

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0737

隧道工程结构模型试验系统研究综述与展望

刘 博¹, 徐 飞^{2,3}, 赵维刚², 高 阳²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制实验室, 河北 石家庄 050043;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 近几年隧道工程向长大深、多场多相耦合方向发展, 隧道在施工和运营时极易诱发结构失稳病害。针对山岭隧道、水下隧道和城市地铁隧道阐述隧道工程结构模型试验系统设计的研究现状, 并指出目前存在的相关问题。结果表明: 山岭隧道模型试验考虑了隧道穿越不良地质体, 承受高地应力、高岩溶水压力和高地震动等荷载条件, 但受装置尺寸限制, 无法模拟围岩高地应力水平。山岭隧道模型试验以平面应变模型为主, 缺乏大型真三维应力条件下多种错动形式的活化错动断层的模拟。水下隧道模型试验已实现稳定的高水压力加载, 但仍无法实现应力场与渗流场耦合的真三维水下环境模拟且试验箱可视性较差, 仅能通过洞口涌水量表征隧道的渗透水状态, 无法得到围岩内部变形规律。城市地铁隧道运营时一般受列车动荷载、路面荷载、邻近施工扰动的共同影响, 目前模型试验通常考虑单一荷载下隧道的振动响应, 且往往忽视了管片接缝和裂隙等结构特征, 需要设计新颖、高效的局部加载装置, 得到管片薄弱环节的极限变形特征, 保障地铁运营安全。最后, 总结隧道工程模型试验遇到的瓶颈问题, 提出需要研制透明相似材料改善模型内部可视化功能, 针对高地应力条件下不良地质条件研制尺寸可拓展的三维静动耦合加载模型试验系统, 并结合微型低功耗无线监测传感元件与三维可视化结果展示平台, 建立适用于复杂环境中的隧道工程结构模型试验系统。

关 键 词: 山岭隧道; 水下隧道; 城市地铁隧道; 模型试验系统

中图分类号: U459

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0452-17

Review and prospect of model test system for tunnel engineering structure

LIU Bo¹, XU Fei^{2,3}, ZHAO Wei-gang², GAO Yang²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Large Structure Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In recent years, tunnel engineering is developing towards super-long and deep, multi-field and multi-phase coupling, thus, which easily induce the structural instability during tunnel construction and operation. Aiming at the mountain tunnel, underwater tunnel and urban tunnel, this paper expounds the research status of structural model test system, and points out the existing issues. The results show that: mountain tunnel model test takes into account passing through the adverse geological rock, and the loading conditions such as high ground stress, high karst hydraulic pressure and high seismic intensity. However, it's hard to simulate the high stress of surrounding rock due to the size limitation of the apparatus. The model test of mountain tunnel is mainly based on plane strain model, which lacks the simulation of active fault with various dislocation forms under large-scale true three-dimensional stress condition. The model test of underwater tunnel has achieved stable high water pressure loading, but it is still unable to simulate the true three-dimensional underwater environment of the coupled stress field and seepage field. Additionally, the visibility of the chamber is poor, the seepage of the tunnel is only be characterized by the water inflow at the entrance, which makes it difficult to obtain the deformation law of the surrounding rock. Urban tunnel is affected by train dynamic load, pavement load and adjacent construction disturbance. At present, the model test usually considers the vibration response of the tunnel under a single load, and often ignores the structural characteristics such as segment joints and cracks. Thus, it is necessary to design novel and efficient local loading device to analyze the ultimate deformation characteristics of weak parts of segment to ensure the safety of subway operation.

收稿日期: 2021-05-15

修回日期: 2022-03-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52078311, No.51991390, No.51991395); 河北省青年拔尖人才项目 (No.BJ2020055); 深圳市科技计划资助项目 (No.KQTD20180412181337494); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金 (No.Z018014)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(52078311, 51991390, 51991395), the Young Talent Top Project of Hebei Province (BJ2020055), the Shenzhen Science and Technology Program(KQTD20180412181337494) and the Open Research Fund of State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences(Z018014).

第一作者简介: 刘博, 女, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事地铁隧道结构管片裂损演化过程及其渐进性破坏机制等方面的研究。

E-mail: liub33851809@163.com

通讯作者: 徐飞, 男, 1988 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土与隧道工程服役性能分析与预测方面的教学与研究工作。E-mail: xufei@stdu.edu.cn

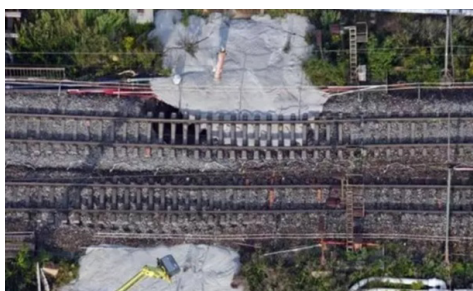
Finally, the bottleneck issues of tunnel engineering model test are summarized, and the internal visualization of the apparatus needs to be improved based on transparent similar materials. Aiming at the adverse geological conditions under high geostress conditions, a three-dimensional static-dynamic coupled model test system with expandable size is developed. Combining with the micro low-power wireless monitoring sensors and 3D visualization results display platform, a tunnel engineering structure model test system suitable for complex environment is established.

Keywords: mountain tunnel; underwater tunnel; urban metro tunnel; model test system

1 引言

《交通强国建设纲要》的提出加速了我国高速铁路、公路及城市轨道交通的建设发展。隧道工程作为道路工程的一种形式,具有节约路面空间、抗震性能良好、提高出行效率等优势,已在隧道设计、施工和长期运营养护等方面取得了一定成果。依据所处位置不同,隧道可分为山岭隧道、水下隧道和城市隧道,近年来隧道逐渐向长、大、深方向快速发展,隧道建设的难度不断加大,运营环境也十分复杂,隧道工程充斥着众多风险因素,一旦风险转化为事故,将严重威胁隧道结构的安全稳定,造成

恶劣的社会影响。例如,2017年德国莱茵河谷盾构隧道发生坍塌事故,导致欧洲铁路物流系统中断,两台盾构机被困于地下^[1];2018年我国贵州在建朝阳隧道发生涌水涌泥事故,致3人遇难^[2];2018年我国佛山轨道交通2号线一期工程工地突发透水,引发隧道及路面坍塌,造成11人死亡^[3];2020年日本东京外环线盾构施工不当,引发路面塌陷、房屋墙体开裂、地面震动和噪音灾害,严重影响了周围居民的正常生活^[4],如图1所示。可见,大型隧道工程失稳破坏事故的后果及影响范围越来越严重,分析复杂环境下的隧道结构受力变形机制迫在眉睫。



(a) 莱茵河谷盾构隧道坍塌导致铁路中断



(b) 贵州朝阳隧道涌水涌泥事故



(c) 佛山轨道交通2号线隧道及路面坍塌



(d) 东京外环线引发路面塌陷

图1 国内外隧道工程重大灾害
Fig.1 Major disasters of tunnel engineering

依托理论分析和数值模拟方法无法考虑复杂环境因素建立准确的模型,具有一定的局限性。然而,在基本满足相似条件的基础上,地质力学模型试验能较全面、直观地反映隧道与围岩力学行为的时空演化规律,成为研究多因素作用下衬砌-围岩相互作用机制,揭示隧道结构裂损演化过程及形态演变规律的重要手段之一。隧道工程结构模型试验

装置的设计一方面需要针对隧道赋存的地质条件、水文地质条件和外部动静荷载设计真三维模型试验装置,并结合三维可视化结果展示平台,分析隧道结构渐进性失稳破坏过程。另一方面,针对隧道结构特定薄弱部位,如强震作用下隧道洞身和洞口震害、盾构隧道管片接头和衬砌裂缝等,开展局部精细化加载试验。以上研究对解决大型工程岩土问题

以及完善隧道力学理论研究具有重要意义。

2 山岭隧道试验装置研究现状

我国山地丘陵地区约占国土面积的 75%，为了缩短行车距离、避让大坡道，需要广泛修建山岭隧道。山岭隧道不仅面临断层破碎带、溶岩空洞等不良地质，还承受高地应力、高岩溶水压力等环境作用，严重危害隧道的施工与运营安全^[5]。统计 1980

年至 2019 年国内外 378 起重大隧道事故，山岭隧道事故发生数量占事故总数的 73%^[6]，因此十分有必要开展山岭隧道地质力学模型试验研究。

围绕山岭隧道穿越不良地质与外部环境激扰等条件，国内外学者开展了大量地质力学模型试验探讨山岭隧道结构稳定性，具有代表性的试验装置如表 1 所示。

地质力学模型试验分为 1g 模型试验和离心模

表 1 国内外具有代表性的山岭隧道模型试验装置
Table 1 Representative mountain tunnel model test devices

模型维度	研究内容	几何相似比	外部环境激扰	模型装置创新性
准平面应变	洞群、边坡和基坑等地质力学模型试验 ^[7]	1:57	边坡开挖与锚固	①具有一机多用功能； ②自主研发“活塞式均布压力加载器”
	采用软弱围岩相似材料，模拟不同施工工法、支护条件下隧道力学效应 ^[8]	1:50	①实现地应力平衡； ②隧道开挖与支护； ③开展超载破坏试验	①模型尺寸大且具有可拓展性； ②实现均匀梯级加载和超载破坏； ③模型可升降移出，剖视围岩内部变形
	平面应变模型			
	揭示岩溶管道充填物失稳突水过程 ^[9]	1:35	①隧道开挖与支护； ②充填型岩溶管道突水	①研制具有流-固耦合特性的围岩和充填物相似材料；②设计大型三维可视化固-液耦合试验平台和水压加载系统
	分析软弱夹层条件下隧道开挖引起的围岩松动 ^[10]	1:50	隧道开挖	①研制围岩与软弱夹层两种相似材料； ②模拟自重应力场下隧道穿越软弱夹层时的渐进性破坏过程
准三维模型	模拟围岩的渐进性破坏过程，揭示隧道大变形的重点支护部位 ^[11]	1:70	通过拉出预埋件实现隧道逐级开挖	自主设计隧道开挖预埋件和围岩内部位移监测装置
	非连续围岩的受力破裂规律 ^[12]	1:200	①洞室分级开挖并支护； ②洞室超载试验	模拟隧道超深、高地应力、裂隙岩体和软弱岩体等特殊工况
	断层错动对与之正交隧道结构受力变形的影响 ^[13]	1:50	正断层在 30°~90° 范围内发生黏滑错动	①断层倾角可通过活动轴承自由调节； ②提高加载速率模拟正断层的黏滑错动
真三维模型	监测隧道应力、位移、渗透压力等，获得围岩固-流耦合作用及突水破坏前兆信息 ^[14]	1:75	①制备溶洞； ②隧道开挖； ③施加稳定水压力直至隧道突水	①可放置不同尺寸的隧道模型； ②设置自动开关门和前后伸缩底座，方便大型隧道模型和监测装置的安装

型试验。早期常规隧道模型试验装置以立式或卧式平面应变模型为主，如顾金才等^[15]设计了平面应变条件下洞室边开挖、边锚固施工模型，分析了预应力锚索加固洞室的受力特征。郭舜年^[16]模拟了平面应变条件下导流隧洞围岩与支护系统由发展到失稳破坏的全过程。这些模型尺寸普遍较小，由自重产生的应力远低于原型，对地应力场的模拟更为简化，只能解决围岩大变形和结构稳定性等基本问题^[17-19]。而模拟小比尺模型围岩真实应力状态唯一的方法就是离心模型试验技术，通过提高模型自重使之与原型等效^[20]。Marshall 等^[21]通过离心模型试验讨论了隧道开挖引起的土层应变和管线弯曲行为，估算了弹性连续体地基土层刚度。凌昊等^[22]利用室内离心模型试验模拟双孔盾构隧道近接施工，研究了隧道在不同相对位置下衬砌结构横向内力的量值及分布

规律。离心模型模型试验虽能实现高地应力条件下的加载，但离心机尺寸非常有限，高离心力对监测传感器的要求较高，模型位移、应力等参数不易监测。

静止状态下大尺寸模型试验可以解决隧道施工过程的监测问题。清华大学首次设计复杂三维多主应力面加载试验系统，模拟大型地下洞室群施工过程^[23]，此后，真三轴模型试验装置开始在地下工程领域得到发展。姜耀东等^[24]研制了真三轴巷道平面模型试验系统开展复杂条件下巷道稳定性试验。张强勇等^[25]研制了一种大型组合式地质力学模型试验系统，进行分岔隧道开挖试验。为了实现大埋深地下洞室隧道轴向和侧向围岩独立和按比例梯度加载，可以在试验台架后面预留螺栓孔，通过高强度螺栓对刚性框架拼接，实现模型的可拓展功

能[26-28]。

目前地下工程真三维模型试验在水电站、地下厂房等地下洞室群体应用较广,而在交通隧道领域却鲜有报道;对于埋深较大的隧道,受模型尺寸限制很难实现人工分层开挖,更无法安设注浆锚杆、预应力锚索等支护结构;试验装置可视性较差,缺乏性能稳定、影响范围小的监测系统。

2.1 工程地质条件

统计表明,影响山岭隧道结构稳定性的因素主要有水文地质条件、施工条件和设计条件,其中地质条件为主导因素,占一半以上(58%),各影响因素的发生概率如图2所示[29]。由图可见,隧址区水文地质条件因素对隧道受力变形机制与结构安全性具有重要影响。

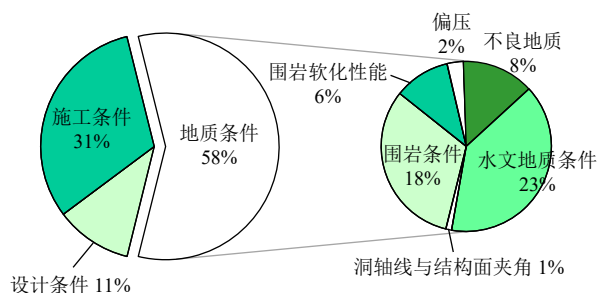


图2 山岭隧道主要影响因素统计

Fig.2 Statistics of main influencing factors of mountain tunnel

2.1.1 地质条件

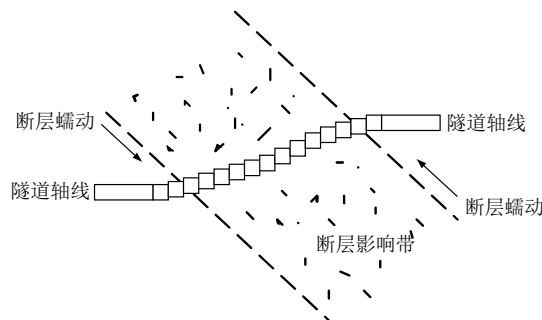
(1) 断层破碎带

基岩错动在狭窄的空间内会产生剪切位移,形成强度低、易变形、透水性强的断层破碎带。当隧道穿越活动断层时,易产生突发性坍塌事故甚至诱发地震、突水突泥等次生灾害[30]。设计隧道穿越断层破碎带模型试验时,一方面要考虑围岩的非均质性和非连续性,还要考虑断层结构的效应。同济大学设计了一套砂箱试验装置,分析断层的黏滑错动倾角对隧道受力的影响。模型试验箱分为上盘和下盘,保持下盘不动,利用分离式千斤顶控制上盘的升降模拟正逆断层,控制上盘底部与加载系统间的活动轴承模拟不同断层倾角[31-33]。

为了提高隧道穿越断层时的抗错断性能,在衬砌连接部位通常设置变形缝或缓冲层。刘学增等[34-36]基于活动断层装置,分别设计了柔性连接与铰接的隧道衬砌结构(如图3所示),利用同济大学断层错动试验箱开展模型试验,得到变形缝能有效减小衬砌的最大纵向应变,并将破裂区集中于变形缝附近,隧道衬砌结构仅发生轻微损伤。



(a) 隧道柔性连接[35]



(b) 隧道铰接[37]

图3 穿越活断层的隧道结构类型

Fig.3 Tunnels across the active faults

然而,受模型重量、刚度以及加载能力等条件限制,目前国内外隧道抗断层试验装置的尺寸普遍较小,且断层错动的沉降方式单一,无法开展多种沉降工况研究。为解决这一问题,一些学者在模型箱底部分别设计沉降平台和稳定平台,保持稳定平台不动,控制沉降平台升降模拟不同地裂缝的运动模式[38]。

(2) 软弱夹层

由于隧道建设规模的不断加大,山岭隧道不可避免地穿越或毗邻软弱夹层,软弱夹层的强度较低,极易受到施工扰动破坏[39-40]。早期试验着眼于设计隧道跨越单条软弱夹层的平面应变装置,分析自重应力下单条软弱夹层对围岩由松动到坍塌破坏过程的影响[10,41];在实际工程中,山岭隧道穿越两条及以上软弱夹层的情况并不少见,而隧道穿越多条软弱夹层的模型试验研究却鲜有报道。文海家等[42]设计了含两条软弱夹层的隧道模型,并对比了隧道穿越单条和多条软弱夹层时围岩破坏模式的差异性。试验表明,含两条软弱夹层的隧道围岩具有更严重的破坏趋势。

2.1.2 水文条件

由图2可知,水文条件是地质条件中发生概率较大的因素,约占22.6%,水文条件的主要诱发因素包括地下水、降雨和地表水系径流,各因素发生的概率如图4所示[43]。

(1) 地下水

山岭隧道地下水主要赋存于岩溶、断层破碎带等不良地质体中,在高埋深条件下开展大断面隧道

施工极易引发隧道涌水、岩溶塌陷等地质灾害^[44]。依据地下水位和地层条件的差异,岩溶可分为溶洞溶腔型、溶蚀裂隙型、管道及地下暗河型构造^[45-46]。对于穿越含溶洞溶腔型构造的隧道,在保持围岩变形稳定的前提下制备完整溶洞是试验的难点。李术才等^[47]利用盐岩遇水溶化的特点制成溶洞,然而盐岩溶解会改变溶洞周围土体力学性质,只能模拟小规模地质缺陷体。随着工艺不断发展,学者们探索出采用熔化预埋硅胶球的方法制备承压溶洞,尽可能降低溶洞对围岩稳定性的影响^[48]。对于溶蚀裂隙型岩溶,需配置渗透性强、遇水易软化的新型填充物模拟可溶岩;管道及地下暗河型岩溶通常采用预埋 PVC 管的方式模拟^[49]。

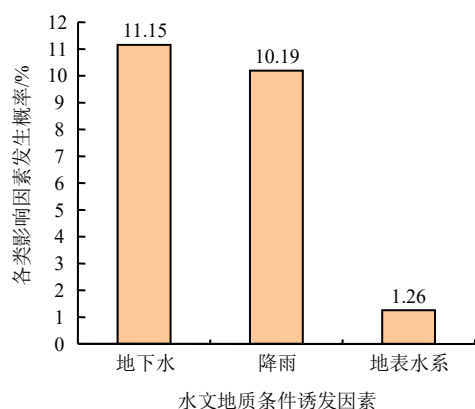


图4 诱发突水灾害主要因素的发生概率

Fig.4 Probability of main factors inducing water inrush disaster

依托西南交通大学自主研发的隧道-地层复合模拟试验平台,可以得到富水地区衬砌背后空洞数量与位置对隧道结构受力与开裂规律的影响^[50]。隐伏溶洞的隐蔽性强,隧道突水灾害更难预测。Yang 等^[14]开展应力场、位移场和渗流场多场耦合作用下的隧道突水试验,分析隐伏溶洞尺寸对隧道隔水岩体破裂的影响。岩溶管道及地下暗河对隧道突水灾害的影响范围远大于其他构造,将 PVC 管连通隧道断面与围岩顶部的水压加载装置,待围岩铺设完毕,将管道取出并及时灌入填充物模拟岩溶管道^[9, 51]。在隧道开挖前施加稳定的初始渗流场和应力场,当岩溶管道被完全揭露后,逐级提升水位直至填充物涌出突水。监测岩溶管道内的渗流压力和洞口涌水量,可实现隧道突水灾害的预警。多个岩溶管道叠加与断层构造相似,具有更明显的水力特征。

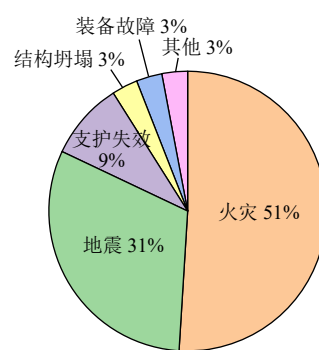
(2) 地表降雨

若隧道与地表的连通性良好,强降雨会通过岩溶裂隙和溶洞在衬砌背后大量积聚,当外水压力达

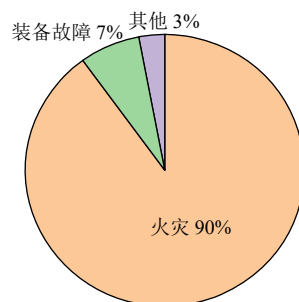
到限值时,将冲破衬砌的薄弱位置引发渗水,甚至诱发大规模突水灾害^[52]。大气降水是地下水的重要补给,但目前对降雨条件下隧道透水试验的研究却相对较少。彭奇等^[53]考虑溶洞形态、尺寸、围岩节理面倾角等因素,分析了降雨入渗条件下隧道突水灾害演变机制。试验将隧道视为降雨入渗过程的中间体,对模型底板进行特殊透水设计,防止水积聚。由于降雨时围岩主要受渗流影响而非地表径流,可忽略地表径流产生的动力荷载^[54]。采用人工集中喷洒方式模拟降雨,观测围岩的宏观状态并实时监测孔隙水压力、土压力,得到强降雨条件下岩溶对隧道稳定性的影响。

2.2 隧道地震破坏特征

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带之间,地震活动剧烈且频繁,统计国内外运营隧道常见的事故类型(如图5所示),地震占事故发生总数的31%,是运营隧道第二大事故类型,却没有记录到由地震引起的死亡事故,这在一定程度上说明隧道结构具有抵抗地震灾害的能力。近些年日本、印度尼西亚发生的多次地震以及我国汶川地震造成了地下工程破坏,促使国内外学者重新重视结构抗震问题^[55]。地震引发隧道结构破坏主要有两方面原因:①由地震惯性力在结构中产生破坏,其影响因素有隧道尺寸、埋深以及地震动强度等;②由地层破坏引起的结构损伤,其破坏形式包括土体液化、断



(a) 运营隧道事故类型



(b) 运营隧道致死事故类型

图5 运营隧道的事故类型统计

Fig.5 Statistics of accident types in operation tunnels

层位移和边坡失稳等^[56-57]。在开展山岭隧道地震响应模型试验研究时,应从以上两个方面出发,找到震害薄弱环节并采取相应减抗震措施。

2.2.1 震害位置

(1) 隧道洞身段

隧道洞身段缺陷表现为隧道穿越断层破碎带、衬砌背后空洞以及衬砌纵向刚度不一致。隧道地震响应分析主要采用人工震源试验、室内振动台试验和离心机振动台试验^[58]。由于断层错动与地震的相互作用复杂,模型试验通常采取分步加载方案,先对上盘施加错动荷载,再通过三维振动台输入地震动^[59]。断层上盘震害主要受错动与震动的联合作用,下盘震害则表现为地震破坏,因此在强震区需要有针对性地提高断层上盘衬砌结构的抗震和抗错断性能。隧道衬砌背后空洞导致结构缺少竖向地层反力的支撑,降低隧道抵抗竖向地震波的能力;若衬砌减薄与空洞病害同时存在,将改变拱顶的约束条件,导致隧道结构在较小的地震波强度下就已经发生破坏^[60]。

(2) 隧道洞口段

隧道洞口是仅次于洞身段的薄弱区域,在强震作用下通常发生衬砌结构开裂、洞口落石、坍塌堵塞等病害^[61]。在实际工程中,洞口仰坡通常存在于软弱夹层或结构面中,因此洞口段仰坡与衬砌结构是相互作用的。试验时,需配制黏聚力较小的相似材料模拟洞口软弱面^[62]。随着仰坡坡度的增加,洞口的加速度放大效应逐渐减弱,洞口衬砌与围岩的相互作用随之减弱^[63-64]。

2.2.2 隧道减抗震措施

隧道的减抗震措施包括设置减震层、减震缝、加固围岩、增大衬砌厚度等,其中减震层是目前应用最广泛的减震措施之一。减震层通常设置于围岩条件较差的地段,将海绵橡胶材料包裹于衬砌外侧,形成衬砌-海绵橡胶层-围岩减震体系,有效降低衬砌拱脚和拱肩峰值应力响应^[65-66]。为了得到减震层刚度、弹性模量和不良地质条件影响下隧道的减震效果,在设计隧道衬砌模型时,应对比分析二衬-初支-围岩以及二衬-减震层-初支-围岩系统^[67]。

虽然减震层能在一定程度上降低隧道动力响应,却无法改善隧道的抗错断性能。考虑采用分段衬砌法,在衬砌节段间设置减震缝,使隧道结构适应断层和地震产生的错动位移。信春雷等^[68-70]对比了减震层、减震缝和套管式可变结构的减抗震效果,发现减震层既能吸收地震波能量,还能提高隧道结构沿纵向的自由度,降低衬砌内力,但整体减震效

果不及减震缝和套管式可变结构;减震缝能够在隧道断层产生相对变位,虽然无法明显降低围岩静压力,但缓冲作用可以有效提高衬砌结构的整体抗震性能;套管式抗减震措施由两节尺寸不同的隧道模型组成,间隙由橡塑海绵填充,套管式可变结构综合了减震层和减震缝的特点,减震性能最优。

2.3 小结

山岭隧道广泛修建于地质构造复杂的山区,不仅面临断层破碎带、溶岩空洞等不良地质体,深埋隧道还承受高地应力、高岩溶水压力、高地震烈度等恶劣环境作用,严重威胁山岭隧道结构在施工和运营期的安全与稳定。目前开展的山岭隧道地质力学模型试验以平面应变模型为主,缺少大型真三维应力条件下断层活化错动现象的研究。此外,受模型重量、刚度和加载能力等限制,隧道抗断层装置尺寸普遍较小,且断层错动方式单一。有机玻璃制成的试验箱无法模拟承受围岩高地应力加载,目前能实现隧道高地应力加载的方法有离心机模型试验,但离心机的尺寸非常有限,很难得到隧道结构渐进性破坏过程且无法实现实时监测。设计静止状态下大型高强度模型试验箱可以实现高地应力隧道加载试验,然而真三维模型装置的可视性较差,无法观测围岩内部变形。为了解决装置的可视化问题,一方面可研制透明岩土体相似材料;另一方面,可与 BIM (building information modeling) 展示平台等三维信息化技术结合,记录试验全过程。

山岭隧道穿越高地震烈度区模型试验同样着眼于地质条件的影响并采取相应减抗震措施。隧道震害试验成功的关键在于模型箱的选择、模型边界效应的控制以及地震动输入。目前模型箱在消除边界效应方面只能满足单向、一致的地震动输入,当模拟隧道、地下管道等长大结构时,没能考虑地震的行波效应。此外,振动台试验模拟的隧道断面形式较少,无法观测结构的破坏过程,这将影响结构极限状态下变形限值的确定。

3 水下隧道试验装置研究现状

与山岭隧道不同,水下隧道上部赋存大量高压水体,隧道穿越导水断层易引发突涌水灾害,支护结构受水压力、氯离子等侵蚀影响十分明显,在设计模型试验装置时应综合考虑水下隧道衬砌与围岩的相互作用^[71]。

3.1 围岩流-固耦合作用

与山岭隧道所含有限隐伏水体不同,水下隧道上覆水体能源源不断补给,围岩受渗流作用影响十

分明显,因此,试验前需要配制具有流-固耦合相似材料围岩相似材料,以便分析隧道位移场与渗流场的时空演化规律。早期流-固耦合相似材料注重解决围岩遇水崩解问题,而忽略材料固体力学特性,这导致试验结果与实际具有一定偏差;新型相似材

料需要综合考虑水下隧道围岩的受力特点,保证围岩的抗压强度、弹性模量、黏聚力、渗透系数等关键参数同时满足力学特性和水理特性要求^[72]。统计目前国内外具有代表性的水下隧道流-固耦合相似材料和模型装置的研制情况,如表 2 所示。

表 2 具有代表性的水下隧道流-固耦合模型试验装置

Table 2 Representative solid-fluid coupling model test devices for underwater tunnels

模型维度	几何相似比	相似材料性质	水压加载方式	装置的优缺点
平面应变模型	1:80	力学特性与岩石相似,遇水基本不软化,可模拟不同渗透性的中低强度岩体	改变水箱与试验架上盖板的垂直距离可控制水力高度	①装置的可视性较差; ②无法提供稳定、足够的水压力
	1:35	能满足围岩强度、弹性模量、渗透系数等要求 ^[73]	压力水箱和离心式抽水泵组合,可提供试验所需水力余压	为国内同类型最大的流-固耦合模型试验系统
	1:50	研制具有不同水理特性的围岩与断层相似材料	水位稳定控制箱、水位提升控制平台可以自动提升水压和稳压	①模型试验架具有尺寸可拓展性; ②含不良地质体的复杂地质
	1:100	考虑围岩弹性模量、单轴抗压、抗拉强度,材料吸水率、孔隙率、渗透系数和软化效应	加压和稳压系统能提供稳定的高压,转换进水方式可改变渗透条件	①相似材料组分简单、价格低廉、配制简便;②深入研究围岩在高渗透压力作用下的失稳机制

统计发现,水下隧道流-固耦合模型试验的设计重点,一方面在于研制价格低廉、满足力学特性和水理特性的相似材料,另一方面在于施加稳定的渗透水压力,模拟水下隧道真实赋存环境。

3.2 水下隧道力学响应分析

水下隧道同时承受高水压力和土压力,结构体系的相互作用复杂。研究表明,土、水压力的关联性较差,若采用四点加载方式对衬砌直接施加压力,无法模拟管片与围岩、水体真实的相互作用。因此,在研究水下隧道管片力学响应时,通常采用水、土压力独立加载方式。以西南交通大学和北京交通大学设计的模型试验装置为代表,探讨水下隧道的受力特点。

(1) 西南交通大学率先在国内研制模拟水下隧道土、水压力加载以及与管片相互作用的试验装置。土压力加载采用卧式盾构隧道-地层复合体模拟试验系统,水平方向千斤顶施加不同侧压力系数的地应力场;垂直于隧道横断面的千斤顶保证隧道时刻处于平面应变加载状态。水压加载装置能实现均匀水压力和非均匀水压力的联合加载:钢绞线箍紧管片模拟环向均匀水压;控制对拉梁处张拉钢绞线的张拉角和张拉力,模拟非均匀水压力^[74-76]。

(2) 改良上述试验装置的加载系统,在原型管片对拉梁位置利用钢绞线施加径向对拉力导入弯矩模拟土压力,环箍梁提供环向水压力,实现了土、水压力在同一装置的共同加载^[77-78]。由于管片尺寸较大,钢绞线从管片外表面进入环箍梁时会产生张拉角,并在环箍梁附近形成集中附加力。为了降低

这种影响,在环箍梁两翼附近增加垫块并开设斜向孔以减小张拉角;钢绞线与管片外弧面混凝土间还会产生摩擦损耗,导致环箍钢绞线拉力沿圆周分布不均匀,需采用具有无黏结特性的钢绞线^[79-80]。

(3) 北京交通大学设计了一种水下隧道与围岩相互作用试验系统,能同时模拟水压力和围岩压力。在模型顶部和左右水平方向施加梯度荷载,在模型顶面设置进水口,施加 0~0.5 MPa 水压力。该装置不但可以施加独立的水、土压力,还考虑了水在围岩中的渗流特性,将围岩渗流场与压力场进行耦合分析,具有一定的先进性^[81]。

3.3 小结

由于水下隧道(含富水区隧道)处于复杂多相(流相、固相等)与多场(渗流场、应力场等)耦合的地质环境中,水下隧道结构不仅承受围岩土压力和水压力,还受上覆水体渗流作用影响。大多数试验装置设计为平面应变模型,利用试验装置钢框架提供围岩反力,无法模拟隧道承受的真实地应力,这与水下隧道真实的受力状态具有一定偏差。为了模拟真实的水下隧道环境,需要设计密封性能良好且能实现真三维加载的模型试验箱,这导致水下隧道试验装置的可视化性普遍较差。可以考虑改善岩土相似材料的透明性能,解决模型内部变形无法直接观测的难题,然而,目前透明相似材料仅用于小尺寸试件的裂隙演化研究,着重解决围岩的力学特性问题,在大型水下隧道工程模型试验研究中却鲜有报道。

当水下隧道穿越活动断裂带时,由于围岩结构

破碎不稳定, 上覆水体容易透过围岩裂隙渗入隧道内部, 应在隧道开挖时及时采取高压注浆等措施, 而模型试验却很少能模拟围岩的注浆加固过程, 对围岩稳定性分析不够全面。

4 城市地铁隧道试验装置研究现状

随着城市化进程的加快, 大中型城市路面拥堵日益严重, 汽车尾气排放量随之加大, 不但降低了人们的出行效率还加剧了大气环境污染, 因此具有便捷、绿色环保等优点的城市地下交通应运而生。以地铁为主的城市隧道工程能直接连通两地, 是城市交通的“大动脉”, 在近些年得到了快速的发展。

4.1 盾构隧道的荷载条件

与山岭隧道和水下隧道不同, 城市盾构隧道的建设与运营环境复杂多样, 隧道既承受了围岩压力, 还受到路面交通荷载、邻近施工荷载和反复作用的列车动荷载作用, 多种荷载形式同时作用, 影响地铁隧道结构的运营耐久性。

4.1.1 路面荷载

软土地区盾构隧道大多采用柔性衬砌设计, 通过降低衬砌的横向刚度, 衬砌在竖向压力作用下横向变形不断变大并产生较高的水平抗力, 降低隧道衬砌成本。然而, 路面超载容易诱发盾构隧道横向椭圆变形超限, 威胁隧道结构的稳定性。黄大维等^[82-84]开展了一系列平面应变模型试验, 分析地表超载作用下盾构隧道与地层的相互作用以及管片接头开裂特征。试验采用外部开槽方式模拟纵向接头, 将预制盾构隧道直接埋入地层中, 待围岩沉降变形稳定后, 在模型箱顶部采用逐级堆载方式模拟地表超载。目前, 模拟路面荷载以静力堆载为主, 没有考虑路面交通动荷载短时间内在地层和隧道结构中的累积破坏, 后续试验需要探讨多种路面荷载形式对城市隧道的影响。

此外, 在日益拥挤的城市环境中, 浅埋城市隧道不可避免地受路面施工扰动, 临近基坑开挖会降低软黏土的侧压力系数, 使盾构隧道横截面发生垂直收敛, 管片接缝处的应力会急剧增大, 螺栓轴向力和剪切力容易产生应力集中, 甚至引发管片接缝开口和错位等病害^[85-86]。由于模型试验环境的理想化, 缩尺试验未能考虑管片接头的结构特征, 导致目前对基坑开挖产生的盾构隧道力学响应机制研究不够全面, 仅通过简化的三维非线性接触理论分析盾构隧道衬砌的非连续性特征以及与围岩、道床的相互作用^[87-88]。需要进一步从多维度分析基坑开挖引起的土与结构应力场、位移场的路径与状态;

随着基坑工程逐渐向深大规模发展, 模型试验还应考虑软土地区受扰动后地下水渗流与固结的耦合作用。

4.1.2 地铁列车动荷载

城市地铁隧道在承受围岩压力和路面荷载的同时, 还要经历列车反复启动与制动过程, 隧道周围土体在列车动荷载的长期作用下会产生液化和不均匀沉降, 加速隧道结构变形、混凝土剥落和接头疲劳等病害发生。因此, 开展列车动荷载试验对研究城市隧道结构稳定性具有重要意义。

列车荷载通常诱发围岩产生小应变, 试验时只需考虑隧道结构和围岩在线弹性范围内的受力即可。列车动荷载模拟一般采用单一轮轴定点加载或移动加载方式, 杨文波等^[89-90]考虑盾构隧道管片与围岩的相互作用模式, 采用单点激振法模拟正弦扫频振动荷载和速度为 80 km/h 的列车振动荷载, 分析管片结构与围岩在频域和时域下的动力响应。动荷载信号由计算机输出, 依次传递至信号发生器和功率放大器, 最后由安装于管片底部的激振器施加动荷载。为了降低振动波在模型箱边界处的反射效应, 在模型箱内部铺设一层吸振材料。传感器布置于隧道管片内部表面和土层内, 监测隧道结构和土体的动力响应以及振动能量的传播与衰减规律。

定点加载方式模拟列车荷载无法使地基土体产生较大的永久变形, 因此有必要构建列车移动加载系统^[91-92]。模拟列车荷载, 既要实现荷载的移动过程, 又能改变列车运行速度。由于轮轨力主要由钢轨下方的扣件分担, 试验时可将荷载激振器直接布置于扣件相应位置, 通过施加扣件承受的荷载时程曲线模拟列车动荷载。Bian^[93]、Jiang^[94]等设计了一套全比尺有砟轨道时序式动力加载系统, 包括 8 个动态液压激振器、1 套控制系统和 1 套反力架。激振器既能满足荷载时程曲线最高频率的要求, 又能通过控制相邻激振器的相位差模拟列车移动荷载。控制系统通过自定义波形通道输出任意速度和波形的荷载。

虽然上述列车移动荷载加载系统已广泛应用于高速铁路路基与轨道结构试验, 并取得了可靠的试验结果, 但原型试验装置尺寸较大, 无法应用于地铁隧道中, 今后可以参考动荷载加载系统原理研制适用于地铁列车动荷载的加载试验。

4.1.3 复杂荷载条件下的量测系统

为了准确量测隧道施工和运营时围岩和管片结构的应力场、位移场、渗流场等变化规律, 依据试验目的在围岩及管片选取关键测点, 并在填筑围

岩相似材料时预先埋设监测元件,如光纤渗压传感器、光纤位移传感器、光纤温度传感器、光纤应力传感器和微型压力传感器等。目前常见的模型试验监测系统包括光纤光栅传感系统和静态应变采集系统,并兼具数字声发射仪、高速摄影仪等感知设备进行辅助监测^[95]。在复杂的荷载条件下,测试系统需满足精度高、抗干扰能力强等优点。所有传感器元件通过引线由侧壁预制的孔集中引出,很容易对土体稳定性产生扰动,影响监测结果的准确性,因此,有必要研发微型、灵敏、低功耗的无线监测系统,突破围岩与隧道结构动态、稳定数据采集技术。

表 3 国内外具有代表性的管片接头加载试验装置
Table 3 Representative liner joint loading test device

加载对象	几何相似比	接头模拟	加载工况	加载方式	试验装置特点
纵缝	足尺 ^[96]	纵缝采用直螺栓连接,无环缝	顶部超载,周边卸载	两点弯曲加载	管片接缝极限承载能力试验
	足尺 ^[97]	纵缝包含 3 个螺栓孔,每个螺栓孔设置两根螺栓	循环加载与卸载,轴力可变	四点弯曲加载	获得循环荷载作用下的接缝特征
	足尺 ^[98]	导向杆	施加不同偏心力和转角	上部千斤顶施加偏心力,侧部钢筋控制接缝转角	利用侧向支撑杆将两块管片立起来
纵缝和环缝	足尺 ^[99]	5.8 级 M30 螺栓	三环压弯试验,单环压弯试验,剪切试验	垂向、水平和纵向三向加载	同时考虑错缝拼装管片的纵缝和环缝特征
整环管片	足尺 ^[100]	纵缝采用直螺栓连接,无环缝	地层抗力,水土压力,地面超载	设置 24 个水平加载点,均匀同步加载。	全面了解结构承载性能
	1:10 ^[101]	纵缝:外侧开槽 环缝:采用带螺纹螺栓连接	水土压力,地基反力	①荷载从 0 加载至设计值; ②隧道结构侧向卸载至 0	降低足尺试验成本,得到侧向卸载时管片内力与变形规律

Zhang 等^[102]研制了一种新型管片接头测试装置,利用两个卧式压缩型钢翼夹紧测试管片,调整钢翼外侧水平千斤顶荷载实现对管片接头轴力与弯矩的耦合加载。与传统两点弯曲试验相比,该装置不但形成了钢翼两侧自平衡加载体系,还能实现不同轴力与弯矩的荷载组合,得到深埋隧道纵缝抗弯性能和转动刚度。此外,接缝张开量也是影响盾构隧道工作性能的重要参数,对于小比例尺隧道模型却很难监测。Wang 等^[103]依据电应变计工作原理设计了一种微位移传感器,利用应变片输出的电压表征小尺寸管片接头的变形规律,并通过预先标定的参数精确测量接头张开量。

总之,管片接缝是目前国内外盾构隧道结构模型试验的研究热点之一,今后模型试验装置的设计将向装置更新颖、加载更简便、研究内容更细致的方向发展。

4.2.2 管片裂缝

除了接缝病害外,部分管片在盾构隧道建成初期就已处于带裂缝工作状态,若不及时养护,管片

4.2 管片结构薄弱环节

4.2.1 管片接缝

管片接缝降低了盾构隧道的整体刚度,在复杂的运营环境中,易产生结构不均匀沉降、接缝张开、错台等病害,是盾构隧道的薄弱环节;此外,列车振动荷载在管片接缝处会发生反射和折射现象,使隧道动力响应问题更加复杂。目前在盾构隧道模型试验中,通常采用内环和外环割槽方式模拟管片接缝,但这种方法只适用于管片弹性变形阶段,无法表征接头的极限破坏和张开断裂过程。为了分析管片接缝的力学特征,国内外学者设计了多种管片接头试验装置,如表 3 所示。

裂缝很容易演化为混凝土破损剥落、开裂渗水等病害。目前管片裂缝试验研究大多围绕裂缝的产生与发展过程,对开裂后管片的极限承载力研究较少。

何川^[104]、刘川昆^[105]等采用自主研发的盾构隧道-地层-水压复合体模拟试验系统开展了一系列管片加载试验,分析了不同裂缝数量和长度条件下,衬砌结构在弹性、塑性和失稳破坏全寿命阶段的力学响应及破坏模式。试验采用 1 个整环管片+2 个半环管片错缝拼装方式,在管片正弯区外侧和负弯区内侧分别开槽缝模拟纵向接头;在管片浇筑过程中,将极薄的塑料垫片置于管片径向位置模拟预制裂缝^[106]。Liu 等^[99, 107-108]考虑顶部超载和周边卸载工况开展原型管片加载试验。将管片水平置于支撑钢板上,在与地面的接触面上设置多个钢球形成滚动支承条件。在管片环向均匀施加 24 个加载点,每个加载装置由荷载分配梁、持荷梁和钢拉杆组成,分别模拟顶部超载、地层抗力和水土压力。加载梁汇于管片中心的反力装置,形成自平衡加载系统。监测管片结构的整体变形、表面裂缝、螺栓应变以

及接缝张开、错动量等信息,描述管片渐进性破坏过程,得到结构的极限承载力。需要注意的是,软弱土层的灵敏性较高,无法为隧道结构提供稳定的侧向土压力,且软土地区盾构隧道结构设计通常采用柔性衬砌理论,管片厚度偏小,加速软土的侧向压力损失,影响隧道的收敛变形。为此,梁东等^[10]改进了上述试验装置,将三环错缝拼装的原型管片置于水平台架上,设计了双层高精度液压千斤顶,精确模拟了软土地基隧道顶部和侧向水土压力加载。

4.3 小结

城市地铁隧道模型试验装置要综合考虑多场耦合(渗流场、应力场等)的运营环境,以及列车动荷载、路面动荷载、邻近施工扰动等多种荷载的共同作用。由于城市地铁隧道运营期的影响因素众多,围岩及隧道结构对荷载扰动十分敏感,这对数据采集系统提出了较高的要求。传统数据采集装置利用数据线将传感器与采集仪连接,冗长的数据线很容易对地下环境产生干扰,因此,有必要依据试验目的开发微型、灵敏、低功耗的无线监测传感器与监测系统,突破围岩与隧道结构的动态、稳定数据采集技术。

5 结 论

近些年,随着我国隧道建设的蓬勃发展,高效、科学地保障隧道工程全生命周期安全成为亟待解决的关键问题。隧道建于天然地层中,与围岩的相互作用十分复杂,极易受到地质条件、水文条件和外部荷载的影响,隧道施工与运营安全面临严峻挑战。本文首先梳理了山岭隧道、水下隧道和城市地铁隧道受力变形机制与病害类型的迥异,系统总结国内外模型试验发展现状与存在的问题,并针对现阶段隧道工程学科提出隧道工程结构模型试验发展的展望与建议:

(1) 由于隧道工程建设规模不断扩大,地质力学模型试验装置需要考虑复杂的地质条件,如饱和软黏土层、复合地层以及不良地质体的非线性特征等,研制兼具力学性能和水理性能良好、并能直观显示围岩力学与变形演化规律的透明相似材料。

(2) 受试验场地和加载条件限制,目前多数试验装置可以实现三维地应力加载,但是仍然无法真实模拟高地应力作用下地震与断层活化活动,有必要结合工程实际研制尺寸可拓展的隧道工程三维静动耦合加载模型试验系统,模拟在穿越断层等不良地质时,在地震、断层活化等作用隧道下的互馈失

稳机制及其灾变演化规律。

(3) 目前隧道模型承受的外荷载大多着眼于单一荷载环境,应关注隧道周围土体的固结作用、地下水渗流动力场、路面荷载与列车荷载动力场的耦合作用,重点考虑盾构隧道管片接缝和裂纹等薄弱环节,设计更高效、新颖的接缝加载装置,保障地铁运营安全。

(4) 研发适用于模型试验的微型低功耗无线监测传感元件与三维可视化结果展示平台,重点突破基于无线传感技术的小型多参量集成的传感元件,减少目前试验过程中大量布设传感器对试验结果的影响。研发基于 BIM 的三维集成展示平台,动态呈现和记录试验过程中关键物理现象,为理论分析提供真实的数据支持与依据。

参 考 文 献

- [1] 徐蓉蓉. 工程事故 德国莱茵河谷铁路隧道工程发生坍塌事故,铁路封闭,盾构遭困,隧道回填! [EB/OL]. (2017-12-15)[2021-05-18]. <https://www.tunnelling.cn/PNews/NewsDetail.aspx?newsId=26194>.
XU Rong-rong. Engineering accident. The railway tunnel project in the Rhine Valley in Germany collapsed, the railway was closed, the shield was trapped, and the tunnel was backfilled! [EB/OL]. (2017-12-15)[2021-05-18]. <https://www.tunnelling.cn/PNews/NewsDetail.aspx?newsId=26194>.
- [2] 吴跃伟. 贵南客专隧道透水事件致3人死亡,1月曾举行施工现场观摩会[EB/OL]. (2018-06-11)[2021-05-18]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2186747.
WU Yue-wei. Three people passed away in the flooding incident of Guinan passenger dedicated tunnel. A construction site observation was held in January [EB/OL]. (2018-06-13)[2021-05-18]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_2186747.
- [3] 张闻. 佛山地铁2号线工地地面坍塌8人死亡,仍有3人失联[EB/OL]. (2018-02-09)[2021-05-18]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1591887622361063067&wfr=spider&for=pc>.
ZHANG Wen. The ground of Foshan Metro Line 2 collapsed, 8 people were killed and 3 people were still lost [EB/OL]. (2018-02-09)[2021-05-18]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1591887622361063067&wfr=spider&for=pc>.
- [4] 徐蓉蓉. 聚焦日本 东京外环线(关越~东名)隧道附近地面塌陷事故最新原因分析[EB/OL]. (2020-12-25)[2021-05-18]. <https://www.tunnelling.cn/PNews/NewsDetail>.

- aspx?newsId=41785.
- XU Rong-rong. Focus on Japan. The latest analysis of ground collapse accident near the tunnel of Tokyo outer ring line (Kanetsu-Tomei)[EB/OL]. (2020-12-25) [2021-05-18]. <https://www.tunnelling.cn/PNews/NewsDetail.aspx?newsId=41785>.
- [5] ZHENG G, CUI T, CHENG X, et al. Study of the collapse mechanism of shield tunnels due to the failure of segments in sandy ground[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2017, 79: 464-490.
- [6] SPYROS K, SPYRIDIS P. Tunnel failure trends and risk management[M]. London: TGS Media Ltd., 2020.
- [7] 陈安敏, 顾金才, 沈俊, 等. 岩土工程多功能模拟试验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 372-378.
- CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 372-378.
- [8] 李术才, 刘钦, 李利平, 等. 隧道施工过程大比尺模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1368-1374.
- LI Shu-cai, LIU Qin, LI Li-ping, et al. Development of large-scale geomechanical model test system for tunnel construction and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1368-1374.
- [9] 周毅, 李术才, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合试验新技术及其在充填型岩溶管道突水模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1232-1240.
- ZHOU Yi, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. New technology for fluid-solid coupling tests of underground engineering and its application in experimental simulation of water inrush in filled-type karst conduit[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1232-1240.
- [10] 黄锋, 朱合华, 徐前卫. 含软弱夹层隧道围岩松动破坏模型试验与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2915-2924.
- HUANG Feng, ZHU He-hua, XU Qian-wei. Model test and analysis about loose failure of tunnel surrounding rock mass containing weak interlayer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 2915-2924.
- [11] 杨忠民, 高永涛, 吴顺川, 等. 隧道大变形机制及处治关键技术模型试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4482-4492.
- YANG Zhong-min, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Physical model test on large deformation mechanism and key treatment techniques of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(12): 4482-4492.
- [12] ZHU W, LI Y, LI S, et al. Quasi-three-dimensional physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(2): 199-209.
- [13] 刘学增, 王煦霖, 林亮伦. 60° 倾角正断层黏滑错动对山岭隧道影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 121-128.
- LIU Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. Model experimental study on influence of normal fault with 60° dip angle stick-slip dislocation on mountain tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(2): 121-128.
- [14] YANG W, WANG M, ZHOU Z, et al. A true triaxial geomechanical model test apparatus for studying the precursory information of water inrush from impermeable rock mass failure[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 93(11): 103078.
- [15] 顾金才, 沈俊, 陈安敏, 等. 锚固洞室受力反应特征物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊 1): 1113-1117.
- GU Jin-cai, SHEN Jun, CHEN An-min, et al. Physical model test study on stress response characteristics of anchorage cavern[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(Suppl.1): 1113-1117.
- [16] 郭舜年. 二滩水电站导流隧洞围岩与支护系统的地质力学平面模型试验研究[J]. 水电站设计, 1997, 13(2): 95-100.
- GUO Shun-nian. Geomechanical plane model test on surrounding rock and supporting system of diversion tunnel of Ertan Hydropower Station[J]. **Design of Hydropower Station**, 1997, 13(2): 95-100.
- [17] 蒋树屏, 黄伦海, 宋从军. 利用相似模拟方法研究公路隧道施工力学形态[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 662-666.
- JIANG Shu-ping, HUANG Hai-lun, SONG Cong-jun. Physical simulation analysis on construction mechanics behavior of road tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 662-666.
- [18] 叶飞, 毛家骅, 刘燕鹏, 等. 软弱破碎隧道围岩动态压力拱效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 76-82.
- YE Fei, MAO Jia-hua, LIU Yan-peng, et al. Model test on effect of dynamic pressure arch of tunnel in soft broken surrounding rock[J]. **China Journal of Highway**

- and Transport, 2015, 28(10): 76-82.
- [19] 张玉, 邵生俊, 赵敏, 等. 平面应变条件下结构性黄土本构模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 485-496.
- ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, ZHAO Min, et al. Experimental study on constitutive models of structural loess under plane strain conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(2): 485-496.
- [20] 冯振, 殷跃平. 我国土工离心模型试验技术发展综述[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 323-331.
- FENG Zhen, YIN Yue-ping. Review of geotechnical centrifuge modeling test in China[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(3): 323-331.
- [21] MARSHALL A M, KLAR A, MAIR R J. Tunneling beneath buried pipes: view of soil strain and its effect on pipeline behavior[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 136(12): 1664-1672.
- [22] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2849-2853.
- LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Centrifugal model test on adjacent construction of double hole shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2849-2853.
- [23] 李仲奎, 卢达溶, 中山元, 等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1430-1436.
- LI Zhong-kui, LU Da-rong, NAKAYAMA H, et al. Development and application of new technology for 3D geo-mechanics model test of large underground houses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1430-1436.
- [24] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3727-3731.
- JIANG Yao-dong, LIU Wen-gang, ZHAO Yi-xin. Design and development of a new type of triaxial system for roadway model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3727-3731.
- [25] 张强勇, 李术才, 尤春安, 等. 新型组合式三维地质力学模型试验台架装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 143-148.
- ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, YOU Chun-an, et al. Development and application of new type combination 3D geomechanical model test rack apparatus[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 143-148.
- [26] 朱维申, 张乾兵, 李勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1-7.
- ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its applications[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 1-7.
- [27] 李术才, 赵岩, 李利平, 等. 超大断面铁路隧道施工断面综合荷载释放过程研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2845-2851.
- LI Shu-cai, ZHAO Yan, LI Li-ping, et al. Study of construction section comprehensive load releasing process of ultra-large section railway tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2845-2851.
- [28] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
- LI Shu-cai, ZHOU Yi, LI Li-ping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1128-1137.
- [29] 朱捷, 曾国伟, 胡国忠, 等. 基于事故统计分析的隧道坍塌施工安全风险评估[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(9): 237-240.
- ZHU Jie, ZENG Guo-wei, HU Guo-zhong, et al. Safety risk assessment of tunnel collapse construction based on accident statistical analysis[J]. **Highway Transportation Technology (Application Technology)**, 2019, 15(9): 237-240.
- [30] ZAHERI M, RANJBARNIA M, DIAS D, et al. Performance of segmental and shotcrete linings in shallow tunnels crossing a transverse strike-slip faulting[J]. **Transportation Geotechnics**, 2020, 23: 100333.
- [31] 刘学增, 王煦霖, 林亮伦. 75°倾角正断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1714-1720.
- LIU Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. Model experiment on effect of normal fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1714-1720.
- [32] 刘学增, 王煦霖, 林亮伦. 45°倾角正断层粘滑错动对隧道影响试验分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 44-50.

- LIU Xue-zeng, WANG Xu-lin, LIN Liang-lun. Modeling experiment on effect of normal fault with 45° dip angle stick-slip dislocation on tunnel[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2014, 42(1): 44-50.
- [33] LIU X, LI X, SANG Y, et al. Experimental study on normal fault rupture propagation in loose strata and its impact on mountain tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 49(6): 417-425.
- [34] 刘学增, 林亮伦, 王煦霖, 等. 柔性连接隧道在正断层黏滑错动下的变形特征[J]. **岩石力学与工程学报**, 2013, 32(增刊 2): 3545-3551.
- LIU Xue-zeng, LIN Liang-lun, WANG Xu-lin, et al. Deformation characteristics of tunnel with flexible joints affected by normal fault stick-slip dislocation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Suppl.2): 3545-3551.
- [35] 刘学增, 郭彪, 李学锋, 等. 变形缝对跨断层隧道抗错断影响的模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(增刊 2): 3837-3843.
- LIU Xue-zeng, GUO Biao, LI Xue-feng, et al. Model experiment study on effect of deformation joints on road tunnel resisting destruction by thrust fault stick-slip dislocation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.2): 3837-3843.
- [36] 刘学增, 刘金栋, 李学锋, 等. 逆断层铰接式隧道衬砌的抗错断效果试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(10): 2083-2090.
- LIU Xue-zeng, LIU Jin-dong, LI Xue-feng, et al. Experimental research on effect of anti-dislocation of highway tunnel lining with hinge joints in thrust fault[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(10): 2083-2090.
- [37] 蒋树屏, 李鹏, 林志. 穿越活动断层区隧道的抗断设计对策[J]. **重庆交通大学学报(自然科学版)**, 2008, 27(6): 1034-1041.
- JIANG Shu-ping, LI Peng, LIN Zhi. Design strategies of breaking resistance of tunnels crossing active faults zone[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)**, 2008, 27(6): 1034-1041.
- [38] 李凯玲, 门玉明, 刘洋, 等. 地裂缝剖面形态对地铁隧道变形影响模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2011, 32(6): 1690-1696.
- LI Kai-ling, MEN Yu-ming, LIU Yang, et al. Model test for influence of ground fissure profile pattern on deformation of metro tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1690-1696.
- [39] HUANG M, FAN X, WANG H. Three-dimensional upper bound stability analysis of slopes with weak interlayer based on rotational-translational mechanisms[J]. **Engineering Geology**, 2017, 223: 82-91.
- [40] XU J, TANG X, WANG Z, et al. Investigating the softening of weak interlayers during landslides using nanoindentation experiments and simulations[J]. **Engineering Geology**, 2020, 277: 105801.
- [41] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 软弱夹层引起围岩系统强度变化的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(5): 720-726.
- GUO Fu-li, ZHANG Ding-li, SU Jie, et al. Change of strength of surrounding rock system induced by weak interlayer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(5): 720-726.
- [42] 文海家, 胡晶, 谢朋, 等. 含 2 条软弱夹层的隧道围岩开挖过程破坏模式研究[J]. **中国公路学报**, 2018, 31(10): 220-229.
- WEN Hai-jia, HU Jing, XIE Peng, et al. Failure modes of rocks surrounding tunnel with two weak interlayers during excavation[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(10): 220-229.
- [43] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. **力学学报**, 2017, 49(1): 22-30.
- LI Shu-cai, WANG Kang, LI Li-ping, et al. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2017, 49(1): 22-30.
- [44] 李利平, 李术才, 赵勇, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(3): 550-560.
- LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHAO Yong, et al. 3D geomechanical model for progressive failure progress of weak broken surrounding rock in super large section tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(3): 550-560.
- [45] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例剖析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2018, 37(5): 1041-1069.
- LI Shu-cai, XU Zhen-hao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [46] LV Y, JIANG Y, HU W, et al. A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: current status, challenges, and perspectives[J]. **Journal of Hydrology**, 2020, 586: 124891.

- [47] 李术才, 李利平, 李树忱, 等. 地下工程突涌水物理模拟试验系统的研制及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 299-304.
- LI Shu-cai, LI Li-ping, LI Shu-chen, et al. Development and application of similar physical model test system for water inrush of underground engineering[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2010, 27(3): 299-304.
- [48] 李术才, 潘东东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3164-3173.
- LI Shu-cai, PAN Dong-dong, XU Zhen-hao, et al. A model test on catastrophic evolution process of water inrush of a concealed karst cave filled with confined water[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 3164-3173.
- [49] 王健华, 李术才, 李利平, 等. 隧道岩溶管道型突涌水动态演化特征及涌水量综合预测[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1880-1888.
- WANG Jian-hua, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. Dynamic evolution characteristics and prediction of water inflow of karst piping-type water inrush of tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(10): 1880-1888.
- [50] FANG Y, WANG H, GUO J, et al. Study on the mechanical behavior and the model test of segmental linings for the shield tunnel undercrossing the Yellow River[J]. **Procedia Engineering**, 2016, 166: 19-31.
- [51] 周毅, 李术才, 李利平, 等. 隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流-固耦合模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1739-1749.
- ZHOU Yi, LI Shu-cai, LI Li-ping, et al. 3D Fluid-solid coupled model test on water-inrush in tunnel due to seepage from filled karst conduit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1739-1749.
- [52] HUANG X, LIU W, ZHANG Z, et al. Structural behavior of segmental tunnel linings for a large stormwater storage tunnel: insight from full-scale loading tests[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 99: 103376.
- [53] 彭奇, 刘国峰, 杨腾, 等. 强降雨条件下岩溶地质环境因素对隧道安全性的影响序列研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1149-1157.
- PENG Qi, LIU Guo-feng, YANG Teng, et al. Study of influencing sequence of geoenvironmental factors on safety of karst tunnels under heavy rainfall condition[J]. **Tunnel Construction**, 2018, 38(7): 1149-1157.
- [54] 唐志成, 夏才初, 肖素光. 节理剪切应力-位移本构模型及剪胀现象分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 917-925.
- TANG Zhi-cheng, XIA Cai-chu, XIAO Su-guang. Constitutive model for joint shear stress-displacement and analysis of dilation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(5): 917-925.
- [55] 黄茂松, 边学成, 陈育民, 等. 土动力学与岩土地震工程[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 64-86.
- HUANG Mao-song, BIAN Xue-cheng, CHEN Yu-min, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2020, 53(8): 64-86.
- [56] DASHTI S, HASHASH Y M, GILLIS K, et al. Development of dynamic centrifuge models of underground structures near tall buildings[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2016, 86: 89-105.
- [57] BAO Z, YUAN Y. Multi-scale physical model of shield tunnels applied in shaking table test[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2017, 100: 465-479.
- [58] 陈卫忠, 宋万鹏, 赵武胜, 等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 310-325.
- CHEN Wei-zhong, SONG Wan-peng, ZHAO Wu-sheng, et al. Research progress of seismic analysis methods and performance evaluation in underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(2): 310-325.
- [59] YAN G, SHEN Y, GAO B, et al. Damage evolution of tunnel lining with steel reinforced rubber joints under normal faulting: an experimental and numerical investigation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 97: 103223.
- [60] 丁祖德, 张博, 李晓琴, 等. 衬砌脱空对隧道地震响应影响的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(14): 156-161.
- DING Zu-de, ZHANG Bo, LI Xiao-qin, et al. Shaking table tests for investigating the effect of void behind lining on the seismic responses of a tunnel[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, 37(14): 156-161.
- [61] 吴冬, 高波, 申玉生, 等. 隧道仰坡地震动力响应特性振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1921-1928.
- WU Dong, GAO Bo, SHEN Yu-sheng, et al. Shaking table test study of seismic dynamic response of tunnel entrance slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1921-1928.
- [62] TAO L, HOU S, ZHAO X, et al. 3-D shell analysis of

- structure in portal section of mountain tunnel under seismic SH wave action[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 46(2): 116-124.
- [63] 崔光耀, 孟令瀚, 张军徽, 等. 隧道洞口软硬围岩交接段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(6): 84-90.
- CUI Guang-yao, MENG Ling-han, ZHANG Jun-hui, et al. Study on large-scale shaking table model test for seismic response of soft and hard surrounding rock interface section of tunnel portal part[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2018, 50(6): 84-90.
- [64] 侯森, 陶连金, 赵旭, 等. 不同加载方向的山岭隧道洞口段地震响应振动台模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 994-1001.
- HOU Sen, TAO Lian-jin, ZHAO Xu, et al. Shaking table test for dynamic response in portal section of mountain tunnel based on different vibration directions[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(3): 994-1001.
- [65] 耿萍, 唐金良, 权乾龙, 等. 穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2520-2526.
- GENG Ping, TANG Jin-liang, QUAN Qian-long, et al. Shaking table test for tunnel with shock absorption layer though fault zone[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2013, 44(6): 2520-2526.
- [66] XIN C L, WANG Z Z, YU J. The evaluation on shock absorption performance of buffer layer around the cross section of tunnel lining[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2020, 131: 106032.
- [67] 范凯祥, 申玉生, 高波, 等. 穿越软硬围岩隧道设置减震层振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 109-120.
- FAN Kai-xiang, SHEN Yu-sheng, GAO Bo, et al. Shaking table test on damping layer applied in tunnel crossing soft and hard surrounding rock[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(9): 109-120.
- [68] 信春雷, 高波, 王英学, 等. 跨断层隧道可变形抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1041-1049.
- XIN Chun-lei, GAO Bo, WANG Ying-xue, et al. Shaking table tests on deformable aseismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1041-1049.
- [69] 信春雷, 高波, 周佳媚, 等. 跨断层隧道设置常规抗减震措施振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2047-2055.
- XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking table tests of conventional anti-seismic and damping measures on fault-crossing tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(10): 2047-2055.
- [70] 信春雷, 高波, 周佳媚, 等. 跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1414-1422.
- XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, et al. Shaking table tests on performances of anti-seismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(8): 1414-1422.
- [71] WU H, SHEN S, CHEN R, et al. Three-dimensional numerical modelling on localised leakage in segmental lining of shield tunnels[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 122: 103549.
- [72] 黄震, 李晓昭, 李仕杰, 等. 隧道突水模型试验流固耦合相似材料的研制及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3029-3039.
- HUANG Zhen, LI Xiao-zhao, LI Shi-jie, et al. Research and development of similar material for liquid-solid coupling and its application in tunnel water-inrush model test[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2018, 49(12): 3029-3039.
- [73] 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 Shu-cai, SONG Shu-guang, LI Li-ping, 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.
- [74] 何川, 封坤, 杨雄. 南京长江隧道超大断面管片衬砌结构体的相似模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2260-2269.
- HE Chuan, FENG Kun, YANG Xiong. Model test on segmental lining of Nanjing Yangtze River Tunnel with super-large cross-section[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(11): 2260-2269.
- [75] 何川, 张建刚, 杨征. 武汉长江隧道管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 85-90.
- HE Chuan, ZHANG Jian-gang, YANG Zheng. Model test study on the mechanical characteristics of segment lining for the Wuhan Yangtze River tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(12): 85-90.

- [76] 何川, 张建刚, 杨征. 层状复合地层条件下管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1537-1543.
HE Chuan, ZHANG Jian-gang, YANG Zheng. Model tests on mechanical characteristics of segment lining structure under multi-layered strata[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(10): 1537-1543.
- [77] WANG S, WANG X, CHEN B, et al. Critical state analysis of instability of shield tunnel segment lining[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 96: 103180.
- [78] FENG K, HE C, QIU Y, et al. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 75(2): 100-116.
- [79] 封坤, 何川, 邹育麟. 大断面越江盾构隧道管片拼装方式对结构内力的影响效应研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 114-124.
FENG Kun, HE Chuan, ZOU Yu-lin. Study on the effect of assembling method on the inner force of segmental of lining for cross-river shield tunnel with large cross-section[J]. **Engineering Mechanics**, 2012, 29(6): 114-124.
- [80] FENG K, HE C, ZHOU J, et al. Model test on impact of surrounding rock deterioration on segmental lining structure for underwater shield tunnel with large cross-section[C]//Proceedings of the 2011 International Conference of Environmental Science and Engineering (ICESE 2011). Singapore: Elsevier, 2012: 891-898.
- [81] 刘强, 谭忠盛, 王秀英. 水下隧道渗流场分布规律的模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 388-392.
LIU Qiang, TAN Zhong-sheng, WANG Xiu-ying. Model test study on the distribution law of underwater tunnel seepage field[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(Suppl.1): 388-392.
- [82] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载作用下软土地区既有盾构隧道与地层的相互作用分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 95-102.
HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qing-song, et al. Analysis of interaction between existing shield tunnel and stratum under surface surcharge in soft soil region[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2018, 40(10): 95-102.
- [83] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 942-949.
HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qing-song, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(5): 942-949.
- [84] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1173-1181.
HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, LAI Guo-quan, et al. Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(7): 1173-1181.
- [85] SHI C, CAO C, LEI M, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 51(1): 175-188.
- [86] 丁智, 张霄, 梁发云, 等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 50-70.
DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fa-yun, et al. Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2021, 34(3): 50-70.
- [87] CHENG H, CHEN R, WU H, et al. A simplified method for estimating the longitudinal and circumferential behaviors of the shield-driven tunnel adjacent to a braced excavation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 123: 103595.
- [88] YE S, ZHAO Z, WANG D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit[J]. **Underground Space**, 2021, 6(4): 421-431.
- [89] 杨文波, 陈子全, 徐朝阳, 等. 盾构隧道与周围土体在列车振动荷载作用下的动力响应特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 537-545.
YANG Wen-bo, CHEN Zi-quan, XU Chao-yang, et al. Dynamic response of shield tunnels and surrounding soil induced by train vibration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 537-545.
- [90] YANG W, CUI G, XU Z, et al. An experimental study of ground-borne vibration from shield tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71(1): 244-252.
- [91] QIAN W, QI T, YI H, et al. Evaluation of structural fatigue properties of metro tunnel by model test under dynamic load of high-speed railway[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 93: 103099.

- [92] MOMOYA Y, SEKINE E, TATSUOKA F. Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(4): 99-118.
- [93] BIAN X, JIANG H, CHENG C, et al. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2014, 66: 368-384.
- [94] JIANG H, BIAN X, JIANG J, et al. Dynamic performance of high-speed railway formation with the rise of water table[J]. **Engineering Geology**, 2016, 206: 18-32.
- [95] 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.
- LI Shu-cai, WANG Kai, LI Li-ping, et al. Development and application of an extendable model system for water inrush simulation in subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2409-2418.
- [96] 柳献, 张晨光, 张宸. 地铁盾构隧道纵向接缝承载能力试验研究与解析分析[J]. **土木工程学报**, 2016, 49(10): 110-122.
- LIU Xian, ZHANG Chen-guang, ZHANG Chen. Investigation on the ultimate bearing capacity of longitudinal joints in segmental tunnel lining[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2016, 49(10): 110-122.
- [97] ANDREOTTI G, CALVI G M, SOGA K, et al. Cyclic model with damage assessment of longitudinal joints in segmental tunnel linings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 103: 103472.1-103472.18.
- [98] CARATELLI A, MEDA A, RINALDI Z, et al. On the behavior of radial joints in segmental tunnel linings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71: 180-192.
- [99] LIU X, DONG Z, SONG W, et al. Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: direct insight from mechanical behaviors of longitudinal and circumferential joints[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71(1): 271-291.
- [100] 毕湘利, 柳献, 王秀志, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. **土木工程学报**, 2014, 47(11): 128-137.
- BI Xiang-li, LIU Xian, WANG Xiu-zhi, et al. Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(11): 128-137.
- [101] 梁东, 金浩, 肖军华, 等. 软土地区侧压损失对盾构隧道受力及变形的影响[J]. **工程力学**, 2019, 36(5): 148-156.
- LIANG Dong, JIN Hao, XIAO Jun-hua, et al. Influence of lateral pressure loss on the force and deformation of shield tunnel in soft soil area[J]. **Engineering Mechanics**, 2019, 36(5): 148-156.
- [102] ZHANG Z X, LIU W, ZHUANG Q W, et al. A novel testing setup for determining the flexural properties of tunnel segmental joints: development and application[J]. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, 2019, 19(3): 724-738.
- [103] WANG J, LIU H, LIU H. Measuring joint opening displacement between model shield-tunnel segments for reduced-scale model tests[J]. **Structures**, 2018, 16: 112-118.
- [104] 何川, 刘川昆, 王士民, 等. 裂缝数量对盾构隧道管片结构力学性能的影响[J]. **中国公路学报**, 2018, 31(10): 210-219.
- HE Chuan, LIU Chuan-kun, WANG Shi-min, et al. Influence of crack number on mechanical properties of shield tunnel segment structure[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(10): 210-219.
- [105] 刘川昆, 何川, 王士民, 等. 裂缝长度对盾构隧道管片结构破坏模式模型试验研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2019, 50(6): 1447-1456.
- LIU Chuan-kun, HE Chuan, WANG Shi-min, et al. Model test study on failure mode of segment structure of shield tunnel with crack length[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2019, 50(6): 1447-1456.
- [106] WANG S, LIU C, SHAO Z, et al. Experimental study on damage evolution characteristics of segment structure of shield tunnel with cracks based on acoustic emission information[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2020, 118: 104899.
- [107] LIU X, DONG Z, BAI Y, et al. Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2017, 66: 1-18.
- [108] LIU X, ZHANG Y, BAO Y. Full-scale experimental investigation on stagger effect of segmental tunnel linings[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 102: 103423.