

横系梁对双柱墩及其基础地震反应的影响

商宇* 叶爱君 翁健健

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要 基于 OpenSees 软件, 研究系梁对无盖梁双柱墩及其基础的地震反应的影响。以桥墩高度、系梁数量和系梁刚度为基本参数, 首先采用弹性单元建立无系梁双柱墩和系梁双柱墩模型进行时程反应对比分析, 研究弹性系梁对地震作用下双柱墩墩底弯矩、基础剪力和弯矩的影响。然后利用弹塑性纤维单元建立系梁模型, 研究系梁屈服耗能对减小双柱墩及其基础地震反应的作用。结果表明, 增设横系梁后可以显著减小墩柱的地震反应, 但会使得基础的反应稍有增加; 系梁屈服会使墩柱底的弯矩有所增加, 但对基础的地震反应是有利的。

关键词 双柱墩, 横系梁, 地震反应, 屈服耗能

Effects of the Link Beam on Seismic Responses of the Double-column Pier and its Foundation

SHANG Yu*, YE Aijun, WENG Jianjian

(State Key Laboratory for Disaster Reduction of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract To explore the effects of link beam on seismic performances of double-column piers without cap beams as well as its foundations, an OpenSees model was constructed. First, the elastic element was used to construct double-column pier model and link beam double-column piers model, considering the height of piers, the number and stiffness of link beams. Comparative analyses were implemented to study the influences of elastic link beam on the moment of the pier bottom and foundation for the double-column pier that is subjected to earthquakes. The link beam model with elastic-plastic fiber element was constructed to study the energy dissipation contribution of the link beam on reducing seismic responses. The results reveal that the link beam contributes to reduce pier seismic responses, but it increases the seismic response of foundation. When the link beam works in the plastic state, it increases the pier moment, but it has positive effects on the foundation seismic behaviors.

Keywords double-column pier, link beam, seismic response, energy dissipation

1 引言

近年来,随着交通量需求的增加,桥梁横向宽度尺寸不断增大,双柱墩已越来越多地应用于宽桥体系当中。目前最常见的双柱墩形式主要有无系梁双柱墩和系梁双柱墩两种。双柱墩的支座通常设置在两个墩柱顶处,一个墩柱顶设置横向滑动支座,另一个墩柱顶设置横向固定支座,上部结

构就是通过这两个支座将各种荷载传递到桥墩当中。

以上两种双柱墩在静力荷载作用下,受力情况基本相同,上部结构的恒载都是均匀的传递到两个墩柱上。但是,在横向地震作用下,由于上部结构会产生很大的横桥向水平惯性力,且这一荷载只能通过固定支座传递,所以两者受力情况会有很大差别。在无系梁双柱墩中,地震作用全部由固定墩柱承担,滑动墩柱几乎不受影响;而在系

收稿日期: 2013-03-18

* 联系作者, Email: 0725shangyu@tongji.edu.cn

梁双柱墩中,可以通过系梁将水平惯性力传递到滑动墩柱上,使两个墩柱共同作用,从而减小了单个墩柱的最不利受力。

从以往的桥梁震害中也可以清楚地看到这一点。对于无系梁双柱墩,最常见的破坏是墩柱底由于所受弯矩较大而发生弯曲型破坏,表现为墩柱底混凝土压碎,纵筋屈曲,如图 1 所示。

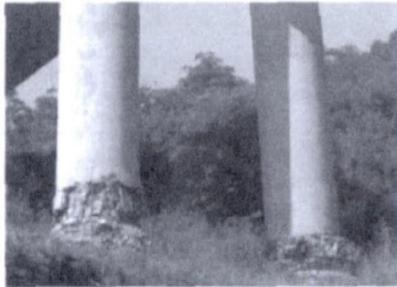


图 1 墩柱底弯矩形破坏

Fig. 1 Bending failure at the bottom of column piers

系梁双柱墩常见的破坏形式如图 2 所示,可见此时系梁与墩柱连接处发生了破坏,这是由于强度相对薄弱的横系梁在地震作用下进入塑性状态,形成塑性铰造成的,这在一定程度上也会减小墩柱底部的破坏。



图 2 系梁双柱墩震害

Fig. 2 Seismic failure of double-column pier with link beam

可见双柱墩中的横系梁对整个体系的受力情况,有着重要的影响。国内的一些学者已经关注到这一问题的工程意义,并对此做了一定的研究。如兰峰等^[1]通过有限元分析得出双柱式高墩桥梁中在 $0.3H$ 和 $0.8H$ 处布置一道相对于墩身刚度为 $0.3 \sim 0.6$ 的横系梁,对桥梁结构的地震响应最为有利。尚维波^[2]等通过分析结构动力特性及地震响应的变化研究了系梁对高墩刚构桥抗震性能的影响,结果表明设置系梁后,桥梁的横桥向抗震性能降低,墩柱和系梁均成为抗震设计的薄弱环节,认为将系梁设计为与墩身铰接可以兼

顾静力性能、动力性能和稳定性要求。

但是,以往的研究都主要针对有盖梁的双柱墩,对无盖梁的研究较少。对于利用系梁屈服耗能方面,多数学者只是提出了此种设想,而并未进行实验或有限元分析。

基于以上几点,本文针对无盖梁双柱墩做了以下两部分研究:第一部分研究,通过比较无系梁、系梁与墩柱刚接、系梁与墩柱铰接三种双柱墩结构体系在相同地震作用下的墩柱和基础的地震反应,分析了加设系梁及系梁和墩柱连接方式对双柱墩结构抗震性能的影响;第二部分研究,通过建立系梁纤维单元模型,探讨了系梁屈服耗能机制在减小系梁双柱墩地震反应方面的效果。

2 结构力学模型及地震动参数

2.1 模型介绍

规则桥梁是指其地震反应以一阶振型为主的桥梁。因此规则桥梁的地震反应可以通过将上部结构作为集中质量加载墩柱顶部进行简化计算。在某些无盖梁双柱墩中存在固定墩和滑动墩的划分,由于固定墩柱和滑动墩柱在传力上有所不同,所以为模拟桥墩真实的传力情况,在模型建立时,将上部结构的竖向质量平均加在固定、滑动两个墩柱上,而上部结构的水平质量则全部加在固定墩柱上。结合工程实际,模型中上部结构质量取为 $1\ 168\ 250\ \text{kg}$ 。

为了探究弹性系梁对双柱墩墩柱及其基础地震反应的影响,需要建立无系梁和有系梁双柱墩模型进行比较分析,在实际工程中系梁双柱墩又可以分为墩梁刚接和墩梁铰接两种形式,故本文第一部分研究共建立了无系梁、墩梁刚接、墩梁铰接三种双柱墩模型。

考虑到桥墩柱高度和系梁数量的影响,对每种双柱墩又将墩柱高分为 $10\ \text{m}$ 、 $20\ \text{m}$ 、 $30\ \text{m}$ 三种,沿墩柱高每隔 $10\ \text{m}$ 设一道横系梁。对于有系梁的情况,因为系梁的刚度也会影响双柱墩的地震反应,因此对每一模型又将系梁分为 $0.6\ \text{m} \times 0.6\ \text{m}$ 、 $1.0\ \text{m} \times 1.0\ \text{m}$ 、 $1.4\ \text{m} \times 1.4\ \text{m}$ 三种尺寸,模型示意图见图 3。对墩柱高 $10\ \text{m}$,系梁截面为 $1.0\ \text{m} \times 1.0\ \text{m}$ 的情况,增加了系梁采用弹塑性单元的双柱墩模型,进行对比分析。只是考虑系梁弹塑性的模型中,系梁采用 OpenSees 中提供的纤维单元进行模拟。

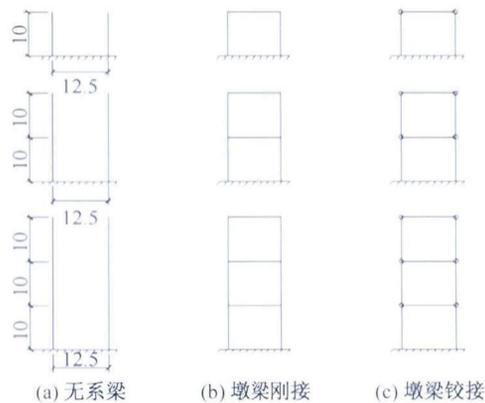


图3 模型示意图

Fig. 3 Model diagram

为了探究系梁屈服耗能对双柱墩墩柱及其基础地震反应的影响,需要建立弹塑性系梁双柱墩模型。因此在前述模型的基础上,对墩柱高10 m,系梁截面为1.0 m×1.0 m的情况,增加了系梁采用弹塑性单元的双柱墩模型,进行对比分析。

全部模型基于 OpenSees 平台建立,全部桥墩和弹性系梁均采用弹性单元。弹塑性系梁采用纤维单元来,以考虑系梁弹性—屈服—破坏的全过程。模型中,墩柱均采用 C40 混凝土,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,截面尺寸为 $1.8\text{ m}\times 1.8\text{ m}$,两墩柱间距 12.5 m 。系梁采用 C40 混凝土,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,截面对应采用前述三种尺寸。承台用 C40 混凝土,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,截面尺寸为 $19.1\text{ m}\times 6.6\text{ m}\times 2.0\text{ m}$,承台顶与两个墩柱底固定,桩基础通过六弹簧模拟,加在承台底部,其顺桥向、横桥向、竖向平动刚度分别为 $1.159\times 10^7\text{ N/m}$, $1.064\times 10^7\text{ N/m}$, $5.140\times 10^7\text{ N/m}$,绕顺桥向、横桥向、竖向转动刚度分别为 $3.163\times 10^9\text{ N}\cdot\text{m/rad}$, $1.130\times 10^9\text{ N}\cdot\text{m/rad}$, $9.173\times 10^8\text{ N}\cdot\text{m/rad}$ 。

2.2 地震动参数选取

所选地震加速度时程根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)^[4]中反应谱拟合而得,场地类型选一区IV类场地,特征周期 $T_g=0.65\text{ s}$ 。在第一部分研究中,峰值加速度取 0.1 g ,经验证此时系梁处于弹性范围内。在第二部分研究中,峰值加速度分别取 0.2 g , 0.3 g , 0.4 g , 0.5 g , 0.6 g 。通过钢筋应变判断,各种地震动输入下系梁皆处于弹塑性状态,以此研究系梁不同屈服程度下,墩柱和基础的地震反应。

3 弹性系梁对墩柱及基础地震反应的影响

采用基于 OpenSees 平台的时程分析方法对模型进行地震反应分析。根据所得结果,图4有代表性地绘制了墩柱高为20 m的各模型地震反应弯矩包络图。从弯矩图对比中可见,三种双柱墩的受力情况有很大差别。无系梁双柱墩全部地震荷载几乎都由固定墩柱承担。而系梁双柱墩的地震荷载由两墩柱共同承担,两墩柱的地震反应基本相同。在系梁双柱墩中,墩梁铰接时系梁上无弯矩分布只有墩柱受弯,而墩梁刚接时弯矩则由系梁和墩柱共同承担。

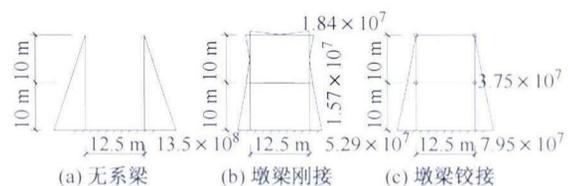


图4 地震作用下各模型弯矩包络图(单位: N·m)

Fig. 4 Comparison of the moment diagram of different

models subjected to earthquakes (Unit: N·m)

此时整个桥梁的最不利地震反应是墩柱底受弯。表1中列出了各模型在地震反应下的墩柱底最大弯矩,图5中将各个模型的墩柱底最大弯矩值在坐标图中表示出来。图表中,无系梁双柱墩给出的是固定墩柱的反应,系梁双柱墩给出的是一个墩柱的反应,文中后续所有的图表均是如此。

表1 各模型墩柱底最大弯矩值

Table 1 The maximum moment at the bottom of piers in different models

N·m

双柱墩类型	系梁尺寸	桥墩墩底最大弯矩		
		墩高 10 m	墩高 20 m	墩高 30 m
无系梁		6.15×10^7	1.34×10^8	2.05×10^8
墩梁刚接	$0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$	3.41×10^7	7.06×10^7	9.39×10^7
	$1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$	2.98×10^7	5.24×10^7	6.17×10^7
	$1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$	2.55×10^7	4.72×10^7	4.16×10^7
墩梁铰接	$0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$	3.41×10^7	7.69×10^7	1.15×10^8
	$1.0\text{ m}\times 1.0\text{ m}$	3.40×10^7	7.93×10^7	1.18×10^8
	$1.4\text{ m}\times 1.4\text{ m}$	3.42×10^7	8.17×10^7	1.22×10^8

由图表可见,加设系梁后,可以显著减小双柱墩墩柱底最大弯矩值,约为50%,且墩高越高折

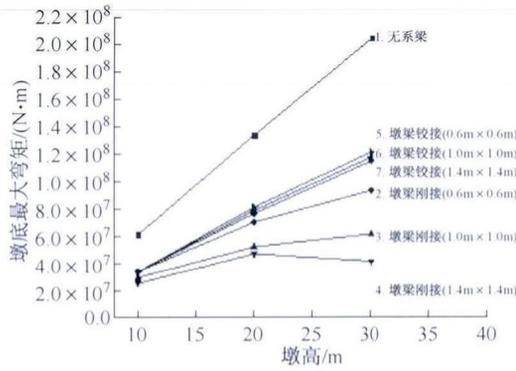


图 5 各模型墩柱底最大弯矩对比图

Fig. 5 Comparison of maximum moment at the bottom of piers in different models

减越多。同样系梁刚度下,采用系梁刚接的形式时墩柱底弯矩采用比系梁铰接时的更小一些。当系梁刚度变化时,系梁刚度越大,墩柱底弯矩越小,这种影响在系梁刚接时表现尤为明显,但对墩梁铰接双柱墩影响不大,这主要是由于在铰接情况下,系梁不传递弯矩而造成的。

在桥梁抗震设计中,基础的地震反应也常常是控制因素,因此表 2 中列出了各个模型的基础最大剪力和弯矩。从表中数据可以看出,增加系梁后的双柱墩基础地震反应比无系梁时要大,从抗震角度上说是不利的,但最多时也只增加约 10%,故在实际工程中影响不大。

表 2 各模型中承台底的地震反应
Table 2 The seismic response at the bottom of foundations in different models

双柱墩类型	系梁尺寸	承台底剪力/N			承台底弯矩/(N·m)		
		墩高 10 m	墩高 20 m	墩高 30 m	墩高 10 m	墩高 20 m	墩高 30 m
无系梁		9.95×10^6	1.09×10^7	1.16×10^7	7.98×10^7	1.61×10^8	2.43×10^8
墩梁刚接	0.6 m × 0.6 m	1.03×10^7	1.12×10^7	1.16×10^7	8.45×10^7	1.69×10^8	2.44×10^8
	1.0 m × 1.0 m	1.07×10^7	1.08×10^7	1.26×10^7	8.66×10^7	1.61×10^8	2.68×10^8
	1.4 m × 1.4 m	1.09×10^7	1.17×10^7	1.30×10^7	8.00×10^7	1.81×10^8	2.74×10^8
墩梁铰接	0.6 m × 0.6 m	1.02×10^7	1.15×10^7	1.17×10^7	8.25×10^7	1.74×10^8	2.51×10^8
	1.0 m × 1.0 m	1.04×10^7	1.19×10^7	1.20×10^7	8.43×10^7	1.79×10^8	2.57×10^8
	1.4 m × 1.4 m	1.05×10^7	1.22×10^7	1.23×10^7	8.54×10^7	1.85×10^8	2.66×10^8

4 系梁屈服耗能对墩柱及基础地震反应的影响

在双柱墩中,柔性横系梁通常只作为一种连接构件,所以系梁发生适度破坏对整个体系的正常工作影响不大。因此,可以考虑将双柱墩中的横系梁当成牺牲构件,在地震作用下,使其进入塑性状态,形成塑性铰,利用其屈服耗能,减小墩柱和基础的地震反应^[5]。

在所选各个地震动输入下,弹塑性系梁均已屈服。表 3 列出了系梁不同屈服程度下各模型墩柱的地震反应,图 6 将各个模型的墩柱底弯矩最大值绘制在坐标图中。由图表结果对比分析可见,考虑了系梁屈服的弹塑性模型较弹性模型而言,墩柱和基础受力并未有明显的减小,反而会随着系梁屈服程度的增加而加大,受力更加接近于墩梁铰接的情况。这是因为,虽然系梁屈服有一定的耗能作用,但是在屈服过程中,系梁与墩柱连

接处的刚度减小,使得双柱墩结构由墩梁刚接体系向墩梁铰接体系转化,显然后者占了主导作用。

表 3 各模型墩柱底最大受力
Table 3 The maximum force at the bottom of piers in different models

	地震峰值加速度	1.系梁刚接(弹性)	2.系梁铰接(弹性)	3.系梁刚接(弹塑性)	模型 3/模型 1	模型 3/模型 2
		(N·m)	(N·m)	(N·m)		
墩底弯矩/	0.2 g	3.25×10^7	3.86×10^7	3.62×10^7	111.3%	93.7%
	0.3 g	3.52×10^7	4.39×10^7	4.12×10^7	117.0%	93.7%
	0.4 g	3.89×10^7	4.93×10^7	4.67×10^7	120.2%	94.8%
	0.5 g	4.26×10^7	5.46×10^7	5.25×10^7	123.1%	96.1%
	0.6 g	4.72×10^7	5.99×10^7	5.84×10^7	123.7%	97.4%
墩底剪力/N	0.2 g	4.10×10^6	4.04×10^6	4.03×10^6	98.32%	99.73%
	0.3 g	4.44×10^6	4.59×10^6	4.52×10^6	101.65%	98.53%
	0.4 g	4.85×10^6	5.13×10^6	5.07×10^6	104.50%	98.77%
	0.5 g	5.31×10^6	5.67×10^6	5.65×10^6	106.29%	99.56%
	0.6 g	5.86×10^6	6.22×10^6	6.24×10^6	106.48%	100.29%

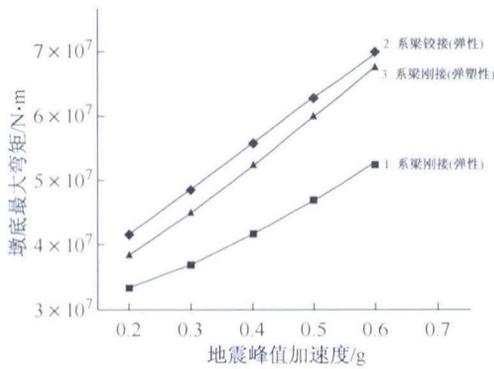


图6 各模型墩柱底弯矩最大值对比图

Fig. 6 Comparison of maximum moment at the bottom of piers in different models

由图表结果可见,考虑了系梁屈服的弹塑性模型较弹性模型而言,墩柱和基础受力并未有明显的减小,反而会随着系梁屈服程度的增加而加大,受力更加接近于墩梁铰接的情况。这是因为:虽然系梁屈服有一定的耗能作用,但是在屈服过程中,系梁与墩柱连接处的刚度减小,使得双柱墩结构由墩梁刚接体系向墩梁铰接体系转化,显然后者占了主导作用。

表4中列出系梁不同屈服程度下,双柱墩基础的地震反应值,由表中最后两列比值可见,系梁屈服后,其耗能作用会减小基础的地震反应,但都维持在10%以内,故在实际工程中影响不大。由以上分析知,利用系梁屈服耗能的效果并不明显。

表4 各模型承台底地震反应值

Table 4 The seismic response at the bottom of foundations in different models

	地震峰值加速度	1. 系梁刚接(弹性)	2. 系梁铰接(弹性)	3. 系梁刚接(弹塑性)	模型3/模型1	模型3/模型2
承台底剪力/N	0.2 g	1.18×10^7	1.16×10^7	1.10×10^7	92.9%	94.8%
	0.3 g	1.30×10^7	1.28×10^7	1.18×10^7	91.4%	92.6%
	0.4 g	1.41×10^7	1.40×10^7	1.32×10^7	93.8%	94.5%
	0.5 g	1.53×10^7	1.52×10^7	1.41×10^7	92.2%	92.4%
	0.6 g	1.67×10^7	1.64×10^7	1.51×10^7	90.2%	91.8%
承台底弯矩/(N·m)	0.2 g	9.43×10^7	9.49×10^7	8.85×10^7	93.8%	93.2%
	0.3 g	1.02×10^8	1.08×10^8	9.88×10^7	96.8%	91.7%
	0.4 g	1.13×10^8	1.21×10^8	1.10×10^8	97.9%	91.4%
	0.5 g	1.23×10^8	1.33×10^8	1.22×10^8	98.5%	91.2%
	0.6 g	1.34×10^8	1.46×10^8	1.33×10^8	99.3%	91.3%

5 结论

本文针对无盖梁双柱墩,分析了横系梁对墩

柱及基础地震反应的影响,结果表明:

(1) 横系梁使上部结构传递给桥墩的横向地震惯性力在两个墩柱间均匀分配,显著减小横向固定墩柱的地震反应。

(2) 增设横系梁,可以改变双柱墩的地震弯矩分布规律,显著减小墩柱底最大地震弯矩,系梁刚度越大,效果越明显。

(3) 系梁铰接与刚接相比,墩柱底最大弯矩略有增大,而且系梁刚度增大对地震反应影响很小。

(4) 增设横系梁,会使基础的地震反应略为增大。

(5) 横系梁的屈服耗能会使墩柱底的最大弯矩有所增加,但对基础抗震有利。

参考文献

- [1] 兰峰,王克海. 中小跨径双柱式高墩桥梁横系梁对抗震性能的影响[J]. 公路交通科技, 2011, 5: 92-97.
Lan Feng, Wang Kehai. Influence of collar beam of double column high-rise pier bridge with short span on seismic performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 5: 92-97. (in Chinese)
- [2] 尚维波,张春宇. 高墩刚构桥系梁抗震分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 1: 62-65.
Shang Weibo, Zhang Chunyu. Seismic research of tie beam of rigid frame bridge with high pier[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 1: 62-65. (in Chinese)
- [3] Priestley M J N, Seible F, Calvi C M. Seismic design and retrofit of bridge[M]. New York: Wiley & Sons, 1996.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 166—2011. 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. CJJ 166—2011. Code for seismic design of urban bridge[S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2011. (in Chinese)
- [5] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ye Aijun. Seismic design of bridge[M]. Second Edition. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)