

矩形顶管下穿对既有箱涵及地面的影响与分析

周健民

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 某工程的地下人行通道,其截面形式为矩形,拟采用顶管法施工。该通道斜向下穿现状污水箱涵、污水管、雨水管。通过分析现状箱涵、管道与人行通道的位置关系、现场环境,并结合地质条件、施工条件,探讨研究合适的方案。采用数值仿真模拟计算以及理论分析,提出具体加固保护方案,以保障矩形通道在顶进施工期间,箱涵、地面沉降在正常使用允许范围以内。推荐选定的加固方案既可以保护现状箱涵、控制地面沉降在允许范围之内,又能做到工程费用节省,经济合理。

关键词: 矩形顶管;地下通道;地面沉降;注浆加固;数值模拟

中图分类号: U449.82

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0318-06

Impact and Analysis of Rectangular Pipe Jacking Underpassing on Existing Box Culverts and Ground

ZHOU Jianmin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The pipe jacking method is proposed to construct an underground pedestrian channel of a project due to its rectangular cross-sectional form. The channel runs diagonally downward through the existing sewage box culvert, sewage pipe and rainwater pipe. A suitable scheme is discussed and studied by analyzing the positional relationship among the existing box culvert, pipeline and pedestrian passage, as well as the on-site environment, and combined with the geological and construction conditions. By employing the numerical simulation calculation and theoretical analysis, the detailed reinforcement protection scheme is put forward to ensure that during the jacking construction of the rectangular channel, the settlement of the box culvert and the ground remains within the allowable range for normal use. The recommended and selected reinforcement scheme can not only protect the existing box culvert and control the ground settlement within the allowable range, but also save the engineering cost, and be economical and reasonable.

Keywords: rectangle pipe jacking; underground channel; ground settlement; grouting reinforcement; numerical simulation

0 引言

顶管施工作为一种高效的非开挖施工方式,广泛应用于管道穿越重要、复杂的现状管线、构筑物或各等级道路^[1]。虽然顶管施工相对于开挖敷设管道、箱涵,可以较好地减小对周围环境的干扰,减少对道路交通的通行压力,但在顶进的过程中,由于顶推力及同步注浆改变了土体前方的应力状态,地面往往会呈现一定量的隆起^[2]。顶管顶进穿越后,由于土体开挖等原因引起的地层损失,地面会产生沉降^[3-4]。当沉降累计到一定量后,会影响其邻近的管道、构筑物或道路的正常使用寿命,甚至产生破坏。因此

非常有必要采取针对性的措施减小其对周边环境的影响。

顶管下穿顶进施工对其上方箱涵、管道的影响表现在除了使其产生一定的沉降和变形外,还会在其结构中产生附加内力。对于箱涵而言,箱涵的原配筋需要满足因顶管施工而引起的截面内力增加和箱涵的正常使用要求;对于道路的影响则主要表征为路面的沉降或者隆起。

关于道路的路面沉降,其沉降值应满足相关的标准或规范要求。上海市《道路路基设计规范》^[5]第3.2.2条规定,城市主干路的容许工后总沉降值不大于10 cm。对于顶管顶进穿越道路时,道路地表最大的沉降允许值,在上述规范及国内其它相关的规范标准中尚未给出规定。借鉴盾构或隧道穿越道路的一系列研究成果,根据参考文献^[6-7],国内大多数

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 周健民(1983—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。

工程的建议是最大地表沉降控制标准应结合公路等级确定,见表 1。

表 1 隧道穿越道路地表沉降建议控制值^[6]

公路等级	重要的高速公路城市主干道	低等级道路
地表沉降/mm	20~40	40~55

虽然低等级道路路面的沉降控制值稍偏大,在短时间内会影响行车的舒适度,但不影响行车安全^[8]。

基于顶管穿越带来的环境影响,设计方案非常有必要科学地结合工程实际情况进行分析,并有针对性地给出有效控制措施。本文将以上海市某下穿既有矩形箱涵的人行通道工程为背景,结合项目实际情况和类似研究,利用 MIDAS GTS 软件三维数值建模仿真模拟^[9],分析人行通道顶进施工时,土体不同加固范围对相邻环境的影响,以期为类似项目设计或施工提供一定的理论参考和建议。

1 概 述

1.1 工程概况

某工程拟新建一处下穿人行通道,该通道为南北走向,与现状道路斜向交叉,并在道路最北侧车道位置依次斜穿越现状 $\phi 300$ 污水管(交角 65°)、 $\phi 1000$ 雨水管(交角 65°)、污水双孔箱涵(交角 77°)。平面位置关系见图 1。

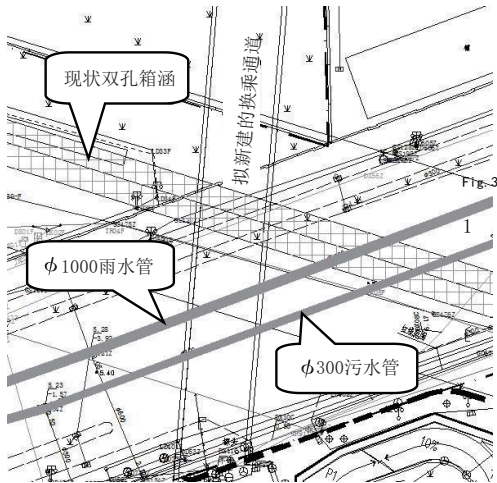


图 1 地下人行通道的平面布置图

污水双孔箱涵为矩形箱涵,钢筋混凝土结构,外轮廓尺寸 $6.00\text{ m}\times 3.20\text{ m}$,单孔内净尺寸 $2.40\text{ m}\times 2.40\text{ m}$,壁厚 400 mm ,见图 2。由于新建人行通道的拟建位置环境较为复杂,拟采用矩形顶管顶进穿越施工。

人行通道外轮廓外包尺寸为 $9.50\text{ m}\times 4.88\text{ m}$ 。其横断面的尺寸见图 3。

根据现状箱涵的竣工图资料和总体专业布置地

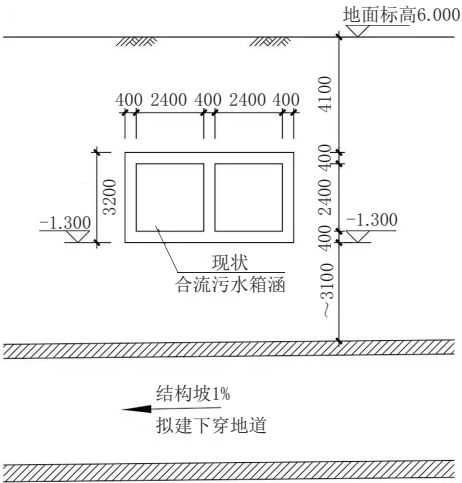


图 2 箱涵与拟建地下通道的竖向关系图(单位:mm)

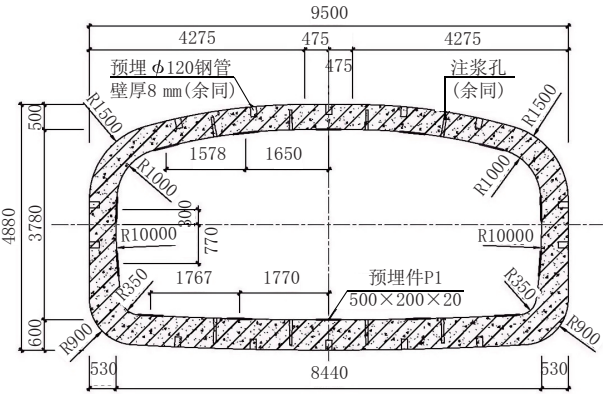


图 3 拟建地下通道的横断面图(单位:mm)

下通道的需求,其竖向与箱涵底板底的净间距约 3.1 m 。

1.2 地勘情况

地勘报告揭示,工程场地理深范围内土层由第四系全新统至中更新统沉积地层组成。按其成因类型、土层结构及其性状特征可划分层位,地层基本呈水平层状分布。场地土层分布规律和变化见图 4。土层力学参数见表 2。

2 污水箱涵的保护方案

2.1 顶管施工对箱涵影响的定性分析

当顶管施工穿越时,对其周边土体的应力分布有显著的影响。按经典的力学理论,其相应的影响范围延伸至 3 倍管道外径范围^[10]。

本工程下穿既有合流双孔箱涵的人行通道横断面尺寸较大,与既有箱涵的净距离小于一倍的通道外径,处于应力显著的影响区域。顶管施工引起的周边土应力变化会影响既有箱涵的基础稳定,进而引起箱涵的沉降。如果既有箱涵腐蚀严重,沉降带来的附加内力有可能造成箱涵的破坏。

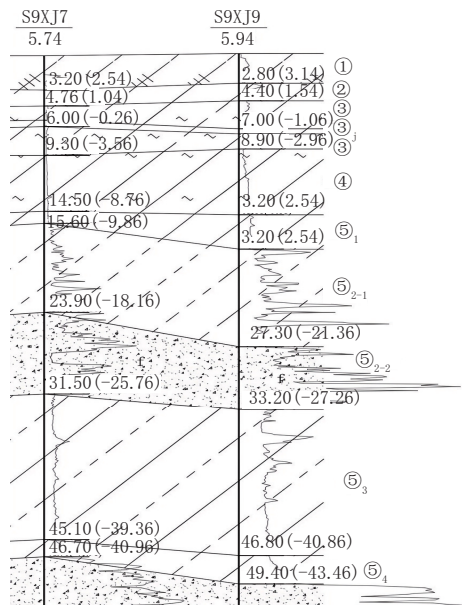


图 4 地勘钻孔图

表 2 土层力学参数

层号	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	固快指标		静探比 贯入阻力 P_s 值/MPa	压缩 模量 E_s /MPa	地基承载 力特征值 f_{ak} /kPa
		C/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$			
②	18.2	23	16.0	0.85	4.07	80
③	17.5	15	13.5	0.40	2.94	55
③ _j	18.8	10	24.0	1.36	11.28	80
④	16.8	15	9.5	0.53	2.45	55
⑤ ₁	17.6	18	12.0	0.77	2.98	65
⑤ ₂₋₁	18.2	9	24.5	2.93	7.43	100
⑤ ₂₋₂	18.2	4	30.5	5.90	11.26	140
⑤ ₃	17.9	24	16.5	1.93	5.12	110

为尽量减小顶管施工过程中土体的扰动,保护既有箱涵,确保其在人行通道下穿顶进过程中正常使用,需采用一定的工程措施,以达到保护现状箱涵和管线的目的^[11]。

2.2 保护方案

箱涵的保护可从两个主要的方面考虑,即加强箱涵本体结构,或者是加固顶管影响范围内的周围环境。由于本工程的污水箱涵在人行通道下穿的过程中须保持通水运行,无法实现箱涵内衬加固;箱涵的底板埋深超过 7 m 且位于道路下方,开挖暴露加固箱涵外侧结构同样困难。因此保护箱涵应从对周围土体采取措施出发,制定保护方案。

为减小通道顶进穿越时周围土体的变形和箱涵的位移及变位,可对通道与箱涵交叉点周围的土体进行加固冻结、或布置隔离桩等措施。

冻结技术难度大,而且冻结土体会带来土体隆起;隔离桩的施工需要大型机械,本工程所在位置为现状道路,对交通影响大,而且道路下方管线众多,

隔离桩的施工影响大;如物探资料稍有偏差,会直接破坏现状管道。综合比较,加固土体更适合实际情况。本工程拟采用旋喷加固土体为主、注浆作为补充的土体加固方案。

如按经典的力学理论,直接加固箱涵 3 倍尺寸范围的土体,确实可以起到保护箱涵和路面的作用,但由于箱涵的尺寸大,3 倍加固范围的工程量多,会造成不必要的浪费。因此本文拟定土体不同加固范围的方案,通过有限元数值模拟计算并结合力学理论,分析各加固方案对现状箱涵和路面沉降的影响,力求做到既满足加固效果,又能使加固工程量相对较为经济合理。

沿着拟建人行通道的顶进方向,箱涵每侧均加固 1 倍、2 倍、3 倍箱涵宽度的土体和完全不加固土体(箱涵的宽度为 B,以下同)。通过三维数值仿真,模拟上述不同加固方案;根据仿真结果对现状箱涵的位移和内力变化、地面沉降进行分析,确定适宜的加固范围。

3 计算及分析

3.1 基本假定

本文采用 MIDAS GTS 对上述各加固方案进行三维数值仿真模拟。为更好地模拟人行通道顶进的影响,同时方便计算,需要对模型中的一些参数作出相应的假定,并对土层和箱涵、管道适当模型简化,以达到高效且有效的模拟结果^[8]。

(1)土体采用实体单元,并将土体视为各向同性、均质的理想线弹塑性体,采用 Mohr-Coulomb 本构模型。

(2)现状污水箱涵、污水管、雨水管、拟建的人行通道均视为各向同性的弹性材料。

(3)忽略管道接头和箱涵可能存在的变形缝对受力分析的影响。

(4)不同介质接触面的位移和变形连续协调。

3.2 三维数值模型的建立

结合污水箱涵、人行通道的尺寸和现状污水管、雨水管的位置,计算模型充分考虑尺寸效应。该模型的 X/Y/Z 向尺寸分别为 70、60、30 m,其中 X 向为拟建人行通道的顶进方向,Y 向为现状污水箱涵的走向,Z 向为地层的深度。

模型的位移边界条件设置:Z 方向,Z=0 即地层表面,自由表面,允许自由沉降;Z=-30 为土体底部,约束其竖向位移;其余四个侧面,均约束其相应法向

方向的变形。

根据 2.2 节的加固方案,按土体加固范围的不同共建立了 4 个不同的计算模型。分别为:①完全不加固土体的模型;②加固 1 倍箱涵宽度的模型;③加固 2 倍箱涵宽度的模型;④加固 3 倍箱涵宽度的模型。

土体和注浆单元类型选用 3D 实体单元,污水箱涵、人行通道和管道均采用 2D 板单元。各土层详细参数按地勘报告、《混凝土结构设计规范》^[12]和上海市《地基基础设计标准》^[13]选取。

4 计算结果及分析

4.1 现状箱涵的位移分析

人行通道在下穿顶进穿越现状箱涵的过程中,对于周围土体的扰动势必会引起土体的应力重分布。当某点的土体强度不能抵抗住变化的应力时,土体相应产生变形,进而带动箱涵产生位移和变形。

根据加固范围的不同,由图 5~图 8 可以看出,土体完全不加固时箱涵的 Z 向位移即沉降达到了约 38 mm;当采用 3 倍宽度加固范围时,箱涵最大的竖向沉降为 13.7 mm,约为未加固土体时的 1/3。

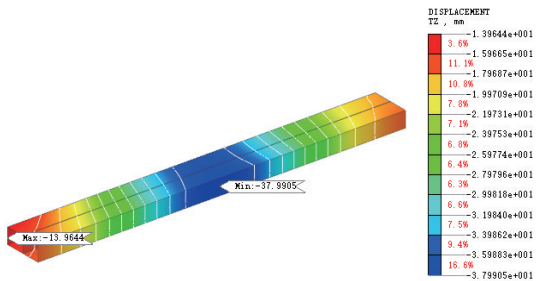


图 5 完全不加固土体时箱涵的竖向位移

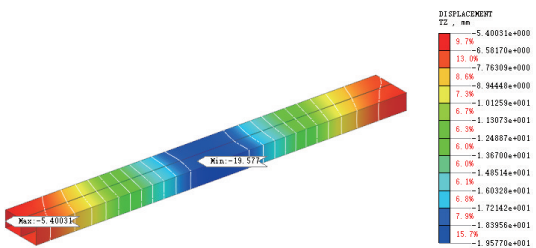


图 6 加固 1 倍箱涵宽度土体时箱涵的竖向位移

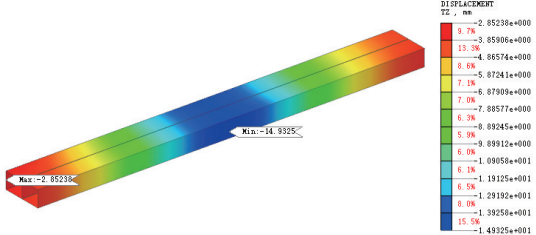


图 7 加固 2 倍箱涵宽度土体时箱涵的竖向位移

将上述不同加固范围工况下的箱涵竖向位移与土体加固范围拟合为变化关系曲线,见图 9。从图 9

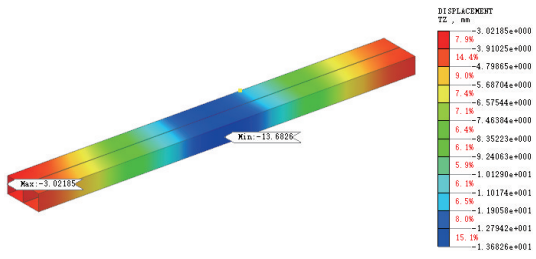


图 8 加固 3 倍箱涵宽度土体时箱涵的竖向位移

中的曲线可以看出,随着土体加固范围的扩大,箱涵的位移减小,其减小的曲率由陡变缓,在 2 倍箱涵宽度加固范围内的效果作用明显。

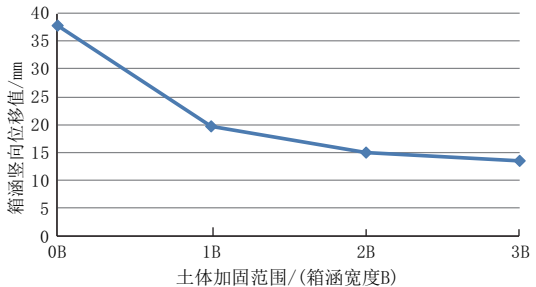


图 9 箱涵竖向位移变化曲线

箱涵 X 向、Y 向的水平位移仅为几毫米,影响甚小,本文将不作探讨。

4.2 现状箱涵的内力分析

在正常使用状况下,采用理正工具箱计算本箱涵在外水土作用下的内力,其最大值为 $M_{max}=72 \text{ kN}\cdot\text{m}$,该弯矩是控制箱涵配筋的主要内力。

从图 10~图 13 及图 14 的箱涵最大弯矩内力与土体加固范围的关系曲线,可以看出在完全不加固土体或是加固土体不足时,由于箱涵外围的外土压力和箱涵沉降产生的次生内力相互叠加,最大弯矩较正常使用状态的最大值还要高出 64%,此时箱涵将会弯曲,引起横断面破裂^[14]。

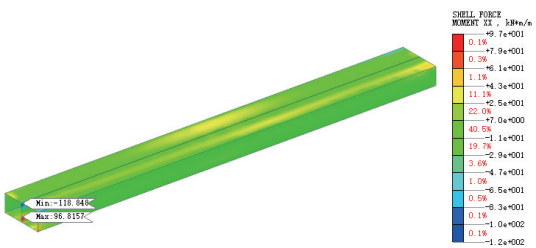


图 10 完全不加固土体时箱涵的弯矩值

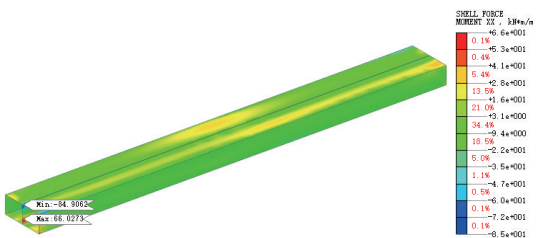


图 11 加固 1 倍箱涵宽度土体时箱涵的弯矩值

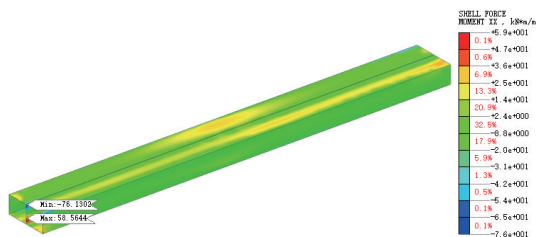


图 12 加固 2 倍箱涵宽度土体时箱涵的弯矩最大值

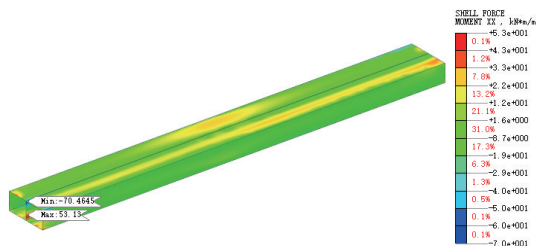


图 13 加固 3 倍箱涵宽度土体时箱涵的弯矩最大值

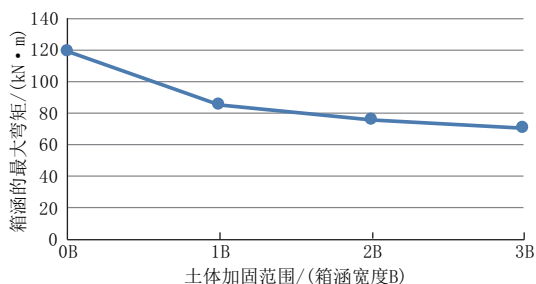


图 14 箱涵弯矩最大值变化曲线

随着加固范围的扩大,箱涵周围土体性质的改善和位移的减小,箱涵的最大弯矩逐渐减小,当加固土体范围扩大至 2 倍范围时,箱涵的最大弯矩比正常使用时略高出 1.5%;当扩大至 3 倍加固范围时,最大弯矩为 $M_{\max}=70.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$,较正常使用状态时还略低,这主要是注浆加固极大地改善箱涵周边部分土体的性质,提高其粘聚力和内摩擦角,减小了作用在箱涵上的外土压力。

4.3 地表沉降分析

从图 15~图 19 可以看出四个不同模型计算出的地表沉降,其最大值出现在人行通道顶进的轴线上方,且其值随着土体加固范围的扩大,地表沉降逐渐减小^[15]。

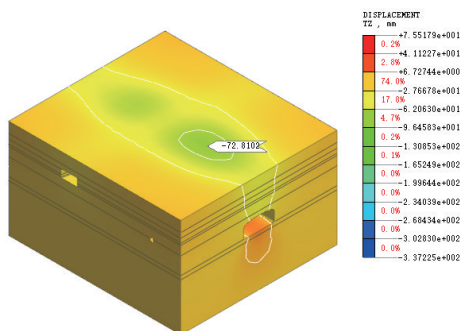


图 15 完全不加固土体时的地表沉降

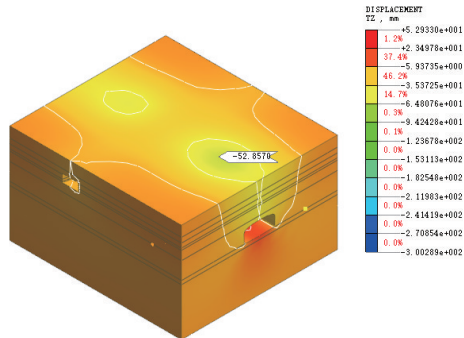


图 16 加固 1 倍箱涵宽度土体时的地表沉降

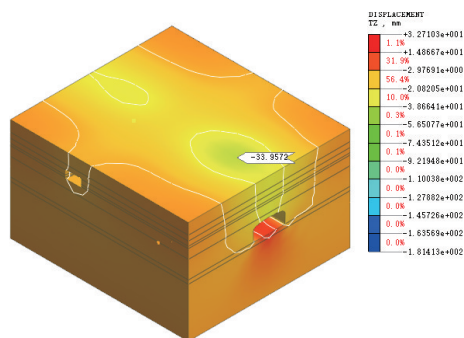


图 17 加固 2 倍箱涵宽度土体时的地表沉降

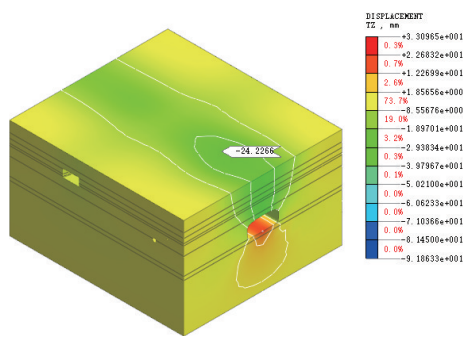


图 18 加固 3 倍箱涵宽度土体时的地表沉降

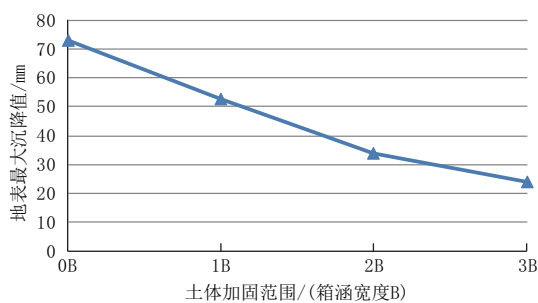


图 19 地表沉降变化曲线

当土体完全不加固时地表最大沉降值达到 72 mm,虽然未超过上海市《道路路基设计规范》^[5]第 3.2.2 条关于道路工后沉降的规定,但沉降偏大对道路使用的行车舒适度有非常大的影响。当加固土体扩大到 2 倍的箱涵宽度时,道路沉降的最大值已经降低到约 34 mm,继续扩大加固范围至 3 倍的箱涵宽度时,其道路地表的最大沉降可降至约 24 mm,其值仅为完全未加固土体的 1/3;因此扩大加固土体范围对于控制地面沉降的效果非常显著。

5 结论与建议

基于上述 MIDAS/GTS 有限元软件建立的矩形人行通道顶进下穿既有污水箱涵和道路的三维数值模型,本文重点分析了土体不同加固范围时现状箱涵的位移、内力和地表沉降变化。结合数值仿真分析结果可得出以下结论:

(1)箱涵的竖向位移、控制配筋的最大弯矩均随着土体的加固范围扩大,其值呈减小趋势。其中箱涵最大弯矩在2倍箱涵宽度的土体加固范围时,接近未施工下穿通道、正常使用状态时外水土工况的最大控制弯矩。

(2)道路的地表沉降同样随着土体加固范围的扩大而减小。当加固范围为2倍箱涵宽度时,其值约为35 mm,完全满足表1中对于道路地表沉降的控制要求。

(3)无论是箱涵的竖向位移还是地表沉降,当土体加固范围超过2倍箱涵宽度时,其“位移值-土体加固范围”的关系曲线都表现为斜率减小^[16],这表征土体加固范围超过2倍箱涵宽度时,加固的效率相对降低。

综上所述,考虑到箱涵的正常使用和道路路面沉降控制要求,同时为了减少工程费用,对于顶管顶进下穿箱涵和市政道路时,建议对交叉节点土体进行加固,其加固范围以2倍的箱涵宽度为宜,可以做到既确保工程安全又经济合理。

参考文献:

- [1] 张治成,林思,王金昌,等.矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):249-254.
- [2] 钟旭浩,张徐杰.顶管对道路沉降影响可视化模型研究[J].城市道桥与防洪,2024(7):271-275.
- [3] 韩仲慧,王梅.浅埋矩形顶管施工对临近管线与地表的影响研究[J].都市轨道交通,2024,37(1):135-142.
- [4] 丰土根,周坤,张箭,等.大截面矩形顶管施工对既有管线影响研究[J].工程力学,2024,41(5):8-19.
- [5] DG/TJ08-2237—2017,道路路基设计规范[S].
- [6] 陈星欣,白冰.隧道下穿既有结构物引起的地表沉降控制标准研究[J].工程地质学报,2011,19(1):103-108.
- [7] 何知思,杨新安.浅埋黄土隧道下穿道路施工沉降及控制研究[J].华东交通大学学报,2016,33(2):35-40.
- [8] 王谭,安关峰.大直径顶管近距离侧穿高架桥桩的数值分析[J].特种结构,2018,35(1):34-39.
- [9] 刘春波.顶管施工地表沉降数值模拟分析[J].城市道桥与防洪,2022(10):166-169.
- [10] 朱黄鼎,田效军,安春秀,等.软土地区大直径电力顶管对周边建筑物环境的影响研究[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(增刊1):332-336.
- [11] 吴垠龙,刘维,贾鹏蛟,等.矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(6):1968-1978.
- [12] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [13] DGJ 08-11—2018,地基基础设计标准[S].
- [14] 冯栋梁.矩形顶管下穿既有箱涵的险情预警方法探析[J].城市道桥与防洪,2019(12):174-177.
- [15] 陈鑫.大口径平行顶管施工对高速路面沉降的理论与实测分析[J].城市道桥与防洪,2021(7):188-192.
- [16] 熊正元,杨春山.上覆高速桥梁对下穿顶管施工的力学响应[J].城市道桥与防洪,2018(10):174-177.