

# 柔性基础下刚性桩复合地基的力学性状研究

王跃伟<sup>1</sup>,刘红岩<sup>2</sup>

(1.杭州通达建筑集团有限公司,杭州 310019;2.杭州坤博岩土工程科技有限公司,杭州 310058)

**摘要:**通过有限元的方法对路堤荷载作用下刚性桩复合地基的力学性状进行了研究,主要考虑了路堤的高度、宽度以及压缩模量,以及桩体的压缩模量与复合地基置换率等因素的影响。利用 ABAQUS 通用有限元程序建立路堤荷载作用下刚性桩复合地基的力学模型,重点研究了以上几个主要因素对桩土荷载分担的影响和对桩身应力的影响,对比了柔性基础下和刚性基础下复合地基力学性状的差异。

**关键词:**柔性基础;复合地基;刚性桩;有限元;力学性状

**中图分类号:** TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8798(2009)04-0347-06

## Study on mechanics behavior of composite ground improved by rigid piles under flexible foundation

WANG Yue-wei<sup>1</sup>, LIU Hong-yan<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Tongda Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310019, China;

2. Hangzhou Kunbo Geotechnical Engineering Technology Co., Ltd., Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** By using the finite element method, the mechanics behavior of composite ground improved by rigid piles under flexible foundation is studied. And the main influence factors such as the height and the width of embankment, the compression modulus of embankment and piles, replacement ratio, the replacement ratio of piles are considered. By using the ABAQUS finite element program, the model of the composite ground improved by rigid piles under embankment is established and the main influence factors are analyzed, and the mechanics behavior of composite ground between the flexible foundation and the rigid foundation is compared.

**Key words:** flexible foundation; composite ground; rigid piles; finite element; mechanics behavior

近年来,刚性桩复合地基在建筑、交通、水利等部门中都得到了广泛的应用,取得了良好的社会和经济效益。

在建筑工程中,复合地基承担的上部荷载常常

通过钢筋混凝土刚性基础传递,通常称之为刚性基础下复合地基;而在路堤、堤坝和堆场等工程中,复合地基承担的荷载是由刚度相对小得多的路堤或堤坝传递的,相应地称之为柔性基础下复合地基<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2009-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708093);东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室资助项目(200608)

作者简介: 王跃伟(1958—),男,浙江杭州人,高级工程师,主要从事施工、监理及技术研发和工法编制等工作。

研究表明:柔性基础下复合地基的承载力和桩土应力比分别小于刚性基础下的对应值,而沉降量的变化规律则相反<sup>[2-7]</sup>。因此,刚性基础下复合地基理论不能直接应用于柔性基础下复合地基,应对基础刚度对复合地基性状的影响作进一步研究。

目前,国内外对于刚性基础下复合地基的工作性状已开展了大量的研究工作,但关于柔性基础下复合地基工作性状的研究工作相对较少。本研究使用 ABAQUS 通用有限元程序,通过平面应变有限元方法考虑了路堤的高度、宽度以及压缩模量,桩体的压缩模量,复合地基的置换率等因素对柔性基础下刚性桩复合地基的力学性状的影响。

## 1 群桩复合地基计算模型简介

本研究所采用的复合地基计算模型如图 1 所示,先将桩体按照体积等效的原则简化为沿路堤中心线方向的连续墙(编号详见图 1),再按照平面应变问题进行处理。由于路堤及其下面的复合地基相对于路堤中心线为对称分布,故取一半进行分析。计算采用四节点平面应变积分单元 CPE4。在水平和竖直向上均采用变化的节点密度,土体计算域面积为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 。计算模型的有限元网格划分如图 2 所示。

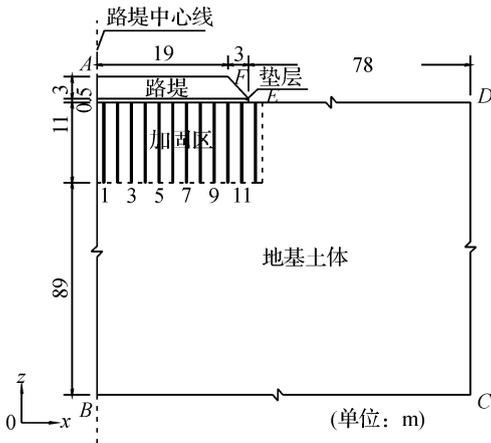


图 1 路堤下刚性桩复合地基计算简图

Fig.1 Sketch of rigid pile composite foundation under embankment

## 2 群桩复合地基力学性状有限元分析

### 2.1 基本算例计算结果分析

图 3 反映了路堤荷载下复合地基中各桩的桩土荷载分担比的变化曲线。曲线在经历了由 1 号桩向 5 号桩的平缓上升后,从 6 号桩开始桩顶荷载分担比

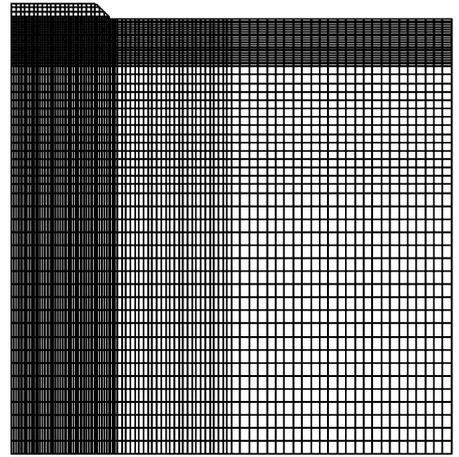


图 2 有限元网格划分

Fig.2 Division of finite element mesh

迅速减小,在 9 号、10 号桩处达到最小,在 11 号桩处又有所回升。但总体而言其变化幅度并不大,在 30%~37% 之间。这表明,在路堤中心线附近以及路堤的边桩对复合地基的承载力的贡献较大,而其他桩的贡献相对较小。

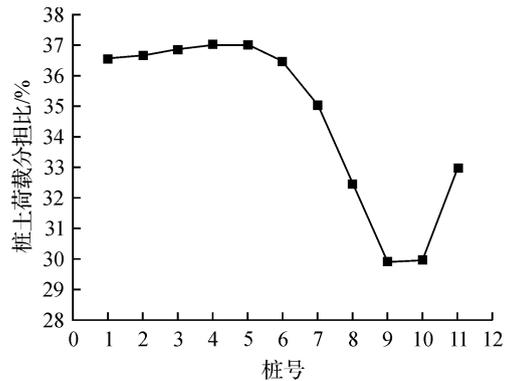


图 3 基本算例各桩体桩土荷载分担比

Fig.3 Pile-soil load share ratio

图 4 为复合地基中 1 号、6 号、11 号桩的桩身轴力分布曲线。由图可见,桩身轴力沿着桩长方向先

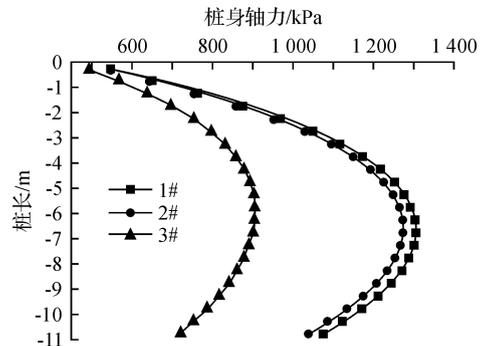


图 4 基本算例桩身轴力分布曲线

Fig.4 Distribution curve of axial stress of pile

增加后减小,在桩体的中下部达到最大值。1#桩的桩身轴力最大,6#桩略小于1#桩,11#桩与1#桩的差距较大。同时,6#桩与1#桩的桩身轴力最大值所出现的位置也比较接近,且比11#桩的桩身轴力最大值的位置深。

### 2.2 路堤高度对复合地基力学性状的影响

分别取路堤高度为1,2,3,4,5 m,但保持路堤的荷载不变,研究路堤高度对刚性桩复合地基的力学性状的影响。

由图5可见,随着路堤高度的增加,复合地基中的桩土荷载分担比的最大值由8#、9#桩向路堤中心线附近的桩体移动。即随着路堤高度的增加,荷载向路堤中心线附近的桩身上集中。同一路堤高度下桩顶荷载分担比的最大值与最小值之间的差距,亦随着路堤高度的增加而增加,表明荷载的不均匀程度随着高度的增加而增加。

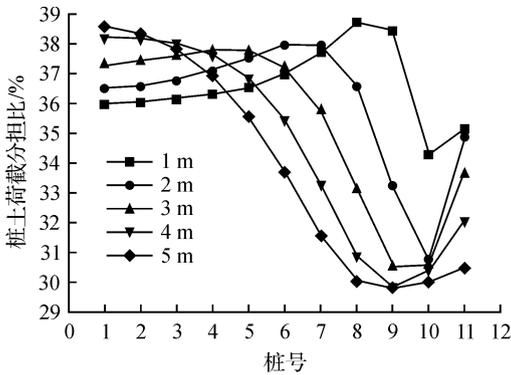


图5 路堤高度对桩土荷载分担比的影响

Fig.5 Influence of embankment height on pile-soil load share ratio

由图6可见,复合地基桩土应力比随着路堤高度增加而接近线性增加。原因在于随着路堤高度的增加,路堤刚度相应增加,使得荷载进一步向复合地基中的桩体上集中。本文的桩土应力比是指复合地

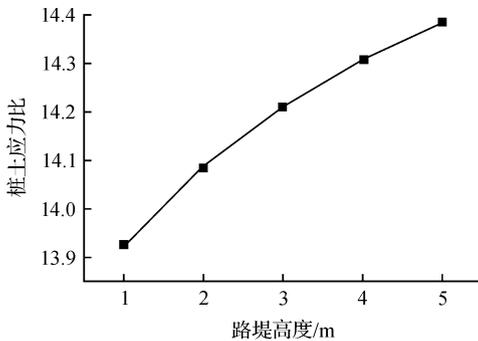
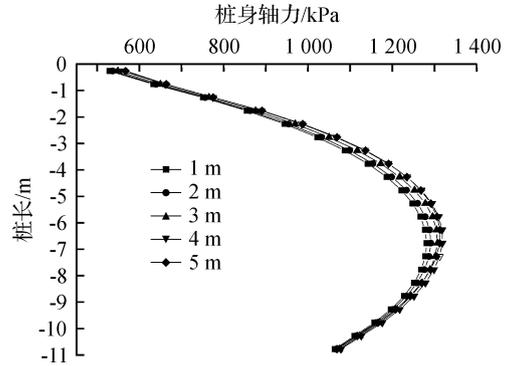


图6 路堤高度对桩土应力比的影响

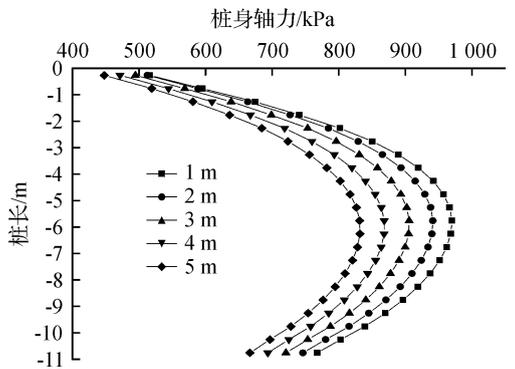
Fig.6 Influence of embankment height on pile-soil stress ratio

基中地表处的桩体平均应力与土体平均应力的比值。

由图7可见,随着路堤高度的增加,路堤中部1#桩的桩身轴力略有增加,而11#边桩的桩身轴力却显著减小。



(a) 1#桩



(b) 11#桩

图7 路堤高度对桩身轴力的影响

Fig.7 Influence of embankment height on axial stress of pile

### 2.3 路堤宽度对复合地基力学性状的影响

分别取路堤宽度(底面宽度)为20,24,28,32,36,40,44 m,对路堤宽度对刚性桩复合地基的力学性状的影响进行研究。

由图8可见,随着路堤宽度的增加,复合地基的

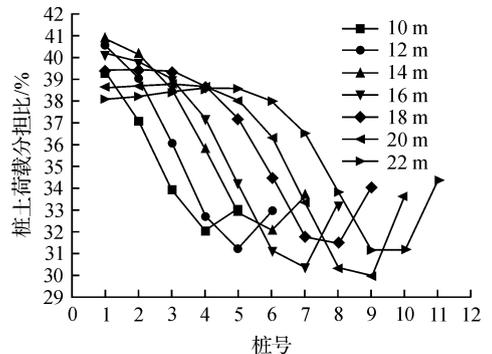


图8 路堤宽度对桩土荷载分担比的影响

Fig.8 Influence of embankment width on pile-soil load share ratio

最大桩土荷载分担比有所下降,同时靠近路堤中心处的桩土荷载分担比趋向平均。

由图 9 可见,复合地基桩土应力比随着路堤宽度的增加而降低,但降低幅度随着路堤宽度的增加

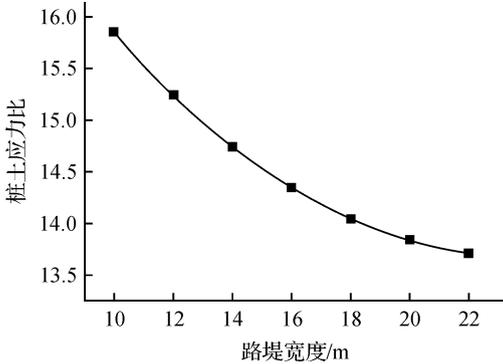


图 9 路堤宽度对桩土应力比的影响

Fig.9 Influence of embankment width on pile-soil stress ratio

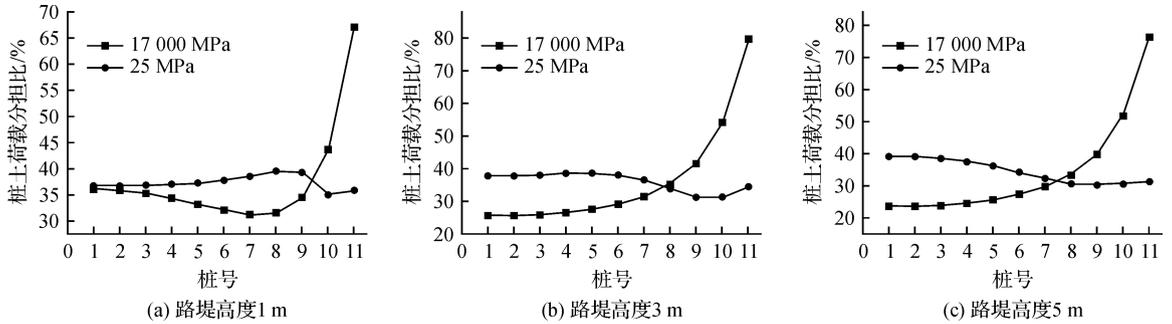


图 10 路堤压缩模量对桩土荷载分担比的影响

Fig.10 Influence of compression modulus of embankment on pile-soil load share ratio

由图 11 可见,各种路堤高度下混凝土基础下的桩土应力比均高于路堤基础。且在路堤基础下,桩土应力比随着路堤高度的增加而呈近似线性的上升;但在混凝土基础下,虽然桩土应力比同样随着路堤高度的增加而上升,但其上升幅度却随着基础厚度的增加而减小。

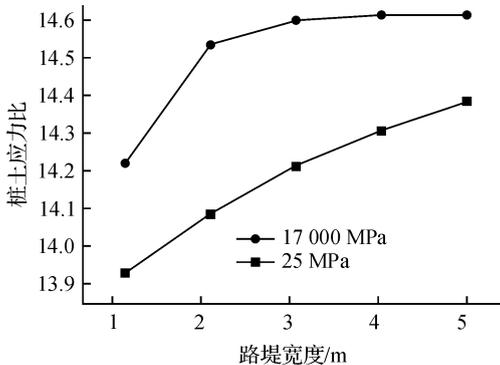


图 11 路堤压缩模量对桩土应力比的影响

Fig.11 Influence of compression modulus of embankment on pile-soil stress ratio

而减小。

图 8 和图 9 说明减小路堤宽度将增加路堤的刚度,刚度越大,复合地基中桩体承担的荷载也越大。

### 2.4 路堤压缩模量对复合地基力学性状的影响

分别取路堤压缩模量为 25,17 000 MPa,比较复合地基在路堤基础下与混凝土基础下的力学性状。

由图 10 可见,路堤基础下的桩土荷载分担比的分布相对较均匀,且路堤中心处桩的桩土荷载分担比高于处桩;而混凝土刚性基础下,桩土荷载分担比由基础中心处向边缘逐渐升高,且越靠近路边升高的幅度越大。同时,在基础中心处,路堤基础下的桩土荷载分担比高于混凝土基础下的桩土荷载分担比,而基础边缘的情况则相反。此外,路堤高度的增加使路堤基础下的桩土荷载分担比趋向平均,而对混凝土基础下的桩土荷载分担比则影响不大。

### 2.5 桩体压缩模量对复合地基力学性状的影响

分别取桩体压缩模量为 15,250,17 000 MPa,用以模拟碎石桩、水泥搅拌桩、低强度混凝土桩等情况,对桩体模量的变化对复合地基力学性状的影响进行研究。

由图 12 可见,随着桩体模量的增加,复合地基

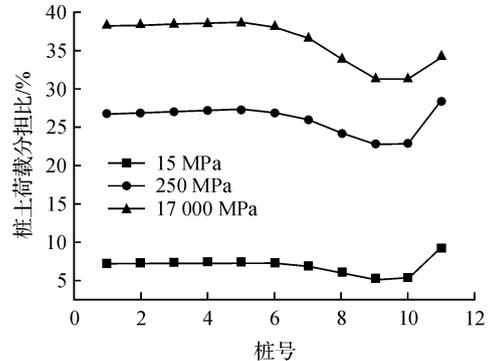


图 12 桩体压缩模量对桩土荷载分担比的影响

Fig.12 Influence of compression modulus of piles on pile-soil load share ratio

中各桩的桩顶荷载分担均有所提高。同时,桩体模量越低,复合地基中各桩的桩顶荷载分担比分布越均匀。

图13为  $\text{Log}(E_p/E_s)$  与桩土应力比的关系。由图可见,随着桩身压缩模量的提高,复合地基的桩土应力比亦随之提高,但增加幅度逐步减小。桩体刚度的增加有益于荷载通过桩体向地基中传递,使得荷载向桩体集中,因此增加桩体压缩模量有益于提高桩土应力比。

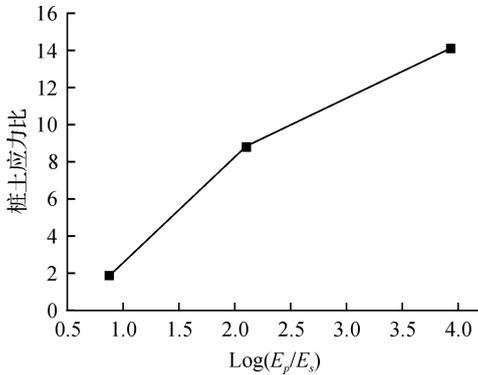


图13 桩体压缩模量对桩土应力比的影响

Fig.13 Influence of compression modulus of piles on pile-soil stress ratio

由图14可见,当桩体模量较小的时候,桩身轴力的分布相对均匀;但随着桩体模量的增加,桩身轴力沿桩长的分布开始出现较大的变化。同时桩身轴力随着桩体压缩模量的增加而增加。

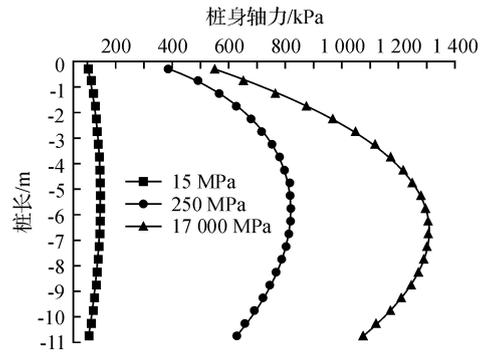
### 2.6 置换率对复合地基力学性状的影响

通过改变桩的半径来实现复合地基置换率的改变。分别取复合地基的置换率为4%,5%,6%,7%,8%。

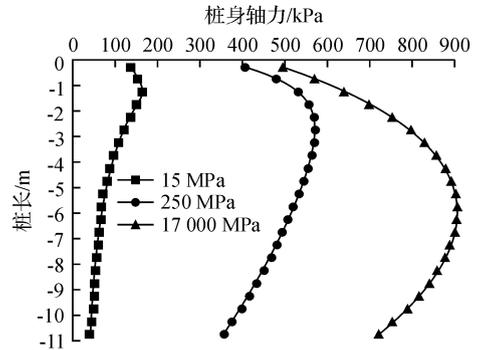
由图15可见,在不同的置换率下,桩顶荷载分担比曲线的变化趋势十分相似。同时桩土荷载分担比随着置换率的提高而提高,提高的幅度随着置换率的增加而减小。

由图16可见,桩土应力比随着复合地基置换率的提高而降低,但是,当置换率增加到6%之后,复合地基的桩土应力比的降低幅度略有减小,这一点与桩土荷载分担比随着置换率的变化趋势相对应。

由图17可见,桩身轴力随着复合地基置换率的提高而减小,桩身轴力最大值亦有所降低。



(a) 1#桩



(b) 11#桩

图14 桩体压缩模量对桩身轴力分布的影响

Fig.14 Influence of compression modulus of piles on axial stress of piles

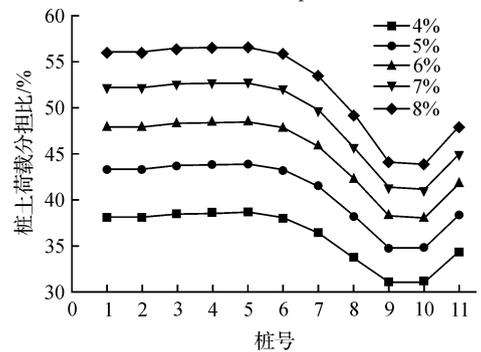


图15 置换率对桩土荷载分担比的影响

Fig.15 Influence of replacement rate on pile-soil load share ratio

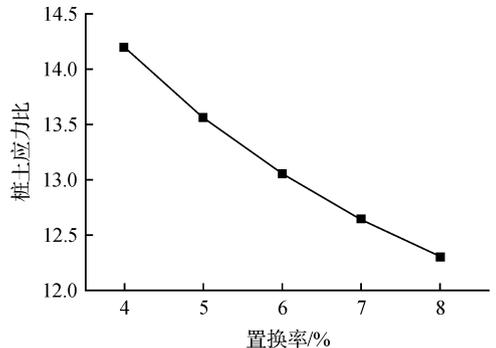


图16 置换率对桩土应力比的影响

Fig.16 Influence of replacement rate on pile-soil stress ratio

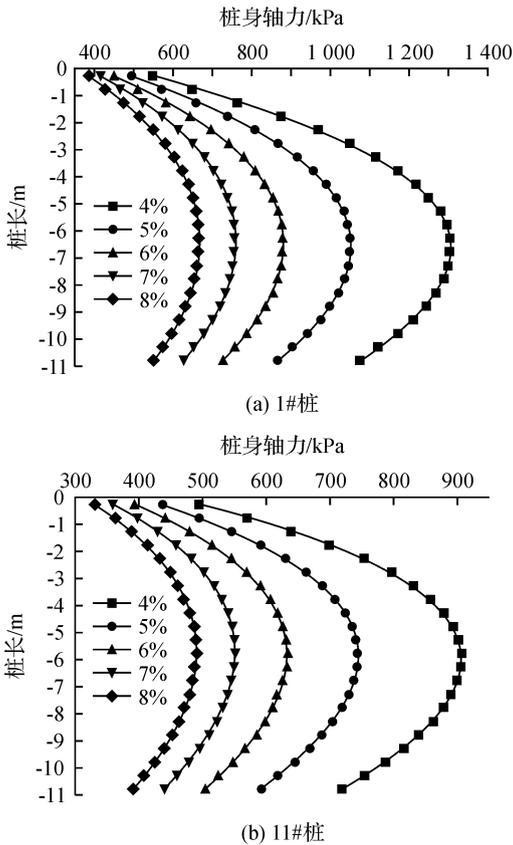


图 17 置换率对桩身轴力的影响

Fig.17 Influence of replacement rate on axial stress of piles

### 3 结 论

1) 路堤荷载下刚性桩复合地基中,各个不同位置的桩所承担的荷载有所区别,一般是路堤中心处和路堤边坡处的桩所承担的荷载相对较高。桩身轴力沿着桩长方向先增加后减小,桩身轴力最大值一般出现在桩体中下部。

2) 增加路堤高度将导致桩顶荷载分担趋向于不均匀,桩顶荷载分担的最大值和最小值之间的差距随着路堤高度的增加而增加。桩土应力比随着路堤高度的增加而呈线性增加,1#桩的桩身轴力略有

增加,而 11#桩的桩身轴力则随之减小。

3) 路堤宽度对刚性桩复合地基的工作性状有较大的影响。路堤宽度的增加将使桩土应力比降低,靠近路堤中心线的桩土荷载分担比趋向均匀。

4) 混凝土基础下,复合地基中桩土荷载分担比向基础边缘集中;填土路堤基础下,荷载分担比向路堤中心线集中。

5) 桩身压缩模量的增加将使复合地基所承担的荷载向桩体集中,使桩土应力比及桩土荷载分担比均增大。桩身轴力随着桩身压缩模量的增加而增加。

6) 随着复合地基置换率的提高,复合地基的桩土应力比减小,桩土荷载分担比却增大。桩身轴力也随着置换率的提高而降低。

### 参考文献:

- [1] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:150-161
- [2] ALAMGIR M, MJURA N, POOROOSHASB H B. Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions [J]. Computers and Geotechnics, 1996(4):267-290.
- [3] 李海芳,温晓贵,龚晓南.路堤荷载下刚性桩复合地基的现场试验研究[J].岩土工程学报,2004(3):419-421.
- [4] 俞建霖,龚晓南,曾开华.杭宁高速公路低强度混凝土桩复合地基试验研究[Z].浙江大学岩土工程研究所,2002.
- [5] 曾开华,俞建霖,龚晓南.高速公路通道软基低强度混凝土桩处理试验研究[J].岩土工程学报,2003(6):715-719.
- [6] 刘吉福.路堤下复合地基桩、土应力比分析[J].岩石力学与工程学报,2003(4):674-677.
- [7] 吴慧明,龚晓南.刚性基础与柔性基础下复合地基模型试验对比研究[J].土木工程学报,2001(5):81-83.