

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.03.044

高墩系梁设置对桥墩横向地震响应的影响

邢洪扬, 张永旺

(徐州市交通规划设计研究院, 江苏 徐州 221006)

摘要: 在地震高烈度地区桥梁下部结构设计时,经常会遇到桥墩较高时需要设置系梁的情况,来防止墩柱发生横向动力失稳,减小地震作用下的桥梁破坏。从大量的震害中发现未设系梁的桥墩比设置系梁的桥墩横向破坏显著。以毛林特大桥引桥下部结构为研究对象,分析E2地震作用下墩柱的横向变形和关键截面的内力,研究表明桥墩较高时系梁设置对桥墩横向抗震性能影响显著。

关键词: 组合箱梁;系梁;动力特性;反应谱;地震响应

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)03-0143-03

0 引言

在结构地震响应分析中发现,中系梁会改变结构的低阶振型;地系梁起到类似承台的作用,改变了横向地震作用下的失稳模态。这是由于墩柱受到系梁的约束,横桥向墩柱的长细比变小,整体刚度增加,抵御面内失稳能力提高。从这个角度讲,系梁的设置高度还可以做些优化,添加系梁后对桥墩抗震性能有所提高。不过系梁与墩交接处是桥墩竖向刚度变化的点,地震中容易引起破坏,设计中应引起足够重视。我国《公路桥梁抗震设计细则》中提到,在8度区的抗震措施要满足,高度大于7m的柱式桥墩和排架桩墩应设置横系梁,但未指出高度大于7m的柱子需要设置几根系梁及设置位置。本文围绕算例桥墩为15m和30m,已设置了地系梁,对是否设置中系梁以及设置在哪个位置最优进行了探讨,得到的结论可供工程实践参考。

1 高墩双柱式桥墩地震响应分析

1.1 算例桥介绍

本文研究的对象位于江苏省徐州市344省道新沂段毛林特大桥的引桥。由于桥址处地震烈度较高,且桥位处受采砂影响桥墩较高,所以在地震作用下,下部结构很容易破坏,特别是横桥向刚度较低,最容易发生横向桥墩破坏。取其中一联6×30m组合连续箱梁计算分析,桥面全宽12.75m;下部结构采用双

柱式墩,桩基础,墩高为15m,柱径取1.4m,桩径取1.5m;柱底设置1道地系梁,系梁高1.2m,宽1.0m。两边墩设置滑板式橡胶支座,中间5个墩顶设置固定板式橡胶支座。

拟建桥梁位于我国著名的活动断裂带——郯庐断裂带内。据有关资料,该断裂带南—宿迁至今活动性较强,场地稳定性较差。根据该大桥工程场地地震安全性评价报告,判定本地区地震动峰值加速度为0.3g,桥梁按9度设防。

1.2 有限元模型建立

本文采用SAP2000空间结构分析与设计程序进行抗震分析。主梁、桥墩、盖梁和桥墩系梁均采用空间梁单元进行模拟,滑板式橡胶支座和固定板式橡胶支座按实际位置、采用连接单元模拟,桩-土相互作用采用单点弹簧单元模拟土弹簧^[1],桥面系的质量通过附加质量单元进行考虑。根据结构的实际布置情况,将其离散成空间有限元模型,全桥动力计算模型见图1。

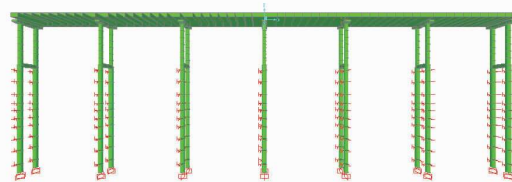


图1 无中系梁动力计算模型

对全桥进行地震响应分析,着重对是否设置中系梁以及设置在哪个位置最优进行了探讨,为设计师提供参考。本文是按中系梁中心到墩顶的距离 H 分多种情况进行分析。

1.3 动力特性分析

自由振动是指结构在没有外来干扰作用时,初

收稿日期: 2020-10-29

作者简介: 邢洪扬(1978—),男,本科,高级工程师,注册道路、咨询、监理工程师,主要从事桥梁工程设计工作。

位移、初速度或两者共同作用引起的振动。自振特性是自由振动时结构的周期或频率及振型,它反映结构自身动力特性,是进行动力分析的基础^[2]。

根据中系梁中心到墩顶的距离 H 不同分别建立 15 m 和 30 m 的动力计算模型,对比各结构动力特性。因为系梁主要是对横向模态影响较大,所以本文仅对横桥向动力特性进行讨论。表 1 列出了 15 m 墩高的 6 种情况结构前十阶振型中横向动力特性下的自振频率;表 2 列出了 30 m 墩高 8 种情况结构前十阶振型中横向动力特性下的自振频率。

表 1 15 m 墩高动力特性分析

振型	频率 /Hz					
	未设置中系梁	设置中系梁位置				
		$H=2.5$	$H=5.0$	$H=7.5$	$H=10.0$	$H=12.5$
一阶反对称侧弯	0.179	0.184	0.187	0.189	0.188	0.185
一阶对称侧弯	0.208	0.214	0.218	0.219	0.218	0.215
二阶反对称侧弯	0.445	0.447	0.449	0.449	0.449	0.448
三阶反对称侧弯	1.064	1.066	1.067	1.067	1.067	1.066

由表 1、表 2 可知,桥墩设置中系梁后,结构横桥向对应振型的自振频率均有所增加,且随着中系梁设置位置的降低,对应振型的频率出现先增大后减小的规律。这表明设置中系梁使结构横桥向刚度增大,横桥向自振频率增大,当中系梁设置在墩柱中心时,结构横桥向刚度最大。

1.4 地震响应分析

依据《公路桥梁抗震设计细则》和工程场地地震安全性评价报告,设计规范反应谱曲线(见图 2),采用横桥向输入。本算例桥通过 E2 阶段该桥的横向变形和关键截面的内力,来分析高烈度区桥墩较高时中系梁对桥墩横向的抗震性能影响。本文首先分析中系梁位置变化对桥墩关键截面的内力影响。图 3 为桥墩关键截面位置图。表 3、表 4 列出了各关键截面内力。

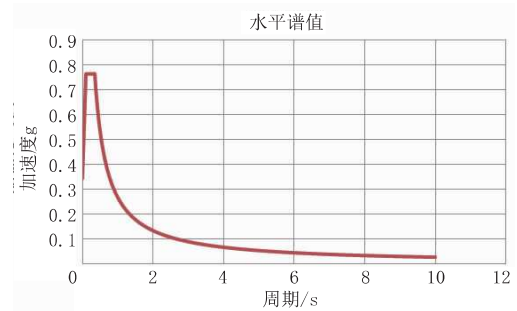


图 2 设计加速度反应谱

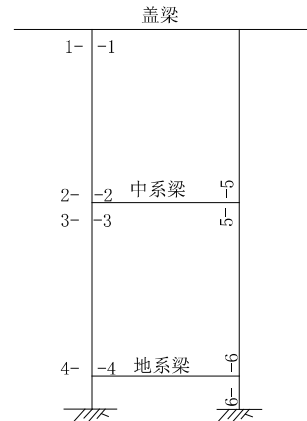


图 3 桥墩关键截面位置

表 3 15 m 桥墩各关键截面内力 单位:kN·m

截面位置	弯矩					
	未设置中系梁	设置中系梁位置				
		$H=2.5$	$H=5.0$	$H=7.5$	$H=10.0$	$H=12.5$
1-1	3 585.4	1573.9	1717.9	2 173.8	2 741.9	3 320.5
2-2	/	769.9	669.1	1 639.4	2 728.2	3 775.2
3-3	/	3967.7	3 501.5	2 693.8	1 629.5	619.7
4-4	4 070.5	4 445.8	3 906.6	3 146.9	2 331.3	1 717.5
5-5	/	3 296.9	3 920.3	4 209.6	4 220.3	3 940.2
6-6	4 539.4	5 112.5	4 752.7	4 157.1	3 464.7	2 868.8

表 3、表 4 分别列出了不同工况、地震作用下 3 号墩处控制截面的弯矩计算结果。可以看出:设置桥墩中系梁后,结构的控制截面增多。随着中系梁设置位置的下降,上柱两端地震弯矩逐渐增大;下柱两端地震弯矩逐渐减小,中系梁端部的弯矩先增大后减

表 2 30 m 墩高动力特性分析

振型	频率 /Hz							
	未设置中系梁	设置中系梁位置						
		$H=5$	$H=10$	$H=12.5$	$H=15$	$H=17.5$	$H=20$	$H=25$
一阶反对称侧弯	0.121	0.135	0.146	0.147	0.151	0.148	0.147	0.136
一阶对称侧弯	0.140	0.156	0.169	0.173	0.175	0.172	0.170	0.158
二阶反对称侧弯	0.426	0.429	0.433	0.435	0.435	0.434	0.434	0.430
二阶对称侧弯	0.795	0.856	0.990	1.060	1.117	1.110	1.128	0.987
三阶反对称侧弯	0.794	0.855	0.989	1.052	1.055	1.055	1.055	0.987

表4 30 m 桥墩各关键截面内力

单位:kN·m

截面位置	未设置中系梁	弯矩						
		设置中系梁位置						
		H=5.0	H=10.0	H=12.5	H=15	H=17.5	H=20.0	H=25.0
1-1	4 366.9	1 535.3	2 135.1	2 479.2	2 891.6	3 365.7	3 811.5	4 280.7
2-2	—	866.1	1 602.7	2 044.9	2 706.4	3 541.4	4 323.2	5 192.4
3-3	—	4 547.5	4 632.5	4 586.9	4 306.9	3 747.2	2 947.5	1 350.1
4-4	5 554.0	5 632.4	5 603.5	5 482.5	5 187.6	4 545.5	3 892.1	2 365.9
5-5	—	4 296.0	5 402.8	5 967.2	6 994.2	6 803.1	6 723.9	5 712.4
6-6	5 540.2	5 685.9	5 778.6	5 777.5	5 633.2	5 261.9	4 715.7	3 526.9

小,以设置在墩柱中心附近最大,地系梁端部的弯矩逐渐减小。出现这种规律的原因是桥墩系梁将盖梁—墩柱—系梁形成的框架体系一分为二,随着桥墩系梁的下降,上框架外形逐渐扩大,刚度增大,相关的地震响应量也逐渐增大;同时,下框架外形逐渐缩小,刚度降低,相关的地震响应量逐渐减小。

《公路桥梁抗震设计细则》规定,在 E2 地震作用下,延性构件的有效截面抗弯刚度按式(1)计算,未进入延性的构件截面刚度仍按毛截面计算刚度。通过非线性纤维截面有限元分析方法,来获得桥墩关键截面的弯矩—曲率曲线,其中混凝土的本构关系采用 Mander 模型,钢筋的本构关系采用考虑硬化的弹塑性本构模型。桥墩纤维截面弯矩—曲率曲线见图 4。

$$E_C \times I_{eff} = \frac{M_y}{\phi_y} \quad (1)$$

式中: E_C 为桥墩的弹性模量, $kN \cdot m^2$; I_{eff} 为桥墩有效截面抗弯惯性矩, m^4 ; M_y 为屈服弯矩, $kN \cdot m$,本截面 $M_y=4 531(kN \cdot m)$; ϕ_y 为等效屈服曲率, $1/m$,本截面 $\phi_y=2.362 \times 10^{-3}$ 。

在计算结构位移时,本文按抗震细则把表 3、表 4 中桥墩截面大于屈服弯矩的截面按式(1)计算截面刚度进行设置,再计算结构位移。盖梁梁端横向位移见表 5、表 6。

表5 15 m 墩高盖梁横向位移

截面位置	位移 /m					
	未设置中系梁	设置中系梁位置				
		H=2.5	H=5.0	H=7.5	H=10.0	H=12.5
盖梁端横向位移	0.088 3	0.070 4	0.063 6	0.059 0	0.058 7	0.063 2

表6 30 m 墩高盖梁横向位移

截面位置	位移 /m							
	未设置中系梁	设置中系梁位置						
		H=5.0	H=10.0	H=12.5	H=15	H=17.5	H=20.0	H=25.0
盖梁端横向位移	0.1997	0.1807	0.1551	0.1463	0.1386	0.1386	0.1397	0.1645

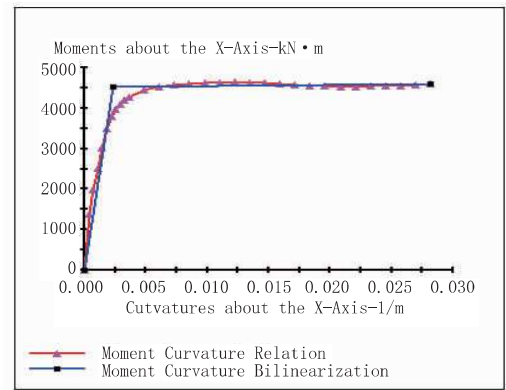
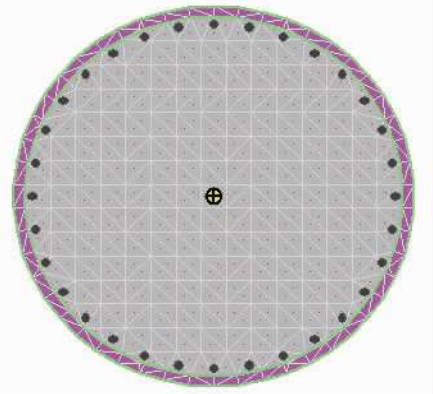


图4 桥墩纤维截面弯矩曲率

表 5、表 6 列出了不同工况下 3 号墩处盖梁顶横桥向位移值的计算结果。可以看出:设置桥墩系梁后,横桥向位移值有所减小;随着系梁设置高度的降低,横桥向位移值呈现出先减小后增大的规律,其中以系梁设置在桥墩中心偏下时,横桥向位移值最小。出

表3 结构各阶模态频率

模态号	频率/Hz	振型描述
1	0.54	桁架1阶横倾
2	1.10	桁架1阶整体横弯
3	1.70	桁架1阶整体竖弯
4	1.85	桁架2阶整体横弯
5	2.00	桁架1阶沿纵向扭转
6	2.34	桁架2阶横倾
7	2.59	桁架3阶横倾
8	2.68	桁架4阶横倾
9	2.78	桁架4阶整体横弯
10	2.94	桁架5阶横倾

全桥第1阶竖向自振动频率值为1.70 Hz,影响行人过桥的舒适性,需对桥梁进行舒适度分析。本次在主桥跨中位置(位移最大点附近)设置一定数量的调谐质量阻尼器,以改善行人过桥舒适性,同时可通过调整阻尼器的频率来避免共振。阻尼器安装后,能满足行人过桥的舒适度要求。

5 结语

(1)连续曲面钢桁架下部弦杆最大压应力出现在支座附近,而最大拉应力出现在中跨跨中位置;连续曲面钢桁架上部弦杆最大压应力出现在中跨跨中位置,最大拉应力出现在中支点位置,与常规钢桁架结构的应力变化趋势一致。

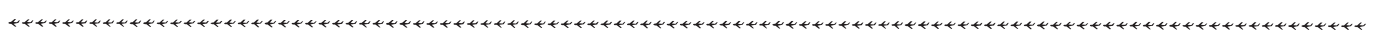
(2)连续曲面钢桁架斜向腹杆最大拉压应力均出现在支座附近,极大值出现在中横梁附近斜向腹杆,是整个桁架结构的控制节点;相对于斜向腹杆,竖向腹杆的应力分布比较均匀,且应力值小于相邻斜向腹杆。

(3)仅考虑人群作用时,连续曲面钢桁架的竖向最大位移值为37 mm,满足《规范》限制($L/500$)的要求;连续曲面钢桁架的计算挠度满足《规范》要求。同时在中跨位置设置向上150 mm的预拱度值。

(4)钢结构在第1阶屈曲模态表现为上部结构弦杆纵向失稳(跨中无横向联系),而第1阶空间屈曲稳定系数计算值为35.76。根据工程实践,面外不会失稳。基本组合作用下,上部弦杆中跨跨中区域、下部弦杆中支点区域、部分钢桁架腹杆为压弯构件,稳定系数小于1,满足《规范》要求。

(5)连续曲面钢桁架第1阶竖向的自振动频率值为1.70 Hz,不满足舒适度要求,会使行人过桥产生不舒适感。本次在主桥跨中位置(位移最大点附近)设置一定数量的调谐质量阻尼器,来改善行人过桥舒适性,同时可通过调整阻尼器的频率来避免共振。

(6)本桥由两榀曲面桁架组成,与平面桁架相比,应力更为不利,需考虑构件本身弯曲的影响。本桥通过增加两榀曲面桁架间的横向联系,来抵消由构件本身引起的弯矩。



(上接第145页)

现这种规律的原因与自振周期变化的原因相同。

2 结语

通过对高墩结构在强震E2地震作用下的内力和位移分析,得到如下结论:

(1)中系梁设置能增大结构的自振频率,其中设置在桥墩中心时,频率最大,刚度最大。

(2)中系梁设置在桥墩中心偏下时,上、下墩柱弯矩最接近,且弯矩较小,受力性能最好,截面配筋最少。

(3)中系梁设置在桥墩中心偏下时,盖梁端横向

位移最小,强震下墩柱抗震性能最好。

(4)由系梁内力值可知,系梁在地震作用下内力较大,容易产生塑性变形,能消耗一部分地震能量,来改善墩柱的受力,减少墩柱、桩基配筋。

(5)由表1至表6可知,当桥墩高度超过15 m时,中系梁的设置能显著减小桥墩的横向地震作用,因此在高烈度区高墩应设置中系梁。

参考文献:

[1] JTG/T 2231—01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
 [2] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1996.