

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.036

中系梁对双柱式桥墩受力性能影响研究

许梁, 邹黎琼, 平晓文

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要:双柱式桥墩结构广泛应用于中国高速公路桥梁设计中,中系梁设置位置及设置数目对结构的受力特点都会产生较为明显的影响。该文采用有限元软件 Midas/Civil 建立中系梁参数变化模型,对其进行相应的动力特性分析、地震响应分析及屈服分析。分析结果表明:中系梁设置能够明显改善结构的动力性能,并随着中系梁设置数目的增加,改善效果越好,但提高幅度随设置数目增加而减缓。设置单根中系梁于墩柱中心位置时,结构最为合理。

关键词: 中系梁; 双柱墩; 动力特性; 地震响应; 屈曲分析

中国交通运输事业发展迅速,公路建设取得了突飞猛进的成果。当前,高速公路路线上的标准跨径桥梁基本采用梁式桥的结构形式,下部结构一般采用双柱式桥墩。桥梁设计中,根据实际情况针对桥梁所处不同地形地貌、地质条件及桥墩高度等,会在双柱墩之间加设中系梁,以增加墩柱的稳定性,改善结构受力。

由于中系梁的设置将直接改变下部结构的力学结构形式,中系梁设置位置、设置数量等,都将对墩柱结构的内力产生不同的影响。因此,对双柱式桥墩中系梁设置的问题进行探讨,将有助于桥梁下部结构的优化设计,达到在保证桥梁结构安全的前提下,寻找出中系梁设置最优方案的目的。

1 工程背景

根据高速公路桥梁常用标准跨径结构形式,该文选取 5×30 m 装配式连续梁桥作为主要研究对象,上部结构为小箱梁结构,采用先简支后连续形式,下部结

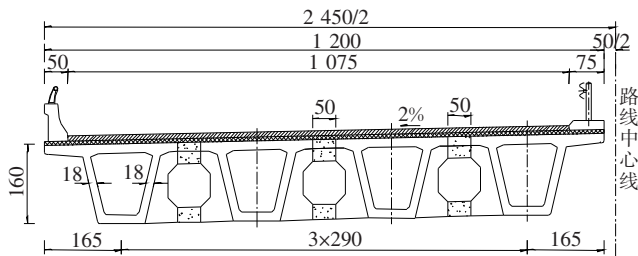


图 1 主梁标准横断面(单位:cm)

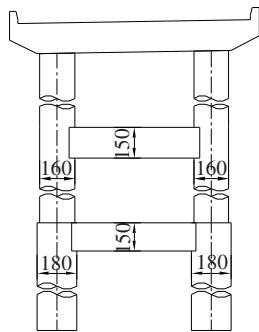


图 2 桥墩一般构造图(单位:cm)

定难度,加固周期相对较长,对交通影响大,施工过程的不确定因素多,需严控加固施工质量,该类加固适用于牛腿开裂较为严重的情况。

参考文献:

- [1] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 蒲黔辉,勾红叶,张君华. 城市立交桥牛腿开裂及加固的

模型试验[J].西南交通大学学报,2008(10).

- [3] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [5] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [6] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

收稿日期:2020-03-12

作者简介:许梁,男,大学本科,高级工程师. E-mail:7774038@qq.com

构采用双柱式桥墩,全桥总宽 12 m。主梁标准横断面及桥墩一般构造图如图 1、2 所示。单片小箱梁高 1.6 m,中梁宽 2.4 m,边梁宽 2.85 m,湿接缝宽 0.5 m;桥墩高度选取 20 m 和 30 m 两种,根据地形不同,桩基长度选取 50 m 与 15 m 进行考虑,墩径为 1.6 m,桩基墩径为 1.8 m,系梁高 1.5 m,宽 1.2 m。支座采用普通橡胶支座。

2 有限元模型

2.1 平原区模型

为了探讨中系梁对双柱式桥墩受力性能的影响,采用有限元软件 Midas/Civil 2015 对桥梁结构进行空间建模分析。上部结构采用梁单元建立 4 道主梁,主梁横向之间采用虚拟梁连接,模拟主梁间的横向刚度;下部结构采用空间梁单元模拟,桩土相互作用采用等效土弹簧模拟;上下部结构连接按支座实际位置采用弹性连接进行模拟。结构桥面铺装、防撞护栏等二期恒载以均布力的方式进行简化考虑。4[#]墩为固定墩,设置固定支座,其余均为滑动支座。

令中系梁中线位置距桥墩顶部高度为 h ,桥墩高度为 H 。考虑到中系梁设置位置、设置数量的变化将对结构内力产生一定影响,分别建立墩柱高 20 m 与墩柱高 30 m 两种情况下的 9 类工况模型:① 无中系梁;② 单根中系梁高度 $h=0.25H$;③ 单根中系梁高度 $h=0.4H$;④ 单根中系梁高度 $h=0.5H$;⑤ 单根

中系梁高度 $h=0.6H$;⑥ 单根中系梁高度 $h=0.75H$;⑦ 2 根中系梁 $h_1=H/3, h_2=2H/3$;⑧ 3 根中系梁 $h_1=H/4, h_2=2H/4, h_3=3H/4$;⑨ 4 根中系梁 $h_1=H/5, h_2=2H/5, h_3=3H/5, h_4=4H/5$ 。

2.2 山区模型

考虑到山区桥址位置易出现地形高低起伏不平的情况,基于平原地区模型进行相应的参数调整。对应于平原地区墩高 20 m 情况下,山区模型修正为 1[#]、6[#]墩墩高 5 m,2[#]、5[#]墩墩高 10 m,3[#]、4[#]墩墩高 20 m;对应于平原地区墩高 30 m 情况下,山区模型修正为 1[#]、6[#]墩墩高 7.5 m,2[#]、5[#]墩墩高 15 m,3[#]、4[#]墩墩高 30 m。桩基长度调整为 15 m,嵌岩桩形式。横系梁设置工况同平原地区,由于边跨桥墩墩高较矮,故针对工况⑧、工况⑨,仅调整 3[#]、4[#]墩横系梁设置位置,其余墩柱的横系梁设置参数按工况⑦设置。

3 动力特性分析

桥梁的动力特性包括结构的振动频率、振动周期及振型等,这些参数直接反映出桥梁结构的动力性能,并能由此得出结构的动力响应效果。以平原区桥梁结构形式为分析对象,遵循单一变量原则,以中系梁设置数目及位置为变量,对其进行桥梁动力特性分析。考虑到中系梁主要对桥梁的横向动力特性产生影响,以桥梁第 1、2 阶对称侧弯及第 1、2 阶反对称侧弯为研究模态,模型振动周期对比如表 1 所示。

表 1 20、30 m 桥墩模型振动周期

跨径/ m	模态	下列工况时振动周期/s								
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
20	1 阶正对称侧弯	1.263	1.07	0.988	0.968	0.979	1.049	0.882	0.845	0.825
	1 阶反对称侧弯	1.132	0.971	0.9	0.882	0.89	0.949	0.809	0.779	0.762
	2 阶正对称侧弯	0.854	0.767	0.719	0.704	0.707	0.744	0.658	0.639	0.628
	2 阶反对称侧弯	0.656	0.613	0.578	0.566	0.566	0.588	0.535	0.523	0.517
30	1 阶正对称侧弯	2.142	1.742	1.565	1.518	1.538	1.69	1.34	1.262	1.219
	1 阶反对称侧弯	1.905	1.562	1.402	1.357	1.372	1.503	1.204	1.137	1.101
	2 阶正对称侧弯	1.196	1.097	1.016	0.985	0.986	1.041	0.908	0.873	0.854
	2 阶反对称侧弯	0.819	0.799	0.757	0.736	0.73	0.752	0.699	0.681	0.672

由表 1 可知:

(1) 20 m 墩高时,工况②~⑥(设置 1 根中系梁)比工况①(无中系梁)的 1 阶正、反对称侧弯振动周期分别减少了 15.3%~23.4%、14.2%~22.1%。其中,以工况④(中系梁设置在桥墩中心时)振动周期减

少量最大;工况⑦(设置 2 根中系梁)比工况④的 1 阶正、反对称侧弯振动周期分别减少了 8.9%、8.3%;工况⑧(设置 3 根中系梁)比工况⑦的 1 阶正、反对称侧弯振动周期分别减少了 4.2%、3.7%。由此可见,中系梁的设置对于桥梁结构横向动力响应影响明显,特

别是在设置 1 根中系梁以后,能够有效提高桥墩的横向刚度,中系梁设置在桥墩中心时,整个结构的框架效应最为明显,结构刚度最大。随着中系梁设置数目的增加,横向刚度增强的效果逐渐减小,对结构刚度变化影响逐渐降低。

(2) 30 m 墩高时,不同工况振动周期变化趋势与 20 m 墩高相同,工况②~⑥比工况①的 1 阶正、反对称侧弯振动周期分别减少了 18.7%~29.1%、18.0%~28.8%。中系梁对桥梁结构横向刚度的提高效果,随着桥梁墩高的增加,更加明显。

4 地震响应分析

4.1 地震参数选取

对于桩柱式墩台,在地震荷载作用下,桥墩往往需要承担较大的水平力作用,特别是在横桥向水平地震力作用下,极易造成破坏。中系梁的设置,在一定程度上能够缓解地震水平力对下部结构的影响,改善墩柱的受力。由于桩柱式桥墩结构广泛应用于中国大部分的高速公路桥梁设计中,根据中国地震动反应谱特征周期区划图,选取平原区(湖北地区)及山区(四川地区)为研究区域背景,分析中系梁设置对桥梁结构的地震响应影响。

区域参数分别为:① 平原区,桥位区地震动峰值加速度系数为 0.05,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,抗震设防烈度为Ⅵ度,抗震防护措施等级为Ⅶ度;② 山区,桥位区地震动峰值加速度系数为 0.1,地震动反应谱特征周期为 0.4 s,抗震设防烈度为Ⅶ度,抗震防护措施等级为Ⅷ度。

根据 JTG/T B02-01-2008《公路桥梁抗震设计细则》,采用反应谱法对上述工况进行 E1 地震作用分析。根据平原区和山区的区域特征参数,选取阻尼比为 5% 设计场地无量纲加速度反应谱函数,反应谱采用横向输入。平原区和山区的地震动设计加速度反应谱如图 3 所示。

由以上加速度反应谱对不同的中系梁设置模型进行地震响应分析,通过对比分析墩顶水平位移、墩身弯矩、中系梁梁端最大弯矩及最大轴力,分析中系梁设置对墩柱结构地震响应影响。

4.2 墩顶水平位移比较

对有限元模型进行地震响应分析,图 4、5 分别为 20、30 m 墩高时平原区和山区的墩顶水平位移。

由图 4、5 可以看出:

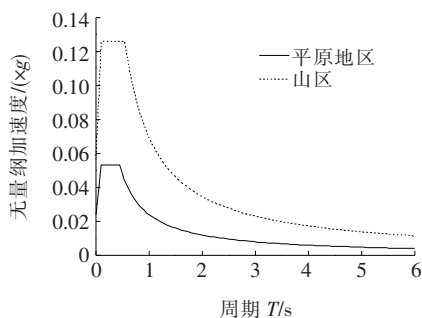
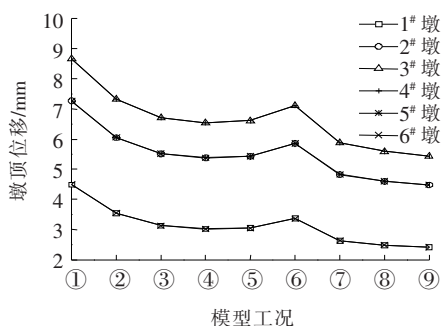
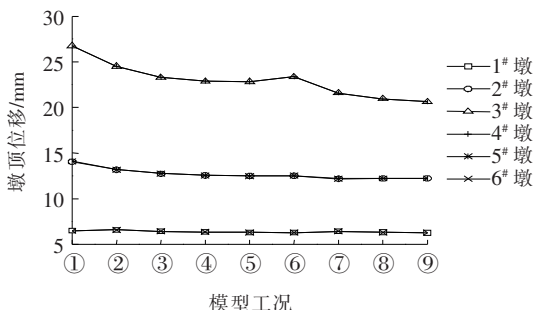


图 3 地震动设计加速度反应谱



(a) 平原区



(b) 山区

图 4 20 m 墩高时桥梁地震响应墩顶水平位移值

(1) 设置中系梁后,墩顶的横向位移明显减小。在设置 1 道中系梁方案中, $h=0.5H$ 方案最佳。对比中系梁设置方案,设置 1 道中系梁后,墩顶位移平原区最大减少了 39.9%,山区减少了 19.6%;设置 2 道中系梁比 1 道中系梁的方案,两个地区墩顶位移最大分别减少了 17.0% 和 7.8%。设置 3 道中系梁比 2 道中系梁的方案,两个地区墩顶位移最大分别减少了 5.7% 和 2.9%。中系梁随设置数目增加,对墩顶位移的改善效果越小。在整个方案中,以设置 1 道中系梁于桥墩中心处方案,对墩顶水平位移改善效果最佳。

(2) 30 m 墩高时,模型墩顶位移变化趋势与墩高 20 m 基本相同,但墩顶水平位移绝对值基本为 20 m 墩高时的 1.4~3.8 倍。这说明,随着墩高的增加,墩顶位移呈现为一个较为明显的增加。增加倍数略高于

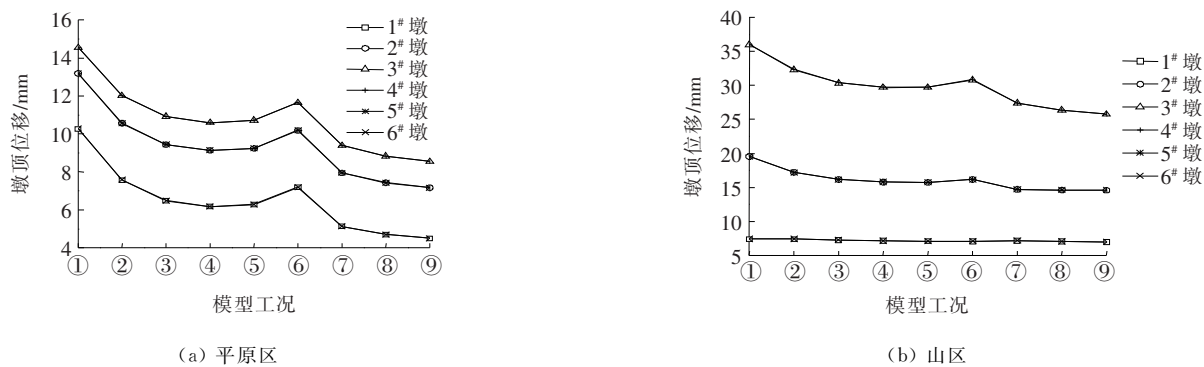


图 5 30 m 墩高时桥梁地震响应墩顶水平位移值

墩高比值。设置 1 道中系梁后,墩顶位移平原区最大减少了 39.9%,山区减少了 19.6%,说明中系梁设置随着墩高的增加,减小墩顶水平位移的效果有所降低。

(3) 对比平原区和山区的墩顶位移值变化,平原区墩顶位移优化效果明显好于山区,这说明中系梁设

置在平原地区的抗震优化设计中更能发挥其作用。

4.3 墩身弯矩比较

以桥梁模型中 4[#] 墩为研究对象,对不同模型工况在地震力作用下,墩底弯矩进行比较分析。表 2 为墩身弯矩的变化。

表 2 20、30 m 墩高平原区、山区墩身弯矩比较 kN·m

模型 工况	20 m 墩高						30 m 墩高					
	平原区弯矩			山区弯矩			平原区弯矩			山区弯矩		
	墩顶	系梁节 点 Max	墩底	墩顶	系梁节 点 Max	墩底	墩顶	系梁节 点 Max	墩底	墩顶	系梁节 点 Max	墩底
①	-761.7	—	814.5	-1 765.0	—	1 751.9	-650.9	—	714.2	-1 418.8	—	1 551.8
②	-377.9	96.5	815.8	-843.3	163.3	1 726.4	-299.8	114.8	756.1	-638.5	236.7	1 700.3
③	-497.9	323.5	745.0	-1 113.7	671.6	1 543.4	-434.9	324.8	714.2	-965.7	714.5	1 635.2
④	-585.7	465.5	665.4	-1 333.7	1 015.9	1 347.9	-351.6	461.5	640.7	-1 219.7	1 062.9	1 471.2
⑤	-660.5	585.6	570.3	-1 545.2	1 337.7	1 100.1	-605.6	569.7	538.1	-1 485.3	1 370.6	1 210.4
⑥	-730.0	711.0	435.1	-1 776.7	1 712.2	705.4	-657.7	661.3	382.5	-1 578.0	1 630.6	753.3
⑦	-477.2	381.3	569.2	-1 032.4	912.1	986.8	-430.8	429.8	549.5	-1 007.6	1 056.1	1 211.5
⑧	-388.0	369.1	485.8	-862.5	788.5	680.6	-363.7	380.1	487.3	-864.7	952.5	990.8
⑨	-335.2	329.1	440.6	-737.1	663.1	455.9	-316.5	340.6	444.9	-757.0	849.8	805.6

由表 2 可以看出:

(1) 中系梁的设置对改善墩身弯矩具有明显的积极作用。增加中系梁后,在中系梁设置位置将会出现一个弯矩的突变点,从而使得原结构的墩顶、墩底最大弯矩大大减小,这对于结构的抗震设计是极为有利的。根据中系梁设置的位置,单根中系梁方案中,位置位于墩身中部时,最为合理。同样,中系梁设置过多后,对弯矩的改善作用也在逐渐下降。

(2) 不同的墩高对墩身弯矩有一定的影响,但影响不大;不同的地震场地效应影响较为明显。根据以往的设计经验及模型模拟结果,位于山区位置的双柱

墩在无中系梁的状况下,很难达到安全标准。

4.4 墩身最大轴力比较

以桥梁模型中 4[#] 墩为研究对象,对比分析不同模型工况下墩身最大轴力值。比较结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出:随着中系梁位置和数目的变化,墩身最大轴力呈现一个增加的趋势。在设置单根中系梁方案中,随着中系梁设置位置从上至下,墩身最大轴力亦呈现一个递增的状态。这是由于中系梁的增加,改变原有的结构受力状态,在改善结构弯矩的前提下,增加了墩柱的轴力。考虑到混凝土结构一般为受压构件,轴力的增加对于结构的受力性能不会产生过大的

表 3 4# 墩墩身最大轴力比较 kN

模型 工况	20 m 墩高		30 m 墩高	
	平原区	山区	平原区	山区
①	279.4	656.4	222.1	494.8
②	405.6	940.8	344.8	787.2
③	480.0	1 129.4	429.2	1 010.9
④	513.7	1 239.1	467.7	1 136.6
⑤	526.7	1 315.4	478.2	1 202.8
⑥	507.1	1 341.3	447.6	1 155.0
⑦	630.3	1 555.1	604.9	1 553.9
⑧	704.4	1 772.0	690.5	1 844.1
⑨	754.3	1 919.0	749.7	2 051.0

影响,因此轴力的增加在一定范围内是可以接受的。

5 屈曲分析

中系梁的设置对于桥梁结构横向稳定性有积极作用。中系梁增加了桥梁结构的横向刚度,对结构的稳定性具有一定的提高作用。对上述模型进行屈曲对比分析,可以反映出中系梁对桥梁结构横向稳定性的改善效果。

以平原地区有限元模型为例,分别以 20、30 m 墩高模型 4# 墩为研究对象,单独取墩柱结构为脱离体进行有限元分析,考虑桥梁的汽车活载,将上部结构的自重、二期恒载及活载转化为静力形式,施加于下部结构脱离体,并进行屈曲分析,通过比较下部结构在桥梁运营过程中的稳定系数,对中系梁设置影响进行分析。图 6 为不同模型工况的稳定系数对比图。

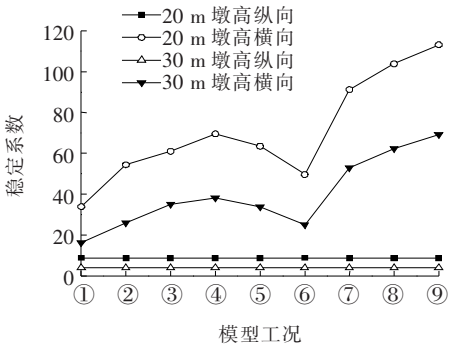


图 6 不同模型工况的稳定系数对比图

由图 6 可知:无论是 20 m 墩高还是 30 m 墩高的情况下,中系梁的设置对桥梁结构纵向稳定性几乎没有任何的影响,但是能对结构的横向稳定性起到较大

的改善作用,由此可见:改善效果最佳的方案是将 1 道中系梁设置于墩身中间位置。随着中系梁设置数目的增加,对于稳定性的提高效果越来越小。墩高越高,中系梁增加对桥梁横向稳定性改善效果越好。

6 结论

(1) 中系梁设置对改善桥梁结构横向刚度具有积极作用,设置单根中系梁位于桥墩中心位置时,对减小桥梁结构横向振动周期,提高结构刚度效果最佳,且随着墩高增加,提高效果越好。

(2) 中系梁的设置能够有效地提高结构的抗震效果,改善结构在水平地震力作用下的动力响应。采用反应谱法对结构在不同场地(平原区和山区)效应下进行 E1 地震分析,设置中系梁后能够明显减小墩顶的水平位移。单根中系梁设置方案中,设置在桥墩中心位置效果最佳;墩顶水平位移改善效果速率随中系梁数目增加而降低。设置中系梁后,原结构的力学特点改变,使得下部结构产生了较为明显的框架效应,原结构墩顶及墩底的弯矩大大减小。墩身轴力随中系梁数目增加呈增大的趋势,但在安全范围内。

(3) 中系梁设置能够有效地提高双柱式结构的横向稳定系数,而对纵向稳定系数没有影响。从提高的效果来看,中系梁数目越多,效果越好;从经济的角度来看,单根中系梁设置于桥墩中心位置时,最为合理。

参考文献:

[1] 刘黎阳,马健.双柱框架式桥墩横系梁的合理布置方式研究[J].中外公路,2014(4).

[2] 沈星,叶爱君,王晓伟.柔性横系梁双柱墩的抗震行为分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013(3).

[3] Yuye Zhang, Feng Xiao, Jhangir Badar. Influence of Straining Beams on the Seismic Fragility of Double - Column Bridge Piers[J]. The Civil Engineering Journal,2019(1).

[4] 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(5).

[5] 杨兴华.横系梁对超高墩大跨连续刚构双幅桥抗震性能的影响分析[J].世界桥梁,2018(4).

[6] 董方超,孙广俊,李鸿晶.横系梁对双柱墩混凝土曲线梁桥地震反应的影响分析[J].世界桥梁,2015(3).

[7] 刘凯,裴炳志,张门哲,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段附近区域梁段刚度和承载能力的合理分布研究[J].中外公路,2019(6).