DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.250159

单侧挖方条件下桥梁基础受力特性及应对措施

马龙祥,陆腾腾
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要: 在桥梁基础周边单侧开挖卸载会引起较大的地层变形,造成桥梁基础承担较大的横向力,这对主要以承受竖向力为主的桥梁基础相当不利。基于实际工程,采用数值模拟的方法,对三种不同工况下的开挖方式进行对比分析,总结规律。经过研究,发现采用双排桩支挡能够显著减小不对称开挖对桥梁基础的影响,同时,通过调整施工工序也能起到很好的效果。研究成果可为后续同类项目的设计方案提供参考。

关键词: 单侧挖方;桥梁;桩基础;双排桩
中图分类号: U443.15;TU997　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0229-05

Mechanical Characteristic and Countermeasures for Bridge Foundation under Unilateral Excavation Conditions

MA Longxiang, LU Tengteng
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute Group, Shanghai 200092, China]

Abstract: Excavating and unloading on one side around the bridge foundation will cause the larger stratum deformation, and the bridge foundation will bear a relatively large lateral force, which is quite unfavorable for bridge foundations that mainly bear the vertical forces. Based on the practical engineering, the numerical simulation method is used to compare and analyze the excavation methods under three different working conditions, and the rules are summarized. After the research, it is found that the use of double-row pile retaining structure can significantly reduce the impact of asymmetric excavation on bridge foundation, and the adjustment of construction process can also have a good effect. The research results can provide a reference for the design schemes of similar projects in the future.

Keywords: unilateral excavation; bridge; pile foundation; double-row piles

0　引　言

随着城市建设的发展,桥梁建设遇到的工程条件越趋复杂。在桥梁基础周边单侧开挖卸载会引起较大的地层变形,造成桥梁基础承担较大的横向力,这对主要以承受竖向力为主的桥梁基础相当不利。如果没有对此类问题引起足够的重视,可能造成严重的后果。

很多专家学者对在陡坡地形及基坑开挖等情况下的桥梁基础的受力特征做了细致的研究,如张建仁[1]等通过数值模拟的方法,研究桥梁桩基在陡坡地形下的水平承载特性,并分析了不同加载工况对基础横向受力的影响。龚先兵[2]等通过模型试验的方法,研究了山区高陡横坡段桥梁桩前后排桩的受力特征。赵明华[3-4]、杨超炜[5]等通过现场试验和理论分析等方法,研究了陡坡坡体推力对桥梁基桩内力和位移的影响规律。周赫宸[6]等通过数值模拟的方法,研究了桥梁基础附近开挖基坑对其造成的影响,并分析了隔离桩的有利作用。张子新[7]等通过模型试验和数值模拟的方法,研究近距离开挖卸荷条件下运营地铁高架桥墩的变形和受力响应。

目前的研究主要是针对既有陡坡地基或者临时基坑[8-12]等工况,对在桥梁周边永久开挖高大陡坡的情况研究较少。

本文基于实际工程,对在桥梁周边永久开挖卸荷进行细致的研究,对比不同工况下桥梁基础的受力特征,并提出应对措施。

1　工程概况

1.1　桥梁工程概况

上海某河道改造工程主要建设内容包括工程范围内的河道疏拓工程(含护岸及防汛道路、支河桥梁工程)及跨河桥梁工程等。根据工程进度安排,桥梁

收稿日期:2025-02-14
作者简介:马龙祥(1988—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。

建设的工期在前，开挖扩宽河道在后，河道边为直立驳岸且与桥梁承台紧贴。桥梁与河道断面示意见图1。

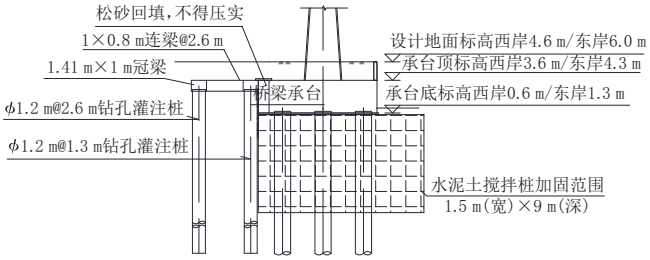

图1　桥梁与河道断面示意图

该桥主桥采用连续钢箱梁桥，整幅布置，近期桥宽16.5 m，远期桥宽22 m，跨径布置为63 m+110 m+63 m=236 m，主梁为连续钢箱梁，下部结构为独柱墩，矩形承台，直径1.2 m灌注桩。引桥采用简支小箱梁，整幅布置，标准跨径为31 m，标准桥宽16.5 m，下部结构为预制混凝土盖梁接独柱式预制桥墩、矩形承台、直径0.85 m灌注桩。为了增加双排桩支挡被动区土体抗力，对承台下方深度9 m，宽度15 m的范围进行了水泥搅拌桩加固。

近期开挖主墩承台前堤岸标高为2.000 m，远期和规划河道衔接，河道底开挖到-2.000 m。远期河道开挖4 m深，桥梁下部基础前土卸载后，势必会对桥墩以及其上的主桥产生影响，因此在桥墩背河侧施作保护性结构，综合比选，考虑采用双排桩结构，减少远期河道开挖不平衡土压力对桥墩的影响，如图所示。

1.2　工程地质概况

本工程河道较长，规划河道两岸多为民房、工业厂房道路、绿化及农田等。沿河两岸场地地势平坦，天然地面高程一般约4.0 m左右。根据上海的地貌单元分区图划分，本工程所在场地属滨海平原地貌类型。

根据勘察揭露的地层，拟建场地100 m深度范围内为第四纪全新世，中更新世沉积层，主要由填土、淤泥质土、黏性土、粉性土、粉砂组成。根据地基土的分布特征及物理力学性质指标，参照行业规范《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)并结合地区工程经验，具体桩基范围内土层划分及计算参数见表1。

表1　地勘土体参数表

土层	层厚h/m	ν	γ/(kN·m^{-3})	c_k/kPa	φ_k/(°)	E_{s1-2}/MPa
①$_1$素填土	4.7	0.4	18.8	15	15	3
②灰黄色粉质黏土	1.35	0.45	18.7	10	25.2	3.9
③灰色淤泥质粉质黏土	3.21	0.45	17.1	10	20.1	1.3
④灰色淤泥质黏土	6.49	0.45	16.8	3	27.3	2.2
⑥暗绿~草黄色粉质黏土	3.3	0.4	19.4	45.2	16	6.7
⑦$_1$草黄~灰色砂质粉土	5.7	0.35	18.6	3.5	30.4	9.7
⑧$_{1-1}$灰色粉质黏土	14.3	0.4	18	19.1	17.1	4.1
⑧$_{1-2}$灰色粉质黏土夹砂质粉土	14.2	0.35	17.8	16	22.5	5.7
⑧$_{2-2}$灰色粉质黏土与粉砂互层	15.5	0.35	18.5	19.7	22.6	6.2
⑨$_{1-2}$灰色粉细砂	11.25	0.35	19.6	2.2	34.1	13.8
回填松砂		0.3	20	3	25	5
水泥土搅拌桩加固		0.3	22	40	20	60

2　数值模型

2.1　土层本构模型

根据大量的研究结果表明，在基坑开挖等工况下，土体基本处于小应变范围内，王卫东[13]等开展了上海土体小应变硬化模型的试验研究，顾晓强[14]等论述了上海地区土体小应变硬化模型参数的取值方法，并通过工程验证，表明小应变硬化模型能很好的反应上海的土体在开挖卸载下的响应，本文将采用小应变硬化(HSS)土体模型进行分析，采用的土体本构模型参数见表2。

2.2　数值模型

除上文介绍的桥梁结构外，双排桩支挡结构中冠梁净尺寸为1.4 m×1.0 m，连梁净尺寸为0.8 m×1.0 m，桩孔灌注桩直径为1.2 m。

数值模型计算采用PLAXIS 2D进行，计算模型以分层土体、支护双排桩、桥梁基础等结构为主。其中不同土层的本构模型采用硬化土弹塑性模型，计算单元采用三角形6节点单元；双排桩和桥梁基础等混凝土结构材料本构模型采用线弹性模型。模型X方向为水平向，Y方向为竖向。模型水平向宽度包络土体开挖影响范围，竖向深度包络桩底以下一定硬持力层厚度。模型底部边界约束X、Y两个方向的

表 2　土体参数取值表

土层名称	E_{s1-2}/MPa	HS 参数模型					
		E_{oed}^{ref}/MPa	E_{50}^{ref}/MPa	E_{ur}^{ref}/MPa	c'/kPa	φ'/(°)	R_f
②$_2$黏土	3.9	3.4	4.4	19.3	10	25.2	0.96
③淤泥质粉质黏土	1.3	1.2	1.6	14.9	10	20.1	0.58
④淤泥质黏土	2.2	1.9	2.0	15.6	3	27.3	0.54
⑤$_3$粉质黏土	6.3	6.1	5.5	23.5	20	26.7	0.95
回填松砂	5	5	5	15	3	25	0.96

位移，两侧边界约束 X 向位移。模型见图 2。

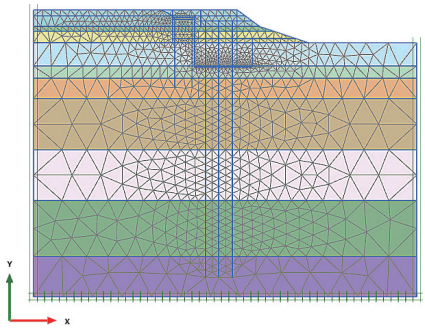

图 2　数值模型

2.3　荷载工况

本次分析考虑三种工况进行对比分析，工况 1：不采用双排桩支护结构，只依靠桥梁自身来抵抗河道开挖带来的附加荷载；工况 2：考虑双排桩支护结构，开挖到承台底标高 2.0 m 后，施工承台，后开挖河道；工况 3：考虑双排桩支挡结构，开挖到远期河道标高 −2.0 m，待变形稳定后，回填至承台底标高 2.0 m，施工承台，后开挖河道。通过对以上三种工况的对比分析，研究双排桩支护的有利作用及不同施工方式的影响。

模型加载时的步骤为：(1)初始地应力场计算；(2)开挖土体至冠梁顶；(3)双排桩施工并施工加固区水泥土搅拌桩；(4)双排桩右侧开挖；(5)桥梁桩基施工并回填土至地面；(6)边坡开挖至指定深度。

3　结果分析

工况 1 在不考虑双排桩支挡结构的情况下，只依靠桥梁自身桩基来抵抗单侧开挖产生的土压力，开挖之后的位移云图见图 3。

从图 4 中可以看出，在不考虑采用双排桩支挡进行保护的情况下，桥梁桩基的最大位移发生在桩顶，最大位移达到了 14.2 mm，参考《公路桥涵地基与基础设计规范》[15]中附录 L 第 P.0.2 条表 P.0.2-1 附注 1，可采用桩顶位移 10 mm 作为控制评价指标，则本工况桩顶位移过大。。同时，过大的基础位移会对桥梁上部结构产生较大的影响，导致伸缩缝顶死等一

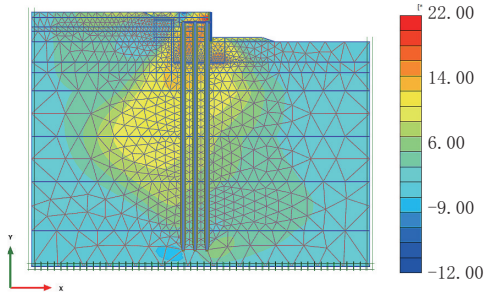

图 3　工况 1 土体位移云图(单位：10^{-3}m)

系列问题。在本工况下，土体的最大水平位移接近 22 mm。

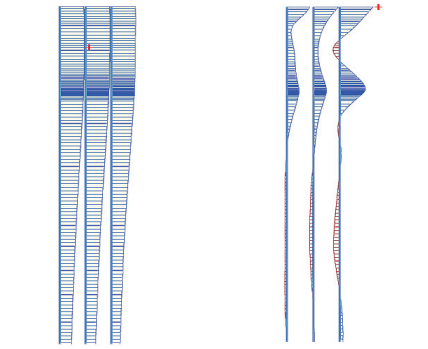

图 4　工况 1 桥梁桩基位移及内力图

桩基最大的弯矩与土体开挖的深度相匹配，最大的弯矩出现在开挖底面附近，最大的弯矩达到 238.5 kN·m/m，按照桩间距 3.375 m 来考虑，最大的桩身弯矩增加约 805 kN·m。对桥梁桩基结构的受力安全带来较大的挑战。

工况 2 考虑采用双排桩支护结构，然后开挖到承台底标高 2.0 m 后，施工承台，最后开挖河道。在桥梁承台施工完成后，依然需要开挖大约 4 m 深的土体，此部分开挖也将对桥梁桩基的变形和受力产生影响。

从图 5 中可以看出，工况 2 桥梁桩基的最大位移降为 9 mm，下降了 37%，满足桩顶位移控制评价指标。最大弯矩降低到 208.7 kN·m/m，最大的桩身弯矩下降到 704 kN·m，下降了 12.5%。

由于双排桩结构自身承担了荷载，产生了变形，

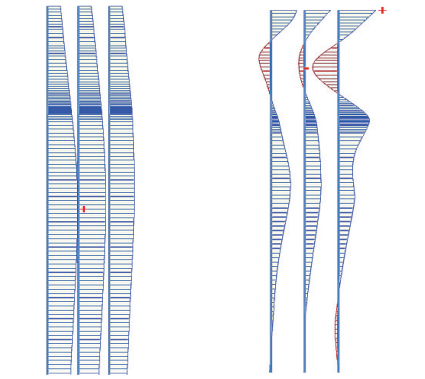

图5　工况2桥梁桩基位移及内力图

见图6，最大桩身位移约5 mm。从图7中可以看出，土体的位移略有减小，约为20 mm。

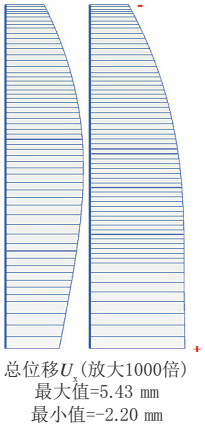

图6　工况2双排桩基位移图

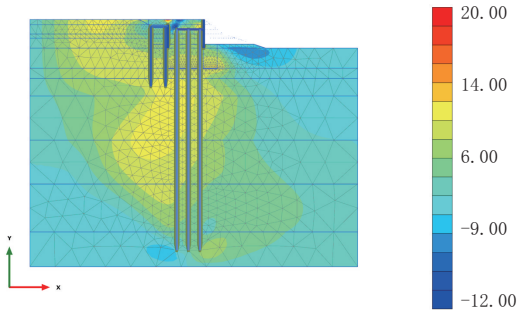

图7　工况2土体位移云图（10^{-3} m）

工况3考虑双排桩支挡结构，开挖到远期河道标高-2.0 m，待双排桩变形稳定后，回填至承台底标高2.0 m，施工承台，最后开挖河道。工况3通过调整施工工序，使得双排桩在桥梁桩基础受力前，完全承担土体开挖带来的荷载，最大限度保护桥梁桩基础，计算结果如下。

从图8中可以看出，桥梁桩基的最大位移降为6 mm，下降了58%，满足桩顶位移控制评价指标。最大弯矩降低到192.7 kN·m/m，最大的桩身弯矩下降到650 kN·m，下降了19.2%。

由于双排桩结构自身承担了荷载，也产生了变形，见图9，最大桩身位移约16 mm。土层位移减小，总体向开挖侧位移，但在顶部位置发生向堤岸侧的位移，大小为16 mm，见图10。

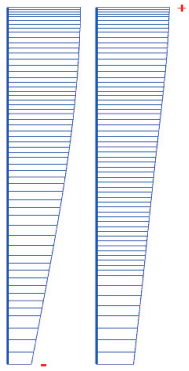

图9　工况3双排桩基位移图

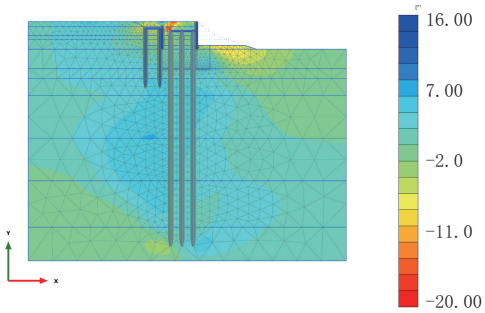

图10　工况3土体位移云图（单位：10^{-3} m）

4　结　语

在桥梁附近开挖永久高大边坡时，采用支挡结构进行保护可以很好减小桥梁基础的位移和内力，对桥梁的永久安全具有重要的意义。同时，合理的施工步骤也是减小开挖对桥梁影响的重要因素。

在本工程中，考虑双排桩支护结构，施工承台，后开挖河道；桥梁桩基位移下降了37%，最大弯矩下降了12.5%；待变形稳定后，回填至承台底标高施工承台，后开挖河道，桥梁的最大位移下降了58%，最大弯矩下降了19.2%。可见，效果显著。可见，双排桩在抵抗桥梁桩基后的不均匀土压力上，起到了显著的效果，且工况3先开挖至远期河道标高，使得双排桩承担更多的土压力，减小了桥梁桩基承担比例，保护了桥梁桩基。

希望本文研究成果可为后续同类项目的设计方案提供依据。

参考文献：

[1] 张建仁，刘海辉，马亚飞，等．陡坡桥梁桩基水平承载特性分析[J]．交通科学与工程，2023，39(1)：42-51.

[2] 龚先兵，杨明辉，赵明华，等．山区高陡横坡段桥梁桩基承载机理模型试验[J]．中国公路学报，2013，26(2)：56-62.
[3] 赵明华，陈耀浩，杨超炜，等．基于有限杆单元法的陡坡基桩非线性分析[J]．岩土力学，2018，39(8)：3020-3028.
[4] 赵明华，杨超炜，陈耀浩，等．高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础现场试验研究[J]．岩土工程学报，2018，40(2)：329-335.
[5] 杨超炜，赵明华，陈耀浩，等．高陡横坡段桩柱式桥梁双桩基础受力分析[J]．湖南大学学报(自然科学版)，2018，45(3)：129-135.
[6] 周赫宸，秦朝辉，顾晓强．基于HSS模型的深基坑开挖对邻近桥桩的影响分析及变形控制研究[J]．地基处理，2023，5(5)：369-375.
[7] 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.
[8] 虞春龙．围堰明挖基坑对临近隧道及桥梁的影响分析[J]．城市道桥与防洪，2018(9)：226-229.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 王恒，陈福全，林海．基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析[J]．岩土工程学报，2015，14(5)：1257-1265.
[12] 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(2)：1697-1701.
[13] 王卫东，王浩然，徐中华．上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]．岩土力学，2013，34(6)：1766-1774.
[14] 顾晓强，吴瑞拓，梁发云，等．上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]．岩土力学，2021，42(3)：833-845.
[15] JTG 3363—2019，公路桥涵地基与基础设计规范[S].

(上接第224页)

67-72.
[7] 邓江涛．极限状态法与容许应力法在铁路桥梁设计应用中的差异性比较[J]．铁道标准设计，2012(2)：41-45.
[8] 闫岩．极限状态法与容许应力法铁路大跨连续梁设计对比分析[J]．铁道标准设计，2018，62(5)：62-66.
[9] 牟兆祥，杨欣然．铁路简支拱极限状态法与容许应力法设计对比研究[J]．中国铁路，2021(12)：40-46.
[10] 尹银艳．铁路无缝线路极限状态法和容许应力法设计对比研究[J]．铁道标准设计，2021，65(5)：65-69.
[11] 荣钊．大跨度宽幅钢桁梁桥施工力学分析与监控[D]．济南：山东交通学院，2019.
[12] 刘海彪．宽幅大跨非对称斜拉桥力学性能研究[D]．兰州：兰州交通大学，2020.
[13] 陈雨薇．宽幅混合梁斜拉桥钢—混结合段力学性能研究[D]．苏州：苏州科技大学，2023.
[14] 高策，薛吉岗．铁路桥梁结构设计规范由容许应力法转换为极限状态法的思考[J]．铁道标准设计，2012(2)：41-45.
[15] 钱冬生．用极限状态原理修订《铁路桥涵设计规范》的若干建议[J]．铁道标准设计通讯，1988(1)：10-12.
[16] 钱冬生．关于将铁路桥设规的水平提高一步的思考[J]．桥梁建设，2013，43(3)：1-4.
[17] 李娜，周小勇，李阳，等．小跨宽幅连续梁桥支座负反力分析[J]．中外公路，2022，42(1)：90-94.
[18] 毛德均，吴维彬，郭俊，等．长联多跨PC连续宽幅箱梁桥荷载试验研究[J]．中外公路，2023，43(6)：165-170.
[19] 杭京，杨利斌，沈建华，等．钢桁架桥预防性养护技术研究[J]．中外公路，2022，42(3)：80-84.
[20] 赵廷衡．桥梁钢结构细节设[M]．成都：西南交通大学出版社，2011.
[21] 郝俊芳，伍星．某下承式钢桁架拱桥施工控制技术[J]．公路，2020，65(11)：188-193.