

纵向墩高差对桥梁抗震响应的影响研究

王强, 张亚州

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430052)

摘要:为提高西部山区桥梁安全性,研究纵向桥墩高差对结构的抗震响应规律。首先明确研究案例,并根据实际工程需求和推广拓展,选择标准跨径下的简支和连续结构为研究对象;然后通过连续改变某一跨的墩高来研究结构在横向、纵向地震作用下的响应规律;最后对得出的结构响应,采用简化弯矩曲率关系判断结构的安全性高低。结果表明:高墩弯矩和轴力受低墩高度影响较小;低墩弯矩呈现二次曲线变化形式,且峰值出现在等高墩之前,低墩轴力为增加自重和增加惯性力的耦合作用结果,呈现非一致增长;当纵向墩高差在5 m范围内时应特别注意低墩在横、纵向地震作用下的地震响应。

关键词:桥梁工程;山区桥梁;纵向高低墩;地震响应

中图分类号: U443.2 **文献标志码:** A

随着中国交通建设的发展,越来越多的公路建设项目在西部展开。不同于中东部地形和地质条件,桥梁设计、建设者在西部公路项目中遇到的首要问题是对其崎岖的山区地形、高烈度地震强度的处理^[1]。为适应起伏高差大的地形,桥梁在布孔时会出现较多的高低墩配合的情况,同一孔或同一联的纵向桥墩高差可能达到十几米甚至几十米,这样的情况在承载力等静力工况验算中与等高墩差别不大,但是在地震荷载下,由于纵向刚度的不协调,可能会对桥梁安全产生较大的影响^[2-3]。因此通过研究墩高差对结构响应的影响规律,可以为结构形式选择、桥墩直径选择以及配筋提供指导,不仅将提高结构在地震荷载下的安全性,同时通过合理配筋和墩径的选择,也可以一定程度上提高工程经济性。

目前对变截面刚构桥的高低墩地震响应研究较多^[4-8],有学者对常规结构横向特性、横向地震作用进行了研究^[9-11]。但是目前的研究主要集中在单一桥梁案例,对经验的推广贡献有限;另一方面,目前对大跨、特殊结构的研究较多,但是在西部交通建设中,应用最广、在工程造价中占比最高的仍然是30 m、40 m标准跨的组合,因此标准跨径下墩高差对地震响应的影响规律研究尤为重要^[12]。

基于以上原因和目的,该文以标准跨径为案例,研究纵向墩高差对桥梁下部结构弯矩、轴力的影响规律。同时为扩展研究结果的适用范围,分别研究结构简支和结构连续两种情况,以期为西部交通建设的前期结

构拟定和配筋提供参考。

1 工程概况

某西部山区公路项目,全线需要跨越峡谷、河流,地形起伏较大。综合经济、环境、施工技术等因素,桥梁采用30 m、40 m标准跨径。

根据地震区划图和地震安评报告,全线场地特征周期为0.45 s,设防烈度为8度。按照JTG/T B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》,桥梁为B类桥梁。地震设防参数值如表1所示,反应谱曲线见图1。根据反应谱人工拟合3条地震波,选择其中一条如图2所示。

表1 地震动参数

地震作用	T_g/s	C_i	C_s	C_d	A/g	S_{max}/g
E1 ($P_{100}=63\%$)	0.40	0.5	0.9	1.0	0.252	0.255
E2 ($P_{100}=5\%$)	0.45	1.7	0.9	1.0	0.259	0.892

注: T_g 为特征周期; C_i 为抗震重要性系数; C_s 为场地系数; C_d 为阻尼调整系数; A 为水平向基本地震动峰值加速度; S_{max} 为设计加速度反应谱最大值。

2 结构有限元模型

该文以全线应用最广且具有一定代表性的30 m

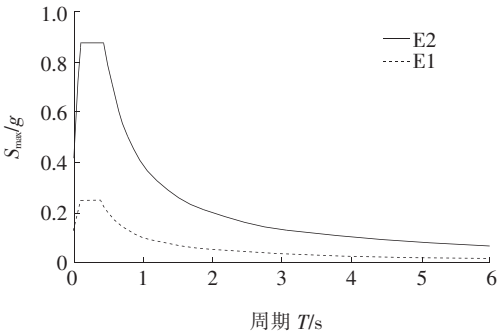


图1 E1、E2反应谱曲线

跨径为研究对象,分别研究桥梁结构连续(3×30 m)和结构简支[(30+30+30) m]两种情况。采用 Midas/Civil 建立全桥结构动力有限元模型。

主梁、桥墩和桩基采用六自由度梁单元模拟,采用

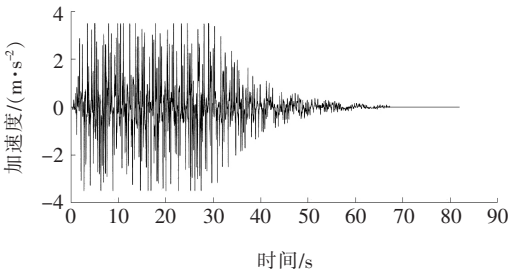


图2 根据反应谱拟合的 E2 地震时程曲线

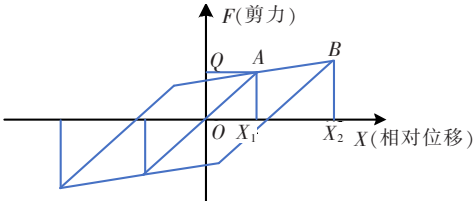
对桩节点施加土弹簧的方式模拟桩土相互作用。采用 Spring 单元模拟结构的减隔震支座,支座参数如表 2 所示。

该减隔震支座的恢复力模型为双折线模型^[13],如图 3 所示。

全桥结构三维有限元模型如图 4 所示。

表2 高阻尼减隔震支座参数(支座型号:HDR(D)320×420×177-G1.0)

承载力/ kN	支座高 度/mm	铅芯屈服 力/kN	剪切弹性 模量/MPa	刚度/(kN·mm ⁻¹)			等效阻 尼比/%
				屈服前	屈服后	水平等效	
1 360	177	62	1.2	8.28	1.27	1.7	15



注:Q 为铅芯屈服力,OA 斜率为屈服前刚度,AB 斜率为屈服后刚度。

图3 减隔震支座恢复力模型^[13]

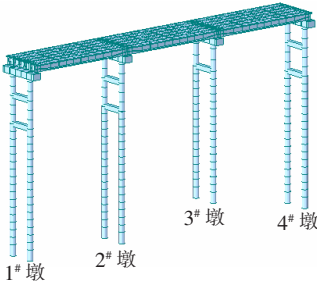


图4 全桥三维有限元模型

其中,简支结构的支座区域局部信息如图 5 所示,连续结构的支座区域局部信息如图 6 所示。图中 111111 为刚性连接,主梁通过刚性连接与支座顶端节点相连,支座底端节点与盖梁上相应位置刚结。

3 纵向高差对结构响应的影响

建立完三维有限元模型后,通过对模型施加地震

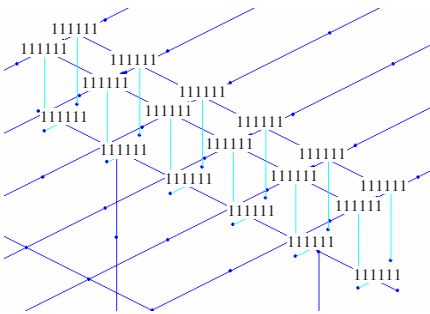


图5 简支结构支座区域局部示意图

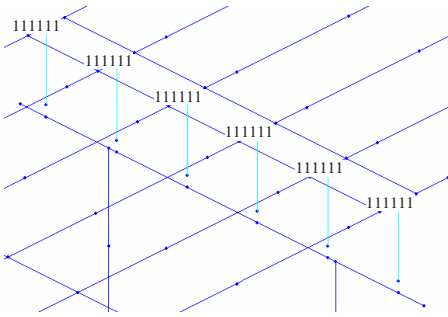


图6 连续结构支座区域局部示意图

荷载,计算结构的内力、位移响应。该文采用与实际情况吻合度更好的非线性直接积分法进行计算。在计算过程中,由于采用瑞利阻尼,因此首先需要计算结构的自振特性,并据此计算相应阻尼比。

3.1 对简支结构的影响

在(30+30+30) m的简支有限元模型中,通过固定其中部分墩高,逐渐改变相邻桥墩的高度来研究不同墩高差的地震响应规律。该文中固定1[#]、2[#]和4[#]桥墩的墩高为15 m,3[#]墩的高度由0 m逐渐增加到15 m。

桥墩在纵向地震作用下的纵向轴力和弯矩响应分别如图7、8所示。

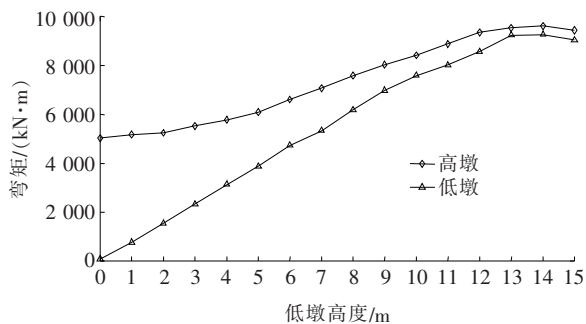


图7 纵向地震作用下高低墩桥梁弯矩

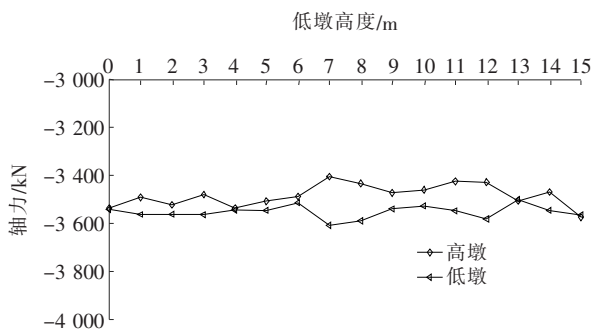


图8 纵向地震作用下高低墩桥梁轴力

从图7、8可以看出:①随着低墩高度的增加,高墩和低墩的弯矩值均有明显增加,且低墩的增加速度较快。低墩随着墩高的增加,在前期呈直线形增加,当墩高增加到13 m时,弯矩开始下降。高墩在前期增加不大,在低墩高度增加到10 m时,高、低墩的增加幅值相近,且同样在低墩高度增加到13 m时开始下降;②随着低墩高度的增加,高墩和低墩的轴力变化较小,且并无一定趋势。随着低墩高度的增加,低墩底部轴力因增加墩高轴力有所增加,但由于纵向地震作用下,结构因惯性力产生向上的轴力,两者的大小相近,且方向相反。

桥墩在横向地震力作用下的横向轴力和弯矩响应分别如图9、10所示。

从图9、10可以看出:高墩的弯矩和轴力受低墩高度变化影响较小。而低墩的弯矩在最开始的1 m范围内随着墩高的增加呈下降趋势,之后随着墩高的增

加呈直线趋势上升。同样地,低墩的轴力并未因墩高的增加呈增加趋势,这与纵向轴力变化趋势及产生的原因一致。

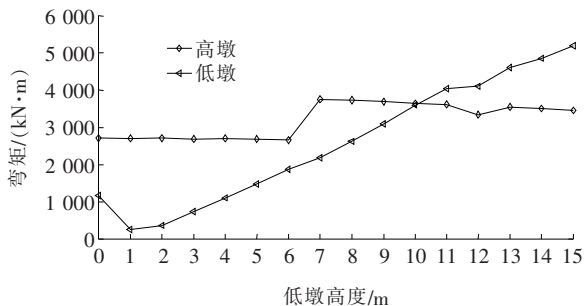


图9 横向地震作用下高低墩桥梁弯矩

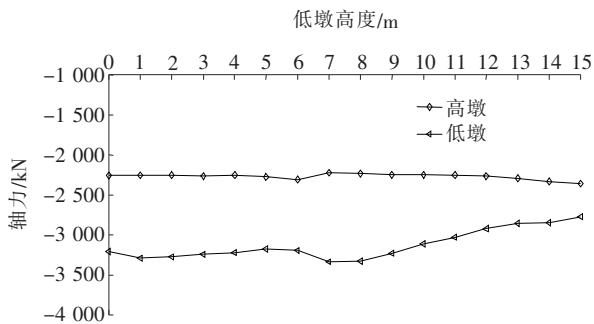


图10 横向地震作用下高低墩桥梁轴力

3.2 对连续结构的影响

为扩大研究结论的适用范围,研究了3×30 m一联的结构在地震作用下的响应规律。研究方式同简支桥,仅将原有简支结构调整为连续结构。

桥墩在纵向地震作用下的纵向弯矩和轴力响应分别如图11、12所示。

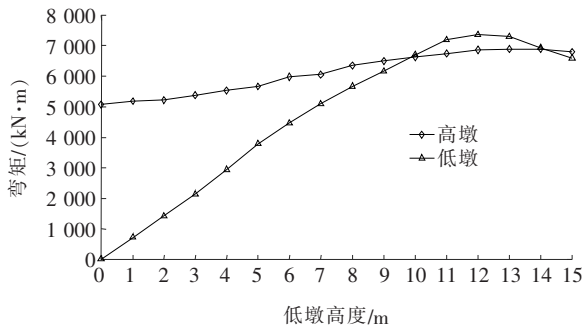


图11 纵向地震作用下高低墩桥梁弯矩

由图11、12可知:与简支结构类似,随着低墩高度的增加,低墩呈现更加明显的上升—下降趋势,而高墩则呈现缓慢上升的趋势,并未出现下降段;高墩的轴力仍然不受低墩高度变化的影响,与简支结构不同,随着低墩高度的增加,低墩的轴力变化更加平缓,且呈现较

为明显的二次抛物线趋势,但变化幅值不大。

桥墩在横向地震作用下的纵向弯矩和轴力响应分别如图 13、14 所示。

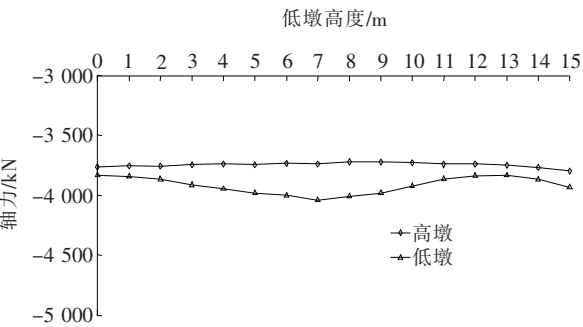


图 12 纵向地震作用下高低墩桥梁轴力

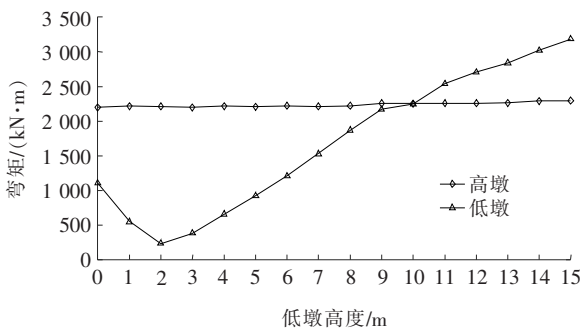


图 13 横向地震作用下高低墩桥梁弯矩

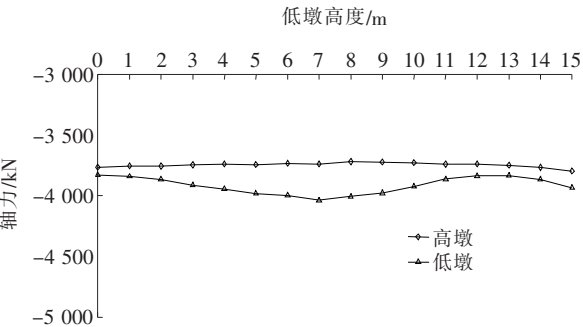


图 14 横向地震作用下高低墩桥梁轴力

由图 13、14 可知:在横向地震作用下,高墩弯矩和轴力均不受低墩高度变化的影响,而低墩轴力则呈现更为明显的下降—上升趋势,在墩高为 2 m 时,低墩弯矩达到最小。与简支结构不同,低墩轴力受墩高变化较为明显,呈现下降—上升的二次曲线趋势。

3.3 对结构安全性的影响

在实际结构抗震设计时,需要同时考虑弯矩和轴力的共同作用。桥墩的塑性变形能力通过弯矩曲率曲线判断,弯矩曲率曲线的计算需要依据一个指定的轴力,可以采用式(1)表示:

$$M_{ee} = f(I_c, F_N)$$
 (1)

式中: M_{ee} 为结构的等效弯矩; f 为弯矩曲率关系,它受截面特性 I_c 和截面所受轴力 F_N 两个因素影响。

通过比较 M_{ee} 和结构地震响应弯矩的大小,来判断结构的安全性。弯矩曲率关系 f 可以通过截面计算软件(如 Xtract)计算得到,但为便于计算和结论的推广,该文采用线性关系系数 k 进行表示[式(2)],需要指出的是,该假设仅为得出一般指导性的结论所设。

$$M_{ee}/M = k(F_N/M)$$
 (2)

式中: M 取结构的实际弯矩响应, M_{ee}/M 值越大,则结构安全性越高,该文研究案例的 M_{ee}/M 值如表 3 所示。

从表 3 可以看出:随着低墩墩高的增加,简支结构和连续结构安全性均有所降低,高低墩的高差在 5 m 范围内,结构安全性趋于稳定。纵向地震荷载作用下,简支结构和连续结构的低墩安全性优于高墩,因此在进行抗震验算时应以低墩安全性为主。在横向地震作用下,无论是简支结构还是连续结构则呈现与纵向地震相反的趋势,结果表明高墩结构更偏于安全,且优势明显。

4 结论

(1) 简支和连续结构的高墩轴力不随低墩高度变

表 3 高低墩地震作用下的 M_{ee}/M 值

低墩高度/m	简支结构				连续结构			
	纵向		横向		纵向		横向	
	高墩	低墩	高墩	低墩	高墩	低墩	高墩	低墩
0	0.71	32.68	0.83	2.74	0.74	204.31	1.41	3.23
1	0.68	4.67	0.83	12.80	0.72	5.29	1.40	6.57
2	0.67	2.31	0.83	8.89	0.72	2.72	1.41	15.35
3	0.63	1.53	0.84	4.36	0.70	1.83	1.41	9.64

续表 3

低墩高度/m	简支结构				连续结构			
	纵向		横向		纵向		横向	
	高墩	低墩	高墩	低墩	高墩	低墩	高墩	低墩
4	0.61	1.13	0.83	2.92	0.68	1.34	1.40	5.65
5	0.58	0.91	0.85	2.14	0.66	1.05	1.41	4.05
6	0.53	0.74	0.87	1.71	0.62	0.90	1.40	3.11
7	0.48	0.68	0.59	1.53	0.62	0.79	1.40	2.45
8	0.45	0.58	0.60	1.27	0.58	0.71	1.39	1.97
9	0.43	0.51	0.61	1.04	0.57	0.65	1.36	1.64
10	0.41	0.47	0.62	0.86	0.56	0.59	1.37	1.55
11	0.39	0.44	0.62	0.75	0.55	0.54	1.37	1.34
12	0.37	0.42	0.68	0.71	0.54	0.52	1.38	1.24
13	0.37	0.38	0.65	0.62	0.54	0.53	1.38	1.17
14	0.36	0.38	0.66	0.59	0.55	0.56	1.37	1.09
15	0.38	0.39	0.68	0.53	0.56	0.60	1.37	1.02

化,但纵向地震作用下的高墩纵向弯矩会随着低墩高度的增加而增加,导致在桥墩截面等效弯矩不变的情况下,结构安全度降低。

(2) 在纵向地震作用下,低墩的弯矩值随着其高度的增加呈现上升—下降的趋势,且峰值并不出现在与高墩等高处,对比相同高度下的轴力,低墩在弯矩峰值处也达到了轴力最小值,表明低墩在此高度下最危险且安全系数低于高墩,因此在验算墩的安全性时应特别注意高墩墩高差在 5 m 范围内的低墩。

(3) 横向地震作用下,无论是简支结构还是连续结构,高墩的弯矩和轴力受低墩高度变化影响较小,但低墩的横向弯矩则呈现下降—上升的趋势,并在高低墩等高处弯矩达到最大、轴力达到最小,此时安全系数最小。

参考文献:

[1] 刘长喜. 桥梁抗震设计若干问题的思考[J]. 中外公路, 2015,35(2):165—167.

[2] 孙治国,司炳君,陈灿,等. 山区桥梁排架抗震能力评价方法[J]. 振动与冲击,2015,34(18):1—6.

[3] 杨鹏,方德春,肖鸿,等. 山区高速公路桥梁工程安全风险评价浅析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(4):

209—211.

[4] 李明哲. 卧龙沟高墩大跨连续刚构桥地震响应分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.

[5] 张文. 高墩大跨曲线连续刚构桥地震响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[6] 黄方,张威振,杨少红,等. 高烈度区刚构桥抗震与减隔震技术研究[J]. 中外公路,2017,37(6):147—150.

[7] 谭世霖,刘忠平,蒋雪琴. 大鳌大桥抗震性能分析[J]. 中外公路,2015,35(3):127—130.

[8] 刘琪,聂尚杰,徐林. 大跨长联波形钢腹板连续梁桥的隔震设计研究[J]. 中外公路,2019,39(3):119—124.

[9] 游惠敏,冯仲仁,陈百奔. 纵向横系梁对双薄壁高低墩连续刚构桥抗震性能影响分析[J]. 公路,2018,63(5):101—108.

[10] 何贝贝,冯仲仁,陈百奔. 参数变化对高墩弯桥地震响应特性的影响[J]. 中外公路,2017,37(3):164—167.

[11] 郝晓光,唐辉,邵帅,等. 横向非等高双柱式桥墩抗震性能研究[J]. 世界桥梁,2019,47(3):54—59.

[12] 孙玥. 双柱式高低墩桥梁地震响应分析[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[13] 石岩,王进,王东升,等. 采用板式橡胶和铅芯橡胶支座的山区桥梁地震损伤评价[J]. 地震工程与工程振动, 2014,34(1):237—241.