

# 粗粒料浸水变形分析方法的改进

沈广军, 殷宗泽

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 首先分析单线法、双线法各自的优点和缺点, 提出试验方面用单线法试验结果修正双线法试验结果, 但计算方面仍用双线法计算的思路。其次进行粗粒料大三轴单线法和双线法湿化变形试验, 对浸水变形特性进行研究, 发现单线法和双线法试验结果之间的一些规律, 并引用其他学者的试验结果进行验证, 同样成立; 同时, 对该规律的机制进行探讨; 基于该规律, 提出一个改进的浸水变形分析方法。最后分别用改进方法和双线法对试验结果进行预测, 预测结果表明, 改进方法计算结果和试验结果更加吻合。

**关键词:** 土力学; 粗粒料; 湿化试验; 浸水变形; 土石坝

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)12 - 2437 - 08

## IMPROVEMENT OF WETTING DEFORMATION ANALYSIS METHOD OF COARSE-GRAINED MATERIALS

SHEN Guangjun, YIN Zongze

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** The advantages and disadvantages of single-line method and double-line method for determining wetting deformation of coarse-grained materials are analyzed. The idea of combining single-line method test with double-line method to solve wetting deformation problem is presented. The wetting deformation tests of coarse-grained materials are carried out on the single-line method and double-line method by use of large triaxial test apparatus. Some laws of the test results between the single-line method and the double-line method are found by studying the wetting deformation characteristics. The test results by other scholars also verify these laws. The mechanism of these laws is discussed. Based on these laws, an improvement analysis method for determining wetting deformation is presented. Finally using improvement method and double-line method to predict the result of the experiment; the predicative results show that the improvement method is much better than the double-line method. The calculated results of the improvement method are quite agree with the test results.

**Key words:** soil mechanics; coarse-grained materials; wetting test; wetting deformation; earth-rock dam

## 1 引言

粗粒料浸水变形(也称粗粒料湿化变形)是指粗粒料在一定应力状态下浸水, 由于颗粒之间被水润

滑以及颗粒矿物浸水软化等原因而使颗粒发生相互滑移、破碎和重新排列, 从而产生变形, 并使土体中的应力发生重分布的现象。土石坝的初次蓄水变形问题是土石坝应力变形研究中的一个重要问题, 该问题如果处理不好, 轻则产生裂缝, 重则裂缝扩

**收稿日期:** 2009 - 03 - 19; **修回日期:** 2009 - 05 - 11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50639050)

**作者简介:** 沈广军(1979 - ), 男, 2002年毕业于河海大学水利水电建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土材料特性和数值模拟方面的研究工作。E-mail: shen\_gj@sina.com.cn

展发生溃坝,造成重大经济损失和人员伤亡。对于我国拟建的 300 m 级别的高土石坝初次蓄水变形问题更是突出,规律更加复杂,失事后果也更加严重,所以有必要对粗粒料高压大三轴湿化变形问题以及湿化变形特性和计算方法进行研究,为高土石坝初次蓄水变形计算分析提供可行的方法和可靠的依据。

对粗粒料浸水变形分析主要有单线法和双线法 2 种方法。所谓“双线法”是指分别进行干态和湿态下的试验,得到相应的应力-应变关系,然后用相同应力状态下湿态与干态变形的差值作为该应力状态下发生浸水湿化时的湿化变形量;所谓“单线法”是指在干态下沿某一加载路径达到某一应力状态,然后在保持应力状态不变的条件下进行浸水湿化饱和,此过程中发生的变形即作为该应力状态下的湿化变形量。很多学者对浸水变形进行了试验研究。E. S. Nobari 和 J. M. Duncan<sup>[1, 2]</sup>在三轴仪上用砂进行了以上 2 种试验,发现 2 种方法得到的湿化变形是相近的,因而认为可以用双线法来代替单线法。左元明等<sup>[3, 4]</sup>通过对砂砾料、堆石料的湿化变形试验发现,单线法与双线法相比,双线法的轴向应变偏小,而体变相比之下偏大一些。李广信<sup>[5]</sup>通过试验也发现双线法得到的湿化变形要比单线法小。左元明等<sup>[3~15]</sup>的试验成果表明,这 2 种试验方法的结果有一定的差别。

在试验方面,双线法用同一应力状态的饱和样剪切过程和风干样剪切过程变形之差计算浸水变形,与实际浸水变形过程和加载路径不一致,且与实际浸水变形结果也不一致。而单线法更符合实际浸水过程,所以实际浸水变形要采用单线法试验进行测试。

在计算方面,单线法不能确定浸水过程中的  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 所以无法用增量型的广义虎克定律计算浸水变形,只能用应力状态的全量关系式计算浸水变形。首先,而确定全量关系式的试验通常是轴对称的三轴试验。轴对称的三轴试验受力情况是  $\sigma_2 = \sigma_3$ , 变形情况是  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ , 而实际土石坝浸水变形问题一般是平面应变问题,所以直接将单线法浸水变形结果直接用于实际问题通常是不适合的<sup>[6]</sup>。其次,试验结果没有直接反映中主应力方向应力和应变分量大小的情况。再次,3 个主应力方向的主应力和主变形如何分解为实际的一般应力空间下 6 个应力方向的分量。为此,必然需要引入诸如应变方向角

和应力方向角相同的假定,这必然人为地引入了一些误差。而在这方面双线法利用增量虎克定律,分别确定干样  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 计算浸水前变形,确定饱和样  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 计算浸水后变形,两者之差认为是实际浸水变形,该方法可以计算平面应变问题,可以分析一般应力状态下的受力变形,可以克服单线法的缺陷。

从以上分析可以看出,单线法和双线法都存在问题,都不好直接用来计算浸水变形,必须对它们有所改进才能用来计算浸水变形。本文在试验方面用单线法试验结果修正双线法试验结果,计算方面仍用双线法计算一思路进行研究。双线法计算需要确定浸水前  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 浸水后等效  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。为此,通过干样剪切线定浸水前  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 通过浸水后变形连线定浸水后等效  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。浸水前  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 用已有方法确定。浸水后等效  $E_t$ ,  $\mu_t$  的确定还没有可靠可行的方法,本文将从试验、试验结果的分析等方面进行研究,解决这个问题,提出一个可行可靠的计算方法。

## 2 单双线法浸水变形试验

### 2.1 试验仪器和试验用料

试验仪器为河海大学岩土工程研究所和长春朝阳仪器厂联合研制的 LSW-1000 型大型三轴流变仪。

试验用料为硬质砂岩风干堆石料。试样尺寸为  $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ , 最大允许粒径为 60 mm, 控制干密度为  $2.0 \text{ g/cm}^3$ 。试样级配按照《土工试验规程》(SL237-1999)对原始级配进行缩配,先按几何相似条件等比例地将原样粒径缩小到仪器允许的粒径,大型尺寸试样的粒径缩小倍数取 2,然后再按等量替代,保持小于 5 mm 的细粒含量不变。原型级配与试验级配曲线如图 1 所示。

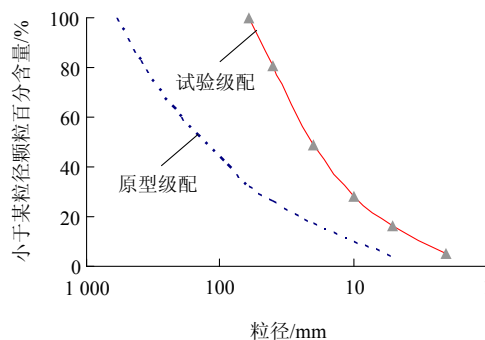


图 1 原型级配与试验级配曲线

Fig.1 Curves of original gradation and test gradation

## 2.2 试样制备

试样按照要求的干密度分5层击实制备而成,由于堆石料颗粒级配十分不均匀,大小颗粒尺寸相差悬殊,为了尽量保证试样的一致性,把堆石料分层击实,每层按各组的比例称取所需料的1/5,拌合后填入制样模内,每层锤击相同的次数,最后一层找平,将所需的料全部击入模内。

## 2.3 试验方法

为研究双线法和单线法浸水变形的关系,本文分别进行了粗粒料大三轴双线法、单线法浸水变形试验。

### 2.3.1 双线法试验方法

(1) 进行围压为400, 800, 1 600 kPa的风干样三轴剪切试验,该试验采用常规三轴排气剪切试验。

(2) 进行围压为400, 800, 1 600 kPa的饱和样三轴剪切试验,该试验采用常规三轴排水剪切试验。

### 2.3.2 单线法试验方法

(1) 进行围压为400, 800, 1 600 kPa的各向等压浸水变形试验。

该试验过程为:对干样施加 $\sigma_3$ 作用下固结稳定1 h,然后从试验底部浸水,湿化水头为1 m,等到试验顶部出水管有连续水流流出,认为试验已经饱和,关闭底部浸水阀。再静置1 h后,试验结束。

(2) 进行围压为400 kPa、偏应力水平 $S = 0.50$ ,围压为800 kPa、偏应力水平 $S = 0.30, 0.50, 0.65, 0.83$ ;围压为1 600 kPa、偏应力水平 $S = 0.30, 0.70$ 的不同围压不同偏应力水平的浸水变形试验。

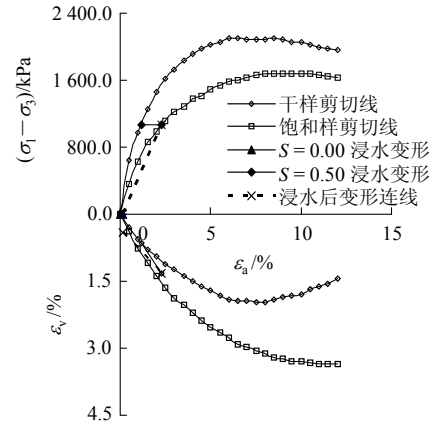
该试验过程为:对干样施加 $\sigma_3$ 作用下固结稳定1 h,然后轴向偏应力按应变控制方式加载到预定的偏应力水平,维持不变,稳定1 h后从试验底部浸水,湿化水头为1 m,等到试验顶部出水管有连续水流流出,认为试验已经饱和,关闭底部浸水阀。再静置1 h后,试验结束。

## 3 浸水变形试验结果及分析

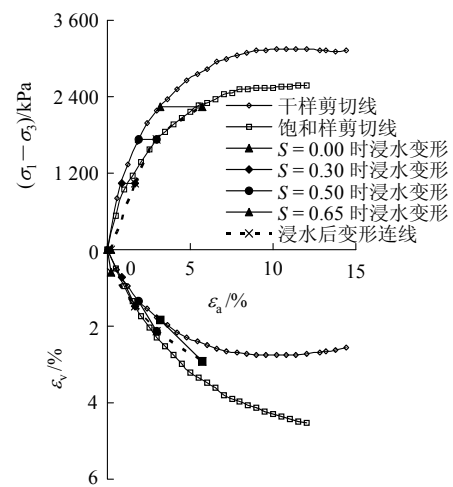
### 3.1 试验结果整理

三轴试验结果,各向等压路径下对应的变形记为 $\{\varepsilon^I\}$ ,等围压(等 $\sigma_3$ )剪切路径下对应的变形记为 $\{\varepsilon^{II}\}$ ,通常利用 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon^{II}\}$ 关系曲线确定 $E_1$ ,  $\mu_1$ 。

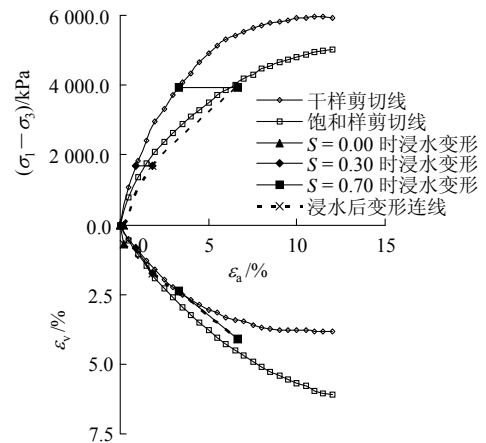
如图2所示,为便于比较将双线法和单线法浸



(a) 围压为400 kPa时浸水变形试验结果



(b) 围压为800 kPa时浸水变形试验结果



(c) 围压为1 600 kPa时浸水变形试验结果

图2 浸水变形试验结果

Fig.2 Test results of the wetting deformation

水变形试验结果整理在同一张图上。由于试样之间的微小差异,单线法浸水前的变形起点通常不在干样剪切线上,为便于单线法和双线法浸水变形结果

的比较, 将单线法浸水前的变形统一为干样剪切线上相同应力状态的变形  $\{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\}$ 。则单线法浸水后的变形为浸水前的变形加上相应浸水变形  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$  后达到的变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$ 。将由此确定的浸水后的变形连线得到“浸水后变形连线”  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$ 。

### 3.2 试验结果分析

通过干样等围压剪切路径下的曲线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\}$  确定浸水前的  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。

通过浸水后变形连线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  确定浸水后的  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。

有了浸水前的  $E_t$ ,  $\mu_t$  和浸水后的  $E_t$ ,  $\mu_t$ , 利用双线法计算浸水过程中发生的变形。

然而浸水后变形连线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  由于起点不过原点, 所以不能直接用来确定  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。为此, 屈智炯和刘昌贵<sup>[7]</sup>对影响起点变形的因素进行了研究, 研究表明, 随着干密度的提高, 起点处的浸水变形  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$  (即各向等压浸水变形) 减小, 当干密度很高时起点各向等压浸水变形可以忽略不计, 将起点移到原点。笔者现在认为他们当时这种将起点移到原点的做法, 引入了一定的误差, 这在理论上造成起点和其他应力水平点的变形修正的不统一, 这种修正在理论上是不对的, 其实也没有必要这样修正。本文提出直接将浸水后变形曲线平移到原点的方法, 得到浸水后等效应力-应变关系曲线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$ 。浸水后等效应力应变关系曲线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  可理解为  $\sigma_3$  为常数  $\sigma_1 - \sigma_3$  从 0 增加到  $\sigma_1 - \sigma_3$  对应的变形增量, 即浸水后等效三轴剪切路径下对应的变形。

### 3.3 浸水后变形连线的特点

(1) 浸水后变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\} = \{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\} + \{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\} = \{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\} + \{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\} + \{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{II}}\}$  (其中  $\{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\}$  为风干样同一应力状态的剪切变形,  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$  为各向等压浸水变形,  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{II}}\}$  为  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$  与  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{II}}\}$  之差)。

对于  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  可以分成 2 个部分: 一部分是各向等压路径对应的部分  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{I}}\}$ , 其大小为  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$ , 另一部分是  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  (即为变形后等效三轴剪切路径下的变形, 简称为等效变形), 其大小为  $\{\varepsilon_{\text{风干}}^{\text{II}}\} + \{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{II}}\}$  之和。

(2) 浸水后变形连线起点(即各向等压浸水变形  $\{\Delta\varepsilon_{\text{浸水变形}}^{\text{I}}\}$ )的特点, 各向等压浸水体积变形大小随着围压的增加而增加, 根据各向同性假定可以认为

各向等压浸水轴向变形为各向等压浸水体积变形的 1/3。

(3) 浸水后变形连线的强度特点, 强度大小具有小于干样强度, 和饱和样强度接近的特点。根据笔者的经验和前人的研究成果, 可以认为强度近似等于饱和样强度。

### 3.4 浸水后等效变形曲线分析

对浸水后等效变形曲线分析的目的是为了确定浸水后  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。

试验结果可知相同应力状态时  $\{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$  并不等于等效变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  (其中  $\{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$  为饱和样剪切变形), 所以需要将  $\{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$  修正为等效变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$ 。

由于通常等效变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  试验点个数较少, 难以直接确定  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。所以可以通过研究等效变形  $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$  与  $\{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$  之间的关系, 利用两者之间的关系和  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$  曲线确定等效饱和状态的  $E_t$ ,  $\mu_t$ 。

### 3.5 $\{\varepsilon_{\text{浸水后}}^{\text{II}}\}$ 与 $\{\varepsilon_{\text{饱和}}^{\text{II}}\}$ 之间的关系

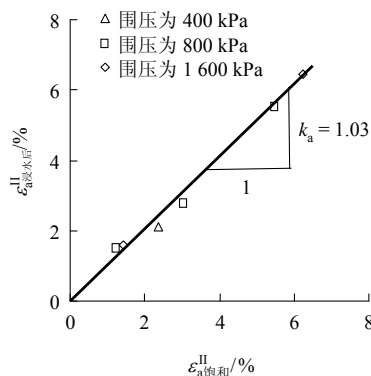
定义:  $\varepsilon_{\text{a浸水后}}^{\text{II}}$  为浸水后等效剪切路径对应的轴向变形,  $\varepsilon_{\text{a饱和}}^{\text{II}}$  为饱和样剪切路径下的轴向变形,  $\varepsilon_{\text{v浸水后}}^{\text{II}}$  为浸水后等效剪切路径对应的体积变形,  $\varepsilon_{\text{v饱和}}^{\text{II}}$  为饱和样剪切路径下的体积变形。

(1) 从图 3(a)可以看出,  $\varepsilon_{\text{a浸水后}}^{\text{II}}$  与  $\varepsilon_{\text{a饱和}}^{\text{II}}$  有较好的线性关系, 可将  $\varepsilon_{\text{a浸水后}}^{\text{II}}$  表示为  $k_a \varepsilon_{\text{a饱和}}^{\text{II}}$ 。

参数  $k_a$  可由单线法和饱和样剪切试验确定。对所试验的粗粒料而言,  $k_a = 1.03$ 。

(2) 从图 3(b)可以看出,  $\varepsilon_{\text{v浸水后}}^{\text{II}}$  与  $\varepsilon_{\text{v饱和}}^{\text{II}}$  有较好的线性关系, 可将  $\varepsilon_{\text{v浸水后}}^{\text{II}}$  表示为  $k_v \varepsilon_{\text{v饱和}}^{\text{II}}$ 。

参数  $k_v$  可由单线法和饱和样剪切试验确定。对所试验的粗粒料而言,  $k_v = 0.73$ 。



(a)  $\varepsilon_{\text{a浸水后}}^{\text{II}}$  -  $\varepsilon_{\text{a饱和}}^{\text{II}}$  关系曲线

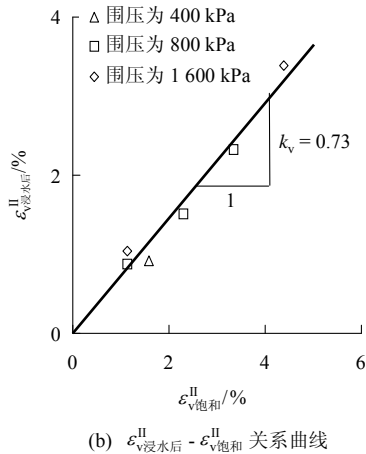
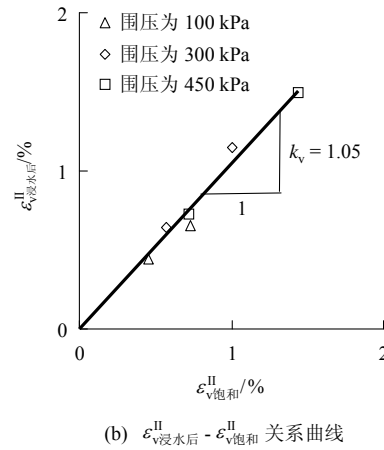


图 3 粗粒料大三轴浸水变形试验结果图

Fig.3 Triaxial test results of wetting deformation of the coarse-grained materials

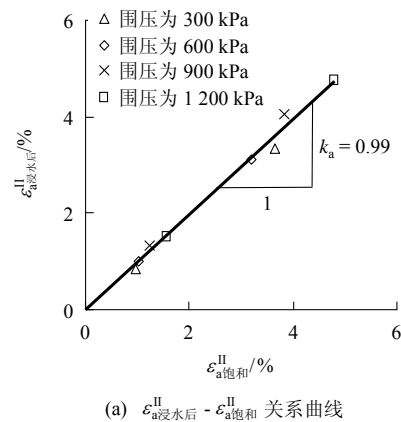
图 4 砂砾料浸水变形试验结果<sup>[8]</sup>Fig.4 Triaxial test results of wetting deformation of the sand-gravel composites<sup>[8]</sup>

### 3.6 规律的进一步验证

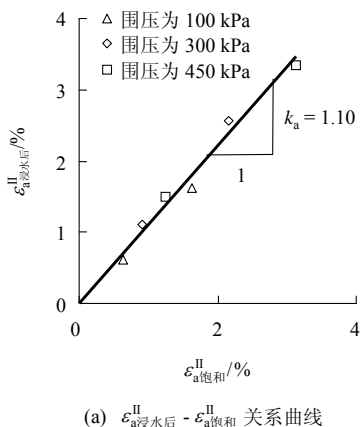
将张金富<sup>[8]</sup>对小浪底砂砾料进行的围压为 150 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、剪切应力为 200, 400 kPa 时的浸水变形, 围压为 300 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、剪切应力为 400, 800 kPa 时的浸水变形湿化变形, 围压为 450 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、剪切应力为 600, 1 200 kPa 时的浸水变形试验结果进行整理分析绘成图 4。

将魏松<sup>[9]</sup>对粗粒料进行的围压为 300 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、应力水平为 0.38, 0.74 时的浸水变形, 围压为 600 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、应力水平为 0.36, 0.70 时的浸水变形, 围压为 900 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、应力水平为 0.37, 0.72 时的浸水变形, 围压为 1 200 kPa 的干样剪切、饱和样剪切、各向等压浸水变形、应

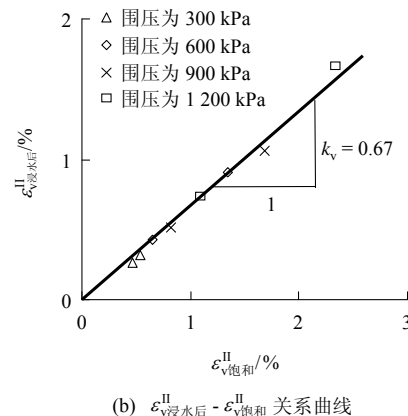
力水平为 0.38, 0.74 时的浸水变形试验结果进行整理分析绘成图 5, 6。其中, 图 5 为完全剪切试验(完全剪切试验是指浸水稳定后继续剪切的试验)的一组浸水变形结果, 图 6 为部分剪切试验(部分剪切试验是指浸水稳定后就结束的试验)的一组浸水变形结果。



(a) \$\epsilon\_{a\text{浸水后}}^{\text{II}} - \epsilon\_{a\text{饱和}}^{\text{II}}\$ 关系曲线



(a) \$\epsilon\_{a\text{浸水后}}^{\text{II}} - \epsilon\_{a\text{饱和}}^{\text{II}}\$ 关系曲线



(b) \$\epsilon\_{v\text{浸水后}}^{\text{II}} - \epsilon\_{v\text{饱和}}^{\text{II}}\$ 关系曲线

图 5 完全剪切情况下浸水变形试验结果<sup>[9]</sup>Fig.5 Triaxial test results of wetting deformation<sup>[9]</sup>

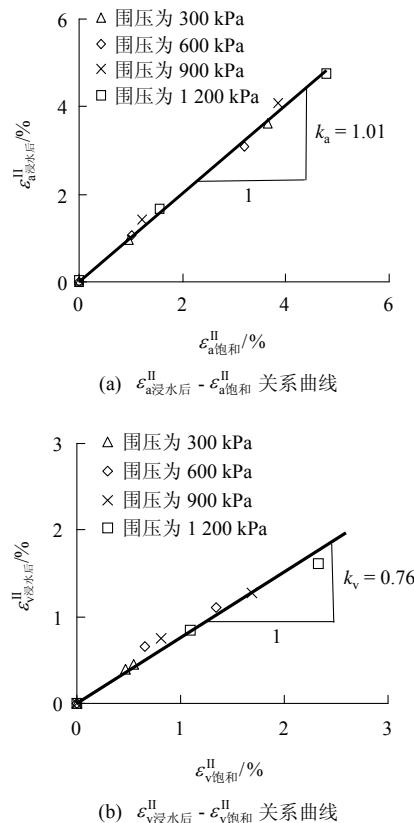


图 6 部分剪切情况下浸水变形试验结果<sup>[9]</sup>  
Fig.6 Triaxial test results of wetting deformation<sup>[9]</sup>

从图 5, 6 可以看出: (1) 浸水后变形与饱和样变形之间基本成线性关系, 且效果较好。(2) 这种成线性关系的规律具有普遍性, 且基本不受材料、干密度和级配的影响。(3) 线性关系的比值由于材料、干密度和级配的不同而各不相同, 说明线性关系的比值受材料、干密度和级配影响。

3.7 机制的探讨

双线法试验是 2 个材料性质几乎保持不变的加载过程。单线法试验与双线法试验相比, 单线法试验是一个内部材料性质发生较大变化分子运动加快的过程, 在这个过程之中材料内部分子运动加速, 碰撞更加激烈, 导致内部斥力增加, 向外膨胀的趋势增强, 宏观表现为膨胀增加, 压缩减小, 所以  $\varepsilon_v^{\text{II}}$  浸水后 小于  $\varepsilon_v^{\text{II}}$  饱和, 这与试验结果一致。由于分子运动加快, 所以分子之间相互滑移的能力增强, 宏观表现为剪切变形增加, 所以  $\varepsilon_s^{\text{II}}$  浸水后 大于  $\varepsilon_s^{\text{II}}$  饱和。由于  $\varepsilon_a^{\text{II}} = \varepsilon_s^{\text{II}} + \frac{1}{3} \varepsilon_v^{\text{II}}$ , 所以  $\varepsilon_a^{\text{II}}$  浸水后 与  $\varepsilon_a^{\text{II}}$  饱和 大小接近也是合理的。

由于  $\{\varepsilon^{\text{II}}$  浸水后  $\}$  与  $\{\varepsilon^{\text{II}}$  饱和  $\}$  均与围压  $\sigma_3$  和剪切应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  有关, 随围压  $\sigma_3$  和剪切应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  的变化而变化, 且两者随围压  $\sigma_3$  和剪切应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  变化的步

调基本一致, 例如在  $\sigma_1 - \sigma_3$  接近饱和样强度时  $\{\varepsilon_a^{\text{II}}$  饱和  $\}$  趋于无穷,  $\{\varepsilon_a^{\text{II}}$  浸水后  $\}$  也趋于无穷。所以可以认为  $\{\varepsilon_a^{\text{II}}$  浸水后  $\}$  与  $\{\varepsilon_a^{\text{II}}$  饱和  $\}$  具有某种相关性,  $\{\varepsilon_v^{\text{II}}$  浸水后  $\}$  与  $\{\varepsilon_v^{\text{II}}$  饱和  $\}$  也具有某种相关性。通过试验结果的分析它们刚好存在线性关系。

4 浸水变形的改进方法

基于以上规律, 提出浸水变形的改进方法, 步骤如下:

- (1) 进行干样和饱和样的三轴剪切试验。利用所测得的干样和饱和样  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a - \varepsilon_v$  关系曲线上确定干态和饱和态土的  $E_t$ ,  $\mu_t$  及其参数, 如邓肯模型参数。
- (2) 进行一些单线法试验, 确定浸水后等效应力应变关系曲线  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \{\varepsilon^{\text{II}}$  浸水后  $\}$ 。
- (3) 利用等效应力 - 应变关系曲线与饱和样剪切变形关系曲线之间的关系确定参数  $k_a$ ,  $k_v$ 。
- (4) 利用饱和样参数和  $k_a$ ,  $k_v$  确定浸水后等效饱和态  $E_t$ ,  $\mu_t$  及其参数。
- (5) 计算某一应力状态(包括复杂应力状态)的浸水变形时, 先用干态的  $E_t$ ,  $\mu_t$  及其参数计算干态的应变  $\{\varepsilon^{\text{II}}$  干样  $\}$ , 再用浸水后等效饱和态  $E_t$ ,  $\mu_t$  及其参数计算浸水后应变  $\{\varepsilon^{\text{II}}$  浸水后  $\}$ , 则浸水变形为

$$\{\Delta \varepsilon\} = \{\varepsilon^{\text{II}}$$
 浸水后  $\} - \{\varepsilon^{\text{II}}$  干样  $\}$  (2)

5 方法的验证

用改进的方法和双线法对粗粒料等围压和不同围压不同应力水平的试验结果进行轴对称情况下的二维有限元预测, 试验所得参数如表 1 所示, 计算网格如图 7 所示。

表 1 邓肯模型参数

Table 1 Parameters used in Duncan model

类别	c/kPa	$\phi_0/(^\circ)$	$\Delta\phi/(^\circ)$	K	n	$R_f$	$K_b$	m
风干样	0	54	12	738	0.43	0.74	258	0.28
饱和样	0	49	10	525	0.36	0.73	151	0.28
浸水后	0	49	10	510	0.36	0.73	207	0.28

由于试样轴对称, 根据对称性取其一半, 边界条件如图 7 所示, 底端竖向位移固定, 左端横向位移固定, 受力条件为右端受围压的作用, 顶端受轴

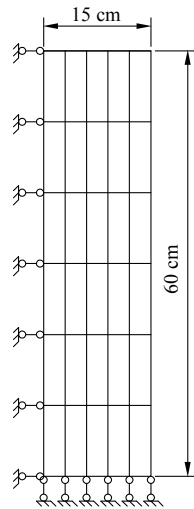


图 7 有限元计算网格图

Fig.7 Finite element calculation meshes

压和围压的共同作用。

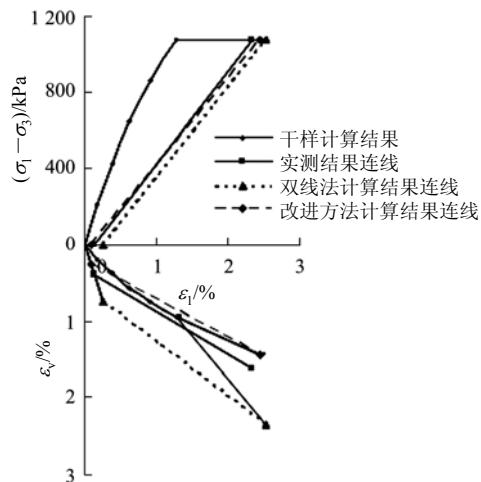
有限元计算预测以下这些情况:

(1) 预测围压为 400 kPa 的干样, 各向等压浸水和应力水平为 0.50 时的浸水变形, 计算结果和实测结果如图 8(a)所示。

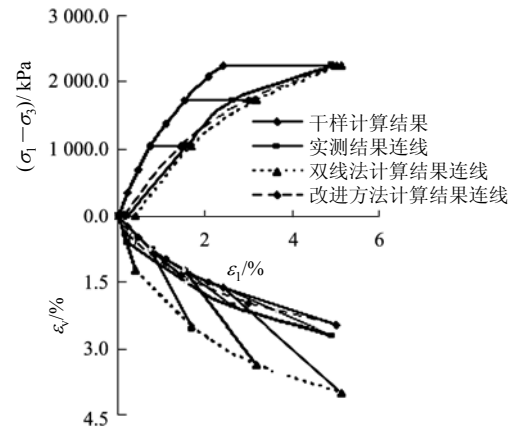
(2) 预测围压为 800 kPa 的干样, 各向等压浸水和应力水平为 0.30, 0.50, 0.65 时的浸水变形, 计算结果和实测结果如图 8(b)所示。

(3) 预测围压为 1 600 kPa 的干样, 各向等压浸水和应力水平为 0.30, 0.70 时的浸水变形, 计算结果和实测结果如图 8(c)所示。

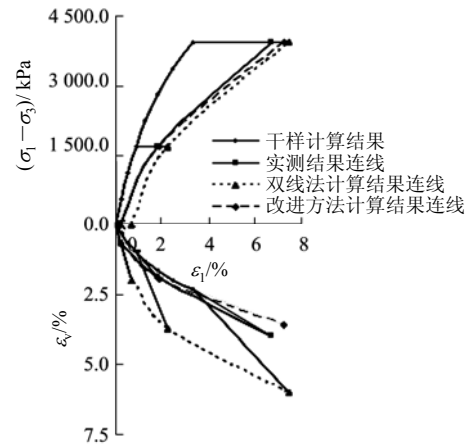
为了便于分析和比较将风干样加载段统一为等围压剪切应力路径的计算结果。实测结果为干样计算结果加上实测变形; 双线法计算结果为干样计算结果加上双线法计算变形; 改进方法计算结果为干样计算结果加上改进方法计算变形。



(a) 围压为 400 kPa



(b) 围压为 800 kPa



(c) 围压为 1 600 kPa

图 8 改进方法和双线法预测结果与试验结果的比较

Fig.8 Comparison between predication results of improvement method and double-line method and test results

从图 8 可以看出, 改进方法计算结果与双线法计算结果相差很大, 尤其在体变方面双线法计算明显偏大。两者与实测结果相比, 改进方法计算结果更贴近实测结果, 尤其在体变方面, 说明改进方法效果优于双线法。

## 6 结 论

通过对粗粒料浸水变形的试验、分析、计算研究, 得到了以下一些结论:

(1) 分析了单线法、双线法各自的优点和缺点, 提出了试验方面用单线法试验结果修正双线法试验结果、计算方面仍用双线法计算的思路, 该思路是合情合理的。

(2) 进行了粗粒料大三轴双线法和单线法浸水变形试验研究, 认识到浸水后变形曲线起点不过原点的特点, 该特点给分析和计算带来了麻烦, 笔者

提出了将它平移到原点的处理方法,并分析了它的合理性。

(3) 分析了单线法和双线法结果之间的关系,发现了 $\varepsilon_{a\text{浸水后}}^{\text{II}}$ 与 $\varepsilon_{a\text{饱和}}^{\text{II}}$ 成正比关系的规律,并引用其他学者的数据进行验证同样成立。

(4) 分析了单线法和双线法结果之间的关系,发现了 $\varepsilon_{v\text{浸水后}}^{\text{II}}$ 与 $\varepsilon_{v\text{饱和}}^{\text{II}}$ 也成正比关系的规律,并引用其他学者的数据进行验证同样成立。

(5) 单线法和双线法试验结果之间的差别主要由于两者过程不同引起的。

(6) 基于笔者发现的规律,提出了试验方面用单线法试验结果修正双线法试验结果、计算方面仍用双线法计算的改进方法。

(7) 分别用改进方法和双线法对试验结果进行预测,预测结果表明改进方法计算结果和试验结果更加吻合。

(8) 本文给出的规律可靠,改进方法理论依据邓肯模型,计算简单适用,结果与实测比较吻合,可为大型堆石坝初次蓄水变形的有限元计算提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] NOBARI E S, DUNCAN J M. Movements in dams due to reservoir filling[C]// Proceedings of Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structure. [S. l.]: [s. n.], 1973: 797 - 815.
- [2] NOBARI E S, DUNCAN J M. Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams[R]. Berkeley, USA: University of California, 1972.
- [3] 左元明, 沈珠江. 坝壳砂砾料浸水变形特性的测定[J]. 水利水电科学, 1989, (1): 107 - 113.(ZUO Yuanming, SHEN Zhujiang. Deformation character of gravel sand due to wetting[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989, (1): 107 - 113.(in Chinese))
- [4] 殷宗泽, 费余琦, 张金富. 小浪底土坝坝料土的湿化变形试验研究[J]. 河海科技进展, 1993, 13(4): 73 - 76.(YIN Zongze, FEI Yuqi, ZHANG Jinfu. Triaxial test research on wetting deformation for materials of Xiaolangdi arch and rock fill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1993, 13(4): 73 - 76.(in Chinese))
- [5] 李广信. 堆石料的湿化试验和数学模型[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 198 - 205.(LI Guangxin. Experimental study and mathematic simulation on wetting behavior of rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(5): 198 - 205.(in Chinese))
- [6] 殷宗泽, 赵航. 土坝浸水变形分析[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 1 - 8.(YIN Zongze, ZHAO Hang. Deformation analysis of earth dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 1 - 8.(in Chinese))
- [7] 屈智炯, 刘昌贵. 论粗粒土的湿化变形特性[C]// 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 1991: 147 - 150.(QU Zhijiong, LIU Changgui. Discussion on wetting deformation behaviour of coarse-grained materials[C]// Proceedings of the Sixth National Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. Shanghai: Tongji University Press, 1991: 147 - 150.(in Chinese))
- [8] 张金富. 土石坝材料湿化试验研究[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 1989.(ZHANG Jinfu. The experiment and research of rockfills and soils due to wetting[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 1989.(in Chinese))
- [9] 魏松. 粗粒料浸水湿化变形特性试验及其数值模型研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2006.(WEI Song. Study on wetting deformation behavior and numerical model of coarse-grained materials[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2006.(in Chinese))
- [10] 李鹏, 李振, 刘金禹. 粗粒料的大型高压三轴湿化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 231 - 234.(LI Peng, LI Zhen, LIU Jinyu. Slaking test study of coarse aggregate under high triaxial stress condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 231 - 234.(in Chinese))
- [11] 张少宏, 张爱军, 陈涛. 堆石料三轴湿化变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5 938 - 5 942.(ZHANG Shaohong, ZHANG Aijun, CHEN Tao. Triaxial slaking test research on rock fill deformation feature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 938 - 5 942.(in Chinese))
- [12] 魏松, 朱俊高. 粗粒料三轴湿化颗粒破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 252 - 1 258.(WEI Song, ZHU Jungao. Study on wetting breakage of coarse-grained materials in triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 252 - 1 258.(in Chinese))
- [13] 刘新喜, 夏元友, 刘祖德, 等. 复杂应力下强风化软岩湿化变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 925 - 930.(LIU Xinxi, XIA Yuanyou, LIU Zude, et al. Experimental study on slaking deformation of intense weathering soft rock under complicated stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 925 - 930.(in Chinese))
- [14] 左永振. 粗粒土的蠕变和湿化试验研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 长江科学院, 2008.(ZUO Yongzhen. Research on creep deformation and wetting deformation of coarse-grained materials[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute, 2008.(in Chinese))
- [15] 魏宁, 傅旭东, 茜平一, 等. 压实土体的部分湿化计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 4 120 - 4 125.(WEI Ning, FU Xudong, QIAN Pingyi, et al. Discussion on calculation method of highly compacted soils with partial wetting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 4 120 - 4 125.(in Chinese))