

邻近建筑软基高填方支挡结构的优化设计

梁永辉

(上海现代设计集团申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘要:结合上海某邻近建筑的大型软基高填方工程,对支挡结构的受力变形特性及方案选型设计进行了分析,总结了软基高填方支挡结构设计中的关键技术问题,提出了桩承式加筋土复合支挡结构的设计方案和简化设计方法,并在工程中得到了成功应用,本文介绍的设计原理和方法可以为软土地区类似工程勘察设计及施工提供参考。

关键词:软基; 邻近建筑; 高填方工程; 桩承式加筋土复合支挡结构

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0697-05

作者简介:梁永辉(1983-),男,山西运城人,硕士,主要从事地基处理与基础工程等方面的设计与研究工作。E-mail: yonghui_liang@xd-ad.com.cn。

Optimization design of retaining structures for high filling projects close to buildings on soft soils

LIANG yong-hui

(Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: A systematic analysis is given for the scheme selection and mechanical characteristics of retaining structures with high filling adjacent to the buildings on soft ground. The critical technical problem is also summarized. A new type of composite retaining structure with pile-supported reinforced soils is put forward. It is successfully applied to the retaining structures for a typical project in Shanghai. The design principle and method may provide reference for similar projects.

Key words: soft ground; adjacent building; high filling project; composite retaining structure with pile-supported reinforced soil

0 引言

软基高填方工程对邻近建构筑物结构的不利影响主要包括以下几方面^[1-2]:①地基整体失稳引起邻近建筑的倾覆、不均匀沉降、结构裂缝等;②邻近建筑的高填方对建筑外墙产生较大的水平力,经结构基础传递至桩基,带来结构桩基的被动受力问题;③高填方堆载传递至软土地基中,产生较大的深层地基附加应力,尤其是巨大的水平应力,对邻近建筑的地基及基础产生不利的影响;④高填方荷载作用下软基的沉降带来邻近建筑结构基础的不均匀沉降或带来结构桩基础的负摩阻力。上述4个方面的不利影响在邻近建筑的软基高填方工程中往往同时并存,使得软基高填方支挡结构的设计和施工成为一个复杂的综合技术问题。

针对此类软基高填方支挡问题,笔者结合上海某典型邻近建筑高填方工程,在分析软基支挡结构受力特点的基础上,提出了桩承式加筋土复合支挡结构的

优化设计方案和设计方法,并得到了成功应用。本文介绍的优化设计方法和实践可以为软土地区类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 邻近建筑及高填土概况

上海某植物园通过堆土造坡并绿化,形成平均高度6~9 m,宽度40~200 m不等的绿色带状台地形人工山体(下文简称绿环),堆土造坡设计标高约4.5~14.0 m,因此堆土的实际高度约为1.0~10.5 m(自然地面平均标高按3.5 m计)。拟建3层建筑(3层框架结构,不设地下室)镶嵌于绿环堆土之中,±0.00相当于自然地面,拟采用独立承台PHC管桩基础,其东西两端堆土最高约10.5 m(设计标高为14.0 m),其南侧堆土最高约4.5 m(设计标高为8.0 m),北侧一

般没有堆土。建筑物与堆土平、剖面图见图1。

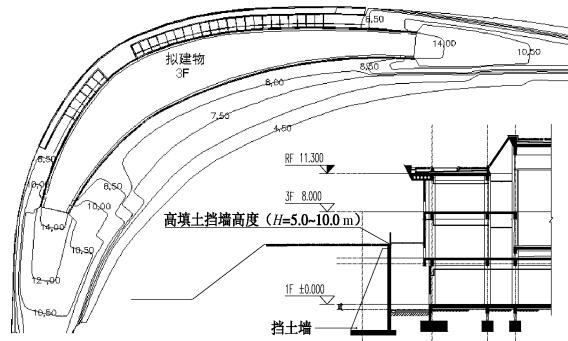


图1 建筑物与堆土平、剖面图

Fig. 1 Plan of construction and surrounding soils

1.2 场地地层概况

场地地貌类型属低山残丘～太湖湖沼平原地貌，浅层地层结构及主要土层物理力学性质指标见表1。

表1 场区地层特征

Table 1 Characteristics of soils

土层名称	层厚 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c /kPa	φ /(°)	$E_{s0.1-0.2}$ /MPa
①素填土	0.2~3.5				
②粉质黏土	0.4~2.9	18.4	17	11.5	3.86
③ ₁ 淤泥质粉质黏土	2.5~5.6	17.9	11	11.7	3.06
③ ₂ 灰色黏土	1.3~7.5	17.5	11	9.7	2.68
④ ₁ 粉质黏土	0.8~18.3	19.5	36	19.7	7.38
④ ₂ 草黄色粉质黏土	3.4~14.3	19.3	34	17.4	7.54
⑤ ₃ 灰色黏土	4.4~14.2	18.3	25	15.5	4.96
⑥粉质黏土	2.~20.9	19.2	46	19.0	7.23

由表1可见，场地表层为填土及薄层黏性土，地基土浅部（埋深10 m以内）主要为软塑～流塑状的软弱黏性土层，其物理力学性质指标较差，对高填方工程尤其是对邻近建筑的地基基础存在显著的不利影响，处理不当将会严重影响建筑结构的安全和使用。

2 支挡结构受力特点分析

天然地基上的挡土墙，墙背作用有土压力 E_a ，墙身作用有竖向重力 G ，墙底水平向作用有抵抗水平土压力的地基土抗滑移摩擦力 T ，墙底竖向作用有抵抗竖向荷载的地基反力 N ，在挡墙安全稳定的情况下，各力的分量应在水平向和竖向平衡，同时绕墙趾点的力矩应平衡。

为解决软土地基承载力的不足，并控制高填方地基沉降对结构基础的不利影响，桩基础常被用于支挡结构的基础和高填方的地基加固。采用桩基承载的挡土墙受力模式、荷载传递机理区别于天然地基上的传统挡墙，涉及桩基与挡土墙的相互作用，以及挡墙下基桩水平受荷以及桩土间复杂的相互作用^[3]。挡墙底

部的地基竖向反力 N 转化为桩顶反力 N_1 ， N_2 ， N_3 ，挡墙底部的地基摩擦力 T 转化为桩顶水平反力 T_1 ， T_2 ， T_3 ，以及地基土摩擦力 t 的复合作用。软基填方挡墙采用天然地基和桩基础情况下的受力模式示意图见图2。

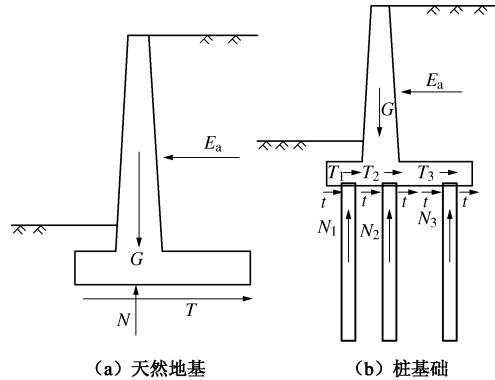


图2 天然地基和桩基础情况下的受力模式示意图

Fig. 2 Stress modes of natural foundation and pile foundation

工程实测表明软土地基上的基桩水平承载力较低，而受制于城市填土土源的稀缺，大部分填料来源于城市基坑开挖出土，土性指标较差。根据本工程不同桩型、桩径的水平承载力测试结果，直径600 mm的灌注桩水平承载力设计值在50~93 kN，而直径500 mm的PHC管桩水平承载力设计值仅50 kN。表2为不同填土高度时侧向土压力及水平承载桩的计算值。

表2 不同填土高度土压力及水平桩计算

Table 2 Horizontal earth pressure and calculation of piles

挡墙 高度 /m	底板 宽度 /m	基底竖 向荷载 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	基底水 平荷载 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	桩 型	n_x /(根· m^{-1})	n_y /(根· m^{-1})
5.0	3.0	300	150	S2	1.6	0.20
				S4	3.0	0.14
8.0	4.8	768	384	S2	4.1	0.50
				S4	7.6	0.36
10	6.0	1200	600	S2	6.5	0.78
				S4	12.0	0.57

注： n_x 代表每延米挡墙按水平承载控制的计算基桩数， n_y 代表每延米挡墙按竖向承载控制的计算基桩数。

表2计算结果表明，挡墙按竖向承载控制所需的用桩量仅为按水平承载控制桩数的1/10不及，采取桩基础承担高填方挡墙的水平荷载，用桩量极大，造成挡墙底板尺寸巨大，造价颇高，而这正是软基高填方挡墙设计的矛盾所在。为解决这个矛盾，在本工程的挡墙优化设计中，立足于采用经济性较高的PHC管桩来承载挡墙的竖向荷载，通过引入加筋土技术减小挡墙的侧向土压力，同时墙底采用加筋碎石垫层作为基桩的柔性平台，通过垫层与墙底的摩擦抵抗挡墙的水平力，通过加筋碎石垫层减小传递至基桩的水平力，从而减小桩基的水平承载要求，达到满足挡墙水平抗

滑移的目的。采用这种处理思路, 可以大幅减少挡墙的用桩量, 节省工程造价。

3 综合支挡方案作用机理及设计方法

3.1 综合支挡方案及作用机理

(1) 墙背土工加筋减小侧向土压力

土工加筋技术应用于填方挡土墙时可以起到显著减小挡墙墙被土压力的作用。本工程优化设计中利用墙后土工加筋技术减小土压力, 采用优化的刚性挡墙与墙后加筋土形成复合支挡结构, 通过室内加筋材料与土的摩擦特性试验, 取得相关的设计参数^[4], 提出了墙背加筋土结构的填土侧向土压力的计算方法^[5]。

(2) 带桩帽控沉桩复合地基满足挡墙竖向承载及变形

带桩帽的小截面方桩, 在上海地区的软基填方地基沉降控制中得到成功的应用^[6]。由于填方高度较大, 最大达到 10~12 m, 挡墙及填土荷载作用下, 地基土计算沉降量可达 80~120 cm, 远远不能满足规范及邻近建筑的保护要求, 因此, 本工程采用带桩帽的 PHC 管桩复合地基作为挡墙地基处理及墙后软基沉降控制的方案。

(3) 加筋碎石垫层提高挡墙水平抗滑移稳定

由于加筋碎石垫层的存在, 地基土的水平承载能力也得以发挥, 同时可以大大提高其桩基的水平承载能力^[7]。加筋碎石垫层直接提高了支挡结构底部的地基土水平摩擦系数, 提高挡墙的抗水平滑移安全系数, 同时加筋垫层的隔离避免了水平力向桩基的直接传递, 减小桩基的水平承载要求, 从而大幅减少水平承载控制下的桩基数量。

上述带桩帽的 PHC 管桩、桩帽顶部水平向加筋碎石垫层以及垫层上部的加筋复合支挡结构共同构成了本文所述的综合支挡方案——桩承式加筋复合支挡结构。图 3 为综合支挡方案的布置示意图。

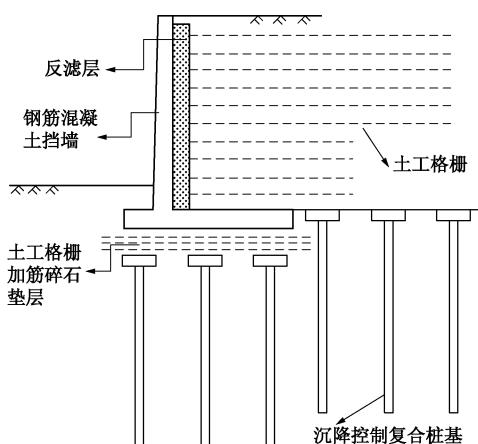


图 3 综合支挡方案示意图

Fig. 3 Diagram of composite retaining scheme

3.2 综合支挡方案的简化设计方法

综合支挡方案——桩承式加筋复合支挡结构的设计, 包括加筋土设计、挡土墙结构设计、带桩帽桩基及加筋垫层平台结构设计 3 个主要部分。

3.2.1 加筋土水平土压力的计算与加筋土结构设计

基于极限平衡理论可以对格栅加筋后的填土主动土压力进行分析。如图 4 所示, 1-2 为墙背, 2-3 为主动破裂面, X_i 为第 i 层土工格栅可以减小的水平力,

$$X_i = \text{Max}(F_i, T_i), \quad (1)$$

式中, F_i 为第 i 层土工格栅处单位宽度的抗拔力和, T_i 为第 i 层土工格栅单位宽度的设计允许抗拉力 (建议取 5% 应变率对应的抗拉强度)。

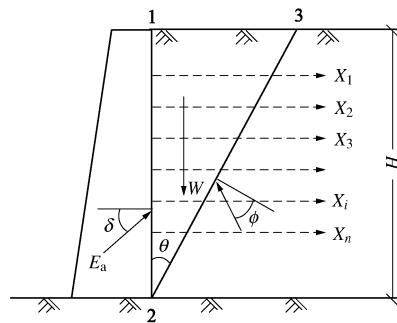


图 4 加筋复合挡墙受力示意图

Fig. 4 Diagram of reinforced composite retaining scheme

土工格栅加筋减小的水平力作用:

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\cos(\theta + \phi)}{\sin(\theta + \phi + \delta)} \tan \theta - \frac{\sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta + \phi + \delta)} \sum X_i, \quad (2)$$

其中, 破裂角 θ

$$\tan \theta = -\tan(\phi + \delta) + \sqrt{\tan(\phi + \delta)[\tan(\phi + \delta) + 1/\tan \phi] - \frac{2 \sum X_i}{\sin \phi \cos(\phi + \delta) \gamma H^2} \sin \delta}. \quad (3)$$

锚固长度可根据式 (4) 初步估算:

$$L_{ai} = T_{ult} F_m / (2 \gamma h_i f). \quad (4)$$

式中 γ 为填料重度; h_i 为第 i 层格栅的埋设深度; T_{ult} 为格栅极限抗拉强度; F_m 为锚固安全系数, 对无黏性土取 $F_m=1.5$, 黏性土取 2.0; f 为土与土工格栅的界面摩擦系数。

3.2.2 钢筋混凝土挡墙的设计及验算

根据 3.1 节中计算的主动土压力进行钢筋混凝土挡墙的截面设计和验算, 包括挡墙的抗滑移验算、抗倾覆验算、基底应力和地基承载力验算以及截面裂缝及配筋验算。设计方法同一般的挡土墙, 需要注意的就是地基承载力的验算, 应采用桩承式柔性平台的复合地基承载力, 一般应进行现场的复合地基载荷试验来确定。

3.2.3 桩承式柔性加筋平台的简化设计

桩承式柔性加筋平台由带桩帽的复合桩基和柔性加筋垫层组成。复合桩基的设计参照沉降控制复合桩基的设计方法执行，并应进行竖向和水平向的承载验算，不满足时进行相应的桩型或桩数的调整后重新验算，直至满足为止。

柔性加筋垫层为位于桩(桩帽)顶部，具有一定厚度、强度、刚度、完整连续，由土工合成材料和砂石料等以不同的铺装形式并经碾压密实形成。

(1) 带桩帽的复合桩基设计

a) 桩帽的设计

桩帽的大小是影响桩土荷载分担比的重要参数。桩帽的尺寸与桩的平面中心间距、桩的荷载分担比、桩径等有关，一般采用长方体、圆饼体或倒锥台体等形状，其材料一般采用现浇钢筋混凝土，或预制板。桩帽的边长 B 初步设计时可按照桩间距的 0.4~0.8 倍，桩帽顶垫层较厚时可取低值。桩帽的厚度可按照钢筋混凝土结构抗冲切以及抗弯验算确定，初步设计时可取 0.5~0.6 倍的桩帽悬臂边长(宽度)。

b) 复合桩基竖向承载及沉降验算

支挡结构下的复合桩基由多根按低承台摩擦桩设计的单桩及桩帽组成，其竖向极限承载力由桩基极限承载力、桩帽下地基土、桩间土极限承载力组成。单桩极限承载力应通过静载荷试验确定。初步设计时，单桩可按规范推荐方法计算，桩帽下地基土可按勘察资料或现场天然地基静载试验确定的承载力极限值确定。复合桩基的极限承载力标准值应满足不小于上部荷载设计值的 2 倍。单桩设计同时须对桩身强度或桩身截面积进行验算，确定其能否满足荷载的要求。

带桩帽复合桩基的沉降计算，可参考《上海市地基基础设计规范》中的沉降控制复合桩基计算方法^[8]，复合桩基桩数的确定，按上述规范的沉降计算原则计算复合桩基中不同桩数时的沉降量，求得桩数与沉降量的关系，然后根据设计容许沉降量确定需要的桩数。

c) 复合桩基的水平承载验算

本文的复合桩基用于支挡结构下，须考虑其水平承载的特性。如前文所述，由于桩顶加筋碎石垫层的存在，一方面，提高其桩基的水平承载能力；另一方面，加筋碎石垫层直接提高了支挡结构底部的地基土水平摩擦系数，使得地基土的水平承载能力得以发挥，同时避免了水平力向桩基的直接传递，减小桩基的水平承载要求。由于带桩帽的复合桩基水平承载问题涉及桩基与挡土墙的相互作用，以及挡墙下基桩水平受荷以及桩土间复杂的相互作用，本文的简化设计时不考虑垫层及桩帽对单桩水平承载力的提高作用，简化公式为

$$nR_H \geq E_a - E_{P1} - E_{P2} - f_{sk}A_c \quad (5)$$

式中 n 为单位长度挡墙范围内的基桩数； R_H 为单桩水平极限承载力； E_a 为加筋土的水平土压力； E_{P1} 为墙趾前被动土压力； E_{P2} 为加筋垫层前侧被动土压力； f_{sk} 为加筋垫层底地基土的摩阻力极限值(即摩阻力系数与基底压力的乘积)； A_c 为加筋垫层与地基土的接触面积(加筋垫层面积即扣除桩帽面积)。

(2) 柔性加筋垫层的设计

a) 垫层及加筋体材料

垫层材料一般采用级配良好的砂砾、碎石、粗砂、中粗砂、含泥量较小的土石混合料(宕渣)等散粒状材料，其含泥量应不大于 5%。加筋材料一般应采用抗拉强度较高，延伸率不大，耐久性良好，且能够与碎石等形成良好嵌锁效应的土工合成材料，例如土工格栅或土工格室等。因水平加筋体在上部荷载作用下呈双向受力状态，故应选用双向基本等强度的土工合成材料。

b) 加筋垫层的尺寸

加筋垫层的厚度一般为 300~1000 mm，加筋垫层的初拟厚度 t 可取桩间距的 20%~25%。软土指标较差时，可适当加厚，其厚度的具体取值应根据桩帽的布置间距和软土层的强度等经计算进一步调整确定。加筋垫层的宽度 B 的确定，可按照挡墙的抗滑移验算所需的挡墙底板宽度 b ，两端各扩展宽度不小于 0.5 m 考虑。

c) 加筋体抗拉强度的验算

关于加筋体的抗拉强度验算，英国 BS8006 规范给出了加筋体拉力的计算。公式为^[9]

$$T = \frac{W_T(s-a)}{2a} \sqrt{1 + \frac{1}{6\varepsilon_a}} \quad (6)$$

式中， W_T 为作用在桩帽间土工织物上的平均荷载，在本文支挡结构基础下时，建议取为平均基底压力， ε_a 为土工织物的轴向应变，按设计要求确定， s 为桩的中心距， a 为桩帽的边长。

加筋垫层中的加筋受力 T 应满足下式的要求：

$$T \leq T_d / F_{sg} \quad (7)$$

式中 T_d 为加筋体的设计强度，按应变 $\varepsilon = 5\%$ 时测定的抗拉强度； F_{sg} 为考虑实际施工损伤，材料耐久性等情况的折减系数 2~5。

4 工程应用及效果

本文背景工程中挡墙高度为 5, 8, 10 m，采用了上文所述的桩承式复合支挡结构优化设计方法。以 8 m 高挡墙为例，经挡墙方案比选，挡墙结构采用扶壁式钢筋混凝土挡墙型式，墙后采用土工格栅加筋填土结构以减小侧向土压力，共设置 10 层 HDPE 单向拉伸塑料土工格栅，设计抗拉强度为 14.3 kN/m。格栅铺

设长度为自墙背至破裂面后 3 m, 满足抗拔稳定要求。经验算, 墙踵长度为 5.5 m 时, 地基土水平抗滑移稳定系数即可达到 1.30。挡墙底板下可仅设置考虑竖向承载和沉降控制的复合桩基, 经计算, 挡墙下横向布置 3 排桩长为 24 m, 直径 500 mm 的 PHC 管桩, 纵向间距为 2.5 m。桩顶设置边长为 1.8 m, 厚度 0.4 m 的钢筋混凝土桩帽, 桩帽顶部设置 50 cm 厚, 内设 3 层 30 kN/m 的双向拉伸塑料土工格栅。计算挡墙最大沉降控制在 5 cm 以内, 满足规范及结构设计的要求。

工程实施中, 通过在支挡结构上设置位移监测点, 获得了填土过程中及填土施工完成后的支挡结构竖向和水平向位移情况。根据监测数据统计, 从 2009 年 4 月 30 开始填土, 至 12 月 26 日填土完成, 监测工作一直持续到 2010 年 5 月 3 日。整个监测过程填土初期变形较大, 随之填土速度放慢, 变化量渐渐变小。挡墙和路堤桩的沉降与填土的高度和速度成正比。整个监测过程, 沉降累计最大 39 mm, 水平位移累计最大变化 27 mm。填土施工完成半年后基本趋于稳定。项目投入使用至今 2 a, 建筑及挡墙均未发现不良的变形破坏情况, 表明本工程所采取的桩承式复合支挡结构设计方案技术可行。另外, 根据造价比较, 与传统支挡结构相比, 由于挡墙结构及基础的优化, 造价节约近 30%。

5 结语

软土地基上邻近建筑的高填方支挡结构设计需要综合考虑软基承载力低, 沉降量大, 对邻近建筑结构的水平力影响大等因素。常规方案采用厚重的挡土墙, 同时采用具有较高水平承载能力的大直径钢筋混凝土灌注桩, 工程造价极高。笔者结合上海某邻近建筑的软基高填土支挡结构的优化设计实例, 对支挡结构的受力特点进行了剖析, 提出了一种综合利用加筋土作用的桩承式复合支挡结构, 分析了受力机理并提出了简化的设计方法, 经实测验证达到了预计的技术和经济效果。本文介绍的设计原理和方法可以为软土地区类似工程勘察设计及施工提供参考。

参考文献:

- [1] 邓益兵, 周健, 孔祥利, 等. 软土地基上高填方对邻近建筑的影响及地基处理方法探讨[J]. 结构工程师, 2009(8): 108 - 113. (DENG Yi-bing, ZHOU Jian, KONG Xiang-li, et al. Soft ground treatment for building foundation nearby high embankment[J]. Structure Engineer, 2009(8): 108 - 113. (in Chinese))
- [2] 杨敏, 周洪波, 朱碧堂, 等. 软土地基上工业厂房堆场的地基处理优化分析[J]. 结构工程师, 2004(2): 43 - 50. (YANG Min, ZHOU Hong-bo, ZHU Bi-tang. Optimum analysis of ground treatment for industrial building foundations subjected to surcharge loads[J]. Structure Engineer, 2004(2): 43 - 50. (in Chinese))
- [3] 吕鹏, 杨广庆, 庞巍, 等. 包裹式土工格栅加筋土挡墙水平位移研究[J]. 岩土力学, 2006(增刊 2): 973 - 976. (LÜ Peng, YANG Guang-qing, PANG Wei, et al. Study on horizontal displacement of packaged geogrid reinforced soil retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(S2): 973 - 976. (in Chinese))
- [4] 梁永辉, 水伟厚, 詹金林, 等. 土工格栅加筋黏性土界面作用特性的试验研究. 第二届全国土工合成材料加筋土学术研讨会论文集. 北京, 2009: 472 - 481. (LIANG Yong-hui, SHUI Wei-hou, ZHAN Jin-lin, et al. Characteristics of geogrid reinforced clayey soil interaction experiment research[C]// The Second Session of the National Conference on Geosynthetic Materials Reinforced. Beijing, 2009: 472 - 481. (in Chinese))
- [5] 梁永辉, 水伟厚, 詹金林, 等. 软土地区加筋土工格栅对高填土侧压力减小作用的理论分析与应用[C]// 第 10 届全国地基处理学术讨论会论文集. 南京, 2008: 263 - 266. (LIANG Yong-hui, SHUI Wei-hou ZHAN Jin-lin, et al. Theory study and application of using geo-grids to decrease the earth pressure of high fill in the soft soil area[C]// The 10th National Conference on Foundation Treatment. Nanjing, 2008: 263 - 266. (in Chinese))
- [6] 张宏斌, 王瑛. 沉降控制复合桩在 F1 赛车场中的运用[J]. 安徽建筑, 2006(1): 67 - 69. (ZHANG Hong-bin, WANG Ying. Application of settlement control composite pile at F1 autodrome[J]. Anhui Architecture, 2006(1): 67 - 69. (in Chinese))
- [7] 屠毓敏, 俞亚南. 刚性桩复合地基水平承载力特性[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2329 - 2332. (TU Yu-min, YU Ya-nan. Characteristics of horizontal bearing capacity of rigid pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2329 - 2332. (in Chinese))
- [8] DGJ 08—11—2010 地基基础设计规范[S]. 上海, 2010. (DGJ 08—11—2010 Foundation design code[S]. Shanghai, 2010. (in Chinese))
- [9] 周镜, 叶阳升, 蔡德钩. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. 中国铁道科学, 2007(3): 1 - 6. (ZHOU Jing, YE Yang-sheng, CAI De-gou. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. China Railway Science, 2007(3): 1 - 6. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)