

新机场高速高架桥受邻近基坑开挖的影响分析

庞 兴

(北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市 100000)

摘 要: 基于永兴河北路综合管廊穿越新机场高速节点高架桥工程,采用MIDAS Civil有限元软件对新机场高速永兴河节点高架桥的基础变位进行数值模拟,以确保上部结构及墩柱满足承载力和正常使用要求,得到了桥梁基础变位的控制和监测指标;同时采用三维有限元计算软件MIDAS GTS NX对永兴河北路综合管廊的基坑开挖的各个工况进行分析,以评判基坑开挖方案对永兴河节点高架桥的影响,从而确定管廊基坑支护方案的有效性和合理性。计算结果表明,与高架桥相交节点处的管廊基坑采用桩锚支护方案能有效减少对节点高架桥的影响,并且桥梁的基础变位满足控制和监测指标要求,桩基内力满足要求,保证了桥梁及基坑的安全性,成果可为类似的地下结构下穿桥梁工程提供参考依据。

关键词: 桥梁;管廊;基坑;桩基;基础变位

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0253-06

Analysis on Impact of Adjacent Excavation on Elevated Bridge in New Airport Expressway

PANG Xing

(Beijing Municipal Engineering Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: Based on the engineering case of utility tunnel on North Yongxinghe Road crossing the elevated bridge of the new airport expressway node, MIDAS Civil finite element software is used to numerically simulate the foundation displacement of the elevated bridge on Yongxinghe node of the new airport expressway in order to ensure that the superstructure and pier columns meet the bearing capacity and normal use requirements, and to obtain the control and monitoring indicators of the bridge foundation displacement. At the same time, the three-dimensional finite element software MIDAS GTS NX is used to analyze various working conditions of the excavation of the foundation pit for the utility tunnel on North Yongxinghe Road in order to evaluate the impact of the foundation pit excavation scheme on the elevated bridge in the node of Yongxing River, and to determine the effectiveness and rationality of the foundation pit support scheme of utility tunnel. The calculation results show that the use of pile anchor support scheme for the utility tunnel foundation pit at the intersection node with the elevated bridge can effectively reduce the impact on the node elevated bridge, and the foundation displacement of the bridge meets the requirements of control and monitoring indicators, and the internal force of the pile foundation meets the requirements, which ensure the safety of the bridge and foundation pit. The reference is provided for similar underground structures crossing under bridge projects.

Keywords: bridge; utility tunnel; foundation pit; pile foundation; foundation displacement

0 引 言

随着地下空间的开发和利用,地下结构下穿城市桥梁的状况越来越多。城市桥梁在城市交通中占据着举足轻重的地位,地下结构下穿城市桥梁会对桥梁结构的安全和正常使用造成严重威胁。桥梁桩基大部分为摩擦桩,主要依靠桩侧土体的摩阻力来提供桩基的竖向承载力。对地下结构的基坑开挖过

程,邻近桥梁的桩基会受到来自土体的水平推力作用,对桩基产生附加弯矩,使桥梁的上部结构荷载分配到桥梁桩基及相邻土层的应力发生改变,很可能使桩基发生损坏,危及桥梁的安全和周边人们的生命。正是由于这些问题的存在,如何预先得到桥梁桩基的变位限值,并采取有效的支护措施,控制地下结构的基坑开挖过程对相邻桥梁桩基的影响,在实际的项目中具有重要意义。

本文采用MIDAS Civil有限元软件对节点高架桥的基础变位进行模拟,以保证上部结构及墩柱满足承载力及正常使用要求的目的,得到桥梁基础变位

收稿日期: 2024-12-20

作者简介: 庞兴(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

的控制指标;同时采用三维有限元软件 MIDAS GTS NX^[1]对永兴河北路综合管廊的基坑开挖的各个工况进行分析,以评判基坑开挖方案对永兴河节点高架桥的影响,从而确定管廊基坑支护方案的有效性和合理性。

1 工程简介

1.1 永兴河节点高架桥概况

永兴河北路综合管廊位于永兴河北路下方,其在新机场高速永兴河节点处下穿新机场高速永兴河高架桥,对应管廊桩号位置为 K10+205~K10+260 和 K11+210~K10+270,其中永兴河桥梁工程分为 4 个部分:X 线主线高架桥、Y 线主线高架桥、X2 匝道桥及 Y2 匝道桥,见图 1。

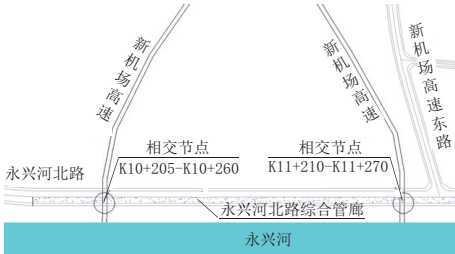


图1 相交节点平面位置示意图(单位:m)

主线高架桥上部结构形式均采用现浇混凝土连续箱梁,主梁为单箱 4 室斜腹板形式,桥宽为 20 m;匝道桥上部结构采用现浇混凝土连续箱梁^[3],主梁为单箱单室斜腹板形式,桥宽为 9 m。永兴河主线高架桥桥梁下部结构采用横向双墩,支撑墩柱统一采用矩形花瓶墩结构,中墩与主梁之间采用固结,柱底部断面尺寸为 1.8 m×1.1 m。匝道桥采用横向独柱支撑,柱底部尺寸为 1.8 m×1.1 m。桥梁基础全部采用钻孔灌注桩上接矩形承台的支撑形式,桩基直径均为 1.2 m。相交节点处永兴河高架桥的跨径、桩基形式见表 1。

表 1 永兴河高架桥信息表

节点桥梁名称	跨径布置/m	桥宽/m	桩径/m	桩长/m	桩基类型
Y2 匝道	33+41+33	9	1.2	30	摩擦桩
Y 线主线	33+41+33	20	1.2	30	摩擦桩
X2 匝道	33.7+39.3+37	9	1.2	30	摩擦桩
X 线主线	33+41+33	20	1.2	30	摩擦桩

1.2 综合管廊工程概况

永兴河北路综合管廊布置在上述新机场高速永兴河主线桥和匝道桥中跨的两墩之间,管廊横向宽度范围约 20.6 m,结构总高度约为 4.9 m。管廊基槽开挖的最大深度为 8~12 m,采用桩锚支护^[4]形式(见图 2)。基坑支护设计为临时支护设计,支护结构

使用年限为 1 a,基坑侧壁安全等级为一级^[5-6]。

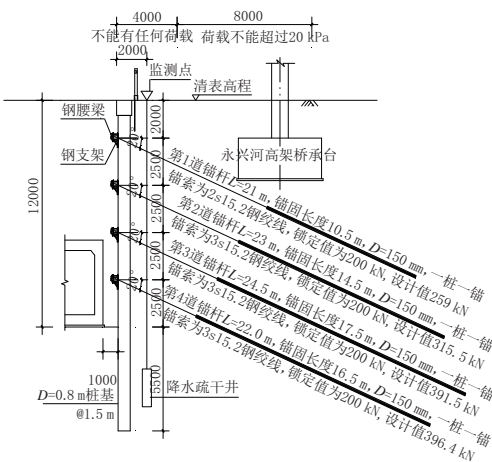


图2 12 m深基坑支护剖面图(单位:mm)

1.3 管廊与高架桥位置关系

基坑深度最深为 8 m 范围内,管廊支护桩与桥桩基的净距最近处为 4.65 m;基坑深度最深为 12 m 范围内,管廊支护桩与桥桩基的净距^[7]最近处为 4.95 m。综合管廊基坑^[8]与永兴河高架桥的相交节点平面示意图见图 3、图 4。位置信息见表 2。

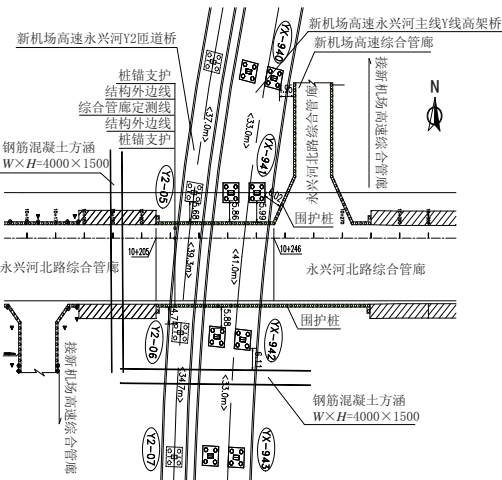


图3 平面示意图 K10+205~K10+280(单位:m)

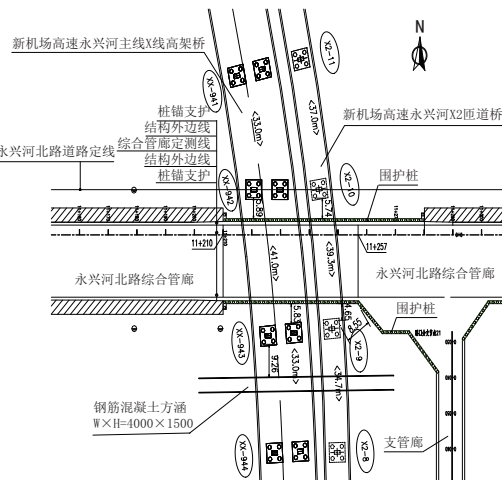


图4 平面示意图 K11+210~K11+270(单位:m)

表2 位置信息表

综合管廊 桩号	下穿桥梁 名称	下穿位置轴号	L_{1min}/m	L_{2min}/m
K10+205 ~ K10+280	Y2 匝道 Y 线主线	Y2-05 ~ Y2-06 YX-941 ~ YX-942	5.68 5.86	4.70 5.88
K11+210 ~ K11+270	X2 匝道 X 线主线	Y2-09 ~ Y2-10 XX-942 ~ YX-943	4.65 5.89	5.74 5.83

1.4 桥位处地质情况

桥梁位于永定河冲洪积扇下游,属平原区,第四系地层厚度变化较大,地貌类型单一,地面高程由北向南逐渐降低,自然地面标高约在 22.32 ~ 35.52 m。按成因年代分为人工堆积层、新近沉积层和一般第四纪冲洪积层 3 大类,现分述如下。

(1)人工堆积层

表层为一般厚度 0.30 ~ 4.40 m(平均层厚 1.04 m)的人工堆积黏质粉土—粉质黏土填土①层。

(2)新近沉积层

人工堆积层以下为新近沉积的砂质粉土—黏质粉土②层,粉质黏土②₁层,有机质黏土②₂层和粉细砂②₃层。

(3)第四纪沉积层

新近沉积层以下为第四纪沉积的砂质粉土—黏质粉土③层,粉质黏土③₁层,粉细砂③₃层,粉质黏土④层,砂质粉土—黏质粉土④₂层,粉细砂④₃层,细中砂⑤₂层,黏质粉土—砂质粉土⑤₃层,粉质黏土⑤₄层,粉质黏土⑥层,黏土⑥₁层,砂质粉土—黏质粉土⑥₂层和粉细砂⑥₃层。

据近几年在该场地附近的勘察及施工资料,场地附近近 3 ~ 5 a 地下水最高水位标高为 28.00 ~ 22.00 m(自北向南)。

沿线 40 m 深度范围地下水以第四纪松散沉积物孔隙水为主,主要分布三层地下水,地下水类型为上层滞水、潜水和微承压水。

上层滞水:本层水分布无规律性,本次勘察期间未测得该层水。

潜水:本次测得水位埋深在 21.20 ~ 21.40 m,含水层主要为④细中砂层。

微承压水:本层水位埋深在 25.0 ~ 29.0 m,含水层主要为⑤₂粉土、⑤₃细砂层,本次勘察期间未测得该层水。

2 桥梁控制指标

采用 MIDAS Civil 对永兴河主线高架桥及中横梁和 X2 匝道桥、Y2 匝道桥建立计算模型,模型中考虑

永久作用和可变作用,并进行分析^[9]。

在满足桥梁正常使用前提下,对基础的竖向沉降值和水平变位值进行多工况组合验算,最后发现当出现下述情况^[2]:承台顶水平变位达到 3 mm,纵向相邻墩柱的相对沉降差超过 3 mm、横向相邻墩柱的相对沉降差达到 2 mm 的位移时,墩柱纵向倾斜度 $\delta/H>0.000\ 32$,墩柱横向倾斜度 $\delta/H>0.000\ 4$,桥梁结构所受的主拉应力超过桥梁规范所允许的最大值。如变位值再增加,中墩墩顶处主梁上缘的主拉应力将严重超标,桥梁结构不满足结构安全和使用要求。

3 力学模型

采用三维有限元计算软件^[10]MIDAS GTS NX 对永兴河北路综合管廊基坑的开挖过程进行数值分析。

3.1 土体参数验证

根据永兴河北路综合管廊基坑支护设计图、永兴河高架桥施工图及相关地勘资料和桩号 K11+250 处的基坑监测数据,采用 MIDAS GTS NX 有限元软件中的修正莫尔库伦本构关系^[11],建立土体验证模型^[12](见图 5)。通过对已有监测数据的管廊基坑进行数值模拟,计算结果中灌注桩顶水平变位和周边土体沉降值与监测数据结果基本吻合,表明土体参数取值合理。主要地层岩土参数见表 3。

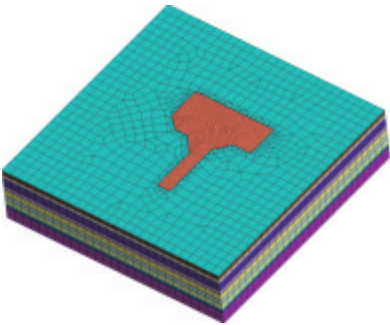


图5 土体验证模型

3.2 有限元模型建立

由于 Y2 匝道桥、Y 线主线高架桥与综合管廊基坑的相对位置关系最为不利,故本次数值模拟仅模拟 Y 线处基坑开挖的影响分析。

计算中土体采用修正摩尔—库伦模型,桥梁墩柱、承台和桩基采用弹性模型^[13],材料按照对应桥梁混凝土强度等级取值。土体、承台和桥墩采用 3D 单元模拟,桩基和冠梁采用 1D 梁单元模拟^[14]。支护桩采用 800 mm@1 500 mm 灌注桩,在程序中使用板单元进行模拟,板单元厚度采用等效刚度法确定,等效厚度为 0.54 m;锚杆采用 $D=150\text{ mm}$ 预应力锚索,在

表3 主要地层岩土参数

土层编号	土层名称	土层厚/m	天然容重/(kN·m ⁻³)	饱和容重/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/(kN·m ⁻²)	压缩模量/kPa
①	素填土	2.0	13.9	18.3	12.0	12.0	3.0
② ₃	粉细砂	3.5	18.0	19.0	28.0	2.0	10.0
② ₁	粉质黏土	3.5	17.8	19.0	13.8	27.2	5.8
② ₃	粉细砂	2.5	18.0	19.0	25.0	25.0	14.0
③	粉质黏土	5.0	18.0	19.0	28.0	2.0	10.0
⑤ ₂	细中砂	6.0	18.0	19.0	36.0	2.0	25.0
⑤ ₄	粉质黏土	3.0	19.0	20.0	14.2	27.1	11.5
⑥	粉质黏土	3.0	19.0	20.0	14.5	27.5	12.4
⑥ ₃	粉细砂	6.0	18.0	19.0	34.0	2.0	45.0
⑥ ₂	粉质黏土	15.5	19.0	20.0	20.3	12.5	18.0

程序中采用植入式桁架单元模拟^[15],并按支护图纸施加相应的张拉力;荷载为桥梁上部结构荷载、自重及超载。数值模拟计算分析中,桥梁的下部结构按模型中的既有结构考虑,地层中存在的既有桥梁结构的状态作为初始平衡状态^[16],基坑开挖施工前地层变形清零。主要考虑管廊基坑开挖、桩锚支护、降水、施加超载等主要阶段^[17]。主要工况如下:

- (1)考虑初始水头,进行稳态分析^[18];
- (2)将既有桥梁结构的状态作为初始平衡状态,进行初始位移分析^[19];
- (3)施工基坑的支护桩和冠梁;
- (4)施加超载 20 kPa,距坑边距 4 m,作用宽度 8 m;
- (5)开挖第一步基坑,施加第一道锚索^[20];
- (6)开挖第二步基坑,施加第二道锚索;
- (7)基坑降水^[21],开挖第三步基坑,施加第三道锚索;
- (8)基坑降水,开挖第四步基坑,施加第四道锚索。

Y线基坑开挖模型见图6。

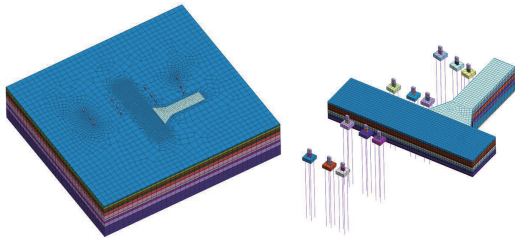


图6 Y线基坑开挖模型

4 计算结果

4.1 地层变形

地层变形云图见图7。

X方向位移(桥梁横桥向),12 m深的基坑最大

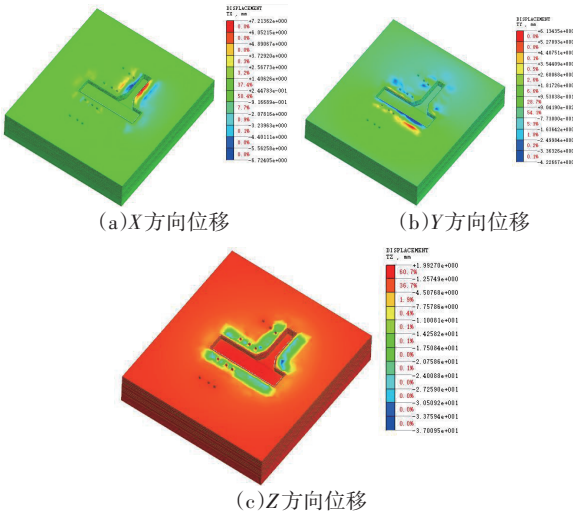


图7 地层变形云图(单位:mm)

变形位移为 6.2 mm;Y方向位移(桥梁纵桥向),8 m深的基坑最大变形位移^[22]为 5.3 mm;土层最大竖向位移值^[23]为 26.0 mm。邻近模型边界土体变形量值很小,说明模型范围取值合理,边界效应对计算结果影响很小。

4.2 桥梁下部变形

开挖工况4的桥梁位移见图8。阶段累计附加下部结构水平变形计算见表4。阶段累计附加相邻墩柱的相对沉降差计算见表5。

可以看出桥梁下部水平位移^[24]离基坑距离越近,位移量越大,YX-941 东侧墩受北侧支管廊的基坑开挖影响,下部结构横桥向位移最大,位移量达到 2.1 mm;YX-942 西侧墩距离受东西走向的主管廊基坑最近,净距为 4.7 m,下部结构顺桥向位移^[25]最大,位移量达到 2.6 mm。

随着开挖过程,邻近基坑的桥梁下部结构的竖向位移减少,远离基坑的桥梁下部结构的竖向位移稍微增大,主要原因是基坑开挖过程中,土体的卸载效应^[26]导致坑底土体的向上隆起,同时两侧土体产

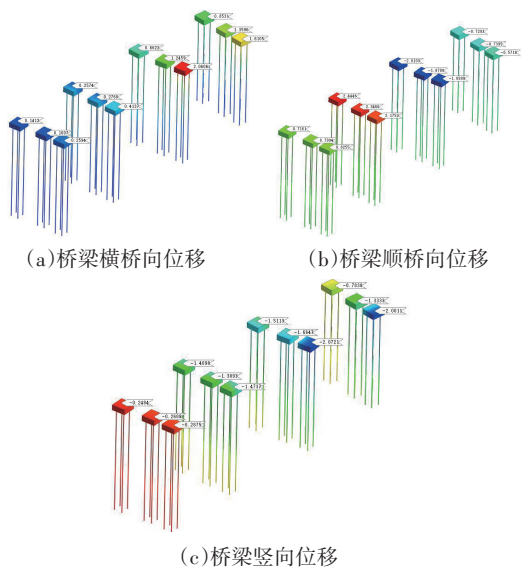


图 8 开挖工况 4 桥梁位移(单位:mm)

表 4 阶段累计附加下部结构水平变形计算结果 单位:mm

位置	开挖 1	开挖 2	开挖 3	开挖 4
YX-941 东侧墩	1.28	1.52	1.85	2.10
YX-942 西侧墩	1.56	1.79	2.47	2.60

表 5 阶段累计附加相邻墩柱的相对沉降差计算结果 单位:mm

位置	开挖 1	开挖 2	开挖 3	开挖 4
纵向相邻墩柱	1.18	0.88	0.70	0.72
横向相邻墩柱	0.64	0.49	0.40	0.15

生指向基坑方向的位移。对桥梁下部结构产生一定的“抬升”作用,从而减小其竖向位移^[27]。

4.3 桥梁桩基内力

施工阶段桩基内力见表 6。

表 6 施工阶段桩基内力结果

施工阶段	轴力 max /kN	横桥向弯矩 max /(kN·m)	纵桥向弯矩 max /(kN·m)
开挖 1	3 439.7	132.2	163.8
开挖 2	3 353.9	106.0	228.3
开挖 3	3 564.4	141.3	249.6
开挖 4	3 586.3	144.6	238.3

受基坑开挖过程中,土体的卸载^[28]效应导致坑底土体的向上隆起^[29],对桥梁下部结构产生一定的“抬升”作用,桩基轴力逐渐增大^[30],桩基的最大轴力值处于基坑开挖工况 4,数值为 3 586.3 kN,桩基的最大弯矩值处于基坑开挖工况 3,数值为 249.6 kN·m,桩基承载力满足现行规范要求^[31]。

5 结 语

通过采用 MIDAS Civil 有限元软件对新机场高速节点高架桥的基础变位进行数值模拟,同时采用三

维有限元软件^[32] MIDAS GTS NX 对永兴河北路综合管廊基坑施工过程的各个工况进行分析,以评估基坑开挖设计方案对新机场高速节点高架桥的影响,进而确定管廊基坑支护方案的有效性和合理性^[33],为类似的地下结构下穿桥梁工程提供了参考依据。主要结论与建议包括。

(1)基于保证桥梁上部结构、墩柱承载力及正常使用要求的目的,可得到合理的桥梁基础变位控制值和监测指标。

(2)综合管廊工程施工会对新机场高速永兴河高架桥桥梁基础产生一定的附加影响,但影响效果在永兴河高架桥的安全承受范围内,不会危害桥梁结构的安全。

(3)通过将基坑开挖的实测数据与模拟计算得到的基坑围护结构及土体变形的结果与进行对比分析,验证了采用 MIDAS GTS NX 有限元软件中的修正莫尔-库伦本构关系,建立的基坑开挖数值模型的可靠性,能够近似真实的反映综合管廊基坑开挖过程的现场情况。

(4)基坑开挖采用桩锚支护方案能有效减少对节点高架桥的影响,并且桥梁的基础变位满足控制和监测指标要求、桩基内力满足承载力要求,保证了桥梁及基坑的安全性。

(5)基坑离新机场高速永兴河高架桥桩基承台较近,为减少锚索对桥梁桩基的影响,建议调整该区域基坑锚索布置,并远离承台和桩身构件,避免桥梁基础周围锚索过于密集。

参考文献:

[1] 芦文文,陆龙龙,李西.大断面综合管廊施工对邻近建筑物和土体变形影响研究[J].中国设备工程,2010(9):261-263.
[2] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
[3] 杨敏,周洪波,杨桦.基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J].土木工程学报,2005,38(4):91-96.
[4] 江建红,崔江余.不同土体本构模型对基坑开挖数值模拟计算结果的影响分析[J].施工技术,2011,40(10):258-261.
[5] 苟尧泊,俞峰,杨予.基坑开挖引起既有桩基侧摩阻力中性点位置分析[J].岩土力学,2015,36(9):2681-2687.
[6] 杨敏,逯建栋.深开挖基坑回弹引起的坑中桩受力与位移计算[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(12):1730-1735.
[7] 陈宁锋,刘念武.某深基坑开挖对高架桥影响的数值和预测分析[J].水利规划与设计,2024(5):139-144.
[8] 陈聪.深基坑开挖对临近市域铁路高架桥梁影响的研究[J].基础工程设计,2021(12):49-51.
[9] 邹建祥,张中华,李金贺,等.深基坑开挖对紧邻高架桥变形影响分析研究[J].建筑结构,2022(12):2298-2303.

- [10] 阮泳华. 临近高架的基坑开挖变形特性的数值分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(8): 68-69.
- [11] 赵平, 王占棋. 深基坑开挖引起临近深层土体水平变形研究[J]. 安徽工程大学学报, 2022, 37(2): 49-53; 67.
- [12] 李福林. 软土地区狭长型深基坑开挖引起深层土体变形分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 121-127.
- [13] 黄文彬, 王源, 孙国峰. 基坑开挖对邻近地铁高架影响的变形计算与监测分析[J]. 广东土木与建筑, 2021, 28(12): 46-50.
- [14] 刘庆晨, 宋昭煌, 李秀峰. 基坑开挖对邻近地铁高架线路的影响及保护研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(6): 162-170.
- [15] 李兵, 马宁. 地铁深基坑开挖对邻近桥桩的影响分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 107-113.
- [16] 张昌桔, 杨守臻, 姜群. 隧道基坑下穿既有高架桥变形控制研究[J]. 市政技术, 2019, 37(5): 114-117.
- [17] 李楠. 双地铁基坑开挖对邻近高架桥桩基础的影响[J]. 铁道勘察, 2023, 49(2): 106-111.
- [18] 麻凤海, 陈荟茹, 韩硕. 高架桥下基坑开挖次序对桥墩变形的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(21): 8750-8756.
- [19] 李明, 潘岸柳, 唐治, 等. 基于 MIDAS 深基坑开挖对近距离高架桥的安全影响研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2018, 30(1): 89-94.
- [20] 王振楠, 杨冬英, 李学东, 等. 基坑降水开挖对地铁高架桥墩的影响分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2021, 34(4): 31-38.
- [21] 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.
- [22] 季凡凡, 李亚明. 近距离管道基坑对运营地铁高架结构的影响[J]. 2022(4): 228-231.
- [23] 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): 3531-3540.
- [24] 王升. 深基坑施工对邻近高铁桥梁影响研究[J]. 铁道建筑, 2014(9): 102-104.
- [25] 苗笛. 基坑开挖对邻近桥梁影响的数值模拟[J]. 港工技术, 2014(5): 76-79.
- [26] 李龙剑, 李政林, 蔡永昌, 等. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1697-1701.
- [27] 李琳, 宋静, 张建新, 等. 多支撑基坑开挖对邻近桩基影响的三维数值研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 782-789.
- [28] 高晶, 戴源. 轨道高架桥下基坑开挖的相关措施及研究分析[J]. 2021(6): 246-249.
- [29] 王卫东, 李进军, 徐中华. 敏感环境条件下深基坑工程的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 10(30): 349-354.
- [30] 郑刚, 李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 969-977.
- [31] 李龙剑, 杨宏伟, 李政林, 等. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1697-1701.
- [32] 杨庆年, 郑俊杰, 丁烈云, 等. 邻近高架桥的深基坑开挖三维数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 120-123; 128.
- [33] 王翠, 闫澍旺, 张启斌. 深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(5): 2994-3000.

(上接第 233 页)

- 断及整治思路[J]. 中国给水排水, 2025, 41(2): 14-21.
- [11] 陈小龙, 李心梅, 余黎, 等. 城镇排水管网分区监测诊断方法与应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 40-45.
- [12] 周梅, 李政, 熊文, 等. 分区监测诊断方法在城镇排水管网排查中的应用研究[J]. 水利水电快报, 2025, 46(1): 43-48.
- [13] 郭紫波, 栗玉鸿, 吕红亮, 等. 基于监测评估的北方丘陵城市污水提质增效研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(16): 116-123.
- [14] 程小文, 周飞祥, 孙广东, 等. 面向提质增效的污水管网外水快捷排查方法研究[J]. 给水排水, 2022, 58(增刊1): 489-493.
- [15] T/CECS 1764—2024, 城镇污水管网入流渗入监测与评估标准[S].
- [16] 胡馨月, 鲁梅, 崔诺, 等. 提质增效背景下排水管网分级诊断技术研究及实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 17-22.