

文章编号: 1000-7598(2010)12-3855-07

盾构隧道穿越苏州河对防汛墙的影响分析

陈峰, 田利勇, 卢伟华

(上海市水利工程设计研究院, 上海 200063)

摘要: 轨道交通11号线盾构隧道穿越苏州河将会对防汛墙的安全造成影响。为保证盾构顺利实施, 拔高影响盾构穿越的桩基, 采用双跨门洞式的结构型式对防汛墙结构加固改造。在保证防汛墙安全的前提下, 为隧道穿越预留了足够空间。运用有限元数值模拟方法建立计算模型, 对隧道穿越前后防汛墙结构的受力和变形形态进行分析。研究表明, 隧道穿越前底板呈连续梁变形规律, 长桩桩身中部和短桩桩端呈向外侧扩张的趋势, 整个结构受力性状符合门洞式刚架结构的特性。隧道穿越后, 底板的变形趋势与隧道穿越前变形规律相似, 最大变形位于隧道上部跨中部位, 而桩基变形形态则完全不同, 隧道开挖引起长桩桩身中部和短桩桩端向隧道侧的变形, 长桩呈挠曲变形, 桩身最大变形位于隧道拱轴线附近, 短桩呈刚体变形, 最大变形位于桩端。经与实测沉降数据对比, 盾构的穿越对防汛墙变形的影响处于可控状态, 整体防汛墙计算沉降值与实测值较为接近。

关键词: 防汛墙; 盾构隧道; 变形; 数值模拟; 地层损失

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Analysis of influence of passing through shield tunnel on flood wall for Suzhou River

CHEN Feng, TIAN Li-yong, LU Wei-hua

(Shanghai Water Engineering Design & Research Institute, Shanghai 20063, China)

Abstract: The metro 11 line shield tunnel passing through the Suzhou River, will impact on the security of flood wall for Suzhou River. The pile foundation relative to shield tunnel was raised and a "double span" portal frame was adopted to ensure the appliance of shield tunnel. Not only the security of flood wall is assuring, but the space for shield tunnel is adequate to the demand. The diversity in the stress and deformation construction of flood wall with shield tunnel or not, was analyzed by constitutive model built on the finite element method. Before shield tunnelling the deformation of bed plate foundation is consistent in it of continuous beam, both the middle part of long pile and the top part of short pile are detected in the extrorse deformation; and the stress rule of the whole structure accord with inherent characteristic of the portal frame. After shield tunneling the deformation of bed plate foundation is similar to it before shield tunnelling; the maximal deformation lies in the middle part of the tunnel upside. By contraries, after shield tunnelling both the middle part of long pile and the top part of short pile are detected in the introrse deformation. The deformation of long pile is in the form of bending deflection, and the maximal deformation lies in the neighborhood of the tunnel axle wire, the deformation of short pile is in the form of rigid body deformation; the maximal deformation lies in the bottom of itself. The theoretical settlement calculated approximates to the practical settlement tested; it is shown that the influence on the deformation of the flood wall by shield tunnelling is of controllable condition.

Key words: flood wall; shield tunnel; deformation; numerical simulation; ground loss

1 引言

随着城市隧道、地铁工程建设, 穿越城市防洪河道不可避免, 如何解决防汛墙与隧道的矛盾是建设中的一个难题。目前, 地铁开挖对地面变形和邻

近建筑物的影响已有不少研究, 但隧道开挖对防汛墙的影响尚未见有研究报道。本文拟通过工程实例, 应用数值计算方法, 并与实测数据比较, 研究盾构隧道开挖前后防汛墙结构及盾构周边土体的变形特征。

收稿日期: 2009-09-16

第一作者简介: 陈峰, 男, 1974年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程和水利工程的研究和设计工作。E-mail: engineeringchenfeng@126.com

上海市轨道交通 11 号线隆德路—愚园路区间隧道需穿越苏州河, 轨道轴线与苏州河岸线呈 50° 交角, 见图 1。隧道穿越位置苏州河防汛墙采用前板桩后方桩的高桩承台结构, 盾构设计顶高程为 -8.20 m (上海吴淞高程, 下同), 防汛墙桩基础底高程均为 -10.0 m, 桩身结构侵入设计盾构断面以内 1.8 m^[1]。

由于隆德路车站距离苏州河北侧岸线最近约为 65 m, 距离较近, 盾构出洞不远即掘进至防汛墙基础, 受隧道设计轴线纵向坡度影响, 盾构无法从桩底下绕过, 防汛墙基础为钢筋混凝土板桩和方桩, 盾构掘进工艺采用土压平衡法, 利用刀盘直接切削难度太大, 切削桩基过程中也必然对地层扰动过大, 并且直接减短防汛墙基础桩长, 严重影响到防汛墙安全。为此, 在盾构穿越前必须对原防汛墙结构进行加固改造, 拔除或拔高影响盾构穿越的桩基。

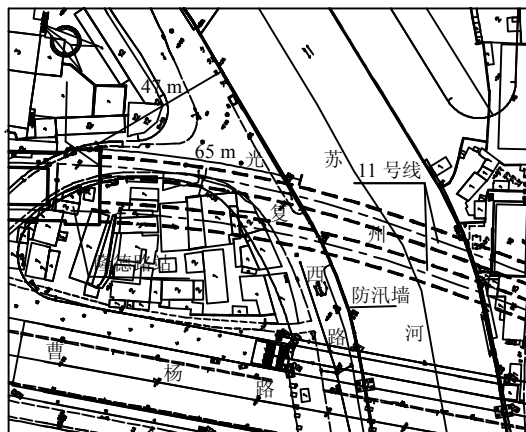


图 1 轨道交通 11 号线与苏州河的相对位置关系图
Fig.1 Relative position of the metro 11 line and the Suzhou River

2 防汛墙结构加固改造方案

2.1 原防汛墙结构

该段防汛墙结构采用 2 级挡墙结构, 第 1 级挡墙为高桩承台结构, 第 2 级挡墙为倒 L 型钢筋混凝土结构。防汛墙断面结构见图 2。第 1 级挡墙结构顶高程为 3.50 m, 基础结构采用前板桩后方桩的高桩承台结构, 底板底高程为 2.0 m, 底板宽为 3.95 m, 厚为 0.50 m。前板桩为 $300\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 12\,500\text{ mm}$ 的钢筋混凝土板桩 (密排布置), 后方桩采用 $350\text{ mm}\times 350\text{ mm}\times 12\,500\text{ mm}$ 的钢筋混凝土方桩, 间隔布置, 间距为 1 500 mm。第 2 级挡墙底板底高程为 2.5 m, 墙顶高程为 5.3 m, 墙顶宽为 300 mm, 两墙之间回填种植绿化。如图 2 所示。

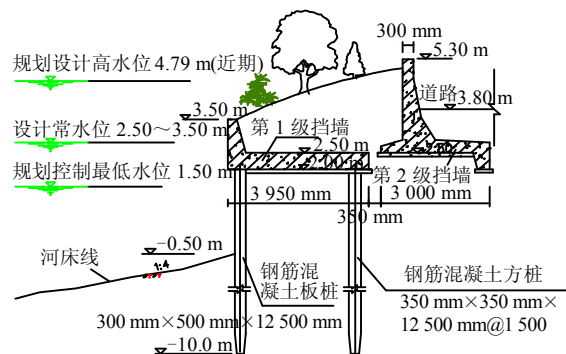


图 2 原防汛墙结构断面图

Fig.2 Former structural section of the flood wall

2.2 防汛墙结构加固改造

为保证盾构顺利实施, 避免隧道穿越苏州河过程中破坏防汛墙结构, 拟将隧道穿越影响范围内原防汛墙桩基进行拔高, 根据盾构穿越的要求, 控制拔高的桩底高程离盾构顶面大于 1.0 m。由于防汛墙桩基拔高后, 将造成桩基承载力和基础整体稳定性不足, 因此, 对防汛墙结构进行加固改造。经多方案比较, 采用“双跨门洞式”结构型式, 即在盾构两侧设置长桩, 在其上部设置不影响穿越的短桩进行基础补强, 通过刚度较大的底板将整个隧道穿越保护范围内防汛墙基础的长短桩连成一体。两侧长桩将外部影响产生的附加荷载传递至深层土体, 避免隧道穿越过程中产生的隆起和土体损失对防汛墙造成过大的变形和不均匀沉降, 保证防汛墙的变形控制在功能允许的范围内。整个结构不分缝, 形成较为完整的受力体系, 共同承担外荷载。防汛墙结构加固改造立面和剖面如图 3 所示。

考虑到盾构将在防汛墙结构改造完成后实施穿越, 如果补强桩基采用挤土类桩, 根据软土地区的经验, 沉桩过程中产生的孔隙水压力在短时间内难以消散, 将会对后续盾构穿越造成影响, 从而对防汛墙结构产生安全隐患, 因此, 桩基选择非挤土类的钻孔灌注桩。

考虑到盾构穿越苏州河期间, 将可能会对防汛墙产生向上隆起和向下沉陷的影响, 并且墙体需跨越在隧道上, 受隧道断面尺寸的限制, 盾构两侧长桩之间的跨度达到 30 m 以上, 为了提高墙体结构刚度, 将 1 级和 2 级挡墙合二为一, 形成刚度较大的 U 型槽结构, 如图 3 所示。

考虑到盾构穿越可能造成改造段防汛墙与两侧连接的防汛墙产生较大的差异变形, 在接头部位采用适应变形能力较强的铜片止水的方式。

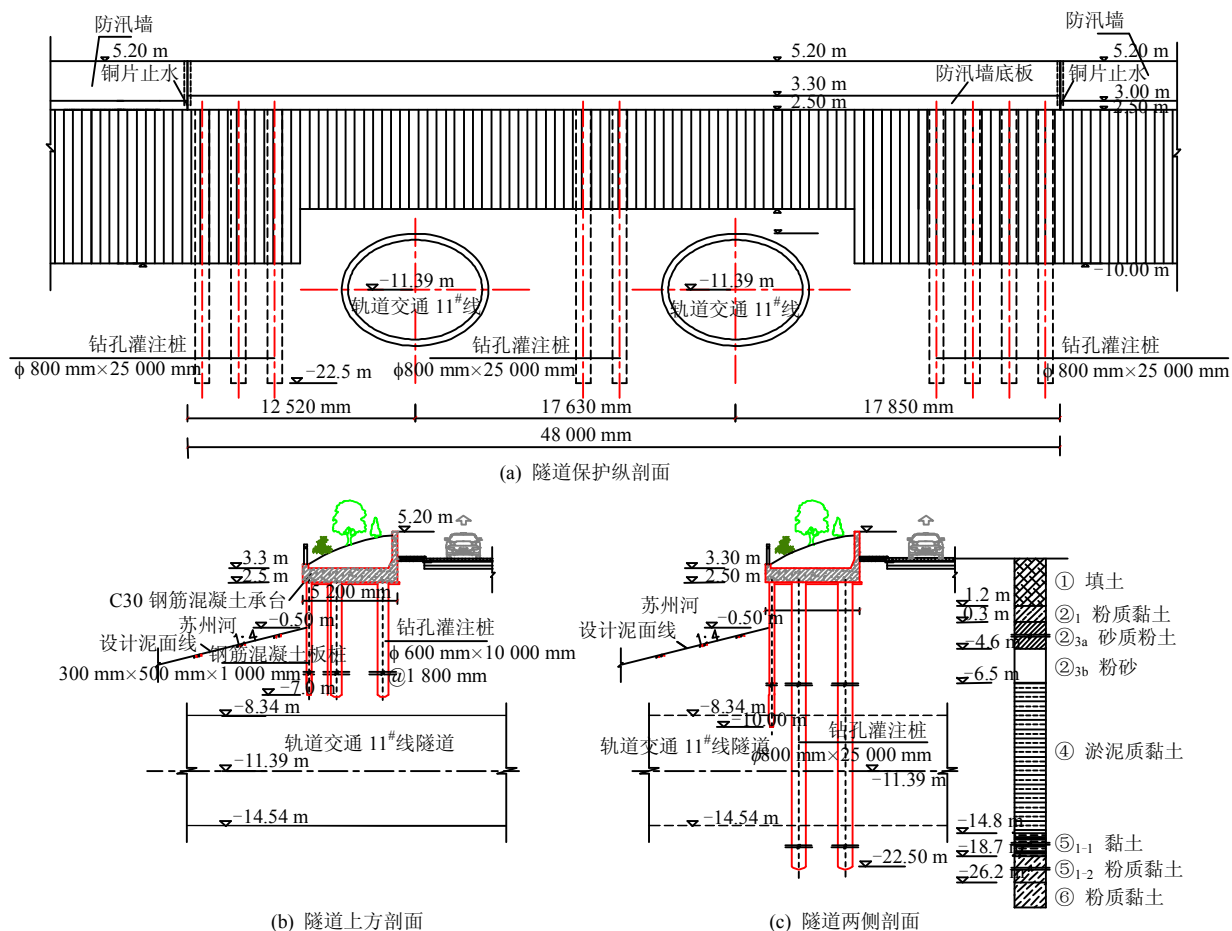


图 3 防汛墙加固改造结构图
Fig.3 Reinforced and reconstructed section of the flood wall structure

2.3 防汛墙保护措施

防汛墙基础进行拔桩处理, 必须对桩基础上部的承台结构进行拆除。防汛墙的拆除、拔桩处理及防汛墙改造重建都将对苏州河的防汛安全造成一定的影响, 因此, 在破除原防汛墙结构之前先构建临时防汛设施。

为了充分利用原防汛墙结构, 并考虑到完全拔除桩基对地基土的扰动过大, 对影响盾构穿越的桩基并不完全拔出, 而是采用拔高的方式, 拔高的桩基仍作为改造防汛墙结构参与受力的一部分。由于桩基在拔高期间一方面失去了底板承台对其变形约束; 另一方面降低护岸的整体稳定性, 因此, 拔桩前在墙前设置一排刚度和强度较大的 U 型钢板桩, 钢板桩底高程低于原防汛墙桩基底高程, 采取该措施可以在一定程度上减少拔桩期间桩基的水平变形, 并且避免因桩基拔高造成护岸整体失稳的现象出现。

桩基拔高后, 桩底拔高部分将与周边土体形成空洞, 桩端成为自由端, 失去了端承力和土体对其的约束作用, 为此采用水泥砂浆对空洞进行填充,

通过提高注浆压力, 起到填充作用, 并对桩端一定范围的土体起到了挤密加固的作用, 保证桩底土体具有一定强度, 同时水泥砂浆的强度低于 2 MPa, 因此, 不会对盾构的穿越产生阻碍。

针对防汛墙的改造采用以上一系列的措施, 使得无论在防汛墙实施期间、运行期间还是盾构穿越期间, 防汛安全均能得到保障。

3 防汛墙结构数值分析

3.1 土性计算参数

经勘探揭示, 拟建场地在勘探深度范围内, 地基土层分布大致稳定, 由软塑黏性土、松散粉性土和砂土组成, 具有成层分布的特点。各层地基土物理力学参数见表 1, 地质剖面见图 3。

3.2 数值计算模型及成果分析

由于隧道穿越段防汛墙受力模式与常规防汛墙受力模式完全不同, 常规防汛墙沿岸线在一个结构分段内断面结构相同, 一般只需简化为平面问题, 进行整体稳定和结构力学分析。而隧道穿越段防汛墙的稳定和结构受力性状复杂, 因此, 采用整体空

表 1 各土层物理力学性质参数表
Table 1 Physico-mechanical parameters of soils

土层 层号	土层名称	重度 γ /(kN/m ³)	凝聚力 c /(kN/m ²)	内摩擦角 φ /(°)	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa
①	填土				
② ₁	粉质黏土	18.3	16	29.0	8.13
② _{3a}	砂质粉土	18.5	5	32.5	8.43
② _{3b}	粉砂	18.6	0	34.5	10.82
④	淤泥质黏土	16.6	12	13.5	2.31
⑤ ₁₋₁	黏土	17.7	16	12.5	3.12
⑤ ₁₋₂	粉质黏土	17.1	17	20.5	4.71
⑥	粉质黏土	19.4	48	18.5	7.69

间模式模拟计算和简化平面问题模拟计算相结合共同进行分析。

3.2.1 防汛墙整体稳定分析

对于隧道穿越段防汛墙的整体稳定采用瑞典圆弧滑动法,假定滑弧通过桩基底部,水位降落期为最不利工况,将滑弧内土体条分,对长桩段和短桩段分别进行滑移力和抗滑力的计算,根据两者加固长度所分担的荷载比例进行加权计算得出总的滑移力和抗滑力。其中长桩部分单位滑移力为 1 300.4 kN,单位抗滑力为 2 140.2 kN,短桩部分单位滑移力为 706.7 kN,单位抗滑力为 703.6 kN,长桩加固范围为 19 m,短桩加固范围为 29 m,则总的滑移力为 $19 \times 1\,300.4 + 29 \times 706.7 = 45\,201.9$ kN,总的抗滑力为 $19 \times 2\,140.2 + 29 \times 703.6 = 61\,068.2$ kN,整个岸段的整体稳定安全系数为 $61\,068.2 / 45\,201.9 = 1.35$,满足抗滑稳定的要求。

3.2.2 防汛墙整体结构受力及变形分析

对于防汛墙结构受力分析,采用三维有限元进行数值模拟。根据拟定的防汛墙加固改造方案、地质参数等资料,利用大型结构有限元软件 Robot Millennium 建立三维有限元模型,见图 4。其中墙身和底板承台采用平板壳单元,桩基由于需承受较大的水平力和弯矩,采用梁柱单元模型,按照隧道穿越段的整体防汛墙空间结构实际尺寸进行建模。模型中材料参数墙身和底板混凝土强度等级为 C30,弹性模量 $E = 30$ GPa;桩基混凝土强度等级为 C40,弹性模量 $E = 32.5$ GPa,泊松比 $\mu = 0.2$,重度 $\gamma = 25$ kN/m³。桩基周边土体假设为弹性地基,将土体模拟成弹性支座对桩基进行约束,弹性支座刚度由土体的基床系数确定,根据上海地区的工程经验,软塑状淤泥质黏性土、松散粉性土和粉砂土水平基床系数 k_H 取为 15 000~30 000 kN/m³,垂直向基床系数 k_V 取为 20 000~40 000 kN/m³[2]。作用于

防汛墙上外荷载除考虑土压力和墙后超载的因素,将盾构掘进引起的地基变位,折换成变位荷载,施加于防汛墙结构上[3]。

经计算,防汛墙结构采用双跨门洞式结构,立面变形形态见图 5,其中防汛墙底板跨中和边侧加固长桩桩体中部变形较大,最大位移值为 18.9 mm,短桩由于嵌固深度较浅,桩端无法形成有效的嵌固,而桩顶与底板近似于固端,因此,桩顶随底板变形而变形,类似刚体变形,而侧面变形即垂直于河道岸线的截面变形较小,最大仅为 1.9 mm,与常规防汛墙主要变形方向不同。防汛墙底板最大弯矩为 178.08 (kN·m)/m,位于两个门洞的跨中,方向平行于岸线,桩基的弯矩呈两向,最大弯矩均发生在两端长桩顶部,其中垂直于岸线为 170.61 kN·m,平行于岸线的弯矩为 90.85 kN·m,均位于与底板接头部位,受力性状均符合门洞式刚架结构的受力特性。

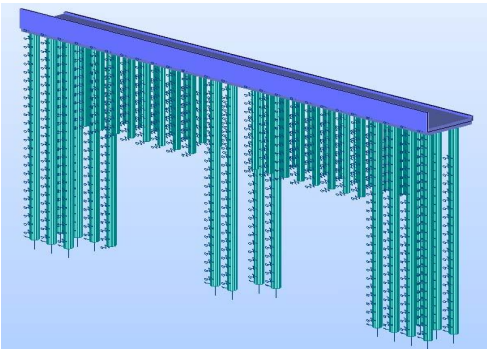


图 4 防汛墙结构有限元模型图
Fig.4 Finite element model of the flood wall

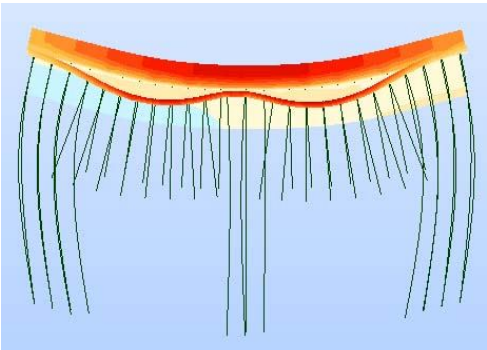


图 5 防汛墙结构变形趋势图
Fig.5 Structural deformation trends of the flood wall

3.2.3 盾构穿越对防汛墙结构的影响分析

从空间结构有限元分析成果可知防汛墙结构的受力性状和变形趋势,但结构模型中未考虑土体的本构关系,仅将结构与土体之间关系采用弹性地基梁的方式进行模拟。同时,空间结构计算结果显示,沿纵向结构变形基本呈左右对称,盾构穿越对防汛

墙结构的影响可近似假设为平面问题进行分析^[4]。因此, 为了进一步了解盾构穿越全过程与结构受力和变形的关系, 采用岩土工程有限元分析软件 Plaxis2D—V8.0 建立计算模型, 将地基与结构作为一个连续体进行数值分析, 模拟因盾构施工掘进引起的应力分布、土体变形和防汛墙变形情况。

盾构掘进对土体的扰动行为非常复杂, 一般认为, 地层损失是导致地面沉降或构筑物变形的重要因素, 地层损失的模拟方式与损失量的取值直接决定数值分析成果合理性和准确性, 而参考已建隧道工程的成功案例数据至关重要, 根据国内外学者的研究成果, 通常取 0.15%~2.50%^[5-6]。参考上海地区已建成隧道工程的实测数据反分析的成果和经验, 在穿越建(构)筑物时, 地层损失一般控制在 0.3%~1.0%^[7]。本文地层损失量取 1.0%, 在模型中通过隧道衬砌的收缩率模拟。

模型中的防汛墙结构采用板梁单元模拟, 等效成同等效轴向刚度和抗弯刚度, 结构材料计算参数同空间有限元结构计算参数。盾构结构则采用 Plaxis 软件专用工具箱进行模拟, 隧道衬砌混凝土强度等级为 C60, 弹性模量 $E=36$ GPa, 泊松比 $\mu=0.15$, 重度 $\gamma=25$ kN/m³。土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 包含 5 个土体计算参数, 即控制弹性行为的弹性模量 E 、泊松比 μ 和控制塑性行为的摩擦角 φ 、黏聚力 c 和剪胀角 ψ , 其中弹性模型 E 采用表 1 中的压缩模量 E_s 根据广义虎克定律推导, 泊松比 μ 取 0.4, 摩擦角、黏聚力取表 1 中对应数值, 剪胀角 ψ 取为 0。土体与隧道管片之间设置界面单元, 采用双线性 Mohr-Coulomb 模型模拟, 并假设土体始终与盾构保持接触, 盾构管片材料是线弹性的、均匀的、各向同性的^[8]。为了保证计算的精度, 模型区域范围左右各 80 m, 上下各 40 m。

盾构施工过程主要分为盾构到达前、盾构穿越和盾构远离后 3 个阶段, 计算模拟分两类情况进行分析, 第 1 类为盾构穿越前或盾构穿越后土体固结变形完成后的情况; 第 2 类为盾构掘进过程中盾尾孔隙收缩变形, 造成地层损失, 及盾构穿越后周边土体开始固结, 但尚未完成固结前的情况。

第 1 类情况的计算结果显示, 防汛墙的结构变形趋势和受力特点与空间结构分析结果类似。最大变形发生在防汛墙底板跨中, 短桩受底板沉降的影响, 沿隧道轴线呈扇形向两侧张开的趋势, 长桩由于埋深较大, 桩底近似呈嵌固状态, 桩中部呈向门洞两侧扩张变形的趋势, 见图 6。

第 2 类情况的计算结果显示, 防汛墙底板的变形趋势与第 1 类情况变形形态和趋势相近, 最大沉降变形位于隧道上部跨中部位, 计算位移值为 10.1 mm。而桩基变形形态与第 1 类情况完全不同, 呈现相反的趋势。隧道开挖引起长桩和盾构周边土体向隧道侧的变形, 呈挠曲变形, 桩身最大变形位置位于隧道拱轴线附近, 最大水平位移值为 17 mm。由于隧道穿越防汛墙时, 位于第④层淤泥质黏土中, 该层土强度指标低, 压缩性强, 受盾构施工影响, 桩基最大变形发生在该层土中, 符合土体的实际变形情况。位于盾构上部的短桩, 桩端变形方向则偏向于隧道侧, 变形形态仍类似于刚体变形, 见图 7。国外学者 Cheng 等^[9]研究了隧道施工对邻近桥梁桩基的影响, 国内学者李宁等^[10]和黄茂松等^[11]研究了隧道开挖对上部桩基变形的影响, 本文研究的第 2 类情况得出桩身结构的变形规律与这些学者的研究成果基本一致。

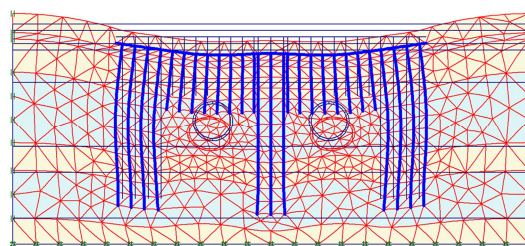


图 6 盾构穿越前防汛墙结构变形图
Fig.6 Structural deformation of the flood wall before shield tunnelling

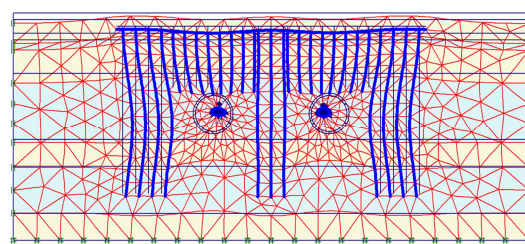


图 7 盾构穿越后防汛墙结构变形图
Fig.7 Structural deformation of the flood wall after shield tunnelling

4 监测结果分析

本区间段盾构从 2008 年 8 月 15 日出洞, 于同年 8 月 30 日成功穿越苏州河, 为了控制盾构穿越对防汛墙的影响, 对加固改造后防汛墙进行监测, 监测内容包括墙体沉降、水平变形等, 监测点布设在墙顶, 间距为 5 m, 在盾构穿越期间, 监测频率平均 2~3 次/d, 要求单日变形量控制在 3 mm 以内。

从沉降观测点的测量数据分析, 防汛墙的沉降变形分为 3 个阶段: 第 1 阶段防汛墙改造结束盾构尚未穿越前, 防汛墙呈总体下沉, 门洞两端长桩部位沉降小, 跨中隧道上部沉降大, 最大沉降量为 9.0 mm, 沉降变形过程见图 8。沿防汛墙岸线方向向底板结构沉降计算值和实测的比较见图 9。由图 9 可知, 两者的变形趋势基本一致, 由于防汛墙加固改造后, 历时较短, 未达到最终沉降, 因此, 计算值大于实测值; 第 2 阶段为盾构穿越期间, 盾构采用土压平衡法, 受盾构机开挖面推进压力的影响, 地基土受到扰动, 防汛墙呈向上隆起变形, 最大变形位于跨中部位, 近 6.0 mm; 第 3 阶段为盾构隧道穿越之后, 受盾尾形成的空隙影响, 防汛墙再次沉降回落。第 2 阶段和第 3 阶段防汛墙沉降变形过程见图 10。从沉降监测数据显示, 盾构穿越前后, 防汛墙结构沉降均不大, 同一个点, 正负变形累计在 10 mm 左右。

由于该段防汛墙整体刚度较大, 隧道穿越后工后沉降总体呈均匀沉降, 在汛期防汛墙的运行未出现任何异常现象, 与相邻防汛墙间未出现明显的差异变形, 从完工至今约 1 a 时间, 绝对沉降量小于防汛墙建设期间的抛高量 50 mm, 对于防汛墙功能需求处于可接受的范围。

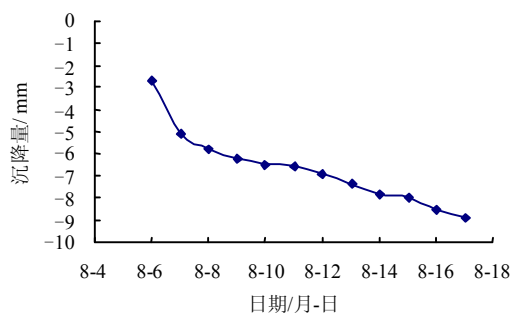


图 8 盾构穿越前防汛墙沉降监测图

Fig.8 monitoring settlement of the flood wall before shield tunnel

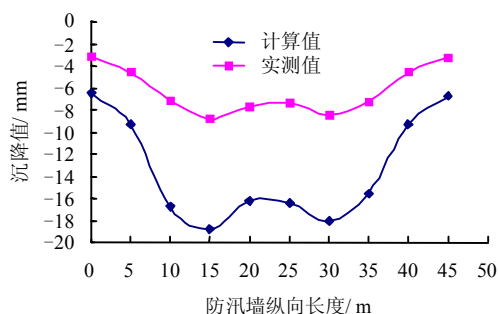


图 9 盾构穿越前防汛墙沉降计算值与实测值比较图

Fig.9 Comparison in results between calculated and practical settlement of the flood wall before shield tunnelling

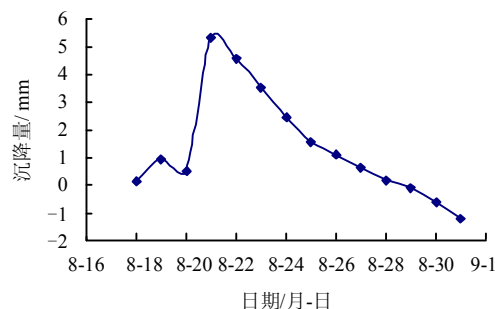


图 10 盾构穿越过程中防汛墙沉降监测图

Fig.10 monitoring settlement of the flood wall while shield tunnelling

5 结 论

上海轨道交通 11 号线穿越苏州河防汛墙, 结合隧道设计、施工工艺和防汛墙的特点, 采取了双跨门洞刚架结构型式对防汛墙进行加固改造, 该种结构型式能在保证防汛功能的基础上, 为盾构的穿越预留空间。通过对防汛墙的整体稳定、空间整体结构及盾构穿越对其的影响等方面进行分析, 结构内力和变形均在防汛墙可承受范围。对照监测数据的规律分析, 认为防汛墙的变形和盾构的穿越对其影响均处于可控状态。整体防汛墙计算沉降值与实测值较为接近。研究表明:

(1) 采用门洞式刚架结构型式在处理隧道与防汛墙之间的交叉矛盾问题是可行的、合理的。

(2) 从空间结构分析结果显示, 双跨门洞防汛墙结构型式不同于一般的防汛墙结构, 因此, 对于该种新结构采用三维数值模拟对结构进行分析是非常必要的, 能够得出更为合理的结果, 弥补传统计算方法的不足。

(3) 综合空间结构有限元分析软件和岩土有限元分析软件的计算结果, 针对第 1 类情况, 盾构穿越前或盾构穿越后土体固结变形完成后, 两者在总体受力性状和变形形态上的规律是一致的, 底板呈连续梁变形规律, 长桩桩身中部和短桩桩端呈向外侧扩张的趋势, 整个结构受力性状符合门洞式刚架结构的特性, 计算数值也在同一数量级, 从而提高了计算结果的可信度。针对第 2 类情况, 盾构掘进过程和盾构穿越后, 防汛墙桩基及盾构周边土体基本呈向隧道侧变形的规律, 长桩的变形形态类似于挠曲变形, 桩身最大变形位于隧道拱轴线附近, 短桩变形形态类似于刚体变形, 最大变形位于桩端。

参 考 文 献

- [1] 陈峰. 上海市轨道交通 11 号线隆德路—愚园路区间穿越苏州河防汛墙拔桩工程防汛安全影响咨询报告[R]. 上海: 上海市水利工程设计研究院, 2007.

- [2] 黄绍铭, 高大钊. 软土地基与地下工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 637—638.
- [3] 张凤祥, 朱合华, 付德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 878—882.
- [4] 魏纲, 裘新谷, 魏新江, 等. 邻近建筑物的暗挖隧道施工数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 547—552.
WEI Gang, QIU Xin-gu, WEI Xin-jiang, et al. Numerical simulation of underground excavated tunnel construction of adjacent structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 547—552.
- [5] ERIC LECA, ANIMATEUR. Settlements induced by tunneling in soft ground[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22: 119—149.
- [6] 魏纲. 盾构施工中土体损失引起的地面沉降预测[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2375—2379.
WEI Gang. Prediction of surface settlement induced by ground loss during shield tunneling construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2375—2379.
- [7] 孙钧. 城市环境土工学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005: 104—153.
- [8] 段光杰. 地铁隧道施工扰动对地表沉降和管线变形的影响的理论和方法研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- [9] CHENG C Y, ASARI G R, D, CHOW Y K, et al. Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22: 450—466.
- [10] 李宁, 王柱, 韩煊, 等. 地铁开挖对上部桩基变形的影响研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 107—111.
LI Ning, WANG Zhu, HAN Xuan, et al. Numerical study of subway tunneling-induced pile-foundation deformations[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(10): 107—111.
- [11] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1379—1383.
HUANG Mao-song, ZHANG Hong-bo, ZHAO Hong-bo. Analysis of pile responses caused by tunnelling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1379—1383.