

下伏倾斜硬层岸边软土区锚拉式桩承加筋路堤及其设计计算方法

陈昌富, 高松, 毛凤山, 朱世民
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对岸边软土区经常遇到的下伏倾斜硬层软土地基, 本文提出了一种锚拉式桩承加筋路堤体系。该体系由支护桩、承重桩、桩帽、锚杆(索)、加筋垫层、水平拉杆、加筋土挡墙等部分组成, 可实现水平和竖向作用效应的分离式高效传递。根据应力扩散效应, 推导了该体系布置方案中临界土拱高度公式, 进而得到了水平加筋垫层中加筋体抗拉力计算公式。基于弹性地基梁理论, 分析了支护桩桩侧土总抗力, 获得了横向拉杆和锚杆拉力计算公式, 并确立了支护桩桩身承载力验算方法。在上述理论研究的基础上, 构建了该体系的设计方法, 并通过算例展示其详细的分析和设计过程以及参数选取原则。

关键词: 桩承式加筋路堤; 锚杆; 加筋土挡墙; 支护桩; 非等厚软土地基

中图分类号: TU12

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)06-0461-10

A foundation system of anchored pile-supported geosynthetic-reinforced embankment in soft area of underlying inclined hard layer bank

CHEN Chang-fu, GAO Song, MAO Feng-shan, ZHU Shi-min

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A foundation system of anchored pile-supported geosynthetic-reinforced embankment is developed to reinforce the soft soil foundation with inclined bedrock often encountered on shores. The system consists of retaining piles, bearing piles, pile caps, anchor bolts (cables), reinforced cushions, horizontal tie rod, geogrid-reinforced earth retaining wall and so on, which can realize the separated and efficient transmission of the horizontal and vertical action effect. According to the stress diffusion effect, the formula of critical soil arch height in the system layout scheme is deduced, and the formula for calculating the tension resistance of the reinforced material in the reinforced cushion is obtained. Based on the elastic foundation beam theory, the total resistance provided by the soil on the side of the retaining piles is analyzed, and the formula for calculating the tension of the transverse tie rod and the anchors rods is obtained, and then the checking method for the bearing capacity of the retaining piles is established. On the basis of the above theoretical research, a complete design method of the system is summarized, and the detailed analysis and design process as well as the principles of parameter selection are demonstrated with an example.

Key words: pile-supported geosynthetic-reinforced embankment; anchor bolts; geogrid-reinforced earth retaining wall; retaining piles; unequal thickness soft soil foundations

0 引言

随着基础设施建设水平和速度的不断提高, 我国公路和铁路里程数大幅增加, 线路分布越来越广, 在修建过程中会途径大量江河、湖泊、沼泽、山谷、

洼地等地质环境, 也必然会遇到大量的岸边软土地基。岸边软土地基地质成因复杂, 一般由厚度不均的软土层和下伏倾斜坚硬土层或岩层组成, 软土层承载力低, 往往不能直接用于公路或铁路路堤的持力层。

收稿日期: 2020-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(51278186, 51978254)。

作者简介: 陈昌富(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、边坡工程及支挡结构研究。E-mail: cfchen@163.com。

在处理下伏硬层软土地基时, 桩承式路堤^[1-3]或桩网复合地基^[4-9]是较为常用的技术措施, 尤其在处理下伏水平层状坚硬土层或岩层的软土地基时, 已被证实可取得较好的加固效果。但在处理下伏倾斜硬层的岸边软土地基时, 若直接应用上述技术, 很容易产生地基的竖向沉降差超限、水平位移和稳定性难以控制等问题^[10], 影响列车或汽车的行驶安全。而且已有试验与数值分析结果表明^[10-14]: 与加固水平层状软土地基相比, 加固下伏倾斜硬层软土地基的桩网复合地基, 呈现出明显不同的变形特征及破坏模式。出现上述问题的主要原因在于, 下伏倾斜硬层软土地基上的桩承式堤或桩网复合地基, 在路堤修筑和运行期间, 不仅承受竖向力, 还承受较为明显的水平推力, 易于引起偏向下坡一侧(参见图1)的水平位移^[9-10], 水平位移又加剧竖向变形并使得路堤存在整体滑移的风险。而且, 路堤越高、运行荷载越大, 上述问题越为突出。因此, 有必要采用新的处治技术来加固下伏倾斜硬层的软土地基, 并建立相应的计算模型和设计方法。

针对常规技术用于处治下伏倾斜硬层岸边软土地基时, 易于出现地基的差异沉降较大、软土层较厚、侧路堤稳定性较差等工程问题, 本文提出一种锚拉式桩承加筋路堤体系^[15], 该体系由支护桩、承重桩、桩帽、锚杆(索)、加筋垫层、水平拉杆、加筋土挡墙等部分组成, 可实现水平和竖向作用效应的分离式高效传递; 然后, 根据应力扩散效应, 推导该体系布置方案中临界土拱高度公式, 进而得到水平加筋垫层中加筋体抗拉力计算公式; 再基于弹性地基梁理论, 分析支护桩桩侧土总抗力, 获得横向拉杆和锚杆拉力计算公式, 进而确立支护桩桩身承载力验算方法; 最后, 在上述理论研究的基础上,

构建该体系的设计计算方法, 并采用算例展示其详细的设计计算过程以及参数选取原则。

1 锚拉式桩承加筋路堤及设计计算方法

1.1 锚拉式桩承加筋路堤

当道路行进于江河岸边, 而岸边是如图1所示的下伏有倾斜硬层的软土区, 如果采用桩体复合地基加固, 则随着路堤断面从较薄软土层向较厚软土层延伸时, 桩体长度会越来越长, 这不仅使地基加固费用急剧增加, 而且还容易出现地基的差异沉降较大、软土层较厚、侧路堤稳定性较差等工程问题。为此, 笔者提出一种适合于下伏倾斜硬层岸边软土区的锚拉式桩承加筋路堤结构体系^[15](如图1)。该结构体系由支护桩、承重桩、桩帽、锚杆(索)、加筋垫层、水平拉杆、加筋土挡墙等部分组成。由路堤自重、交通荷载等上部荷载产生的竖向荷载, 主要通过加筋垫层和承重桩传递至硬土层; 而上部荷载引起的土压力(水平推力)则通过挡土墙传递给支护桩、拉杆和锚杆(索)。

如图2所示, 承重桩可按正方形布置, 桩间距为 S_p 。桩帽呈正方形, 其边长为 a , 其两条对角线分别与路堤的纵向和横向一致, 水平拉杆穿过对角线。这种桩锚布置方式可减小拉杆长度、增加桩帽稳定性、保持土拱具有较规则的形状和较好的稳定性。该体系将路堤荷载在桩上可能产生的水平推力通过拉杆传递给预应力锚杆承担, 而产生的竖向力则由承重桩承担, 从而实现竖向力和水平力分离并分别由竖向承载性能较好的承重桩和抗拉能力较强的拉杆和锚杆来承担。

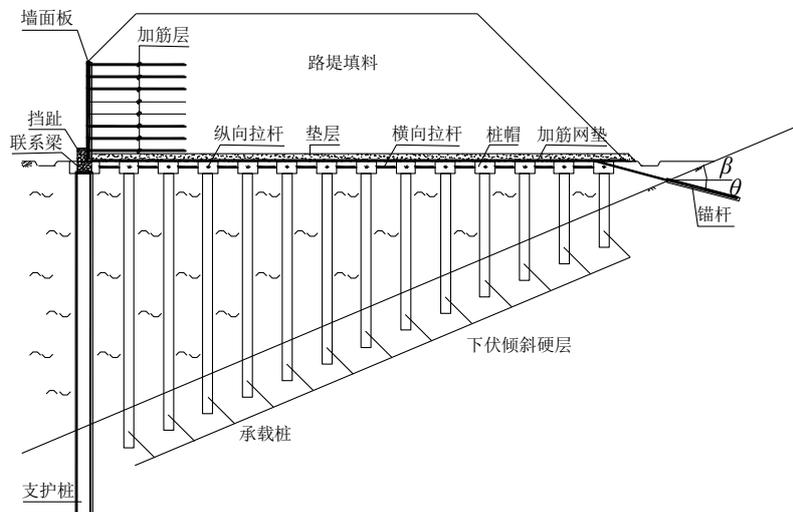


图1 锚拉式桩承加筋路堤体系

Fig. 1 Foundation system of anchored pile-supported geosynthetic-reinforced embankment

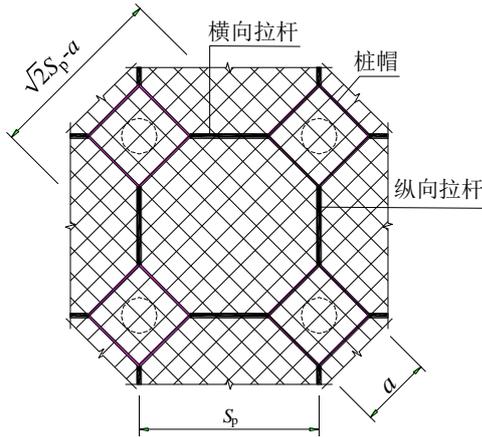


图 2 锚拉式桩承加筋路堤平面布置示意图

Fig. 2 Layout plan of the foundation system of anchored pile-supported geosynthetic-reinforced embankment

1.2 锚拉式桩承加筋路堤体系设计计算方法

锚拉式桩承加筋路堤体系的设计计算内容主要包括：桩型选择、桩间距确定、最小设计路堤高度验算、加筋网垫设计、支护桩和承重桩承载力验算、拉杆和预应力锚杆设计计算、加筋土挡墙设计计算。在进行上述计算时，主要依据以下假定：

(1) 承重桩和加筋垫层不承受因土压力而产生的水平推力，亦即作用于挡土墙上的土压力经挡土墙与墙底摩擦作用及挡趾的限位作用，最终全部传递到支护桩、拉杆和锚杆上；

(2) 基于文克尔弹性地基梁理论，按“*m*”法计算支护桩外侧土体提供的水平抗力。

因桩型选择、桩间距确定、加筋土挡墙设计等内容在现有规范^[16-18]中已有明确规定和说明，本文将不再详细讨论，下面重点讨论与规范中设计计算方法不同或者规范中没有的内容。

1.2.1 路堤最小设计高度验算

确定土拱高度是路堤填土高度设计的前提，也是水平加筋垫层中加筋体设计与计算的依据。我国复合地基技术规范^[17]采用了应力扩散方法，假定桩承式路堤土拱的形式为三角形楔体，顶角为 2φ ，其中 φ 为材料的内摩擦角，黏性土取综合内摩擦角，依此来计算临界高度。本文沿用此假定，并根据桩帽布置形式，推导土拱临界高度。

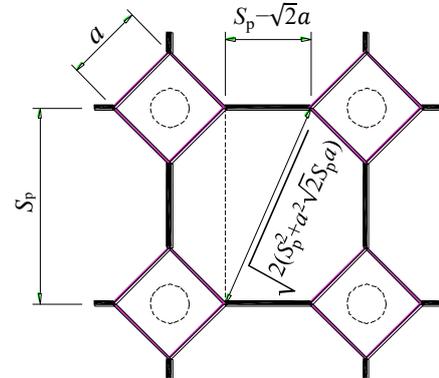
由于采用正方形布桩，桩帽也设计为正方形，根据桩帽布置形式（如图 2），土拱底面形状为八边形（如图 3）。假定土拱为八棱锥形状，且过锥底面最长对角线剖面上的锥角为 2φ ，则桩帽之间的临界土拱高度计算公式为：

$$h_c = \frac{\sqrt{2(S_p^2 + a^2 - \sqrt{2} \cdot S_p a)}}{2 \tan \varphi} \quad (1)$$

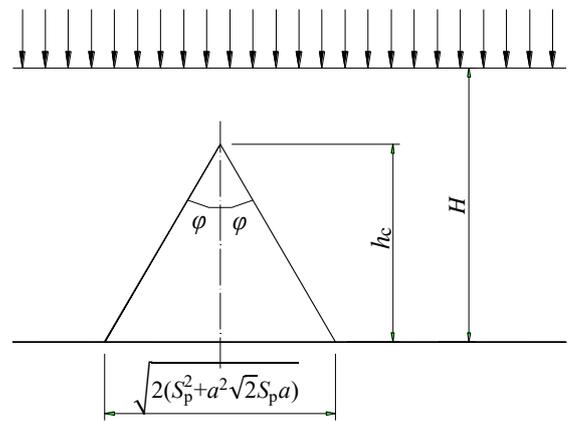
式中： h_c 为临界土拱高度。

由此，路堤最小设计高度 H_{\min} 应满足：

$$H_{\min} \geq 1.2h_c \quad (2)$$



(a) 平面图



(b) 竖向剖面图

图 3 八棱锥土拱计算示意图

Fig. 3 Soil arching of octagonal pyramid body

1.2.2 加筋网垫设计

加筋网垫主要承担土拱内土体的重量 W_T ，若路堤填料重度为 γ ，则八棱锥土拱内土体重量为：

$$W_T = \frac{1}{3}(S_p^2 - a^2)h_c\gamma \quad (3)$$

假定土拱内土体荷载最终传递到由两个宽度为 a 、斜向正交的加筋体来平均承担，加筋体受土拱内土体重力作用后产生变形，其变形近似于三角形，则由图 4 中加筋体变形与力对应的几何关系得：

$$\frac{T_g a}{\sqrt{4^2 + (\sqrt{2}S_p - a)^2} / 4} = \frac{\gamma_G W_T / 4}{\Delta} \quad (4)$$

式中： γ_G 为拱内土体的重量 W_T 的分项系数，一般可取 $\gamma_G=1.35$ 。

由式 (4) 可得水平加筋垫层中加筋体抗拉力 T_g 为：

$$T_g = \frac{1.35W_T \sqrt{(\sqrt{2}S_p - a)^2 + 4\Delta^2}}{8a\Delta} \quad (5)$$

式中： Δ 为加筋体中点最大下垂量，根据复合地基技术规范^[17]， Δ 可取桩间距的1/10，最大不宜超过0.2 m。

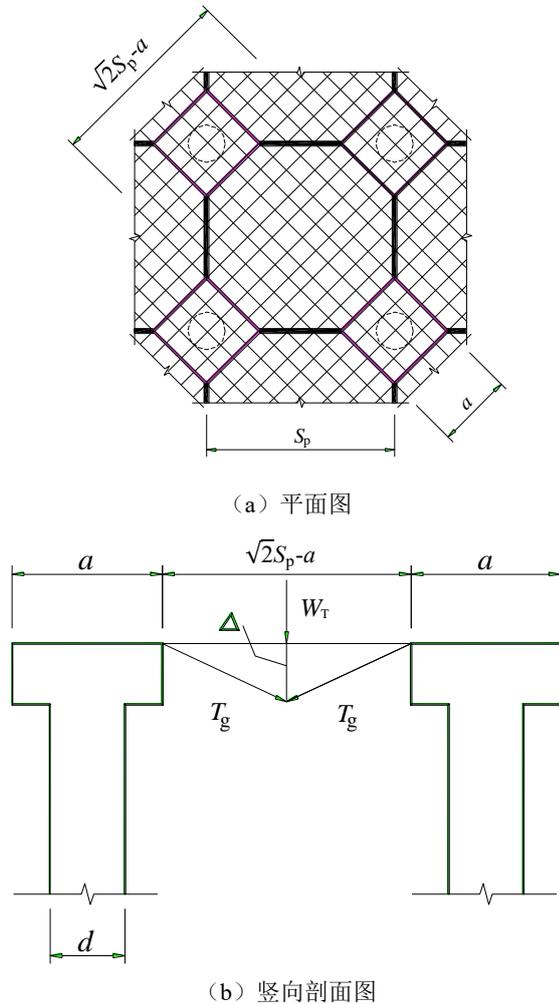


图4 加筋体拉力计算示意图
Fig. 4 The tension resistance of the reinforced material

1.2.3 拉杆拉力计算

由以上假定可知，作用于横向拉杆上的拉力 T_b 等于路堤产生的总土压力水平分量 $E_a S_p$ 减去支护桩外侧土体提供的总水平抗力 R_s (如图5)，其中支护桩桩长为 l_p ，土压力引起的支护桩桩顶水平力合力为 Q_0 。拉杆可选用混凝土梁、防腐处理后的钢筋或钢绞线。

达到设定的桩顶容许水平位移 x_0 时，对应的 Q_0 即为总水平抗力 R_s 。由文献^[19]可知，弹性长桩桩顶水平位移 x_0 与桩顶水平力 Q_0 关系式如下：

$$x_0 = \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} A_x \quad (6)$$

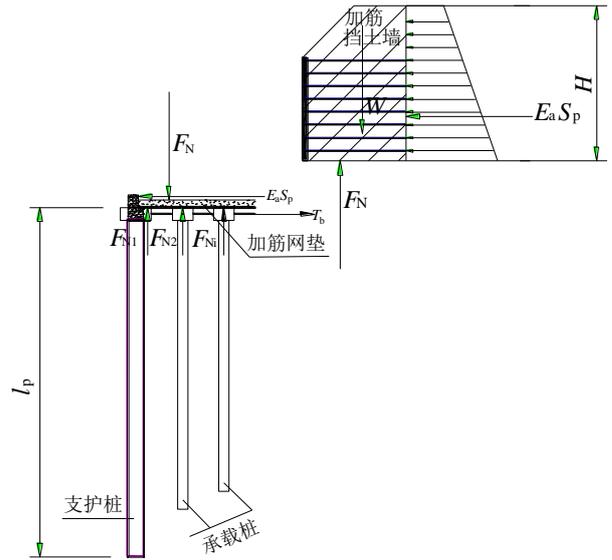


图5 横向拉杆拉力计算简图
Fig. 5 The tension of the horizontal tie rod

假若支护桩地表处容许水平位移为 $[x_0]$ 值，则有：

$$Q_0 = \frac{[x_0] \cdot \alpha^3 EI}{A_x} \quad (7)$$

式中： A_x 为无量纲系数； EI 为桩的抗弯刚度， $EI=0.8E_c I$ ， E_c 为混凝土弹性模量， I 为桩的惯性矩； $[x_0]$ 不大于 0.01 m^[18-19]； α 为桩的变形系数，由下式计算：

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{EI}} \quad (8)$$

式中： m 为地基水平抗力系数的比例系数； b_1 为桩的计算宽度，可按式^[18,20] 计算：

$$b_1 = \begin{cases} k \cdot k_f (d + 1), & d \geq 1.0 \text{ m 时} \\ k \cdot k_f (1.5d + 0.5), & d < 1.0 \text{ m 时} \end{cases} \quad (9)$$

其中： k_f 为桩形状换算系数，圆形截面 $k_f=0.9$ ，矩形截面 $k_f=1.0$ ； k 为桩间相互影响系数，单排桩 $k=1.0$ ； d 为桩径或垂直于水平外力方向桩的宽度。

若设有 n_p 排支护桩，则支护桩桩侧土总抗力 R_s 可按式计算：

$$R_s = n_p Q_0 = \frac{[x_0] n_p \alpha^3 EI}{A_x} \quad (10)$$

则横向拉杆拉力 T_b 为：

$$T_b = E_a S_p - R_s = E_a S_p - \frac{[x_0] n_p \alpha^3 EI}{A_x} \quad (11)$$

1.2.4 锚杆设计

设锚杆的倾角为 θ ，则锚杆轴向拉力 T_a 为：

$$T_a = \frac{T_b}{\cos \theta} = \frac{E_a S_p}{\cos \theta} - \frac{[x_0] n_p \alpha^3 EI}{A_x \cos \theta} \quad (12)$$

此外锚杆截面面积和锚杆锚固段长度需依据岩土锚杆规范^[23]进行设计计算。

1.2.5 支护桩和承载桩的设计

1.2.5.1 支护桩设计

支护桩可采用灌注桩、预制桩等类型,其设计内容包括桩身最大弯矩和最大剪力计算以及桩身正截面受弯和斜截面受剪承载力验算。因支护桩顶的填土重量对其桩身受弯和斜截面受剪承载力是有利作用,且支护桩承受水平作用为主,因此支护桩如果能满足水平承载力要求,则一般能满足竖向承载力要求。所以,在验算支护桩的承载力时,不考虑支护桩轴向力^[24]。

桩顶所受水平力 H_0 等于单根支护桩桩侧土总抗力 R_s (如图5),即:

$$H_0 = R_s = \frac{[x_0]\alpha^3 EI}{A_x} \quad (13)$$

基于 m 法可得任意深度 z 处桩弯矩^[19]为:

$$M_z = \frac{H_0}{\alpha} A_M \quad (14)$$

式中: A_M 为无量纲系数。

桩身最大剪力 V 出现在桩顶,数值上等于桩顶所受水平力 H_0 。

预制桩可根据桩身最大弯矩和剪力,结合相关图集等材料进行选用;灌注桩设计时,桩身斜截面承载力的计算依据混凝土结构设计规范^[22]进行,正截面受弯承载力计算参见基坑支护规范^[24]。

1.2.5.2 承重桩设计

承重桩可采用灌注桩、预制桩等类型,单桩竖向承载力应通过试桩确定,对于灌注桩或预制桩(闭口)可通过下列公式^[18]预估其单桩竖向承载力特征值 R_a :

$$R_a = \frac{1}{2} Q_{uk} = \frac{1}{2} (u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A) \quad (15)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向承载力标准值; u 为桩的周长; q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值; l_i 为第 i 层土的厚度; q_{pk} 为极限端阻力标准值。其他类型桩的承载力计算以及其他设计要求,详见相关桩基技术规范^[18,20,25]。

2 算例分析

某路堤高 6.0 m,路堤顶部宽度 13.6 m,填土重量为 γ 为 18.5 kN/m³,填土综合内摩擦角为 $\varphi=31^\circ$ 。地基分层土质依次为:淤泥质粉质黏土,灰褐色,

软塑,厚度为 1.7~10.4 m;粉质黏土,灰褐色,中密状态,厚度为 0.3~1.2 m;倾斜基层为卵石层,未揭穿,基层倾角约为 23° ,其桩侧极限侧阻力特征值 q_{sia} 为 100 kPa,极限端阻力特征值 q_{pa} 为 3 500 kPa。采用本文提出的锚拉式桩承加筋路堤体系进行路堤设计,其中支护桩侧软土的地基水平抗力系数的比例系数 $m=4 500$ kN/m⁴。

2.1 承重桩设计和设计路堤高度验算

因本算例路堤高度为 6 m,根据城市道路路基设计规范^[21]可知车辆荷载为 15 kN/m²,承重桩采用预应力混凝土管桩(PC桩),直径为 400 mm,型号为 PC-400-AB-95,选择卵石层为桩端持力层,进入持力层 3 倍桩径即 $l=1.2$ m,单桩竖向承载力特征值 R_a 根据现场载荷试验确定,本算例设计时依据式

$$(15) \text{ 预估 } R_a = \frac{1}{2} (u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A) = 590.6 \text{ kN}, \text{ 假设桩}$$

间距 S_p 为 1.6 m,柱帽边长为 a 为 0.8 m,桩帽厚度 d 为 0.6 m,单桩受荷范围内荷载标准值为 $F=(15.0+18.5 \times 6.0) \times 1.6^2 = 322.56 \text{ kN} < R_a$,则单桩竖向承载力满足要求。

根据式(1)可得临界土拱高度为:

$$h_c = \frac{\sqrt{2(S_p^2 + a^2 - \sqrt{2} \cdot S_p a)}}{2 \tan \varphi} = 1.387 \text{ m}, \text{ 设计土拱}$$

最小高度 $H_{\min}=1.2h_c=1.665 \text{ m} < 6.0 \text{ m}$,则设计路堤高度和桩间距满足要求。

2.2 加筋网垫设计

土拱重量依据式(3)得:

$$W_T = \frac{1}{3} (S_p^2 - a^2) h_c \gamma = 16.426 \text{ kN} \quad (16)$$

将式(16)代入式(5)得加筋体抗拉力:

$$T_g = \frac{1.35 W_T \sqrt{(\sqrt{2} S_p - a)^2 + 4 \Delta^2}}{8 a \Delta} = 32.426 \text{ kN/m} \quad (17)$$

其中:加筋体中点最大下垂量 Δ 取桩间距的 $1/10$ ^[17] 为 0.16 m,则选用抗拉强度不小于 35 kN/m 的土工格栅或高强有纺土工织物可满足要求。

2.3 拉杆拉力计算

加筋挡土墙高度为 4 m,为简化计算,将挡墙以上 2 m 路堤荷载视为超载 q_1 (如图5),则 $q_1=18.5 \times 2=37 \text{ kN/m}^2$,汽车荷载视为超载 $q_2=15 \text{ kN/m}^2$,则挡土墙顶以上总超载 $q=q_1+q_2=37+15=52 \text{ kN/m}^2$,荷载因数 f_f 取 1.3,可知路堤作用于加筋挡墙土压力为:

$$E_a = \frac{1}{2} K_a f_f (\gamma H + 2q) H = 148.10 \text{ kN/m} \quad (18)$$

若支护桩采用钢筋混凝土灌注桩, 桩径 $d=0.6\text{ m}$, 桩体采用 C30 混凝土, 弹性模量 $E_c=3.0\times 10^7\text{ kPa}$, 根据式(9)得桩计算宽度: $b_1=k\cdot k_f(1.5d+0.5)=1.26m>2d=1.2\text{ m}$, 则取 $b_1=1.2\text{ m}$, 支护桩抗弯刚度 EI 为 $EI=0.8E_cI=1.527\times 10^5\text{ kN}\cdot\text{m}^2$, 支护桩变形系数依据式(8)可得:

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_1}{EI}} = 0.5125 \quad (19)$$

因 $\alpha l_p > 4$, 可查表^[19]得支护桩桩顶位置 $A_x=2.435$, 将上述参数代入式(11)得拉杆轴力 T_b :

$$T_b = E_a S_p - \frac{[x_0]n_p \alpha^3 EI}{A_x} = 152.5\text{ kN} \quad (20)$$

采用经过防腐处理的钢筋作为拉杆, 假设拉杆选用 1 根 25 mm 直径 HRB 400 级钢筋, 则抗拉力:

$$T' = 490.9 \times 360 \div 1000 = 176.7\text{ kN} > T_b = 152.5\text{ kN} \quad (21)$$

则满足要求, 且拉杆在桩帽中的锚固长度需满足混凝土规范^[22]的要求。

2.4 支护桩设计

为详尽展示支护桩设计方法, 本算例中的支护桩采用灌注桩。灌注桩根据桩身纵向受力钢筋分布形式的不同, 又可分为“沿桩周边均匀布置”(如图 6a)和“沿受拉区和受压区周边局部均匀布置”(如图 6b)。因在承受单向水平力时, 后者比前者更为合理且经济性更好, 所以本算例采用桩身纵向钢筋“沿受拉区和受压区周边局部均匀布置”。

在进行桩身纵向钢筋“沿受拉区和受压区周边局部均匀布置”的配筋验算时, 先假定混凝土受压区配筋量 A'_{sr} 和受拉区钢筋配筋量 A_{sr} , 再根据式(22)计算受压区对应圆心角与 2π 的比值 α , 然后根据式(22)验算桩身受弯承载力是否大于设计弯矩 M , 如不满足则调整 A'_{sr} 和 A_{sr} , 继续上述计算^[24]。

$$\alpha f_c A \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha} \right) + f_y (A'_{sr} - A_{sr}) = 0 \quad (22)$$

$$M \leq \frac{2}{3} f_c A r \frac{\sin^3 \pi\alpha}{\pi} + f_y A_{sr} r_s \frac{\sin \pi\alpha_s}{\pi\alpha_s} + f_y A'_{sr} r_s \frac{\sin \pi\alpha'_s}{\pi\alpha'_s} \quad (23)$$

式中: f_c 为支护桩混凝土轴心抗压强度设计值; f_y 为纵筋钢筋抗拉强度设计值; A 为支护桩截面面积; r_s 为纵向钢筋重心所在圆周的半径; α_s 为受拉钢筋圆心角与 2π 的比值, α_s 通常可取 0.25; α'_s 为受压钢筋圆心角与 2π 的比值, 一般取 $\alpha'_s = 0.5\alpha$ 。同时 α 需满足式(24)且 $\alpha \geq 1/3.5$, 当 $\alpha \leq 1/3.5$ 时, 则需满足式(25)。

$$\cos \pi\alpha \geq 1 - \left(1 + \frac{r_s}{r} \cos \pi\alpha_s \right) \xi_b \quad (24)$$

$$M \leq f_y A_{sr} \left(0.78r + r_s \frac{\sin \pi\alpha_s}{\pi\alpha_s} \right) \quad (25)$$

在本算例中, 由式(13)可知支护桩桩顶水平力 H_0 为 84.4 kN, 经查表^[19]知当 $\alpha_x=1.4$ 时, A_M 有最大值为 0.772, 则桩身最大弯矩值 M 由式(14)可知为 127.1 kN·m。

支护桩半径 $r=0.3\text{ m}$, 桩体采用 C30 混凝土, 纵向钢筋与箍筋等级都为 HRB 400 级, 则 f_c 为 14.3 N/mm², f_y 为 360 N/mm²。假设支护桩混凝土受压区布置 5 根 12 mm 直径 HRB 400 级钢筋, $A'_{sr}=565\text{ mm}^2$, 受拉区布置 6 根 16 mm 直径 HRB 400 级钢筋, $A_{sr}=1206\text{ mm}^2$, 由式(22)可得受压区对应圆心角与 2π 的比值 α 为 0.2116。

在此基础上, 取 $\alpha_s=0.25$, $\alpha'_s=0.5\alpha$, r_s 为 240 mm, 代入式(22), 桩身受弯承载力大于设计弯矩 M , 可满足要求。根据混凝土规范^[22]可知矩形截面的相对界限受压区高度 $\xi_b=0.1806$, 由式(24)得 $\cos \pi\alpha=0.7870 > 1 - \left(1 + \frac{r_s}{r} \cos \pi\alpha_s \right) \xi_b=0.7172$, 但因 $\alpha=0.2116 < 1/3.5$, 则需同时满足式(25), 经过验算 $f_y A_{sr} \left(0.78r + r_s \frac{\sin \pi\alpha_s}{\pi\alpha_s} \right) = 195.4\text{ kN}\cdot\text{m} > M_{\max}=127.1\text{ kN}\cdot\text{m}$, 则证明上述受压区和受拉区的配筋是合理的。

在验算桩身斜截面承载力时, 依据基坑支护技术规程^[24], 将圆形截面换算成矩形截面, 其中矩形截面宽 $b=1.76r=528\text{ mm}$, 截面有效高度 $h_0=1.6r=480\text{ mm}$, 根据混凝土规范^[22]可知, 截面混凝土受剪承载力系数 $\alpha_{cv}=0.7$, 则 $\alpha_{cv}f_t b h_0=253.7\text{ kN} > V_{\max}=84.4\text{ kN}$, 则可不进行受剪承载力验算, 箍筋按构造配置。

2.5 锚杆计算

2.5.1 锚杆截面面积计算

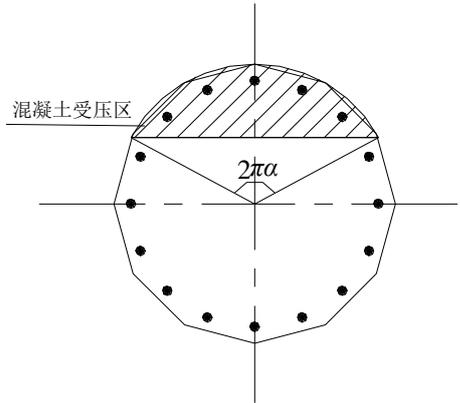
本算例锚杆锚固层为卵石层, 依据岩土锚杆(索)规范^[23], 锚杆杆体抗拉安全系数 $K_t=1.6$, 杆体材料为牌号 40Si₂MnV 的精轧螺纹钢筋, $f_{yk}=540\text{ N/mm}^2$, 锚杆与水平方向之间的夹角 θ 取 15°, 则根据式(12), 锚杆轴向拉力 T_a 为:

$$T_a = \frac{T_b}{\cos \theta} = \frac{152.5}{\cos 15^\circ} = 157.9\text{ kN} \quad (26)$$

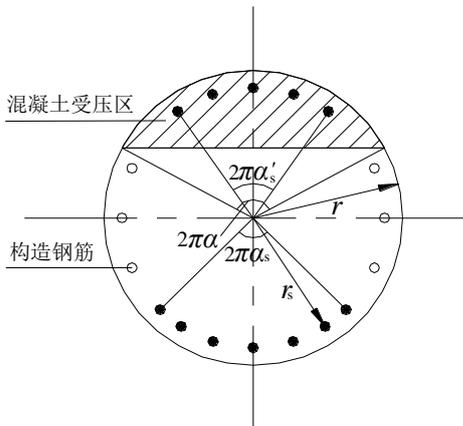
锚杆杆体的截面面积为:

$$A_s \geq \frac{K_t T_a}{f_{yk}} = \frac{1.6 \times 157.9 \times 10^3}{540} = 467.85\text{ mm}^2 \quad (27)$$

可选用公称直径为 25 mm 杆体, 锚杆水平间距为 1.6 m, 满足规范^[22] 要求。



(a) 纵向钢筋沿桩周边均匀布置



(b) 纵向钢筋沿受拉区和受压区周边局部均匀布置

图 6 支护桩纵向钢筋布置方式

Fig. 6 Arrangement of longitudinal rebar for retaining piles

2.5.2 锚杆锚固段长度计算

依据岩土锚杆(索)规范^[23], 锚杆锚固体抗拔安全系数 $K=2$, 结合锚固层岩体特征, 锚固段注浆体与地层间黏结强度标准值 f_{mg} 取 300 kPa, 锚固段注浆体与筋材间黏结强度标准值 f_{ms} 取 2 000 kPa; 锚固段钻孔直径 D 为 100 mm; 因单根锚杆钢筋根数 $n=1$, 则因多根钢筋引起的界面黏结强度降低系数 ξ 为 1.0; 经过初算, 锚固长度小于 4 m, 锚固长度对黏结强度的影响系数 $\phi=1.3$, 则锚杆锚固段长度 L_a 为:

$$L_a > \frac{KT_a}{\pi D f_{mg} \phi} = \frac{2.0 \times 157.9}{\pi \times 0.1 \times 300 \times 1.3} = 2.58 \text{ m} \quad (28)$$

$$L_a > \frac{KT_a}{n \pi d \xi f_{ms} \phi} = \frac{2.0 \times 157.9}{1 \times \pi \times 0.032 \times 1 \times 2000 \times 1.3} = 1.21 \text{ m} \quad (29)$$

结合规范^[23] 对于锚固长度构造规定, 锚固长度 L_a 取为 3 m, 且锚固段与自由段长度之和不小于

8.0 m。

2.6 加筋土挡墙设计

本算例路堤采用加筋土挡墙, 加筋长度一般为挡土墙高度 H 的 0.7~0.8 倍, 本算例加筋长度 $L > 0.8 \times 4 = 3.2 \text{ m}$, 取 $L=4.0 \text{ m}$, 采用有纺土工织物作为筋材, 竖向间距 S_{vi} 为 0.5 m, 共设 8 层加筋层(如图 7)。加筋挡土墙的设计主要包括加筋土挡墙整体稳定性验算、筋材强度验算、筋材抗拔稳定性验算和挡土墙墙面设计等内容。挡土墙墙面可采用喷浆挂网、预制混凝土模块等方式, 主要由构造确定, 下面主要讨论前三项设计验算内容。

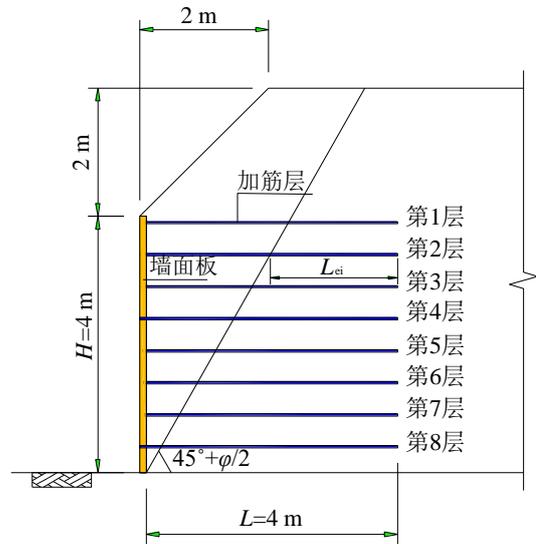


图 7 加筋挡土墙示意图

Fig. 7 Geogrid-reinforced earth retaining wall

2.6.1 加筋土挡墙整体稳定性验算

加筋土主要验算整体抗滑稳定性^[16], 并将加筋土体视为刚体, 加筋土体重力为:

$$W = 4 \times 4 \times 18.5 + (4 + 2) \times 2 \times \frac{1}{2} \times 18.5 = 407 \text{ kN/m},$$

墙背土压力 E'_a 由朗肯土压力确定, 采用承载能力极限状态的基本组合, 但其分项系数均为 1.0, 则 E'_a 为:

$$E'_a = \frac{1}{2} K_a (\gamma H + 2q) H = 113.92 \text{ kN/m} \quad (30)$$

根据土工合成材料技术规程^[16], 有纺土工织物与土摩擦系数为:

$$\mu = \frac{2 \tan \phi}{3} = 0.4 \quad (31)$$

则抗滑稳定安全系数:

$$F_s = \frac{\mu W}{E'_a} = \frac{0.4 \times 407}{113.92} = 1.429 > 1.3 \quad (32)$$

满足抗滑整体稳定性要求。

2.6.2 筋材强度验算^[16]

$$T_i = [(\sigma_{vi} + \Sigma \Delta \sigma_{vi}) K_i + \Delta \sigma_{hi}] s_{vi} / A_r, T_i \text{ 为第 } i \text{ 层}$$

筋材水平拉力, 因筋材水平向满铺, 则筋材面积覆盖率 A_r 为 1.0, 筋材竖向间距 s_{vi} 为 0.5 m, 柔性筋材土压力系数 $K_i = K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) = 0.32$, σ_{vi} 为验算层筋材所受土的垂直自重压力, $\Sigma \Delta \sigma_{vi}$ 为超载引起的垂直附加应力, $\Delta \sigma_{vi}$ 为水平附加荷载, 本算例中 $\Delta \sigma_{vi} = 0$, 各层筋材的水平拉力如表 1 所示。

由表 1 可知, 选用允许抗拉强度不小于 20 kN/m 的有纺土工织物作为筋材, 可满足要求。

表 1 各层筋材的水平拉力

Tab. 1 Horizontal tension of each layer of the reinforced material

层数	距离地面高度 h_c/m	$\sigma_{vi}/(kN/m^2)$	$\Sigma \Delta \sigma_{vi}/(kN/m^2)$	$T_i/(kN/m)$
1	3.85	39.78	15.00	8.76
2	3.35	49.03	15.00	10.24
3	2.85	58.28	15.00	11.72
4	2.35	67.53	15.00	13.20
5	1.85	76.78	15.00	14.68
6	1.35	86.03	15.00	16.16
7	0.85	95.28	15.00	17.64
8	0.35	104.53	15.00	19.12

2.6.3 筋材抗拔稳定性验算^[16]

$$\text{第 } i \text{ 层筋材抗拔力 } T_{pi} = 2\sigma_{vi} B L_{ei} \mu, \text{ 由式 (31)}$$

可知 $\mu = 0.4$, B 为筋材宽度, 满堂铺时 $B = 1$, L_{ei} 为破裂面以外的筋材长度, 破裂面与水平面夹角为 $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$, 本算例中 $L_{ei} = 4 - h_{ci} \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$, 其中 h_{ci}

为第 i 层筋材距离基础面的距离。各层筋材的抗拔力 T_{pi} 如表 2 所示。

由表 2 可知, 每层筋材抗拔安全系数 $F_s > 1.5$, 满足要求。

综合上述加筋土挡墙整体稳定性验算、筋材强度验算、筋材抗拔稳定性验算可知, 加筋长度 L 取 4.0 m 是合理的, 且能满足工程设计目标。

3 结 语

为解决常规技术用于处治下伏倾斜硬层岸边软土地基时, 易于出现地基的差异沉降较大、软土层较厚侧路堤稳定性较差等工程问题, 本文提出了一种锚拉式桩承加筋路堤体系。该体系由支护桩、承重桩、桩帽、锚杆(索)、加筋垫层、水平拉杆、加筋土挡墙等部分组成, 可实现水平和竖向作用效应的分离式高效传递。

在构建该体系分析与设计方法过程中, 根据该体系桩帽布置形式, 结合应力扩散原理, 推导了桩帽之间的临界土拱高度计算公式; 根据加筋体受力与变形协调的几何关系, 得到了水平加筋垫层中加筋体抗拉力计算公式; 再基于弹性地基梁理论, 分析得到了支护桩桩侧土总抗力和任意深度的桩弯矩, 在此基础上, 获得了横向拉杆和锚杆拉力计算公式, 并归纳了支护桩桩身承载力的设计方法。并利用算例展示该体系详细的设计计算过程以及参数选取原则。

该体系水平和竖向传力途径清晰简捷, 可有效限制岸边软土路基水平和竖向位移, 保障其稳定性; 提供的设计方法明确且完整, 易于通过手算或者编程实现, 可为下伏倾斜硬层岸边软土区桩承式路堤设计提供技术和理论支持。

表 2 各层筋材的抗拔力和抗拔安全系数

Tab. 2 Pullout resistance and pullout safety factor of each layer of the reinforced material

层数	距离地面高度 h_c/m	$\sigma_{vi}/(kN/m^2)$	L_{ei}/m	$T_{pi}/(kN/m)$	$T_i/(kN/m)$	抗拔安全系数 F_s
1	3.85	39.78	1.82	57.97	8.76	6.61
2	3.35	49.03	2.10	82.55	10.24	8.06
3	2.85	58.28	2.39	111.31	11.72	9.49
4	2.35	67.53	2.67	144.26	13.20	10.93
5	1.85	76.78	2.95	181.39	14.68	12.35
6	1.35	86.03	3.24	222.72	16.16	13.78
7	0.85	95.28	3.52	268.23	17.64	15.20
8	0.35	104.53	3.80	317.92	19.12	16.62

参考文献

- [1] 姜启珍, 刘吉福, 刘运明. 基于桩土作用的刚性桩复合地基承载力计算方法[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 32-36.
JIANG Qi-zhen, LIU Ji-fu, LIU Yun-ming. Calculation method of bearing capacity of rigid-pile composite foundation on account of pile-soil interaction[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(1): 32-36.
- [2] 徐日庆, 冯苏阳, 俞建霖, 等. 桩承式加筋路堤研究综述[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 31-40.
XU Ri-qing, FENG Su-yang, YU Jian-lin, et al. Review on geosynthetic-reinforced pile-supported embankments[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 31-40.
- [3] 郑俊杰, 罗先国, 付海平, 等. 基于 H&R 土拱模型的桩承式加筋路堤分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 50-54.
ZHENG Jun-jie, LUO Xian-guo, FU Hai-ping, et al. Analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment based on H&R soil arching model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 50-54.
- [4] 尹锋, 周航, 刘汉龙, 等. 车辆载重与动荷载对 X 形桩-网复合地基动力特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1324-1330, 1340.
YIN Feng, ZHOU Hang, LIU Han-long, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of XCC pile-geogrid composite foundation under static and dynamic loads of vehicles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1324-1330, 1340.
- [5] 李瑛, 郑健明, 陈东, 等. 深厚软土桩-网复合地基沉降控制现场试验研究[J]. 地基处理, 2020, 2(2): 111-115.
LI Ying, ZHENG Jian-ming, CHEN Dong, et al. Field test study on settlement control of pile-net composite foundation in deep soft soil[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(2): 111-115.
- [6] 陈昌富, 邱琳淇, 毛凤山, 等. 基于加权扰动共生生物搜索算法桩网复合地基优化设计[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4477-4485, 4514.
CHEN Chang-fu, QIU Lin-qi, MAO Feng-shan, et al. Design optimization of pile-net composite foundation based on perturbation-weighted symbiotic search (PWSOS) algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4477-4485, 4514.
- [7] 于进江, 程谦恭, 贺宏武, 等. 超大面积深厚软土桩-网复合地基承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3323-3330.
YU Jin-jiang, CHENG Qian-gong, HE Hong-wu, et al. Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3323-3330.
- [8] 曹新文, 卿三惠, 贺宏武, 等. 桩网复合地基土工格栅加筋效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3162-3167.
CAO Xin-wen, QING San-hui, HE hong-wu, et al. Experimental study on reinforcement effect of geogrid on composite foundation with dry jet mixing piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3162-3167.
- [9] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile support earth platforms over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 44-53.
- [10] 毕俊伟, 高广运, 张建经. 下覆倾斜地层软土桩-网复合地基破坏机理试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 1-9.
BI Jun-wei, GAO Guang-yun, ZHANG Jian-jing. Model test study on the failure mechanisms of the geogrid-reinforced and pile-supported foundation on soft soil with overlying sloping base[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 1-9.
- [11] 顾行文, 黄炜旺, 谭祥韶, 等. 基底倾斜的管桩复合地基路堤破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 204-208.
GU Xing-wen, HUANG Wei-wang, TAN Xiang-shao, et al. Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 204-208.
- [12] 王闰梅, 王浩. 交通荷载下斜坡软基路堤变形破坏机理分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 81-84.
WANG Run-mei, WANG Hao. Analysis of deformation and failure mechanism of embankment on inclined slope soft foundation under traffic load[J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 81-84.
- [13] 刘飞成, 张建经. 斜坡基底软土桩-网复合地基变形特性离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 209-219.
LIU Fei-cheng, ZHANG Jian-jing. Centrifuge test on deformation characteristics of pile-geogrid composite

- foundation in soft soil under slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 209-219.
- [14] 路言杰. 倾斜基底软土桩网复合地基工作机理分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 54-58.
- LU Yan-jie. Analysis of working mechanism of pile-geogrid composite foundation for reinforcing inclined soft soil base[J]. Railway Engineering, 2018, 58(3): 54-58.
- [15] 陈昌富, 毛凤山, 刘一俊, 等. 一种处治岸边软土路基的锚拉式桩承加筋堤设计方法. CN 106676992B[P]. 2017-02-14.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工合成材料应用技术规范: GB/T 50290-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范: GB/T 50783-2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [19] 周景星, 李广信, 张建红, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG D63-2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路路基设计规范: CJJ 194-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [23] 中国工程建设标准化协会标准. 岩土锚杆(索)技术规范: CECS 22: 2005[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规范: JGJ 120-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 劲性复合桩技术规范: JGJ/T 3327-014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

【简 讯】

2021年岩土工程西湖论坛（一号通知）

岩土工程西湖论坛（2021）拟定于2021年10月23—24日在杭州花家山庄召开。

计算与分析在岩土工程设计规划、运维管控、防灾减灾等全生命周期各个阶段皆发挥着不可或缺的作用，因此，本次会议主题设定为岩土工程计算与分析。会议旨在加强土木工程各行业间的交流，促进我国岩土工程计算与分析水平不断提高，开发拥有自主知识产权的岩土工程计算分析软件，更好地为我国工程建设服务。会前将围绕该主题组

织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第5册《岩土工程计算与分析》，并在中国建筑工业出版社出版。

热忱欢迎各位同行积极参与。

联系人：宋秀英

联系电话：0571-88208775

电子邮件：xysong2020@163.com

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址：

<http://www.zjdxyt.com>