

# 高速公路路堤下复合地基研究的探讨

杨 华, 黄明华

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 现行的刚性基础下复合地基理论并不适用于高速公路路堤工程, 对路堤下复合地基的研究已成为当今工程界的热点。根据国内外文献资料, 对路堤下复合地基的研究现状进行了分析, 总结了国内外三大类研究方法即试验研究、理论计算和数值模拟的研究成果, 分析了研究中存在的问题, 对今后的研究工作提出了若干建议。

**关键词:** 高速公路; 路堤; 柔性基础; 复合地基  
**中图分类号:** TU47      **文献标识码:** A

复合地基是指在地基处理过程中, 部分土体得到增强或置换, 或在地基中设置加筋材料, 加固区是由基体和增强体两部分组成的人工地基; 在荷载作用下, 基体与增强体共同承担荷载的作用<sup>[1]</sup>。近年来利用复合地基技术处理高速公路软土地基日益增多, 与其他方法相比, 具有施工工期短, 提高地基承载力快, 减小工后沉降效果显著等优点。

在建筑工程中, 复合地基承担的上部荷载通常是通过钢筋混凝土承台或筏板(刚性基础)传递的; 而在路堤工程中, 复合地基承担的荷载是由刚度小得多的路堤(柔性基础)直接传递的, 理论研究和试验结果均表明刚性基础与路堤下复合地基的性状有较大差异<sup>[2-4]</sup>。现行复合地基理论是建立在刚性基础下的, 并不适合于高速公路中路堤工程。在研究前人工作的基础上, 对路堤下复合地基的研究现状作了总结和分析, 指出了其中存在的问题, 并对今后研究工作提出了若干建议, 以为将来的研究提供一定的参考。

## 1 研究现状分析

目前, 对于路堤这种柔性基础下的复合地基理论研究还处在初步阶段, 这方面的研究成果国内外

极少。现有的研究成果主要集中在试验研究、理论计算和数值模拟三方面。

### 1.1 试验研究

#### 1) 模型试验

S. H. Chew<sup>[3]</sup>通过室内模型试验对路堤下刚性桩复合地基的工作机理开展研究, 得到了加载过程中桩土应力比、地表沉降的变化规律。方磊<sup>[5]</sup>通过室内模型试验, 研究了柔性基础下桩土应力比与桩底持力层强度和上部荷载的关系。Allersma<sup>[6]</sup>通过离心机模型试验对比分析了路堤下天然地基、水泥搅拌桩、刚性桩复合地基和半刚性桩复合地基的破坏模式、工作性状及其主要影响因素。

#### 2) 现场试验

Eksortm<sup>[7]</sup>通过现场测试证明了柔性基础(路堤)下桩顶位移与桩间土体位移并不相等。孙军<sup>[8]</sup>、李海芳<sup>[9]</sup>对路堤荷载下复合地基的变形特性进行了长期现场观测研究, 发现桩与桩间土体的沉降不一致, 桩与桩周土存在等沉面。曾开华<sup>[10]</sup>、吴少汉<sup>[11]</sup>通过现场试验, 对公路路堤下复合地基的力学特性进行了分析, 结果表明低强度混凝土刚性桩复合地基桩土应力比的变化趋势为先减小后增大, 而水泥土柔性桩的桩土应力比变化趋势是逐渐增大的。马时冬<sup>[12]</sup>在泉厦高速公路试验段研究了水泥搅

拌桩复合地基的桩土应力比  $n$  的变化规律:  $n$  随荷载的增大而增大,桥台和通道等刚性基础下的  $n$  值比路堤下的大,荷载一定时  $n$  随时间基本不变。冯瑞玲<sup>[13]</sup>通过现场实测得出了路堤下粉喷桩复合地基中桩土应力比  $n$  值,结果表明在加荷初期,桩体所分担荷载的增长速率较大,但  $n$  值很快随着桩土变形的协调趋于稳定。李国维等<sup>[14]</sup>同样对公路下粉喷桩复合地基的桩土应力比进行了现场测试,发现柔性基础下复合地基的桩土应力比要比刚性基础下小得多,并随荷载增加先较小后增大呈波浪形变化。

### 1.2 理论计算研究

Alamgir<sup>[15]</sup>通过假定典型单元体的位移模式,提出了“单元元”的概念,获得了柔性基础下端承桩复合地基中桩和桩周土的附加应力和沉降计算的解析方法。杨涛等<sup>[16][17]</sup>修正了 Alamgir 的典型单元体变形模式,提出了柔性基础下竖向增强体复合地基沉降计算的复合本构有限元分析方法,该方法未能反映桩土之间竖向不协调性。李海芳<sup>[18]</sup>在杨涛的基础上考虑了桩土相互作用,提出了改进的位移分布模式,通过力学推导,得到了路堤荷载下复合地基加固区压缩量的简化算法。刘杰<sup>[19]</sup>在 Alamgir 和杨涛的基础上考虑了径向位移,推导出了路堤荷载作用下复合地基加固区桩及桩周土压缩量计算的解析式。王欣<sup>[20]</sup>、张忠苗<sup>[21]</sup>等采用弹性力学中的 Mindlin 和 Boussinesq 联合求解,得出了粉喷桩复合地基内附加应力和地基沉降的解析式。实践表明,利用这些计算方法得到的结果与实测值有较好的吻合,因此这种求解柔性基础下沉降与应力的分析方法是值得的。

### 1.3 数值模拟研究

J. Han<sup>[22]</sup>采用典型单元体和 Duncan - chang 模型,对桩承式加筋路堤的性状进行了数值分析研究,分析了路堤填土高度、加筋体刚度以及桩体模量对桩土应力比的影响。杨虹<sup>[23]</sup>等利用弹性、Duncan - Chang 非弹性两种本构模型,将平面问题有限元用于填土路堤下复合地基性状的研究,对复合地基沉降及桩土应力比的变化规律进行了研究。曾远<sup>[24]</sup>、刘国明<sup>[25]</sup>等利用 Biot 固结理论,采用非线性有限元法分析了高速公路下复合地基变形的影响因素,并提出了合理布桩方式。朱云升<sup>[26]</sup>等利用有限元对柔性基础下复合地基的力学性状作了初步的数值模拟分析,得到了复合地基桩土应力比、变形特性等一些基本规律。刘义怀<sup>[27]</sup>等对路堤荷载下碎石桩复合地基的桩土沉降等受力特性进行了平面线弹性有限元

分析。窦远明等<sup>[28]</sup>在分析现场观测结果和有限元计算结果的基础上,得出了桩土应力比及沉降随时间、荷载性质、置换率等因素变化的规律。冯瑞玲<sup>[29]</sup>、吴国华<sup>[30]</sup>等利用大型有限元软件对路堤荷载下复合地基的力学性状、沉降特性及其影响因素进行了研究,可以看出,这些研究大都是对路堤下复合地基力学与变形特性做定性的分析。

## 2 存在的问题

### 1) 试验方面

现有的试验研究比较少,且大都在刚性承载板下进行的,仍然沿用刚性基础下复合地基试验方法,不能真正反映路堤下复合地基的工作性状;模型试验是在理想的条件下进行的,存在着尺寸效应,很难模拟实际情况,具有一定的局限性;现场试验,因影响因素过多,必须经过大量的试验积累,才能找出规律。

### 2) 理论计算方面

研究时基本将复合地基与路堤基础相脱离,未考虑路堤填土——刚性垫层——复合地基——下卧层土体四者之间的应力及变形耦合;研究中采用的桩间土竖向位移模式,大多数做法是假定在桩长范围内有一刚性位移,对解析计算的模型进行了简化,这种简化处理方法不能反映出桩土之间的力学机制。

### 3) 数值模拟方面

(1) 材料本构问题 由于土的突出非线性,到目前为止,还没有找到可以体现土的各种特性的本构模型。采用不同的本构关系,计算结果不同。刚性桩、柔性桩、半柔半刚性桩的本构有较大的差别,但研究中大多数都视为线弹性体。

(2) 计算模型 建模时大都将桩假设成连续墙或板,将复合地基简化成平面问题进行研究,而实际由于桩的存在,路基的力学性质在长度方向上不再有均匀性,这将影响数值模拟结果的真实性。

(3) 计算参数的选用 现场土体的性质很不均匀,且各向异性,选取计算参数比较困难,实际计算时,往往对某一段范围内土体进行简化,一般按经验公式取值,带有随意性,计算参数取值不同,计算结果也不同,这将影响数值模拟的可信度。

(4) 桩土接触面的处理 研究中大都没有考虑桩土之间的相对滑动,仍采用刚性基础下复合地基中桩和桩间土竖向变形相等的假设,不能反映路堤

荷载下桩与桩间土的竖向不协调性及桩土之间的荷载传递规律。

### 3 今后研究工作的建议

综上所述,目前对路堤下各类复合地基的研究,大都是针对其力学性状、变形特性和荷载传递规律作定性的分析,且研究方法存在不少问题,建议今后从以下几方面进行研究。

#### 1) 数值分析与试验相结合

单纯应用数值分析和试验研究都是行不通的,必须以数值分析与试验研究相结合,进行优势互补,依靠室内和现场试验研究的验证与反馈,走理论分析和经验分析与实际相结合的道路。例如在室内试验时,在模型试验的基础上建立数值分析模型,采用数值方法模拟模型的应力和变形,将结果与试验结果进行比较,以验证数值分析方法的合理性,再采用数值分析方法计算原型的力学和变形特性。

#### 2) 理论计算方法的改进

柔性基础下复合地基的荷载传递机理应当包括:基础填土的拱效应、基础的刚度效应、刚性垫层效应、桩土间差异沉降引起的荷载传递以及下卧层土体的支承作用5个部分。在分析中应当从整个系统上下部共同作用的角度出发,系统研究荷载传递5个组成部分各自的机理,才能准确地把握整个系统的荷载传递规律及变形特性;桩间土的竖向位移模式是柔性基础下复合地基的关键问题之一,直接关系到桩侧摩阻力的分布、桩土应力比的确定以及复合地基变形特性分析,理论计算时应采用能描述桩、土两者之间相对位移量的竖向位移模式。

#### 3) 提高数值模拟的可信度

(1) 应建立三维计算模型进行路堤和复合地基的三维数值模拟,使模拟结果更加真实。

(2) 为了更好地反映桩与土间的相互作用,真实模拟路堤荷载下桩与桩间土的竖向不协调性及桩土之间的荷载传递规律,应特别重视对桩土接触面的模拟,需要在桩土之间设置接触面单元。目前常用的接触面单元主要分为三类:以 Goodman 为代表的无厚单元;以 Desai 为代表的薄单元;以 Katona 为代表的接触摩擦元。接触面单元较多,有的单元并不能完全反映桩土间的相互作用力学机理,因此需要针对所要研究的复合地基类型选用恰当的单元形式,来描述桩土间的接触特性,可通过专门的试验,确定接触面单元的本构关系。

(3) 选择合理的材料本构。土的本构比较复杂,不同土的本构,往往针对某个问题才具有合理性,因此要根据所研究的问题灵活选用,必要时对土的本构关系进行修正。桩的本构关系应通过试验确定,不能盲目的照搬经验。

#### 参考文献:

- [1] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [2] 陈洪等. 不同刚度基础下复合地基沉降变形性状研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(11): 13-16.
- [3] S. H. Chew, H. L. Phoon, K. H. Loke. Geotextile reinforced piled embankment for highway bridges [J]. ACSE Transportation Engineering, 2004: 438-443.
- [4] 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.
- [5] 方磊等. 柔性基础下复合地基模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, (5): 67-71.
- [6] H. G. B. Allersma, M. Bartsch. Centrifuge tests on methods stabilizing embankments [J]. ASCE Geo Jodran, 2004: 311-322.
- [7] J. C. Ekstrom, J. A. Bemtsson, G. B. Salfors. Test fills of clays stabilized with cement columns [A]. New Delhi: Proc XIII ICSMFE [C], 1994(3): 1183-1186.
- [8] 孙军等. 深层搅拌桩复合地基的现场试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(6): 52-55.
- [9] 李国维等. 柔性基础下复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, (2): 265-269.
- [10] 曾开华等. 路堤荷载下低强度混凝土桩复合地基性状分析[J]. 浙江大学学报学报, 2004, 38(2): 185-190.
- [11] 吴少汉等. 路堤下的水泥土搅拌桩复合地基性状的探讨[J]. 湖南交通科技, 2007, 33(3): 29-31.
- [12] 马时冬. 水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 48-51.
- [13] 冯瑞玲等. 柔性基础下复合地基的数值分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 40-42.
- [14] 李国维等. 柔性基础下复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 265-269.
- [15] M. Almagir, N. Miura, H. B. Poorooshasb *et al.* Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusion [J]. Computers and Geotechnics, 1996, 18(4): 267-289.
- [16] 杨涛. 柔性基础下复合地基下卧层沉降特性数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 53-56.
- [17] 杨涛. 路堤荷载下柔性悬桩复合地基的沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 741-743.
- [18] 李海芳等. 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, 26(3): 419-421.
- [19] 刘杰等. 复合地基荷载传递规律及变形计算[J]. 中

- 国公路学报 2004 ,17(1):20-23.
- [20] 王 欣 等. 路堤柔性荷载下的粉喷桩复合地基内的附加应力分析[J]. 中国市政工程 2003 (3):1-2.
- [21] 张忠苗 等. 柔性承台下复合地基应力和沉降计算研究[J]. 岩土力学 2004 25(3):451-454.
- [22] J. Han ,M. A. Gabr. Numerical analysis of geosynthetic - reinforced and pile - support earth platforms over soft soil [J]. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2002 (1):44-53.
- [23] 杨 虹 等. 填土路堤下复合地基性状研究[J]. 佛山科学技术学院学报 2003 21(2):36-39.
- [24] 曾 远 等. 高速公路复合地基非线性有限元分析[J]. 福州大学学报 2003 31(2):206-210.
- [25] 刘国明 等. 路堤软土地基沉降有限元非线性分析[J]. 福州大学学报 2003 31(4):470-473.
- [26] 朱云升 等. 柔性基础复合地基力学性状的有限元分析[J]. 岩土力学 2003 24(3):395-400.
- [27] 刘义怀 等. 路堤荷载下碎石桩复合地基的有限元分析[J]. 公路交通科技 2002 ,19(5):11-13.
- [28] 窦远明 等. 柔性荷载作用下水泥土桩复合地基的承载力与沉降特性的研究[J]. 河北工业大学学报 2001 30(1):80-83.
- [29] 冯瑞玲 等. 路堤荷载作用下复合地基的计算机辅助试验仿真分析[J]. 土木工程学报 2004 37(1):92-95.
- [30] 吴国华. 路堤荷载下 CFG 桩复合地基力学性状研究[D]. 大连:大连理工大学 2006.

## Discussion on the Composite Foundation under the Embankment of Highway

YANG Hua HUANG Ming - hua

( School of Civil Engineering and Architecture ,East China Jiaotong University ,Nanchang 330013 ,China)

**Abstract:** The theory of composite foundation used today does not fit embankment of highway. Its research is becoming a hot topic. According to geotechnical literatures ,the current research situation are explained. A summary is made on study results by three methods used at home and aboard: the experiment method ,the theoretical analysis method and numerical simulation method. The existing defects are explained and some recommendations about research work in the future are made.

**Key words:** highway; embankment; flexible base; composite foundation

(责任编辑:刘棉玲)

