

地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究

徐前卫^{1,2}, 朱合华², 马险峰², 马忠政³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 200010)

摘要: 针对上海地铁10号线曲阳路—溧阳路区间隧道穿越四平路沙泾港桥群桩基础这一工程案例, 结合对既有桥梁结构形式、现场周边环境、施工条件以及作业空间的调研, 提出了适合本工程的扩大板式基础托换以及盾构机直接切桩的施工方法。为了确保在桩基托换及刀盘切桩施工过程中桥梁结构的安全性和正常通行功能的发挥, 通过理论分析和数值计算等手段, 对桩基托换施工过程中桩基合理开挖暴露长度、桩—筏体系受力转换机理以及盾构切桩对上部结构的影响进行了研究。研究结果表明: 地基加固及扩大板式基础托换法能够有效减小施工期间桥梁的沉降、改善桥梁结构的受力性能; 由于原桩基承担荷载大都转移到托换后的筏板基础上, 因此部分桩基的切除对桥梁结构的安全性影响不大; 现场监测结果表明, 施工过程中桥梁结构的沉降变形与计算结果吻合较好, 说明本工程的方案制定合理、施工措施得当, 桥梁结构处于安全范围之内。

关键词: 软土; 盾构隧道; 桥梁; 桩基托换; 筏板基础; 地基加固

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)07-1217-10

作者简介: 徐前卫(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下结构工程领域的教学与科研工作。E-mail: xuqwtju@126.com。

Pile underpinning and removing technology of shield tunnels crossing through group pile foundations of road bridges

XU Qian-wei^{1,2}, ZHU He-hua², MA Xian-feng², MA Zhong-zheng³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: During the construction of Shanghai Metro line No. 10, the interval tunnel from Liyang Road Station to Quyang Road Station has to pass through the pile foundation of Shajinggang Bridge on Siping Road. Based on the survey of the existing bridge structure, surrounding environment, construction condition and working space, a proper construction scheme including pile underpinning with expanded raft and cutting pile directly with shield machine is proposed. In order to ensure the safety of bridge structure and the normal traffic capacity during the construction process, by means of the theoretical analysis and numerical simulation, the studies are carried out on reasonable excavation length of pile, load transfer mechanism of pile-raft system and the construction influence on bridge structure due to cutting pile, etc. The results show that the soil reinforcement and pile-raft underpinning can effectively reduce bridge settlement and improve the bridge loading state. Secondly, since the original load born by piles is mainly transferred to raft foundation, the residual part of the pile to be cut has little effect on the security of bridge structure. According to the field monitoring results, the settlement of bridge structure during the construction process is in good accordance with the calculated results, which indicates that the construction scheme is reasonable, the construction measures are appropriate and the bridge structure is in the allowable safety range.

Key words: soft ground; shield tunnel; bridge; pile

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(1600219169); 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放基金资助项目(KLE-TJGE-B1108)

收稿日期: 2011-06-27

underpinning; raft foundation; foundation reinforcement

0 引言

随着城市化进程的加快和城市流动人口的增加,交通拥堵正成为制约城市进一步发展的瓶颈问题。为此,世界各国竞相发展以地铁隧道(主要是盾构隧道)为代表的城市快速轨道交通系统,以解决不断增长的交通量需求。然而,随着城市地铁的持续建设和地铁网络的不断完善,施工环境却变得日益复杂,表现在新线与旧线的交叉、新规划线路之间的交叉等越来越多,施工中穿越道路、桥梁、建筑物、各类管线等结构物的情况也日益增多^[1-8],尤其是当结构物下方存在有打入深度较深的桩基时,这不仅对隧道的施工形成了障碍,而且还增加了施工的难度。因此,开展拟建隧道如何穿越既有地下结构物的研究,不仅对于提高现代城市的市政工程施工技术水平具有重要的指导作用,而且还具有重要的经济价值和社会意义。

1 工程概况

1.1 沙泾港桥概况

上海轨道交通 10 号线全长 42 km,共设 35 座车站,连接闵行、长宁、徐汇、卢湾、黄浦、虹口、杨浦 7 个区。其中,一期工程线路的起点为高速铁路客站,终点为新江湾城站,全长 32.76 km,共设 30 个车站,29 个区间。根据轨道交通 10 号线的线路规划,溧阳路—曲阳路区间隧道将从四平路上的沙泾港桥桩基间穿越。沙泾港桥位于四平路曲阳路交叉口南侧 100 m 左右,距离曲阳路车站南端头井为 57 m。该桥为三跨简支梁结构,共设置桥墩、桥台各两座。桥墩采用 23 根 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 26000\text{ mm}$ 预制钢筋混凝土方桩作为基础,桩基长度为 $12\text{ m} + 14\text{ m}$ 与 $14\text{ m} + 12\text{ m}$,硫磺胶泥接桩。桥台采用 14 根 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 27000\text{ mm}$ 预制钢筋混凝土方桩作为基础,桩基长度为 $13\text{ m} + 14\text{ m}$ 与 $14\text{ m} + 13\text{ m}$,硫磺胶泥接桩。根据线路设计,隧道顶标高约 $-6 \sim -7\text{ m}$,每个桥墩处约 5 根桩基受影响,每个桥台处约 3~4 根桩,共需处理 33 根桩。隧道与桥梁及桩基的相对位置关系如图 1,2 所示。四平路路面宽为双向 5 车道,两侧另设非机动车道和人行道。由于四平路为上海城市主干道,车辆通行频繁,交通流量十分巨大。

1.2 周边环境和地下管线状况

沙泾港桥处四平路、曲阳路交叉口,曲阳路向南 100 m 处,周边管线众多、建筑物林立,如图 3 所示。在桥的两侧,比较重要的地下管线有:桥西侧的 $\phi 300\text{ mm}$ 的上水管道一根、 $\phi 800\text{ mm}$ 的污水管道一根、 ϕ

700 mm 和 $\phi 300\text{ mm}$ 的煤气管道各一根,以及多根电话电缆;桥东侧有 $\phi 1500\text{ mm}$ 的上水管道 1 根,以及电力电缆多根。距离桥梁最近的重要建筑物主要有:桥西南侧有一在建高层,其角部距离道路边线 11 m;桥南侧 15.2 m、距四平路边线 4.69 m 为单层四平泵站一座;桥东南侧为 24 层新兴大楼;桥东北侧为一座四层砖混楼房;桥北侧为拟建 10 号线曲阳路车站南端头井,桥梁施工时正处与施工阶段;西北侧曲阳路口为华西证券大厦。因此,桥梁施工期间交通组织受到地下管线、周边管线和建筑物的影响较大。

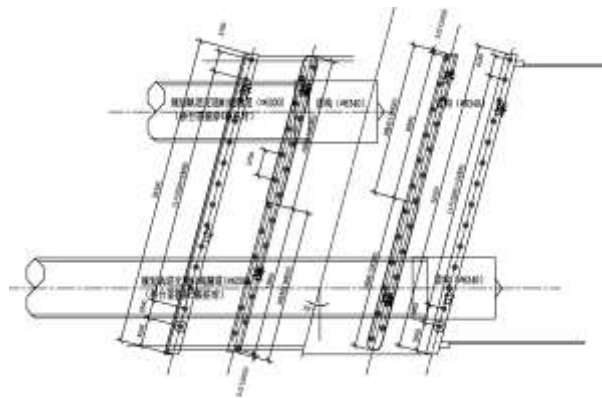


图 1 盾构穿越桥梁桩基平面图

Fig. 1 Plan view of tunnel crossing bridge foundation

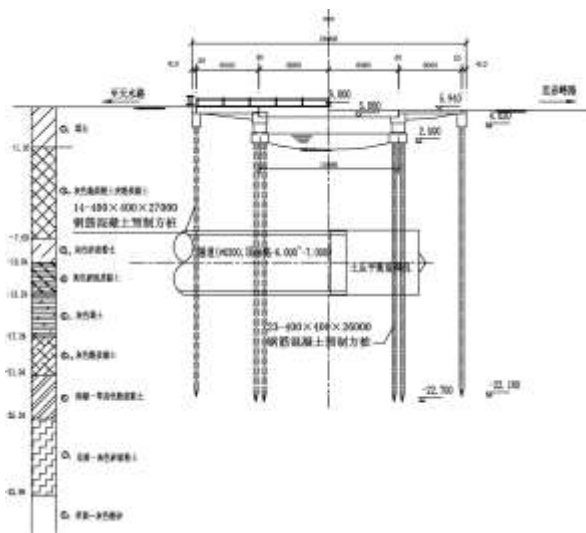


图 2 盾构穿越桥梁桩基立面图

Fig. 2 Elevation view of tunnel crossing bridge foundation



图 3 沙泾港桥周围环境

Fig. 3 Environment around Shajinggang Bridge

1.3 工程地质及水文地质

根据工程地质勘察报告,沙泾港桥所处位置的地质情况大致可分为以下 7 层:第①₁层为 1.16~3.8 m 不等的填土,其中含煤屑、石子等;第②₃₋₁层为灰黄一灰色黏质粉土夹粉质黏土,有黑色腐殖质,约 8.85 m 厚,夹有大量黑色淤泥质土,似河浜现象;第②₃₋₂层为灰色砂质粉土,属中压缩性土,有 2.35 m 厚左右;第④层为灰色淤泥质黏土,属高压缩性土,含有白色僵块、黑色腐殖质,约 3.2 m 厚;第⑤₁₋₁层为灰色黏土,属中压缩性土,此层有 7.8 m 厚;第⑤₁₋₂层为暗绿一草黄色粉质黏土,属中压缩性土;第⑥层为草黄一灰色砂质粉土。

各层土的主要物理力学性质如表 1 所示。盾构通过沙泾港桥时,穿越土体主要为灰黄一灰色黏质粉土夹粉质黏土、灰色砂质粉土、灰色淤泥质黏土。

表 1 土层的主要物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil strata

土层 编号	范围 /m	重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$	孔隙 比 e	黏聚力 c/kPa	摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩 模量 E_c/MPa
① ₁	+3.87~+1.16	1760		2.3	15	1.68
② ₃₋₁	+1.16~7.69	1800		4.2	20	3.73
② ₃₋₂	-7.69~10.04	1860	0.93	2.6	22.5	9.94
④	-10.04~13.24	1740	1.29	9.8	13	2.50
⑤ ₁₋₁	-13.24~17.24	1840	0.96	8.4	12	3.83
⑤ ₁₋₂	-17.24~21.04	2060	0.61	33.3	17	6.75

2 存在问题与解决方案

在本工程中,由于车站与桥梁距离太近,盾构在出溧阳路站约 100 m 后就遇到沙泾港桥桩基,致使线路平面位置无法变更;其次,根据目前地铁隧道规范所允许的曲率半径,即使用最大坡度来设计,隧道也无法绕开桩基础;再次,如果将车站埋深变深,则车站深度将很大,给乘客带来很大不便,同时造价非常昂贵。以上诸多限制的存在,使得线路无法更改。

上海乃至中国其它地方在盾构施工中碰到类似情况时,往往采取整体拆除桥梁结构的方法,而为了保证地面道路交通的顺畅,必须另外搭建临时替代桥梁。但这种做法总共需要拆除两座桥梁、建造两座桥梁,

不但费时费力,造价也非常昂贵;其次,四平路为上海市 3 条南北纵向干道之一,交通流量大、地位重要,不允许使该桥所承担的交通量受到影响;另外,该桥周围为密集住宅区,空间有限,拆除旧桥时架设临时桥梁难度大,同时拆迁量也大,代价很高,因此该方法不符合中国国情和上海的实际情况。

国外在进行此类工程施工时,往往更多考虑施工对交通的影响,而不允许拆除交通要道的桥梁,为此常采取托换及拔桩等工法,即在施工中保证旧桥的功能发挥的同时,除去影响盾构向前推进的障碍物。这样做不仅建设费用能大副度降低,工期也能加快,对交通的影响也较小,具有很大的经济和社会效益。

有鉴于此,在综合国内外成功经验的基础上,本研究拟针对盾构穿越沙泾港桥桩基这一实际难题提出新的解决方案,即在保证既有桥梁使用功能的前提下,通过一系列施工技术拔除或截断桩基,达到盾构顺利推进的目的。新的解决方案的研究和实施不仅是对旧的解决方案的突破和革新,而且也符合上海地铁建设新形势的需要,同时也有利于提高上海地铁建设水平。

3 工程实施方案

3.1 现有施工条件与作业空间调研

如图 4 所示,沙泾港桥所在四平路车流量巨大,因此在进行托换、加固施工时,不宜过多占用路面;此外,桥下常年有水流动,且汛期时作为排泄洪的主要通道,因此在桥下开挖施工时,应避开雨季施工,并需得到河道、水务部门的允许;再者,由于该桥修建历史较早,桥下淤泥及填土较多,尤其是桥梁两侧边跨已被淤积,故此桥下施工作业空间有限,不适合大型机械施工。



图 4 桥下管线布置状况

Fig. 4 Environment around Shajinggang Bridge

3.2 沙泾港桥既有结构物调研

沙泾港桥宽度 30 m,采用 6 m+14 m+6 m 三跨跨径布置,桥梁的上部主梁中跨采用预应力混凝土空心板梁,14 m 主梁梁高 0.82 m;边跨采用钢筋混凝土空心板梁,6 m 主梁梁高 0.52 m。桥面采用 100 mm 钢

筋混凝土铺装+防水层+80 mm 沥青混凝土铺装。原始桥梁结构及桩基结构在经历几十年的使用后,未见有明显的沉降、倾斜及裂缝等影响桥梁安全使用的缺陷。

3.3 适合本工程的施工方案建议

考虑到老桥现状、盾构施工影响范围及四平路交通情况后,以及施工难易程度,建议对桥墩及桥台实施托换施工,即通过托换将原来由桩基础承担的上部结构荷载转换到托换后的扩大筏板基础上,在此前提下,对盾构推进过程中遇到的障碍桩基进行截断、清除,而不会影响桥梁的正常使用。

(1) 桥台背后地基加固

如图 5 所示,桥台背后进行地基加固的目的是为了在桥台背后形成重力式挡墙支撑结构,确保在桥梁下方进行基坑开挖所需要施工空间的安全稳定。

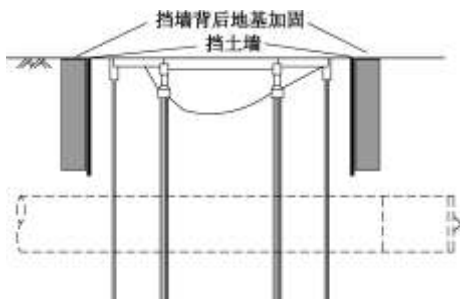


图 5 桥台背后地基加固

Fig. 5 Foundation reinforcement behind abutment

(2) 围堰施工及桥基范围外河床加固

如图 6 所示,河内围堰修筑的主要目的是为了确保护桥下基坑顺利开挖,同时也是为了避免对河水的污染。为了保证基坑开挖的安全,除了桥台背后地基需要加固外,对桥基范围外的河床也进行加固。

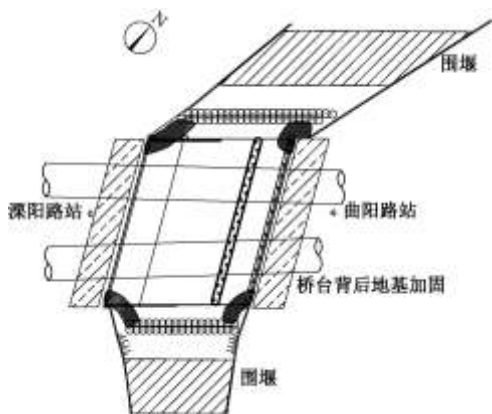


图 6 桥梁托换结构体系及地基加固范围平面图

Fig. 6 Plan view of bridge underpinning structure system and foundation reinforcement scope

(3) 桥下基坑开挖

桥下基坑开挖的目的是为了进行桩基托换及地基加固。为了便于后期地基加固,桥下基坑开挖的高度应不小于 4 m,如图 7 所示。

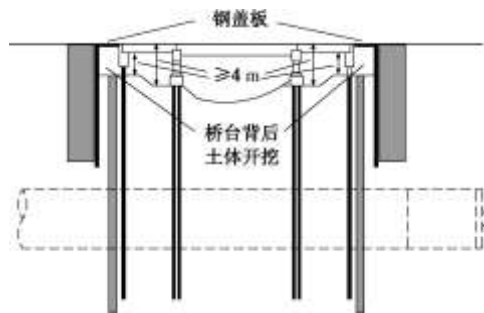


图 7 桥下基坑开挖

Fig. 7 Elevation view of pit excavation below bridge

(4) 桥下扩大式底板托换

如图 8 所示,在桥下基坑土体开挖到设计深度后,即可进行底板混凝土基础的施工,于此同时,也对桥墩和桥台下开挖暴露出来的桩基包裹一层钢筋混凝土层形成隔墙,并与底板、上部桥梁结构形成箱形结构,构成新的受力体系,从而实现将荷载由桩基转移到筏板基础上。

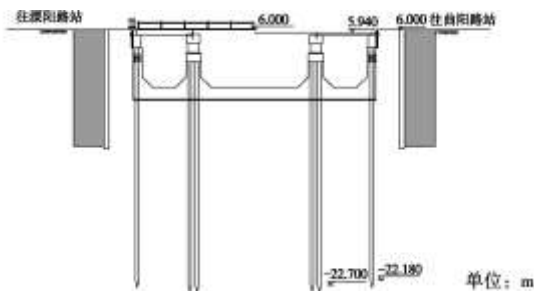


图 8 桥梁托换结构体系及地基加固范围立面图

Fig. 8 Elevation view of bridge underpinning structure system and foundation reinforcement scope

(5) 土体加固及盾构推进

在底板托换完成并对筏板下土体进行加固后,盾构便可继续推进,直至遇到桥台下桩基,如图 9 所示。

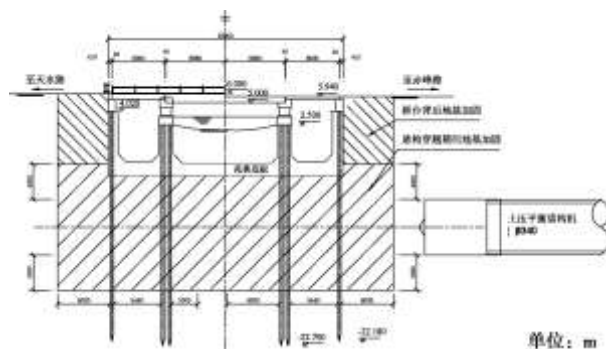


图 9 盾构穿桩示意图

Fig. 9 Elevation view of bridge underpinning structure system and foundation reinforcement scope

3.4 需要深化研究的内容

在上述施工方案中,涉及到上部桥梁结构、基坑和隧道结构体系之间的相互作用。因此,针对本工程存在的问题,需要开展如下 3 个方面的研究:①桥下

基坑合理开挖深度研究; ②桩-筏体系托换的受力转换机理研究; ③盾构在筏板下推进对桥梁结构的影响分析。

4 桥下基坑合理开挖深度研究

4.1 既有桥梁结构体系承载力现状分析

(1) 桥梁结构承载体系的荷载确定

作用在桥梁结构上的荷载主要有桥面车辆和行人活荷载以及桥身、桥墩、桥台自重等外部荷载; 桥梁结构的荷载传递按照外部荷载、自重荷载→桥身→桥墩、桥台→桩基→地基的路径传递。为了计算分析的方便, 采用如图 10 所示的计算坐标系, 图中 x 方向为顺着承台的方向, 即垂直于道路方向, y 方向为沿着道路方向, z 方向为竖直方向。

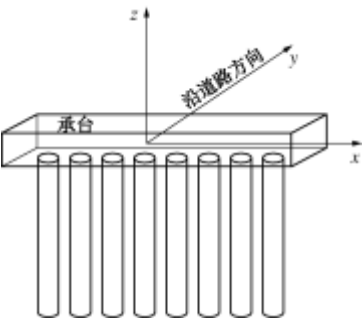


图 10 计算坐标系

Fig. 10 Calculation coordination system

进行各种工况下的最不利荷载进行组合, 对桥墩和桥台的受力进行计算分析。计算共分 3 个工况, 分别是工况 1 (轴力最大, 即边跨布载、中跨布载)、工况 2 (x 向弯矩最大, 即边跨布载、中跨不布载)、工况 3 (x 向弯矩最大, 即中跨布载、边跨不布载)。经过计算, 得到不同工况下桥梁桥墩、桥台处所受荷载, 如表 2 所示, 对应的桥墩、桥台下单桩实际所受轴力如表 3 所示。

表 2 不同工况下桥墩、桥台所受荷载

Table 2 Loads on pier and abutment in different cases

工 况	桥墩			桥台		
	轴力 N/kN	水平力 H/kN	弯矩 M $/(\text{kN}\cdot\text{m})$	轴力 N/kN	水平力 H/kN	弯矩 M $/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	9784	160	176	4545	-51.6	0
2	7653	160	439	4545	-51.6	0
3	8501	160	264	3264	-51.6	0

表 3 不同工况下桥墩、桥台下单桩桩顶实际所受荷载

Table 3 Actual loads on pile top in different cases

工 况	桥墩			桥台		
	轴力 $/\text{kN}$	剪力 $/\text{kN}$	弯矩 $/(\text{kN}\cdot\text{m})$	轴力 $/\text{kN}$	剪力 $/\text{kN}$	弯矩 $/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	461.72	6.65	-8.873	324.64	-3.69	0
2	400.80	6.65	-6.290	324.64	-3.69	0
3	417.56	6.65	-8.000	233.14	-3.69	0

(2) 开挖前单桩极限承载力分析

桩的承载力由桩侧摩阻力和桩端阻力两部分组成。因此, 根据桩周各土层的单位摩阻力和桩底土的单位端阻力, 就可计算得出单桩的承载力。

$$R_d = \psi \left(\frac{R_{sk}}{\gamma_s} + \frac{R_{pk}}{\gamma_p} \right) = \psi \left(\frac{U_p \sum f_{si} l_i}{\gamma_s} + \frac{f_p A_p}{\gamma_p} \right), \quad (1)$$

式中, ψ 为折减系数, f_p 为桩端土体极限阻力标准值, f_{si} 为第 i 层土的极限摩阻力标准值, U_p 为桩身截面周长, γ_p , γ_s 为荷载分项系数。

经过计算, 可得桥墩和桥台下单桩桩基极限承载力分别为 $R_{d墩} = 622 \text{ kN}$, $R_{d台} = 634 \text{ kN}$ 。结合表 3, 可见桥墩、桥台下单桩桩顶实际所受荷载均小于极限承载力, 故原桥桩基受力是安全的。

4.2 桥下桩基合理开挖暴露长度分析

桩基的最大开挖暴露长度需要同时满足压杆稳定和桩基承载力要求。由表 3 可知, 最不利的情况来自于工况 1, 以下主要针对这一工况开展计算。

(1) 从开挖暴露桩的压杆稳定确定暴露长度

既有桥梁桩基混凝土采用 C30, 钢筋采用 HPB235; 根据查询有关资料选用安全系数, 荷载设计值见压杆稳定作用荷载图表。由混凝土规范有混凝土轴心抗压强度设计值 $f_c = 14.3 \text{ MPa}$, 轴心抗拉强度设计值 $f_t = 1.43 \text{ MPa}$, 而钢筋的抗拉压强度设计值 $f_y = 210 \text{ MPa}$, 查表得界限相对受压区高度 $\xi_b = 0.614$ 。通过对暴露桩基的压杆稳定验算进行反算, 可以得到桥墩下单桩的计算暴露长度为 $l_0 = 8.2 \text{ m}$ 时满足桩基压杆稳定要求。

(2) 由开挖暴露桩的承载力确定暴露长度

根据上节所得保持压杆稳定的最大桩基暴露长度 $l_0 = 8.2 \text{ m}$ 并结合式 (1) 计算开挖后桩基承载力 $R_d = 366.68 \text{ kN}$, 该结果小于表 3 所示单桩实际承载力, 即开挖暴露长度为 8.2 m 时不能满足实际承载力的要求。因此, 有必要按照原桥设计的安全系数、单桩承载力和作用于桩顶荷载的结果, 反求得最大暴露长度。

如前所述, 既有桥墩桩基的入土深度 $l = 23.0 \text{ m}$, 作用于单桩上最大荷载 461.72 kN , 由单桩承载力公式, 令单桩承载力等于最大荷载, 可求得若要满足承载力所需最小的入土深度 $x = 17.18 \text{ m}$, 即桥墩桩的最大暴露长度应为 5.82 m 。同理可得, 桥台桩基的最大暴露长度应该为 7.45 m 。

(3) 实际施工中桩基暴露长度

根据本计算成果, 该工程在实际施工过程中采取的桥墩下桩基实际开挖暴露长度为 4.2 m , 桥台下桩基实际开挖暴露长度为 5.72 m 。

5 桩基托换过程的受力转换机理研究

为了顺利完成桥梁桩基托换，保证上部保留结构的安全可靠性，就必须保证桥梁结构在桥下基坑开挖、筏板托换施工过程中不至于产生过大的变形和较大的应力，为此对上述施工过程进行了三维数值模拟，并据此加以分析研究。

5.1 有限元计算模型

如图 11 所示，计算模型对应的尺寸为 60 m×52 m×35 m，即沿道路 x 方向为 60 m、沿河流 y 方向为 52 m、沿高度 z 方向为 35 m。基坑开挖范围限于对应桥面投影范围内的土体，左、右两侧桥台的外侧各设置 6 m 宽度的加固区，前、后两侧的河床上也各设置一道加固带。模型的边界条件采用为位移边界条件，模型底部结点施加竖直方向约束（y 方向），对土体左、右两侧位置的结点施加侧向约束（x 方向），对土体前后两侧位置的结点施加侧向约束（z 方向）。桥面活荷载按 20 kN/m² 计算，地基土计算参数见表 1，有关的结构计算参数取值参见表 4。

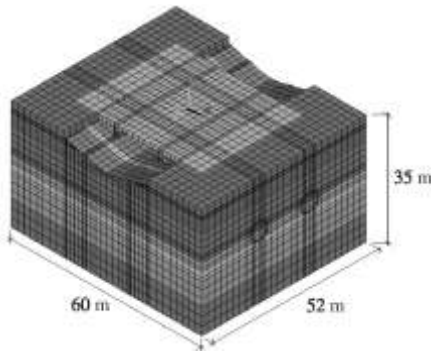


图 11 三维有限元计算模型
Fig. 11 3D FEM calculation model

表 4 结构计算参数的选取

Table 4 Actual loads on pile top in different cases

材料名称	弹性模量 /MPa	泊松比	重度 $\gamma/(\text{kN m}^{-3})$
桥梁混凝土	30000	0.2	2500
管片衬砌	28000	0.2	2500
支撑型钢	210000	0.3	

土体材料按照理想弹塑性介质来考虑，即采用 Drucker-Prager 准则，其一般表达式为

$$F = \beta I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{3\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (3)$$

$$K = \frac{\sqrt{3} c \sin \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

式中， I_1 为应力张量第 1 不变量， J_2 为偏应力张量第 2 不变量， c 为黏聚力， φ 为内摩擦角。

5.2 计算结果分析

施工过程中对桥梁结构的影响主要通过桥面的变形、桥面板内应力改变以及桩基轴力表现出来，下面就不同施工阶段的计算结果进行分析。

(1) 自重作用下结果分析

由于在桥梁建成并投入运行后，土体及结构自重所引起的位移已经发生，因此在计算时，将这部分位移予以消除，而重点研究桩基托换及后续的盾构穿桩施工对现有桥梁结构的影响。在计算中采取将自重产生的位移置零，但同时在结构中保留自重产生的应力。

对于桥梁结构来说，水平方向 x 应力是沿着桥面板梁的方向的，因此对板梁的影响较大；竖直方向 y 向应力主要结构的自重应力； z 向应力则是垂直于板梁方向的，而每块板梁的宽度较小，故其对板梁影响不大，但是当该方向应力较大时，则有可能对板梁下的桩基承台结构有影响。图 12 表示的是自重作用下的桥面板中跨上下两侧 x 向的应力分布，可以看出， x 向最大压应力和最大拉应力分别为 -2.13 MPa 和 2.01 MPa，对应出现在桥梁中跨的跨中顶部和底部，这表明桥梁板上部受到挤压，而下部则受到拉伸作用，即以压弯型受力构件为主。

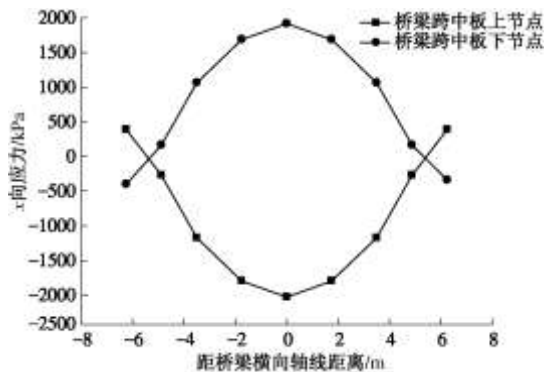


图 12 自重作用下中跨桥面板上、下表面的 x 向应力分布图
Fig. 12 Distribution of x -stress of the upper and lower surface of midspan bridge deck under gravity

图 13 表示的是自重作用下桥墩处的单桩轴力，可以看出，在自重作用下，桥墩单桩轴力约为 38.5 t，与第 4 节中计算得到的最大轴力值较为接近；其次，桩顶最大轴力与桩底轴力之差即为作用在桩身的摩擦力，约为 23 t，这说明桩基主要为摩擦桩类型，摩擦力沿桩身分布较均匀。

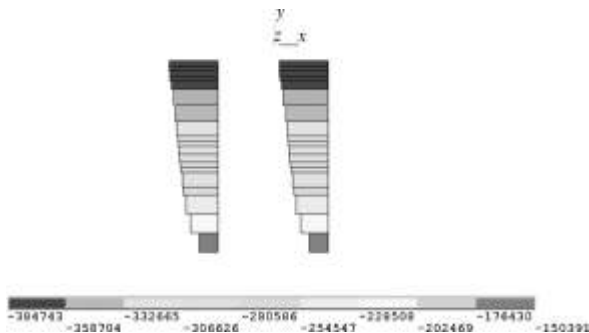


图 13 自重作用下桥墩中部单桩轴力 ($z=0.0\text{ m}$)

Fig. 13 Pile axial force of pier under gravity

(2) 桥下基坑开挖后结果分析

图 14 表示的桥下基坑开挖至设计指定深度处时对应的桥梁结构的竖向位移图。可以看出, 由于桥梁下部分土体的挖出, 使得桥墩和桥台失去了部分支托力, 而桩基失去了部分摩擦力, 导致桥梁面板整体下沉, 最大下沉量为 11.363 mm, 出现在桥面两侧的跨中位置; 另外, 整个桥梁面板上的差异沉降为 9.4 mm, 该值远小于现行公路桥梁设计规范中“跨中最大计算挠度不应超过 $L/600$ (L 为计算跨径)”的规定。

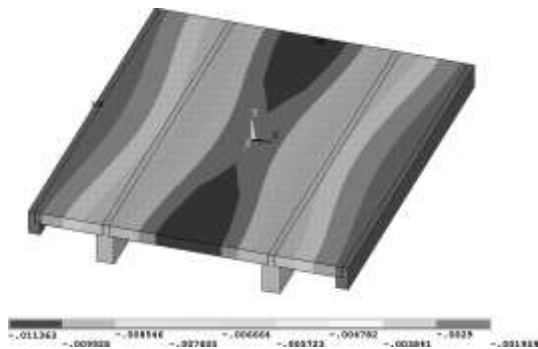


图 14 桥下基坑开挖后桥梁体竖向位移

Fig. 14 Vertical displacement of bridge after pit excavation

图 15 给出了桥下基坑开挖后的桥梁结构 x 向的应力云图。可以看出, 开挖后跨中位置桥面板顶部的最大压应力由基坑开挖前的 -2.13 MPa 迅速增大为 -3.66 MPa , 板底最大拉应力也由开挖前的 2.01 MPa 变为开挖后的 3.53 MPa , 这是由于桥面板向下弯曲所致。

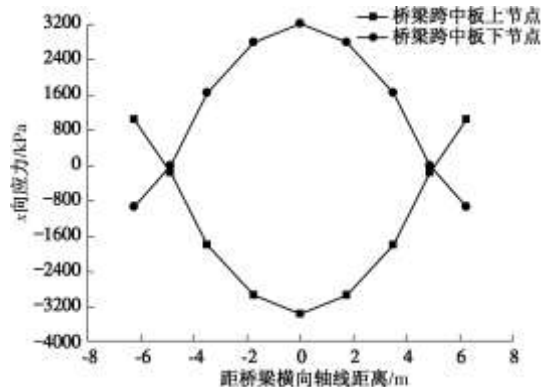


图 15 基坑开挖后中跨桥面板上、下表面的 x 向应力比较

Fig. 15 Distribution of x -stress of upper and lower surfaces of

midspan bridge deck after pit excavation

图 16 表示的是桥下基坑开挖后桥墩处的单桩轴力, 可以看出, 桥墩处单桩轴力由开挖前的 38.47 t 迅速增加至 55.0 t , 而这也比较接近基坑开挖后桥墩处桩基的理论极限承载力 57.1 t 了。出现这种情况有两方面的原因: ①由于桥下基坑土体的开挖使得桥墩、桥台的承台底面土体承担的部分荷载全部转由桩基来承担, 故而桩基轴力迅速上升; ②由于桩侧土体的挖除, 使得上部结构传下来的荷载完全由桩身暴露部分的轴力来承担, 而桩身未暴露部分则继续由桩端阻力和桩侧摩阻力共同承担来自上部的荷载。

综上可见, 桥下基坑开挖不仅会造成两侧桥台背后土体向基坑内变形失稳, 而且会造成桥面板产生过高的弯曲应力集中, 再者, 也会造成暴露的桩基承受更大的荷载, 故而从结构安全的角度考虑, 需采取相应施工措施来减小这种影响。为此, 一方面采取在桥台两侧进行地基加固, 以抵抗基坑开挖过程中土体的失稳; 另一方面, 为了减少桥梁弯曲导致的弯曲应力增加, 在桥下架设支撑是必要的。

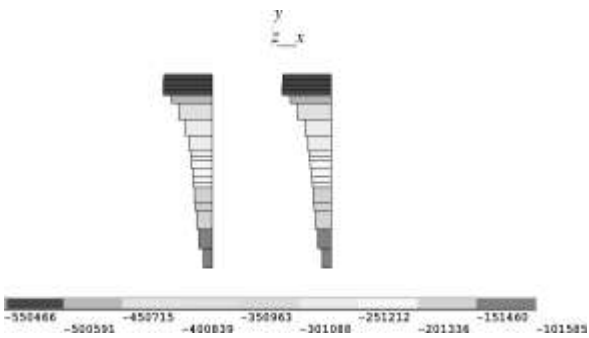


图 16 基坑开挖后桥墩跨中位置单桩轴力 ($z=0.0\text{ m}$)

Fig. 16 Pile axial force of pier after pit excavation

(3) 筏板托换后结果分析

图 17 表示的是采用桥下筏板基础托换后整体结构和桥梁结构的竖向位移图。可以看出, 由于桥墩、桥台下桩 - 筏板体系的形成, 使得原本完全由桩承重体系变为桩 - 筏板 - 土体共同受力, 因此很好的改善了桥梁结构的受力状况, 与基坑开挖后的最大沉降 11.363 mm 相比, 桥梁面板最大沉降量略有减小, 为 10.399 mm , 同样出现在桥面两侧的跨中位置; 另外, 筏板托换后整个桥面的最大差异沉降为 5.8 mm , 与筏板托换前的 9.404 mm 相比, 幅度明显减小。

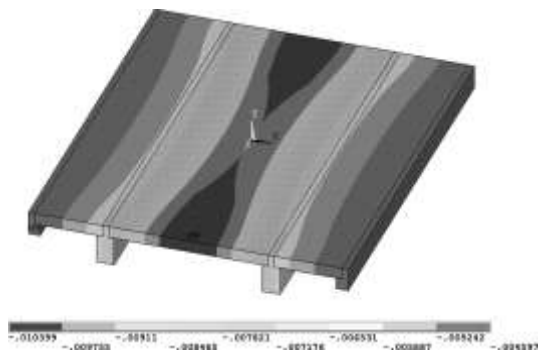


图 17 筏板托换后桥梁结构竖向位移

Fig. 17 Vertical displacement of bridge after raft underpinning

图 18 给出了桥下筏板托换前后的桥梁纵向中线处的竖向位移, 可见托换后桥梁中心处有所反弹, 这是由于筏板托换后形成的结构体系刚性增强所致。

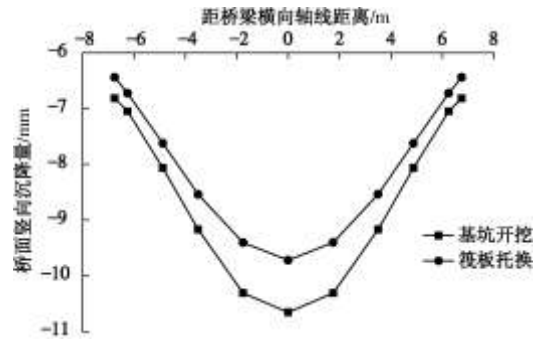


图 18 筏板托换前后桥面纵向轴线处的沉降量比较

Fig. 18 Settlement curves of bridge surface along road center before and after raft underpinning

图 19 给出了筏板托换后中跨桥面纵向轴线处桥面板上、下表面的 x 向应力比较。与筏板托换前相比, x 方向最大压应力和最大拉应力分别由 -3.66 MPa 和 3.53 MPa 变为托换后的 -3.15 MPa 和 3.18 MPa , 这说明筏板托换能很好地改善桥梁结构的内力。

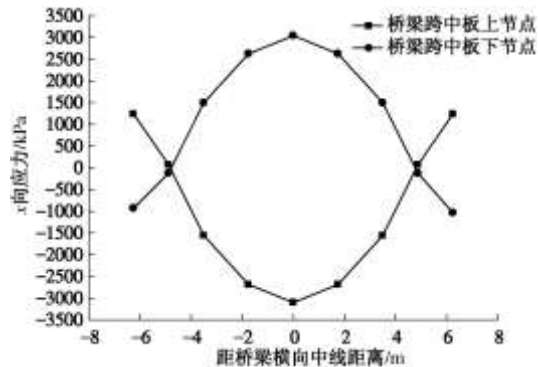


图 19 筏板托换后中跨桥面板上、下表面的 x 向应力比较

Fig. 19 Distribution of x -stress of upper and lower surfaces of midspan bridge deck after raft underpinning

图 20 给出了不同工况下纵向轴线处桥面板上表面的 x 向应力比较, 可以看出, 采用扩大筏板基础能有效降低桥梁结构的水平向应力。

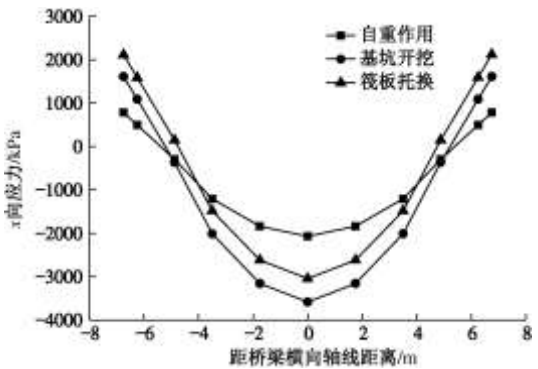


图 20 不同工况下纵向轴线处桥面板上表面的 x 向应力比较

Fig. 20 Distribution of x -stress of upper surface of midspan bridge deck in different cases

图 21 给出了筏板托换后跨中位置桥墩跨中位置处单桩轴力图。可以看出, 筏板托换后桩基内力再次发生调整。首先, 由位于筏板之上暴露在外的桩身部分依然是靠轴力来承受上部结构荷载, 而在筏板之下的部分桩身轴力沿深度方向较为均匀, 且较之托换前普遍减小, 这说明有很大一部分来自桩身承担的上覆荷载的很大一部分转移到筏板基础上了, 即原来桥梁体系的荷载传递路径是桥梁→桥墩、桥台→桩基→地基土; 而在筏板托换后, 则变为桥梁→桥墩、桥台→筏板+桩基→地基土。其次, 桩基在筏板之上部分的轴力较之托换前略有降低, 这是由于桥墩承台下群桩之间承担的荷载重新分配的缘故。

图 22 表示的是不同工况下桥墩下桩基轴力的分布图, 可以看出, 在筏板托换前, 筏板位置桩身荷载是 55 t , 而在筏板托换后, 传递给板底桩身的荷载只有 23 t , 亦即约有 60% 的荷载被转移到筏板基础上了。再者, 筏板下桩身部分所受轴力较为均匀, 说明土体与这部分桩身之间没有明显的相对位移, 这是由于筏板刚性较大, 使得板下土体压缩得较为均匀的缘故。

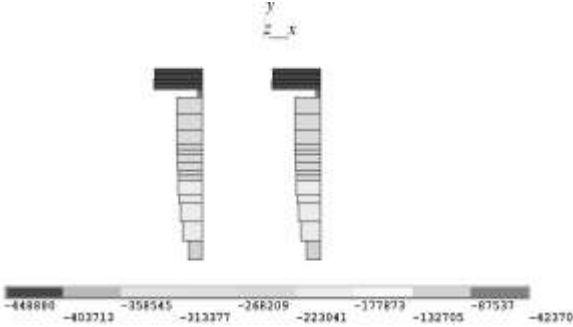


图 21 筏板托换后跨中位置桥墩单桩轴力

Fig. 21 Pile axial force of pier after raft underpinning

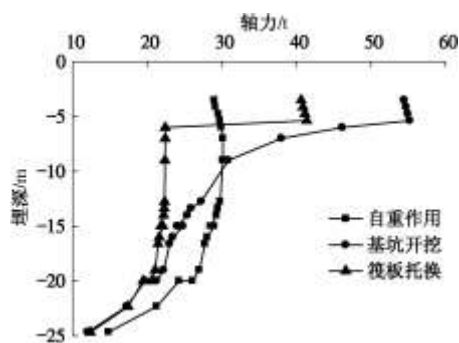


图 22 不同工况下桥墩下桩基轴力分布的比较

Fig. 22 Comparison of pile axial force of pier in different cases

6 盾构推进对桥梁结构的影响分析

三维有限元计算模型仍然同 5.1 节中所述, 桩基托换后的桥梁结构、筏板、桩基和隧道的关系如图 23 所示。计算中先对前方隧道进行开挖, 之后再对后方隧道进行开挖。每条隧道在进行开挖时, 均分为 8 个荷载步, 沿 x 轴负向开挖面分别取在 $x=+20\text{ m}$ 、 $+13.5\text{ m}$ 、 $+7.5\text{ m}$ 、 0 m 、 -7.5 m 、 -13.5 m 、 -20 m 、 -30 m 处。对盾构掘进的模拟通过在隧道前部的开挖面上施加均布面力, 本次计算中开挖面压力取 0.15 MPa 。

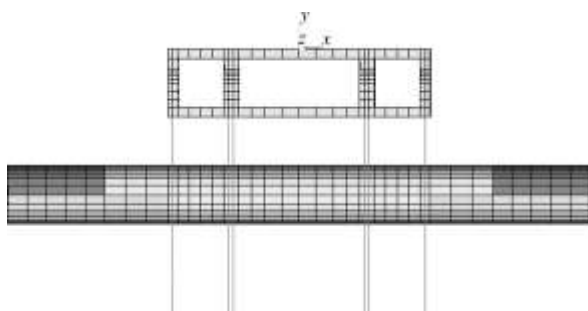


图 23 托换后的桥梁、筏板、桩基、隧道立面图

Fig. 23 Spatial relationship of bridge, raft, pile and tunnel

盾构在推进过程中, 按照设定的压力值对开挖面施加压力, 尽管该压力值足以使开挖面稳定, 但由于盾构施工会引起地层扰动, 从而使得地表和桥面会产生沉降。可以看出, 在开挖面推进至 $x=+20.0\text{ m}$ 位置时, 桥面最大沉降为 12.606 mm , 较之筏板托换后的最大沉降值 10.399 mm 略有增大, 这一点可从图 24 中看出。

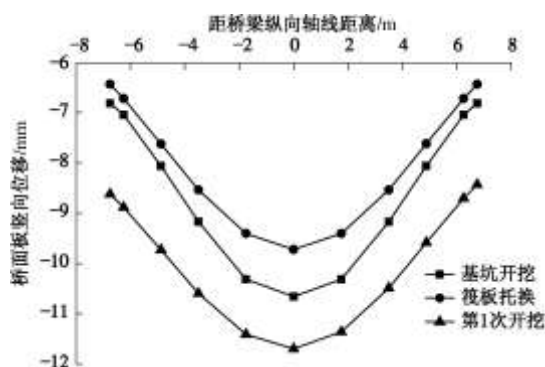


图 24 隧道开挖前、后的中跨桥面竖向位移比较

Fig. 24 Settlement curves of bridge surface along road center in different cases

图 25 给出了不同开挖面推进至不同位置时的桥面竖向位移比较。可以看出, 并且桥面的沉降最大值仍然出现在跨中位置, 但是随着开挖面的临近, 桥面位移逐渐有所反弹。

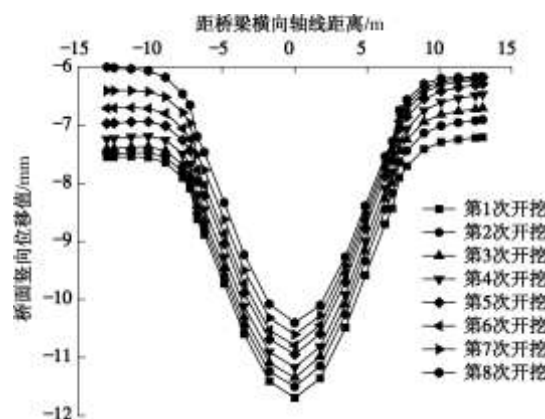


图 25 隧道开挖至不同位置时的桥面竖向位移比较

Fig. 25 Vertical displacement of bridge surface under tunneling to different positions

图 26, 27 表示的是不同工况下桥梁中跨面板的 x 向应力, 可以发现, 地基加固、架设支撑、筏板托换等措施均可使得桥面板 x 向应力减小, 从而使结构受力更为合理; 其次, 隧道开挖后桥面结构的应力与筏板托换后的应力值相比变化不大, 这说明盾构推进对简支结构桥梁的应力影响不大。

7 施工监测结果分析

托换施工及盾构推进并切桩引起桥梁结构的变形, 必将改变线路的技术状况和桥梁受力状况, 必须系统掌握, 及时调整, 确保桥梁的安全。因此, 为了解桥梁在施工期间的沉降稳定情况, 需要对施工全程进行了监控量测。图 28 表示的是施工过程中实测桥面沉降变化情况, 图 29 表示的是桥梁结构在前述不同施工工况下的计算所得和现场实测的桥面板位移变化情况, 可以看出, 二者所反映的规律较为吻合。

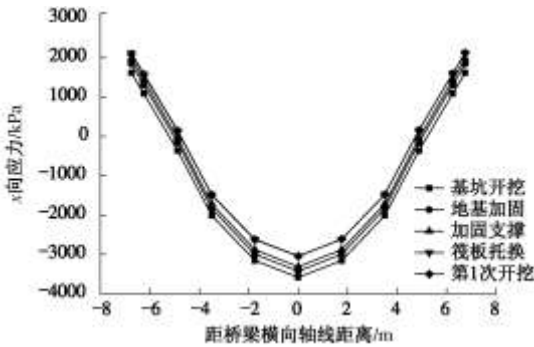


图 26 不同工况下桥面 x 向应力比较

Fig. 26 Comparison of x -stress of upper surface of midspan bridge deck in different cases

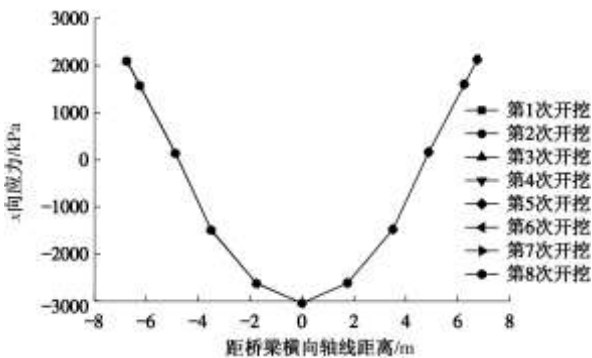


图 27 盾构推进至不同位置时桥面 x 向应力比较

Fig. 27 Comparison of x -stress of upper surface of midspan bridge deck under tunneling to different positions

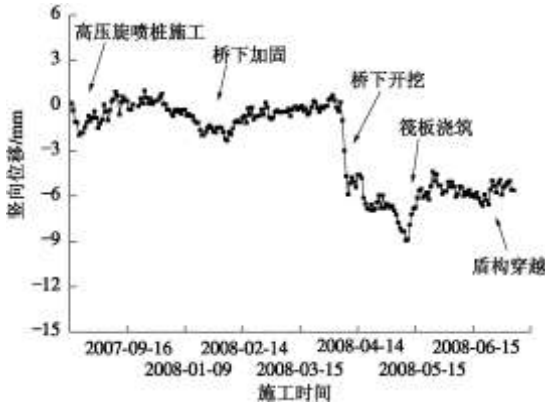


图 28 桩基托换施工过程中桥面板的位移变化情况

Fig. 28 Displacement of bridge deck surface during pile underpinning process

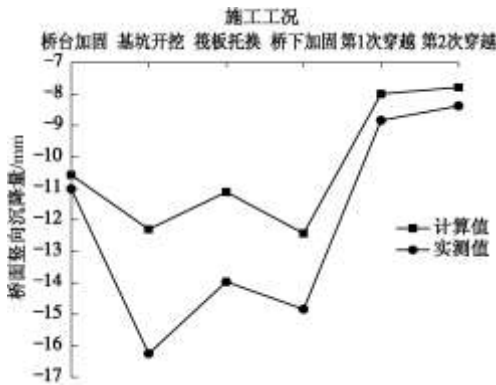


图 29 不同施工工况下桥面板的位移变化情况的比较

Fig. 29 Comparison of displacement of bridge deck surface under different construction steps

8 结 论

本文针对上海地铁 10 号线盾构穿越沙泾港桥桩基这一典型工程案例, 结合现场调研, 辅以理论分析和数值计算, 研究了在确保既有桥梁结构正常使用功能条件下盾构穿越既有桥梁桩基的托换及除桩技术, 主要结论如下:

(1) 根据理论计算结果, 桥墩下桩基合理开挖暴露长度为 5.82 m, 桥台下桩基合理开挖暴露长度为 7.45 m。据此, 在实际施工过程中, 采取的桥墩下桩基实际开挖暴露长度为 4.2 m, 桥台下桩基实际开挖暴露长度为 5.72 m。

(2) 根据数值计算的结果, 对桥台背后地基加固、桥下基坑开挖、支撑架设、筏板托换及其与上部结构的共同作用进行数值模型分析, 计算发现桥下基坑开挖及桩基托换过程中桥梁结构的变形和应力均在安全范围内, 并且通过筏板可将原有桩基所承担荷载的 60% 转移到筏板上。

(3) 桥下基坑开挖造成的不利影响在于: ①会造成两侧桥台背后土体向基坑内变形失稳; ②会造成桥面板产生过高的弯曲应力集中; ③还会造成暴露的桩基承受更大的荷载。为应对基坑开挖可能造成的不利影响, 从结构安全的角度考虑, 采取的施工应对措施主要包括在桥台背后进行地基加固和在基坑开挖过程中对桥梁下方施作支撑, 从而有效改善桥梁的受力和变形形态。

(4) 通过对桥梁结构和周边结构的监测, 一方面, 施工过程中桥梁结构的沉降变形与计算结果吻合较好, 另一方面, 说明由于本工程方案制定合理、施工措施得当, 所以托换结构本身及周边结构未产生较大沉降和变形, 均处于安全范围之内。

参考文献:

- [1] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, et al. Construction control for underpinning piles and their behavior during excavation[J]. Géotechnique, 1994, **44**(4): 681 - 689.
- [2] YAMAGUCHI I, YAMAZAKI I, KIRITANI Y. Study of ground-tunnel interactions of four shield tunnels drive in close proximity, in relation to design and construction of parallel tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, **13**(3): 289 - 304.
- [3] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001(16): 93 - 98.
- [4] TAKAHASHI K, FUKAZAWA N, AGIWARA T, et al. Observational control of slurry shield tunnels with super close spacing under the nearby bridge abutments loads[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004(19): 390.
- [5] 刘宝琛. 急待深入研究的地铁建设中的岩土力学课题[J]. 铁道建筑技术, 2000, **20**(3): 1 - 3. (LIU Bao-chen. Problems on geomechanics in need of immediate deep research in subway construction[J]. Railway Construction Technology, 2000, **20**(3): 1 - 3. (in Chinese))
- [6] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 地铁隧施工近邻桥基加固效果三维数值分析[J]. 铁道工程学报, 2005, **89**(5): 48 - 52. (WU Bo, LIU Wei-ning, SUO Xiao-ming, et al. Reaearch on the reinforcing effect of adjacent short pile bridge foundation in metro station construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, **89**(5): 48 - 52. (in Chinese))
- [7] 丁红军, 王琪, 蒋盼平. 地铁盾构隧道桩基托换施工技术研究[J]. 隧道建设, 2008, **28**(2): 209 - 212. (DING Hong-jun, WANG Qi, JIANG Pan-ping. Pile foundation underpinning technology applied in construction of shield-bored tunnels[J]. Tunnel Construction, 2008, **28**(2): 209 - 212. (in Chinese))
- [8] 杨晓杰, 邓飞皇, 聂雯. 地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(6): 1290 - 1295. (YANG Xiao-jie, DENG Fei-huang, NIE Wen, et al. Study on effect of metro tunneling on carrying capacity of pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(6): 1290 - 1295. (in Chinese))