

考虑预制内部结构的单洞双线盾构隧道 地震响应分析

唐泽人¹, 陈辰², 朱元昌¹, 杜亚南², 柳献¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要:为探究单洞双线盾构隧道及其预制内部结构的地震响应, 该文依托上海市机场联络线, 采用地层-结构法及黏弹性人工边界, 在结构中采用混凝土塑性损伤本构, 建立了有限元模型, 计算、分析并对比了5条地震动作用下单洞双线盾构隧道的地震响应。研究表明, 考虑内部结构有利于隧道的抗震性能, 可有效增加隧道的横向刚度, 减小隧道的直径变形率、内力。此外, 由于内部结构的存在, 隧道损伤最严重的部位也会发生改变。轨下结构的存在虽然增加了隧道结构的横向刚度, 但中箱涵两侧侧墙在地震作用下将是最先发生损伤的部位。中隔墙是隧道中抗震性能最差的构件, 其响应由地震动中长周期控制, 中隔墙的损伤集中发生于顶部和底部节点。隧道结构抗震性能相对较好, 内部结构抗震性能相对较差, 尤其是中隔墙, 今后设计及研究中应对中隔墙进行重点研究。

关键词:地震响应; 单洞双线隧道; 预制内部结构; 轨下结构; 中隔墙

中图分类号: TU921; P315.9

文献标志码: A

Analysis of seismic response of single-tube with two-track shield tunnels considering prefabricated internal structures

TANG Zeren¹, CHEN Chen², ZHU Yuanchang¹, DU Yanan², LIU Xian¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: To investigate the seismic response of single-hole with two-track shield tunnels and inside prefabricated internal structures, this paper adopts stratum-structure method and viscous-spring artificial boundaries, utilizing the concrete damage plasticity (CDP) model to structures and establish the finite element models based on the Shanghai airport link line. After simulating, analyzing, and comparing, the seismic response of single-hole with two-track shield tunnels under five earthquakes has obtained. The results reveal that: internal structures, which can effectively increase the lateral stiffness of tunnel and reduce the diameter deformation rate, are beneficial to the seismic performance of tunnel. However, due to the internal structures, the most severely damaged part of the tunnel will change. Although the under-track structure increases the transverse stiffness of tunnel, the side walls on both sides of middle box culvert will be the first damaged parts under seismic wave. The seismic performance of partition walls is the worst among all components, and its response is controlled by the medium to long periods of seismic wave. Damage to the middle partition wall is mainly concentrated on the top and bottom. The seismic performance of the tunnel structure is relatively good, while the seismic performance of the internal structure is relatively poor, especially the middle partition wall. Future design and research should focus on the partition walls.

收稿日期:2024-06-30; 修回日期:2024-09-08

基金项目: 中铁十四局集团有限公司科研课题项目(202214jtky0069)

作者简介: 唐泽人(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事装配式地下结构及工程抗震研究。E-mail: tangzr@tongji.edu.cn

通信作者: 柳献(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事新型隧道及地下建筑结构受力性能与设计方法研究。E-mail: xian.liu@tongji.edu.cn

Key words: seismic response; single-tube with two-tracks shield tunnel; prefabricated internal structure; under-track structure; partition wall

0 引言

近年来,隧道工程震害屡见不鲜^[1-3],隧道工程的抗震问题得到了研究人员的重点关注。随着我国盾构隧道修建技术的不断发展,盾构隧道的修建直径也越来越大,采用单洞双线布置形式的大直径盾构隧道已有较多工程应用^[4]。单洞双线隧道因空间利用率高、对周边环境影响小等特点,将会成为今后大直径盾构隧道的主要形式。

内部结构是隧道形成单洞双线布置的重要载体,主要包括轨下结构和中隔墙。按施工方式,内部结构可分为全现浇内部结构、部分现浇部分预制内部结构和全预制内部结构。随着施工技术的不断成熟及环境保护要求的不断提高,隧道内部结构逐渐往全预制形式发展。然而,大部分研究均表明,预制构件虽具有较多优点,但连接部位相对薄弱,抗震性能较差^[5]。

当前,学者们对隧道预制内部结构的施工技术^[6-8]、力学性能^[4,9-10]、列车行驶对内部结构产生的影响^[11-12]等方面进行了较多研究,但对考虑预制内部结构的隧道抗震性能研究相对较少。禹海涛等^[13]研究了预制车道板对盾构隧道抗震性能的影响,结果表明:当内部结构刚度较大时,可提高盾构管片的抗震性能;同时,预制内部结构抗震性能差于现浇结构,且节点部位是薄弱部位。薛光桥等^[14]对双层公路隧道抗震性能进行了模拟计算,计算结果显示:内部结构对隧道抗震性能有利,且施作上层板相较于不施作上层板更有利于隧道整体安全。何应道等^[15]基于济南黄河隧道,对比分析了有无内部结构及不同内部结构施作方式对隧道横向地震响应的影响,结果表明:内部结构可提升隧道抗震性能;同时,在内部结构施作过程中应尽量提高内部结构与管片接触面间的连接刚度,充分发挥内部结构优势。GUO等^[16]对武汉三阳路隧道进行了振动台试验研究,结果表明内部结构会对土-结构相互作用产生明显影响,此外,由列车行驶对车道板产生的振动影响也不可忽略,后续设计中建议考虑内部结构的影响。

综上所述,当前针对隧道内部结构抗震性能研究的较少,但研究结果均表明,考虑内部结构中的轨下结构可改善隧道受力性能。然而,单洞双线隧道内部结构除有轨下结构外,还设置了大长细比中隔墙,结构形式与当前研究有所区别,其地震响应有待进一步探索。同时,由中隔墙与轨下结构一同组成的内部结构地震响应规律也有待进一步研究。针对上述问题,本文以上海市机场联络线为研究背景,采用数值模拟方法对考虑预制内部结构的单洞双线盾构隧道地震响应进行了模拟分析,分析并对比了考虑和不考虑内部结构情况下隧道截面在不同地震动作用下的响应,得到了不同结构形式的地震响应规律,为今后单洞双线盾构隧道预制内部结构优化设计及抗震性能评价提供参考依据。

1 工程背景

上海市机场联络线为我国首条在单洞双线盾构隧道采用全预制内部结构的工程,工程穿越主要地层信息见表1,为典型软土。

表1 地层信息

Table 1 Stratum information

土层编号	土层名称	密度/(kg/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
②-1	粉质黏土	1890	21.8	14.2	4.90
④	灰色淤泥质粉质黏土	1770	12.4	14.6	7.35
⑤-1	灰色粉质黏土	1780	15.2	15.0	7.80
⑥-1	暗绿~草黄色粉质黏土	1950	43.6	15.7	7.50
⑦-1	草黄~灰黄色粉砂夹粉质黏土	1970	13.0	31.8	13.80
⑦-2	灰黄~灰色粉砂	2000	13.4	32.2	16.00
⑨	灰色中细砂	2010	17.1	32.9	17.20

预制内部结构包括预制整体式轨下结构、预制中隔墙、预制顶部连接件和电缆槽。隧道内径和外径分别为12.5、13.6 m,管片厚0.55 m,环宽2.0 m,混凝土强度等级C60。预制内部结构宽度与管片环宽保持一致,

均为 2.0 m。整体式预制轨下结构单体尺寸为 9.5 m×2.8 m×2.0 m;预制中隔墙尺寸约为 9.2 m×0.4 m×2.0 m。内部结构混凝土强度等级均为 C40。顶部连接件采用“π”型件形式,采用 Q235 钢材。隧道信息见图 1。

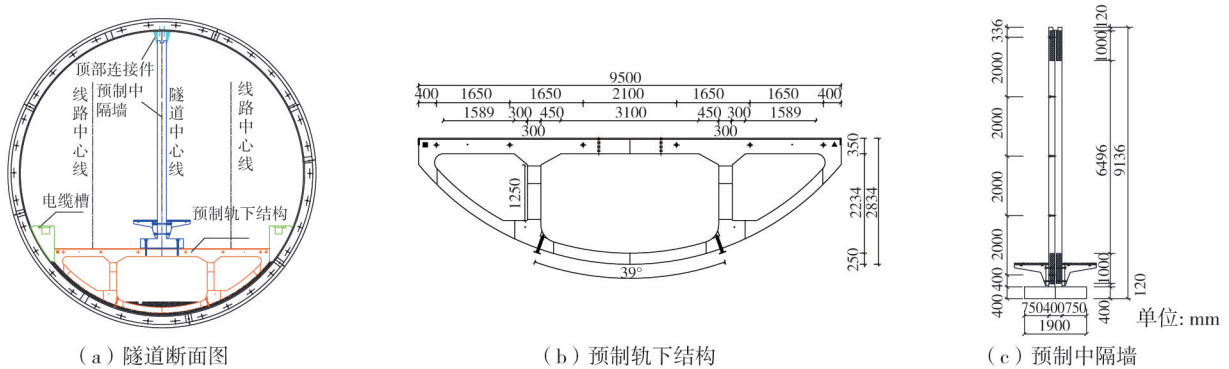


图 1 隧道信息

Fig. 1 Information of the tunnel

2 模型信息

采用 ABAQUS 软件对隧道抗震性能进行研究,本节将对有限元模型的设置、地震动的选取进行详细阐述。

2.1 模型设置

2.1.1 单元、材料与接触

采用二维模型对隧道抗震性能进行研究分析,土体、隧道、预制轨下结构、预制中隔墙和顶部连接件均采用实体单元(CPE4R)进行模拟。

考虑接头螺栓对强度的影响,盾构管片混凝土取折减系数 0.8^[12]。盾构隧道、内部结构混凝土均采用损伤塑性(concrete damage plasticity, CDP)本构,C40 本构见图 2。连接件钢材采用三折线弹塑性本构。

地层与土体、连接件与中隔墙法向采用“硬”接触,切向采用“罚”函数(地层与土体间摩擦系数为 0.3,连接件与中隔墙间摩擦系数为 0.5);轨下结构、顶部连接件与隧道内部、中隔墙与轨下结构采用“tie”接触,采用“tie”接触部位见图 3 标红部位。

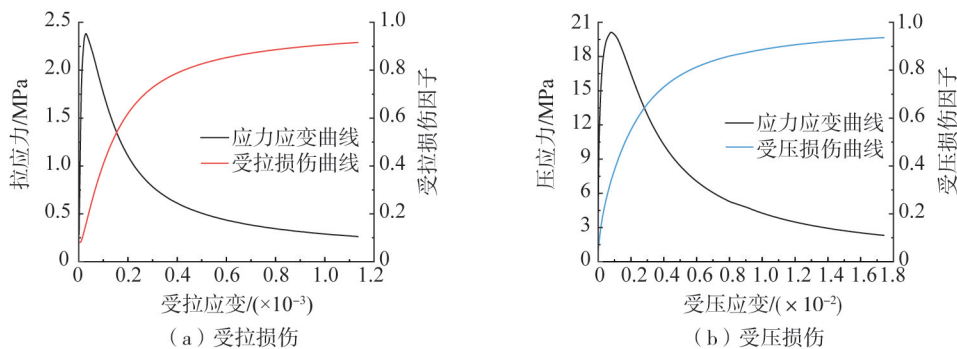


图 2 C40 混凝土 CDP 本构

Fig. 2 CDP constitutive of C40 concrete

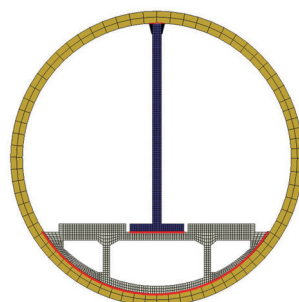


图 3 “tie”接触部位

Fig. 3 The tie constrain parts

2.1.2 边界与荷载

模拟中隧道埋深-35 m,土体尺寸选择为 100 m×100 m,可消除由人工边界产生的尺寸效应。同时为满足各地震动最小波长与土体尺寸关系,土体网格尺寸选为 1 m,并将隧道周围土体网格进行局部加密处理。

分析分为地应力平衡、静力分析和动力分析,其中地应力平衡和静力分析步中两侧土体采用法向约束,底部土体采用固接约束;动力分析中取消土体约束,施加节点反力并将边界转化为黏弹性人工边界。二维黏弹性人工边界参数取值、等效节点力计算、分析步设置参考相关文献[17-19]进行操作设置。

模拟全过程均施加重力,动力分析步中对各边界节点施加支反力并采用等效节点力进行地震动模拟输入^[20]。

2.2 地震动选取

根据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[21]及工程地勘资料,上海市闵行区设防烈度为 7 度,加速度为 0.10 g,设计地震分组为第 2 组,场地类别 IV 类。依据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[21]及上海 DGJ08-9—2013《建筑抗震设计规程》^[22]要求,地震动加速度需调整为 0.12 g,反应谱特征周期需调整为 0.9 s。根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[23]及场地类别,在太平洋地震工程研究中心(pacific earthquake engineering research center, PEER)中进行地震动匹配。考虑场地类别为 IV 类,匹配过程中要求场地土体 V_{30} 不大于 150 m/s,以满足场地条件要求。匹配后选取 4 条实测地震动记录,生成人工地震动 1 条,各地震动信息见表 2。

表 2 地震动基本信息

Table 2 Basic information of selected ground motion

序号	地震名称	发生年份	震级 M_w	持时/s	峰值加速度/g	$V_{30}/(m/s)$
1	Loma Prieta	1989	6.93	30.095	0.118	126.40
2	Chi-Chi	1999	7.62	135.000	0.060	124.27
3	Niigata	2004	6.63	172.190	0.205	134.50
4	Christchurch	2011	6.20	50.000	0.690	141.00
5	人工地震动	—	—	20.000	0.221	—

以生成的人工地震动为例,时程记录见图 4。将所选地震动记录峰值调幅至 0.12 g 后各地震动反应谱对比见图 5。由图可知,Chi-Chi 地震动及 Niigata 地震动反应谱峰值较高,Christchurch 地震动反应谱峰值较小;在短周期段,生成人工地震动均值最高,而在中长周期段,Chi-Chi 地震动明显最高。

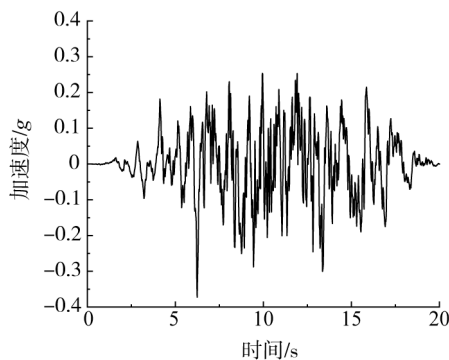


图 4 人工地震动

Fig. 4 Artificial seismic wave

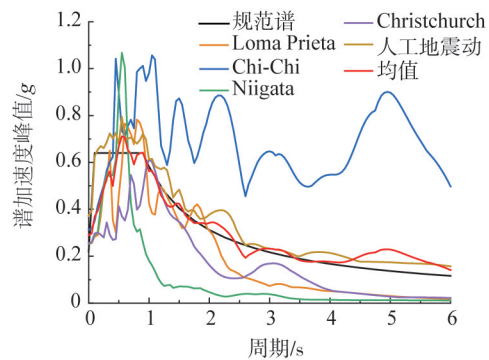


图 5 反应谱对比图

Fig. 5 Comparison of reaction spectra

2.3 计算工况与模拟思路

共设置 2 种计算工况,工况 1 为不考虑内部结构的隧道截面,工况 2 为考虑内部结构的隧道截面。均采用上文选用的 5 条地震动记录进行计算,数值模拟思路见图 6,图中 D 为隧道外径。

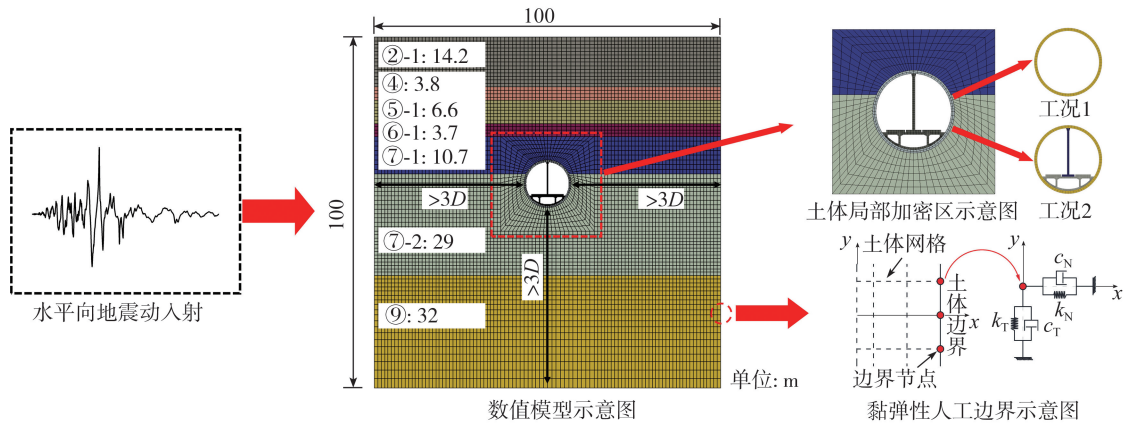


图 6 数值模拟思路

Fig. 6 Route of numerical simulation

3 结果分析

依据第 2 节内容,将地震动强度调幅至 50 a 超越概率为 10% 的强度进行计算。本节将从结构变形、结构内力及结构损伤三方面对计算结果进行分析。

3.1 结构变形

结构变形包括隧道变形、轨下结构变形及中隔墙变形,下文内力、损伤分析类别同该节,不再赘述。

3.1.1 隧道变形

隧道管片变形通过环内直径变形率进行判断,参照文献[14],水平地震动作用下隧道管片变形提取 45° 肩部及 235° 趾部部位,各地震动作用下隧道直径变形率见图 7。

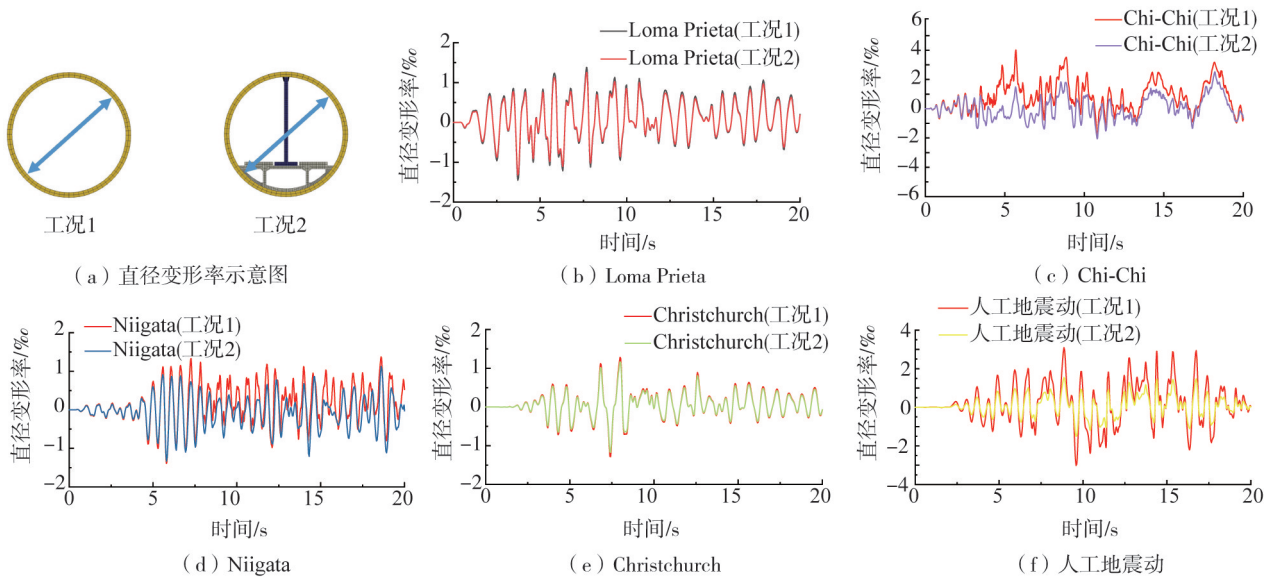


图 7 隧道直径变形率时程

Fig. 7 Time history curves of tunnel diameter deformation rate

同时,将图 7 中隧道峰值直径变形率汇总于表 3。

由图 7 及表 3 可知,2 个工况中结构直径变形率变化趋势基本一致,考虑内部结构可增加隧道横向刚度,提高隧道横向抗震性能。同时对比 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》可知,由于隧道所在场地为软土场地及所选地震动为长周期地震动,Chi-Chi 地

表 3 隧道峰值直径变形率

Table 3 Peak diameter deformation rate of tunnel

变形情况	地震名称				
	Loma Prieta	Chi-Chi	Niigata	Christchurch	人工地震动
工况 1/‰	1.449	4.016	1.390	1.284	3.015
工况 2/‰	1.318	2.514	1.331	1.168	1.508
相对变形差值/mm	1.640	18.780	0.740	1.450	18.840

震动作用下隧道变形已经微超出规范要求,其余地震作用下隧道变形均未超过4%。整体上看,工况1中不同地震作用下隧道峰值直径变形率从大到小依次是:Chi-Chi、人工地震动、Loma Prieta、Niigata、Christchurch;工况2中不同地震作用下隧道峰值直径变形率从大到小依次是:Chi-Chi、人工地震动、Niigata、Loma Prieta、Christchurch。为简化分析工序,后文分析均以 Chi-Chi 地震动为例。

3.1.2 轨下结构变形

轨下结构变形图见图8。为更清晰表现轨下结构变形趋势,将轨下结构变形整体缩放250倍后得到图8(a)。可看出轨下结构变形主要由于上部中隔墙作用,在中箱涵顶部具有向底部凹陷的变形趋势,导致两侧轨道垫层及中箱涵顶板具有向下变形趋势,进而导致中箱涵两侧侧墙具有向外扩张的变形趋势。此外也可看出,轨下结构在两侧与隧道两侧趾部接触部位变形较明显,与隧道管片变形趋势较为相关。同时由于轨下结构与隧道相接部位也位于趾部且采用“tie”连接,因此导致轨下结构在两侧产生变形值较大。

提取中箱涵两侧侧墙水平相对位移时程曲线见图9。

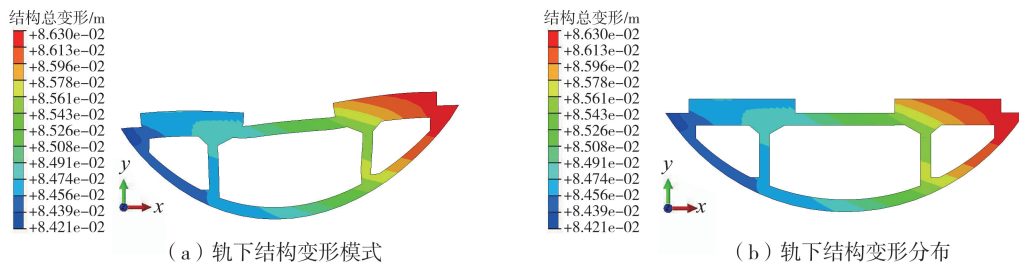


图8 轨下结构变形图

Fig. 8 Deformation of under-track structure

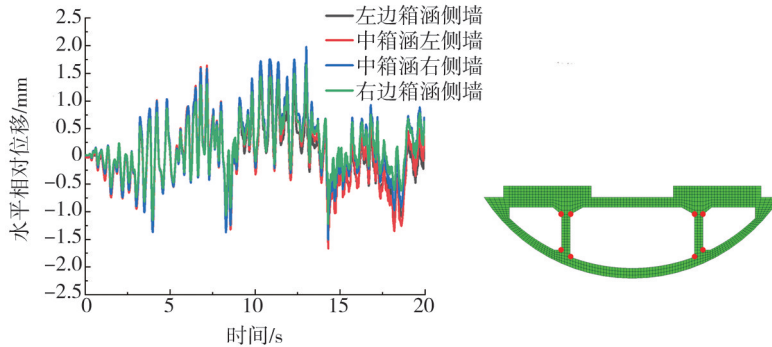


图9 轨下结构侧墙相对水平位移时程曲线

Fig. 9 Relative lateral displacement curves in the sidewall of under-track structures

各地震作用下轨下结构箱涵侧墙的峰值相对水平位移见表4。

表4 箱涵侧墙峰值相对水平位移

Table 4 Peak relative lateral displacement of box culvert sidewall

地震动	左箱涵侧墙		中箱涵左侧墙		中箱涵右侧墙		右箱涵侧墙	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向
Loma Prieta	1.448	-1.151	1.726	-1.390	1.694	-1.336	1.431	-1.088
Chi-Chi	1.388	-1.450	1.791	-1.666	1.980	-1.508	1.654	-1.223
Niigata	1.435	-1.468	1.738	-1.750	1.789	-1.696	1.507	-1.392
Christchurch	1.197	-0.637	1.417	-0.745	1.424	-0.686	1.212	-0.562
人工地震动	1.446	-0.971	1.819	-1.194	1.841	-1.159	1.492	-0.901

由表4可知,轨下结构侧墙在不同地震动作用下的相对水平位移值较小,在2mm内,相对水平位移值与隧道变形情况较为相关。不同地震作用下轨下结构侧墙相对水平位移从大到小依次是:人工地震动、Chi-Chi、Niigata、Loma Prieta、Christchurch。

3.1.3 中隔墙变形

中隔墙变形图见图10。为更清晰表现中隔墙变形趋势,将中隔墙变形整体缩放100倍后得到图10(a),可看出中隔墙变形主要产生较大水平变形,中隔墙变形以弯曲变形为主。由于中隔墙底部为固接节点,顶部

受到连接件约束,因此,连接件底部中隔墙水平变形略高于中隔墙顶部。中隔墙变形通过对比中隔墙顶部、连接件底部、中上部(约墙高 2/3 处)、中部、中下部(约墙高 1/3 处)相对中隔墙底部相对水平变形量化。中隔墙各部位相对水平位移时程曲线见图 11。

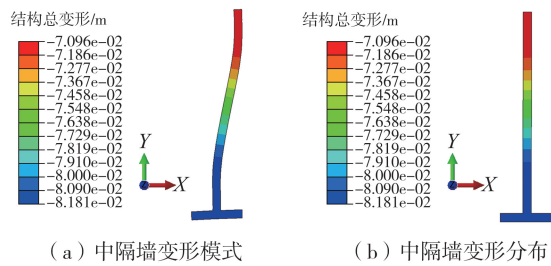


图 10 中隔墙变形图

Fig. 10 Deformation of the partition wall

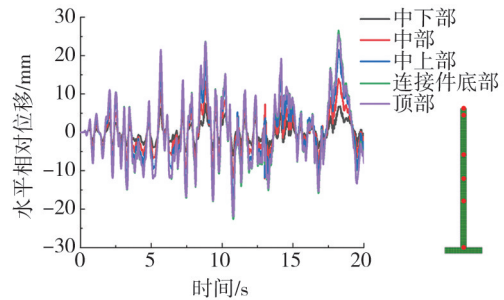


图 11 中隔墙相对水平位移时程曲线

Fig. 11 Relative lateral displacement curves of partition wall

各地震作用下中隔墙各部位相对水平位移见表 5。

表 5 中隔墙水平变形情况

Table 5 Lateral displacement of partition wall

地震动	中下部		中部		中上部		连接件底部		顶部	
	位移/mm	位移角 θ	位移/mm	位移角 θ	位移/mm	位移角 θ	位移/mm	位移角 θ	位移/mm	位移角 θ
Loma Prieta	5.82	1/531	10.14	1/453	14.56	1/425	19.15	1/459	19.35	1/477
Chi-Chi	8.85	1/350	13.97	1/328	21.52	1/288	26.54	1/331	25.47	1/363
Niigata	4.48	1/692	8.13	1/565	12.62	1/491	16.82	1/523	16.89	1/546
Christchurch	5.26	1/588	9.82	1/467	14.62	1/423	19.26	1/456	19.35	1/477
人工地震动	8.69	1/356	13.16	1/349	18.59	1/333	23.24	1/378	23.08	1/400

由表 5 可知,由于中隔墙为大长细比构件,在地震作用下产生的相对水平位移较大,相对水平位移随墙身增高而增高。墙顶由于存在连接件约束,因此顶部相对水平位移略小于连接件底部中隔墙相对水平位移。不同地震作用下中隔墙水平位移从大到小依次是:Chi-Chi、人工地震动、Loma Prieta、Christchurch、Niigata。

从上述分布可看出,中隔墙水平位移与各地震动中长周期部分数值大小一致,可认为中隔墙响应主要由地震动反应谱中的中长周期段控制。此外,从层间位移看,若按照框架结构^[24]、单层或双层地下结构弹性位移角 1/550 要求,中隔墙在 50 a 超越概率为 10%的地震动作用下已基本进入塑性段;若按照钢筋混凝土抗震墙、3 层及以上地下结构弹性位移角 1/1 000 要求,则中隔墙位移角已远超限制。综上,今后单洞双线盾构隧道抗震性能设计及研究中应对中隔墙结构进行重点关注。

3.2 结构内力

3.2.1 隧道内力

提取隧道结构各点地震响应中内力最大值,见图 12。

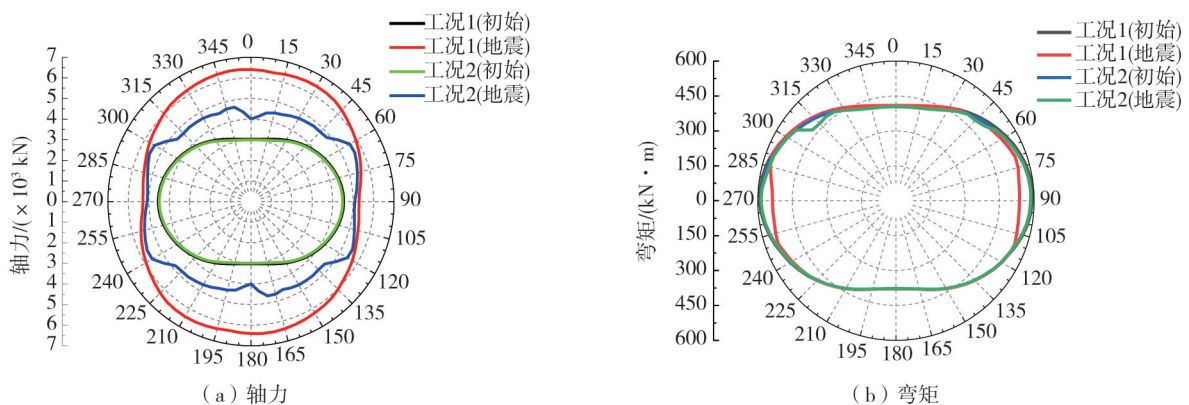


图 12 隧道内力图

Fig. 12 Internal forces of tunnel

由图12可知,相较初始静力工况,地震作用下结构轴力产生较大变化,地震作用前后结构所受弯矩变化较小。当考虑内部结构作用时,隧道结构轴力和弯矩均产生一定变化。

初始静力工况下隧道轴力基本一致,地震作用后结构轴力有明显增加,且顶底轴力增长幅度明显高于腰部;其中工况1在地震作用前后顶底轴力分别增长3386、3410 kN,工况2在地震作用前后顶底轴力分别增长981、1005 kN。相较于不考虑内部结构工况,隧道结构顶部轴力相对减少2405 kN,底部轴力相对减少2232 kN;而在两侧腰部轴力轻微减少,相对减少210 kN,在腰部所受轴力较为接近。

地震作用前后结构所受弯矩变化较小,除不考虑内部结构作用外,其余结构所受弯矩较为接近。相较于不考虑内部结构工况,隧道结构两肩弯矩相对减少50.3 kN·m,两侧腰部相对增加49.6 kN·m。

综上,由于内部结构尤其是轨下结构增加了隧道结构的横向刚度,使得对应部位的内力发生变化。从图中也可看出,隧道结构在地震作用下隧道顶部和底部是轴力的控制截面,而弯矩控制截面位于隧道两侧腰部。

3.2.2 内部结构内力

提取内部结构的轨下结构及中隔墙节点内力见表6。

表6 内部结构内力表

Table 6 Internal forces of internal structures

地震动	轨下结构左侧墙顶部		轨下结构右侧墙顶部		中隔墙底部节点	
	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
Loma Prieta	132.30	1.57	126.75	4.80	61.05	1.03
Chi-Chi	184.10	7.34	174.00	5.68	104.00	2.41
Niigata	187.60	4.16	99.05	2.68	212.50	2.51
Christchurch	194.00	3.95	106.50	2.32	262.20	2.83
人工地震动	75.97	2.23	192.70	4.37	112.70	2.67

由表6可知,轨下结构侧墙、中隔墙底部节点所受内力值整体较小,尤其是弯矩值非常小,可忽略。同时可看出,中隔墙底部节点所受剪力较大,轨下结构右侧墙所受弯矩值较大,左侧墙所受水平剪力值高于右侧墙,但整体小于中隔墙底部所受剪力。

3.3 结构损伤

本节将参照文献[14],将各部件损伤单元数量与部件总单元数的比值定义为损伤占比,后文不再赘述。同时受拉损伤高于0.5、受压损伤高于0.3视为单元失效破坏^[20]。

3.3.1 隧道损伤

隧道结构受拉损伤云图及受压损伤云图对比分别见图13和图14。

图13、图14中工况1、工况2受拉损伤分别为0.866、0.933;工况1、工况2受压损伤分别为0.014、0.271,隧道结构受拉损伤明显高于受压损伤。当考虑内部结构时,隧道结构所受损伤由顶部附近转移至两侧趾部。且结合图12,可看出不考虑内部结构时,隧道结构在顶底部分所受轴力较大,在顶部附近产生较大损伤;考虑内部结构时,结构顶底受力性能有所改善,损伤集中于隧道结构两侧趾部与轨下结构交界处。可看出由于中隔墙及轨下结构作用隧道顶部损伤明显降低,但由于内部结构作用,在趾部会产生新的损伤,应注意该部位可能产生的损伤。

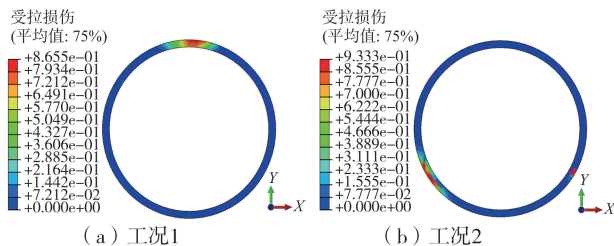


图13 隧道受拉损伤云图对比

Fig. 13 Comparison of tension damage of tunnel

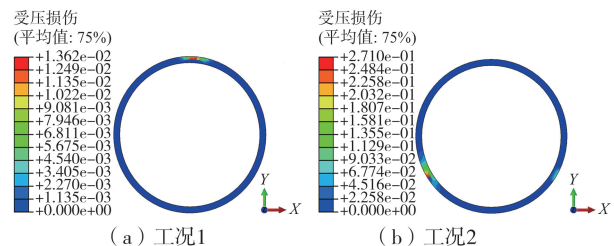


图14 隧道受压损伤云图对比

Fig. 14 Comparison of compression damage of tunnel

3.3.2 轨下结构损伤

轨下结构损伤云图见图15。

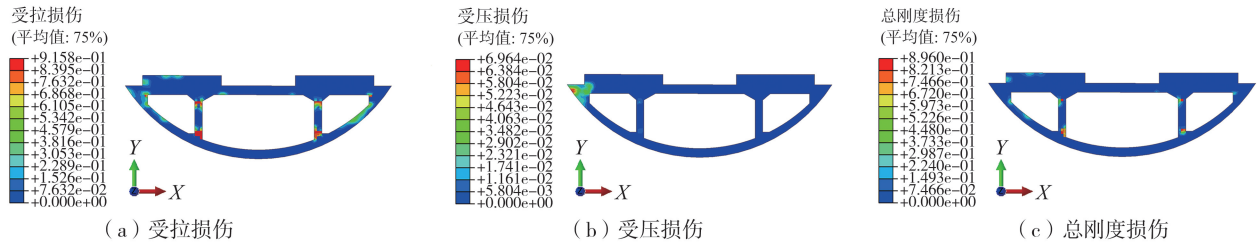


图 15 轨下结构损伤云图

Fig. 15 Damage of under-track structure

图 15 中轨下结构最大受拉损伤为 0.916,主要集中于轨下结构侧墙顶、底节点及边箱涵两侧转角,此外中箱涵顶板下部由于中隔墙作用也产生了一定损伤;最大受压损伤为 0.070,主要集中于左侧边箱涵的电缆槽与隧道交界处;总体刚度损伤最大值 0.896,主要集中于轨下结构侧墙顶、底节点处。可看出轨下结构损伤主要集中于中箱涵两侧侧墙的部位。

不同地震作用下轨下结构损伤情况见表 7。

表 7 不同地震动作用下轨下结构损伤情况

Table 7 Damage of under-track structure under different seismic wave reaction

变形情况	地震名称				
	Loma Prieta	Chi-Chi	Niigata	Christchurch	人工地震动
受拉损伤	0.243	0.916	0.287	0.139	0.708
损伤占比/%	—	4.64	—	—	0.26
受压损伤	0.001 0	0.070 0	0.000 3	0.000 2	0.002 0
总刚度损伤	0.198	0.896	0.168	0.066	0.488

由表 7 可知,轨下结构整体损伤较少,虽然 Chi-Chi 地震动和人工地震动作用下产生了破坏,但破坏程度较少,后续设计仅需对侧墙进行验算,并适当增加构造措施。

3.3.3 中隔墙损伤

中隔墙损伤云图见图 16。

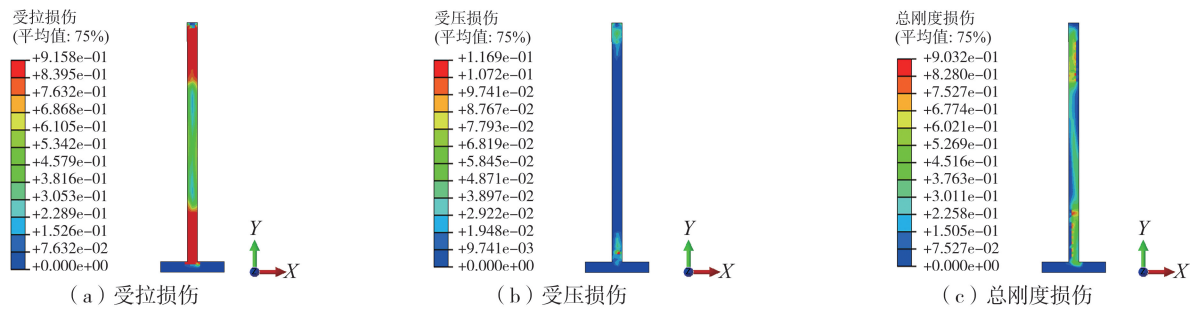


图 16 中隔墙损伤云图

Fig. 16 Damage nephogram of the central partition wall

由图 16 可知,中隔墙受拉损伤非常严重,受压损伤较少,总刚度损伤分布与受拉损伤分布较为一致。中隔墙受拉损伤最大值 0.916,受压损伤最大值 0.117,总刚度损伤最大值 0.904。损伤部位主要集中于中隔墙的顶部及底部。此外由于中隔墙顶部设置连接件,地震作用下中隔墙主要与连接件下部接触传力,因此中隔墙顶部存在部分损伤较小区域。底部损伤由于设计时中隔墙底部考虑为固接节点,因此中隔墙底部所受内力较大;同时中隔墙与基座连接部位产生刚度变化,成为地震作用下的薄弱部位。由于设置连接件的约束,中隔墙顶部不能自由变形,导致在地震作用下损伤不断增加。

不同地震作用下中隔墙损伤情况见表 8。

由表 8 可知,中隔墙在地震动作用下损伤较严重,受拉损伤占比较高,且损伤部位位于顶部和底部,可认为中隔墙在 50 a 超越概率为 10%强度地震作用下已完全失效,中隔墙是单洞双线隧道地震响应中最容易受到损伤并产生失效破坏的构件。

表8 不同地震动作用下中隔墙损伤

Table 8 Damage of the central partition wall under different seismic wave reaction

变形情况	地震名称				
	Loma Prieta	Chi-Chi	Niigata	Christchurch	人工地震动
受拉损伤峰值	0.916	0.916	0.767	0.669	0.916
受拉损伤占比/%	11.94	61.71	8.11	1.36	26.35
受压损伤峰值	0.014	0.117	0.012	0.004	0.020
总刚度损伤峰值	0.907	0.904	0.603	0.365	0.913

4 结论与展望

本文基于上海市机场联络线,通过数值模拟分析并对比了单洞双线盾构隧道在有无内部结构时结构变形、结构内力及结构损伤,得到了考虑内部结构时单洞双线盾构隧道的地震响应,得到了如下结论:

1)隧道结构在50 a超越概率为10%强度地震作用下性能较好,除在中长周期成分较高地震动作用下变形超过限值,在其余地震动作用下均满足设防需求。当存在内部结构时,隧道横向刚度得到提升,直径变形率产生明显下降,隧道顶底所受内力有所改善并产生明显下降,损伤分布从隧道顶部附近转移至两侧趾部。考虑内部结构虽然有利于隧道抗震性能,但也应注意轨下结构与隧道连接部位可能出现的损伤。

2)轨下结构中箱涵两侧的侧墙是地震作用下最先损伤的部位。由于侧墙需要将上部轨道垫层、中隔墙重力传递至下部隧道,同时下部箱涵有通行检修需求,因此后续设计中建议增加侧墙截面厚度,或增加配箍等构造措施,适当提高侧墙刚度。

3)中隔墙是地震作用下单洞双线盾构隧道抗震性能最为薄弱的构件,中隔墙响应主要受地震动反应谱中的中长周期段控制。中隔墙在50 a超越概率为10%强度地震作用下所产生的位移角已超过弹性限制,进而导致顶部、底部节点损伤非常严重。今后设计、研究应对隧道断面布置形式及中隔墙构件进行重点优化。可考虑采用摇摆柱或摇摆墙的结构形式,也可考虑在中隔墙顶部节点安装阻尼器(如碟簧、环簧、扇形阻尼器等)。

4)整体上看单洞双线盾构隧道由于内部结构的作用,抗震性能相对较好;但内部结构在地震作用下损伤较为严重,尤其是轨下结构的箱涵侧墙及中隔墙顶底节点部位。今后设计及研究中应对上述薄弱部位进行重点研究并采取响应构造措施,避免因上述部位提前失效影响隧道抗震性能。同时也建议对上述构件的震后修复进行相关研究。此外,本文采用仅考虑水平地震动入射二维模型,并未考虑地震动入射角度的影响,也未考虑行波效应等在隧道纵向上产生的地震响应,所得结果具有局限性,将在后续研究中进一步细化。

参考文献:

- [1] 李国良, 黄双林. 走滑型断裂破坏模式及隧道工程对策[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(8): 18-23.
LI Guoliang, HUANG Shuanglin. Strike slip fault failure mode and tunnel engineering countermeasures[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(8): 18-23. (in Chinese)
- [2] 蔡丽雯, 黄勇, 何静, 等. 2022年青海门源6.9级地震交通系统震害与启示[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 8-16.
CAI Liwen, HUANG Yong, HE Jing, et al. Earthquake damage and enlightenment from traffic system in 2022 Qinghai Menyuan M_s 6.9 earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 8-16. (in Chinese)
- [3] KAZMI Z A, KONAGAI K. Co-seismic stress changes and damage to tunnels in the 23 October 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 55(5): 736-748.
- [4] 葛照国, 唐泽人, 陈辰, 等. 单洞双线盾构隧道中隔墙顶部节点形式与力学性能研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(6): 1223-1232.
GE Zhaoguo, TANG Zeren, CHEN Chen, et al. Forms and mechanical performance of prefabricated partition walls' top connectors in single-tube double-track shield tunnels[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(6): 1223-1232. (in Chinese)
- [5] 范力, 吕西林, 赵斌. 预制混凝土框架结构抗震性能研究综述[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 90-97.
FAN Li, LV Xilin, ZHAO Bin. Summary of research on seismic performance of precast concrete frame structures[J]. Structural Engineers, 2007, 23(4): 90-97. (in Chinese)
- [6] 林春刚, 马召林, 陈勇良, 等. 大直径盾构隧道弧形件预制拼装技术与智能化安装机应用[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 460-477.

- LIN Chungang, MA Zhaolin, CHEN Yongliang, et al. Assembly technology of prefabricated arc parts and application of intelligent assembling machine for large-diameter shield tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(3): 460-477. (in Chinese)
- [7] 葛照国, 朱元昌, 陈辰, 等. 大直径盾构隧道整体式预制弧形构件构造[J]. *铁道建筑*, 2024, 64(3): 89-93.
GE Zhaoguo, ZHU Yuanchang, CHEN Chen, et al. Structure of monolithic prefabricated arc part inside large-diameter shield tunnel[J]. *Railway Engineering*, 2024, 64(3): 89-93. (in Chinese)
- [8] 郇昊霖, 李培楠, 刘俊, 等. 大直径盾构隧道内部装配式预制结构安装路径优化及应用[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(1): 236-244.
XUN Haolin, LI Peinan, LIU Jun, et al. Optimization and application of installation path of prefabricated structure in large-diameter shield tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(1): 236-244. (in Chinese)
- [9] 陈扬勋, 张迪, 周俊超, 等. 大直径盾构隧道内部预制中隔墙力学性能分析[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(增刊1): 406-411.
CHEN Yangxun, ZHANG Di, ZHOU Junchao, et al. Analysis of mechanical performance of precast middle partition wall in large diameter shield tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(Sup. 1): 406-411. (in Chinese)
- [10] 唐泽人, 于朋臣, 朱元昌, 等. 大直径盾构隧道预制中隔墙顶部节点整体受力分析研究[J]. *力学与实践*, 2024, 46(5): 975-981.
TANG Zeren, YU Pengchen, ZHU Yuanchang, et al. Analysis of mechanical performance on top connector of precast partition walls in large-diameter shield tunnels[J]. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(5): 975-981. (in Chinese)
- [11] DAI C Q, YANG M Y, WANG Q L, et al. Analysis of three-dimensional vibration characteristics of single-circle double-track subway tunnel under moving load[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 6620301.
- [12] 陈扬勋, 付钊, 刘学增, 等. 不同地层下大直径盾构隧道列车振动响应研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2023, 19(增刊1): 458-464.
CHEN Yangxun, FU Zhao, LIU Xuezheng, et al. Study on train vibration response of large diameter shield tunnel under different ground conditions [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(Sup. 1): 458-464. (in Chinese)
- [13] 禹海涛, 李龙津, 曹春艳, 等. 考虑内部预制结构的盾构隧道抗震性能分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(增刊2): 834-840.
YU Haitao, LI Longjin, CAO Chunyan, et al. Seismic performance analysis of shield tunnel considering internal prefabricated structure [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(Sup. 2): 834-840. (in Chinese)
- [14] 薛光桥, 肖明清, 封坤, 等. 特大直径双层公路盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(5): 67-77.
XUE Guangqiao, XIAO Mingqing, FENG Kun, et al. Research on transverse seismic resistance of compound system of segments and internal structure of a super-large diameter double-layer highway shield tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(5): 67-77. (in Chinese)
- [15] 何应道, 肖明清, 封坤, 等. 公轨合建盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究——以济南黄河隧道为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(8): 1404-1413.
HE Yingdao, XIAO Mingqing, FENG Kun, et al. Transverse seismic performance of segment-internal structure composite system of highway-metro integrated shield tunnel: A case study of Yellow River tunnel in Jinan, China [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(8): 1404-1413. (in Chinese)
- [16] GUO W Q, YANG W B, QIAN Z H, et al. The effect of internal structure on dynamic response of road-metro tunnels under train vibration loads: An experimental study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 138: 105182.
- [17] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46-51.
LIU Jingbo, WANG Zhenyu, DU Xiuli, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46-51. (in Chinese)
- [18] 禹海涛, 杨喻声, 袁勇, 等. 地下结构抗震分析的振动法与波动法对比研究[J]. *地震工程学报*, 2019, 41(4): 845-852.
YU Haitao, YANG Yusheng, YUAN Yong, et al. A comparison between vibration and wave methods in seismic analysis of underground structures[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2019, 41(4): 845-852. (in Chinese)
- [19] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在ABAQUS中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1445-1457.
MA Shengjie, CHI Mingjie, CHEN Hongjuan, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1445-1457. (in Chinese)
- [20] 金宇航. 城市地下综合管廊特殊节段地震响应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
JIN Yuhang. Seismic response analysis of the special segment of an urban underground utility tunnel [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [21] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2015.
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [22] DGJ08—2013 建筑抗震设计规程[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2013.
DGJ08—2013 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
- [23] GB 50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2014.
GB 50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [24] 唐泽人. 外廊式框架结构的优化设计与抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
TANG Zeren. Research on optimal design and seismic capacity of RC frame structures with exterior verandah [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)