

文章编号: 1674—8247(2021)01—0001—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.01.001

铁路浸水支挡结构的最不利水位与确定方法

江靓瑾¹ 张 韵¹ 李福华² 陈邵勇³ 丁 杨³

(1. 四川省铁路集团有限公司, 成都 610031; 2. 中国中铁二局集团有限公司, 成都 610031;
3. 成都西南交通大学设计研究院有限公司, 成都 610031)

摘 要:本文从铁路行业最不利水位的概念和主要作用入手,分析了规范中最不利水位定义的局限性,提出了完善最不利水位定义的建议,构建了以最小偏移率确定浸水支挡结构控制项和最不利水位的通用方法。结合具体的工程实例,演示了确定最不利水位的步骤和过程。

关键词:浸水; 支挡结构; 检算项; 不利极值; 偏移率; 控制项; 最不利水位

中图分类号:U213.1+52.2 **文献标志码:**A

Most Unfavorable Water Level of Submerged Retaining Structure for Railway and Its Determination Method

JIANG Liangjin¹ ZHANG Yun¹ LI Fuhua² CHEN Shaoyong³ DING Yang³

(1. Sichuan Railway Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. China Railway No.2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

3. Chengdu Southwest Jiaotong University Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper analyzes the concept and main functions of the most unfavorable water level in the railway industry, analyzes the limitations of the definition of the most unfavorable water level in the codes, and then puts forward suggestions on improving this definition. It also establishes a general method for determining the control items and the most unfavorable water level of the submerged retaining structure with the minimum offset rate. At last, the paper demonstrates the steps and processes of determining the most unfavorable water level with specific engineering examples.

Key words: submerge; retaining structure; check calculation item; unfavorability limit; offset rate; control item; most unfavorable water level

在铁路浸水支挡结构设计检算过程中,经常提到最不利水位。什么是最不利水位,不同行业对其的定义有所不同。因此,理清最不利水位的概念、了解其作用、掌握其确定方法,对铁路浸水支挡结构的设计十分重要。

1 最不利水位的概念

TB10025-2006《铁路路基支挡结构设计规范》(以下简称 2006 规范)条文解释中对最不利水位的定义为:设计水位或其下某一水位,当用此水位检算挡土

收稿日期:2020-06-08

作者简介:江靓瑾(1990-),女,工程师。

引文格式:江靓瑾,张韵,李福华,等. 铁路浸水支挡结构的最不利水位与确定方法[J]. 高速铁路技术,2021,12(1):1-5.

JIANG Liangjin, ZHANG Yun, LI Fuhua, et al. Most Unfavorable Water Level of Submerged Retaining Structure for Railway and Its Determination Method[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(1):1-5.

墙时,得出的抗倾覆稳定系数最小或抗滑动稳定系数最小或得出的基底应力最大。

这一定义包含如下信息:

(1)规定了检算水位的上下限界和最不利水位出现的范围:设计水位为最高上限,消落的最低水位为下限,其间所有水位均可作为检算水位,最不利水位就出现在上下限界内。

(2)指定了检算的内容:抗倾覆稳定或抗滑动稳定或基底应力三项。

(3)规定了最不利水位的判断标准:抗倾覆稳定系数最小或滑动稳定系数最小或基底应力最大。

(4)对上述检算内容的最小(最大)值是否必须满足控制值(即允许值和限定值)未作规定。

支挡结构的检算内容,常列项计算,故也称作检算项。浸水支挡结构的水位,大多为一个有上下限的水位范围,范围内取用多少个水位,检算项就有多少个计算结果,每个检算项的计算结果都有最大和最小值,对应结构最差状态的那个极值,称作不利极值。全部检算项中,安全储备最低或欠安全储备、对结构能否满足所有功能要求起最终控制作用的检算项叫作控制项。控制项亦可通俗地理解为全部检算项中的短板项。

按2006规范条文解释的本意,最不利水位应该是指结构控制项的不利极值所对应的水位。其他一些行业将结构的每一检算项不利极值对应的水位都称为最不利水位^[1],这与铁路行业最不利水位的概念有很大区别。

2 最不利水位的作用及工程应用

最不利水位与控制项的不利极值相对应,这一水面位置能被直接观测,因此可用作结构最不利状态(抗倾覆稳定系数最小或抗滑动稳定系数最小或基底应力最大的状态,下同)的指示标志。水位一旦到达最不利水位,结构就处在最不利状态。通过最不利水位就能掌控结构的最不利状态,这个特点使最不利水位具有相当大的工程应用价值。

(1)用作报警水位或预警的参照水位

一些特定的濒水对象一旦失稳,稳定性随水位变化而改变,后果严重,需要在危险出现前预警或在危险出现时报警。最不利水位正好对应了对象安全稳定性最小(相对而言危险性最大)的状态,可作为报警水位或预警参照的水位。在沿江沿河的一些地质灾害点或病险护堤的监控措施中,就常见最不利水位的这种用法^[2]。

(2)在工程方案决策中作为控制条件

有时,人们并不希望结构处在稳定性最小(危险性相对最大)的状态。规避最不利水位的影响便能达到目的,最不利水位因而被用作限制条件,在工程方案决策中被广泛应用。

近年来,各流域水资源开发力度越来越大,工程中常避开一些重要的基础设施(如铁路、公路、高压输电设施等),最不利水位被用作限制条件广泛应用。如开发利用的最高水位超过关键构筑物原有的最不利水位时,这些构筑物的安全性将不能保证。此时需要决策是限定开发水位,还是加固构筑物获取更高的利用水位。当后者经济上不可取时,关键构筑物的最不利水位就常被当作限制条件,要求开发利用的水位不高于最不利水位^[3]。西南地区的许多小水电常采用此法拟定利用水位。

又如铁路(公路)桥梁铺架,桥头支挡结构在最不利水位时安全性最差,有经验的铺架单位往往避开这一水位铺架(必须在此水位铺架时,一般也制定有支挡结构临时加固的措施),此时最不利水位也被当作限制条件。

再如地铁和高层建筑深基坑开挖,降水时常会避免水位在支护结构的最不利水位附近长时间停留,以保证边坡的安全。这也是最不利水位作为限制条件的应用例子。

(3)在支挡结构设计及验算中用作把关水位

最不利水位对应控制项的不利极值。在能预先知道最不利水位的情况下,可直接利用最不利水位检算控制项,看其不利极值是否满足控制值要求,而不必验算其他水位以及控制项以外的其他检算项,这能极大地简化支挡结构的设计和验算工作。2006规范和TB 10025-2019《铁路路基支撑结构设计规范》都有“浸水挡土墙应从设计水位及以下搜索最不利水位作为计算水位”的规定。由此可见,在支挡结构设计和验算过程中,最不利水位被用作把关水位。

3 规范中最不利水位定义的局限性

2006规范中,最不利水位是根据重力式挡土墙稳定性验算的三个检算项(抗倾稳定系数、抗滑稳定系数、基底应力)来定义的^[4]。而其他支挡结构(如半刚性结构和柔性结构)与重力式挡土墙有所不同,尚有构件变形、位移、内应力、截面和基底偏心距等检算内容^[5],如仍按重力式挡土墙的三个检算项来定义它们的最不利水位,则其他内容就无法参与最不利水位的

定义。将仅由部分内容定义的最不利水位,用作把关水位或检验水位可能会得出错误结果。因此,2006规范中最不利水位的定义是有局限性的。

4 完善最不利水位定义的建议

建筑物都有功能要求,支挡结构也不例外。以满足支挡结构各功能所规定的检算内容来定义最不利水位则能避免上述局限性。可将最不利水位定义为:检算支挡结构各功能相应的检算项时,其控制项中不利极值所对应的水位。此定义能涵盖浸水支挡结构的稳定、位移、强度等验算项目^[6-7],使最不利水位从全部而非部分检算项中选出。

5 控制项和最不利水位的确定方法

设计支挡结构或编制定型图时,支挡结构截面可采用经济截面。此种情况确定控制项非常简单,必有一个检算项的不利极值与控制值相等或相当接近,找到那个检算项便是控制项。但当截面不为经济截面时,各检算项的不利极值就会偏离控制值。这种情况下,不少人习惯拿各检算项不利极值与控制值的差值进行比较(所谓差值法)或拿不利极值与控制值的比值进行比较(所谓直接比值法)来确定控制项。尽管两法有时都有效,但都不太严谨。如遇检算部位多、检算项目多、荷载组合多、有多个检算项出现差值或比值相等的情况,以此两法来确定控制项就不一定行得通,需建立一个普遍适用的方法。

确定控制项的通用方法为定义偏移率,用偏移率数值大小来确定控制项。

(1)对不利极值允许比控制值大的检算项(简称容大项),如抗滑动、抗倾覆稳定检算项,定义:

$$d_{ij}^k = \frac{u_{ij}^k - [u_i^k]}{[u_i^k]} \times 100\% \quad (1)$$

式中: i ——支挡结构第 i 检算项的编号 ($i = 1, 2 \dots m$);

j ——荷载组合形式编号 ($j = 1, 2 \dots n$);

k ——检算部位或位置代号,不同部位或位置采用不同的代号 ($k = a, b, c \dots$);

u_{ij}^k ——检算 k 部位时,第 i 检算项第 j 荷载组合形式的不利极值;

$[u_i^k]$ ——检算 k 部位时,第 i 检算项的控制值;

d_{ij}^k ——检算 k 部位时,第 i 检算项第 j 荷载组合形式的不利极值相对于控制值的偏移率。

①若 $d_{ij}^k = 0$,表示该检算项不利极值与控制值相等,结构刚满足功能要求(安全);

②若 $d_{ij}^k > 0$,表示检算项的不利极值比控制值大,结构满足功能要求(安全);

③若 $d_{ij}^k < 0$,表示检算项的不利极值未达控制值,结构不满足功能要求(不安全)。

(2)对不利极值允许比控制值小或相等的检算项(简称容小项),如应力、位移、偏心距检算项,定义:

$$d_{ij}^k = -\frac{u_{ij}^k - [u_i^k]}{[u_i^k]} \times 100\% \quad (2)$$

①若 $d_{ij}^k = 0$,表示该检算项不利极值结果与控制值相等,结构刚满足功能要求(安全);

②若 $d_{ij}^k > 0$,表示检算项的不利极值比控制值小,结构满足功能要求(安全);

③若 $d_{ij}^k < 0$,表示检算项的不利极值比控制值大,结构不满足功能要求(不安全)。

(3)比较各检算项偏移率 d_{ij}^k 的大小,按以下原则确定控制项:

①偏移率 d_{ij}^k 无论正负,数值最小者为控制项。

②洪水位类型的偏移率,只将常水位 d_{ij}^k 的符号右上角上加撇(即 d_{ij}^k)以示区别,计算公式和控制项确定方法同上。

(4)偏移率公式中,常、洪两种类型水位采用的控制值是不同的。洪水类型时不为控制项的验算项在常水类型时可能变成控制项,因此,铁路行业确定控制项和最不利水位需事先明确水位类型。

(5)采用计算机编程确定控制项时,应将支挡结构包含的全部检算项的偏移率纳入比较,才能获得正确的结果;人工列表确定控制项时,则可只挑检算结果比较接近控制值和不满足控制值的项目计算其偏移率,再进行比较。得到正确结果的前提是不能漏选可能成为控制项的检算项。

计算出各检算项不利极值后,将不利极值与对应水位成对列出。控制项一旦确定,与控制项不利极值对应的那个水位就是最不利水位。

6 确定最不利水位的步骤和过程

计算和确定铁路浸水支挡结构最不利水位的过程比较复杂,为免空泛,本文以一工程实例为例,介绍其确定步骤和过程。

某顺河既有铁路有一段浸水挡墙,原设计水位为墙趾之上 4.2 m ($P = 1\%$)。拟拦河开发水电,挡墙距坝址约 1 300 m,筑坝建库后,墙前常水位将上升至墙

趾之上 8 m,检算既有挡墙是否安全。如电站汛期拦洪削峰,水位超过常水位高达墙顶,检算挡墙是否安全。

(1) 确定计算条件

① 基本条件

搜集挡墙竣工资料和本段挡墙原始计算资料,收集河道水文资料和当地气象资料,核查墙前水位与大坝各特征水位的对应关系。

挡墙原设计参数为:墙身采用 C20 片石混凝土,墙体截面和荷载如图 1 所示。填料为砂卵石,容重 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$,内摩擦角 $\phi = 35^\circ$,浮容重 $\gamma_b = 11 \text{ kN/m}^3$,地基为砂卵石地层,容许承载力 $[\sigma] = 350 \text{ kPa}$,墙底摩擦系数 $f = 0.4$,地震烈度 6 度。

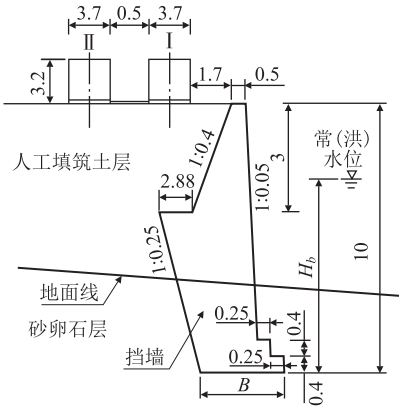


图1 浸水墙图(m)

② 墙前需要检算的水位

按上述要求,应进行常水位 8.0 ~ 0 m 和洪水位 10 ~ 0 m 两个水位工况的计算。

③ 荷载组合

既有铁路为双线,列车荷载有 4 种组合方式,如图 2 所示。

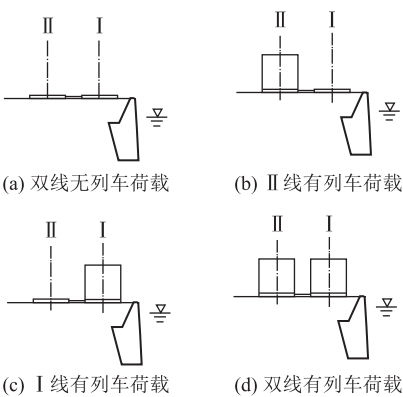


图2 列车及轨道荷载组合图

(2) 确定检算部位和检算项目

① 检算部位

衡重式浸水挡墙需计算墙身整体稳定性和截面强度,前者检算部位为墙身整体(但检算内容都涉及基底),后者检算部位为墙身薄弱截面。衡重墙墙身有两个相对薄弱的截面,即上墙底水平截面(斜截面计算本文略)和过墙趾上级台阶顶面的墙身水平截面。故检算针对基底、上墙底、墙趾上级台阶顶水平截面 3 个部位。

② 检算项

挡墙的不同部位有不同的验算内容。按相应规范^[8],挡墙基底有滑动、倾覆、基底应力和偏心距 6 项内容;上墙底及墙趾上级台阶顶水平截面有拉、压、剪应力和偏心距 4 项内容。

(3) 计算各检算项结果

不同部位的检算成果单独成表。挡墙 3 个验算部位的检算成果分别如表 1、表 2、表 3 所示,各表首行列出检算项(即检算内容),末行列出控制值,首列则列出列车荷载组合形式。

表1 浸水墙基底 6 个检算项成果表(8~0 m 常水位)

荷载组合	最小抗滑稳定系数(对应水位/m)	最小抗倾覆稳定系数(对应水位/m)	墙趾最大应力/kPa(对应水位/m)	墙踵最大应力/kPa(对应水位/m)	基底平均应力最大值/kPa(对应水位/m)	基底最大偏心距/m(对应水位/m)
双线有荷	1.37(8.00)	2.31(8.00)	251.4(0)	318.1(0)	284.8(0)	-0.076(0.4)
II线有荷	1.31(8.00)	2.51(8.00)	218.6(0)	280.9(0)	249.8(0)	0.140(0.8)
I线有荷	1.98(7.00)	2.89(7.93)	164.8(0)	402.4(0)	283.6(0)	-0.272(0.8)
双线无荷	2.04(7.00)	3.78(7.21)	122.2(0)	370.5(0)	246.4(0)	-0.328(0.8)
控制值(常)	1.3	1.6	350	525	350	±0.638

注:偏心距负值代表基底竖直合力中心靠墙踵一侧

在 8 ~ 0 m 水位和 10 ~ 0 m 水位范围内,按设定的水位增减间隔变动水位,逐个水位计算检算项,找出每一检算项不利极值和对应水位,列于相应各表的单元格内。这一过程计算工作量较大,采用计算机编程

计算。

10 ~ 0 m 洪水位的上墙底和墙趾上台阶顶截面计算结果与表 2、表 3 差异不大,故本文只列出其基底检算结果,如表 4 所示。

表 2 上墙底正截面 4 个检算项成果表(8~0 m 常水位)

荷载组合	墙胸缘最大压应力/kPa (对应水位/m)	墙背缘最大压应力/kPa (对应水位/m)	最大剪应力/kPa(对应水位/m)	截面最大偏心距/m (对应水位/m)
双线有荷	168.2(7~0)	6.6(8)	63.3(7~0)	0.295(7~0)
Ⅱ线有荷	147.4(7~0)	-3.3(7~0)	45.6(7~0)	0.322(7~0)
Ⅰ线有荷	168.2(7~0)	6.6(8)	63.3(7~0)	0.295(7~0)
双线无荷	147.4(7~0)	-3.3(7~0)	45.6(7~0)	0.322(7~0)
控制值(常)	6 800	-430(6 800)	850	±0.617

注:应力为负值则为受拉

表 3 墙趾上级台阶顶正截面 4 个检算项成果表(8~0 m 常水位)

荷载组合	墙胸缘最大压应力/kPa (对应水位/m)	墙背缘最大压应力/kPa (对应水位/m)	最大剪应力/kPa(对应水位/m)	截面最大偏心距/m (对应水位/m)
双线有荷	472.3(7.47)	303.3(0.81)	85.3(0)	0.193(7.82)
Ⅱ线有荷	412.0(7.46)	266.2(0.8)	73.6(0)	0.202(7.8)
Ⅰ线有荷	400.4(0.84)	360.4(5.69)	62.5(0)	-0.048(0.85)
双线无荷	372.8(0.80)	296.3(7.46)	50.0(0)	-0.101(0.8)
控制值(常)	6 800	6 800	850	±1.163

注:偏心距负值代表基底竖直合力中心靠墙踵一侧

表 4 浸水墙基底 6 个检算项成果表(10~0 m 洪水位)

荷载组合	最小抗滑稳定系数(对应水位/m)	最小抗倾覆稳定系数(对应水位/m)	墙趾最大应力/kPa(对应水位/m)	墙踵最大应力/kPa(对应水位/m)	基底平均应力最大值/kPa(对应水位/m)	基底最大偏心距/m(对应水位/m)
双线有荷	1.36(8.38)	2.30(8.46)	251.4(0)	318.1(0)	284.8(0)	-0.076(0.4)
Ⅱ线有荷	1.31(8.45)	2.51(8.23)	218.6(0)	280.9(0)	249.8(0)	0.140(0.8)
Ⅰ线有荷	1.98(7.00)	2.89(7.93)	164.8(0)	402.4(0)	283.6(0)	-0.272(0.8)
双线无荷	2.04(7.00)	3.78(7.21)	122.2(0)	370.5(0)	246.4(0)	-0.328(0.8)
控制值(洪)	1.2	1.4	420	525	420	±0.638

注:偏心距负值代表基底竖直合力中心靠墙踵一侧

(4) 确定控制项

①常水位为 8~0 m 时挡墙的控制项

最小抗滑稳定系数项和最小抗倾覆稳定系数项为容大项,按式(1)计算偏移率,其他项为容小项,按式(2)计算。表 2、表 3 中,偏心距检算项以外的各检算项的不利极值与控制值相差甚远,说明墙身材料强度富余较大,这些项不会成为控制项,可不计算偏移率。表 1 中,最小抗滑稳定系数(1.31)、墙踵最大应力(402.4 kPa)以及基底平均应力最大值(284.8 kPa)三项结果比较接近控制值,表 2 中,最大偏心距(0.322 m)数值也较大,它们都有成为控制项的可能,将上述项挑出计算其偏移率。令挡墙基底、上墙底、墙趾上级台阶顶水平截面的代号分别为“a”、“b”、“c”,对各表按检算项目从左至右、荷载组合从上往下的顺序编号,则表 1 中,最小抗滑稳定系数所在单元格的偏移率 $d_{12}^a = (1.31 - 1.3)/1.3 \times 100\% = 7.5\%$,墙踵最大应力单元格的偏移率 $d_{43}^a = -(402.4 - 525)/525 \times 100\% = 23.4\%$,基底平均应力最大单元格的偏移率 $d_{51}^a = -(284.8 - 350)/350 \times 100\% = 18.6\%$,表 2 中,最大偏心距单元格的偏移率 $d_{42}^b = d_{44}^b = -(0.322 - 0.617)/0.617 \times 100\% = 47.8\%$ 。

可见 d_{12}^a 在 5 个偏移率中数值最小,因此 d_{12}^a 所代表的Ⅱ线有荷状况下的抗滑动稳定验算项为控制项。

②洪水位为 10~0 m 时挡墙的控制项

选取表 4 中比较接近控制值最可能成为控制项的 3 项进行计算比较,其偏离率分别为 $d_{12}^a = (1.31 -$

$1.2)/1.2 \times 100\% = 9.2\%$, $d_{43}^a = -(402.4 - 525)/525 \times 100\% = 23.4\%$, $d_{51}^a = -(284.8 - 420)/420 \times 100\% = 32.2\%$ 。 d_{12}^a 的数值最小,故抗滑稳定系数不利极值为 1.31 的检算项是控制项。

表 1、表 4 的控制项均为抗滑动稳定验算项,印证了滑动稳定性问题是控制一些建筑物结构设计的主要问题的论断^[9],但并不意味着所有浸水支挡结构的抗滑动检算项都一定为控制项。铁路浸水支挡结构类型众多、形状尺寸各异,也常有非滑动稳定项为控制项的情况。

(5) 确定最不利水位

控制项不利极值与最不利水位对应,表 1、表 4 结果都表明Ⅱ线有荷状况下的抗滑动稳定验算项为控制项,可以用该项直接确定最不利水位。常水位为 8.0~0 m 时,最不利水位为 8 m;洪水位为 10~0 m 时,最不利水位为 8.45 m。

(6) 挡墙安全性

控制项是各检算项中的最不利项,若控制项的不利极值能满足相应控制值要求,则挡墙的所用检算项都能满足要求,即挡墙安全。

①表 1、表 2、表 3 的控制项是Ⅱ线有荷状况下滑动稳定验算项,其最不利极值为 1.31,大于控制值 1.3,满足要求,因此既有墙在常水位 8.0~0 m 时是安全的。

②表 4 的控制项也是Ⅱ线有荷状况下的抗滑动稳

(下转第 11 页)

(4) 岩石的含水率与饱和吸水率的比值表征着岩石含水状态的饱和程度。天然状态岩石的含水情况不尽相同,膨胀力测试值随着试件初始含水比的增大而减小。

(5) 饱和吸水率直接反应了岩石的密实程度和孔隙率情况,饱和吸水率越大,岩石孔隙率越大。烘干状态下,岩石内部孔隙中水分全部排出,吸水量越大,产生的吸水膨胀越显著。

(6) 岩石的密实程度或岩石的空孔率是影响岩石膨胀性的决定性因素。空孔率越大,岩石膨胀力测试值越大,对工程稳定性越不利。

参考文献:

[1] 王美乾. 膨胀岩膨胀—蠕变耦合试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
WANG Meiqian. Expansive Rock of Expansion-Creep Coupling Test Reseach[D]. Nanning: Guangxi University, 2012.

[2] 范秋雁, 刘金泉, 杨典森, 等. 不同降雨模式下膨胀岩边坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3401–3409.
FAN Qiuyan, LIU Jinquan, YANG Diansen, et al. Model Test Study of Expansive Rock Slope under Different Types of Precipitation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3401–3409.

(上接第 5 页)

定验算项,其最不利极值亦为 1.31,大于控制值 1.2,满足要求,表明既有挡墙在洪水位 10~0 m 条件下工作,也是安全的。

7 结束语

铁路行业的最不利水位是按重力式支挡结构的稳定性检算内容来定义的,这种定义对重力式以外的其他支挡结构并不完全合适。因此,本文建议以支挡结构各功能的验算内容,重新定义最不利水位,拓展最不利水位的适用范围,可采用比较偏移率的通用方法来确定支挡结构的控制项,将最不利水位定义为控制项不利极值对应的水位。确定最不利水位的一般步骤为:确定计算条件和检算项目→逐水位计算支挡结构各检算项,找出各检算项不利极值及对应水位→计算偏移率,确定控制项→选定控制项不利极值对应的水位为最不利水位。

参考文献:

[1] 阙云. 浸水重力式挡土墙稳定性的最不利水位确定[J]. 福建建设科技, 2012(5): 11–14.
QUE Yun. Determination of the most Unfavorable Water Level Equation of the Wetted Gravity Retaining Wall [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2012(5): 11–14.

[2] 中国铁路总公司. 铁路防洪工作指南[M]. 北京: 中国铁道出版

[3] TB 10115–2014 铁路工程岩石试验规程[S].
TB 10115–2014 Code for Rock Test of Railway Engineering [S].

[4] TB 10077–2019 铁路工程岩土分类标准[S].
TB 10077–2019 Code for Rock and Soil Classification of Railway Engineering [S].

[5] TB 10102–2010 铁路工程土工试验规程[S].
TB 10102–2010 Code for Soil Test of Railway Engineering [S].

[6] 吴会东. 膨胀岩试验设备改进与评价研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 75–78.
WU Huidong. Study on Improvement and Evaluation of Swelling Rock Test Equipment[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 75–78.

[7] 余尚银. 材料物理化学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.
YU Shangyin. Physical Chemistry of Materials [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.

[8] 张廷雷, 方明, 李建兵, 等. K_{30} 曲线拟合及修正的程序设计[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(4): 42–47.
ZHANG Tinglei, FANG Ming, LI Jianbing, et al. Program Design for K_{30} Curve Fitting and Revising[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(4): 42–47.

[9] 张廷雷, 蒋良文, 张晓晖, 等. 含水率对 K_{30} 值和 E_{vd} 值相关性的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 10–14.
ZHANG Tinglei, JIANG Liangwen, ZHANG Xiaohui, et al. Research on the Effect of Moisture Content on Correlation between K_{30} and E_{vd} [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 10–14.

社, 2017.
China Railway. Guide for Railway Flood Control Work[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[3] 梅锦山, 侯传河, 司富安. 水工设计手册(第2卷): 规划、水文、地质(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 2014.
MEI Jinshan, HOU Chuanhe, SI Fu'an. Hydraulic Design Manual (Volume 2): Planing, Hydrology and Geology (2nd Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.

[4] TB 10025–2006 铁路路基支挡结构设计规范[S].
TB 10025–2006 Code for Design on Retaining Structures of Railway Subgrade[S].

[5] 李海光, 等. 新型支挡结构设计工程实例(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Li Haiguang et al. Design and Engineering Examples of New Retaining Structures(2 Edition) [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[6] 王秀丽. 支挡结构设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
WANG Xiuli. Design and Calculation Manual of Retaining Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

[7] 尉希成, 周美玲. 支挡结构设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
WEI Xicheng, ZHOU Meiling. Design Manual of Retaining Structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.

[8] TB 10025–2019 铁路路基支挡结构设计规范[S].
TB 10025–2019 Code for Design on Retaining Structures of Railway Earthworks[S].

[9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利水电出版社, 1996.
QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Geotechnical Principles and Calculations (2 Edition) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996.