

杨宝刚,李永庆,张玥,等.中小跨径桥梁座式桥台抗震性能参数敏感性分析[J].地震工程学报,2022,44(2):321-327.DOI:10.20000/j.1000-0844.20200908002
YANG Baogang, LI Yongqing, ZHANG Yue, et al. Sensitivity analysis for seismic performance parameters of seat abutment of small and medium span bridges[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(2): 321-327. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20200908002

中小跨径桥梁座式桥台抗震性能参数敏感性分析

杨宝刚¹, 李永庆², 张玥¹, 宋飞¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要:采用 pushover 分析方法研究中小跨径桥梁座式桥台构造参数对自身抗震性能的影响,基于前人研究成果和座式桥台统计数据,选取背墙箍筋间距、台帽水平拉筋间距、背墙厚度及主梁作用高度作为试验因素,进行 4 因素 3 水平的正交数值模拟试验,选取桥台的峰值位移、峰值荷载、平均刚度及位移延性系数 4 个指标作为反映其抗震性能的目标函数,通过极差分析得出各桥台构造参数对桥台抗震性能指标的敏感性。结果表明:对桥台的峰值荷载及平均刚度而言,背墙厚度对其影响最大、最敏感,背墙厚度的增大可使峰值荷载和平均刚度分别增大 29.8% 和 33.4%;对于桥台的峰值位移及位移延性,主梁作用高度和背墙箍筋间距对其影响较大,主梁作用高度和背墙箍筋间距的增大使桥台峰值位移变化幅度分别不超过 9.2% 和 11%,主梁作用高度和背墙箍筋间距的增大使桥台位移延性系数变化幅度分别不超过 10% 和 6.7%。

关键词:座式桥台; 正交试验; 敏感性; 背墙厚度

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)02-0321-07

DOI:10.20000/j.1000-0844.20200908002

Sensitivity analysis for seismic performance parameters of seat abutment of small and medium span bridges

YANG Baogang¹, LI Yongqing², ZHANG Yue¹, SONG Fei¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: The influence of structural parameters of seat abutment of small and medium span bridges on their seismic performance was studied by the pushover analysis method. The orthogonal numerical simulation test of four factors and three levels was carried out by selecting the stirrup spacing of abutment backwall, the horizontal bar spacing of abutment cap, the thickness of backwall, and the action height of main beam as the test factors. The peak displacement, peak load, average stiffness, and displacement ductility coefficient of the abutment were selected as

收稿日期:2020-09-08

基金项目:旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室(长安大学)开放基金(300102210513);陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2018-TD-040);陕西省教育厅专项科研计划项目-自然科学类(18JK0502)

第一作者简介:杨宝刚(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,主要从事桥梁抗震研究。E-mail:1749800733@qq.com。

通信作者:宋飞(1984—),男,河南漯河人,博士,讲师,主要从事桥梁抗震研究。E-mail:songfei-8864299@163.com。

the objective function to reflect the seismic performance. Through range analysis, the sensitivity of each parameter to seismic performance indexes of the abutment was obtained. The results showed that the thickness of backwall has the greatest influence on the peak load and average stiffness of abutment. With the increase of backwall thickness, the peak load and average stiffness increase by 29.8% and 33.4%, respectively. The action height of main beam and the stirrup spacing of backwall have a great impact on the peak displacement and displacement ductility of abutment. With the increase of action height of main beam and stirrup spacing of backwall, the variation of abutment peak displacement is not more than 9.2% and 11%, and the variation of abutment displacement ductility coefficient is not more than 10% and 6.7%.

Keywords: seat abutment; orthogonal test; sensitivity; thickness of backwall

0 引言

桥台作为衔接桥梁结构与公路工程的构筑物,是地震时桥梁结构中的薄弱环节^[1]。在历次地震中,桥台破坏凸显严重,其主要原因是桥台背墙与主梁发生碰撞引起台后填土失效,从而导致桥台发生滑移、倾斜等破坏。桥台的破坏不仅会导致自身丧失功能,而且还会诱发落梁、桥梁垮塌等严重震害。因此考虑上部结构—桥台—土体相互作用已成为桥梁抗震分析的趋势,自 20 世纪 90 年代开始,美国学者采用台帽与背墙分离的结构对上部结构—桥台—土体系统进行了一系列大尺寸拟静力试验与理论研究^[2-4],基于这些研究成果,CALTRANS 抗震设计标准将背墙纵向挤压回填土的力-位移关系进行双折线简化。随后许多学者^[5-9]在进行桥梁整体抗震分析时,采用 CALTRANS 抗震设计标准^[10]中反映台后填土力学性能的非线性弹簧来模拟上部结构—桥台—土体相互作用。

然而以上研究大部分所采用模拟桥台的方法忽视了桥台自身强度的贡献,刘洋^[11]初步探索桥台强

度对连续梁桥抗震分析的影响,发现考虑桥台强度和不考虑桥台强度对主梁位移及桥墩位移延性影响较大,并建议在桥梁抗震分析时考虑桥台强度。CALTRANS 标准将桥台分为整体式桥台和座式桥台,其中座式桥台在我国应用较为广泛,本文以某中小跨径梁桥的座式桥台为背景,采用正交数值模拟试验方法,选取峰值位移、峰值荷载、平均刚度以及位移延性系数作为桥台抗震性能评价指标,研究桥台构造参数变化对桥台的抗震性能影响规律,为后期的桥台抗震研究提供参考。

1 工程背景

本文以某 3 跨连续梁桥为依据,桥跨布置为 3×30 m。上部结构由 4 片小箱梁组成,桥梁宽度布置为净-15+2×0.5 m 护轮带;桥梁下部结构采用柱式墩;两侧均为座式桥台。两侧桥台上部结构构造基本相同,图 1 为一侧桥台构造图,图 2 是桥台配筋图。两侧桥台采用 C30 混凝土,HRB335 钢筋,

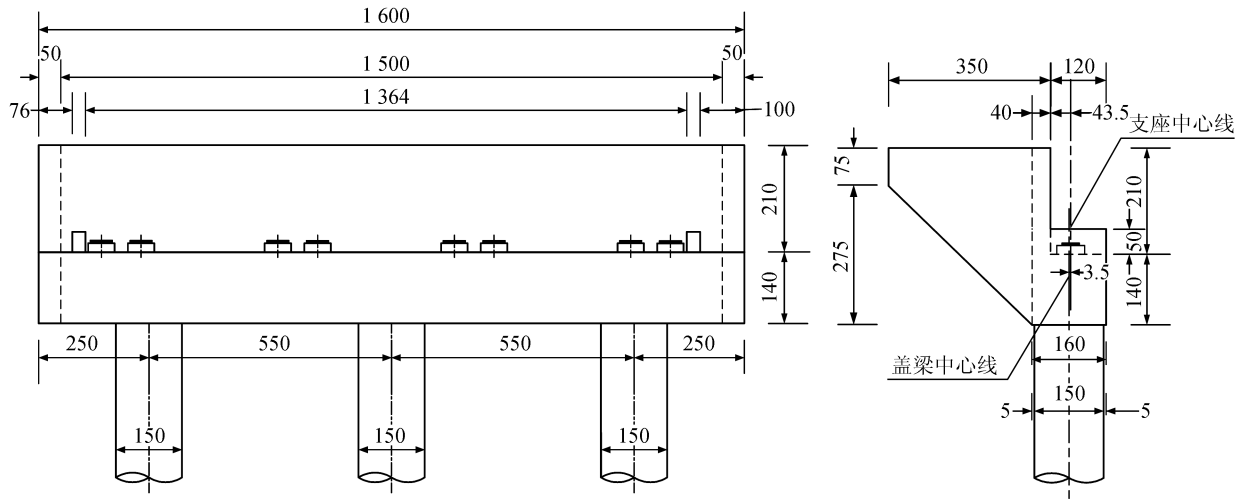
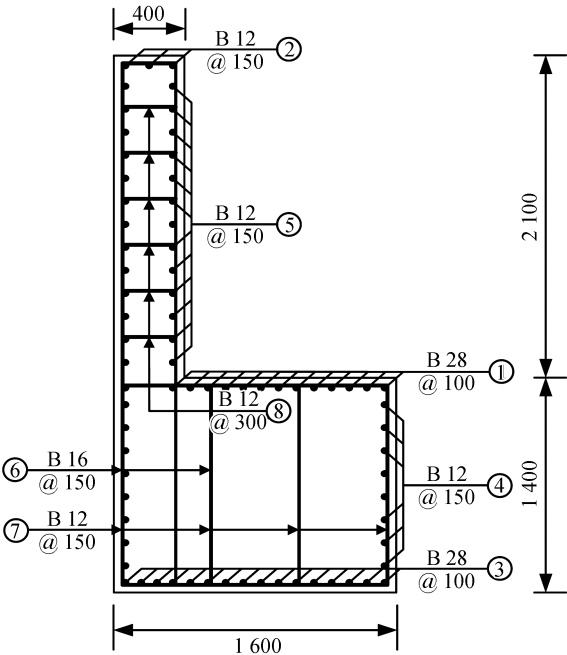


图 1 座式桥台构造图(单位:cm)
Fig.1 Structure of seat abutment (Unit:cm)



注:⑥背墙箍筋⑦台帽水平拉筋
图 2 桥台钢筋布置(单位:mm)
Fig.2 Abutment steel layout (Unit:mm)

台后回填透水性好的砂土,压实度大于 95%。

2 有限元模型

本文采用 ABAQUS 软件对座式桥台进行有限元建模分析,钢筋均采用两结点线性三维桁架单元(T3D2),混凝土和回填土采用八结点线性六面体减缩积分单元(C3D8R)。钢筋本构关系为理想双线性模型,混凝土应用塑性损伤模型,塑性参数指标分别设置为膨胀角 30°,偏心率 0.1, f_{b0}/f_{c0} 为 1.16, K 为 0.667,黏聚系数为 0.005。钢筋及混凝土的其他材料参数按照《混凝土结构设计规范》^[12] 中相关规定选取,如表 1 所列。回填土选用莫尔-库仑模型,其参数采用 Bozorgzadeh 的回填土试验数据^[13],满足 CALTRANS 抗震设计标准^[10],详情列于表 2。

表 1 混凝土及钢筋参数

Table 1 Parameters of concrete and steel				
名称	密度 γ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 E /MPa	泊松比 ν	屈服强度 f_{yk} /MPa
C30	2 390	3×10^4	0.2	/
HRB335	7 850	2×10^5	0.3	335

表 2 回填土参数

Table 2 Parameters of backfill soil						
回填土 类型	密度 γ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 E /MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\Phi/(^\circ)$	膨胀角 $\Phi_f/(^\circ)$	黏聚力 C/kPa
砂土	1 936	34.2	0.3	34.5	30	28.7

桥台由背墙、耳墙、台帽和基础四部分组成,桥台基础和台帽的强度和刚度较大,地震作用下一般不会发生破坏且变形很小^[14],强度较低的耳墙对桥台—主梁纵桥向作用下贡献小^[13],因此本文将桥台按照图 3 简化处理。

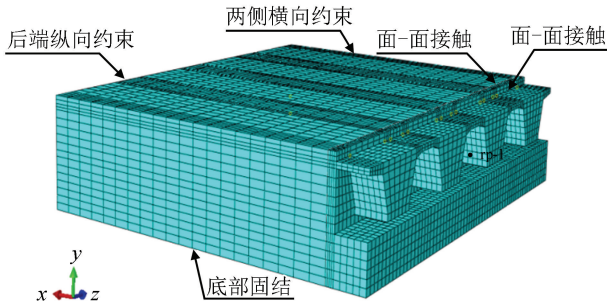


图 3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

为了真实反映桥台构造参数对其抗震性能的影响,建立全尺寸有限元模型,约束条件为桥台底部和台后填土底部施加全部约束,台后填土后端约束纵桥向位移,模型两侧约束横桥向变形,回填土与背墙

间、主梁与背墙间均采用面-面接触模拟上部结构-桥台-土体的相互作用。

采用 pushover 分析方法研究桥台抗震性能,对主梁表面形心 rp-1 进行位移控制,沿纵桥向缓慢加载,直至峰值荷载下降 10% 为止^[15]。

3 正交数值试验设计

桥台构造参数对桥台抗震性能的敏感性分析体系为多因素共同作用的体系,本文选用正交试验设计法,对该体系进行多因素敏感性分析。根据该桥台原有的设计参数,并结合刘洋^[11]及后续 40 座中小跨径桥梁座式桥台的统计数据,发现各钢筋直径基本不变,间距波动较大。本文借鉴 Megally 等^[16]的研究成果,选取背墙箍筋间距(S_w)、台帽水平拉筋间距(S_a)、背墙厚度(b)以及主梁作用高度(主梁底部到台帽顶面的距离 h)作为正交试验的影响因素进行参数分析。将每个影响因素分为 3 个水平,选用 L9(3⁴)正交表,需进行 9 次数值分析试验,各因素水平及正交数值模拟试验方案分别列于表 3、表 4。

表 3 因素水平表

Table 3 Factor and level				
水平号	S_w/cm	S_a/cm	b/cm	h/cm
A	10	10	30	20
B	15	15	40	25
C	20	20	50	30

表 4 正交数值模拟试验方案

Table 4 Scheme of orthogonal numerical simulation test				
试验编号	S_w/cm	S_a/cm	b/cm	h/cm
1	10	10	30	20
2	10	15	40	25
3	10	20	50	30
4	15	10	40	30
5	15	15	50	20
6	15	20	30	25
7	20	10	50	25
8	20	15	30	30
9	20	20	40	20

4 参数敏感性分析

各个数值试验下主梁 rp-1 的力-位移骨架曲线如图 4 所示。为了能反映各构造设计参数变化对桥台抗震性能的影响程度,本文选取峰值位移、峰值荷载、平均刚度、位移延性系数 4 个指标为目标函数,以极差分析结果来表示桥台构造设计参数变化对各目标函数的敏感性。峰值荷载是桥台进行 push-over 静力分析过程中,所达到的最大荷载 f_{ult} ;峰值位移为峰值荷载所对应的位移 y_{max} ;平均刚度是过原点及 50%峰值荷载点的割线刚度 K_{50} ^[17];位移延性系数为峰值位移 y_{max} 与 50%峰值荷载点对应的位移 y_{50} 的比值 u ,详细情况见图 4。

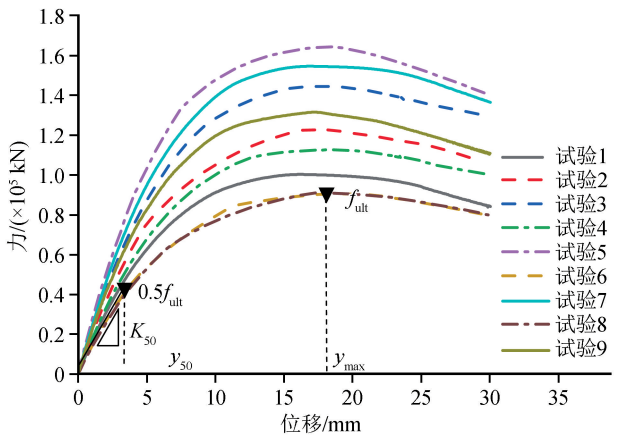


图 4 各个数值试验下桥台的力-位移骨架曲线
Fig.4 Force-displacement skeleton curves of abutment under various numerical tests

4.1 峰值位移影响

对峰值位移进行影响因素敏感性分析,表 5 为

峰值位移各影响因素分析结果,图 5 为各因素敏感程度数值对比图,图 6 为峰值位移与各影响因素的关系。

表 5 峰值位移影响因素分析结果(单位:mm)

Table 5 Analysis results of the factors affecting the peak displacement (Unit:mm)				
因素	S_w	S_a	b	h
K_A	52.56	54.43	54.51	51.88
K_B	58.33	55.38	54.62	53.49
K_C	52.90	53.98	54.66	58.42
k_A	17.520	18.143	18.170	17.293
k_B	19.443	18.460	18.207	17.830
k_C	17.633	17.993	18.220	19.473
R_i	1.923	0.467	0.050	2.180

注: K_i 表示各因素在第 i 水平下计算结果之和; k_i 表示各因素在第 i 水平下计算结果均值; R_i 表示各因素在不同水平下计算结果的极差。

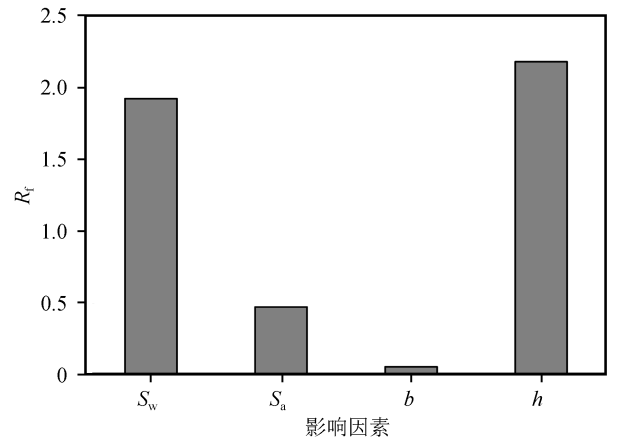


图 5 峰值位移影响因素敏感程度对比
Fig.5 Sensitivity comparison of influencing factors of peak displacement

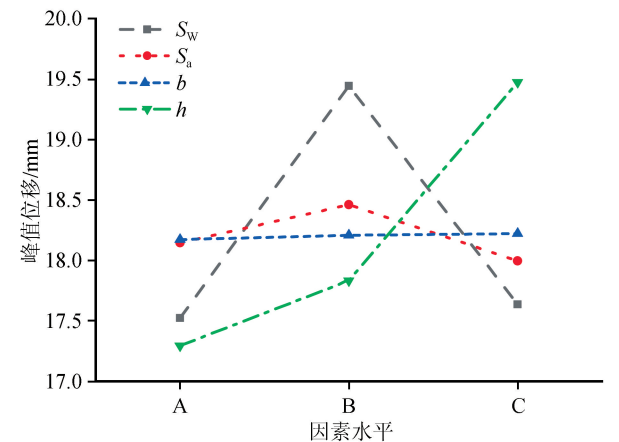


图 6 峰值位移与影响因素的关系
Fig.6 Relationship between the peak displacement and the influencing factors

根据峰值位移影响因素敏感性分析结果,主梁

作用高度对桥台峰值位移影响最大,随着主梁作用高度的增大,峰值位移呈递增趋势,最大增加了 9.2%;其次是背墙箍筋间距和台帽水平拉筋间距,由于多影响因素耦合,随着间距增大,峰值位移均呈先递增后递减的趋势,背墙箍筋间距增大使峰值位移变化值最大不超过 11%,台帽水平拉筋间距增大使峰值位移变化值不超过 2.6%;背墙厚度影响最小,峰值位移在数值上相差不大,不超过 0.3%。

4.2 峰值荷载影响

对峰值荷载进行影响因素敏感性分析,表 6 为峰值荷载各影响因素分析结果,图 7 为各因素敏感度数值的对比图,图 8 为峰值荷载与各影响因素的关系。

表 6 峰值荷载影响因素分析结果 (×10⁵ kN)

Table 6 Analysis results of the factors affecting the peak load (×10⁵ kN)

因素	S_w	S_a	b	h
K_A	3.67	3.66	2.82	3.95
K_B	3.67	3.78	3.66	3.68
K_C	3.76	3.66	4.62	3.47
k_A	1.223	1.220	0.940	1.317
k_B	1.223	1.260	1.220	1.227
k_C	1.253	1.220	1.540	1.157
R_f	0.030	0.040	0.600	0.160

注:同表 5。

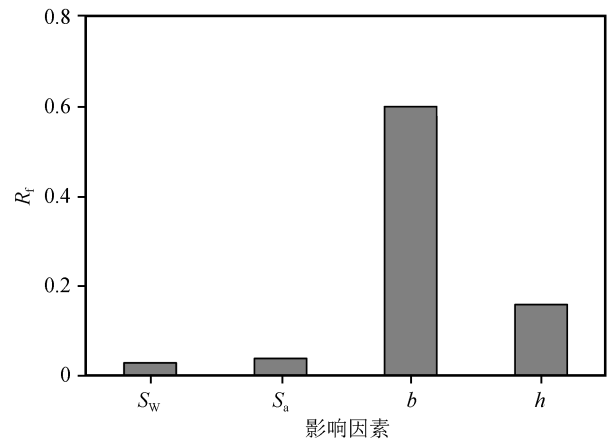


图 7 峰值荷载影响因素敏感度数对比

Fig.7 Sensitivity comparison of influencing factors of peak load

根据峰值荷载影响因素敏感性分析结果,背墙厚度对桥台峰值荷载影响最大,随着背墙厚度的增大,峰值荷载呈递增趋势,最大增加了 29.8%;其次是主梁作用高度,随着主梁作用高度增大,峰值位移呈递减的趋势,最大减小了 6.8%;由于多影响因素耦合,随着台帽水平拉筋间距增大,峰值荷载呈先增大后减小趋势,数值上相差不超过 3.3%;背墙箍筋间距对峰

值荷载影响最小,峰值荷载变化不超过 2.5%。

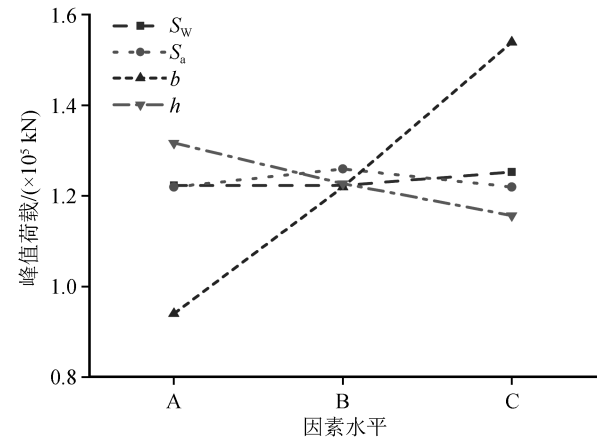


图 8 峰值荷载与影响因素的关系

Fig.8 Relationship between the peak load and the influencing factors

4.3 平均刚度影响

对平均刚度进行影响因素敏感性分析,表 7 为平均刚度各影响因素分析结果,图 9 为各因素敏感度数值的对比图,图 10 为平均刚度与各影响因素的关系。

表 7 平均刚度影响因素分析结果 (×10⁴ kN/mm)

Table 7 Analysis results of the factors affecting the average stiffness (×10⁴ kN/mm)

因素	S_w	S_a	b	h
K_A	4.85	4.83	3.65	5.41
K_B	4.85	5.01	4.87	4.82
K_C	4.96	4.82	6.14	4.43
k_A	1.617	1.610	1.217	1.803
k_B	1.617	1.670	1.623	1.607
k_C	1.653	1.607	2.047	1.477
R_f	0.037	0.063	0.830	0.327

注:同表 5。

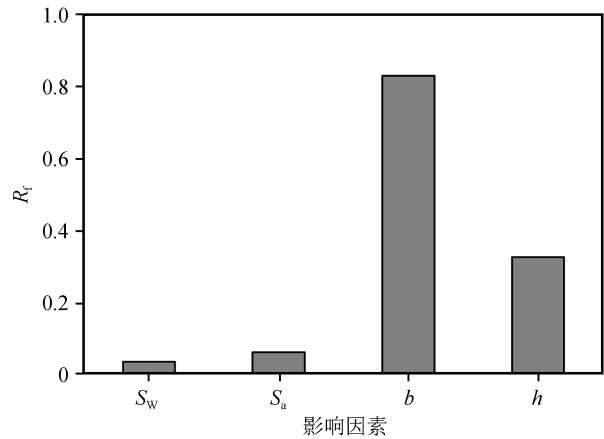


图 9 平均刚度影响因素敏感度数对比

Fig.10 Sensitivity comparison of influencing factors of average stiffness

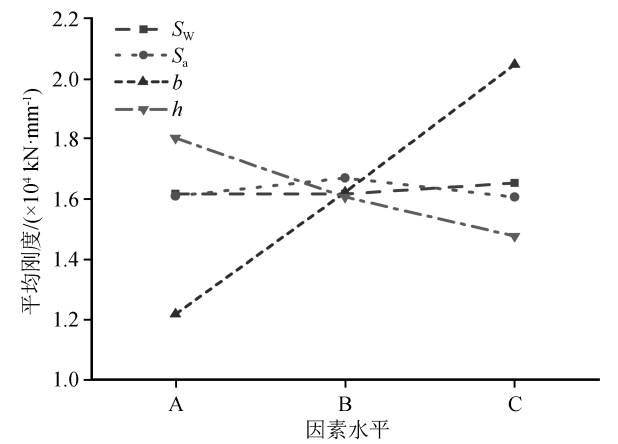


图 10 平均刚度与影响因素的关系

Fig.10 Relationship between the average stiffness and the influencing factors

根据平均刚度影响因素敏感性分析结果,背墙厚度对桥台平均刚度影响最大,随着背墙厚度的增大,平均刚度呈递增趋势,最大增加了 33.36%;其次是主梁作用高度,随着主梁作用高度增大,平均刚度呈递减的趋势,最大减小了 10.9%;由于多影响因素耦合,随着台帽拉筋间距增大,平均刚度呈先递增后递减的趋势,数值上相差不超过 3.8%;背墙箍筋间距对平均刚度影响最小,平均刚度变化不超过2.3%。

4.4 位移延性系数影响

对位移延性系数进行影响因素敏感性分析,表 8 为位移延性系数各影响因素分析结果,图 11 为各因素敏感度数值对比图,图 12 为位移延性系数与各影响因素的关系。

表 8 位移延性系数影响因素分析结果

Table 8 Analysis results of the factors affecting the displacement ductility ratio

因素	S_w	S_a	b	h
K_A	13.91	14.36	14.04	14.19
K_B	15.31	14.51	14.49	13.95
K_C	13.81	14.16	14.50	14.89
k_A	4.637	4.787	4.680	4.730
k_B	5.103	4.837	4.830	4.650
k_C	4.603	4.720	4.833	4.963
R_f	0.500	0.117	0.153	0.313

注:同表 5。

根据位移延性系数影响因素敏感性分析结果,背墙箍筋间距对桥台位移延性系数影响最大,其次是主梁作用高度。由于多种影响因素耦合,背墙箍筋间距和主梁作用高度的变化使桥台位移延性系数均呈现不单调趋势。随着箍筋间距的增大,位移延性系数呈先递增后递减的趋势,变化幅度不超过 10%;随着主梁作用高度增大,位移延性系数呈先递

增后递减的趋势,最大变化幅度为 6.7%;随着背墙厚度增大,位移延性系数呈递增趋势,数值上相差不超过 3.2%;台帽水平拉筋间距对位移延性系数影响最小,位移延性系数变化不超过 2.5%。

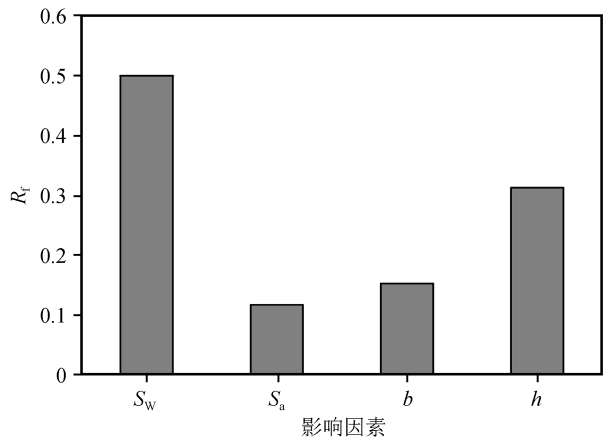


图 11 位移延性系数影响因素敏感度对比

Fig.11 Sensitivity comparison of influencing factors of displacement ductility coefficient

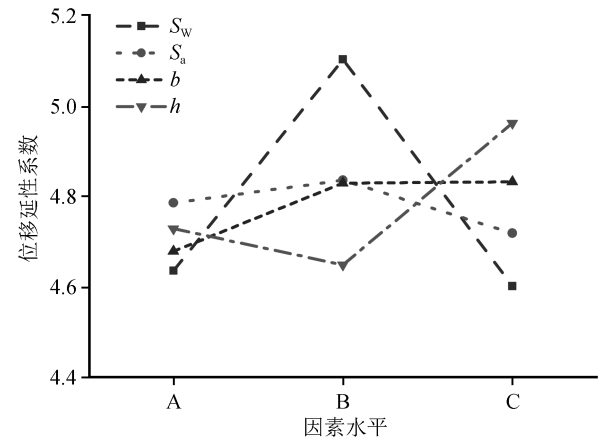


图 12 位移延性系数与影响因素的关系

Fig.12 Relationship between the displacement ductility ratio and the influencing factors

5 结论

本文基于某座 3×30 m 跨径桥桥台,并结合 40 多座中小跨径的座式桥台构造设计参数统计结果,建立座式桥台简化模型,进行 pushover 分析,采用正交数值试验方法研究了桥台上部结构参数变化对桥台抗震性能指标的影响规律及敏感性,得到以下结论:

(1) 对桥台峰值荷载和平均刚度影响最大、最敏感的构造参数是背墙厚度。随着背墙厚度的增加,峰值荷载和平均刚度最大分别增大 29.8%和 33.4%,适当增加背墙厚度对于桥台刚度的提高有

着重要意义;

(2) 主梁作用高度和背墙箍筋间距对桥台峰值位移及位移延性有着较大影响。主梁作用高度的增大使桥台峰值位移最大增加 9.2%,背墙箍筋间距的增大使峰值位移变化幅度不超过 11%。主梁作用高度和背墙箍筋间距的增大使桥台位移延性系数变化幅度分别不超过 10% 和 6.7%,可以结合桥台刚度的实际需求,适当增大主梁作用高度及背墙箍筋间距,提高桥台延性;

(3) 本论文在对桥台抗震性能进行参数敏感性分析时,采用 pushover 分析方法对桥台进行建模分析,尚未进行考虑主梁撞击的动力分析。随着此课题的深入研究,这些工作会进一步展开。

参考文献(References)

- [1] 焦驰宇,鲁子明,龙佩恒,等.桥台-土-结构相互作用对桥梁结构地震反应影响的研究进展[J].工程抗震与加固改造,2016,38(6):1-8,31.
JIAO Chiyu, LU Ziming, LONG Peiheng, et al. Advanced researches on the influences of abutment-soil-structure interaction on the seismic response of bridges[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(6):1-8, 31.
- [2] SWEET J, MORRILL N. Nonlinear soil-structure interaction simulation of the painter street overcrossing[C]// Proceedings of the Second Annual Caltrans Seismic Research Workshop, Sacramento, CA, 1993:16-18.
- [3] MARONEY B H. Large scale abutment tests to determine stiffness and ultimate strength under seismic loading[D]. Davis: University of California, 1995.
- [4] AVIRAM A, MACKIE K R, STOJADINOVIC B. Effect of abutment modeling on the seismic response of bridge structures[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4):395-402.
- [5] SHAMSABADI A, KAPUSKAR M. Nonlinear soil-abutment-foundation-structure interaction analysis of skewed bridges subjected to near-field ground motions[J].Transportation Research Record, 2010, 2202(1):192-205.
- [6] 王翼,李建中.台后填土与主梁的相互作用对梁桥纵向地震反应的影响[J].结构工程师,2015,31(5):71-76.
WANG Yi, LI Jianzhong. Influence of the interaction between abutment backfill and girder on the longitudinal seismic responses of a girder bridge[J].Structural Engineers, 2015, 31(5):71-76.
- [7] 焦驰宇,鲁子明,龙佩恒,等.考虑土-桥台-上部结构相互作用的曲线桥抗震性能研究[J].振动与冲击,2018,37(8):99-106.
JIAO Chiyu, LU Ziming, LONG Peiheng, et al. Study on seis-

mic behavior of curved bridge considering soil-abutment-superstructure interaction[J].Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8):99-106.

- [8] 陶源,徐略勤,姚凯,等.考虑双向碰撞效应的连续斜交桥地震响应研究[J].地震工程学报,2019,41(2):360-369.
TAO Yuan, XU Lueqin, YAO Kai, et al. Seismic response of continuous skewed bridges considering the bidirectional pounding effect[J].China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):360-369.
- [9] 王荣霞,曹宏琨,刘思琦.强震作用下桥台对斜交连续梁桥抗震性能的影响研究[J].地震工程与工程振动,2020,40(1):88-102.
WANG Rongxia, CAO Hongkun, LIU Siqu. Study on the influence of abutment on seismic performance of skew continuous girder bridge under strong ground motion[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(1):88-102.
- [10] CALTRANS. Seismic design criteria version 1.7[S]. California: California Department of Transportation, 2013.
- [11] 刘洋.桥台背墙对桥梁地震反应的影响[D].西安:西安科技大学,2019.
LIU Yang. Effect of back wall of abutment on seismic response of bridge[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [12] 混凝土结构设计规范:GB 510010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Specification for design of concrete structures: GB 510010—2010[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [13] BOZORGZADEH A. Effect of structure backfill on stiffness and capacity of bridge abutments[D]. San Diego University of San Diego, 2007.
- [14] 孙治国,王东升,张蓓.高原大桥桥台地震破坏机理与抗震措施分析[J].地震工程与工程振动,2012,32(4):79-87.
SUN Zhiguo, WANG Dongshen, ZHANG Bei. Analysis of seismic failure mechanism and earthquake resistant measures for the abutments of Gaoyuan bridge[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012, 32(4):79-87.
- [15] 宋飞,李建中.桥台模拟方法对连续梁桥地震反应的影响[J].结构工程师,2016,32(1):85-91.
SONG Fei, LI Jianzhong. Effect of abutment modeling on the seismic response of continuous bridges[J].Structural Engineers, 2016, 32(1):85-91.
- [16] MEGALLY S H, SILVA P F, SEIBLE F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutments; Structural Systems Research Report SSRP-2001/23[R]. California: USA. Department of Structural Engineering, University of California, 2001.
- [17] SHAMSABADI A, ROLLINS K M, KAPUSKAR M. Nonlinear soil-abutment-bridge structure interaction for seismic performance-based design[J].Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2007, 133(6):707-720.