维普资讯 http://www.cqvip.com

第26卷 第6期 同济大学学报 Vol.26 No.6
1998年12月 JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY Dec., 1998

# 上海软土基坑水泥土挡墙的可靠度指标研究

况龙川 高大钊

(同济大学地下建筑与工程系,上海,200092)

**摘要** 结合常规定值计算方法,提出用于软土基坑水泥土挡墙可靠度分析的6种失效模式,建立了相应的极限状态方程.在具有代表性的18例上海软土地质资料基础上,参数统计采用空间平均特性概念,用一次二阶矩验算点法(JC法)进行有关的可靠度计算与分析,分析结果与工程实践基本一致,为有关土层的抗剪强度指标分项系数的研究工作打下基础.

**关键词** 水泥土挡墙;失效模式;极限状态方程;自相关性;可靠度指标
**分类号** TU 43

近年来,上海地区开挖深度在7 m内的基坑较多采用了水泥土挡墙这种支护形式,它的插入深度和厚度一般都很大,其中插入深度是为了获得被动土压力以补足有限的墙底摩阻力,足够的厚度一方面为了形成重力墙的需要,另一方面由此可具备很大的抗弯刚度以适应材料抗拉强度极低的实际情况,可以认为它受力时无弯曲变形,而是如同刚体的平动及转动.研究软土基坑在水泥土挡墙支护条件下的可靠度指标变化规律,不仅可以对现阶段此类支护设计的安全水准进行校核,还为有关土层抗剪强度指标分项系数的研究工作打下基础.

## 1 极限状态方程的建立

### 1.1 失效模式及相应定值计算公式

对于水泥土挡墙来说,在不考虑其自身结构强度验算的前提下,可能的失效模式主要有整体滑移、倾覆、水平滑移、地基承载力丧失、隆起和坑内管涌[1,2],见图1.目前有关的定值计算公式分别见式(1)~(6).

$$K_1 = \frac{\sum c_i l_i + \sum (q_i b_i + w_i)\cos\alpha_i \tan\phi_i}{\sum (q_i b_i + w_i)\sin\alpha_i} \tag{1}$$

$$K_2 = M_R / M_O \tag{2}$$

$$K_3 = (\tan\phi_0 \sum G + c_0 A) / \sum H \tag{3}$$

$$K_4 = (\zeta_c c N_c + \zeta_q q N_q + \zeta_\gamma \gamma B N_\gamma / 2) / \sigma_v \tag{4}$$

$$K_5 = (\gamma D N_q + c N_c) / (\gamma (H + D) + q) \tag{5}$$

$$K_6 = \gamma' / j\gamma_w \tag{6}$$

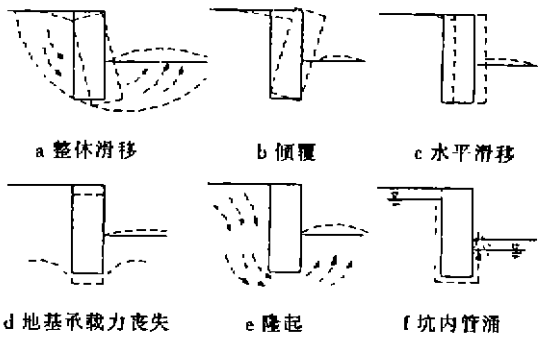



图1 水泥土挡墙的几种失效模式

Fig.1 Failure modes of cement-soil retaining wall

式(1)~(6)中:$l_i$,$b_i$和$\alpha_i$为土条划分的几何参数;$w_i$和$q_i$分别为$i$土条的自重和其上超载;$c_i$($c_0$,$c$)和$\phi_i$($\phi_0$,$\phi$)为土的抗剪强度指标;$M_R$和$M_O$分别为挡墙的抗倾覆力矩和倾覆力矩;$\sum G$和$\sum H$分别为作用在挡墙上的竖向力和水平力;$H$,$D$,$B$和$A$分别为挡墙的支挡深度(即开挖深度)、插入深度、宽度和底面积;$q$为地面超载;$\zeta_c$,$\zeta_q$和$\zeta_\gamma$为承载力修正系数;$N_c$,$N_q$和$N_\gamma$为地基承载力系数;$\sigma_v$为作用在地基土上的竖向应力;$\gamma$和$\gamma'$分别为地基土的天然重度和浮重度;$\gamma_w$为地下水重度;$j$为渗流水力梯度.

### 1.2 极限状态方程[3]

依据上述6个定值计算公式,需分别建立极限状态方程,它们是以挡墙的几何尺寸和重度、地面超载、

收稿日期:1997-12-04 第一作者:男,1970年生,博士生

维普资讯 http://www.cqvip.com



土抗剪强度指标以及地下水位等作为基本变量,若存在多层土时,土层划分亦是基本变量.以 $X=(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 表示可能涉及到的全部变量,则极限状态方程为

$$Z_i = g_i(X) = g_i(X_1, X_2, \cdots, X_n) = 0 \tag{7}$$

$i=1,2,\cdots,6$,表示前述6种可能失效模式.

## 2 土性参数的统计分析

### 2.1 自相关性[4]

土是自然历史的产物,其工程特性指标既与位置有关(场效应),又具有自相关的结构特性.在与土有关的工程设计中,土性指标往往是由空间平均特性而非"点"特性所控制,实践中,土性指标的点特性容易获知,但无法直接测得描述其空间特性的数据,随机场模型把"点"特性和空间特性有效地联系起来,使获知土性指标的空间特性成为可能.上海软土是典型的三角洲近海沉积物,通常可以认为土性指标是沿深度方向变化的一维随机场,在$[t, t+h]$区间上

$$X_h(t) = \frac{1}{h}\int_t^{t+h} X(t)\mathrm{d}t \tag{8}$$

当工程问题明确后,$h$ 和 $t$ 为定值,$X_h(t)$即成为随机变量,其均值和方差为

$$\mathrm{E}\,(X_h(t)) = \mu \tag{9}$$

$$\mathrm{var}(X_h(t)) = \sigma^2\Gamma(h) \tag{10}$$

式中:$\mu$ 和 $\sigma^2$ 分别为点均值和方差;$\Gamma(h)$称为方差折减系数,$h$ 充分大时,有下列近似关系式:

$$h\Gamma(h) = \delta_0 \tag{11}$$

$\delta_0$ 为相关距离,则

$$\Gamma(h) = \delta_0/h = 1/n_0 \tag{12}$$

式中:$n_0$ 为目标总体空间范围内相互独立数据的最大数目,若在满足独立取样条件下取样不足时

$$\Gamma(h) = 1/n \qquad n < n_0 \tag{13}$$

### 2.2 互相关性

抗剪强度指标 $c$ 和 $\phi$ 之间往往具有一定的负相关特性,原则上可靠度计算时应计入这种互相关性的影响.考虑变量互相关性的可靠度计算方法主要有正交变换法和改进JC法[5].

本文不考虑 $c$ 和 $\phi$ 的互相关性.

## 3 上海地区可靠度指标变化规律的研究

### 3.1 基本假定

(1)水泥土挡墙的截面为矩形,参照工程经验取宽度为 $B=0.8H$,埋深为 $D=H$,$H$ 为开挖深度,挡墙重度取 20 kN·m$^{-3}$.

(2)地面和开挖面水平,地面超载 $q=20$ kN·m$^{-2}$;土层①亦按超载计算,其重度取 20 kN·m$^{-3}$.

(3)地下水位分别取为地面下 1 m 和开挖面下 1 m.

(4)考虑土层划分的实际情况,各土层划分的界限深度根据地质勘察报告取值.

(5)土层 $i$($i\geq 2$)中的土性指标 $\gamma_i$ 由于变异性很小,可以把 $\gamma_i$ 作为确定值;$c_i$ 和 $\phi_i$ 为正态随机变量;不同土层的土性指标之间相互独立.

(6)地基承载力和隆起模式中的 $c$ 和 $\phi$ 取直固快剪7折指标;其它模式中的 $c$ 和 $\phi$ 取直固快剪峰值指标.

上述(1)~(4)均按确定值考虑.

### 3.2 计算成果

按土层实际划分建立前述5种极限状态方程(管涌模式除外,关于抗管涌的可靠度指标研究今后另作

维普资讯 http://www.cqvip.com



讨论),利用JC法可以对软土基坑在水泥土挡墙支护条件下的可靠度进行计算.本文以18例具有代表性的上海软土地质资料,用前述参数统计分析方法得到地基土(②、③、④层)土性指标 $c_i$ 和 $\phi_i$($i=2\sim4$)的统计信息,详见表1,计算5种可能失效模式随深度变化的可靠度指标,主要结果见表2.

表1 土层直固快剪强度峰值指标的统计值

| 序号 | ② 粉质粘土 | | ③ 淤泥质粉质粘土 | | ④ 淤泥质粘土 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $c$ | $\phi$ | $c$ | $\phi$ | $c$ | $\phi$ |
| 1 | 12.94(0.19) | 22.58(0.08) | 8.83(0.25) | 28.74(0.09) | 7.08(0.15) | 17.26(0.13) |
| 2 | 22.75(0.16) | 20.35(0.19) | 9.86(0.27) | 22.41(0.13) | 6.86(0.20) | 16.83(0.08) |
| 3 | 22.81(0.18) | 21.01(0.06) | 16.18(0.11) | 19.49(0.13) | 14.65(0.13) | 12.82(0.10) |
| 4 | 14.95(0.34) | 21.94(0.05) | 10.35(0.20) | 23.04(0.06) | 14.16(0.12) | 12.02(0.10) |
| 5 | 22.61(0.26) | 21.41(0.07) | 11.89(0.16) | 18.44(0.05) | 11.32(0.10) | 12.32(0.06) |
| 6 | 21.33(0.10) | 17.41(0.05) | 10.97(0.16) | 20.87(0.06) | 5.57(0.17) | 14.98(0.08) |
| 7 | 30.58(0.13) | 15.71(0.14) | 13.41(0.16) | 22.25(0.08) | 12.30(0.19) | 11.82(0.12) |
| 8 | 26.48(0.36) | 15.66(0.14) | 9.04(0.31) | 23.84(0.07) | 12.59(0.30) | 17.51(0.09) |
| 9 | 23.09(0.15) | 19.50(0.19) | 8.06(0.09) | 17.17(0.09) | 9.55(0.10) | 13.55(0.15) |
| 10 | 19.40(0.25) | 17.19(0.06) | 8.46(0.15) | 21.92(0.10) | 10.78(0.20) | 13.07(0.12) |
| 11 | 21.03(0.18) | 19.63(0.11) | 19.01(0.21) | 19.39(0.08) | 13.60(0.15) | 12.22(0.09) |
| 12 | 11.24(0.30) | 21.57(0.06) | 8.22(0.19) | 27.96(0.08) | 9.24(0.15) | 12.80(0.05) |
| 序号 | ②$_1$粉质粘土 | | ②$_2$砂质粘土 | | ③ 淤泥质粉质粘土 | | ④ 淤泥质粘土 | |
| | $c$ | $\phi$ | $c$ | $\phi$ | $c$ | $\phi$ | $c$ | $\phi$ |
| 13 | 22.04(0.14) | 17.22(0.08) | 9.88(0.18) | 29.14(0.18) | 14.97(0.25) | 19.20(0.13) | 12.21(0.14) | 11.57(0.08) |
| 14 | 19.46(0.17) | 11.72(0.17) | 12.30(0.11) | 35.95(0.05) | 9.18(0.16) | 16.28(0.14) | 10.43(0.10) | 14.13(0.07) |
| 15 | 18.33(0.18) | 21.83(0.10) | 15.38(0.19) | 28.81(0.05) | 8.45(0.36) | 22.13(0.09) | 9.83(0.12) | 14.70(0.07) |
| 16 | 7.70(0.43) | 32.02(0.07) | 5.54(0.29) | 35.03(0.05) | | | 13.67(0.11) | 14.48(0.19) |
| 17 | 13.00(0.18) | 29.13(0.10) | 13.75(0.26) | 27.37(0.05) | | | 13.54(0.13) | 11.26(0.12) |
| 18 | 21.50(0.19) | 24.18(0.06) | 14.23(0.11) | 30.21(0.06) | | | 17.73(0.10) | 9.96(0.08) |

Tab.1 Statistic results on indices of shear strength

注:表中非括号内数据为均值,括号内数据为变异系数.

表2 各种失效模式下可靠度指标的计算统计值

| 开挖深度 | 整体滑移 | | 倾 覆 | | 水平滑移 | | 地基承载力 | | 隆 起 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $H$/m | 均 值 | 变异系数 | 均 值 | 变异系数 | 均 值 | 变异系数 | 均 值 | 变异系数 | 均 值 | 变异系数 |
| 4 | 7.88 | 0.21 | 8.18 | 0.23 | 6.81 | 0.28 | 5.31 | 0.21 | 5.74 | 0.23 |
| | (7.88) | (0.32) | (8.59) | (0.28) | (6.35) | (0.39) | (4.28) | (0.31) | (4.89) | (0.29) |
| 5 | 7.21 | 0.22 | 7.81 | 0.20 | 5.61 | 0.28 | 4.50 | 0.20 | 5.48 | 0.19 |
| | (6.37) | (0.44) | (8.25) | (0.26) | (5.06) | (0.39) | (3.57) | (0.30) | (4.93) | (0.26) |
| 6 | 6.28 | 0.20 | 8.56 | 0.35 | 4.94 | 0.38 | 3.62 | 0.21 | 4.98 | 0.22 |
| | (5.81) | (0.29) | (7.40) | (0.28) | (3.34) | (0.44) | (2.06) | (0.63) | (4.61) | (0.26) |
| 7 | 5.45 | 0.22 | 7.82 | 0.35 | 3.50 | 0.23 | 2.99 | 0.24 | 4.77 | 0.23 |
| | (5.33) | (0.27) | (6.61) | (0.29) | (2.35) | (0.54) | (0.30) | (6.01) | (4.35) | (0.25) |
| 8 | 4.97 | 0.24 | 6.63 | 0.28 | 2.72 | 0.19 | 2.16 | 0.38 | 4.63 | 0.25 |
| | (4.77) | (0.27) | (5.76) | (0.31) | (1.56) | (0.64) | (−1.86) | (−1.12) | (4.15) | (0.25) |

Tab.2 Statistic results of reliability indices on failure modes

注:表中非括号内数据为土层④满足 $\phi_{u,7}\geqslant10°$;括号内数据为土层④满足 $\phi_{0,7}<10°$.

### 3.3 计算分析

(1)根据18例地质资料关于土层的实际划分,挡墙在挖深为4 m时有7例位于土层②或③上,挖深为5 m时有2例位于土层②或③上,此时,计算得到对应5种失效模式的可靠度指标都很高,即水泥土挡墙发生失效的概率极低,说明基坑是安全的.

(2)表2为对应于挡墙底座在土层④中时,各种模式下可靠度指标的计算统计值:①整体滑移和倾覆

维普资讯 http://www.cqvip.com



模式随深度变化时相应的可靠度指标均值都十分高,虽然存在一定的变异性,但从概率角度看,二者发生失效的可能性极小;②隆起模式可靠度指标均值在各挖深条件下也很高,可靠度指标的变异性几乎不会使隆起先于地基承载力和水平滑移发生失效;③地基承载力和水平滑移随挖深增加,可靠度指标明显减小,以地基承载力最为显著;一方面可靠度指标均值明显减小、变异系数增大,另一方面 $\phi_{0.7}$ 的取值成为最大可能支护深度的控制因素,即地基承载力是水泥土挡墙可靠度分析的关键模式,其次是水平滑移;④对照工程结构对一般建筑物目标可靠度指标取值 3.2 的要求,考查地基承载力模式在各挖深下的可靠度指标均值和变异性,$\phi_{0.7} \geq 10°$ 时,最大支护深度为 6 ~ 7 m,$\phi_{0.7} < 10°$ 时,最大支护深度不宜超过 5 m,否则需要采取地基加固措施;⑤本文汇集的 18 例工程地质资料中,属于 $\phi_{0.7} \geq 10°$ 的占 33.33%,属于 $\phi_{0.7} < 10°$ 的占 66.67%.

## 4 结　　语

本文结合目前常规定值计算方法,考虑土层实际划分情况,在具有代表性的 18 例上海软土地质资料基础上,参数统计采用空间平均特性概念,研究水泥土挡墙在不同挖深下各种模式所具备的可靠度指标水平,计算分析结果表明:地基承载力模式是关键模式,其次是水平滑移模式.关于计算分析结论与目前上海地区工程实践的经验基本一致.表 2 反映了上海地区此类支护形式的总体可靠度水平,可以作为今后采用分项系数设计的校准依据.从地基承载力模式的验算特点看,它仅与挡墙底端所在土层的抗剪强度指标有直接关系,在给定的目标可靠指标的前提下,只能对土层④抗剪强度指标的分项系数进行校准;而水平滑移模式的计算则与土层②、③和④都有关系.因此,在上海地区设计水泥土挡墙时,关于土层 $c$ 和 $\phi$ 分项系数取值的研究,建议土层②、③以水平滑移模式为主,土层④以地基承载力模式为主展开工作.

### 参考文献


1 黄强编著.深基坑支护工程设计技术.北京:中国建材工业出版社,1995
2 华东水利学院土力学教研室主编.土工原理与计算.北京:水利电力出版社,1984
3 高大钊.土力学可靠性原理.北京:中国建筑工业出版社,1989
4 Vanmarcke E H. Probabilistic modelling of soil profiles. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(GT11):1227 ~ 1246
5 张庆华,包承纲.改进 JC 法及其在土工可靠度计算中的应用.见:包承纲,高大钊,张庆华主编.地基工程可靠度分析研究.武汉:武汉测绘科技大学出版社,1997.105 ~ 109


# Research of Reliability Indices on Cement – soil Retaining Wall of Excavation in Shanghai Soft Soil


*Kuang Longchuan　Gao Dazhao*

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)



**Abstract** In this paper, referred to conventional deterministic design methods, 6 failure modes used to analyse reliability on cement – soil retaining wall of excavation in soft soil are proposed. Based on 18 different and representative geotechnical data in Shanghai and the application of the concept of spatial average, JC – method is used to calculate and analyse the reliability indices on cement – soil retaining wall at different excavation depth. Conclusions obtained coincide with the engineering experience, and will be helpful for the future research work of partial factors of $c$ and $\phi$ in the design of cement – soil retaining wall in Shanghai area.



**Keywords** Cement – soil retaining wall; Failure modes; Limit state equation; Autocorrelation; Reliability index