

文章编号: 1000-7598-(2014)11-3148-09

基于均匀设计的带桩帽钢管减沉桩 承载性能试验研究

黄晓晖¹, 龚维明¹, 穆保岗¹, 黄挺^{1,2}, 谢日成¹

(1.东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 2.河海大学 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098)

摘 要: 采用均匀设计法对桩长、桩距、垫层、桩帽对减沉桩承载性能的影响进行室内模型试验研究。通过 6 组 3×4 群桩试验, 对不同沉管隧道荷载作用下的土压力、桩身轴力及沉管隧道沉降进行测定。由于采用均匀设计, 运用数理统计理论工具对试验数据进行相关性分析和回归分析, 从而区别于传统的单因素优选法, 使得同时考察多因素、多水平作用下对沉管隧道沉降的综合影响成为可能。分析结果表明, 桩长、桩距、桩帽对沉管隧道沉降的影响随着外荷载的增加而改变; 垫层厚度和桩帽存在交互作用, 两者共同对沉管隧道沉降产生影响。最后, 利用拟合结果进行反演分析, 在总样本为 432 种减沉桩组合中找出符合沉降控制要求的最优化组合。反演结果在后续模型试验中得到较好的验证。

关 键 词: 均匀设计; 减沉桩; 模型试验

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study of bearing performance of steel pipe settlement reducing pile with pile cap based on uniform design

HUANG Xiao-hui¹, GONG Wei-ming¹, MU Bao-gang¹, HUANG Ting^{1,2}, XIE Ri-cheng¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the uniform design, the influence of pile cap, cushion, pile spacing and pile length on bearing capacity of settlement reducing pile foundation has been researched through six lab model tests with 3×4 pile group. Earth pressure, axial force of pile shaft, and tunnel settlement are measured under the different load of immersed tunnel. Owing to the application of the uniform design, the test data can be analyzed with the mathematical statistics methods such as correlation and regression analysis, and the significant degree and influence effect of the four influence factors on the settlement are estimated. Different from the traditional single factor optimization, this approach makes it possible to study the comprehensive influence of the pile foundation on the tunnel settlement under the multi-factor and multi-level conditions. The result shows that the influence of pile length, pile spacing and pile cap on tunnel settlement varies with the increase of the external load, and that the cushion and the pile cap interacts with each other, having a joint effect on the tunnel settlement. Finally, with the back analysis based on the fitting results, one optimum combination is obtained among 432 combination forms and verified in the successive test, which provides a new effective and practical way for the optimum design.

Key words: uniform design; settlement reducing pile; model test

1 引 言

在软土地基的基础设计中, 有时决定采用桩基方案并不是因为邻近地表的土层强度不足, 而是因为较深处的软弱土层会产生过大沉降, 此时可采用数量较少的桩使沉降量减少到容许范围内, 这种桩

基础称为减沉桩。由于基础沉降控制值大于常规的桩基础设计值, 设计中所采用的减沉桩数量少于一般桩基础的数量, 同时在加载过程中保持承台与土体接触, 进一步发挥了承台的承载作用。相对传统方法, 减沉桩基础具有明显的经济及社会效益, 运用日益普遍。

收稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No. 2011BAG07B01)。

第一作者简介: 黄晓晖, 男, 1972 年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事桩基础理论、检测等方面的研究。E-mail: wshxh001@126.com

减沉桩这一概念由 Burland 等^[1]于 1977 年提出, 此后国内外许多学者对其开展了深入的研究, 如 Poulos 等^[2]研究了达到合理沉降所需的减沉桩数目; Randolph^[3]提出了减沉桩对减小实际沉降和差异沉降的作用, 并研究了桩的位置对差异沉降的影响; Polous^[4]分析了减沉桩在提高基础承载力及减小平均沉降和差异沉降上的作用, 并提出合理设计减沉桩的 3 个步骤。目前在减沉桩方面的试验研究尚不多见, 是由于同为桩土共同作用, 复合桩基方面的研究对减沉桩基础研究具有较好的借鉴性。池跃君等^[5]通过现场试验认为单桩复合地基中加固层压缩是产生沉降的主要原因, 下卧层的压缩量很小, 垫层压缩量占沉降的比例随荷载而变化。王兵等^[6]通过现场静载荷试验, 结果表明随垫层厚度的增加, 桩身分担荷载的比例逐渐减小, 而桩间土分担荷载的比例却逐渐增大。之后, 有许多学者开展了减沉桩的数值模拟研究^[7-9]。

本文以港珠澳海底隧道沉管减沉控制技术研究为依托, 研究桩长、桩距、垫层和桩帽共同作用下对隧道沉管减沉桩承载力性能的影响。以往绝大多数室内外桩基试验研究均采用单变量优选法设计试验方案, 即假定处理的实际问题中只有一个因素起作用, 因此, 得出的研究结论也只能是单因素的影响。这种设计方法不能全面反映各种影响因素的共同作用, 其不足是显而易见的, 如果同时考虑多种因素、多个水平, 又因为试验组数激增而导致无法实施。为解决这一难题, 笔者等采用均匀设计方法进行室内模型试验方案设计, 以期得到多种因素共同作用下沉管沉降的基本规律, 为后续模型试验确定参数, 并为工程设计方法提供参考。

均匀设计是一种具重大意义的科学试验方法, 是交叉学科的典范, 广泛应用于国防、医药、生物、化学、电子等诸多领域, 并取得了显著成效^[10-12]。本研究具有如下特点: (1) 试验考虑了不同桩长、不同桩距、不同垫层厚度及有无桩帽等多种因素的影响, 最大限度加大了各种因素的取值范围, 实现以最少的试验次数研究多种因素联合作用下减沉桩承载性能; (2) 现有的减沉桩理论计算公式、数值分析虽然取得了丰厚的成果, 但由于假定条件的局限性和各种参数的不准确性, 实际运用中仍会产生很大的误差。本文利用试验得到的第一手数据, 运用数理统计理论工具研究减沉桩承载能力; (3) 在工程实用中, 为了达到特定设计要求, 理论上存在无数种垫层、桩帽与桩基的组合方案, 目前尚没有有效的理论明确最优化组合。本文在对各种因素综合

影响能力分析的基础上, 通过反演分析探讨了选择桩基最优化组合的方法。

2 试验概况

2.1 试验方案

2.1.1 均匀设计简介

均匀设计^[13]由我国数学家方开泰和王元发明, 根据数论在多维数值积分中的应用原理, 构造了一套均匀设计表, 用来指导均匀试验。均匀设计在我国最早应用于飞航式导弹的研制, 并获得国际认可。以往, 对于多因素试验设计一般采用正交设计法, 其整齐可比的特点给试验结果的分析带来方便, 但为了照顾到整齐可比, 使得试验的均匀性受到一定限制, 因而试验点的代表性不够强, 且试验点的数目必然较多。相比之下, 均匀设计不考虑整齐可比性的要求, 让试验点按一定规律在其试验范围内充分地均匀分散, 每个试验点都有更好的代表性, 试验效果更好, 能大幅度地减少试验次数。本次所采用的 4 因素、6 水平试验, 全面试验次数为 432 次, 正交设计至少需试验 36 次, 而均匀设计只需试验 6 次, 其优越性非常突出, 缺点是不能直观地通过图表看出因素改变时结果的变化, 需要通过数理统计工具加以分析。梅松华等^[14]曾对均匀设计在岩土工程中的应用做了介绍。

2.1.2 试验因素和水平选择

在影响减沉桩性状的各种因素中一般认为桩长和桩距是影响较大的 2 个因素, 而带桩帽及厚垫层是本工程项目的主要特点, 因此, 试验选择桩长、桩距、垫层厚度和桩帽作为重点考察对象, 确定为 6 水平, 参数取值按如下考虑:

(1) 桩长: 参照实体工程项目的初步设计桩长和模型试验条件取模型试验桩长为 $(30 \sim 55)D$ (D 为桩径, 下同)。

(2) 桩距: $3.5D$ 在承台式桩基础中是重要的桩距, 随着桩距的增大, 当桩距增大至 $6D$ 时, 桩侧阻力分布、极限桩侧阻力以及极限桩端阻力总体上均趋近于独立单桩。为了充分发挥桩间土的作用, 本试验决定考察更大桩距工况时的情形, 桩距因子的变化范围选择为 $(3.5 \sim 9.0)D$ 均匀分布。

(3) 垫层厚度: 本试验模型桩桩径为 40 mm, 采用垫层内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$ 。张羽等^[15]、王年云^[16]、周翔龙等^[17]基于不同的方法和角度, 论述了复合地基中垫层合理厚度或最大、最小值的计算方法。本文参考了他们的文献资料, 并结合本试验桩帽的尺寸大小, 最终确定垫层厚度取值为 $0 \sim 125$ mm。

(4) 桩帽: 属于定性因素, 重点研究桩帽的有无对基础沉降所产生的影响。桩帽尺寸与实体工程拟采用的桩帽比例相同, 为 $2D$ 。

2.1.3 样本构造

将模型试验中桩长、桩距、垫层厚度、桩帽考虑为均匀试验设计的 4 个因素对 3×4 群桩基础的沉降影响进行研究, 采用改进的混合水平均匀设计表 $U_6(6^3 \times 2)^{[18]}$, 取值范围见表 1。

表 1 模型试验设计
Table 1 Model test design

编号	桩长 / cm	桩距 / cm	垫层 / cm	桩帽	沉管尺寸(长×宽) / (cm×cm)
1	120(30D)	28(7.0D)	10.0	有	112×84
2	140(35D)	14(3.5D)	5.0		56×42
3	160(40D)	32(8.0D)			128×96
4	180(45D)	20(5.0D)	12.5	有	80×60
5	200(50D)	36(9.0D)	7.5	有	144×108
6	220(55D)	24(6.0D)	2.5		96×72

2.2 试验装置

本次试验在独立的 $3.0 \text{ m} \times 6.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 的混凝土试验槽中进行。试验装置如图 1 所示。

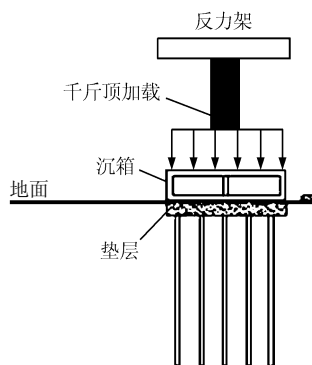


图 1 加载试验示意图
Fig.1 Sketch of load test

土体采用中砂模拟, 物理力学性质见表 2。筛分试验测定其颗粒含量为: 粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量占 34.3% , 粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量占 99.8% 。填土的深度为 4 m , 为保证土的均匀密实性, 填土时每填 30 cm 将土夯实一次, 且严格控制每层填土的高度及夯实后的高度, 保证试验土体的均匀性及一致性。

模型桩采用薄壁钢管模拟。根据相似比原则, 选用桩外径为 40 mm , 壁厚 1.18 mm 。制作模型桩时先将桩沿桩长方向对半剖开, 将应变片及导线布置在钢管内壁, 并采用环氧树脂保护。待胶体凝固

后, 用小型电焊机将两个半桩焊接成一体。为了使模型桩更加接近工程实际, 采用静力压桩法把桩压入土中。桩端处设置锥形桩尖, 桩尖锥角为 45° 。压桩时在桩顶位置放置桩帽, 见图 2。已压入的模型桩见图 3。

表 2 试验用砂物理力学参数
Table 2 Parameters of sand for tests

土粒 相对 密度	含水率 / %	湿密度 / (g/cm ³)	干密度 / (g/cm ³)	孔隙比	内摩 擦角 / (°)	压缩 模量 / MPa	压缩系数 a_{1-2} / MPa ⁻¹
2.65	9.70	1.55	1.41	0.875	32.52	37.50	0.05



图 2 桩帽
Fig.2 Pile caps

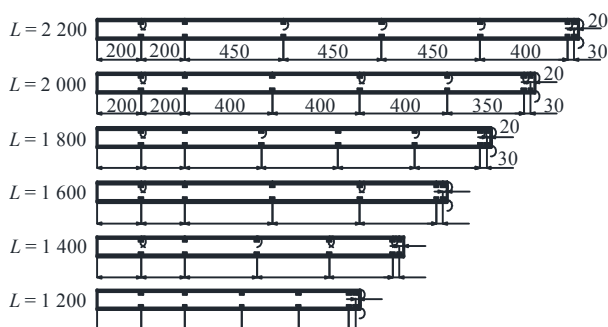


图 3 已压入的模型桩
Fig.3 Model piles pressed into soil

为使试验更贴近实际工程的设计方案, 制作了 6 个不同大小的沉管模型, 具体尺寸见表 1。加载时将沉管置于垫层或桩帽之上, 沉管采用 30 mm 厚钢板制成, 实测数据表明其刚度满足试验要求。垫层采用瓜子石 (粒径为 $2 \sim 10 \text{ mm}$) 模拟, 铺设后用水平尺找平, 实际厚度根据表 1 设定。

2.3 试验测量

试验采集的数据有沉管沉降、桩身各截面应变、桩间土压力及桩顶压力。沉管沉降采用百分表量测。桩身应变片采用聚胺脂精密级应变片, 半桥接线法, 试验中根据桩长不同, 每根桩两侧分别贴 6 个或 7 个应变片, 如图 4 所示。



土压力及桩顶压力采用应变式微型土压力盒量测。本次试验采用的压力盒有两种，一种量程为 1 MPa，用于量测桩间土压力。另一种量程为 8 MPa，用于量测桩顶压力。按照试验设计，压力盒预埋于桩帽预先留的圆孔内和桩间土的相应位置，具体位置见图 5，应变和压力盒数据采用 DH3816 静态应变采集仪采集。

2.4 试验步骤和试验加载

处出现土体裂缝。本模型试验重点考察了试验沉管在各级荷载作用下的沉降,荷载-沉降曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 荷载 0~300 kPa 时各组沉降量差别不大, 且基本呈线性关系。随着荷载的进一步加大, 各组试验的沉管沉降差距才逐渐拉大。通过与天然砂土状态下荷载-位移曲线比较, 各组试验的承载力特征值 (取 $s/b = 0.015$ 时对应的荷载值, s 为沉降; b 为荷载板宽度) 均有明显提高, 其中 30D 组的提高幅度最小, 为 18.4%; 55D 组的提高幅度最大, 为 93.9%。

3.1.2 轴向受力特性

以 600 kPa 沉管压力下各组试验中 4 号桩（位置见图 5）的桩身轴力为例，如图 7 所示。试验结果显示，模型桩轴力先增大后减少，因为桩的沉降小于桩侧土沉降，从而形成桩基负摩阻力的作用。桩-土位移相同点即为负摩阻力中性点，在该点处桩轴力最大。从轴力图可以发现本试验中减沉桩中性点位置较高，一般在 $L/4 \sim L/2$ （ L 为桩长）范围内，其中以 50D 一组（桩距为 9D）的轴力最小，而 55D 组（桩距 6D）和 45D（桩距 5D）的轴力最大，说明桩距 5D~6D 左右时减沉桩的作用发挥较大。比较 45D 组和 55D 组可以发现，由于 45D 组的垫层厚度大，负摩阻力的中性点比较低。需要说明的是，各组试验桩身轴力反映的是桩长、桩距、垫层厚度、有无桩帽等 4 种因素共同发挥作用的结果，只不过每种因素所产生的作用效果有所不同。

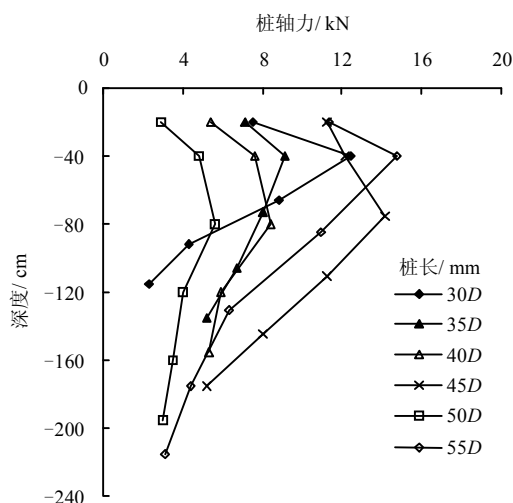


图7 桩身轴力曲线

Fig.7 Axial force curves of pile

3.2 相关分析

由于试验采用均匀设计, 可以利用相关性分析考察各个因素对试验结果影响的程度和方向, 从而找出影响因素的主次。本文借助统计学分析软件 IBMSPSS, 将 6 组试验各级荷载下的沉管沉降数据分析整理, 得出桩帽、垫层、桩距及桩长与沉管沉降的相关系数见表 3。

表3 各因素与沉管沉降的相关系数
Table 3 Correlation coefficient between factors and tunnel settlement

因素	变化量 / cm	不同沉管底压力(kPa)沉管沉降的相关系数 r					
		100	200	300	400	500	600
桩长	120→220	-0.023	-0.044	-0.290	-0.440	-0.697	-0.808
桩距	14→32	0.696	0.732	0.638	0.547	0.400	0.328
垫层	0→12.5	0.329	0.302	0.291	0.118	0.117	0.178
桩帽	有→无	0.667	0.647	0.603	0.399	0.330	0.350

在相关性分析中, 变量之间存在正相关 ($r > 0$) 及负相关 ($r < 0$) 两种关系。正相关表明, 2 个变量的变化方向一致, 即一个变量增大, 则另一个变量亦会增大; 负相关则是一个变量随另一个变量的增大而减小。变量之间的相关程度是以相关系数 r 的绝对值的大小来评判, 评判标准为: $|r| > 0.95$, 变量间存在显著性相关; $|r| \geq 0.8$, 高度相关; $0.5 \leq |r| < 0.8$, 中度相关; $0.3 \leq |r| < 0.5$, 低度相关; $|r| < 0.3$, 关系极弱。

由表 3 可以看出, 桩长与沉管沉降的相关系数为负值, 体现负相关性, 即桩长的增加使沉降变小。随着沉管荷载水平的逐渐增大, 二者的相关系数绝对值也逐步增大至 600 kPa 时的 0.808, 呈高度相关性。而桩距、桩帽与沉管沉降的相关系数则相反,

随着沉管荷载水平的逐渐增大, 由沉管荷载水平较低时呈现的中度相关性逐步减弱为弱相关性。分析结果表明, 在荷载水平较低的弹性阶段, 基础沉降受桩距和桩帽的影响较为显著, 而受桩长的影响较小。这是因为受荷初期, 桩间土承担大部分荷载, 减沉桩所分担的小部分荷载由上部桩侧摩阻力承担, 这时桩长大小的区别没有能够充分体现出来。而桩距和桩帽则直接关系到桩土荷载分担比, 所以在这个阶段二者对沉降的大小起到重要作用。随着上部荷载的增加, 复合地基开始向屈服阶段发展, 桩间土压力增加愈趋平缓, 桩侧摩阻力则逐步发挥到达极限, 桩端阻力也逐步发挥, 此时桩身逐渐承受更多的荷载, 这时桩长对沉降的影响也逐渐明显, 直至起到最显著的作用。

垫层厚度和基础沉降的相关系数最大值为 0.329, 最小值为 0.117, 相关性极弱。根据统计学理论初步分析这可能和垫层与其他 3 个影响因素存在交互作用有关。一个试验里不仅各种因素单独对应变指标起作用, 有时某些因素之间各水平的联合搭配对指标也有影响, 这种联合搭配的作用称为交互作用。

为了进一步研究 4 个影响因素之间的是否存在交互作用, 笔者计算了各个因素相互之间的相关系数, 见表 4。

表4 各因素之间的相关系数 r
Table 4 Correlation coefficient " r " between factors

因素 A-B	桩长与 桩距	桩长与 垫层	桩长与 桩帽	桩距与 垫层	桩距与 桩帽	垫层与 桩帽
相关系数	0.226	-0.200	-0.098	-0.173	0.318	0.878

从影响因素之间的关系来看, 垫层与桩帽之间存在着高度相关关系, $r = 0.878$ 。分析其原因, 在减沉桩地基中褥垫层作为刚性基础与桩土体系的过渡层, 其作用机制是通过提供向上贯入的条件来调整桩-土应力比, 实现桩-土协调变形。而桩顶刺入垫层的程度乃至垫层的破坏都与桩与垫层的接触面积密切相关。桩帽的使用实际上就是改变了桩与垫层之间的接触面积, 本次试验中二者之间的高度相关性正是这种联系的体现。

3.3 回归分析

回归分析方法是建立统计模型研究变量间相互关系的密切程度、结构状态、模型预测的有效工具。本次试验中, 有 4 个处理因素分别为桩长 x_1 、桩距 x_2 、垫层厚度 x_3 、桩帽 x_4 作为自变量, 其

中桩帽为定性因素, 用 1 代表有桩帽, 0 代表无桩帽。以沉管压力 600 kPa 时的沉降量 y 为应变量, 构造回归方程为

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon \quad (1)$$

式中: α 、 $\beta_1 \sim \beta_4$ 为回归系数; ε 为误差值。公式亦可表示为

$$\begin{pmatrix} 28.52 \\ 22.29 \\ 22.80 \\ 17.61 \\ 22.88 \\ 14.76 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 120 & 28 & 10 & 1 \\ 1 & 140 & 14 & 5 & 0 \\ 1 & 160 & 32 & 0 & 0 \\ 1 & 180 & 20 & 12.5 & 1 \\ 1 & 200 & 36 & 7.5 & 1 \\ 1 & 220 & 24 & 2.5 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

求解得回归模型:

$$y = 93.172 - 0.103x_1 - 1.663x_2 - 6.642x_3 + 59.940x_4 \quad (3)$$

为了判断回归模型是否具有显著意义, 需进行显著性检验。首先进行回归方程显著性检验, 又称 F 检验。检验假设 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_p = 0$, 当 H_0 不成立时, F 值满足式 (4), 认为在显著水平 α 下回归方程是显著的。

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p}}{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p-1)}} > F_{\alpha}(p, n-p-1) \quad (4)$$

式中: $F_{\alpha}(p, n-p-1)$ 为 F 检验临界值; p 为自由度; n 为样本数。通过查 F 分布表获得, 本次试验临界值 $F_{0.1} = 55.83$, 本次回归拟合得到的 $F = 13.597$, 可见回归方程在整体上不显著, 拟合效果不佳。另外, 本文还进行回归系数显著性 t 检验, 同样未能通过。

针对本次回归分析检验结果做如下调整:

(1) 垫层厚度 x_3 的 t 值最低, 将该因素 x_3 从方程中剔除; (2) 考虑自变量之间的交互作用。鉴于前文各因素间的相关性分析 (见表 4) 得出桩帽与垫层之间存在较强的交互性, 所以引入了两者的交互变量 $x_3 x_4$ 。重新构造回归方程为

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_4 + \beta_4 x_3 x_4 + \varepsilon \quad (5)$$

即

$$\begin{pmatrix} 28.52 \\ 22.29 \\ 22.80 \\ 17.61 \\ 22.88 \\ 14.76 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 120 & 28 & 10 & 1 \\ 1 & 140 & 14 & 0 & 0 \\ 1 & 160 & 32 & 0 & 0 \\ 1 & 180 & 20 & 12.5 & 1 \\ 1 & 200 & 36 & 1 & 7.5 \\ 1 & 220 & 24 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (6)$$

求解得回归模型:

$$y = 36.351 - 0.116x_1 + 0.158x_2 + 11.671x_4 - 1.013x_3 x_4 \quad (7)$$

或

$$y = 36.351 - 0.116x_1 + 0.158x_2 + (11.671 - 1.013x_3)x_4 \quad (8)$$

SPSS (Statistical Product and Service Solutions, 美国 IBM 公司出品的用于数理统计学分析运算的著名软件) 分析结果见表 5。

表 5 公式(8)回归结果的显著性检验
Table 5 Significance test of regression results about equation (8)

各项自变量	回归系数	t 检验	P 值	F 检验	决定系数 R^2
常数项	36.351	72.753	0.009		
桩长 x_1	-0.116	-48.334	0.013		
桩距 x_2	0.158	10.229	0.062	773.013	1.000
桩帽 x_3	11.671	14.749	0.043		
桩帽 $\times$ 垫层 $x_3 x_4$	-1.013	-13.946	0.046		

回归方程显著性检验: $F = 773.013$, 大于试验临界值 $F_{0.1} = 55.83$, 说明各个自变量全体对因变量 y 产生了显著影响。从拟合优度角度看, 决定系数 $R^2 = 1.000$, 几乎 100% 的方差波动。

在处理多元回归的实际问题时, 往往并不满足于判断回归方程的显著性, 还需要进一步对每个自变量的回归系数进行显著性检验, 即 t 检验。对于给定的检验水平 $\alpha = 0.10$, 从 t 分布表中可以查出临界值 $t_{\alpha} = 1.638$, 回归方程各系数的 $|t|$ 均大于 t_{α} , 可见所有因素均非常显著。因此, 从综合检验的结果看, 回归方程对试验数据的拟合效果非常优秀。表 6 为回归方程的计算结果。

表 6 沉降量实测值与计算值的比较
Table 6 Comparison of measured and calculated values of settlement

试验编号	Y (观测值) / mm	Y' (理论值) / mm	$\Delta = Y - Y'$ / mm	相对误差 / %
1	28.52	28.40	0.12	0.43
2	22.29	22.32	-0.03	0.15
3	22.80	22.85	-0.05	0.21
4	17.61	17.64	-0.03	0.17
5	22.88	22.91	-0.03	0.14
6	14.76	14.62	0.14	0.93

回归分析结果表明:

(1) 一个回归方程需经过回归方程显著性的 F 检验、衡量回归拟合程度的拟合优度检验和回归系数显著性的 t 检验。回归分析过程中自变量的筛选是一个动态的过程,需综合考虑显著性检验的结果、自变量之间的交互作用以及回归方程的理论意义等等,如有必要可以采用逐步回归、岭回归等其他辅助方法。

(2) 在模型试验中桩长每增加 10 cm, 沉管沉降量平均相应减少 1.16 mm, 桩长的增长与沉降的增长成负相关关系。而桩距每增加 10 cm, 沉管沉降量相应增加 1.58 mm, 桩距的增长与沉降的增长成正相关关系。所以, 桩距对沉管沉降的影响程度略大于桩长, 两者相差 12% 左右。

(3) 从垫层的回归系数 1.103 可见, 对于本文所采用的砂土地基, 设置褥垫层可以明显改善复合地基的承载性能, 充分发挥桩间土的承载能力。桩帽对沉管沉降的影响与垫层厚度有关。对于薄垫层, 使用桩帽反而会加大基础沉降, 但垫层厚度超过一定水平之后桩帽则有助于降低基础沉降。

4 反演分析及检验

4.1 最优化设计方案的反演分析

回归方程的一个重要应用是用最优化方法预测指标的极大值或极小值, 从而确定最佳的试验条件或配方^[18]。传统的地基基础设计过程是设计人员事先拟定几个设计方案, 通过校核方案的安全性和可靠性来进行方案优化。这种方式只能对少量的几个方案进行比较, 得到的解可能离最优解还有相当的距离, 且与设计人员的水平和经验有很大关系。孙林娜等^[19]曾经做过复合地基沉降及按沉降控制的优化设计研究, 但其建立的模型也是事先假定若干方案进行计算检验。本文则采用试验数据回归模型对优化设计方法做出探讨。

以本文均匀试验为例, 假设要求复合地基在沉管底部压力在 600 kPa 时沉降控制在 20 mm 左右, 并且相对误差在 $\pm 5\%$ 以内是可以接受的范围, 即沉降量控制在 19~21 mm 之间则认为符合要求。通过对回归方程式(8)的反演分析, 对本试验表 1 中 4 因素 6 水平共计算了 432 种组合, 其中有 21 种组合符合沉降控制要求。

为了评价这 21 种组合的优劣, 引进单位面积用桩量这个经济性指标, 即每平方米处理地基中所使用的桩材料的数量。由于限定条件是在一定上部荷载作用下沉管沉降相同, 这 21 种组合地基的综合刚

度是一致的, 可以保持上部沉管结构刚度的一致性。在沉管结构刚度相同的情况下, 地基工程的投资主要由桩材料用量控制。本次分析桩径不变, 所以桩材料用量直接以桩的长度表示, 量纲为 m/m^2 , 其实际意义就是最小的用桩量达到所要求控制的沉降量。经计算得到一组最优参数值见表 7。由于模型试验的桩间土能够提供较大的荷载, 大的桩间距与厚垫层配合可以充分发挥桩间土的作用, 同时桩帽的使用也使得桩土荷载分担比得到有效的调整, 最终取得最佳的组合效果。分析结果表明, 即使在不用考虑持力层的单一性土层中, 也并不是打入的桩越多其控制沉降的效果就越好。同一减沉效果的桩基组合形式其单位面积用桩量可高达数倍, 但产生的减沉效果却基本相同。因此, 合理选择桩的组合形式至关重要。

表 7 最优参数组合

Table 7 Optimum combination of factors

桩长 / cm	桩距 / cm	垫层 / cm	桩帽	沉降预测值 / mm	单位面积用桩量 /(m/m^2)
200	36	10	有	20.38	15.43

4.2 反演分析结果验证

根据本均匀设计方案试验分析结果, 为隧道沉管减沉控制技术研究确定了 12 组后续模型试验, 试验条件和步骤与本试验相同。试验分组情况见表 8。将每一组试验参数组合代入数学模型 8 得到的 12 组目标函数值即沉管沉降预测值。由表 8 可知, 反演参数正分析计算得到的沉管沉降预测值和实测值吻合较好。特别是章节 4.1 反演分析得到的最优化组合 (200 cm, 36 cm, 10 cm, 有桩帽) 预测值与实测值误差仅为 12.5%, 体现了这种反演分析确定最优设计的方法具有一定可靠性。

表 8 试验分组情况及实测值与计算值对比

Table 8 Comparison of settlement between measured and calculated values at each model test

试验 编号	桩长 / cm	桩距 / cm	垫层 / cm	桩帽	沉降计 算值 / mm	沉降实 测值 / mm	相对 误差 / %
1	120	16	10.0	无	24.96	18.78	32.9
2	120	24	6.0	无	26.22	23.94	9.5
3	120	36	6.0	有	33.71	24.59	37.1
4	120	36	10.0	无	28.12	28.28	-0.6
5	160	16	2.4	无	20.32	18.15	12.0
6	160	24	10.0	无	21.58	23.37	-7.6
7	160	36	2.4	无	23.48	26.71	-12.1
8	160	36	10.0	有	25.02	25.59	-2.2
9	200	16	10.0	有	17.22	19.62	-12.2
10	200	24	2.4	无	16.94	19.27	-12.1
11	200	36	2.4	有	28.08	24.47	14.7
12	200	36	10.0	有	20.38	23.29	-12.5

5 结 论

(1) 沉管沉降与桩距、桩长、垫层厚度和桩帽的相关关系随荷载的变化而发生改变。受荷初期, 沉管沉降受桩距和桩帽的影响显著, 受桩长的影响较小。随着荷载的逐渐增大, 桩长对沉管沉降的影响逐渐明显, 直至起到最显著的作用。垫层厚度与桩帽之间的交互作用, 两者联合对沉管沉降产生作用, 在厚垫层条件下使用桩帽能够减少沉管沉降。

(2) 通过对回归模型的反演分析, 确定出符合沉降控制要求的最优减沉桩参数组合, 是一种桩基工程最优化设计的可供参考的方法。

(3) 均匀设计方法在保证试验效果的前提下大幅度减少了试验数量, 使实际工程中通过现场试验确定各种参数和桩基组合形式成为可能。由于理论计算和数值模拟均不可避免地带有经验取值的风险, 现场试验得到的结论可靠性更高。因此, 均匀设计方法在实际工程应用中具有较高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] BURLAND J B, BROMS B B, DE MELLO V F. Behavior of foundations and structures[C]//Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo: State of the Art Report, 1977: 495—546.
- [2] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1980.
- [3] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and piled rafts[C]//Proc., 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: Balkema, 1994, 5: 61—82.
- [4] POLOUS H G. Piled raft foundations: Design and applications[J]. *Geotechnique*, 2001, 51(2): 95—113.
- [5] 池跃君, 宋二祥, 金淮, 等. 刚性桩复合地基应力场分布的试验研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(3): 339—343.
CHI Yue-jun, SONG Er-xiang, JIN Huai, et al. Experimental study on stress distribution of composite foundation with rigid piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 339—343.
- [6] 王兵, 杨为民, 李占强, 等. 褥垫层对复合地基承载特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 403—408.
WANG Bing, YANG Wei-min, LI Zhan-qiang, et al. Test study on influence of cushion on loading behavior of composite foundations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 403—408.
- [7] 郑刚, 刘润. 减沉桩与土相互作用机制的工程实例与有限元分析[J]. *天津大学学报*, 2001, 34(2): 209—213.
ZHENG Gang, LIU Run. Case study and finite element analysis on the interaction between soil and settlement reducing pile foundation[J]. *Journal of Tianjin University*, 2001, 34(2): 209—213.
- [8] REUL O, RANDOLPH M F. Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(1): 1—13.
- [9] LEE Jinhyung, KIM Youngho, JEONG Sangseom. Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2010: 37(1-2), 103—114.
- [10] 刘永才. 均匀设计及其应用[J]. *战术导弹技术*, 2002, 23(1): 58—61.
LIU Yong-cai. Uniform design and its applications[J]. *Tactical Missile Technology*, 2002, 23(1): 58—61.
- [11] 黄芳, 黄子杰. 均匀设计及其在药学研究中的应用[J]. *数理医药杂志*, 2007, 20(5): 612—614.
HUANG Fang, HUANG Zhi-jie. Uniform design and its applications on pharmaceutical research[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2007, 20(5): 612—614.
- [12] 黄厚今, 王瑞淑, 徐维光, 等. 用均匀设计方法优化 sertoli-germ 细胞培养条件的研究[J]. *中国公共卫生学报*, 1999, 18(2): 72—74.
HUANG Hou-jin, WANG Rui-shu, XU Wei-guang, et al. Optimization of the condition of sertoli-germ cell co-culture by uniform design[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 1999, 18(2): 72—74.
- [13] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14] 梅松华, 盛谦, 冯夏庭. 均匀设计在岩土工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2694—2697.
MEI Song-hua, SHENG Qian, FENG Xia-ting. Application of uniform design to geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2694—2697.
- [15] 张羽, 林才奎, 烘宝宁. CFG 桩复合地基的垫层作用机制和设计研究[J]. *广东公路交通*, 2005, 88(1): 55—57.

- ZHANG Yu, LIN Cai-kui, HONG Bao-ning. Research on the mechanism and design of cushion in CFG pile composite foundation[J]. **Guangdong Highway Communications**, 2005, 88(1): 55—57.
- [16] 王年云. 复合地基上褥垫层设计的理论分析[J]. 建筑结构, 1999, 29(12): 24—26.
- WANG Nian-yun. Theoretical analysis on the design of cushion in composite foundation[J]. **Journal of Architectural Structure**, 1999, 29(12): 24—26.
- [17] 周龙翔, 童华炜, 王梦恕, 等. 复合地基褥垫层的作用及其最小厚度的确定[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 841—843.
- ZHOU Long-xiang, TONG Hua-wei, WANG Meng-shu, et al. Study on the role of cushion of composite ground and its minimum depth[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 841—843.
- [18] 毛东森. 均匀设计及其在化学化工中的应用[J]. 化工进展, 1997, 6(5): 16—19.
- MAO Dong-sen. Uniform design and its applications in chemical engineering[J]. **Advance in Chemical Engineering**, 1997, 6(5): 16—19.
- [19] 孙林娜, 龚晓南. 按沉降控制的复合地基优化设计[J]. 地基处理, 2007, 18(1): 3—8.
- SUN Lin-na, GONG Xiao-nan. Optimum design of composite foundation with settlement control[J]. **Ground Improvement**, 2007, 18(1): 3—8.
-
- 上接第 3116 页
- [8] 李广信, 张其光, 黄永男. 等应力比平面应变试验中主应力转换的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1867—1872.
- LI Guang-xin, ZHANG Qi-guang, HUANG Yong-nan. Study on transforming of principal stresses in constant stress ratio plane strain tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1867—1872.
- [9] EWY R. Wellbore-stability prediction by use of a modified Lade criterion[J]. **SPE Drill Completion**, 1999, 14(2): 85—91.
- [10] NAKAI T, MATSUOKA H. Constitutive equation for soils based on the extended concept of “spatial mobilized plane” and its application to finite element analysis[J]. **Soils and Foundations**, 1983, 23(4): 87—105.
- [11] YAMAGUCHI H, KIMURA T, FUJII N. On the intermediate of progressive failure on the bearing capacity of shallow foundations in dense sand[J]. **Soils and Foundations**, 1976, 16(4): 11—22.
- [12] 刑义川. 黄土的弹塑性模型及边坡稳定有限元分析[硕士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 1988.
- [13] 殷宗泽, 赵航. 中主应力对土体本构关系的影响[J]. 河海大学学报, 1990, 18(5): 54—61.
- YI Zong-ze, ZHAO Hang. Effect of intermediate principal stress on constitutive relationship[J]. **Journal of Hohai University**, 1990, 18(5): 54—61.
- [14] 施维成, 朱俊高, 张博, 等. 粗粒土在平面应变条件下的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1974—1979.
- SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, ZHANG Bo, et al. Strength characteristics of coarse-grained soil under plane strain condition[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1974—1979.
- [15] 舒继森, 才庆祥, 王成龙, 等. 岩石边坡平面滑动时的临界滑面倾角的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(4): 437—440.
- SHU Ji-sen, CAI Qing-xiang, WANG Cheng-long, et al. Inquire into critical inclination of failure face in rock slope with planar failure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(4): 437—440.
- [16] 赵衡, 宋二祥, 徐明. 基于推广 SMP 准则的边坡稳定性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 150—154.
- ZHAO Heng, SONG Er-xiang, XU Ming. Slope stability analysis based on the extended SMP criterion[J]. **Journal of Tsinghua University(Science and Technology)**, 2012, 52(2): 150—154.