

软土地区大面积堆载对邻近高架桥墩的影响分析研究

马志龙¹, 潘春辉²

(1.天津滨海新区轨道交通投资发展有限公司, 天津市 300450; 2.上海市市政工程设计有限公司, 上海市 200438)

摘 要:结合杭州某高速公路桥梁周边景观地形堆载项目,采用数值有限元方法,对大面积堆载引起的桥墩变形进行研究。考虑有效应力和超孔隙水压力,分析了堆载高度、堆载坡率、堆载与既有桥墩距离的相关因素,依据设计规范对桩基位移控制标准,确定了合适的堆载高度和堆载距离,可为类似工程提供相关经验。

关键词:大面积堆载;既有桥墩;有限元分析;桩基变形

中图分类号: TU74

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0212-04

0 引言

随着城市交通的迅速发展,高架桥梁在沿海软土地区的城市中得到了广泛应用。出于景观要求,桥梁周边需要建造微地形,从而要求在既有地形上进行大面积堆土。这样就需要分析堆土对相邻桥墩的影响。软土具有富水饱和性、压缩模量低、泊松比高的特点。在竖向堆载压缩下,软土将会产生侧向膨胀,且因土体饱和,堆载引起超孔隙水压力难以释放,引起的桩基侧向压力较大,对桥梁的影响较大,已有较多引起桥墩变形甚至桥梁坍塌的严重案例。

关于大面积堆土对邻近桥墩的影响,目前国内学者已有相关研究。万友元^[1]计算了填土对桥梁内力的影响,采用数值有限元软件,通过荷载结构法模型计算出来的桥墩的拉应力最大值超过了混凝土抗拉强度标准值,得出意外堆载需要进行相应处理的结论。但是其计算方法较为单一,没有考虑钢筋在结构中对抗拉强度的影响。孙剑平等^[2]对某高速桥墩因高边坡过度堆载导致的桥墩桩基位移问题进行了理论分析和数值模拟分析,在全面总结现有纠偏技术基础上提出了桩侧钻孔卸压、桩侧顶推扶正的综合纠偏技术。潘晓东等^[3]以杭州因填土引起的桥梁坍塌为例,采用有限元分析对比了不同土体参数、填土的高度、桥梁与道路夹角对桥梁结构的影响。冯忠居等^[4]根据现场实测数据,利用 BOZOUK 提出的分析标准对桥梁受堆载影响进行分析,提出了预应力锚索进行纠偏的技术,但是仅仅采用国外单一标准,

并没有对比该标准制定的相关条件是否符合现状桥墩情况,做出的判断不够严谨。杨敏等^[5]针对超载对邻近的桩基与周边土体之间的关系问题,采用了修正的弹性地基梁模型,用解析和数值计算方法分析了土体与桩基相互作用机理。该方法理论较为严密,但是在确定主动被动弹性系数 k_a 和 k_b 上是实际应用的难点,且难以考虑地下水位、饱和土体超静水压力对桩基的影响。吴江斌等^[6]研究了软土地区大面积填土对地表沉降和桩基变形的影响,并提出了采用结构架空、轻质材料等卸荷方法和桩基隔离的措施。这一系列设计措施在软土地区具有较好的实用性。

本文以杭州某高速公路桥梁周边景观地形堆载项目为依托,采用数值有限元方法,对堆载引起桥墩变形进行研究,期望为类似工程提供相关经验。

1 研究背景

1.1 工程概况

杭州市紫金港入城口综合整治工程为在已有高架桥边设计景观地形。由于现状地形高度较大、距离桥墩较近,需要做堆土对桥梁影响的数值分析。

桥梁总平面图、堆土位置见图1,分析区位见图2,桥梁结构平面布置图、桥梁纵断面、桥梁横断面图见图3~图5。桥梁桩基持力层为中风化砂砾岩,桥墩处地坪绝对标高 2.0 m。桥梁上部结构为小箱梁,下部结构为桩柱式盖梁。

1.2 工程地质条件

根据“桥梁勘察报告”,本场地共划分为 31 个工程地质层。与分析相关的主要土层为②₁粉土、②₂淤泥质粉质黏土、②₂淤泥、③₁₋₂粉质黏土、③₂粉质黏土、④₁₋₂中砂、④₁₋₃粉砂、⑤₃₋₁粉砂、⑤₃₋₂砾砂、强风

收稿日期: 2021-02-04

作者简介: 马志龙(1988—),男,本科,工程师,从事地铁轨道交通、市政工程管理研究工作。

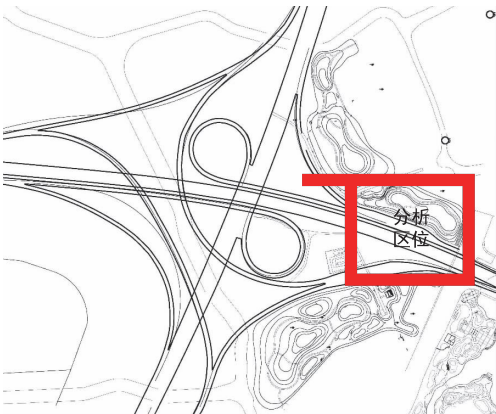


图 1 总平面图

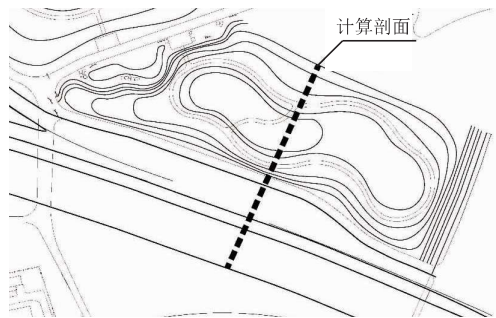


图 2 分析区域

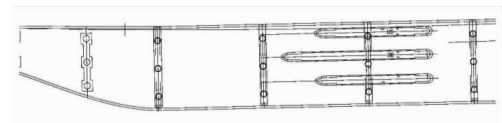


图 3 桥梁结构平面布置图

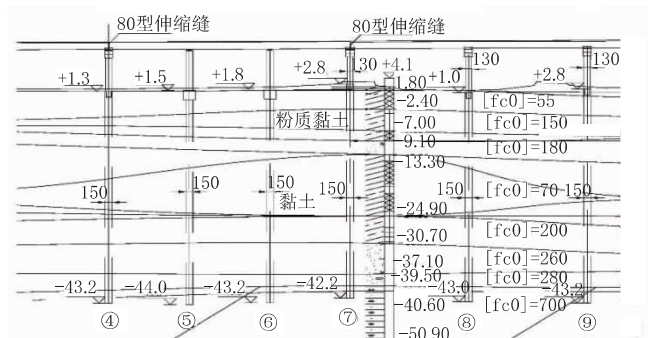


图 4 桥梁纵断面图

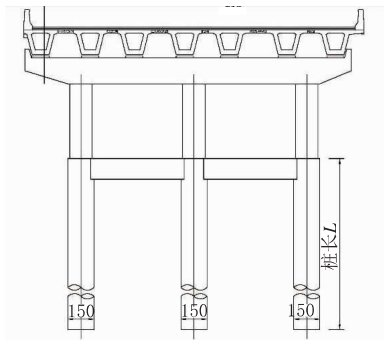


图 5 桥梁横断面图

化岩、中风化岩。
主要土层物理力学指标见表 1。

表 1 土体物理力学指标

分层 代号	岩土 名称	重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩 模量 /MPa	粘聚力 /kPa	内摩擦 角 /($^{\circ}$)	地基承载 力基本 容许值 /kPa
① ₁	粉质黏土	18.8	4.7	21.8	7.1	90
② ₁	粉土	19.1	8.5	16.2	22.1	100
② ₂	淤泥质 粉质黏土	17.2	1.8	7.5	1.3	55
② ₂ '	淤泥	16.1	1.5	7.7	0.6	45
② ₂ ''	粉质黏土	17.7	3.1	22.6	2.6	70
③ ₁₋₁	粉质黏土	19.5	5.9	35.8	13.1	150
③ ₁₋₂	粉质黏土	19.4	6.8	38.5	11.1	180
③ ₂	粉质黏土	19.0	5.2	21.6	9.8	140
③ ₂ '	粉土	18.9	9.4	15.4	26.7	100
③ ₃₋₁	淤泥质 粉质黏土	17.6	3.2	18.7	3.4	55
③ ₃₋₂	粉质黏土	18.1	4.0	26.7	4.8	80
③ ₄	粉土	19.8	6.1	20.8	7.4	140
④ ₁₋₁	粉质黏土	19.9	6.1	32.8	6.7	180
④ ₁₋₂	中砂	19.4	5.9	16.6	12.1	200
④ ₁₋₂ '	粉质黏土	18.7	3.8	31.0	6.8	150
④ ₁₋₃	粉质黏土	19.6	6.4	42.8	14.2	200
④ ₁₋₃ '	粉砂	19.5	6.7	30.0	23.4	140
④ ₃₋₁	粉土	20.5	9.5	26.0	14.1	140
④ ₃₋₁ '	粉质黏土 夹粉土	18.8	5.7	22.3	2.9	140
⑤ ₃₋₁	粉砂	19.0	7.1	8.9	24.3	190

3 桥梁桩基的竖向与水平位移分析

3.1 建模原则

(1)采用二维平面模型,考虑荷载影响边界,考虑桩基与土体的相互连接参数。
(2)考虑地应力平衡、土体堆载的施工工况,对该堆土卸载导致的桥梁桩基沉降和水平位移进行了Plaxis 数值计算分析。

(3)根据地勘报告,对现状地层的厚度、地下水位、土体的弹模、强度指标参数等进行归类选取。地层的厚度,根据不同土层参数选取类似参数进行归并。土体的强度指标和变形指标根据建模的本构模型进行对应换算,根据计算区域最近的钻孔对参数进行分析选取。不同土层厚度归并参数可以选择平均值进行合并。

3.2 数值建模

实际上,采用有限元模拟计算堆载对相邻桥墩的应力应变影响很难做到精确解。因为实际条件下,

土体参数具有复杂性,结构尺寸具有变异性,施工过程也具有不确定性。但是在现有的条件手段下,有限元分析方法较为方便,在宏观上与现实条件有一定的吻合度。

计算范围:模型上边界到堆载的上部,下边界到桩基底部以下 20 m,横向取堆土实际范围长度,至两边坡脚的宽度,并延伸之外 10 m。模型的尺寸大小满足计算要求,计算的应力应变至边界会收敛。

土体的本构模型采用应变强化模型(HS 模型)。与理想弹塑性模型不一样的是,HS 模型的屈服面在应力向量场中的形状随着非线性应变产生的大小而不断扩大。其弹性强化分为剪切弹性强化和拉压弹性强化两种方式。剪切弹性强化用于响应偏应力引起的应变。该应变属于塑性应变。拉压弹性强化用于响应正应力引起的应变。该应变为塑性变形。这两种强化形式均在本构模型的参数模型中体现。

Hardening-Soil 本构相对于理想弹塑性模型具有相当的优势,它对于软土地区和硬质土地区均有适应性(Schanz, 1998)。在主应力偏量的作用下,土体产生了塑性变形,不可逆的变形导致土体的弹模下降。在排水三轴试验条件下可以看到,土体的偏应力和轴应变之间呈现一定的非线性关系。Kondner (1963)最早发现并研究了 this 关系,并证明了该关系有双曲线数学规律,因此定义为双曲线本构模型(Duncan & Chang, 1970)。而作为邓肯张模型的修正版,Hardening-Soil 模型目前已经得到广泛应用。源于它考虑了塑性变形而不是弹性变形,而且对于土体的剪切应力引起的膨胀效应也进行了描述,因此引入了屈服帽盖。

对于 HS 模型建模的最主要的方法就是,考虑三向应力条件下,竖向应变 ε_1 与偏应力 q 之间所呈现的双曲非线性关系。因此简化的应力应变关系如下式所示:

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1-q/q_a}$$

式中: q_a 为抗剪偏应力的硬化极限强度,见图 6。

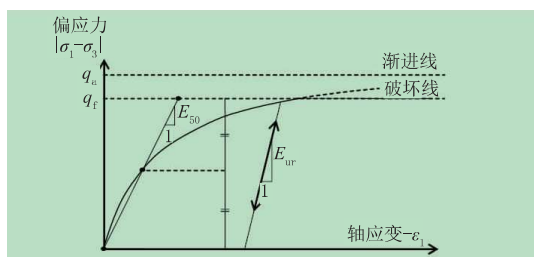


图 6 标准排水三轴试验主加载下双曲型应力-应变关系

3.3 计算模型概述

根据地勘报告对土层进行分层,反映了最初的地形标高为 2.500 m 左右。最新测量的新近堆土地形标高为 3.500 m(堆土时间 10 个月左右)。根据堆土情况,选取距离堆土最近的 8 号桥梁 D 匝道的下部结构进行分析。

根据景观堆土设计方案,选择 9 种工况,分别代表不同堆土高度、堆土与桥墩的距离、堆坡坡率,计算对桥墩的影响。计算模型共 7 389 个单元,网格数量有 7 771 个,模型四周的边界条件为位移边界,即上表面为自由边界,下表面为 y 向固定约束,左右为 x 方向固定约束。

计算模型中考虑桥梁上部结构的自重,通过荷载施加到承台和桩基上,土体和景观堆载采用有限元模型自动计算,见图 7。

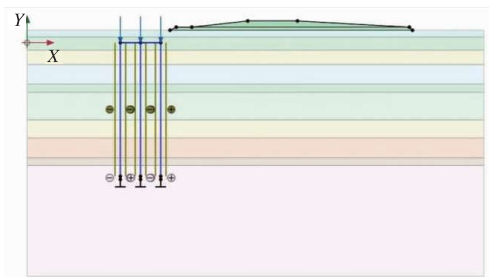


图 7 计算模型

桥梁桩长 45 m,桩顶荷载取桩基的单桩承载力 6 700 kN,景观土体参数取普通填土参数。

4 计算结果分析

桩基的变形主要为水平变形和竖向变形。根据相关文献,竖向位移主要为堆载引起土体内部附加应力增加产生土体压缩,对桩侧产生负摩阻力,引起摩擦桩的竖向变形,严重的可以削弱桩基竖向承载力,甚至引起桩基破坏。水平位移主要由土体竖向压缩导致泊松比产生的水平向应力对桩基产生的水平向荷载,可以运用弹性地基梁简化桩基分析桩土之间在水平推力作用下的变位响应。对于饱和软黏土,不可忽视的因素在于土体在短期加载过程中超孔隙水压力的作用。该孔隙压力可以在短期内大大提高土体泊松比,使得土体在竖向荷载作用下为体积不变弹性体,从而对侧向桩基推力有较大作用,随着时间的变化会慢慢消散。该部分附加应力难以用荷载结构弹性地基梁方法计算,采用考虑土体有效应力和超孔隙水压力的弹塑性有限元方法是较为合适的分析方法。

根据有限元模型计算分析,工况 1 条件下现有

桥梁 8 号桥梁 D 匝道下部结构附近堆土引起的变形结果云图见图 8、图 9。由图形变位情况可以知道,桩基在单侧堆载下呈现不均匀竖向和水平变形状态,靠近堆载一侧的变形要大于原理堆载一侧。可能的原因在于,大面积堆载在范围外扩散至土体内引起的附加应力随着深度和距离是衰减的。根据土体弹性应力分布 Boussinesq 解可以知道,随着大面积堆载范围外侧距离和深度的增加,衰减的速率是较快的。加之群桩的阻隔效应,远离堆载一侧的桩基变形远小于靠近一侧。因此在实际设计施工中,要考虑到桩基承台不均匀变形产生的桥梁的内力变化不利影响。

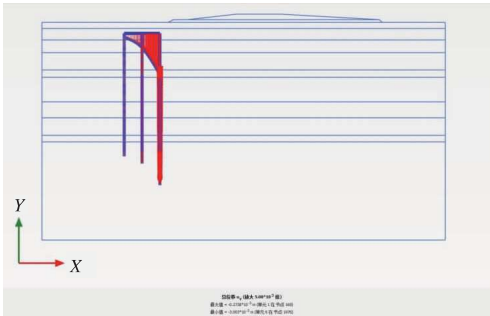


图 8 工况 1 桥墩竖向位移图

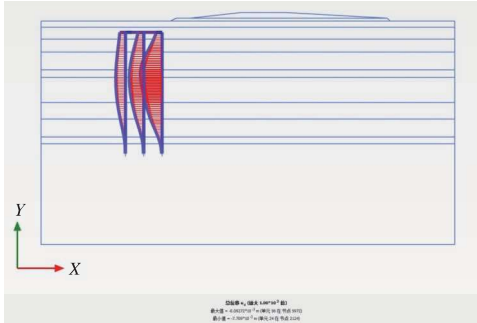


图 9 工况 1 桥墩水平位移图

对 9 种工况分别计算,考虑不同堆坡高度、堆载坡率、与桩基距离的因素,分析施工后承台的竖向和水平最大位移,计算结果详见表 2。根据计算结果可知,堆载的高度和距离对桩基变形有至关重要的影响。随着堆载高度的降低,承台的竖向和水平向变形减小;随着堆载距离的增大,承台的竖向和水平变形减小。因此在实际施工中,应尽量减小堆载高度,增大堆载与桥墩的距离。

根据《建筑桩基技术规范》^[6],对水平位移敏感的建筑(构)筑物柔性桩基,采用水平静载试验结果为 6 mm 时作为水平承载力特征值,即桩顶水平位移控制指标为 6 mm。根据《公路桥涵地基及基础设计规范》(JTG D63—2007)^[7]附录 P,当非岩石地基水平向抗力系数 m 取值时,应考虑地面即桩顶水平位移不

表 2 桥梁承台变形计算

工况编号	坡顶 标高 /m	坡顶和承台 的距离 /m	承台竖向最 大位移 /mm	承台水平最 大位移 /mm
1	7.000	25	3.003	7.709
2	7.000	30	2.890	7.196
3	7.000	35	2.792	6.722
4	7.000	40	2.698	6.305
5	6.500	25	2.658	6.126
6	6.500	30	2.578	5.761
7	6.500	35	2.499	5.429
8	6.500	40	2.424	5.137
9	6.500	45	2.356	4.889

超过 6 mm。因此,可以考虑桩基水平位移 6 mm 为控制标准。在本工程案例中,根据计算分析评估,堆土标高(坡顶)建议不超过 6.5 m,土坡底边线与桥墩外围桩基的控制距离建议不小于 12 m,最高点距离桥墩外围桩基建议不小于 35 m。实际施工也是依据该标准,施工后对既有桥墩的监测情况有良好的安全保证,验证了采用有限元分析方法,对分析堆载引起桥墩变形响应和采取相关设计方案有较好的实际运用效应。

5 结 论

本文基于杭州某高速公路桥梁周边景观地形堆载项目,详细分析、研究了大面积堆载对既有桥墩的影响,得出了相关有创新意义的结论。

(1)采用 HS 本构模型,考虑土体有效应力和超孔隙水压力的弹塑性有限元分析方法,对软土地区堆载引起土体应力应变和结构响应的相关问题是较为合适的,对实际施工具有指导意义。

(2)采用多种工况比选,考虑多种因素,包括堆载的高度、堆载的坡率、堆载与既有桥墩的距离,分析桥墩的变形响应,是较为科学的分析思路。本文根据相关规范控制水平变形为 6 mm 作为桥梁在堆载作用下的极限位移,从而针对性地设计了景观堆载的规模。

(3)由于桩基的阻隔效应和应力扩散的衰减,桩基产生的竖向位移和水平向位移呈现不均匀性。因此在实际施工中,结合计算分析,需要加强既有桥墩的监测工作,确保实施安全、可靠。

参考文献:

[1] 万友元.意外堆土对高架桥结构安全性评估分析[J].湖南交通科技, 2017,6(2):215-218.

2021 年 8 月实施的工程建设标准

序号	标准名称	标准编号	实施日期	替代情况
团体标准				
1	城镇污水处理厂污泥深度脱水工艺设计与运行管理指南	T/CECS 20005—2021	2021-08-01	
2	城镇污水处理厂污泥好氧发酵工艺设计与运行管理指南	T/CECS 20006—2021	2021-08-01	
3	城镇污水处理厂污泥厌氧消化工艺设计与运行管理指南	T/CECS 20007—2021	2021-08-01	
4	城镇污水处理厂污泥干化焚烧工艺设计与运行管理指南	T/CECS 20008—2021	2021-08-01	
5	城镇污水处理厂污泥处理产物园林利用指南	T/CECS 20009—2021	2021-08-01	
地方标准				
6	城市轨道交通机电设备安装工程质量验收标准	DG/TJ 08-2005—2021	2021-08-01	替代 DG/TJ 08-2005—2006
7	公共建筑绿色及节能工程智能化技术标准	DG/TJ 08-2040—2021	2021-08-01	替代 DG/TJ 08-2040—2008
8	假山叠石工程施工标准	DG/TJ 08-211—2020	2021-08-01	替代 DG/TJ 08-211—2014
9	内河航道工程设计标准	DG/TJ 08-2116—2020	2021-08-01	替代 DG/TJ 08-2116—2012
10	城镇污水深度处理反硝化砂滤池技术标准	DG/TJ 08-2351—2021	2021-08-01	
11	综合杆设施技术标准	DG/TJ 08-2362—2021	2021-08-01	

来源:住房和城乡建设部网站

(上接第 215 页)

- [2] 孙剑平,唐超,王军,等.堆载致桥梁桩基偏移机理分析与纠偏技术研究[J].建筑结构,2020,50(6):61-67.
- [3] 潘晓东,应添添,范立盛.桥侧大面积堆土致斜交梁桥倒塌事故分析[J].中国公路学报,2019,8(8):114-124.
- [4] 冯忠居,张永清,李晋.堆载引起桥梁墩台与基础的偏移及防治技术研究[J].中国公路学报,2004,7(3):74-77.
- [5] 杨敏,朱碧堂.堆载地基与邻近桩基的相互作用分析[J].水文地质工程地质,2002,3(1):1-5.
- [6] JGJ 94—2008,建筑桩基技术规范[S].
- [7] JTG D63—2007,公路桥涵地基与基础设计规范[S].