

Engineering Achievements

桥岛隧组合跨海通道的最新建设技术

葛耀君, 袁勇

State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

1. 引言

通常有两种结构用于跨越河流、运河、海洋或其他障碍物：上跨障碍物的桥梁结构和下穿障碍物的隧道结构。尽管桥梁和隧道的建造可以追溯到几千年前，但使用岛屿作为跨海通道（SCFL）的桥隧组合跨海通道仅有82年的建造史。第一条桥隧组合SCFL可能是美国的旧金山—奥克兰海湾大桥，海湾大桥长6.4 km，于1936年竣工。最近建造的集桥梁、隧道和岛屿于一体的SCFL是港珠澳（HZM）大桥，港珠澳大桥于2018年10月24日通车，是世界上最长的桥岛隧组合SCFL，全长29.6 km。

在桥隧组合SCFL 82年的建造史中，全球已经建成了10个著名的工程项目[1]。继旧金山—奥克兰海湾大桥之后，同样位于美国的汉普顿道路桥隧是第二个已建的桥隧组合SCFL。该桥隧组合SCFL长9.72 km，于1956年建成，是第一个在桥梁段和隧道段之间建造人工岛的SCFL。随后，1964年在美国建成的切萨皮克湾跨海大桥是港珠澳大桥建成之前最长的桥隧组合SCFL。切萨皮克湾跨海大桥项目包括22.2 km桥梁、3.2 km隧道和4个人工岛。在20世纪90年代，世界各地完成了3个桥岛隧（BIT）组合SCFL项目：美国的Monitor–Merrimac纪念桥隧、日本的东京湾跨海公路及其联络线和丹麦的大贝尔特桥。在21世纪，除了港珠澳大桥之外，迄今为止还建造了3个BIT组合项目：连接丹麦和瑞典的厄勒海峡大桥、中国的上海长江隧

桥，以及韩国的巨济大桥。表1提供了这10条BIT组合SCFL的基本信息。

由于SCFL组合通常由一个或多个桥梁、隧道、天然岛或人工岛及其连接线组成，因此SCFL体系的施工技术必然包括建造桥梁、隧道和人工岛的关键技术。为了将港珠澳大桥与其他BIT组合SCFL进行对比，对上述8个项目中桥梁、隧道和人工岛的施工技术进行了比较。由于缺乏关于Monitor–Merrimac纪念隧桥的详细资料，所以未对该项目进行对比。

2. 跨海大桥施工

与许多其他桥梁相比，BIT组合跨海大桥具有长度长、跨度大、基础深等显著特点，同时也会遇到一些特殊的条件，如腐蚀性条件和恶劣的施工环境，这可能会影响其设计和施工。考虑到这些因素，表2对用于建造上述跨海大桥的最新技术进行了比较，包括通航孔桥、非通航孔桥和深水基础。

2.1. 通航孔桥

虽然BIT组合SCFL的主航道位于隧道上方，但是大跨度桥梁可作为一个或多个其他航道修建在通航孔下方。本次对比的8个BIT组合项目涉及4种通航孔桥：梁桥、桁架桥、斜拉桥和悬索桥（表2）。

梁桥是最简单但使用最广泛的桥型，采用先简支后连续的结构体系。最长的梁桥是东京湾跨海公路及其

表1 10条桥岛隧（BIT）组合跨海通道（SCFL）

	Name	Date of completion	Bridge length (km)	Number of islands	Tunnel length (km)	Total length (km)
1	San Francisco–Oakland Bay Bridge (USA)	1936	3.141 + 3.102 = 6.243	One natural island	0.160	6.403
2	Hampton Roads Bridge–Tunnel (USA)	1957	5.6	One artificial island	2.06 + 2.06 = 4.12	9.72
3	Chesapeake Bay Bridge–Tunnel (USA)	1964	19 + 3.2 = 22.2	Four artificial islands	1.6 + 1.6 = 3.2	25.4
4	Monitor–Merrimac Memorial Bridge–Tunnel (USA)	1992	5.1	Two artificial islands	1.463	6.563
5	Tokyo Bay Aqua-Line (Japan)	1997	4.4	One artificial island	9.6	14.0
6	Great Belt Fixed Link (Denmark)	1997	6.790 + 6.611 = 13.401	One natural island	8.024	21.425
7	Øresund Bridge (Denmark to Sweden)	2000	7.845	One artificial island	4.050	11.895
8	Shanghai Yangtze River Tunnel and Bridge (China)	2009	16.6	One natural island	8.9	25.5
9	Busan–Geoje Fixed Link (Korea)	2010	1.87 + 1.65 = 3.52	Two natural islands	3.2	6.72
10	Hong Kong–Zhuhai–Macau Bridge (China)	2018	22.9	Two artificial islands	6.7	29.6
Summary	Ten projects	1936–2018	3.52–22.9	One to four islands	0.160–9.6	6.403–29.6

表2 8条BIT组合SCFL建设中采用的技术对比

	Name	Navigational channel bridge	Non-navigational approach bridge	Deep foundation
1	San Francisco–Oakland Bay Bridge	2 × 704 m suspension bridges 427 m cantilever truss	48 m concrete girder	Piles
2	Hampton Roads Bridge–Tunnel	—	24 m concrete girder	Piles
3	Chesapeake Bay Bridge–Tunnel	140 m steel truss span	23 m concrete girder	PC cylindrical piles
4	Tokyo Bay Aqua-Line	2 × 240 m continuous steel box-box girders	130 m steel box-box girder 80 m steel box girder	Piles
5	Great Belt Fixed Link	1624 m suspension bridge	110 m concrete girder 193 m steel box girder	RC caissons
6	Øresund Bridge	490 m cable-stayed bridge	140 m composite girder 120 m composite girder	RC caissons
7	Shanghai Yangtze River Tunnel and Bridge	730 m cable-stayed bridge 220 m PC box girder	105 m composite girder	Piles
8	Busan–Geoje Fixed Link	475 m cable-stayed bridge 2 × 230 m cable-stayed bridge	90 m composite girder	Steel caissons
Summary	Eight projects	Four bridge types	Three materials	Two foundation types

PC: prestressed concrete; RC: reinforced concrete.

联络线的通航孔桥，这是一座最大跨度为240 m的10跨连续钢箱梁桥。上部结构完工后，发现存在涡激振动（VIV），振幅超过0.5 m。为了抑制这种振动，安装了16个调谐质量阻尼器（TMD），如图1所示。这是TMD在VIV控制中的最早应用之一[2]。上海长江隧桥拥有世界第二大梁桥，这是一座中央跨度为220 m的连续预应力混凝土（PC）箱梁桥[3]。

19世纪70年代至20世纪30年代，钢桁架桥是一种常见的桥梁结构形式，建于1936年的旧金山—奥克兰海湾大桥通航孔桥就属于钢桁架桥。该桥的原东段由5个下承式桁架跨、一个桁架引桥和一个427 m长的双悬臂跨

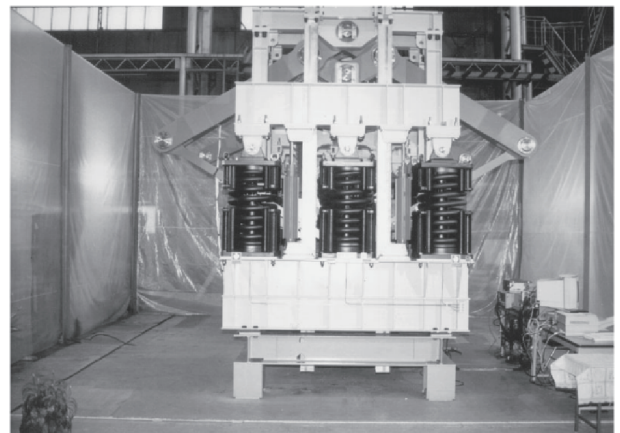


图1. 调谐质块阻尼器（TMD）。

(当时为世界第三长桥梁)组成,所有结构均采用双层桥面[4]。切萨皮克湾跨海大桥采用跨度为140 m的钢桁架梁作为其通航孔桥[5]。2000年,厄勒海峡大桥还使用了最大跨度为140 m的钢桁架与混凝土板组合梁[6]。

斜拉桥是1955年后出现的最年轻的桥型,近年来在跨海通航孔桥项目中得到了广泛的应用。厄勒海峡大桥采用了能支承重载公路和铁路的跨度为490 m的双层斜拉桥,该斜拉桥是当时最长的铁路斜拉桥[6]。大约10年后,上海长江隧桥建成了一座730 m的双箱梁斜拉桥,巨济大桥建成了两座斜拉桥,其中包括一座475 m主跨桥和一座有两个230 m主跨的大桥[8]。

虽然这8个BIT组合项目仅包括两座悬索桥,但大跨度跨海悬索桥的发展对桥梁施工技术做出了重大贡献。旧金山—奥克兰海湾大桥西段包括两座跨度为701 m的单主跨悬索桥(当时为世界第二长桥梁)。如图2(a)所示,这两座单主跨悬索桥通过中间共用锚碇连接,这在当时是一种保持力学平衡同时降低成本的绝好方法[4]。悬索桥的进一步发展促进了多主跨悬索桥的发展。多主跨悬索桥是一种具有两个边跨、多个主跨、两端只有两个锚墩的悬索桥,其他地方均不需要修建锚碇,如图2(b)所示[9]。悬索桥技术的另一个贡献是创造了一项新的跨度世界纪录:大贝尔特桥是钢箱梁悬索桥,桥长1624 m,其进一步的特点是采用角形导流板进行颤振和涡振控制的抗风技术。

2.2. 非通航孔桥

非通航孔桥因其长度长,出于工程经济和施工方便的考虑,几乎全部采用钢、混凝土、钢-混凝土组合结构的梁式桥。由于跨海大桥的建造条件恶劣,并且有深水基础,所以必须设计为大跨度并逐跨建造。

非通航孔桥的跨度通常比通航孔桥的跨度小,因此

出于经济原因,混凝土箱梁是首选。前3座组合跨海大桥建于1936—1964年,使用钢筋混凝土(RC)和预应力混凝土梁,其最大跨度从23 m至48 m不等。

东京湾跨海公路及其联络线建于1997年,是第一座使用80~240 m跨度的连续钢箱梁组合跨海大桥[2]。大约在同一时间,大贝尔特桥采用了跨度为193 m的钢箱梁和跨度为110 m的PC梁。因此,在逐跨吊装施工时,每种类型的梁重量相同[10]。为了使材料强度和重量之间保持平衡,21世纪建造的3座最新的BIT组合桥梁均采用跨度为90~140 m的钢桁架和混凝土桥面板组合梁。有趣的是,我们可以得出这样的结论:跨海大桥非通航孔桥的发展已经从混凝土过渡到钢,然后又过渡到钢-混凝土组合结构。

几乎所有的非通航孔桥均采用逐跨建造技术,这就需要建造大型船只或浮吊船来吊装整孔梁。桥梁建造中使用的最大浮吊船是荷兰于1991年制造的HLV“天鹅”号浮吊船,吊装能力为8700 t,吊装高度为76 m[图3(a)]。第二大的是日本于1995年制造的3000 t浮吊船。中国为了建造跨海大桥,专门制造了两台大型浮吊船,包括在2003年的东海大桥建造中首次使用的起吊能力为2500 t的“小天鹅”号浮吊船[图3(b)],以及在2005年的杭州湾大桥建造中使用的起吊能力为3000 t的“天一”号浮吊船。这两台浮吊船,连同最近建造的另外两台浮吊船(起吊能力为3200 t的“长大海升”号浮吊船和起吊能力为4000 t的“一航津泰”号浮吊船)一起用于港珠澳大桥的吊装施工。

2.3. 深基础

深基础是一种比浅基础更能将桥梁荷载传递至地表以下的土壤中的基础。深基础主要有两种类型:桩基础和沉井基础。

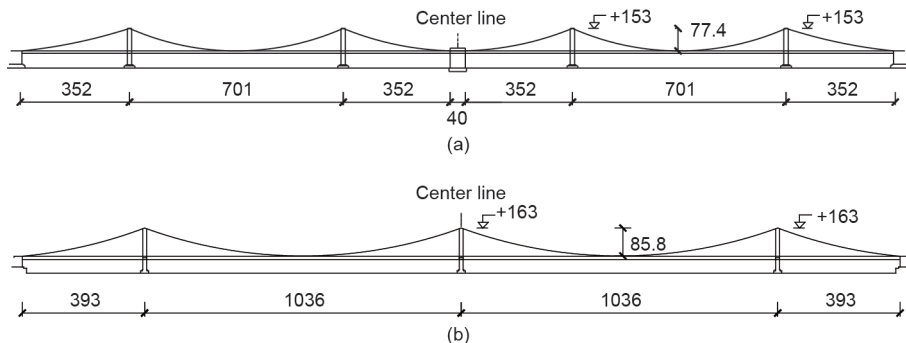


图2. 单主跨或双主跨悬索桥。(a) 两座单主跨悬索桥; (b) 一座双主跨悬索桥。单位: m。

桩基础可采用两种不同类型的桩：钢打入桩或RC钻孔灌注桩。表2中的前4座BIT组合桥梁以及上海长江隧桥采用了打入桩或钻孔桩基础。其中，旧金山—奥克兰海湾大桥保持了水下最深基础的纪录（水下74 m [4]），切萨皮克湾跨海大桥是第一座采用预制预应力圆柱式混凝土空心桩桥梁基础的大桥[5]。

沉井基础是一种由RC或钢制成的水密围护结构，将其沉入地下达到一定深度后，填充混凝土形成基础。表2中的其余3座BIT组合桥梁采用沉井基础，沉井基础在岸上预制，从岸上运到现场，然后在现场沉置。大贝尔特桥东段采用了最大的钢筋混凝土沉井，桥塔基础沉井长78 m，宽35 m，深20 m，重 3×10^4 t，锚碇基础沉井占地面积为6100 m²，质量为 5×10^4 t [10]。巨济

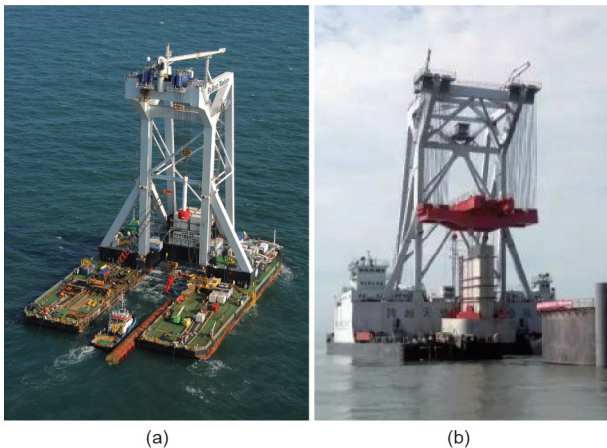


图3. 巨型浮吊船。(a)“天鹅”号浮吊船；(b)“小天鹅”号浮吊船。

大桥475 m跨度斜拉桥的桥塔基础采用了最大的钢沉井（图4）。该沉井占地面积为38 m × 20.5 m，深度为14 m，重量为2600 t [8]。

3. 人工岛建设

天然岛或人工岛均可用于连接桥梁与隧道，或实现从桥梁到隧道的过渡。如果规划项目区内没有天然岛，则必须建造人工岛。

人工岛大小不一，功能各异，历史悠久。近代以来，用于陆上运输的人工岛已成为桥梁的墩台基础、隧道的通风塔以及衔接桥梁与隧道之间的交通通道。可通过两种主要方式填海造地形成人工岛：利用既有小岛或礁盘填筑成人工岛，以及直接填海造地建成人工岛。

3.1. 在小岛或礁盘填筑，然后保护堤岸

填海造地的传统方法是选定浅水区小岛或礁盘的位置，然后用石头和其他建筑材料将其扩大。所需的人工岛填造地形成后，有必要建造堤岸防护结构。通过填海造地建造的人工岛包括东京湾横断道路[11]的木更津岛和厄勒海峡大桥[12]的佩伯霍尔姆（Peberholm）岛等人工岛。上述人工岛起到了从海底隧道到桥梁的过渡作用。

3.2. 先围海，再造地

另一种方法是围堰造地。过去，通过向水中倾倒散料建造围堰，目的是形成围封水域的岸堤。板桩是一

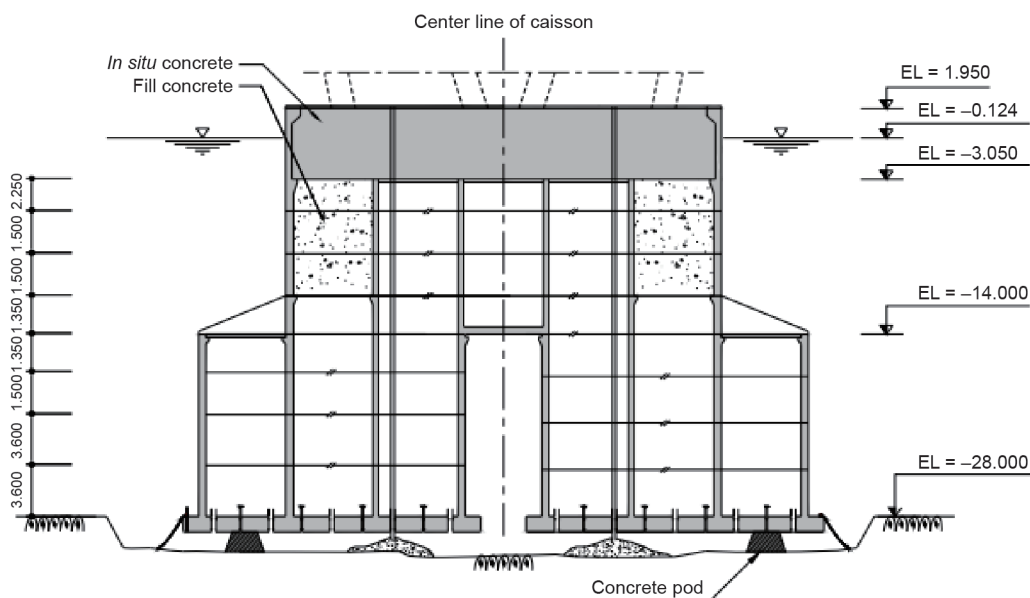


图4. 巨济大桥使用的桥塔钢沉井。EL: 标高。单位: m。

种围封水域的方法，该方法通常用于浅滩水域。如果所需填造的人工岛场地不大，则可选择沉置预制沉井。建造东京湾横断道路[11]的川崎岛时就采用了这种方法（图5）。沉井也充当了盾构机的盾构始发竖井，在运行过程中成为隧道通风塔。

软土地基上的人工岛偶尔会出现长期沉降。这不仅对岛上防护结构的功能有害，而且也不利于桥梁与隧道的转换连接。软土地基的改善很重要。常用的方法包括用砂（即夯实砂桩或SCP）或水泥（即深层水泥搅拌桩或DCM）代替软土。另一种方法涉及桩基础的应用，然而，这种方法花费更高。

4. 跨海隧道建设

旧金山—奥克兰海湾大桥由通过芳草岛上的隧道相连的东桥和西桥组成。这条隧道实际上是一条山岭岩石隧道（宽23 m，高18 m，长160 m），因此不同于涉及水下隧道建设的其他BIT组合项目。

BIT项目的本质之一是建设海底隧道。汉普顿道路

隧桥的BIT组合项目[13]应用了沉管隧道。这条隧道是当时世界上最长的沉管隧道，也是第一条建在两个人工岛之间的隧道。

1994年修建了连接英国和法国的英吉利海峡隧道（Channel Tunnel），这是隧道掘进机（TBM）在海底隧道建设中的首次成功应用。同一建设时期的大贝尔特铁路隧道的建设，由于海水浸入淹没了TBM（1991年），该工程的竣工时间迟于海峡隧道。因此，该项目说明了施工前测量的重要性。在地震区，地震作用是必须解决的另一个关键问题[14]。

4.1. 沉管隧道

BIT组合项目中采用的沉管隧道与其他水域采用的沉管隧道差别不大。早期沉管隧道的预制通常利用造船码头先在干坞内预制成型钢管，然后再运输到预定位置沉放安装[15]。汉普顿道路隧桥也采用了这项技术。随着沉管隧道技术的发展，钢筋混凝土（RC）沉管隧道建设的应用越来越广泛[16]。根据隧道的地质条件以及施工和运行过程中需要考虑的荷载，可将隧道管节设计

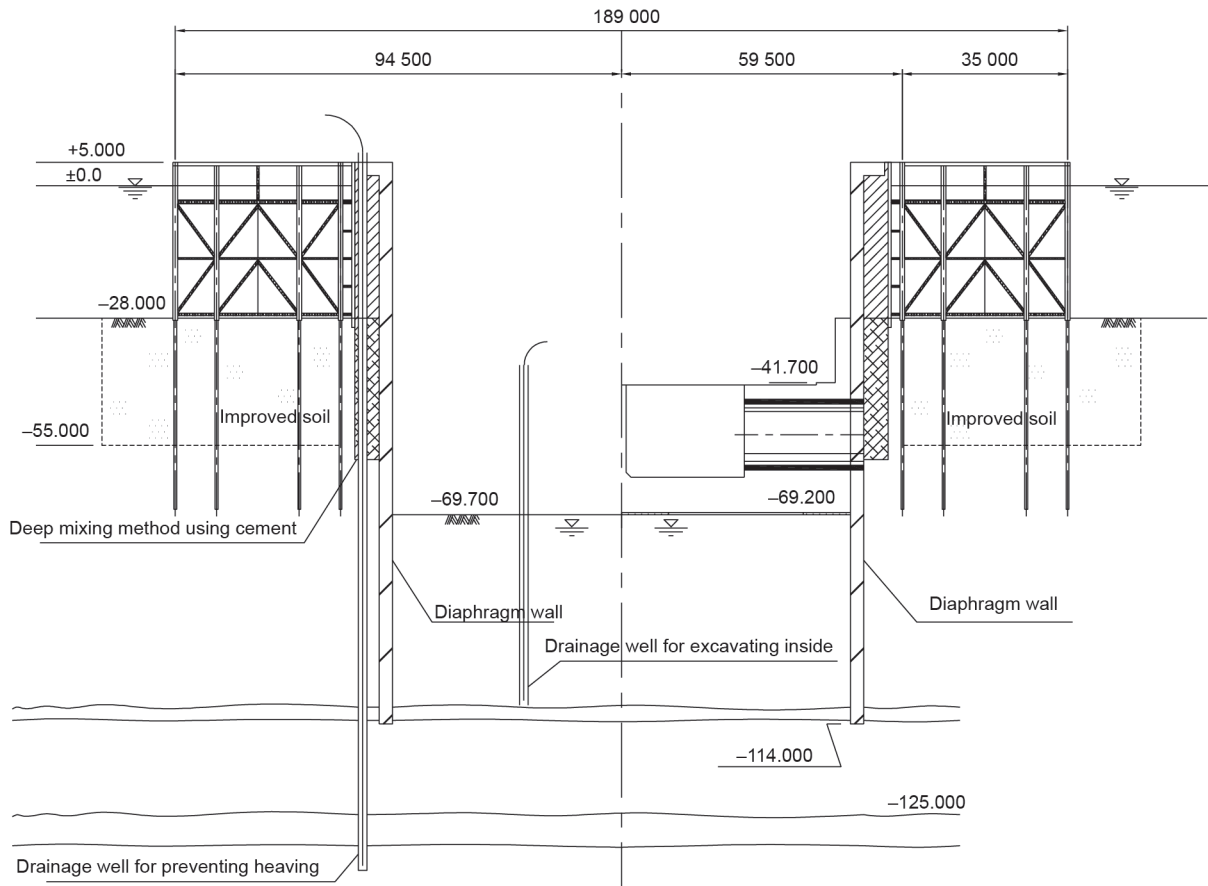


图5. 川崎岛。单位：mm（Reproduced from Ref. [11] with permission of Ingenta, ©1993）。

并预制成整体式管节或节段式管节。如表3所示，最近20年建成的BIT项目中，节段式RC沉管隧道包括厄勒海峡大桥[12]、巨济大桥[17]和港珠澳大桥。用钢壳预制的沉管隧道通常为整体式管节。汉普顿道路隧桥和切萨皮克湾隧道大桥项目是整体式沉管隧道范例。

在建造沉管隧道时，通常遇到的挑战包括开挖隧道基槽，软土地基处理，隧道管节预制、运输、下沉和对接，然后回填覆盖固定。早期在建造沉管隧道时，主要通过安装在驳船上的挖掘机开挖槽沟，并采用拖船拖运管段。用缆机来下沉悬挂在驳船之间的管段。

沉管隧道的加固处置有先处理和后处置两种不同的方法基础。后一种方法是在管段覆盖稳定后，在其底部

注入喷射砂或砂流；另一种方法是先用碎石铺一层碎石基层，然后再沉放沉管管节。软土地基的沉管基础也可采用桩基础。

4.2. TBM 隧道

虽然仅有3条BIT工程项目的隧道使用TBM建造，但每条TBM隧道均打破了复合地基或软土地基的现有纪录（表4）。大贝尔特桥[18]用于铁路运输。9.6 km东京湾跨海公路及其联络线[19]的双线隧道使用了8台TBM进行盾构施工，每台TBM掘进了大约2.4 km。当两台护盾式盾构机在管道部分中心相遇时，使用地层冻结技术在海平面以下60 m处进行连接。为了适应地

表3 BIT项目的沉管隧道

		Hampton Roads Bridge Tunnel	Øresund Fixed Link	Busan–Geoje Fixed Link	HZM Bridge
Conditions	Function	Road	Road and rail	Road	Road
	Length (km)	2.06 + 2.06	3.51	3.24	6.7
	Cross-section (m)	$\phi 11.1$ ($\phi 9.9$) ^a	38.8 × 8.6	26.46 × 9.97	37.95 × 11.4
	Depth to bottom (m) (below sea level)	33.9	30	50	44.5
	Strata	River sediments	Limestone, glacial deposits	Soft clay, medium sand	Soft clay, sand
	Earthquake zone	No	No	No	Yes
Design	Trench	Equipment digger	dredger		
		Foundation	Gravel-bed	Screed gravel-bed, with hydraulic jack-up on wharf barge	
	Element (or section)	Type	Monolithic double-shell steel	Segmental RC rectangular box	
		Number	23	22	18
		Length	1 × 90 m	8 × 22 m	8 × 22.5 m
Construction	Prefabricating site	Ship-dock	Factory	Open dry dock	Factory
	Towing ship	2 tugs	4 tugs	4 tugs	12 tugs
	Sunk facilities	Steel framework straddling between two barges	Pontoon with external positioning system		

^a ϕ is the diameter of a cross section of the immersed tube. The number in parenthesis is the inner diameter, the other one is outer diameter, of the tube.

表4 BIT项目的TBM隧道

		Great Belt Fixed Link	Trans-Tokyo Bay Highway	Shanghai Yangtze River Tunnel and Bridge
Conditions	Function	Rail	Road	Road
	Length (km)	8.02 + 8.02	9.6 + 9.6	7.47 + 7.47
	Depth to bottom (m) (below water level)	75	60	50
	Strata	Glacier residuals, mud limestone	Soft deposits	Soft clay, medium sand
	Earthquake zone	No	Yes	Yes
Design	Linings	Segments	5 + 1	11 + 1
		Dimensions (mm)	400 × 1650	650 × 1500
		Inner lining (mm)	Without	300 (RC)
Construction	TBM	Type	EPB	Slurry
		Diameter ^a (m)	$\phi 8.7$	$\phi 14.14$
		Number	4	8
				2

EPB: earth pressure balance.

^a Here, diameter is referred to the bore diameter of the TBM tunnel.

震作用并确保耐久性，在管片衬砌的基础上还设计了300 mm厚的二次衬砌。

通风是海底长隧道的另一个关键问题[20]。在东京湾跨海公路及其联络线项目中，将一个预制RC沉箱拖运到现场，然后沉置作为4台隧道掘进机的盾构始发竖井。

上海长江隧桥[21]保持了当前运营公路隧道最大直径（15.43 m）TBM的纪录，也保持了在砂质软土地基上不用更换刀盘的最长盾构距离（7.0 km）的纪录。从2013年开始，美国华盛顿州西雅图SR99隧道项目使用了更大的土压平衡式（EPB）隧道掘进机（ $\phi 17.45$ m）。在建的屯门至赤鱗角连接路是另一条经海底隧道通往香港国际机场人工岛的路线，全长4.2 km。该项目于2015年动工，采用了 $\phi 17.6$ m混合护盾TBM。如图6所示，大直径TBM隧道将继续保持需求。

5. 结论

本文综述了8个BIT组合SCFL项目建设中采用的最

新的桥梁、人工岛和隧道施工技术。跨海大桥的关键施工技术可分为通航孔桥、非通航孔桥和深水基础施工技术。大跨度悬索桥和单主跨或双主跨斜拉桥对通航孔桥做出了最突出的技术贡献。非通航孔桥最重要的方面是采用大型浮吊船进行整孔梁吊装的方法，以及结构材料从混凝土到钢，最后到钢-混凝土组合结构的演变。跨海大桥的深基础主要由打入桩和钻孔桩基础或混凝土或钢沉井基础组成。

人工岛建设的两种主要方法如下：①利用小岛或礁盘先填海筑地，然后再建造堤岸保护结构；或者②先围海，再填筑造地。两种主要的海底隧道施工方法包括沉管隧道法和TBM法。沉管隧道建设中必须通过技术创新来克服的重大挑战包括：基槽开挖，软土地基处置，管段预制，管节运输、下沉和对接，以及用回填覆盖固定。在TBM法中，根据层面条件选择掘进机非常重要。未细致论述的通风和疏散系统是海底隧道技术需要面对的问题。在地震设防的地区，采用二次衬砌TBM隧道和沉管隧道抗震缝等方法来提高隧道的抗震性也是非常重要的技术。

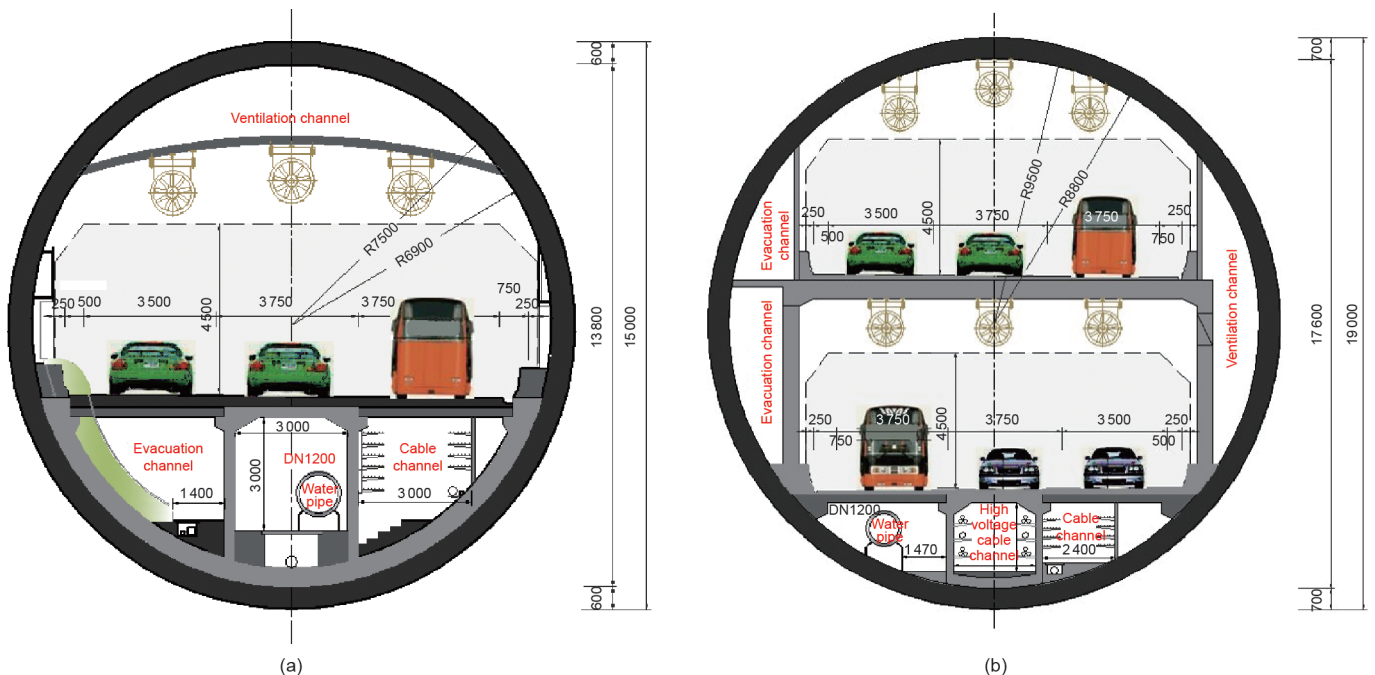


图6. 混合车辆TBM隧道的截面图。(a) 单层三车道；(b) 双层三车道。单位：mm（来源：中交公路规划设计院有限公司）。

References

- [1] List of bridge-tunnels [Internet]. Wikipedia; [cited 2018 Dec 24]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge-tunnels.
- [2] Nagai M, Yabuki T, Suzuki S. Design practice in Japan. In: Chen W, Duan L, editors. Bridge engineering handbook. Boca Raton: CRC Press; 1999.
- [3] Shao C. Conceptual design of long span continuous composite box girder bridge. Bridge Constr 2008;1:41-3.
- [4] Middlebrook RF, Moldova RV. San Francisco-Oakland Bay Bridge. Struct Mag 2014 Feb:26-8.
- [5] Yordy SW. The Chesapeake Bay Bridge and tunnel parallel crossing. In: Proceedings of the Structures Congress; 2006 May 18-21; St. Louis, MO, USA. Reston: ASCE; 2006.
- [6] Zuo M. Design and construction of bridge over Øresund Strait. China Harbour Eng 2001;1:5-9.
- [7] Lu Y, Shao C. Engineering design and key technology research of Shanghai

- Yangtze River Bridge. *Shanghai Constr Sci Technol* 2006;2:5–8. Chinese.
- [8] Hu Y, Zhou P. Introduction of Busan–Geoje Fixed Link. *World Bridges* 2006;4:5–6. Chinese.
- [9] Gimsing NJ. *Cable supported bridges—concept and design*. New York: Wiley; 1997.
- [10] Miller FP, Vandome AF, McBrewster J. *Great Belt Fixed Link*. Riga: Alphascript Publishing; 2010.
- [11] Shioi Y, Arakawa T. Man-made islands, Trans-Tokyo Bay Highway, Japan. *Struct Eng Int* 1993;3(3):155–7.
- [12] Hampton Roads Bridge–Tunnel history [Internet]. Norfolk: VDOT. c2019 [cited 2018 Dec 24]. Available from: http://www.hrftexpansion.org/learn_more/hrbt_history.asp.
- [13] Yu HT, Yuan Y, Xu GP, Su QK, Yan X, Li C. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings—part II: application to the HZM immersed tunnel. *Soil Dyn Earthquake Eng* 2018;108:187–95.
- [14] Grantz WC. Steel-shell immersed tunnels: forty years of experience. *Tunn Undergr Space Technol* 1997;12(1):23–31.
- [15] Rasmussen NS. Concrete immersed tunnel: forty years of experience. *Tunn Undergr Space Technol* 1997;12(1):33–46.
- [16] Janssen WPS, Lykke S. The fixed link across the Øresund: tunnel section under the Drogden. *Tunn Undergr Space Technol* 1997;12(1):5–14.
- [17] Janssen W, Haas PD, Yoon YH. Busan–Geoje Link: immersed tunnel opening new horizons. *Tunn Undergr Space Technol* 2006;21(3–4):332.
- [18] Odgård A, Bridges DG. Design and risk analyses for the Great Belt East Tunnel. *Struct Eng Int* 1995;5(4):216–7.
- [19] Uchida K. Trans-Tokyo Bay Highway. *Struct Eng Int* 1998;8(1):7–9.
- [20] Yamada N, Ota Y. Safety systems for the Trans-Tokyo Bay Highway Tunnel project. *Tunn Undergr Space Technol* 1999;14(1):3–12.
- [21] Huang R. *The Shanghai Yangtze River Tunnel. Theory, design, and construction*. Boca Raton: CRC Press; 2008.