

远场类谐和地震作用下双柱墩梁桥失效分析

颜桂云¹, 余勇胜¹, 袁宇琴¹, 李环辉², 张东鹏³

(1.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室 福建工程学院土木工程学院, 福建 福州 350118;
2.厦门中胤建筑工程有限公司, 福建 厦门 361000; 3.福建省方鑫建设集团有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 根据远场类谐和地震动、普通地震动反应谱与规范反应谱之间的包络关系, 选取输入结构的地震动加速度峰值; 建立双柱墩式抗震梁桥, 分析同峰值加速度的远场类谐和地震动和普通地震动作用下双柱墩式梁桥主梁、墩柱的地震响应等, 揭示远场类谐和地震动作用下双柱墩式梁桥的动力响应与失效机理; 采用SR模型模拟双柱墩抗震梁桥墩底的SSI效应, 分析远场类谐和地震动作用下梁桥地震响应变化规律。结果表明, 远场类谐和地震动对桥梁的地震响应为普通地震动作用的1.5倍以上, 其设防烈度至少应提高一度才能保证桥梁的安全; 墩-系梁连接点处弯矩随桩土刚度减小而增大, 有可能会引起桥墩弯曲破坏。

关键词: 远场类谐和地震动; 双柱墩; 失效机理; SSI效应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0307-08

Failure mechanism of double-column pier beam bridge under far-field harmonic-like ground motions

YAN Guiyun¹, YU Yongsheng¹, YUAN Yuqin¹, LI Huanhui², ZHANG Dongpeng³

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering,

School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Xiamen Zhongyin Construction Engineering Co., Ltd., Xiamen 361000, China;

3. Fujian Provincial Fangxin Construction Group Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: According to the envelope relationship between the code response spectrum and the far-field harmonic-like and ordinary seismic response spectrum, the peak value of seismic acceleration of input structures was selected. A double-column pier seismic beam bridge was established and analysis was made of the seismic response of the main beam and pier-column of the double-column pier beam bridge under the action of far-field harmonic-like and ordinary ground motions with the same peak acceleration, so as to reveal the dynamic response and failure mechanism of double-column pier beam bridge under the action of far-field harmonic-like ground motions. The SSI effect of the bottom of the two-pillar anti-seismic beam bridge was simulated by the SR model, and the change law of seismic response of the bridge was analyzed under the effect of far-field harmonic-like ground motions. Results show that the seismic response of the far-field harmonic-like ground motions to the bridge is more than 1.5 times that of the ordinary earthquake, so the fortification intensity needs to be at least one degree higher than the ordinary earthquake to ensure the safety of the bridge. The bending moment at pier-beam connection point increases with the decrease of pile-soil stiffness, which may cause bending failure of the pier.

Keywords: far-field harmonic-like ground motions; double-column piers; failure mechanism; SSI effect

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778149); 福建省住房和城乡建设厅科技开发项目(2021-K-23)

第一作者简介: 颜桂云(1974—), 男, 湖南衡山人, 教授, 博士, 研究方向: 装配式结构、减震隔震与工程应用。

远场类谐和地震动是一种特殊类型地震动,具有持时长、低频成分丰富等特点,地震动后期包含多个类似谐和振动的脉冲循环,其卓越周期一般在几秒到十几秒的范围内^[1]。早在 1954 年美国 Dixie valley 地震,距震中 300 km 的贮水池产生“共振”效应发生破坏;1999 年台湾地震中因盆地效应导致距震中 150 km 的十几层高楼破坏;震害表明,远场地震动对长周期结构的破坏极大。

许立英等^[2]研究表明长周期地震动的反应谱衰减较慢,长周期段内谱值明显大于普通地震动,能量集中于低频部分。徐龙军^[3]研究表明远场类谐和地震动的加速度幅值小于时程加速度幅值,但其规准谱峰值大,易产生“共振”效应,脉冲循环的相位角和周期是影响脉冲幅值、频谱的主要因素;邱志刚等^[4]研究表明地震动加速度脉冲峰值达到一定水平,有可能使结构瞬间破坏。魏晓龙等^[5]研究表明远场谐和型地震动对自振周期 2~4 s 的斜拉桥的地震响应为普通地震动的 2 倍以上,位移响应达到 18 倍,使塔底产生严重的塑性变形。

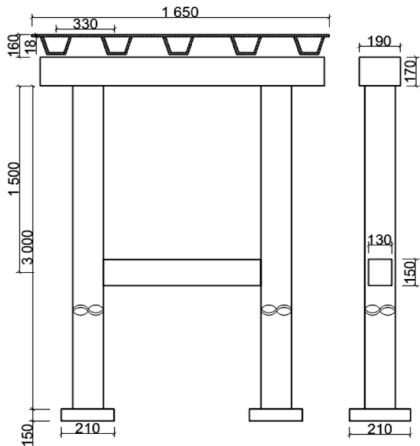
由于远场类谐和地震动产生于距离震源较远的厚冲击层盆地或平原,实际分析时不能忽略桩-土作用的影响。臧明明等^[6]研究表明长周期地震动下桥梁基底反力和主要截面的内力均大于普通地震动下的结果,地震动的行波效应对结构的影响较大,在抗震设计中应充分考虑;段浪等^[7]研究表明长周期地震动作用下的部分软弱土层产生液化丧失承载能力,软土地基上的大跨斜拉桥在长周期地震动下的地震响应明显大于普通地震动作用下的响应;因此分析远场类谐和地震动对结构的地震响应时需考虑桩-土作用。

双柱墩式梁桥机构造型简单,施工方便,有良好的空间通过性,在我国的各类场地上广泛应用,具有代表性。因此本文研究双柱墩梁桥在远场类谐和地震动下的地震响应,以及考虑场地作用 (SSI 效应) 下的梁桥响应。

1 双柱墩抗震梁桥结构模型

以规则连续箱梁桥为背景,梁桥横截面总体布置如图 1(a),桥长为 4×30 m,桥面由 5 片箱梁组成,宽 16.5 m,主梁采用混凝土 C50;盖梁尺寸为 13.5 m×1.9 m×1.7 m;双柱墩为圆形截面,墩身直径 1.7 m,墩高 30 m,墩柱中心处设置一道横系

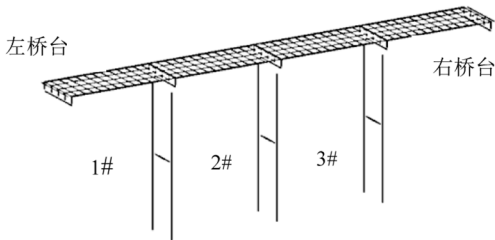
梁,尺寸为 1.5 m×1.3 m,,盖梁和墩柱为 C40,横系梁和桩基为 C30;墩身钢筋采用 HRB335,纵筋直径为 25 mm,钢筋数量为 36 根,箍筋直径为 12 mm,间隔为 0.1 m;桥墩桩基为正方形,长 2.1 m,高 1.5 m;主梁两端布置桥台,共布置 25 个支座,支座编号布置如图 1(b) 所示,13 号布置为固定支座,双箭头代表单向活动支座,四箭头代表双向活动支座。采用 Midas Civil 软件建立双柱墩梁桥的有限元模型,如图 1(c) 所示。梁体、墩柱、横系梁等均采用梁单元模拟,将主梁视为弹性状态,仅模拟其刚度和质量的分布;盖梁与双柱式桥墩、主梁节点与主梁底部节点均采用弹性连接中的刚性连接进行耦合;桥梁伸缩缝采用间隙单元模拟,初始间隙为 0.1 m;支座采用弹性连接模拟,通过改变支座的刚度来模拟固定、单向和双向活动支座。



(a) 梁桥横截面总体布置图 (单位: cm)

1	6	11	16	21
2	7	12	17	22
3	8	13	18	23
4	9	14	19	24
5	10	15	20	25

(b) 支座编号布置图



(c) 有限元力学模型

图 1 桥梁概况与力学模型

Fig.1 Bridge overview and mechanical model

2 地震动输入

从太平洋地震工程中心分别取 3 条远场类谐

和地震动和 3 条普通地震动,参数见表 1;据统计,远场类谐和地震动加速度峰值范围 $0.2\sim 1\text{ m/s}^2$,选取结构地震动加速度 a_p 峰值为 0.5 和 1 m/s^2 。

表 1 选用地震动参数							
Tab.1 Selected ground motion parameters							
类型	台站	震级	$a_p/(m\cdot s^{-1})$	$v_p/(m\cdot s^{-1})$	d_p/m	v_p/a_p	T_p/s
远场类谐和地震动	CHY032N	6.20	0.041	0.014	0.012	0.341	5.56
	ILA005-V	7.62	0.026	0.011	0.010	0.430	9.68
	ILA041-N	7.62	0.063	0.022	0.018	0.349	4.92
普通地震动	EL Centro	6.950	0.281	0.032	0.009	0.110	/
	SFO	6.190	0.048	0.003	0.001	0.060	/
	Taft	7.360	0.159	0.015	0.006	0.100	/

注: a_p 为加速度峰值; v_p 为速度峰值; d_p 为位移峰值; T_p 为脉冲周期。

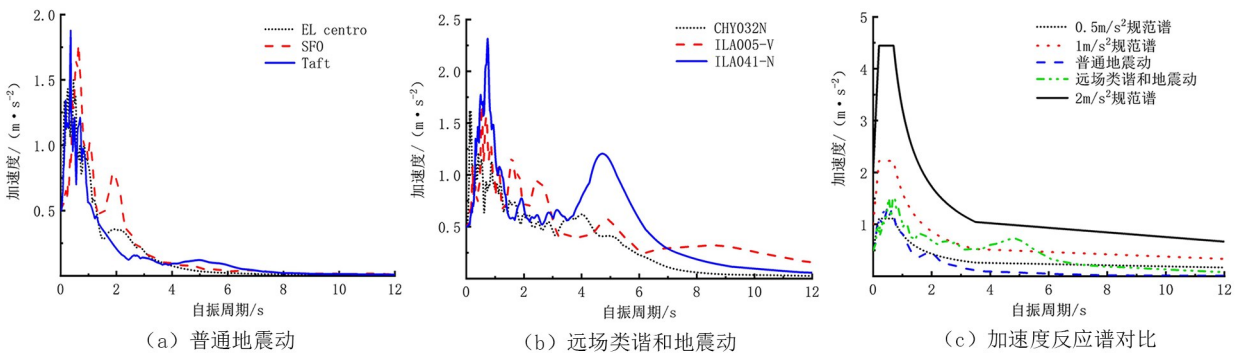


图 2 地震动加速度谱

Fig.2 Ground motion acceleration spectrum

从图 2(c) 可知:同峰值加速度的规范反应谱仅能将普通地震动反应谱完全包络进去,由于远场类谐和地震动加速度反应谱在结构周期 $4\sim 6\text{ s}$ 内有二次峰值,仅当规范反应谱峰值加速度为 2 m/s^2 时才能将其完全包络,基于此,添加 2 和 3 m/s^2 普通地震动两种输入工况。根据 JTG/TB02-01-2008《公路桥梁设计规范》:地震动输入为纵、横两方向,纵向地震系数取 1 ,横向地震系数取 0.85 ,对结构进行时程分析。

3 地震响应

3.1 主梁地震响应

图 3 为 6 种工况下主梁位移图,其中工况名称由地震动类型和峰值加速度组成,如:“普- 0.05 ”表示峰值加速度 0.5 m/s^2 的普通地震动,

“远- 0.05 ”表示峰值加速度 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动。由图 3 可知,当峰值加速度为 0.5 m/s^2 时,远场类谐和地震动下主梁纵向位移为普通地震动下的 2 倍以上,峰值加速度增大时,两类地震动下的主梁纵向位移相差倍数增大,但不超过 3 倍;峰值加速度 1 m/s^2 的远场类谐和地震动和 2 m/s^2 的普通地震动下,主梁纵向位移超过 10 cm ,超过伸缩缝设置宽度,会引起主梁与桥台的碰撞。峰值加速度 $0.5、1\text{ m/s}^2$ 的普通地震动下主梁横向位移小于 0.3 cm ,纵向单向活动支座处于弹性状态; 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动下主梁横向位移超过 0.3 cm ,支座发生横向位移破坏,单向活动支座转变为双向活动支座,增加主梁横向位移。

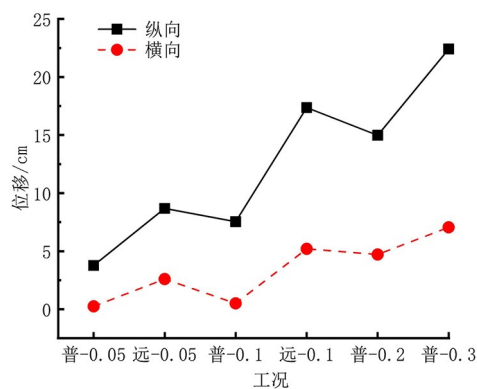


图 3 主梁位移图

Fig.3 Main beam displacement diagram

3.2 桥墩地震响应

3.2.1 墩底地震响应

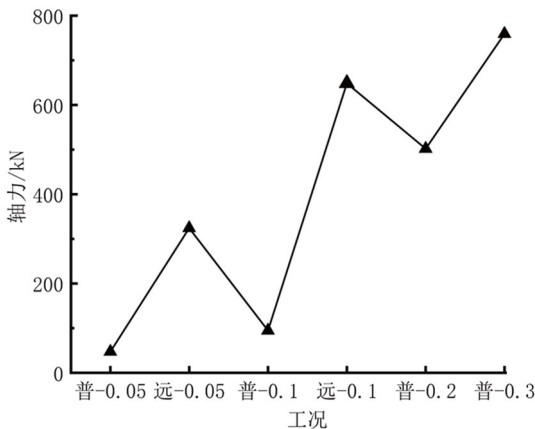
图 4 为不同峰值加速度的两类地震动下中墩墩底地震响应对比图。由图 4(a) 可知:峰值加速度为 0.5 m/s^2 时远场类谐和地震动下墩底轴力是普通地震动的 7 倍,表明远场类谐和地震动对墩底轴力的影响更大。由图 4(b) 和图 4(c) 可知:峰值加速度为 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震下墩底横向的地震响应仅为普通地震动的 1.15 倍,而墩底纵向地震响应为普通地震动的 1.5 倍,说明远场类谐和地震动引起的墩底纵向地震响应比墩底横向地震响应的影响更大,更易使桥墩进入塑性状态。因此,在远场类谐和地震动下桥梁结构的抗震设防烈度至少应比普通地震动下提高一个度才能保证桥梁的安全。

3.2.2 墩-系梁连接点地震响应

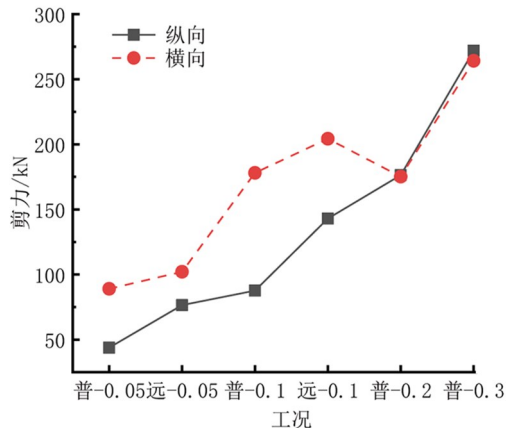
图 5 分别为墩-系梁连接点剪力、弯矩大小对比图,可得:墩-系梁连接点纵、横向地震响应变化趋势与墩底响应基本一致,峰值加速度 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动下墩-系梁连接点横向剪力和弯矩分别为普通地震动的 1.5 倍和 1.2 倍;远场类谐和地震动下墩-系梁连接点纵向弯矩为普通地震动下的 7 倍,说明远场类谐和地震动对桥墩墩-系梁连接点纵向弯矩响应更为不利。

3.2.3 系梁端点地震响应

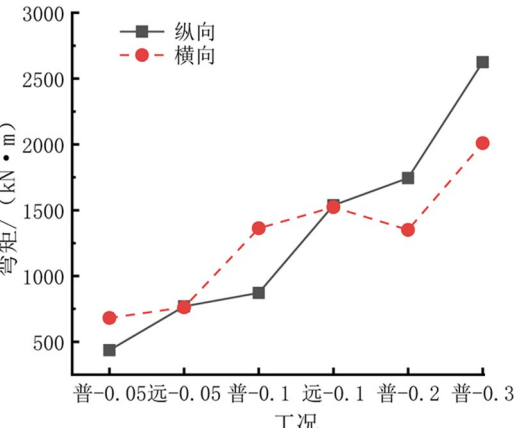
图 6 为 6 种地震动工况下系梁端部地震响应。由于 6 类地震工况下系梁端点轴力和纵向地震响应较小,不会引起系梁的破坏,在本节中不罗列出来。由图 6 可知:系梁端点横向地震响应与墩-系梁连接点横向剪力变化规律一致;峰值加速度 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动下系梁端点



(a) 轴力



(b) 剪力



(c) 弯矩

图 4 墩底地震响应

Fig.4 Seismic response of the pier bottom

地震响应为普通地震动下的 2 倍左右,说明远场类谐和地震动对系梁端点的地震响应增长速率比普通地震动的大,对系梁端点产生更不利的影响;对比桥墩上各个节点的地震响应可知系梁端点的横向地震响应最大,因此系梁端点最先发生塑性耗能并产生破坏,从而降低桥墩的承载能力。

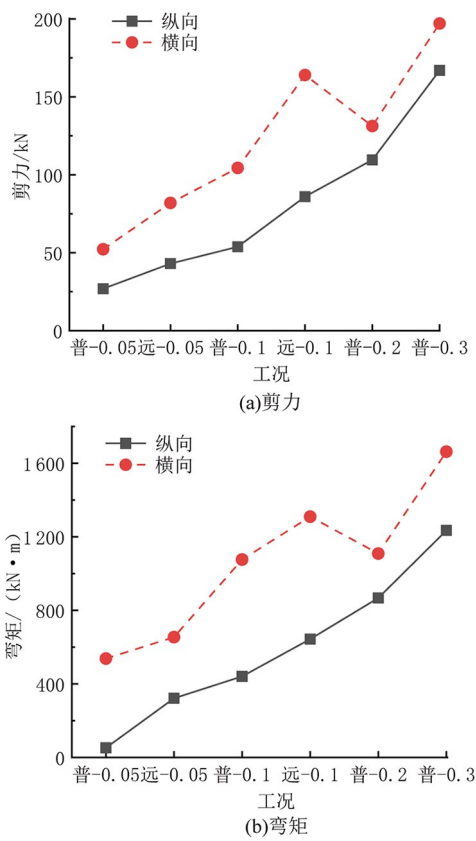


图 5 墩-系梁连接点地震响应

Fig.5 Seismic response of pier-tie beam connection point

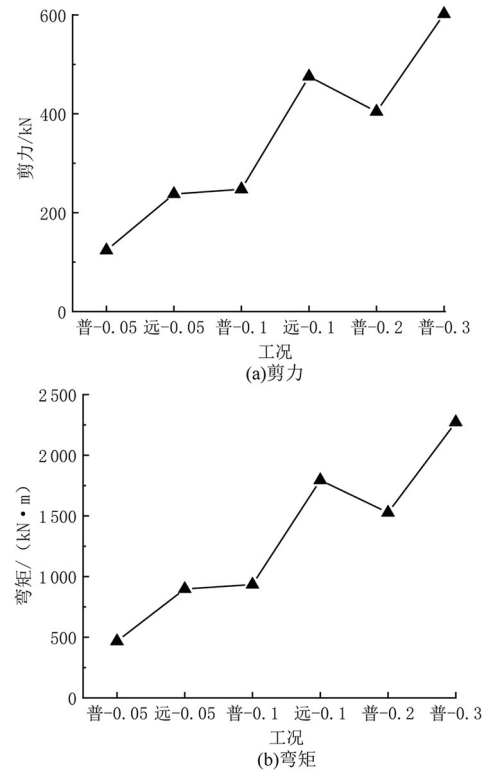


图 6 横桥向系梁端点响应

Fig.6 Response of horizontal tie beam end

3.2.4 墩顶位移

图 7 为中墩墩顶位移对比图,由图 7 可知:两类地震动下墩顶纵、横向位移的变化规律一致;峰值加速度 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动下墩顶位移为普通地震动的 2 倍以上;且纵向墩顶位移比横向墩顶位移大将近 20%。

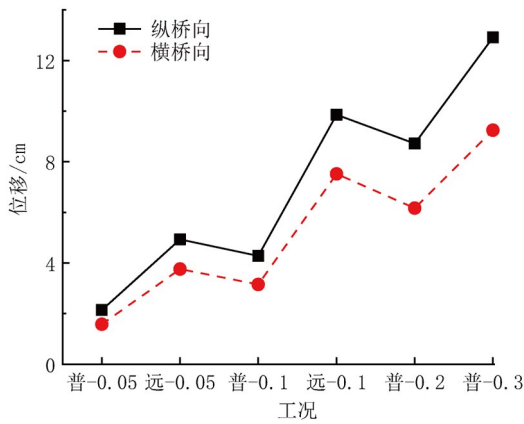


图 7 墩顶位移

Fig.7 Displacement of pier-top

3.3 支座地震响应

图 8 为支座在 6 种地震动工况下,支座地震响应对比图。由图 8(a)可知:峰值加速度 1 m/s^2 的远场类谐和地震动和 3 m/s^2 的普通地震动下桥台支座纵向位移超过支座纵向临界位移 10 cm,支座发生位移破坏;支座纵向位移由大到小为:桥台支座>边墩支座>中墩(固定墩)支座,固定支座位移为零,边墩支座位移大小处于中墩和桥台支座位移之间,是墩身位移与主梁位移互相抵消的结果。由图 8(b)可知:桥台、边墩的中心支座为纵向单向活动支座,地震下支座横向位移为零, $0.5, 1 \text{ m/s}^2$ 的普通地震动下桥台支座横向位移小于 3 mm,此时支座处于弹性状态,其他 4 种工况下桥台单向活动支座横向位移远大于 3 mm,此时支座发生位移破坏,转变为双向活动支座抵抗地震力; 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动下桥台双向活动支座位移处于弹性范围内(小于 4 cm),支座状态良好,峰值加速度增大时,桥台双向活动支座发生位移破坏。由图 8(c)可知:6 种地震工况下支座均处于弹性状态;普通地震动下中墩固定支座纵向剪力与桥台支座纵向剪力相当;远场类谐和地震动下桥台支座纵向剪力为中墩固定支座剪力的 2 倍以上,随着峰值加速度增大,远场

类谐和地震动引起的桥台支座纵向剪力越大,说明远场类谐和地震动对桥台支座纵向剪力产生更不利的影响。由图 8(d)可知:支座横向地震响应主

要由纵向单向活动支座和固定支座承担,桥台单向活动支座响应最大,同峰值加速度的远场类谐和地震动下支座横向剪力比普通地震动下的大。

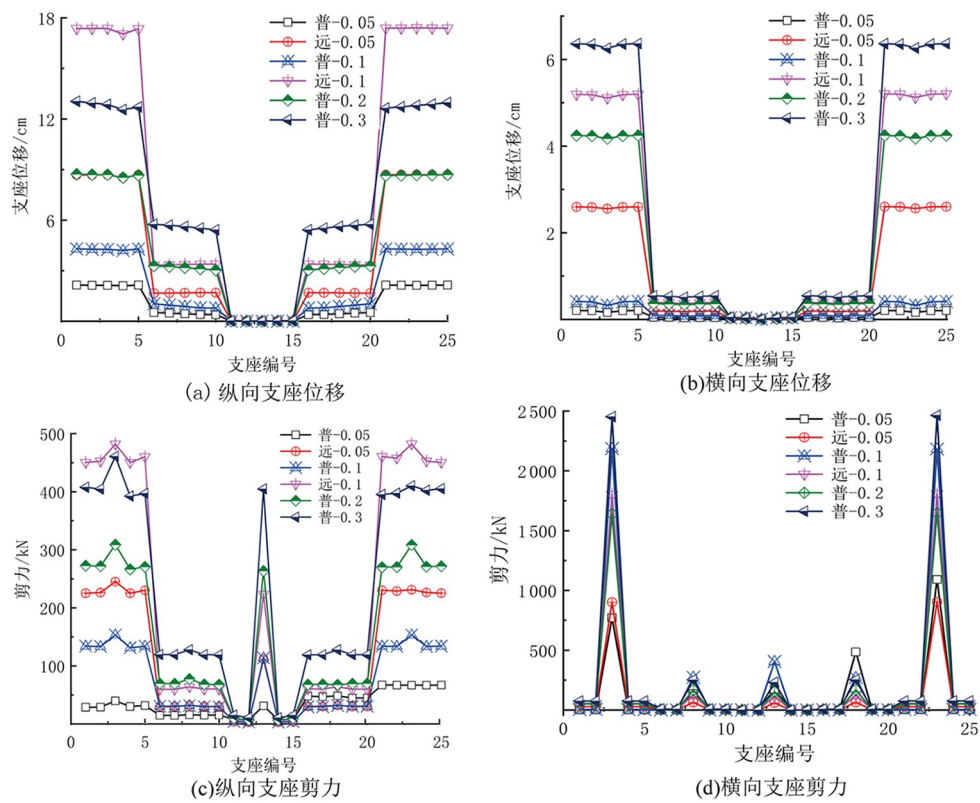


图 8 支座地震响应
Fig.8 Seismic response of the foot

4 考虑 SSI 效应的类谐和地震动响应分析

由于远场类谐和地震动产地的特殊性,实际分析时不能完全忽略桩-土作用的影响。模拟场地土类型分别为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类,并插值 3 个刚度。刚度 1、2 分别为Ⅱ、Ⅲ类场地刚度插值的 1/3、2/3 处;刚度 3 为Ⅲ类和Ⅳ类场地刚度插值的 1/2

处,场地刚度计算如文献[8],得到表 2。输入结构地震动为 0.5 m/s^2 的远场类谐和地震动,分别为 CHY032-N、ILA005-V 和 ILA041-N。经计算可知:在 6 类不同桩-土刚度共同作用下,梁桥的自振周期如表 3 所示,表明桥梁在不同场地土上结构的自振周期相差很大,且随着场地土刚度的变小,结构的自振周期增大。

表 2 桩-土作用刚度系数表
Tab.2 Stiffness coefficient of pile-soil action

场地类别	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平动刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	平动阻尼 系数	转动刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	转动阻尼 系数
Ⅱ类	280	2 000	1.449×10^6	6.668×10^6	3.340×10^6	3.376×10^6
刚度 1	/	/	1.151×10^6	5.106×10^6	2.333×10^6	2.334×10^6
刚度 2	/	/	5.753×10^6	2.553×10^6	1.166×10^6	1.167×10^6
Ⅲ类	180	1 900	2.769×10^5	9.913×10^5	1.596×10^5	1.255×10^5
刚度 3	/	/	1.410×10^5	6.980×10^5	9.425×10^5	8.836×10^4
Ⅳ类	100	1 700	5.027×10^3	4.048×10^5	2.891×10^4	5.125×10^5

表 3 梁桥自振周期
Tab.3 Self-vibration period of the beam bridge

场地类型	固定	Ⅱ类	刚度 1	刚度 2	Ⅲ类	刚度 3	Ⅳ类
第一周期	1.786	2.136	2.157	2.211	2.472	2.609	2.954
第三周期	1.319	1.371	1.373	1.379	1.406	1.421	1.458

4.1 墩底地震响应

图 9 为远场类谐和地震动下墩底地震响应。

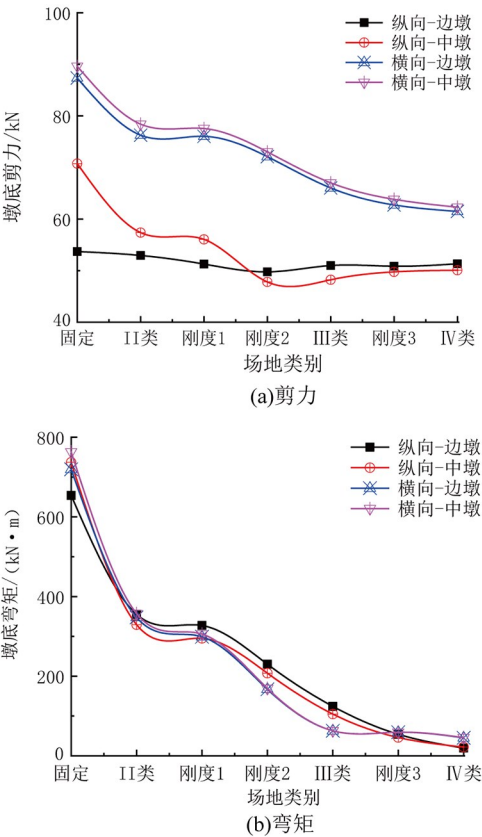


图 9 墩底地震响应

Fig.9 Seismic response of the pier bottom

由图 9(a)可知:墩底横向剪力和中墩纵向剪力随着桩-土刚度系数减小呈现下降-平缓-下降的趋势,但纵向剪力下降的幅度较横向的大;边墩纵向剪力几乎不发生改变;墩底横向剪力在Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类场地作用下较桩-土固定分别减小 12.5%、25.2%、30.5%,中墩纵向剪力分别减小 18.9%、31.8%、29.2%;考虑 SSI 效应后墩底剪力减小,纵、横向墩底剪力相差越小,固定墩的作用减小。由图 9(b)可知:墩底弯矩变化规律与墩底横向剪力一致,但墩底弯矩的下降速率远大于墩底横向

剪力的下降速率;考虑 SSI 效应后墩底受纵向弯矩较横向弯矩大,墩底受力性能发生改变。综上所述,桩-土刚度系数减小会使墩底地震响应减小,需注意墩底是否发生位移破坏。

4.2 墩-系梁连接点地震响应

图 10 为远场类谐和地震动下墩-系梁连接点

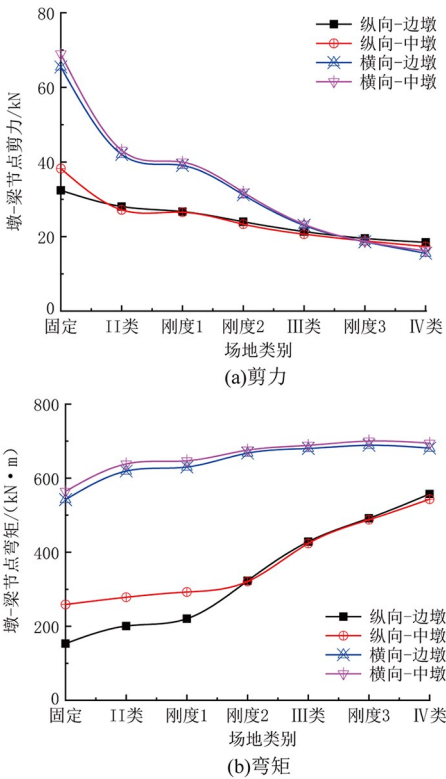


图 10 墩-系梁连接点地震响应

Fig.10 Seismic response of pier-tie beam connection point

地震响应。由图 10(a)可知:墩-系梁连接点剪力随桩-土刚度系数减小而下降,且横向剪力的衰减速率明显大于纵向剪力衰减速率;考虑 SSI 效应后纵、横向剪力间的差距随桩-土刚度系数减小而减小,在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类场地下,纵向剪力较桩-土固定时减小 29.0%、46.0%、54.7%,横向剪力减小 37.4%、66.2%、76.6%。由图 10(b)可知:墩-系梁连接点弯矩随桩-土刚度系数减小而增大;

边墩、中墩横向弯矩相差较小,且增长速率一致,考虑 SSI 效应后弯矩增长率不超过 26%;桩-土固定时中墩纵向弯矩为边墩的 1.4 倍,考虑 SSI 效应后两者差距减小;在 II、III、IV 类场地地下,中墩纵向弯矩增加 7.6%、63.8%、109.9%,边墩纵向弯矩增加-31.0%、179.7%、264.0%。综上所述:考虑 SSI 效应后,墩-系梁连接点的纵、横向响应和各墩柱之间的地震响应差距越来越小,表明考虑 SSI 效应后会弱化固定墩作用。

4.3 系梁端点地震响应

图 11 为远场类谐和地震动下系梁端点的地震响应,由图 11 可知,系梁端点地震响应随桩-土刚度系数减小而持续减小,中墩、边墩响应衰减速率相同;在 II、III、IV 类场地作用下,系梁地震响应减小 25.8%、45.4%、50.7%。

5 结论

1) 加速度峰值为 0.5 m/s^2 的规范反应谱不能将同峰值加速度的远场类谐和地震动反应谱完全包络进去,表明远场类谐和地震动对周期较长结构的地震响应要比普通地震动大。

2) 同峰值加速度的远场类谐和地震动对桥墩产生的纵、横向地震响应为普通地震动下的 1.5 倍以上,对桥梁进行抗震设防时,远场类谐和地震动需比普通地震动的设防高一个度才能更大程度保证桥梁安全。

3) 由于桥台固定,在抗震梁桥中桥台支座地震响应最大,需采用抗震能力强的支座抵抗地震力。

参考文献:

- [1] 韩建平,石金辉.特殊长周期地震动作用下超限高层建筑结构地震响应分析[J].建筑结构,2017,47(5):72-76.
- [2] 许立英,刘宁,吴应雄.基于抗震分析的长周期地震动的界定与选取[J].地震研究,2019,42(4):569-578,651.
- [3] 徐龙军,胡进军,谢礼立.特殊长周期地震动的参数特征研究[J].地震工程与工程振动,2008,28(6):20-27.
- [4] 邱志刚,罗奇峰.脉冲型地震动的潜在破坏能分析[J].土木工程学报,2014,47(12):56-63.
- [5] 魏晓龙,徐路勤,乔万芝,等.长周期地震动对独塔宽幅斜拉桥地震响应的影响[J].工程抗震与加固改造,2017,39(4):92-100,152.
- [6] 臧明明,陈清军.长周期地震动的场地效应与大跨桥梁结构的动力响应分析[J].结构工程师,2010,26(1):118-125.
- [7] 段浪,赵荣欣.考虑土-结构相互作用的大跨度斜拉桥长周期地震反应分析[J].公路交通科技,2012,29(5):76-82.
- [8] 苏毅,李静珠,何强,等.土与结构相互作用对层间隔震结构影响的参数分析[J].工业建筑,2015,45(11):9-13,34.

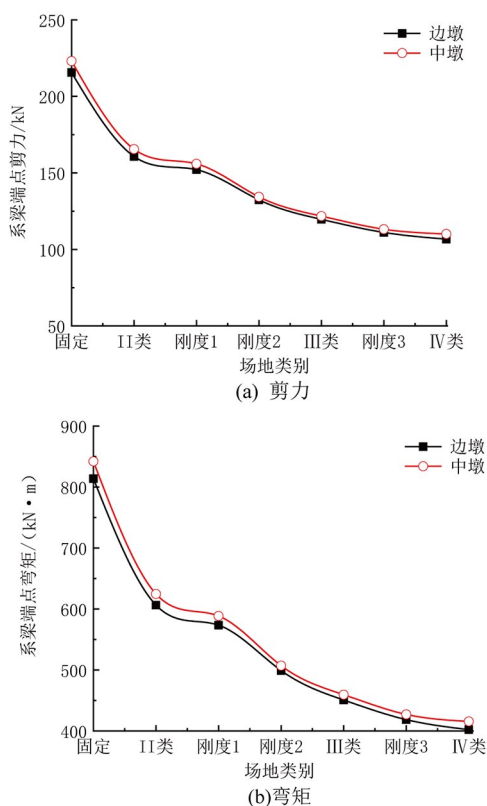


图 11 系梁端点地震响应

Fig.11 Seismic response of tie beam end

4) 考虑 SSI 效应后墩底地震响应、墩-系梁连接点剪力和系梁端点地震响应都随着桩-土刚度的减小呈下降趋势;墩-系梁连接点弯矩随桩-土刚度系数的减小而增大;需注意墩-系梁连接点发生弯曲破坏。