

内河沉管隧道干坞选择形式的探讨

范国刚¹, 贺维国¹, 沈永芳²

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津市 300133; 2. 上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司)

摘要: 内河相比于海洋环境,河道窄、水深浅,流速大、航运密集、水位落差大,同时城市中心地带建筑物密集,河道上的桥梁限制了大型水上作业设备的使用,给沉管隧道建设带来许多难题。该文结合建设环境、沉管隧道规模、管段结构类型等,分析了轴线、旁建、分离、移动和工厂化干坞的适应性,并给出相应工程案例,建立了基于内河复杂环境条件下的沉管隧道干坞选择方法。

关键词: 内河; 沉管隧道; 干坞; 形式选择

中国江河众多,水系发达,内陆河流总长达43万km,长度在1000km以上的河流20多条。中国国内人口超过100万的城市超过100座,其中98%以上都是依江而建,靠河而兴,但河流也将城市分割,使得江河两岸道路骨架不连,一定程度上制约了城市整体交通路网的形成和经济快速发展。水下隧道具有全天候、大运量、交通快捷、对航运及环境影响小的特点,是有效连通城市两岸道路的主要方式之一。水下隧道工法主要有矿山法、盾构法、沉管法等。沉管法隧道是将预制好的管段通过浮运、沉放、水下对接后贯通形成整个隧道,其顶部覆土浅、隧道长度短、与水域两岸道路衔接更灵活,可大大节约中心城区土地资源,是城市修建内河水下隧道的主要方法之一。

世界上第一座沉管隧道是1910年建于美国底特律河的水下双线铁路隧道。中国大陆于1993年建成了第一座沉管隧道,截至目前已建和在建的沉管隧道近20座,另有10多座内陆城市计划建设沉管隧道。沉管隧道干坞是用于管段预制的场地,管段需在干坞内预制、存放、舾装,然后浮运至指定位置对接。虽然干坞属于临时结构,但其形式、规模和位置也直接影响工程造价、管段浮运方式,甚至决定隧道方案是否可行,故选择合适的干坞形式对沉管隧道工程意义重大。

1 内河沉管隧道特点

国内外已建沉管隧道基本都位于海湾或江河入海

口等海洋环境。相比海洋环境,城市内河修建沉管隧道具有如下主要特点:①河道窄、水深浅、径向流速大、航运密集、水位落差大;②已建成连接城市两岸道路的跨河桥梁密集,河道通航尺度有限,从而限制了大型水上作业设备在管段浮运和沉放施工中的使用;③城市核心区河道两岸土地资源紧缺,高大建构筑物密集,而沉管管段体积庞大,合适的批量管段预制场地(干坞)选择困难。

上述复杂的环境条件都制约着沉管隧道干坞在城市内河的形式。

2 干坞类型、选择原则与坞底标高

2.1 干坞类型

根据管段预制场地和预制方式的不同,可把沉管隧道干坞分为固定干坞、移动干坞和工厂化干坞3类。

固定干坞通常是在陆地上开挖大型基坑,在基坑内进行管段预制,可兼用于舾装、起浮、系泊。根据干坞与隧道的位置关系,又可分为轴线干坞、旁建干坞和独立干坞。独立干坞根据大基坑内预制管节的小基坑数量又可分单子坞和双(多)子坞。

移动干坞是利用码头作为隧道工区用地,在大型半潜驳船上进行的管段预制,后期驳船也兼做管段浮运、舾装的载体。

工厂化干坞是在室内固定位置完成钢筋绑扎与移动、模板支立、混凝土浇筑与养护等工序,通过对达到

一定强度的节段顶推平移实现下一个增量匹配节段的循环作业,多次循环,完成一节管段制作。虽然工厂化干坞也在陆地预制管段,但它的设计理念、设计与常规的固定干坞有本质区别,因此,该文沿用传统的分类方法,把工厂化干坞作为单独的一种干坞类型。

2.2 干坞选择原则

(1) 干坞位置、规模及类型应结合工程周边地面环境(建构筑物、交通与材料来源等)、地质和航道条件、工程造价、管段预制工艺等综合确定。

(2) 干坞设计使用年限应根据工程筹划确定,并满足管段预制、浮运工期需求。

(3) 干坞坞顶防洪标高、基坑边坡稳定等应符合现行国家或行业标准的规定。

(4) 干坞应具有良好的外部施工条件。

2.3 干坞底标高

固定干坞坞底标高决定干坞基坑深度,影响工程造价,与管段高度、干舷高度、管段安全浮运需求有关。移动干坞管段应在下潜区进行检漏,下潜区尺寸应满足驳船所需的平面操作空间及水深要求。

(1) 固定干坞坞底标高 H_a 可按式(1)确定:

$$H_a = H_0 - H + h_g - H_s \quad (1)$$

式中: H_0 为管节出坞设计水位或标高(m); H 为管节外包高度(m); h_g 为管节干舷高度(m); H_s 为管节底部至坞底的起浮安全距离(m),不宜小于 0.5 m。

(2) 移动干坞下潜区底标高 H_a 可按式(2)确定:

$$H_a \leq H_h - H + h_g - H_s - H_1 \quad (2)$$

式中: H_h 为管节脱离驳船时设计水位或标高(m); H_s 为管节底部至驳船甲板面的起浮安全距离(m),不宜小于 0.5 m; H_1 为驳船船体高度(m); H 、 h_g 意义同前。

3 内河沉管隧道干坞选择实例

3.1 轴线干坞

轴线干坞是将隧道岸上明挖段主体结构基坑与干坞基坑共用,管段预制完成后,沿隧道轴线浮运出坞进入基槽沉放。此种干坞优点:管段数量较少时,能节省临时用地、降低工程造价;无需单独为管段浮运疏浚航道。缺点:管段浮运出坞后才能进行岸上主体结构施工,当管段数量较多时,影响岸上段施工工期。

广州官洲隧道起于生物岛,下穿宽约 190 m 的官洲河后到达大学城,水深 2.15~7.40 m,远期规划航道宽 80 m,深 6 m,枯水期水面最低标高 3.45 m。隧道沉管段宽 23 m,高 8.7 m, E1 管段长 94 m、E2 管

段长 116 m、E3 管段长 4 m,3 节管段总长 214 m。

隧址处河道窄,水深浅,长距离管段浮运临时航道的疏浚工程量巨大,隧道周边又无合适地块作为干坞场地,故该工程采用轴线干坞,坞址设在生物岛侧,坞底纵向长度 260 m,横向宽度 47 m,坞底标高 -5.6 m,干坞内一次预制所有管段。

与单独设置干坞方案相比,该隧道轴线干坞无需为管段浮运疏浚航道,管段数量少,明挖段主体结构与时干坞共用,缩短工期约 5 个月,减小临时占地面积 3.4 万 m^2 。

3.2 旁建干坞

旁建干坞是将干坞选址在隧道岸上段主体结构旁,并与隧道岸上段主体结构共用基坑围护结构和基坑止水体系。此种干坞优点:基坑共享围护结构,能减小临时占地面积,节省工程投资;干坞内预制管段的区域与岸上主体结构基坑不完全重叠,可实现管段预制与岸上段主体结构的平行作业,从而加快施工速度,节省工期;对管段数量较多的沉管隧道也适用。缺点:主体结构基坑与干坞基坑并排设置,整体场地面积要求高;管段浮运至沉放位置需根据水深情况考虑临时航道疏浚。

佛山东平隧道北侧起于佛山市禅城区,南侧与东平新城相接,下穿东平水道,隧址处水面宽 200~300 m,河流中心水深 8~11 m,常年水流速度 2.7~3.0 m/s,枯水期水面最低标高 0.4 m。隧道沉管段宽 39.9 m,高 9.0 m, E1、E2 管段长均为 115 m、E3 管段长 105 m、E4 管段长 110 m,4 节管段总长 445 m。

沉管隧道管段浮运理想的水流速度为 1 m/s 以下,东平水道流速不利于独立干坞管段长距离浮运;隧址附近单独设置大型干坞需拆迁大面积房屋;中、小型干坞工期不能满足需求;移动干坞无合适的驳船,故该隧道采用旁建干坞,干坞选址在东平新城端隧道东侧,占地面积 61 000 m^2 ,坞底标高 -9.1 m,一次同时预制 4 节管段。

东平隧道采用旁建干坞比轴线干坞节约工期约 12 个月,比独立干坞减少拆迁 6 300 余 m^2 。

3.3 独立干坞

独立干坞是在隧址范围以外另外选择干坞位置。此干坞优点:选址范围灵活,江河上下游岸边地块都可作为备选场地;可实现沉管隧道水下基槽开挖、两岸明挖段施工、管段预制多方面的平行作业,加快工期;根据管段总数量,可采用单个、两个或多个相对独立的干坞体系。管段数量很多时,多子坞同时具备独立的管

段预制及出坞条件,能灵活应对内河水位季节性的变化,缩短工期、降低造价。缺点:管段远距离浮运可能会带来较大的航道临时疏浚量;沿线桥梁等建筑物通航尺度、季节性水位变化差等外界条件控制干坞选址和管段浮运。

南昌红谷隧道位于八一大桥与南昌大桥之间,下穿赣江后,连接南昌市西岸红谷滩新区与东岸老城区。隧址处水面宽度约 1 400 m,最低水位 9.80 m,枯水期与丰水期水位最大高差超过 12 m。隧道沉管段宽 30 m,高 8.3 m,E1~E9 管段长均为 115 m、E10 管段长 96.5 m、E11 管段长 107.5 m、E12 管段长 90 m,12 节管段总长 1 329 m。

隧址附近两岸建筑物密集,轴线干坞和旁建干坞在工期和用地上不能满足需求。经沿岸考察,干坞选址在隧址下游约 8.5 km,周边空旷、无房屋拆迁的沙滩上。

由于赣江水位差季节变化大,若在最低水位浮运,航道疏浚量极大,故选择丰水期集中浮运,管段在隧址附近临时寄放,枯水期集中沉放方案。管段出坞水位标高等于 12.65 m,场地标高 17~22 m,坞底标高 4.0 m,干坞的开挖平均深度约 16 m,总长 516 m,总宽 257 m,占地面积 13.3 万 m²。

结合沉管段数量,采用并排的双子坞平行作业,每个子坞内一次预制 3 节管段,分 2 批预制完成。

与一次预制 12 节管段的大型干坞相比,双子坞方案可节约工期 4 个月,并可避开枯水期对管段浮运的影响,实现管段预制与浮运沉放的流水化作业。

3.4 移动干坞

当隧道两岸房屋密集,在隧址附近征拆固定干坞场地困难,同时河道水深浅,采用独立干坞疏浚费用庞大时,可考虑采用移动干坞制作管段。移动干坞优点:利用既有驳船作为管节预制场地,节省固定干坞修建时间;不需要占用大面积施工场地,减小了对环境的破坏和影响;半潜驳吃水深度比管段浮运所需水深浅 3~4 m,对航道要求低,能有效降低管段运输的疏浚工程量;移动干坞可重复使用,减小隧道临时工程规模,节约工程造价。缺点:管段的规模受半潜驳平面尺寸和承载能力制约;半潜驳一次预制一节管段,只适用于管段数量不多的工程;移动干坞需要在隧址附近找到合适的下潜港池,进行管段从驳船到河中的入水转换;半潜驳预制需要建造临时码头,且浮运路线受桥梁通航净高影响;中国既有半潜驳数量较少,要找到与工程相匹配的半潜驳难度较大。目前中国典型大型半潜

驳、浮船坞统计见表 1。

广州市仑头隧道线路北端起于海珠区,下穿宽 280 m 的仑头海后到达生物岛,仑头海水深 6~8 m,远期规划航道宽 60 m,深 6 m,枯水期水面最低标高 3.45 m。隧道沉管段宽 23 m,高 8.7 m,E1 管段长 55 m、E2 管段长 67 m、E3 管段长 4 m、E4 管段长 71.5 m、E5 管段长 77 m,5 节管段总长 277 m(包括水下最终接头 2.5 m),单节管段最大重量约 1.5 万 t。

表 1 中国典型大型半潜驳、浮船坞统计

名称	主尺度(长×宽×内宽)/ (m×m×m)	载重量/ t
重任 1501 号	122.5×30.5×7.6	15 000
重任 1601 号	122.5×31.6×7.7	16 000
重任 1602 号	122.5×31.6×7.7	16 000
半潜驳	重任 3 号	196×46×12.7
	重任 2 号	136×40×8.0
	幸运天使	150×40×8.7
	泰安口	156×32.2×12.0
	康胜口	156×32.2×12.0
浮船坞	滨海 308 号	122.5×30.5×7.6
	翠华山	238.56×39.6
	友联 3 号	240×32.3

工程受正在建设地块、既有房屋及生态保护区影响,在隧址附近无固定干坞所需的场地,独立干坞航道疏浚极大,结合生物岛沿线码头和中国国内既有半潜驳情况,最终采用“重任 1601 号”驳船作为移动干坞,船体长度 122.5 m×31.6 m,载重 1.6 万 t,最大下潜深度不小于 9 m,下潜港池底面积为 150 m(长)×31.6 m(宽),底标高-13.25 m,浮运距离 13.5 km。

与固定干坞相比,仑头隧道采用移动干坞避免了房屋征拆,减少工期 4 个月,减少土方开挖 7.4 万 m³。

3.5 工厂化干坞

工厂化干坞占地面积大、自身造价高,一般用于沉管段长超过 3 km 的工程。中国只有港珠澳大桥海底沉管隧道采用工厂化干坞,其沉管段长约 5.7 km。在城市内河受建设场地和工程本身规模制约,尚无采用工厂化干坞的内河沉管隧道。

4 内河干坞形式选择

中国大陆已建成运营的内河沉管隧道已有 10 座,沉管段长度从 214 m 到 1 329 m 不等,干坞形式和沉管段长度统计见图 1。

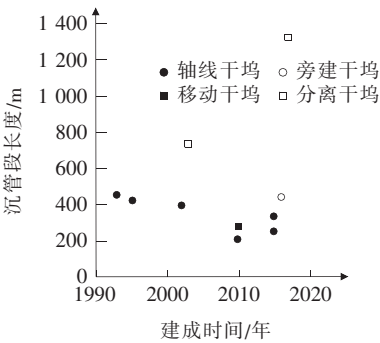


图1 中国大陆已建成沉管隧道干坞形式与管段长度统计

综合考虑沉管段规模、建设环境、管段结构类型等控制条件,内河沉管隧道干坞方案可利用表2进行初步选择。

5 结论

该文结合官洲、东平、红谷、仑头4座内河沉管隧道,分析了固定干坞(包括轴线干坞、旁建干坞、独立干坞)、移动干坞与工厂化干坞各自的优缺点及适应性,

表2 内河沉管隧道干坞方案初步选择

控制条件/考虑因素		固定干坞				移动干坞	工厂化干坞
		轴线干坞	旁建干坞	独立干坞			
				单子坞	双(多)子坞		
沉管段总长	500 m	★	◎	▲	▲	◎	×
	500～3 000 m	×	▲	◎	▲	×	×
	3 000 m 以上	×	×	×	★	×	★
建设环境	隧址场地大	▲	▲	×	×	▲	◎
	隧址场地小	★	×	★	★	★	×
	水浅,管段自身浮运疏浚量大	▲	★	×	×	★	×
	管段自身浮运方便	▲	▲	◎	◎	×	×
	隧址上下游桥梁通航尺度低	★	▲	×	×	×	×
管段类型	存在异形管节	◎	◎	◎	◎	◎	×

注:★表示宜选;◎表示可选;▲表示非约束条件;×表示不宜选。

给出了干坞方案初步选择方法。通过工程实践验证,可得出如下结论:

- (1) 固定干坞坞底标高和移动干坞下潜区底标高计算公式满足工程需求,公式合理。
- (2) 轴线干坞在内河沉管隧道中应用最多,但隧道明挖段需在管段出坞后施工,整体工期受制于管段预制、浮运和沉放时间。
- (3) 旁建干坞、独立干坞、移动干坞都可实现管段预制与隧道明挖段之间平行作业,可节省隧道工期,但需结合管段浮运对水深、航道疏浚、浮运线路上桥梁通航限高等因素综合考虑。
- (4) 内河高水位差不制约沉管隧道工法是否可行,通过合理的干坞形式和浮运窗口期的选择,可避开高水位差对管段浮运的影响。工厂化干坞虽可实现管段生产的高度机械化和流水化作业,但其占地面积大、造价高、不能制造异形管段,而内河沉管隧道通常长度短,故较少采用工厂化干坞。
- (5) 当内河沉管隧道管段数量较多时,可采用独立双(多)子坞形式实现管节预制、浮运的流水作业。

参考文献:

[1] 肖明清. 水下隧道设计技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2016.

[2] 王海林. 跨海隧道填海围堰内深大基坑支护选型与设计技术[J]. 中外公路,2018(6).

[2] GB 51201-2016 沉管法隧道施工与质量验收规范[S].

[3] DB/T 29-219-2013 内河沉管法隧道设计、施工及验收规范[S].

[4] 贺维国,邢永辉,沈永芳. 新型内河沉管隧道工程修建技术实践[M]. 北京:人民交通出版社,2017.

[5] 上海市建设和管理委员会科学技术委员会,上海城建(集团)公司. 外环沉管隧道工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,2005.

[6] 陈韶章,陈越. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京:科学出版社,2002.

[7] 陈韶章,陈越. 沉管隧道施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[8] 邢永辉,张毅,李志军. 南昌红谷隧道 F4 管节轴线纠偏案例的分析与应用[J]. 隧道建设,2016(9).