

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.03.006

高填土路堤对既有大跨度桥梁桩基的影响分析与监测

宋春雨¹, 季永兴², 孙磊¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 上海市水利工程设计研究院, 上海 200061)

摘要: 哈尔滨市松花江北岸滨江大道工程穿越松花江跨江大桥。为减轻路堤填筑对桥桩的影响, 基于垂向二维有限元模型及现场监测, 研究了土工格栅加筋、钻孔灌注桩隔离及注浆处理等综合措施的可行性, 并分析了路堤填筑过程中地基土及桥桩的变形。结果表明: 土体加筋、钻孔灌注桩隔离及注浆处理等综合措施可有效减轻路堤填筑对桥桩的影响; 路堤填筑对桥桩的影响主要集中在桥墩桩身的上部, 桩身下部影响较小; 桩基础附加沉降主要由承台上部填土所致, 主动区加固措施对减小桥桩的水平位移效果比较明显。研究同时表明, 垂向二维有限元模型因桩基简化为板桩墙, 使得地层附加应力全部由桩基承担, 被动区土层变形的计算结果偏小, 桩基变形计算结果偏大。

关键词: 填土; 桩基; 加筋; 监测; 有限元

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)03-0029-06

Analysis and Field Monitoring on the Effect of High Earth Embankment on the Existing Large Span Bridge Pile foundations

SONG Chun-yu¹, JI Yong-xing², SUN Lei¹

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Water Engineering Design & Research Institute, Shanghai 200061, China)

Abstract: Bingjiang Avenue is built along the north bank of Songhua River and runs through the Songpu Bridge in Haerbin city, the provincial capital of Heilongjiang. The high embankment causes additional stresses in the ground layers affecting on the adjacent piles for the bridge abutment. In this paper, a 2D FEM model was used to analyze the deformations of soil layers and the performances of bridge piles during the construction. The field monitored data of settlements and lateral displacements were reported and discussed. The synthetic implements including geogrid, bore piles for stress isolation and compaction grouting were studied for their feasibility on controlling the influences of high embankment on the bridge piles, as well as the deformation of the foundation and the bridge piles. The results of computations and measurements in situ can be summarized as follows; the synthetic implements mentioned above can alleviate the influence of embankment construction on the adjacent bridge piles; high embankment mainly affects on the performance of upper part of the piles, while the lower parts are scarcely disturbed; the additional settlements of the bridge piles were mostly induced by the part of embankment over the pile cap, while the stress isolation piles in active zone can be more effective to control the lateral displacements of the piles. In addition, because the row of piles are presented as a sheet wall in the 2D FEM model, the additional stresses fall on the foundation of the piles, which leads to larger deformations of bridge piles and smaller deformations of soil layers in passive zone.

Keywords: embankment; pile foundation; reinforcement; monitoring; FEM

哈尔滨市松花江北岸滨江大道工程采用在原有防洪堤防基础上拓宽加固,形成长约 101 km 的滨江道路^[1]。工程跨越哈尔滨市松北和呼兰两个区,工程路线长、地质变化大、交叉节点多,穿(跨)多条铁路、高速公路、城市道路、特大桥梁等。滨江大道穿越哈尔滨重要的跨江通道松浦大桥就是其中之一(图 1)。滨江大道路堤填筑在松浦大桥北汉主跨中间进行,紧邻桥墩,部分填土覆在桥台桩基正上方。大面积高填土不仅会引起堆载范围内地基土的沉降和水平侧移,甚至改变临近建(构)筑物地基土体的应力状态,从而导致临近建(构)筑物基础发生过大沉降或侧移等地基事故^[2]。

路堤填筑施工引起的临近桩基内力变形的问题,通常称作被动桩问题。目前,被动桩与土体相互作用的计算分析方法大致可分为四类:经验方法、基于土压力的计算方法、基于土体变形的分析方法和有限元法^[3]。经验方法由于诸多假设应用有一定局限性,而基于土压力的分析方法不能计算对滑动区外桩的影响,基于土体变形的分析方法又需要已知围堤施工产生的侧向位移场,所以基于有限元的数值分析法是目前采用最多的方法,可以方便地采用土的非线性本构关系来描述桩周土的特性,而且可以定性地考虑各种复杂边界条件、土体内加筋情况、土的变形性状、施工顺序等影响。Bransby 和 Springman^[4]利用离心机实验研究了堆载对临近群桩的影响,发现地基土体水平侧移对桩身产生了水平被动荷载,同时地基土内新的附加应力对桩基的沉降和变形均有较大影响。Ellis 和 Springman^[5-6]在离心试验的基础上,利用平面应变有限元法分析了桥桩的被动荷载的影响因素,得到了与离心机实验结果相一致的规律。Xu 和 Poulos^[7]采用边界元法分析了群桩在被动荷载下的响应。Jeong, Seo 和 Kim^[8]将大应变引入二维有限元,分析了填土施工在临近群桩上产生的短期和长期被动荷载的影响因素。近些年,亦有学者采用三维有限元进行单桩^[9]和群桩^[10]被动受荷分析。上述研究大都从机理上解释了填土荷载引起被动桩变形的问题。在设计施工过程中,为控制被动桩变形,通常采用调整路堤沉降和地基隔离加固的措施。加筋土工格栅对路堤不均匀沉降的调整有明显的效果,Han 和 Akins^[11]将土工格栅应用在拓宽既有路堤工程中,Liu 和 Wu^[12]等采用土工格栅调整填土荷载,以减少加固桩的用量。杨敏、朱碧堂^[13-14]采用有限元法模拟堆载作用下,探讨了深层搅拌法在主动区与被动区加固,对临近桩基侧

向变位的影响,结果表明主动区加固的效果更好。

根据相关研究成果和工程经验,笔者等提出在回填土体内铺设 3 层土工格栅,同时在主动加固区(桥桩和主填土区之间),采用钻孔灌注桩或水泥搅拌桩进行应力隔离,并采用压密注浆体提高隔离桩附近土体承载力,减少土体侧向变形,防止高填土对桥桩的影响。为全面分析土工格栅和隔离措施的影响,采用有限元法计算分析隔离措施的可行性,并研究隔离桩深度变化对桥桩变形的影响,进而确定合理的深度。同时,施工过程中在工程现场进行了相关监测试验,检验相关分析结果,以便为相关类似工程设计施工提供科学参考。

1 工程概况

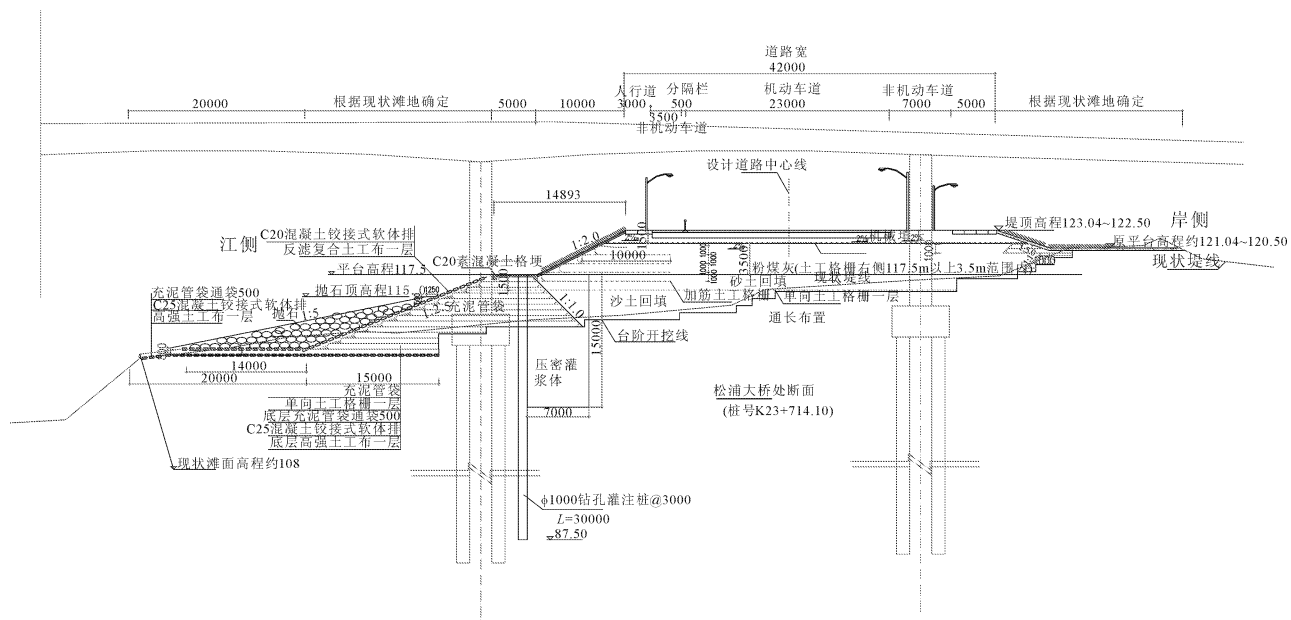
1.1 路堤结构方案

滨江大道松浦大桥段位于松花江北岸滨江大道工程桩号 23 + 812 堤段。为保证滨江大道净空要求,路堤采用在既有防洪堤外加宽,穿越松浦大桥北汉主跨之一。滨江大道路堤顶高程为 122.50 m ~ 123.04 m,堤顶宽度为 42 m,最大填土高度约为 12.2 m。临水侧采用充泥管袋作为堤防支撑体,出水后回填砂土,边坡为 1:2.5。在高程 117 m 处设有 5 m 宽马道。为减轻覆土对桥墩影响,出水后的堤防临水侧采用土工管袋作为加筋,边坡调整为 1:2.0。该段为松花江北汉弯道,滩地深、流速大,为防止江水冲刷和筑堤对桥桩的影响,临水侧堤脚采用坡度为 1:5 的块石抛填护脚,高度约为 7 m。

滨江大道穿越的松浦大桥北汉主跨采用三跨连续变截面箱梁结构,桥桩采用旋挖钻机成孔灌注桩基础,桩长 51.5 m,桩径 1.5 m。桩基础承台厚 3.5 m,宽 6.5 m,顶高程为 113.0 m。滨江大道穿越的桥跨桥墩间距为 50 m。

1.2 地质条件

根据工程地质勘察报告,桥堤交叉处由上至下土层分部依次为:人工填土,为①层低液限黏土、级配不良细砂等,厚度为 4.70 m。第四系全系统冲积层,包括②层粉土质细砂层,层厚度 4.60 m;③层级配不良中砂层,层厚为 7.70 m;④层级配不良粗砂层,层厚为 2.40 m;⑤层低液限黏土层,层厚为 1.50 m;⑥层级配不良中砂层,层厚为 6.50 m。第四系下更新统东深井组,为⑦层低液限黏土层,层厚为 2.80 m。第四系下更新统猗荆组,为⑨层级配良好中砂层,该层未揭穿,揭露层厚为 4.20 m。地下水埋深为 5.75 m,地下水位为 115.35 m。



说明: 1.图中高程、桩号为m为单位,其余尺寸为mm为单位。
 2.本图为松浦大桥与堤路节点处断面,临江侧护坡坡比采用1:2及1:2.5,减少筑堤对桥桩影响。本段现状滩地较深,需在堤脚处抛石以稳定堤身。

图 1 松浦大桥处堤防结构断面及监测布置示意图

2 变形计算分析

2.1 有限元模型

采用 PLAXIS8.2 进行平面应变有限元建模分析。由于松浦大桥承台下桩径为 1.5 m,桩距为 4 m,小于 3 倍桩径,所以根据被动桩桩间拱效应的相关研究,当桩距小于桩径的 3 倍时,因地面填土导致的桩侧附近压力有 90% 以上份额由桩承担^[15],因此模型建立时将桩基等效为板桩,忽略桩间土绕流,填土作用产生土层变形引起的水平附加作用力全部由桩承担。整体计算模型如图 2 所示,模型总宽 150 m,标高位于 39 m~124 m,即计算深度 85 m。天然土层分为八层,分别为低液限黏土、粉土质细砂、级配不良中砂、级配良好粗砂、低液限黏土和粗砂,上层为充泥管袋、回填砂土和粉煤灰。回填过程中共设 3 道土工格栅,用以降低路堤的不均匀沉降。临水侧桩基与填土之间拟设置水泥深层搅拌桩或钻孔灌注桩作为隔离措施,压密注浆加固隔离桩附近土体。

模型计算中土体及注浆体采用摩尔库伦理想弹性本构模型,桥梁桩基和承台采用线弹性本构模型。桩采用一维梁单元模拟,承台、注浆体、地基和回填土采用实体单元(15 节点等参单元)模拟,土工格栅采用格栅单元模拟。桩与周围土体的相互作用通过设置接触面单元来实现,其强度通过强度折减因子与材料强度的乘积求得。考虑到三维效应,桩

按等效刚度原则选取计算参数。有限元计算参数见表 1。

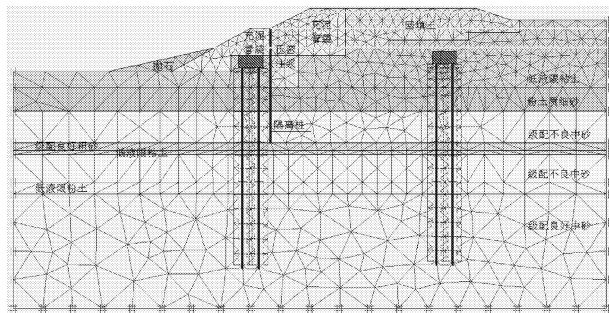


图 2 平面有限元计算模型

2.2 计算工况

为研究钻孔灌注桩和压密注浆体作为保护措施的有效性,计算三种工况:(1) 无隔离措施;(2) 20 m 水泥深层搅拌桩 + 压密注浆体;(3) 30 m 深钻孔灌注桩 + 压密注浆体。

计算时首先考虑地应力平衡,在桥桩、承台、地基土激活状态下进行应力平衡,然后进行分层填土,每层填土固结时间为 20 d,最后一级填土完成后,固结 30 d。填土过程采用固结分析模拟,土工格栅铺设采用塑性计算模拟。应力平衡时,填土、土工格栅单元、隔离桩处于冷冻状态,根据施工过程逐步激活各层填土及格栅以模拟路基填筑过程。

为了比较保护措施的效果,三种工况计算过程相同。后两种工况中,填土过程中根据施工顺序激活填土层的同时激活钻孔灌注桩和压密注浆体。

表 1 工程地质及模型计算参数

土层序号	名称	层厚 /m	干重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	湿重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	弹性模量 /kPa
①	低液限黏土	4.7	18.6	19.3	33	26	5000
②	粉土质细砂	4.6	15.1	19.2	8	26	4000
③	级配不良中砂	7.7	16.0	18.0	8	28	4560
④	级配良好粗砂	2.4	17.0	18.0	5	30	4200
⑤	低液限黏土	1.5	18.6	19.3	33	26	5000
⑥	级配不良中砂	6.5	16.0	18.0	8	28	4560
⑦	低液限粉土	2.8	19.0	19.3	15	20	5000
⑨	级配良好中砂	> 2.6	16.0	18.0	8	28	6000
⑩	回填土		16.5	16.8	10	28	3000
	充泥管袋		16.5	16.8	20	28	3000
	注浆体			20.0	40	20	30000
	水泥搅拌桩			21.0			200000
	混凝土			24.0			3000000

2.3 计算结果

图 3、图 4 为第三种工况条件下水平位移和沉降的计算云图,图 5 为三种工况条件下桥桩的桩身水平位移曲线,图 6 为三种工况条件下桩身弯矩曲线。

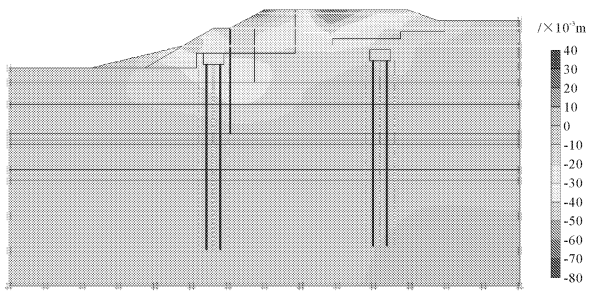


图 3 水平位移分布图

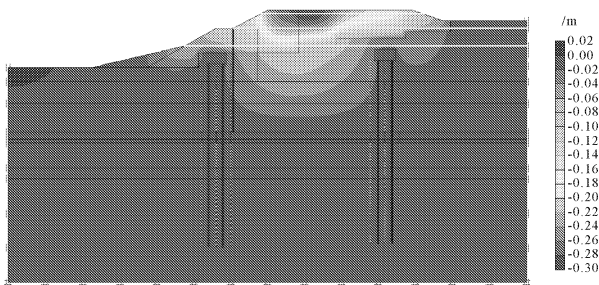


图 4 沉降分布图

(1) 无隔离措施

桥桩周围没有隔离措施,直接填筑路基。计算结果表明,固结完成后,路堤最大水平位移为 22.77 mm;堤顶最大沉降量为 68.29 mm;桥桩承台竖向沉降为 1.031 mm;桥桩承台水平位移为 0.61 mm;桩基最大水平位移为 0.587 mm。

(2) 20 m 深水泥搅拌桩 + 压密注浆体

在桥桩右侧及前后采用 20 m 深水泥搅拌桩加压密注浆体隔离,后填筑右侧路基。固结完成后,路

基最大水平位移为 21.85 mm;堤顶最大沉降量为 64.44 mm;桥桩承台竖向位移为 1.021 mm;桥桩承台水平位移为 0.442 mm;桩基最大水平位移为 0.547 mm。

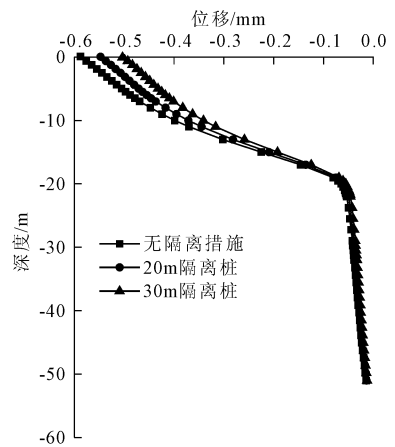


图 5 桩身水平位移曲线

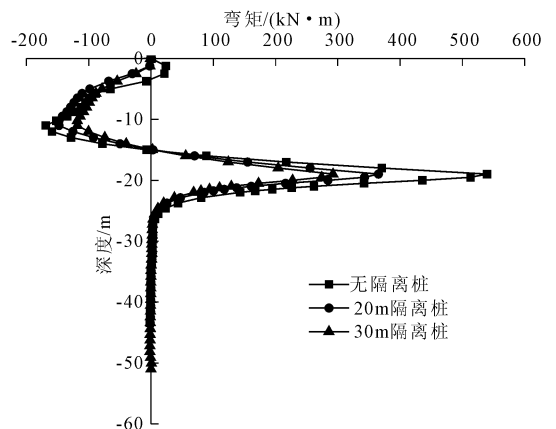


图 6 桩身弯矩曲线

(3) 30 m 深钻孔灌注桩 + 压密注浆体
在桥桩右侧及前后采用 30 m 深钻孔灌注桩加

压密注浆体隔离,后填筑右侧路基。固结完成后,路基最大水平位移为 21.24 mm;堤顶最大沉降量为 63.09 mm;桥桩承台竖向位移为 0.987 mm;桥桩承台水平位移为 0.370 mm;桩基最大水平位移为 0.502 mm。

计算结果显示,填土对桥桩的影响主要集中在桩身的上部,对桩身下部的影响较小;采用围护措施后,桥桩及承台位移有所减小,水平位移减小的幅度相对较大,采用 20 m 深水泥搅拌桩加注浆体方案,承台水平位移减少 4.1%,承台竖向位移减少了 1%,桩身最大水平位移减少了 1.4%;采用 30 m 深钻孔灌注桩加压密注浆体方案,承台水平位移减少 19.74%,承台竖向位移减少了 4.27%,桩身最大水平位移减少了 9.55%。计算同时显示,三种工况下桩身变形形态相似(图 5、图 6),最大负弯矩发生在级配不良中砂层,最大正弯矩发生在低液限黏土层和级配不良中砂层交界处。

比较两种隔离方案,钻孔灌注桩加注浆体围护方案对桩基承台的水平位移控制有较大作用。两种方案对桩基及承台的沉降控制作用有限,这是由于本工程桩基承台埋置在部分填土下方,桩基的附加沉降主要由承台顶部填土所致,桩基侧面围护加固对其影响较小。

3 现场监测

为保证路堤填筑过程中,地基的变形控制和桥梁基础的安全,并验证本文计算结果的可靠性,在松浦大桥交叉节点处设置了土体分层沉降和深层水平位移观测点、桥墩沉降和水平位移观测点、堤顶和地表沉降观测点等。土体分层沉降分别布置在填土路堤中央(测线 S1)和临水侧桥桩与隔离桩加固体之间(测线 S2)。S1 测线布置 15 个磁性沉降环,S2 测线布置 13 个沉降环,相邻沉降环上下间距为 2 m。堤顶和地表沉降观测采用沉降板,分别布置在临水侧(测点 DS1 和 DBS1)和背水侧(测点 DS2 和 DBS2)。测斜管布置在临水侧桥桩基础左侧(近水,测线 D1)。两侧桥墩上设置水平位移(临水侧为测点 BD1,背水侧为测点 BD2)和沉降观测点(临水侧为测点 BS1,背水侧为测点 BS2)。测试工作从 2014 年 4 月路堤填筑前开始,一直持续到该段路堤填筑结束(2014 年 9 月),并将持续监测一段时间。

因为路堤填筑时桥梁正常运行,所以桥桩深埋于地下,其上未设置测点,为了与监测结果进行比较,这里取计算模型中与现场布置的测点相同位置的土层计算结果。图 7、图 8 分别给出了路堤填筑

结束后测线 S1 和测线 S2 的土层沉降分布的计算值和监测值。

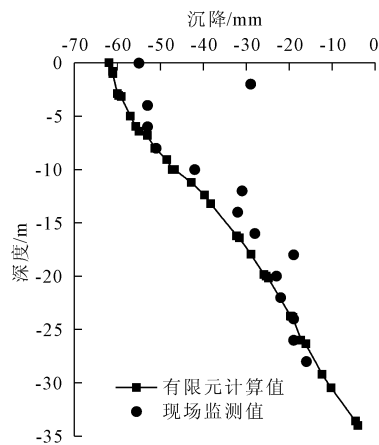


图 7 测线 S1 处沉降随深度变化曲线

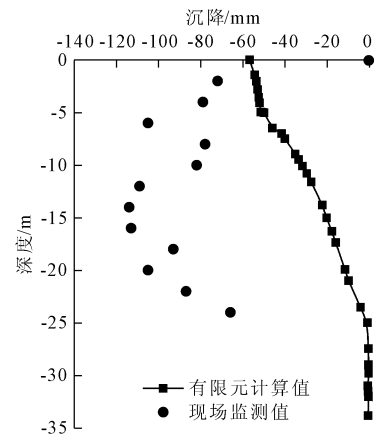


图 8 测线 S2 处沉降随深度变化曲线

由图 7 可见,有限元计算结果和与现场监测结果比较,路堤沉降的分布趋势完全一致,计算值略大于监测值,这除了因为计算模型参数与现场实际情况略有出入外,有限元计算结果是土体完全固结以后的沉降值。第二层沉降环监测值明显异常,是由于该现场施工时,为固定土工格栅,与原有地基锚固,使得该点沉降明显较其他测点偏小。有限元计算考虑工程整体的沉降规律,未考虑局部锚固作用,所以该点计算值与监测值偏差较大。综合该测线位置总体沉降规律,计算结果和监测结果基本吻合。

图 8 中的结果为 S2 测线深层沉降分布。由图 8 可见,该处计算值比现场监测值小。S2 测线位于压密注浆隔离桩和桥桩之间。压密注浆施工时,注浆压力对周围地基土层变形产生较大的作用,而有限元计算主要考察高填土对桥桩的影响,注浆体仅考虑其隔离加固作用,未考虑注浆过程的影响,所以计算值比监测值小。

图 9 给出测线 D1 的土体深层水平位移计算值

和测试值。由图 9 可见,该点最大水平位移的计算值比监测结果略小,这是由于二维有限元计算中,桩简化为等效刚度的板状墙,不考虑桩间土体承担的附加应力和绕流,被动区土层位移的计算值偏小。

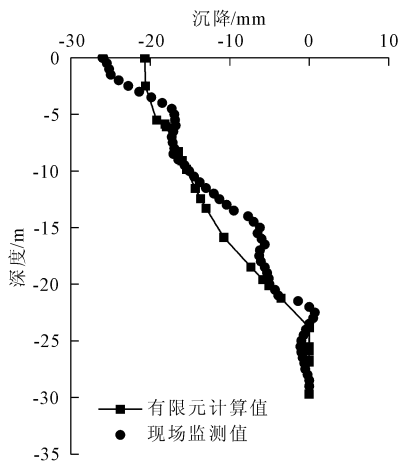


图 9 测线 D1 处深层水平位移分布图

承台顶部沉降计算值分别为:临水侧 0.987 mm,背水侧 0.824 mm。桥墩上测点 BS1、BS2 的测试结果最大值分别为 0.625 mm 和 0.595 mm。计算结果与测试结果基本吻合,说明本文进行的有限元分析结果具有一定的可靠性。根据桥梁设计规范,桥基附加沉降和水平位移应分别低于 $2\sqrt{a}$ 和 $0.5\sqrt{a}$, a 为桥墩间距。对测试和计算结果综合分析可见,在现有综合隔离加固措施下,路堤填筑导致松浦大桥桥桩的沉降和水平位移均能满足规范要求。

4 结 论

基于二维有限元模型和现场测试结果,研究了哈尔滨松花江北岸滨江大道与松浦大桥交叉断面处路堤填筑对桥桩的影响,并分析了不同的加固方案的有效性,得出如下结论:

(1) 土体加筋、钻孔灌注桩隔离及注浆处理等综合措施可有效减轻路堤填筑对桥桩的影响,施工过程中及运行一段时间后,工程处于安全状态。

(2) 路堤填筑对桥桩的影响主要集中在桩身的上部,桩身下部影响较小。最大负弯矩发生在级配不良中砂层,最大正弯矩发生在低液限黏土层和级配不良中砂层界面。

(3) 主动区加固措施对减小桥桩的水平位移效果比较明显,能够满足工程安全和设计规范的要求。但是,桩基础附加沉降主要由承台上部填土所致,加固隔离措施对减小沉降效果并不明显。

(4) 二维有限元模型因桩基简化为板桩墙,使得地层附加应力全部由桩基承担,被动区土层变形

的计算结果偏小,桩基变形计算结果偏大。

参考文献:

- [1] 季永兴,朱晓丹,李硕娇,等.哈尔滨松花江北岸滨江大道建设关键技术研究及实践[C]//第五届中国水利水电岩土力学与工程学术研讨会论文集,北京:中国水利水电出版社,2014.
- [2] 刘毓胤,陈福泉,左广州.大面积堆载下软土地基的应力隔离与加固实例分析[J].岩土力学,2006,27(5):846-848,852.
- [3] 王国粹,杨敏,熊巨华,等.路堤堆载对邻近桥桩基影响分析[J].结构工程师,2008,24(4):90-98,105.
- [4] Bransdy M F, Springman S M. Centrifuge modeling of pile groups adjacent to surcharge loads[J]. Soils and Foundation, 1997,37(2):39-43.
- [5] Ellis E A, Springman S M. Full-height piled bridge abutments constructed soft clay[J]. Geotechnique, 2001,51(1):3-14.
- [6] Ellis E A, Springman S M. Modeling of soil-structure interaction for a piled bridge abutment in plane strain FEM analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(2):79-98.
- [7] Xu K J, Poulos H G. 3-D elastic analysis of vertical piles subject to "Passive" loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(5):349-375.
- [8] Jeong S, Seo D, Kim Y. Numerical analysis pile groups in offshore soft deposits[J]. Computers and Geotechnics, 2009,36:1164-1175.
- [9] Miao L F, Goh A T C, The C I. Three-dimensional finite element analyses of passive pile behavior[J]. International Journal of Numerical Analyses Methods of Geomechanics, 2006,30(7):599-613.
- [10] Kelesoglu M K, Springman S M. Analytical and 3D numerical modeling of full-height bridge abutments constructed on pile foundations through soft soils [J]. Computers and Geotechnics, 2011,38(8):943-948.
- [11] Han J, Akins K. Use of geogrid-reinforced and pile-supported earth structures[C]//Proceeding of Deep Foundations 2002: an international Perspective on Theory, Design, Construction and Performance, Reston, Va.,2002:668-679.
- [12] 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.
- [13] 杨敏,朱碧堂.超载软土地基主动加固控制临近桩基侧向变形分析[J].建筑结构学报,2003,24(4):76-84.
- [14] 杨敏,朱碧堂.超载软土地基被动加固控制临近桩基侧向变形分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1912-1918.
- [15] 杨云蓉,楼晓明,杜金龙,等.某围堤对其跨上桥梁桥径的影响分析[J].结构工程师,2009,25(2):57-61,76.