

重力式挡土墙抗滑稳定分析安全判据和标准研究

陈祖煜^{1,2}、詹成明^{1,2*}、姚海林¹、陈立宏³、李旭³

(1.中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉, 430071; 2.中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京, 100048; 3.北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京, 100044)

摘要: 本文探讨水利、交通等领域挡土墙设计规范中对抗滑稳定安全系数规定的允许值的合理性, 认为其相应值与国外相关规定相比偏小。从理论上分析, 使用抗力除以土压力的安全系数定义, 计算土压力相应的强度参数是标准值而非经分项系数或安全系数折减后的标准值, 其允许安全系数宜大于边坡同类土方构筑物的相应值。本文认为, 建立在可靠度理论指导下的分项系数方法可以从根本上摆脱在安全判据方面存在的缺陷。在假定一级建筑物的允许可靠指标为 3.7、土的凝聚力和摩擦系数变异系数分别为 0.2 和 0.1 的条件下, 对一个特定的算例, 填土的凝聚力、摩擦系数和基底的摩擦系数分项系数标定值分别为 $\gamma_c=1.301$, $\gamma_f=1.209$ 和 $\gamma_{fo}=1.170$; 应用作者研究团队提出的“相对安全率”的判据, 可以发现上述的分项系数标定值具有普适意义。本文的讨论可以为相关规范的制订工作提供参考。

关键词: 重力式挡土墙; 安全系数; 可靠度分析; 相对安全率; 分项系数

Appraisal of the safety criteria and standards for stability analysis of gravity retaining walls

CHEN Zu-yu^{1,2}, ZHAN Cheng-ming^{1,2*}, YAO Hai-lin¹, CHEN Li-hong³, LI-xu³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China 430071; 2. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China 100048; 3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China 100044)

Abstract: In this paper, the allowable factor of safety in gravity retaining wall design is discussed. In retaining wall design, factor of safety is defined as the resistance over earth pressure. Thus, it should be larger than that in slope design where factor of safety is defined by shear strength reduction. At the same time, its allowable value in Chinese code is obviously lower than these in abroad. To overcome this problem, limit state design with partial factors is applied to retaining wall design problem. For Class 1 structures, its target reliability index is 3.7. Assuming the coefficients of variability of 0.2 and 0.1 for cohesion and friction respectively, the calibrated

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2013CB036405); 国家自然科学基金项目(No.41402317)。

第一作者: 陈祖煜, 男, 1943年生, 博士, 教高, 主要从事边坡稳定、岩土工程可靠度分析等方面的研究和咨询工作。

通讯作者: 詹成明, 硕士研究生, E-mail: zhancm2015@163.com。

partial factors are $\gamma_c=1.301$, $\gamma_f=1.209$ and $\gamma_{fo}=1.170$. The calibrated partial factors are further validated by the 'Ratio of safety margin' theory proposed by the authors' research team. The discussion of this paper could be a useful reference to code makers.

Key words: gravity retaining wall, safety factor, reliability analysis, the ratio of safety margin, partial factor

0. 前言

重力式挡土墙抗滑稳定分析是土力学中一个经典领域。通常根据主动土压力理论获得墙前土的推力后,将挡墙基底发挥的抗滑力除以这一推力即获得抗滑稳定的安全系数。我国的水工挡土墙设计规范^[1](SL_379-2007)对不同地基、不同等级、不同工况的挡土墙提供允许安全系数取值标准。根据该标准建于土质地基上的挡土墙,对于一、二、三、四级建筑物在正常工况下其允许安全系数值分别为 1.35, 1.30, 1.25, 1.20;铁道领域挡土墙规范^[2]的规定值稍小。查阅国外文献,加拿大地基手册^[3]对挡土墙的相应允许值为 1.5 至 2.0。美国公路局^[4]则规定其允许值为 1.5。为什么中外规范对挡土墙的抗滑稳定安全系数标准有如此明显的差别?这是一个值得探讨的问题。

当我们将水工挡土墙规范和水工边坡设计规范^[5]的抗滑稳定安全系数作一对比,倒是可以发现,两者基本上是匹配的。例如一级建筑物,挡土墙和边坡的允许安全系数分别为 1.35 和 1.3~1.25,处于同一量级。这里值得探讨的另一个问题是,为什么对于挡土墙这样一个相对来说安全控制标准远较边坡为低的建筑物,其允许安全系数基本相当甚至还要稍高一些呢?

深入研究这些命题后可以发现,在计算挡土墙和边坡的安全系数时实际上采用了不同的安全系数定义。在挡土墙的计算过程中,主动土压力是根据填土抗剪强度指标设计值确定的,也就是说,在建立静力平衡方程获得安全系数 F 时只有墙底与土基接触的面上的强度指标设计值缩减了 F 倍。如果按边坡稳定强度折减的安全系数的定义,计算主动土压力时输入的抗剪强度指标也要缩减 F 倍。两者计算安全系数的方法不一样,自然对他们的安全系数允许标准要求取不同的值。换句话说,如果要用边坡的风险控制标准来为传统的建立在土压力基础上挡土墙抗滑稳定安全系数提供允许值,那么一定会高于边坡的相应值。因此国外规范对挡土墙的允许安全系数提出了 1.5 甚至更大的数值看来是合适的,相反,水工挡土墙规范采用了抗力除以作用的安全系数的定义,却和基于强度折减安全系数的定义的边坡规范取同一数量级的允许安全系数值则是不妥的。

我国水利、交通等领域有关挡土墙设计的规范规定是长期实践经验基础上总结而成的。从根本触动相关的重要判据,并不存在现实可行性。另一方面,工程设计从单一安全系数转轨为建立在可靠度理论指导下的分项系数方法,已经成为不可逆转的潮流。如果在创立这一新体系时,能够充分认识到传统方法中存在的问题,科学、合理地确定好分项系数的取值标准,那么,这个转轨过程也将成为在这一领域从根本上摆脱在安全判据方面存在的缺陷的一个现实可行的途径。

本文的研究将从一个典型算例入手,再推广到一般情况,论证以下命题:

(1). 采用不同的抗滑稳定的安全系数定义,将获得差异很大的安全系数值。我国重力式挡土墙规范使用了抗力除以土压力的安全系数定义,却提出了相应强度折减的边坡规范相应的允许值标准,不仅与国外规范的规定不一致,而且具有一定的理论缺陷;

(2). 对于给定的强度参数概型和变异系数,相应上述两种安全系数定义计算所得的可靠指标却是完全相等的,在此基础上标定极限状态设计方法的分项系数也完全一样;

(3). 在假定一级建筑物的允许可靠指标为 3.7、土的凝聚力和摩擦系数变异系数分别为 0.2 和 0.1 的条件下,对一个特定的算例,填土的凝聚力、摩擦系数和基底的摩擦系数分项系数值标定值分别为 $\gamma_c=1.301$, $\gamma_f=1.209$ 和 $\gamma_{f_0}=1.170$;

(4). 应用作者研究团队提出的“相对安全率”的判据,可以发现上述的分项系数标定值具有普适意义,不受这一特定算例的限制,因而可以为规范的制订工作提供参考。

1. 安全系数允许值及相关规定

1.1 问题的提出

我们以图 1 所示算例展开相关问题的讨论。这一重力式挡土墙墙体的参数为:墙高 $H=9\text{m}$, 墙顶宽 $D=3\text{m}$, 墙体容重 $\gamma_2=24\text{kN/m}^3$ 。左侧面坡度 $m=0.5$, 墙后土体的凝聚力均值 $\mu_c=20\text{kPa}$, $\mu_f=0.7$, 填土容重 $\gamma_1=18\text{kN/m}^3$, 墙后作用荷载 $q=100\text{kN/m}$ 。基底面和地基土体间摩擦系数 $\mu_{f_0}=0.5$, 粘结力为零。强度参数均取设计值,通常可取 0.2 分位值^[6],如式(1)所示, x 代表强度指标 c, f 和 f_0 。

$$x_k = \mu_x - 0.842\sigma_x \quad (1)$$

其中, μ_x 与 σ_x 分别为 x 的均值和标准差。对于这一挡墙的抗滑稳定,通常可以有以下两种相应不同安全系数分析途径:

(1)方案 1: 传统的抗力除以土压力的安全系数定义

根据库仑或朗肯理论,主动土压力为

$$E_a = \frac{1}{2}\gamma_1 \cdot H^2 \cdot K_a + q \cdot H \cdot K_a - 2c \cdot H \cdot \sqrt{K_a} \quad (2)$$

由墙体产生的抗滑力为

$$R = W \cdot f_0 \quad (3)$$

据此,获得抗滑稳定安全系数为

$$F = \frac{R}{S} = \frac{W \cdot f_0}{\frac{1}{2}\gamma_1 \cdot H^2 \cdot K_a + q \cdot H \cdot K_a - 2c \cdot H \cdot \sqrt{K_a}} \quad (4)$$

式中,墙体自重和主动土压力为

$$W = \frac{1}{2}(H \cdot m + 2D) \cdot H \cdot \gamma_2 \quad (5)$$

$$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - 0.5 \tan^{-1} f\right) \quad (6)$$

根据式(4)算得的安全系数为 1.637,列于表 1 的第 6 行第 6 列。

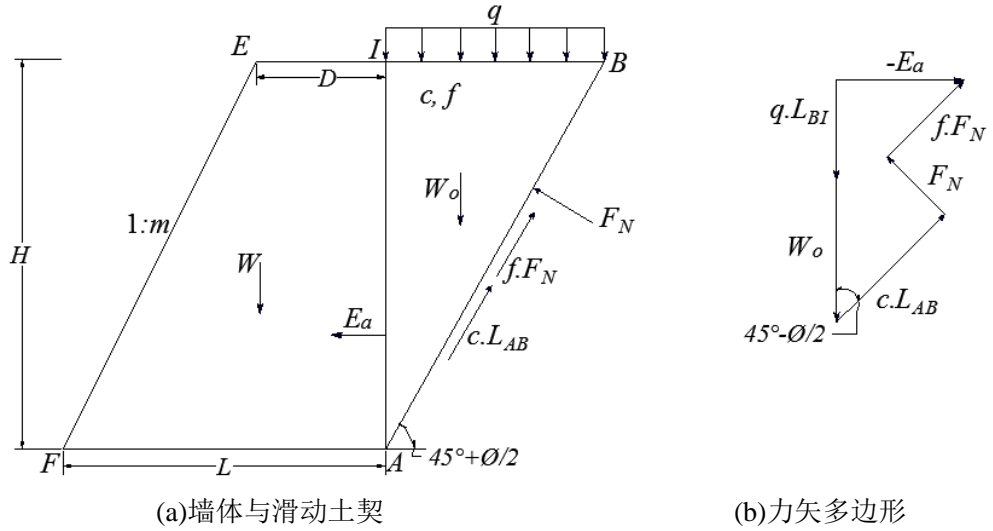


图 1 重力式挡土墙库仑理论分析模型

(a) Wall and sliding soil wedge; (b) Force vector polygon

Fig 1 Coulomb theory analysis model of gravity retaining wall

(2)方案 2: 按边坡稳定强度折减的安全系数定义

如果将挡墙和填土理解为一个边坡, 将基底面 FA 和相应最大土压力的破裂面 AB 视为滑裂面, AB 和水平面夹角为 $45^\circ + \phi/2$ 。那么, 可以用传统的边坡稳定分析方法计算安全系数。根据这一领域对于安全系数的定义, 我们将相关的强度指标缩小 F 倍:

$$c_e = \frac{c}{F} \quad (7)$$

$$f_e = \frac{f}{F} \quad (8)$$

$$f_{o,e} = \frac{f_o}{F} \quad (9)$$

分析由滑块 $ABEF$ 的静力平衡, 我们有

$$E_{a,e} = \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot H^2 \cdot K_{a,e} + q \cdot H \cdot K_{a,e} - 2c_e \cdot H \cdot \sqrt{K_{a,e}} \quad (10)$$

$$K_{a,e} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - 0.5 \tan^{-1} f_e\right) \quad (11)$$

$$R_e = W \cdot f_{o,e} = \frac{W \cdot f_o}{F} \quad (12)$$

上述公式中, 下标 e 代表根据折减后的强度指标计算的相应值, 根据静力平衡, 有

$$W \cdot f_{o,e} = \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot H^2 \cdot K_{a,e} + q \cdot H \cdot K_{a,e} - 2c_e \cdot H \cdot \sqrt{K_{a,e}} \quad (13)$$

式(13)亦可写成

$$F = \frac{W \cdot f_o}{\frac{1}{2} \gamma_1 \cdot H^2 \cdot K_{a,e} + q \cdot H \cdot K_{a,e} - 2c_e \cdot H \cdot \sqrt{K_{a,e}}} \quad (14)$$

根据式(7)到(14), 可通过迭代求解式(14)中的安全系数。算得的安全系数为 1.205。列于表 1 的第 7 行第 6 列。

方案 1 和方案 2 计算所得的安全有明显的差别。比较式(4)和式(14), 可以清楚地发现原因所在, 两者右式的分子是相同的, 而右式的分母相应的主动土压力系数分别是 K_a 和 $K_{a,e}$ 。后者比较前者大很多。

表 1 挡土墙安全系数、可靠指标和分项系数计算过程表

Table 1 Calculation of factor of safety, reliability index and partial factors

意义	强度参数设计值			墙体自重	主动土压力	安全系数	安全系数均值	安全系数标准差
	凝聚力	摩擦系数	基底面摩擦系数					
列数	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
符号	$c_k; c_{ke}$	$f_k; f_{ke}$	$f_{ok}; f_{oke}$	W	$E_a; E_{ae}$	F	μ_F	σ_F
量纲	kPa	-	-	kN	kN	-	-	-
公式	(1)	(1)	(1)	(5)	(2):(10)	(4):(14)	(4):(14)	(16)
方案 1	16.632	0.641	0.458	1134	317.3	1.637	2.280	0.344
方案 2	13.807	0.532	0.380	1134	431.1	1.205	1.334	0.090

注: 表中下标符号 e 为相应参数经安全系数强度折减后的数值, 对应方案 2, 未注者对应方案 1。

表 1 挡土墙安全系数、可靠指标和分项系数计算过程表(续)

Table 1 Calculation of factor of safety, reliability index and partial factor (continued)

意义	可靠指标	验算点值			强度指标分项系数		
		凝聚力	摩擦系数	基底面摩擦系数	凝聚力	摩擦系数	基底面摩擦系数
列数	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
符号	β	c^*	f^*	f_o^*	γ_c	γ_f	γ_{fo}
量纲	-	kPa	-	-	-	-	-
公式	(16)	(17)	(18)	(19)	(23)	(24)	(25)
方案 1	3.719	12.781	0.530	0.392	1.301	1.209	1.170
方案 2	3.719	12.781	0.530	0.392	1.301	1.209	1.170

1.2 中外规范安全系数取值标准对比

既然两种不同定义计算获得的安全系数有明显的差别, 它们相应的允许值也应有所不同。表 2 和表 3 分别总结了中外各国规范对挡土墙和边坡安全系数的规定, 从中可以发现:

(1). 按传统的抗力除以土压力的安全系数定义, 安全系数值 1.637 与加拿大地基手册和美国公路规范的允许值接近, 但是远大于国内的规范对挡土墙安全系数 1.2~1.3 的允许值;

(2). 与边坡相比,挡土墙的规模和失效引起的后果均较小,相应的允许安全系数取表中的下限比较合理。因此按边坡稳定强度折减的安全系数 1.205 与中外规范的允许值均接近。

表 2 中外挡土墙规范安全系数取值标准对比表

Table 2 Standards for safety factor of retaining walls in China and abroad

规范	安全系数允许值	说明
中国水工挡土墙设计规范 ^[1] (SL379-2007)	1.35,1.3,1.25,1.2	土质地基, 正常工况, 依次对应 1 到 4 级挡土墙
中国铁路路基支挡结构设计规范 ^[2] (TB10025-2006)	1.3	正常工况下
加拿大地基手册 ^[3]	1.5~2.0	沿用了 Terzaghi 和 Peck 的建议值
美国公路桥梁设计规范 ^[4]	1.5	配合分项系数的使用

表 3 中外边坡规范安全系数取值标准对比表

Table 3 Standards for safety factor of slopes in China and abroad

规范	安全系数允许值	说明
中国水利水电工程边坡设计规范 ^[5] (SL386-2007)	1.3~1.25,1.25~1.2, 1.2~1.15,1.15~1.1	正常运用条件, 依次对应 1 到 4 级边坡
加拿大地基手册 ^[3]	1.3~1.5	沿用了 Terzaghi 和 Peck 的建议值
香港边坡工程手册 ^[7]	1.2-1.4	无

通过本节的论述,可以认为,目前我国水利和铁路规范对于按方案 1 定义的安全系数规定值是偏小的,与国际规范不接轨,在理论上也存在不足之处。

1.3 可靠度分析

上面提到了在重力式挡土墙抗滑稳定安全判据应采用不同的安全系数定义出现的问题。事实上,对建筑物抗滑稳定的安全评价还可以有另一种判据,即可靠度指标。为此,不妨再以本算例,使用以下关于可靠指标的计算来说明这一点。

建立在安全系数基础的极限平衡方法,极限状态方程式可以表示为:

$$G = F(c, f, f_o) - 1 = 0 \quad (15)$$

则相应的可靠度指标 β 的计算公式为:

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} = \frac{\mu_F - 1}{\sigma_F} \quad (16)$$

上述公式中, μ_F 和 σ_F 分别为安全系数的均值和标准差,通过式(16),我们建立起安全系数和可靠指标之间的相互关系。式(16)在众多学术论文^[8-14]中均有采用,并纳入水利水电行业相应规范^[5-6]。

引入无量纲变量,

$$c^* = \frac{c - \mu_c}{\sigma_c} \quad (17)$$

$$f^* = \frac{f - \mu_f}{\sigma_f} \quad (18)$$

$$f_o^* = \frac{f_o - \mu_{f_o}}{\sigma_{f_o}} \quad (19)$$

则可靠指标 β 的物理意义是在此无量纲坐标系中，从原点至以下式(20)代表的状态边界面的最短距离，

$$G = F(c^*, f^*, f_o^*) - 1 = 0 \quad (20)$$

我国《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》^[6](简称水工统标)对水利工程中结构允许可靠指标作出如下表4的规定，表中第一类破坏指非突发性破坏；第二类破坏指突发性破坏，无明显征兆，一旦发生事故难于补救或修复，水利工程结构破坏按第二类对待。

表4 水工统标规定的结构允许可靠指标 β_a

Table 4 Allowable reliability index specified by the Chinese code for hydraulic structures

结构安全级别	I 级	II 级	III 级
一类破坏	3.7	3.2	2.7
二类破坏	4.2	3.7	3.2

对于一级挡土墙，本文选用的建议值为 3.7。

确定强度指标的变异系数是进行可靠度分析一项重要内容，表5总结了有关文献。综合分析，本文采用摩擦系数和粘聚力的变异系数分别为 0.1 和 0.2。

表5 地基土强度参数变异系数的工程文献统计

Table 5 Review of the coefficients of variability of soil strength parameters from engineering literatures

强度参数	小浪底工程	高大钊 ^[15]	Chowhury ^[16]	Duncan ^[17]	Orr ^[18]
摩擦系数 V_f	0.06-0.13	0.12-0.37	0.068-0.097	0.02-0.13	0.05-0.15
粘聚力 V_c	0.18-0.25	0.16-0.47	0.14-0.25	0.10-0.35	0.20-0.40

现针对前一节中两种不同的安全系数定义方式所对应的功能函数采用用一次二阶矩法进行可靠度分析计算，相应方案 1 和 2，计算结果如表 1(续)第 9 列所示。

本节的计算结果表明，尽管使用了公式(4)和(14)不同安全系数定义，得到安全系数值差异显著，但却获得了相同的可靠指标。究其原因，是因为两种定义方式实际上对应着相同的极限状态方程，因此得到了相同的可靠指标。

2. 分项系数设计方法

2.1 概述

从上述分析中可以看出，如果我们使用可靠度分析方法，那么挡土墙的抗滑稳定安全判据将不受安全系数的不同定义的影响。但是，可靠度分析方法目前还难以直接在工程设计中广泛应用。另一方面，用极限状态分项系数方法来替代传统的单一安全系数判据，则已是必然的趋势。依据目标可靠指标时获得的验算点来标定分项系数，实际上就是一种以可靠度理论指导下的实用的挡土墙抗滑稳定分析方法，为此，对这一体系和分项系数的标定方法做一简要回顾。

我国《工程结构可靠性设计统一标准》^[19](下文简称“统标”)对使用分项系数设计方法的

承载力极限状态表达式作了规定,

$$\gamma_0 \cdot S \leq R\left(\frac{R_k}{\gamma_f}, \alpha_d\right) \quad (21)$$

其中, γ_0 为结构重要性系数, S 为荷载效应的组合标准值, R_k 为抗力材料的强度设计标准值, γ_f 为材料性能分项系数, α_d 为结构几何参数标准值。在本文研究中 γ_0 , α_d 取值为 1。可以根据式对安全系数的定义, 将式(21)改造为

$$F\left(\frac{c}{\gamma_c}, \frac{f}{\gamma_f}, \frac{f_o}{\gamma_{fo}}\right) - 1 \geq 0 \quad (22)$$

假如相应的可靠指标恰好就是规范规定的允许值(在本文中, $\beta_a=3.7$), 当我们依据式(17)到(19)获得了 c^*, f^*, f_o^* 后, 也就获得了分项系数的标定值。

$$\gamma_c = \frac{c_k}{c^*} \quad (23)$$

$$\gamma_f = \frac{f_k}{f^*} \quad (24)$$

$$\gamma_{fo} = \frac{f_{ok}}{f_o^*} \quad (25)$$

对上面例子, 无论采用方案 1 或方案 2, 计算获得的可靠指标均为 $\beta=3.719$ (接近于规范允许值 $\beta_a=3.7$), 相应的分项系数 $\gamma_c=1.30, \gamma_f=1.21, \gamma_{fo}=1.17$ 见表 1(续表)中第 13-15 列, 可见用不同的安全系数定义得到的分项系数也是完全一致的。

2.2 分项系数的标定和讨论

通过上例, 我们已经发现相应于目标可靠指标 3.7, 对于这一特定的算例相应的分项系数为分别为 $\gamma_c=1.301, \gamma_f=1.209, \gamma_{fo}=1.170$ 。

现回顾已有设计规范对挡土墙的设计参数、分项系数规定, 对于挡土墙的设计, 欧洲的岩土设计手册(Eurocode 7)^[20]和香港挡土墙设计规范(Geoguide 1)^[21]明确规定采用分项系数设计方法, 并对荷载、抗力和材料参数等的分项系数进行了具体规定; 美国公路桥梁设计规范(AASHTO)^[4]和加拿大岩土手册^[3]中定值法和分项系数设计方法并存, 分别规定了 K 和 γ 的取值, 表 6 对其部分取值进行了规定。

表6 国内外挡土墙规范材料参数分项系数规定值

Table 6 Specified value of partial coefficient of the retaining wall criterion at home and abroad

分项系数类型		欧洲	加拿大	美国	中国香港
荷载	静荷载	0.9~1.1	0.8~1.25	0.9~1.4	1.00
	活荷载	1.50	1.50	0.5~1.6	1.50
强度	填土内摩擦角	1.25	1.25	—	—
指标	填土粘聚力	1.25	1.50	—	—

基底面摩擦系数	-	-	-	1.20
---------	---	---	---	------

可见，对于这一特例，如果沿用强度指标的变异系数($V_c=0.2, V_f=V_{f_0}=0.1$)，标定的成果和欧洲规范和香港规范是基本一致的。

3. 普适性考核

3.1 基本原理

以上对于一个特定的设定目标可靠指标 β_a 为 3.7（相应一级挡土墙的允许值）例子，在对填土和墙底接触面的摩擦系数、填土的凝聚力变异系数分别为 0.1 和 0.2 的条件下，获得分项系数的“理论”标定值 $\gamma_c=1.30, \gamma_f=1.21, \gamma_{f_0}=1.17$ 。对方案 1 和 2，也可将相应的安全系数计算值 1.205 和 1.637 分别标定为一级挡土墙的允许值 F_a 。如果我们将这一特定的例子的输入参数稍作变动，例如，令墙高 H 在 6 至 15m 范围变动，那么，可以得到 β 值和方案 1 和 2 安全系数 F ，分别如表 7 的第(5)、(3)列所示。现在的问题是，上面标定的这一系列指标对于 H 值不是 9m，因而可靠指标 β 值并不同于 3.7，方案 1 和 2 安全系数也不同于 1.205 和 1.637 的情况，相应的计算值是否都具有相同的风险控制标准。为此，陈祖煜等^[8-12]在以往对于土石坝和重力坝抗滑稳定分析判据的研究中提出了“相对安全率”这一个量化的指标，为在不同条件下计算所得的可靠指标和安全系数进行相关和比较提供了一个平台。

相应某一安全系数的计算值 F ，定义其相对安全率 η_F 为

$$\eta_F = \frac{F}{F_a} \quad (26)$$

此外，我们还定义一个分项系数方法的相对安全率 η_P ，它使式(22)变为等式

$$F\left(\frac{c}{\eta_P \gamma_c}, \frac{f}{\eta_P \gamma_f}, \frac{f_0}{\eta_P \gamma_{f_0}}\right) - 1 = 0 \quad (27)$$

陈祖煜等^[10-12]通过理论推导，提出相应可靠指标的相对安全率 η_R 表达式

$$\eta_R = (\beta - \beta_a) \sigma_F + 1 \quad (28)$$

在前期的研究工作中，分别对土石坝边坡稳定和重力坝深层抗滑稳定的允许安全系数进行验证，发现在某一目标工况下标定的这些允许值可以保证在任何其它情况下，分别有

$$\eta_R = \eta_F \quad (29)$$

$$\eta_R = \eta_P \quad (30)$$

现在我们来考察本文的挡土墙算例。计算所得 η_R ，相应方案 1 和 2 的 η_F 和 η_P 如表 7 中列(6)、(4)、(8)所示。线性相关拟合如图 2 所示。可见，对于所有的情况，均实现了式(29)和(30)的预期关系，相关系数非常接近 1，但方案 1 的 η_P 和 η_R 拟合情况稍差。在下面的研究中，我们仅列举相应方案 2 的成果。

表 7 不同墙高 H 挡土墙抗滑稳定计算成果

Table 7 Anti sliding stability calculation results for retaining wall with different height

模型		确定性模型			可靠度方法		分项系数方法	
符号		μ_F	σ_F	F	η_F	β	η_R	η_P
列数		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(8)
公式		(11)	(13)	(11)	(26)	(13)	(28)	(27)
方案 1 墙高 $H(m)$	6	1.632	0.410	1.805	1.102	3.981	1.115	1.074
	8	1.376	0.362	1.684	1.029	3.804	1.037	1.023
	10	1.200	0.329	1.596	0.975	3.644	0.981	0.984
	12	1.072	0.306	1.530	0.935	3.502	0.939	0.952
	14	0.975	0.289	1.478	0.903	3.375	0.906	0.925
方案 2 墙高 $H(m)$	6	1.372	0.093	1.236	1.030	3.981	1.026	1.024
	8	1.346	0.091	1.214	1.012	3.804	1.009	1.007
	10	1.324	0.089	1.196	0.997	3.644	0.995	0.993
	12	1.306	0.087	1.181	0.984	3.502	0.983	0.982
	14	1.291	0.086	1.169	0.974	3.375	0.972	0.972

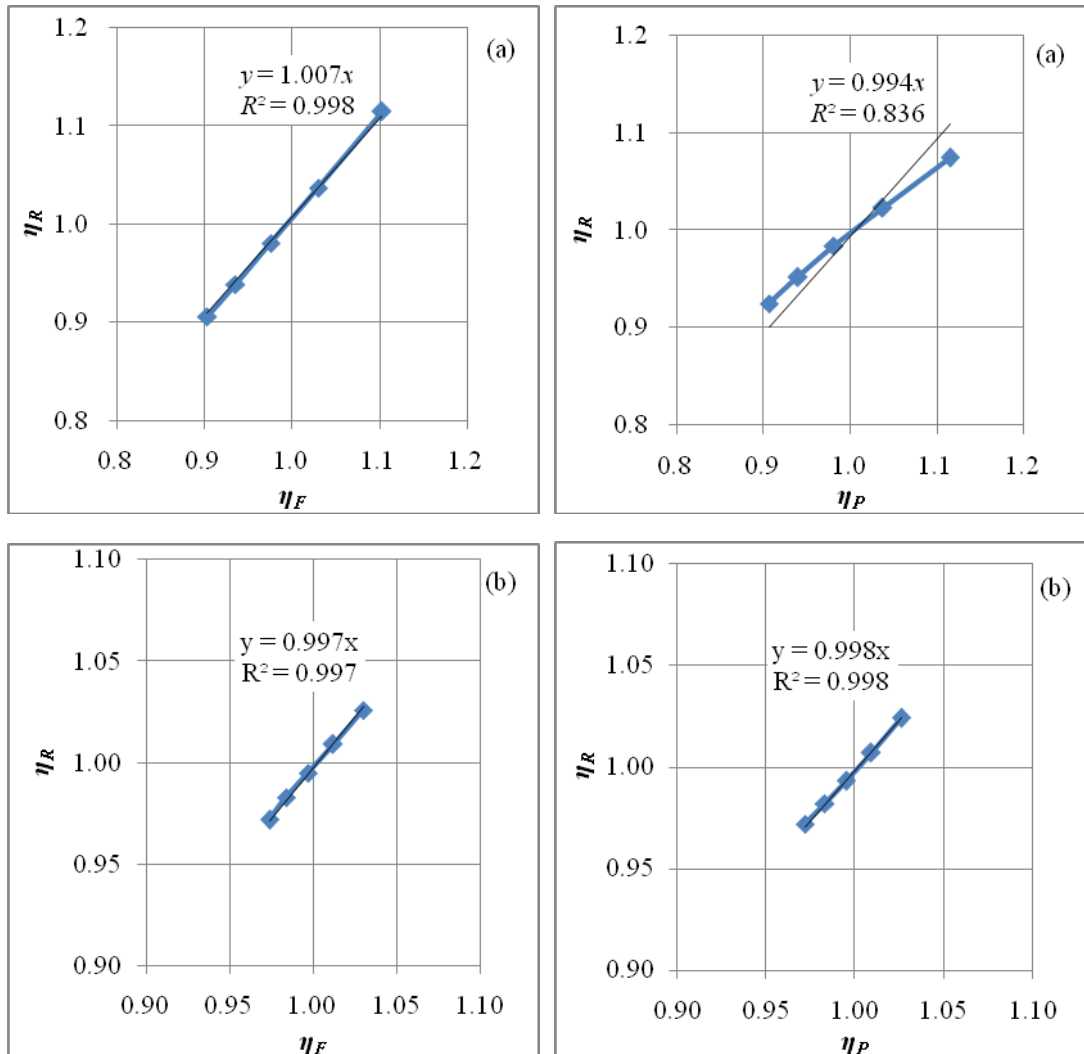


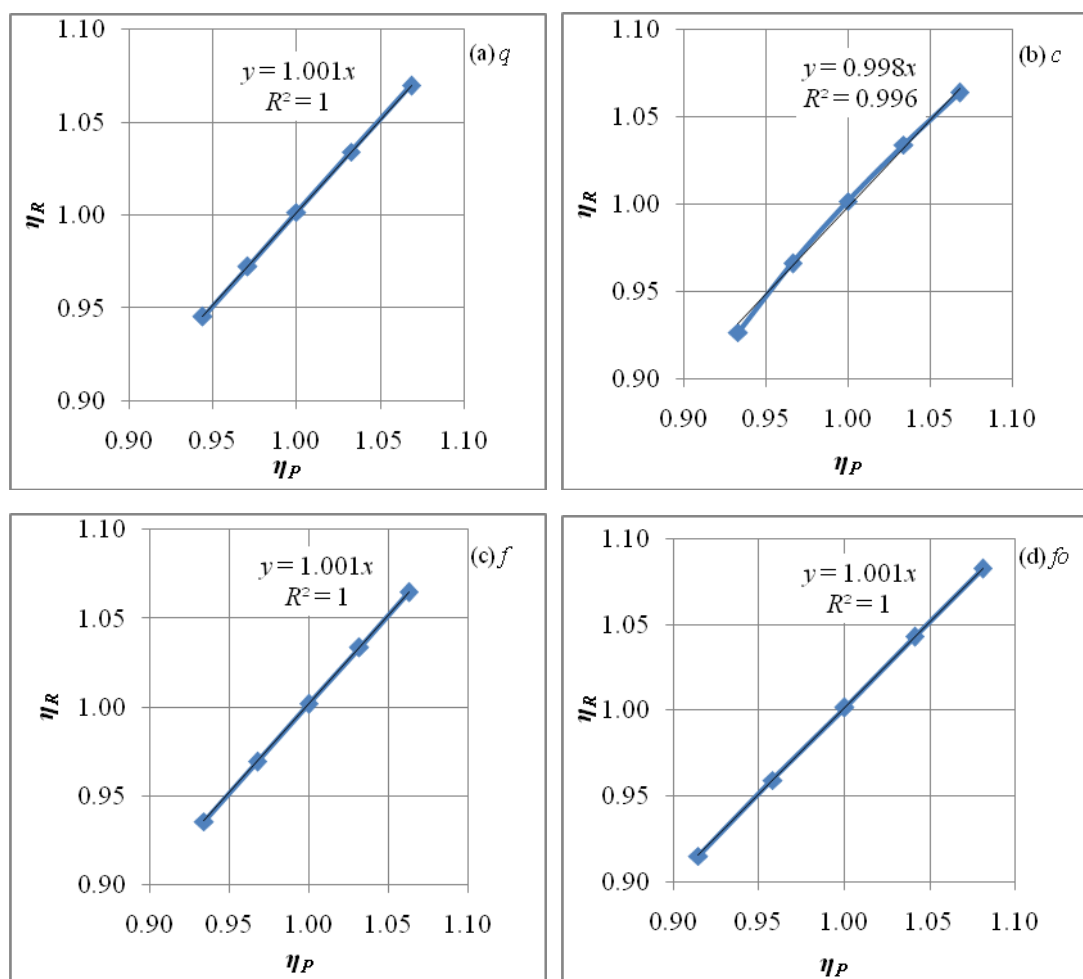
图 2 不同墙高 H 对方案 1、2 各相对安全率线性回归图

Fig 2 Linear regression of the ratio of safety margin for different wall height to plan 1 and 2

(注: 图中数据点自左至右分别相应墙高 6,8,10,12,14m 的值; (a)对应方案 1; (b)对应方案 2)

3.2 参数普适性验证

上面，我们通过变动墙高验证了所标定的分项系数的普适性。本节拟在更大的范围进行验证。即保持土体及基底面变异系数($V_c=0.20$, $V_f=V_{f_0}=0.10$)不变，依次改变：(1)墙后土体均布荷载 q 以 10KN/m 的增量由 80KN/m 增加到 120KN/m , (2)粘聚力 c 以 5kPa 的增量由 10kPa 增加到 30kPa , (3)摩擦系数 f 以 0.05 的增量从 0.6 变化到 0.8 , (4)基底面摩擦系数 f_0 以 0.05 的增量率由 0.3 增加到 0.5 , (5)墙顶宽 D 以 0.5m 的增量从 2m 增加到 4m , (6)左侧坡度 m 以 0.05 的增量从 0.4 增加到 0.6 。得到相对安全率 η_P 和 η_R 的回归曲线关系如图 2 所示。结果表明，分项系数方法相对安全率和可靠度方法相对安全率依然具备较好的相关性和可比性。由此亦可证明，在一般情况下，第 2 节中在可靠度分析的基础上所标定得到的挡土墙强度参数的分项系数值，和对应挡土墙可靠指标是建立在同一风险安全标准之上的。



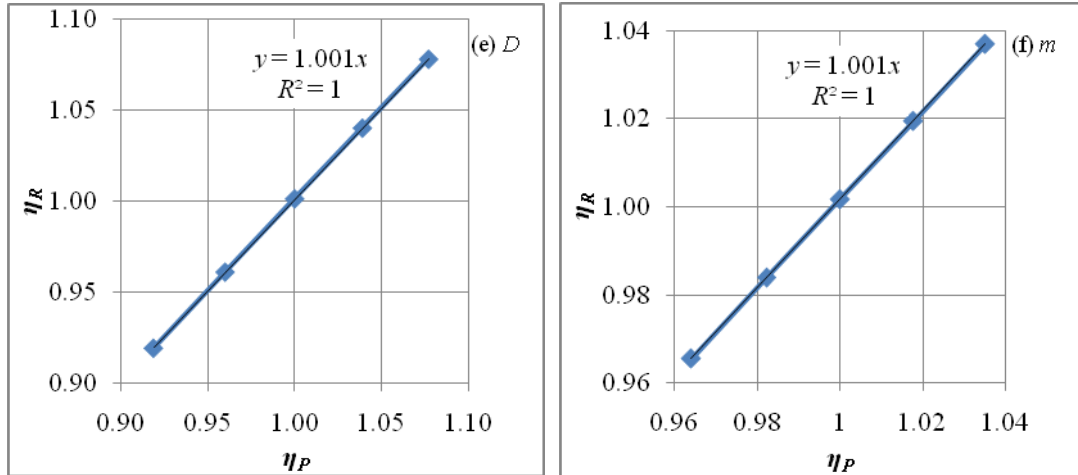


图 3 挡土墙 $\eta_P \sim \eta_R$ 关系的普适性研究:

(a) $q=80, 90, 100, 110, 120\text{kN/m}$; (b) $c=10, 15, 20, 25, 30\text{kPa}$; (c) $f=0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80$;
 (d) $f_0=0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5$; (e) $D=2, 2.5, 3, 3.5, 4\text{m}$; (f) $m=0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6$ 。

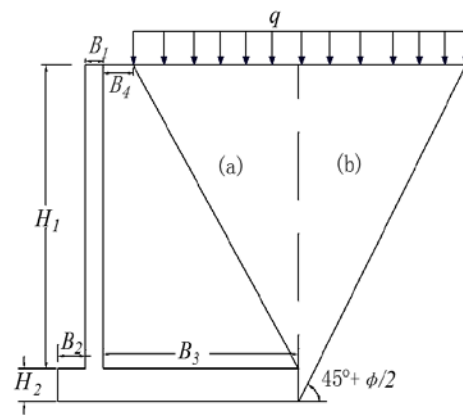
Fig 3 Investigation on the universal applicability based on ' η_P versus η_R ' study

4. 工程实例验证

现以京石项目部涿州火车站路基扶壁式挡土墙为例^[22]进行分析计算, 考察本文对于分项系数的标定值的可行性。挡土墙位于路基两侧长 315 米, 高 12.0 米, 基础为土质地基, 地下水位于墙底以下, 基底面与地基层间只考虑摩擦系数影响, 回填土为非粘性土, 为简化计算, 不考虑前趾土重及被动土压力影响。荷载组合为基本组合, 其剖面图如下图 4 所示, 具体结构和土体参数见下表 8 示:



(1) 扶壁式挡土墙现场施工图



(2) 横截面结构图

图 4 涿州火车站路基扶壁式挡土墙现场及其横截面结构图

(1) Construction site map of the buttressed retaining wall; (2) Cross section structure diagram

Fig 4 The Zhuozhou Railway Station subgrade counterfort retaining wall and its cross section structure

表 8 挡土墙墙体结构与土体参数表

Table 8 The parameters of the retaining wall and soil mass

参数名	符号单位	大小	参数名	符号单位	大小
墙顶宽度	$B_1(\text{m})$	0.6	前趾宽度	$B_2(\text{m})$	0.9
后踵宽度	$B_3(\text{m})$	6.0	墙身高度	$H_1(\text{m})$	11
墙趾高度	$H_2(\text{m})$	1.0	扶肋顶宽	$B_4(\text{m})$	1.0
填土内摩擦角	$\phi(^{\circ})$	40	填土凝聚力	$c(\text{kPa})$	0
墙后均布荷载	$q(\text{kN/m})$	50	填土容重	$\gamma_1(\text{kN/m}^3)$	18
基底面摩擦系数	f_o	0.5	墙体容重	$\gamma_2(\text{kN/m}^3)$	24

(1) 确定型模型稳定验算

对土体和墙体进行稳定分析，将(a)和墙体等效为重力式挡土墙，(b)视为按库伦土压力理论分析的滑动土楔。强度指标的设计取值取 0.2 分位值，经过受力分析后，基底面所受竖向力的荷载之和 $\sum G=1801.4 \text{ kN}$ ，水平土压力 $\sum E=478.9\text{kN}$ ，那么抗滑稳定安全系数为

$$F = \frac{f_o^* \cdot \sum G}{\sum E} = 1.722 > 1.35$$

由此可见，该扶壁式挡土墙满足稳定性要求。

(2) 分项系数设计方法验算

第 2 节中通过可靠度理论已经建立起了一级挡土墙强度指标的分项系数值： $\gamma_f=1.209, \gamma_{f_o}=1.170$ 。由式(16)来进行分项系数设计验算，将分项系数值代入到式中，其中结构重要性系数值取 1.0，可以得到：

$$\gamma_o \cdot S = \gamma_o \cdot \sum E' = 624.5\text{kN}$$

$$R = f_o' \cdot \sum G = 705.3\text{kN}$$

从计算结果可看出， $\gamma_o \cdot S < R$ ，满足设计要求。

同时，也可以采用可靠度分析来进行分项系数验算，通过相对安全率的比较比较来确定设计是否满足要求。针对方案 1 和 2，将表 8 中参数以及强度指标分项系数值代入到分项系数标定所使用的 Excel VBA 程序中，可以得到对应方案 1、2 的分项系数方法相对安全率 $\eta_p=1.090$ 和 1.046，均大于极限值 1.0，显然都满足设计要求。

(3) 敏感性分析及讨论

针对该工程案例，若将填土的内摩擦角调整为 $\phi=35^{\circ}$ 时，按照上述计算流程，获得抗滑稳定安全系数 $F=1.419$ ，此时满足我国水利、交通规范允许值，但相比加拿大、美国等规范值却显不足；进行分项系数设计方法验算， $\gamma_o \cdot S=725.8\text{kN}$ ， $R=705.3\text{kN}$ ，也同样达不到设计要求。也就是说，我国现行规范的挡土墙标准是要低于国际标准的，这一状况需引起工程实践的重视。

5. 结论

我国的挡土墙设计规范规定的允许安全系数取值标准和国外标准相比偏低,采用抗力除以土压力的安全系数计算方法也存在理论缺陷。顺应工程设计从单一安全系数向分项系数方法转轨的潮流,本文将可靠度分析方法引入到挡土墙稳定计算中,在设定目标可靠指标为3.7、土的凝聚力和摩擦系数的变异系数分别为0.2和0.1的条件下,对一个特定的算例,填土的凝聚力、摩擦系数和基底的摩擦系数分项系数值标定值分别为 $\gamma_c=1.301$, $\gamma_f=1.209$ 和 $\gamma_{fo}=1.170$ 。然后就不同墙高、宽、坡度和强度指标、表面荷载使用“相对安全率”进行普适性验证,发现,在所有的情况下,均满足 $\eta_R=\eta_P$ 的条件。本文提出的确定安全标准和判据的方法可供规范编制参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部.水工挡土墙设计规范(SL/379-2007)[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
The Ministry of Water Conservancy of the People's Republic of China. Hydraulic retaining wall design specification (SL/379-2007) [S].Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国铁道部.铁路路基支挡结构设计规范(TB/10025-2006)[S].北京:中国铁道出版社,2006.
The ministry of railways of the People's Republic of China. Code for design on retaining structures of railway subgrade. (TB/10025-2006) [S].Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [3] Canadian Geotechnical Society Foundations Committee [S]. Canadian Foundation Engineering Manual.4nd ed. Richmond: BiTech Publisher Ltd, 2006.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials[S]. LRFD Bridge Design Specification. Customary U.S. Units, Washington, D.C, 2012.
- [5] 中华人民共和国水利部.水利水电工程边坡设计规范(SL386-2007)[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
The Ministry of Water Conservancy of the People's Republic of China. Design code for slopes in hydraulic engineering (SL/386-2007) [S].Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国住建部.水利水电工程结构可靠性设计统一标准(GB50199-2013)[S].北京:中国计划出版社,2014.
Housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of hydraulic and Hydropower Engineering Structures. (GB50199-2013)[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [7] The Hong Kong Geotechnical Engineering Office. Geoguide 5: Guide to slope maintenance [S]. Hong Kong: Government Publications Centre: 2003.
- [8] 周建平,王浩,陈祖煜等.特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究:(一)理论基础和等级标准[J].水利学报,2015,46(05):505-514.
Zhou J P, Wang H, Chen Z Y, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I: fundamentals and criteria [J]. Journal of Hydraulic

- Engineering, 2015, 46(05):505-514. (in Chinese)
- [9] 周建平, 钮新强, 贾金生等. 重力坝设计二十年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008:267-277.
Zhou J P, Niu X Q, Jia J S, et al. Design of concrete gravity dams – a 20 year perspective [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008:267-277. (in Chinese)
- [10] Chen Z Y, Chen L H, Xu J C, et al. Quantitative deterministic versus probability analyses based on a safety margin criterion. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 1988–2000
- [11] 陈祖煜, 徐佳成, 孙平等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析: (一)相对安全率方法[J]. 水力发电学报, 2012,31(3):167-178.
Chen Z Y, Xu J C, Sun P, et al. Reliability analysis on sliding stability of gravity dams: Part I, an approach using criterion of safety margin ratio [J]. *Journal of Hydroelectric Power*, 2012, 31(3):167-178. (in Chinese)
- [12] 陈祖煜, 徐佳成, 孙平等. 重力坝抗滑稳定可靠度分析: (二)强度指标和分项系数的合理取值研究[J]. 水力发电学报, 2012,31(3):160-167.
Chen Z Y, Xu J C, Sun P, et al. Reliability analysis on sliding stability of gravity dams: Part II, determination of shear strength parameters and partial factors [J]. *Journal of Hydroelectric Power*, 2012, 31(3): 160-167. (in Chinese)
- [13] 杜效鹤, 李斌, 陈祖煜等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究: (二)高土石坝坝坡稳定安全系数[J]. 水利学报, 2015, 46(06):640-649.
Du X H, Li B, Chen Z Y, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part II: Slope stability of embankment dams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(05):505-514. (in Chinese)
- [14] 李斌, 陈祖煜, 王玉杰等. 拱座抗滑稳定可靠指标和分项系数取值标准研究[J]. 水力发电学报, 2014,33(6):202-212.
Li B, Chen Z Y, Wang Y J, et al. Appraisals on the criteria for arch dam abutment stability analysis based on the reliability index and partial factor approaches [J]. *Journal of Hydroelectric Power*, 2014, 33(6):202-212. (in Chinese)
- [15] 高大钊, 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
Gao D Z, Principles of soil mechanics reliability [M]. Beijing: China building industry press, 1989.
- [16] Chowdhury R N. Recent developments in landslide studies: probabilistic methods, state-of-the-art report. 4th International Symposium on Landslide, Toronto. 1984.1:209-228.
- [17] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(4):307-316.
- [18] Orr T L L. Selection of characteristic values and partial factors in geotechnical designs to Eurocode 7. *Computers and Geotechnics*, 2000. 26(3-4):263-279.
- [19] 中华人民共和国建设部. 工程结构可靠性设计统一标准(GB50153-2008)[S]. 中国建筑工业出版社, 2008.
The ministry of construction of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of engineering structures (GB50153-2008) [S]. China building industry press, 2008.
- [20] The European standard. Eurocode 7: Geotechnical design[S]. the authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2004.
- [21] The Hong Kong Geotechnical Engineering Office. Geoguide 1: Guide to Retaining Wall

Design[S]. Hong Kong: Government Publications Centre: 1993.

[22] 任庚.高扶壁式挡土墙设计及应用研究[D].中国地质大学(北京).2013.

Ren G, Research on the design and application of high retaining wall supporting wall [D].
China University of Geosciences (Beijing). 2013.