

上海规范重力式围护墙稳定性若干问题探讨

梁发云¹, 杨开彪^{1,2}, 李镜培¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 广东省建筑设计研究院, 广东 广州 510010)

摘 要: 重力式围护墙是软土地区常用的基坑支护形式, 目前关于重力式围护墙的可靠度分析还不够完善, 各因素对稳定性的影响机制等也存在一些疑问。以收集到的上海地区重力式围护墙实际工程为例进行可靠度分析, 对水泥土重力式围护墙稳定性分析中的相关问题进行了探讨。分析结果表明, 上海地区实际工程的设计安全水准通常高于规范规定值, 其中水平滑动多为重力式围护工程稳定性验算的控制失效模式; 通过提高插入比和墙体宽度可改善水泥土重力式围护基坑的抗倾覆、抗水平滑动稳定性的安全状态; 对于整体稳定性, 提高插入比较有效, 墙体宽度的变化对其影响不敏感。

关 键 词: 重力式围护墙; 稳定性; 上海基坑规范; 影响因素

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2015) 增 1—0199—05

Discussion on stability of gravity retaining wall in Shanghai design code

LIANG Fa-yun¹, YANG Kai-biao^{1,2}, LI Jing-pei¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: Cement mixing gravity retaining wall is widely used as a supporting method in soft soil area. It is not clear enough about the reliability analysis of gravity retaining structures in Shanghai region, and doubts about the mechanism of various factors still exist. By analyzing some practical projects collected in Shanghai, this paper discusses some problems on both the reliability levels and stability of gravity retaining wall. The influences of some factors such as the insertion ratio, the excavation depth and the width of wall on its stability are also evaluated. The results show that the safety level of practical projects is usually higher than requirements in the design code. In these typical stabilities, the sliding stability is usually judged as the controlling mode of stability checking. The security status of sliding stability and overturning stability can be improved obviously when the width and insertion ratio of the gravity retaining wall. In addition, the increase of insertion ratio contributes much more than the increase of the wall width in improving the security status of overall stability.

Keywords: gravity retaining wall; stability; Shanghai code for excavation engineering; influential factors

1 引 言

水泥土重力式围护墙(简称重力式围护墙)具有施工方便、效率高、工期短、成本低等优点,是软土地区应用广泛的一种基坑围护形式^[1]。国家行业标准《建筑基坑支护技术规程》^[2]采用单一的安全系数法进行岩土稳定性的承载力极限状态设计,而在软土地区具有代表性的地方标准上海市《基坑工程技术规范》^[3](以下简称上海规范)则采用了分项系数表达的计算公式,在表达形式上与国家行业标准^[2]有所不同。需要指出的是,该分项系数主

要依据工程经验确定,并未实行真正意义上的概率极限状态设计,本质上仍属于传统的安全系数法。而场地地质条件、土性参数的变异性、周边环境等因素都会对基坑工程的安全性产生影响,若将这些不确定因素归结为单一安全系数,以此来评价基坑工程的安全性是不妥当的。

可靠度理论可以对各种不确定性加以定量考虑,通过可靠指标 β 来评价工程结构的安全度。与结构工程相比,岩土工程相关规范向可靠度设计接轨相对滞后,随着可靠度理论实用化进程的推进,岩土工程设计规范逐渐向以概率论为基础的分项系

数设计方法转变。

况龙川等^[4]探讨了上海地区重力式围护墙在不同挖深下各稳定失效模式的可靠度水平,分析表明地基承载力和水平滑移是水泥土重力式围护墙的控制失效模式。本文依据上海地区实际工程分析了重力式围护墙的稳定性可靠度,讨论了主要影响因素对重力式围护墙稳定性的影响。

2 关于稳定性可靠度的讨论

依据 JC 法和上海规范^[3],建立水泥土重力式围护基坑工程稳定性的极限状态方程,并对搜集的上海地区重力式围护墙工程进行可靠度分析。

2.1 计算方法

上海规范对于水泥土重力式围护基坑的稳定性验算内容包括整体稳定性、抗倾覆稳定性、抗水平滑动稳定性、坑底抗隆起稳定性、抗渗流稳定性以及抗承压水稳定性等 6 种情况^[3],根据目前工程设计经验,本文仅对起主要控制作用的整体稳定性、抗倾覆稳定性和抗水平滑动稳定性等 3 种验算模式^[5]进行分析。需要说明的是,下文讨论所采用的计算图式和计算公式均来源于上海规范,与国家行业标准的规定有所不同^[2]。

重力式围护墙的稳定性计算图式如图 1 所示。图中, F_p 、 F_a 、 F_w 分别为墙前被动土压力、墙后主动土压力和净水压力(水压力为坑内外水压力之差,这里未考虑墙底水压力); Z_p 、 Z_a 、 Z_w 分别为墙前被动土压力、墙后主动土压力和静压力作用点至墙底的距离; E_R 为沿墙底面的抗滑力; H 为挖深; D 为插入深度; B 为围护墙宽度; G 为墙体自重; q 为超载; O 为最危险圆弧滑动面的圆心; W_i 为第 i 条土条的自重; b_i 为第 i 条土条的宽度; α_i 为第 i 条圆弧中点的切线和水平线的夹角。

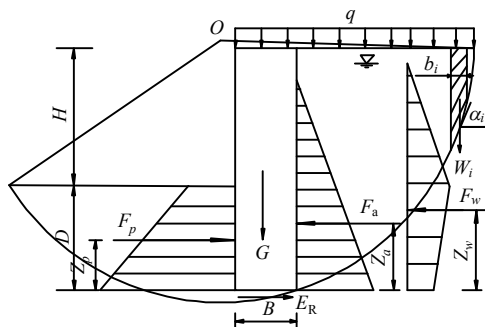


图 1 计算图式

Fig.1 Computational mode

重力式围护墙的 3 种稳定验算模式的极限状态

方程见式 (1), 其中 M_R 为抗力项, M_S 为荷载项。

$$Z = M_R - M_S = 0 \quad (1)$$

整体稳定性 M_R 、 M_S 可由式 (2) 表示。

$$\left. \begin{aligned} M_R &= \sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n (q_i b_i + W_i) \cos \alpha_i \tan \varphi_i \\ M_S &= \sum_{i=1}^n (q_i b_i + W_i) \sin \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: c_i 、 φ_i 分别为第 i 条土条滑动面上土的黏聚力和内摩擦角; q_i 为第 i 条土条处的地面超载值; l_i 为第 i 条土条沿滑动面的弧长。

抗倾覆稳定性 M_R 、 M_S 公式为

$$\left. \begin{aligned} M_R &= F_a Z_a + F_w Z_w \\ M_S &= F_p Z_p + GB/2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

抗水平滑动稳定性 M_R 、 M_S 公式为

$$\left. \begin{aligned} M_R &= F_a + F_w \\ M_S &= F_p + G \tan \varphi + cB \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: c 、 φ 分别为墙底土层的黏聚力和内摩擦角。

抗剪强度指标 c 、 φ 可视为随机变量, 将抗力项 M_R 和荷载项 M_S 简化为随机变量 c 、 φ 的函数。通过将 M_R 、 M_S 在 c 、 φ 均值点处泰勒展开并取线性项, 可分别求得 M_R 、 M_S 的均值和变异系数^[5]。

依据上海现代建筑设计集团搜集的上海地区工程资料, 对勘察报告中的场地土工试验成果进行统计, 由此得到了各土层直剪固结快剪峰值强度指标 c 、 φ 的场地变异系数统计值, 对其进行 95% 置信度的区间估计, 见表 1。

表 1 上海地区各土层场地变异系数
Table 1 Field variability coefficient of soils
in Shanghai area

典型土层	置信区间	
	黏聚力 δ_c	内摩擦角 δ_φ
②粉质黏土	0.16, 0.22	0.09, 0.13
③淤泥质粉质黏土	0.11, 0.23	0.12, 0.24
④淤泥质黏土	0.07, 0.13	0.08, 0.16
⑤灰色黏土	0.07, 0.27	0.08, 0.22
⑤ ₁₋₁ 灰色黏土	0.05, 0.13	0.09, 0.15
⑤ ₁₋₂ 灰色粉质黏土	0.07, 0.17	0.08, 0.18

本文采用 95% 置信度的区间上限值来反映上海地区土层的变异性, 计算结果偏于安全。适用于土性参数的概率分布形式有正态分布和对数正态分布^[6], 采用正态分布会使失效概率偏大^[7], 本文采用对数正态分布来描述土性参数。为简化计算, 假定 c 、 φ 和 M_R 、 M_S 服从对数正态分布且相互独立。

分析中第①层素填土的重度可取 18 kN/m^2 ，黏聚力 c 取 5 kPa ，内摩擦角 φ 取 20° ，其变异系数近似取为 0 。其他各土层参数则按实际工程的统计结果取用，在此不再列出，围护墙重度取 19 kN/m^2 ，不考虑其变异性，地下水位统一取地面下 0.5 m ，超载取 20 kPa 。按 JC 法编制 Matlab 程序。

2.2 实际工程分析

对收集到的上海地区 23 个重力式挡墙工程进行分析，求得各稳定性模式的安全系数和可靠指标，计算结果见表 2。表中，将整体稳定性、抗倾覆稳定性和抗水平滑动稳定性的安全系数分别表示为 K_z 、 K_q 、 K_h ；可靠指标分别表示为 β_z 、 β_q 、 β_h 。上海规范关于水泥土重力式围护的稳定性设计安全系数的规定见表 3。

表 2 计算结果汇总
Table 2 Results of calculation

统计值	K_z	β_z	K_q	β_q	K_h	β_h
min	1.40	3.17	1.13	1.70	1.26	1.63
max	2.22	9.84	2.20	9.57	2.59	6.38
μ	1.72	6.16	1.59	4.90	1.69	3.72
δ	0.13	0.30	0.19	0.50	0.21	0.29

注：min 为各统计量的最小值；max 为最大值； μ 为均值； δ 为变异系数。

表 3 上海基坑规范设计安全系数
Table 3 Design safety factor of Shanghai code

稳定性	K_z	K_q	K_h
设计安全系数	1.45	1.10	1.20

从表 2、3 可以看出，除个别工程外，各工程稳定性安全系数均要大于规范设计安全系数，这表明实际工程的设计安全水准通常要高于规范规定值。

上海地区实际工程各稳定性可靠指标均值所对应失效概率见表 4。其中抗水平滑动稳定性可靠指标最低，均值为 3.72 ，对应失效概率为 9.96×10^{-5} ，水平滑动多为稳定性验算的控制失效模式。

表 4 可靠指标均值对应的失效概率
Table 4 Failure probability of mean reliability indexes

可靠指标均值	失效概率
$\beta_z = 6.16$	3.64×10^{-10}
$\beta_q = 4.90$	4.79×10^{-7}
$\beta_h = 3.72$	9.96×10^{-5}

3 关于稳定性影响因素的讨论

重力式围护墙通过对土体加固形成了具有一定厚度和嵌入深度的围护墙体，围护墙插入比 θ ($\theta =$

H/D)、墙体宽度 B 和开挖深度 H 等都会对基坑稳定性产生影响。为分析各因素对基坑稳定性的影响，对其分别进行探讨。选择上述实际工程中 4 个典型场地进行分析，各场地土层参数见表 5。

表 5 典型工程场地土层参数
Table 5 Soil parameters of typical projects

土层	工程	H/m	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$
①	1	1.8	5.0	20.0	18.0
	2	1.5	5.0	20.0	18.0
	3	2.0	5.0	20.0	18.0
	4	1.6	5.0	20.0	18.0
② ₁	1	0.8	3.0	17.0	18.6
	2	1.7	20.0	19.0	18.1
	3	1.3	18.0	19.5	18.6
	4	0.9	7.0	16.5	18.1
② ₂ 、② ₃	1	0.9	16.0	18.0	17.4
	2				
	3	2.3	7.0	28.5	18.4
	4				
③	1	3.8	10.5	20.0	17.4
	2	5.1	10.0	18.0	17.3
	3	1.9	8.0	20.0	17.3
	4	6.5	12.0	18.0	17.2
④	1	9.4	10.0	12.0	16.5
	2	7.1	13.0	11.0	16.9
	3	7.7	10.0	12.5	16.7
	4	12.0	11.0	13.5	16.6
⑤ ₁	1	5.4	15.0	14.0	17.5
	2	6.0	18.0	12.5	17.5
	3	4.6	18.0	10.0	17.5
	4				

注： H 为层厚； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角； γ 为重度。

3.1 插入比 θ

为了讨论插入比 θ 对重力式围护墙稳定性的影响，令 θ 分别为 1.0 、 1.1 、 1.2 、 1.3 、 1.4 ，选择挖深 $H = 5 \text{ m}$ ，墙宽 $B = 4.7 \text{ m}$ 为研究对象，针对表 5 中 4 个工程场地进行分析，结果如图 2~4 所示。

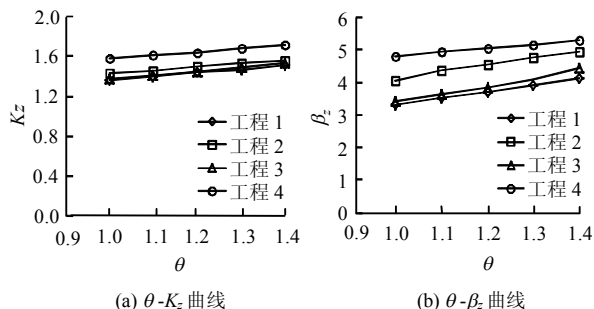


图 2 插入比 θ 对整体稳定性的影响
Fig.2 Impact of insertion ratio on overall stability

从图 2 可以看出, 随插入比 θ 增大, 整体稳定性安全系数 K_z 、可靠指标 β_z 均有一定程度的提高。

插入比 θ 对抗倾覆稳定性的影响如图 3 所示。从图中可以看出, 随插入比 θ 的增大, 抗倾覆稳定安全系数 K_q 和可靠指标 β_q 反而呈减小趋势, 这并不符合工程实际, 已有研究^[8]考虑了墙土摩擦力及墙底土反力的作用, 克服了该不合理现象。

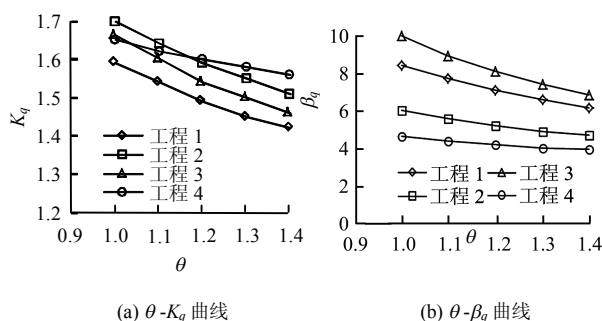


图 3 插入比 θ 对抗倾覆稳定性的影响

Fig.3 Impact of insertion ratio on overturning stability

插入比 θ 对抗水平滑动稳定性的影响如图 4 所示。由图可见, 随插入比 θ 的增大, 安全系数 K_h 、可靠指标 β_h 均有一定程度地提高。

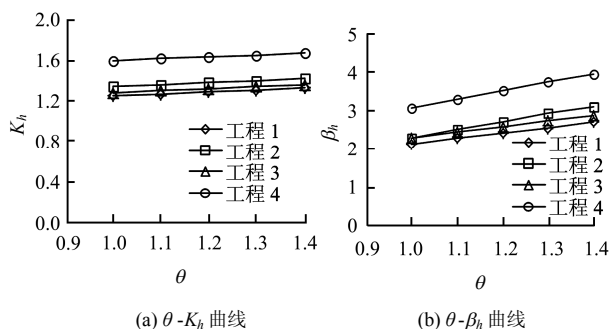


图 4 插入比 θ 对抗水平滑动稳定性的影响

Fig.4 Impact of insertion ratio on sliding stability

3.2 墙体宽度 B

为了讨论墙体宽度 B 对重力式围护墙稳定性的影响, 令 B 分别为 $0.7H$ 、 $0.8H$ 、 $0.9H$ 、 $1.0H$, 选择开挖深度 $H = 5$ m, 插入比 $\theta = 1.3$ 为研究对象, 同样依据上述 4 个工程场地来进行分析。

从图 5 中可以看出, 增加墙宽 B 、整体稳定性的安全系数 K_z 、可靠指标 β_z 在一定范围内波动, 墙宽 B 的改变对重力式围护基坑整体稳定性的影响并不明显。

墙宽 B 对抗倾覆稳定性的影响如图 6 所示。由分析结果可知, 随墙宽 B 的增大, 抗倾覆稳定性安全系数 K_q 和可靠指标 β_q 均呈增长趋势, 提高墙宽 B 可改善重力式围护墙抗倾覆稳定的安全状态。

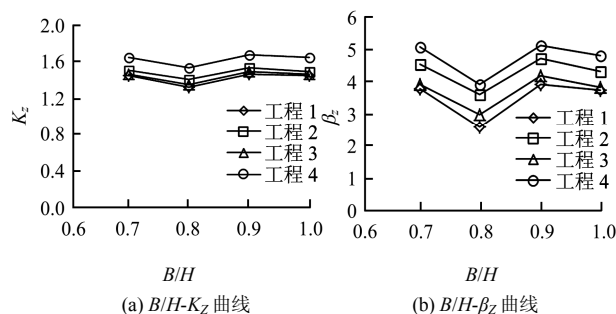


图 5 墙宽 B 对整体稳定性的影响

Fig.5 Impact of wall width on overall stability

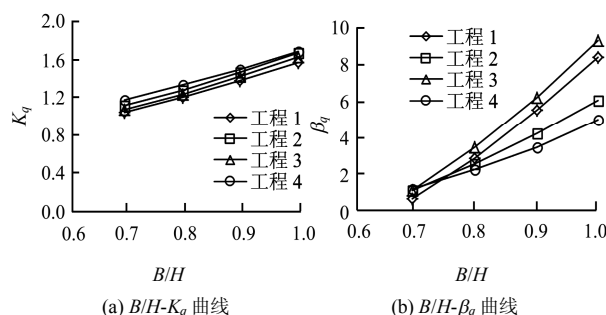


图 6 墙宽 B 对抗倾覆稳定性的影响

Fig.6 Impact of wall width on overturning stability

墙宽 B 对抗水平滑动稳定性的影响如图 7 所示。由结果可知, 提高墙宽 B 可在一定程度上提高抗水平滑动稳定性的安全系数 K_h 、可靠指标 β_h 。

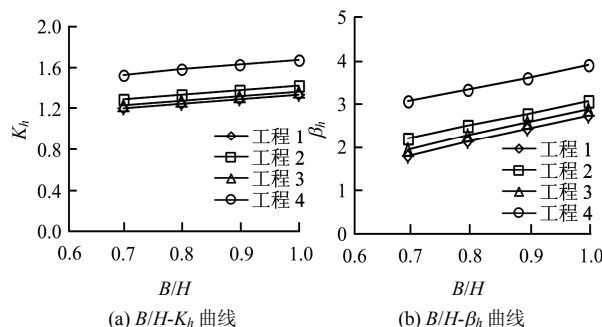


图 7 墙宽 B 对抗水平滑动稳定性的影响

Fig.7 Impact of wall width on sliding stability

3.3 开挖深度 H

为了讨论开挖深度 H 对重力式围护墙稳定性的影响, 令开挖深度分别为 4、5、6、7 m, 选择墙体宽度 $B = 0.8H$, 插入比 $\theta = 1.3$ 为研究对象, 对上述 4 个工程场地进行分析, 分析结果如图 8~10 所示。从图中可以看出, 对于相同的墙宽 B 和插入比 θ , 随着开挖深度的增加, 重力式围护墙整体稳定性的安全状态逐渐降低, 开挖深度 H 的改变对水泥土重力式围护基坑整体稳定性的安全状态有着显著地影响。

开挖深度 H 对抗倾覆稳定性的影响如图 9 所示。其变化趋势与整体稳定性类似, 即随开挖深度

H 的增加, 抗倾覆稳定性的安全状态逐渐降低, 下降趋势明显。开挖深度 H 的改变对水泥土重力式围护基坑的抗倾覆稳定性有着重要地影响。

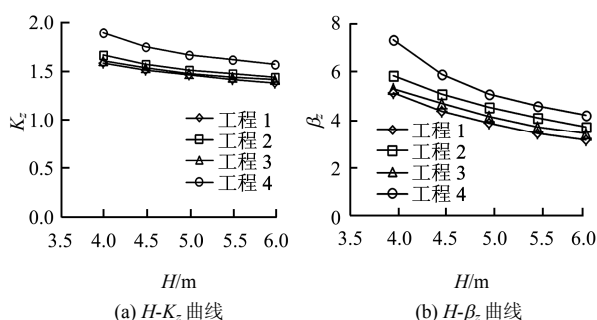


图 8 开挖深度 H 对整体稳定性的影响

Fig.8 Impact of excavation depth on overall stability

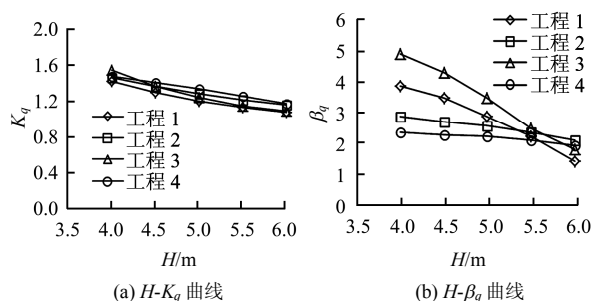


图 9 开挖深度 H 对抗倾覆稳定性的影响

Fig.9 Impact of excavation depth on overturning stability

开挖深度 H 对抗水平滑动稳定性的影响如图 10 所示。分析结果与整体稳定性、抗倾覆稳定性类似, 开挖深度 H 的改变对水泥土重力式围护基坑的抗水平滑动稳定性有着重要地影响。

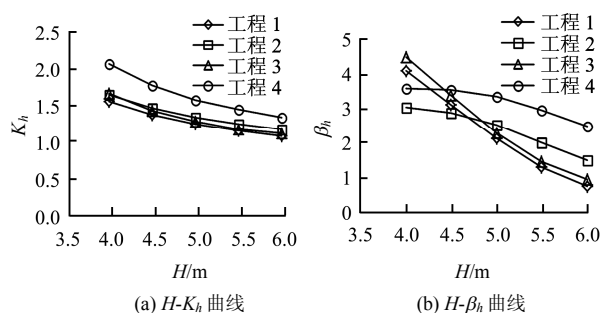


图 10 开挖深度 H 对抗水平滑动稳定性的影响

Fig.10 Impact of excavation depth on sliding stability

4 结 论

(1) 上海地区实际工程的设计安全水准通常高于规范规定值, 水平滑动多为重力式围护工程稳定性验算的控制失效模式。

(2) 通过提高插入比和墙体宽度可改善水泥土重力式围护基坑的抗倾覆、抗水平滑动稳定性的安全状态。对于整体稳定性, 提高插入比较有效, 而其对墙体宽度的变化不敏感。

参 考 文 献

- [1] 熊智彪. 建筑基坑支护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 上海市勘察设计行业协会, 上海市现代设计(集团)有限公司, 上海建工(集团)总公司. DG/T J08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 上海: 上海市勘察设计行业协会, 2010.
- [4] 况龙川, 高大钊. 上海软土基坑水泥土挡墙的可靠度指标研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(6): 640—640.
- KUANG Long-chuan, GAO Da-zhao. Research of reliability indices on cement-soil retaining wall of excavation in Shanghai soft[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 1998, 26(6): 640—640.
- [5] 杨开彪, 梁发云, 李镜培, 等. 上海地区水泥土重力式围护墙稳定性可靠度校准分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 902.
- YANG Kai-biao, LIANG Fa-yun, LI Jing-pei, et al. Reliability calibration analysis of stability of cement soil-treated gravity retaining wall in Shanghai area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Supp.2): 902.
- [6] 张继周, 缪林昌. 岩土参数概率分布类型及其选择标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3526—3526.
- ZHANG Ji-zhou, LIAO Lin-chang. Types and selection criteria of probability distribution of rock and soil parameters[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Supp.2): 3526—3526.
- [7] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [8] 熊巨华, 杨敏. 水泥土桩墙支挡结构抗倾覆稳定验算新方法[J]. 工程勘察, 1998, 26(3): 1—1.
- XIONG Ju-hua, YANG Min. A new method of overturning stability analysis about cement-soil retaining wall structure[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1998, 26(3): 1—1.