

文章编号:1673-2049(2017)05-0031-10

## 桩承式路堤中的静动力土拱效应

陈仁朋<sup>1,2</sup>, 刘骐炜<sup>1,2</sup>, 姜正晖<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

**摘要:**为了从更深层次理解土拱效应的工作性状,在总结桩承式路堤土拱效应中等沉面、桩体荷载分担比等问题的基础上,比较了几种桩体荷载分担比的计算方法,阐述了动荷载在桩承式路堤中的传递机理,分析了土拱效应发挥程度对动应力的影响,最后给出桩承式路堤中动应力的计算方法。研究表明:等沉面与土拱高度可用临界填土高度进行归一化描述,临界填土高度与桩间净距呈线性关系;桩体荷载分担比的大小与工况有关,几种计算方法有各自的适用条件;陈云敏的计算方法与实测值拟合度较高;动荷载的传递也受土拱效应的影响,随着动荷载循环次数的增加,土拱效应存在先强化后弱化的现象。

**关键词:**桩承式路堤;土拱效应;荷载分担比;沉降控制;等沉面

**中图分类号:**TU311 **文献标志码:**A

## Static and Dynamic Soil Arching Effect of Pile-supported Embankments

CHEN Ren-peng<sup>1,2</sup>, LIU Qi-wei<sup>1,2</sup>, JIANG Zheng-hui<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning Design & Research, Hangzhou 310006, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of soil arching effect deeply, on the basis of summarizing equal settlement plane and pile efficacy in the soil arching effects of pile-supported embankments, the several calculation methods on pile efficacy were compared. The transfer mechanism of dynamic load in pile-supported embankment was elaborated, and the influence of degree of soil arching effect on dynamics stress was analyzed. Finally, the method for calculating the dynamic stress in pile-supported embankments was given. The results show that the equal settlement plane and soil arch height can be normalized description with critical filling height, and the critical filling height is linear with the spacing between piles. The values of pile efficacy are related to the working conditions, and the calculation methods have their applicable conditions. The calculation method of Chen is fitting with measured value. The dynamic loads are also affected by the soil arching effects, and the soil arching effect appears strengthened firstly and then weakened with the increase of cycle number of dynamic loads.

**Key words:** pile-supported embankment; soil arching effect; pile efficacy; settlement control; equal settlement plane

收稿日期:2017-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41472244);国家重点研发计划资助(2016YFC0800207)

作者简介:陈仁朋(1972-),男,浙江衢州人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: chenrp@hnu.edu.cn。

## 0 引言

中国沿海、沿湖、沿江地区广泛分布深厚软土。软土地基高速公路、高速铁路的沉降控制标准非常严格,规范<sup>[1-2]</sup>中要求:高速公路和一级公路的一般地段工后沉降应小于等于 30 cm;设计时速为 250 km·h<sup>-1</sup> 和 300~350 km·h<sup>-1</sup> 的有砟轨道路基一般地段工后沉降应分别小于等于 10 cm 和 5 cm;无砟轨道路基一般地段工后沉降则要求小于等于 1.5 cm。桩承式路堤既能有效地控制地基工后沉降和均匀沉降,约束土体侧向变形,满足稳定性与沉降的要求,又可加快填筑施工,缩短工期,具有良好的经济效益和环境效益。目前该技术已广泛应用于高速公路、高速铁路等工程。桩承式路堤受力较为复杂,桩间土与桩帽上方路堤填料的差异沉降会使桩顶水平面上一定范围内的路堤填土产生应力重分布,将一部分桩间土上部路堤所受重力传递到桩帽上,这一现象即为桩承式路堤的土拱效应,而土拱效应是桩承式路堤的核心工作原理之一。

1884 年 Roberts 首次发现“粮仓效应”<sup>[3]</sup>;1943 年 Terzaghi<sup>[4]</sup> 通过活动门试验证实了土拱效应的存在;Carlsson<sup>[5]</sup> 提出了二维三角形的刚塑性土拱形态模型;Hewlett 等<sup>[6]</sup> 和 Low 等<sup>[7]</sup> 则分别提出了半球形土拱形态模型及半圆形土拱形态模型。土拱理论促进了相关规范的制定。英国规范 BS 8006-1<sup>[8]</sup> 采用了 Marston 等<sup>[9]</sup> 的管道土压力理论来计算桩帽、桩间土压力;德国 EBGE0 2004<sup>[10]</sup> 基于 Zaeske 等<sup>[11]</sup> 提出的多拱模型对桩土应力进行计算;北欧设计指南<sup>[12]</sup> 以及日本设计手册<sup>[13]</sup> 则均采用 Carlsson<sup>[5]</sup> 的楔形体土拱模型。近 20 年中,中国学者通过缩尺模型试验<sup>[14-16]</sup>、足尺模型试验<sup>[17-18]</sup>、有限元模拟<sup>[19-21]</sup>、离散元模拟<sup>[22-23]</sup>、现场试验<sup>[24-27]</sup> 等方法进行相关研究。连峰等<sup>[28]</sup> 通过在广东某环城高速上设置桩-网复合地基试验段,发现桩-网复合地基能有效减少沉降。曹卫平等<sup>[29]</sup> 通过室内三维土拱模型试验发现土拱效应完全发挥时所需桩土相对位移很小,加筋体能够有效地提高桩土应力比。杨涛等<sup>[30]</sup> 在平面应变的条件下建立了弹塑性有限元模型,结果表明,桩承式路堤中的土拱效应随着土拱的形成而逐渐发挥,土拱形态为长半轴约等于土拱高度的半个椭圆。

上述国内外学者虽然对土拱效应进行了大量的研究,但对于土拱效应中等沉面、荷载分担比等的确定仍未能统一。本文对桩承式路堤静力土拱效应中

等沉面和桩体荷载分担比等进行总结,并比较了几种荷载分担比的计算方法;在此基础上,分析了土拱效应对动荷载传递的影响,提出动应力传递的计算方法。

## 1 静力土拱效应

### 1.1 等沉面及土拱高度

Spangler 等<sup>[31]</sup> 提到:Marston 最早发现在土拱效应作用下,随着填土高度的不断增加,填土中的差异沉降逐渐减小,当填土高度增加到某一值时,差异沉降消失,这一平面被其称之为等沉面。等沉面高度的确定通常有 2 种方式:①在填土中分层埋置位移计,测得桩和桩间土上方每层填土的沉降,计算沉降差,当沉降差基本为 0 时,对应水平面高度即为等沉面高度;②在填土中分层埋置应力计,当达到某一深度时,桩间土中心位置处竖向应力试验值开始偏离自重应力分布,该深度与桩间软土深度的差值即为等沉面高度。后续研究发现,在桩承式路堤的实际应用中,若填土高度低于等沉面高度,则土拱效应难以发挥,桩与桩间土的差异沉降会在路面上产生蘑菇状高低起伏的现象。因此,等沉面高度是桩承式路堤设计的重要指标,设计填土高度应大于等沉面高度以防止路堤表面出现过大差异沉降。

Chen 等<sup>[32]</sup> 通过缩尺模型试验对等沉面高度进行了研究,提出等沉面高度为 1.4 倍~1.6 倍桩间净距,其结果如图 1 所示。

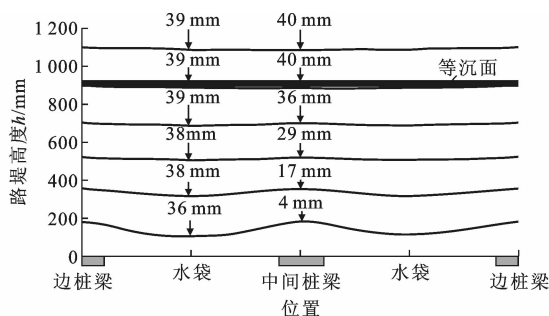


图 1 路堤分层沉降

Fig. 1 Layered Settlements of Embankment

与等沉面相对应,能产生完整土拱效应的路堤填土高度称为土拱高度。Terzaghi<sup>[4]</sup> 认为若存在等沉面,则等沉面高度  $H_e$  即为土拱顶高度;为将等沉面与土拱高度进行归一化处理,英国规范 BS 8006-1:2010 提出临界填土高度  $H_{cr}$ ,即桩间软土上表面到等沉面的高度。当填土高度小于  $H_{cr}$  时,路堤表面出现差异沉降,路堤内形成不完整土拱,土拱效应无法完全发挥;当填土高度大于  $H_{cr}$  时,路堤表面不

出现差异沉降,路堤内形成完整土拱,土拱效应完全发挥。各国规范均沿用  $H_{cr}$  的概念,其计算式如表 1 所示。

表 1  $H_{cr}$  计算方法

Tab. 1 Calculation Methods of  $H_{cr}$

规范名称	理论依据	$H_{cr}$ 计算式
英国规范 <sup>[8]</sup>	H&R 半球拱模型	$0.7(s-a)$
北欧规范 <sup>[12]</sup>	Carlsson 楔形体模型	$1.2(s-a)$
日本细则 <sup>[13]</sup>	应力扩散角和 Carlsson 楔形体模型	$1.46(s-a)$
中国规范 <sup>[1,33]</sup>	考虑桩帽间最大间距和 内摩擦角的影响	$0.707(s-a)/\tan(\varphi)$ 或 $1.4(s-a)^B$

注: $s$  为桩间距; $a$  为桩帽宽度; $\varphi$  为填土内摩擦角,当  $\varphi=26^\circ$  时,规范 JTG/T D31-02—2013 与规范 GB/T 50783—2012 的等沉面高度相等。

从表 1 中可以发现,虽然各国规范对临界填土高度  $H_{cr}$  都进行了规定,但由于对土拱模型假设的不同, $H_{cr}$  的计算方法也不相同。数值模拟、模型试验、现场试验等方法对临界填土高度  $H_{cr}$  的研究结果如表 2 所示。

表 2 临界填土高度  $H_{cr}$  的相关研究结果

Tab. 2 Related Research Results of

Critical Filling Height  $H_{cr}$

研究方法	数据来源	材料参数	$\frac{H_{cr}}{s-a}$
数值模拟	2D	填土:Disk 颗粒 桩间土:钢板	0.8
	3D	填土:砂土 桩间土:等效均布荷载	1.5
模型试验	2D	填土:中粗河砂 桩间土:水袋	1.6
	3D	填土:中细砂+纤维丝 桩间土:中细砂	1.5
现场试验	文献 <sup>[27]</sup>	填土:砾石混合 地基土:3 m 厚填土+ 16~17 m 厚软土+ 15~17 m 厚卵石层	1.1~1.3

注:数值模拟中包括有限元和离散元方法;模型试验中加入纤维丝为模拟填土材料存在黏聚力的情况。

除上述研究之外,费康等<sup>[37-38]</sup>认为  $H_{cr}$  等于 1.25 倍~1.5 倍的桩间净距;陈仁朋等<sup>[17]</sup>通过足尺试验,得到  $H_{cr}$  约为 1.5 倍的桩间净距。模型试验与数值模拟的结果基本一致,即  $H_{cr}$  与桩间净距比值在 0.8~1.6 之间;由于  $H_{cr}$  的量测方法较为繁琐,现场试验很难直接获得,通常以桩间土压力达到最大值时所对应的填土高度作为临界填土高度  $H_{cr}$ ,现场实测结果表明  $H_{cr}$  为 1.1 倍~1.3 倍的桩

间净距。  
由此可见,由于对拱形的假设、量测手段存在差异,有关  $H_{cr}$  的结论尚未统一,仍有待研究。总的来说,若不考虑填土和地基土的基本性质,临界填土高度  $H_{cr}$  与桩间距和桩土相对位移有关,且桩间距影响较大。临界填土高度  $H_{cr}$  在  $1.4(s-a)$  左右,随桩间距呈线性变化。

1.2 桩体荷载分担比

桩体荷载分担比(或者桩土应力比)用来表示桩承式路堤中荷载转移的程度,是设计单桩承载力的重要指标之一。桩体荷载分担比  $E_p$  通常按下式进行计算

$$E_p = P_u / (\gamma H s^2) \tag{1}$$

式中: $P_u$  为桩帽上方土压力; $\gamma$  为路堤填料重度; $H$  为路堤高度。

土拱效应形成后,路堤荷载向桩顶转移的大小与路堤填料的性质、填料的高度与桩间距的比值、桩帽大小以及桩土相对位移等有关。

曹卫平等<sup>[36]</sup>通过模型试验研究了桩土相对位移、路堤高度与桩间净距的比值等因素对桩体荷载分担比的影响,其结果如图 2 所示。

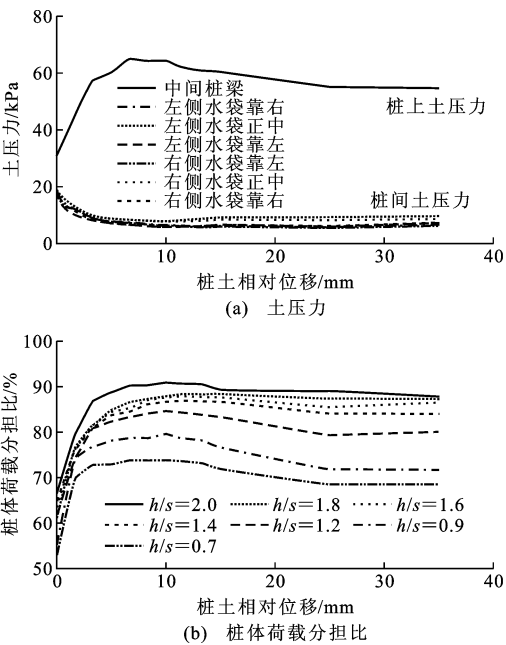


图 2 土压力与桩体荷载分担比

Fig. 2 Soil Pressure and Pile Efficacy

由图 2(a)可以看出,随着桩土相对位移持续增大,桩上土压力在增加到峰值 63.97 kPa 后逐渐减小至稳定值 58.2 kPa,水袋上土压力减小到 6.34 kPa 后又增大至稳定值 7.12 kPa。图 2(b)则表明:随着桩土相对位移的增大,桩体荷载分担比也呈现

先增大后减小的趋势;随着填土高度的增加,桩体荷载分担比的峰值和稳定值都有所提高。

模型试验、现场试验证实了桩承式路堤存在明显的桩土差异沉降、填土土拱效应。随着桩土相对位移的增加,桩体荷载分担比均呈现先增大后减小最后逐渐稳定的现象,即存在峰值和残余值;随着填土高度的增加,填土中的土拱逐渐由不完整土拱演变为完整土拱,桩体荷载分担比峰值和残余值逐渐增加,残余值越来越趋近峰值;除此之外,桩梁越大,桩体荷载分担比越大,但提高幅度有限;格栅的拉膜作用能够有效地提高桩体荷载分担比,提高的幅度与桩土差异沉降和格栅的拉伸强度有关。陈仁朋等<sup>[17]</sup>通过模型试验证明:路基上部受到静荷载作用时,土工格栅能使桩顶承担的静荷载增加约 12%。因此,填土高度将影响荷载的大小以及土拱效应能否完全发挥,对桩体荷载分担比影响最大,格栅次之,桩梁宽度影响程度最小。在进行单桩承载力设计时,应充分考虑构筑物的经济性与安全性,填土高度应大于临界填土高度  $H_{cr}$ ,防止路堤表面出现差异沉降,使土拱效应完全发挥;合理设计桩帽尺寸和铺设土工格栅,使桩基达到最佳承载力状态。

### 1.3 计算方法比较

实际土拱的形状较为复杂,目前还只能假定其形状。不同假定下荷载分担比的计算方法也有所不同,以下对几种计算方法进行介绍。

#### 1.3.1 Terzaghi 计算方法<sup>[4]</sup>

当填土高度  $h \leq 2s$  时,作用在 Trap-door 上的土压力  $\sigma_{vh}$  和两侧不动边界上的土压力  $\sigma_p$  分别为

$$\sigma_{vh} = \sigma_v|_{z=h} = \frac{\gamma S}{2K \tan(\varphi)} (1 - e^{-2K \frac{h}{S} \tan(\varphi)}) \quad (2)$$

$$\sigma_p = \frac{h(S+b)\gamma - \sigma_{vh}S}{b} \quad (3)$$

当填土高度  $h > 2s$  时,同样按式(3)求解  $\sigma_p$ ,而  $\sigma_{vh}$  为

$$\sigma_{vh} = \frac{\gamma S}{2K \tan(\varphi)} (1 - e^{-4K \tan(\varphi)}) + \gamma(h-2S)e^{4K \tan(\varphi)} \quad (4)$$

式中: $S$  为活动门的宽度; $b$  为活动门不动边界宽度(相当于桩帽); $K$  为侧土压力系数(Terzaghi 建议取值为 1)。

#### 1.3.2 英国规范 BS 8006-1:2010 计算方法<sup>[8]</sup>

对于正方形布桩的桩承式路堤,作用在桩帽上的土压力  $\sigma_p$  为

$$\sigma_p = \gamma h \left( \frac{C_c b}{h} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $C_c$  为土拱效应系数(若为打穿软土层的端承

桩,  $C_c = 1.95h/b - 0.18$ ;若为未打穿软土层的摩擦桩,  $C_c = 1.5h/b - 0.07$ )。

此计算方法采用 Marston 管道土压力理论<sup>[9]</sup>进行计算。除此之外, Hewlett & Randolph 计算方法<sup>[6]</sup>也被纳入 BS 8006-1:2010<sup>[8]</sup>中。

#### 1.3.3 Hewlett & Randolph 计算方法<sup>[6]</sup>

Hewlett & Randolph 根据模型试验观测结果,提出了半球形土拱模型,并假设半球形土拱拱顶或拱脚处土单元体会达到极限状态,并据此得出桩、土所承担的应力,从而进一步推导出桩顶荷载。

桩间土压力  $\sigma_s$  为

$$\sigma_s = \gamma \left( h - \frac{s}{\sqrt{2}} \frac{2K_p - 2}{2K_p - 3} \right) \left( 1 - \frac{b}{s} \right)^{2(K_p - 1)} + \gamma \frac{s-b}{\sqrt{2}(2K_p - 3)} + \gamma \frac{s-b}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

桩顶所受荷载  $P$  为

$$P = \frac{2K_p}{K_p + 1} s^2 \sigma_s [(1-\delta)^{1-K_p} - (1-\delta)(1+\delta K_p)] \quad (7)$$

式中: $K_p$  为被动土压力系数,  $K_p = (1 + \sin(\varphi)) / (1 - \sin(\varphi))$ ;  $\delta = b/s$ 。

#### 1.3.4 Low 计算方法<sup>[7]</sup>

Low 等<sup>[7]</sup>在 Hewlett & Randolph 半球形模型<sup>[6]</sup>基础上对土拱效应计算方法进行了改进,假设土拱效应厚度为桩帽宽度的一半。

桩间土压力为

$$\sigma_s = \frac{\beta \gamma (K_p - 1) (1 - \delta) (s + b)}{2(K_p - 2)} + \beta \gamma (1 - \delta)^{K_p - 1} \cdot \left[ h - \frac{s+b}{2} - \frac{s+b}{2(K_p - 2)} \right] \quad (8)$$

式中: $\beta$  为应力扩散系数,建议取 0.8。

桩帽上土压力为

$$\sigma_p = \frac{h(s+b)\gamma - \sigma_s s}{b} \quad (9)$$

#### 1.3.5 陈云敏等计算方法<sup>[39]</sup>

中国学者对桩承式路堤土拱效应提出了许多修正计算方法<sup>[40-41]</sup>。陈云敏等<sup>[39]</sup>提出的计算方法被规范 JTG/T D31-02—2012 所采纳,故本文对此方法进行介绍。

陈云敏基于单桩等效处理范围内路堤土体受力平衡,引入状态参量  $\alpha$  对 Hewlett & Randolph 计算方法<sup>[6]</sup>进行修正,即桩间土压力  $\sigma_{su}$  为

$$\sigma_{su} = \gamma \left( H - \frac{s}{\sqrt{2}} \frac{K_p - 2}{K_p - 3} \right) (1 - \delta)^{2(\alpha K_p - 1)} + \frac{\gamma(s-b)}{\sqrt{2}(2\alpha K_p - 3)} + \gamma(s-b)/\sqrt{2} \quad (10)$$

桩顶所受荷载  $P_u$  为

$$P_u = \frac{2\alpha K_p}{\alpha K_p + 1} s^2 \sigma_{su} [(1-\delta)^{1-\alpha K_p} - (1-\delta)(1+\delta\alpha K_p)] \quad (11)$$

再通过单桩等效处理范围内路堤土体的平衡方程求待系数  $\alpha$ , 从而求出  $P_u$ , 即

$$\gamma s^2 H = P_u(\alpha) + \sigma_{su}(\alpha)(s^2 - b^2) \quad (12)$$

### 1.3.6 荷兰规范 CUR 226:2016 计算方法<sup>[42]</sup>

CUR 226:2016 采用 Van Eekelen 等<sup>[43]</sup> 的同心拱模型计算桩体荷载分担比, 即桩土的差异沉降在桩帽边缘处形成拱脚; 随着加筋体的变形, 填土中逐渐形成闭合拱, 加筋体的变形又进一步导致沉降差, 在土拱内部形成新的土拱; 这一过程不断往加筋体内部发展, 从而形成嵌套的土拱。此计算方法能够

考虑土拱效应和加筋拉膜效应的共同作用, 具有较好的适用性, 在设计过程中能够准确地设计加筋体的拉伸强度, 但因公式较为复杂, 故不在文中罗列。

以杭甬高速公路(HY Highway)<sup>[24]</sup>、上海高速公路(SH Highway)<sup>[38]</sup>、申苏浙皖高速公路(SJZA Highway)<sup>[27]</sup>、台缙高速公路(TJ Highway)<sup>[27]</sup> 的 3 个试验段、广州环城高速(GZ Highway)、宁安城际铁路(NA Railway)<sup>[44]</sup>、长平高速公路(CP Highway)<sup>[45]</sup> 为例, 对上述几种荷载分担比计算方法进行比较, 计算结果如图 3 所示。为将结果量化处理, 定义参数  $R$  为

$$R = \sum \sqrt{(A-B)/A}^2 / N \quad (13)$$

式中:  $A$  为实测桩体荷载分担比;  $B$  为计算荷载分担

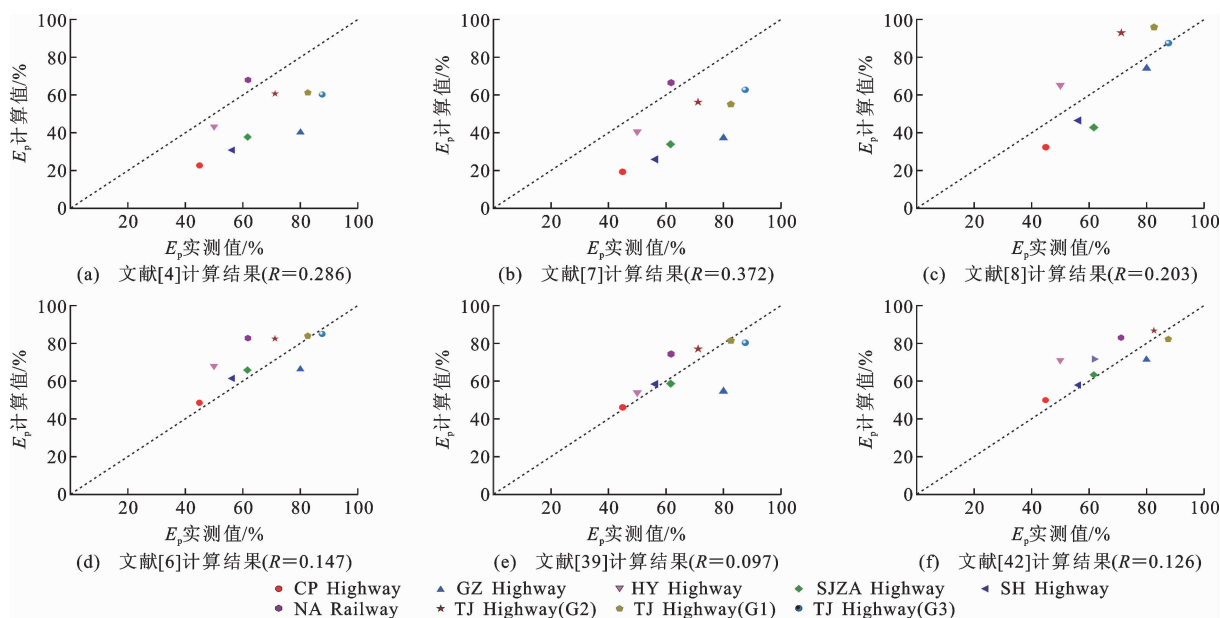


图 3 几种理论方法计算的荷载分担比比较

Fig. 3 Comparison of Pile Efficacies Calculated by Different Theoretical Methods

比;  $N$  为参与计算的项目数。

参数  $R$  可反映计算值与实测值的吻合度,  $R$  越接近 0, 则计算值与实测值吻合度越高。

由图 3 可知: Terzaghi 计算方法基于二维的活动门试验, 故在计算实际工程时存在缺陷, 计算值较实测值偏小; 文献[7]的多圆拱模型计算值比文献[4]计算值更小; 文献[6], [42]的计算值均与实测值较为吻合, 但文献[42]在桩间距较小时的计算结果偏大; 文献[39]计算值与实测值吻合度最高。

上述方法也存在一定的缺陷, 即不能考虑差异沉降对土拱效应的影响, 基于这个缺点, Chen 等<sup>[46]</sup> 提出路堤-桩-土共同作用分析模型, 考虑土体固结所产生的差异沉降, 通过桩土差异沉降求得等沉面

高度, 再根据等沉面高度算出桩体荷载分担比, 以此将桩土差异沉降纳入考虑范围。

## 2 土拱效应对动应力传递规律的影响

路基动力响应的分布和变化规律是研究路面平顺度及路基安全的重要内容。上述研究内容侧重于静荷载, 对动力荷载下的土拱效应研究尚处于起步阶段。

### 2.1 动应力传递机理

研究列车动荷载在桩承式路堤中的传递机理, 对控制单桩的循环累积沉降很有意义。已有研究结果表明: 土拱高度以上动荷载由路堤顶面向下传递时随深度递减; 土拱以下动荷载的传递与静荷载相

似,受土拱效应影响,桩顶承担的动荷载大于桩间土承担的动荷载。许朝阳等<sup>[47]</sup>采用可视化模型试验和颗粒流数值模拟相结合的方法,发现在土拱效应影响范围内,桩顶动荷载显著增加,桩间动荷载显著减少,距桩顶平面越近,变化幅度越大,并且动荷载作用下竖向应力的变化幅度与加筋体的设置有关,动荷载对双层加筋路堤的影响最小,10 cm 处加筋的影响其次,无筋时影响最大。

与静力相似,动应力向下传递过程中,完整土拱和不完整土拱对荷载传递有着很大的影响。肖宏等<sup>[48]</sup>在遂渝线现场对 3 m 高桩网结构路堤进行现场实测研究,该地段地基土质较好,桩土相对位移小,土拱效应未完全形成。因此,桩顶较桩间虽然承担更多的动应力,但动应力经过 3 m 高的路堤衰减后对下部垫层几乎没有影响。

陈仁朋等<sup>[49]</sup>在足尺模型试验中先使路堤内产生完整土拱,再施加动荷载,研究速度  $324\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  的列车在 120 万次轮轴动荷载作用下及 3.2 m 高路基范围内动土压力随振次的变化规律,分析长期动荷载作用下土拱演化规律,其结果如图 4,5 所示。

由图 4 可知,受土拱效应影响,桩顶动应力大于桩间土的动应力,且越接近桩顶变化幅度越大。由图 5 可知:当振动 50 万次以后,桩顶上方不同高度处的动应力大于开始振动时的动应力;振动次数达到 100 万次时,桩顶上方不同高度处的动应力小幅衰减,说明在大振次作用下,土拱效应会有所衰减,即动荷载的长期作用对土拱效应存在一定的影响。

2.2 循环荷载作用对动应力的影响

桩承式路堤在修建完成后,由于地基土的固结,桩土间存在差异沉降,从而在路堤内形成土拱效应,发生应力重分布。已有研究表明<sup>[50-51]</sup>,桩基础在动荷载的作用下会产生循环累积沉降。桩的循环累积沉降使桩土的差异沉降减少,会在一定程度上影响土拱效应的发挥。

韩高孝等<sup>[52]</sup>通过室内三维模型试验进行动荷载作用下的土拱效应研究,结果表明,动荷载作用下土拱效应会发生退化,填土高度和土工格栅能够提高动荷载作用下土拱效应的稳定性,其中土工格栅影响最大,填土高度次之。赖汉江等<sup>[53]</sup>认为土拱效应的弱化宏观上表现为路堤荷载传递效率的逐渐减小,微观上则表现为桩顶与桩间土上方接触力差异程度的减小。

陈仁朋等<sup>[49]</sup>根据循环荷载作用下足尺试验得到的桩体荷载分担比如图 6 所示。

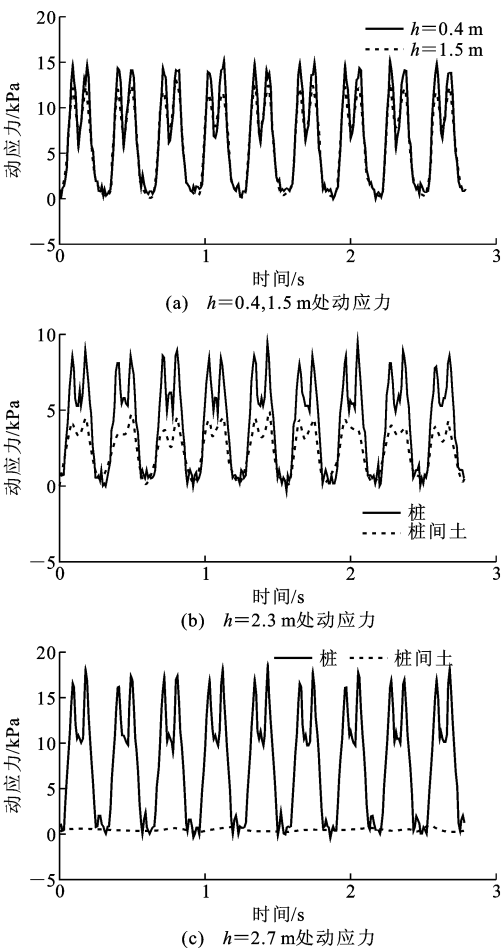


图 4 动应力沿深度的分布  
Fig. 4 Distribution of Dynamic Stress Along Depth

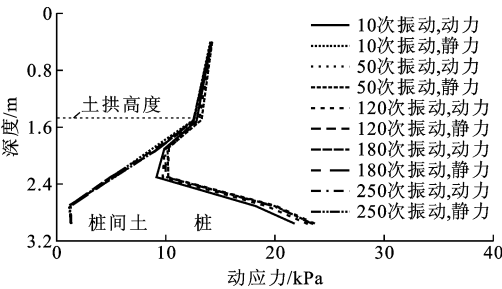


图 5 路堤内部动静应力分布  
Fig. 5 Distribution of Static and Dynamic Stresses Inside Embankment

从图 6 中可以看出:当循环次数较小时,桩体荷载分担比随着循环次数的增加而增加,说明循环次数较少时土拱效应得到了一定程度上的强化;当循环次数继续增大时,土拱效应逐渐弱化,最终桩体荷载分担比可能小于未施加循环荷载时的桩体荷载分担比。然而在停载 1 d 后,桩体荷载分担比又会再次提高,大于上一个阶段结束加载时的桩体荷载分担比。

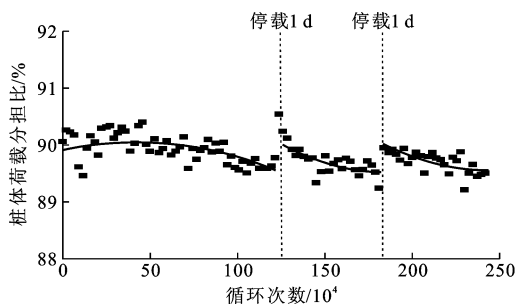


图 6 桩体荷载分担比随循环次数的变化

Fig. 6 Change of Pile Efficacy with Cycle Times

循环荷载作用初期,由于土拱拱身填料在动荷载作用下会更加密实,土拱会在一定程度上得到强化,随着循环荷载的持续作用,桩基开始发生累积沉降,土拱效应逐渐弱化,因此在长期动荷载作用下,土拱效应将处于一个持续被削弱的过程,但对于削弱程度仍需要进一步的研究;填土高度及土工格栅能够减缓土拱效应的削弱;土拱效应和格栅拉膜效应在动荷载作用后存在一定的“恢复”能力,但 2 种效应各自的“恢复”能力以及“恢复”时间仍有待进一步研究。

### 2.3 动应力传递计算方法

陈仁朋等<sup>[50]</sup>基于足尺模型试验结果,作出 2 个假定:①桩顶高度动荷载分担比与静荷载分担比相同;②在拱顶以下深度范围内动应力不再沿深度衰减。根据以上假定,提出了桩结构路堤动应力传递计算方法:

- (1)土拱高度以上路基中的动应力按照 Boussinesq 公式计算,确定拱顶动应力  $\sigma_p$ 。
  - (2)计算桩顶动荷载  $P_d$ ,  $P_d = \sigma_p S^2 E_p / a^2$ 。
- 桩承式路堤动应力计算简图如图 7 所示。

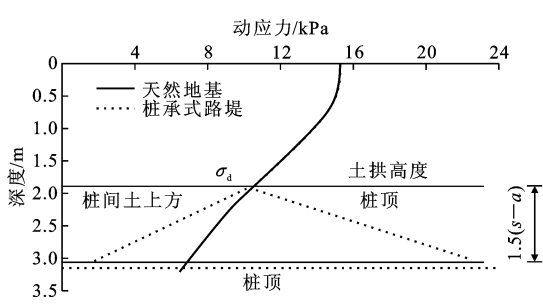


图 7 桩承式路堤动应力计算

Fig. 7 Calculation of Dynamic Stress of Pile-supported Embankments

动应力传递计算方法没有考虑动荷载在土拱影响范围内沿深度的衰减以及土拱效应随循环次数先增强后减弱的特性,故存在一定的局限性。总体上该方法偏于安全。

## 3 结 语

(1)桩承式路堤中临界填土高度  $H_{cr}$  可反映等沉面高度及土拱高度,一般情况下要求填土高度大于  $H_{cr}$ ,保证填料内部土拱效应完全发挥,路堤表面不产生差异沉降。桩间净距对  $H_{cr}$  影响最大,模型试验及数值模拟中  $H_{cr}$  与桩间净距的比值为 1.4~1.6。

(2)桩承式路堤中桩体荷载分担比受土拱效应的影响,与桩土相对位移、路堤高度、桩间净距、桩帽尺寸等多个因素有关。桩体荷载分担比随着路堤高度与桩间净距的比值和桩帽尺寸的增大而增大;随着桩土相对位移的增大先增大后减小。铺设加筋垫层有利于提高桩体荷载分担比。荷载分担比的计算方法由于假设的不同而存在各自的适用条件,总的来说陈云敏等的计算方法更符合实测值。

(3)动荷载的传递同样受土拱效应影响,即土拱面高度以上动荷载沿深度衰减;土拱高度以下,桩顶上方各处承担的动荷载大于桩间土上方对应位置处承担的动荷载。

(4)随着动荷载循环次数的增加,土拱效应存在先强化、后弱化的现象,对应的桩体荷载分担比先增大后减小。填土高度和格栅布置形式能提高土拱效应的稳定性,并且土拱效应和拉膜效应在动荷载作用后存在一定的“恢复能力”。

(5)本文建议的路基动应力计算方法能够估算出桩顶动荷载大小,据此控制桩顶累积沉降。

(6)路基土拱效应是个很复杂的问题,尤其是有关动荷载的传递机理、对土拱效应的影响还需要进一步研究。

### 参考文献:

#### References:

[1] JTG/T D31-02—2013,公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S].  
JTG/T D31-02—2013, Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Embankment on Soft Ground[S].

[2] TB 10621—2014,高速铁路设计规范[S].  
TB 10621—2014, Code for Design of High Speed Railway[S].

[3] VANEL L, CLAUDIN P, BOUCHAUD J, et al. Stresses in Soils: Comparison Between Theoretical Models and New Experiments[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(7): 1439-1442.

- [4] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [5] CARLSSON B. Reinforced Soil, Principles for Calculation[M]. Linköping: Terratema A B, 1987.
- [6] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of Piled Embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21 (3): 12-18.
- [7] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in Piled Embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11): 1917-1938.
- [8] BS 8006-1: 2010, Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills[S].
- [9] MARSTON A, ANDERSON A O. The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pile[R]. Ames: Iowa State College, 1913.
- [10] EBGeo 2004, Bewehrte Erdkörper auf Punkt-oder Linienförmigen Traggliedern[S].
- [11] ZAESKE D, KEMPFERT H G. Berechnung und Wirkungsweise von Unbewehrten und Bewehrten Mineralischen Tragschichten Ueber Punktund Linienförmigen Traggliedern [J]. Bauingenieur, 2002, 77 (S): 80-86.
- [12] Nordic Geotechnical Group. Nordic Guidelines for Reinforced Soils and Fills [M]. Stockholm: Nordic Geotechnical Group, 2004.
- [13] Railway Institute of General Technology. The Design and Construction Handbook of Mixing Piled Foundation (Machine Mixing)[M]. Tokyo: Railway Institute of General Technology, 2001.
- [14] 费康, 陈毅, 王军军. 加筋形式对桩承式路堤工作性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (12): 2312-2317.  
FEI Kang, CHEN Yi, WANG Jun-jun. Experimental Study on Influence of Reinforcing Modes on Behavior of Piled Embankment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2312-2317.
- [15] 芮瑞, 黄成, 夏元友, 等. 砂填料桩承式路堤土拱效应模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (11): 2082-2089.  
RUI Rui, HUANG Cheng, XIA Yuan-you, et al. Model Tests on Soil Arching Effects of Piled Embankments with Sand Fills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2082-2089.
- [16] 徐超, 宋世彤. 桩承式加筋路堤土拱效应的缩尺模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (增2): 4343-4350.  
XU Chao, SONG Shi-tong. Scaled Model Tests of Soil Arching Effect in Geosynthetic Reinforced and Pile Supported Embankments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 4343-4350.
- [17] 陈仁朋, 汪焱卫, 陈金苗, 等. 桩承式加筋路堤土拱及格栅受力模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1275-1280.  
CHEN Ren-peng, WANG Yan-wei, CHEN Jin-miao, et al. Experimental Study on Behaviors of Soil Arch and Geogrid in a Pile-supported Reinforced Embankment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1275-1280.
- [18] CHEN R P, WANG Y W, YE X W, et al. Tensile Force of Geogrids Embedded in Pile-supported Reinforced Embankment; A Full-scale Experimental Study [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44 (2): 157-169.
- [19] HAN J, GABR M A. Numerical Analysis of Geosynthetic-reinforced and Pile-supported Earth Platforms over Soft Soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(1): 44-53.
- [20] HUANG J, HAN J, OZTOPRAK S. Coupled Mechanical and Hydraulic Modeling of Geosynthetic-reinforced Column-supported Embankments [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(8): 1011-1021.
- [21] WANG Z, MEI G. Numerical Analysis of Seismic Performance of Embankment Supported by Micropiles [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2012, 30 (1): 52-62.
- [22] LAI H J, ZHENG J J, ZHANG J, et al. DEM Analysis of "Soil"-arching Within Geogrid-reinforced and Unreinforced Pile-supported Embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 13-23.
- [23] 许朝阳, 周健, 完绍金. 桩承式路堤承载特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(增1): 501-507.  
XU Zhao-yang, ZHOU Jian, WAN Shao-jin. Simulation of Bearing Characteristics of Pile-supported Embankments by Particle Flow Code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 501-507.
- [24] 贾宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (6): 755-760.  
JIA Ning, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Theoretical Analysis and Measurement for Widening Project of Hang-Yong Expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (6): 755-760.



- [25] 夏元友,芮 瑞. 刚性桩加固软土路基竖向土拱效应的试验分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 327-331.  
XIA Yuan-you, RUI Rui. Experimental Analysis of Vertical Soil Arching Effect of Embankment Reinforced by Rigid Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 327-331.
- [26] LIU H L, NG C W W, FEI K. Performance of a Geogrid-reinforced and Pile-supported Highway Embankment over Soft Clay: Case Study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12): 1483-1493.
- [27] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field Tests on Pile-supported Embankments over Soft Ground [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 777-785.
- [28] 连 峰, 龚晓南, 赵有明, 等. 桩-网复合地基加固机理现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 7-12.  
LIAN Feng, GONG Xiao-nan, ZHAO You-ming, et al. Field Test Study on the Improvement Mechanism of Pile-net Composite Foundation [J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 7-12.
- [29] 曹卫平, 胡伟伟. 桩承式加筋路堤三维土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 351-358.  
CAO Wei-ping, HU Wei-wei. Experimental Study of 3D Soil Arching in Piled Reinforced Embankments [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 351-358.
- [30] 杨 涛, 王刚刚, 闫业强, 等. 桩承式路堤中土拱形态与成拱过程中土拱效应研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 731-735.  
YANG Tao, WANG Gang-gang, YAN Ye-qiang, et al. Shape of Soil Arching and Development of Its Effect in a Piled Embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 731-735.
- [31] SPANGLER M G, HANDY R L. Soil Engineering [M]. New York: Harper & Row, 1982.
- [32] CHEN Y M, CAO W P, CHEN R P. An Experimental Investigation of Soil Arching Within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 164-174.
- [33] GB/T 50783—2012, 复合地基技术规范[S].  
GB/T 50783—2012, Technical Code for Composite Foundation[S].
- [34] 付海平, 郑俊杰, 赖汉江. 桩承式路堤“土拱结构”形成演化规律离散元分析[J/OL]. 岩土工程学报, 2017: 1-8. (2017-03-28) [2017-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170328.1545.022.html>.
- crete Element Analysis of the Development and Evolution of “Soil Arching” Within a Piled Embankment [J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017: 1-8. (2017-03-28) [2017-06-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20170328.1545.022.html>.
- [35] 庄 妍, 崔晓艳, 刘汉龙. 桩承式路堤中土拱效应产生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 1): 118-123.  
ZHUANG Yan, CUI Xiao-yan, LIU Han-long. 3D FE Analysis of Arching in a Piled Embankment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 118-123.
- [36] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式加筋路堤土拱试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 436-441.  
CAO Wei-ping, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Experimental Investigation on Soil Arching in Piled Reinforced Embankments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 436-441.
- [37] 费 康, 王军军, 陈 毅. 桩承式路堤土拱效应的试验和数值研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1975-1983.  
FEI Kang, WANG Jun-jun, CHEN Yi. Experimental and Numerical Studies of Soil Arching in Piled Embankment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1975-1983.
- [38] FEI K, LIU H L. Field Test Study and Numerical Analysis of a Geogrid-reinforced and Pile-supported Embankment [J]. Rock & Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1005-1012.
- [39] 陈云敏, 贾 宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1-6.  
CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil Arch Analysis of Pile-supported Embankments [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(4): 1-6.
- [40] 余 闯, 刘松玉, 杜广印. 桩承式路堤土拱效应的改进 Terzaghi 方法[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 74-76, 96.  
YU Chuang, LIU Song-yu, DU Guang-yin. A Modified Terzaghi's Method on Soil Arching in Piled Embankments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 74-76, 96.
- [41] 陈福全, 李阿池, 吕艳平. 桩承式路堤中土拱效应的改进 Hewlett 算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1278-1283.  
CHEN Fu-quan, LI A-chi, LU Yan-ping. An Improved Solution of Hewlett's Method for Soil Arching Effect on Piled Embankment [J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1278-1283.
- [42] CUR 226; 2016, Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments[S].
- [43] VAN EEKELLEN S J M, BEZUIJEN A, VAN TOL A F. An Analytical Model for Arching in Piled Embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 39(39): 78-102.
- [44] 郑俊杰, 曹文昭, 董同新, 等. 中低压缩性土地区桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1549-1555.
- ZHENG Jun-jie, CAO Wen-zhao, DONG Tong-xin, et al. Experimental Investigation of Geogrid-reinforced and Pile-supported Embankment on Soils with Medium-low Compressibility[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1549-1555.
- [45] 郑俊杰, 张 军, 马 强, 等. 路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 355-362.
- ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, MA Qiang, et al. Experimental Investigation of Geogrid-reinforced and Pile-supported Embankment at Bridge Approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 355-362.
- [46] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A Theoretical Solution for Pile-supported Embankments on Soft Soils Under One-dimensional Compression[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5): 611-623.
- [47] 许朝阳, 周 锋, 吕 惠, 等. 动荷载下桩承式路堤的承载特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3231-3239.
- XU Zhao-yang, ZHOU Feng, LU Hui, et al. Bearing Behavior and Mechanism of Pile-supported Embankment Under Dynamic Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3231-3239.
- [48] 肖 宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 79-84.
- XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Dynamic Test Analysis on Ballastless-track Column-net Structure Subgrade of the Suining-Chongqing Railway Line[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 79-84.
- [49] 陈仁朋, 汪焱卫, 陈金苗, 等. 大振次列车动荷载作用下桩网加筋路堤土拱效应模型试验研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 107-113.
- CHEN Ren-peng, WANG Yan-wei, CHEN Jin-miao, et al. Experimental Study on Soil Arching Effect in Pile-supported Reinforced Embankment Under Dynamic Train Loads with Large Number of Vibration Cycles[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 107-113.
- [50] 陈仁朋, 任 宇, 陈云敏. 刚性单桩竖向循环加载模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1926-1933.
- CHEN Ren-peng, REN Yu, CHEN Yun-min. Experimental Investigation on a Single Stiff Pile Subjected to Long-term Axial Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1926-1933.
- [51] 朱 斌, 任 宇, 陈仁朋, 等. 竖向下压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 186-193.
- ZHU Bin, REN Yu, CHEN Ren-peng, et al. Model Test on Bearing Capacity and Accumulated Settlement of Single Pile Subjected to Axial Cyclic Loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 186-193.
- [52] 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 列车动荷载下桩网结构路基土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1600-1606.
- HAN Gao-xiao, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Experimental Study of Soil Arching Effect in Geogrid Reinforced Pile Supported Embankment Under Train Dynamic Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1600-1606.
- [53] 赖汉江, 郑俊杰, 崔明娟. 循环荷载下低填方桩承式路堤动力响应分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3252-3258.
- LAI Han-jiang, ZHENG Jun-jie, CUI Ming-juan. Dynamic Response Analysis of a Low-filled Piled Embankment Under Cyclic Loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3252-3258.