

软土地区桥隧合建桩基布置数值模拟研究

李佳明, 陈式轩

(宁波市城建设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要: 依托宁波某明挖隧道工程项目, 针对桥梁、桥隧合建结构和隧道标准段结构, 利用有限元软件 PLAXIS 3D 建立了三维数值模型。该模型考虑了不同桩基分布方案、桩间距和桩长等多种因素, 分析它们对差异沉降的影响。研究结果表明, 在桥梁段及桥隧合建段, 采用桩基础能够确保承载力满足使用要求; 在隧道过渡段, 采用减沉桩可以通过桩土共同作用来减小沉降, 实现沉降的平稳过渡; 在隧道常规段, 可不采用桩基础。此外, 研究还发现, 隧道过渡段采用 10~30 m 的桩长可以有效地降低沉降, 桩长超过 30 m 时, 对沉降的影响作用会明显下降。隧道过渡段采用加密桩间距对改善节段间的差异沉降不明显, 对过渡段的整体沉降有改善效果。

关键词: 桥隧合建; 桩基布置; 三维数值; 减沉桩; 明挖隧道

中图分类号: U443.15

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0298-05

Numerical Simulation Study on Pile Foundation Layout of Bridge and Tunnel Co-construction in Soft Soil Area

LI Jiaming, CHEN Shixuan

(Ningbo Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Relying on an excavated tunnel project in Ningbo, aiming at the co-construction structure of bridge and tunnel, and the structure of tunnel standard section, a three-dimensional numerical model is established using the finite element software PLAXIS 3D. The model incorporates various factors, including different pile foundation layouts, pile spacing and pile lengths, to analyze the impacts on differential settlement. The research findings indicate that the use of pile foundations in the section of bridge and the co-construction section of bridge and tunnel can ensure the bearing capacity to meet the operational requirements. In the tunnel transition section, the use of settlement-reducing piles can reduce the settlement through the combined action of piles and soil, which can realize a smooth transition of settlement. And the pile foundations can not be used in the conventional tunnel sections. Furthermore, the study reveals that pile lengths ranging from 10m to 30m in the tunnel transition section effectively reduce the settlement. When pile lengths exceed 30m, the impact on settlement will obviously reduce. In the tunnel transition section, the adoption of increased pile spacing has no obvious effect on improving the differential settlement between segments, but has an improvement effect on the overall settlement of the transition section.

Keywords: bridge-tunnel co-construction; pile foundation layout; three-dimensional numerical value; settlement-reducing pile; excavated tunnel

0 引言

随着城市经济与人口规模的迅速扩张, 城市交通压力与日俱增, 地面交通网络也趋于饱和状态。为有效缓解这一难题, 地下道路(隧道)的建设成为城市发展的新趋势^[1-4]。考虑城市集约化建设, 地下

道路往往与市政地面道路采用相同线位, 穿越河道时不可避免会出现与桥梁线位交叉的问题。无论是选择桥梁避让还是隧道避让方案, 均可能带来路线设计标准的降低以及工程总造价的显著增加, 最终会造成行车舒适度降低, 另一方面, 这与城市集约化建设的理念也并不符, 由此衍生出“桥隧合建”的设计概念。

桥梁位于地面以上, 主要是竖向承压结构, 桩基形式多采用承压桩, 隧道埋置于河道以下受到水压影响, 主要采用抗拔桩作为抗浮措施, 隧道常规段可不设置桩基。桥隧合建需要同时考虑两种结构的受力不同特性, 同时常规隧道段与桥隧合建区域的基

收稿日期: 2024-10-22

作者简介: 李佳明(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地下工程方面研究、咨询工作。

通信作者: 陈式轩(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事市政道桥设计工作。电子信箱: chenshixuan@live.com

础形式差异较大,可能会导致较大的差异沉降问题。

目前国外对桥梁“合建”结构鲜有报道,研究内容仍是在隧道或车站开挖对邻近桥梁影响^[5-7]。国内的研究主要是集中在地铁车站和市政桥梁“合建”研究上。杨家熙^[8]通过对车站和高架桥不同结合方案下受力进行分析,总结了结构受力规律,认为采用分离合建式结构的方案比较合理。申齐豪和盖怀涛^[9]以某车站为例,从造价、结构受力和施工难度等角度对不同方案进行比较,认为桥梁扩大基础与车站结合的结构形式,虽然在造价上较高,但结构受力上明确。刘承启和闫杰栋^[10]对比了不同的同位建设方案,通过优化结构的传力路径,采用了桥梁跨越车站方案。马晓刚^[11]论述了上海某跨线桥在地铁车站范围内以车站结构作为其下部基础的结构的合理性,通过优化设计桥梁形式,在实际实施中上取得了较好的效果,站桥合建设计方案既能够节约建设用地,又能降低建设费用。董沂鑫等^[12]着重分析地铁车站和桥梁同位分离合建的结构受力特点,提出增设顶板横梁、提高纵向板配筋和采用桩基础结合的结构方案。胡显鹏^[13]对地铁站与高架桥同期同位分离式合建模式分析,认为应采用高架桥以扩大基础形式落于车站顶,再通过立柱向土层传递的形式,车站仅受竖向的桥梁荷载,传力路径明确,地震工况受力较好,且车站能形成外包防水。汪乐等^[14]对地铁车站和桥梁合建结构的结构承载能力、变形控制、抗震性能展开研究,提出车站结构可作为桥梁的箱型基础,车站结构内力集中处应加强设计,桥梁荷载对整体的承载力和变形存在一定影响。有智慧等^[15]分别对地铁车站和桥梁合建和分离两种简化模型的抗震性能进行分析,结果表明分离合建的车站抗震性能更强,结构形式更合理。赵修旺^[16]对地铁车站和市政桥梁结合形式进行了总结,结合形式大致可分为5种,分离式、连接式、侧穿、下穿和共板合建,选取结合形式应根据城市建设、经济效益和社会效益多角度进行考虑。

目前,国内城市下穿隧道和市政桥梁合建研究较少,只有少数学者展开研究。熊正元 and 杨春山^[2]利用数值法对桥隧合建段的桩基布置形式进行研究,揭示不同影响因素对桩基承载特性的影响。张涛等^[1]提出了一种桩基托换技术用于现有桥梁与新建隧道的合建,通过植筋将既有承台的扩大基础与隧道结构相连,并在合建段隧道结构采用预应力混凝土,将隧道结构作为桥梁上部支撑体系,从而完成

受力体系转换。王天宝和张立锐^[17]依据工程实例,研究了软土地区涉河桥隧减沉施工技术,认为合建模式和减沉设计可节约交通空间,降低建设成本。

现有针对桥隧合建的研究成果仍存在很多不足,如宁波地区以软土为主,土层较差,桩土作用较其他地区机理更为复杂,上部结构、桩、土三者协同作用机理不明,桥梁桩基为承压桩,水下隧道桩基为抗浮桩,隧道常规段未设置桩基,不同区域的变形协调设计未有深入研究。

综上所述,依托在建明湖隧道项目,对桥梁、桥隧合建结构和隧道标准段结构建立三维数值模型,研究差异沉降受疏密桩、长短桩以及桩径的变化影响程度,为桥隧合建结构的设计提供参考。

1 工程概况

宁波某明挖隧道工程下穿规划河道,与既有桥梁冲突,现有桥梁需拆除重建,本工程采用桥隧合建形式,地面桥梁上部结构采用14 m+18 m钢箱桥梁,下部结构与隧道合建,墩柱及台身以隧道结构顶板为支撑基础,增大局部顶底板和侧墙尺寸,下部设置钻孔灌注桩,将上部荷载传递至地层深处。隧道总体平面图见图1,桥隧合建纵断面见图2,横断面见图3。



图1 隧道总体平面图

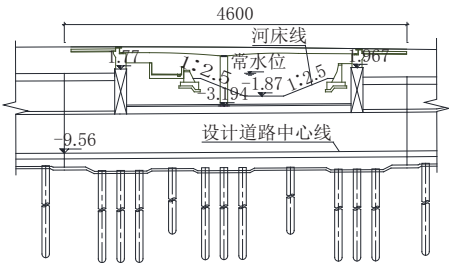


图2 桥隧合建纵断面图(单位:cm)

2 数值模拟的建立

2.1 模型建立

根据依托工程项目,本研究选取桥隧合建段及周边4个隧道节段,利用PLAXIS 3D建立三维数值模型。数值模型主要是通过划分有限元网格完成近似的数值计算,在保证计算精度的有效性下,可对复杂的岩土体条件进行适当简化,省略掉对实际工程影

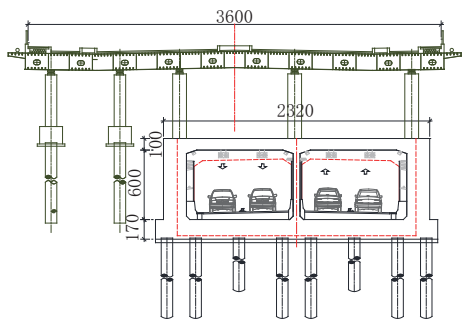


图3 桥隧合建横断面图(单位:cm)

响较小的一些因素。在本次模拟中对近似土层的物理力学加权归并。土体参数详见表1,隧道和桥梁结构参数详见表2,桩基参数详见表3。

表1 土体参数

项目	土层1	土层2	土层3	土层4
$\gamma_{dry}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.3	18.4	19.5	19.2
$\gamma_{wet}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.3	18.4	19.5	19.2
$E_{50}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	2 700	4 800	33 400	5 700
$E_{oed}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	2 700	4 800	33 400	5 700
$E_{ur}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	8 100	14 400	100 200	17 100
m	0.8	0.8	0.5	0.8
ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2
c/kPa	10.7	20.5	4.8	33.9
$\varphi/(^{\circ})$	16	23.7	36.3	18.2
$\psi/(^{\circ})$	0	0	6.3	0

表2 隧道和桥梁结构参数

项目	混凝土	变形缝
$\gamma_{dry}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	25	25
$E_{ref}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	32.5×10^6	1 000
ν	0.2	0.2

表3 桥桩和隧道桩基参数

项目	桥梁	隧道
直径/m	1.2/1.0	1.0
$E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	3.0×10^7	3.0×10^7
ν	0.2	0.2

为了能够真实模拟工程完成后,隧道节段之间、桥隧合建段与桥梁段之间的差异变形,须根据完成后的实际地形、地面道路范围、隧道及桥墩的真实尺寸及位置建立有限元模型,车辆荷载按 20 kPa 计算,使本次模拟尽可能地符合真实的情况。本次数值模拟的模型按如下原则建立:

- (1)桥梁和隧道承载桩均采用 Embedded 梁单元模拟;
- (2)桥梁承台及隧道主体结构采用实体单元进行模拟;
- (3)车辆荷载和铺装荷载采用平面荷载进行模拟。
- (4)土层采用实体单元(10 节点单元)。

网格划分过程中,对结构区域进行了网格加密。该模型尺寸为长×宽×高=200 m×100 m×80 m(见图4),共 144 109 个单元,32 989 个节点(见图5)。

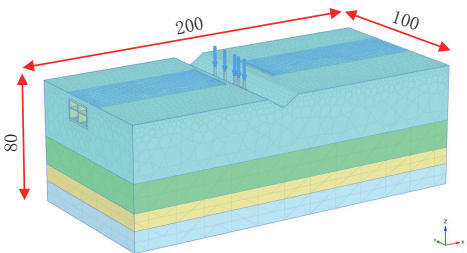


图4 桥隧合建模型网格图(单位:m)

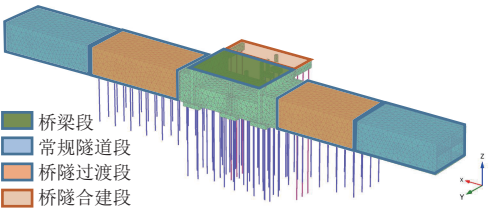


图5 桥隧合建模型网格图

模型边界条件:对土体四周边界为法向约束,对土体底边界为固定约束,地面为无约束。土体荷载取自重。

2.2 模拟方案

施工工序分为3步,主要研究隧道和桥梁下部结构施工完毕后,车辆荷载对工后沉降的影响。施工工序如表4所列。

表4 施工工序

工况	土层1	备注
1	初应力平衡	
2	实施河道、隧道和桥梁结构及桩基	位移清零
3	施加桥梁荷载和地面及隧道内车辆荷载	

对于桥梁和桥隧合建区域,重点关注桩基承载力是否满足要求,此外考虑行车舒适性,还应关注桥梁段、桥隧合建段、过渡段、常规段之间差异沉降。在阶段过渡区域选取7个典型点用于比较差异沉降变化。a点属于桥梁段,b点和c点属于桥隧合建段,d点和e点属于隧道过渡段,f点和g点属于隧道常规段(见图6)。

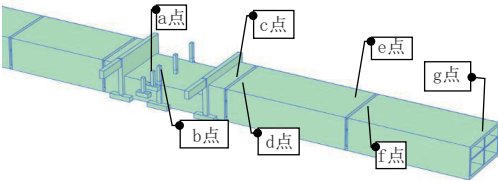


图6 点位示意图

3 计算结果及分析

3.1 桩基类型对差异沉降的影响

按表5中桩基类型方案分别建立模型进行计算分

析。按图6所示的7个点提取工后竖向位移绘制图7。

表5 设计方案表

	桥梁段	桥隧合建段	隧道过渡段	隧道常规段
方案一	50 m长桩	密桩 50 m长桩	疏桩 40 m长桩	无
方案二	50 m长桩	密桩 50 m长桩	疏桩 20 m短桩	无
方案三	50 m长桩	疏桩 20 m短桩	疏桩 20 m短桩	无

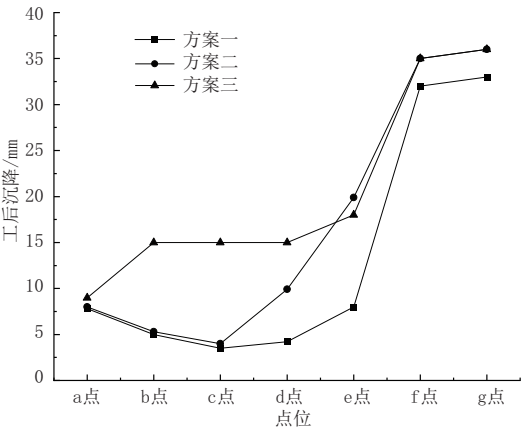


图7 不同方案各点工后沉降(单位:mm)

方案一桥梁段和隧道段均采用长桩密打,因此桥梁合建段与桥梁段之间的差异变形较小,a点和b点差异沉降仅为2.8 mm;隧道过渡段与桥隧合建段保持一致采用长桩,但桩间距较大采用疏打型式,c点和d点差异沉降为0.7 mm;隧道常规段采用不打桩的型式,e点与f点差异沉降达24 mm。

方案二桥梁段和隧道段均采用长桩密打,a点和b点差异沉降仅为2.7 mm;隧道过渡段采用短桩疏打型式,c点和d点差异沉降为4.9 mm,隧道常规段采用不打桩的型式,e点与f点差异沉降达15 mm。

方案三桥梁段仍采用长桩密打,桥隧合建段采用短桩疏打,a点和b点差异沉降为6 mm;隧道过渡段与桥隧合建段保持一致采用短桩疏打型式,c点和d点差异沉降为0.1 mm;隧道常规段采用不打桩的型式,e点与f点差异沉降17 mm。

3.2 桩长对差异沉降的影响

隧道过渡段桩间距与方案二相同,桩长研究范围为10~50 m。

图8表示各点沉降变化图。其中桥梁段(a点)和桥隧合建段(b点、c点)基本不受到隧道过渡段桩长变化的影响;隧道过渡段(d点、e点)快速下降,d点由15.9 mm下降至3.6 mm,e点由31.5 mm下降3.6 mm,其中桩长由10 m变化为20 m下降最为明显;隧道常规段(f点、g点)工后沉降隧道过渡段桩长

增加略有下降。可以看出随着桩长的增加,隧道过渡段沉降显著降低,常规段也受到一定的降低。

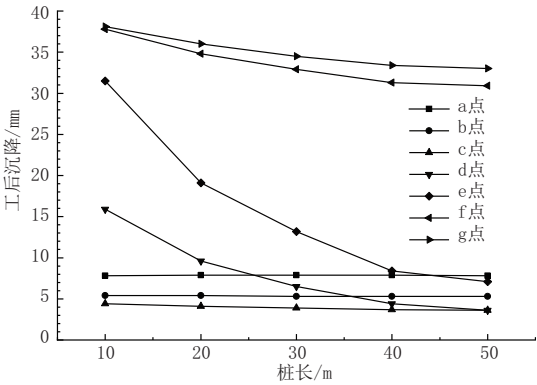


图8 不同桩长各点工后沉降(单位:mm)

3.3 桩间距对差异沉降的影响

隧道过渡段桩长和横向布置与方案二相同,横向布置4根20 m长直径为1 m钻孔灌注桩,桩纵向间距研究为3~8 m。

根据图6中点位所示形成图9的各点沉降变化图。其中桥梁段(a点)和桥隧合建段(b点、c点)基本不受到隧道过渡段桩纵向变化的影响;隧道过渡段(d点、e点)缓慢增加,d点由8.7 mm增加至9.6 mm,e点由17.5 mm增加至19.1 mm;隧道常规段(f点、g点)工后沉降隧道过渡段桩长纵向间距增大,仅增加0.5 mm工后沉降。可以看出随着纵向间距的增加,隧道过渡段的工后沉降略有增加,过渡段的整体差异沉降(即d点与e点之间的沉降差)增加,但隧道常规段、桥梁段和桥隧合建段基本不变。

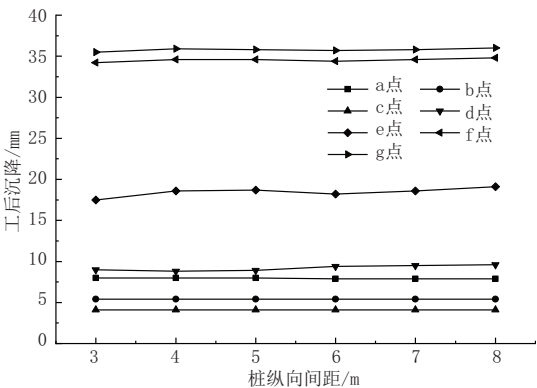


图9 不同桩纵向间距各点工后沉降(单位:mm)

4 结 论

通过分析不同桩基分布方案、桩间距和桩长对差异沉降的数值模拟分析结果得到以下结论。

(1)从隧道和桥梁安全以及行车舒适性,差异沉降需进行严格控制,桥梁结构及桥隧合建段宜采用

桩基础,确保承载力满足使用要求;隧道过渡段作为桥隧合建段与隧道常规段的过渡段,宜通过桩土共同作用较小沉降,达到沉降过渡作用。

(2)桥隧合建段既要承受隧道中车辆荷载,还要承受桥梁上方的车辆荷载,整体荷载较大,原地基承载力难以满足需求,无法适用于减沉摩擦桩,故采用桩基础。结构整体沉降仅8 mm,与桥梁段差异沉降为4 mm,满足结构安全和行车舒适性要求。

(3)隧道过渡段依据《建筑桩基技术规范》(JTJ 94—2008)软土地基减沉复合疏桩基础设计方法进行设计,对其中桩间距和桩长进行有限元数值模拟分析,结果表明增大桩长有助于减小沉降,加密桩间距对沉降影响较小,但可以改善过渡段整体结构的差异沉降。桩间距控制在8 m,桩长20 m是较为合理的布桩方式,隧道过渡段与桥隧合建段变形缝处差异沉降为5 mm,隧道过渡段和隧道常规段差异沉降为15 mm。

参考文献:

- [1] 张涛,胡传鹏,周山水,等.隧道下穿bri桥梁桩基托换设计关键技术[J].公路,2022,67(11):43-50.
- [2] 熊正元,杨春山.隧道与桥梁共建桩基布置及方案优化[J].公路,2019,64(2):137-142.
- [3] 林峰.城市道路下穿高铁桥梁的方案研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [4] 方辉成.隧道正交下穿既有城市道路施工的影响分区研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [5] Nematollahi M, Dias D. Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction - case of the shiraz subway line[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019(86): 75-88.
- [6] Yoo C, Abbas Q. Interaction between two-arch tunnel and pile supported bridge - an experimental investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021: 112.
- [7] Yoo C S, Chung E M. A comparative study on construction method for a large underground station under pile supported bridge[J]. Journal of the Korean Geosynthetic Society, 2017, 16(4): 177-190.
- [8] 杨家熙.地铁明挖车站与高架桥同期同位合建关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [9] 申齐豪,盖怀涛.关于地铁车站与高架桥结合设计方案研究[J].工业建,2015(1):1093-1096;1108.
- [10] 刘承启,闫杰栋.与地铁车站同位建设的机场高架桥设计分析[J].工程建设,2022,54(3):54-60.
- [11] 马晓刚.与地铁地下车站合建的桥梁设计[J].城市道桥与防洪,2021(2):55-59.
- [12] 董沂鑫,张强,陈明.站桥同位分离合建中的地铁车站设计[J].铁道勘察,2017,43(4):96-99.
- [13] 胡显鹏.地铁站与高架桥同期同位分离式合建方案设计研究[J].城市轨道交通研究,2018,21(12):92-96.
- [14] 汪乐,王涛,宋磊.地铁明挖车站-市政桥梁合建结构的关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(12):2006-2012.
- [15] 有智慧,郭洋洋,聂斐,等.连接合建式与分离合建式站桥结构抗震性能探讨[J].特种结构,2018,35(5):45-50.
- [16] 赵修旺.城市轨道交通和市政桥隧工程结合形式研究[J].中国高新科技,2021(11):106-108;110.
- [17] 王天宝,张立锐.软土地区涉河桥隧合建减沉施工技术研究[J].科技创新与应用,2024,14(20):158-162.
- [18] 王振宇.邻近既有高速铁路施工现场起重机械安全技术管理研究[J].运输经理世界,2022(12):141-143.
- [19] 吴宜铸.深基坑沉井施工不排水下沉姿态控制及对地表变形影响[J].苏州科技大学,2023(6):80.
- [20] 刘新星.不排水下沉施工技术在市政沉井工程中的应用[J].建筑技术开发,2023(4):87-89.
- [21] 张升华,张亮.高压旋喷桩在深基坑止水帷幕中的应用[J].科学技术创新,2024(8):144-147.
- [22] 黄耀锋.过江大桥深基坑咬合桩止水帷幕支护施工技术及安全管理措施[J].劳动保护,2024(5):102-105.
- [23] 王高峰,付建武,张光庭,等.强渗透性软土地层中硬咬合桩施工技术研究[J].建筑技术,2023(11):2747-2751.
- [24] 窦冠荣.不排水下沉沉井施工方案及技术措施[J].中国城市经济,2010(8):111;245.
- [25] 张良.不排水沉井施工技术在市政工程中的实践[J].住宅与房地产,2021(4):232-233.
- [26] 左俊.杰砂、卵石地质条件下沉井施工技术的应用——以遂宁某污水厂进水泵房施工为例[J].城市道桥与防洪,2023(6):195-198;249.

(上接第247页)

与配件,2018(1):203-204.

- [12] 王振宇.邻近既有高速铁路施工现场起重机械安全技术管理研究[J].运输经理世界,2022(12):141-143.
- [13] 吴宜铸.深基坑沉井施工不排水下沉姿态控制及对地表变形影响[J].苏州科技大学,2023(6):80.
- [14] 刘新星.不排水下沉施工技术在市政沉井工程中的应用[J].建筑技术开发,2023(4):87-89.
- [15] 张升华,张亮.高压旋喷桩在深基坑止水帷幕中的应用[J].科学技术创新,2024(8):144-147.
- [16] 黄耀锋.过江大桥深基坑咬合桩止水帷幕支护施工技术及安全