

加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构的 稳定性分析及其应用

刘全林¹, 杨有莲²

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 加筋水泥土斜锚桩通过对土体加注水泥搅拌和拉锚, 实现对地层的主动加固, 在基坑的四周形成一重力式挡土结构, 维护基坑壁的稳定。首先简要介绍了其工作原理及对基坑稳定性的作用机理。利用 Kranz 理论的有关假设和条分法原理, 建立该维护结构的稳定性分析简化模型。该计算模型克服了 Kranz 理论的不足, 简化了条分法的计算, 具有较高的实用价值。最后, 对广州某地铁车站基坑的加筋水泥土斜锚桩维护结构进行稳定性计算分析, 计算结果与实测结果较接近, 从而验证了该方法的可靠性。

关键词: 桩基工程; 加筋水泥土; 斜锚桩; 稳定性分析; 简化稳定性模型; 地铁站; 深基坑

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5331 - 06

STABILITY ANALYSIS OF INCLINED ANCHORAGE PILE FOR REINFORCED CEMENT-SOIL IN BRACING EXCAVATION STRUCTURE AND ITS APPLICATION

LIU Quan-lin¹, YANG You-lian²

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The inclined anchorage pile of reinforced cement-soil can form a gravity bulkhead in excavation. It is an active reinforcement method by agitating earth mixed with cement and buried anchor bar. The working principle of reinforced with steel strips and inclined cement-soil pile are introduced, and its mechanism on the strain and stability of excavation is also analyzed. By using slice method and Kranz theory, a simplified model of stability analysis in excavation structure braced by the anchoring pile is established. This method can overcome the shortcoming in Kranz theory, and it can simplify the calculation of slice method. So it has practical value, and an actual example using this method in Guangzhou underground station to analyze the stability is studied, which indicates its feasibility.

Key words: pile engineering; reinforced cement-soil; inclined anchorage pile; stability analysis; simplified stability model; metro station; deep pit

1 引言

随着城市建设的发展, 地下空间的开发利用得

到了前所未有的重视, 不论是城市高层建筑还是地下交通设施, 都要遇到深基坑的维护问题。我国的大多数大中城市均位于江河、湖海的冲积性平原地区, 这里软土深厚广布, 力学性质差、含水量高、

收稿日期: 2004 - 02 - 28; **修回日期:** 2004 - 08 - 08

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(03044402)

作者简介: 刘全林(1962 -), 男, 博士, 2002 年于同济大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事地基基础、结构与介质相互作用分析及土木工程信息技术方面的教学与研究。E-mail: tjql@126.com。

受扰动易发生变形、开挖形成的边坡自稳能力差。这对维护基坑的稳定带来了很大困难和挑战^[1~6]。针对软土地区深基坑边坡自稳能力很低,开挖变形很大等特点,采取主动加固技术,即采用加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构,在基坑的周围形成一个重力式的挡土结构,以确保深基坑的边坡稳定。这种维护结构具有很强的地层适应性,并不受支护深度的限制,突破土钉墙应用的局限性,尤其是淤泥性土层,对自然环境无污染,如不产生施工噪音、废弃的泥浆和挤土效应等,不仅能降低维护结构的造价,而且能减少施工工期。

2 加筋水泥土斜锚桩的工作原理

加筋水泥土斜锚桩维护结构的形成过程是,利用旋喷钻机按一定的角度(与水平面夹角为 20° 左右)在土体中成孔,在成孔同时通过旋喷机向土体喷射水泥浆,水泥浆与土体充分搅拌形成水泥土斜桩,在成孔搅拌同时将加筋体——钢绞线带入桩体中。当达到设计深度时,将螺旋钻杆退出,从而形成加筋水泥土凝固体——即加筋水泥土斜锚桩。在基坑的壁面上按一定的纵横间距形成加筋水泥土斜锚桩群。其主要工作原理如下:

- (1) 通过水泥土搅拌斜桩,在坑壁四周土中形成三维空间梁系,支承上部土体荷载和水平土压力;
- (2) 由于高压水泥浆的渗透、压密和搅拌,对原土体改良和加固,大大提高了土体力学性能,减小了土体主动土压力;
- (3) 通过水泥土与加筋体的粘合,水泥土斜桩与桩周地层的咬合,从而将加筋体与地层牢牢地结合在一起,大大提高了土体的自承载能力;
- (4) 对斜向加筋体施加预应力,可有效地控制土体和结构的变形及位移;
- (5) 垂直加筋搅拌桩面层和斜向加筋水泥土斜锚桩形成土中三维空间梁系维护结构。其维护结构是集挡土、防水、承载于一体的重力式挡土墙结构,其结构的稳定性将不再需要内支撑来提供作用力。

3 维护结构的稳定性分析

3.1 基坑变形与边坡的失稳

基坑开挖过程也是基坑开挖面上卸荷的过程,坑底土体原有应力状态因垂直卸荷而改变,使坑底土体产生向上为主的位移,同时围护墙体也因两侧

压力差作用产生向基坑内的侧向变形,从而改变基坑外围的原始应力状态,进而导致墙后地面的沉降^[2, 3]。

基坑工程的变形主要由围护墙的位移及变形、围护墙后地表沉降及基坑底部隆起三部分组成;这三者间存在耦合关系,其中以墙后地表沉降对环境的影响最大,而成为研究重点。

对于加筋水泥土斜锚桩维护结构是通过加筋体对地层的锚固来实现对基坑边坡稳定的控制。要确保深基坑的施工安全,对该维护结构的稳定性进行分析是十分必要的^[7~11]。

至于锚固边坡的失稳有3种类型:

- (1) 圆弧滑动面,即边坡中加筋不是简单地受剪,而是抗拉,也就是说,在加筋产生抗剪作用之前,抗拉力已达到极限值;
- (2) 楔体滑动面,即当挖方边坡由裂隙、层理发育的岩石组成时,滑动面可能沿这些裂隙产生。在这种情况下,滑动面大都表现为直线型,在整个滑动面处,作用在锚杆上不仅有拉力而且还有剪力;
- (3) 重力式挡土墙型,在这种情况下,加筋坡体被虚构的重力式挡墙所代替,重力式挡墙所具有的破坏形式,如滑移、倾覆等,加筋坡体也有。

3.2 建立稳定性分析模型

尽管Kranz理论在稳定性分析方面存在着一定的问题,但其中的一些假定条件(如假想挡墙)是值得借鉴的。目前在我国边坡稳定性分析方法中,应用最多的是条分法(简布法),该方法已在大量的工程实践中得到了验证,其可靠性较好。本文结合Kranz理论的一些假定条件(如假想挡墙)及条分法原理(如图1所示),并作如下假定^[1, 8, 10, 11]:

- (1) 各层土为均质各向同性土体,且滑动块体为刚性体;
- (2) 锚桩中点 D 与地面垂线为一假想墙;
- (3) 锚桩中点 D 与桩端 C 点构成一假想的滑动圆弧面,即深层滑动圆弧面;
- (4) 不考虑各土条间的相互影响作用;
- (5) 在滑动面上土的极限平衡条件符合Mohr-Coulomb破坏准则,同时假定锚桩也达到抗拉或拔出极限状态;
- (6) 锚桩拉力作用在土条底边中点。

由此建立该维护结构的稳定性计算模型。

在图1中: ED 为假想挡墙; \widehat{CD} 为滑动面, o 点为圆弧所对应的圆心; T 为加筋水泥土斜锚桩对桩体的锚固力; E_1 为 ED 假想挡墙对滑动体的土压

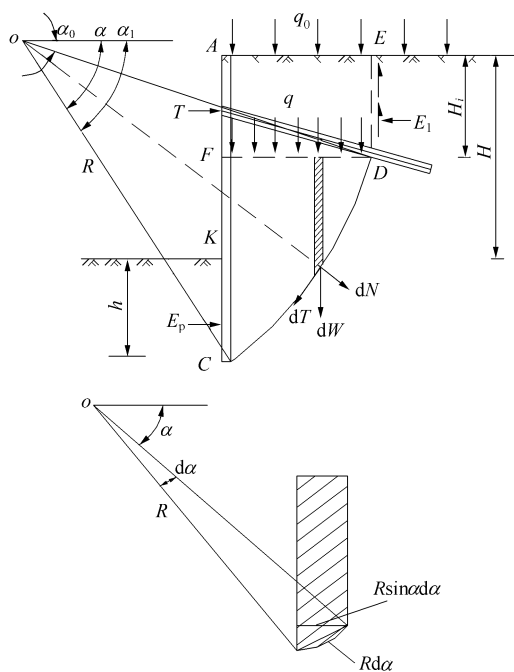


图 1 加筋水泥土斜锚桩维护结构稳定性计算简化模型
Fig.1 Simplified stability calculation model for the slope anchorage pile of reinforce cement soil

力,按主动土压力计算, q 为假想作用在面 FD 上的一个均布荷载($q = \gamma L \cos \alpha + q_0$, 其中, L 为锚桩自由段与锚固段一半之和, γ 为土体的容重, α 为锚桩的水平倾角, q_0 为地面均布荷载)。纵向取加筋水泥土斜锚桩的水平间距 S_x 为土条进行计算。

根据几何关系, 有

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \arccos \frac{CD}{2R} - \arccos \frac{FD}{CD} \\ \alpha_1 &= 2 \arcsin \frac{CD}{2R} + \alpha_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

得土条的高度为

$$y = R(\sin \alpha - \sin \alpha_0) \quad (2)$$

从而得到土条重量为

$$dw = [\gamma R(\sin \alpha - \sin \alpha_0)S_x + q_0]R \sin \alpha d\alpha \quad (3)$$

3.2.1 计算抗滑力矩

由土层、锚固力 T 、被动土压力及假想墙 ED 产生的抗滑力矩 dM_τ , M_T , M_{E_p} , M_{τ_2} 分别为

$$dM_\tau = [\gamma R(\sin \alpha - \sin \alpha_0)S_x + q_0] \cdot R^2 \sin^2 \alpha \tan \varphi d\alpha + cS_x R^2 d\alpha \quad (4)$$

$$M_T = T(R \sin \alpha_0 - L \sin \theta) \quad (5)$$

$$M_{E_p} = \frac{1}{2} K_p \gamma h^2 S_x \left(R \sin \alpha_1 - \frac{1}{3} h \right) \quad (6)$$

$$M_{\tau_2} = \left(\frac{1}{2} \gamma K_a h_i^2 S_x \tan \varphi + cS_x \right) \cdot (R \cos \alpha_1 + L \cos \alpha_0) \quad (7)$$

式中: K_a , K_p 分别为主动、被动土压力系数; h_i 为土条高度; S_x 为土条水平间距; h 为垂直桩入土深度; c 为土的粘聚力; φ 为内摩擦角; R 为滑弧半径。

3.2.2 计算滑动力矩

由假想挡墙 ED , 可得到土层所产生的滑动力矩 M_{E_1} , dM_i 分别为

$$M_{E_1} = \frac{1}{2} K_a \gamma h_i^2 S_x \left(R \sin \alpha_0 - \frac{1}{3} h_i \right) \quad (8)$$

$$dM_i = [\gamma R(\sin \alpha - \sin \alpha_0)S_x + q_0] R^2 \sin \alpha \cos \alpha d\alpha \quad (9)$$

式中: L 为锚桩自由段与锚固段一半之和, q_0 为地表荷载, 其余符号如图 1 所示。

3.2.3 确定安全系数

由上述分析得到该维护结构的抗滑安全系数如下式所示:

$$K = \frac{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_\tau + M_T + M_{E_p} + M_{\tau_2}}{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_i + M_{E_1}} \quad (10)$$

3.2.4 确定滑动圆心位置

根据 Gred. Gadehus 对于土坡稳定性分析的研究成果, 土坡的可能滑动圆弧的圆心位置^[5, 9, 12]为

$$\left. \begin{aligned} x &= H[(40 - \varphi) / 70 - (\beta - 40) / 50] \\ y &= H[0.8 + (40 - \varphi) / 100] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: β 为坡度。

可将此圆心位置作为加筋水泥土斜锚桩维护结构稳定性分析圆心的搜索中心, 由此确定搜索区域的 S 为 $0.7H_i \times 0.7H_i$, 如图 2 所示(其中: $H_i = H_0 + H$, H 为每次计算坡高, H_0 为坡顶超载换算高度)。

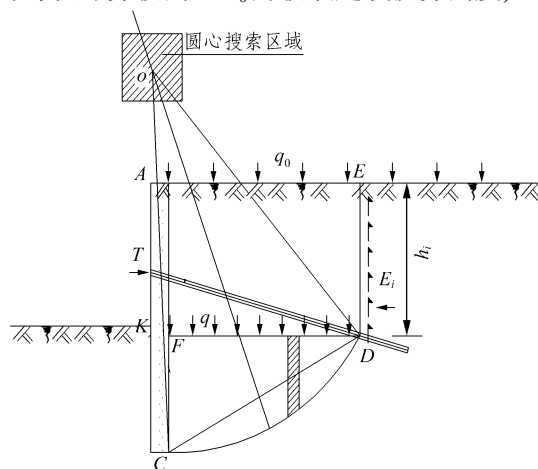


图 2 滑动圆心简化计算示意图
Fig.2 Schematic diagram of predigest calculation for the center of slip circle

由于圆弧的割线 CD 是已知的，则圆心必定在割线 CD 的垂直平分线上，显然该垂直平分线与搜索区域 S 的交线，即为圆心的最可能的位置，先计算两个交点的安全系数，然后采用二分法原理，便得到不同半径 R 。

对于不同的 R 值，可计算出不同的 K 值，取该结构的整体安全系数 $K_0 = \min(K_1, K_2, \dots, K_n)$ ，本文根据基坑土钉支护技术规程(CECS96_97)及水泥土地锚设计施工技术规程，取该结构整体稳定允许安全系数 $K = 1.5$ 作为设计依据，即若 K_0 大于等于 1.5，则维护结构安全；否则，便不安全。

3.2.5 多层锚桩支护结构的稳定性分析

上述的加筋水泥土斜锚桩维护结构的稳定性简化计算方法适用于只有一层加筋水泥土斜锚桩的结构。接下来可以将其进一步推广应用到多层加筋水泥土斜锚桩结构中。对多层加筋水泥土斜锚桩的不同配置型式要分别作安全系数 K 的验算^[5]。下面介绍两种配置型式的验算方法^[7]：

(1) 上层锚桩比下层锚桩短的类型

这种配置型式中(如图 3 所示)，对下层锚桩，假想深层滑动面为圆弧 \widehat{CD}' 。

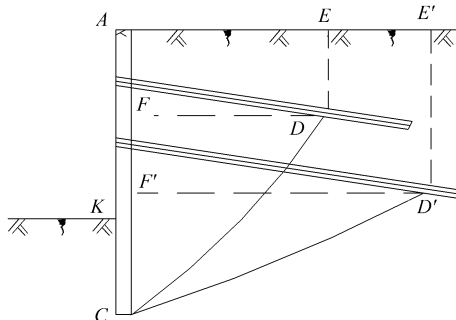


图 3 上层锚桩比下层锚桩短的配置型式

Fig.3 Type of the upper anchor pile shorter than the lower

(2) 上层锚桩比下层锚桩长的型式

这种配置型式(如图 4 所示)，对下层锚桩，假想深层滑动面为圆弧 \widehat{CD} 。

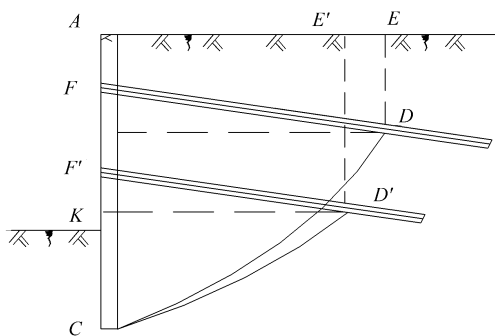


图 4 上层锚桩比下层锚桩长

Fig.4 Type of the upper anchor pile longer than the lower

对于多层加筋水泥土斜锚桩结构，其配置型式的不同决定了滑动面是完全不同的，由图 3, 4 可看出，第一种配置型式不如第二种配置型式合理，这也为工程实践所证明。

按单层加筋水泥土斜锚桩的分析方法，可得到下层加筋水泥土斜锚桩结构的抗滑安全系数为

$$K = \frac{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_{\tau} + M_T + M_T^{\downarrow} + M_{E_p} + M_{\tau 2}}{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_t + M_{E_l}} \quad (12)$$

式中： M_T^{\downarrow} 为下层锚桩锚固力为 T^{\downarrow} 的抗滑力矩，其余参数同上。

同理，推广到 n 层锚桩时，其安全系数计算式：

$$K = \frac{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_{\tau} + \sum_1^{n-1} M_T + M_T^{\downarrow} + M_{E_p} + M_{\tau 2}}{\int_{\alpha_0}^{\alpha} dM_t + M_{E_l}} \quad (13)$$

式中： $\sum M_T$ 为 $n-1$ 层加筋水泥土斜锚桩的锚固力抗滑力矩之和。

以上通过对支护系统稳定性计算模型的简化，使加筋水泥土斜锚桩稳定性计算简单化。该简化计算方法不仅克服了 Kranz 理论中的不足，还大大简化了条分法中最危险滑动面的圆心的计算步骤，这将为该维护结构的设计和施工提供指导。

4 应用实例

4.1 工程概况

广州地铁某车站基坑东西向全长约为 206 m，车站东部及西部通风道部位基坑宽度(南北向)约 98 m，其余部位基坑宽(南北向)约 20 m，风道部位基坑宽(东西向)约 11 m。

该车站地层从上到下依次为人工填土、淤泥质土、淤泥质砂、砂层、岩层，其中砂层在整个场地范围内都有揭露，砂层的厚度较大。由于本场地属于饱和的散砂层，对常规的锚杆施工极为不利，因传统的锚杆在这样的砂层中不能成孔并发生喷砂、管涌的事故，对此采用加筋水泥土斜锚桩作维护结构来解决上述难题。

加筋水泥土斜锚桩设计参数为：共设置了 5 排加筋水泥土斜锚桩，第 1~4 排桩长为 12 m，第 5 排桩长为 14 m，其水平和竖向间距均为 1.5 m，直径均为 350 mm，倾角均为 15°；由于不具备放坡条件，垂直开挖第一层，在 -1.5 m 施工第一排水泥土锚，在 -3 m 施工第二排水泥土锚，在 -4.5 m

施工第三排水泥土地锚, 在 -6 m 施工第四排水泥土地锚, 在 -7.5 m 施工第五排水泥土地锚, 加筋体采用 2 根 7φ5 钢绞线, 其强度设计值为 1 760.00 N/mm², 荷载分项系数取 1.25; 土与锚固体粘结强度由试验确定, 其分项系数取 1.30。

根据地质资料, 基坑开挖影响深度范围内场地地层及设计计算参数自上而下见表 1。

4.2 稳定性分析模型的计算结果

基坑开挖深度 8.5 m, 垂直搅拌桩的插入深度为 7.5 m。为了简化计算, 各土层参数取加权的平均值, 按图 4 所示的稳定性计算图, 取土条宽度为 1.5 m。

计算参数为: $q_0 = 20 \text{ kN/m}$, $T = 636.9 \text{ kN}$, $L = 9 \text{ m}$, $\alpha = 15^\circ$, $h_i = 5.3 \text{ m}$ 。

主动区的参数加权平均值为

$$\bar{\gamma} = 17 \text{ kN/m}^3, \bar{\varphi} = 13^\circ, \bar{c} = 7.4 \text{ kPa}$$

被动区参数加权平均值为

$$\bar{\gamma} = 19.5 \text{ kN/m}^3, \bar{\varphi} = 25^\circ, \bar{c} = 13.6 \text{ kPa}$$

圆弧滑动区各土层参数的加权平均值为

$$\bar{\gamma} = 19.7 \text{ kN/m}^3, \bar{\varphi} = 28.8^\circ, \bar{c} = 15.8 \text{ kPa}$$

假想墙主动土压力系数 $K_a = 0.633$; 被动土压力系数 $K_p = 2.464$ (参数的意义同前)。

4.3 实测结果与分析结果的比较

分析上表计算结果可知: 当 $R = 23 \text{ m}$ 时, 抗滑安全系数 $K_0 = 1.565 > 1.5$, 说明该设计支护系统稳

定。

实测加筋水泥土斜锚桩维护墙体水平位移平均 20 mm, 最大为 26 mm, 地面沉降量一般为 0~10 mm, 最大为 15 mm。该工程实测资料表明, 加筋水泥土斜锚桩加固后基坑变形明显减少, 无加筋水泥土斜锚桩加固时随基坑开挖将在基坑顶部和底部出现塑性区, 有加筋水泥土斜锚桩加固后, 土体没有出现塑性破坏区, 仅在地表局部墙后 8~9 m 处出现拉张区。计算与实测结果相符, 说明本文建立的计算方法是可靠的, 具有推广应用价值。

利用本文建立的计算模型, 得到计算结果如表 2 所示。

5 结论及建议

(1) 应用加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构, 通过对土层的主动加固, 在基坑的四周形成一重力式挡墙, 实现主动支护、取了所有内支撑, 可缩短施工工期和节省维护费用。

(2) 本文建立了加筋水泥土斜锚桩基坑维护结构的稳定性分析模型, 计算简单, 其计算结果被实测结果验证该计算模型是可靠的。

(3) 从开挖结果来看, 水泥土地锚支护效果好, 搅拌桩形成止水帷幕, 保证了基坑稳定和地面建筑物的安全, 这表明水泥土地锚支护对加固软弱

表 1 土层参数表

Table 1 Parameter of soil layers

土层编号	土层描述	土层厚度 /m	主要计算指标		
			重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi / (^\circ)$	c / kPa
1	由砂土、碎石、粘土堆填而成素填土	2.5	17.2	15	10
2	深灰色、流塑、饱和淤泥质土层	4.0	16.8	12	5
3	混 20% 淤泥、松散、饱和淤泥质砂层	2.5	17.8	30	6
4	灰色、稍密、饱和海相冲积砂层	2.6	19.0	30	6
5	裂隙较发育、易软化强风化泥岩	10.0	22.0	32	30

表 2 不同半径条件下计算结果

Table 2 Calculation results of different circle radius

R /m	α_0 / $^\circ$	α_1 / $^\circ$	M_i /(N·m)	M_{E1} /(N·m)	ΣM_H /(N·m)	M_r /(N·m)	M_T /(N·m)	M_{Ep} /(N·m)	M_{r2} /(N·m)	ΣM_K /(N·m)	K
21	19.9	58	26 689	1 220	27 909	11 624	3 070	31 034	1 243	46 971	1.683
22	20.8	57	28 610	1 369	29 979	11 128	3 490	32 331	1 294	48 243	1.609
23	21.7	57	30 475	1 526	32 001	10 802	3 930	34 034	1 325	50 091	1.565
24	22.4	56	30 505	1 673	32 178	11 361	4 344	35 270	1 379	52 354	1.627

土层,改善地质条件是切实可行的。

(4) 实测结果表明:该工程加筋水泥土斜锚桩维护结构,经开挖后基坑稳定,墙体最大位移 26 mm,平均为 20 mm。表明加筋水泥土斜锚桩维护结构是安全的。

参考文献(References):

- [1] 李 峰. 深基坑锚杆护坡桩支护结构稳定性评价[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(2): 44 - 47.(Li Feng. Stability valuation of revetment structure with anchor pole in deep excavation[J]. Geology of Coal Field in China, 1998, 10(2): 44 - 47.(in Chinese))
- [2] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报[J], 2002, 35(4): 86 - 90.(Yu Jianlin, Gong Xiaonan. Study of formational property of deep excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86 - 90. (in Chinese))
- [3] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 347 - 349.(Gong Xiaonan. Design and Construction Manual of Deep Excavation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. 347 - 349.(in Chinese))
- [4] 中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会编. 锚固与注浆技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999, 3 - 5.(Commission of Anchor and Injection in China Commission of China Rock Mechanics and Engineering. Technical Manual of Anchor and Injection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. 3 - 5.(in Chinese))
- [5] 叶书麟, 陈促颐. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 501 - 507.(Ye Shulin, Chen Cuyi. Foundation Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1991. 501 - 507.(in Chinese))
- [6] 荒木和彦, 岡琦正弘. アヘスアニカ工法讲座[J]. 土木技术, 1975, 30(6 - 10): 42 - 49.
- [7] 卢肇钧, 吴肖茗, 孙葵英. 关于锚定板结构的整体稳定[J]. 土木工程学报, 1982, 15(4): 75 - 80.(Lu Zhaojun, Wu Xiaoming, Sun Kuiying. Whole stability of anchor slab structure[J]. China Civil Engineering Journal, 1982, 15(4): 75 - 80.(in Chinese))
- [8] Juran I, Elias V. Ground Anchor and Soil Nails in Retaining Structures. Foundation Engineering Handbook(Second Edition)[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Pub., 1991. 868 - 906.
- [9] Juran I, Bandrand G. Design of soil nail retaining structures[J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1990, 25: 654 - 659.
- [10] Michalwsk R L. Stability of uniformly reinforced slopes[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 123(6): 546 - 555.
- [11] Wu X M. Support for deep excavation in China[A]. In: Proceedings of the International Conference on Deep Foundation(Vol.II)[C]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1986. 48 - 53.