



# 长江口穿越类工程 对航道规划整治建筑物的影响及措施

张贵宾<sup>1,2</sup>, 张绪进<sup>1</sup>, 王巍<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 交通运输部长江航务管理局, 湖北 武汉 420100;  
3. 上海河口海岸工程咨询有限公司, 上海 201201)

**摘要:** 以长江口重大穿越类工程——上海市天然气过江管工程为例, 研究了长江口水域穿越工程与规划航道整治建筑物的相互影响及相关工程措施。上海市天然气过江管工程与规划瑞丰沙整治工程、堡镇沙护滩工程平面相交, 隧道建设与规划整治建筑物的实施相互存在一定影响。为充分考虑上述影响, 做好相应安全防护, 同时确保不影响规划工程的实施, 有必要就本工程对南北港规划整治建筑物的影响及措施开展专题研究。采用比较成熟的  $\eta-\zeta$  法进行隧道结构的内力计算, 结果表明, 规划瑞丰沙整治工程、堡镇沙护滩工程引起的天然气过江管的变形超过变形控制标准, 需采取相应保护措施; 单独实施近期方案可消除规划堡镇沙护滩工程对隧道 A 线的影响, 但无法消除规划瑞丰沙整治工程对隧道 B 线的影响, 需在瑞丰沙整治工程建设时同步实施远期方案。

**关键词:** 长江口; 规划整治建筑物; 相互影响; 隧道; 保护措施

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0078-08

## Impact of crossing project on planned regulation buildings of waterway in Yangtze Estuary and protective measures

ZHANG Guibin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xujin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Changjiang River Administration of Navigational Affairs, MOT, Wuhan 420100, China;  
3. Shanghai Estuarine and Coastal Engineering Consultant Company, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** Taking Shanghai LNG pipeline project, the major crossing project of the Yangtze Estuary, as an example, the paper studies the interaction between the crossing project and the planned regulation buildings in the Yangtze Estuary and the relevant engineering measures. Shanghai LNG pipeline project intersects with the planned Ruifengsha regulation project and the Baozhen beach protection project, the tunnel construction will have a certain impact on each other. To fully consider the above impacts, prepare the corresponding safety protection, and ensure that the implementation of the planned project will not be affected, it is necessary to carry out a special study on the impact of the project on the planned renovation buildings of the North South Port and the measures to solve it. This paper uses the mature  $\eta-\zeta$  method to calculate the internal force of the tunnel structure. The results show that the deformation of the LNG pipeline project will exceed the control standard when the planned Ruifengsha regulation project and Baozhen beach protection project implement, and corresponding protective measures should be taken. It also shows that the short-term plan can eliminate the impact of the beach protection project in the planned Baozhen Town on the tunnel line A, but not the impact of the planned Ruifengsha regulation project on the tunnel line B. Therefore, the long-term plan should be implemented simultaneously during the construction of the Ruifengsha regulation project.

**Keywords:** Yangtze Estuary; planned regulation building; impact; tunnel; protective measures

收稿日期: 2022-12-23

作者简介: 张贵宾 (1985—), 博士, 工程师, 研究方向为航道治理工程技术、通航管理。

## 1 工程概况

随着沿江、沿海地区的经济社会发展和岸线开发,越来越多的水下穿越类工程与码头、锚地、停泊区、水上综合服务区等的间距问题越来越突出,可穿越空间越来越小。同时,随着穿越类工程的增加,不可避免出现对已建或规划工程存在影响的问题。对于如何解决此类突出矛盾问题,2020年修订的《长江干线通航标准(JTS 180-4—2020)》率先放宽了原禁止性要求,并提出对穿越类工程结构预先采取相应措施,避免对后期实施航道整治工程产生影响的解决方法。本文以上海市天然气主干管网崇明岛—长兴岛—浦东新区五号沟LNG站管道工程(以下简称“LNG过江管工程”)为例,通过研究提出切实可行的方案,旨在为类似穿越类工程提供参考。

LNG过江管工程是《上海市燃气发展“十二

五”规划》提出的重要工程,项目实施对崇明岛、长兴岛和浦东新区经济及市场发展、崇明燃气电厂安全供气、完善上海市天然气主干管网系统及长三角区域天然气的安全供应有着十分重要的意义,更能为崇明岛、长兴岛实现生态岛目标奠定基础。

LNG过江管自崇明岛南岸崇明清管站开始,沿G40沪陕高速敷设,经长兴岛至浦东新区G40、G1501立交向南,沿浦东新区G1501至规划巨峰路向东至五号沟LNG站,管道全长24.55 km(图1)。工程以隧道盾构方式穿越长江口北港和南港水域,隧道工程江中段总长约15.2 km,分为A、B两线。隧道A线穿越长江口北港,总长8.237 km,位于上海长江大桥东侧,与大桥基本平行;隧道B线穿越长江口南港,总长6.931 km,位于上海长江隧道西侧,与隧道基本平行<sup>[1-2]</sup>。

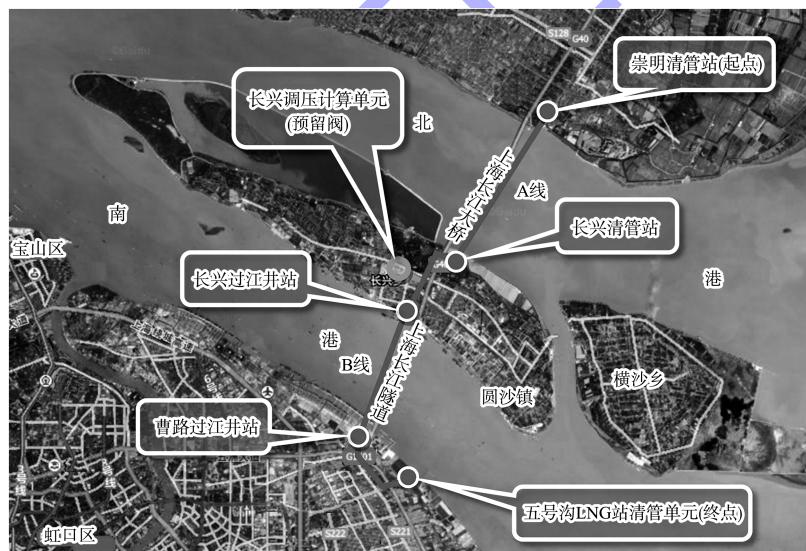


图1 LNG过江管工程路由走向

根据《长江口综合整治开发规划(2008)》和《长江口航道发展规划(2010)》,在南港、北港水域分别规划了瑞丰沙整治工程和堡镇沙护滩工程。LNG过江管工程穿越长江口南港和北港水域,分别与上述规划的航道整治工程平面相交,隧道建设与规划整治建筑物的实施相互存在一定影响。为充分考虑上述规划工程与LNG过江管工程相互之间的影响,做好相应安全防护,同时确保不影响规划工程的实施,有必要开展工程对南北港规

划整治建筑物的影响及措施研究。

## 2 长江口整治规划

### 2.1 长江口综合整治开发规划

为加强长江口整治开发、保护和管理,保障长江口地区经济社会的可持续发展,2008年3月,国务院批准了水利部上报的《长江口综合整治开发规划(2008)》。

从维护长兴岛涨潮沟及北槽进口水深的需要,

南港应稳定进口分流通道, 维持瑞丰沙沙体的完整, 保持主流偏靠南岸。规划提出了瑞丰沙整治工程方案<sup>[3]</sup>: 结合地形条件, 采取潜堤工程方式, 以维持一定的落潮漫滩流, 同时长兴岛串沟的上口不宜封闭, 以维持长兴岛涨潮槽现状分流态势; 堤线走向为上段基本沿-2 m 等高线布置, 堤顶高程为-2.0~0 m(吴淞基面), 长 27.5 km, 中间顺串沟中轴线至下沙体, 沿下沙体沙脊线往下延伸至沙尾。

为使北港形成上段主流偏北、下段主流偏南的微弯单一河道形态, 并稳定北港大桥主通航孔位置, 规划提出北港堡镇沙、外团结沙圈围并北岸的方案: 沿堡镇沙脊线布置至八滧, 八滧以下基本沿-5 m 等高线布置, 至团结沙港向东北转折与崇明东滩围堤相连。堡镇沙及外团结沙近期促淤圈围 4 300 万 m<sup>2</sup>, 堤线总长约 34.6 km。

## 2.2 长江口航道发展规划

《长江口航道发展规划》2010 年 8 月由交通运输部批复。该规划指出, “瑞丰沙治理工程、白茆

沙治理工程和扁担沙治理工程既是《长江口综合整治开发规划》中的河势控制工程, 也是相应河段航道开发利用的重要前提条件”。《长江口航道发展规划》从航道治理的角度提出北港航道治理的建设方案, 其中一项为堡镇沙护滩工程, 大体沿堡镇沙滩脊线布置。护滩堤沿堡镇沙沙脊线布置, 南侧等间距布置护滩齿坝, 护滩堤长度为 13.35 km(穿越长江大桥), 护滩齿坝长度为 350 m; 间距 1 600 m, 护滩潜堤和护滩齿坝厚 2 m<sup>[4]</sup>。

## 3 LNG 过江管与规划工程的位置关系

### 3.1 平面关系

根据《长江口综合整治开发规划(2008)》和《长江口航道发展规划(2010)》, 在南港、北港水域分别规划了瑞丰沙整治工程和堡镇沙护滩工程。LNG 过江管工程 B 线隧道在南港河段穿越瑞丰沙整治工程, A 线隧道在北港河段穿越堡镇沙护滩工程(图 2)。

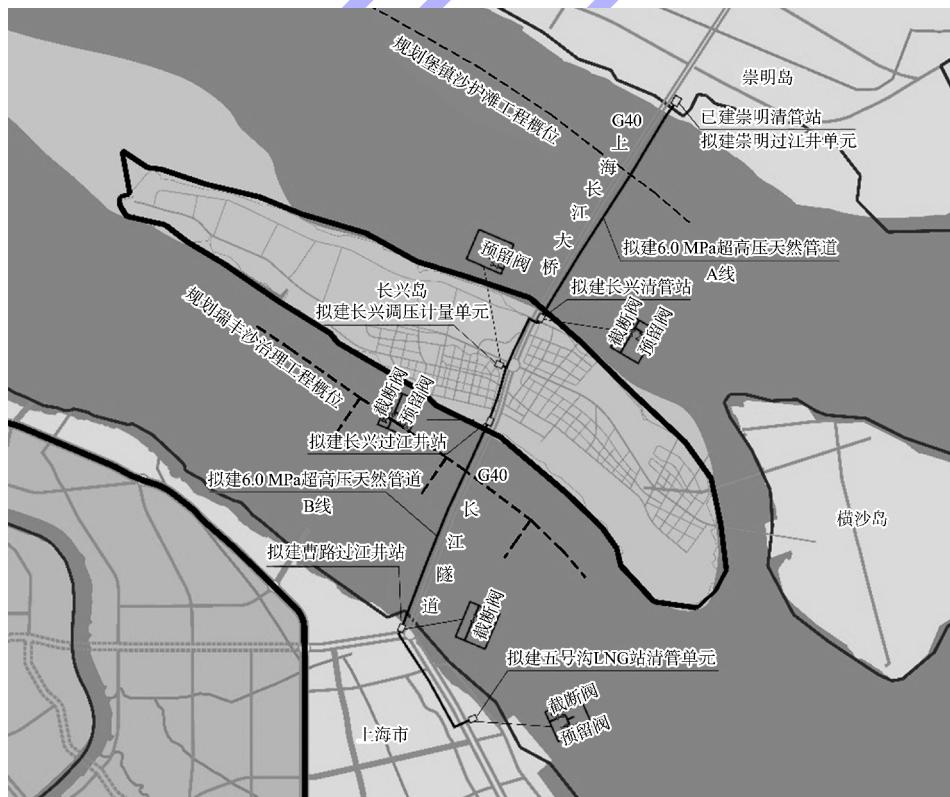


图 2 LNG 过江管工程隧道路由与规划工程平面位置关系

### 3.2 垂向关系

根据现行规划, 规划瑞丰沙工程位于 LNG 过江管工程 B 线隧道里程约 BK5+200—BK5+540 范围, 本区段隧道顶覆土约 12.5 m, 隧道主要位于④淤泥质黏土、⑤<sub>1-1</sub> 黏土, ⑤<sub>3-1</sub> 粉质黏土; 规划堡镇沙工程位于 LNG 过江管工程 A 线隧道里程约 AK6+500—AK6+800 范围, 本区段隧道顶覆土约 28.0 m, 隧道主要位于⑤<sub>1-1</sub> 黏土、⑤<sub>2</sub> 粉砂、⑤<sub>3-1</sub> 粉质黏土。

LNG 过江管工程与规划瑞丰沙、堡镇沙工程平面相交, 与规划瑞丰沙工程最小竖向间距 12.5 m, 与规划堡镇沙工程最小竖向间距 28.0 m, 见图 3。

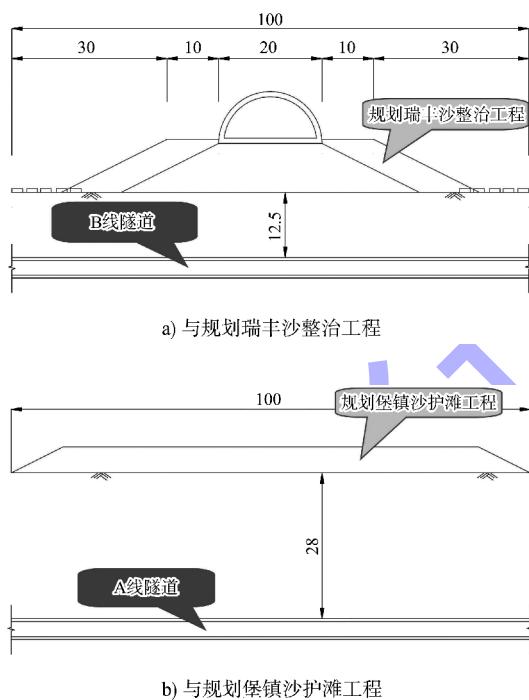


图 3 LNG 过江管与规划工程相对位置关系 (单位: m)

### 3.3 定性影响分析

从平面位置来看, LNG 过江管工程与规划瑞丰沙整治工程、规划堡镇沙护滩工程相交。从垂向位置来看, LNG 过江管工程埋置于规划瑞丰沙整治工程、规划堡镇沙护滩工程下方的土体内, 垂向上距上述工程底部距离均较近。规划瑞丰沙整治工程和堡镇沙护滩工程均为大型涉水构筑物, 将大幅增加作用在河床上方的荷载, 并通过土体传递至下方的 LNG 过江管工程, 对隧道结构内力

和变形产生影响。若隧道变形幅度超过控制标准, 将危及隧道的自身安全。

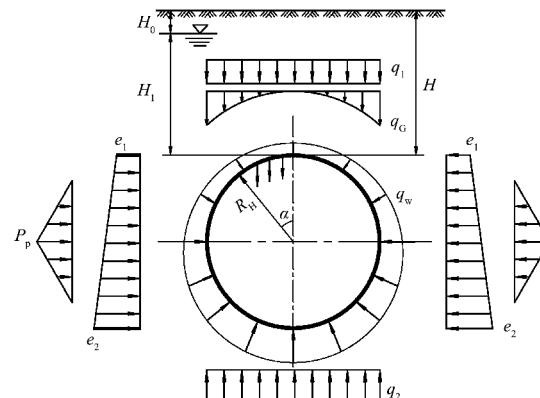
## 4 数值计算方法和条件

### 4.1 计算方法

针对隧道管片的力学特性计算, 国内外已有较多成熟的计算软件。如李春林等<sup>[5]</sup>、罗实等<sup>[6]</sup>采用有限元软件 ABAQUS 建立了盾构隧道数值计算模型, 诸岩<sup>[7]</sup>在 FLAC 3D 平台上对珠海市兴业快线东段隧道开挖支护全过程进行数值模拟等。本次设计采用本项目隧道设计方上海市隧道工程轨道交通设计研究院编制的“圆形衬砌环设计程序”(V1.0)软件进行计算。

衬砌环的内力计算采用自由变形的弹性均质环模型, 对错缝拼装的衬砌结构需考虑接头部位抗弯刚度的下降、环间剪切键等对隧道结构总体刚度的补强作用。依据设计资料和相关资料, 对结构整体或构件可能出现的最不利荷载组合进行结构强度、刚度计算和裂缝宽度验算。

本次计算采用比较成熟的  $\eta-\zeta$  法(惯用法)进行设计计算。衬砌受力分析见图 4。



注:  $H_0$  为地下水位至地面的距离;  $H$  为隧道顶部覆土厚度;  $q_1$  为隧道顶部的水土荷载;  $q_2$  为隧道底部的水反力;  $q_G$  为隧道自重力荷载;  $e_1$ 、 $e_2$  分别为隧道顶部、底部的侧向水土压力;  $P_p$  为地层抗力;  $q_w$  为衬砌环受力;  $R_H$  为管片计算半径。

图 4 衬砌受力分析

错缝拼装的衬砌结构必须考虑整体补强效果, 进行弯矩的重分配(图 5)。

衬砌环接头处内力:

$$M_{ji} = (1-\zeta) M_i \quad (N_{ji} = N_i) \quad (1)$$

相邻管片内力:

$$(N_{si} = N_i) M_{si} = (1 + \zeta) M_i \quad (2)$$

式中:  $\zeta$  为弯矩调整系数;  $M_i$ 、 $N_i$  分别为匀质圆环模型的计算弯矩和轴力;  $M_{ji}$ 、 $N_{ji}$  为调整后的接头弯矩和轴力;  $M_{si}$ 、 $N_{si}$  为调整后的相邻管片本体的弯矩和轴力。

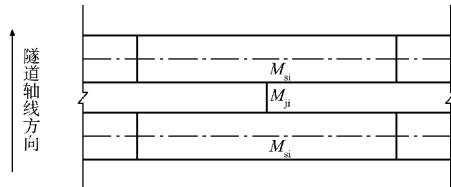


图 5 错缝拼装弯矩分配

#### 4.2 计算条件及变形控制标准

为确保安全, 规划工程对 LNG 过江管工程的荷载按《长江口综合整治开发规划》和《长江口航道发展规划》中的最大规模考虑。瑞丰沙整治工程按全线高程为-1.66 m(吴淞基面 0 m)考虑, 堡镇沙护滩工程按厚 2 m 方案考虑。

结合 2020 年工程局部地形, 拟按半圆体结构考虑, 规划瑞丰沙整治工程半圆体高度为 11 m, 宽 20 m, 两侧护肩块石铺设宽 40 m, 整治工程正中 20 m 范围内半圆体结构压载为 11 t/m<sup>2</sup>, 半圆体两侧各 20 m 范围内护肩块石铺结构荷载为 6 t/m<sup>2</sup>, 外侧混凝土连锁块荷载为 1 t/m<sup>2</sup>。荷载断面见图 6a)。

规划堡镇沙护滩工程堤身高 2 m, 宽 100 m, 拟按抛石堤结构考虑, 整治工程 100 m 范围内抛石堤结构荷载为 3.6 t/m<sup>2</sup>, 外侧混凝土连锁块压载为 1 t/m<sup>2</sup>。荷载断面见图 6b)。根据上海市工程建设规范 DG J08-11—2018《地基基础设计规范》第 12.5.8 节和《盾构隧道工程设计规范》第 7.4.2 节规定, 盾构法隧道结构衬砌结构按作用效应的准永久组合进行变形计算时, 其直径变形应  $\leq 3\%eD$  ( $D$  为隧道外径)。因此, 本工程按照计算直径变形  $\leq 3\%eD$  即 12 mm 的标准控制。

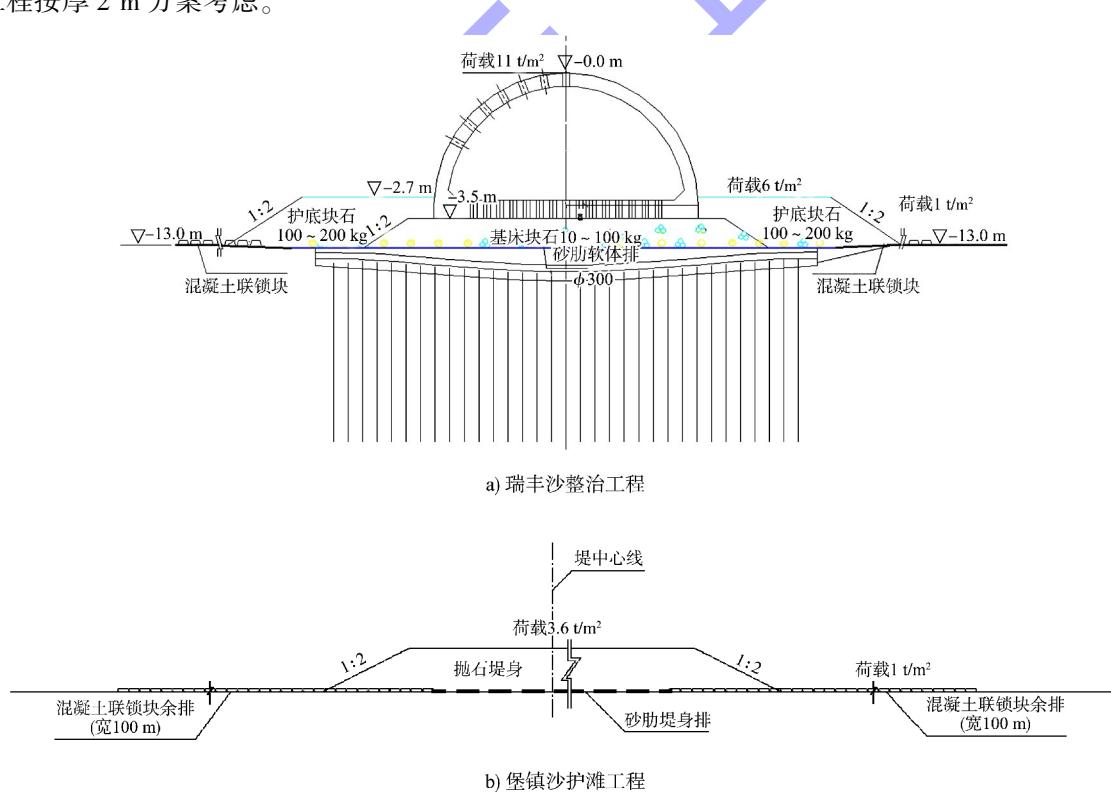


图 6 整治工程断面荷载

### 5 隧道内力计算结果

#### 5.1 不考虑规划整治工程

在不考虑规划整治工程的情况下, LNG 过江

管工程隧道结构内力计算结果如图 7 所示, 隧道结构的强度与刚度均满足规范要求。

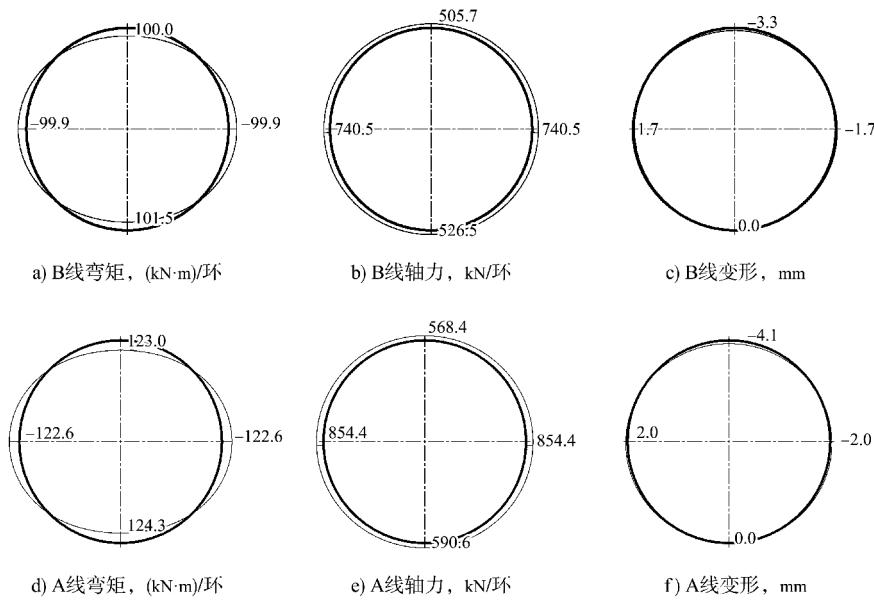


图7 不考虑规划整治工程的 LNG 过江管工程隧道结构内力计算结果

## 5.2 考虑规划整治工程

在考虑规划整治工程的情况下, LNG 过江管工程隧道结构内力计算结果如图 8 所示。通过以上计算, 规划堡镇沙护滩工程对于 LNG 过江管工

程 A 线隧道的变形影响为-12.2 mm, 略超过变形控制标准(12 mm); 而规划瑞丰沙整治工程对于 LNG 过江管工程 B 线隧道的变形影响为-15.3 mm, 大幅超过变形控制标准。

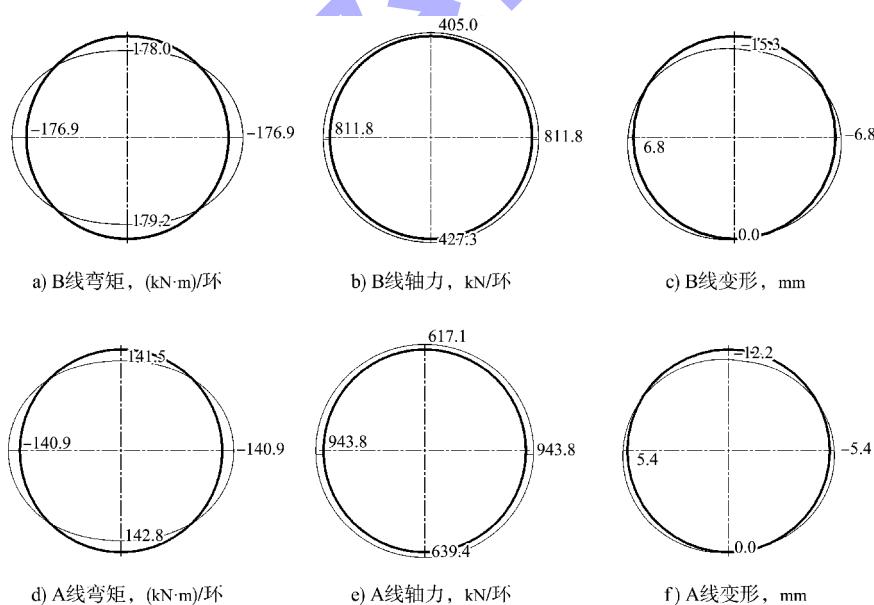


图8 考虑规划整治工程的 LNG 过江管工程隧道结构内力计算结果

## 6 隧道保护方案及效果

### 6.1 近期方案

近期方案在 LNG 过江管工程实施时, 对工程与整治工程平面交叉范围的隧道结构作特殊处理。

增设注浆管管片, 使交叉范围的隧道管片预留注浆孔的数量由 6 个增加到 16 个(图 9), 进行洞内预注浆加固。

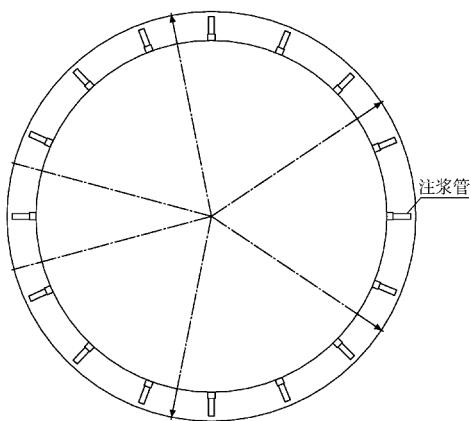


图 9 增设注浆管布置

采取洞内预注浆加固措施后, 规划瑞丰沙整治工程对于 LNG 过江管工程 B 线隧道在隧道衬砌

受力和收敛变形见图 10a)~c), 从图 10 与图 8 的计算对比来看, 隧道内力无明显改善; 隧道收敛变形有一定的改善, 加固后最大变形由原先的 -15.3 mm 减小至 -13.9 mm, 仍大于 12 mm。因此对于南港河段而言, 单独近期方案不能消除未来瑞丰沙整治工程对于隧道 B 线的影响。

对于北港规划堡镇沙护滩工程来说, 采取洞内预注浆加固措施后, LNG 过江管工程 A 线隧道的受力及变形计算见图 10d)~f)。从图 10 与图 8 的计算对比来看, 加固后最大变形由原先的 -12.2 mm 减小至 -10.1 mm, 小于 12 mm。因此对于北港河段而言, 单独近期方案即可消除未来整治工程对于隧道 A 线的影响。

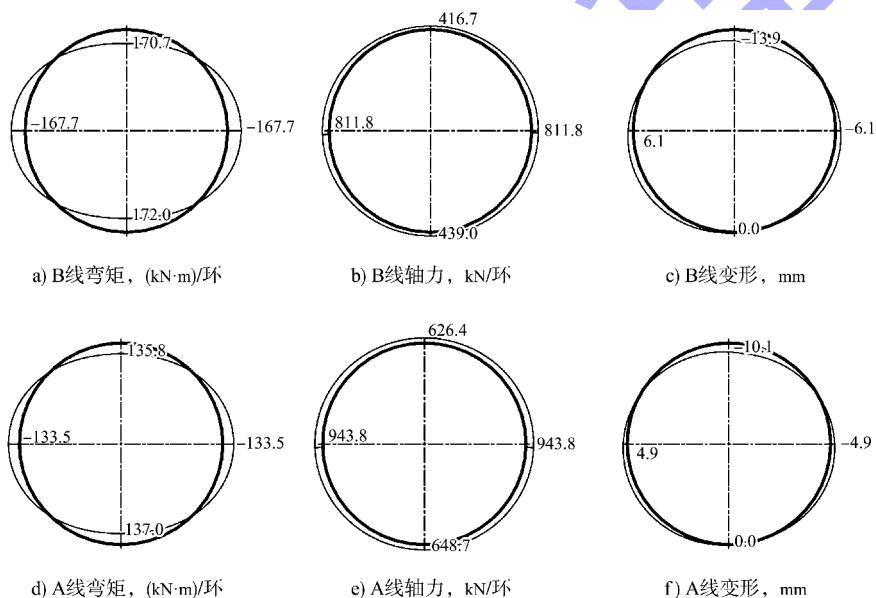


图 10 近期方案的 LNG 过江管隧道结构内力计算结果

## 6.2 远期方案

如果后期实施规划瑞丰沙整治工程, 为保证 LNG 过江管隧道在规划工程实施后的位移变形在可控范围内, 且同时保证航道规划工程、管道隧道工程及保护工程自身三者的结构稳定和安全, 拟在隧道穿越节点处进行保护方案设计, 主要设计思路为“卸荷”和“改善隧道上部土体物理力学性能”。具体技术方案为: 在隧道两侧 5 m 处各新建灌注桩 1 排。灌注桩直径 1.2 m, 桩长暂定

30 m, 桩间距 2.5 m。在两排桩之间底板下土体 8 m 范围内进行搅拌桩加固土体, 桩顶支承基础底板, 底板为钢筋混凝土梁板式结构, 底板设置主次梁, 附加荷载通过底板、次梁、主梁最后传递到灌注桩上, 从而避免隧道周边土体的变形。基础底板长 17.16 m, 为便于吊装, 底板宽度一般为 12 m, 可根据后期航道工程确定的尺寸进行合理分割, 确定基础底板的数量。隧道穿越保护工程远期方案的平面与断面见图 11。

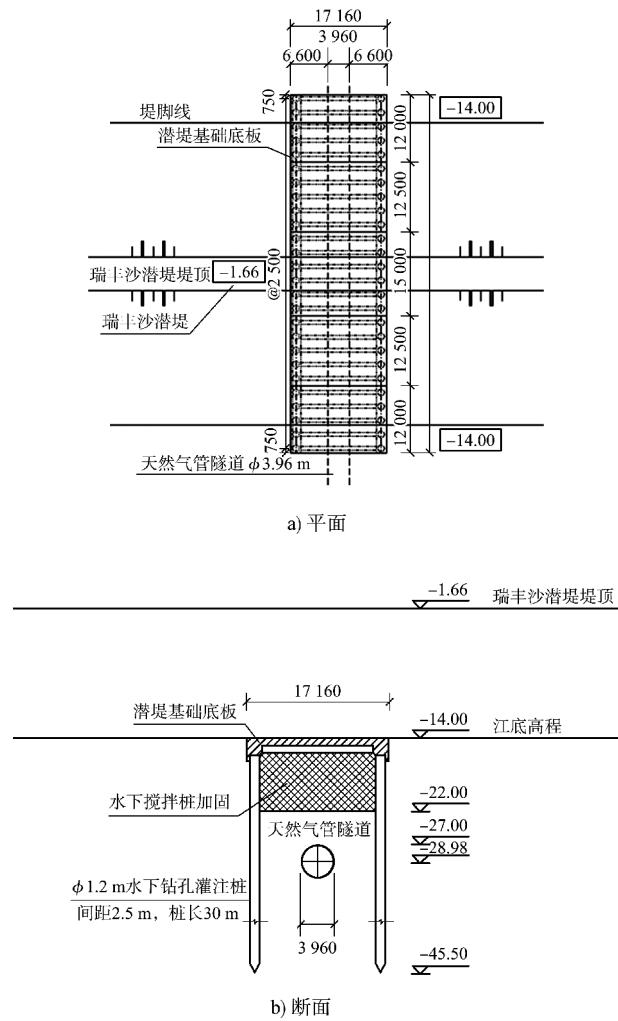


图 11 隧道穿越保护工程远期方案 (高程: m; 尺寸: mm)

## 7 结论

1) 规划瑞丰沙整治工程、堡镇沙护滩工程的实施增加了 LNG 过江管工程上方土体的荷载, 对隧道结构应力及变形产生较大影响。

2) 近期通过增设注浆管片, 进行预注浆加固, 一方面增强了隧道局部结构强度, 减少隧道变形; 另一方面为实施远期方案提供基础条件。

3) 远期通过实施灌注桩及搅拌桩加固土体等措施, 转移隧道上部新增荷载并改善土体物理力学性能, 从而减少隧道变形。

4) 通过近期、远期方案的防护措施, 可有效消除规划工程对 LNG 过江管隧道变形的影响。

5) 随着穿越类工程的增加,工程建设对规划航道整治工程影响的问题越来越突出。本文为解决类似问题提供了一个重要且可行的方案,未来随着我国海洋水下工程技术的发展,有望提出更多的技术方案。

### 参考文献：

- [1] 上海河口海岸工程勘测设计有限公司. 上海市天然气主干管网崇明岛-长兴岛-浦东新区五号沟 LNG 站管道工程航道通航条件影响评价报告[R]. 上海: 上海河口海岸工程勘测设计有限公司, 2021.
- [2] 上海河口海岸工程勘测设计有限公司. 上海市天然气主干管网崇明岛-长兴岛-浦东新区五号沟 LNG 站管道工程对南港、北港规划整治建筑物的影响及措施专题论证[R]. 上海: 上海河口海岸工程勘测设计有限公司, 2021.
- [3] 水利部长江水利委员会. 长江口综合整治开发规划报告[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2008.
- [4] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口航道发展规划[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2010.
- [5] 李春林, 张西文, 刘广森, 等. 循环荷载作用下大直径盾构隧道力学变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 47-53.
- [6] 罗实, 张君臣, 晏启祥, 等. 压弯荷载作用下带有定位榫盾构隧道管片接缝的力学特性[J]. 铁道建筑, 2022, 62(9): 111-115.
- [7] 诸岩. 多孔小净距隧道施工力学特性数值模拟与现场实测研究[J]. 公路与汽运, 2022(3): 139-143.

(本文编辑 王传瑜)

## 征订通知

2024年《水运工程》杂志征订工作已经开始,请登录《水运工程》杂志官方网站www.sygc.com.cn首页下载中心下载“2024年《水运工程》征订通知单”,有关要求和反馈信息一应俱全。

《水运工程》编辑部