

姚士磊. 隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析 [J]. 华南地震, 2020, 40(1): 105-110. [YAO Shilei. Numerical Analysis of Seismic Dynamic Analysis of Fractured Viscous-Slip Section of Tunnel Lining Structure [J]. South China journal of seismology, 2020, 40(1): 105-110]

隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析

姚士磊

(中铁隧道局集团有限公司勘察设计院, 广州 511458)

摘要: 针对传统地震动力响应数值分析方法存在应力响应性能较差的问题, 提出一种隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法, 对隧道衬砌结构断裂粘滑段进行地震动力响应数值分析。利用动力数据 ICP 采集系统采集模拟中的动力数据, 并通过振动台动力振动模型, 对隧道衬砌结构断裂粘滑段在地震波下受到的影响进行模拟, 根据模拟结果, 获取隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动峰值加速度的具体变化规律, 从而获得断裂粘滑段的地震动峰值加速度, 构建隧道衬砌结构断裂粘滑段的地震动动力响应数值分析模型, 对隧道衬砌结构断裂粘滑段进行地震动力响应数值分析。为了证明该方法的应力响应性能较强, 将传统地震动力响应数值分析方法与该方法进行对比实验, 实验结果证明该方法的地震动动力响应数值分析方法更加平稳, 也就是该方法的应力响应性能优于传统地震动力响应数值分析方法, 更适合进行隧道衬砌结构断裂粘滑段的地震动动力响应数值分析。

关键词: 隧道; 衬砌结构; 断裂粘滑段; 地震动力; 响应数值分析

中图分类号: U457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2020)01-0105-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.01.016

Numerical Analysis of Seismic Dynamic Response of Fractured Stick-slip Section of Tunnel Lining Structure

YAO Shilei

(Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group, Guangzhou 511458, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor stress response performance in traditional numerical analysis method of seismic dynamic response, a numerical analysis method of seismic dynamic response for the fracture stick-slip section of tunnel lining structure is proposed, and the corresponding numerical analysis of seismic dynamic response for the fracture stick-slip section of tunnel lining structure is carried out. The dynamic data in the simulation are collected by ICP acquisition system, and the influence of the fracture stick-slip section of tunnel lining structure under seismic wave is simulated by the dynamic vibration model of shaking table. According to the simulation results, the specific variation law of the peak acceleration of the ground motion in the fracture stick-slip section of tunnel lining structure and the peak acceleration of the ground motion in the fracture stick-slip section are obtained. In this paper, the numerical analysis model of seismic dynamic response for the fracture stick-slip section of tunnel lining structure is constructed, and the numerical analysis of seismic dynamic response for the fracture stick-slip section of tunnel lining structure is carried out. In order to prove that

收稿日期: 2019-03-26

作者简介: 姚士磊(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为隧道抗震计算。

E-mail: tianjingyaoshilei@163.com.

the method has better stress response performance, the traditional numerical analysis method of seismic dynamic response is compared with this method. The experimental results show that the numerical analysis method of seismic dynamic response of this method is more stable, that is, the stress response performance of this method is better than that of the traditional numerical analysis method of seismic dynamic response, and it is more suitable for the numerical analysis of seismic dynamic response of the fracture stick-slip section of tunnel lining structure.

Keywords: Tunnel; Lining structure; Fracture stick-slip section; Seismic dynamic; Response numerical analysis

0 引言

我国具有辽阔的国土,地处环太平洋板块、印度洋板块与欧亚板块的交界处,属于地震频发国家。自二十世纪以来,我国死于地震灾害的人口数超过六十万,基础设施遭受严重破坏。由于处于世界最大的浅源大陆强震活动区,我国部分国土承受着全球三分之一以上的陆地强震^[1]。通常,我国发生的地震灾害多见于西北的宁夏、青海、天山沿线、河西走廊;西南青藏高原及其边缘的云南省西部、四川省西部;华北的山东中南部、京津唐区域以及太行山沿线等^[2]。二十世纪以来,我国多次发生强烈地震。

尽管隧道结构具备优秀的抗震性能,但处于强震条件下仍然会受到严重的震害。强震条件下,隧道结构受到的震害如下:边墙垮塌、边墙掉块、衬砌开裂、洞门墙碎裂、拱部垮塌、衬砌错台、隧道水平错动、隧道竖向错动、边墙变形扭曲、冒顶、洞口垮塌、管片明显裂缝、交接部进入泥水、混凝土剥落、混凝土掉块、钢筋变形扭曲、二衬垮塌、仰坡滑塌等^[3]。其中,最易受到震害侵袭的隧道结构就是衬砌结构,在衬砌结构中,又以断裂粘滑段最易受到震害影响。

当前,我国的交通建设进程不断加快,新建以及在建的隧道工程数量不断增加,使隧道在我国交通路线中占据着越来越重要的地位^[4]。而很多新建以及在建的隧道工程都处于地震频发区域,包括东南沿海地区、西北地区以及西南地区等,甚至很多隧道穿越了地震活动断裂带,包括保凰断裂带、二郎山断裂带、龙门山断裂带等都存在整个穿越的隧道工程^[5]。衬砌结构断裂粘滑段作为隧道中最易受到震害影响的构造,必须对其进行地震动力响应数值分析,因此提出一种隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法。

1 设计隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法

1.1 地震动输入影响模拟

利用动力数据 ICP 采集系统采集模拟中的动力数据,并通过振动台动力振动模型,对隧道衬砌结构断裂粘滑段在地震波下受到的影响进行模拟^[6]。振动台具体如图 1 所示。

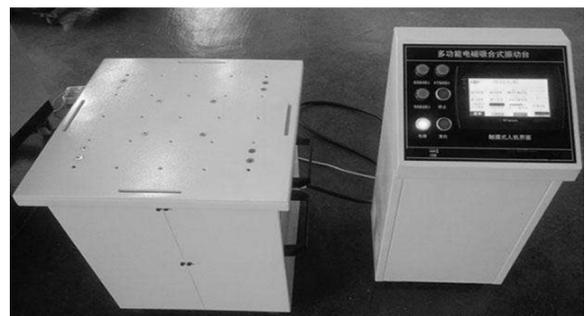


图 1 振动台

Fig.1 Shaking table

通过隧道衬砌结构断裂粘滑段的模型试验箱进行地震动输入影响模拟,模型试验箱的具体参数如表 1 所示^[7]。将模型试验箱置于振动台动力振动模型上。

在振动台动力振动模型中输入的地震波采用实测地震波,具体记录时间是 173.5 s^[8]。具体记录间隔为 0.003 s。模型中加载的地震波与加速度时程曲线的具体持时与频率范围具体如表 2 所示^[9]。输入模型中的模拟地震波具体如图 2 所示。

分六次进行加载,并逐渐提升输入的地震波烈度。具体模拟工况如表 3 所示^[10]。

1.2 获取断裂粘滑段地震动峰值加速度

根据地震动输入影响模拟结果,获取隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动峰值加速度的具体变化规律,从而获取断裂粘滑段的地震动峰值加速度^[11]。

隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动峰值加速度的变化会受到地震烈度以及覆岩层厚度的影响^[12]。其中地震烈度的具体影响系数如表 4 所示。

表 1 模型试验箱的具体参数

Table 1 Specific parameters of the model test box

| 类型 | 物理量 | 实物相似系数 |
|--------|-------|-----------|
| 材料特性 | 质量密度 | 2.5 |
| | 泊松比 | 1 |
| | 弹性模量 | 55 |
| | 应变 | 1 |
| | 应力 | 55 |
| 几何荷载特性 | 时间 | 6.588 |
| | 频率 | 0.29 |
| | 力矩 | 2 125 000 |
| | 荷载 | 50 600 |
| | 面积 | 1000 |
| | 角位移 | 1 |
| | 线位移 | 40 |
| | 几何长度 | 40 |
| 动力特性 | 内摩擦角 | 1 |
| | 刚度 | 2450 |
| | 质量 | 51 500 |
| | 阻尼 | 8484 |
| | 重力加速度 | 1 |
| | 加速度 | 1 |
| | 速度 | 6.366 |

表 2 具体持时与频率范围

Table 2 Specific duration and frequency range

| 类型 | 具体方向 | 持时/s | 频率范围/Hz |
|---------|------|-------|-----------|
| 加载的地震波 | 南北 | 165.5 | 0.2~5 |
| | 东西 | 165.5 | 0.2~5 |
| | 竖向 | 165.5 | 0.2~3 |
| 加速度时程曲线 | 南北 | 31 | 0.2~15.56 |
| | 东西 | 31 | 0.2~26.67 |
| | 竖向 | 31 | 0.2~26.67 |

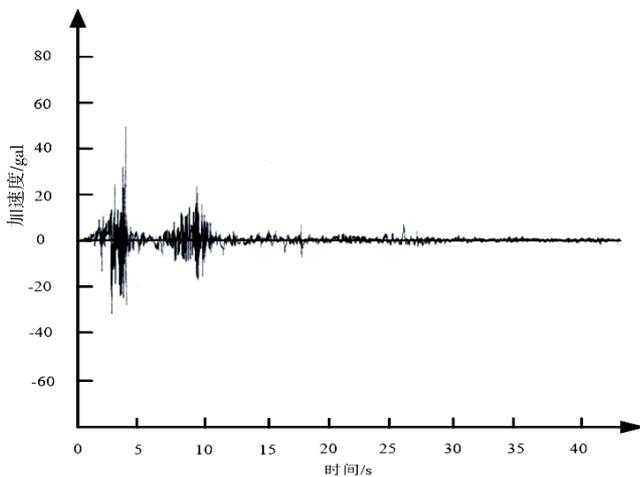


图 2 输入模型中的模拟地震波

Fig.2 Simulated seismic waves in the input model

表 3 具体模拟工况

Table 3 Specific simulation conditions

| 序号 | 工况 | 加载次序 |
|----|-----------------|----------|
| 1 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 白噪声小振幅信号 |
| 2 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 七度地震烈度 |
| 3 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 八度地震烈度 |
| 4 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 九度地震烈度 |
| 5 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 十度地震烈度 |
| 6 | 隧道衬砌结构断裂粘滑段动力测试 | 十一度地震烈度 |

表 4 地震烈度的具体影响系数

Table 4 Specific influence factors of seismic intensity

| 地震烈度 | Z 向 | Y 向 | X 向 |
|------|------|------|------|
| 7 | 1 | 1 | 1 |
| 8 | 0.8 | 0.85 | 0.85 |
| 9 | 0.71 | 0.74 | 0.78 |

而覆岩层厚度的具体影响系数如表 5 所示。

表 5 覆岩层厚度的具体影响系数

Table 5 Specific influence factors of overlying strata thickness

| 覆岩层厚度/m | Z 向 | Y 向 | X 向 |
|---------|------|------|------|
| 10 | 0.63 | 0.65 | 0.66 |
| 20 | 0.66 | 0.69 | 0.72 |
| 30 | 1 | 1 | 1 |

据表 5 的覆岩层厚度的具体影响系数获取覆岩层厚度在 Z 向、Y 向、X 向这三个方向上对地震动峰值加速度的影响规律，即在这三个方向上，隧道衬砌结构断裂粘滑段峰值加速度放大系数呈现水平传播状态，并且三个方向基本呈现三角形变化，且不同基岩的三角形斜率基本保持一致^[13]。Z 向、Y 向、X 向这三个方向上，隧道衬砌结构断裂粘滑段峰值加速度放大系数的具体传播规律如下：

$$Z \text{ 向: } N_z = 2.13 \times 10^{-2}x + 1 \quad (1)$$

其中， N_z 代表隧道衬砌结构断裂粘滑段峰值加速度放大系数在 Z 向的传播速度； x 代表三角形斜率。

$$Y \text{ 向: } N_y = 2.03 \times 10^{-2}x + 1 \quad (2)$$

其中， N_y 代表隧道衬砌结构断裂粘滑段峰值加速度放大系数在 Y 向的传播速度。

$$X \text{ 向: } N_x = 1.99 \times 10^{-2}x + 1 \quad (3)$$

其中, N_x 代表隧道衬砌结构断裂粘滑段峰值加速度放大系数在 X 向的传播速度。

而根据表 5 的地震烈度的具体影响系数获取地震烈度对隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动峰值加速度的影响规律, 其主要通过影响 Z 向、 Y 向、 X 向这三个方向的斜率来实现^[14]。

根据覆岩层厚度与地震烈度对隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动峰值加速度的影响规律计算断裂粘滑段的地震动峰值加速度。

1.3 地震动力响应数值分析

构建隧道衬砌结构断裂粘滑段的地震动动力响应数值分析模型, 对隧道衬砌结构断裂粘滑段进行地震动力响应数值分析。首先选取一个范围作为地震动力响应数值分析的计算区域, 其横向宽度为 85 m, 接着在不同埋深处构建不同半径的隧道衬砌结构断裂粘滑段模型^[15]。其上边界是地面, 下边界则距离洞底有五十米距离, 衬砌为各种强度混凝土、各个厚度的单层衬砌。隧道衬砌结构断裂粘滑段模型的具体计算工况如表 6 所示。

表 6 隧道衬砌结构断裂粘滑段模型的具体计算工况

Table 6 Specific calculation conditions of fracture stick-slip section model of tunnel lining structure

| 序号 | 影响因素 | 类别 |
|----|----------|--|
| 1 | 断面尺寸 | 10m、5m |
| 2 | 混凝土强度 | C60、C50、C40、C30 |
| 3 | 衬砌厚度 | 60cm、50cm、45cm |
| 4 | 围岩级别 | V级、IV级、III级 |
| 5 | 地震动加速度峰值 | 0.5m/s ² 、2.5m/s ² 、 4.2m/s ² 、5.5m/s ² |
| 6 | 埋深 | 60D、40D、30D、20D、15D、 10D、5D、2D |

以构建的隧道衬砌结构断裂粘滑段模型为基础, 在 ANSYS 有限元软件上构建其对应的地震动力响应数值分析模型^[16]。在地震动动力响应数值分析模型中, 采用线弹性材料作为围岩, 通过实体单元对其进行模拟; 衬砌通过 SHELL 单元进行模拟; 围岩下部与临空面分别为固定边界与自由边界, 而模型的其余平面则为粘弹性人工边界, 通过 COMBIN14 质量弹簧单元对其进行模拟^[17]。

其中, 构建的隧道衬砌结构断裂粘滑段的地震动动力响应数值分析模型具体如图 3 所示。

通过 Y 向地震波与 X 向地震波同时进行激励, 选取地震动力响应数值分析模型中衬砌结构断裂粘滑段特征点为仰拱底、右墙脚、左墙脚、右拱

腰、左拱腰、左拱肩、拱顶^[18]。通过地震动力响应数值分析模型提取各特征点的位移、各特征点的应力、峰值位移、峰值应力、最大有效应力^[19]。根据这些数据获取隧道衬砌结构断裂粘滑段的应力场, 以应力场为基础对隧道衬砌结构断裂粘滑段进行地震动力响应数值分析^[20]。

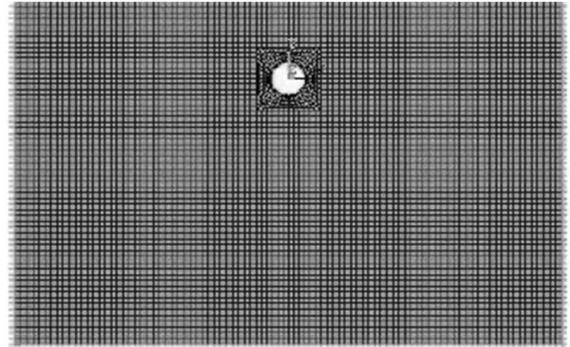


图 3 地震动力响应数值分析模型

Fig.3 Numerical analysis model of seismic dynamic response

2 实验研究与分析

2.1 实验方法与流程

利用隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法对某隧道衬砌结构断裂粘滑段实施地震动力响应数值分析。首先对该隧道衬砌结构断裂粘滑段的物理参数进行测量, 具体如表 7 所示。

表 7 该隧道衬砌结构断裂粘滑段的物理参数

Table 7 Physical parameters of fracture stick-slip section of tunnel lining structure

| 名称 | 物理参数 | | | | |
|----------|-------|-----------|---------------|-----------|--------------------------|
| | μ | E (MPa) | φ (°) | c (kPa) | r (kN/m ³) |
| 二衬 (C25) | 0.2 | 25 000 | - | - | 22 |
| 软弱岩层 | 0.35 | 2000 | 25 | 200 | 17 |
| 基岩 | 0.2 | 27 000 | 55 | 1800 | 27 |

提取隧道衬砌结构断裂粘滑段左边墙、右边墙、拱顶的内力计算结果, 具体如表 8 所示。实验的具体地震波设置如表 9 所示。

以设置的地震波为基准, 对该隧道衬砌结构断裂粘滑段实施地震动力响应数值分析。为了保障实验的有效性以及公正性, 将传统地震动力响应数值分析方法与本文设计的隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法进行对比实验,

通过对比实验结果判断隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法的性能。主要通过比较各个地震动力响应数值分析方法的应力响应性能来获取实验结果，判断应力响应性能的高低通常需要通过获取其应力响应频率曲线来实现，其应力响应频率曲线越平稳，即可证明其应力响应性能越优越；反之，则证明其应力响应性能较差。

表 8 内力计算结果

Table 8 Calculation results of internal force

| 内力计算结果 | 右边墙 | 左边墙 | 拱顶 |
|--|------|------|------|
| 纵向轴力 $N_x(\text{kN})$ | 340 | 350 | 356 |
| 竖向弯矩 $M_z(x)(\text{kN}\cdot\text{m})$ | 188 | 186 | 189 |
| 横向弯矩 $M_y(x)(\text{kN}\cdot\text{m})$ | 1588 | 1614 | 1641 |

表 9 实验的具体地震波设置

Table 9 Specific seismic wave settings for experiments

| 工况 | 地震波 | 加速度峰值/g (横向、台面) | 加速度峰值/g (横向、输入) |
|-----|-----------------|--------------------|--------------------|
| S34 | Chizhi-Teca67 | 0.144 | 1.389 |
| S26 | Keceole-Dukce | 0.382 | 3.59 |
| S21 | Kabe-Tokarakuna | 0.462 | 5.67 |

2.2 结果分析

在传统地震动力响应数值分析方法中，基于反应位移理论的地震动力响应数值分析方法的应力响应性能实验结果如图 4 所示。

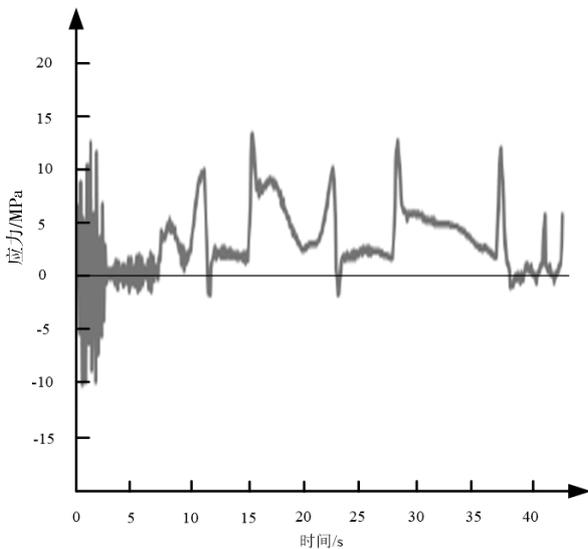


图 4 反应位移理论的应力响应性能实验结果

Fig.4 Experimental results of stress response performance of reaction displacement theory

基于结构变形特性分析方法的应力响应性能实验结果如图 5 所示。

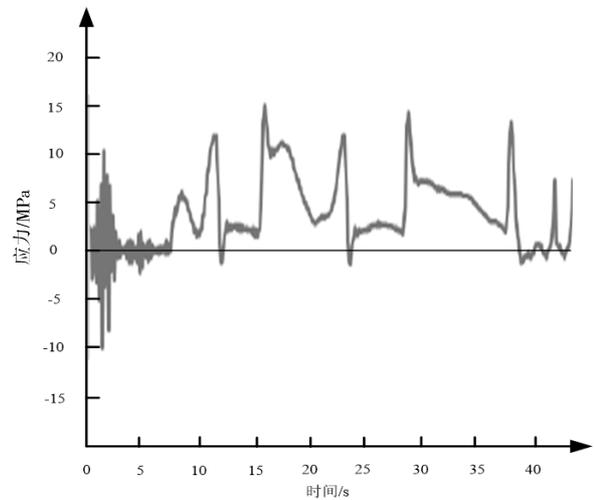


图 5 结构变形特性分析方法的应力响应性能实验结果

Fig.5 Experimental results of stress response performance of structural deformation characteristics analysis method

而隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法的应力响应性能实验结果则如图 6 所示

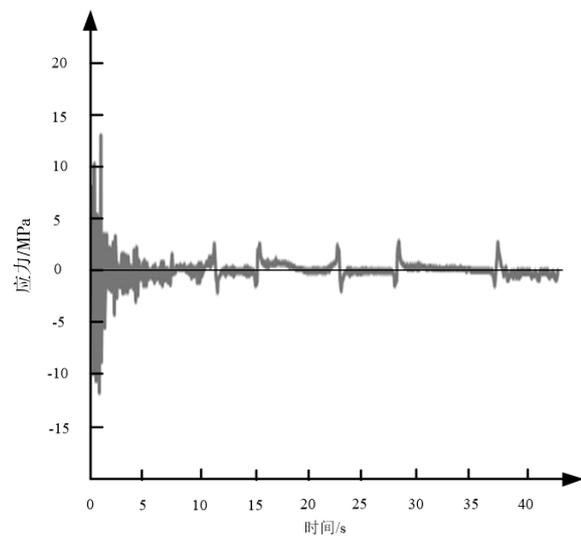


图 6 本文方法的应力响应性能实验结果

Fig.6 Experimental results of stress response performance of this method

根据上图的应力响应性能对比实验结果可知，隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法的应力响应频率曲线在几种地震动力响应数值分析方法中，明显更加平稳，也就是说，隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法的应力响应性能相较于传统地震动力响应数值分析方法而言更加优秀。

3 结语

隧道衬砌结构断裂粘滑段地震动力响应数值分析方法实现了应力响应性能的提升,对于隧道衬砌结构断裂粘滑段防震性能的提升具有重要意义。

参考文献:

- [1] 施有志,孙爱琴,林树枝. 地下综合管廊土-结构接触面参数对地震动力响应的影响数值分析[J]. 地震工程学报, 2017, 11(25): 16-24.
- [2] 窦远明,冯帆,王建宁. 软弱夹层对地铁车站结构地震动力响应影响的三维数值分析[J]. 结构工程师, 2019, 11(22): 140-148.
- [3] 施有志,孙爱琴,林树枝,等. Rayleigh波作用下地下综合管廊动力响应三维数值分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(34): 196-210.
- [4] 张沛洲,孙宝印,古泉. 基于数值子结构方法的低延性RC框架结构抗震性能精细化分析[J]. 工程力学, 2017, 34(36): 38-48.
- [5] 邱菊. 强震作用下含孔隙度混凝土受压破裂程度分析[J]. 华南地震, 2019, 39(4): 142-147.
- [6] 林启权,杨辅,董文正,等. 用平台巴西圆盘实验确定金属粉末压坯的力学性能参数[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(43): 408-412.
- [7] 贾真,刘五峰,王万祯,等. 折线隔板贯通方钢管轻骨料混凝土柱-H形钢梁异型节点破坏机理分析[J]. 空间结构, 2017, 23(34): 77-83.
- [8] 卿龙邦,喻滔来,徐东强. 基于扩展有限元法的混凝土重力坝宏观断裂数值分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(46): 97-105.
- [9] 王青原,陈红鸟,张华刚,等. 三点弯曲下混凝土梁挠度与裂缝口张开位移关系[J]. 应用力学学报, 2017, 34(35): 937-943.
- [10] 武小菲,王鹰,叶唐进. G318林芝—波密段斜坡地震动力响应及失稳机理[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(53): 571-571.
- [11] 王建宁,窦远明,魏明. 土-隧道结构动力相互作用振动台模型试验中传感器位置的优选[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(42): 148-154.
- [12] 崔春义,程学磊,孙宗光,等. 软基场地地铁车站地震响应及参数敏感性分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(43): 94-100.
- [13] 言志信,龙哲,周小亮,等. 锚固参数对地震作用下岩质边坡锚固界面剪切作用影响的数值分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(50): 2537-2544.
- [14] 庞亚瑾,杨少华,李海兵. 青藏高原东北缘海原—六盘山断裂带现今地壳应力环境的数值分析[J]. 岩石学报, 2019, 35(36): 1165-1169.
- [15] 胡鸿运,周晓军,汪精河. 岩层倾角 s 对顺层岩体隧道地震响应不对称性的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2018, 54(64): 461-466.
- [16] 江辉,王宝喜,王志刚. 不同类型地震动下深水高桩承台群桩基础动力响应对比研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(52): 833-841.
- [17] 程惠红,张贝,张怀,等. 2016年11月13日新西兰凯库拉(Kaikoura) M_w 7.8地震同震位移和应力数值分析[J]. 地球物理学报, 2017, 11(27): 2651-2659.
- [18] 崔春义,孟坤,陈守龙,等. 场地软土夹层对桥梁结构相互作用体系动力响应影响参数化分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 11(26): 951-957.
- [19] 颜学渊,毛会敏,祁皓,等. 近断层水平地震激励下巨—子三维隔震结构振动台模型试验[J]. 振动工程学报, 2017, 30(34): 646-653.
- [20] 宋辰宁,周国良,李小军,等. 非规则环形圆柱水箱液体晃动动力特性试验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(41): 187-192.