

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.05.033

平行顶管施工及公路拓宽工程的相互影响研究

沈承¹, 姬永红²

[1.嘉兴科技城投资发展集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:在地下综合管廊的建设工程中,顶管施工方法目前得到了越来越广泛的应用。针对某工程中三条地下综合管廊下穿公路的实际工程案例,采用三维数值方法模拟其平行顶管施工过程,系统地分析不同的管廊顶进顺序条件下上部公路及下部埋设污水管道变形量的变化规律,讨论得到后续公路拓宽工程完成后已建成地下管廊及污水管道沉降量,并较为全面地研究不同土体加固范围和深度对地下管廊顶管施工及道路拓宽工程中结构物变形量的降低程度。结果表明,不同顶管顺序会影响已建成公路的变形量,最优顺序应率先进行两侧顶管施工;在公路拟拓宽区域进行土体加固可以降低顶管施工中地下结构物的沉降量,但在加固深度较浅时无法在公路拓宽工程中保证地下结构物的稳定性。

关键词:城市地下综合管廊;顶管施工;数值分析;变形分析

中图分类号: TU99

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)05-0129-05

0 引言

随着我国城市化进程的不断深入,地下综合管廊逐渐成为城市输送物质资源的重要基础设施,而顶管施工作为一种非开挖施工技术越来越多地被应用于地下管廊的建设中^[1-5]。地下综合管廊的顶管施工建设不可避免地造成周围土体扰动,从而引起地面变形^[6-9]。当顶管施工区域下穿公路时,必定会导致路面及路基的变形,从而为公路的正常使用埋下安全隐患。诸多学者已经通过工程实测和数值分析等方法对该问题进行了较为充分地研究^[10-15]。

城市地下空间的限制使得近距离平行多线顶管在近年来得到了越来越多的应用。由于平行多线顶管施工中的不同管道需要进行顺序顶进,前后施工管道之间便会相互影响,相较先建顶管,后建顶管造成的最大地面变形及变形槽宽度均要更大,从而引起的公路路面变形要大于单顶管,会对周边环境产生更大的危害^[16,17]。迄今为止,相关的成果数量十分有限,且主要研究多集中于对现场实测资料的理论分析与总结,采用数值模拟方法对工程现象进行机理性分析的研究成果相对较少^[18,19]。

随着我国公路事业地稳步前进,许多道路已经无法满足现有需求,需要进一步改建拓宽。当改建或拓宽道路位于已建地下管廊上方时,则需要充分考

虑改建和拓宽工程对于已建管廊安全性的影响,但是国内关于该方面的研究报道十分罕见^[20-21]。

某顶管施工项目为某地地下综合管廊项目二期工程,3条平行施工管线下穿省道,且该省道有相应的拓宽计划。因此,本文结合该工程采用三维数值分析方法研究拟建平行三线综合管廊顶管施工过程对省道路面以及后续省道拓宽工程对已建成地下综合管廊的相互影响,研究成果可为类似工程提供参考依据。具体研究内容如下:

(1)建立三维数值模型模拟3条地下管廊平行顶管的施工过程,分析施工过程中不同管廊顶管顶进顺序对省道变形量的影响差异;

(2)基于已经建立的三维计算模型,评估省道拓宽后公路堆土和车行荷载对已建成地下管廊的变形量;

(3)分析在省道拓宽部分进行土体加固后,施工过程及省道拓宽工程对于道路路面及地下管廊的影响程度。

1 工程概况

拟建综合管廊为公用建筑,整体工程位于某科技城辖区,新建管廊全长约4.8 km。主要针对横穿省道的地下管廊施工部分进行研究。

拟建地下管廊工程从下方横向穿越了某已建成省道,管廊采用DN2000预应力钢筒混凝土顶管,外径为2.4 m,内径为2.0 m,且管廊下方存在DN1600污水管道,因此为避开下方污水管道,管廊顶进方向

收稿日期: 2020-12-08

作者简介: 沈承(1985—),男,博士,高级工程师,主要从事工程项目管理工作。

为斜向上。工作井处管廊中线的高程为 -5.063 m , 接收井处管廊中线的高程为 -1.947 m , 从接收井向工作井方向观察, 3 根管廊的标号分别标记为 P-1、P-2、P-3。该省道在地下管廊竣工后有相应的拓宽计划。

初步判断顶管施工过程对新 07 省道的影响类型主要为卸载上浮, 而省道拓宽施工对已建成地下管廊的影响类型主要为加载沉降。采用 ABAQUS 数值分析软件建立三维有限元模型针对位于省道及其正下方的整个施工区域进行计算评估。施工区域示意图如图 1 所示。

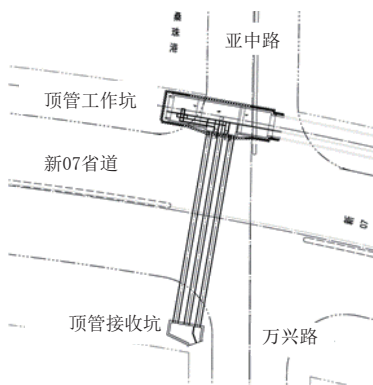


图 1 施工区域示意图

2 数值分析方法

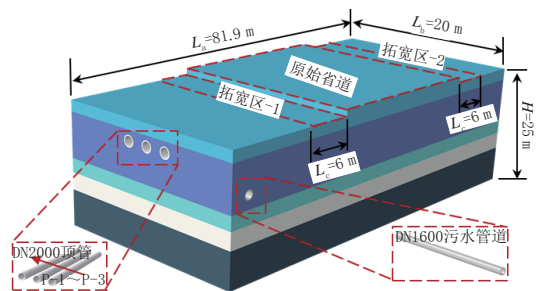
采用 ABAQUS 数值分析软件针对实际工程构建精细化模型并对施工过程进行详细分析。

2.1 数值模型

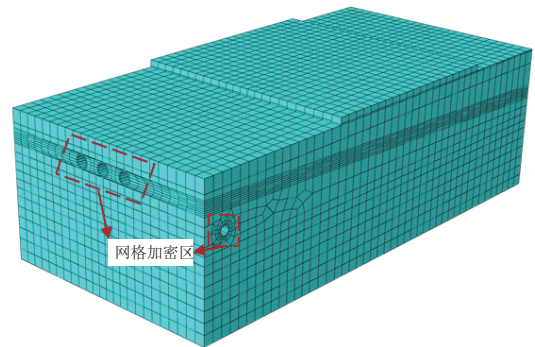
数值模型长度按顶管施工区的实际长度取值 $L_a = 81.9\text{ m}$; 经过大量试算后发现, 在数值模型宽度大于 20 m 之后继续增加宽度对计算结果的影响程度可以忽略, 因此模型宽度最终取值 $L_b = 20\text{ m}$; 由于综合管廊和污水管道的埋深相对有限, 同样通过试算后发现数值模型在达到一定的深度后对计算结果的影响相对较小, 因此最终确定数值模型的深度取值 $H = 25\text{ m}$ 。土层厚度及标高按地勘资料中相对临近施工区域的 J56 钻孔实测结果进行取值。模型的竖向边界仅约束法向位移; 底部边界条件则设置为全约束。具体数值分析模型示意图如图 2(a) 所示。

模型全部选用三维八节点全积分六面体单元 (C3D8)。为确保计算结果的准确性, 在 DN1600 污水管道和 DN2000 管廊附近进行网格加密, 整体模型共包含 26 640 个单元, 具体网格绘制结果如图 2(b) 所示。

DN2000 管廊和 DN1600 污水管道均采用线弹性模型进行模拟, 其中 DN2000 管廊材料为钢筋混



(a) 数值模型示意图



(b) 网格绘制结果

图 2 数值模型及网格整体示意图(单位:m)

凝土, 密度取值 $\rho_{\text{pipe}} = 2500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量取值 $E_{\text{pipe}} = 35.5\text{ GPa}$, 泊松比取值 $\nu_{\text{pipe}} = 0.3$ 。DN1600 污水管道材料为球墨铸铁, 密度取值 $\rho_{\text{sewage pipe}} = 2500\text{ kg/m}^3$, 弹性模量取值 $E_{\text{sewage pipe}} = 151\text{ GPa}$, 泊松比取值 $\nu_{\text{sewage pipe}} = 0.25$ 。为考虑顶管过程中的土体损失, 分析中在管廊外侧设置了软弱薄层以模拟触变泥浆, 层厚根据实际工况设置为 35 mm , 并在分析过程中根据管廊的顶进顺序依次激活。

土体材料采用遵循 Mohr-Column 屈服准则的理想弹塑性本构模型进行模拟, 土体强度按地勘报告中的固结快剪结果 ($c-\varphi$) 进行取值; 土体密度和弹性模量分别取地勘报告中土的重度 (γ) 和压缩模量 (E_{s1-2}), 泊松比 (ν) 一律按经验取值为 0.3 。相关的土体物理力学性质参数取值具体见表 1。

2.2 研究方法

根据研究目标, 拟针对“顶管施工对原有省道的影响”和“省道拓宽施工对建成管廊的影响”分别开展相应的研究。

2.2.1 顶管施工对原有省道的影响研究

采用“生死单元法(model change)”分析管廊顶管的不同顶进顺序对省道的影响程度, 为降低原始省道上的道路荷载和污水管道替换过程产生的位移对计算结果的影响, 将 DN1600 污水管道放入初始的整体模型中进行地应力平衡, 并且同时在原始省道部分施加行车荷载和道路荷载 $P_{\text{highway}} = 23.62\text{ kPa}$,

表1 土体物理力学性质参数表

层号	岩土名称	密度 ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 c/kPa
①	杂填土	1 827	4.41	0.3	16	21.4
③	淤泥质 粉质黏土	1 724	2.79	0.3	8.3	9.3
④ ₂	粉质黏土	1 855	4.63	0.3	19.2	19.9
⑤	黏土	1 752	3.13	0.3	9.5	12.7
⑥ ₁	黏土	1 931	8.23	0.3	16.9	42.8

确保两者在后续过程中不会产生额外的位移;之后分别对 P-1、P-2、P-3 管廊进行“生死单元替换”,由于模型的对称性,针对不同管廊顶管顺序共设计了 3 种计算工况,具体见表 2。

表2 具体计算工况

工况 标号	工况描述	第一阶段	第二阶段	第三阶段
S-1	顺序顶进	替换 P-1 管廊	替换 P-2 管廊	替换 P-3 管廊
S-2	两侧优先顶进	替换 P-1 管廊	替换 P-3 管廊	替换 P-2 管廊
S-3	中央优先顶进	替换 P-2 管廊	替换 P-1 管廊	替换 P-3 管廊

2.2.2 省道拓宽施工对建成管廊的影响研究

在研究过程中,为排除替换 DN1600 污水管道和 DN2000 管廊对计算结果的影响,将两种管道均代入初始整体模型中进行地应力平衡,同时对原始省道部分施加行车荷载和道路荷载 $P_{\text{highway}} = 23.62 \text{ kPa}$;之后再对拟拓宽后省道范围内土体表面施加的堆土荷载、道路荷载和车行荷载进行计算。接收井附近省道拓宽部分(拓宽区 -1)土体表面施加的堆土荷载为 $P_{1\text{-soil}} = 46.09 \text{ kPa}$,工作井附近省道拓宽部分(拓宽区 -2)土体表面施加的堆土荷载为 $P_{2\text{-soil}} = 41.89 \text{ kPa}$,计算省道拓宽对已建成管廊的影响程度。具体模型及荷载施加方式的示意图如图 2(a)所示。

同时为降低省道拓宽工程施工过程中的道路沉降及对已建成地下管廊的影响,拟针对省道拓宽区域土体采用旋喷桩工艺进行加固,通过更改数值模型构件的物理力学性质设定加固区,加固区域的土体采用线弹性模型进行分析,具体参数依据安关峰^[22]等人的研究成果进行取值。共设计 3 种加固区域尺寸进行分析,分别为通铺加固、管廊施工区域附近加固 15 m 和 20 m 的工况,以讨论不同的加固范围对地下管廊及污水管道沉降变形量的影响。

3 计算结果

根据上文描述的实际工程条件和数值方法研究地下综合管廊施工和省道拓宽工程之间的相互影

响,并对研究对象的变形情况进行具体分析。

3.1 未加固工况下顶管施工的影响

施工阶段按照表 2 所示的施工顺序进行管廊顶管作业,各个工序完成后的省道路面变形计算结果见表 3。

表3 省道路面各阶段位移值汇总表 单位:mm

工况	位移 种类	施工 阶段	位移 极值	位移 方向	最大变形位置
S-1	省道 竖向位移	第一	5.81		P-1 管廊上方
		第二	9.81	下沉	P-1 和 P-2 管廊中间上方
		第三	11.33		P-2 管廊上方
S-2	省道 竖向位移	第一	5.81		P-1 管廊上方
		第二	7.01	下沉	P-1 和 P-3 管廊中间上方
		第三	11.75		P-2 管廊上方
S-3	省道 竖向位移	第一	6.03		P-2 管廊上方
		第二	9.62	下沉	P-1 和 P-2 管廊中间上方
		第三	10.98		P-2 管廊上方

由表 3 可以得到,不同的施工顺序对省道路面的影响程度基本一致。第二施工阶段完成后,S-2 工况的竖向位移较 S-1 工况降低了 2.80 mm,降幅约为 28.51%;较 S-3 工况降低了 2.61 mm,降幅约为 27.11%。所有施工阶段完成后,S-2 工况的竖向位移较 S-1 工况增加了 0.42 mm,增幅约为 3.71%;较 S-3 工况增加了 0.77 mm,增幅约为 7.01%。其中 S-2 计算工况的省道路面的竖向最终位移虽然较大,但是增加量和增幅均相对有限;而在第二施工阶段完成后,相较其他两个工况而言,S-2 工况的沉降量明显降低,因此可以认为 S-2 工况可以较好地保证施工整体过程中的安全性和省道的稳定性,应为最优施工方案。

S-1 至 S-3 工况施工完成后不同部件的位移云图如图 3 所示。

分析不同的顶管施工顺序对管廊和污水管道的影响程度可以发现,按 S-1、S-2 和 S-3 工况施工完成后,管廊的最大竖向位移量分别为 16.1 mm、15.9 mm 和 17.0 mm,位移方向为上浮;污水管道的最大竖向位移量分别为 10.77 mm、10.75 mm 和 10.78 mm,位移方向为上浮。可以看出不同施工顺序对于管廊有一定程度的影响,最大差异可达 6.71%,对污水管道的影响则相对较小,最大差异仅为 0.28%。

省道路面的最大位移通常出现于管廊的正上方位置,污水管道的最大位移通常出现在管廊的正下方位置,而管廊的最大位移则会根据施工顺序的不同而出现于不同管廊上。结合表 2 的计算结果综合分析可以得到,S-2 工况的施工顺序对于原始省道路

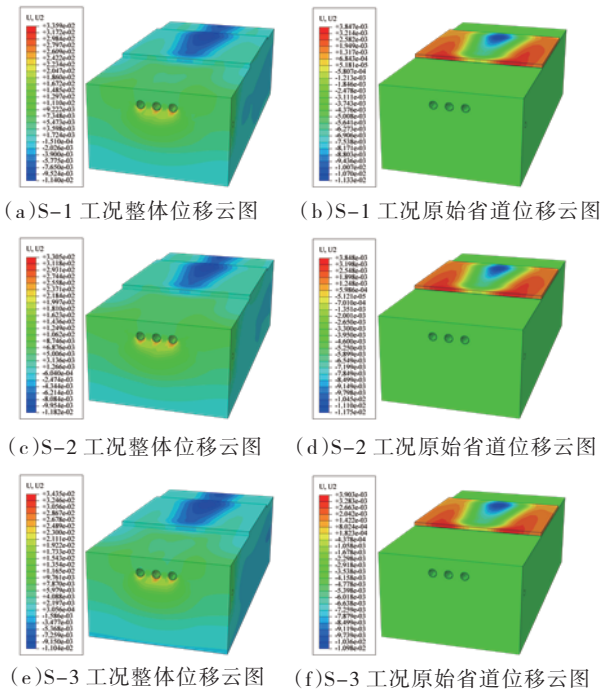


图3 施工完成后原始省道的位移云图(单位:m)

面、管廊及污水管道的影响程度均相对较小,该种施工顺序相对最为安全。

3.2 地基加固后顶管施工的影响

经过不同方法加固,顶管施工完成后的管廊本体和污水管道的竖向峰值位移如图4所示。

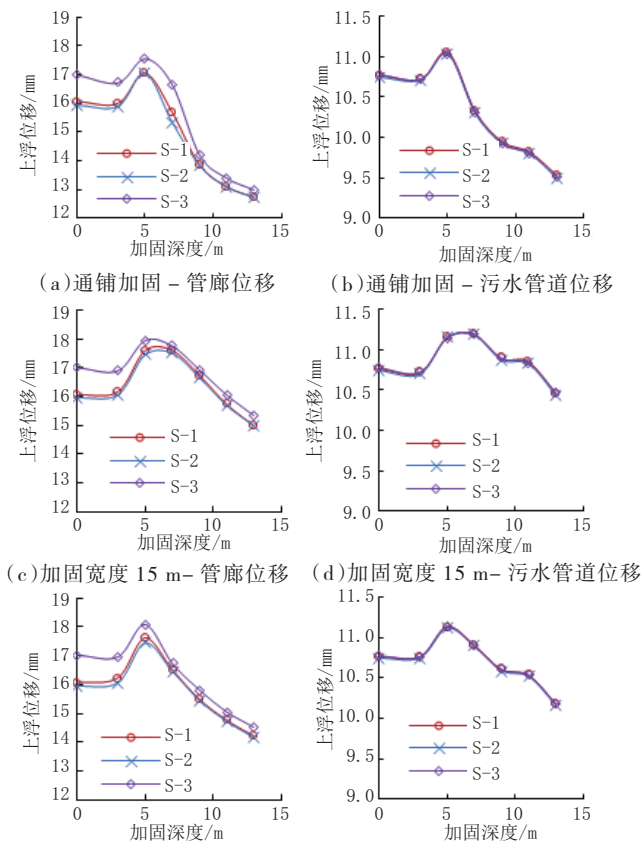


图4 顶管施工后经不同土体加固方法的管廊及污水管道的位移值

根据图4所示的计算结果可以得到,经过不同加固方法后地下管廊和污水管道在顶管施工过程中的最大位移整体上均会随着加固深度的增加而缓慢降低。当加固深度超过管廊埋设深度时,位移会出现较为明显的下降趋势;其中通铺加固的效果最为显著,加固深度为13.0m时地下管廊的最大位移已经可以降低至13.0mm,污水管道的最大位移也可以降低至9.5mm,均小于其他两种加固方法。同时,通过横向比较也可以得到,无论何种加固方法,S-2工况的施工顺序(即两侧优先顶进)均可以更好地控制地下管线的上浮位移。

3.3 省道拓宽施工对建成管廊影响的计算结果

3.3.1 未加固时省道拓宽对建成管廊的影响

省道上部荷载施加完成后,省道路面、地下管廊及污水管道的变形计算结果见表4。

表4 省道路面各阶段位移值汇总表 单位:mm

计算工况	位移种类	位移极值	位移方向	最大变形位置
省道	竖向位移	166.60	沉降	拓宽省道与已建成省道的交界处
DN2000管廊	竖向位移	30.67	沉降	拓宽道路部分正下方
DN1600污水管道	竖向位移	5.367	沉降	整体沉降

由表4可以得到,省道拓宽对于污水管道的影响十分有限,但对管廊有一定的影响,最大沉降量为30.7mm。省道拓宽路面有166.60mm的沉降量,是施工完成后沉降最显著的区域。省道拓宽完成后不同部件的位移云图见图5。

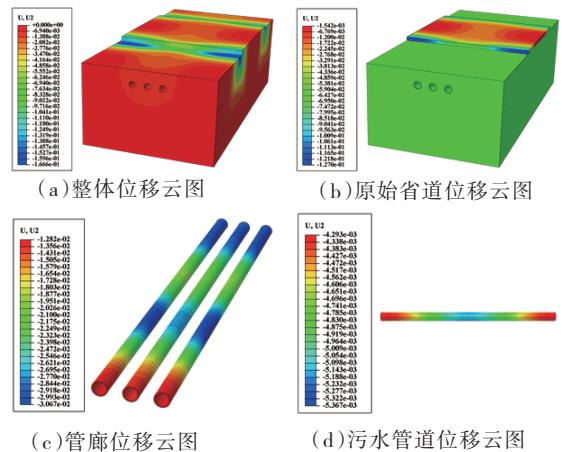


图5 省道拓宽完成后不同部件的位移云图(单位:m)

由图5可以得到,省道拓宽工程施工完成之后最大位移出现在拓宽部分,原始省道本身并没有发生明显的位移;拓宽工程对管廊和污水管道的影响相对有限,管廊最大位移为30.7mm,最大位移主要出现于拓宽部分的下方;污水管道的最大位移为