



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.019

任华春, 张婧, 邱小杰. 地下洞室震害类型及破坏程度影响因素数值分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 106-110. REN Huachun, ZHANG Jing, QIU Xiaojie. Earthquake damage types and the numerical analysis of influencing factors about destructiveness of underground caverns[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 106-110. (in Chinese)

# 地下洞室震害类型及破坏程度影响因素数值分析

任华春, 张婧, 邱小杰

(上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

**摘要:** 通过对世界各国实际震害资料的搜集整理, 综合分析得出地下洞室地震破坏形式有山体边坡破坏造成的结构破坏、洞口塌方、洞室横断面错动破坏、沿相交断层产生较大位移、围岩剥落、支护或衬砌扰动或变形等。运用数值模拟技术, 分析地下洞室震害程度影响因素。计算结果表明地震烈度越高, 洞室越易遭受破坏; 圆形洞室动力稳定性较好; 建在均匀、坚硬的岩石中的地下洞室不易遭受地震破坏; 地下洞室所处区域地应力越大, 其位移动力响应值较小; 地下洞室衬砌刚度增大在一定程度上将会加大震害程度; 洞室出口段容易遭受地震破坏。

**关键词:** 地下洞室; 震害类型; 地震波; 影响因素; 数值模拟

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0106-05

## Earthquake damage types and the numerical analysis of influencing factors about destructiveness of underground caverns

REN Huachun, ZHANG Jing, QIU Xiaojie

(Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200061, China)

**Abstract:** Based on earthquake damage data collection around the world, the earthquake damage types of underground cavern were comprehensively analyzed, such as the structural failure caused by slope failure, the portal collapse, the fault movement of cavern crosscut, the large displacement between two intersected faults, the spalling of surrounding rock, the disturbance or deformation of the support and lining system and so on. Numerical simulation technology was applied to analyze the influencing factors of underground caverns destructiveness. The calculation results showed that: the cavern was easier to be destroyed under higher earthquake intensity; dynamic stability of circular tunnel was better; the cavern constructed on homogeneous and hard rock was nontrivial to be damaged by earthquake; the dynamic displacement response index would be smaller with a large ground stress in the underground cavern region; the increase of lining stiffness would partly rise the degree of the seismic damage; the outlet of cavern suffered the earthquake destruction easily.

**Key words:** underground cavern; earthquake damage type; earthquake wave; influencing factors; numerical simulation

随着地下洞室这一结构形态越来越多地运用于水利、市政等行业的实际工程中, 针对其开展的各项研究也逐渐深入。虽然地下结构相较于地面结构具有较好的抗震性能, 但世界上诸多关于实际震害的调查报告表明, 地震作用下, 地下洞室也会遭受

不同程度破坏<sup>[1-5]</sup>, 这些调查报告为相关理论的发展奠定了基础。目前, 地下洞室的地震破坏研究主要采用震后现场调查以及数值分析两种方法。Dowd C. H. 和 Rozen A. 在 1978 年首先较早地对地下洞室震害进行全面总结, 采用来自美国、日本的 71

收稿日期: 2015-11-08 修回日期: 2015-12-17 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1139.021.html>

作者简介: 任华春(1985-), 女, 江苏江都人, 工程师, 主要从事水工结构设计研究。E-mail: renzhe0416@hotmail.com

通讯作者: 张婧(1989-), 女, 江苏连云港人, 助理工程师, 主要从事水利工程设计。E-mail: 842584719@qq.com

个地震中地下洞室破坏的例子,研究了岩体隧道在地震中的破坏模式;随后不少研究者采用类似方法,根据地下洞室震害特征分析其地震反应,对地震中影响洞室稳定的重要因素进行了研究和总结;上世纪以来,Sharama<sup>[6]</sup>、Asakura<sup>[7]</sup>等专家学者通过整理和总结实际震害资料,得到了一些关于地震对地下洞室造成破坏的定性结论。由于通过对地下洞室震害进行研究分析得出的相关结论不能定量表明洞室应力应变情况,所以随着计算科学的发展,地下洞室地震反应数值分析方法也逐渐得以应用。本文结合两种方法,首先通过搜集整理相关资料,分析地下洞室遭受地震破坏的类型,然后运用有限元数值分析方法模拟各种影响其破坏程度的因素,得出一般规律性,从而为工程设计提供概念性指导。

表1 地下洞室震害实例

Tab. 1 Earthquake damage of underground cavern in practical engineering

地震名称(年份)	国家地区	震级	地下工程	受损情形
旧金山地震(1906)	美国	8.3	莱特一号隧道	断裂带处隧道损毁严重,木梁柱折断,轨道上凸水平错动最大1.37 m
关东大地震(1923)	日本	7.9	震区82座隧道	主要表现为顶拱和边墙塌落,衬砌裂缝,洞口砖石墙碎裂
伊豆地震(1930)	日本	7.3	丹那隧道	水平错动2.39 m,竖向错动0.6 m,内部边墙多处裂缝
克恩郡地震(1952)	美国加州	7.6	南太平洋铁路线3.4、5.6号隧道	穿越白狼断裂带处的洞室边墙扭曲,洞壁出现大裂缝,洞顶穿透破坏
柯依纳地震(1967)	印度	6.5	柯依纳(Koyna)水电站地下厂房	发电站变压器室、水轮机室及其中间走廊的地面板和侧壁拱顶轻微裂缝
云南通海地震(1970)	中国内地	7.7	多条公路隧道	洞口段坍塌
唐山地震(1976)	中国内地	7.8	唐山矿区斜井、洞室	井口附近地面建筑物倒塌,井口以下15 m之内的井筒壁约隔1~3 m出现一道环向裂缝,洞室底板多处拱起,个别边墙被挤出,洞顶掉砖碴和灰条
墨西哥地震(1985)	墨西哥	8.1	墨西哥市地铁	洞室衬砌混凝土剥落,出现较多裂缝
阪神地震(1995)	日本	7.2	六甲隧道神户隧道	两条隧道的水泥内壁有多处出现裂缝,六甲隧道中裂缝长达数十米的地方有3处,顶部水泥块有倾掉现象
集集地震(1999)	中国台湾	7.3	车笼埔断层东侧上盘山体多条公路隧道	洞口坍塌,衬砌断裂、错动,衬砌混凝土剥落,钢筋裸露
			石岗坝输水隧洞	隧洞在垂直洞轴线向产生3~4 m错动
新潟中越地震(2004)	日本	6.8	鱼沼隧道	顶拱衬砌大面积掉落,洞径减小,洞底上抬
“5.12”汶川地震(2008)	中国内地	8.0	映秀湾、渔子溪等水电站地下厂房	厂房洞室上下游衬砌混凝土边墙以及顶拱处有局部开裂,交通洞进口、尾水洞出口段边坡垮塌
			龙溪、紫坪铺等多条公路隧道	洞门及洞口段破坏严重,洞内衬砌出现裂缝及掉块,基底上鼓并错台,顶拱钢筋网发生扭曲变形

## 2 地下洞室震害影响因素数值模拟分析

### 2.1 计算模型及参数选取

#### 2.1.1 计算模型

地下洞室数值分析中,取垂直于洞轴线水平向为X轴,沿洞轴线向为Y轴,竖直向为Z轴,横向截

## 1 实际工程震害调查

20世纪以来全球发生过许多地震,其中1906年美国旧金山地震、1920年中国海原地震、1923年日本关东地震、1960年智利地震、1976年中国唐山地震、1985年墨西哥地震、1995年日本阪神地震、2008年中国汶川地震等震级都在7级以上,对地下结构造成了不同程度的损害,这为深入研究地下洞室震害机理提供了大量必要而宝贵的资料。表1列举了反映绝大部分地下洞室地震破坏形式的工程实例<sup>[8-10]</sup>。由表中可见,地下洞室地震破坏的一般形式有山体边坡破坏造成的结构破坏、洞口塌方、洞室横断面错动破坏、沿相交断层产生较大位移、围岩剥落、支护或衬砌扰动或变形等<sup>[11-18]</sup>。

断边界范围取10倍洞径,Z轴方向由洞顶往上取至地表,洞底往下取10倍洞径,洞室基本尺寸为10 m×50 m×10 m。

#### 2.1.2 岩体物理力学指标

岩石介质选凝灰岩,其静态力学指标见表2。根据规范<sup>[19]</sup>,岩石动态弹性模量值应比静态弹性模

量值提高 30%。

表 2 岩石物理力学指标

Tab. 2 The mechanics parameters of rock mass

力学特性	值
弹性模量 $E$ /GPa	23.0
泊松比	0.25
体积模量/GPa	15.3
剪切模量/GPa	9.2
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2500
黏聚力 $c$ /MPa	1.0
摩擦角( $^\circ$ )	40
抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	2.0

### 2.1.3 岩石力学模型和屈服准则

数值模拟中,岩石力学模型采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则。

### 2.1.4 动荷载

大多数研究表明剪切波对洞室动力响应影响较大,本文选择从模型底部以 SV 波形式输入动荷载。文中计算主要采用如下两种波。

(1)人工地震波。加速度时程曲线见图 1,其中(a)为设计烈度 7 度、地震持续时间为 1.0 s 的人工地震波,简称 I 类人工地震波;(b)为设计烈度 7 度的人工地震波,简称 II 类人工地震波。

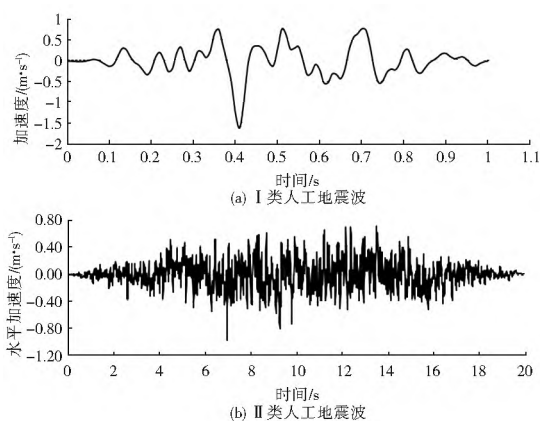


图 1 人工地震波加速度时程曲线

Fig. 1 Time acceleration curve of artificial seismic wave

(2)正弦波。速度时程表达式为:  $v = 0.2 \sin(\frac{2\pi}{T}t)$ , 最大幅值取为 0.2 m/s,卓越周期  $T$  为 1.0 s,频率为 1 Hz,持续时间为 2.0 s。

### 2.1.5 边界条件和力学阻尼

根据动力计算相关原理,模型侧边界采用自由场边界条件,模型底部采用黏性边界条件,岩体阻尼采用有限元软件提供的局部阻尼 0.157 (0.05 $\eta$ )。

## 2.2 地震烈度对洞室动位移值的影响

影响地震烈度的因素有地震震级和震中距等,从数值模型底部输入设计烈度分别为 7、8、9 度的人工地震波,其中 7 度人工地震波的加速度时程曲线如图 1(b)所示,并对该地震波加速度振幅进行缩放得到 8、9 度人工地震波。从模型底部以 SV 波形式输入设计烈度分别为 7、8、9 度的 II 类人工地震波。

图 2 表达了侧压系数  $K = 2.0$ ,埋深为 200 m 时,洞径为 10 m 的圆形洞室拱顶在不同设计地震烈度地震波作用下的 X 向动位移时程曲线。由图可知,地震烈度越高,洞室的动位移值越大。

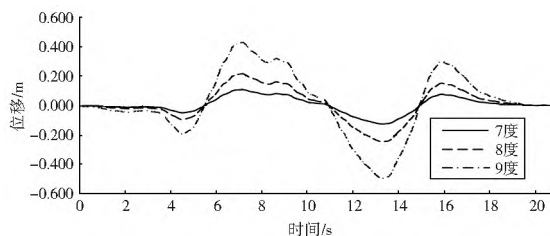


图 2 圆形洞室拱顶 X 向动位移时程曲线

Fig. 2 Horizontal time displacement curve of the vault

## 2.3 洞室断面型式对洞室位移的影响

从模型底部以 SV 波形式输入动荷载,其速度时程为正弦波。

图 3 为侧压系数  $K = 2$ ,不同埋深情况下,洞径 10 m 的圆形(直径 10 m)、矩形(宽、高均为 10 m)、城门洞形(顶拱直径 10 m,洞高 15 m)三种断面形状的洞室动位移值响应的变化规律,选取  $t = 2$  s 时动位移值进行比较。由图可知,在动荷载作用下,三种断面形状的洞室的拱顶动位移值响应有一定区别,其中矩形洞室动位移值最大,城门洞形洞室动位移值次之,圆形洞室动位移值最小,这与实际震害资料分析结论一致。当埋深不超过 300 m 时,三种断面形状的洞室拱顶动位移值相差不大。

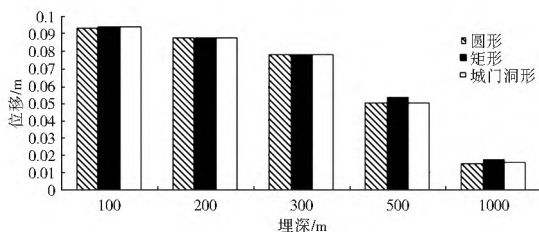


图 3 不同埋深工况下洞室动位移随洞室断面变化情况

Fig. 3 Time displacement curve of different cross section types

## 2.4 地应力对洞室位移的影响

从模型底部以 SV 波形式输入动荷载,其速度时程为正弦波。垂直向地应力仅考虑受重力场作用。

图4是埋深为200 m, 洞径为10 m的城门洞形断面洞室拱顶、拱底测点动位移值随地应力变化规律, 选取 $t=2\text{ s}$ 时动位移值进行比较。由图可知, 在地震荷载作用下, 洞室拱顶、拱底动位移值随侧压系数的增加而减小, 当 $K \leq 1$ 时, 洞室拱顶和拱底动位移值的量值和变化幅度较大。

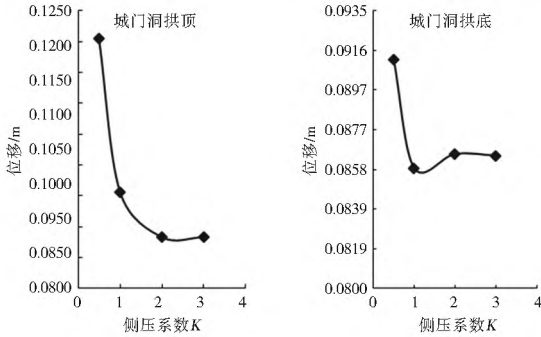


图4 不同地应力场下的洞室动位移变化情况

Fig. 4 Time displacement curve of different initial stress fields

### 2.5 岩石类型对洞室位移的影响

从模型底部以SV波形式输入动荷载, 其速度时程为正弦波。相关岩石力学参数见表2。

图5是埋深为200 m、侧压系数 $K=2.0$ 时, 城门洞型洞室建在不同弹性模量岩体中时, 洞室拱顶、拱底测点的动位移值变化规律, 选取 $t=2\text{ s}$ 时动位移值进行比较。由图可知, 随着岩石弹性模量逐渐增大, 洞室在动荷载作用下的动位移值先增大后减小。

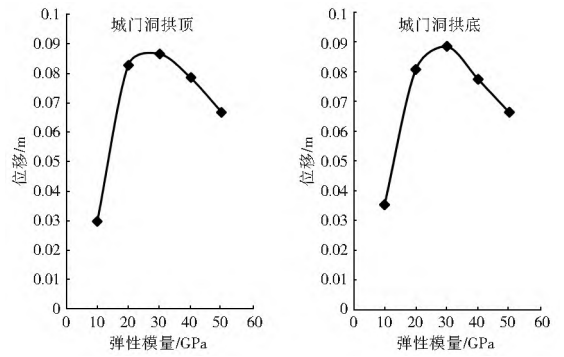


图5 不同岩石弹性模量下洞室动位移变化情况

Fig. 5 Time displacement curve of different rock elasticity modulus

### 2.6 衬砌刚度对洞室动力响应的影响

从模型底部以SV波形式输入I类人工地震波, 其加速度时程曲线见图1(a)。模型采用两种材料, 围岩动态剪切模量4.0 GPa, 动态体积模量6.67 GPa, 衬砌为混凝土, 其动态剪切模量6.0 GPa, 动态体积模量10.0 GPa。计算考虑埋深为200 m、侧压系数 $K=1.0$ 时, 圆形洞室在衬砌刚度分别为初始刚度0.5、1.0、2.0、3.0倍这四种工况。

表3列出了衬砌取不同刚度时, A、B点处洞室围岩与衬砌动应力峰值及放大系数值。由表可知, 衬砌刚度越大, 其动应力也越大, 衬砌与周边围岩的动应力差值也越大, 放大系数也越大。该规律与冈本舜三(1984)<sup>[20]</sup>的震害调查结果一致, 即衬砌刚度增大在一定程度上将会加大震害程度。

表3 洞室围岩及衬砌在A、B两点处的应力峰值及放大系数

Tab. 3 The dynamic principle stress and amplification coefficient of surrounding rock and lining

		0.5倍刚度	1倍刚度	2倍刚度	3倍刚度
A点	围岩 $\sigma_z$ / MPa	-0.218/0.192	-0.210/0.190	-0.201/0.179	-0.190/0.170
	衬砌 $\sigma_z$ / MPa	-0.113/0.099	-0.346/0.301	-0.443/0.390	-0.685/0.662
	放大系数	0.518	1.648	2.204	3.894
B点	围岩 $\sigma_x$ / MPa	-0.054/0.036	-0.054/0.036	-0.054/0.036	-0.047/0.033
	衬砌 $\sigma_x$ / MPa	-0.021/0.019	-0.090/0.060	-0.120/0.080	-0.170/0.130
	放大系数	0.528	1.667	2.222	3.939

### 2.7 边坡对洞室出口段动力响应的影响

数值计算采用圆形洞室出口段模型, 洞口处竖直埋深30 m。从模型底部以SV波形式输入I类人工地震波, 其加速度时程曲线见图1(a)。模型采用两种材料, 围岩动态剪切模量4.0 GPa, 动态体积模量6.67 GPa, 衬砌为混凝土, 其动态剪切模量6.0 GPa, 动态体积模量10.0 GPa。计算考虑侧压系数 $K=2.0$ 。

图6给出了人工地震波作用结束时, 沿洞室纵轴线剖面围岩的剪切破坏状态, 图中NONE代表该

处一直处于弹性变形状态, shear-p代表该处当前处

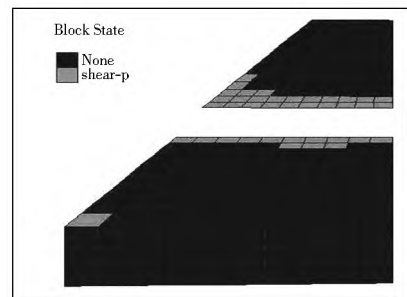


图6 洞室围岩剪切破坏状态

Fig. 6 The shear failure condition of the exit of cavern

于弹性状态,在此之前处于剪切破坏状态,由图可知,越接近出口处,洞室围岩剪切破坏区域越大。

### 3 结论

(1) 地下洞室地震破坏一般有山体边坡破坏造成的隧道结构破坏、隧道洞口塌方、洞室横断面错动破坏、沿相交断层产生较大位移、洞室围岩的剥落、支护或衬砌的扰动或变形等形式。

(2) 在动荷载作用下,地震烈度越高,洞室的位移值越大;圆形洞室位移响应最小,城门洞次之,矩形洞室位移响应最大,当埋深不超过 300 m 时,三种断面形状的洞室拱顶位移相差不大;洞室拱顶、拱底位移随侧压系数的增加而减小,当时,洞室拱顶和拱底位移的量值和变化幅度较大。

(3) 随着岩石弹性模量逐渐增大,洞室在动荷载作用下的位移值先增大后减小;衬砌刚度增大,其内应力也越大,衬砌与周边围岩的应力差值也越大,放大系数也越大,在一定程度上将会加大洞室震害程度;边坡对洞室出口段的动力响应特性存在一定影响,越接近出口处,洞室越容易破坏。

#### 参考文献(References):

[1] Charles H Dowding, Amon Rozan. Damage to rock tunnels from earthquake shaking[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(2): 175-191.

[2] 王瑞民, 罗奇峰. 阪神地震中地下结构和隧道的破坏现象浅析[J]. 灾害学, 1998, 13(2): 63-66. (WANG Rui min, LUO Qi feng. Analysis on the damage to underground structure and tunnel in kobe are caused by hانشin earthquake[J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(2): 63-66. (in Chinese))

[3] 王文礼, 苏灼谨, 林峻弘等. 台湾集集大地震山岳隧道受损情形之探讨[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 52-60. (WANG Wen li, SU Zhuo jing, LIN Jun hong et al. Discussion on damaged extent of mountainous tunnels due to earthquake, Taiwan [J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(2): 52-60. (in Chinese))

[4] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742-750. (LI Tian bin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of Great Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742-750. (in Chinese))

[5] 唐天国, 宋胜武, 雷承弟. 汶川地震对水电地下厂房洞室工程稳定性动力分析研究[R]. 北京: 中国学术期刊电子出版社, 2008, 44F-446. (TANG Tian guo, SONG Sheng wu, LEI Cheng di. Dynamic analysis on underground powerhouse tunnel stability under Wenchuan Earthquake[R]. Beijing: China Academic Journal Electronic Press, 2008, 44F-446. (in Chinese))

[6] Sharma S, Judd W R. Underground opening damage from earthquake[J]. Engineering of Geology, 1991, 30(3): 263-276.

[7] Asakura T, Sato Y. Mountain Tunnels Damage in the 1995 HYOGOKEN-NANBU Earthquake[R]. Quarterly Report of

the Railway Technical Research Institute (RTRI), 1998, 39(1): 9-16.

[8] 何川, 耿萍, 晏启祥. 汶川大地震隧道工程震害初步分析[A]. 汶川大地震工程震害调查分析与研究[C]. 成都, 2009. (HE Chuan, GENG Ping, YAN Qi xiang. Preliminary analysis on tunnel engineering seismic damage in Wenchuan Earthquake [A]. Investigation and Research of Wenchuan Earthquake Engineering Damage [C]. Chengdu, 2009. (in Chinese))

[9] 赖金星, 李伟松, 潘超. 二郎山隧道震害监测与评估[J]. 勘察科学技术, 2010, (5): 56-57. (LAI Jin xing, LI Wei song, PAN Chao. Seismic damage detection and evaluation of Erlang Mountain tunnel [J]. Site Investigation Science and Technology, 2010, (5): 56-57. (in Chinese))

[10] 谭可奇, 陈东升, 尹葵霞等. 汶川地震对震中附近水电站地下厂房的影响[J]. 水电站设计, 2012, 28(3): 7F-74. (TAN Ke qi, CHEN Dong shen, YI Kui xia et al. The influence on underground powerhouse of Wenchuan Earthquake [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2012, 28(3): 7F-74. (in Chinese))

[11] 皇民, 刘马群, 王安华等. 隧道地震破坏的主要形式及影响因素分析[J]. 交通科技与经济, 2010, (57): 60-62. (HUANG Ming, LIU Ma qun, WANG An hua et al. The research of tunnel earthquake damage forms and the reasons [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2010, (57): 60-62. (in Chinese))

[12] 倪开伟. 高速公路隧道地震破坏的形式及预防措施[J]. 黑龙江交通科技, 2012, (10): 97-98. (NI Kai wei. The form and preventive measure of expressway tunnel earthquake damage [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2012, (10): 97-98. (in Chinese))

[13] 陶双江, 蒋雅君. 汶川地震隧道震害影响因素的统计和分析[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 15-21. (TAO Shuang jiang, JIANG Ya jun. Statistics and analysis of influential factors of tunnel damage induced by the Wenchuan Earthquake [J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(3): 15-21. (in Chinese))

[14] 龙岗, 任华春. 三道湾水电站地下厂房洞室围岩支护方案研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2009, 45(12): 24-26. (LONG Gang, REN Hua chun. Geological investigation report of Sandaowan Hydropower station in Taolai river [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute, 2009, 45(12): 24-26. (in Chinese))

[15] Shen Z Z, Ren H C. Dynamic response characteristics of underground powerhouse caverns for sandaowan hydropower station [J]. Advanced Materials Research, 2012, (382): 80-83.

[16] Scanlan R H, Sachs K. Earthquake time histories and response spectra [J]. J. Eng. Mech. Div., 1974, EM4, 635-655.

[17] Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi Chi Earthquake [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 133-150.

[18] Hsiung S M, Ghosh A. Seismic Responses of Underground Excavations in Jointed Rock Mass [A]. 41st U. S. Rock Mechanics Symposium ARMA's Golden Rocks 2006-50 Years of Rock Mechanics Symposium [C]. Madison, 2006, 13.

[19] SL203-97, 水工建筑物抗震设计规范[S]. (SL203-97, Specifications for seismic design of hydraulic structures [S]. (in Chinese))

[20] Okamoto Shunzo. Introduction to Earthquake Engineering (2nd Ed) [M]. University of Tokyo Press, 1984.