

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20241227001

文章编号:1674-599X(2025)01-0001-19

引用格式:汪亦显,薛鹏徽,郑俊,等.高渗透压岩体力学研究进展及其跨海工程应用[J].交通科学与工程,2025,41(1):1-19.

Citation: WANG Yixian, XUE Penghui, ZHENG Jun, et al. Advances in high osmotic pressure rock mass mechanics and its application to cross-sea engineering[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(1): 1-19.

高渗透压岩体力学研究进展及其跨海工程应用

汪亦显¹, 薛鹏徽¹, 郑俊², 柴金飞³, 陈天艳⁴, 邓能伟⁵, 欧可⁶, 郭盼盼¹

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009;2.中铁十一局集团有限公司,湖北 武汉 430061;
3.中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所,北京 100081;4.中国铁路北京局集团有限公司,北京
100038;5.中铁四局集团有限公司,安徽 合肥 230009;6.中铁五局集团有限公司,湖南 长沙 410083)

摘要:我国海底隧道建设事业正如火如荼地开展着,在推动交通和科技发展的同时,也面临着诸多挑战。其中,渗漏突水作为海底隧道建设面临的关键问题之一,是众多学者研究的重点。近年来,高渗透压岩体力学研究在理论与技术上均取得了丰硕成果,并被广泛应用于海底隧道突水灾害的防治工作中。但由于海底施工条件的复杂性,目前,海底隧道围岩失稳破坏的演化过程和复杂地质隧道的突水机制尚不明确,突水灾害风险预测方法仍不完善,严重制约着海底隧道建设事业的发展。因此,对高渗透压岩体力学研究成果与海底隧道工程应用案例进行了整理,总结了高渗透压条件下岩体从微观裂隙扩展到宏观断裂过程规律的研究进展,对高渗透压作用下地质力学参数对隔水岩层致裂机理的影响效应、裂隙岩体渗透破坏演化规律、动应力作用下岩体裂隙的扩展规律、渗流裂隙场扩展过程可视化与重构技术进行了系统梳理,介绍了海底隧道建设过程中面临的高渗透压、复杂地质和多场耦合等理论和技术难题,回顾了高渗透压岩体力学在海底隧道围岩稳定性控制、渗流突水防控、隔水层厚度计算中的应用情况,进一步探讨了高渗透压岩体力学在海底隧道施工风险控制中的应用前景,对海底隧道及其他水下工程突水灾害防治工作具有一定的理论和现实意义。

关键词:高渗透压;裂隙;海底隧道;突水;综述

中图分类号:TU452 文献标志码:A

Advances in high osmotic pressure rock mass mechanics and its application to cross-sea engineering

WANG Yixian¹, XUE Penghui¹, ZHENG Jun², CHAI Jinfei³, CHEN Tianyan⁴, DENG Nengwei⁵,
OU Ke⁶, GUO Panpan¹

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. China Railway 11th Bureau Group Corporation Limited, Wuhan 430061, China; 3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 4. China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100038, China; 5. China Railway No.4 Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230009, China; 6. China Railway No.5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410083, China)

Abstract: The construction of China's submarine tunnels is in full swing, and faces many challenges while promoting the development of transportation and science and technology. As a key problem facing submarine tunnel construction, seepage and water gushing are the research focus of many scholars. In recent years, the research on high osmotic pressure rock mass mechanics has yielded fruitful achievements in theory and technology and has been widely employed in the prevention and

收稿日期:2024-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52374085、42077249)

通信作者:汪亦显(1980—),男,教授,主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail:wangyixian2012@hfut.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

control of water gushing disasters in submarine tunnels. However, due to the complexity of submarine construction conditions, the evolution process of destabilization and damage of surrounding rocks in submarine tunnels and the water gushing mechanism in complex geological tunnels are still unclear, and the method of predicting the risk of water gushing disasters is still imperfect, which seriously restricts the development of submarine tunnel construction. Therefore, this paper reviewed the research results of high osmotic pressure rock mass mechanics and application cases of submarine tunnel engineering and summarized the research progress in rock masses from microscopic fissure propagation to macroscopic fracture process laws under high osmotic pressure. Moreover, it provided a systematic summary for the influence of geomechanical parameters on the fracturing mechanism of the water barrier layers under high osmotic pressure, the evolution law of permeability damage of fissured rock, the propagation law of fissures of rock masses under the dynamic stress, and the visualization and reconstruction of the propagation process of the seepage fissure field. Meanwhile, the theoretical and technical difficulties facing the construction process of submarine tunnels were introduced, such as high osmotic pressure, complex geology, and multi-field coupling. Additionally, this paper reviewed the application of high osmotic pressure rock mass mechanics in the stability control of surrounding rocks of the submarine tunnels, prevention and control of seepage and water gushing, and the thickness calculation of water barrier layers. Furthermore, the application prospect of high osmotic pressure rock mass mechanics in the risk control of submarine tunnel construction was discussed, thereby providing certain theoretical and practical significance for the prevention and control of water gushing disasters in submarine tunnels and other underwater projects.

Key words: high osmotic pressure; fissure; submarine tunnel; water gushing; review

随着“交通强国”“海洋强国”等战略的推动,水下隧道建设的规模和数量不断提升,隧道穿越断裂破碎带、高地应力带等不良地质区段所带来的理论和技术难题也不断涌现。特别是在海底、湖底、岩溶区等高水压环境下,由施工扰动和渗透压力引起的围岩裂隙扩展过程具有复杂性、隐蔽性和突发性,给隧道安全施工带来了极大的挑战^[1-5]。

由于岩体的各向异性,在地应力作用下往往会在岩石内部的应力集中处出现裂隙,这些裂隙在很大程度上影响着岩石的力学性能,同时细观裂隙发展成宏观裂隙所造成的岩体结构与功能失效是引发诸如矿井坍塌、边坡滑坡、隧道塌陷等灾害的最主要原因^[6-8]。然而,裂隙的生成与发育过程复杂多变,随机裂隙的存在导致岩石的失效过程具有多样化特征。此外,高地应力、施工扰动、地层条件等诸多因素相互耦合,导致岩体内部裂隙扩展的影响参数难以量化,岩体内部裂隙扩展演化路径难以探明,进而导致裂隙岩体宏观断裂破坏机制难以厘清。因此,开展高渗透压岩体力学研究,分析岩体损伤演化规律及其力学特性,研究多因素耦合作用下岩体裂隙的扩展规律,对解决富水地层坍塌突水

灾害的防治难题具有重要意义^[9-10]。

海底隧道是“交通强国”“海洋强国”战略的重要组成部分,有利于提高我国交通运输效率和区域的协调发展。自2005年厦门翔安海底隧道建设以来,海底隧道建设相关理论与技术不断进步,但突水灾害防治依然是海底隧道建设过程中面临的首要难题和挑战^[11]。为了应对海底隧道突水难题,众多学者针对隧道衬砌支护、渗流特性、突涌水预测、施工方式等展开了研究,并取得了丰富成果^[12-15]。但海底隧道突水机理和演化机制尚不明确,隧道突水防控预测技术仍不完善,导致海底隧道施工充满挑战和危险。因此,亟须开展适用于海底隧道的高渗透压岩体力学研究,完善海底隧道围岩断裂突水理论,提升海底隧道围岩失稳突水控制技术,保障海底隧道安全、绿色、高效施工。

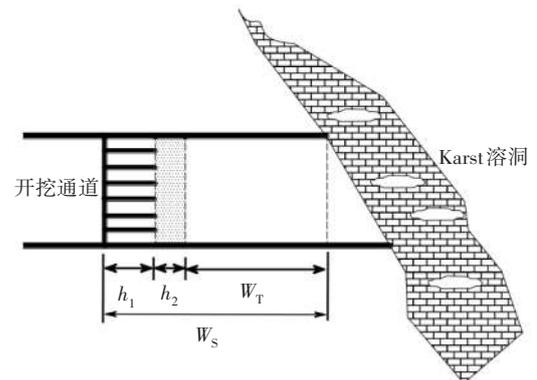
为促进高渗透压岩体力学研究的发展与应用,本文总结了高渗透压岩体力学在地质力学参数、渗透破坏规律、动应力裂隙扩展规律以及裂隙扩展可视化与重构等方面的研究进展,梳理了高渗透压岩体力学在海底隧道工程中的应用情况,讨论了高渗透压岩体力学在水下工程中应用的发展方向。

1 承压隔水层地质力学参数影响研究

承压隔水层的渗透参数及其影响因素对于高承压隔水层围岩裂隙场的宏细观量化及致裂机理等有着至关重要的作用。承压含水层理论、试验及工程应用研究主要集中在两个方面。一是深层地下水开采;二是承压含水层对矿山开采过程有较大影响,成为长期关注焦点。郑刚等^[16]、CHAI等^[17]利用数值模拟技术对承压含水层局部降压引起的变形场及参数变化进行了分析;徐良骥等^[18]对承压水降水问题进行了研究。从近年来发生的重特大突水灾害来看,突水事故难以遏制的关键原因是人们对突水的前兆规律认识得不够深入,缺乏预测和预报的理论和方法。王晓振等^[19]对在承压含水层下采煤进行模拟,为承压水害的预测与防治提供了有益借鉴;CHEN等^[20]基于 Forchheimer 方程建立了裂隙岩体渗透系数和非线性系数的解析模型;HE等^[21]通过反分析的方法得到了裂隙岩体的等效渗透系数;陶煜等^[22]根据单裂隙平行板渗流理论,提出等效渗流阻的概念,得到了裂隙岩体等效渗流阻、渗透率与应力之间的关系;VANDAMME等^[23]、BRUNO等^[24]基于广义 Biot 孔隙弹性模型,分析了渗流流速和裂隙变形之间的关系。上述针对承压隔水层的研究,提升了人们对岩体渗流裂隙场的认知,也推动了人们对富水裂隙岩体渗透断裂成灾问题的研究。一般而言,富水裂隙岩体的渗透系数和渗透特性的确定对分析裂隙岩体渗透机制和裂隙岩体强度参数具有重要意义。

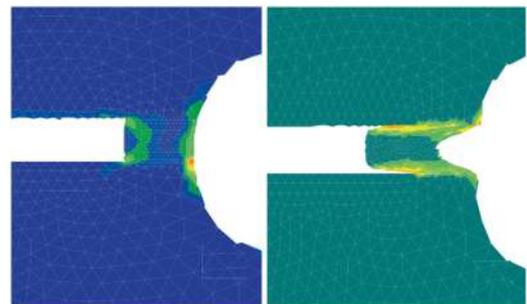
2 高渗透压裂隙岩体渗透破坏规律研究

随着国家重大战略工程的建设,处于复杂地质环境中的工程越来越多,如海底隧道、岩溶地层隧道、富水地层矿山等,不断推动着高渗透压下裂隙岩体活化、断裂演化规律的研究。如 ZHAO等^[25]基于煤矿突水灾害进行了动水压力作用下围岩稳定性分析(图 1);罗声等^[26]基于断裂力学理论,研究了动水压力作用下裂隙岩体破损机理;陈俊国等^[27]根据裂隙蠕变效应,建立了裂隙岩体流固耦合时空演化模型;王文学等^[28]研究了应力恢复作用下裂隙岩体内裂隙开度及渗透性的演化规律;王媛等^[29]研究了多裂隙岩体渗流场和应力场的耦合规律。



注: W_S 为防水岩柱所需宽度; W_T 为防水岩柱理论宽度; h_1 为爆破孔深度; h_2 为爆破干扰深度。

(a) 防水岩柱宽度示意图



(b) 动水压力作用下防水岩柱失稳过程

图 1 岩溶区煤矿突水及其安全厚度^[25]

Fig. 1 Water gushing and safe thickness of coal mines in Karst areas^[25]

ZHANG等^[30]开发了一套模拟加压水的防水系统,该系统可以显示底板裂缝的发育过程和涌水通道的形成;曹平等^[31]发现渗透水压对力学特性影响显著;ZENG等^[32]研究了正交异性水力压裂问题,建立了岩石变形与流体流动耦合模型;ZHAO等^[33]通过离散元法(discrete element method, DEM)进行了虚拟水力压裂的模拟;张春阳等^[34]通过对斜长角闪岩进行单轴压缩蠕变试验,分析了深部巷道该类型围岩的流变稳定性;ZHAO等^[35]建立了岩石裂缝流变断裂本构关系。

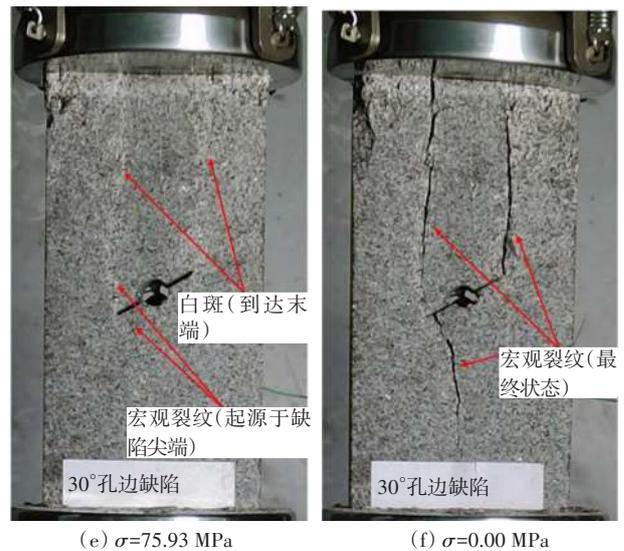
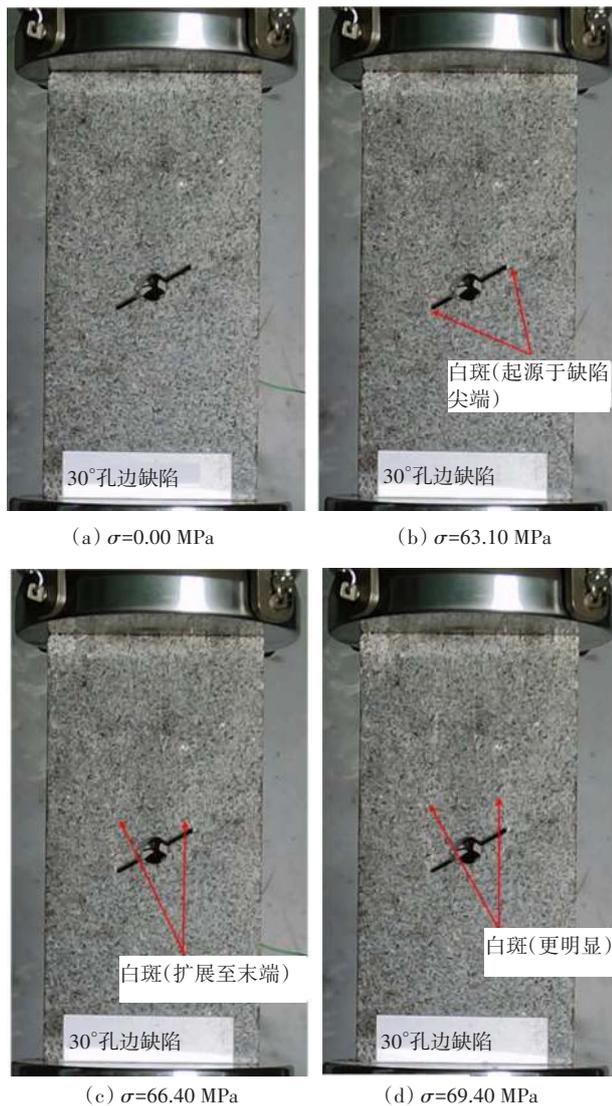
在扰动应力作用下承压隔水层的裂隙活化直至断裂,并形成贯通的导水通道,加快了裂隙场损伤的积累,增大了高渗透压作用下隔水层的变形程度和塌陷概率,所以厘清扰动应力作用下裂隙的活化规律是进行隔水层失稳塌陷机制定量化推断的前提。

3 动应力作用下高渗透压岩体裂隙扩展规律研究

在扰动应力作用下高渗透压对裂隙活化扩展

的相关影响效应难以被厘清,因此对动应力作用下岩体裂隙扩展断裂规律进行研究十分必要。

DAI等^[36]利用具有“V”形缺口的半圆形弯曲试样来确定岩石I型动态断裂参数;WANG等^[37]通过试验研究了平板圆孔型岩样的断裂过程(图2,图中 σ 为压应力);WANG等^[38]采用泰勒-陈-库兹莫尔连续介质损伤模型对自由表面附近的炮孔和爆坑的形成过程进行了数值模拟;朱飞昊等^[39]建立了聚能爆破的岩石断裂力学模型;肖旺新等^[40]用小波变换图像处理技术对摄影图片进行了处理,计算出了爆破裂纹的发展速度;WANG等^[41]研究了小孔径爆破对含水岩体裂纹扩展和损伤的影响;姚池等^[42]提出了脆性各向异性岩石损伤断裂的数值模拟方法;SARFAZI等^[43]发现岩石的宏观剪切断裂是由大量黏结圆片的微观拉伸断裂引起的;梁正召等^[44]讨论了具有不同岩层倾角的横观各向同性岩体的不同破裂模式及其破坏准则;赵延林等^[45]研究了随机



(e) $\sigma=75.93$ MPa (f) $\sigma=0.00$ MPa

图2 试验中平板圆孔型岩样的断裂过程^[37]

Fig. 2 Fracture processes in experiments with flat-plate circular-hole-type rock samples^[37]

卸荷裂纹扩展的时效特性,建立了随机卸荷岩体裂纹流变断裂的数学关系式,为研究卸荷岩体变形损伤特性提供了细观层面上的理论依据;LIN等^[46]通过数值模拟检测了常规和真实三轴试验下岩体的分层强度和变形特征。

就高渗透压裂隙岩体活化断裂而言,其研究内容常涉及从宏观到细观甚至微观损伤特性等方面,而其裂隙活化扩展规律相关影响参数(包括理论、试验、数值模型参数)是进行隔水层失稳塌陷机制定量化推断的共同前提和基础。

4 渗流裂隙场活化扩展的可视化与重构

岩石断裂的试验研究是理论研究和数值模拟研究的基础,许多学者通过室内试验对裂隙岩石的宏细观断裂进行了深入研究。汪亦显等^[47]探讨了水化作用对岩体断裂韧度等参数的影响规律;ZHAO等^[48]提出了在液压和远场应力作用下实用型岩石裂缝流变断裂判据。在渗流-应力作用下,受非均质性、多重网络和次生裂纹的影响,多重裂隙网络活化断裂的塌陷机理更为复杂。王恩志等^[49]建立了二维网络渗流模型;牛多龙等^[50]研究了承压开采背景下顶板岩层破断和渗流规律的时空关系特征及采动破坏区发育范围。

在动应力作用下的高承压含水层裂隙场贯通、扩展、破坏的演化过程中,很难真实地观察到裂纹的扩展过程。目前,3D打印技术能较为准确地再现

岩体裂隙网络。ISHUTOV 等^[51]打印了砂岩孔隙模型,精确复制了砂岩内部的孔隙特征;熊祖强等^[52]借助 3D 扫描和打印技术进行了岩体结构面的仿真制作;LIN 等^[53]首先尝试采用光敏树脂作为节理材料打印了不规则柱状节理;鞠杨等^[54]将 3D 打印技术和应力冻结技术相结合(图 3),选用树脂材料制作出了煤岩体的三维重构裂隙网络,直观定量地表征了煤岩体内部复杂结构和应力场的分布特征,该成果为渗透压作用下裂隙场活化断裂、贯通、塌陷等问题的研究提供了借鉴。

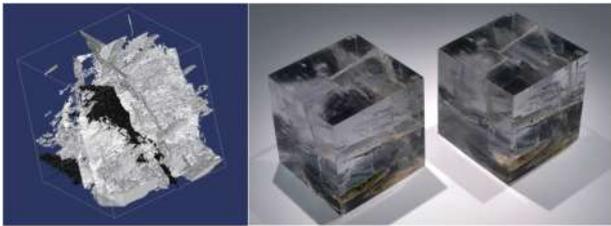


图 3 3D 打印和应力冻结技术^[54]

Fig. 3 3D printing and stress freezing technology^[54]

将裂隙损伤电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)数字图像二值化后,冻结三维裂隙网络并实现重构^[55-60],可以形象直观地重现内生裂隙网络的三维形态特征,而且可以为宏观的高渗透压隔水层断裂破坏等灾害问题提供更多的解决思路,但是多重裂隙活化扩展过程的三维可视化难以实现,而传统手段又具有监测点有限、可信度与准确性不高、成本高等缺点^[61-63]。因此,发展有效、可靠的方法来直观显示应力场的分布及演变规律,验证数值模拟的正确性显得极为重要和急切,这就需要采用 CT 数字图像二值化、3D 打印及应力冻结技术,进行宏观尺度下真实模拟现场塌陷的试验,有效突破内生裂纹重构及裂隙活化辨识相关试验的技术瓶颈。

因此,突破承压水高渗透压下隔水层渗流裂隙场活化致裂塌陷灾变数值仿真重构技术瓶颈,实现高渗透压导致的塌陷等地质灾害宏观观参数量化因子辨识、标定和提取,为宏观断裂理论、相似试验、数值再现的量化过程验证等提供量化方法,是解决诸多地质突水塌陷灾害问题的关键科学基础。

5 高渗透压岩体力学研究在海底隧道中的应用

海底隧道是在海峡、海湾和河口等处的海底之下建造的沟通陆地间交通的管道技术工程。海底

隧道一般分海底表面和海底地层之下两种类型,常用的建筑方法有沉管法、钻爆法、盾构法、全断面隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)法等^[64]。

20 世纪 30 年代,第一条海底隧道在日本开始建设,之后,英国、法国、挪威、美国等国相继开始海底隧道的建设,海底隧道在世界范围内得到了蓬勃发展。时至今日,全球跨海隧道已逾百座,其中著名的海底隧道有日本青函隧道(图 4)、英法海峡隧道和挪威莱尔多隧道等。这些海底隧道工程为中国类似工程的建设提供了宝贵的技术经验,相应的理论研究与施工技术也得到了快速发展。

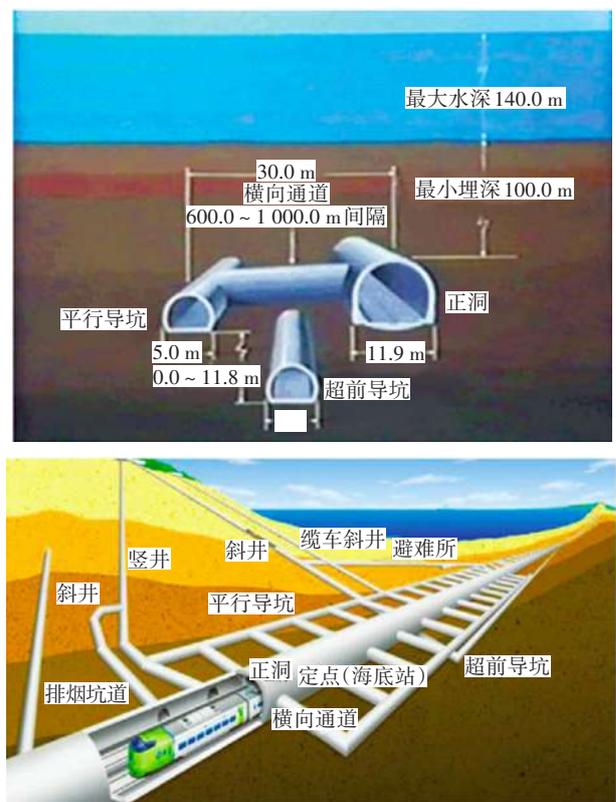


图 4 日本青函隧道结构示意图^[65]

Fig. 4 Structure of Seikan tunnel in Japan^[65]

近二十年来,随着经济的高速发展和隧道施工技术的日趋成熟,我国建设了大量水下隧道,其中海底隧道修建了近 40 座(表 1)。2005 年开工的厦门翔安海底隧道是我国大陆修建的第一条海底隧道,隧道全长 6 050 m,隧道洞总长 5 900 m,最大水深约为海平面以下 70 m。大陆第二条大型海底隧道是青岛胶州湾海底隧道,隧道全长 7 797 m,其中海底隧道部分长 4 095 m,最大水深约为 44.5 m。广深港狮子洋海底隧道采用盾构法施工,全长 10 800 m,设计时速 350 km,是国内首个海底铁路隧道,被誉为“中国世纪铁路隧道”。港珠澳大桥主体工程

表1 我国已建、在建海底隧道统计^[64,66]Table 1 Statistics on China's completed and under-construction submarine tunnels^[64,66]

序号	隧道名称	所在地区	工程起止年份 (含计划竣工年份)	隧道断面尺寸/m (开挖直径或宽×高)	隧道长度/m	水下段长度/m	水头高度/m	最大水深/m	最小埋深/m	主要施工方法
1	红磡海底隧道	香港	1969—1972年	10.5	1 860	1 605	28	14	2.13	沉管法
2	香港地铁水底隧道	香港	1976—1979年	13.1×6.5	1 400	1 300	26	17	2.5	沉管法
3	东区海底隧道	香港	1986—1989年	35.45×9.75	2 250	1 860	30	18	2	沉管法
4	西区海底隧道	香港	1993—1997年	33.40×8.02	1 970	1 340	27	15	1.5	沉管法
5	西线隧道	香港	1994—1996年	12.4×7.7	1 300	1 260	28	18.4	2	沉管法
6	厦门翔安海底隧道	福建	2005—2010年	13.5×5.0	6 050	4 200	70	17	12	钻爆法
7	广深港狮子洋海底隧道	广东	2005—2011年	10.8	10 800	9 340	50.7	27	26	盾构法
8	青岛胶州湾海底隧道	山东	2006—2011年	28.3×18.7	7 797	4 095	82.8	44.5	25	钻爆法
9	厦门机场海底隧道	福建	2006—2008年	37.3×5.0	1 376	625	10	4.54	0	堰筑法
10	沈家门港海底隧道	浙江	2008—2015年	11.5×6.4	393	212	8.9	6.9	2	沉管法
11	台山核电站取水隧洞(1、2号机组海域工程)	广东	2009—2013年	8.9	4 330.6	4 084.8	55.75	4	8	盾构法
12	港珠澳大桥海底隧道	广东	2009—2018年	37.95×11.40	6 700	5 664	-	44	-	沉管法
13	横琴岛澳门大学海底专用隧道	广东、澳门	2011—2012年	32.2×9.7	1 570	1 030	22	9	7	明挖法
14	港珠澳大桥珠海连接线项目(拱北隧道)	广东	2012—2017年	22.243×23.840	2 740	1 225	30.62	4.67	4	浅埋暗挖法
15	香港沙中线海底隧道	香港	2013—2020年	17.9×8.1	1 700	1 663	28	24	1.5	沉管法
16	厦门地铁2号线穿海隧道	福建	2014—2019年	7.04	2 769	2 769	60	33	8.7	盾构法
17	香港屯门-赤鱗角连接工程	香港	2014—2020年	17.60/14.00(双洞双线)	5 700	5 000	56	25	15	盾构法
18	厦门地铁3号线海底隧道	福建	2015—2021年	7.02	4 898	3 640	60	19	41	矿山法、盾构法
19	青岛地铁1号线海底隧道	山东	2015—2019年	12.40×8.76	8 100	3 490	88	42	35	复合式衬砌
20	汕头海湾隧道	广东	2016—2022年	东线 15.01, 西线 15.03	东线 3 047.50, 西线 3 045.75	2 800×2(双线)	23	8.5	12	盾构法
21	厦门第二西通道(海沧隧道)	福建	2016—2021年	13.75×5.00	6 306	2 810	72.6	22.4	43.1	钻爆法
22	青岛地铁8号线	山东	2017—2020年	7.60×8.40/7.02	7 900	5 205	51	51	22.72	矿山法、盾构法
23	大连地铁5号线火车站-梭鱼湾南站	辽宁	2017—2022年	12.26	3 310	2 310	50	14	12.2	盾构法
24	鲁家峙至东港公路工程海底隧道	浙江	2017—2022年	11.3	左线 785, 右线 777	420×2(双线)	18.9	7.7	8.5	盾构法
25	深中通道海底隧道	广东	2017—2024年	(46.00~55.46)×10.60	6 845	5 035	26.82	25.48	2	沉管法
26	厦门地铁6号线	福建	2017—2020年	6.2	3 798	1 573	21	7.8	5.73	盾构法
27	大连湾海底隧道	辽宁	2019—2023年	33.4×9.7	4 857	3 035	9.845	5.534	0.679	沉管法
28	深圳妈湾隧道	广东	2019—2023年	15	2 060×2(双线)	1 100×2(双线)	32	14	25	盾构法
29	汕汕高铁海底隧道	广东	2019—2023年	14.57	9 191	2 169	83	10	6.5	盾构法
30	T2主干路及茶果岭隧道	香港	2019—2026年	13.5	2 700	2 000	33.2	14.5	15.2	盾构法
31	广湛高铁海底隧道	广东	2020—2024年	14.33×14.56	9 640	2 500	20.8	20.8	4.62	盾构法、明挖法
32	深江铁路珠江口隧道	广东	2020—2025年	13.42	13 690	11 050	106	18.16	19.4	盾构法、矿山法
33	胶州湾第二海底隧道	山东	2022—2027年	矿山法 15.0×10.6, 盾构法 15.0	14 373	9 950	矿山法 115, 盾构法 96	46	9	矿山法、盾构法
34	厦门电力与清水进岛隧道	福建	2022—2027年	6.7	6 200	3 100	42.1	42.1	9.2	盾构法
35	甬舟铁路金塘海底隧道	浙江	2022—2028年	14	16 180	8 300	85	45	17	盾构法
36	广澳港铁路汕头海湾隧道	广东	2022—2026年	盾构段 12.90, 矿山段 13.59×11.73	9 965	2 990	62	17.4	16.9	盾构法、矿山法

中海底隧道全长 6 700 m,海底部分长 5 664 m,由 33 节巨型沉管和一个合龙段组成,最大安装水深超过 40 m。青岛地铁 1 号线海底隧道全长 8 100 m,其中海域段长 3 490 m,是国内首条地铁海底隧道。汕头海湾隧道是国内首个超大直径盾构海底隧道,也是我国地处 8 度抗震设防烈度区的超大直径盾构海底隧道。甬舟铁路金塘海底隧道的施工标志着世界最长海底高铁隧道开启“穿海之旅”。这些海底隧道工程的建设极大地促进了我国交通运输行业的发展,也为我国“交通强国”“海洋强国”战略的实施打下了坚实的理论和技術基础。

5.1 海底隧道地质力学特点

海底隧道在施工过程中所面临的由高渗透压导致的一系列渗漏突水问题也是众多学者和技术人员亟待解决的难题。

即将建成的甬舟铁路金塘海底隧道是目前世界上最长的海底高铁隧道,连接着宁波与舟山,建成后将提高舟山人民的出行效率和生活水平。金塘海底隧道全长 16 180 m,盾构段长 11 210 m,其中金塘侧长 6 273 m。金塘侧盾构穿越的地层以软土为主,长 589 m 的弱风化岩层(平均强度 33~54 MPa,最大强度 165 MPa)占 9.4%,长 324 m 的上软下硬地层占 5.2%,长 5 360 m 的软土地层占 85.4%。盾构穿越的地层较为复杂,涉及粉砂、粉土、粉质黏土、强风化、弱风化凝灰岩等地层。不良地质区段有砂土液化带、断裂带。隧址区盾构段的凝灰岩、凝灰岩熔受岩体不均匀风化的影响,局部地层软硬不均,基岩面起伏较大,因此盾构隧道施工具有一定难度。以金塘海底隧道为例,海底隧道建设面临着以下几方面难题:

一是高渗透压。在海底隧道工程中,高渗透压作用下隧道稳定性影响与控制技术是关键研究内容。金塘海底隧道在建造过程中将面临高渗透压情况^[67]。在高压、富水、大埋深复合地层中掘进,若

盾构机主驱动密封、盾尾密封失效将造成突泥、涌水、开挖面失稳坍塌等严重事故。此外,金塘海底隧道金塘侧局部穿越富水砂层、强风化岩层,当管片脱出盾尾后,岩层裂隙水量丰富、盾构掘进超挖、线路上坡及变坡、同步注浆效果不佳、凝固时间长等因素将会导致管片上浮、错台、裂缝、渗漏水等,影响隧道后期的质量和安全。

二是海底地质条件复杂。海底隧道通常深埋于海床下,其上覆十几米乃至几十米的海水,因此地质勘探工作难度大,勘探数据精确度低^[68]。此外,海底隧道距离长,穿越破碎断裂带、风化岩等不良地层的情况并不少见。例如,在金塘海底隧道,盾构穿越的地层涉及软土、强风化和弱风化硬岩,金塘侧掘进段中存在长约 324 m 的上软下硬地层,且存在孤石区;在掘进过程中易出现渣土流动性差所致的排渣困难、施工效率低、地表沉降、姿态易跑偏等问题;盾构穿越部分液化地层(主要分布在地面至地面以下 20 m 范围内),而用盾构掘进液化地层存在切口压力波动大、盾构机栽头、海底冒浆、盾尾渗漏、沉降过大等风险(图 5)。

三是施工扰动与高渗透压的耦合作用使隧道围岩渗流场与应力场发生重分布,隧道穿越不良地质带致使围岩失稳破坏机理复杂,进而使风险预警及防控难度变大,因此隧道发生突水事故的可能性较大,施工风险较高^[69-71]。

为了应对上述问题带来的挑战,需要采取一系列工程措施。例如,可以通过优化隧道设计,采用合理的支护结构和防水措施,来减少流体对隧道的影[72]。同时,还可以通过监测隧道周围的水文地质条件和隧道结构变形情况,及时发现和处理可能出现的裂隙扩展问题^[73-74]。此外,采用先进的施工技术,可以在一定程度上控制隧道周围的应力状态,减少高渗透压对隧道稳定性的影响^[75-77]。

近年来,高渗透压岩体力学的研究也取得了显

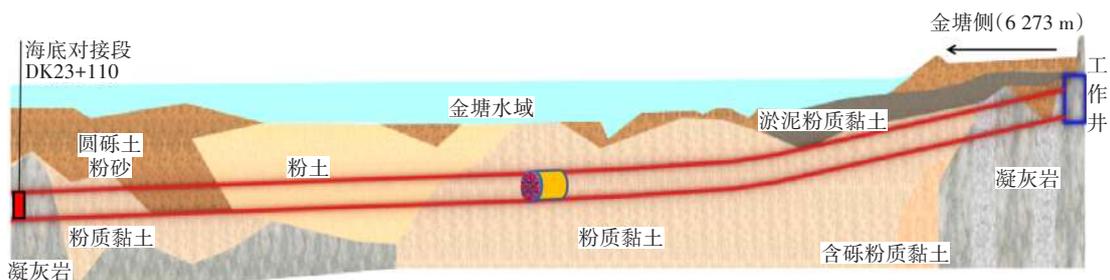


图 5 金塘海底隧道金塘侧地质纵断面图

Fig. 5 Geological profile of Jintang submarine tunnel

中显得尤为重要。

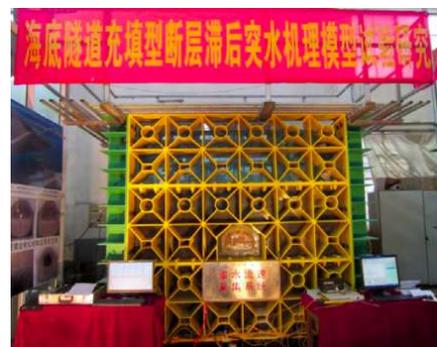
国内在海底隧道建设初期对海底隧道突水机理的认识主要源于采矿和山岭隧道工程的研究。张明聚等^[97]在采矿突水机理研究的基础上,基于岩体极限平衡理论,对海底隧道正常地质段和断层处的突水机理进行了力学分析,给出了隧道突水临界水压力,并将其应用于厦门翔安海底隧道的建设中;而沈荣喜等^[98]基于极限平衡理论,分析了海底隧道临界水压力的影响因素,指出海底隧道临界水压力与围岩力学性质、隔水层厚度、隧道开挖尺寸、开挖方式、支护方式等因素有关;张顶立等^[99]从突水通道产生的力学机制方面将海底隧道突水分为水力劈裂型、地层坍塌型和结构面滑移型三种模式,并揭示了海底隧道的突水机制。

从渗流力学的观点来看,土壤、岩石和混凝土均为孔隙介质或裂隙介质。宋浩然^[100]根据断裂力学原理,建立了海底隧道裂隙岩体开裂损伤的流固耦合模型,对水力劈裂型突水进行了模拟,得到了围岩起裂、扩展、贯通的开裂区及变形的发展规律,并实现了对厦门翔安海底隧道围岩变形的精细控制;厉明浩^[101]基于离散裂隙网络,结合有效应力原理及双重物质点理论,提出了流体驱动下裂隙岩体水力致裂破坏的近场动力学应力-渗流耦合模拟方法,并将其应用于汕头湾海底隧道的建设中。随着流固耦合理论不断完善,流固耦合计算程序已被嵌套进多个数值模拟软件中,从而实现了孔隙介质中流体渗流过程的精细化模拟^[102]。例如, FU 等^[103]利用有限元方法建立了流固耦合模型,并利用该模型对胶州湾海底隧道的渗流演化、岩体变形和衬砌稳定性进行了探讨,模拟结果与现场监测数据吻合较好。林涛等^[104]采用块体离散元方法模拟研究了浆液-裂隙耦合模型、裂隙剪胀等因素对裂隙岩体浆液扩散的影响规律,其计算结果与青岛胶州湾海底隧道的监测数据基本吻合,误差在工程应用的容许范围内。

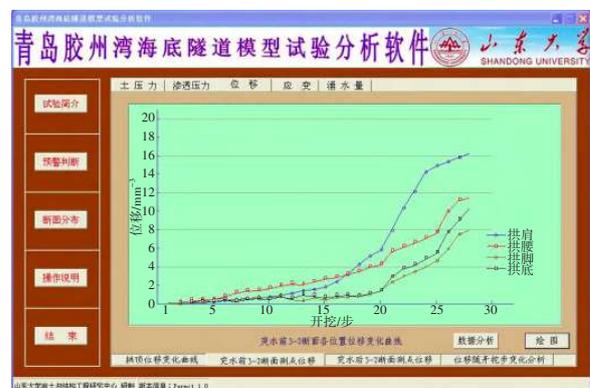
目前,关于渗流力学研究的模型试验主要集中在采矿及跨江跨河的隧道工程上。为了探明海底隧道建设过程中渗透压与围岩应力应变的动态响应规律,众多学者采用模型试验的方式对其展开了研究,研究成果在一些重大海底隧道工程中发挥了重要作用^[105]。蔚立元等^[106]研制了以石蜡为胶结剂的憎水型流固耦合相似材料,开发了光纤监测系统,并以青岛胶州湾海底隧道为工程背景开展了流

固耦合相似材料试验,指出应尽量减小开挖面积; XUE 等^[107]基于海沧海底隧道建立了风化岩力学渗流模型试验系统,分析了隧道的位移、应力和渗流特性。传统的裂隙渗流试验无法直接透过裂隙介质观测渗流过程中流场的分布状态。有学者^[108]采用 CT、核磁共振等方法观测液体的流动状态,但这类试验所需设备昂贵且无法直接观测。为了方便观察和记录试验过程,从简单的透明试验材料^[109]到可视化试验系统,模型试验的可视化研究都在不断精进。李术才等^[110]采用钢化玻璃试验箱结构研制出了新型流固耦合模型试验系统,实现了试验的可视化,并针对青岛胶州湾海底隧道开展了流固耦合模型试验研究,揭示了海底隧道施工过程中洞壁压力和围岩位移场、渗流场等的变化规律,如图 7(a) 所示;此外,李术才等^[111]针对青岛胶州湾海底隧道开发出了模型试验软件系统,并用其分析了隧道开挖时断层突水、拱顶沉降等的变化规律,如图 7(b) 所示。

海底隧道防渗防突水研究工作已经取得了一些重要成果,并在细观裂隙岩体起裂扩展机理、多场耦合量化模型、宏观渗流模型试验等方面取得了



(a) 试验系统^[110]



(b) 分析软件^[111]

图 7 新型可拓展海底隧道突水模型试验系统及分析软件

Fig. 7 Water gushing model test system and analysis software of novel expandable submarine tunnels

长足进步,为高渗透压作用下海底隧道的安全施工作出了重要贡献。

5.4 高渗透压岩体力学在隧道隔水层厚度计算中的应用

承压隔水层厚度是水下隧道防突水的重要研究对象。相较于隧道围岩稳定性研究和隧道防突水研究,隔水层安全厚度因其结果直观明了被研究者广泛应用于水下隧道的施工风险防控工作中。大量的研究与工程实践表明,隧道失稳与施工扰动导致的隔水层失稳有关^[112]。此外,国内外学者研究发现^[113-117]:若隔水层厚度太小,隧道稳定性无法得到保障;若隔水层厚度过大,则隧道埋深及长度均会增加,工程整体造价也随之增高。因此确定承压隔水层安全厚度对海底隧道断面设计至关重要。

有学者从力学角度进行了承压隔水层安全厚度的研究,但由于隔水层厚度的影响因素较多,目前还没有成熟的理论公式来确定合理的最小隔水层厚度。LIU等^[118]利用极限平衡法研究了隧道上浮力,为盾构隧道安全抗浮力下的最小埋深提供了计算公式。针对传统上覆土层厚度计算方法中没有考虑土体自身剪切强度对抗浮作用的影响问题,戴小平等^[119]提出了一个新的覆土厚度计算方法;郭彩霞等^[120]考虑水、土、注浆浆液的动力影响,给出了水下盾构隧道的合理覆土厚度和最小覆土厚度临界值的判定依据和条件,并提出了一种估算水下盾构隧道最小覆盖层厚度的改进方法^[121]。

虽然关于隔水层厚度的研究已经取得了较多成果,但其主要集中在岩溶隧道工程上,对高渗透压作用下海底隧道的研究仍然不足。1993年,NILSEN^[122]通过对已建海底隧道岩石覆盖厚度的下限进行归纳分析,得到了海底隧道基岩埋深经验曲线;李廷春等^[123]运用三维快速拉格朗日法,考虑不同侧压力系数,通过分析隧道应力、位移、塑性区等因素确定了厦门海底隧道最小顶板厚度;徐帮树等^[124]将海底隧道简化为半无限空间的水文地质模型,分析了海底隧道涌水量和岩石覆盖厚度之间的关系;赵笃坤^[125]建立了防突层厚度力学计算模型,结合力学分析与能量法构建了不同类型的围岩破坏防突层厚度计算理论,确定了典型的海底隧道突水类型防突层最小安全厚度的计算方法,并将其应用于青岛地铁1号线海底隧道工程中;靖一峰等^[126]基于水力学理论,推导并得到了考虑上覆淤泥层的海底隧道渗流场解析解,依托汕头湾海底隧道工程

探究了上覆淤泥层对海底隧道渗流特征的作用机理。

为了能够更精细地量化高渗透压作用下的海底隧道最小隔水层厚度,众多学者根据经典弹性力学理论,将隧道围岩塑性区半径作为海底隧道最小隔水层厚度,并结合有限元软件进行了应用。蔚立元等^[127]考虑塑性区体积、隧道应力应变等因素,提出了确定水下隧道合理覆盖层厚度的方法,并以胶州湾海底隧道为工程背景进行了运用;SUN等^[128]建立了兼顾地基加固和渗流效应的海底隧道围岩力学模型,并根据塑性区范围验证了胶州湾海底隧道加固参数的可靠性;秦松等^[129]指出隧道围岩塑性区单元数量与海水深度正相关;金波等^[130]指出增加内水水头可以有效限制围岩塑性区的发展。

上述对海底隧道隔水层厚度的研究表明,合理的隔水层厚度是保障隧道围岩稳定性与预防隧道渗流突水的重要因素。随着理论与技术的不断发展,基于弹塑性分析、损伤理论、流固耦合、海水深度、施工方法等多种因素对海底隧道隔水层厚度影响的研究,取得了较为丰富的成果,已有多种海底隧道隔水层厚度的选取方法被应用于海底隧道的建设中。这些方法主要有挪威经验法、日本最小涌水量预测法、顶水采煤法、最小位移法、权函数法等^[131],为海底隧道设计与建设提供了更加成熟完善的施工方案与技术,对海底隧道建设具有重要意义。

6 高渗透压岩体力学在海底隧道中的应用前景

海底隧道突水是在多种因素相互耦合作用下形成的非线性问题。现有的关于高渗透压岩体力学的理论分析、数值模拟、物理试验等在解决实际工程问题时通常只考虑某几项主要因素而忽略次要因素,或对实际问题提出假设条件来简化分析,这导致理论计算值与工程实际监测值相差甚远。因此,有学者积极探索可用于解决海底隧道渗流突水等非线性问题的方法。XUE等^[132]、SONG等^[133]分析了海底隧道突水风险影响因素,采用云模型、贝叶斯网络对海底隧道突水风险等级进行评价,并成功将其应用于青岛胶州湾海底隧道、厦门海沧海底隧道等国家重大工程的建设中;刘辉喜等^[134]采用随机-模糊统计方法对深圳妈湾海底隧道勘察数据进行了分析,并对岩体力学参数进行了相关性分析,

指出随机-模糊统计方法比传统随机统计方法获得的土体参数更接近实际值;谭明伦等^[135]以青岛胶州湾第二海底隧道为研究背景,利用机器学习方法对隧道工作面特征多维数据集和拱顶沉降监测数据的复杂深层关系进行学习,实现了围岩稳定性的智能预测。随着计算机技术与智能算法的不断成熟,将高渗透压岩体力学与机器学习算法相结合,采用大数据决策指导施工或许更加快速有效。

目前,海底隧道突涌水理论基本上是从采矿或山岭隧道工程研究的基础上发展而来的,而海底隧道无论在突涌水机制上还是在处治方式上均与采矿或山岭隧道存在较大差异^[99]。海底岩层地质条件、海水侵蚀、地震作用、施工方式等引起的渗流场、应力场、温度场等多场耦合作用对隧道围岩的影响机制尚不明确,多场耦合作用下的海底隧道围岩失稳模式、突涌水形成机制及突水判据等尚未明晰,因此建立可靠、全面的海底隧道围岩失稳突水风险控制方法和标准,并采取行之有效的施工措施,对海底隧道的安全建设具有重要的理论和实际意义。

7 结论与展望

高渗透压岩体力学研究作为富水地层突水问题的关键工作,对诸多水下工程施工具有重要意义。岩体力学发展至今,众多学者采用理论分析、数值模拟、物理试验等方法在高渗透压裂隙扩展方面开展了大量研究,并在海底隧道工程的安全建设中进行了成功应用。

1) 本文综述了高渗透压作用下裂隙岩体的研究进展,发现岩体渗透性和渗透系数对分析裂隙岩体渗流机制具有重要意义,而高渗透压和动应力扰动作用加快了裂隙岩体起裂、扩展直至贯通失效的过程,也是隔水岩层断裂破坏的主要诱因。

2) 为了研究高渗透压及应力扰动对裂隙扩展的影响规律,众多学者在理论研究和数值模拟的基础上开展了可视化试验的探索,虽然已取得了许多重要的成果,但探明岩体内三维随机裂隙扩展演化过程及应力场分布特征仍有难度。

3) 近年来,国内外建设了众多海底隧道,但由于高渗透压、不良地质条件、施工扰动等因素的影响,海底隧道突水问题十分显著。学者们针对高渗透压岩体力学在海底隧道围岩稳定性、围岩裂隙渗

流特性及突水机制、最小隔水层厚度计算方法等方面的研究取得了诸多成果,并将其应用于一些重要的海底隧道工程中,为海底隧道的设计和建设提供了重要依据。

目前看来,高渗透压岩体力学的研究成果仍然不能满足水下隧道工程的建设需求,其存在的局限性表明学者们的研究必须向着与工程实际相结合的方向发展。海底隧道、跨江跨河隧道等高渗透压地层施工的复杂性和不确定性,必然推动高渗透压岩体力学向着更深层次发展。着力解决多场耦合作用下裂隙岩体从细观扩展到宏观的断裂演化机制难以厘清、多参数非线性风险控制评估体系难以建立等关键问题,为高渗透压地层施工提供更合理可靠的理论和技术支撑,是促进我国海底隧道安全建设的重要途径。未来,随着海底隧道建设规模的不断扩大和技术水平的不断提高,高渗透压岩体力学研究将继续深入发展,为海底隧道建设提供更加科学的技术支撑和保障。

参考文献(References):

- [1] 邓衍,刘辉,刘耀坤,等.安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响[J].交通科学与工程,2020,36(1):82-86. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.014. DENG Yan, LIU Hui, LIU Yaokun, et al. The influence of hidden Karst cave at the top of Anping tunnel on the stability of surrounding rock in Karst area[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 82-86. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.014.
- [2] DONG L H, WANG H, SONG D Q, et al. Analysis of the catastrophe mechanism and treatment countermeasures of a sudden water inrush disaster in a long and deeply buried tunnel in the Karst area [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2023, 37(6): 06023002. DOI: 10.1061/jpcfev.cfeng-4349.
- [3] YANG W M, YANG X, FANG Z D, et al. Model test for water inrush caused by Karst caves filled with confined water in tunnels [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(24): 749. DOI: 10.1007/s12517-019-4907-x.
- [4] LAN Q N, ZHANG Z Q, XU P. Research on disaster-causing characteristics of water and mud inrush and combined prevention-control measures in water-rich sandstone and slate interbedded strata tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106250. DOI: 10.1016/j.tust.2024.106250.
- [5] WANG C K, LIU Z Y, DONG Z, et al. Comprehensive application of borehole fine detection methods: a case study in Shantou Bay subsea tunnel [J]. Geofluids,

- 2024,2024(1): 5546191. DOI:10.1155/2024/5546191.
- [6] SHAO J L, ZHANG Q, ZHANG W Q. Evolution of mining-induced water inrush disaster from a hidden fault in coal seam floor based on a coupled stress-seepage-damage model [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2024, 10 (1) : 1-21. DOI: 10.1007/s40948-024-00790-w.
- [7] GAO X, LIU H L, LI L P, et al. Analysis of tunnel collapse mechanism due to dislocation and fracture of the surrounding rock block, and a method to predict the collapse height [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36 (11) : 0242607. DOI: 10.1063/5.0242607.
- [8] 刘新荣, 张吉禄, 周小涵, 等. 考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45 (12) : 3596-3612. DOI: 10.16285/j. rsm. 2024. 0134.
- LIU Xinrong, ZHANG Jilu, ZHOU Xiaohan, et al. Deformation and seepage characteristics of precast fractured rock mass considering the influence of axial stress [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45 (12) : 3596-3612. DOI: 10.16285/j. rsm. 2024. 0134.
- [9] KAN Z H, DOU L M, HE H, et al. Advances and trends in multi-field coupling induced disaster similarity theory within deep ground engineering [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2024, 10 (1) : 1-21. DOI: 10.1007/s40948-024-00905-3.
- [10] SHI T Y, FU J X, SONG W D, et al. Effect of internal fractures on mechanical properties and failure of sandstone under multi-physical fields [J]. *Heliyon*, 2024, 10 (2) : e24312. DOI: 10.1016/j. heliyon. 2024. e24312.
- [11] ZHANG C P, LI L M, SONG H R, et al. Safety accident analysis and risk control in subsea tunneling [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 346: 69-74. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.346.69.
- [12] ZHANG Y T, WANG M N, YU L, et al. Experimental and numerical research on the influence of steel arch frame corrosion on security of supporting system in subsea tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 120: 104253. DOI: 10.1016/j. tust. 2021. 104253.
- [13] ZHANG Z G, CHEN J P, YE T, et al. Wave-induced response of seepage pressure around shield tunnel in sand seabed slope [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23 (10) : 04023181. DOI: 10.1061/ijgnai.gmeng-8072.
- [14] XUE Y G, WANG D, LI S C, et al. A risk prediction method for water or mud inrush from water-bearing faults in subsea tunnel based on cusp catastrophe model [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21 (7) : 2607-2614. DOI: 10.1007/s12205-017-0611-0.
- [15] NIU F Y, CAI Y C, LIAO H J, et al. Unfavorable geology and mitigation measures for water inrush hazard during subsea tunnel construction: a global review [J]. *Water*, 2022, 14 (10) : 1592. DOI: 10.3390/w14101592.
- [16] 郑刚, 曾超峰, 薛秀丽. 承压含水层局部降压引起土体沉降机理及参数分析 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36 (5) : 802-817. DOI: 10.11779/CJGE201405002.
- ZHENG Gang, ZENG Chaofeng, XUE Xiuli. Settlement mechanism of soils induced by local pressure-relief of confined aquifer and parameter analysis [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36 (5) : 802-817. DOI: 10.11779/CJGE201405002.
- [17] CHAI J C, SHEN S L, ZHU H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai [J]. *Géotechnique*, 2004, 54 (2) : 143-147. DOI: 10.1680/geot.54.2.143.36332.
- [18] 徐良骥, 朱楠, 马荣振, 等. 厚松散承压含水层失水沉降模拟试验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32 (5) : 821-826. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.019.
- XU Liangji, ZHU Nan, MA Rongzhen, et al. Water loss settlement simulation of thick unconsolidated confined aquifer layer [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32 (5) : 821-826. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.019.
- [19] 王晓振, 许家林, 朱卫兵, 等. 覆岩结构对松散承压含水层下采煤压架突水的影响研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31 (6) : 838-844.
- WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Overburden structure influence to support crushing and water inrush during mining under unconsolidated confined aquifer [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31 (6) : 838-844.
- [20] CHEN Y F, ZHOU J Q, HU S H, et al. Evaluation of Forchheimer equation coefficients for non-Darcy flow in deformable rough-walled fractures [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 993-1006. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2015. 09. 021.
- [21] HE J, CHEN S H, SHAHROUR I. Back analysis of equivalent permeability tensor for fractured rock masses from packer tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44 (4) : 491-496. DOI: 10.1007/s00603-011-0149-2.
- [22] 陶煜, 刘卫群. 裂隙岩体渗流-应力耦合等效渗流阻模型 [J]. *岩土力学*, 2012, 33 (7) : 2041-2047. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598. 2012. 07. 019.
- TAO Yu, LIU Weiqun. An equivalent seepage resistance model with seepage-stress coupling for fractured rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (7) : 2041-2047. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598. 2012. 07. 019.
- [23] VANDAMME L M, ROEGIERS J C. Poroelasticity in hydraulic fracturing simulators [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1990, 42 (9) : 1199-1203. DOI: 10.2118/16911-pa.
- [24] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore pressure

- influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28 (4): 261-273. DOI: 10.1016/0148-9062(91)90593-b.
- [25] ZHAO Y L, LUO S L, WANG Y X, et al. Numerical analysis of karst water inrush and a criterion for establishing the width of water-resistant rock pillars [J]. *Mine Water and the Environment*, 2017, 36 (4): 508-519. DOI: 10.1007/s10230-017-0438-4.
- [26] 罗声, 许模, 康小兵. 考虑动水压力的裂隙岩体裂纹扩展机理研究及应用 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13 (4): 726-728, 741. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.04.026.
- LUO Sheng, XU Mo, KANG Xiaobing. Research on crack expanding mechanism of fractured rock tunnel with hydrodynamic pressure [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13 (4): 726-728, 741. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.04.026.
- [27] 陈俊国, 刘卫群, 梁浩楠. 地下岩体裂隙蠕变渗流耦合分析 [J]. *长江科学院院报*, 2015, 32 (11): 45-51. DOI: 10.11988/ckyyb.20140499.
- CHEN Junguo, LIU Weiqun, LIANG Haonan. Creep-seepage coupled analysis of underground fractured rock mass [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32 (11): 45-51. DOI: 10.11988/ckyyb.20140499.
- [28] 王文学, 隋旺华, 董青红. 应力恢复对采动裂隙岩体渗透性演化的影响 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39 (6): 1031-1038. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0213.
- WANG Wenxue, SUI Wanghua, DONG Qinghong. Influence of cover stress re-establishment on the permeability evolution of the mining-induced fractures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39 (6): 1031-1038. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0213.
- [29] 王媛, 刘杰. 裂隙岩体渗流场与应力场动态全耦合参数反演 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (8): 1652-1658. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.08.015.
- WANG Yuan, LIU Jie. Inverse analysis of fully coupled dynamic water flow and stress in fractured rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (8): 1652-1658. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2008.08.015.
- [30] ZHANG B L, MENG Z B. Experimental study on floor failure of coal mining above confined water [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12 (4): 114-124. DOI: 10.1007/s12517-019-4250-2.
- [31] 曹平, 王华, 靳瑾, 等. 渗透水压下孔洞裂隙砂岩断裂破坏试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47 (2): 240-246, 263.
- CAO Ping, WANG Hua, JIN Jin, et al. Experimental study of the fracture failure of sandstone containing hole and fissure under seepage water pressure [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47 (2): 240-246, 263.
- [32] ZENG Q D, YAO J, SHAO J F. Numerical study of hydraulic fracture propagation accounting for rock anisotropy [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 160: 422-432. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.10.037.
- [33] ZHAO X Y, WANG T, ELSWORTH D, et al. Controls of natural fractures on the texture of hydraulic fractures in rock [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 165: 616-626. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.02.047.
- [34] 张春阳, 曹平, 汪亦显, 等. 自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44 (4): 1587-1595.
- ZHANG Chunyang, CAO Ping, WANG Yixian, et al. Creep characteristics of plagioclase hornblende rock under natural and water-saturated conditions in deep underground [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44 (4): 1587-1595.
- [35] ZHAO Y L, WANG Y X, WANG W J, et al. Modeling of rheological fracture behavior of rock cracks subjected to hydraulic pressure and far field stresses [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2019, 101: 59-66.
- [36] DAI F, XIA K, ZHENG H, et al. Determination of dynamic rock Mode-I fracture parameters using cracked chevron notched semi-circular bend specimen [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78 (15): 2633-2644. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2011.06.022.
- [37] WANG Y X, ZHANG H, LIN H, et al. Fracture behaviour of central-flawed rock plate under uniaxial compression [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 106: 102503. DOI: 10.1016/j.tafmec.2020.102503.
- [38] WANG Z L, LI Y C, SHEN R F. Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44 (5): 730-738. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.11.004.
- [39] 朱飞昊, 刘泽功, 高魁, 等. 构造带内巷道定向聚能爆破掘进围岩损伤特征试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37 (9): 2037-2047. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0344.
- ZHU Feihao, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study on rock damage of roadway excavation by cumulative blasting in structural coal [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37 (9): 2037-2047. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0344.
- [40] 肖旺新, 肖正学, 郭学彬, 等. 基于小波图像处理的爆破裂纹发展速度 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22 (12): 2057-2061. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.

- 2003.12.020.
XIAO Wangxin, XIAO Zhengxue, GUO Xuebin, et al. Blast-induced crack developing velocity based on wavelet image processing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (12) : 2057-2061. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2003.12.020.
- [41] WANG Y X, WANG S Y, ZHAO Y L, et al. Blast induced crack propagation and damage accumulation in rock mass containing initial damage [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018 (1) : 3848620. DOI: 10.1155/2018/3848620.
- [42] 姚池,何忱,蒋水华,等.脆性各向异性岩石破坏过程数值模拟[J].工程力学,2019,36(2):96-103.
YAO Chi, HE Chen, JIANG Shuihua, et al. Numerical simulation of damage and failure process in anisotropic brittle rocks [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (2) : 96-103.
- [43] SARFARAZI V, GHAZVINIAN A, SCHUBERT W, et al. Numerical simulation of the process of fracture of echelon rock joints [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4) : 1355-1371. DOI: 10.1007/s00603-013-0450-3.
- [44] 梁正召,唐春安,李厚祥,等.单轴压缩下横观各向同性岩石破裂过程的数值模拟[J].岩土力学,2005,26(1):57-62. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2005.01.012.
LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, LI Houxiang, et al. A numerical study on failure process of transversely isotropic rock subjected to uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (1) : 57-62. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.01.012.
- [45] 赵延林,曹平,万文,等.随机卸荷岩体裂纹流变断裂模型与数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2015(12):4647-4656.
ZHAO Yanlin, CAO Ping, WAN Wen, et al. Model and numerical simulation of rheological fracture of random unloading rock mass cracks [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015 (12) : 4647-4656.
- [46] LIN H, CAO P, WANG Y X. Numerical simulation of a layered rock under triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60: 12-18. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.027.
- [47] 汪亦显,曹平,陈瑜,等.膨胀性软岩水腐蚀损伤断裂力学效应试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1685-1691.
WANG Yixian, CAO Ping, CHEN Yu, et al. Testing study on damage and fracture mechanical effects for swelling soft rock during water corrosion [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(6) : 1685-1691.
- [48] ZHAO Y L, WANG Y X, WANG W J, et al. Modeling of rheological fracture behavior of rock cracks subjected to hydraulic pressure and far field stresses [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 101: 59-66. DOI: 10.1016/j.tafmec.2019.01.026.
- [49] 王恩志,杨成田.裂隙网络地下水流数值模型及非连通裂隙网络水流的研究[J].水文地质工程地质,1992(1):12-14.
WANG Enzhi, YANG Chengtian. Numerical model of groundwater flow in fracture networks and water flow in disconnected fracture networks [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1992(1):12-14.
- [50] 牛多龙,杨科,华心祝,等.采动岩体应变-渗流耦合效应与致灾机理分析[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(3):45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2013.03.011.
NIU Duolong, YANG Ke, HUA Xinzhu, et al. Analysis of strain-seepage coupling effect of rock mass affected by mining and disaster-causing mechanism [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33 (3) : 45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1098.2013.03.011.
- [51] ISHUTOV S, HASIUK F J, HARDING C, et al. 3D printing sandstone porosity models [J]. Interpretation, 2015, 3(3) : 49-61. DOI: 10.1190/INT-2014-0266.1.
- [52] 熊祖强,江权,龚彦华,等.基于三维扫描与打印的岩体自然结构面试样制作方法与剪切试验验证[J].岩土力学,2015,36(6):1557-1565. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.005.
XIONG Zuqiang, JIANG Quan, GONG Yanhua, et al. A method for preparing natural joints of rock mass based on 3D scanning and printing techniques and its experimental validation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (6) : 1557-1565. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.06.005.
- [53] LIN Z N, XU W Y, WANG H L, et al. Anisotropic characteristic of irregular columnar-jointed rock mass based on physical model test [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(5) : 1728-1734. DOI: 10.1007/s12205-016-1796-3.
- [54] 鞠杨,谢和平,郑泽民,等.基于3D打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法[J].科学通报,2014,59(32):3109-3119. DOI: 10.1007/s11434-014-0579-9.
JU Yang, XIE Heping, ZHENG Zemin, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (32) : 3109-3119. DOI: 10.1007/s11434-014-0579-9.
- [55] JOSHI M Y. A class of stochastic models for porous media [D]. Lawrence Kansas: University of Kansas, 1974.
- [56] QUIBLIER J. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media [J]. Journal of

- Colloid and Interface Science, 1984, 98 (1) : 84-102. DOI: 10.1016/s0021-9797(84)80012-0.
- [57] IOANNIDIS M, KWIECIEN M, CHATZIS I. Computer generation and application of 3D model porous media: from pore-level geostatistics to the estimation of formation factor [C]//Proceedings of Petroleum Computer Conference. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1995: 185-194. DOI: 10.2523/30201-ms.
- [58] RALSTON J, REID D, HARGRAVE C, et al. Sensing for advancing mining automation capability: a review of underground automation technology development [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24 (3) : 305-310. DOI: 10.1016/j.ijmst. 2014. 03.003.
- [59] LAWLER, J S, KEANE D T, SHAH S P. Measuring three-dimensional damage in concrete under compression [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98 (6) : 465-475. DOI: 10.14359/10847.
- [60] QIN C, ZHANG C H. Numerical study of dynamic behavior of concrete by meso-scale particle element modeling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(12): 1011-1021. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.07.004.
- [61] BOBET A, YU H T. Stress field near the tip of a crack in a poroelastic transversely anisotropic saturated rock [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 141: 1-18. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2015.05.006.
- [62] PACEWICZ J, KOZLOWSKI P, ORLOWSKI T. X-ray computerized tomography [J]. Wiadomosci Iekarskie, 1979, 32(19): 1377-1380.
- [63] BALDI A, BERTOLINO F, GINESU F. A temporal phase unwrapping algorithm for photoelastic stress analysis [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45 (5) : 612-617. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2006.08.006.
- [64] 王梦恕. 水下交通隧道发展现状与技术难题: 兼论“台湾海峡海底铁路隧道建设方案” [J]. 岩石力学与工程学报, 2008(11): 2161-2172.
WANG Mengshu. Current developments and technical issues of underwater traffic tunnel: discussion on construction scheme of Taiwan Strait undersea railway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(11): 2161-2172.
- [65] 张久长, 史俊玲, 曲云腾. 日本青函隧道的技术特点及应用情况 [J]. 中国铁路, 2017(5): 91-97. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2017.05.091.
ZHANG Jiuchang, SHI Junling, QU Yunteng. Technical specifications and operation of Seikan submarine tunnel [J]. China Railway, 2017(5): 91-97. DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2017.05.091.
- [66] 陈建芹, 冯晓燕, 魏怀. 中国水下隧道数据统计与分析 (截至 2023 年底) [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44 (4) : 826-881. DOI: 10.3973/j. issn. 2096-4498.2024. 04.020.
CHEN Jianqin, FENG Xiaoyan, WEI Huai. Statistics and analysis of underwater tunnels in China (by the end of 2023) [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(4) : 826-881. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2024.04.020.
- [67] 李志强, 薛翊国, 曲立清, 等. 青岛胶州湾第二海底隧道主要不良地质与施工风险分析 [J/OL]. 工程地质学报: 1-12 [2024-12-13]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0756>.
LI Zhiqiang, XUE Yiguo, QU Liqing, et al. Primary unfavorable geology and construction risks of the second subsea tunnel of Jiaozhou Bay in Qingdao city [J/OL]. Journal of Engineering Geology: 1-12 [2024-12-13]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0756>.
- [68] 裴文兵. 基于激发极化与地震波联合探测的海底(水下)隧道渗透性综合评价方法 [D]. 济南: 山东大学, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.001469.
PEI Wenbing. Comprehensive evaluation method of submarine (underwater) tunnel permeability based on induced polarization and seismic wave joint detection [D]. Jinan: Shandong University, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.001469.
- [69] 龙燕霞. 流固耦合效应下青岛地铁过海隧道穿越断层破碎带施工稳定性分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.000486.
LONG Yanxia. Analysis of construction stability of Qingdao metro cross-sea tunnel crossing fault fracture zone under fluid-solid coupling effect [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27275/d.cnki.gsdku.2020.000486.
- [70] 王建华. 渗流作用下海底隧道结构流-固耦合地震响应研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
WANG Jianhua. The study on seismic response of fluid-structure coupling of subsea tunnel structure under the seepage [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013.
- [71] 靖一峰, 汪波, 梅洁, 等. 高铁海底隧道矿山-盾构对接段渗流应力耦合特征研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(5): 181-190. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2024.05.22.
JING Yifeng, WANG Bo, MEI Jie, et al. Characteristics of seepage-stress coupling in mine-shield docking section of high speed railway subsea tunnel [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(5): 181-190. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X. 2024.05.22.
- [72] SUN Z Y, ZHANG D L, FANG Q. Technologies for large cross-section subsea tunnel construction using drilling and blasting method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2023, 141: 105161.

- DOI: 10.1016/j.tust.2023.105161.
- [73] ZHENG Z P, LEI Y. Structural monitoring techniques for the largest excavation section subsea tunnel: Xiamen Xiang'an subsea tunnel [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(2): B4016002. DOI: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000594.
- [74] LU J F, XUE X Q. Research on the classification of life-cycle safety monitoring levels of subsea tunnels [J]. *Polish Maritime Research*, 2017, 24(sup 2): 125-132. DOI: 10.1515/pomr-2017-0074.
- [75] 曲立清. 胶州湾第二海底隧道工程挑战与技术创新 [J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(2): 223-231. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.02.020.
- QU Liqing. Challenges and technological innovations in the Jiaozhou Bay second submarine tunnel project [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(2): 223-231. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.02.020.
- [76] 李喆, 江媛, 姜礼杰, 等. 我国隧道和地下工程施工技术与装备发展战略研究 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(10): 1717-1732. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.10.011.
- LI Zhe, JIANG Yuan, JIANG Lijie, et al. Research on development strategy of tunnel and underground construction technology and equipment in China [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(10): 1717-1732. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.10.011.
- [77] 陈华龙. 厦门海沧海底隧道帷幕注浆技术应用研究 [J]. *河南建材*, 2017(6): 177-178. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9772.2017.06.092.
- CHEN Hualong. Study on application of curtain grouting technology in Xiamen Haicang subsea tunnel [J]. *Henan Building Materials*, 2017(6): 177-178. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9772.2017.06.092.
- [78] 白松松, 周宗青, 高成路, 等. 钻爆法海底隧道穿越断层破碎带围岩稳定性综合分析与控制方法研究 [J/OL]. *岩石力学与工程学报*: 1-14 [2024-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.O3.20241201.2042.003.html>.
- BAI Songsong, ZHOU Zongqing, GAO Chenglu, et al. Research on comprehensive analysis and control method of surrounding rock stability in submarine tunnel crossing fault fracture zone by drilling and blasting method [J/OL]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*: 1-14 [2024-12-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1397.O3.20241201.2042.003.html>.
- [79] BIENIAWSKI Z T. Engineering classification of jointed rock masses [J]. *Civil Engineering in South Africa*, 1973, 15(12): 335-343.
- [80] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. *Rock Mechanics*, 1974, 6(4): 189-236. DOI: 10.1007/BF01239496.
- [81] HONG E S, PARK E S, SHIN H S, et al. Effect of a front high hydraulic conductivity zone on hydrological behavior of subsea tunnels [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2010, 14(5): 699-707. DOI: 10.1007/s12205-010-0838-5.
- [82] 王星华, 章敏, 王随新. 考虑渗流及软化的海底隧道围岩弹塑性分析 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3267-3272. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.11.008.
- WANG Xinghua, ZHANG Min, WANG Suixin. Elastoplastic analysis of surrounding rocks of subsea tunnel with consideration of seepage and material softening [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3267-3272. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.11.008.
- [83] 汪优, 王星华, 陈俊儒. 考虑渗流的海底隧道围岩弹塑性分析 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29(5): 89-95, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.05.015.
- WANG You, WANG Xinghua, CHEN Junru. Elastoplastic analysis of surrounding rocks of subsea tunnel considering seepage [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29(5): 89-95, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.05.015.
- [84] 李鹏飞, 张顶立, 赵勇. 渗流作用下海底隧道开挖面围岩稳定性分析 [J]. *中国公路学报*, 2013, 26(3): 130-136. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.03.015.
- LI Pengfei, ZHANG Dingli, ZHAO Yong. Stability analysis of subsea tunnel face considering seepage [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(3): 130-136. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.03.015.
- [85] 丁万涛. 随机裂隙对节理岩体稳定性影响研究及其在海底隧道中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- DING Wantao. Study on stability of jointed rock mass affected by random fracture and its application on subsea tunnel [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [86] LI Z Q, LIU Q S, LIU S A, et al. Dynamic stability analysis of subsea tunnel crossing active fault zone: a case study [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(5): 839. DOI: 10.3390/jmse12050839.
- [87] LIU Q S, LIU Z Q, XUE Y G, et al. Deformation features and failure mechanism of subsea shield tunnels with different burial depths crossing fault-zone [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2024, 42(6): 679-693. DOI: 10.1080/1064119x.2023.2214132.
- [88] VERRUIJT A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(21): 2795-2804. DOI: 10.1016/s0020-7683(97)00194-7.
- [89] VERRUIJT A, BOOKER J R. Complex variable analysis of Mindlin's tunnel problem [C]// *Developments in theoretical geomechanics: the proceedings of Booker Memorial Symposium*.

- Rotterdam: A A Balkema, 2000: 3-22.
- [90] 宋浩然,张顶立,房倩.浅埋海底隧道的围岩应力解析解[J].土木工程学报,2015,48(增刊1):283-288.
SONG Haoran, ZHANG Dingli, FANG Qian, Analytic solution on the stress of surrounding rocks for shallow subsea tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(sup 1):283-288.
- [91] 李新源,陈浩群,陈甦.海底隧道力学效应研究[J].公路,2018,63(1):249-253.
LI Xinyuan, CHEN Haoqun, CHEN Su. Research on mechanical effect of submarine tunnel [J]. Highway, 2018, 63(1): 249-253.
- [92] FANG Q, SONG H R, ZHANG D L. Complex variable analysis for stress distribution of an underwater tunnel in an elastic half plane [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, 39(16): 1821-1835. DOI: 10.1002/nag.2375.
- [93] 田俊彤.浅埋海底隧道应力分析中复变函数显式解研究[D].长沙:湖南大学,2023. DOI:10.27135/d.cnki.gghudu.2023.003186.
TIAN Juntong. Study on explicit solutions of complex functions in stress analysis of shallow buried submarine tunnels [D]. Changsha: Hunan University, 2023. DOI: 10.27135/d.cnki.gghudu.2023.003186.
- [94] 金波,田俊彤,方棋洪.浅埋海底隧道围岩应力复势函数显式解[J].力学学报,2023,55(7):1505-1516. DOI:10.6052/0459-1879-23-077.
JIN Bo, TIAN Juntong, FANG Qihong. Explicit solution of stress complex potential function for surrounding rock of shallow subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(7): 1505-1516. DOI: 10.6052/0459-1879-23-077.
- [95] LOUIS C. Rock hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer-New Verlag, 1974: 299-387. DOI: 10.1007/978-3-7091-4109-0_16.
- [96] 周炳桦.海底隧道穿越风化槽段突水机理与风险评价研究[D].济南:山东大学,2019.
ZHOU Binhua. Study on water inrush mechanism and risk evaluation of subsea tunnel crossing weathered trough[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [97] 张明聚,郜新军,郭衍敬.海底隧道突水分析及其在翔安隧道中的应用[J].北京工业大学学报,2007,33(3):273-277. DOI:10.3969/j.issn.0254-0037.2007.03.010.
ZHANG Mingju, GAO Xinjun, GUO Yanjing. Analysis of water inrush in undersea tunnel and its application in Xiang'an tunnel [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(3): 273-277. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0037.2007.03.010.
- [98] 沈荣喜,吴秀仪,刘长武,等.海底隧道施工过程中突水风险研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(3):385-388. DOI:10.3963/j.issn.2095-3844.2008.03.002.
SHEN Rongxi, WU Xiuyi, LIU Changwu, et al. Research of water inrush on subsea tunnel construction [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(3): 385-388. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2008.03.002.
- [99] 张顶立,孙振宇,宋浩然,等.海底隧道突水演化机制与过程控制方法[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):649-667. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2019.0827.
ZHANG Dingli, SUN Zhenyu, SONG Haoran, et al. Water inrush evolutionary mechanisms of subsea tunnels and process control method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 649-667. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0827.
- [100] 宋浩然.钻爆法海底隧道突水机理及其应用[D].北京:北京交通大学,2015.
SONG Haoran. Water inrush mechanism of subsea tunnel constructed by drill-blasting method and its application [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [101] 厉明浩.动力扰动下裂隙岩体水力耦合近场动力学模拟方法及应用[D].济南:山东大学,2023. DOI:10.27272/d.cnki.gshdu.2023.001973.
LI Minghao. Hydraulic-mechanical coupling peridynamic simulation method and application of fractured rock mass under dynamic disturbance [D]. Jinan: Shandong University, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.001973.
- [102] 张宪堂,王洪立,周红敏,等.FLAC^{3D}在海底隧道涌水量预测中的应用[J].岩土力学,2008,29(增刊1):258-262. DOI:10.16285/j.rsm.2008.s1.033.
ZHANG Xiantang, WANG Hongli, ZHOU Hongmin, et al. Application of FLAC^{3D} to forecast water flow in subsea tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(sup 1): 258-262. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.s1.033.
- [103] FU J W, LABUZ J F, CHENG H X, et al. Simulating progressive failure in fractured saturated rock under seepage condition using a novel coupled model and the application [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022, 8(2): 42. DOI: 10.1007/s40948-022-00354-w.
- [104] 林涛,赵志宏,周书明.裂隙岩体注浆块体离散元方法模拟分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1080-1090.
LIN Tao, ZHAO Zhihong, ZHOU Shuming. Block-based DEM modeling on grout penetration in fractured rock masses [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1080-1090.
- [105] 朱杰兵,吕思清,汪斌,等.隧道突涌水灾害缩尺物理模型试验研究综述[J].长江科学院院报,2024,41(1):98-106,113. DOI:10.11988/ckyyb.20220952.
ZHU Jiebing, LYU Siqing, WANG Bin, et al. Research

- review of scaled physical model test of water inrush disaster in tunnel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(1): 98-106, 113. DOI: 10.11988/ckyyb.20220952.
- [106] 蔚立元, 靖洪文, 徐帮树, 等. 海底隧道流固耦合相似模拟试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 983-990.
YU Liyuan, JING Hongwen, XU Bangshu, et al. Solid-fluid coupling analogous material test for subsea tunnel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 983-990.
- [107] XUE Y G, ZHOU B H, LI S C, et al. Deformation rule and mechanical characteristic analysis of subsea tunnel crossing weathered trough [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114: 103989. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103989.
- [108] 崔中兴, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 渗流状态下砂岩的三维实时CT观测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1390-1395. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6915.2005.08.018.
CUI Zhongxing, WU Yanqing, PU Yibin, et al. Triaxial real-time observations of sandstone under seepage by X-ray CT scan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1390-1395. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6915.2005.08.018.
- [109] 付金伟, 朱维申, 张新中, 等. 内水压下含中空裂隙新型材料的压裂试验及数值模拟研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 78-85. DOI: 10.15961/j. jsuese. 201601087.
FU Jinwei, ZHU Weishen, ZHANG Xinzhong, et al. Fracturing experiment and numerical simulation study on new material containing a hollow internal crack under internal water pressure [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(4): 78-85. DOI: 10.15961/j. jsuese. 201601087.
- [110] 李术才, 宋曙光, 李利平, 等. 海底隧道流固耦合模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 883-890.
LI Shucai, SONG Shuguang, LI Liping, et al. Development on subsea tunnel model test system for solid-fluid coupling and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 883-890.
- [111] 李术才, 王凯, 李利平, 等. 海底隧道新型可拓展突水模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2409-2418. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2014.12.006.
LI Shucai, WANG Kai, LI Liping, et al. Development and application of an extendable model test system for water inrush simulation in subsea tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2409-2418. DOI: 10.13722/j. cnki. jrme. 2014.12.006.
- [112] 蔚立元. 水下隧道围岩稳定性研究及其覆盖层厚度确定[D]. 济南: 山东大学, 2010.
YU Liyuan. Study on stability of surrounding rocks and selection of overburden thickness for underwater tunnels [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [113] 吕明, GRØV E, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(23): 4219-4225.
LYU Ming, GRØV E, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(23): 4219-4225.
- [114] GRØV E, NILSEN B. Subsea tunnel projects in hard rock environment in Scandinavia [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2176-2192.
- [115] PALMSTRÖM A. The challenge of subsea tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 145-150. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90025-6.
- [116] DAHLØ T S, NILSEN B. Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 151-158. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90026-4.
- [117] EISENSTEIN Z D. Large undersea tunnels and the progress of tunnelling technology [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(3): 283-292. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90054-x.
- [118] LIU X Y, YUAN D J. Mechanical analysis of anti-buoyancy safety for a shield tunnel under water in sands [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 47: 153-161. DOI: 10.1016/j.tust.2014.12.005.
- [119] 戴小平, 郭涛, 秦建设. 盾构机穿越江河浅覆土层最小埋深的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 782-786. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598. 2006. 05. 020.
DAI Xiaoping, GUO Tao, QIN Jianshe. Research on minimum depth burial of shield tunnel machines crossing over ground base under rivers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 782-786. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-7598. 2006. 05. 020.
- [120] 郭彩霞, 王梦恕, 孔恒, 等. 水下盾构隧道的合理覆土厚度数值模拟分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 238-246. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-7372. 2017. 08. 028.
GUO Caixia, WANG Mengshu, KONG Heng, et al. Numerical simulation analysis of reasonable overburden depth of underwater shield tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 238-246. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-7372. 2017. 08. 028.
- [121] GUO C X, QI J, SHI L L, et al. Reasonable overburden thickness for underwater shield tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 35-40. DOI: 10.1016/j.tust.2018.06.016.

- [122] NILSEN B. Empirical analysis of minimum rock cover for subsea rock tunnels [C]//BURGER H. Proceedings of Options for Tunneling. Amsterdam: Elsevier, 1993: 677-687.
- [123] 李廷春, 李术才, 邱祥波, 等. 三维快速拉格朗日法在安全顶板厚度研究中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 935-939. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.06.020.
LI Tingchun, LI Shucui, QIU Xiangbo, et al. Application of fast Lagrangian analysis of continua to researching on safe rock covers of Xiamen subsea tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 935-939. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.06.020.
- [124] 徐帮树, 张宪堂, 张芹. 海底隧道涌水量预测及应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(4): 599-602. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2007.04.009.
XU Bangshu, ZHANG Xiantang, ZHANG Qin. Studies on forecasting of water flow in subsea tunnel and its application [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2007, 31(4): 599-602. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2007.04.009.
- [125] 赵笃坤. 海底隧道典型突涌水类型与突水机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2021. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2021.004090.
ZHAO Dukun. Analysis of typical water inrush types and mechanism of subsea tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2021. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2021.004090.
- [126] 靖一峰, 汪波, 梅洁, 等. 矿山法海底隧道水压力分布规律及限排设计研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 84-95. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.01.008.
JING Yifeng, WANG Bo, MEI Jie, et al. Study on water pressure distribution pattern and limited drainage design of mined subsea tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(1): 84-95. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.01.008.
- [127] 蔚立元, 李术才, 徐帮树. 青岛小间距海底隧道施工优化的有限差分分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3564-3570.
YU Liyuan, LI Shucui, XU Bangshu. Finite difference analysis for construction optimization of little distance subsea tunnels in Qingdao city [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(sup 2): 3564-3570.
- [128] SUN Z Y, ZHANG D L, FANG Q. Determination method of reasonable reinforcement parameters for subsea tunnels considering ground reinforcement and seepage effect [J]. Applied Sciences, 2019, 9(17): 3607. DOI: 10.3390/app9173607.
- [129] 秦松, 陈云娟, 盛圣胜, 等. 海底隧道开挖过程中衬砌结构变形与能量损失[J]. 铁道建筑, 2023, 63(3): 103-107. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2023.03.22.
QIN Song, CHEN Yunjuan, SHENG Shengsheng, et al. Deformation and energy loss of lining structure during subsea tunnel excavation [J]. Railway Engineering, 2023, 63(3): 103-107. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2023.03.22.
- [130] 金波, 胡明, 方棋洪. 考虑渗流效应的深埋海底隧道围岩与衬砌结构应力场研究[J]. 力学学报, 2022, 54(5): 1322-1330. DOI: 10.6052/0459-1879-21-670.
JIN Bo, HU Ming, FANG Qihong. Research on stress field of surrounding rock and lining structure of deep-buried subsea tunnel considering seepage effect [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(5): 1322-1330. DOI: 10.6052/0459-1879-21-670.
- [131] 李术才, 徐帮树, 丁万涛, 等. 海底隧道最小岩石覆盖厚度的权函数法[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 989-996. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.04.023.
LI Shucui, XU Bangshu, DING Wantao, et al. Weighted function method for minimum rock cover thickness of subsea tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 989-996. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2009.04.023.
- [132] XUE Y G, LI Z Q, LI S C, et al. Water inrush risk assessment for an undersea tunnel crossing a fault: an analytical model [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(7): 816-827. DOI: 10.1080/1064119x.2018.1494230.
- [133] SONG Q, XUE Y, LI G, et al. Using Bayesian network and intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process to assess the risk of water inrush from fault in subsea tunnel [J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 27(6): 605-614.
- [134] 刘辉喜, 李保军, 张鹏军. 妈湾海底隧道软土力学参数解析及相关性研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 328-334. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.S1.043.
LIU Huixi, LI Baojun, ZHANG Pengjun. Study on parametric analysis and correlation of mechanical properties of soft soil in Mawan subsea [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(sup 1): 328-334. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2020.S1.043.
- [135] 谭明伦, 全令帅, 周鸣亮, 等. 数物双驱动的水下隧道围岩稳定性分析[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(增刊1): 183-193. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.S1.018.
TAN Minglun, TONG Lingshuai, ZHOU Mingliang, et al. Stability analysis of surrounding rock of underwater tunnel driven by physics and data information [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(sup 1): 183-193. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2024.S1.018.

(责任编辑:石月珍)