

文章编号: 1002-0268 (2008) 04-0047-05

# 土工格室 + 碎石桩处治软土路基设计计算方法

赵明华, 张 玲, 蒋德松

(湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 通过对土工格室 + 碎石桩双向增强体复合地基这一新型地基处治技术的承载机理的分析研究, 结合实际工程, 以振动沉管碎石桩 + 土工格室为例, 探讨了处治高速公路软土路基的技术方法。在此基础上, 针对土工格室垫层与碎石桩复合地基共同工作构成荷载传递和支撑体系以提高地基承载能力的特点, 建立了考虑格室体水平加筋作用的土工格室 + 碎石桩双向复合地基的简化计算模型, 并给出了一便于工程应用的双向增强体复合地基承载力设计计算方法。最后将该方法应用于京珠高速公路临长段地基处治实践。理论分析及实际工程实践表明, 土工格室 + 碎石桩复合地基处治软土地基可充分发挥碎石桩的竖向承载能力及土工格室的水平加筋特性, 两者共同工作可有效提高地基承载力。

**关键词:** 道路工程; 复合地基; 设计计算; 土工格室 + 碎石桩; 竖向承载力

**中图分类号:** U416.1<sup>+</sup>6; TU473.1 **文献标识码:** A

## Design Calculation Method for Soft Foundation Treatment by Geocell Mattress and Stone Column

ZHAO Ming-hua, ZHANG Ling, JIANG De-song

(Geotechnical Engineering Research Institute, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

**Abstract:** Working mechanisms of a new foundation treatment technology formed by geocell reinforced mattress and stone column were discussed. Combining with a certain engineering project, techniques of treating soft soil foundation of expressway were studied with an example of vibrosinking stone columns and greccell reinforced mattress. This foundation treatment system has an advantage of putting both geocell and stone column into full play on load transfer and support. On the base of that, by considering the horizontal reinforced effect by geocell reinforcement, an appropriate calculation model for stone column composite foundation with geocell reinforcement located over it was set up. Furthermore, a useful design calculation method for this two-direction reinforced composite foundation system was proposed. Finally, this method was employed to design a concrete foundation treatment by geocell mattress and stone column in a certain highway project. Both the mechanism analysis and the real project study indicate that, the foundation system formed by geocell mattress and stone column possess the integrated effects of vertical piles and horizontal reinforcement; the soft soil foundation can be enhanced effectively by this treatment.

**Key words:** road engineering; composite foundation; design calculation; geocell + stone column; vertical bearing capacity

### 0 前言

近年来, 多元型复合地基, 如土工格室 + 碎石桩双向 (竖向和水平向) 增强体复合地基处理技术的出

现与成长, 为地基处理技术的发展开辟了一条新的途径。该技术在碎石桩复合地基上加设一层土工格室碎石垫层, 可充分发挥水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基各自的优点。目前已在国内外的高速公

收稿日期: 2007-07-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2006AA11Z104)

作者简介: 赵明华 (1956 -), 男, 湖南洞口人, 教授, 博士生导师, 从事桩基础及特殊土地基处理等研究. (mhzhahd @21cn.com)

路路基加固、台背填土加固、不良地质条件的旧路加宽改造等工程中得到了广泛应用<sup>[1~7]</sup>。目前,对单一型复合地基(只采用水平向增强体或竖向增强体的复合地基)的研究已有不少,其计算理论,如沉降理论、承载力理论等已有不少成果。然而对于双向增强体复合地基的设计理论与方法的研究尚处于初级阶段。土工格室+碎石桩双向增强复合地基的受力特性及承载机理不同于单一型复合地基,其设计理论不可简单套用一般的单一型复合地基的设计理论。为此,本文拟从土工格室+碎石桩双向增强体复合地基的处理原理与方法入手,针对其受力特性,给出一便于工程应用的土工格室+碎石桩复合地基设计计算方法。

## 1 处治原理与方法

### 1.1 承载机理

土工格室垫层和碎石桩在荷载作用下相互作用,共同工作,形成一双向增强的复合地基形式,它兼备了土工格室垫层和碎石桩复合地基加固软基的优点。土工格室作为水平向增强体,起到约束土体侧向膨胀变形、有效扩散上部荷载均化应力和柔性筏基等作用,而碎石桩复合地基作为竖向增强体则起到改善土体本身承载性能的作用。此外,土工格室垫层与碎石桩相互作用,构成约束调节与支撑体系<sup>[6,9]</sup>。

土工格室加筋碎石垫层与碎石桩复合地基的共同工作包含两方面:一是土工格室垫层对碎石桩的约束限制作用(图1);二是碎石桩对土工格室垫层的支撑作用。

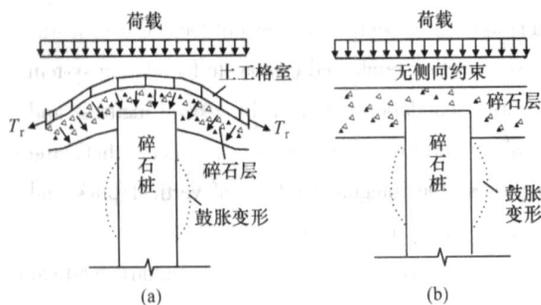


图1 均布荷载土工格室垫层对碎石桩桩顶的约束

Fig. 1 Restrictions on top of gravel pile by geocell

碎石桩复合地基和土工格室碎石垫层共同构成性能良好的排水体系。复合地基中的碎石桩不仅置换和加强了部分软土,而且为深层软土提供了排水通道,在荷载不断增加的过程中改善了土体本身的性能,为土体对碎石桩提供有效约束以及土工格室垫层和碎石桩复合地基的共同工作创造了必要条件。

土工格室+碎石桩构成双向增强体复合地基进行软土路基处理,具有如下优点<sup>[8]</sup>:

- (1) 具有桩体(碎石桩)、垫层(土工格室碎石垫层)的综合效能;
- (2) 可有效减小路基总沉降、差异沉降;
- (3) 可有效减小路基的侧向土压力及侧向变形;
- (4) 较单一的竖向增强体复合地基,可适当加大桩间距,大幅度降低工程建设成本。

### 1.2 处治方法

土工格室与碎石桩共同工作构成荷载传递和支撑体系提高承载能力,其处治原则是:充分发挥碎石桩的竖向承载能力及土工格室的水平加筋特性,两者共同工作来承担上部结构荷载。下面以振动沉管碎石桩+土工格室为例来说明双向增强体复合地基的处治方法。

#### 1.2.1 振动沉管碎石桩设计

(1) 桩径、桩长 桩径应根据施工设备能力、软土强度等因素确定,通常可取 $\phi 275 \sim \phi 500$ 。桩长则主要取决于需加固处理的软土层厚度,可分段控制,如地基软土 $8 \text{ m}$ ,桩体应穿过软土层,且进入持力层 $20 \sim 40 \text{ cm}$ ;若地基软土 $> 8 \text{ m}$ ,桩长可取 $8 \text{ m}$ 。

(2) 平面布桩 沿路线方向应超出设计加固长度 $2 \sim 3$ 排,沿道路横断面应超出基底宽度 $2$ 排。桩的平面布置形式采用正三角形(梅花形)或正方形布置。桩间距可根据承载力及变形要求按计算确定,通常可取 $1.1 \sim 1.5 \text{ m}$ 。

(3) 桩材 可用砂(如含泥量小于 $5\%$ 的中粗砂和砾砂)、石(如粒径小于 $50 \text{ mm}$ 的砾石、卵石、碎石等)或砂和石的混合料,也可采用本身稳定并对环境无污染的其他硬性散体材料。桩材含水量根据不同成桩亦有不同要求。

#### 1.2.2 土工格室设计

土工格室的规格可根据实际工程荷载及变形要求选取,格室高通常取 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 。为了增强加固效果,格室体中宜充填良好级配,最大粒径不大于 $3 \text{ cm}$ 的碎石粗骨料,格室体上下宜铺设 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 砂石垫层,并应保证基底填料的强度。

#### 1.2.3 施工要点

(1) 施工流程为:清表及整平地面 振动沉管机具就位对中 下放沉管、开机振动加压成孔 投料并继续振动 桩管上拔留振 成桩后设备移位进入下一桩位 铺设砂砾垫层并压实 铺设土工格室 格室内填砾石 推土机压实 压路机械碾压 铺设砂砾垫层并压实。

(2) 桩体材料投放应分批加入, 不宜一次过量, 保证桩体充实, 防止断桩和颈缩。

(3) 拔管速度不宜过快, 以免影响桩体密实及成桩质量, 应“多振慢拔”。一般拔管速度应 1 m/min, 留振时间不少于 1 min, 以保证桩体充分密实。

(4) 为保证格室内填料充分压实, 格室体中填料应从两边向中间进行, 并避免施工机具直接在上行驶压垮片材, 破坏格室网眼。可以自卸汽车将填料卸在完成的填料上, 由推土机向前摊平, 并保证格室上填料不小于 10 cm, 且不大于 15 cm。

(5) 土工格室的连接可采用多种连接方式, 如现场焊接、现场铆接、打孔穿绳连接、专用插件的连接等。

(6) 应保证垫层材料渗透性良好, 粘土含量和有机质含量不得超限; 垫层表面应平整, 不应有造成土工格室悬空的坑洼。此外, 砂垫层底面即桩顶需设置 3% 向外横坡度。

### 1.2.4 质量控制措施

(1) 正式大面积施工前应按规定进行成桩试验, 验证设计参数, 取得施工工艺控制参数, 如加料厚度、留振时间、拔管速度等。

(2) 土工格室施工时应张拉至要求的尺寸, 还应保证格室体中填料达到最佳密实度。

(3) 若地下水位较高, 为保证路堤稳定性和承载力要求, 必须做好排水措施, 有效降低地下水, 并结合当地实际情况遵循相应规范设计, 保证水排出路基外且不倒灌。

## 2 设计计算方法

### 2.1 计算模型

对于路堤而言, 其长度要比宽度大得多, 故可取单位纵向长度进行分析。为简化计算, 设路堤自重荷载为作用在土工格室上的均布荷载, 并认为路基在均布荷载作用下产生均等沉降。

此外, 将汽车单轴荷载  $P$  的一半按等效均布圆荷载作用于半径  $r = 15$  cm 的圆上<sup>[8]</sup> (图 2)。

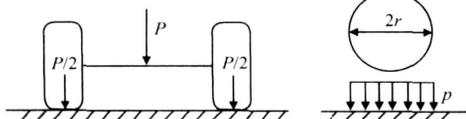


图 2 汽车荷载计算模型

Fig. 2 Calculating model of vehicle load

取沿直径方向的横断面进行受力分析, 即:

$$p = \frac{P/2}{r^2} = 7.074 P. \quad (1)$$

车辆局部荷载  $p$  以  $\theta$  角扩散于土工格室顶面, 则:

$$e = 0.15 + h \tan \theta, \quad (2)$$

式中,  $h$  为路堤填料高度。

设土工格室垫层受车辆荷载后产生局部不均匀沉降, 其变形为一圆弧, 其半径为  $R$ , 对应圆心角为  $2\alpha$  (图 3)。

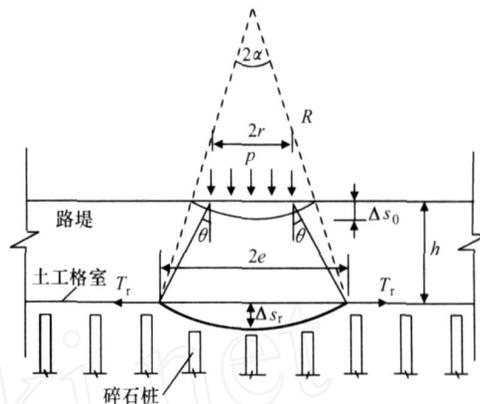


图 3 双向增强体局部受荷计算模型

Fig. 3 Calculation model of two-direction reinforced foundation under local loading

### 2.2 格室承载力计算

土工格室垫层在软土路基加固中主要起应力扩散和网兜作用, 因此该复合地基的承载力计算也应考虑这两方面因素, 即土工格室垫层的承载力提高  $f$  为土工格室垫层应力扩散作用引起的承载力增值  $f_1$  与筋材拉力的竖向分力引起的承载力增值  $f_2$  之和。

#### 2.2.1 $f_1$ 计算

如图 3 所示, 扩散作用引起的承载力增值  $f_1$  可按式 (3) 计算:

$$f_1 = f_{ps}, \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为土工格室扩散作用引起的承载力增加系数:

$$\lambda = \begin{cases} 2 h_c \tan \theta & l_c \geq b + 2 h_c \tan \theta, \\ l_c / b - 1 & l_c < b + 2 h_c \tan \theta, \end{cases}$$

式中,  $b$  为路堤横断面下边缘宽度;  $h_c$  为土工格室垫层高度;  $\theta$  为土工格室垫层的应力扩散角;  $l_c$  为横截面土工格室的铺设长度;  $f_{ps}$  为碎石桩复合地基承载力。

由此可见, 为充分发挥土工格室应力扩散的作用, 其横截面长度应适当大于路堤宽度。

#### 2.2.2 $f_2$ 计算

$$f_2 = 2 T_r \sin \alpha, \quad (4)$$

式中,  $T_r$  为土工格室的拉力, 可由式 (5) 确定:

$$T_r = E_c \epsilon, \quad (5)$$

式中,  $E_c$  为土工格室材料的抗拉模量, 可通过土工格室拉伸试验得出的拉力-拉应变曲线确定;  $\epsilon$  为土工格室的应变, 满足以下几何关系:

$$\epsilon = \frac{R - e}{e}, \quad (6)$$

式中,  $R = \frac{s_r^2 + e^2}{2 s_r}$ ;  $\sin \alpha = \frac{2e s_r}{s_r^2 + e^2}$ ;  $s_r$  为路堤的弯沉变形;  $e$  为图 3 所示的弦长。

最大允许应变  $\epsilon_{\max}$  的确定应同时考虑土工格室筋体材料自身的最大允许应变  $[\epsilon_{\max,1}]$  与道路工程中实际路堤允许弯沉变形确定的  $[\epsilon_{\max,2}]$ , 即  $[\epsilon_{\max}] = \min\{[\epsilon_{\max,1}], [\epsilon_{\max,2}]\}$ 。其中,  $[\epsilon_{\max,1}]$  可通过土工格室拉伸试验确定,  $[\epsilon_{\max,2}]$  应由允许路面弯沉并通过式 (6) 确定。若路堤高度不高, 可简单认为车辆等局部荷载引起的路堤表面沉降量  $s_0$  与格室竖向弯沉量  $s_r$  近似相等,  $s_0$  允许值取车辙深度、允许路面弯沉等各种工作状态下的最不利情况。

当路堤高度  $< 6$  m, 特别是 1.5 m 时, 车辆荷载作用对路堤承载力影响较大, 此时格室筋材将充分发挥其对承载力的提高作用。

### 2.3 碎石桩复合地基承载力计算

确定竖向增强体复合地基承载力的方法主要有: 载荷试验法、理论计算法和经验类比法等。理论上通常可按面积比分析法计算其竖向承载力  $f_{ps}^{[11]}$ , 即:

$$f_{ps} = K_1 \cdot m f_p + K_2 \cdot (1 - m) f_s, \quad (7)$$

式中,  $f_p$ 、 $f_s$  为桩体及桩间土体的承载力;  $K_1$ 、 $K_2$  为反映桩体和桩间土体实际极限承载力的修正系数;  $\alpha_1$  为复合地基破坏时桩体发挥其极限强度的比例;  $\alpha_2$  为复合地基破坏时桩间土体发挥其极限强度的比例;  $m$  为复合地基置换率。

### 2.4 双向增强复合地基竖向承载力计算

双向增强体复合地基的承载力  $f_{cps}$  为碎石桩复合地基承载力  $f_{ps}$  和格室垫层增加的承载力  $f$  之和, 即:

$$f_{cps} = f_{ps} + f_1 + f_2 = (1 + \alpha) f_{ps} + 2 E_c \sin \alpha. \quad (8)$$

## 3 工程应用实例

现以本文方法对京珠高速公路临长段 K111 + 620 ~ 750 段土工格室 + 碎石桩双向增强体复合地基为例, 进行设计计算。

### 3.1 工程概况

该路段填方较高, 软土深度较大, 地基的沉降和稳定控制十分重要。为了有效地提高地基承载力, 当软土深度大于 5 m 时, 采用沉管碎石桩 + 土工格室进行处理, 路基设计如图 4 所示。路段地表为 0.3 ~ 0.5 m 的种植土, 下接软土层。根据钻探揭露、现场观察及室内土工试验结果, 软土主要物理力学性质指标见表 1。

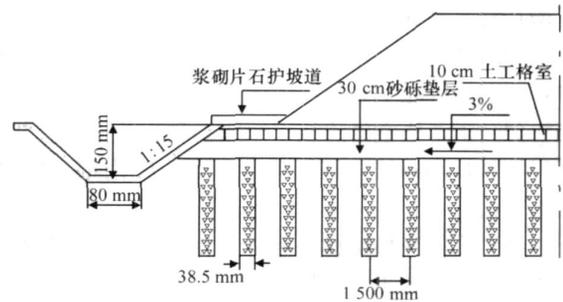


图 4 路基横断面示意图

Fig. 4 Transverse of the roadbed

表 1 软土主要物理力学性质指标

Tab. 1 Main physical-mechanical property of soft soil

含水量/ %	孔隙比	液限/ %	塑性 指数	粘聚力/ kPa	内摩擦 角 / (°)	压缩系 数 / MPa <sup>-1</sup>	密度/ (g cm <sup>-3</sup> )
33 ~ 50	0.8 ~ 1.2	40 ~ 45	10 ~ 25	3 ~ 25	10 ~ 28	0.3 ~ 1.0	1.7 ~ 2.0

### 3.2 双向增强复合地基设计

根据工程情况, 对该路段设计如下。

(1) 选用直径  $\phi 325$  桩管, 配  $\phi 385$  大头型活瓣式桩尖; 桩间距取 1.5 m; 桩长根据软土层厚度分段控制。桩的平面布置形式采用梅花形布桩, 且沿路线方向超出设计加固长度 2 ~ 3 排, 沿道路横断面超出基底宽度 2 排。桩体材料采用未风化干净砾石, 砾石粒径 20 ~ 40 mm, 自然级配, 含泥量  $< 5\%$ 。

(2) 格室选用北京燕山石油公司 TGL-400-100 型土工格室 (层高 10 cm), 其拉伸屈服强度为 22 ~ 23 MPa。为了增强加固效果, 垫层及土工格室填料选用碎石等粗骨料。

(3) 双向增强体复合地基承载力计算

复合地基置换率为  $m = 5.97\%$ , 软土路基设计容许沉降为  $s_0 = 0.30$  m<sup>[12]</sup>, 处理前软土承载力 55.0 kPa, 静载试验测得桩体承载力 190.0 kPa, 桩间土承载力 110.0 kPa。按本文方法计算可得双向增强体复合地基承载力为 129.7 kPa, 比处理前提高 135.8%。若仅采用碎石桩复合地基, 其承载力计算值为 114.7 kPa, 提高 108.5%。可见双向增强复合地基的加固效果较为明显。

### 3.3 处治效果

该工程以双向增强体复合地基处理技术处治后,获得了良好的社会与经济效益。运营5年来,在长期超重荷载与大交通量作用下,整个临长高速公路软土地基路段无一处因地基沉降变形而出现路基变形、开裂或滑移现象,并获得2005年度詹天佑土木工程奖。

### 4 结语

(1) 深入分析了土工格室+碎石桩双向增强体复合地基的承载机理,探讨了该技术在高速公路软土路基处治工程中的应用,提出了相应的设计计算方法。

(2) 考虑格室垫层与碎石桩共同工作构成荷载传递和支撑体系的特点,得出了该类双向增强体复合地基按变形控制设计的承载力计算公式,其计算简便,便于工程应用。

(3) 将本文方法应用于临长高速公路K111+620~750工程实践,结果表明,该方法比单一碎石桩复合地基加固效果好,获得了良好的社会与经济效益。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 蒋鹏飞,陈昌富,赵明华,等.土工格室垫层+碎石桩复合地基在高速公路软基处理中的应用与研究[J].公路,2006(4):135-139.  
JIANG Peng-fei, CHEN Chang-fu, ZHAO Ming-hua, et al. Application and Research on Geocell and Gravel Pile Composite Foundation in Soft Ground Treatment in Expressway [J]. Highway, 2006 (4): 135 - 139.
- [2] 陈艳平,赵明华,陈昌富,等.土工格室碎石垫层+碎石桩复合地基相似模型试验[J].中国公路学报,2006,19(1):17-22.  
CHEN Yan-ping, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu, et al. Similarity Model Test of Geocell Reinforced Gravel Mattress and Gravel Pile Composite Foundation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (1): 17 - 22.
- [3] 晏莉,阳军生,韩杰.桩承土工合成材料加筋垫层复合地基作用原理及应用[J].岩土力学,2005,26(5):821-826.  
YAN Li, YANG Jun-sheng, HAN Jie. Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Earth Platform Composite Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (5): 821 - 826.
- [4] HAN J, GABR M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-reinforced and Pile Supported Earth Platforms over Soft Soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128 (1): 44 - 53.
- [5] MADHAVI L G, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Experimental and Theoretical Investigations on Geocell-supported Embankments [J]. International Journal of Geotechnics, ASCE, 2006, 6 (1): 30 - 35.
- [6] 李强,郑健龙.桩承土工格网褥垫层的承载特性与设计计算[J].公路,2005(5):6-9.  
LI Qiang, ZHENG Jian-long. Bearing Characteristic and Design of Geonet-reinforcing Soil Cushion-pile [J]. Highway, 2005 (5): 6 - 9.
- [7] 赵明华,杨明辉,吴亚中,等.土工格室+碎石桩复合地基承载机理及其试验研究[J].公路交通科技,2005,22(11):6-9,29.  
ZHAO Ming-hua, YANG Ming-hui, WU Ya-zhong, et al. Study on Capacity Mechanism and Model Test of Geogrid Mattress and Gravel Pile Composite Foundation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 6 - 9, 29.
- [8] 张建勋,陈福全,简洪钰.桩承土工织物加筋地基的研究与工程应用综述[J].福建工程学院学报,2003,1(3):10-15.  
ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Overview of Piled Geosynthetic-reinforced Foundations over Soft Soil [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2003, 1 (3): 10 - 15.
- [9] 杨明辉,王娟,赵明华.土工格室+碎石桩复合地基承载机理及承载力计算方法探讨[J].中南公路工程,2005,30(4):6-8,21.  
YANG Ming-hui, WANG Juan, ZHAO Ming-hua. Study on the Capacity Mechanism and Model and Calculation of Geocell Mattress and Gravel Pile Composite Foundation [J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30 (4): 5 - 8, 21.
- [10] 邓学钧.路基路面工程(第2版)[M].北京:人民交通出版社,2005.  
DENG Xue-jun. Subgrade and Road Pavement Construction [M]. 2<sup>nd</sup> Edition. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 龚晓南.复合地基引论(二)[J].地基处理,1991,2(4):1-11.  
GONG Xiao-nan. Composite Foundation Introduction ( ) [J]. Foundation Treatment, 1991, 2 (4): 1 - 11.
- [12] JTGD30-2004,公路路基设计规范[S].  
JTGD30-2004, Specifications for Design of Highway Subgrades [S].