

不均匀堆土载荷作用下桥梁桩基变形试验研究*

Experimental Study on Deformation of Bridge Pile Foundation under Uneven Soil Loading

李小林¹, 赵蕊¹, 宋园²

(1. 渭南职业技术学院, 陕西渭南 714000;
2. 信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西西安 710054)

摘要: 公路沿线两侧堆放的大量弃土会产生一定的堆载作用, 造成桥梁桩基发生变形, 为避免堆载对桥梁桩基造成无法挽回的影响, 设计不均匀堆土载荷作用下桥梁桩基变形试验研究。选取合安铁路某桥梁段 58 号、59 号桥墩作为试验桩基, 使用大体量钢箱作为试验箱, 将两个试件置于其中并填土, 使用加载装置, 布置不同加载间距、不同加载等级, 以及不同加载时长下, 验证桥梁桩基的变形情况。经试验验证: 58 号桩基、桩顶的水平位移、竖向位移以及变形值要略高于 59 号; 当堆积间距为 160 cm 时, 两桩基的水平位移在 5 mm 之内, 桩基的竖向位移均保持在 -3.0 mm, 形变值逐渐减小; 当载荷等级逐渐加大, 达到 120 kN 时, 58、59 号桩基的水平位移量分别达到了 25 kN、22 kN, 使桥梁桩基变形越严重, 且在较大堆载作用下, 桩基的竖向位移范围越大。

关键词: 不均匀; 堆土载荷; 桥梁桩基变形; 水平位移; 沉降量; 堆载间距

中图分类号: TU473. 1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0085-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.015

LI Xiaolin¹, ZHAO Rui¹, SONG Yuan²

(1. Weinan Vocational & Technical College, Weinan 714000, China;

2. China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710054, China)

Abstract: A large number of spoils stacked on both sides of the highway will produce a certain stacking effect, causing the deformation of bridge pile foundation. In order to avoid the irreparable impact of stacking on bridge pile foundation, an experimental study on the deformation of bridge pile foundation under uneven stacking load is proposed. The No. 58 and No. 59 piers of a bridge section of He'an railway are selected as the test pile foundation, and the large-scale steel box is used as the test box. Two test pieces are placed in it and filled with soil, and the loading device is used to verify the deformation of the bridge pile foundation under different loading spacing, loading grades and loading duration. The test shows that the horizontal displacement, vertical displacement and deformation value of No. 58 pile foundation and pile top are slightly higher than that of No. 59 pile foundation; When the stacking distance is 160 cm, the horizontal displacement of the two pile foundations is within 5 mm, the vertical displacement of the pile foundations is kept at -3.0 mm, and the deformation value gradually decreases; when the load level gradually increases to 120 kN, the horizontal displacement of pile foundation No. 58 and No. 59 reaches 25 kN and 22 kN respectively, which makes the deformation of bridge pile foundation more serious, and the vertical displacement range of pile foundation is larger under the action of large surcharge load.

Keywords: non-uniformity; pile load; bridge pile deformation; horizontal displacement; settlement; stack space

* 基金项目: 陕西省教育厅科研项目 (19JK0301); 渭南市科技计划项目 (2020ZD YF-SFG G-95)。

作者简介: 李小林 (1984—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 黄土力学、桩基工程、支护工程研究。

收稿日期: 2022-08-04

道桥技术

0 引言

铁路、公路建筑规模持续扩大, 各类桥梁的里程不断增加, 但由于目前施工条件的不足以及桥梁周围环境的破坏^[1-3], 大量挖方产生的弃土出现大量堆积^[4], 引起较多地质灾害情况发生, 当弃土靠近桥梁桩基时, 若出现滑坡、泥石流等灾害, 会对桥梁造成巨大的影响^[5]。

此时, 需要提前分析桥梁桩基在堆载下的变形机理, 使桥梁维护人员可以在危害还未发生之前就对弃土处理^[6-7]。有较多学者对此研究, 例如王崇淦等^[8], 研究堆载对既有高铁桥梁桩基承载性能影响, 但该方法仅针对大范围堆载作用研究, 对于不均匀的堆载作用并未采取详细实验, 例如黄瑞堂等^[9], 研究邻近堆载作用下群桩变形特性, 虽然该方法全面研究邻近堆载状态下桩基的位移情况, 但该方法未全面分析桩基沉降问题。

为此, 本文研究不均匀堆土荷载作用下桥梁桩基变形试验, 利用试验全面分析不均匀堆载时桩基的位移情况。

1 桥梁桩基变形研究

1.1 工程概况

选取合安铁路某桥梁段研究, 现阶段桥梁周围存放较多的工程弃土, 且堆载土体均处于 58~59 号桥墩周围。该路段桥梁为简支梁, 其中, 58、59 号墩桩长分别为 29.5 m、28.5 m。在桥梁现场周围采集土样, 并在室内检测得到土样参数^[10], 具体如表 1 所示。

表 1 土样参数分析
Table 1 Soil sample parameter analysis

名称	粉质黏土	粉质黏土	全风化混合花岗岩	强风化混合花岗岩	桥墩	承台
厚度/m	3.1	11.92	13.2	99.4	—	—
天然容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	19.2	20.2	22	23	—	—
黏聚力/kPa	20	22	34.4	36	—	—
内摩擦角/ $^{\circ}$	40	40	26.3	30	—	—
弹性模量/ MPa	14.01	15.07	29.16	33.31	33000	33000
泊松比	0.34	0.34	0.24	0.24	0.14	0.14
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.92	1.92	2.2	2.3	2.45	2.45

试验两桩基的桩身配筋情况如图 1 所示。

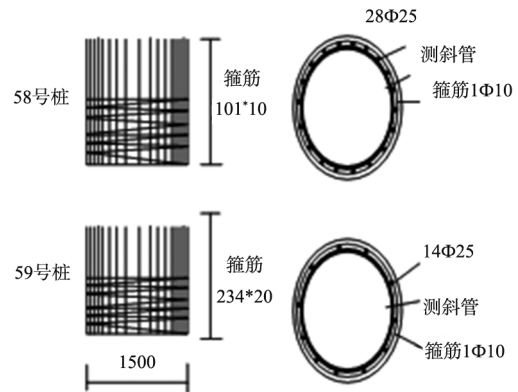


图 1 桩身配筋图

Fig. 1 Pile reinforcement figure

根据图 1 中配筋情况, 按照实际桥梁桩基参数, 选取 0.42 缩尺比等比例制备两个桥梁桩基试件, 试件实物图见图 2。



图 2 桥梁桩基试件

Fig. 2 The bridge pile foundation specimen

试件桥梁桩基的高度为 3.32 m, 横向宽度为 2.03 m, 厚度为 0.25 m, 纵筋为 $\Phi 10$ 带肋钢筋, 箍筋为 $\Phi 6$ 光圆钢筋, 经测试确定所用配筋的屈服强度为 348 MPa。经过测量, 这两个试件的屈服强度与抗压强度以及弹性模量分别为 226 MPa、249 MPa、219 GPa^[10-11]。

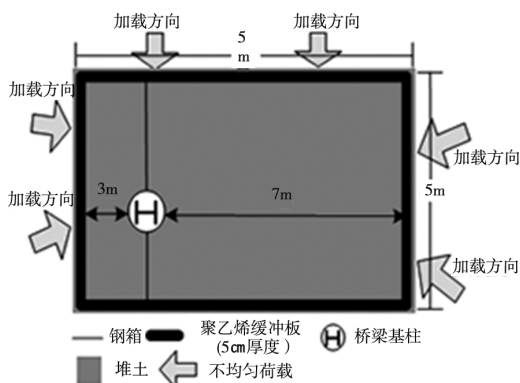
1.2 不均匀堆土加载方案

不均匀堆土荷载需要在一个大型矩形钢箱中进行, 考虑所制备的桥梁桩基体量较大, 所以需要的试验钢箱也较大, 试验中要求钢箱内部大小能够达到桩基直径 5 倍大小, 但是可以不考虑钢

箱边界效应^[12-14]，按照这些需求钢箱的长、宽、高分别为 15 m、5 m、3 m，钢箱的外观以及试件在该钢箱中的位置布置情况见图 3。



(a) 试验用钢箱



(b) 钢箱内试件与土体布置

图 3 钢箱及试件内置情况

Fig. 3 Steel box and specimen internal situation

试验开始时，加载装置从各个方向施加荷载，影响土体，钢箱内的土体就具有不均匀荷载。试验过程中将两种不同的试件分别置于试验所使用的钢箱之中，试件所处位置不居中，以此验证不均匀堆土荷载对于桥梁基桩施加荷载后基桩的变形情况。

1.3 试验过程

(1) 布置测试点

钢箱外部布置多个位移计，数值显示装置位于钢箱外部，探针等设施深入钢线之中，连接桥梁桩基，通过位移计获得不均匀堆土荷载下，桥梁桩基的位移情况，位移计布置情况见图 4。

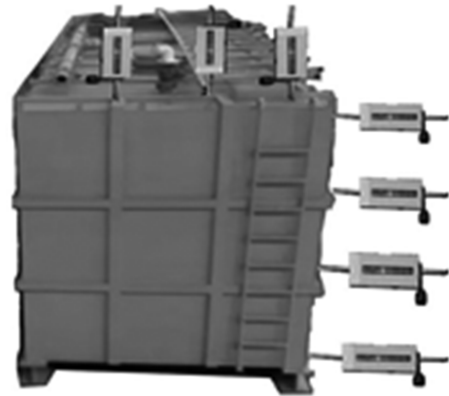


图 4 布置位移计

Fig. 4 Layout a displacement meter

(2) 不均匀荷载加载方式

使用电液伺服加载装置向上文所制备的试验装置施加往复低周不均匀荷载，分级加载过程中利用位移控制方式，1 Hz 加载频率，每加载一次持续 35 s，为使试验结果更加准确，每次结果取值为第二次循环的加载结果。

(3) 堆载间距对于桥梁桩基变形影响

同时从多个加载点向试验钢箱施加不均匀堆土荷载设置加载点的间距分别为 40 cm、80 cm、120 cm、160 cm，使用位移计记录不同加载间距下，各个试件的水平位移变化情况^[15]。

(4) 荷载等级对于桥梁桩基变形影响

在钢箱上没间隔 5 cm 布置一个不均匀荷载加载点，各个减灾点分别分四次施加荷载，荷载数值分别为 30 kN、60 kN、90 kN、120 kN，分析不同荷载等价下，两种不同的桥梁桩基所出现的变形情况。

(5) 加载时长差异对于桥梁桩基变形影响

加载时长差异也会导致桥梁桩基的变形形态存在差异，向试验用钢箱施加不同等级的不均匀堆土荷载，测量不同加载时长下，两种桥梁桩基试件的变现情况，加载时长分别为 7 d、14 d、21 d、28 d。

2 试验分析

分析不均匀堆载对桥梁桩基变形的影响，从不同堆载间距、不同荷载等级等方面研究，获取桩基变形规律，其中，不同堆载间距与荷载等级的测试结果均在堆载后第 7 天测试，具体试验结

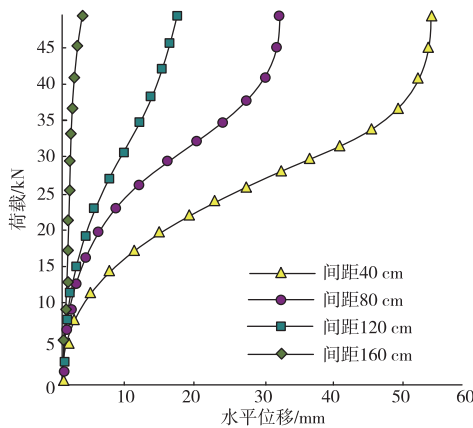
道桥技术

果如下。

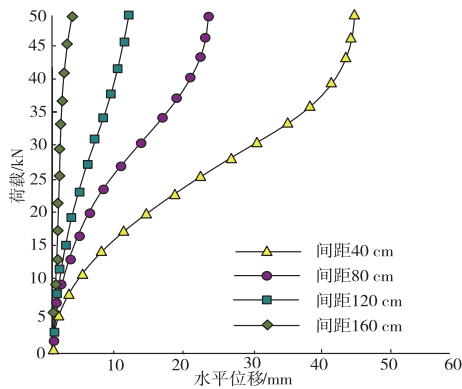
2.1 不同堆载间距

由于桩体 X 向的剪力与 Y 向弯矩受堆载影响较大, 因此仅针对这一方向上的位移情况研究, 而载荷等级统一为 145 kPa, 统一堆载。

针对 58 号、59 号桥墩, 依次分析不同堆载间距对桥梁桩基变形的影响, 得到两个桩基的水平位移情况, 如图 5 所示。



(a) 58 号桩水平位移情况



(b) 59 号桩水平位移情况

图 5 桩基水平位移分析

Fig. 5 Horizontal displacement of pile foundation analysis

由图 5 可以看出, 桩基的水平位移与堆载间距呈负相关, 当堆载间距越大, 桩基的水平位移就越小。其中, 58 号桩基的水平位移量略大于 59 号桩基的位移量, 这是由于 58 号墩桩相对高于 59 号墩桩, 在堆土载荷作用下, 墩桩高度会对位移产生轻微影响。58 号墩桩在堆载间距 40 m 时, 水平位移达到 50 mm 以上。而 59 号墩桩水平位移则保持在 45 mm 左右, 当堆载间距达到 160 m 时,

两墩桩的水平位移均保持在 5 mm 以内。

分析两个墩桩桩顶在不同堆载距离下, 水平位移产生的变化情况, 分析结果如图 6 所示。

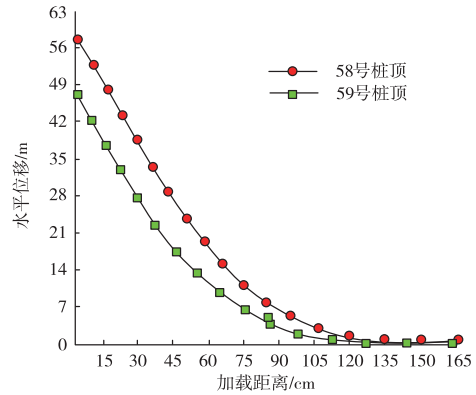


图 6 桩顶水平位移与堆载距离之间的关系

Fig. 6 Top horizontal displacement of piles and pile load distance relationship

由图 6 可知, 随着堆载间距的逐渐加大, 桩顶的水平位移量逐渐降低, 这与桩基的水平位移变化一致, 其中, 58 号桩顶的最高水平位移量达到 56 cm 以上, 而 59 号桩顶的水平位移量最高在 46~47 cm 之间, 当堆载间距达到 135 cm 以上时, 两墩桩桩顶水平位移均保持在 5 cm 以下。

分析两墩桩在不同堆载间距下的桩顶竖向变形量, 分析结果如图 7 所示。

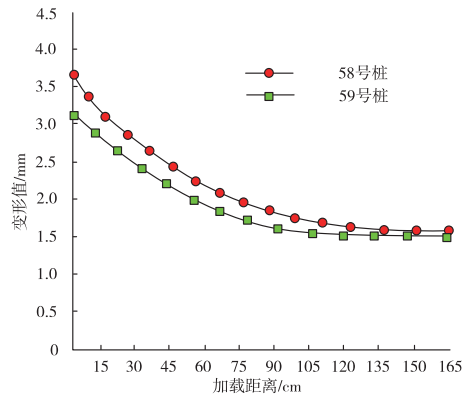
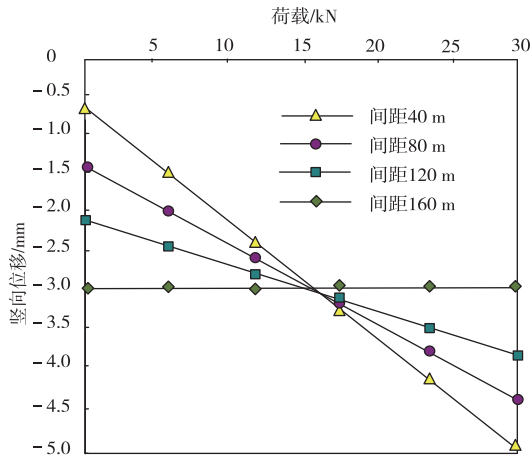


图 7 桩顶沉降量分析

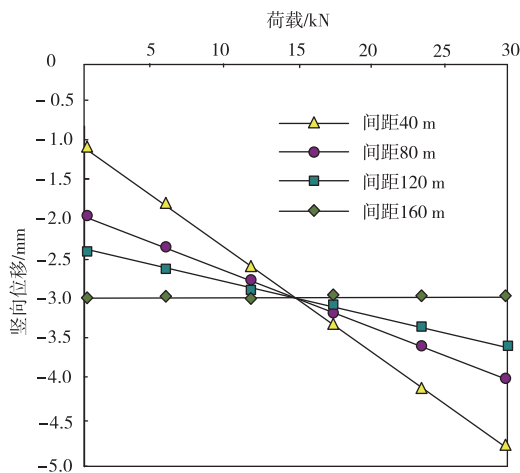
Fig. 7 The pile top settlement analysis

由图 7 可知, 随着堆载间距的加大, 两墩桩的桩顶变形量出现缓慢下降, 这是由于堆载越密集, 桩周围土体受堆载影响越大。其中, 58 号桩最大变形值在 3.5 cm 以上, 而 59 号桩的最大变形值在 3.0 cm 以上, 当堆载间距加大, 两桩桩顶的变形值逐渐接近, 最终达到 1.5~2.0 cm 之间。

分析不同堆载间距下堆土载荷作用对两墩桩变形情况的影响，并通过竖向位移表示，分析结果如图 8 所示。



(a) 58 号桩竖向位移情况分析



(b) 59 号桩竖向位移分析

图 8 墩桩竖向位移情况研究

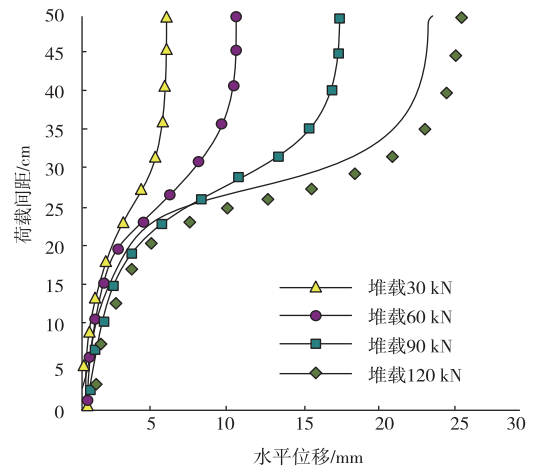
Fig. 8 Vertical displacement of pier pile research

由图 8 可知，当堆载间距越小，墩桩的竖向位移变化就越大，则变形范围就越大。其中，58 号桩的竖向位移要略低于 59 号桩，58 号桩在堆载间距 40 m 时，竖向位移保持在 $-5.0 \sim -0.7$ mm 之间，位移变化较大，而此时 59 号桩的竖向位移量处于 $-4.7 \sim -1.0$ mm 之间，当堆载间距达到 160 m 时，两墩桩的竖向位移量均保持在 -3.0 mm，且未出现其他变化，说明此时竖向位移变化稳定。

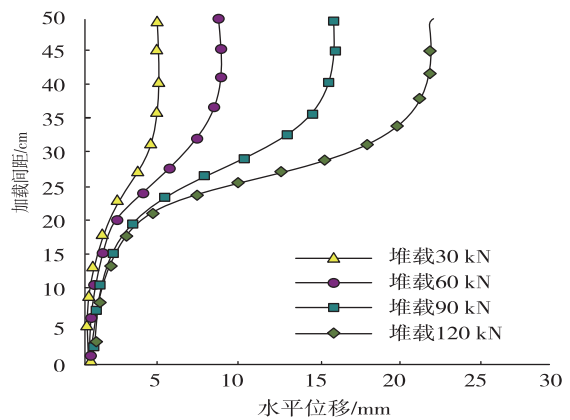
2.2 不同载荷等级

分析不同载荷等级对桥梁桩基的影响。不同

载荷等级下，桥梁桩基的水平位移情况，分析结果如图 9 所示。



(a) 58 号桩基水平位移情况



(b) 59 号桩基水平位移情况

图 9 桥梁桩基的水平位移情况分析

Fig. 9 Horizontal displacement of bridge pile foundation analysis

由图 9 可知，当载荷等级不同时，桩基的水平位移趋势基本一致。当载荷等级不断加大，水平位移的变化也随之加大，当加载距离达到 25 cm 时，两桩基的水平位移基本保持在 2 mm 以内；其中，58 号桩基的水平位移量略高于 59 号桩基，58 号桩基在载荷等级为 30 kN 时，水平位移达到了 5 mm 以上。此时，59 号桩基的水平位移保持在了 5 mm 以内，当载荷等级达到 120 kN 时，58、59 号桩基的水平位移量分别达到了 25 kN、22 kN，并未存在较大差距。由此可知，当载荷等级加大，会对桩基的水平位移造成一定影响。

分析随着载荷等级的上升，两墩桩桩顶的水

道桥技术

平位移情况, 分析结果如图 10 所示。

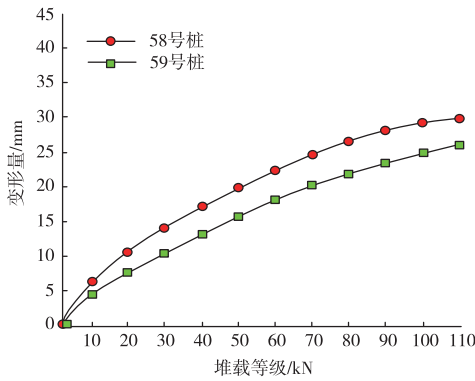


图 10 桩顶水平位移情况分析

Fig. 10 The pile top horizontal displacement situation analysis

由图 10 可知, 当堆载等级不断提升, 两墩桩桩顶的水平位移也随之加大。其中, 58 号桩顶的水平位移相对略高, 当堆载等级达到 110 kN 时, 58 号桩桩顶的水平位移达到 25 kN 以上, 这与桩基的水平位移情况较为相似。由此可知, 堆载等级的加大, 同样会使桩顶的水平位移加大。

分析不同堆载等级下, 两墩桩的变形量变化, 分析结果如图 11 所示。

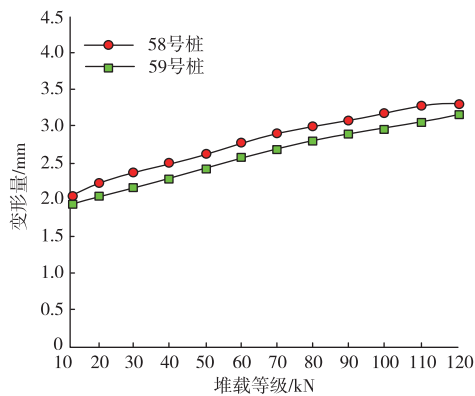
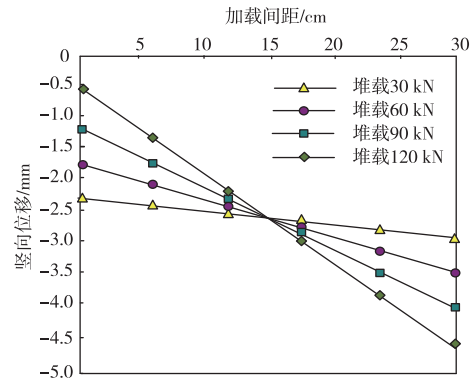


图 11 不同堆载等级下沉量变化分析

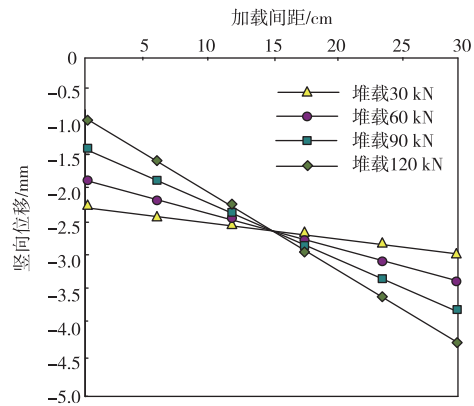
Fig. 11 Settlement under the different stack rank analysis

由图 11 可知, 两墩桩在不同堆载等级下沉降量变化十分接近。其中, 58 号墩桩变形量由 2.0 mm 逐渐上升到 3.0 mm 以上, 而 59 号墩桩的变形量最低未达到 2.0 mm, 且最高也保持在 3.0 mm 以下。说明 59 号桩基变形量相对较低, 而随着堆载等级的逐渐上升, 变形量明显得到增加, 导致桩基出现变形变化。

分析不同堆载等级下, 两墩桩的竖向位移变化, 分析结果如图 12 所示。



(a) 58 号桩基竖向位移变化



(b) 59 号桩基竖向位移变化

图 12 桩基竖向位移变化分析

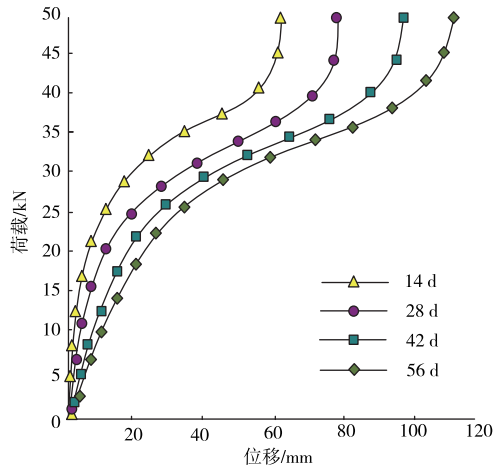
Fig. 12 The pile vertical displacement change analysis

由图 12 可知, 当堆载强度逐渐提升, 两墩桩桩基的竖向位移范围逐渐加大。在堆载等级为 30 kN 时, 两桩基的竖向位移十分相似, 均保持在 -2.0 ~ -3.0 mm 之间。当堆载等级达到 120 kN 时, 58 号桩基的竖向位移达到了 -0.5 ~ -5.0 mm 之间, 而 59 号桩的竖向位移为 -4.5 ~ -1.0 mm 之间, 说明在较大的堆载等级下, 58 号桩的竖向位移相对较大。

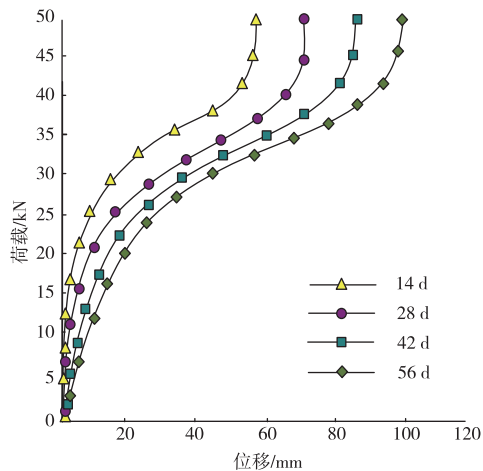
2.3 不同检测日期下桩基变形情况

设置堆载等级为 145 kN, 对堆载数天后两桩基位移情况研究, 研究结果如图 13 所示。

由图 13 可知, 随着堆载放置日期的不断加大, 两桩体的位移情况也不断扩大, 导致桩基引起一定程度的变形。其中, 58 号桩基的位移情况略大于 59 号桩基, 但并未出现较大差距。通过这一试验可以看出, 快速堆载完成后, 随着日期的不断加大, 桩基依然会出现继续变形。



(a) 58号桩基变形情况分析



(b) 59号桩基变形情况分析

图 13 桩基位移变形试验分析

Fig. 13 The pile displacement deformation test analysis

3 结论

研究不均匀堆土载荷作用下桥梁桩基变形试验,设计不均匀堆载方式在试验区堆载,并利用数值计算模型对桥梁桩基的变形机理分析,经试验分析后,得到精准的桩基位移与变形情况。在未来研究过程中,可利用当前试验方法与结果继续深入试验,计算分析更多的桥梁桩基变形情况,维护桥梁桩基的稳定,使公路或高铁线路运行更加安全。

参 考 文 献

- [1] 王林峰,何静,唐宁,等. 振动荷载作用下桥梁桩基筑岛平台变形机制研究 [J]. 人民长江, 2021, 52 (12): 181-187.
- [2] 宋剑,张蛟,成进科,等. 抗滑桩对桥梁桩基受力变形影响的模型试验研究 [J]. 公路, 2022, 67 (4): 118-124.
- [3] 章维明. 桥梁桩基础施工对既有明挖隧道变形影响研究 [J]. 公路工程, 2020, 45 (2): 143-146+167.
- [4] 马重,何峰,傅承诚,等. 软土地区堆载下邻近高铁桩基侧向变形研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (S2): 769-776+811.
- [5] 孔德森,张杰,巩越. 波浪荷载作用下近海风电单桩基础受力变形特性影响因素分析 [J]. 海洋通报, 2020, 39 (5): 632-640.
- [6] 黄戡,孙逸玮,杨伟军,等. 基于渗流应力耦合的盾构隧道开挖对邻近桥梁桩基的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (3): 983-993.
- [7] 高海军,董丁明,赵琪,等. 循环荷载作用下加筋土路基动力响应研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (1): 208-215+230.
- [8] 王崇淦,蒋志琳,朱禹,等. 大面积堆土荷载对既有高铁桥梁桩基承载性能影响分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (5): 1090-1096.
- [9] 黄瑞堂,李友元,王新浪,等. 邻近堆载作用下群桩变形特性的室内模型试验研究 [J]. 铁道建筑, 2021, 61 (1): 35-38+60.
- [10] 叶好文,麦健,张学峰. 公路桥梁桩基础受竖向荷载桩侧土接触面损伤机理模型试验研究 [J]. 公路交通科技, 2021, 38 (6): 104-111.
- [11] 李龙起,赵皓璐. 竖向荷载作用下倾斜群桩受力及桩身变形性状研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (3): 72-78.
- [12] 王晓佳,张启伟. 软土地区地面堆载对桥梁下部结构的影响分析 [J]. 结构工程师, 2020, 36 (4): 145-150.
- [13] 董芸秀,冯忠居,冯凯,等. 下伏软弱夹层路基堆载对桩基影响及处治方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (4): 1219-1229.
- [14] 潘良,祝兵,张家玮,等. 考虑多土层的波-流荷载下跨海桥梁桩基动力响应分析 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (12): 76-82.
- [15] 张振华,陆金桂. 基于改进卷积神经网络的混凝土桥梁裂缝检测 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (11): 490-494.