顶管下穿密集砖混结构建筑群土层加固方案研究

张丽萍
广东省水利电力勘测设计研究院股份有限公司　广东　广州　510635

摘　要：顶管施工在建筑密集区可能会引发土体沉降，直接威胁邻近建筑物安全，因此须在施工前对穿越土层进行有效加固。传统竖向加固方法具有技术成熟、设计简单等优点，但在空间受限区域往往难以实施。基于此，本文提出一种结合袖阀管注浆与旋喷的斜向复合加固方法，并采用三维有限元数值模拟对加固效果进行评估。结果表明，该复合加固方法具有施工便利性上的优点，能有效抑制地层变形，控制地表沉降。工程实践证明了该方案的可行性与有效性，可为类似复杂环境下的顶管工程提供技术参考。

关键词：顶管，地表沉降，袖阀管注浆，复合加固

引言：近年来水利供水输水线路穿越城区时，征地难度大、建构筑物密集，常需穿越公路、河道等设施，顶管非开挖技术应用渐广。顶管施工会在管体与土体间形成环形间隙，需注入膨润土浆液减阻控沉降，但仍会扰动地层引发地表变形，沉降超标将危及周边建筑安全，需预先地层加固。传统竖向旋喷桩、搅拌桩等加固手段，在场地狭小、房屋密集区域难以施工。本文提出斜向袖阀管注浆+旋喷复合加固工艺，依托工程开展数值模拟验证加固效果。结果表明斜向加固可有效降低土层变形。该工艺已落地应用，顶管施工地表沉降控制在规范限值内，可为同类工程提供技术参考。

1 工程概况

1.1 顶管布置

如下图1所示为引韩济饶供水工程其中一段顶管，该段顶管沿线地面建筑物分布密集，最近处建筑物基础距离管道外周仅1m。物探资料显示，部分建筑物基础在平面投影上与管道外缘紧邻。沿线建筑物多为扩展基础砖混结构，顶管施工所引起的地表沉降将对建筑物产生显著影响[1]。

为保障建筑物安全，需结合现有建筑物布置、地质勘察与物探资料，对顶管施工过程中可能产生的地表沉降量及其分布规律进行预测分析，并依据计算结果提出有效的地层加固措施。本次预测分别采用经验公式法（Peck法）与有限元三维数值模拟方法进行对比计算。

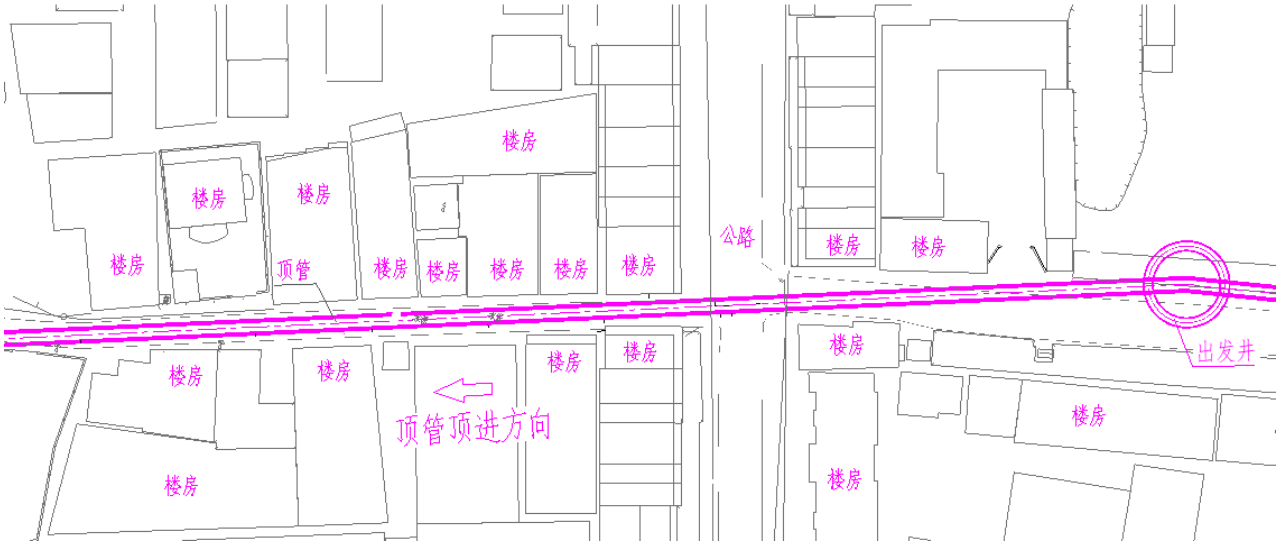


图1 顶管平面布置示意图

1.2 工程地质

顶管穿越土层地质剖面如图2，顶管穿越的范围分别为上层为松散~稍密的细砂~中粗砂层，弹模为10 ~ 16MPa，穿越层为可塑黏性土，弹模为5.0 ~ 7.0MPa，下层为可塑的淤泥质黏性土，弹模为3.5 ~ 4.0MPa，其余相应的各土层主要物理力学参数。

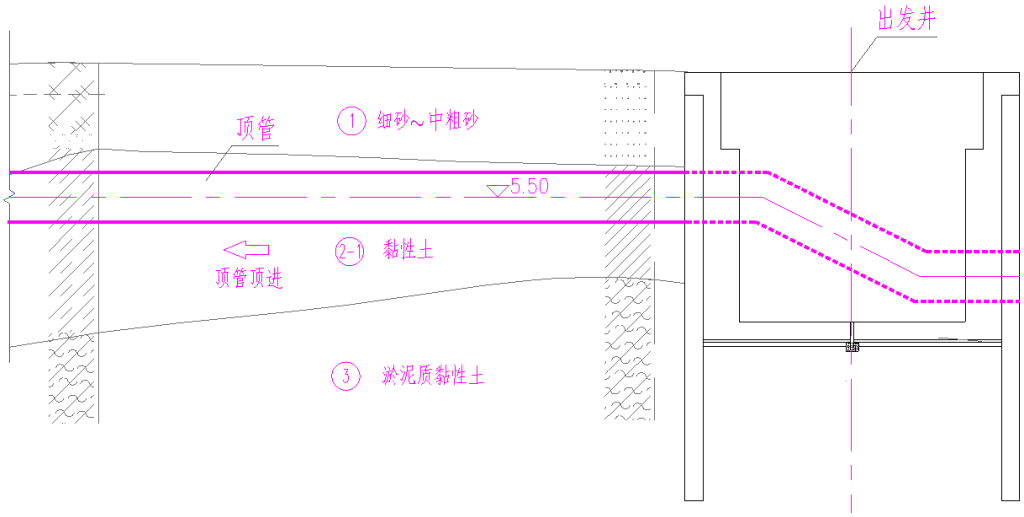


图2 顶管顶进纵剖面图

2 加固前 Peck 公式法顶管沉降计算

Peck认为施工引起的地表沉降是在不排水情况下发生的，所以沉降槽的体积应该等于地层损失的体积。根据这个假定并结合采矿引起地表位移的一种估算方法，Peck在对大量隧洞开挖后地表沉降实测数据分析的基础上，提出了隧洞施工引起施工阶段地层损失的概念及地表沉降的估算方法。

某些学者认为顶管地层损失量V_i主要为三部分组成，其一为顶管机头切削面土体损失V_1，其二为顶管机头纠偏引起的地层损失V_2，其三为顶管过程中管道外周与土层之间的形成的空腔引起的地层损失V_3。

根据现场实际，管外空隙取2~3cm，该工程顶管机头切削面土体损失V_1，顶管机头纠偏引起的地层损失V_2，顶管过程中管道外周与土层之间的形成的空腔引起的地层损失V_3。

由机头切削所引起的地层损失及相应沉降相对较小约0.5mm~4.6mm；管道外围空隙若未能及时、充分注浆，则将导致显著的地表沉降，最大沉降达23.3mm。因此，在顶管施工过程中，应严格控制开挖面的土压力，并采用适当的注浆压力、必要的注浆量以及合理配比的浆液，对管道外围环形空隙实施同步注浆与补充注浆，以有效控制并减少地表沉降[2]。此外，在顶进过程中，纠偏也将引起较大沉降，纠偏沉降可达10.3mm，因此应确保管道轴线走向与设计轴线尽可能一致，最大限度减少纠偏操作，从而降低因纠偏引起的附加沉降风险。

根据计算结果可知，该工程在未采取管侧加固措施的情况下：

（1）若考虑管周注浆效果最差、机头土体损失最大，并计入纠偏引起的附加沉降，顶管施工导致的地表最大沉降量为38.2 mm；

（2）若设定注浆未充满度为0.6，同时考虑机头土体损失最大及纠偏引起的沉降，地表最大沉降量为28.9 mm。

上述两种工况下管周地表沉降分布，基于沉降分布可推算，地面建筑物的倾斜度约为0.003~0.004。依据《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2011）第5.3.4条规定，建筑物地基变形允许值中，倾斜度应控制在0.002以内。因此，前述两种工况均不满足规范要求。

相比之下，若设定注浆未充满度为0.3，机头土体损失最小，且不考虑纠偏沉降，则地表最大沉降量为7.5 mm，此时沉降控制效果较好。

3 管周土层加固方案的设计

如图1所示，顶管沿线房屋建筑密集，其基础与顶管外壁的最近距离约为1m ~ 2m，较远区域约为3m ~ 5m。为有效控制顶管施工引起的地层变形，确保邻近建筑物结构安全，传统做法是在管道周围采用竖向旋喷或注浆加固，以在建筑物基础与顶管之间形成隔离屏障。

然而，本工程区域内顶管与建筑物距离极近，一方面加固施工受到机械设备操作空间的严重限制，旋喷施工机械较大，空间较小时无法正常开展，另一方面若继续采用竖向加固方式，加固钻孔距离既有建筑基础及顶管管线过近，施工过程中注浆压力将影响两者的结构安全。为此，本文提出在顶管紧邻建筑物的区段采用斜向袖阀管注浆工艺，具体加固布置如图3所示，斜向后能保证加固钻孔上方距离建筑物基础较远，钻孔下方和顶管不交叉，同时该工艺所需机械尺寸小、施工灵活便捷，能够适应狭窄作业环境。而在顶管距离建筑物稍远的区

段，则仍采用常规旋喷加固方式。

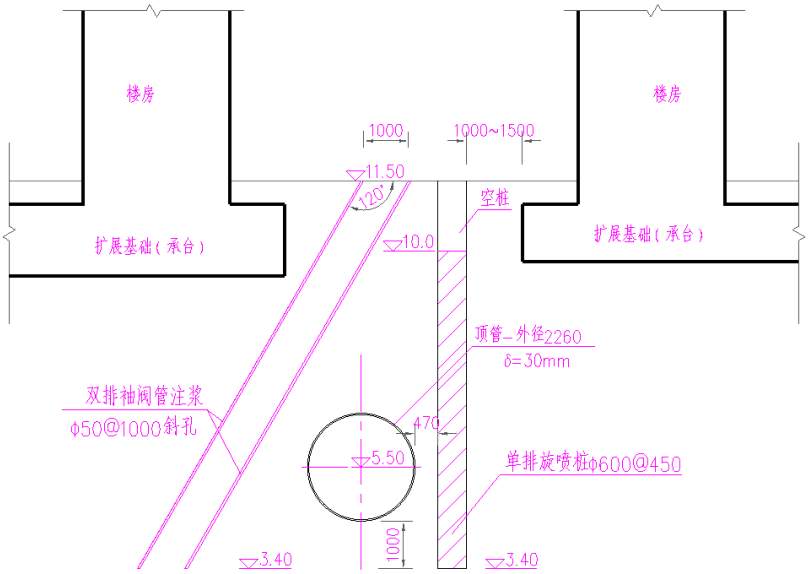


图3 加固剖面

4 顶管掘进诱发地表沉降的三维数值模拟计算分析

Peck经验公式法在预测顶管施工引起的地表沉降时存在一定局限，既无法考虑不同土层性质对沉降分布的差异性影响，也难以模拟地基加固后的沉降控制效果。为此，本研究拟采用三维有限元方法，在获取施工前场地初始地应力场的基础上，对顶管掘进过程进行动态模拟，以更准确地分析施工诱发的地表沉降。

计算结合地质剖面资料，综合考虑掌子面压力、注浆层作用等施工关键参数，模拟分析在顶管沿线土体加固与未加固两种工况下，顶管开挖所导致的地表沉降差异，从而评估加固措施的有效性与地层响应特征。

4.1 三维数值模型

选取顶管典型断面，建立了如图4所示的三维有限元计算模型。周边地层的力学特性对约束顶管掘进所引发的地表沉降具有关键影响，因此在三维数值模拟中，需结合地层分布特点合理确定计算参数。三维有限元计算模型中的地层自上而下分别为粗砂、粘土、淤泥，各地层的计算参数详见表1。三维有限元计算模型的边界条件为：模型底部及四个侧面均采用法向约束[3]。

顶管掘进施工过程按表2设定，每步开挖进尺为1.5 m。采用等代层模拟管片壁后注浆层，在分析中不考虑浆液硬化过程：初始施作时赋予等代层极低的弹性模量（0.02 MPa）以模拟管周未硬化浆体间隙，随后将其弹性模量提高至10 GPa，以模拟注浆体硬化后的力学状态。

表1 材料属性与本构

土层	重度（kN/m^3）	凝聚力（kPa）	内摩擦角(°)	弹性模量（MPa）	本构
粗砂层	20.0	0	27.0	40	莫尔-库伦
淤泥	15.3	4	4	8	莫尔-库伦
粘土	19.3	10	12	32	莫尔-库伦
加固土	23	15	20	150	莫尔-库伦
管片	25	-	-	50000	弹性
注浆软化层	15	-	-	0.02	弹性
注浆硬化层	24	-	-	10000	弹性

表2 顶管掘进的三维动态施工过程

施工工况	主要施工内容
工况1	场地初始地应力场分析
工况2（不加固工况无此步骤）	加固顶管沿线土体
工况3	开挖1

续表：

施工工况	主要施工内容
工况4	开挖2且施作管片1及等代层1
工况5	开挖3且施作开挖管片2及等代层2
工况6	开挖4且施作开挖管片3及等代层3
以此类推，共开挖42m	

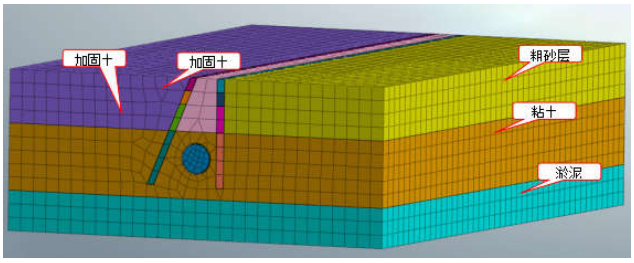


图4 三维有限元模型轴视图

4.2 模拟结果分析

图5为未采取加固措施时顶管掘进所诱发的地表沉降云图，其中心最大沉降量为7.5 mm。图6为对沿线土体进行加固后的地表沉降云图，中心最大沉降量为3.9 mm。对比结果表明，采取加固措施后，顶管施工引起的最大地表沉降量约为未加固工况的一半，说明该加固方法有效抑制了地层变形。

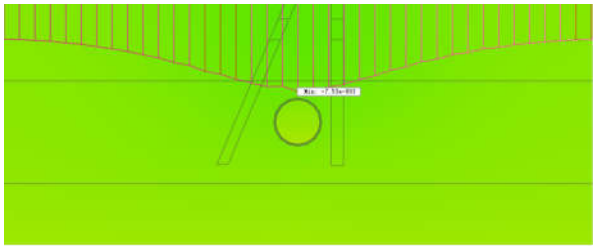


图5 未加固顶管施工引起地面沉降分布(单位m)

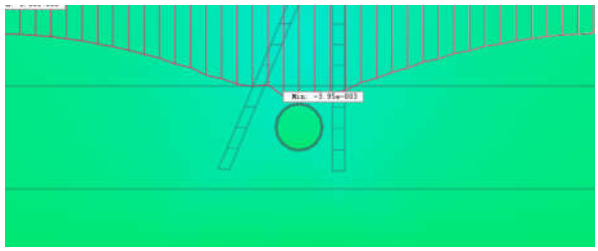


图6 管周两侧加固后顶管施工引起地面沉降(单位m)

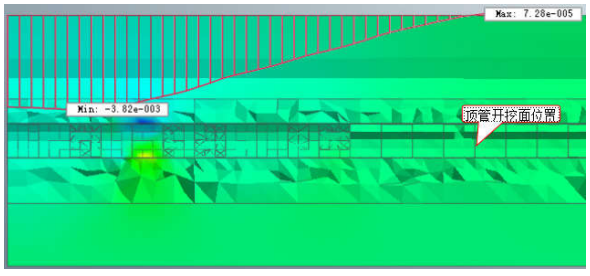


图7 沿顶进方向地面沉降分布(单位m)

图7为加固后沿顶管轴向的管顶地表沉降分布图。由图可知，在顶管开挖面前方土体可能出现轻微隆起，而最大沉降主要发生在顶管推进后方区域，随后沉降逐渐趋于稳定。

结论

（1）本文根据工程特点提出一种斜向袖阀管注浆与竖向旋喷加固相结合的复合加固方法，并采用了peck法与三维有限元数值模拟方法分别进行了顶管沉降计算，由计算结果可知，peck法因考虑了多方面的包络算得沉降值大于三维有限元法。（2）Peck经验公式法在预测顶管施工引起的地表沉降时存在一定局限性，既无法考虑不同土层性质对沉降分布的差异影响，也难以有效模拟地基加固后的沉降控制效果。相比之下，三维有限元方法能够较好地弥补上述不足。数值计算结果表明，本文所提出的加固方法对地层变形具有明显的抑制效果。该顶管工程目前已顺利完成施工，整个顶进过程中所监测到的地层沉降均处于允许范围内，沿线建筑物未出现明显变形，进一步验证了该加固方案的可行性与有效性。（3）从沉降计算可知，地表沉降也与顶管掘进过程中的施工控制密切相关。结果表明，开挖面土压力、管周注浆压力以及施工纠偏操作等因素均会对地表沉降产生显著影响。为有效控制地表沉降，在顶管施工过程中应严格控制开挖面土压力，并采用适当的注浆压力、必要的注浆量以及合理配比的浆液，对管道周围环形空隙实施同步注浆与补充注浆。同时，应确保顶进轴线与设计轴线尽可能一致，最大限度减少纠偏操作。此外，需严格监控各项施工参数，加强过程监测，实时评估地表沉降是否满足控制要求。

参考文献

[1]赵腾跃，陈希林，李飞.城市砂层隧道管幕法顶进参数优化研究[J].市政技术，2025.

[2]盛松涛，安子玥，周洪云，刘 杰.过河段顶管施工河床地表沉降影响规律[J].长江科学院院报，2025.

[3]崔光耀，麻建飞，宁茂权，唐再兴，刘顺水，田宇航.超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工加固方案对比分析[J].岩土力学，2022.