

Numerical Analysis of the Influence of Surcharge Loads on the Adjacent High-Speed Railway Pile Deformation

Zhong Ma¹, Chengcheng Fu², Xin Huang¹

¹Tongji University, Shanghai

²Shaoxing Keqiao District Rail Transit Group Co. LTD., Shaoxing Zhejiang

Email: madrone123@163.com

Received: Feb. 8th, 2020; accepted: Feb. 21st, 2020; published: Feb. 28th, 2020

Abstract

Surcharge loads will cause lateral and vertical displacement of adjacent high-speed railway pile in soft ground. Different types of surcharge loads will directly affect the displacement model and the size of pile. Based on the engineering case of the impact of the construction load on the adjacent Hangyong railway in Wanxiulu vehicle base in Shaoxing, the paper studies the deformation model of the high-speed railway pile under the surcharge loads by numerical simulation method, then studies the influence of loads height, loads distance, loads concentration, loads stiffness and loads position. The results show that the displacement of high-speed railway pile is mainly the lateral displacement, which will increase with the increase of loads height, the decrease of loads distance and the increase of loads concentration, and the influence of loads stiffness is related to the magnitude of loads. In addition, when the location of loads changes, the pile at the edge of the loads will produce larger lateral deformation, which needs to be focused on and protected. The research results can provide technical support for the design and optimization of construction loads in soft soil area.

Keywords

Surcharge Loads, Soft Soil Foundation, High-Speed Railway Pile, Numerical Simulation

堆载对邻近高铁桩基变形影响的数值分析研究

马 重¹, 傅承城², 黄 昕¹

¹同济大学, 上海

²绍兴市柯桥区轨道交通集团有限公司, 浙江 绍兴

Email: madrone123@163.com

收稿日期：2020年2月8日；录用日期：2020年2月21日；发布日期：2020年2月28日

摘要

软土地基上的堆载会使邻近高铁桩基产生侧向和竖向位移，不同的堆载形式会直接影响桩基的位移规律和大小。基于绍兴万绣路车辆基地施工堆载对邻近杭甬客专影响的工程案例，采用数值模拟的方法，研究堆载作用下高铁桩基变形规律，并探究堆载高度、堆载距离、堆载集中度、堆载刚度、堆载位置等参数对于高铁桩基变形的影响。计算结果表明，高铁桩基以侧向位移为主，且桩基侧向位移随堆载高度增加、堆载距离减小、堆载集中度增大而增加，而堆载刚度的影响和堆载荷载大小有关。此外，当堆载位置变化时，处于堆载边缘的桩基会产生更大的侧向变形，需要对其提供重点关注和保护。研究结果可为软土地区施工堆载的设计与优化提供技术支持。

关键词

堆载，软土地基，高铁桩基，数值模拟

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

高速铁路对线路的平顺性有非常高的要求，而当高铁附近存在大面积堆载时，堆载首先会压缩地基，使得地基土体产生竖向沉降和侧向位移。地基土体的变形会进一步作用于邻近的高铁桩基，使得高铁桩基产生相应的竖向和侧向位移，威胁高铁的运营安全[1] [2] [3]。

国内外学者对堆载作用下高铁桩基变形及相关影响参数进行了研究。代恒军[4]等研究了堆载作用下，土体弹性模量和桩身刚度对桩基变形的影响，并将数值计算结果与实测数据进行对比，发现土体弹性模量对桩基变形影响更显著。梁育玮[5]等通过 PLAXIS 3D 软件和离心机试验，研究了桩与承台接触方式、桩与土体接触方式对堆载作用下桩基变形的影响，同时根据墩顶侧向水平位移限值得到了堆载允许高度。Bransby 和 Springman [6]采用非线性土体本构模型，研究了土体原位应力和应力路径对堆载作用下桩基变形的影响，并通过离心机模型研究了土体和桩基的相互作用方式，探究了堆载作用下桩基变形机理。

一些学者研究了堆载作用下高铁桩基的受力特性和极限承载力。宫玉明[7]等利用理论计算及三维有限元数值计算，分析了施工过程中附加荷载对桩基负摩阻力的影响，并发现角桩更容易处于不利情况，是安全监测重点。江杰[8]等应用 FLAC^{3D} 程序着重分析了桩侧堆载对土体及试桩受荷性状的影响，并评估了堆载影响下单桩极限承载力的变化。Jesmani [9]等针对桩的不同几何形状以及桩与堆载的不同距离进行了一系列三维数值分析，得到了不同参数下的桩基轴力、附加弯矩和极限承载力的变化规律。

目前，大部分研究着重于堆载及桩基参数对高铁桩基的影响，而堆载参数和堆载位置对桩基影响的研究较少。当高铁附近存在施工堆载时，往往需要对施工堆载的位置、形状进行设计，以减小对高铁桩基的影响。本文基于浙江绍兴境内万绣路车辆基地施工对邻近杭甬客专影响的工程案例，结合 FLAC^{3D} 分析软件，研究堆载高度、堆载与承台距离、堆载集中度和堆载刚度对高铁桩基的影响，并计算同一堆载的 16 个不同堆载位置下桩基的变形，得到施工场地内堆载最优位置、最不利位置和对应的最不利桩基，

为高铁桩基附近施工堆载的设计优化提供技术支持。

2. 工程概况

万绣路车站基地为杭州至绍兴城际铁路的重点工程，其北侧紧邻杭州市至宁波市的高速铁路——杭甬客专。在车站建设过程中，不可避免地会出现大型机械、场地填土等施工堆载，直接影响到邻近高铁的运营安全。

车辆段段址长约 1.05 km，宽约 0.45 km，大致呈东西向布置，其下卧地基以软土为主，具有泊松比大、压缩性高的特点。根据地勘报告，选取该地区的典型土层如下：① 黏质粉土，中等压缩性，层厚约为 5 m；② 淤泥，具高压缩性，层厚约为 12 m；③ 粉质黏土，局部含少量粉砂，层厚约为 26 m；④ 细砂，力学性质良好，层厚约为 16 m；⑤ 强风化凝灰岩，块状构造，层厚约为 14 m。表 1 是每层土体的详细的物理力学参数。

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil layer

表 1. 土层物理力学参数

土层	重度(kN/m ³)	压缩模量(MPa)	泊松比	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	土层厚度(m)
黏质粉土	18.8	6.2	0.35	19.5	14.7	4.5
淤泥	17.8	2.8	0.42	20.3	11.8	12.0
粉质黏土	19.0	5.5	0.38	25.0	14.3	26.0
细砂	18.8	18.0	0.28	0	36.0	16.0
强风化凝灰岩	19.0	40.0	0.20	5.0	45.0	14.0

杭甬客专高铁桥梁的桥墩间距为 32 m。桥墩下方矩形承台的尺寸为 12 m × 6 m × 2.5 m，且每个承台下方设置 8 根桩径为 1.25 m、桩长为 50 m 的桩基础。桩基础沿纵向(高铁运行方向)布置 2 根，桩间距为 4 m；沿横向布置 4 根，桩间距为 3.2 m。高铁桩基与土体位置的示意图如图 1 所示。高铁桩基、承台等结构均采用强度等级为 C35 的混凝土。

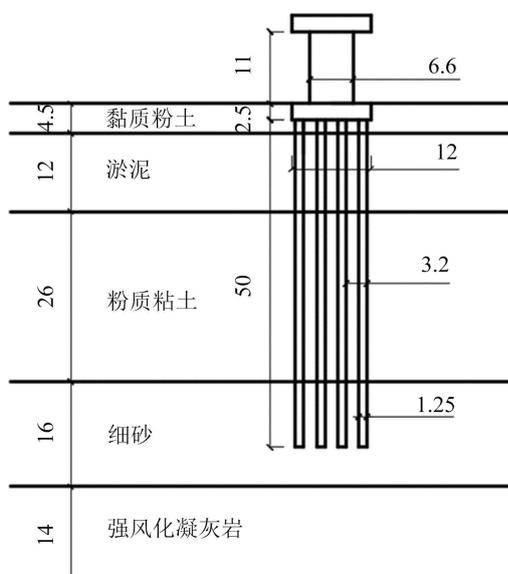


Figure 1. High-speed rail bridge pile foundation (unit: m)

图 1. 高铁桥梁桩基示意图(单位: m)

3. 数值模型

运用 FLAC3D 软件建立三维数值分析模型。模型的总体计算长度取为 260 m，宽度为 120 m，高度为 72.5 m。模型包含土体、堆载、桩基和高铁上部结构。高铁桥梁桩基位于模型右侧，堆载区域位于模型左侧。模型的平面布置图和三维模型图分别如图 2 和图 3 所示。模型上表面为自由边界，四个侧面受到法向位移约束，地基土体底部为固定约束。

土体本构模型采用摩尔 - 库仑模型，将地基土体分为 5 层，具体的物理力学参数参见表 1。此外，高铁桩基和承台等桥梁结构采用弹性模型，模型参数依照 C35 混凝土的物理力学参数，重度取为 25 kN/m³，弹性模量为 33 GPa，泊松比为 0.17。

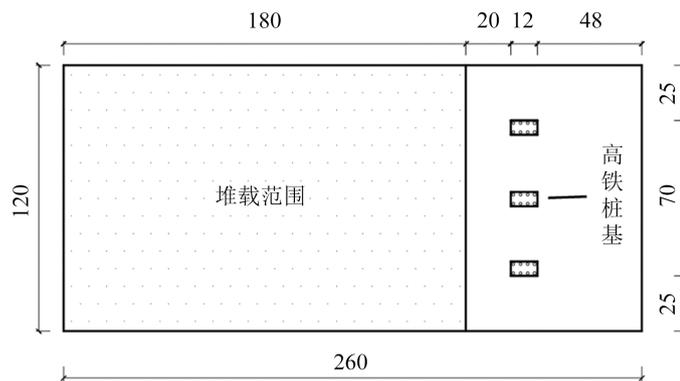


Figure 2. Model layout plan (unit: m)

图 2. 模型平面布置图(单位: m)

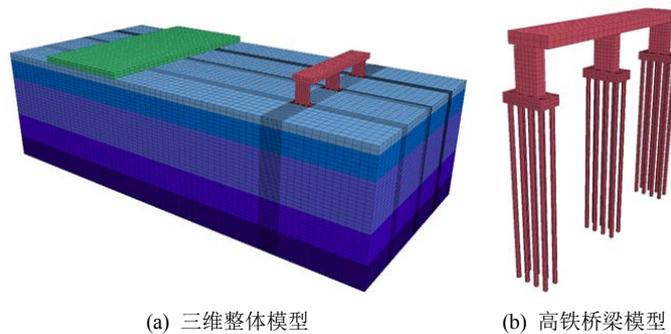


Figure 3. Numerical model

图 3. 数值计算模型

在实际工程中，桩基与地基土体会产生相对位移，在数值模型中，采用 Coulomb 接触面单元来模拟桩与土的相互作用。Coulomb 接触面单元主要包含切向刚度、法向刚度、粘结力、摩擦角等参数，其中切向刚度和法相刚度可以取周围“最硬”相邻区域等效刚度的 10 倍。而对于粘结力、摩擦角等摩擦参数，Acer [10]和 Potyondy [11]的研究表明，对于黏土等软土地基，接触面的摩擦角可以取桩周围土体摩擦角的 0.6~0.7，而接触面的黏聚力约为桩周围土体黏聚力的 0.5 倍。在本模型中，综合考虑桩基施工方式和土体力学性质，接触面的摩擦角取为 9.2°，黏聚力取为 11.2 kPa。

4. 堆载作用下高铁桩基位移基本规律

取堆载土体的长度(高铁运行方向)为 120 m，宽度为 60 m，高度为 4 m，堆载边缘与承台边缘的距离

为 40 m，堆载土体重度取为 16 kN/m^3 。堆载作用下高铁桩基的位移云图如图 4 所示。可以看到，三个承台下的 24 根桩基的侧向位移规律基本一致，都表现为桩身中部侧向位移值最大，桩顶位移值次之，桩底位移值最小，且越靠近堆载的桩基的整体侧向位移值越大。

高铁桩基的竖向位移规律表现为，靠近堆载的桩基因地基沉降而向下移动；远离堆载的桩基受到地基土体隆起的影响而向上移动，从而导致高铁桥梁的桥面倾斜。

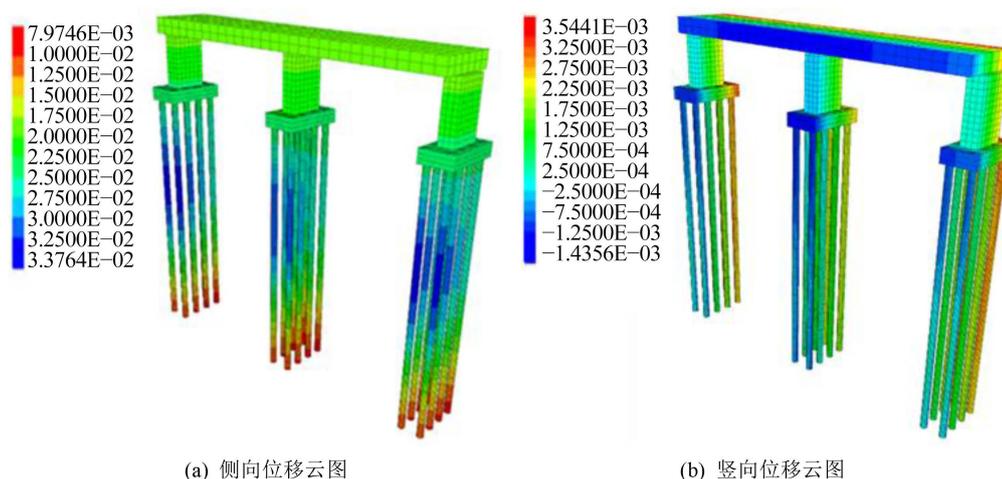


Figure 4. Cloud chart of pile displacement of high-speed railway under surcharge (unit: m)
图 4. 堆载作用下高铁桩基位移云图(单位: m)

同一承台下高铁桩基的桩身侧向位移曲线如图 5 所示。依照与堆载的距离，同一承台下的 8 根桩基可以分为 4 排，每一排桩基的桩身侧向位移曲线规律一致。按离堆载远近，桩的桩身最大侧向位移值依次为：3.2 cm、2.9 cm、2.6 cm、2.5 cm，且离堆载越远，桩身的最大侧向位移点越高。由于桩基顶部被承台约束，故 4 排桩基的顶部位移值相同，且约等于承台位移。所有桩基的桩底侧向位移值也基本相同，大约只有 7.9 mm，一方面由于堆载的影响深度有限，另一方面由于底层土体较硬，对桩基的侧向约束较大，限制了桩基的侧向位移。

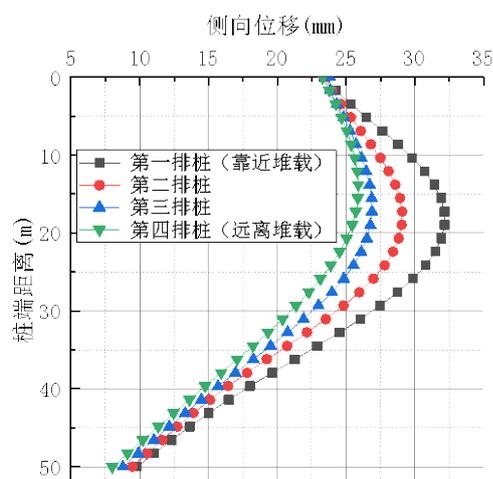


Figure 5. Lateral displacement diagram of high-speed railway pile under surcharge
图 5. 堆载作用下高铁桩基桩身侧向位移图

值得注意的是，高铁桩基的侧向位移量在厘米级，而竖向位移量在毫米级，故堆载作用下高铁桩基的侧向位移远大于竖向位移。董亮[12]等的研究也表明，堆载作用下高铁桩基的侧向位移对高铁运营安全的不利影响更大，故应该着重研究堆载参数和堆载位置对于高铁桩基侧向位移的影响。

5. 堆载参数

在本文中，主要研究堆载高度、堆载与承台距离、堆载集中度以及堆载刚度等因素对高铁桩基侧向位移的影响。

5.1. 堆载高度

取堆载长度(高铁运行方向)为 120 m、堆载宽度 60 m、堆载与承台距离 40 m、堆载土体重度 16 kN/m^3 ，仅改变堆载高度，依次取值为 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m。图 6 是最靠近堆载的桩基桩身侧向位移变化图，图 7 是堆载高度变化时，桩身最大侧向位移的变化曲线。

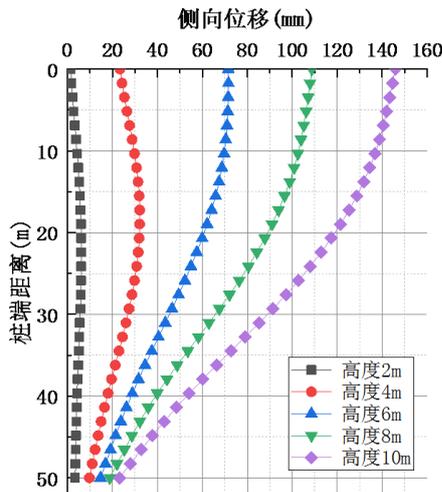


Figure 6. Influence of height on lateral displacement
图 6. 堆载高度对侧向位移影响

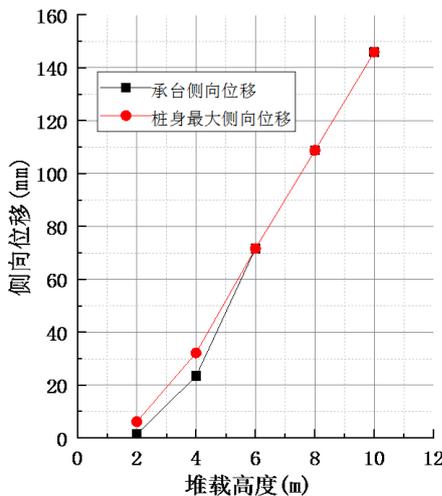


Figure 7. Diagram of maximum lateral displacement
图 7. 侧向位移最大值变化图

随着堆载高度增加，桩身最大侧向位移和承台位移都同步增加。堆载高度增加 5 倍，桩身最大位移增加了近 29 倍。此外，堆载高度增加会导致桩身最大侧向位移点上移，当堆载高度为 6 m 时，桩身最大侧向位移点到达桩顶点，即在此工况下，承台位移等于桩身最大位移。且当桩身最大侧向位移到达桩顶点后，桩身最大位移与堆载高度几乎呈线性关系。

5.2. 堆载与承台距离

改变堆载边缘与承台边缘的距离，分别取 20 m、40 m、60 m、80 m、100 m。堆载高度取为 4 m，其他参数与 5.1 节保持一致。图 8 和图 9 分别为堆载距离变化时，桩基的桩身侧向位移曲线和桩身最大侧向位移变化曲线。

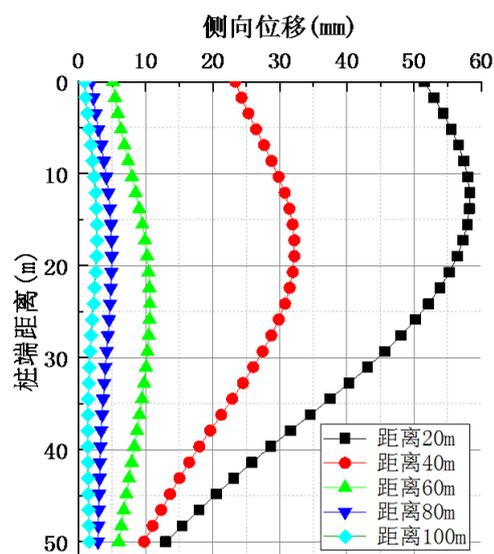


Figure 8. Influence of distance on lateral displacement

图 8. 堆载距离对侧向位移影响

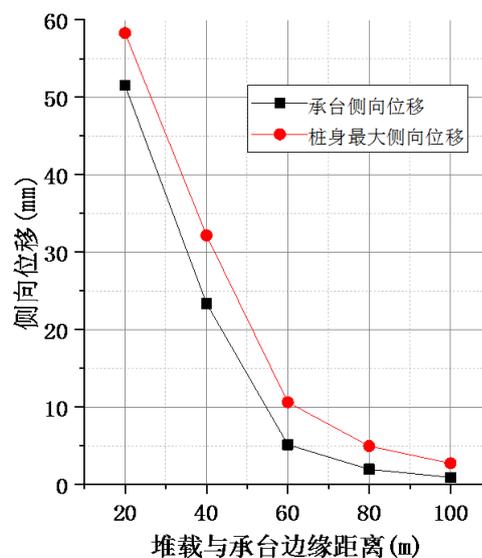


Figure 9. Diagram of maximum lateral displacement

图 9. 侧向位移最大值变化图

随着堆载边缘与承台边缘距离的增加, 桩身侧向位移迅速减小, 同时桩身最大侧向位移点逐渐下移, 且桩身最大侧向位移和承台的侧向位移几乎同步变化。当堆载距离在 20 m~60 m 区间内, 堆载距离对于桩身侧向位移的影响非常大; 当堆载距离增加到 60 m 时, 堆载距离对桩身侧向位移的影响逐渐减小, 桩身位移趋于稳定; 当堆载距离增加到 100 m 时, 桩身最大侧向位移和承台侧向位移几乎不发生变化, 分别稳定在 3 mm 和 1 mm 左右。

5.3. 堆载集中度

表 2 是研究荷载集中度的四种工况。保证堆载的总体积和堆载中心与承台边缘的距离不变。堆载长度(高铁运行方向)为 120 m, 通过不断减小堆载宽度, 增加堆载高度的方式, 来提高荷载集中度, 从而研究其对于高铁桩基侧向位移的影响。

Table 2. Condition of the load concentration
表 2. 堆载集中度的工况

工况	堆载长度(m)	堆载宽度(m)	堆载高度(m)	堆载中心与承台边缘距离(m)
1	120	40	6	70
2	120	30	8	70
3	120	24	10	70
4	120	20	12	70

图 10 为不同工况下的桩身侧向位移图, 图 11 为桩身最大侧向位移变化曲线。可以看到, 对于工况 1、工况 2 和工况 3, 桩身侧向位移变化不大, 此时堆载集中对于高铁桩基影响不大。但从工况 4 的计算结果发现, 当堆载宽度减小到 20 m 时, 荷载集中度会对桩身侧向位移产生显著影响。一方面, 桩身最大侧向位移点由桩中上移至桩顶, 另一方面, 桩身最大位移迅速变大, 增加到 6 cm 左右, 是工况 1 的最大桩身位移的两倍。故在实际工程中, 应该尽量减小施工堆载的集中堆放。

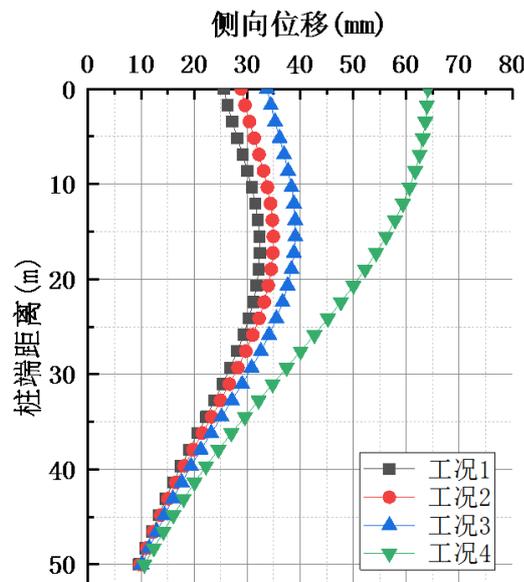


Figure 10. Influence of load concentration
图 10. 荷载集中度的影响

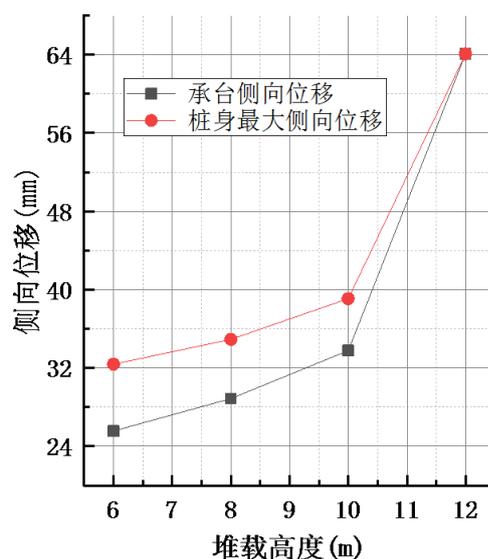


Figure 11. Diagram of maximum lateral displacement

图 11. 侧向位移最大值变化图

5.4. 堆载刚度

在施工现场,除了存在填土等柔性堆载外,还存在混凝土等刚度较大的刚性堆载。不同的堆载刚度会影响堆载下方地基土体的受力和变形,从而影响邻近高铁桩基的侧向变形。刚性堆载的参数采用重度和和土体一样的轻混凝土材料,以便保证除刚度参数外的其他参数一致。轻混凝土的刚度参数如下:弹性模量取 12.5 GPa,泊松比取 0.2。

图 12(a)为堆载高度为 4 m,堆载宽度为 60 m 时,两种刚度堆载下桩基最大侧向位移随堆载距离的变化图。图 12(b)是堆载宽度为 60 m,堆载与承台距离为 40 m 时,两种刚度堆载下桩基最大侧向位移随堆载距离的变化图。可以发现,当堆载高度较高或堆载距离桩基较近时,土体堆载会使得桩基产生更大的侧向变形。而当堆载高度较小或堆载距离较远时,轻混凝土堆载会使得桩基产生更大的侧向变形。

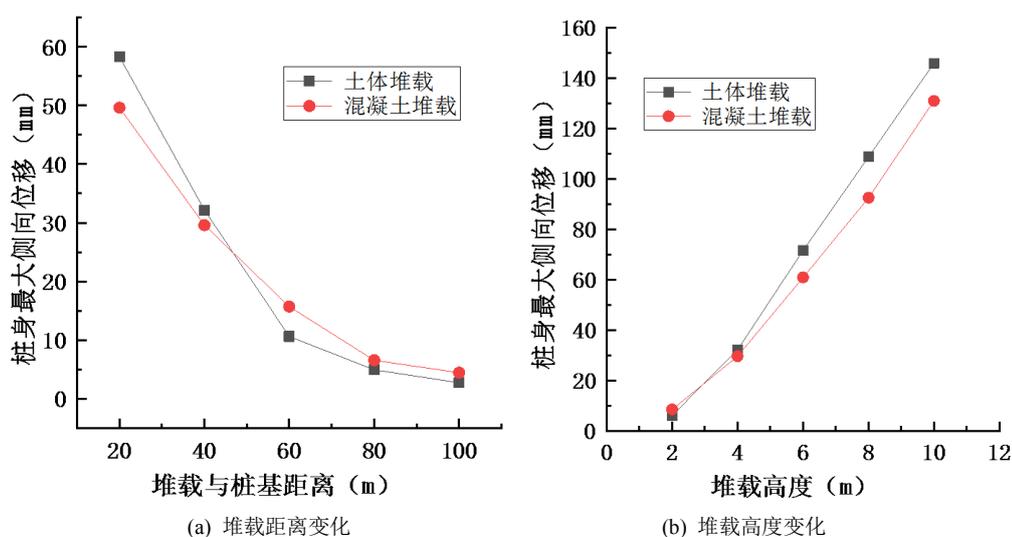


Figure 12. Influence of loads stiffness

图 12. 堆载刚度的影响

6. 堆载平面位置

为了直观展示堆载在不同位置时高铁桥梁桩基的位移情况，将堆载最有可能出现的区域进行划分，一共分为 16 个小格，分别在 16 个小区域上施加堆载，并计算高铁桥梁桩基的位移，堆载出现区域的划分示意图如图 13 所示。

在图 13 中，每个小区域为正方形，边长为 30 m，堆载土体高度取为 10 m，土体重度为 16.0 kN/m^3 。实际工程往往更加关心所有桩基中的最大桩顶位移值，以及产生最大桩顶位移的桩的位置。由第 4 节可知，桩顶最大位移只可能发生在距离堆载最近的 6 根桩基中，将这 6 根桩基从左至右依次命名为 1 号桩基、2 号桩基、……、6 号桩基。

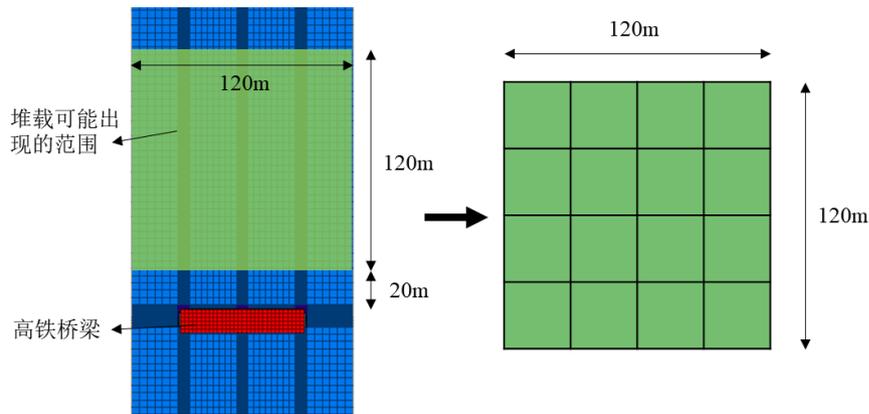


Figure 13. Schematic diagram of surcharge loads area
图 13. 堆载区域示意图

图 14 为堆载作用在不同位置时，高铁桩基的最大桩顶侧向位移值的方格图。其具体意义为：当堆载作用于相应位置时，格子中的颜色对应的数值为 6 根高铁桩基中的最大桩顶侧向位移值，且格子中的数字代表发生最大侧向位移的桩的编号。举例来说，当堆载作用于第 4 行第 2 列的区域时，6 根最靠近堆载的桩基中最大的桩顶侧向位移值大约为 2.5 cm，且最大桩顶侧向位移值发生在 1 号桩基。

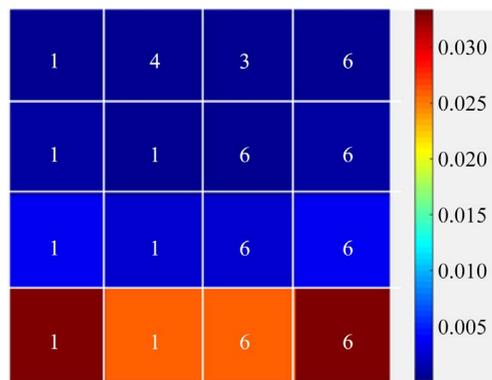


Figure 14. Grid diagram of maximum lateral displacement of pile top (unit: m)
图 14. 最大桩顶侧向位移值方格图(单位: m)

从图 14 可以发现，堆载离高铁越远，最大桩顶侧向位移值越小。相比于放置在两侧，堆载放置于中间可以减小最大桩顶侧向位移。在 16 种工况中，有 7 种工况下的最大桩顶侧向位移值发生在 1 号或 6 号

桩基, 有 1 种工况下的最大桩顶侧向位移值发生在 3 号或 4 号桩基。可见, 堆载位置变化时, 应该对堆载边缘的桩基提供重点关注和保护。

7. 结论

通过 FLAC3D 数值分析软件, 研究了软土地区堆载对邻近高铁桩基的位移及不同堆载形式对高铁桩基的影响, 研究结果可为软土地区施工堆载的设计与优化提供技术支持。具体研究结论如下:

1) 大面积堆载会使得邻近高铁桩基产生位移和变形。高铁桩基的桩身中部侧向位移值最大, 桩顶位移值次之, 桩底位移值最小。且高铁桩基的侧向位移远大于竖向位移。

2) 堆载参数会对高铁桩基的侧向位移产生较大影响。堆载高度越高、堆载与承台距离越近、堆载集中度越高, 高铁桩基的桩身侧向位移越大。此外, 堆载刚度的影响和堆载荷载大小有关。

3) 堆载距离高铁越远, 最大桩顶侧向位移值越小。且在绝大多数工况下, 处于堆载边缘的高铁桩基的桩顶侧向位移值更大, 需要重点关注。

4) 堆载平面位置的研究可以获得施工场地内堆载的最优位置、最不利位置和对应的最不利桩基, 可用于实际施工堆载的设计和优化。

参考文献

- [1] 李志伟. 软土地基邻近堆载对桥梁桩基偏位的影响研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3594-3600.
- [2] 张燕. 堆填工程对既有铁路路基的预变形影响研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(12): 20-24.
- [3] 姚仰平, 王坤, 王乃东, 张千里. 临线堆载影响下高速铁路基长期沉降预测方法[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 625-630.
- [4] 代恒军, 梁志荣, 赵军, 魏祥, 洪昌地. 地面堆载作用下邻近桩基变形的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 220-223.
- [5] 梁育玮, 边学成, 董亮. 侧方堆载作用下高架桥群桩基础变形分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 5-12.
- [6] Bransby, M.F. and Springman, S.M. (1996) 3-D Finite Element Modelling of Pile Groups Adjacent to Surcharge Loads. *Computers and Geotechnics*, **19**, 301-324. [https://doi.org/10.1016/0266-352X\(95\)00001-Q](https://doi.org/10.1016/0266-352X(95)00001-Q)
- [7] 宫玉明, 张超, 尹利华. 深厚软土地基超载预压对桥梁桩基负摩阻力的影响[J]. 路基工程, 2019(5): 76-81.
- [8] 江杰, 韦永超, 陈俊羽, 马少坤, 刘莹. 静载试验中试桩受桩侧堆载的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1034-1041.
- [9] Jesmani, M., et al. (2016) Finite Element Modelling of Undrained Vertical Bearing Capacity of Piles Adjacent to Different Types of Clayey Slopes. *International Journal of Geotechnical Engineering*, **12**, 147-154. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1254398>
- [10] Acer, Y.B., et al. (1982) Interface Properties of Sands. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, **108**, 648-654.
- [11] Potyondy, J.G. (1961) Skin Friction between Various Soils and Construction Materials. *Géotechnique*, **11**, 339-353. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.4.339>
- [12] 董亮. 侧向堆载引起既有铁路桥梁桩基沉降变形的有限元分析[J]. 铁道建筑, 2017(5): 7-9.