress  $P$  at different soil layers of the filling body

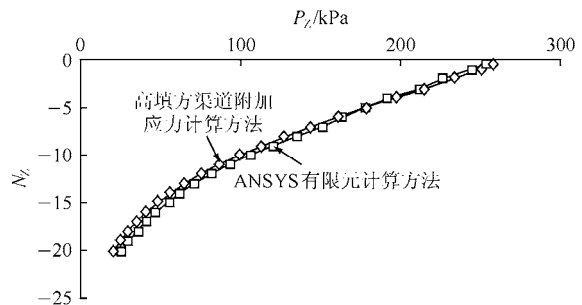


图 16 地基层不同深度处的附加应力  $P_z$

Fig.16 Additional stress  $P_z$  at different depths of the foundation layers

据图 15 可见：高宽比  $N_H$  越大，则计算土层越靠近填筑体底面，附加应力  $P$  越大；对于同一高度的土层，通过 ANSYS 有限元方法与本文方法计算出的附加应力  $P$  相差不大，且均小于理论值  $\gamma H$ ；随着高宽比的增大，即计算土层越靠下，附加应力  $P$  与理论值  $\gamma H$  之间的差值越大，且当高宽比为 3 时，两者相差已达 20%，可见随着填土高度的递增，填筑体中真实的附加应力  $P$  与理论值  $\gamma H$  之间的差距将会更加显著。

据图 16 可见：随着相对深度的增加，地基层中的附加应力  $P_z$  在逐步衰减；在相对深度  $N_z$  为 0~10(即深度  $Z = 0 \sim 50$  m)时，2 种方法计算的结果几乎一致；当相对深度  $N_z$  超过 10(即 50 m 以下)以后，本文方法计算出的附加应力  $P_z$  较 ANSYS 有限元方法衰减地稍快，但两者相差并不大，这主要是因为 ANSYS 有限元中，当计算深度越大，下部单元变形过大，将会产生一定的应力集中现象，从而导致相同深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$  稍偏大。

ANSYS 有限元软件在公路路堤、土石坝中运用得较为成熟，且可揭示其受力变形的一般规律，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，而本文提出的计算方法，可快捷准确地计算出高填方渠道断面中心线上，各填土层的附加应力  $P$  与地基层不同深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$ ，进而可借鉴分层总和法的流程，用于高填方渠道的沉降计算，这对南水北调工程中高填方渠道的沉降计算具有一定的实际意义。

## 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，讨论了不同的坡比  $i$ 、高宽比  $N_H$ 、相对深度  $N_z$  等因素对高填方渠道附加应力带来的影响，建立了一种适用于高填方渠道填筑体与地基层附加应力的计算方法，得出的主要结论如下：

(1) 高填方渠道填筑体在中心线上各土层真实的附加应力  $P$  低于通常所认为的理论值  $\gamma H$ ，且随着填土高度的递增，两者之间的差距将会更加显著；填筑体底面的附加应力呈盆状分布。

(2) 本文提出的填筑体附加应力修正系数  $K$ ，分别与坡比  $i$  和高宽比  $N_H$  均呈一定的双曲线关系；提出的地基层附加应力比  $K_p$ ，与相对深度  $N_z$  呈一定的指数关系，且分别与高宽比  $N_H$ 、坡比  $i$  呈一定的双曲线关系。

(3) 本文建立的高填方渠道附加应力计算方法，仅需知道渠道填筑体的坡比  $i$ 、顶宽  $a$ 、填高  $H$  等关键参数，便可以方便且准确地计算出高填方渠道中心线上，各填土层的附加应力  $P$  与地基层不同深度  $Z$  处的附加应力  $P_z$ ，进而可借鉴分层总和法的流程，用于高填方渠道的沉降计算，这对南水北调工程中高填方渠道的沉降计算具有一定的实际意义。

## 参考文献(References)：

- [1] 周汉荣. 土力学与地基基础[M]. 武汉：武汉工业大学出版社，1996：28-30.(ZHOU Hanrong. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan：Wuhan University of Technology Press，1996：28-30.(in Chinese))
- [2] 刘毓胤，左广洲，陈福全. 加筋垫层应力扩散特性试验研究[J]. 岩土力学，2007，28(5)：903-908.(LIU Yuchuan，ZUO Guangzhou，CHEN Fuquan. Numerical research on stress distribution of geosynthetic reinforcement layer[J]. Rock and Soil Mechanics，2007，28(5)：903-908.(in Chinese))
- [3] 陈义军，刘长武，徐进. 山区公路斜坡填筑路堤应力变形特征及影响因素分析[J]. 岩土力学，2009，30(4)：1051-1056.(CHEN Yijun，LIU Changwu，XU Jin. Analysis of deformation stress feature and influential factors about road-dike on ramp in mountainous region expressway[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(4)：1051-1056.(in Chinese))
- [4] 王志亮，高峰，殷宗泽. 考虑侧向变形的路堤沉降一维法计算修正系数研究[J]. 岩土力学，2005，26(5)：763-768.(WANG Zhiliang，GAO Feng，YIN Zongze. Study on modified factors for 1-D calculation of embankment settlement considering soil lateral deformation[J]. Rock and Soil Mechanics，2005，26(5)：763-768.(in Chinese))
- [5] 陈仁朋，贾宁，陈云敏. 桩承式加筋路堤受力机制及沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(23)：4358-4367.(CHEN Renpeng，JIA Ning，CHEN Yunmin. Mechanism and settlement analysis of pile-supported and geogrid-reinforced embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(23)：4358-4367.(in Chinese))
- [6] 景宏君，苏如荣，丁宁. 坝式高路堤应力分区研究[J]. 公路工程，2008，33(3)：21-24.(JING Hongjun，SU Rurong，DING Ning. Study of compaction degree zoning of earth dam-high fill embankment[J]. Highway Engineering，2008，33(3)：21-24.(in Chinese))
- [7] 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))
- [8] CLOUGH R W，WOODWARD R J. Analysis of embankment stresses and deformation[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division，1967，93(4)：529-549.
- [9] KULHAWY F H，DUNCAN J M. Stresses and movements in Oroville dam[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division，1972，98(7)：653-665.
- [10] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报，2009，31(1)：1-14.(YIN Zongze. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2009，31(1)：1-14.(in Chinese))
- [11] 杨锡武，张永兴. 公路高填方涵洞土压力变化规律及计算方法研究[J]. 土木工程学报，2005，38(9)：119-124.(YANG Xiwu，ZHANG Yongxing. A study on the earth pressure theory for high fill culverts[J]. China Civil Engineering Journal，2005，38(9)：119-124.(in Chinese))
- [12] 蒋关鲁，王力伟，杭红星. 路桥交界处地基附加应力修正计算方法[J]. 岩土工程学报，2013，35(2)：208-218.(JIANG Guanlu，WANG Liwei，HANG Hongxing. The modified additional stress calculation method of bridge approach foundation under the subgrade load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(2)：208-218.(in Chinese))