

甬舟铁路海底隧道穿越金塘水道埋深尺度论证



张 鹏, 胡家顺, 谭 凤, 唐 敏

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 宁波至舟山铁路(简称“甬舟铁路”)是舟山融入国家快速铁路网的重要纽带, 其穿越金塘水道的隧道线位面临超大自然水深、局部极限冲刷、大型船舶通航及锚泊落锚和拖锚带来的埋设环境风险。综合梳理金塘水道现状通航条件和锚地锚泊条件, 开展了历史海岸演变、极限冲淤分析、落锚及拖锚的锚击深度等专题研究, 提出了甬舟铁路隧道穿越金塘水道的局部最小埋设深度和沿程埋设尺度要求, 为我国最长海底铁路隧道的建设可行性提供了重要的技术支撑。

关键词: 甬舟铁路; 海底隧道; 金塘水道; 极限冲刷; 埋深

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0048-06

Argument of buried depth of the submarine tunnel of Yongzhou Railway passing through Jintang waterway

ZHANG Peng, HU Jia-shun, TAN Feng, TANG Min

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The Yongzhou Railway from Ningbo to Zhoushan is an important link for Zhoushan to integrate into the national high-speed railway networks. The tunnel line through the Jintang waterway faces the buried environmental risks caused by the excessive natural water depth, local limit scour, anchor dropping, or dragging of large ships during navigation and mooring. The paper has comprehensively combed the current navigation conditions and anchorage conditions of the Jintang waterway, and carried out special studies on historical coast evolution, limit erosion and deposition analysis, anchor drop and towed anchor strike depth, etc. The study has proposed the local minimum buried depth and the along with requirement the buried dimension of the Yongzhou Railway tunnel passing through the Jintang waterway, which has provided important technical support for the longest undersea rail tunnel construction in our country.

Keywords: the Yong-Zhou Railway; undersea tunnel; the Jintang waterway; limit scour; buried depth

新建宁波至舟山铁路(简称“甬舟铁路”)位于浙江省东部沿海地区, 西起宁波枢纽宁波东站, 经宁波市鄞州区、北仑区, 至舟山市金塘岛、册子岛及本岛, 终于定海区白泉镇, 总长约 45.0 km。

宁波舟山港是我国综合立体交通运输体系的重要枢纽, 在我国经济发展中具有重要的战略地位。甬舟铁路跨越的宁波舟山港中部港域港区众多、航路交错、船型多样、运输繁忙, 是宁波舟山港最核心的水域之一, 通航条件和通航环境均十分复杂。

为满足甬舟铁路建设要求, 同时保障通道工程周边港口、水运相关企业正常生产运营和船舶通航安全, 经多轮论证, 线位位于金塘水道采用海底隧道方式全程穿越。

金塘水道形态独特, 总体呈现大水深、急流速、软底质、海床演变较剧烈的特点, 为保证高铁隧道建设和运营的安全稳定, 科学分析隧道埋深影响因素、准确判别控制要素、合理确定隧道埋设尺度就显得极为重要。



图 1 线位选址平面示意

1 甬舟铁路穿越金塘水道通航环境

1.1 线位路由

甬舟铁路于金塘水道段为隧道形式穿越, 线路于北仑西作业区进入金塘水道, 在金塘水道北部敷设, 角部下穿七里锚地、金塘西锚地后至规划木岙作业区南侧登陆, 随后线路折向北进入规划金塘站。越海铁路隧道长约 16.06 km, 海中段线路长 8.39 km, 海中最大水深约 38.7 m^[1]。

1.2 海域地形及水流条件

金塘水道海域海底地形总体上为东低西高, 金塘水道窄而深, 平均高程-50 m, 底部剖面呈中部低、两端高的马鞍形态, 中部最低高程可达-110 m。出金塘水道后, 沿西北方向海床渐渐抬高, 至甬江口一带, 底高程尚有-30~-20 m, 至灰鳖洋水域宽阔平坦, 高程仅-10~-5 m, 深水区窄小, 且紧贴在大鹏山边缘, -10 m 以下的宽度约 3 km^[2]。

隧道沿线海域水下地形地貌主要有潮流冲刷槽、水道边坡、水下浅滩, 冲淤变换的潮流脊槽及沙波群(图 2)。

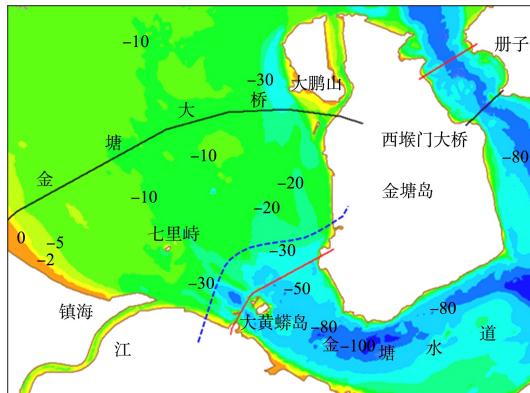


图 2 金塘水道水下地形分布 (高程: m)

受金塘水道及其本身喇叭形边界制约, 涨潮流向呈放射状, 落潮流向呈辐聚状。涨落潮流基本呈往复流, 呈西北—东南走向, 涨、落急时刻水流流速强劲, 大潮涨、落潮垂线平均最大流速分别为 2.2 m/s 和 2.0 m/s。

1.3 船舶交通流量及船型分布

隧道沿程穿越金塘水道北部核心水域, 根据 2016—2017 年船舶 AIS 统计, 金塘水道船舶交通呈现码头布点多、船流密度极大、主干航路集中、支线航路略散乱的总体分布特点(图 3)。

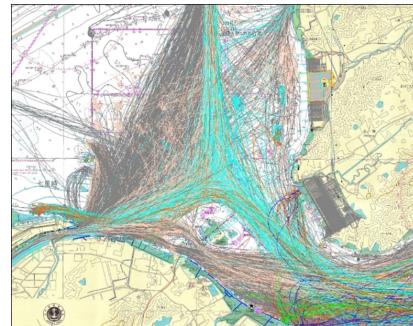


图 3 金塘水道总体船舶交通流 AIS 轨迹

金塘水道船舶流量年均约 10 万艘次, 其中主要为货运船舶, 占比 88.7%, 以散杂货船、集装箱船和危险品船(油气化工类)为主。

表 1 金塘水道涉航水域分船种船舶流量

船舶	船舶流量/艘次	占比/%
船舶总数	100 000	100.0
普通货船	58 000	58.0
集装箱船	22 500	22.5
危险品船	8 200	8.2
渔船	5 600	5.6
工作船	4 100	4.1
工程船	1 530	1.5
客船	70	0.1

经分析,金塘水道北段通航代表船型为10万吨级油船和散货船。

2 隧道埋深尺度要求

JTS 180-3—2018《海轮航道通航标准》^[3]关于穿越航道设施的埋设和尺度做出了总体要求。在此基础上,结合本项目隧道沿程区域的现状水深、水流和通航条件,隧道埋设深度的确定需重点关注以下几个核心影响因素^[4]:

1)航路和航道、锚地水域规划水深。隧道沿程主要涉航的航路和航道为金塘水道第6分道通航带、镇海港区、甬江港区、北仑港区西作业区航路、金塘港区规划木岙作业区航路,涉航锚地有七里锚地、金塘西锚地(图4)。



图4 金塘水道北侧航路/航道、锚地分布

2)航道、锚地维护性疏浚超挖深度可按区域常规维护设备能力考虑。

3)铁路隧道沿程水域考虑自然条件下的最大自然水深,若超过规划水深则按自然水深计。

4)应根据海床历史演变和近期演变,论证海域冲刷规律,预判隧道使用期内最大冲刷包络深度。

5)应在极限冲刷条件下,计算隧道沿程涉航水域上通航代表船型在应急工况下的落锚和拖锚深度。

6)根据隧道性质,预留适当的安全富余,且

不小于最大锚击深度。

3 金塘水道隧道埋深限制因素分析

3.1 航路/航道、锚地水域规划/最大自然水深

航路和航道:进甬江口、镇海和北仑西航路水深10~20 m,为5万吨级双向通航,且须满足10万吨级油船乘潮通航;金塘水道北段水深10~20 m,满足5万吨级船舶乘潮或正常通航需要,南段较深,约16~30 m。

锚地:七里锚地水深7~12 m,满足5 000吨级及以下船舶引航、待泊、避风需要;金塘西锚地水深16~20 m,满足3.5万吨级及以下船舶引航、待泊、避风需要;木岙作业区规划调整后为5万~7万吨级通用码头,港池水深暂定17 m。

除航路和航道、锚地之外的水域,大部分均为自然水深,均按隧道沿程近年海图最低点计算。

3.2 航道、锚地维护性疏浚超挖深度

隧道沿程水域条件均为自然水深,现阶段不需要额外疏浚和维护,未来若因回淤导致需要开展疏浚工程,根据周边工程实施经验,航道维护性疏浚超挖深度可取0.5~0.7 m。

3.3 隧道沿程海床冲淤演变最大冲刷深度

3.3.1 隧道周边海床整体冲淤特征

根据1928—2002年工程海域历史海床演变情况,隧道周边海床总体稳定,但近年来受人类活动影响造成局部区域地形变化较大,尤其是杭州湾南岸岸线2002年以来逐步形成,故以2002—2017年地形变化分析为主是合适的。

根据冲淤对比,2002—2017年隧道断面海床在南侧边滩至中门柱岛位置基本为淤积为主,淤积幅度可达10 m,蛟门水道向西出口位置及西北较大范围的区域总体为冲刷,其中蛟门水道出口处冲刷幅度最大为10 m,近金塘岛边滩有所淤积,淤积幅度2 m左右。在2002—2017年这15 a内,蛟门水道出口的冲刷主要发生在2002—2011年这9 a内,该阶段最大冲刷15 m左右(图5),在2011—2017年则回淤大约5 m,且冲刷中心出现了偏移(图6)。

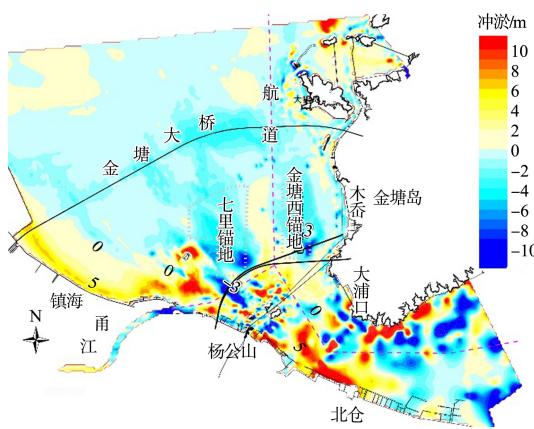


图 5 2002—2011 年工程海域冲淤变化

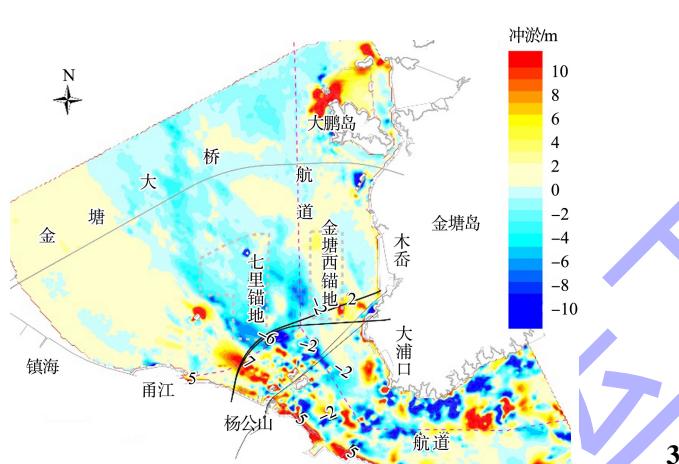


图 6 2011—2017 年工程海域冲淤变化

3.3.2 隧道走线断面对比和包络线

隧道于金塘水道西出口海域断面展宽, 沟槽位置受中门柱与黄麟岛水流控制, 水下浅滩和槽脊区域流态相对杂乱, 流态相对变化较大。

2002 年以来, 蛟门水道深槽以西的边滩淤积明显, 造成深槽水流向东北方向偏移调整, 隧道断面最深点不断刷深, 深槽向东摆动, 深槽最深点由 2002 年的-37.5 m 冲刷至 2011 年的-44.8 m, 冲刷达 7.3 m。至 2011 年达最深后逐渐开始回淤, 同期深槽最深点不断向东北方向偏移, 2015 年之后位置基本稳定, 至 2017 年最深点已回淤至-39 m。金塘侧边滩地形相对稳定, 多年来地形变化不大, 且基本以岸线外推造成地形微淤为主的趋势。

综上, 隧道在金塘主水道段的冲刷以 2017 年为历年最低。

隧道断面特征点的高程和冲淤速率变化见

表 2, 南深槽的基本特征是阶段性冲刷、冲刷速率减慢、基本平稳, 金塘潮流通道的基本特征是基本稳定、略有冲刷。隧道断面各测次水下地形及其上、下包络线见图 7。

表 2 海底隧道南深槽和金塘潮流通道冲刷变化

年份	南深槽		金塘潮流通道	
	平面位置/m	最深点高程/m	平面位置/m	最深点高程/m
2002	1 292	-37.0	4 572	-29.0
2011	1 496	-45.0	4 702	-29.0
2015	1 461~1 820	<-35.0	4 342	-31.0
2017	1 592	-40.0	4 443	-31.4

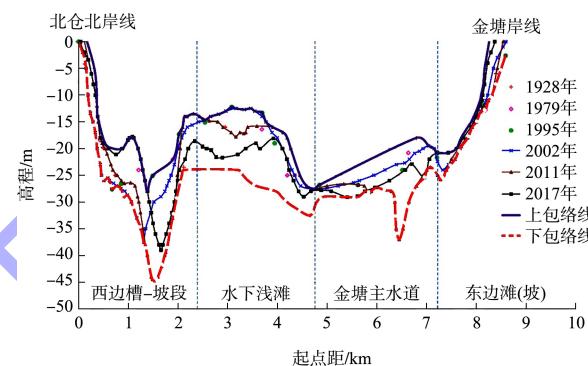


图 7 铁路隧道断面历次水下地形及上、下包络线

3.4 隧道沿程上方船舶落锚、拖锚的锚击深度

3.4.1 代表船型和锚型选取

隧道上方因船舶应急或事故造成的船锚掉落, 碰击土层并施行造成的贯穿也是隧道埋设需要考虑的重要因素。

隧道段通航代表船型为 10 万吨级油船和散货船。据调研, 工程区现有船舶大部分采用霍尔锚或其改进型, 本研究采用霍尔锚作为代表锚型, 见图 8。

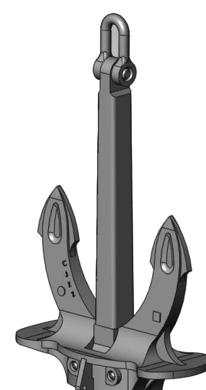


图 8 霍尔锚型

3.4.2 船舶落锚后贯穿量

关于船舶落锚后的入土贯穿量，国际上并无统一算法，本研究采用经验算法、Young 理论公式法、规范参考算法和有限元方法进行对比计算^[5]。

1) 经验算法是指根据相关工程经验，锚的贯穿深度与锚爪长度的倍数、不同底质条件存在相关关系。一般锚在泥、软淤泥及黏土中贯穿深度最大为 5 倍锚爪长度，平均值为 4.125 倍锚爪长度。

2) Young 公式法则是根据 1997 年 Young 的《侵彻公式》提出的物体贯穿土壤深度计算公式计算。

$$D = 0.0077 S(m/A)^{0.7} \ln(1 + 2.5v_2^2 \times 10^{-4}) \quad (1)$$

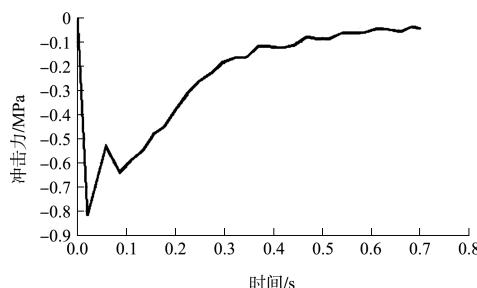
式中： D 为贯穿深度 (m)； S 为土壤系数； m 为锚质量 (kg)； v_2 为锚接触土壤时的速度 (m/s)； A 为物体的横截面积 (m^2)。

3) 参考 GB 50217—2007《电力工程电缆设计标准》对通航水域海底电缆的埋设深度要求，锚入水深度随锚质量变化的关系为：

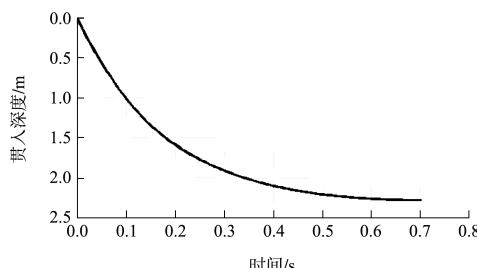
$$Y = -0.0054X^2 + 0.3064X + 0.6389 \quad (2)$$

式中： Y 为水深 (m)； X 为锚质量 (t)。

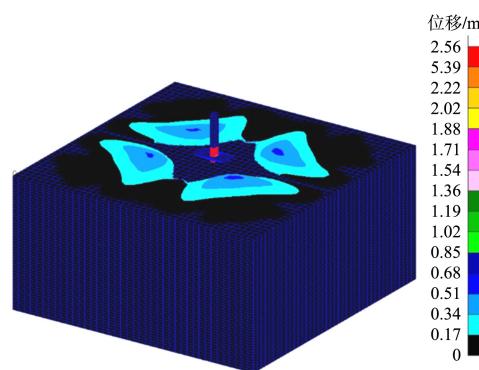
4) 有限元法是近年来运用愈渐成熟的方法，通过创建霍尔锚和海床模型，对落锚冲力、落锚速度、能量变化和贯穿深度进行模拟。隧道沿程中段典型落点在 0.8 MPa 落锚冲击压强下的落锚响应见图 9。



a) 落锚冲击力随时间变化曲线



b) 贯入深度变化时程曲线



c) 0.7 s时刻位移响应云图

图 9 隧道沿程中段典型落点落锚响应

综合上述方法，对船舶极限工况下的落锚进行分析计算，对比结果见表 3。

表 3 落锚贯入量

船型 DWT	锚质量/t	触底 速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	贯入量/m			
			经验 算法	理论 公式	参考 算法	有限 元法
5 万	8.3	11.24	3.16	1.39	2.81	1.49
8 万	11.1	12.28	3.42	1.77	3.37	1.89
10 万	14.7	12.54	4.44	1.96	3.98	2.35

经验算法仅考虑估算比例关系，没有考虑项目的地质、水深、船型等情况，适用性较差；Young 公式算法虽考虑了速度、工程地质、水深、锚质量等因素，但是在工程地质的参数选取上针对性较差，无法具体描述工程实际地质情况，结果仅供参考；电力规范的方法因仅针对电缆，适用性不足；有限元方法充分考虑本项目的地质、水深、船型等情况，模拟锚贯入海床的整个动力过程，能够较好地反映工程地质下的冲击过程，结果更具有针对性和适用性。

经分析，极限冲刷工况下，10 万吨级船舶隧道上方最大落锚贯穿深度为 2.35 m，拖锚贯穿深度为 2.17 m。非极限冲刷工况下，上述贯穿深度宜增加表层未扰动淤泥层厚度约 0.8 m。

3.4.3 国外相关研究类比

关于锚贯穿深度，国内外也进行了相似研究。

国外海底管道理论^[6]认为，常规条件下 5 000 t 船落锚入深度可取 1 m，2 万 t 船可取 1.7 m，5 万 t 船可取 2.0 m。

1975 年，日本相关研究人员进行了投锚试验，

采用锚型为霍尔锚, 锚质量 4.0~22.0 t, 落锚最大贯入量不大于 5.0 m。

2013 年, 德国联邦水运工程研究所开展实船拖锚贯入量测试。采用约 11.7 t 霍尔锚型, 地质为松散层粉细砂, 测试最大贯入量 0.88 m。

港珠澳大桥工程前期对舟山、青岛和大连引水部门开展了调研咨询工作, 对 10 万吨级以上船舶, 建议的安全锚击深度取 3 m^[7]。

综合分析, 本工程取极限锚击深度为 3 m。

3.5 安全富余深度

综合相关要求, 考虑本工程海域有危险品船舶的通行, 安全富余深度取为 3 m, 与极限锚击深度等同。

4 海底隧道穿越金塘水道埋深尺度的确定

研究表明, 极限工况是隧道埋设尺度的核心控制工况, 而隧道极限冲刷深度和安全富余深度

则是核心控制工况下的两大核心控制因素。因此, 隧道结构顶部最大高程应按极限工况下“隧道沿线最大冲刷高程-安全富余深度”控制。

据此, 隧道沿程存在两处较大幅冲刷区, 一处近北仑侧岸线, 距北仑岸侧约 1 544 m, 极限冲刷控制高程 -55.7 m, 隧道结构顶高程不应高于 -58.7 m; 另一处近金塘岛侧, 距北仑岸线 6 955 m, 极限冲刷控制高程 -44.6 m, 隧道结构顶高程不应高于 -47.6 m。见图 10。

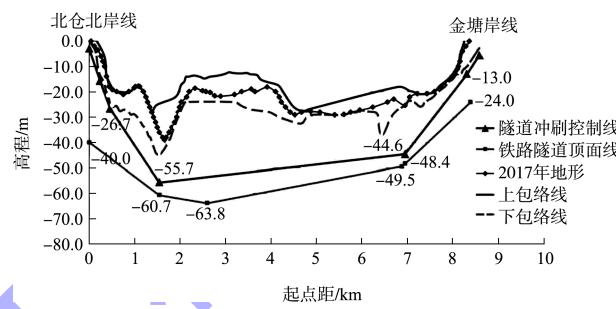


图 10 铁路隧道断面冲刷控制线

表 4 隧道工程埋设深度适应性评价

最大冲刷控制点	距北仑岸线距离/m	极限冲刷高程/m	隧道结构顶最大高程/m	隧道结构顶设计高程/m	埋设深度适应性评价
I	1 544	-55.7	-58.7	-60.7	满足
II	6 955	-44.6	-47.6	-48.4	满足

根据金塘水道铁路隧道埋深尺度的适应性评价(表 4)可知, 仅从埋设尺度的角度, 铁路隧道埋深已能够满足未来可能使用其上航道或锚地的船舶通航要求, 以及线位沿程在极限冲刷和落锚情况下的结构埋设深度安全要求。在此基础上, 隧道埋深尚应满足隧道本身结构设计的要求。

5 结语

1) 在开敞海域中穿越的隧道, 其埋深尺度的影响因素多、受影响大, 对于重要的隧道, 在满足现行规范基础上, 宜对各相关影响因素进行逐项分析论证, 分清主次, 确定核心控制工况和参数。

2) 对于海床演变较为剧烈的海域, 一般极限冲刷是隧道埋深的核心控制要素, 应充分搜集和分析海域海床历时演变和近期演变规律, 从整体和局部两个层次归纳总结演变规律, 并结合海域周边人类活动和工程建设, 综合预测未来演变趋势, 确保隧道埋设于预测冲淤变化地层之下。

3) 对船舶应急落锚影响, 也是隧道埋设尺度的重要影响因素, 一般应结合海域沿线底质条件, 按不利工况组合的可接受风险概率, 分别确定常规条件和不利条件的贯入深度。

4)《海轮航道通航标准》提出, 穿越航道建筑物、构筑物应避开锚地。但在工程隧道选址中, 有时不可避免需要穿越锚地水域。本研究认为, 穿越航道建筑物、构筑物的所谓避开锚地水域系指工程在水平、垂向两个方向能够保障设施的安全使用, 但非必要同时满足。若其在客观上无法满足平面尺度上的“避开”要求时, 应转换论证其在垂向尺度上对锚地和港口永久水工结构物的影响程度, 并据此做出分析结论。若隧道垂向埋深远超规范安全要求, 则理论上可认为线位在垂向空间上等效“避开”。这将对我国未来更多的大型越海工程通航评价带来较大的实践指导意义。