

周晓靖,钟明文,汪洪武,等.地质条件对隧道地震响应的影响因素研究[J].地震工程学报,2021,43(1):154-161.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.154

ZHOU Xiaojing,ZHONG Mingwen,WANG Hongwu,et al.Influence of Geological Conditions on the Seismic Response of a Tunnel[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(1):154-161.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.154

地质条件对隧道地震响应的影响因素研究

周晓靖¹,钟明文¹,汪洪武¹,戴永浩²,梁栋才^{2,3}

(1. 云南通大高速公路改扩建工程有限公司, 云南 大理 671000;

2. 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;

3. 中国科学院大学, 北京 100000)

摘要: 地质条件对隧道的地震响应的影响因素研究,目前已有较多研究者开展,但多数研究者关注单因素研究,但对多因素及各因素间相互作用关注较少。本文以华丽高速公路典型隧道为工程背景,将其抽象为数值算例,并基于正交设计及均匀设计等试验方法,分别研究地质条件中岩体的力学效应、应力状态效应、结构面的力学效应对隧道的影响。研究表明:对于岩体力学参数,除开挖变形指标的主要影响因素为变形模量外,岩体力学参数中对隧道地震响应最主要的影响因素为黏聚力及内摩擦角,即强度参数;岩体应力状态参数中对隧道地震响应最主要的影响因素为隧道埋深,其次分别为平面内侧压系数和平面外侧压系数;节理力学参数中的摩擦角和抗拉强度为影响隧道地震响应的主要因素,其次为黏聚力、法向刚度、切向刚度。

关键词: 隧道;地震响应;地质条件;正交设计;节理单元

中图分类号: TU92

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0154-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.154

Influence of Geological Conditions on the Seismic Response of a Tunnel

ZHOU Xiaojing¹, ZHONG Mingwen¹, WANG Hongwu¹, DAI Yonghao², LIANG Dongcai^{2,3}

(1.YunnanTongda Highway Extension Projection Co., Ltd., Dali 671000, Yunnan, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: Extensive research has been conducted on the influence of the geological conditions on the seismic responses of tunnels. However, most existing work has focused on the influence of single parameters. Less emphasis has been place on the influence of multiple parameters and the interactions between them. In this paper, we consider the influences of geological conditions on a typical tunnel of the Huali expressway project. Using orthogonal and uniform design methods, we studied the influences of various geological parameters, including the mechanical parameters of the rock mass, the in-situ stress state of the rock mass, and the mechanical parameters of the joints. The results indicate that the main factor influencing the excavation deformation index is the deformation modulus. Regarding the mechanical param-

收稿日期:2019-08-15

基金项目:云南省交通科技项目(云交科教[2018]18号)

第一作者简介:周晓靖(1974-),男,云南昆明人,高级工程师,主要从事公路勘察设计工作。E-mail:454290417@qq.com。

备地震动力计算功能的 RS2 软件中建立了数值模型,图1给出了隧道算例的数值模型示意图。隧道跨度为 12 m,工程位于地震活动强烈的高山峡谷地区,地震基本烈度Ⅶ度。以其为背景抽象为数值算例,进行地震动条件影响研究。单元尺寸约 1.5 m,自重应力场,根据工程相关地勘报告,围岩按照Ⅲ类围岩考虑,材料属性为容重 2 700 kg/m³,变形模量 10 GPa,泊松比 0.25,黏聚力 2.2 MPa,内摩擦角

48.2°,抗拉强度 0.5 MPa。分 2 步开挖。动力计算中采用黏滞边界,地震动至底部向上输入。

1.2 地震动

在本文研究中,均采用鲁甸地震记录进行分析,盖因此记录临近工程区域。

取三向地震记录中的两向进行二维计算,如图 2 所示。取幅值 2 m/s²,其他条件不变。分析中竖向地震幅值设定为水平向的 2/3。

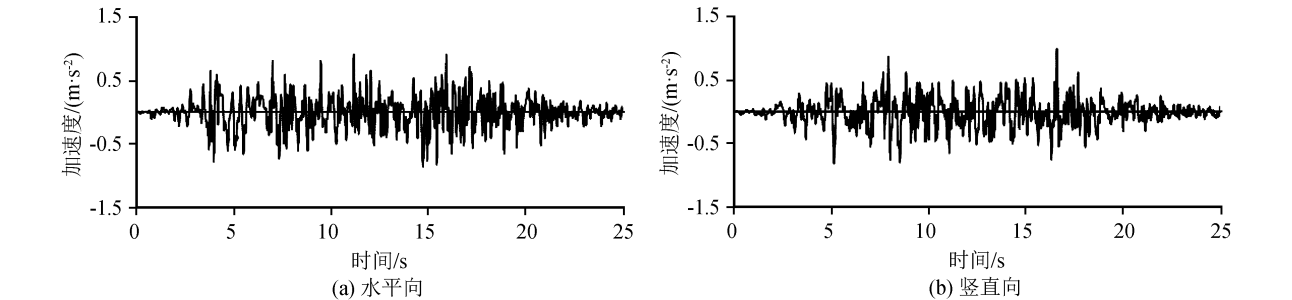


图 2 鲁甸地震记录时程曲线
Fig.2 Time-history curve of Ludian earthquake

2 岩体的力学效应

对于岩体的力学效应对隧道地震响应的影响,已有较多的研究成果。目前基本认为修建在强度较高岩体内的隧道的抗震性能较修建在低强度岩体内的隧道的抗震性能要强。但对于岩体各个力学参数的增减对地震响应的影响,及其相互之间的影响,研究尚少。

正交设计法是依据正交性原则来挑选试验范围(因素空间)内的代表点。若试验有 x 个因素,每个因素有 n 个水平,则全面试验的试验点个数为 n^x 个,而正交设计仅有 n^2 个。依据正交性原则来选择试验的正交试验设计可大大减少试验次数,并且具有“均衡分散性”和“整齐可比性”,非常适用于多因素、多水平的试验情况。以上节中华丽高速工程中典型隧道的数值算例,采用正交试验设计,研究岩体各个力学参数对隧道地震响应影响的主次顺序,以期获得一些参考性的结论。

将岩体的力学效应概括为变形模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度五个参数,为了按照正交设计原则构造计算样本,以原型算例中岩体参数为基准,对每个参数取其可能的取值区间内的 4 个水平,如表 1 所列。由于参与试验的参数有五个,依据正交试验原理,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,给出了 16 组组合方案,列于表 2。

对于每一组试验数据,采用图2中的鲁甸地震

表 1 岩体力学效应的因素水平					
Table 1 Factor levels of the rock mechanical effect					
参数水平	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
原型	10	0.25	2.2	48.2	0.4
1	6	0.21	1	40	0.1
2	8	0.24	2	45	0.3
3	12	0.27	3	50	0.5
4	14	0.30	4	55	0.7

表 2 正交设计试验方案表					
Table 2 Scheme of the orthogonal design test					
方案	变形模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
1	6	0.21	1	40	0.1
2	6	0.24	2	45	0.3
3	6	0.27	3	50	0.5
4	6	0.30	4	55	0.7
5	8	0.21	2	50	0.7
6	8	0.24	1	55	0.5
7	8	0.27	4	40	0.3
8	8	0.30	3	45	0.1
9	12	0.21	3	55	0.3
10	12	0.24	4	50	0.1
11	12	0.27	1	45	0.7
12	12	0.30	2	40	0.5
13	14	0.21	4	45	0.5
14	14	0.24	3	40	0.7
15	14	0.27	2	55	0.1
16	14	0.30	1	50	0.3

波,以峰值 2 m/s² 输入第 2 节中的算例模型,求得开挖变形、震后边墙相对变形、震后拱顶-底板相对变形三个结果。16 组方案的结果如表 3 所列。

表 3 正交设计试验结果表

Table 3 The results of orthogonal design test			
方案	开挖 变形/cm	地震后	
		边墙相对变形/cm	拱顶-底板相对变形/cm
1	18.62	7.82	-4.86
2	18.62	0.86	-0.59
3	8.36	0.09	0.11
4	7.15	0.10	0.13
5	7.91	0.43	-0.28
6	6.07	0.58	-0.48
7	6.72	0.06	0.07
8	5.35	0.06	0.06
9	6.10	0.01	0.04
10	3.77	0.01	0.04
11	3.62	1.77	-1.24
12	6.87	0.88	-0.67
13	5.25	0.01	0.03
14	3.21	0.21	-0.21
15	3.31	0.06	-0.01
16	3.15	0.76	-0.62

在此处采用正交设计试验的目的为研究岩体各力学参数对隧道地震响应影响的主次顺序。下面将在正交试验设计中,采用直观分析法,对各因素的主次顺序进行研究,具体步骤为:

(1) 通过正交设计试验得到各个指标的结果值。

(2) 计算 Ki 值,表示任一列上水平号为 i 时对应的试验结果之和,计算出各个列中的 Ki ,列如表 4 中。

(3) 计算 ki 值, $ki=Ki/s$,其中 s 为任一列上各水平出现的次数,所以 ki 表示任一列上因素取水平 i 时所得试验结果的算术平均值,计算各列的 ki ,写入表 4 中。

(4) 计算极差值,在任何一列上 $R=\max\{ki\}-\min\{ki\}$ 。一般来说,各列的极差是不相等的,这说明各因素的水平改变对试验结果的影响是不相同的。

表 4 正交试验结果分析

Table 4 Analysis of the results of orthogonal design test						
指标		因素				
		变形模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
开挖变形 /cm	K1	52.75	37.88	31.46	35.42	31.05
	K2	26.05	31.67	36.71	32.84	34.59
	K3	20.36	22.01	23.02	23.19	26.55
	K4	14.92	22.52	22.89	22.63	21.99
	k1	13.187 5	9.47	7.865	8.855	7.762 5
	k2	6.512 5	7.917 5	9.177 5	8.21	8.647 5
	k3	5.09	5.502 5	5.755	5.797 5	6.637 5
	k4	3.73	5.63	5.722 5	5.657 5	5.497 5
	极差 R	9.457 5	3.967 5	3.455	3.197 5	3.15
	因素主→次	变形模量→泊松比→黏聚力→内摩擦角→抗拉强度				
边墙地震 相对变形 /cm	K1	8.87	8.27	10.93	8.97	7.95
	K2	1.13	1.66	2.23	2.7	1.69
	K3	2.67	1.98	0.37	1.29	1.56
	K4	1.04	1.8	0.18	0.75	2.36
	k1	2.217 5	2.067 5	2.732 5	2.242 5	1.987 5
	k2	0.282 5	0.415	0.557 5	0.675	0.422 5
	k3	0.667 5	0.495	0.092 5	0.322 5	0.39
	k4	0.26	0.45	0.045	0.187 5	0.59
	极差 R	1.957 5	1.652 5	2.687 5	2.055	1.597 5
	因素主→次	黏聚力→内摩擦角→变形模量→泊松比→抗拉强度				
顶拱-底板 地震相对 变形/cm	K1	-5.21	-5.07	-7.2	-5.67	-4.77
	K2	-0.63	-1.24	-1.55	-1.74	-1.1
	K3	-1.83	-1.07	0	-0.75	-1.01
	K4	-0.81	-1.1	0.27	-0.32	-1.4
	k1	-1.302 5	-1.267 5	-1.8	-1.417 5	-1.192 5
	k2	-0.157 5	-0.31	-0.387 5	-0.435	-0.275
	k3	-0.457 5	-0.267 5	0	-0.187 5	-0.252 5
	k4	-0.202 5	-0.275	0.067 5	-0.08	-0.35
	极差 R	1.145	1	1.867 5	1.337 5	0.94
	因素主→次	黏聚力→内摩擦角→变形模量→泊松比→抗拉强度				

(5) 排列因素的主次顺序,极差越大,表示该列因素的数值在试验范围内的变化会导致试验指标在数值上有更大的变化,所以极差最大的那一列就是因素的水平对试验结果影响最大的因素,也就是最主要因素。

根据本节的正交试验研究,除开挖变形指标的主要影响因素为变形模量外,岩体力学参数中对隧道地震响应最主要的影响因素为黏聚力及内摩擦角,即强度参数。

3 岩体的应力状态效应

对于岩体的应力效应对隧道地震响应的影响,研究结论并不一致。此处试图进行进一步的研究,得到较综合的结论,并得到应力效应各因素对隧道地震响应影响的主次顺序。

将岩体的应力状态参数概括为平面外侧压系数(洞轴向)、平面内侧压系数(垂直洞轴)和隧道埋深,代表三个方向的主应力。

由于因素个数较少,正交试验设计表头中难以找到合适的表头,如 $L_4(2^3)$ 正交表水平数过少,此处采用均匀设计方法,试图对这样较少的因素,可以计算较多的水平数。

均匀设计是一种只考虑试验点在试验范围内均匀散布的一种试验设计方法。与正交试验设计类似,均与设计也是通过一套精心设计的均匀表来安排试验的。其数学原理是数论中的一致分布理论,只考虑试验点在试验范围内的均匀分布,忽略整齐可比性。对于有 x 个因素,每个因素有 n 个水平的试验,其选取的试验点仅有 n 个,因此可以大幅度降低试验工作量,又能全面控制所有可能出现的试验组合。

按照均匀设计原则构造计算样本,根据区域地应力场,估算得到原型的地影响力。

以原型算例中岩体应力状态为基准,对每个参数取其可能的取值区间内的 5 个水平,如表 5 所列。由于参与试验的参数有 3 个,根据均匀试验原理,采用 $U_5(5^3)$ 均匀设计表,给出 5 组组合方案,列于表 6。

表 5 岩体力学效应的因素水平

Table 5 Factor levels of the rock mechanical effect			
参数水平	平面外侧压系数(洞轴向)	平面内侧压系数(垂直洞轴)	隧道埋深/m
原型的均值	1.6	0.6	50
1	0.4	0.4	10
2	0.7	0.7	20
3	1.0	1.0	30
4	1.3	1.3	40
5	1.6	1.6	50

表 6 均匀设计试验方案表

Table 6 Scheme of the uniform design test			
方案	平面外侧压系数(洞轴向)	平面内侧压系数(垂直洞轴)	隧道埋深/m
1	1.6	0.7	40
2	0.4	1.3	30
3	0.7	0.4	20
4	1.0	1.0	10
5	1.3	1.6	50

对于每一组试验数据,采用图 2 中的修正地震波,以峰值 2 m/s^2 输入第 2 节中的算例模型,求得开挖变形、地震后边墙相对变形、地震后拱顶-底板相对变形三个结果。5 组方案的结果如表 7 所列。

表 7 均匀设计试验结果表

Table 7 The results of uniform design test			
方案	开挖变形/cm	地震后	
		边墙相对变形/cm	拱顶-底板相对变形/cm
1	6.58	0.06	0.02
2	9.55	0.02	0.03
3	2.08	0.03	0.01
4	2.50	0.06	0.06
5	19.96	0.15	-0.04

与上节一样,在此处采用均匀设计试验的目的仍然为研究岩体各应力状态参数对隧道地震响应影响的主次顺序。下面将在均匀试验设计中,利用多元线性回归,得到多元线性回归方程,采用标准回归系数比较法来判断因素影响的主次顺序,具体步骤为:

(1) 通过多元线性回归,得到多元线性回归方程 $\hat{y}=a+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_mx_m$,其中 a 为常数, b_i 为 y 对 x_i 的偏回归系数;

(2) 对每个 x_i ,求得统计量 $L_{ii},L_{ii}=\sum_{j=1}^n(x_{ij}-\bar{x}_1)^2$;

(3) 对 y ,求得统计量 $L_{yy},L_{yy}=\sum_{j=1}^n(y_j-\bar{y})^2=S_T$;

(4) 计算 y 对因素 x_i 的标准回归系数 $b'_i,b'_i=|b_i|\sqrt{L_{ii}/L_{yy}}$;

(5) 根据标准回归系数判断因素影响的主次顺序, b'_i 越大,所对应的因素的 x_i 的影响就越大。

分析结果如表 8 所列。根据本节的均匀设计试验结果和标准回归系数比较,对于岩体应力状态参数中对隧道地震响应最敏感的影响因素为隧道埋深,其次分别为平面内侧压系数和平面外侧压系数。

表 8 正交试验结果分析

Table 8 Analysis of the results of uniform design test

方案		因素		
		平面外侧压系数(洞轴向)/	平面内侧压系数(垂直洞轴)/	隧道埋深/m
		x_1	x_2	x_3
开挖变形 /cm	多元线性 回归方程	$y_1 = -7.815\ 3 - 0.712\ 1x_1 + 8.213\ 5x_2 + 0.028\ 2x_3$ 总偏差平方和 S_T :212.667 12 回归平方和 S_R :204.158 377 8 残差平方和 S_e :8.732 869 244		
	标准回归系数	0.046 324 641	0.534 317 43	0.611 503 481
	因素主→次	隧道埋深→平面内侧压系数→平面外侧压系数		
边墙地震相 对变形/cm	多元线性 回归方程	$y_1 = -0.069\ 4 + 0.059\ 8x_1 + 0.067\ 3x_2 + 0.000\ 01x_3$ 总偏差平方和 S_T :0.010 499 923 回归平方和 S_R :0.007 753 162 残差平方和 S_e :0.002 392 127		
	标准回归系数	2.510 9E-05	2.825 82E-05	1.399 61E-06
	因素主→次	平面内侧压系数→平面外侧压系数→隧道埋深		
拱顶-底板 相对变形/cm	多元线性 回归方程	$y_1 = 0.055\ 7 + 0.019\ 4x_1 + 0.005\ 1x_2 - 0.000\ 2x_3$ 总偏差平方和 S_T :0.004 894 805 回归平方和 S_R :0.002 980 029 残差平方和 S_e :0.001 637 173		
	标准回归系数	8.145 74E-06	2.141 41E-06	2.799 22E-05
	因素主→次	隧道埋深→平面外侧压系数→平面内侧压系数		

4 节理的力学效应

对于节理力学效应对隧道地震响应的影响,目前也有一定的研究。也基本认为节理力学条件越好,隧道的地震稳定性越好,但对于节理各个力学参数的增减对地震响应的影响,研究同样尚少。故此处仍然使用正交试验设计,研究节理各个力学参数对隧道地震响应影响的主次顺序,以期获得一些参考性的结论。

将节理的力学效应概括为法向刚度、切向刚度、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度五个参数,为了按照正交设计原则构造计算样本,以隧道工程区域的层间错动带为原型,对每个参数取其可能的取值区间内的 4 个水平,如表 9 所列。由于参与试验的参数有五个,依据正交试验原理,采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表,给出了 16 组组合方案,列于表 10。

表 9 节理力学效应的因素水平

Table 9 Factor levels of the joint mechanical effect					
参数 水平	法向刚度 k_n /GPa	切向刚度 k_s /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
原型	0.5	0.25	0.04	15	0.03
1	0.2	0.1	0.01	5	0.01
2	0.5	0.2	0.03	10	0.03
3	0.8	0.3	0.05	15	0.05
4	1.1	0.4	0.07	20	0.07

对于第 2 节中的算例模型,加入一条节理作为此处的模型,如图 3 所示。对于每一组试验数据,采

用图 2 中的鲁甸地震波,以峰值 2 m/s^2 输入本节中的算例模型,求得开挖变形、地震后上游层间错动带出露部位的相对变形、地震后下游边墙层间错动带出露部位的相对变形三个结果。16 组方案的结果如表 11 所列。

表 10 正交设计试验方案表

Table 10 Scheme of the orthogonal design test					
方案	法向刚度 k_n /GPa	切向刚度 k_s /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
1	0.2	0.1	0.01	5	0.01
2	0.2	0.2	0.03	10	0.03
3	0.2	0.3	0.05	15	0.05
4	0.2	0.4	0.07	20	0.07
5	0.5	0.1	0.03	15	0.07
6	0.5	0.2	0.01	20	0.05
7	0.5	0.3	0.07	5	0.03
8	0.5	0.4	0.05	10	0.01
9	0.8	0.1	0.05	20	0.03
10	0.8	0.2	0.07	15	0.01
11	0.8	0.3	0.01	10	0.07
12	0.8	0.4	0.03	5	0.05
13	1.1	0.1	0.07	10	0.05
14	1.1	0.2	0.05	5	0.07
15	1.1	0.3	0.03	20	0.01
16	1.1	0.4	0.01	15	0.03

在此处采用正交设计试验的目的为研究岩体各力学参数对隧道地震响应影响的主次顺序。下面在正交试验设计中,采用直观分析法,对各因素的主次顺序进行研究,如表 12 所列。

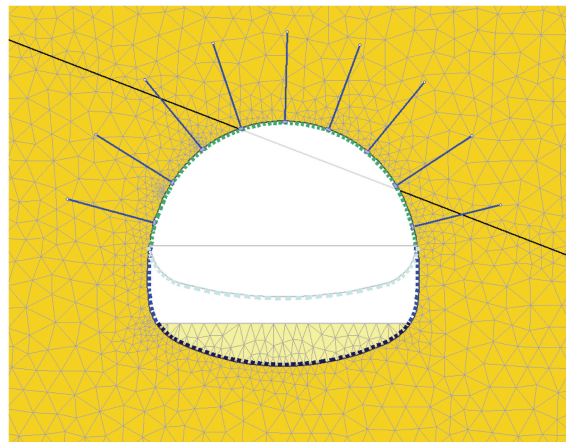


图 3 带一条节理的算例数值模型

Fig.3 The numerical model with a joint interface

根据本节的正交试验研究,可以认为节理力学参数中的摩擦角和抗拉强度为影响隧道地震响应的主要因素,其次为黏聚力、法向刚度、切向刚度。

表 11 正交设计结果表

Table 11 The results of orthogonal design test			
方案	开挖 变形/cm	地震后	
		顶拱层间错动带出露 部位的相对变形/cm	边墙层间错动带出露 部位的相对变形/cm
1	42.45	16.48	19.03
2	35.11	1.98	1.75
3	27.85	1.07	1.11
4	24.16	0.60	1.20
5	21.75	0.94	1.42
6	18.71	0.54	1.36
7	30.89	21.73	25.18
8	24.82	2.00	1.82
9	18.00	0.31	1.19
10	19.14	0.81	1.53
11	22.85	2.02	1.94
12	28.66	22.04	25.44
13	21.71	1.77	1.84
14	27.56	22.63	25.95
15	16.03	0.39	1.31
16	18.17	0.95	1.56

表 12 正交试验结果分析

Table 12 Analysis of the results of orthogonal design test						
指标	因素					
	法向刚度 k_n /GPa	切向刚度 k_s /GPa	黏聚力 /MPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa	
开挖变形 /cm	K1	129.57	103.91	102.18	129.55	102.43
	K2	96.17	100.52	101.56	104.49	102.17
	K3	88.65	97.61	98.22	86.91	96.92
	K4	83.46	95.81	95.90	76.89	84.79
	k_1	32.39	25.98	25.54	32.39	25.61
	k_2	24.04	25.13	25.39	26.12	25.54
	k_3	22.16	24.40	24.55	21.73	24.23
	k_4	20.87	23.95	23.97	19.22	21.20
	极差 R	11.53	2.02	1.57	13.16	4.41
	因素主→次	摩擦角→法向刚度→抗拉强度→切向刚度→黏聚力				
顶拱错动带 部位相对 变形/cm	K1	14 541.91	14 422.34	14 570.56	16 826.50	14 348.86
	K2	14 323.73	14 482.24	14 343.46	14 979.47	14 516.83
	K3	14 456.88	14 436.49	14 503.62	13 261.55	14 343.15
	K4	14 249.16	14 230.62	14 154.06	12 504.18	13 227.30
	k_1	3 635.48	3 605.59	3 642.64	4 206.63	3 587.22
	k_2	3 580.93	3 620.56	3 585.87	3 744.87	3 629.21
	k_3	3 614.22	3 609.12	3 625.90	3 315.39	3 585.79
	k_4	3 562.29	3 557.65	3 538.51	3 126.04	3 306.82
	极差 R	1.41	1.62	1.51	20.26	5.37
	因素主→次	摩擦角→抗拉强度→切向刚度→黏聚力→法向刚度				
边墙错动带 部位的相对 变形/cm	K1	23.08	23.47	23.90	95.61	23.69
	K2	29.78	30.58	29.91	7.35	29.68
	K3	30.10	29.54	30.07	5.61	29.74
	K4	30.65	30.03	29.75	5.05	5.87
	k_1	5.77	5.87	5.97	23.90	5.92
	k_2	7.44	7.64	7.48	1.84	7.42
	k_3	7.53	7.39	7.52	1.40	7.44
	k_4	7.66	7.51	7.44	1.26	1.47
	极差 R	1.89	1.78	1.54	22.64	5.97
	因素主→次	摩擦角→抗拉强度→法向刚度→切向刚度→黏聚力				

5 结论

本文以华丽高速工程中典型隧道工程为工程背景抽象为数值算例,基于正交设计及均匀设计等试验方法,分别研究地质条件因素中,岩体的力学效应、应力状态效应、结构面的力学效应对隧道的影响。获得研究结论如下:

- (1) 除开挖变形指标的主要影响因素为变形模量外,岩体力学参数中对地下洞室地震响应最主要的影响因素为黏聚力及内摩擦角,即强度参数。
- (2) 岩体应力状态参数中对地下洞室地震响应最主要的影响因素为洞室埋深,其次分别为平面内侧压系数和平面外侧压系数。
- (3) 节理力学参数中的摩擦角和抗拉强度为影响地下洞室地震响应的主要因素,其次为黏聚力、法向刚度、切向刚度。
- (4) 在后续研究中,将综合考虑岩体力学参数、地应力状态及结构面参数进行试验设计,进一步确认地质条件中的主控因素。

参考文献(References)

[1] 郭青春.水工地下厂房岩体隧洞地震反应的初步分析[D].大连:大连理工大学,2009.
GUO Qingchun.Seismic Response Primary Analysis on Underground Rock Tunnel for Hydropower Station [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.

[2] 张玉敏.大型地下洞室群地震响应特征研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2010.
ZHANG Yumin.Study on Response Characteristics of Large Underground Cavern Group under Earthquake [D]. Wuhan: Graduate School of the Chinese Academy of sciences(Institute of Rock and Soil Mechanics),2010.

[3] 赵宝友.大型岩体洞室地震响应及减震措施研究[D].大连:大连理工大学,2009.
ZHAO Baoyou.Research on Seismic Response and Seismic Resistance Measure for Large Rock Cavern under Earthquake Motion[D].Dalian:Dalian University of Technology,2009.

[4] 李海波,马行东,李俊如,等.地震荷载作用下地下岩体洞室位移特征的影响因素分析[J].岩土工程学报,2006,28(3):358-362.
LI Haibo,MA Xingdong,LI Junru,et al.Study on Influence Factors of Rock Cavern Displacement under Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(3):358-362.

[5] 林皋.地下结构抗震分析综述(上)[J].世界地震工程,1990,(2):1-10.
LIN Tao.Summary of Seismic Analysis of Underground Structures (Part I) [J].World Earthquake Engineering,1990,(2):1-10.

[6] 张丽华,陶连金,李晓霖.节理岩体地下洞室群的地震动力响应分析[J].世界地震工程,2002,18(2):158-162.
ZHANG Lihua,TAO Lianjin,LI Xiaolin.Dynamic Response Analysis of Large Underground Excavations in Jointed Rock [J].World Earthquake Engineering,2002,18(2):158-162.

[7] CHEN J C.Seismic Safety Analysis of Kukuan Underground Power Cavern[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2004,19(4-5):516.

[8] 李小军,卢滔.水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J].水力发电学报,2009,28(5):41-46.
LI Xiaojun,LU Tao.Explicit Finite Element Analysis of Earthquake Response for Underground Caverns of Hydropower Stations[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(5):41-46.

[9] 崔臻,盛谦,刘加进,等.基于小波包的地下洞室群地震响应及其频谱特性研究[J].岩土力学,2010,31(12):3901-3906.
CUI Zhen,SHENGQian,LIU Jiajin,et al.Spectrum Characteristics Analysis of Seismic Response for Underground Caverns Via Wavelet Packet[J].Rock and Soil Mechanics,2010,31(12):3901-3906.