

# 基于正交理论的土工格室垫层碎石桩复合地基优化设计

杨明辉<sup>1</sup>, 赵明华<sup>1</sup>, 吴亚中<sup>2</sup>

(1. 湖南大学岩土工程研究所 长沙市 410082; 2. 湖南省交通厅 长沙市 410011)

**摘要:** 针对土工格室垫层碎石桩复合地基这一新型的地基处理形式, 深入探讨了其独特的承载机理, 并在此基础上, 运用正交设计理论, 对影响加固效果的各主要因素进行了探讨, 得出了各因素对地基加固效果的影响程度, 进而对各参数进行优化设计, 对这一新型结构的优化设计方法进行了初步探讨。最后结合某高速公路地基处理实例, 给出了上述方法的实际应用。

**关键词:** 土工格室; 碎石桩; 复合地基; 正交优化

土工格室由于其独特的性能而在地基处理、边坡防护、江湖围堰以及管道支护等方面得到了广泛应用。与一般合成材料相比, 其最大的特点是具有三维立体结构, 强度高, 整体性能好, 并且具有使用简单、运输方便的特点<sup>[1]</sup>。将土工格室作为加固垫层, 与碎石桩联合处治软弱地基是地基处理的新思路, 能将两者的优点结合起来, 取得比一般碎石桩复合地基更好的处理效果。

优化设计理论在地基基础工程中得到了广泛的应用, 通过优选结构的各影响参数, 达到提高结构工作性能的目的, 并能获得较好的经济效益, 而对于土工格室垫层碎石桩复合地基这一新型结构, 其优化设计尚处于起步阶段, 目前国内外相关文献探讨较少, 为此本文在讨论其承载机理的基础上, 借助正交设计理论, 对土工格室垫层碎石桩复合地基各主要因素(包括土工格室材料参数)的影响程度进行了初步探讨, 并在此基础上进行优化设计, 对实际工程具有一定的指导意义。

## 1 土工格室垫层碎石桩复合地基作用机理

土工格室垫层碎石桩复合地基通过对软土地基进行碎石桩加固并铺设具有立体三维结构的土工格室垫层的办法, 形成一种新型的双向增强体复合地基, 达到提高地基承载力, 减少沉降和不均匀沉降的目的。其作用机理有别于一般的加筋材料, 主要体现在

在以下几个方面。

### 1.1 当量侧向约束力效应

一般筋材通过与土体的接触面摩擦给土体提供侧向约束力, 从而达到提高土体强度、加固软基的目的, 而土工格室给填充其内的骨料提供了竖向摩擦力作用和更为强大的侧向约束力作用, 见图 1。侧向约束力的大小由格室材料的抗拉强度控制。

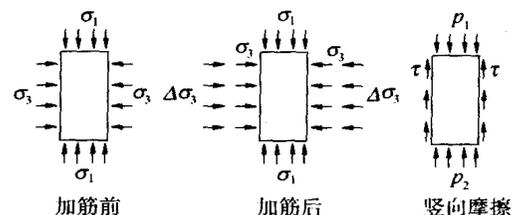


图 1 土工格室加筋的侧向约束力效应

### 1.2 筏板基础效应<sup>[2]</sup>

土工格室作为一种立体的加筋材料, 与格室内的填料相互作用, 共同工作, 构成了一个具有相当大的抗弯、抗拉和抗剪的复合整体。在工程上, 这一复合体可视作一柔性的筏板基础, 能够促使地基破坏向深层发展, 从而提高地基承载力。

### 1.3 网兜效应

在上部荷载作用下, 土工格室+碎石垫层结构体在外力作用下形成凹曲面, 作用在凹曲面上部向下的作用力大于作用在凹曲面下部向上的作用力,

不平衡部分由垫层与土体接触面产生的界面剪切摩擦力平衡, 此即网兜效应。网兜效应的存在, 从而进一步减小了软土层所受竖向荷载, 提高了地基承载力。

## 2 土工格室垫层碎石桩复合地基正交优化

由上述分析可知, 土工格室垫层碎石桩复合地基有别于一般的复合地基, 其优化设计必须充分考虑到土工格室垫层的作用, 本文的优化设计思路以正交理论为基础, 充分考虑各主要因素的影响。

### 2.1 正交设计理论的基本原理

正交设计<sup>[3]</sup>是一种数理统计方法, 它是在实际经验和理论认识的基础上, 利用一种规格化的表——“正交表”来安排多因素试验, 可以用较少的试验次数得到极佳的试验效果。主要得到以下的结论<sup>[4]</sup>: (1) 各因素对研究目标的影响程度, 即各因素的主次; (2) 各因素与研究目标的基本关系, 即每个因素水平不同时, 研究指标是如何变化的。

对于 $L_n(t^m)$ 正交方案, 设第 $i$ 号计算方案的结果为 $y_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ ,  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 相互独立, 且服从同方差 $\sigma^2$ 的正态分布, 即 $y_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$ , 则对假设 $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$ 作显著性检验。设:

$$T = \sum_{i=1}^n y_i, \bar{y} = T/n, r = n/t$$

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

$$S_j = r \sum_{i=1}^t (T_{ij}/r - \bar{y})^2, j = 1, 2, 3, \dots, m$$

式中:  $T_{ij}$ 为正交表 $L_n(t^m)$ 的第 $j$ 个因素的第 $i$ 水平的计算结果 $y_i$ 之和;  $r$ 为同水平的重复次数;  $S_T$ 反映了全部计算结果之间的差异程度, 称为总变差平方和;  $S_j$ 反映第 $j$ 列因素的不同水平之间的差异程度, 称为第 $j$ 列变差平方和。

以 $f_T, f_j$ 分别表示 $S_T, S_j$ 的自由度, 其表达式为:

$$f_T = n - 1, f_j = t - 1 \quad (2)$$

正交表 $L_n(t^m)$ 中一般存在空列, 而空列的列变差平方和当作随机误差平方和, 将所有的空列列变差平方和相加, 记为 $S_e$ , 对应的自由度记为 $f_e$ 。所以, 构造 $F$ 检验的统计量为:

$$F_j = \frac{S_j/f_j}{S_e/f_e} \quad (3)$$

最后即可作出合理判断, 在 $H_0$ 成立时,  $F_j \leq F$

( $f_j, f_e$ ), 在给定的显著水平下, 若 $F_j$ 大于 $F_{1-\alpha}(f_j, f_e)$ 时, 则该因素作用显著, 反之不显著, 影响不大。

### 2.2 优化目标的选定

复合地基的优点就是能够较好地发挥地基土体承担荷载的潜能, 以提高地基承载力和减小地基沉降。承载能力、沉降以及工程造价等等都是优化的目标。而对于高速公路而言, 路面沉降往往是工程中关心的主要问题, 因此, 以路基的沉降来衡量复合地基的加固效果更有实际意义。关于复合地基沉降的计算可采用公式计算以及数值计算方法等。

### 2.3 控制变量和约束条件

影响复合地基的因素众多, 在复合地基的设计中要完全考虑到全部因素, 显然是不可能的, 本文主要探讨对复合地基力学形态和工作性能起主要作用的因素的作用, 如: 碎石桩桩长、置换率, 以及土工格室高度和强度, 对复合地基加固效果的影响程度, 以此作为优化设计的依据。

在实际工程设计中, 各参数的选用不是无限制的, 在初步设计中, 必须和实际工程情况结合起来, 充分考虑到现场地质特点、软土的物理力学性质等, 给出桩长、桩径等各参数的大致选用范围, 在优化设计中以此来作为各参数的约束范围, 然后在此范围选取较优方案, 达到优化的目的。

## 3 应用举例

### 3.1 工程概况

某高速公路沿线软土分布广、深度大, 软土的天然地基承载能力差, 在荷载作用下变形很大, 不能满足沉降的要求, 拟采用土工格室垫层碎石桩复合地基进行加固处理。钻探结果显示土层分布由上到下依次为: 地表为0.3~0.5 m 耕植土, 下卧灰白色软土层, 厚约3.4~4.0 m, 流塑—流动状态, 液限高达70%。

### 3.2 正交试验设计

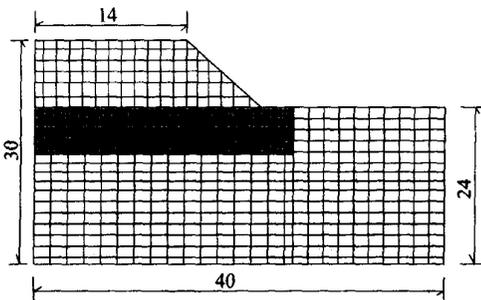
以设计桩长、置换率、土工格室的高度以及土工格室的抗拉强度作为优化设计的4个控制变量。根据初步设计, 桩长拟采用3.5~4.2 m, 置换率为25%~35%, 而格室高度根据生产厂家的规格, 可取80 mm、100 mm、150 mm和200 mm等规格, 格室的抗拉强度在12~20 MPa之间。因此对上述4个因素各取4个水平, 选用 $L_{16}(4^5)$ , 因素水平见表1所列。

表 1 因素水平

水平	桩长 m	置换率 %	格室高度 mm	格室抗拉强度 M Pa
1	3.5	25	80	12
2	3.7	28	100	15
3	4.0	30	150	18
4	4.2	35	200	20

3.3 优化目标的数值计算

目前,对复合地基的计算方法很多,但计算理论都还很成熟<sup>[5]</sup>,不少计算方法是结合工程实践经验提出来的,而对于土工格室垫层碎石桩复合地基这一新型复合地基形式,由于土工格室与一般砂垫层的材料性能与功能都存在一定的差别,故笔者认为不能套用一般的碎石桩复合地基沉降计算方法,而用数值计算方法不失为一种有效的途径。在这里,采用拉格朗日元法的计算软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行分析,该方法在分析非线性问题时有着独特的优越性。而路堤结构显然是一个沿路线中线完全对称的结构,因此取路堤一半作为研究对象,图 2 为计算模型的剖面图。对于岩土类材料,摩尔—库仑模型受到广泛应用,在此模型中,各类材料均采用摩尔—库仑模型,各材料参数不在本次优化设计之列,根据试验结果,各材料参数取值见表 2。



单位: m

图 2 计算模型剖面单元

表 2 数值计算各参数取值

材料	体积模量 $K$ kPa	剪切模量 $G$ kPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	凝聚力 $c$ kPa
填土	$6.67 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$	35.6	20
格室	$1 \times 10^5$	$6 \times 10^4$	30	100
碎石桩	$2.5 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	38	30
软土	$2.5 \times 10^4$	$1.2 \times 10^4$	10	10
砂垫层	$9 \times 10^4$	$3.7 \times 10^4$	35	50
持力层	$9 \times 10^4$	$3.7 \times 10^4$	35	50

为便于比较,采用各碎石桩桩顶沉降的均值作为复合地基沉降的代表值。各因素水平组合的计算方案见表 3 所列。

表 3 正交设计试验方案

方案	误差	桩长	置换率	格室高度	格室强度
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

利用公式(1)计算各列的变差平方和  $S_j$ , 其中第 1 列为误差列,其自由度为 2。选取显著性水平  $\alpha = 0.01, 0.05$ , 可查表得知  $F_{0.09}(2, 2) = 99.00, F_{0.95}(2, 2) = 19.00$ , 由检验的方法可知,当  $F$  检验统计量  $F_j > F_{0.99}(2, 2)$  时,则因素高度显著;若  $F_{0.95}(2, 2) < F_j < F_{0.99}(2, 2)$ , 则因素显著;若  $F_j < F_{0.95}(2, 2)$ , 因素称为不显著。根据上述理论,对各因素的影响程度进行判断,结果见表 4。

表 4 方差分析

因素	变差平方和 $S_j$	自由度 $f_j$	检验统计量 $F_j$	显著性 (影响程度)
桩长	128.63	2	100.96	
置换率	96.54	2	75.77	
格室高度	69.87	2	54.84	
抗拉强度	22.45	2	17.62	
误差	1.274	2		

从上述分析结果可以看出:对于复合地基影响最显著的是桩长,其次是置换率和格室高度,而格室抗拉强度对地基沉降影响较小。因此,在此工程中的各参数的优化设计采用:桩长 4.2 m, 置换率取

30%, 格室高度取 100 mm, 而对格室抗拉强度不做要求, 取最低值。

#### 4 结语

本文在分析土工格室垫层碎石桩复合地基作用机理基础之上, 着重对其设计思路进行了探讨, 并利用正交设计理论, 对该地基形式的设计进行了初步研究, 得到了以下的结论:

(1) 以沉降控制为目的的优化设计, 可以通过调整桩长、置换率以及土工格室高度来达到目的, 其中复合地基沉降对桩长最为敏感;

(2) 由于实际工程的复杂性, 优化设计方法得到的参数虽然不一定是实际工程中的最可行方案, 但对于工程设计具有一定的指导意义;

(3) 影响复合地基工作性能的参数众多, 本文只

是选出其中具有代表性的参数给予优化, 实际上其他一些参数也能达到优化的目的, 并且各因素之间并不是完全独立的, 因此, 土工格室垫层碎石桩复合地基的优化设计有待于进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 曾锡庭, 于志强. 土工格室及其应用[J]. 中国港湾建设, 2001, 4(2).
- [2] 赵明华, 等. 土工格室+ 碎石垫层结构体的稳定性分析[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(2).
- [3] 马希文. 正交设计的数学理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981.
- [4] 何灿芝. 概率论与数理统计[M]. 湖南科技出版社, 1996.
- [5] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 中国建筑工业出版社, 2002.

## Optimum Design of Geocell and Broken Stone Pile Composite Foundation Based on Orthogonal Theory

YANG Ming-hui<sup>1</sup>, ZHAO Ming-hua<sup>1, 2</sup>, WU Ya-zhong<sup>2</sup>

(1. Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Department of Communications of Hunan Province, Changsha 410011, China)

**Abstract:** Aiming at a new foundation style named geocell and broken stone pile composite foundation, the action mechanism is discussed and the orthogonal design theory applied in the paper. The prime factors which affect the reinforce result through the orthogonal design theory, and the influence extent are gained. As a result, the optimum design for the parameters are done to direct the design of the new foundation style. Finally, through the example of a certain highway, an actual application of the method is shown.

**key word:** geocell; broken stone pile; composite foundation; orthogonal optimization

## 河南又一条高速公路开工

2004年10月18日, 济源至东明高速公路河南焦作至修武段开工。

该项目起自在建的济源至东明高速公路济源至焦作段, 跨焦作城市主干道塔南路, 在陈村与新改建的省道233线相交, 在王里长屯和二十里铺之间与省道308相交, 止于焦作与新乡两市交界处。路线全长29.41 km, 全线设大桥1座, 中桥两座, 涵洞100道。项目概算投资10.19亿元。该项目建成后, 将完善河南省高速公路网布局, 形成豫西北地区最便捷快速通道, 促进豫西北地区经济发展, 进而发挥河南省地处中原、公路交通四通八达的交通枢纽作用。

济源至东明高速公路起于济源境内的太澳高速公路, 经焦作、新乡, 止于山东省东明市, 向东可达山东日照等港口城市, 路线全长238 km, 是河南省黄河以北地区横贯东西的省际高速公路。