

墩承台施工对营业线的影响研究

谭程龙¹, 龚天昊^{2,3,4}, 刘鑫^{3,4}, 白朋朋¹

(1.中交第三航务工程局有限公司,江苏南京 210011;2.中通服咨询设计研究院有限公司,江苏南京 210019;3.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;4.河海大学隧道与地下工程研究所,江苏南京 210098)

摘要:临近营业线的施工安全问题越来越引起人们的重视。墩承台施工势必引起周围地基中地下水位和应力场的改变,导致周围地基土体的变形,最终将引起临近运营线产生附加变形。针对上述问题,该文依托某深基坑工程,为探究墩承台施工步骤对营业线桥台位移变形的影响,建立Plaxis 3D有限元模型,模拟实际工况,并且对比分析实际监测数据。研究结果表明:墩承台施工对营业线桥台位移影响不大;在最不利组合情况下位移为3~6 mm,有限元模拟结果与实测结果基本相符;其中基坑最下层土体开挖对营业线位移影响最大。

关键词:基坑开挖;营业线;墩承台;有限元;Plaxis 3D

中图分类号:U443.21

文献标志码:A

0 引言

在临近既有运营高铁线、城市轨道交通线隧道及高层建筑物建设过程中,产生了大量的深基坑工程。随着城市基坑向大、深方向发展,临近建筑物、立交桥等的桩基础可能因基坑开挖引起土体位移的作用而产生不利影响:一方面,土体沉降会对桩产生负摩阻力,引起桩下沉,尤其是桩基的不均匀下沉使上部结构产生不均匀沉降;另一方面,土体的水平位移导致桩身产生附加弯矩、应力和位移,严重时将引起临近桩基过量变形甚至破坏,进而引起桩所支撑的建筑物或构筑物失稳甚至破坏^[1]。

国外城际铁路发展较中国早,所以基坑开挖施工对既有营业线桥梁承台的桩土相互影响研究也较早。Finno等^[2]、Goh等^[3]、Poulos等^[4]、Pan等^[5]、Leung等^[6]、Miao等^[7]、Ong等^[8]、Liyanapathirana等^[9]、Shakeel等^[10]从理论进而试验再至数值方法模拟分析方面,选择不同的土体本构模型,变化不同桩土参数,对既有营业线桥台的桩土相互影响进行了一系列的研究和验证,取得许多重要成果。而郑刚

等^[11]、王菲等^[12]、王木群^[13]、高立刚等^[14]、高东等^[15]、孟繁增^[16]、曾国东等^[17]、邓超^[18]以国外学者研究成果为基础,采用有限元计算软件Abaqus、Midas-GTS、FLAC 3D、Pias等改变桩土参数,建立有限元模型,研究了基坑开挖对既有营业线的影响,并且将实际监测数据与模拟结果进行了验证分析。

该文以某深基坑工程为背景,Mohr-Coulomb弹塑性模型为本构模型,设置最不利工况组合,简化工程参数,建立Plaxis 3D有限元模型模拟实际工况,探究基坑开挖对营业线的影响,并且对比验证实际监测数据。

1 Plaxis有限元模型

1.1 参数选取

Plaxis 3D模型的建立基于某新建城际铁路基坑工程墩承台情况,设置最不利工况组合且模型参数又不可与现实工况相差过大。因此,在模型的结构设计阶段,基坑参数将从深度8 m以上的深基坑中选择,选取其中某典型承台的参数作为模型建立的依据。

1.1.1 模型尺寸参数

模型整体尺寸为70 m×50 m×111.5 m,其中基

收稿日期:2022-09-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51609071);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:B200202087);国家留学基金委资助项目(编号:201806715014)

作者简介:谭程龙,男,大学本科,高级工程师.E-mail:184775744@qq.com

坑尺寸设置为 $13\text{ m} \times 10\text{ m} \times 9.683\text{ m}$, 基坑短边一侧设置地下连续墙, 厚度为 0.5 m , 与基坑外边缘的距离为 2 m 。基坑另一侧设置既有营业线的桥台, 桥台分为两部分, 墩台和墩身, 其中墩台尺寸为 $13\text{ m} \times 10\text{ m} \times 3\text{ m}$, 墩身尺寸为 $10\text{ m} \times 7\text{ m} \times 15\text{ m}$, 混凝土方量约 $1\,440\text{ m}^3$, 墩身的外表面与基坑外边缘的距离设置为 7 m 。在基坑和营业线桥台下部土体中, 已使用灌注桩处理, 桩体参数为桩长 70 m , 桩直径 1.5 m 。既有线桥台下部灌注桩排布方式为 3×3 等间距排布, 基坑下部灌注桩排布方式为 3×4 等间距排布。

1.1.2 土层参数

实际工程中土层参数较为复杂, 考虑最不利工况, 该 Plaxis 3D 模型中, 土层设置为 3 层, 分别为淤泥质粉质黏土、粉质黏土以及持力层, 具体力学参数如表 1 所示。持力层的存在是为了限制在初始应力状态下激活大尺寸结构瞬时产生的过大的竖直方向的位移, 因此持力层的参数实际上对基坑的变形不会产生太大影响。

表 1 土层力学参数

土层名称	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^{\circ}$)	$w/$ %	$h/$ m
淤泥质粉质黏土	18.0	10.27	10.49	28.4	19.0
粉质黏土	18.6	9.83	17.97	33.9	61.5
持力层	24.0	21\,000.00	57.00	12.5	21.0

1.1.3 构件参数

模型中的构件主要可以分为梁、板和刚体单元: 其中将围檩、支护以及灌注桩设置为梁单元; 将地下连续墙、钢板桩和坑底垫层设置为板单元; 将既有营业线桥台设置为刚体单元。在以上所有的构件中, 梁单元中的围檩、支护以及板单元中的钢板桩的参数将对基坑变形产生重要影响。部分参数如表 2 所示。

表 2 材料部分参数

钢板桩类型	截面面积 A/cm^2	惯性矩 I/cm^4	截面模量 W/cm^3
钢板桩 SP-VI 型	306.0	8\,600	3\,820
2HW400 \times 400 \times 13 \times 21	437.4	130\,723	4\,768
$\phi 609 \times 16$ 钢管	298.0	131\,117	4\,306

挡墙尺寸设置为 $20\text{ m} \times 16\text{ m} \times 0.8\text{ m}$, 高于地面的部分为 4.5 m 。基坑内的围檩和支护由 2 根型钢 HW 400 \times 400 \times 13 \times 21 焊接组合而成, 截面形状为

旋转 90° 的“II”型, 经计算, 该截面抵抗自重的惯性矩为 $1.491 \times 10^{10}\text{ mm}^4$ 。

1.2 模型建立

为了提高计算精度和计算收敛, 对地下深基坑网格进行加密规则划分。基于上述相关模型参数, 最终确定基坑模型网格划分情况如图 1 所示, 三维有限元计算模型如图 2 所示, 共生成 13\,086 个单元, 25\,330 个节点。模型的相对位置关系为: 地下连续墙模型位于基坑一侧短边外侧, 既有线桥台位于基坑另一侧短边外侧, 地下连续墙与基坑外边缘相距 2 m , 既有线桥台与基坑外边缘相距 7 m 。

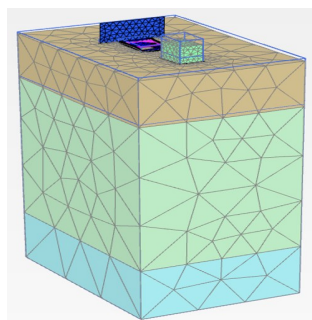


图 1 网格划分情况示意图

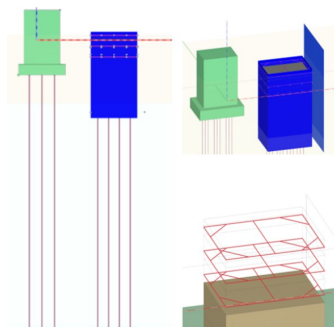


图 2 Plaxis 3D 模型图

1.3 施工过程模拟

该 Plaxis 3D 模型模拟的整个施工过程为基坑钢板桩的打入至完成坑底垫层施工, 为了能够精确地计算和分析每一个施工步骤带来的影响, 将整个模型施工过程分为 11 个步骤。具体施工步骤如表 3 所示。

2 基坑开挖对营业线的影响分析

2.1 基坑安全性分析

2.1.1 基坑长边钢板桩变形

基坑长边钢板桩变形图如图 3 所示, 基坑内第一层土开挖后, 未进行支护时的基坑长边钢板桩变形

表3 施工步骤

步骤	分阶段施工说明
1	激活土层
2	激活基坑两侧的既有线桥台和挡墙
3	激活基坑钢板桩
4	围堰内降水开挖至+0.317 m标高处
5	在+1.317 m标高处激活第1层围檩以及支撑
6	围堰内降水开挖3~-2.683 m标高处
7	在-1.683 m标高处激活第2层围檩以及支撑
8	围堰内降水开挖3~-5.683 m标高处
9	在-4.683 m标高处激活第3层围檩以及支撑
10	围堰内降水开挖4~-9.683 m标高处
11	激活垫层

最大位移位于挡墙顶部中间部分,为-3 mm,即向基坑内部变形了3 mm;垫层施工完成后整体的钢板桩结构最大位移位于 $H=-8.1$ m平面,即在垫层和第3层支护所在平面的中间平面,为-49.3 mm,即向基坑内部变形了49.3 mm。由于钢板桩为柔性挡土墙,其变形相比其他挡土结构要大,在建模中也反映出了这个特点。

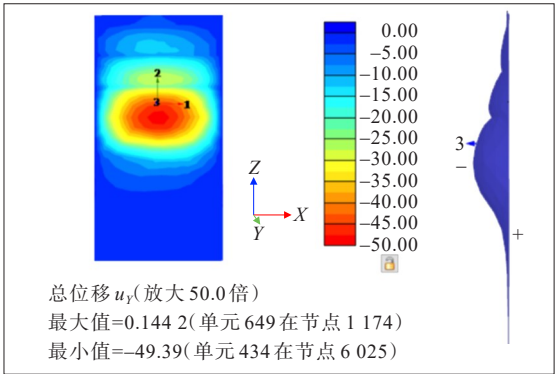


图3 基坑长边钢板桩变形图(单位:mm)

2.1.2 围檩和斜撑变形

围檩、斜撑与钢板桩可认为在大变形上是协同的,在Plaxis 3D中,支护的总位移并不是实际的变形量,而是受到钢板桩影响的总位移,在模型中激活第2层、第3层围檩和斜撑时,会产生初始变形量,而在实际施工中,焊接组装第2层和第3层围檩和斜撑时,并不存在这种初始位移。第1层围檩和斜撑在激活后,直到垫层完成,整体位移小于3 mm,整个过程中,阶段变形量小于1 mm。在计算第2层和第3层围檩时,实际的阶段变形也小于1 mm,整体来说变形满足材料变形允许值,即 $1\text{ mm} < L/400 = 12\text{ mm}$ 。垫层施工完成后的第1层支护变形如图4所示。

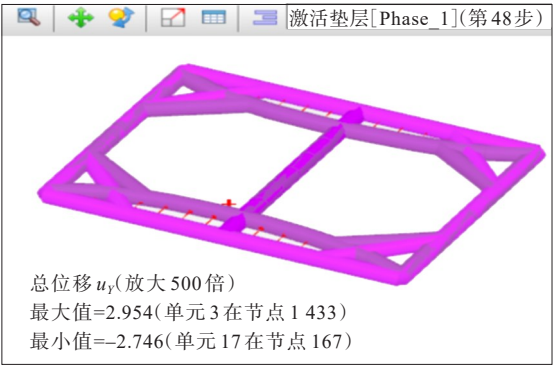


图4 第1层支护变形图(单位:mm)

2.2 对既有挡墙的影响

从以上变形、位移量分析得知,整个基坑开挖模型符合工程安全要求。只有在此基础上,对营业线的影响分析才有意义。因此,接下来通过Plaxis 3D中的节点位移量、位移云图等对基坑开挖对既有挡墙的影响进行量化分析。

在分析挡墙变形时,设置两种情况:第一种情况为基坑短边外边缘与挡墙的距离设置为2 m,在变形满足要求的情况下,缩小距离为1 m,作为第二种情况。2 m和1 m间隔X方向变形图如图5、6所示。

在基坑内第一层土开挖后,未进行支护时,与基坑相距2 m挡墙最大的位移为挡墙顶部中间点,为-2.6 mm,即向基坑方向变形了2.6 mm。在垫层施工完成后挡墙的最大位移为-10.3 mm,即向基坑方向变形了10.3 mm。将挡墙与基坑边缘的间距缩小到1 m,再次划分网格计算最大的位移仍为挡墙顶部中间点,为-2.4 mm,即向基坑方向变形了2.4 mm。在垫层施工完成后,挡墙的最大位移为-9.8 mm,即向基坑方向变形了9.8 mm。

从以上两种情况的计算结果分析,当挡墙和基坑的间距从2 m缩小到1 m时,实际的挡墙变形反而减小了,X方向位移减小了0.5 mm。在模型建立时,考虑到沿线有数百个基坑,因此截取一段挡墙对应一个基坑来研究基坑开挖对挡墙的影响。然而在实际过程中,挡墙长度远大于基坑宽度,分割了挡墙后导致整体性下降,在模型中的表现为变形和位移的增加。因此,若将模型中挡墙的长边边缘位移限制为0,则在实际施工中其变形量要再下降30%~50%。

得出结论:在当前设置的最不利条件组合情况下,基坑开挖至坑底后,距离基坑外边缘1~2 m的挡墙,最大变形为5~7 mm。

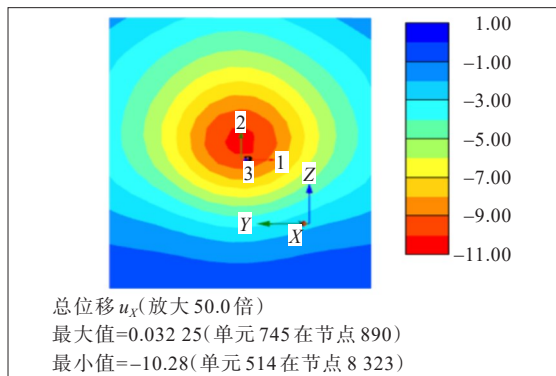


图 5 2 m 间隔 X 方向变形图(单位:mm)

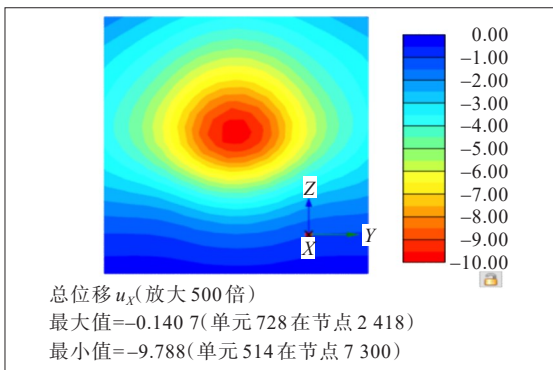


图 6 1 m 间隔 X 方向变形图(单位:mm)

2.3 位移场对营业线的影响

对于营业线的桥台,模型建立时将其设置为大结构刚体(可忽略自身变形),将其作为模型的初始条件激活,产生的位移在步骤 2 后全部重置为 0。在设置营业线桥台与基坑间距时,参考现场某墩承台基坑外边缘与营业线外边缘距离为 9.45 m,在模型建立时,考虑更不利条件,再将距离减小约 25%,将基坑外边缘与营业线外边缘距离设置为 7 m。

在三维坐标系中截取基坑和营业线桥台的中轴面 $Y=15$ m 平面,该平面的 X 方向位移图如图 7 所示,可见基坑的位移场的影响范围为距离基坑 6.5 m 的位置,因此营业线桥台外边缘和在 6.5 m 范围外,受到位移场的影响较小。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[19],按 II 级公路车辆均布荷载考虑,在基坑与营业线旁施加面荷载,取 $q=7.875$ kN/m²。在重新划分网格计算后,选择营业线桥台靠近基坑一侧的外侧表面所在平面 $X=6.5$ m,得到如图 8 所示的 X 轴方向的阶段位移云图,可见营业线桥台产生的最大位移为 3.9 mm。由于营业线桥台设置为刚体,其变形在该云图中表现为线性,在靠近地面处的 X 轴方向位移约为 3 mm。

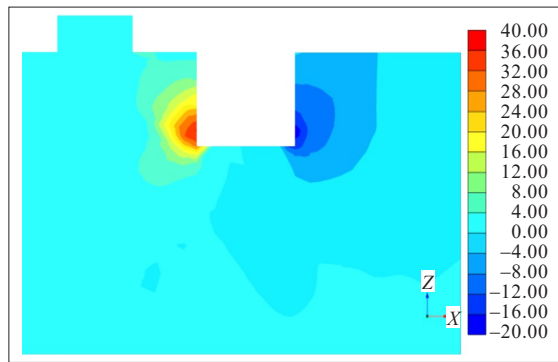


图 7 中轴面位移云图(单位:mm)

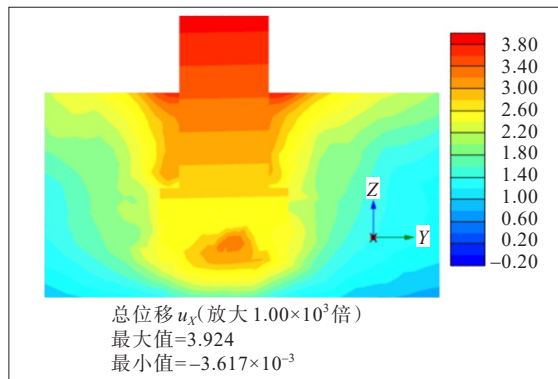


图 8 中轴面 X 累计位移图(单位:mm)

选取 $X=6.5$ m 上位于营业线桥台顶部边缘某计算节点,节点位置如图 9 所示,分别计算相同荷载下基坑与营业线的距离为 7 m 和 5 m 条件下该节点的位移,位移曲线如图 10 所示。由图 10 可见:① 7 m 间距下节点最终的 X 轴方向的累计位移量约为 3.7 mm,5 m 间距下节点最终的 X 轴方向的累计位移量约为 5.6 mm,增大了约 50%;② 对过程产生较大位移的步骤为钢板桩的打入(包含激活周边荷载 $q=7.875$ kN/m²)和最后一层土开挖,因此,实际上影响位移的施工过程为车辆荷载和开挖基坑内最后一层土;③ 在当前设置的最不利条件组合情况下,基坑开挖至坑底后,距离基坑外边缘 5~7 m 的营业线桥台,产生的最大位移为 3~6 mm。

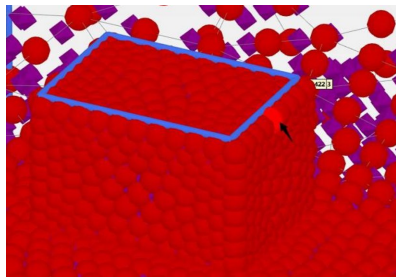


图 9 节点位置图

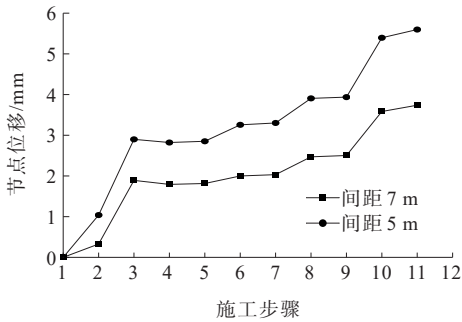


图10 节点位移图

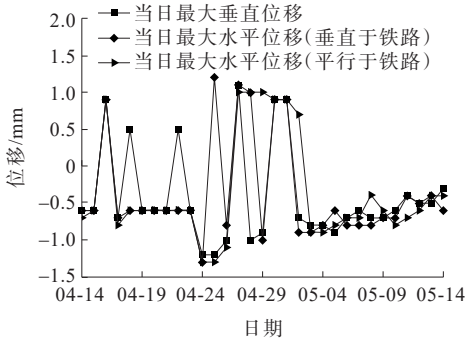


图12 当日最大位移图(2020年)

3 实际监测数据的对比与分析

在对最不利情况建模分析后,再对现场的实测数据进行分析对比。现场的施工监测期设置为2020年4月14日至5月14日,监测段为白茆河特大桥的330#~344#桥台基坑施工段,测点布置在既有线两侧,在桥墩墩身离地面1.5 m处各布置2个观测点。所用监测仪器为Leica TS60全站仪和Laica DNA03电子水准仪,临近营业线施工段监测点布置见图11。

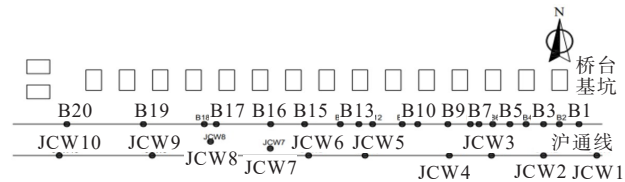


图11 临近既有线施工段监测点布置图(330#~344#桥台)

根据规范,有砟轨道路基水平横向位移或垂向位移变化速率不得超过2 mm/d,累计变化量不得大于10 mm。

该项目采用的是假定坐标系,以垂直于铁路方向为横坐标方向,平行于铁路方向为纵坐标方向,垂直变化量中,正值表示上升,负值表示下沉。横坐标方向变化量中:正值表示测点垂直于线路方向远离铁路位移,负值表示测点垂直于线路方向靠近铁路位移;纵坐标方向变化量中:正值表示测点沿铁路沿线小里程方向位移,负值表示测点沿铁路沿线大里程方向位移。

在4月14日至5月14日的基坑施工过程中,每天都对沪通线上设置的位移点进行测量。当日最大位移图如图12所示,所有测量日中,当日最大垂直位移为-1.2 mm(下沉),当日最大水平位移:垂直于铁路方向为1.2 mm(靠近铁路方向),平行于铁路方向为-1.3 mm。

图13为4月14日至5月14日,所有测量日中的累计最大位移。所有测量日中,累计最大垂直位移为-3.5 mm(下沉),累计最大水平位移:垂直于铁路方向为-3.7 mm(远离铁路方向),平行于铁路方向为-3.4 mm。累计值以最后一日测量为准,可见受到桥台施工的先后顺序影响,累计最大位移值并不是固定一个测点,在整个施工期间,累计最大变化值的测点位置一直在变化。监测期的最后一天,所有测点的累计变形/位移量为3 mm左右,变化量±0.6 mm。变化方向为所有测点均沉降,且向着远离铁路方向进行位移。最后一日观测点累计位移图如图14所示。

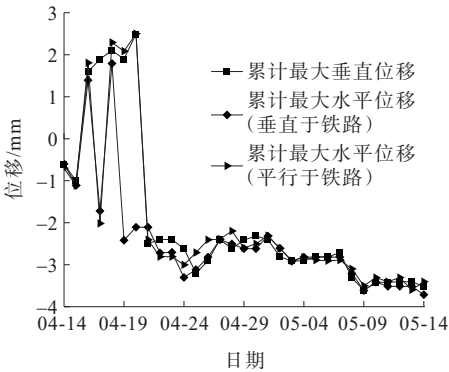


图13 累计最大位移图(2020年)

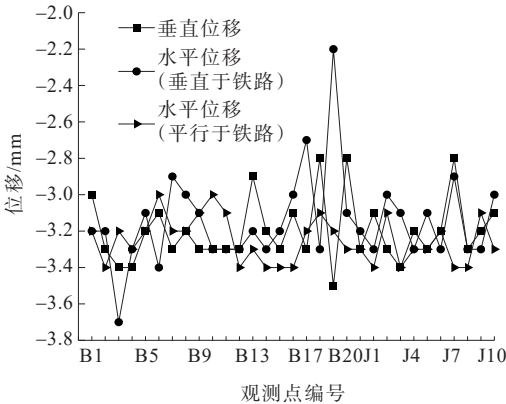


图14 最后一日观测点累计位移图

在变化方向上,实际的变化方向和模型中既有线桥台的变化方向相同,即临近既有线的桥台施工使得既有线产生了沉降,且由于基坑开挖引起土压力释放,既有线整体向着施工侧位移。

在位移变化量上,3 mm 的实测数据与模型的 3~6 mm 数据处于同一量级。实际上模型的建立是按照最不利条件建立的,但在实际施工过程中,还存在既有线的车辆荷载以及临近既有桥台基坑施工的时间效应,这些因素具有影响小且在模型中较难表现,因此模型的变化量比计算结果更大。

4 结 论

本文通过建立 Plaxis 3D 模型,对基坑开挖过程的安全性、对营业线的影响进行了分析,得到了有关典型墩承台的基坑施工对营业线的影响结果:

(1) 临近挡墙的钢板桩基坑开挖过程会对墙体产生影响,在最不利条件的组合下,基坑开挖至坑底后,距离基坑外边缘 1~2 m 的挡墙,最大变形为 5~7 mm。

(2) 临近营业线的钢板桩基坑开挖过程会对营业线桥台产生影响,在最不利条件的组合下,基坑开挖至坑底后,距离基坑外边缘 5~7 m 的营业线桥台,产生的最大位移为 3~6 mm,且产生位移的主要因素或施工步骤为车辆荷载和基坑最下层土开挖。基坑开挖外边缘与营业线桥台的距离建议大于 6.5 m。

(3) 在实际临近既有线的施工过程中,既有线整体会产生沉降且向着施工侧位移,与模型中既有营业线变化方向相符合。既有线的实测变形/位移量在 3 个方向的变化量为 (3 ± 0.6) mm,与模型计算结果的 3~6 mm 基本符合。

参考文献:

- [1] 杨敏,朱碧堂.超载软土地基被动加固控制邻近桩基侧向变形分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1912-1918.
- [2] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(6): 934-955.
- [3] GOH A T C, TEH C I, WONG K S. Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(9): 792-801.
- [4] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94-99.
- [5] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional analysis of single pile response to lateral soil movements[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(8): 747-758.
- [6] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1): 58-65.
- [7] MIAO L F, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional finite element analyses of passive pile behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(7): 599-613.
- [8] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1462-1474.
- [9] LIYANAPATHIRANA D S, NISHANTHAN R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 52: 168-181.
- [10] SHAKEEL M, NG C W W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 55-72.
- [11] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等.基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J].岩土工程学报,2007,29(5): 638-643.
- [12] 王菲,嵇一.基坑开挖对既有铁路桥基础变位的影响分析[J].铁道工程学报,2012,29(8): 28-33.
- [13] 王木群.基坑开挖对临近桥桩的影响及基坑稳定性分析[J].中外公路,2014,34(3): 197-200.
- [14] 高立刚,宁贵霞.基坑开挖深度对既有铁路线变形的影响分析[J].南阳理工学院学报,2016,8(2): 102-105.
- [15] 高东,汪东林.基坑开挖对临近高架桥桩的影响[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2017,35(3): 435-438.
- [16] 孟繁增.基坑开挖引起邻近高铁桥墩隆起变形实例分析[J].铁道标准设计,2020,64(4): 98-103.
- [17] 曾国东,王佳,徐奋强,等.桩土复合路基基层剪切机理研究[J].中外公路,2019,39(2): 19-22.
- [18] 邓超.高架桥基础承台开挖引起的路面差异沉降控制方法研究[J].中外公路,2020,40(2): 15-19.
- [19] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.