

盖梁临时支撑对地铁隧道变形受力影响分析

戴 风, 黄 曦

(上海浦东工程建设管理有限公司, 上海市 200127)

摘 要: 城市高架桥改建工程难度大、风险高, 不可避免会上跨既有地铁隧道施工。其中混凝土盖梁湿接缝施工所需的临时支撑会对下行运营期地铁的受力变形产生不利影响, 威胁地铁运营安全。依托某邻近运营地铁隧道的城市快速路高架桥改建工程, 对盖梁临时支撑荷载作用下的地铁隧道受力变形规律进行理论和实测分析, 结果表明: (1) 数值模拟结果与实测数据基本吻合, 均呈“鼓腹形”变化, 最大误差仅为 0.087 mm; (2) 隧道管片的受力变形随盖梁临时支撑作用距离和隧道埋深增加逐步减小, 荷载至两隧道中心线距离由 0 m 增加至 23 m 时, 最大竖向位移由 0.4 mm 减小至 0 mm, 拱顶和拱腰处弯矩分别下降 10 % 和 5.8 %, 隧道埋深由 1.0 D 增加至 3.5 D 时, 最大竖向位移减小 91.4 %, 环向附加最大弯矩由 25.9 kN·m 减小至 1.5 kN·m; (3) 合适的临时支撑架设位置对于保障隧道结构安全至关重要, 应根据隧道埋深和建设场地条件综合确定; (4) 隧道拱顶受力变形对临时支撑作用较为敏感, 需加强对拱顶范围内管片的监测。研究结果可为上跨运营期地铁的高架盖梁临时支撑的设计、施工和隧道施工监测提供技术参考。

关键词: 临时支撑; 地铁隧道; 数值模拟; 变形监测

中图分类号: TU74; U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0237-07

Analysis on Impact of Temporary Support of Bent Cap on Force Deformation of Metro Tunnels

DAI Feng, HUANG Xi

(Shanghai Pudong Engineering Construction Management Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: The reconstruction project of urban elevated bridges is highly challenging and risky, and it is inevitable that the construction will cross the existing metro tunnels. The temporary supports required for the wet joint construction of concrete bent caps will have an adverse effect on the force deformation of the metro during the downward operation period, which threatens the operational safety of the metro. Relying on an urban expressway elevated bridge reconstruction project near the metro tunnel under operation, the theoretical and measured analysis is conducted on the force deformation rules of metro tunnel under the temporary support load of bent cap. The conclusions are as follows (1) the numerical simulation results are basically consistent with the measured data, both exhibiting a "bulging abdomen type" variation pattern. The maximum error is only 0.087 mm. (2) The force deformation of tunnel segments gradually decreases with the increase of the temporary support distance of the bent cap and the burial depth of the tunnel. When the distance from the load to the central line of two tunnels increases from 0 m to 23 m, the maximum vertical displacement decreases from 0.4 mm to 0 mm, while the bending moments at the vault and arch haunch reduce by 10 % and 5.8%, respectively. The burial depth of the tunnel increases from 1.0 D to 3.5 D , the maximum vertical displacement decreases by 91.4%, and the circumferential additional maximum bending moment decreases from 25.9 kN·m to 1.5 kN·m. (3) The appropriate position of erecting the temporary supports is crucial for ensuring the safety of the tunnel structure, which should be determined comprehensively based on the tunnel burial depth and the conditions of the construction site. (4) The force deformation of the tunnel vault is particularly sensitive to the temporary supports, which is required to strengthen the monitor of segments within the vault range. The research result can provide the technical references for the design and construction of temporary supports of elevated bent cap of metro lines spanning the operational metro and the monitoring of tunnel construction.

Keywords: temporary support; metro tunnel; numerical simulation; deformation monitoring

收稿日期: 2024-11-12

作者简介: 戴风(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市市政工程建设管理工作。

0 引 言

高架桥作为城市交通基础设施的重要组成部分, 可以有效缓解地面交通拥堵, 提高道路通行效率,

改善城市整体的交通状况。近年来,随着城市轨道交通迅猛发展,高架施工不可避免地会出现近地铁保护区施工的情况,导致邻近地铁隧道周围土体发生变形。过大的土体变形可能会造成地铁隧道出现裂缝、变形等损坏,进而影响地铁结构的完整性。此外,荷载传递会引起地层的不均匀沉降,也会导致地铁隧道出现不均匀沉陷,影响地铁运营安全。因此,邻近地铁上部施工须充分预估和防控对地铁隧道的各种潜在影响,确保地铁隧道运营安全。

针对邻近地铁隧道或上部堆载施工,目前已有学者做了大量研究,主要集中在数值模拟、实测分析和理论解析方面。数值模拟方面,闫常山^[1]依托城市高架桥建设项目,对高架桥的桩基与邻近既有地铁隧道进行了数值模拟和现场监测,得出高架桥桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的变化规律;荣露等^[2]依托某与地铁交叉新建快速通道工程,建立高架桥紧邻地铁隧道的三维模型,并与实际监测数据进行对比,提出了桩基施工隧道变形控制措施;王涛等^[3]采用 MIDAS GTS 有限元软件建立三维模型,隧道采用连续板单元,模拟了公园用地先卸载再加载对上海地铁 8 号线隧道位移的影响;秦浩等^[4]运用三维数值分析方法,研究了地面堆砂对近距离既有沉管隧道暗埋段隧道位移的影响,并对比分析了不同堆载方案的影响。在现场实测方面:范垚垚等^[5]监测了河道加卸载对上海地铁 9 号线隧道的影响,发现河道回填后隧道最大沉降量达到 28 mm;邵华等^[6]基于现场实测数据对上方 7 m 堆土下上海市某地铁区间盾构隧道的受力变形进行了分析,隧道产生了严重且密集的渗漏水及结构损伤病害;曾华蔚^[7]结合实际工程案例,提出隧道结构变形整治方案,并基于监测数据,分析了微扰动注浆技术整治机理。理论解析方面:李春良等^[8]基于弹性地基梁理论,建立了地面荷载作用下的盾构隧道结构的纵向内力模型,计算隧道产生的附加沉降和内力;曩继立等^[9]把深埋盾构隧道等效为双面弹性地基梁,利用 Boussinesq 公式求出隧道上部的附加应力,最后采用有限差分法求出隧道的纵向位移和内力。梁荣柱等^[10]利用非线性 Pasternak 地基模型,考虑地基非线性变形特点,通过接头非连续盾构隧道计算模型,利用两阶段法,推导得到地表堆载作用下盾构隧道纵向变形的简化计算方法。

高架结构主体施工是由局部到整体的过程,未成形之前不能完全靠自身承载或保持稳定。通常预

先搭设临时支撑,临时支撑可承担部分上部结构荷载,防范结构失稳和坍塌等安全隐患,但不可避免会对邻近地铁隧道受力、变形产生较大影响,严重时威胁地铁运营安全。虽然国内外学者针对近地铁施工下的隧道受力变形规律和保护措施做了大量工作,但对于高架混凝土盖梁临时支撑施工对运营期地铁隧道的受力变形规律研究较少,且缺乏高架盖梁临时支撑合理布设范围方面研究。因此,本文依托金海路快速化改建工程,采用数值模拟及现场监测相结合的方式对运营地铁隧道的变形影响进行研究分析,从变形、受力角度确定临时支撑合理布置范围,为混凝土盖梁临时支撑设计与施工提供参考,保证邻近地铁安全运营。

1 工程背景

1.1 工程概况

金海路改建工程西起杨高中路,东至华东路东侧,全长约 7 km,全线共分 4 个标段,本文所研究地铁上盖邻近混凝土盖梁临时支撑布置位置为 2 标段,长度约 1.717 km。共设置 3 条匝道。场地条件复杂,风险因素多,沿线有 3 条轨道交通:现状轨道交通 9 号线、在建崇明线和规划轨道交通 20 号线。路线南侧为 220 kV 高压线。主要横向相交道路为申江路、金吉路和金穗路。2 标段范围内部分盖梁分为 2 段和 3 段安装,在湿接缝位置处设置临时支撑并铺设 2.4 m×6.0 m 路基箱承载,混凝土盖梁临时支撑与轨道交通 9 号线的相对位置和 P38 混凝土盖梁临时支撑布置分别如图 1 和图 2 所示。P35 盖梁处左线隧道布置 3 个拱顶竖向位移测点 M1~M3,测点 M1 位于 P35 盖梁正下方,测点间水平间距为 10 m。地铁隧道的直径为 6.6 m,管片为 C50 钢筋混凝土预制件,厚 0.35 m。根据该工程上跨盾构隧道的实际施工情况,本文选取紧邻地铁隧道(路基箱边紧贴地铁盾构边线)的 P34、P35 和 P38 临时支撑进行分析,3 个工况临时支撑与隧道的位置关系与最不利荷载工况如表 1 所列。

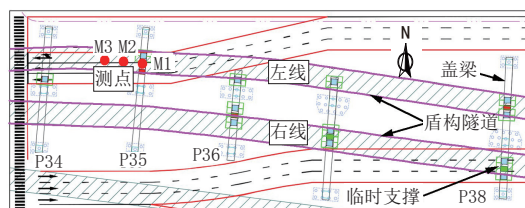


图1 高架上跨地铁隧道平面图

为确定临时支撑的合理布设范围,将临时支撑作用位置按1 m为间隔自左、右线隧道中心线开始设置,定义荷载作用位置距左右线隧道中心线的距离为 x ,共24个荷载工况,如图4所示;此外,埋深会对地表荷载作用下的盾构隧道附加变形与受力产生较大的影响。因此,按 $0.5D$ 为间隔自距地表 $1.0D$ 深度开始设置,进一步确定不同埋深的盾构的临时支撑合理布设范围,为工程设计与施工提供参考。模型计算分析步如表3所列,针对不同作用位置处荷载与不同埋深隧道,仅改变Phase3和Phase5分析步,激活对应位置管片和荷载即可。

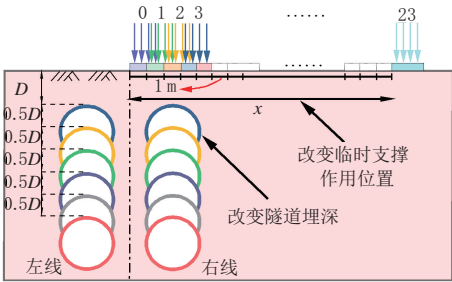


图4 模拟工况

表3 模型计算分析步

序号	分析步
Phase0	静力平衡
Phase1	隧道内土体降水
Phase2	杀死隧道内土体
Phase3	激活隧道(拱顶距地表 $1.0D\sim3.5D$, $0.5D$ 为间隔)
Phase4	位移重置
Phase5	激活荷载(距左、右线中心线 $0\sim23\text{ m}$, 1 m 为间隔)

2.2 模型计算结果与验证

管片的受力变形是否处于安全限值内对于高架盖梁施工过程中隧道结构能否保持安全稳定状态起着至关重要的作用。在有限元模型中选取P35临时支撑工况下的拱顶竖向位移与现场实测数据进行对比分析如图5所示,测点自盖梁临时支撑正下方开始按10 m间隔沿隧道纵向布置。

由图5中P35临时支撑工况的数值模拟与现场实测数据对比可分析得到:二者变化趋势大致相同,均在临时支撑作用位置处达到位移最大值,并在峰值位移处向两侧减小,但实测、模拟结果在最大位移处有一定差异,实测结果为 -0.510 mm ,模拟结果为 -0.423 mm ,误差仅为 0.087 mm 。这主要与施工过程中隧道结构除受到临时支撑荷载用外,还会受到堆载、车辆等其余因素的综合影响,导致实测结果比模拟结果存在差异。但是数值模拟结果与实测数据结果整体偏差不大,且二者变化趋势一致,表明所建立

的模型较为合理。P34、P35和P38工况下的隧道最大附加变形、弯矩与隧道外壁附加荷载校核计算结果如表4所列。3个工况下的轨道交通结构附加变形均远小于变形控制要求 $10\text{ mm}^{[15]}$,引起的地铁隧道外壁附加荷载均小于 $20\text{ kPa}^{[16]}$,满足地铁保护要求。

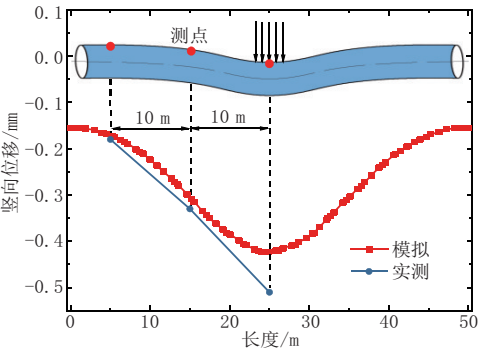


图5 P35工况实测-模拟对比

表4 计算结果

工况	附加变形/mm	附加弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	外壁附加荷载/ kPa
P34	0.470	3.41	1.40
P35	0.423	2.27	1.30
P38	0.496	4.04	1.50

3 下行运营期地铁隧道变形受力分析

3.1 支撑架设位置分析

在上述建立的模型基础上,改变混凝土盖梁临时支撑作用位置,得到不同位置临时支撑作用下P35混凝土盖梁位置处的隧道位移响应,左、右线隧道最大竖向位移曲线如图6所示。由图6可知:对于左线隧道,由于荷载没有作用于隧道正上方,因此随荷载作用距离 x 增大,隧道的最大竖向位移逐渐减小,最终趋近于0。主要原因在于荷载作用距离 x 增大,由于地面堆载引起的隧道周围土体的附加应力减小,从而使得既有隧道变形相应减小,这与文献[17]中的结论相似。对于右线隧道,在荷载直接作用区内(混凝土盖梁临时支撑作用面与隧道投影面相交),在右线隧道轴线左侧范围内时,隧道的最大竖向随 x 增大逐渐减小, x 位于右线隧道轴线右侧范围内时,隧道的最大竖向位移逐渐增大,即当荷载作用于隧道中心线上时,隧道取得相对较小的竖向位移,为 0.34 mm ,当荷载处于荷载直接作用区外,最大竖向位移变化规律同左线一致,随距离 x 增大呈逐渐减小的趋势。

值得注意的是,当荷载作用于右线隧道正上方时,其最大竖向位移相对较小。其主要原因为:随着临时支撑荷载作用位置的变化,隧道外壁附加荷载

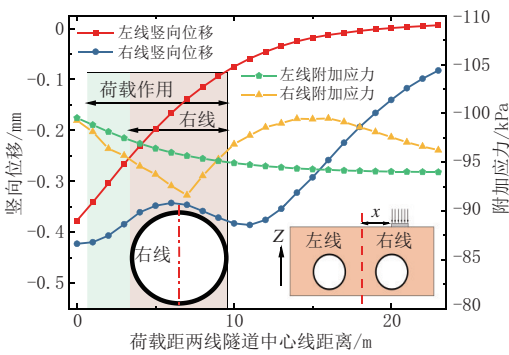


图6 隧道最大竖向位移

分布和大小发生变化。如图6所示,当荷载作用距离 x 在0~6 m范围内时,隧道外壁附加荷载逐渐减小,随之最大竖向位移也减小;当荷载作用距离 x 在7~13 m范围内时,外壁附加荷载逐渐增大,最大竖向位移同步增大。上述结果表明在不同荷载作用位置处,在隧道外壁上产生的附加荷载分布及大小存在差异,进而导致隧道结构变形和受力发生变化。

取距左、右线隧道中心线0、3、6、9、12、15、18、21 m荷载作用下的右线隧道拱顶沉降曲线如图7所示。由图7可知:在不同距离荷载作用下,隧道沿纵向的拱顶竖向位移均呈中间大两侧小的“鼓腹形”变化模式,荷载影响范围为 $5D$ 。此外,与图6中右线隧道最大竖向位移曲线变化规律一致,荷载直接作用区内的隧道竖向位移大于荷载直接作用区外的工况,在荷载直接作用区内,当荷载作用于隧道中心线正上方时,沿隧道纵向的拱顶竖向位移取得相对较小值,当荷载作用于右线隧道轴线两侧时,拱顶竖向位移逐渐增大。因此,在布设临时支撑时,应避免荷载作用于荷载直接作用区内,且尽可能增大混凝土盖梁临时支撑与隧道的距离,从而降低隧道的竖向位移。

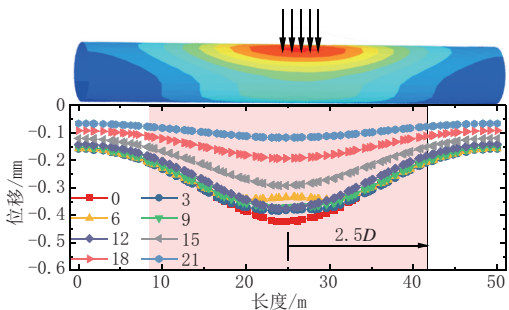


图7 右线隧道拱顶纵向竖向位移

在混凝土盖梁临时支撑作用下,左、右线隧道的变形会受到两线隧道相互作用的影响。取距左、右线隧道中心线0、5、9 m 3个荷载工况,分别位于右线隧道轴线左侧,上方和右侧,其中0、9 m处荷载关于隧道轴线对称,得到如图8所示的右线隧道断面竖

向位移。由图8可以发现,隧道断面的竖向位移在拱顶处取得最大值,两侧拱腰处位移呈对称分布,拱底处竖向位移最小。此外,位于轴线左侧荷载工况下的隧道断面竖向位移整体大于位于轴线右侧,且差异主要分布于 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 和 $270^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内,即隧道轴线左侧管片。造成这种差异的主要原因是,当荷载作用于右线隧道轴线右侧时,右线隧道有向左侧位移的趋势,但由于左侧存在隧道结构,会对右线隧道及土层产生约束作用,从而降低右线隧道的竖向位移。因此,在两线盾构隧道上方布设临时支撑时,可充分利用两线隧道间的约束作用,将临时支撑布设在左、右线隧道两侧,从而降低隧道的竖向位移,保障地铁运营和隧道结构的安全。

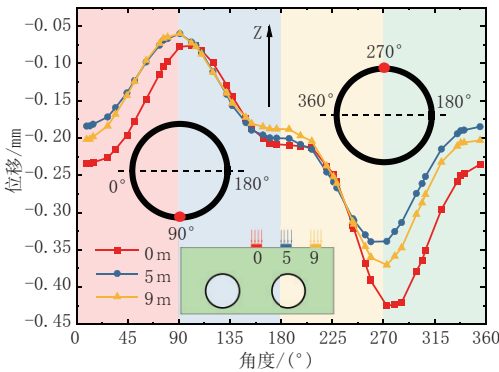


图8 隧道竖向位移环向分布

不同荷载作用位置下的右线隧道拱顶和拱腰弯矩变化曲线图9(a)所示。从图中可以明显发现:在荷载直接作用区内,拱腰处弯矩值基本保持在 $60.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ 不变,而拱顶处弯矩呈现出由 $51.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 减小至 $50.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ 并趋于稳定的趋势,表明当荷载位于两线隧道之间时,拱顶弯矩有所增大。此外当荷载处于荷载直接作用区外时,拱顶和拱腰处弯矩同步减小并趋于稳定,拱顶和拱腰最终分别下降约 $5.0\text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $3.5\text{ kN}\cdot\text{m}$,分别下降10%和5.8%。由图9(b)中距左、右线隧道中心线0 m和23 m两个荷载工况作用下的隧道截面弯矩可知:荷载作用位置对隧道受力模式的影响较小,不同位置荷载作用下的隧道截面均呈拱顶和拱底受拉,两侧拱腰受压的受力模式,且差异集中在拱顶位置附近,最大弯矩差异仅为 $6.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

综合上述分析,进行上跨运营期地铁盾构隧道的高架盖梁施工时,确定合适的临时支撑架设位置对于保障盾构管片的受力变形处于安全范围内至关重要。从变形和受力角度出发,应避免临时支撑作用面与盾构投影面相交,且应距离隧道中心线尽量

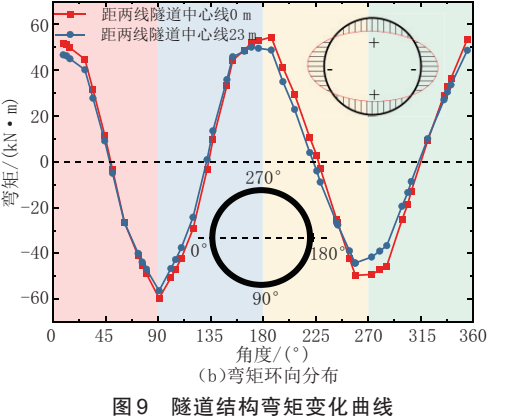
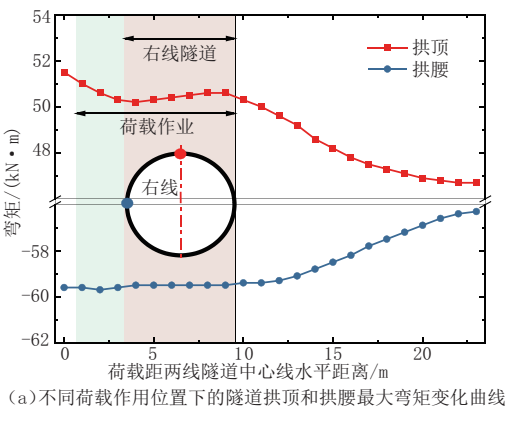


图9 隧道结构弯矩变化曲线

远。此外,当下行隧道为左、右两线时,可利用左、右线隧道的相互约束作用,将临时支撑布置在两线隧道外侧,从而减小盾构隧道在临时支撑附加荷载下的受力变形。

3.2 隧道埋深分析

混凝土盖梁临时支撑会对下行运营期地铁盾构隧道的受力变形产生影响,此外隧道埋深也是影响其受力变形的重要因素。因此,本节基于上述建立的三维有限元模型,分析了盖梁临时支撑对不同埋深隧道的受力变形影响,得到不同埋深下的右线隧道竖向位移包络如图10所示。由图10可知:随隧道埋深增加,盖梁临时支撑荷载作用下的隧道竖向位移逐渐减小,隧道埋深1.0D时,最大竖向位移为1.024 mm;埋深为3.5D时,最大竖向位移仅为0.088 mm,减小91.4%,即其他条件不变的情况下,埋深越大,土拱效应越明显,盖梁临时支撑对既有盾构隧道的影响越小。此外,当隧道埋深小于2倍隧道直径时^[18],隧道变形对盖梁临时支撑荷载作用位置比较敏感,当临时支撑荷载位于荷载直接作用区内时,其竖向位移大于荷载直接作用区外的工况;当隧道埋深超过2倍隧道直径时,不同位置盖梁临时支撑荷载作用下的隧道竖向位移包络趋于平缓,即当隧道埋深较大时,混凝土盖梁临时支撑布置位置对

隧道变形影响较小。

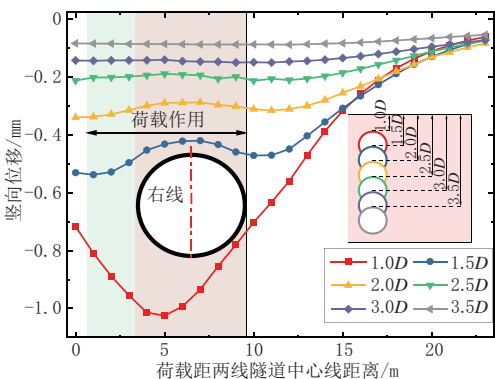


图10 不同埋深下隧道竖向位移包络线

不同埋深的隧道在不同位置的盖梁临时支撑作用下的受力差异显著。如图11所示,不同位置临时支撑作用下的不同埋深的隧道弯矩标准差环向分布所示,由图11可以明显发现:当埋深为1.0D时,隧道环向弯矩标准差分布最大,表明在该埋深下,隧道受临时支撑布置位置的影响较大,而随着埋深增加,这种受临时支撑位置的影响逐步减弱。此外,值得注意的是,在不同位置的临时支撑荷载作用下,隧道环向180°~360°范围内(拱腰-拱顶)管片结构弯矩波动较大,而0°~180°(拱腰-拱底)范围内管片结构弯矩波动较小。

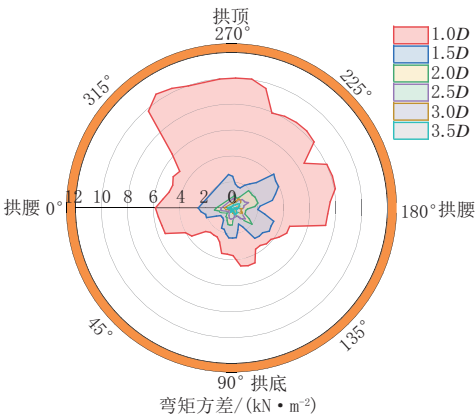


图11 不同荷载作用位置下隧道环向弯矩标准差

综合上述分析可知:当隧道埋深较浅时,应避免将混凝土盖梁临时支撑布置于隧道结构上方,以保证管片受力变形处于安全限值内;而当隧道埋深较大时,临时支撑作用位移对于管片结构的影响较小,在存在场地、桩基位置等条件限制的情况下,将临时支撑设置在隧道结构上方仍能保证结构的受力变形安全。此外,隧道拱顶受力对临时支撑架设位置较为敏感,因此,在盖梁临时支撑施工时,需加强拱顶范围内管片的监测。

3.3 临时支撑荷载大小和范围分析

临时支撑荷载的大小和作用范围对下方运营期地铁隧道的影响较大。因此,本节基于上述三维数值模型,分析了临时支撑荷载大小对隧道结构的影响。此外,在保证临时支撑合力恒定条件下,改变荷载作用范围,对荷载作用范围进行了分析,结果如图 12 所示。由图可知,随着荷载值的增大,隧道拱顶的竖向位移逐步增大。当临时支撑荷载为 50 kPa 时,隧道拱顶最大竖向位移为-0.11 mm;当荷载增至 350 kPa 时,拱顶最大竖向位移增至-0.70 mm,且拱顶最大竖向位移与荷载之间呈线性关系,二者的比值为 7。

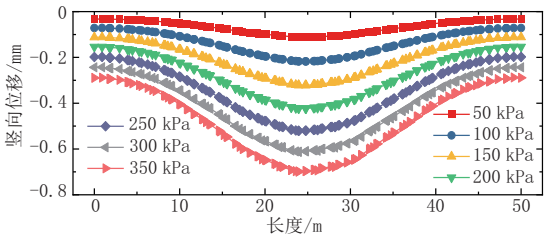


图 12 不同荷载作用下隧道拱顶竖向位移

不同荷载作用下的隧道拱顶最大竖向位移曲线与隧道外壁最大附加荷载变化曲线如图 13 所示。从图中可以明显看出,随着荷载增大,隧道拱顶最大竖向位移和外壁最大附加荷载变化呈线性增大变化趋势,二者具有显著的相关性。此外,当临时支撑荷载为 350 kPa 时,隧道外壁最大附加荷载为 10.50 kPa,低于规范要求的 20 kPa 附加荷载限制。然而,与 50 kPa 荷载作用时相比,附加荷载增大 10 倍,对隧道结构的扰动较为显著。对比不同荷载作用范围下的隧道最大竖向位移变化曲线和隧道外壁变化曲线可以发现,当隧道作用范围为 3S 时,在 350 kPa 荷载作用下的最大附加位移为-0.53 mm,隧道壁附加荷载为 7.01 kPa,相比于作用范围为 1S 分别降低 24% 和 33%。表明在临时支撑合力一定的情况下,增大荷载作用范围,可以降低隧道的最大竖向位移和外壁附加荷载,进而减少对隧道结构受力和变形的扰动,保证运营地铁隧道的安全。

4 结 语

采用数值模拟与现场实测相结合的方法分析了高架桥混凝土盖梁临时支撑作用下的下行运营期地铁隧道结构的受力变形规律,得到主要结论如下。

(1)理论和实测分析结果表明:有限元模拟结果与实测数据基本吻合,最大误差仅为 0.087 mm;三个

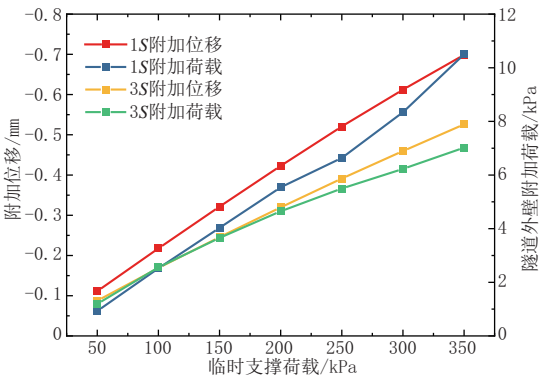


图 13 不同荷载作用下隧道外壁附加土压力

最不利临时支撑架设工况下的隧道附加变形和外壁附加荷载均满足控制要求,验证了临时支撑设计方案的合理性。

(2)隧道管片的受力变形随混凝土盖梁临时支撑作用距离和隧道埋深而逐步减小,荷载作用距离 x 由 0 m 增加至 23 m 时,最大竖向位移由 0.4 mm 减小至 0 mm,拱顶、拱腰处弯矩分别下降 10% 和 5.8%;隧道埋深由 $1.0D$ 增加至 $3.5D$ 时,最大竖向位移减小 91.4%,环向附加最大弯矩由 26 kN·m 减小至 1.5 kN·m。

(3)当隧道埋深小于 $2.0D$,应避免临时支撑作用在盾构隧道正上方,且应距离隧道中心线尽量远;当隧道埋深大于 $2.0D$,在场地、桩基位置等限制的情况下,可将临时支撑设置在隧道结构上方。隧道拱顶受力变形较为敏感,需加强拱顶范围内管片的监测。

(4)临时支撑荷载的大小和作用范围对下方运营期地铁隧道的影响较大。通过适当增加临时支撑的作用范围,可以有效减小隧道拱顶的竖向位移和隧道外壁的附加荷载,从而降低地表荷载对隧道结构的扰动。

参考文献:

[1] 闫常山.某高架桥桩基施工对邻近既有地铁隧道的影响分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
[2] 荣露,刘金波.高架桥上跨施工对邻近运营地铁隧道变形的影响[J]. 建筑施工,2020,42(9):1805-1807.
[3] 王涛,李浩,徐日庆.上方大面积加(卸)载引起盾构隧道的变形分析[J]. 现代交通技术,2008(3):29-31;57.
[4] 秦浩,师刚.地面堆载对沉管隧道暗埋段的影响研究[J]. 低温建筑技术,2013,35(10):111-113.
[5] 范焄焄,郭晓航,邓指军,等.正上方加卸载对盾构隧道变形的影响分析[J]. 施工技术,2014,43(7):107-109.
[6] 邵华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
[7] 曾华蔚.软土地区大面积堆载致盾构隧道变形及其整治技术分析[J]. 绿色建筑,2020,12(4):102-105.