

Research
Tunnel Engineering—Article

长大海底隧道——认识并克服运营和施工物流困难问题

Gareth Mainwaring^{a,*}, Tor Ole Olsen^b

^a Mott MacDonald, Croydon CR0 2EE, UK

^b Dr.techn.Olav Olsen AS, Lysaker 1325, Norway

ARTICLE INFO

Article history:

Received 19 April 2017

Revised 7 September 2017

Accepted 22 September 2017

Available online 21 March 2018

关键词

海峡隧道

越海通道

消防和生命安全

竖井

重力结构

摘要

长大海底隧道尤其是运输用长大海底隧道，并非寻常的基础设施工程。尽管长大海底隧道的设计和施工相当耗时，但一旦建成投运，便可形成重要的越海通道。此类隧道建在海底，会面临独特的挑战，包括一系列施工和运营方面的复杂问题。此类挑战与最终隧道路径缺少中间辅助点有关。地下隧道（如穿越阿尔卑斯山之类山脉的隧道）也面临类似问题。本文将探讨长大海底隧道设计和施工方面的关键问题，并采用其他工程专业所用的成熟技术来提出可能性解决方案。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

相较于地下隧道，运输用海底隧道的施工与运营面临独特的挑战与限制，尤其是长大海底隧道。连接英法两国的英吉利海峡隧道是全球最长的海底隧道，将英法两国的高速铁路网以及欧洲大陆连接在一起（图1），隧道全长约为50 km，其中，海底段长度为38 km。日本的青函隧道全长53.8 km，其中，海底段长度为23.3 km。

已建成或在建的穿越阿尔卑斯山脉的隧道中，位于多山区域的隧道面临类似问题：沿隧道路径的中间辅助点（如竖井和横洞）布置受限。阿尔卑斯枢纽计划的圣哥达基线隧道连接意大利和瑞士，全长57 km。

世界各地还在规划修建其他长运输隧道，包括海底隧道和地下隧道，如连接德国和丹麦的Fehmarn Belt隧道（全长18 km的海底隧道）、连接法国和意大利的里昂—都灵隧道（全长57 km的地下隧道）、韩国济州岛隧道（全长79 km的海底隧道）、中国渤海隧道（全长110 km的海底隧道）。此外，中国大陆—台湾隧道也可能在规划中（全长150 km的海底隧道）。

如下文所述，出于施工和运营考虑，此类越海通道沿隧道设置中间辅助点是有利的。中间辅助点便于在隧道施工中多个切面同时施工，在突发状况下也可作为应急出口疏散乘客。但除非海底隧道跨过多个岛屿，否则难以设置中间辅助点，无论是自然或人工中间辅助点，深海条件下都不大可能设置。

* Corresponding author.

E-mail address: gareth.mainwaring@mottmac.com (G. Mainwaring).

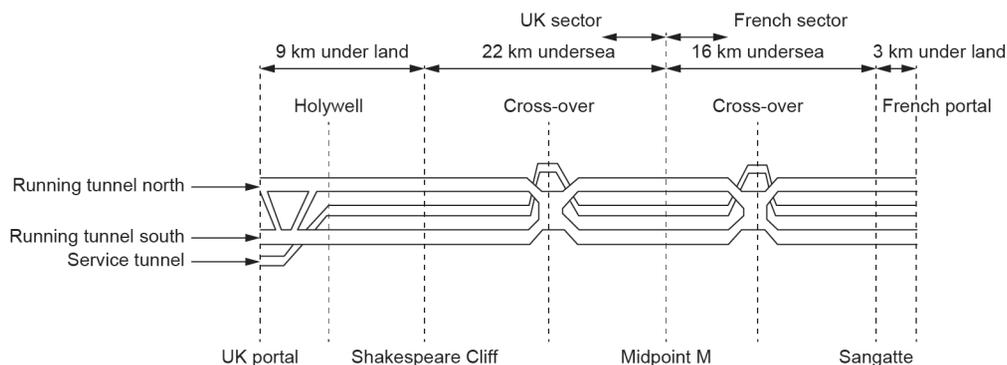


图1. 连接英法两国的英吉利海峡隧道布局图。

2. 施工物流

以上文所述的大长隧道即英吉利海峡隧道、青函隧道和圣哥达基线隧道为例，公认上述3条隧道项目皆采用多掘进段法施工。尽管英吉利海峡隧道全长50 km，但最长隧道掘进段却仅有22 km长。该掘进段从英国海岸线出发，与法国隧道掘进机（TBM）掘进段在英吉利海峡下方的交汇点处相连。较短的掘进段从海岸线出发，又回到各终点处隧道洞口。

圣哥达基线隧道沿隧道路径设置了大量横洞和竖井，目的是将整条隧道分成多段，便于多条掘进段开挖（图2）。事实上，最深的竖井有800 m，经过大量深挖工程而来，但最长隧道掘进段的长度却仅有14 km。由此可见，提出此类开挖方案的施工方认为沿隧道路径设置中间施工点有利于成本控制和项目推进。

2.1. 隧道通风

无论隧道采用钻爆法开挖还是TBM开挖，整个施工过程中，隧道掌子面皆需通入新鲜空气。可采用风管通风，风管通常沿施工隧道拱腰布置。对于较长隧

道，可能需要沿风管布置冷却机，以确保隧道掌子面空气不会过热，从而保证作业人员的健康。尽管风管布置在隧道掌子面上，但事实上整个开挖隧道皆有新鲜空气进入。毫无疑问，隧道掘进段越长，要求提供更多空气，风管尺寸将越大。就超长隧道而言，施工要求即风管和冷却设备尺寸可能会决定施工隧道的直径。这种施工法成本效益不高，因而将整条隧道分成多段施工更为划算。

2.2. 收敛掘进段灵活性

隧道施工中，设置多个补给区并从补给区双向开挖隧道，能为施工物流提供一定的灵活性和保证。当其中一台TBM发生故障时，反方向施工的TBM可完成整条隧道的施工。若只是单向掘进，只用一台TBM完成整条隧道施工，则无法完成上述操作。此外，多条掘进段开挖有利于保证整个项目能在合理时间范围内完工。

2.3. 隧道掌子面通道

材料运输和作业人员所用的隧道掌子面通道通常由沿完工隧道运行的机车提供。为保证隧道内工人的安

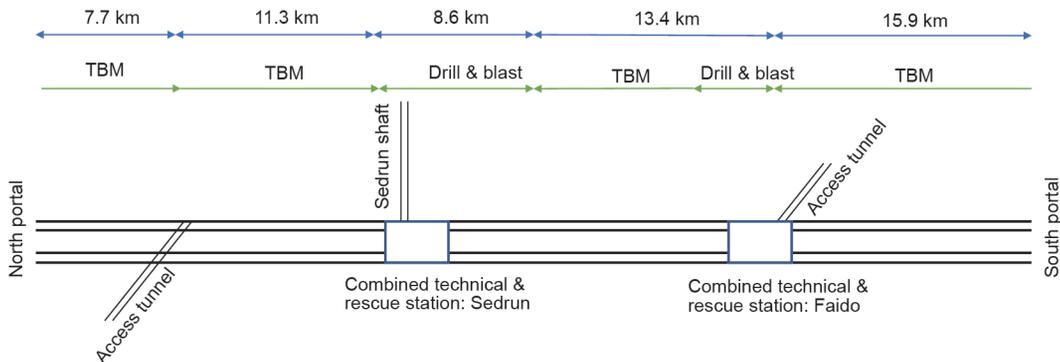


图2. 连接意大利和瑞士的圣哥达基线隧道。

全, 此类运输车辆的速度控制为 $20 \sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。考虑到英吉利海峡隧道的最长掘进段长度为 22 km , TBM靠近掘进段末端时, TBM工作人员在每一班开始和结束时皆需花费 1 h 移动到工作点。掘进段越长花费的时间越多。长隧道施工中, 如果出入隧道掌子面需花费工作日的 20% , 则劳力成本将成为一个重要问题。因此, 将隧道分成合理小段有利于整体成本的控制, 圣格达基线隧道项目已证明这一点。

3. 运营问题

完工隧道运营物流需考虑的问题包括空气质量/通风、空气动力(尤其是铁路隧道)、温度、排水、消防和生命安全等。在处理此类问题时, 可参考英法两国间的英吉利海峡隧道项目, 包括该项目设计过程中所做的研究。

3.1. 初步设计考虑因素

3.1.1. 空气质量和通风

英吉利海峡隧道布局图实际上由三条平行隧道构成: 两条区间隧道和一条中心工作隧道, 中心工作隧道供维护人员通行, 并用作紧急疏散通道(图3)。

英吉利海峡隧道自1994年投入使用后已取得巨大成功。2014年, 有2100万乘客通过此隧道, 打破了纪录。每天多达400辆列车通过此隧道(单向200辆), 平均日交通量如下: 58 000名乘客、6000辆小汽车、180辆大巴车、54 000 t货物。

区间隧道正常通风取决于整条隧道上列车的运行量, 由海岸线上的风机补充。任何时候隧道中需保证有2万人次的空气量, 人均空气量为 26 m^3 , 即 $144 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [1]。

中心工作隧道需加压处理, 以确保发生火灾时隧道能保持无烟状态。此外, 工作隧道与区间隧道间采用气密门隔开。上述体系称为正常通风系统(NVS)。补充通风系统(SVS)用于火灾时隧道中烟雾控制。在此情况下, 风机以 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度向各区间隧道输送空气。此类风机布置在英法海岸线上, 因而必须实现海岸线间 38 km 的通风量。

3.1.2. 空气动力

显然, 出于成本考虑, 承包商要求尽量降低隧道直径。因此, 隧道尺寸保证使用隧道的最大机车车辆能通行即可。在这种情况下, 运载重型货车(HGV)的公铁两用车能通行即可。区间隧道内直径设置为 7.6 m , 隧

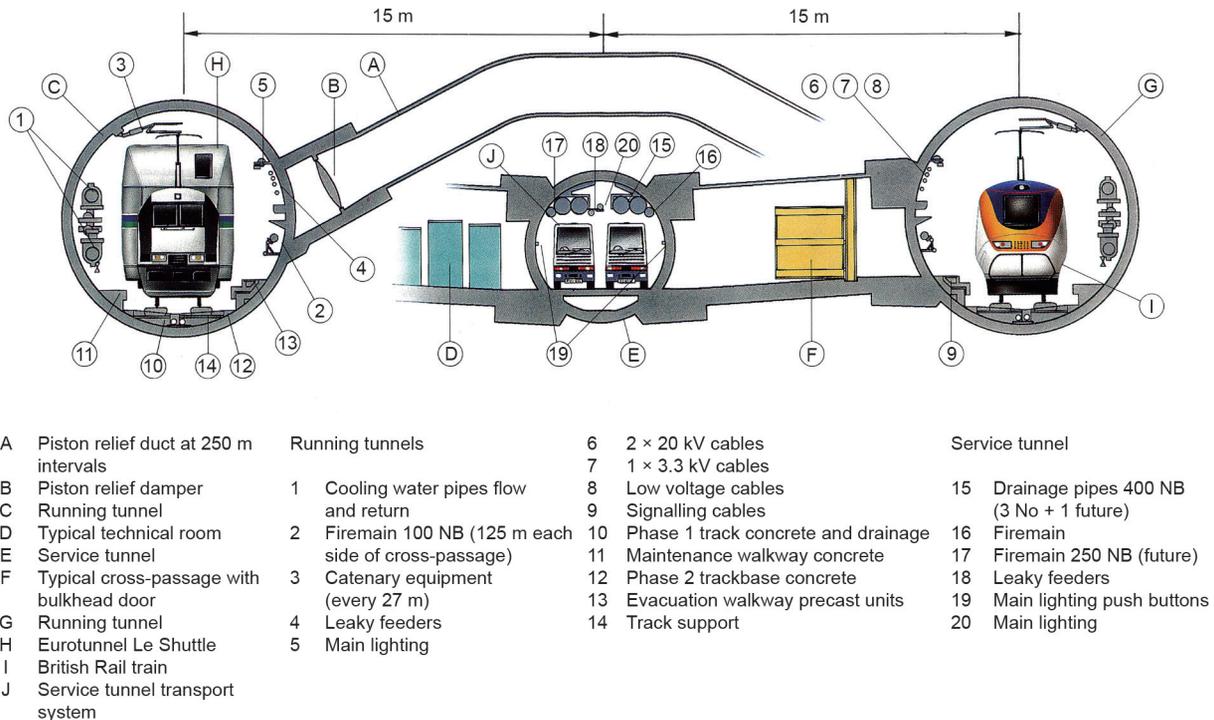


图3. 连接英国和法国的英吉利海峡隧道配置图。

道中机车车辆阻塞比设置为50%[2]。

已确定高速运行列车将带动区间隧道中5000 t空气运动,拖曳力大小对机车功率要求有重大影响[1]。需提出解决方案,以免机车在整条隧道中都推着空气柱运行;可沿隧道布置活塞式泄压管(PRD),与区间隧道相连,以解决上述问题。泄压管布置在250 m中心处,便于压力在隧道中累积后转移到对面隧道中。

在设计阶段,需优化通风系统的设计和隧道直径。发生火灾时,隧道越小,通风更易(尽管需考虑管片衬砌所产生的摩擦力)。扩大隧道将提高空气动力,但会增加施工成本,且需显著提高风机喷风量,以便发生火灾时能保证一定空气流速。未设置中间竖井的长隧道需重点考虑这一问题。

3.1.3. 温度

英吉利海峡隧道区间隧道中通行的列车所产生的平均热量为 $80 \text{ MW} \cdot \text{d}^{-1}$ 。已确定2~3个月后空气温度可达到 50°C ,这相当于北欧的温度气候。因此,隧道需采取降温措施;可在隧道壁上布置直径为400 mm的管道,管道中循环流通 3°C 冷水,以此方式降温。隧道越长,需布置更多降温管道,以控制温度。此外,对于超长隧道而言,降温管道可能会影响隧道的实际直径。

3.1.4. 排水

由于开挖隧道所在地面具有相对不渗透性,因此地下水可通过隧道管片接缝排出,以降低作用于隧道衬砌上的流体静压。但排出的水需收集到池中,再输送回地面。可在工作隧道中布置4根直径为400 mm的排水管,完成上述排水作业。布置上述管道所需空间对工作隧道的尺寸有重大影响,考虑到温度因素,隧道越长,可能需要布置直径更大的管道。

3.1.5. 消防与生命安全

为方便应急疏散,交叉通道应沿隧道路径布置在375 m中心处,将各区间隧道连接到中心工作隧道,从而在紧急情况下有安全区供躲避。“第一响应线”小组负责24 h巡逻工作隧道,在隧道内发生任何事故时皆随时待命。全天候应急服务小组常驻在隧道法国一侧桑加特站。因此,当英国海岸线附近隧道中发生事故时,可能应急小组距离事故发生地40 km远。在过去20年运营时间内,英吉利海峡隧道已发生过无数次火灾,最开始制定的政策和章程也已经修改。

3.2. 经验教训

英吉利海峡隧道首次开放运营时,最初制定的列车消防政策是:将列车沿隧道一直开往对侧隧道洞口,然后在开阔处灭火。在过去20年运营时间内,隧道中共计发生4次火灾,最初制定的政策已经修改。4次火灾都发生在HGV公铁两用车所运载的车辆上。首次火灾火情最为严重,虽然列车尝试穿过隧道,但大火实际上烧坏了架空接触网电线,列车只得中途停下。消防政策修改后,要求列车在隧道中停下,尽快疏散乘客,然后立即灭火。

欧洲隧道公司是英吉利海峡隧道的运营商,近期在隧道中建造了4个独立“安全站”,用于应对列车火灾。此类安全设施由指定870 m长隧道段内所安装的消防设施构成,配备有高压水雾灭火系统,此系统可在3 min内将温度从 1000°C 降到 250°C 。安全站布置可保证隧道中任何位置处的列车能在15 min到达安全站。

英吉利海峡隧道在50 km长度位置上方设有4架独立跨接设施,其中两架位于海底段,另两架分别朝向法国和英国一侧的隧道洞口。此种配置便于在维护期间和隧道中发生任何事故时隧道能灵活运营。此外,已经证明,在发生上述火灾时,此配置对隧道能否幸免于难至关重要。

在首次火灾发生后,其中一段隧道于1996年11月停运,停运时间共计6个月之久。建造跨接设施后,虽然在整个损毁段修复期间车次减少,但列车却可从损毁段旁边驶过,继续运营。隧道中还发生过其他小事故,如架空接触网被HGV公铁两用车所运载的车辆损毁,但由于提前建造有足够的跨接设施将隧道分成多段,列车仍能继续运营。

如上所述,迄今为止发生的所有火灾都是HGV公铁两用车所运载的车辆造成的。采用此类机车车辆运输货车并不常见,仅是英吉利海峡隧道所特有。但出于隧道长度和隧道交通量考虑,HGV公铁两用车却是此方案能否成功的关键。若非隧道禁用HGV公铁两用车或HGV公铁两用车只可用于货船上,将来的海底隧道皆有可能会要求采用此类机车车辆来运载HGV。需吸取机车车辆设计方面的教训并汲取经验,沿隧道设置中间消防设施和足够跨接设施,以便发生事故时隧道能继续运营。

3.3. 小结

显然,建造跨接设施将整条隧道分成多段有利于铁道运营,沿整条隧道布置中间辅助井有利于任何类型运

输隧道的施工和运营，但面临以下挑战：当隧道有大部分位于深海环境时，该如何建造此类中间辅助设施。相应的解决方案可参考其他必须建在深海下的行业——油气行业。

4. 可能性解决方案

油气生产已成功使用重力式结构超过30年之久，主要用在北海挪威部分，安装深度超过300 m。北海挪威部分Draugen平台的中央竖井直径为20 m，布置在250 m深水中（图4）[3]。作业人员居住舱模块位于“上部”结构上。此类结构可作为拟建隧道的施工现场，掘进作业从各结构处双向进行。在油气行业中，“上部”运营支撑系统比隧道施工支撑系统复杂得多，并要求提供加压碳氢化合物以及相关加工装置。

“上部”可用空间可轻松容纳隧道作业中操作多台TBM所需的人员以及支持隧道作业的发电机和车间。隧道管片将由可停泊在平台旁的驳船运送。在永久性工程中，此类结构将提供超长隧道通风设施和排水设施，并沿隧道路径布置应急入口/出口。这一成熟技术还可用于战胜超长海底隧道施工和运营的物流限制。安全安装和固定重力式结构在海底的方法已有现成文献可参考，

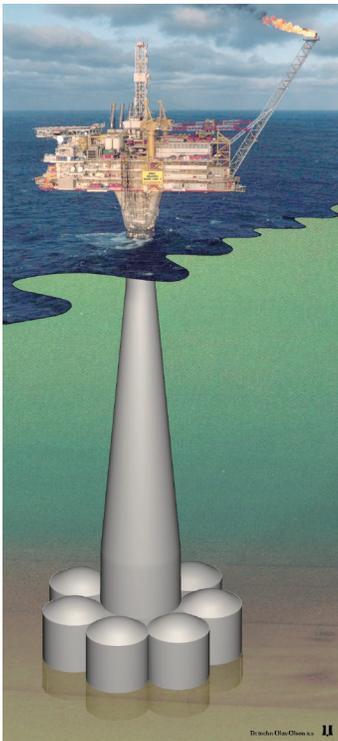


图4. Draugen平台示意图

此处不再赘述。

已发现有大量隧道倾向于越海通道，尤其是在亚太地区。跨越台湾海峡、连接中国大陆与台湾的最短隧道约有150 km长，离海面深度约为70 m，严格控制在本文所述重力式结构的范围内。采用4个重力式结构沿隧道路径构建中间补给点，从而将隧道分成5段，每段长30 km。最长的隧道掘进段为15 km，与圣哥达基线隧道的最长掘进段相类似。众所周知，位于台湾海峡的任何结构需设计成抗震形式，并能抵抗台风期间的恶劣天气条件。但事实是，此类结构已在北海的严酷环境中建成，历经30年仍在运营，由此可见，此类挑战是可以战胜的。

韩国隧道工程社区正在调查能否在朝鲜半岛南端和济州岛度假岛之间建造一条越海通道。此通道直达路径要求隧道长达75 km。尽管会用到现有岛屿，但隧道比计划的要长大约15 km。此隧道是一个独立的重大工程，因而采用直达路径显现出很多优势。

在过去多年的大量研究中，日韩两国之间的隧道是研究的主题。该隧道的最短路径要求海底段长度为128 km，离海面深度不超过220 m。可能离海面深度会更小，但相关隧道长度将更大。

最近，连接中韩两国的隧道在热议中，该隧道路径将穿越黄海，从韩国仁川市通往中国山东地区。此路径要求隧道海底段长度超过300 km。值得注意的是，黄海没有岛屿来简化建设物流。然而，重力结构的使用可以提供解决方案。

5. 结论

前述所有国家即中国（大陆和台湾）、韩国和日本皆有高速铁路系统。因此，采用重力式结构能解决上述国家之间修建越海通道的问题。平台可提供补给点，利用风力或太阳能为运输系统补充能源，并供越海通道路径的维修和安全人员住宿用。

最后一个需考虑因素是施工时间问题，可沿隧道路径布置中间施工井，以控制施工时间。若采用重力式结构将整条隧道分为大约30 km长的小段，无论隧道多长，整条隧道的实际施工时间总体很接近。

Compliance with ethics guidelines

Gareth Mainwaring and Tor Ole Olsen declare that

they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Henson DA, Bradbury WMS. The aerodynamics of Channel Tunnel trains. In: Haerter A, editor. *Proceedings of the Seventh International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*; 1991 Nov 27–29; Brighton, UK. London: Elsevier Applied Science; 1991. p. 927–56.
- [2] Pope TA. Channel Tunnel rolling stock—the tunnel environment [presentation]. In: *Institution of Mechanical Engineers Seminar: Railway Engineering*; 1990 Apr 19; London, UK; 1990.
- [3] Olsen TO, Mainwaring G, Sharp A. Ultra-long undersea tunnels. In: Frydenlund TE, Flaate K, Østlid H, editors. *Proceedings of the Sixth Symposium on Strait Crossings*; 2013 Jun 16–19; Bergen, Norway. Oslo: Norwegian Public Roads Administration; 2013. p. 186–95.