

盾构区间小净距穿越高速公路桥桩的影响分析与研究

胡财宝

广州地铁设计研究院股份有限公司

摘要: 城市人口的不断增多,城市交通压力也逐渐增大,轨道交通是当前缓解交通压力的方式之一。轨道交通的应用越来越广泛,线网越来越密集,盾构区间小净距穿越高速公路桥桩的设计越来越多。复杂环境下如何更好地制定出盾构区间小净距穿越高速公路桥桩的设计方案,是当前隧道工程需要关注的重要课题。本文主要以西善桥站~板桥北站盾构区间为例,对小净距穿越高速公路桥桩进行设计分析。

关键词: 盾构区间;小净距;高速公路;桥桩

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.12.054

引言:

随着盾构法在隧道工程中的普遍推广,盾构区间小净距穿越高速公路的形式也随之增多。这样不仅能够缓解我国部分大城市越来越复杂的交通压力,对穿越的高速公路桥桩的影响也会更小,这种形式的设计将成为当前常见的变化趋势。

一、工程概述

(一) 工程概况

南京至马鞍山市域(郊)铁路(简称宁马线)南京段:线路全长26.51km,其中地下线10.82km,高架线15.14km,过渡段0.55km。全线共设8座车站,其中地下站4座、高架站4座,设滨江车辆基地一座。

西善桥站~板桥北站区间为宁马线的第二个区间,区间下行线设计起讫里程下DK12+936~下DK15+830,全长2894m,采用盾构法施工,由西善桥站始发至板桥北站接收。区间设置一座区间风井及三座联络通道,区间纵坡为V字坡,盾构隧道出西善桥站后依次为22%下坡、16%上坡、6%下坡、12.08%上坡进入板桥北站。

本区间最小平面曲线半径800m,最大纵坡22%,其中穿越宁马高速刘村互通节点处左、右线线间距约15~16m,线路半径2400m,线路纵坡为-6%,埋深约13.4m。区间沿线建构筑物及控制性因素较多,以致在宁马高速刘村互通节点处,以小净距穿越高速高架桥桩

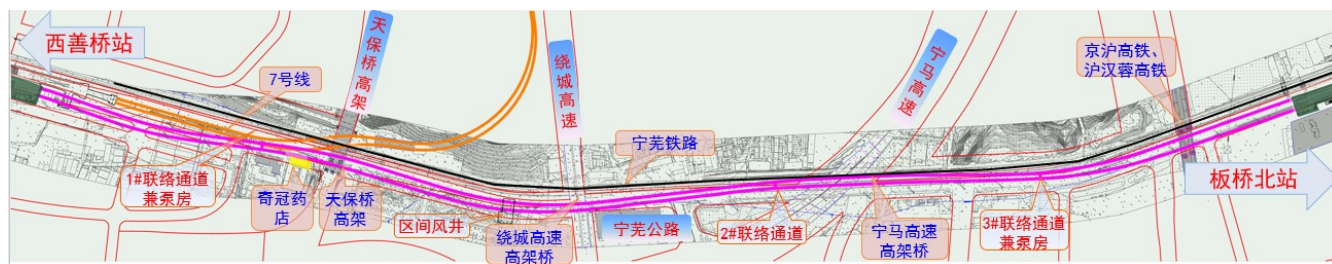


图1 西~板区间线路走向平面图

基。

(二) 工程地质条件

拟建场地(西善桥站~板桥北站区间)位于长江漫滩区。由于人们长时间的活动,对填土层也有一定的影响,填土层厚度1.9~6.1m。填土层之下,覆盖层深度范围内以全新世中晚期沉积的新近沉积土(包括淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉砂)及早期沉积的粉质黏土。

场地下伏基岩埋深为3.1~35.6m,岩性为白垩系浦口组(K2p)砂质泥岩、侏罗系大王山组凝灰岩(J3d)。岩土层分布变化亦较大。

本工程盾构穿越范围自上而下分别为:①-1杂填土、②-1d3-4粉砂、③-3b1-2粉质黏土、3-4e2含卵砾石粉质黏土、K2P-2强风化泥质砂岩、K2P-3中风化泥质砂岩、J3d-2nh强风化凝灰岩、J3d-3nh中风化凝灰岩,此区段盾构掘进土层为:K2P-2强风化泥质砂岩、K2P-3中风化泥质砂岩、J3d-2nh强风化凝灰岩、J3d-3nh中风化凝灰岩等。

二、宁马高速公路概况

(一) 宁马高速公路概况

宁马高速本标段起点接宁马高速沪蓉高速段,起于绕城高速北侧,起点桩号为K7+940.000,止于板桥河南侧,终点桩号为K14+200.000,路线全长约6.26km。

该区段共设计宁马高速5个桥梁,1个主线桥,2个匝道桥及2个新建桥梁。其中主线桥为宁马高速公路主线四号桥(K0+000~K2+308),匝道桥分别为D匝道2号桥(DK0+318~DK0+396)和A匝道1号桥(AK0+171~AK0+271),新建桥梁分别为分离左桥及分离右桥。宁马高速桥桩桩径1.2~1.5m,桩长20~45m,桩底均进入中风化岩层。

(二) 西善桥站~板桥北站区间与宁马高速相对位置关系

区间隧道在下DK14+715~DK14+815里程侧穿宁马高速。侧穿区段隧道线间距约15~16m,隧道埋深约为13.4m,区间隧道与桥桩最小水平净距为1.5m。

三、计算模型及计算结果分析

(一) 研究方法

高速公路和国道的舒适度是衡量其是否可正常使用的关键指标,行业规范中对高速公路舒适度的要求主要体现在路面的平整度上,而路面的沉降、不均匀沉降可直接反映其平整度的变化,所以,本次评估根据拟建地铁盾构隧道的设计资料,通过理论分析和数值模拟两种方式进行研究,研究盾构隧道施工对上方高速公路和国道的沉降以及变形影响,并据此判定盾构下穿工程的可行性。

(二) 仿真计算软件

选取大型通用有限元软件MIDAS/GTS作为计算平台。

1. 计算参数

岩石和土体材料的结构对计算结果都有比较大关系，所以在计算过程中，要严格选择岩土的本构模型。考虑场地内岩土特性，分析时地基各土层采用弹性模型。盾构隧道衬砌的刚度较大，相当于是在弹性的状态中，所以数值模拟中采用弹性模型来模拟它们的变形和受力特征，其应力应变关系如下所示：

$$\sigma = E \varepsilon \quad (\text{式})$$

式中： σ 为材料应力， E 为弹性模量， ε 为材料应变。

2. 计算模型

根据盾构区间与宁马高速的平纵关系，对盾构区间的状况要考察清楚，例如隧道、地层等，充分掌握实际情况，按照1:1的创建几何模型。有限元计算模型的范围确定为330m×285m×40m (X×Y×Z)，其中，模型上表面边界取自地表（地表高差变化较小，简化为水平面），下表面边界取自隧道底部以下约25m，三维计算模型如图2和3所示。

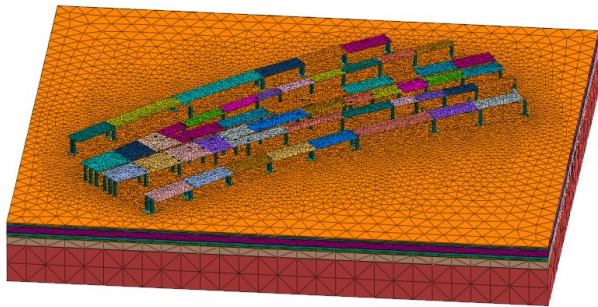


图2 有限元计算模型

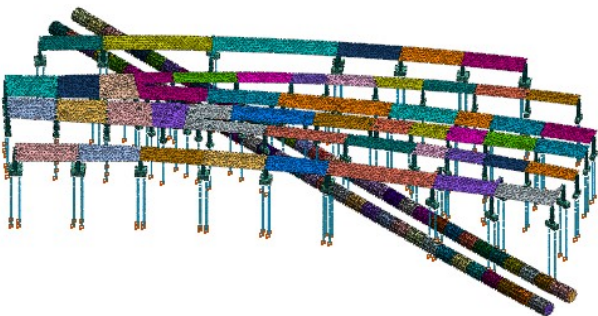


图3 盾构隧道与宁马高速桥桩相对位置关系

数值计算中，地表为自由边界条件；模型的前后边界的y方向位移限制为零，x及z方向自由；模型左右两侧边界的x方向位移限制为零，y及z方向自由；模型底部边界的z方向位移限制为零，其他方向自由。

3. 计算过程

地铁隧道盾构施工过程中，盾构机不仅需要确保开挖面和周围土体稳定性，还要进行隧道掘进、出渣工作，同时在机内拼装管片形成衬砌、实施壁后注浆，在土体中渐进向前，而有限元法不能够很好地模拟盾构的连续推进过程，因此，须做一定的简化。本次模拟分析中，把盾构推进当成非连续的过程进行探讨，如果盾构机以跳跃方式向前推进，每次向前推进的长度为N个衬

砌单元环宽度(1.2m)，在盾构机尾部衬砌拼装一次性完成，盾构机和管片衬砌之间的超挖部分进行同步注浆，并且在掌子面上增加均布的土压力，大小为原始地层隧道中心位置的侧向静止土压力值。盾构机内土体开挖采用有限元软件MIDAS/GTS提供的单元“钝化”功能进行模拟，模拟同步注浆过程中先激活超挖部分土体，然后把这些土体单元参数修改为注浆材料的属性。计算过程中要按照盾构工筹进行，为了模拟最复杂的工况，本次模型中上下行线要一起掘进。

4. 盾构施工对周边环境的影响机理

盾构施工对土体的位移和变形会造成一定程度上的影响，有影响的地表建筑物，因为地基土体变形的影响，会造成其外力条件和支承状态产生浮动，而外力因素的影响也会造成已有建筑物发生沉降、倾斜、断面变形等现象，因此，邻近建筑物的变形从本质上而言是因为地层变形造成的。

(1) 地层变形的原因，地表变形是因为盾构法施工造成隧道周围土体的松动和沉降，主要的原因是由于沉降或隆起。主要有以下两点原因：

地层损失是指盾构施工中实际开挖土体体积与理论计算排土体积之差。隧道的挖掘土量一般是因为超挖或盾构与衬砌间的间隙等原因，而比按隧道断面计算出的土量超出较多，从而导致隧道与衬砌之间存在空隙，空隙会被周围土壤及时填充，引起地层运动，产生施工沉降（也称瞬时沉降）。土的应力也会产生变化，随之而形成：应变—变形—位移—地面沉降。

固结沉降因为盾构推进过程中的挤压、超挖和盾尾的压浆作用，对地层造成扰动，从而导致隧道周围地层产生正、负超静孔隙水压力，随着超静孔隙水压力消散，土骨架逐渐产生变形，从而引起地层沉降称为固结沉降。固结沉降可分为主固结沉降和次固结沉降。主固结沉降为超孔隙水压力消散引起的土层压密；次固结沉降是由于土层骨架蠕动引起的剪切变形沉降。

从理论上讲，盾构法施工引起隧道周围地表沉降是施工沉降（也称瞬时沉降）、主固结沉降及次固结沉降三者之和。一般土体中次固结沉降历时时间较长，相比主固结沉降，其沉降数值较小，即地表总沉降等于地层损失造成的施工沉降和由于地层扰动引起的主固结沉降之和。

(2) 地层变形的表现形式。盾构施工引起地层变形的分布模块是三维的，随着盾构推进，隧道上方地表的沉降量逐渐增加，沉降区域的宽度也日趋扩展，如图4所示。

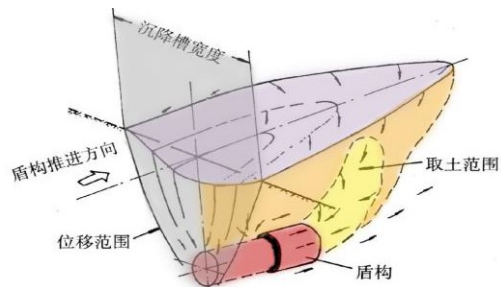


图4 盾构掘进过程地层变形示意图

盾构推进引起的地面纵向沉降变化规律可分为先行沉降、掌子面前的沉降与隆起、尾部沉降、尾部空隙沉降和长期延续沉降共五个阶段。

5. 计算结果

根据上述材料参数和施工步骤，经过MIDAS/GTS求解，计算系统达到平衡后，得到盾构施工期间土体变形结果如下：

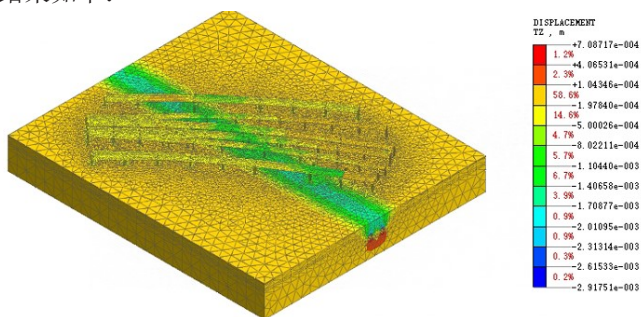


图5 土体整体竖向位移, $Tz_{max1}=-2.918mm$

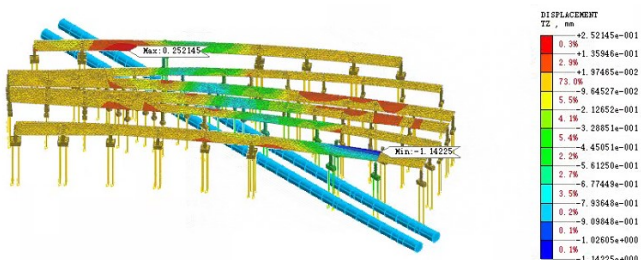


图6 桥梁竖向位移 $Tz_{max2}=-1.211mm$

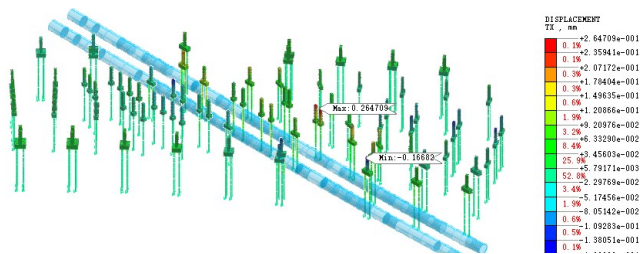


图7 桥墩最大水平位移 $Tx=0.265mm$

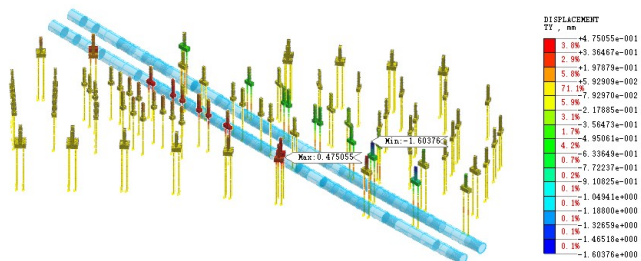


图8 桥墩最大水平位移 $Ty=1.610mm$
(ty)

根据有限元结果，盾构隧道开挖对地层造成扰动，引起上方地表及高速公路路基的位移和变形，其中，盾构隧道拱顶土体最大沉降值约为2.918mm，桥梁墩台引起的最大水平位移为1.610mm，最大竖向沉降为-0.794mm。

桥梁墩台的最大累计沉降与施工步骤的关系如图4.2.3.4-7所示，从图中可以看出，前序施工阶段会对地层产生扰动，使得桥梁墩台发生固结沉降，随着盾构隧道开挖的进行，在S15~20阶段下穿绕城高速下侧，逐渐发生沉降0.8mm左右。

下穿公路期间发生的沉降占总沉降的80%以上，随着管片安装以及壁后注浆，高速公路沉降逐渐稳定。

隧道开挖进程

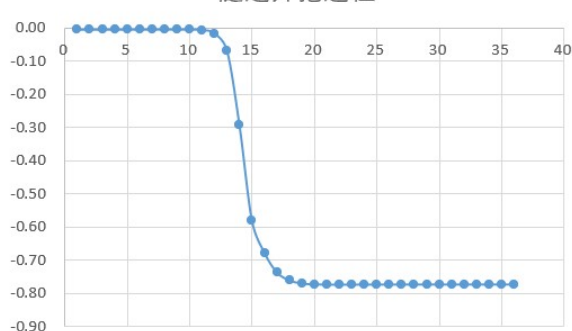


图9 桥梁最大竖向沉降历程曲线

沿着隧道上部桥梁位置地表布置沉降测点，得到隧道上部地表的沉降云图，从云图可以看出，隧道两侧的地表沉降呈现对称分布，最大沉降集中在上下行线顶部地表位置处，此处的最大地表沉降为-1.40mm，最终呈现的计算结果是两条peck曲线的叠加。

桥梁位置竖向位移/mm

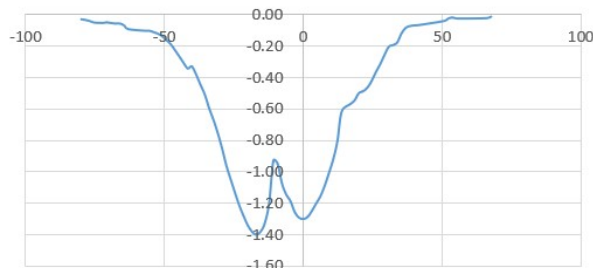


图10 桥梁位置地表最大沉降曲线

综上，桥梁墩台最大沉降值为0.794mm<10mm，最大水平位移值为1.610mm<5mm，纵向相邻桥梁墩台间差异沉降0.579mm<3mm，横向相邻桥梁墩台间差异沉降0.111mm<2mm，满足规范要求。

结语

综上所述，1) 按照当前的设计方案盾构穿越对高速公路设施影响可控，桥梁墩台最大沉降值为0.794mm<10mm，最大水平位移值为1.610mm<5mm，纵向相邻桥梁墩台间差异沉降0.579mm<3mm，横向相邻桥梁墩台间差异沉降0.111mm<2mm，满足规范要求。

2) 为了减少地层地下水流失导致地面沉降，需要提高隧道结构的整体性及整体抗变形能力，增加环缝嵌缝、纵缝嵌缝及变形嵌缝防水措施，以提高隧道结构的防水能力。对于盾构区间在施工过程中对周边环境的影响，需要做好地层变形、地层损失等工作。

参考文献

[1] 杨凯钧. 盾构隧道穿既有建筑施工过程控制研究[J]. 工程技术研究, 2020, 06.
 [2] 刘亮, 黄明, 钟祖良, 梁宁慧. 高速公路小净距隧道建设关键技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, S1.
 [3] 周绍宾, 郭佳奇, 徐冲. 盾构隧道下穿交叉市政管线地表沉降分析与控制[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 08.

作者简介: 胡财宝, 1987年4月, 男, 江苏徐州, 硕士, 职称: 轨道交通结构设计工程师, 研究方向: 轨道交通结构设计。