

分级沉降模式下桩 - 土荷载分担效应模型 试验研究

章清涛^{1*}, 刘晓威², 高 健¹, 李为传³, 闫庆亮¹, 李 信³, 张宏博³

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

²山东省交通规划设计院, 山东 济南

³齐鲁交通学院, 山东大学, 山东 济南

Email: zhang_qt@163.com

收稿日期: 2021年4月23日; 录用日期: 2021年5月8日; 发布日期: 2021年5月21日

摘 要

桩网复合地基具有良好的协调差异变形的能力, 但由于受地基固结沉降特征的影响, 其承载特性的发挥与桩 - 土差异沉降量密切相关。为揭示路基渐进沉降模式下桩网复合地基桩 - 土荷载分担效应, 设计了室内缩尺模型模型, 考虑桩 - 土差异沉降、桩间距等参数变化, 通过对比桩网复合地基与普通复合地基, 对分级沉降条件下的桩 - 土荷载分担效应开展了研究。研究表明, 在同等桩间距条件下, 随着桩 - 土差异沉降量的增大, 桩网复合地基与普通复合地基桩顶荷载均增大, 且前者明显高于后者; 在同等桩 - 土差异沉降量下, 桩网复合地基荷载分担比例及桩土应力比更高, 但随着桩间距的增大, 桩土应力比以及桩土荷载分担比逐渐减小。通过分析桩 - 土应力比与桩间距及桩 - 土差异沉降的关系, 建立了分级沉降条件下桩 - 土应力比的预测公式, 为桩网复合地基设计可提供良好的借鉴意义。

关键词

桩网复合地基, 分级沉降, 模型试验, 荷载分担效应, 桩 - 土应力比

Experimental Study on Pile-Soil Load Sharing Effect Model under Hierarchical Settlement Mode

Qingtao Zhang^{1*}, Xiaowei Liu², Jian Gao¹, Weichuan Li³, Qingliang Yan¹, Xin Li³,
Hongbo Zhang³

¹Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan Shandong

²Shandong Province Communication Planning and Design Institute, Co. Ltd., Jinan Shandong

*第一作者。

文章引用: 章清涛, 刘晓威, 高健, 李为传, 闫庆亮, 李信, 张宏博. 分级沉降模式下桩 - 土荷载分担效应模型试验研究[J]. 土木工程, 2021, 10(5): 402-412. DOI: 10.12677/hjce.2021.105046

³Shandong university, School of Qilu Transportation, Jinan Shandong
Email: zhang_qt@163.com

Received: Apr. 23rd, 2021; accepted: May 8th, 2021; published: May 21st, 2021

Abstract

In order to reveal the pile-soil load sharing effect under the progressive settlement mode of subgrade, an indoor scale model was designed. Considering the difference of pile-soil differential settlement and pile spacing, the load sharing effect of pile-soil under the condition of graded settlement was carried out. According to the research results, it is proposed that under the same pile spacing condition, with the increase of pile-soil differential settlement, the pile top load of pile-net composite foundation and common composite foundation increases, and the former is significantly higher than the latter. Under the difference of soil settlement, the load sharing ratio and pile-soil stress ratio of pile-net composite foundation is higher than common composite foundation, but the pile-soil stress ratio and pile-soil load sharing ratio decrease with the increase of pile spacing. By analyzing the relationship between pile-soil stress ratio and pile spacing and pile-soil differential settlement, the prediction formula of pile-soil stress ratio under limit and non-limit conditions is established. The research results can provide a good reference for pile-net composite foundation design.

Keywords

Pile Net Composite Foundation, Differential Settlement, Model Test, Load Sharing Effect, Pile-Soil Stress Ratio

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥头跳车是指由于桥梁或通道等结构物两侧与路堤填土衔接处产生较大的差异沉降,使得路面出现显著的纵坡变化和刚度变化,造成台背回填处路面出现沉降断裂,车辆通过时产生剧烈的跳跃和冲击,影响道路的舒适性与安全性[1] [2] [3] [4] [5]。为了克服或减轻桥头跳车现象,新建或扩建公路普遍加强了桥头路段的地基处理,尤其对于填方高度超过 6 m 的路段,往往采取搅拌桩、CFG 桩、管桩等复合地基技术进行加固治理,加固区域的长度一般为 40~50 m,沿道路走向分 A、B、C 三区,桩径为 0.4~0.6 m,桩长多介于 8~15 m,桩间距为 1.2~2.5 m 不等[6]。然而,调研表明,尽管许多路段采取了复合地基处治措施,但桥头跳车现象仍层出不穷,个别区域甚至 2~3 年内的差异沉降即高达 30 cm,严重超过了工后沉降控制标准[7]。针对该问题,有研究表明,对于普通复合地基,受复合地基桩间距影响,桩顶土拱效应发挥程度不一,桩顶承担竖向荷载的能力有限,桩间土会承担较大的上覆荷载,从而引起地基的压缩变形大于桩体沉降,使得桩体产生负摩阻作用,引起桩体的整体下沉,地基沉降难以达到预期目标[8] [9]。因此,为解决该问题,应当采取措施增大桩体的竖向承载能力,桩网复合地基技术逐渐应用于工程实践中。

目前,在软土工程中应用较多,该类型复合地基是“水平向增强体(格栅联合垫层)+ 竖向增强体(桩)”的联合型复合地基[10] [11]。与传统复合地基相比,桩网复合地基有效利用了“桩-网-土”的协同作用,通过桩体的土拱效应和水平增强体的网兜效应,更充分发挥了桩体的承载能力,降低了桩周土的附加应力[12],尤其适合在软土地基上快速建造路堤或堤坝类构筑物。为揭示其复杂的作用机理,国内外学者对其承载特性开展了较多研究,如 Low [13]等通过模型试验,研究桩网式复合地基中加筋材料的工作特性;赵明华[14]基于弹性理论,考虑桩间土的承载能力,推导了桩承式复合地基的桩土应力比计算方法;曹文贵[15]考虑了桩土差异沉降与土拱发挥程度,建立了桩网复合地基土拱效应分析模型;Delmas [16]假设加筋材料的挠曲变形为抛物线,分析了加筋材料对桩土应力比的影响规律。上述研究大多是基于土拱效应充分发挥的基础上开展的研究工作,但在实际工程中,受上覆荷载作用及土质条件的影响,地基固结是一个缓慢的过程,许多情况难以达到土拱效应充分发挥的条件,即处于非极限位移状态,其对桩-土荷载分担效应的影响规律是本文研究解决的主要问题。因此,本文采用分级沉降活动门模型试验,通过对比普通复合地基与桩网复合地基的桩-土荷载分担效应,研究了不同桩间距条件下桩-土应力比随桩-土差异沉降的变化规律,揭示了分级沉降条件下桩网复合地基的工作特性,建立了不同沉降条件下桩-土应力比与荷载分担效应计算公式,研究成果可为桩网复合地基的工程设计提供借鉴意义。

2. 模型试验方案设计

2.1. 模型假定

本文研究重点在于探讨不同桩间距及分级沉降条件下的桩网复合地基受力特性,为简化影响因素,模型试验设计采用如下假定:

- 1) 假定桩网复合地基支撑于坚硬持力层中,因此,桩体相对桩周土视为刚体、不动,桩周土体发生竖向压缩变形,试验中通过调整填土底部沉降模拟桩土间的差异沉降;
- 2) 为揭示土体分级沉降对桩网复合地基工作特性的影响机理,假定土体只发生一维竖向变形,不考虑土体侧向变形的影响;
- 3) 为避免模型侧壁对土体内部主应力的干扰,假设路基填土与模型侧壁为完全光滑;
- 4) 研究表明,土体粘聚力的存在会影响桩网复合地基土拱效应发挥半径。因此,为尽量减小模型尺寸效应对研究结果的影响,试验采用无粘性材料模拟路基填土。

2.2. 模型参数的确定

1) 基本设计参数的确定

依据桩网复合地基常用技术参数,按照 1:10 的几何相似比进行模型试验设计,取为桩径为 6 cm,桩间距为 12~25 cm。采用活动门试验模拟桩-土差异沉降,假定桩体不动、土体下沉。根据预估实际差异沉降量,模型试验中桩-土最大差异沉降量取为 4 cm 作为极限沉降。

2) 模型装置的设计

模型试验装置如图 1 所示,由试验箱、固定底板(模拟桩体)、活动底板(模拟土体)、土工格栅、剪式千斤顶等组成。其中,模型槽长度为 90 cm,模型槽高度为 60 cm,宽度为 50 cm。为合理控制路基填料底部沉降,将桩体设为不动体,通过采用剪式千斤顶调整底板位移实现桩-土间的相对位移。

2.3. 试验工况设计

试验工况如表 1 所示,包括桩顶有格栅与无格栅两种工况,桩间距分别选取桩径的 2、3、4、5 倍。试验过程中实行分级沉降,每级沉降 5 mm,并记录分级沉降过程中的桩顶土压力值。

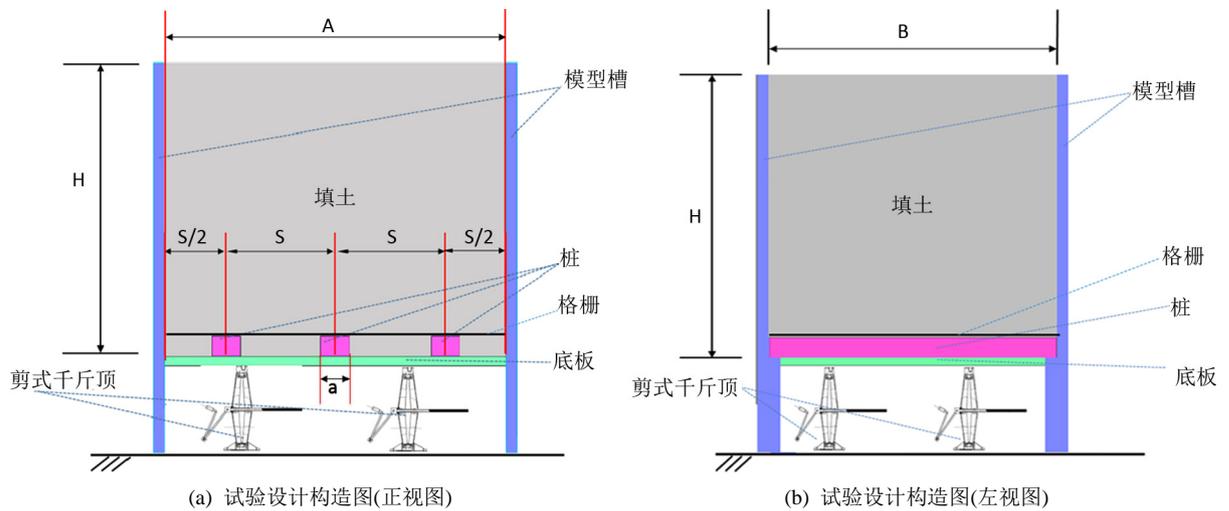


Figure 1. Laboratory test design construction drawing
图 1. 室内试验设计构造图

Table 1. Test condition
表 1. 试验工况

序号	格栅	桩径 d/mm	桩间距 s/mm	底板沉降 δ/mm	填土高度 h/mm
1	有	60	2×60	$5 \times N$	600
2			3×60		
3			4×60		
4			5×60		
5	无	60	2×60	$5 \times N$	600
6			3×60		
7			4×60		
8			5×60		

注: N 为试验分级数, 最大为 8 级。

2.4. 试验材料

1) 填料

试验填料为砂土, 为减小颗粒粒径的尺寸效应, 降低对土压力监测数据的影响, 试验材料过 5 mm 筛进行筛分。筛分后, 土料的级配试验曲线如图 2 所示, 有效粒径 $d_{10} = 0.12 \text{ mm}$, 限定粒径 $d_{60} = 0.82 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.36 \text{ mm}$, 计算不均匀系数 $C_u = 5.47$, 曲率系数 $C_c = 1.32$, 土的级配良好, 为不均匀土。细度模数 $M_X = 2.435$, 为中砂。试验中控制含水率 $w = 4\%$, 相对密实度 $D_r = 0.75$, 容重 $\gamma = 16.85 \text{ kN/m}^3$, 粘聚力 $c = 4 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 38^\circ$ 。

2) 土工格栅

试验采用 PET 双向土工格栅, 厚度为 5 mm, 抗拉强度为 80 kPa/m, 弹性模量为 48 GPa, 切向刚度为 4300kPa/m, 泊松比为 0.33。

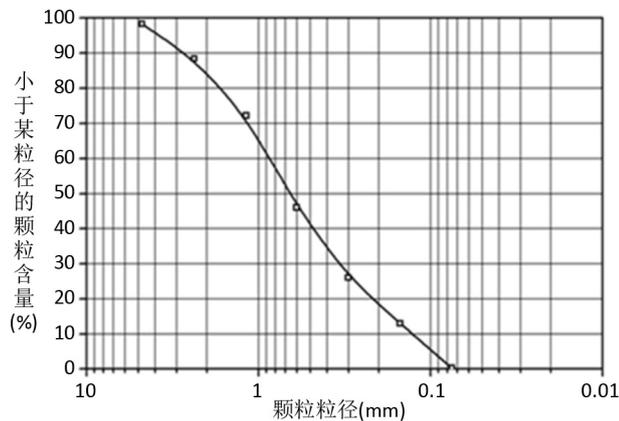


Figure 2. Grading curves of filler

图 2. 填料颗分曲线

2.5. 试验测试

模型试验测试内容包括底板沉降量和桩顶土压力，其中，底板沉降通过百分表进行测量，共布设 2 只百分表。如图 3 所示，土压力盒布设于桩顶和土工格栅之间，在中桩和边桩顶部各布设 4 个电阻式土压力盒，土压力盒型号为 LY-350 型，外形尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

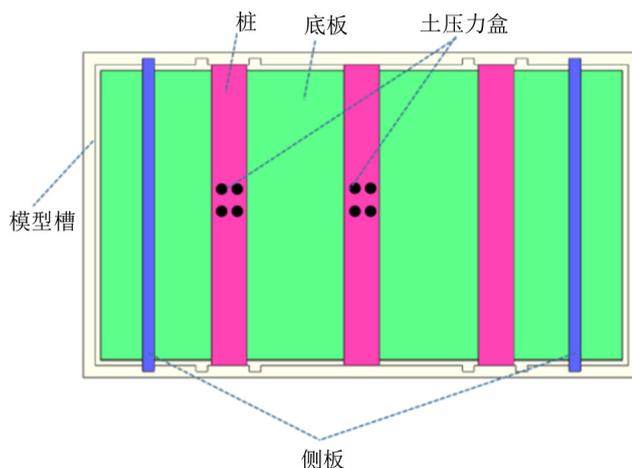


Figure 3. Earth pressure chamber layout

图 3. 土压力盒布置图

2.6. 试验流程

本试验装置图如图 4 所示，试验流程如下：

- 1) 模型装置的安装固定：安装固定模型试验槽，粘贴土压力盒，安装百分表。
- 2) 填料填筑：为保证填料的均匀性和连续性，采用雨淋法填筑，砂体的相对密度为 $D_r = 75\%$ ，填筑过程中每隔 15 cm 填筑高度随机选择三个压实度测点，其平均压实度与目标压实度误差不超过 2%。
- 3) 土工格栅的安装固定：待砂土填筑标高超过土压力盒顶部 2 cm 时，停止淋砂，铺设土工格栅。为保证土工格栅具有充足的伸长量及锚固端，通过在模型槽外侧设置 U 型葫芦，用于延长土工格栅的铺设长度。安装固定后，继续淋砂至设计高度 60 cm，
- 4) 分级沉降：逐级向下移动底板位置，并测试桩顶土压力变化，直至底板与土工格栅脱离，停止试验。

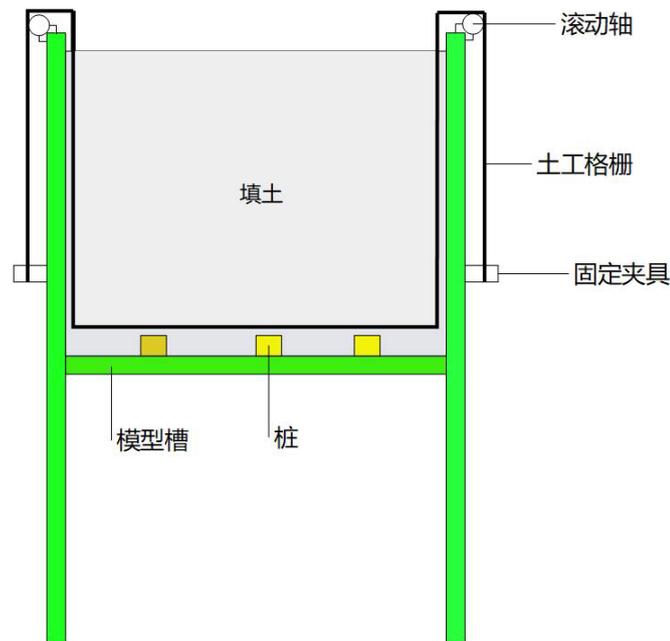


Figure 4. Schematic diagram of buried geogrid
图 4. 埋设土工格栅示意图

3. 试验结果分析与讨论

3.1. 复合地基桩顶土压力的影响因素分析

依据不同沉降量下土压力测试结果, 绘制桩顶平均土压力 \bar{p} 随底板沉降 δ 的变化规律, 如图 5 所示。由图可知, 随着底板沉降量的增加, 无论有无格栅, 桩顶土压力值均逐渐增大, 这表明复合地基上部填土内部逐渐形成土拱, 填土内部的自重应力发生重分布, 使得桩体承担的荷载逐渐增大。

对比有无格栅情况, 如图 5 所示, 可发现有格栅条件下的桩顶土压力 \bar{p}_m 高于无格栅情况 \bar{p}_z 。同时, 无论有无格栅存在, 桩顶土压力 - 位移 ($p-\delta$) 曲线由初期的快速增加逐渐演化为缓慢增加, 并最终将趋于稳定。相比较, 无格栅条件下桩顶土压力达到非线性稳定的速度更快, 如 $s = 5d$ 条件下, 底板沉降 $\delta = 1.0$ cm 时, 桩顶压力增量即逐渐减缓, 表明土拱效应逐渐趋于稳定。然而, 对于有格栅条件, 当 $\delta = 3.0$ cm 时桩顶压力增量才逐渐趋缓, 这表明当设置格栅时, 桩顶承载作用不仅通过土拱效应而发挥, 同时还受到土工格栅的应力调整作用, 使得桩体可以分担更多的上覆压力。

如图 6 所示, 通过对比不同桩间距对桩顶压力的影响规律, 可知无论对于普通复合地基还是桩网复合地基, 桩间距越大, 桩顶土压力越大。如对应差异沉降 $\delta = 4$ cm 时, 随着桩间距由 $2d$ 变为 $5d$, 桩顶土压力值的增长幅度 $(p_m - p_z)/p_z$ 由 10% 变为 33%, 其中, p_z 对应沉降量为 0 时的桩顶土压力, p_m 对应某一级沉降量的桩顶土压力。同时, 如表 2 所示, 桩顶土压力增幅 $(p_{Nd} - p_{(N-1)d})/p_{(N-1)d}$ 与桩间距增加近似呈线性增大趋势。

3.2. 最大差异沉降条件下桩 - 土荷载分担效应

为建立不同沉降量下桩 - 土荷载分担比, 有必要首先确定桩 - 土最大差异沉降条件下的桩土应力比 n 。根据测试结果, 绘制最大沉降条件下的桩 - 土应力比及荷载分担比与桩间距的关系曲线, 如图 7 所示。由图 7(a) 可知, 桩顶土压力 \bar{p} 与桩间距 s 近似呈线性增大关系, 有格栅条件下的桩顶压力与桩间距的关系更为敏感, 表明桩间距增大, 格栅的提兜效应发挥更为显著。

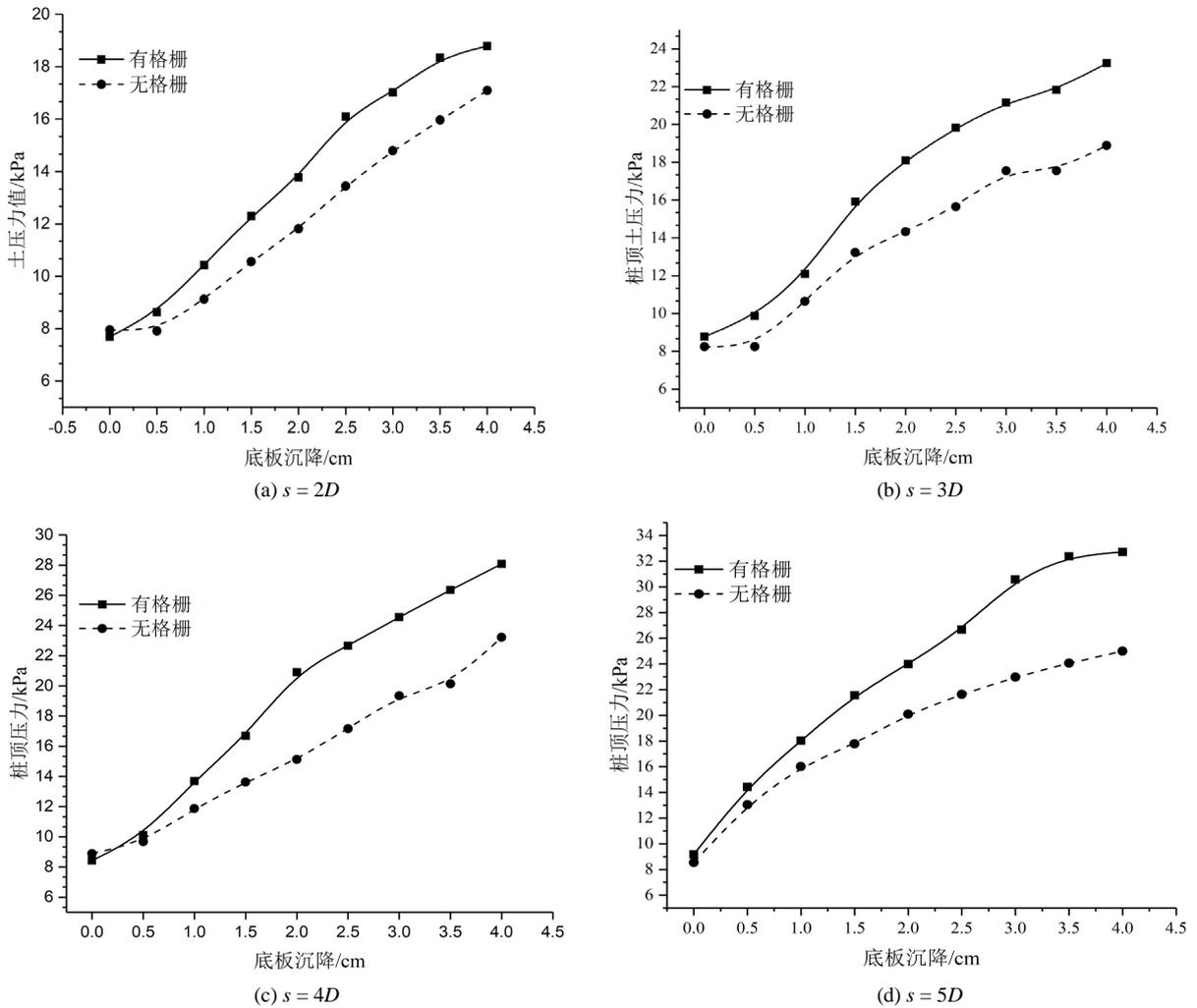


Figure 5. Comparison of soil pressure on pile top of composite foundation with and without grid
 图 5. 有无格栅条件下复合地基桩顶土压力比较

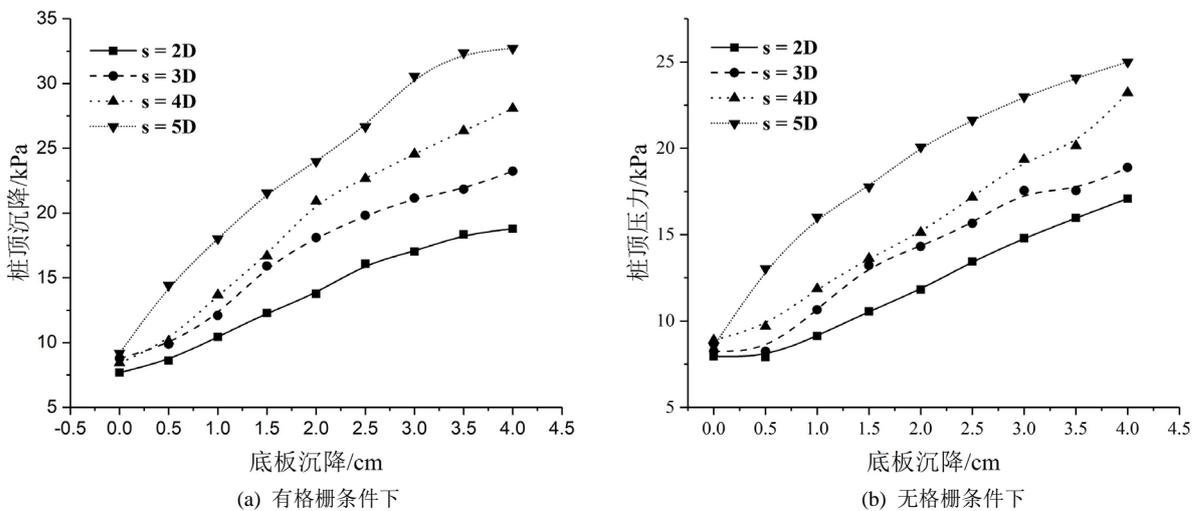


Figure 6. Comparison of soil pressure on pile top of composite foundation under different pile spacing conditions
 图 6. 不同桩间距条件下复合地基桩顶土压力比较

Table 2. The variation of soil pressure on pile top of two composite foundations under different pile spacing
表 2. 不同桩间距条件下两类复合地基桩顶土压力变化规律

复合地基类型	桩间距 $s = N \times d$	分级沉降量(cm)及对应增幅($(p_{Nd}-p_{(N-1)d})/p_{(N-1)d}$)							
		1	增幅(%)	2	增幅(%)	3	增幅(%)	4	增幅(%)
普通复合地基	2	9.13		11.82		14.79		17.09	
	3	10.64	16.54	14.32	21.15	17.55	18.66	18.89	10.53
	4	11.87	11.56	15.13	5.66	19.35	10.26	23.22	22.92
	5	16.01	34.88	20.08	32.72	22.98	18.76	24.99	7.62
桩网复合地基	2	10.43		13.77		17.03		18.78	
	3	9.87	-5.37	18.10	31.45	21.16	24.25	23.23	23.70
	4	13.69	38.7	20.91	15.52	24.56	16.07	28.07	20.84
	5	18.03	31.70	23.99	14.73	30.57	24.47	32.71	16.53

由图 7(b)可知, 桩 - 土荷载比(P_p/P_s)与桩间距 s 呈非线性减小趋势, 其中, P_p 为桩承担荷载, P_s 为桩周土承担荷载。这表明随着桩间距 s 的增大, 因为桩周土体承载面积增大, 其承担荷载比例随之增大。同时, 桩网复合地基桩 - 土荷载比降低幅度大于普通复合地基, 表明桩网复合地基的桩间距 s 的设置存在最大临界值 s_c , 当 $s > s_c$ 时, 桩网复合地基等同于普通复合地基。

进一步比较图 6(c)可知, 桩体荷载分担比(P_p/P_t)与桩间距呈近似线性的衰减规律, 其中, P_t 为总荷载, $P_t = \gamma H \cdot A$, A 为单桩承载面积。普通复合地基桩体承载比衰减幅度更为明显, 当 $s = 5D$ 时, 桩体荷载分担比衰减至 52%, 桩网复合地基衰减至 68%。由此可知, 桩网复合地基更能充分发挥桩体承载能力, 若按照桩体荷载分担比为 70% 进行控制, 则对应桩网复合地基的 $s = 4.5D$, 对应普通复合地基为 $3D$, 前者的经济性将明显高于后者。

由图 7(d)可知, $2D \sim 5D$ 桩间距范围内, 桩 - 土最大差异沉降条件下桩网复合地基桩 - 土应力比 n_{max} 介于 8.5~11.5, 而普通复合地基桩 - 土应力比 n_{max} 介于 4.2~6.2, 表明通过增加土工格栅垫层, 桩 - 土应力比 n_{max} 提高了约 1 倍。再比较桩土应力与桩间距的关系, 可发现桩 - 土应力比 n_{max} 与桩间距 s 呈抛物线衰减规律, 且 $2D \leq s \leq 3.5D$ 范围内, n_{max} 衰减最快, 表明小桩距条件下的桩顶荷载分担能力更强。由此可得两种不同复合地基下桩土应力比 n_{max} 与桩间距 s 的关系式如下:

桩网复合地基:

$$n_{max} = 0.416(s/D)^2 - 3.594s/D + 15.946。$$

普通复合地基:

$$n_{max} = 0.279(s/D)^2 - 2.544s/D + 10.06。$$

式中, n_{max} —桩 - 土最大差异沉降对应桩土应力比;

s/D —桩间距与桩径之比, 无量纲系数;

s —桩间距, m;

D —桩径, m。

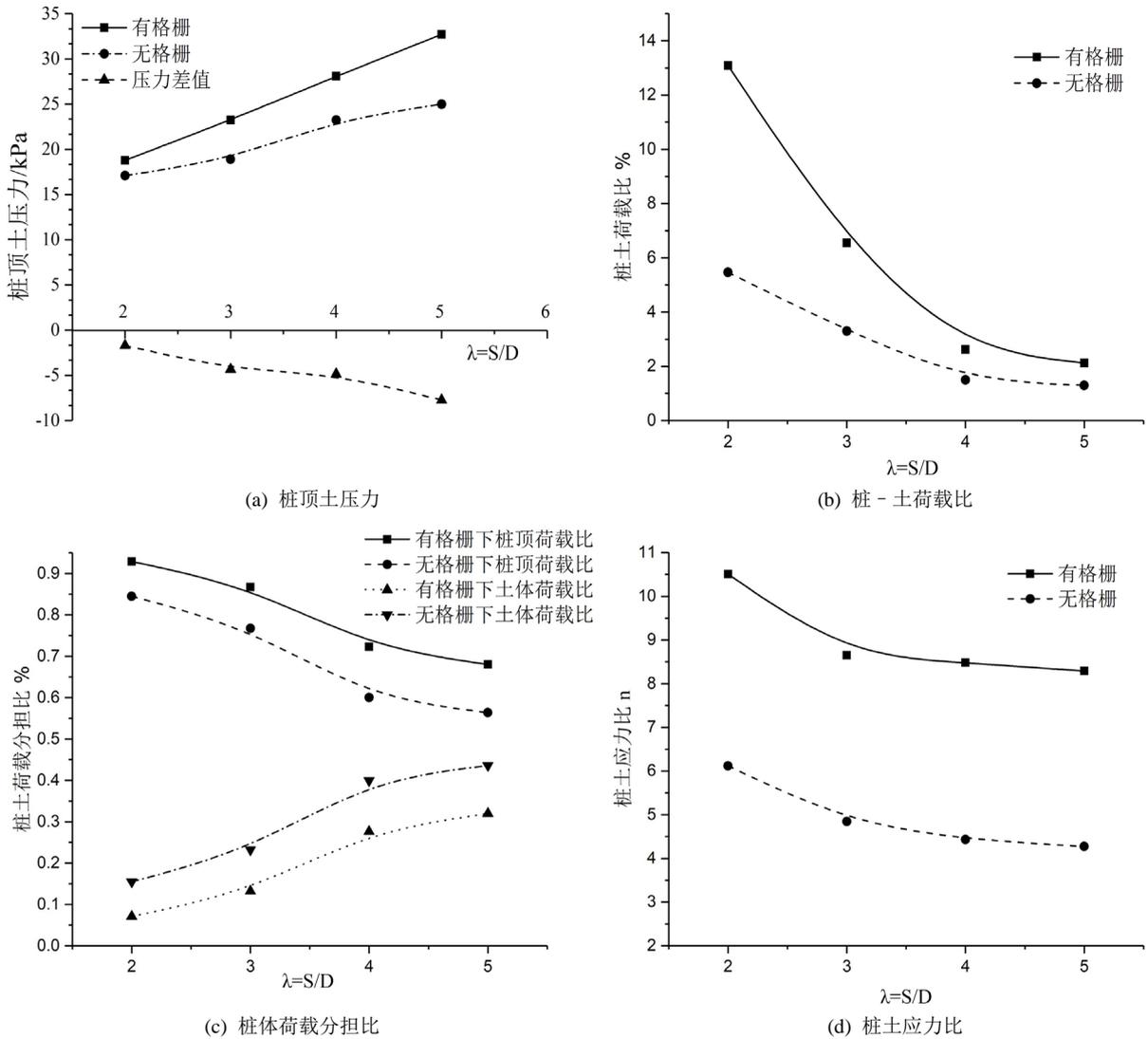


Figure 7. The relationship between pile-soil bearing characteristics and pile spacing of composite foundation under maximum displacement condition

图 7. 最大位移条件下复合地基桩 - 土承载特性与桩间距的关系曲线

3.3. 分级沉降条件下桩 - 土应力比

为确定分级沉降条件下桩 - 土承载特性，绘制桩土应力比 n 与桩 - 土间差异沉降比 δ/δ_{\max} 的关系曲线，如图 8 所示。由图可知，随着桩 - 土间差异沉降比 δ/δ_{\max} 的增大，桩土应力比均呈增大趋势发展。相比较其他桩间距， $s = 2D$ 时的桩土应力比与 δ/δ_{\max} 关系特征差异性较大，这是由于土拱效应的存在，使得小间距条件下桩顶荷载更为集中。然而，实际工程中通过经济技术比较，较少采用 $s = 2D$ 的设计间距，因此，本文在进行桩土应力比与 δ/δ_{\max} 的关系拟合时，提出 $3D \leq s \leq 5D$ 的情况，提出如下拟合公式：

有格栅条件下：

$$n/n_{\max} = 0.05 \delta/\delta_{\max} + 0.91。$$

无格栅条件下：

$$n/n_{\max} = 0.19 \delta/\delta_{\max} + 0.82。$$

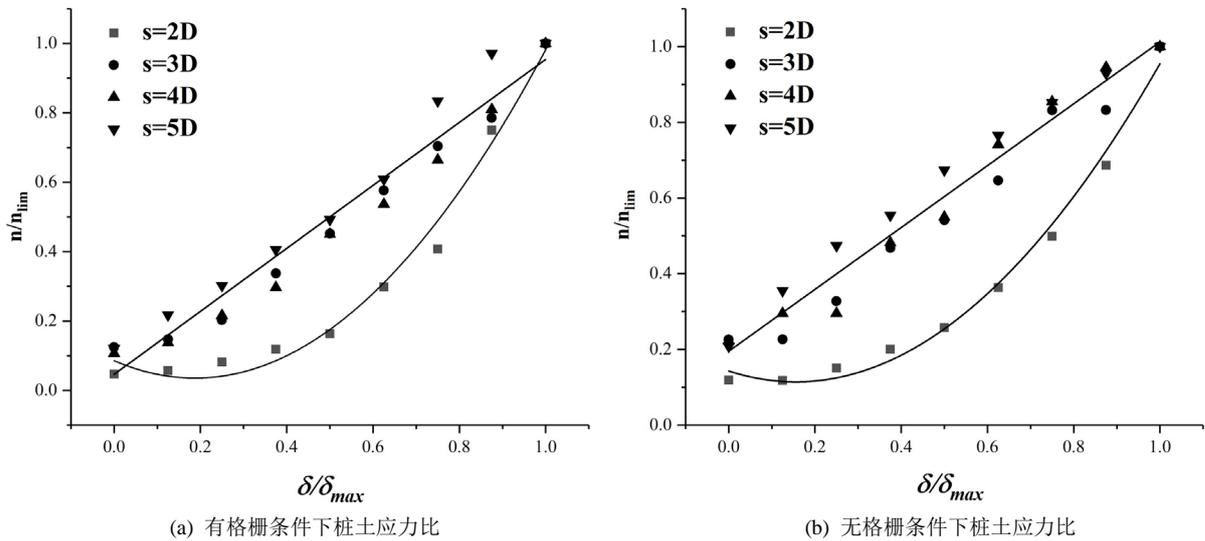


Figure 8. Variation of pile-soil stress ratio in different types of composite foundation under graded settlement mode
图 8. 分级沉降模式下不同类型复合地基桩土应力比变化规律

4. 结论

本文采用缩尺模型试验，研究了渐进沉降模式下桩网复合地基荷载分担效应，根据研究成果，可提出如下结论：

1) 同等土质参数与桩间距条件下，无论是普通复合地基还是桩网复合地基，随着桩 - 土沉降量的逐渐增大，桩顶压力均随之增大并逐渐趋缓，表明填土内部的土拱效应逐渐发挥至极限。

2) 同等土质参数与桩间距条件下，随着桩 - 土差异沉降量的增大，桩网复合地基桩顶压力明显高于普通复合地基，表明桩网复合地基的格栅层在逐渐发挥张拉膜效应，使得桩顶承担了土拱下方部分土体自重荷载。

3) 同等土质参数与桩 - 土差异沉降量条件下，桩网复合地基荷载分担比例及桩土应力比较普通复合地基更高，但随着桩间距的增大，桩土应力比以及桩土荷载分担比逐渐减小，并逐渐趋近于普通复合地基，表明桩网复合地基存在临界桩间距。

通过分析桩 - 土应力比与桩间距及桩 - 土差异沉降的关系，分别针对桩网复合地基与普通复合地基，建立了最大差异沉降条件下桩 - 土应力比的预测公式，并在此基础上，考虑桩 - 土差异沉降的渐进发挥因素，建立了分级沉降条件下的桩 - 土应力比预测公式。

参考文献

- [1] 刘代全. 刚柔过渡解决桥头跳车的理论和应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [2] 钱玉林. 路堤沉降计算方法的适应性研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 1999, 2(1): 72.
- [3] 聂如松, 冷伍明, 律文田. 软基台后路基填土对桥台桩基侧向影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1487-1490.
- [4] 张军辉. 软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006.
- [5] 李朝辉. 深厚软土层桩 - 网复合地基承载性状监测分析[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(6): 26-31.
- [6] 邵先胜. 高速公路复合地基处治可靠度与沉降控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [7] 陈晓光. 基于沉降量和沉降速率控制的黄泛区桥头跳车地基处治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学,

- 2017.
- [8] 武君磊. CFG 桩复合地基受力沉降变形及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2016.
 - [9] 陈国升, 杨美玲, 何江斌, 杨力. 长短桩复合地基承载性能分析[J]. 公路工程, 2018, 43(1): 114-117.
 - [10] 龚晓南. 广义复合地基理论及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 1-13.
 - [11] 毛前, 龚晓南. 桩体复合地基柔性垫层的效用研究[J]. 岩土力学, 1998(2): 67-73.
 - [12] 雷正敏. 复合地基桩网结构的加固机理及其设计方法探讨[J]. 铁道建筑技术, 2013(10): 56-59.
 - [13] Low, B.-K., Tang, S.-K. and Choa, V. (1994) Arching in Piled Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 1917-1938. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:11\(1917\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:11(1917))
 - [14] 赵明华, 胡增, 陈炳出. 路堤下桩承式加筋复合地基的桩土应力比[J]. 公路交通科技, 2012, 29(10): 33-37.
 - [15] 曹文贵, 余林芳, 张超, 李鹏. 考虑桩土差异沉降影响的桩网复合地基桩土应力比分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 41-49.
 - [16] Delmas, P. (1979) *Sols Renforces Par Geosynthetiques-Premieres Etudes*. University of Grenoble, Grenoble.