

文章编号:1674-2869(2018)06-0649-06

# 基坑开挖对既有小直径桥墩的影响分析及加固设计

刘 策,宋郁民\*

上海工程技术大学轨道交通学院,上海 201620

**摘 要:**温州市某主干道采用U型槽下穿高速公路桥梁。U型槽基坑开挖改变了既有小直径桥墩的受力状态,并对桥梁结构安全造成影响。针对该情况,采用有限元数值分析,并结合实验室土工试验,对U型槽基坑开挖各个工况下小直径桥墩位移和内力进行力学分析。分析结果表明:基坑开挖导致桩基附加弯矩增大,桥墩发生较大横向位移,裂缝宽度达0.18 mm。根据受力分析结果,对既有小直径桥墩进行加固设计。桥墩加固后进行基坑开挖,减小了桥墩横向位移,附加弯矩降低,裂缝减少至0.07 mm,桥墩稳定性安全系数得到提高。通过施工监测数据和数值计算结果的对比,计算分析值与实测值基本吻合。本文工作可作为同类型小直径桥墩全周围基坑开挖结构分析与加固设计的借鉴。

**关键词:**桥梁工程;既有小直径桥墩;基坑开挖;数值模拟;加固方案

中图分类号:U442.5 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2018.06.013

## Influence of Foundation Pit Excavation on Existing Small Diameter Piers and Reinforcement Design

LIU Ce, SONG Yumin\*

School of Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract:** The underpass with U-shape groove's structure goes through an existing highway bridge as a main road in Wenzhou. The excavation changed the stress state of the existing small-diameter pier and affected the safety of bridge structure. Thus the displacement and internal force of small-diameter pier under various working conditions in process of U-shape groove excavation were numerically analyzed with finite element method combined with the laboratory test. The results exhibit that the additional bending moment of pile increases, and the transverse displacement of pier also increases with the crack width of 0.18 mm due to the excavation. The consolidation design of existing small-diameter pier was carried out according to the results of force analysis. When the bridge pier is consolidated prior to the excavation, the transverse displacement and additional bending moment of the pier reduce and the crack of pier decreases to 0.07 mm, improving the stability safety factor of bridge piers. The numerical simulation results are generally consistent with the monitoring data during construction. This paper can give a reference for structural analysis and reinforcement design of the same type of small-diameter pier with the surrounding excavation.

**Keywords:** bridge engineering; existing small diameter piers; foundation pit excavation; numerical simulation; consolidation scheme

随着城市化进程的加快,城市路网关系越来越立体和复杂。城市道路下穿既有高速公路、既有铁路常采用U型槽结构。在U型槽基坑开挖过

程中土体水平和竖向压力的同时卸载<sup>[1]</sup>会对坑内及邻近高速公路桥墩特别是小直径桥墩带来桥墩偏移、桩基弯矩加大、桩基承载力不足等结构安全

收稿日期:2018-06-11

作者简介:刘 策,硕士研究生。E-mail:liuceedward@163.com

\*通讯作者:宋郁民,博士,副教授。E-mail:song-yumin@163.com

引文格式:刘策,宋郁民. 基坑开挖对既有小直径桥墩的影响分析及加固设计[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(6):649-654.

问题<sup>[2]</sup>。丁勇春等<sup>[3]</sup>和王成华等<sup>[4]</sup>对单侧邻近桩基础的基坑做了大量的研究,在桩基侧向变形、桩基变形控制等方面取得了不菲收获。张子新等<sup>[5]</sup>对近距开挖卸荷下地铁高架桥墩的响应通过承载力损失、位移变形等方面展开了详细研究,认为基坑开挖卸荷将导致高架桥桩基周围静止土压力损失,导致桩基极限承载力产生损失,且桩基产生上抬变形。郑明新等<sup>[6]</sup>展开了基坑开挖过程中邻近桥墩墩台沉降和桩基变形规律的探讨,认为基坑开挖使桥墩桩基产生附加变形。本研究面对的工程背景是运营中高速公路桥梁下进行U型槽深基坑的开挖施工,施工场地狭窄,空间有限。这样的全周基坑开挖对运营状态下小直径桥墩的影响及加固方法的研究较少。

本文结合温州某主干道下穿既有高速公路近距离基坑开挖对小直径桥墩造成的影响,采用Midas/GTS有限元软件分析了基坑内既有小直径桥墩的墩顶位移、受力状态,验算桥墩的稳定性,确定合理的加固方案及施工工序,对桥墩进行基坑施工及后期运营中的加固设计。

1 工程概况

温州市某城市主干道,下穿铁路、高速公路桥梁工程段采用U型槽结构,工程重要性等级一级,开挖位置(见图1)在高速公路互通桥梁右幅9#、10#、11#墩附近,桥下净空8 m。上跨高速公路已运营20多年,右幅全长1 057 m,桥面净宽12.5 m,10#墩为现浇混凝土连续梁与预制空心板梁的交接墩,下部结构采用桩柱一体墩结构,柱径80 cm,桩径120 cm,桩基为嵌岩桩。

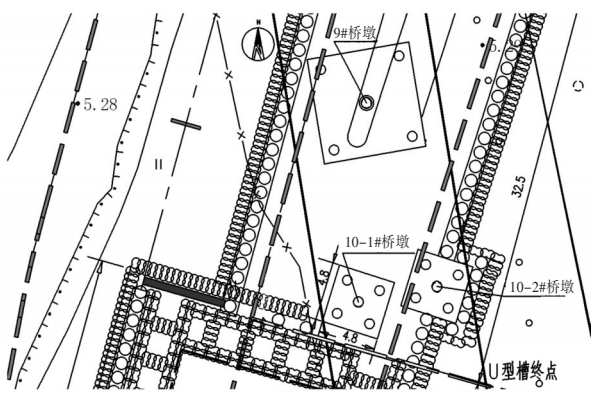


图1 基坑位置平面图  
Fig. 1 Plan of excavation site

设计的U型槽,基坑开挖长度80 m,宽度17 m,其中10#墩全周开挖深度达5.11 m。对于80 cm直径桥墩,U型槽的直接开挖可能会造成桥墩开裂、桩基沉降、稳定性变差等问题,影响高速公路桥梁的运营安全。同时,在基坑开挖过程中,由于坑内土体卸载,在外侧土压力作用下,基坑地面回弹<sup>[1]</sup>,对桩基产生负摩阻力,桩基受拉、压、弯组合受力,引起小直径桩基混凝土开裂、断裂失效等危害。

2 近距开挖工况数值分析

2.1 土体本构模型及力学参数

拟建场地受沿线山体影响,地貌单元交替变化,以山前洪坡积平原地貌为主,过渡至海滨平原地貌,地形起伏较大,分布沉积大厚度淤泥,是典型的不良地质土。根据工程地质勘察,结合当地建筑经验、室内土工试验结果,得出土体的物理力学参数(见表1),在此基础上进行桥墩稳定性的分析。

表1 地基土物理力学参数  
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	弹性模量 / (kN·m <sup>-2</sup> )	泊松比	容重 / (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 / (kN·m <sup>-2</sup> )	摩擦角 / (°)	本构模型	$E_{50}$ / (kN·m <sup>-2</sup> )	$E_{ed}$ / (kN·m <sup>-2</sup> )	$E_{ur}$ / (kN·m <sup>-2</sup> )
素土	\	0.3	18	10	15	修正莫尔-库伦	10 000	10 000	30 000
淤泥	\	0.3	20	8.7	7.6	修正莫尔-库伦	1 700	1 700	7 200
黏土	\	0.3	18.3	10	15	修正莫尔-库伦	5 600	5 600	22 400
含碎石粉质黏土	\	0.3	18.5	18.5	10	修正莫尔-库伦	7 000	7 000	28 000
强风化基岩	50 000	0.3	19	50	30	莫尔-库伦	\	\	\
中风化基岩	500 000	0.3	19	200	40	莫尔-库伦	\	\	\

在本文的数值模拟中,根据提供的地质资料及土工试验结果,为详细研究各工况下桥墩的受力特性,应用专业岩土工程分析软件Midas/GTS建立二维几何模型可以有效模拟工程内复杂的地质

地形和多重的施工工况。对基岩采用了莫尔-库伦模型<sup>[7-8]</sup>,基岩所受应力在达到屈服点前与应变成正比关系,超过屈服点时应力-应变关系为水平线,是弹性-完全塑性的本构关系,莫尔-库伦准则在实

用的约束压力范围内具有较高的准确性,满足实际工程中基岩对嵌岩桩的工作特性;对土体采用修正莫尔-库伦模型<sup>[9]</sup>,土体强度采用三轴试验刚度( $E_{s0}$ )、三轴卸载刚度( $E_{ur}$ )和固结仪荷载刚度( $E_{oed}$ )描述,能较准确地模拟黏土等具有摩擦特性的土体材料;桩基以及加固承台采用了各向同性弹性模型。

在修正莫尔-库伦模型下,对于各层土体,有:

$$\begin{cases} E_{s0}=E_{oed} \\ E_{oed}=\frac{p}{\lambda}, \quad \lambda=\frac{C}{2.3(1+e)} \\ E_{ur}=\frac{3P(1-2v_{ur})}{k}, \quad k=\frac{2C}{2.3(1+e)} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $C$ 为黏聚力增量; $P$ 为基准压,10 t/m<sup>2</sup>; $v_{ur}$ 为卸载/再加载泊松比; $k$ 为弹塑性压缩模量。

2.2 模型建立与网格划分

由于岩土构成的复杂性,完全真实详尽地模拟岩土材料的刚度特性较难实现,因此,针对具体的分析目的进行模型的简化十分必要。本例中,项目关注重点在于岩土、墩顶的位移、桩基的内力,故将岩土模型范围进行适当地放大,对岩土单元进行细分。同时,在网格划分过程中,对结构物附近进行局部加密,经平缓过渡,在边界位置进行适当的稀疏划分,以提高有限元分析的计算精度并保证模型计算的收敛性。模型横向取90 m,土层厚度取50 m,地基基础底面为固定端约束,地基基础的左、右面施加 $X$ 方向的位移约束。桥梁桩基、立柱、承台和加固桩采用梁单元模拟,土层采用平面应变单元模拟。模型共建立5 122个单元,4 860个节点,如图2所示。

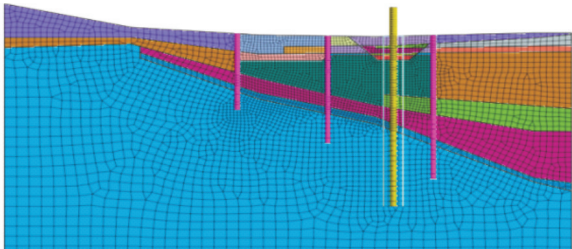


图2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

2.3 基坑开挖施工工序

由于既有桥墩竣工已久,基坑开挖需要将在土体自重及桥梁荷载作用下已经固结的土体作为初始应力状态,因此,建模时,需对公路桥墩施工后的土体模型进行平衡初始应力和位移清零。在10#墩附近基坑开挖前,对基坑进行直径100 cm的基坑支护桩加固,对坑底淤泥采用高压旋喷桩加固,后进行基坑的开挖。既有桥墩墩顶受到上部结构传来的结构自重、一级公路车辆荷载以及车辆制动力作用。为尽可能地保证开挖的安全性,桥墩周围土体对称分层开挖。计算分析模型采取如下工况:

工况1:初始应力状态-公路桥墩施工;工况2:基坑支护-基坑支护桩施工;工况3:土体清表并开挖右幅土体0 m~2 m;工况4:开挖右幅土体2 m~4 m;工况5:开挖右幅土体4 m~6 m;工况6:开挖左幅土体0 m~4 m;工况7:开挖左幅土体4 m~6 m。

2.4 基坑开挖对既有桥墩的影响分析

2.4.1 位移分析 确定桥墩稳定性分析评价指标:根据公路桥梁规范<sup>[10-11]</sup>,Ⅰ类和Ⅱ类环境下钢筋混凝土构件验算最大裂缝宽度应不超0.20 mm。墩顶位移参考公路及铁路相关规范<sup>[12-13]</sup>跨径20 m桥梁桥墩水平位移限值为20 mm,相邻墩台沉降差不大于0.2%(折角)。施工期间老桥仍处于饱和交通流量下运营,且施工空间狭窄,施工机械往复工作会对土体造成剪切扰动,同时可能碰撞到既有桥墩,为保证结构和行车安全,并考虑到连续梁的受力状态,如表2所示,确定桥墩墩顶水平位移预警值为6 mm,竖向位移预警值为3 mm,实测值超过预警值时需启动纠偏支护预案。

由于基坑内土体水平、竖向压力的同时卸载及坑外被动区土体的压力,桩基受到负摩阻力作用,桩基上移,如图3(b)的墩顶竖向位移云图中竖向位移0.9 mm,导致需常年加固的老桥上部结构的应力重分布,结构破坏的危险很大,桩基受拉,出现混凝土开裂。

依据各施工工况下的分析结果,从如图3(a)的墩顶位移云图中得出10#墩在最不利工况下墩

表2 桥墩位移限值  
Tab. 2 Displacement limits of piers

规范	位移限值	对应规范取值 / mm	本文预警值 / mm
公路养护技术规范 <sup>[14]</sup>	水平位移限量	20	6
地铁设计规范 <sup>[15]</sup>	横桥向位移限值	16	6
公路桥涵地基与基础设计规范 <sup>[16]</sup>	相邻墩台沉降差	32	3



顶水平位移-20.6 mm,超出规范值,对桥上正常运营车辆的行车安全及结构安全均是不利的,造成上部结构及支座受力不均匀,80 cm小直径桥墩底部开裂、桥墩偏移,甚至倒塌。

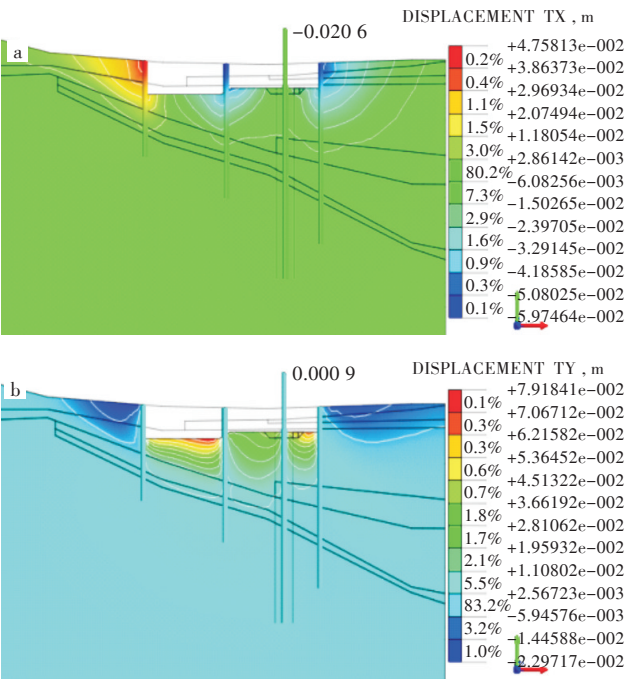


图3 未加固桥墩基坑开挖过程中墩顶：  
(a)水平位移图,(b)竖向位移图

Fig. 3 Displacement on top of unconsolidated pier during excavation of foundation: (a) horizontal displacement, (b) vertical displacement

2.4.2 内力分析 在最不利工况下,桩基最大轴力-1 867 kN,土体扰动引起的最大弯矩 775 kN·m。对于圆形截面的压弯构件,依据公路相关规范<sup>[10]</sup>计算,桥墩立柱裂缝最大裂缝宽度为0.18 mm,桩基裂缝验算宽度为0.13 mm。在负摩阻力、弯矩、轴力共同作用下的拉、压、弯组合受力体系,导致120 cm小直径桩基易出现裂缝或裂缝宽度加大,开挖卸载引起地层移动会对桩基础产生附加挠度,承载能力降低甚至失效。同时,由于基坑的开挖,桥墩立柱的长细比增大,车辆制动力等可变作用会引起墩底弯矩增大,导致立柱稳定性变差、承载能力降低,立柱裂缝增大,对施工阶段以及之后的运营安全十分不利。因此,对加固桥墩十分必要。

3 既有桥墩加固效果数值分析

3.1 桥墩加固方案

因考虑到桥下仅有8 m净空,施工空间有限,基坑开挖后作为U型槽行车道使用,不进行回填,

桥墩长细比增大。故采用如图4所示的加固方案,加固桩基与既有桩基通过加固承台连接的方式进行加固。桩基采用直径80 cm的钻孔灌注桩,与既有桩基间距1.6 m,采用4.8 m×4.8 m×2 m的加固承台连接加固桩基与既有桩基,使加固桩基与既有桩基形成整体。加固桩基嵌入岩层与既有桩基相同标高。坑底淤泥采用了高压旋喷桩进行加固。采用施工工序:基坑支护桩支护—加固桩基施工—坑底和被动区加固—既有桩基临时支护—加固承台施工—拆除临时支护,U型槽基坑施工。

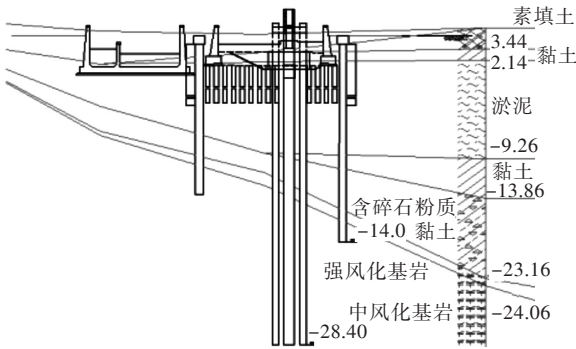


图4 既有桥墩加固方案

Fig. 4 Consolidation scheme for existing pier

3.2 既有桥墩加固效果分析

在进行模型建立时,加固桩基和加固承台采用弹性模型,坑底淤泥采用高压旋喷桩加固提高地基的承载能力。依据高压旋喷桩抗压不抗剪的工作特性,采用了莫尔-库伦模型,如表3所示。

表3 加固材料计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of consolidated materials					
加固结构	弹性模量 / (kN·m <sup>-2</sup> )	泊松比	容重 / (kN·m <sup>-3</sup> )	本构模型	单元类型
桩基	3×10 <sup>7</sup>	0.2	25	弹性	梁
加固承台	3×10 <sup>7</sup>	0.2	25	弹性	梁
坑底加固	3×10 <sup>4</sup>	0.3	20	莫尔-库伦	平面应变

通过有限元计算,在各个施工阶段中,加固承台开挖对既有桥墩的扰动最大,由图5的墩顶位移云图可知,在最不利工况下既有桥墩墩顶最大水平位移-4.3 mm,墩顶最大竖向位移-0.5 mm,满足墩顶最大位移6 mm的要求。土体最大位移5 cm。桩基所受最大弯矩389 kN·m。满足桩基和立柱的承载力要求,裂缝验算结果为0.07 mm,满足桥涵规范对钢筋混凝土构件的裂缝要求。为防止机械碰撞及机械往复引起土体扰动造成桩基因弯矩增大而出现裂缝扩大,采用增大桩基截面惯性矩的方式减小既有桩基的裂缝宽度。

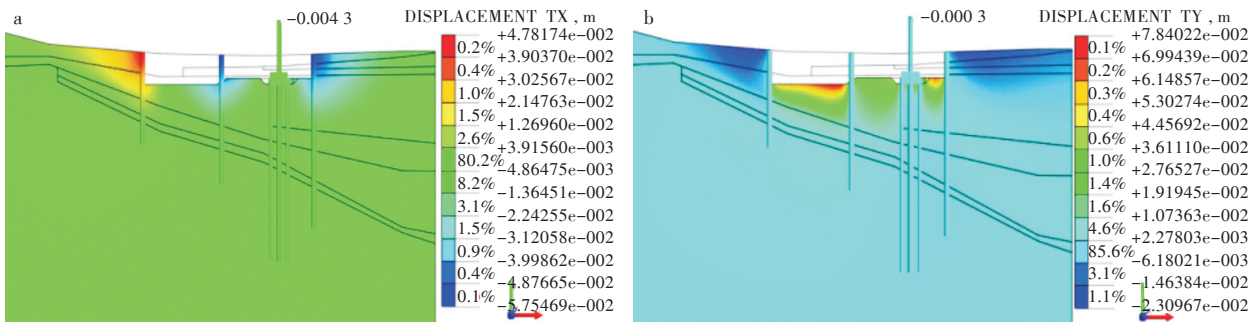


图5  基坑开挖过程中加固桥墩墩顶:(a)水平位移图,(b)竖向位移图

Fig. 5  Displacement on top of consolidated pier during excavation of foundation:  
(a) horizontal displacement, (b) vertical displacement

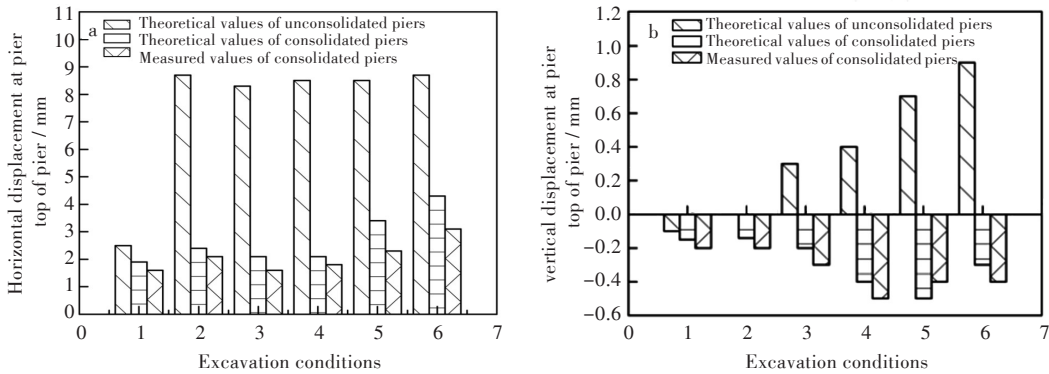


图6  加固后墩顶位移对比图:(a)水平位移,(b)竖向位移

Fig. 6  Comparison of displacement on top of consolidated pier:  
(a) horizontal displacement, (b) vertical displacement

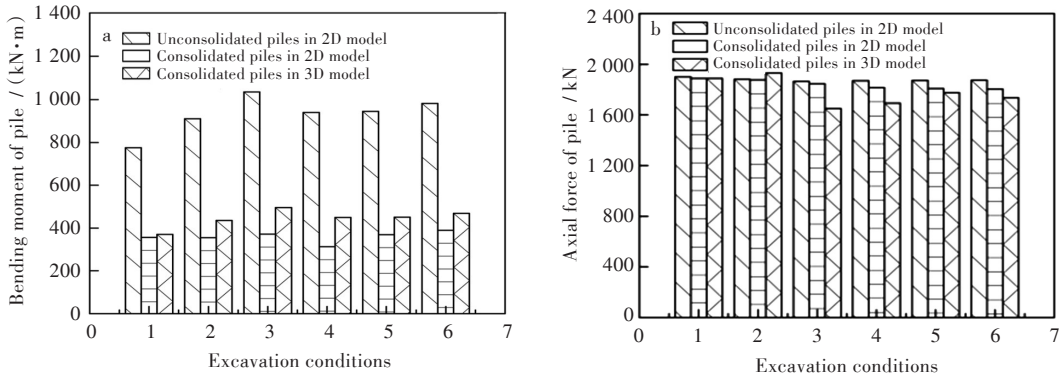


图7  加固后桩基内力对比图:(a)桩基弯矩,(b)桩基轴力

Fig. 7  Comparison of internal force of consolidated pile foundation: (a) bending moment, (b) axial force

通过图6、图7对基坑开挖各阶段施工工况下数值分析以及监测数据的对比,可以发现:

1)加固后的桥墩在基坑开挖各个阶段水平位移较不加固施工都有显著减小,且加固后桥墩的数值分析结果与实际监测结果吻合度较高,说明四个加固桩基与承台可以通过互相平衡受力对既有桩基起到纠偏的作用。

2)桩基加固后的竖向位移较未加固有所缓解,位移量较小,且方向均为向下,避免了桩基上抬变形,淤泥等软土层对桩基的负摩阻力作用有

效降低,降低桩基受损可能,由于桩基采用嵌岩桩,因此,基坑开挖过程中桩基的沉降量较小。

3)桩基内力的对比中,弯矩和轴力均有所减少,避免桩基受到拉压弯组合受力,可以减少裂缝或降低裂缝宽度,避免桩基失效。加固桩基与既有桩基共同工作,可有效降低基坑开挖过程中,大型机械往复工作带来土体对桩基的剪切、挤压作用。

4)既有桩基与加固桩基通过加固承台连接,可以降低基坑开挖后桥墩的长细比,提高桥墩的

稳定性和承载能力,降低桥墩立柱的裂缝验算宽度。

4 结 语

1)桩基加固前后数值分析结果表明:U型槽基坑开挖过程,对高速公路小直径桥墩产生了较大的不利影响,桥墩偏移,稳定性变差,立柱、桩基开裂,需进行加固设计。桩基的加固方案使得桥墩结构内力减小,裂缝宽度降低,桥墩偏移得到纠正,可以保障小直径桥墩的结构安全,起到加固效果。

2)采用的二维有限元模型,数值分析结果与实际监测结果吻合良好,且土体与桩基相互作用计算与三维模型计算结果一致。因此,只要相关参数选取合理,二维模型可以满足实际工程计算要求,提高计算效率。

3)对基坑开挖过程中墩顶位移的预警值取值、立柱、桩基裂缝的限值要求都较为保守,基于在正常运营状况下的小直径桥墩桥梁,这样的取值是偏于安全的。更为合理的预警值和极限值有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 殷德顺,王保田,张文慧. 不同方向卸载对基坑支护位移内力的影响[J]. 岩土力学, 2008, 9(6): 1701-1705.

[2] 李俊峰. 深基坑支护结构分析与应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.

[3] 丁勇春,王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 155-161.

[4] 王成华,刘庆晨. 考虑基坑开挖影响的群桩基础竖向承载性状数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1851-1856.

[5] 张子新,李佳宇,周湘,等. 近距离开挖卸荷条件下运营地铁高架桥墩响应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12):3531-3640.

[6] 郑明新,夏一鸣,袁钊,等. 深基坑开挖对邻近高数铁路桥墩桩基变形影响分析[J]. 施工技术, 2017, 46(5):12-15,28.

[7] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[8] 魏涛. 邻近建筑物桩基对基坑开挖的影响研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

[9] 黄锐. 桩锚-土钉复合支护基坑的变形与稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

[10] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

[11] 焦美菊,孙利民. 基于最大裂缝宽度的钢筋混凝土桥梁可靠度分析[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊1): 245-249.

[12] 张静元,马科萌. 路基开挖对高铁高架桥桥墩和基础的影响[J]. 中外公路, 2015, 35(1):18-22.

[13] 王景春,刘旭菲,侯卫红. 新建桥梁对运营高铁基础变位的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(7): 60-65,83.

[14] 中华人民共和国交通部. 公路养护技术规范: JTG H10—2009 [S]. 北京:人民交通出版社,2009.

[15] 中华人民共和国建设部. 地铁设计规范:GB50157—2013 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[16] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007 [S]. 北京:中国人民交通出版社,2007.

本文编辑:苗 变