

# 夯实水泥土桩复合地基主要性状研究

李豪杰, 刘 明, 雷子恒

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

Email: 1246310629@qq.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月23日; 发布日期: 2020年10月30日

---

## 摘 要

夯实水泥土桩复合地基是一种新兴的能适用于多数场景的一种地基处理方式, 由于其施工简单, 强度较高被广泛应用。本文通过查阅相关论文文献, 就目前夯实水泥土桩复合地基的研究中所关注的重点问题进行了细致的分析和总结归纳, 主要是影响水泥土强度的因素、桩土应力比的影响因素、有效桩长问题、垫层作用等问题, 其次是完善细化了水泥土桩在实际工程设计中的设计步骤, 确定承载力计算及变形验算的方法, 最后就仍需关注和重点研究解决的问题做了梳理。

## 关键词

夯实水泥土桩, 复合地基, 承载力计算

---

# Study about Main Characteristics of Compacted Cement-Soil Pile Composite Foundation

Haojie Li, Ming Liu, Ziheng Lei

College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Email: 1246310629@qq.com

Received: Oct. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Rammed soil-cement pile composite foundation is a new foundation treatment method suitable for most scenes. It is widely used because of its simple construction and high strength. In this paper, through the related paper documents, rammed soil-cement pile composite foundation is cur-

rently in the research of the focus of the attention question has carried on the detailed analysis and summary, mainly influence factors of cement-soil strength, the influence factors of pile soil stress ratio and effective pile length, cushion effect and so on, the second is the perfect refinement of cement-soil pile in practical engineering design steps in the design, to determine the bearing capacity calculation and deformation calculation method, finally will still need to pay attention to and focus on the problem made a comb.

## Keywords

Tamping Cement Soil Pile, Composite Foundation, Bearing Capacity Calculation

Copyright © 2020 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

复合地基是指通过部分土体置换或土体增强,由地基土和竖向增强体共同作用,来承担荷载的人工地基[1]。虽然复合地基的地基处理技术发展起步较晚,但由于其形式多样、适用性广泛,目前被广泛应用于工程实际当中。复合地基的地基处理采用桩型多样,可以按照桩体采用的材料对复合地基进行分类,一般来说可以分为柔性、刚性和散体材料桩复合地基三类。

其中,夯实水泥土桩复合地基属于柔性桩复合地基,是近年来新兴起的一种相对新型的地基处理办法,由于具有造价低,承载力高,沉降变形小和施工简单等特点,倍受工程界关注[2]。

夯实水泥土桩最主要的特点是桩身水泥土经过充分拌合和夯实,桩身强度较高,比普通只经搅拌的搅拌水泥土桩强度高2~10倍,而且由于其对土体的挤密作用优异,能很好的消除黄土的湿陷性,因此在黄土地区的使用能起到较好的使用效果[3]。

本文通过查阅相关论文资料来研究夯实水泥土桩复合地基的主要性状,主要包括对夯实水泥土桩的桩体强度、桩土应力比、有效桩长、垫层效应等问题的研究,并对夯实水泥土桩复合地基的设计计算过程进行总结归纳。

## 2. 夯实水泥土桩复合地基

夯实水泥土桩通常先通过人工或者机械钻孔,并选用较为稳定单一的土质材料与水泥按一定的配合比进行充分拌合,形成均匀的混合料。之后将拌和好了的水泥土分层向挖孔中回填,并用重锤逐层夯实成桩。夯实形成的水泥土桩与桩周挤密的土体和散体材料褥垫层共同作用,组合形成复合地基[4]。如图1所示。

从桩体强度方面来看,夯实水泥土桩是中等粘结强度桩,多用于粉质黏土、素填土、淤泥质土等土体的地基处理,能有效提高地基基础的承载能力,在消除地基不均匀沉降方面有重要作用。

结合目前国内外的工程实际,夯实水泥土桩桩体水泥和土的体积比一般为1:5~1:8,夯实形成的桩身强度约为3.0~6.0 MPa,复合地基处理深度不宜超过10 m,桩径一般为350~600 mm,并通过褥垫层与桩和基础相联系[5]。对于在特定环境和施工条件下的夯实水泥土桩复合地基设计,应结合实际施工情况进行,对桩身参数和承载力进行验算,使设计能符合实际工程要求。

## 3. 夯实水泥土桩复合地基研究现状

在当前有关夯实水泥土桩复合地基问题的研究中,主要是关于桩体强度的影响因素、桩土应力比、

有效桩长、垫层效应等方面,目前的研究已经比较全面,对于各类问题在行业内也有了比较一致的结论,现就各方面问题的情况进行归纳总结。

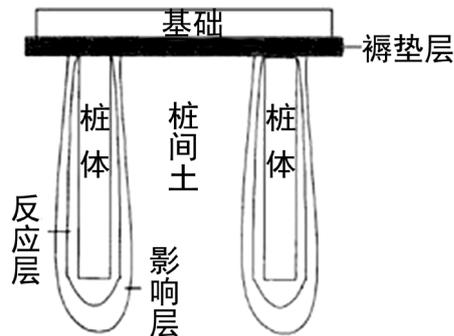


Figure 1. Schematic diagram of tamping cement-soil pile composite foundation  
图 1. 夯实水泥土桩复合地基示意图

### 3.1. 桩体强度的影响因素

杨有海等(2013年)[6]为研究提高水泥改良黄土强度的措施,就依据郑西客专夯实水泥土桩复合地基的应用背景,并结合室内的土工试验,测定了改良黄土的物理力学性质、压缩模量、最佳含水率、最大干密度等基本参数,分析了影响水泥改良黄土的多种因素的作用效果,为提高桩体强度提出多项建议和多种措施。

闫明礼等(1997年)[5]也通过研究,介绍了夯实水泥土桩的力学特性,研究了土性、放置时间和冻结对夯实水泥土桩强度的影响,提出其适用范围和优缺点,并对夯实水泥土桩复合地基的施工工艺、施工流程做了研究。

论文结果表明,对夯实水泥土桩的强度起关键性作用的是水泥掺和比和龄期,放置时间也有影响但是作用不大。水泥土的龄期越长,强度越高,7~28 d龄期水泥黄土强度增长最快,超过28 d后,水泥土桩强度虽然仍有增长但是增长速度会逐渐减慢;水泥土桩中掺入的水泥量越大,桩体强度越高,但是在工程中,为了使效率最高,成本最低,需要结合实际情况,根据设计强度要求来确定水泥的掺和比。

### 3.2. 桩土应力比的研究

对于桩土应力比,简单来说,就是在复合地基中桩顶所承担的应力与桩间土所承担的应力的比值。在实际工程中,桩的强度优于桩间土强度,但是桩的造价较高,因此研究桩土应力比有着实际意义。最理想的复合地基设计效果是让桩体和桩间土都能发挥自身最大的价值,使强度效果和经济效益都能做到最优。

郭忠贤等(2006年)[7]进行了现场载荷实验,来研究桩土应力比的影响因素。结果表明:在荷载增大时,桩土应力比 $n$ 先增大后减小,取值范围约为2.2~14.8,跨越范围较大; $n$ 随桩长的增大而增大,但是存在着一个临界长度,当桩长超过临界长度之后,再增大桩长,对桩土应力比的影响不大; $n$ 值随桩土面积置换率和垫层刚度的增大而增大,但其影响逐渐减小。

郭忠贤等(2007年)[8]的实验结果表明,增大桩长和提高面积置换率都可提高桩荷载分担比及桩土应力比,随着值继续提高,影响作用会逐步减弱;垫层刚度越大,桩的作用体现的越早,土的发挥滞后。

赵军贤等(2007年)[9]为更细致全面地研究各种因素对桩土应力比的影响,在进行夯实水泥土块的无侧限抗压强度试验之后,进行了有限元分析。分析结果显示,桩长、桩身弹性模量、垫层弹性模量以及

桩端土弹性模量的提高能有效提高桩土应力比, 呈正相关关系, 而桩土应力比会随着桩径桩周土弹性模量、垫层厚度的增大而减小。

郭忠贤等(2009年) [10]提出建立一种计算桩土应力比的方法, 以复合地基载荷试验为基础, 充分考虑桩、土的变形协调, 使之更能有效反应实际工程情况。计算结果表明, 桩土应力比会受到桩、土和垫层性能的综合影响, 相对比来看, 垫层的影响更为明显, 因此研究垫层作用的优化可以更好的促进桩—土协调作用的发挥。

综合上述论文研究结果, 可发现桩土应力比  $n$  的取值受多种因素的影响, 总的来说, 可以分为桩体自身强度、桩周土体性质和垫层布置三大类。 $n$  会先随荷载增大到最大值然后再随荷载增大而减小;  $n$  的大小与桩的长径比呈正比, 即  $n$  正比于  $l/r$ , 在临界桩长以下  $n$  随长径比的增大而增大;  $n$  值随桩土面积置换率和垫层刚度的增大而增大, 但其影响逐渐减小; 垫层的模量对桩土应力比的影响较为显著。

### 3.3. 有效桩长的研究

桩的临界长度是指桩上端的侧摩阻力达到极限值, 而桩身某处的侧摩擦力还为零时的桩长。有效桩长的计算, 可以为实际工程切合实际地选用桩长, 以在能满足施工设计要求的情况下, 尽可能的降低施工成本, 增大工程效益。

在查阅的有关夯实水泥土复合地基的论文中, 大多都提到了存在着有效桩长, 对比分析桩长长度在有效桩长以下和以上时, 分别对桩土应力比、桩土荷载分担比等的影响, 前文也有相关表述, 在这一节主要分析有效桩长大小的影响因素, 有部分学者在这一方面进行了深入研究。

闫明礼等(2012年) [4]进行了多组室内的模型试验, 对有效桩长问题展开研究。文中提出有效桩长和有效复合层厚度的概念, 并指出夯实水泥土桩的桩身强度大小与有效桩长息息相关, 是影响有效桩长的最主要因素。

佟建兴等(2013年) [1]通过室内模型试验进行实测, 通过对比引入了关于有效桩长的讨论。其研究结果表明, 夯实水泥土桩有效桩长与桩身强度相关, 应以桩身强度控制对夯实水泥土桩桩体设计。

综合上述论文的研究结果, 可发现两篇文章均认为夯实水泥土桩复合地基的桩体设计应以桩身强度控制, 有效桩长的计算与桩身强度有直接关系, 在实际设计中, 应使由桩身强度确定的单桩承载力大于(或等于)由桩周土和桩端土的抗力所提供的单桩承载力。

### 3.4. 垫层效应的研究

在复合地基中, 基体与增强体共同起承担荷载的作用。在基础底部设置垫层, 实际上是起到对上方向在重新分配的作用, 可以改良复合地基中桩与土的荷载分配形式, 合理的垫层布置, 可以使得桩与桩间土的荷载分担更加合理, 起到更好的复合效果, 对复合地基的布置至关重要。

王兵等(2008年) [11]进行了现场静载荷试验, 改变褥垫层的厚度和材料, 测试夯实水泥土单桩及多桩共同作用的地基承载特性, 并得出相应结论。结果表明选用较好的褥垫层材料可以更好地协调桩土变形能力; 垫层厚度增加, 桩土应力比会随之降低。

杨志红等(2010年) [12]也进行载荷试验, 通过试验来分析垫层对复合地基桩土受力性能的影响, 其研究结果证明, 垫层刚度的大小会影响复合地基中桩与桩间土的应力分布情况, 会影响复合地基的破坏形式。加大垫层厚度, 减小垫层刚度可以使桩间土的性能发挥更大, 在天然地基承载力较好的地基基础中, 可以通过此种形式达到经济的目的, 更好的发挥地基土效应。

上述两篇文章的研究, 均是从现场的载荷试验出发, 分析实验结果, 研究垫层对复合地基承载特性的影响作用。

王兵等的研究主要是分析垫层材料性能和厚度两种因素对桩土应力比和桩土荷载分担比的影响。

杨志红等的研究主要分析垫层刚度的影响。实际上,若垫层为绝对刚性,桩会承担大部分荷载;若垫层为绝对柔性,桩的承载性能不能有效发挥。因此为使的桩土应力比均能有效发挥,应当结合实际工程情况,在绝对刚性和绝对柔性之间选择适当刚度的垫层,发挥桩与桩间土体的综合能力。

## 4. 水泥土桩复合地基的设计

在进行夯实水泥土桩复合地基设计时,既要满足承载力要求,又要便于施工,降低施工成本,因此需要进行多步骤的计算和验证,通常有以下七个步骤:

### 4.1. 进行地基变形计算

首先按照天然地基土进行地基变形计算,进行此步计算的主要目的是验证使用复合地基的必要性,通过计算天然地基土下的变形情况,当天然地基土下变形较大时,必须选用复合地基进行设计,并进行初步估计确定加固深度。

### 4.2. 确定桩身参数

首先确定所需桩的桩体强度、类型、底面积大小等桩身参数,然后做水泥土的配合比实验,确定所需的掺和比,使桩体能达到所需的桩体强度,又不至于所需水泥量过大增大成本。一般来说,通常需要  $a_w = 12\% \sim 15\%$ ,  $f_{cu} = 1 \sim 1.6 \text{ MPa}$ , 具体取值根据工程实际进行实验分析。

### 4.3. 确定(估算)单桩承载力

估算水泥土桩的单桩承载力,用下式计算:

$$R_a = \eta \cdot f_{cu} \cdot A_p, \quad (1)$$

式中,  $f_{cu}$  为抗压强度标准值,  $A_p$  为桩体截面面积。

用上式计算,可以大致估算单根桩的承载力。

### 4.4. 计算有效桩长

有效桩长的计算问题,在实际工程中大多采用经验估计法,参考临近项目或类似情形的其他工程项目的情况来确定有效桩长取值。

### 4.5. 确定(估算)置换率

选取桩置换土的置换率,可以按一般工程经验进行取值,也可按下式进行初步预估计算,公式如下:

$$m = \frac{f_{spk} - \beta f_{sk}}{\frac{R_a}{A_p} - \beta f_{sk}}, \quad (2)$$

式中,  $R_a$  为单桩竖向承载力特征值

$\beta$  为桩间土承载力折减因数;

$A_p$  为桩底端横截面面积;

$f_{sk}$  为处理后桩间土承载力特征值;

$f_{spk}$  为复合地基承载力特征值。

根据上式计算置换率  $m$  时,无法进行准确计算,只能大概按需要达到的复合地基承载力等值带入进行试算,初步确定  $m$  的取值,若后续验算不通过,要重新调整  $m$  重新计算。

## 4.6. 布桩设计

根据 4.5 中所取得的置换率  $m$  的值, 进行布桩设计, 选取布桩的范围、桩的直径、间距等数据, 进行布桩。在布桩时应尽量对称布桩, 便于后续的受力分析及计算。

## 4.7. 复合地基承载力及变形验算

根据规范规定, 夯实水泥土桩复合地基承载力特征值按下式计算[3] [13]:

$$f_{spk} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk}, \quad (3)$$

$R_a$  为单桩竖向承载力特征值, 计算如下:

$$R_a = U_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + \alpha q_p A_p, \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为单桩承载力发挥系数;

$m$  为置换率;

$\beta$  为桩间土承载力折减因数;

$A_p$  为桩底端横截面面积;

$f_{sk}$  为处理后桩间土承载力特征值;

$U_p$  为桩身周边长度;

$q_{si}$  为桩侧摩阻力特征值;

$l_{pi}$  为第  $i$  层土的厚度;

$\alpha$  为桩端阻力发挥系数;

$q_p$  为桩端阻力特征值。

并且桩身强度满足:

$$f_{cu} \geq 4\lambda \frac{R_a}{A_p}, \quad (5)$$

在根据实际工程情况要求确定  $\lambda$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  发挥系数后, 运用叠加法, 代入上述公式(3)(4)可验算复合地基中的承载力特征值, 代入公式(5)验算抗压强度, 并进行现场的载荷试验来加以确定设计的准确性和安全性。若不能达到工程要求, 需要返回重新取值, 重新进行验算。

高笑娟等(2015年) [3]进行了夯实水泥土桩复合地基的承载力分析计算, 在文章中, 他们就某一工程实例进行了详细的复合地基承载力特征值验算, 可以用做参考。

## 5. 结论

本文主要就水泥土桩复合地基目前研究较多的桩土应力比、有效桩长、影响水泥土强度的因素、垫层作用等问题进行了归纳整理和总结, 也就水泥土桩复合地基的整体设计过程进行了步骤上的细化和归纳。

主要得出以下结论:

1) 桩土应力比的值受多方面因素的综合影响, 桩土应力比会先随荷载增大到最大值然后再随之减小; 桩土应力比与桩的长径比呈正比, 随长径比的增大而增大; 值随桩土面积置换率和垫层刚度的增大而增大; 垫层的模量对桩土应力比的影响较为显著。

2) 夯实水泥土桩复合地基存在有效桩长或有效复合土层厚度, 且与桩身强度的大小有直接关系。夯实水泥土桩复合地基的桩体设计应以桩身强度作为主要控制指标。

3) 垫层在复合地基中起调整桩和土的荷载分担,有利于桩间土的承载力发挥的作用。垫层的材料性能、垫层厚度、垫层刚度时目前研究中的主要研究点。

4) 水泥土桩复合地基的设计,需要先进行参数选择,根据经验和临近相似工程的取值作为参考进行布桩设计,之后再利用公式(3)~(5)做变形和承载力验算和现场载荷试验验算,若验算不通过需重新设计。

本文的研究仍存在下述部分不足,有待进一步研究。

1) 水泥土桩荷载传递规律。夯实水泥土桩在施工过程中需要进行重锤夯实挤密,在施工中势必会对桩间土产生一定的扰动,可能会对土体挤密,也可能造成不利影响。扰动之后的土体与桩体的协调作用时,荷载的传递规律势必与原状土体情况下有所出入,有待进一步研究;

2) 关于桩间土的承载力计算。工程实际中桩间土承载力多仍按照天然土体承载力来进行计算,这是不准确的。由于桩对土体的挤密振密作用,以及固化剂的使用必然影响桩间土的承载力,因此具体取值需要按现场载荷试验进行确定。关于桩间土承载力如何确定,也是目前研究中的一项重要内容;

3) 基础刚度的影响。一般可以通过实验比较,通过控制变量法进行多组实验的对比观察影响因素的影响程度,或通过数值分析进行模拟计算。

## 参考文献

- [1] 佟建兴,孙训海,杨新辉,罗鹏飞,闫明礼.不同桩体材料复合地基承载及变形性状对比试验研究[J].北京科技大学学报,2013,35(9):1241-1248.
- [2] 乔卫青.夯实水泥土桩复合地基加固机理试验分析[J].路基工程,2008(4):123-124.
- [3] 高笑娟,李跃辉,马建军,杨晓斌.夯实水泥土桩复合地基的应用和承载力分析[J].河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(5):62-67+8.
- [4] 佟建兴,闫明礼,孙训海,杨新辉,王明山.夯实水泥土桩复合地基有效桩长与桩身强度关系试验研究[J].岩土力学,2012,33(S1):30-36.
- [5] 闫明礼,滕延京,杨焕玲,徐克伟,梁军,吴廷杰,杨志红.夯实水泥土桩复合地基的工程应用研究[J].建筑科学,1997(6):20-24.
- [6] 徐静波,杨有海.郑西客运专线夯实水泥土桩复合地基水泥黄土试验研究[J].兰州工业学院学报,2013,20(6):54-57.
- [7] 郭忠贤,杨志红,王占雷.夯实水泥土桩复合地基桩土应力比的研究[J].工程勘察,2006(6):10-13.
- [8] 郭忠贤,王占雷,杨志红.夯实水泥土桩复合地基共同作用的试验研究[J].岩土力学,2007(4):763-768+773.
- [9] 赵军贤,麻桂芳.夯实水泥土桩复合地基桩土应力比影响因素分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2007(3):329-333.
- [10] 郭忠贤,霍达,张明聚.夯实水泥土桩复合地基承载特性分析[J].北京工业大学学报,2009,35(8):1045-1053.
- [11] 王兵,杨为民,李占强,赵常州.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(2):403-408.
- [12] 杨志红,郭忠贤.夯实水泥土桩复合地基垫层效应研究[J].岩土工程学报,2010,32(S2):578-581.
- [13] 张厚先,胡长明,郭文涛.夯实水泥土桩复合地基的优化设计研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(8):72-75.