

妈湾跨海通道工程盾构施工过程中风险评估

孙威, 林黎, 李翔宇

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 通过对妈湾跨海通道工程设计、施工方案及所在海域地质、水文条件的综合分析, 明确盾构施工过程中的潜在风险点, 并将其作为风险评估重点。评估结果表明该海底隧道盾构施工总体风险等级为III级, 盾构机进出工作井及盾构区间施工专项风险等级均为III级, 盾构机设备系统安全风险等级为II级。通过风险评价进一步识别盾构施工过程中潜在的重大风险源, 并给出风险控制措施。风险评估能够有效识别盾构施工中的潜在风险因素, 以便于施工单位提前采取针对性的风险控制措施, 减小施工中风险发生概率及风险损失。

关键词: 海底隧道; 风险评估; 盾构施工; 层次分析法

中图分类号: TU714

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0158-06

Risk assessment in the shield construction process of Mawan cross-sea channel

SUN Wei, LIN Li, LI Xiang-yu

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Through a comprehensive analysis of the engineering design construction scheme, the geological and hydrologic conditions of Mawan cross-sea channel, the potential risks in the shield construction process were identified, which were taken as the key point of risk assessment in this study. The assessment results showed that the overall risk of the shield construction of the subsea tunnel was III level. The risk for the construction of the shield machine in and out of the working well and the shield section was III level, and the safety risk of the shield machine equipment system was II level. Through risk assessment, potential sources of significant risks during shield construction were further identified, and several risk control measures were given. Risk assessment can effectively identify potential risk factors in shield construction, so that targeted control measures can be taken in advance. The probability and loss of risks in the shield construction can be reduced significantly.

Keywords: subsea tunnel; risk assessment; shield construction; the AHP method

0 引言

随着我国经济的快速发展, 人们对跨海交通的需求与日俱增, 海底隧道能够适应复杂的海洋环境及气候, 对通航影响较小, 是一种重要的跨海交通方式。海底隧道往往具有隐蔽性强、地质条件复杂、技术难度高、不确定性因素多等特点, 施工风险性较高, 隧道上方为无限的海水, 一旦发生安全事故后果将非常严重, 轻则影响施工进度, 重则造成施工人员伤亡。风险评估能够有效识别隧道建设过程中潜在的风险因素, 以科学的方法进行定性或定量

分析, 针对风险级别选择合理的控制措施, 确保项目顺利实施, 国内外学者对海底隧道风险进行了多方面研究。Einstein^[1]首次将风险相关概念引入隧道工程。B Nilsen等^[2]对复杂地层条件下的海底隧道风险进行研究。吕明等^[3]从地址勘探、隧道选线、海底隧道渗水问题、隧道开挖及岩体支护技术等方面对挪威海底隧道钻爆法施工技术特点及潜在风险进行介绍。王梦恕^[4]结合厦门东通道海底隧道的特点, 对钻爆法施工隧道的顶板厚度及衬砌水压力大小确定、衬砌断面优化及结构防排水设计等阶段存在的潜在风险进行重点分析。宋浩然等^[5]以大连湾

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0802008-02)

作者简介: 孙威(1989—), 女, 博士研究生, 工程师, 从事岩土工程设计与风险评估研究。E-mail: sunweicabr@163.com。

海底隧道为背景, 针对不同隧道施工方案进行风险识别及评价, 推荐采用沉管法施工方案, 并给出风险控制措施。张永刚等^[6]采用信心指数法和层次分析法, 对渤海湾海底隧道钻爆法施工风险进行评估。

目前水下隧道施工风险研究主要针对钻爆法施工的隧道工程, 而对于采用盾构法施工的海底隧道工程施工风险的定量评估研究相对较少。本文采用层次分析法对妈湾跨海通道工程盾构施工风险进行评估, 并给出风险控制措施建议, 为国内海底隧道盾构施工的定量风险评价提供参考依据。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

妈湾跨海通道工程盾构施工段总长2.063 km, 其中海域段总长1.1 km, 规划为双向6车道的城市快速公路。盾构隧道外径15 m, 内径13.7 m, 管片厚度0.65 m, 环宽2 m, 管片强度为C60, 抗渗等级为P12。盾构始发段最小覆土厚度21.0 m, 坡度为-3.7%, 接收段最小覆土厚度10.0 m, 坡度为+3.75%, 隧道盾构段纵断面示意图见图1。海域段水下地形呈中部高、近岸低的“一滩两槽”断面, 水位随时间不断变化。海底主要有小型沉船、落锚、管线等杂物零散分布, 无影响隧道施工的障碍物。

1.2 地质条件

海域段地层自上而下分别为淤泥、黏土、砂质黏性土、全~微风化混合花岗岩, 其中全~强风化岩体呈土状或半岩半土状, 厚度不均且分布不连续; 中~微风化岩体较破碎~较完整, 岩质较硬。

对盾构施工影响较大的地下水主要为赋存在第四系冲洪积砂砾石层中的孔隙承压水和基岩裂

隙承压水, 其中孔隙承压水与海水存在水力联系, 水头随季节、降雨及海水潮汐变化而变化。基岩裂隙承压水主要存在于岩石强、中等风化带中。

盾构隧道穿越全断面软弱地层279 m (中砂、淤泥质黏土、黏土、粗砂、砂质黏性土等), 穿越上软下硬地层段1 032 m (软弱地层、全~强风化、中~微风化混合花岗岩), 穿越全断面岩层段672 m (中~微风化混合花岗岩), 穿越长约80 m的岩层断裂破碎带 (K2+480~K2+560)。断裂带及中风化岩层顶与隧道纵断面位置关系见图1。

1.3 海洋水文条件

隧道所在海域潮汐属于不正规半日潮, 潮流主要为不规则半日潮流, 潮流的运动形式均为往复流, 工程水域涨潮最大流速为1.03~1.53 m/s, 落潮最大流速一般为0.99~1.76 m/s。隧道所在海域经常受台风的袭击和影响, 几乎每年都发生台风暴雨, 台风增水幅度一般在1.0 m左右, 最大为1.96 m。隧道线址所在海域的波浪基本为无浪日数多, 无浪日数占全年29%, 波高小于0.5 m的占波浪的90%以上。影响本工程的波浪主要以风浪为主。

2 潜在风险点分析

通过对妈湾跨海通道盾构施工段设计、施工方案及所在海域的地质、水文条件的综合分析, 明确盾构施工过程中的潜在风险点。

(1) 刀盘刀具故障

海域段基岩主要为全~微风化混合花岗岩, 普遍存在风化不均现象, 如K2+723.50~K2+864.50区段盾构断面强风化地层夹有大量中风化硬岩块, 极易造成盾构机刀具磨损、卡刀、断刀等现象。

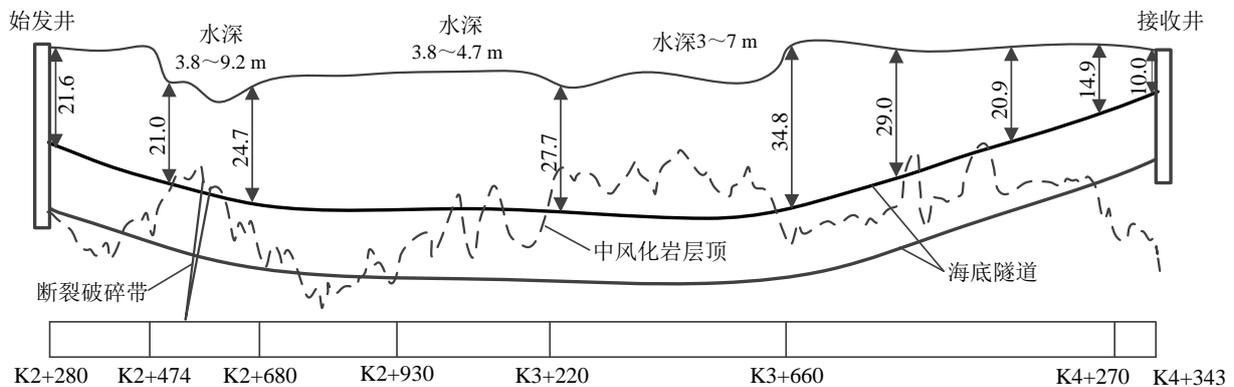


图1 海底隧道盾构段纵断面示意图

Fig. 1 Longitudinal profile of the shield construction section of the subsea tunnel

(2) 涌水、冒顶透水

基岩强、中风化带中存在水头较高的基岩裂隙水, 盾构机在穿越岩层断裂破碎带或构造裂隙发育的岩体时, 可能出现大量涌水。盾构机全断面或局部断面穿越砂层、黏土、淤泥等软弱土体时, 极易出现掌子面失稳坍塌, 存在涌水及冒顶透水的风险

(3) 盾构机偏向或仰头

盾构机多在起伏较大的基岩面附近穿越, 土岩分界明显。上软下硬的地层不利于盾构机姿态的保持, 容易出现盾构机“抬头”或“偏头”现象。

(4) 始发或接收过程地面坍塌

始发段最小覆土厚度约21.6 m, 到达段最小覆土厚度仅为10.0 m, 隧道断面从上向下经历的土层依次为黏土、中砂、淤泥质黏土、黏土粗砂、残积砂质黏土、全~强风化混合花岗岩, 大部分为稳定性较差的松软地层。端头加固效果不好、盾构机进出洞姿态及泥水平衡压力控制不当等原因均有可能诱发工作井地面坍塌。

3 风险评估

依据《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》^[7], 首先对该隧道盾构施工过程的总体风险进行评估, 若总体风险等级为III级(高度风险)及以上, 需要进行专项风险评估。

3.1 总体风险评估

从地质情况、建设规模、洞口形式及特征等评估指标, 对该隧道盾构施工总体风险进行评估。评估指标的分类及赋值标准见《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》^[7]。施工总体风险评估结果见表1, 总体风险分级标准见表2。

由表1可知, 该桥梁施工总体风险估值 $R=2+3+3+3+1=12$, 根据表2可确定施工总体风险等级为III级(高度风险), 需进行专项风险评估。

表1 盾构施工总体风险评估结果

Tab. 1 The overall risk assessment result of the shield tunneling

评估指标	估值	说明
地质情况 G	2	V、VI围岩长度占全隧道长度 20% 以上、40% 以下, 隧道施工区域无瓦斯; 局部存在涌水突泥风险
开挖断面 A	3	单洞三车道大断面隧道
隧道全长 L	3	盾构施工段隧道总长 2 063 m
洞口形式 S	3	盾构工作井为竖井
洞口特征 C	1	洞口加固, 隧道进口施工较容易

表2 盾构施工总体风险分级标准

Tab. 2 Classification standard of the shield tunneling overall risk

风险等级	计算分值 R
等级IV (极高风险)	14 分及以上
等级III (高度风险)	8~13 分
等级II (重度风险)	5~8 分
等级I (低度风险)	0~4 分

3.2 专项风险评估

采用层次分析法, 对海底隧道盾构施工过程进行专项风险评估。按照表3~表4确定各风险事件的事故可能性估值 P 及严重程度估值 C , $P \times C$ 表示风险综合估值 R , 通过 R 值大小划分风险等级: $R=1$ 时, 风险等级为I级(低度); $1 < R \leq 4$ 时, 风险等级为II级(中度); $4 \leq R \leq 9$ 时, 风险等级为III级(高度); $R > 9$ 时, 风险等级为IV级(极高)。当 P 、 C 均等于2时, 风险等级为II级。

海域地质情况沿着隧道轴线变化较大, 隧道不同区段的风险类型及等级均不同, 因此除了盾构始发段、接收段之外, 将盾构区间划分为10个风险评估单元。经过对海底隧道盾构施工过程中潜在风险的识别、分析及估测, 形成风险估测汇总表, 见表5。表5中盾构区间施工风险及盾构机设备系统安全风险的评价对象均为K2+394.4~K2+488里程范围内的盾构区间。该区段内的隧道断面地层上软下硬且存在断裂破碎带。其余9个区段的盾构区间施工风险估测结果不再阐述。

将同级风险因素两两比较, 并参照九度表将比较结果仿数量化, 构成判断矩阵。计算判断矩阵的最大特征值及对应的特征向量, 通过一致性检验后, 该特征向量即为各风险因素等级对于作业内容风险等级的权重向量。

(1) 各风险因素的权重向量计算

刀盘及刀具故障权重向量 $W_{SD1-1}=\{20.00\%, 40.00\%, 40.00\%\}$, 考虑权重的风险系数为4.0, 为II级风险。

盾构机机械故障权重向量 $W_{SD1-2}=\{23.86\%, 47.73\%, 13.39\%, 7.51\%, 7.51\%\}$, 考虑权重的总

表3 事故可能性估值表

Tab. 3 Accident probability estimation

概率值	描述	估值 P
>0.3	很可能	4
$0.03 \sim 0.3$	可能	3
$0.003 \sim 0.03$	偶然	2
<0.003	不太可能	1

表4 事故严重程度估值表
Tab. 4 Accident severity estimation

描述估值 C	一般 1	较大 2	重大 3	特大 4
人员伤亡/人	人员死亡(含失踪)人数<3 或重伤人数<10	3≤人员死亡(含失踪)人数<10 或 10≤重伤人数<50	10≤人员死亡(含失踪)人数<30 或 50≤重伤人数<100	人员死亡(含失踪)人数≥30 或重伤人数≥100
经济损失/万元	Z<10	10≤Z<50	50≤Z<500	Z≥500

注: 事故严重程度估值采取就高原则确定。

表5 盾构施工过程风险估测汇总表
Tab. 5 Summary of risk assessment during shield construction process

分部工程	分项工程	风险因素	P	C	风险等级
盾构机设备 系统安全风险 SD1	刀盘及刀具故障 SD1-1	SD1-1-1 刀盘和刀具磨损严重	4	1	III
		SD1-1-2 卡刀、断刀	2	2	II
	盾构机械故障 SD1-2	SD1-1-3 刀盘轴承失效	2	2	II
		SD1-2-1 推进系统失灵	2	2	II
		SD1-2-2 泥水平衡舱故障	2	2	II
盾构机进出工 作井风险 SD2	盾构机的吊装故障 SD2-1	SD1-2-3 管片拼装系统失效	2	1	II
		SD1-2-4 盾构内气动元件不工作	2	1	II
		SD1-2-5 数据采集系统失灵	2	1	II
	盾构出洞故障 SD2-2	SD2-1-1 吊装设备倾覆、坠落	2	3	III
		SD2-1-2 盾构零件碰撞	2	1	II
盾构机进出工 作井风险 SD2	盾构进洞故障 SD2-3	SD2-1-3 拼装失误或调试失败	2	2	II
		SD2-2-1 始发过程地面坍塌	3	3	III
		SD2-2-2 拆除封门时涌水涌砂	2	2	II
		SD2-2-3 洞口水土流失	2	2	II
		SD2-2-4 盾构出洞轴线偏离轴线	2	2	II
盾构区间施工 风险 SD3	管片工程故障 SD3-3	SD2-2-5 后盾系统失稳	1	3	II
		SD2-3-1 接收过程地面坍塌	3	3	III
		SD2-3-2 洞口水土流失	2	2	II
		SD2-3-3 盾构基座变形	2	2	II
		SD2-3-4 偏离目标井或对接错误	1	3	II
盾构掘进施工风险 SD3-1	掘进对周边建(构)筑物影响较大	SD3-1-1 掘进面土体失稳	3	3	III
		SD3-1-2 冒顶透水	3	3	III
		SD3-1-3 盾构内出现涌水、流砂	2	3	III
		SD3-1-4 遇见障碍物	2	2	II
		SD3-1-5 盾构掘进轴线偏离轴线	2	2	II
		SD3-1-6 盾构抬头或偏头现象	3	2	III
		SD3-1-7 盾尾密封装置泄漏	3	3	III
		SD3-1-8 地面隆起或沉降	3	3	III
		SD3-1-9 掘进对周边建(构)筑物影响较大	1	3	II
隧道注浆故障 SD3-2	注浆管堵塞	SD3-2-1 注浆管堵塞	3	1	II
		SD3-2-2 注浆压力过高或过低	2	2	II
		SD3-2-3 注浆质量不合格	2	2	II
		SD3-2-4 二次注浆不及时	2	2	II
管片接缝渗漏	管片接缝渗漏	SD3-3-1 管片破损	3	1	II
		SD3-3-2 管片就位不准	2	1	II
		SD3-3-3 螺栓连接失效	2	2	II
		SD3-3-4 管片接缝渗漏	2	2	II

风险系数为 3.4, 为II级风险。

盾构机吊装故障权重向量 $W_{SD2-1}=\{66.67\%, 11.11\%, 22.22\%\}$, 考虑权重的风险系数为 5.1, 为III级风险。

盾构机出洞故障权重向量 $W_{SD2-2}=\{55.33\%, 13.33\%, 13.33\%, 6.67\%, 13.33\%\}$, 考虑权重影响的风险系数为 6.5, 为III级风险。

盾构机进洞故障权重向量 $W_{SD2-3}=\{57.14\%, 14.29\%, 14.29\%, 14.29\%\}$, 考虑权重影响的风险系数为 6.7, 为III级风险。

盾构机掘进施工风险权重向量 $W_{SD3-1}=\{11.20\%, 22.41\%, 11.20\%, 3.91\%, 2.56\%, 11.20\%, 22.41\%, 11.20\%, 3.91\%\}$, 考虑权重影响的盾构掘进施工风险系数为 7.8, 为III级风险。

隧道注浆故障权重向量 $W_{SD3-2}=\{20.00\%, 20.00\%, 20.00\%, 40.00\%\}$, 考虑权重影响的盾构进洞安全总风险系数为3.8, 为II级风险。

管片工程故障权重向量 $W_{SD3-3}=\{12.22\%, 22.74\%, 22.74\%, 42.31\%\}$, 考虑权重影响的管片工程风险系数为 3.4, 为II级风险。

(2) 分项工程的权重向量计算

盾构机设备系统安全风险权重向量 $W_{SD1}=\{33.33\%, 66.67\%\}$, 考虑权重的风险系数为 3.6, 为II级风险。

盾构机进出工作井风险权重向量 $W_{SD2}=\{20.00\%, 40.00\%, 40.00\%\}$, 考虑权重影响的风险系数为 6.3, 为III级风险。

盾构区间施工风险权重向量 $W_{SD3}=\{60.00\%, 20.00\%, 20.00\%\}$, 考虑权重影响的风险系数为 6.1, 为III级风险。

通过以上分析可知, 盾构进出工作井施工及盾构区间施工风险等级均为III级(高度)风险。其中盾构进出洞口施工过程的重大风险因素分别为吊装设备倾覆或坠落、始发或到达地面坍塌; 盾构区间施工过程中的重大风险因素分别为掘进面土体失稳、冒顶透水、涌水流砂、盾构机抬头或偏头、盾尾密封装置泄露、地面隆起或沉降。对于安全等级在III级及以上的重大风险源, 除了在施工中加强监测外, 还需要采取控制措施, 降低风险等级, 以保证盾构机施工过程的安全。

3.3 风险控制措施建议

(1) 吊装设备倾覆或坠落

制定起重吊装专项方案, 进场时严格进行起重设备验收工作; 由具有相应资质的专业公司负责盾构机的运输和吊装, 严格遵守国家规定的设备吊装

操作规程; 合理选择盾构机主机吊耳位置, 并由专业技术人员焊接吊耳。

(2) 始发或接收地面坍塌

盾构机掘进前, 采用平行取孔验证端头井的加固效果; 减慢掘进速率, 减小对土体的扰动; 接收段上覆土层厚度仅为 10 m, 需精确控制泥水仓内压力, 避免造成地表隆起或沉降; 出洞时将管片壁后孔隙回填密实, 防止泥水渗漏造成地面沉降。

(3) 掘进面土体失稳

掘进过程中严格控制盾构姿态、掘进速度、泥水仓压力等参数, 地质条件发生变化时, 及时调整掘进参数; 必要时对前方地层进行超前注浆加固, 提高拱顶及掌子面的稳定性; 严格控制泥浆配比。

(4) 冒顶透水

覆土较薄处, 极易发生泥水劈裂、冒顶透水, 因此掘进过程中严格控制泥水仓压力; 计算开挖面稳定所需支护力时, 应当考虑覆土厚度的影响; 在不良地质环境中掘进时, 必要时进行超前注浆加固; 完善施工管理体系, 建立隧道冒顶应急预案, 减小冒顶事故造成的损失。

(5) 盾构机抬头或偏头

在上软下硬地层中掘进时, 严密观察盾构姿态的实时测量数据, 根据盾构机姿态数据不断调整各分区千斤顶的推力及总推力, 以保持盾构机姿态的平稳。

(6) 盾尾密封装置泄露

控制管片拼装接缝以及管片与刀盘孔隙的均匀性; 及时、均匀的压注盾尾油脂; 严格控制盾构姿态, 减小纠偏量, 避免盾构机后退。

4 结 论

(1) 紧密结合妈湾跨海通道盾构段设计、施工方案及所在海域的地质、水文条件, 明确盾构施工过程中的潜在风险点。

(2) 该海底隧道盾构施工总体风险等级为III级(高度)风险, 为风险较大的施工活动。

(3) 采用层次分析法, 对海底隧道盾构施工过程进行专项风险评估。结果表明盾构进出工作井及盾构区间施工风险等级均为III级(高度)风险, 盾构机设备系统安全风险等级为II级(中度)风险。并给出重大风险源的控制措施。

(4) 隧道埋深、海域地质条件等沿着轴线变化较大, 不同区段的风险类型及风险等级均有所区别, 合理划分风险评估单元, 能够使风险评估结果

对工程更具有指导作用。

参考文献

- [1] Einstein H H. Risk and risk analysis in rock engineering[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1996, 11(2): 141-155.
- [2] Nilsen B, Palmström A, Stille H. Quality control of a sub-sea tunnel project in complex ground conditions[C]// Proc of ITA World Tunnel Congress, Oslo, 1999: 137-145.

- [3] 吕明, Grov E, Nilsen B, Melby K. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4219-4225.
- [4] 王梦恕. 厦门海底隧道设计、施工、运营安全风险分折[J]. 施工技术, 2005(S): 1-4.
- [5] 宋浩然, 张顶立, 谭光宗. 大连湾海底隧道风险评估及对策研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 1-6.
- [6] 张永刚, 王永红, 王梦恕. 渤海湾海底隧道工程施工风险评估与控制分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 414-418.
- [7] 交通运输部. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险分折评估指南[Z]. 北京: 2011.

【简讯】

2020年（第九届）国际桥梁与隧道技术大会暨展览会

“2020（第九届）国际桥梁与隧道技术大会”将于2020年9月在广州举办。届时大会将围绕国家重大工程规划建设、智能运维、安全保障等一系列关键问题进行深入研讨，推动前沿科学研究和信息技术融合创新，加快新技术、新工艺、新装备的转化应用，促进我国桥隧基础设施产业转型升级和高质量发展，努力将我国建设成为“桥隧强国”，提升国际影响力和知名度。值此机会，组委会诚邀业界专家代表拨冗莅临，共襄盛会！

一、会议主题

创新引领，建养并重

二、时间和地点

时间：2020年9月23日—25日

地点：广州

三、组织机构

指导单位：中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会

主办单位：上海市土木工程学会、同济大学、广东省公路学会、广东省土木建筑学会、江苏省土木建筑学会、上海市工程建设质量管理协会

官方网站：www.IBTCevents.com

四、会议内容

- (1) 粤港澳大湾区战略交通规划
- (2) 川藏铁路建设关键技术及重大挑战
- (3) 深中通道关键技术与创新
- (4) 重大桥隧工程前沿热点介绍
- (5) 桥隧设计和施工技术创新
- (6) 拟在建桥隧工程最新进展
- (7) 桥隧工程智能运维和安全保障

(8) 桥隧工程结构安全与健康监测

(9) 新技术、新材料在桥隧建设和运维中的应用

(10) 大跨度、特殊结构桥隧施工工艺与装备

(11) 既有桥隧工程病害整治技术与装备

(12) 桥隧工业化、信息化现状及趋势

五、展览

会议期间将设立展示区域，旨在通过展示桥梁与隧道领域新技术、新产品、新工艺、新材料，推动行业发展与技术进步。展示范围包括：桥梁、隧道、地下空间、市政道路、轨道交通等领域新产品与新技术；施工机械设备及配套；测绘、测量、检测、监测仪器与设备；防水、防火、防腐、安防设备与新材料；通风、照明、通讯设备技术与产品；管理、运营、维护及相关设施设备单位；其他相关新产品等。

六、参会人员

两院院士及特邀嘉宾；国家相关部门主管领导；重大工程项目业主单位领导；公路、铁路、桥梁、隧道领域勘察设计单位、施工单位、监理单位、管理和养护单位的管理人员和工程技术人员；科研院所、高校及行业学会、协会专家人员及学术论文作者；重大装备制造、设备商、材料供应商、信息技术供应商、方案提供商；投融资机构及主流媒体等。

七、组委会秘书处联系方式

联系人：王翔

联系电话：021-51757707

电子邮件：xiang.wang@wintimechina.com