

文章编号: 1000-4750(2015)07-0038-09

# 近断层地震动作用下多塔悬索桥的地震反应分析

丁幼亮<sup>1</sup>, 谢辉<sup>1</sup>, 耿方方<sup>1,3</sup>, 宋建永<sup>2</sup>, 李万恒<sup>2</sup>, 王玉倩<sup>2</sup>

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096;

2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 3. 东南大学成贤学院, 南京 210088)

**摘要:** 以泰州大桥为原型研究了多塔悬索桥近断层地震动作用下的地震反应特点, 在此基础上以近断层地震动反应幅值与普通地震动反应幅值的比值作为放大系数, 进一步研究了速度脉冲效应和场地土效应对桥塔和主梁地震反应的影响规律。分析结果表明: 1) 近断层地震动作用下多塔悬索桥位移和内力的分布规律与普通地震动基本相同; 2) 纵向+竖向地震输入下坚硬场地上近断层地震动对主梁竖向位移的影响最大, 对主梁竖向弯矩的影响次之, 对桥塔纵向位移和纵向剪力的影响相对较小。当地土由硬变软时, 边塔的地震反应增幅明显, 中塔次之, 主梁相对较小; 3) 横向+竖向地震输入下坚硬场地条件下近断层地震动对中塔横向位移的影响最大, 对主梁竖向位移的影响次之, 对桥塔横向剪力和主梁横向弯矩的影响相对较小。当地土由硬变软时, 主梁的横向弯矩增幅明显, 桥塔次之, 主梁竖向位移相对较小; 4) 在近断层地震动速度脉冲特性以及场地土固有周期特性的共同作用下多塔悬索桥边塔、中塔以及主梁的地震反应存在明显差异, 在抗震设计时需要引起重视。

**关键词:** 多塔悬索桥; 近断层地震动; 时程分析; 地震反应; 场地土效应

中图分类号: TU448.25

文献标志码: A

doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0269

## SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF A MULTI-TOWER SUSPENSION BRIDGE SUBJECTED TO NEAR-FAULT GROUND MOTIONS

DING You-liang<sup>1</sup>, XIE Hui<sup>1</sup>, GENG Fang-fang<sup>1,3</sup>, SONG Jian-yong<sup>2</sup>, LI Wan-heng<sup>2</sup>, WANG Yu-qian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Chengxian College, Southeast University, Nanjing 210088, China)

**Abstract:** The characteristics of seismic responses of a multi-tower suspension bridge subjected to near-fault ground motions are investigated with regard to the prototype of Taizhou bridge. Furthermore, the influences of velocity pulse effect and site effect on the seismic responses of the bridge towers and girders are investigated based on the amplification coefficient which is the ratio of seismic response amplitudes under the near-fault ground motions to seismic response amplitudes under the normal ground motions. The analysis results reveal that: 1) the distribution characteristics of displacements and internal forces in the multi-tower suspension bridge under near-fault ground motions are basically the same as those under normal ground motions; 2) under longitudinal plus vertical seismic input conditions, the vertical displacement of the girder is significantly affected by near-fault ground motions on a hard site. The vertical moment of the girder is medium, and the longitudinal displacement and shearing force of the bridge towers are relatively small. The increase amplitudes of seismic responses

收稿日期: 2013-03-26; 修改日期: 2015-01-21

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2015CB060000); 国家科技支撑计划项目(2014BAG07B01); 国家自然科学基金项目重点项目(51438002); 江苏省“六大人才高峰”项目(1105000268)

通讯作者: 丁幼亮(1979—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士, 博导, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: civilding@163.com).

作者简介: 谢辉(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 从事结构振动控制研究(E-mail: 570819734@qq.com).

耿方方(1983—), 女, 四川绵阳人, 博士生, 从事结构振动控制研究(E-mail: gengfangfang\_1983@163.com);

宋建永(1977—), 男, 内蒙古人, 研究员, 博士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: 623151019@163.com);

李万恒(1972—), 男, 山东人, 研究员, 硕士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: wh.li@rioh.cn);

王玉倩(1984—), 男, 陕西人, 助理研究员, 博士, 从事桥梁结构安全与防灾减灾研究(E-mail: yuqian.wang@rioh.cn).

decrease in turn in the side-tower, in the middle-tower, and in the girder, when site condition turns from hard to soft; 3) under transverse plus vertical seismic input conditions, the transverse displacement of the middle-tower is significantly affected by near-fault ground motions on a hard site, the vertical displacement of the girder is medium, and the transverse shear of the tower as well as the transverse moment of the girder are relatively small. The increase amplitudes of seismic responses decrease in turn in girder's transverse moment, tower's response, and girder's vertical displacement, when the site condition turns from hard to soft; 4) there are significant differences in the seismic responses of the side-tower, of the middle-tower, and of the girder, in multi-tower suspension bridges under the combined actions of velocity pulse effect and site effect, which should be paid an enough attention in the seismic design.

**Key words:** multi-tower suspension bridge; near-fault ground motion; time history analysis; seismic response; site effect

近年来,多塔悬索桥方案在实现大型跨海、跨江工程中备受青睐,与传统的双塔悬索桥及自锚式悬索桥相比,多塔悬索桥主跨跨径大大减小,主缆的拉力及锚锭的规模明显降低,经济性卓越,综合性能极具竞争力。但多塔悬索桥由于存在中塔效应,结构的静、动力特性可能出现质的不同<sup>[1]</sup>。阮静、马如进<sup>[2]</sup>研究了三塔双跨悬索桥在成桥状态和施工状态的动力特性。邓育林等<sup>[3-4]</sup>以泰州长江公路大桥为研究对象,开展了普通地震动作用下多塔悬索桥的抗震性能研究,然而对多塔悬索桥在近断层地震动作用下的抗震性能并没有专门研究。

近十余年来通过对近断层地震动记录的不断积累和分析,为土木结构的近断层地震动作用研究奠定了基础,并且针对高层建筑、大跨桥梁等柔性结构的近断层地震反应研究逐步深入<sup>[5-9]</sup>。Adanur和Cavdar等<sup>[5-6]</sup>研究了大跨悬索桥在近断层地震动作用下的非线性动力反应特点。研究结果表明:近断层地震动的速度脉冲对于悬索桥的位移地震反应和弯矩、剪力、轴力等内力地震反应影响显著。多塔悬索桥由于其体系刚度不足,结构柔性更大,近断层地震动的低频共振效应问题更为突出。目前我们对于近断层地震动的速度脉冲效应以及场地土效应的共同作用对多塔悬索桥桥塔和主梁等关键构件的影响特点和影响程度缺乏足够的认识。为此,本文以泰州大桥为原型研究了多塔悬索桥近断层地震动作用下的地震反应特点,在此基础上以近断层地震动反应幅值与普通地震动反应幅值的比值作为放大系数,进一步研究了速度脉冲效应和场地土效应对边塔、中塔和主梁地震反应的影响规律,为多塔悬索桥抗震设计提供参考价值。

## 1 地震波选取

### 1.1 本文采用的地震动记录

近断层地震动具有方向性效应和永久地面位移效应,其速度时程和位移时程具有大幅值、长周期、短持时的特点。速度脉冲是近断层地震动的主要特征,1992年Landers地震、1994年Northridge地震、1995年Kobe地震以及1999年Kocaeli地震和Chi-Chi地震都观测到带有速度脉冲的近断层地震动<sup>[10-11]</sup>。为了研究近断层地震动作用下多塔悬索桥结构地震反应特点,本文从美国太平洋地震工程研究中心地震记录库中分别对应于坚硬场地(A类场地)和软土地场(C类场地)各选择7条近断层地震波,如表1所示。同时,为了对比分析近断层地震动和普通地震动作用下多塔悬索桥地震反应的差异,另外对应于2种场地特性各选择7条普通地震动记录,如表2所示。

表1 实际近断层地震波记录

Table 1 Records of near-fault ground motions

编号	地震名称	记录台站	场地分类	震中距/km
1	NORTHR	24207Pacoi-ma Dam	A	8.00
2	Landers	LCN275	A	1.10
3	Chi-Chi	TCU046-W	A	14.34
4	Kocaeli,Turkey	DZC000	A	17.00
5	Loma Prieta	LGP000	A	6.10
6	Chi-Chi	HWA056	A	48.80
7	Cape Mendocino	CPM090	A	8.50
8	Chi-Chi	TCU052-N	C	0.24
9	Chi-Chi	TCU068-N	C	0.24
10	Chi-Chi	TCU102-W	C	1.79
11	Chi-Chi	CHY101-N	C	11.10
12	Erzincan	ERZ-NS	C	2.00
13	Northridge	JEN022	C	6.20
14	Imperial Valley	H-E04230	C	4.20

表 2 实际普通地震波记录

Table 2 Records of normal ground motions

编号	地震名称	记录台站	场地分类	震中距/km
1	Chi-Chi	ENA	A	77.75
2	Northridge	BAL180	A	71.50
3	Chi-Chi	ILA050-W	A	77.75
4	Chi-Chi	NSK-N	A	64.50
5	Northridge	WWJ090	A	68.40
6	Loma Prieta	MCH090	A	44.80
7	N. Palm Springs	H01090	A	63.30
8	Chi-Chi	CHY014-N	C	41.49
9	Kern County	135 LA - Hollywood Stor Lot	C	120.50
10	Imperial Valley	EL-Centro180	C	8.30
11	Chi-Chi	KAU008-W	C	118.70
12	Chi-Chi	TAP024-W	C	100.20
13	Northridge	WBA090	C	71.10
14	Whittier Narrows	A-H05360	C	105.00

表 3 典型周期对应的平均反应谱值

Table 3 Values of average response spectrums corresponding to typical periods

场地分类	周期/s	近断层地震动	普通地震动	比值
坚硬场地	0.5	1.38	2.04	0.68
	1.5	0.62	0.55	1.13
	2	0.48	0.41	1.17
	5	0.32	0.06	5.33
	6	0.27	0.06	4.50
	12	0.09	0.03	3.00
软土场地	0.5	1.71	3.56	0.48
	1.5	2.15	0.62	3.47
	2	1.67	0.46	3.63
	5	0.60	0.09	6.67
	6	0.64	0.06	10.67
	12	0.30	0.01	30.00

1.2 弹性加速度反应谱分析

图 1 给出了坚硬场地(A 类场地)和软土场地(C 类场地)上近断层地震动和普通地震动的平均反应谱曲线,即动力放大系数  $\beta$  的平均值曲线。表 3 给出了典型周期上的平均反应谱值。从中可以看出: 1) 坚硬场地上近断层地震动的动力放大系数在周期小于 2.0 s 时略小于普通地震动,在周期大于 2.0 s

后其动力放大系数大于普通地震动; 2) 软土场地上近断层地震动的动力放大系数在周期小于 1.0 s 时小于普通地震动,在周期大于 1.0 s 后其动力放大系数大于普通地震动; 3) 软土场地上近断层地震动的动力放大系数显著大于坚硬场地上的动力放大系数; 4) 软土场地上近断层地震动的动力放大系数在长周期段明显大于普通地震动,并且随着周期的增加近断层地震动的动力放大系数与普通地震动的比值显著增大。

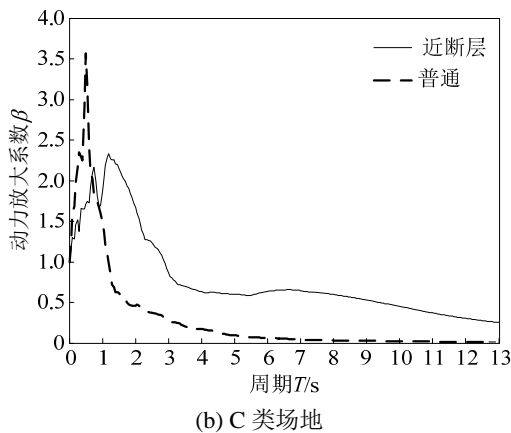
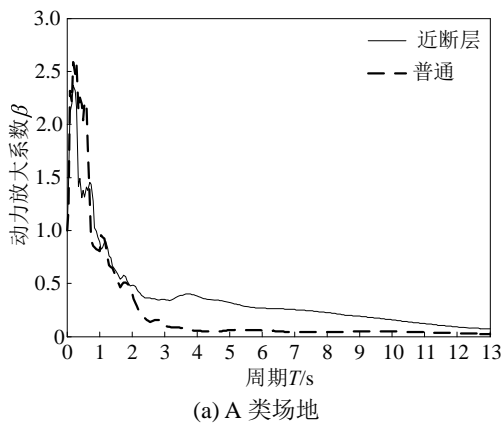


图 1 平均反应谱曲线

Fig.1 Curves of average response spectrums

2 多塔悬索桥地震反应分析

2.1 泰州大桥有限元模型

泰州大桥为首个建造的千米级三塔两主跨悬索桥。主桥跨径布置为 390 m+2×1080 m+390 m=2680 m, 加劲梁为封闭式流线形扁平钢箱梁, 宽 39.1 m, 主缆成桥状态矢跨比为 1/9。中塔为变截面钢塔, 索塔总高 192 m, 中塔内侧壁与主梁间安装横向抗风支座, 纵向采用弹性拉索, 边塔为混凝土塔, 塔高 178 m。中塔基础采用刚度较大的沉井基础, 北(泰州)边塔采用 40 根 D3.1/D2.8 m 钻孔灌注桩群桩基础, 南(扬中)边塔采用 46 根 D3.1/D2.8 m 钻孔灌注桩群桩基础。

采用 ANSYS 有限元软件建立泰州大桥的空间动力计算模型。主梁和主塔均采用空间梁单元模拟。主梁采用单梁式力学模型, 在主梁质量中计入旋转质量惯性矩。主缆与吊杆均采用空间杆单元模拟。根据悬索桥成桥状态分析得到主缆恒载线形和内力。考虑主缆和吊杆在恒载作用下的几何刚度, 并采用 Ernst 公式修正弹性模量。主梁与中塔间纵向约束采用弹簧单元模拟, 横向设置主从约束, 主

梁与南北边塔在横桥向、竖向及绕纵桥向设置约束方程。中塔沉井基础与地基固结；边塔群桩基础考虑土-桩-结构相互作用，并采用 Penzien J 质量-弹簧模型模拟。边跨主缆端部锚固于地锚上，锚锭的边界条件处理为与地基固结。

2.2 近断层地震动和普通地震动作用下的地震反应

根据泰州大桥的技术指标，南北两个桥址场地类别为 II 类，100 年超越概率率 3% 的基岩地震动水平向峰值加速度分别为 1.585 g 和 1.725 g。因此，本文对近断层地震动和普通地震动的加速度峰值均调整为 0.15 g，地震输入方式为纵向+竖向(工况 1)和横向+竖向(工况 2)两种，竖向地震动取为水平向地震动的 2/3。地震动的时间间隔取为 0.02 s。计算结果取地震动时程分析的平均值。

首先考察纵向+竖向地震输入(工况 1)下的地震反应结果。图 2 和图 3 给出了近断层地震动与普通地震动作用下中塔和边塔的顺桥向位移和剪力包络图。图中：J1 和 J2 分别为坚硬场地和软土地地上的近断层地震动分析结果；P1 和 P2 分别为坚硬

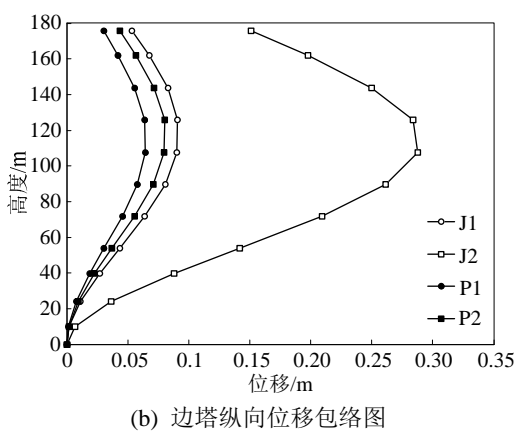
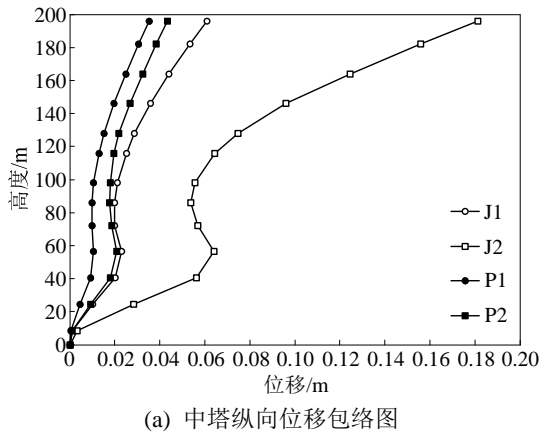
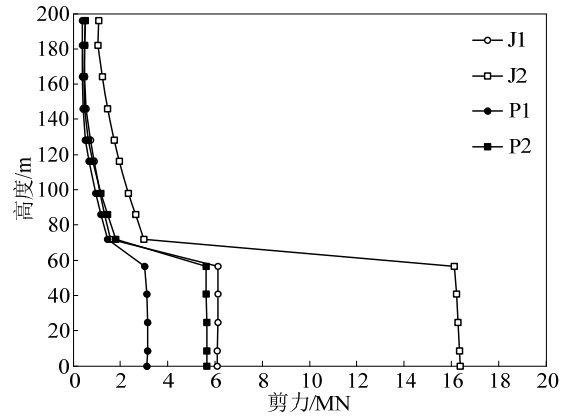
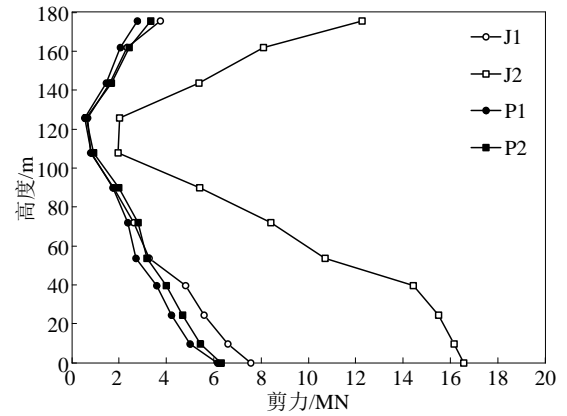


图 2 桥塔纵向位移包络图

Fig.2 Envelope diagrams of longitudinal displacements of bridge towers



(a) 中塔纵向剪力包络图

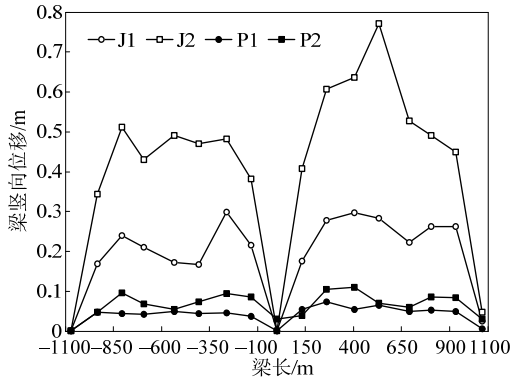


(b) 边塔纵向剪力包络图

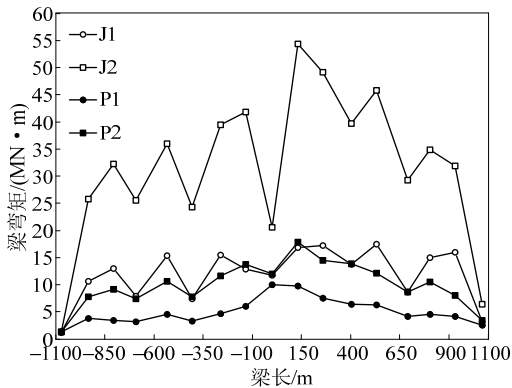
图 3 桥塔纵向剪力包络图

Fig.3 Envelope diagrams of longitudinal shear forces of bridge towers

场地和软土地地上的普通地震动分析结果。从图中可以看出：1) 中塔纵向位移包络图沿塔高出现两个极大值，分别在弹性拉索处和塔顶，这是因为主缆对中塔的约束类似于滑移支座，而弹性拉索对中塔的顺桥向位移有约束作用。边塔纵向位移包络图的极大值出现在离塔高约 2/3 处，说明主缆对边塔的纵向约束作用较大；2) 中塔纵向剪力包络值沿塔高逐渐递减，在中塔变截面处出现突变。由于中塔为人字形的钢塔，下部两肢的轴力较大，用以平衡地震作用引起的弯矩，因而中塔下部的纵向剪力远大于上部。边塔纵向剪力包络图呈“两端大，中间小”的 K 形分布，并且塔底的剪力大于塔顶。图 4 给出了近断层地震动与普通地震动作用下主梁的竖向位移和弯矩包络图。从图中可以看出：1) 主梁的竖向位移在跨中区域达到极大值；并且两跨主梁的竖向位移并不完全对称；2) 主梁的竖向弯矩类似于两跨连续梁，在中塔附近区域达到极大值。



(a) 主梁竖向位移包络图



(b) 主梁竖向弯矩包络图

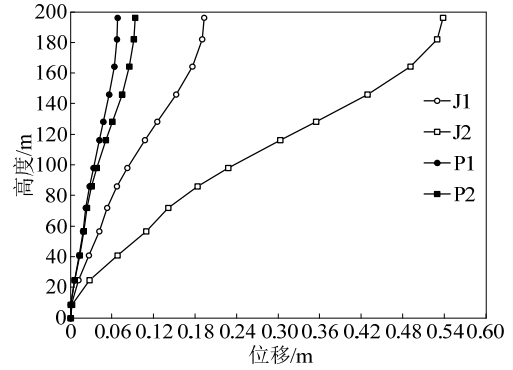
图4 主梁竖向位移和弯矩包络图

Fig.4 Envelope diagrams of vertical displacements and bending moments of bridge girders

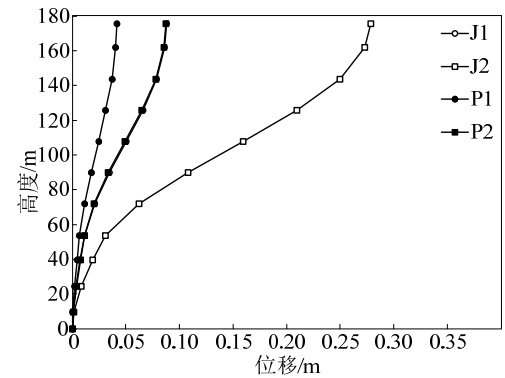
以下考察横向+竖向地震输入(工况2)下的地震反应结果。图5和图6给出了近断层地震动与普通地震动作用下中塔和边塔的横桥向位移和剪力包络图。从图中可以看出：1) 中塔和边塔的横桥向位移包络线均随塔高递增，极大值出现在塔顶，说明主缆对桥塔的横向约束作用较小；2) 中塔和边塔的横向剪力包络值沿塔高逐渐递减，在桥塔变截面处出现突变，并且边塔横向剪力大于中塔剪力，说明边塔的横向刚度大于中塔。图7给出了近断层地震动与普通地震动作用下主梁的竖向位移和横向弯矩包络图。从图中可以看出：1) 地震动作用下两跨主梁的竖向位移基本对称，并在跨中区域达到极大值；2) 主梁的横向弯矩类似于两跨简支梁，在两跨跨中区域达到极大值。

### 2.3 近断层地震动和普通地震动反应的对比分析

本文2.2节的分析结果表明，近断层地震动和普通地震动作用下多塔悬索桥的桥塔和主梁地震反应特点基本相同，但是在地震反应幅值上存在明显差异。这是因为泰州大桥为长周期柔性结构，具有速度脉冲的近断层地震动在长周期段成分更为



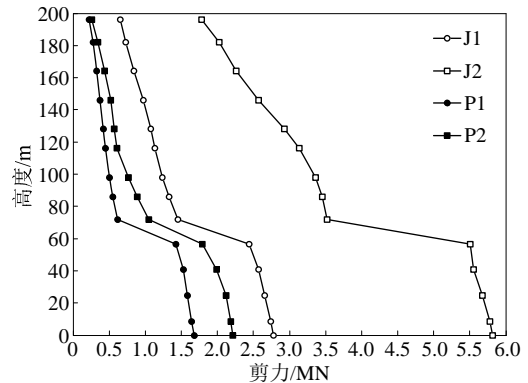
(a) 中塔横向位移包络图



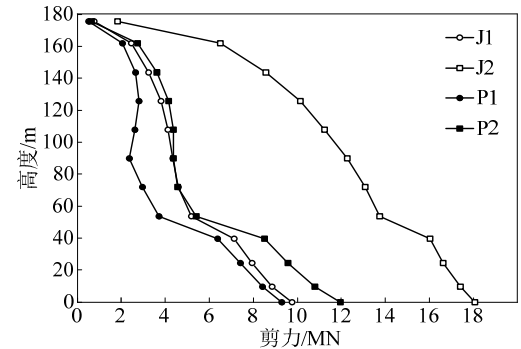
(b) 边塔横向位移包络图

图5 桥塔横向位移包络图

Fig.5 Envelope diagrams of transverse displacements of bridge towers



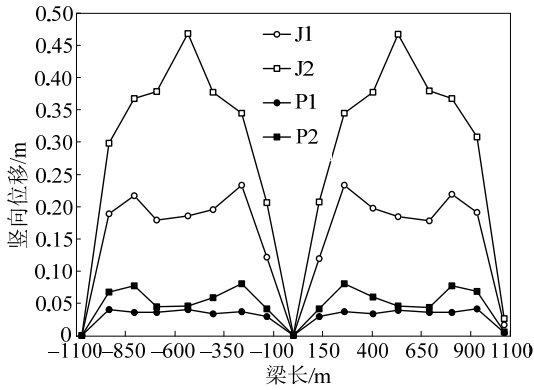
(a) 中塔横向剪力包络图



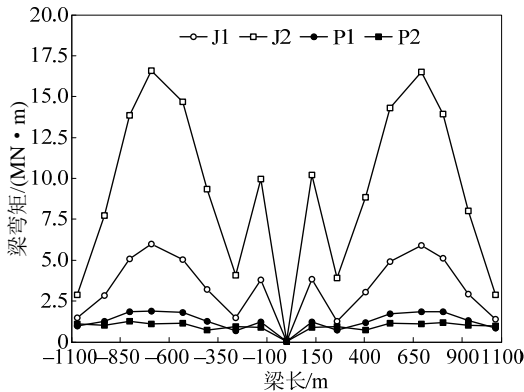
(b) 边塔横向剪力包络图

图6 桥塔横向剪力包络图

Fig.6 Envelope diagrams of transverse shear forces of bridge towers



(a) 主梁竖向位移包络图



(b) 主梁横向弯矩包络图

图 7 主梁竖向位移和弯矩包络图

Fig.7 Envelope diagrams of vertical displacements and bending moments of bridge girders

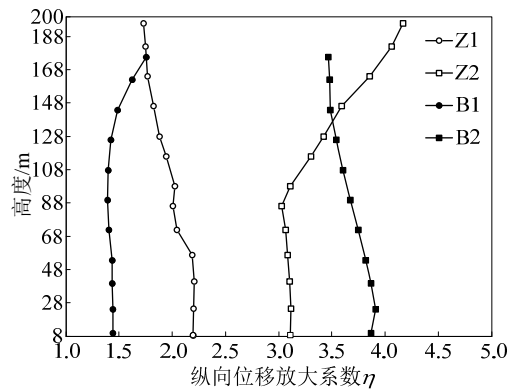
显著，由表 3 典型周期对应的平均反应谱值可知，近断层地震波的反应谱放大系数是普通地震波的数倍，而软土场地会进一步放大地震波中的长周期成分，因此在两者的双重效应下，多塔悬索桥的桥塔和主梁反应幅值会明显增大。为了对比分析两种地震动作用下结构地震反应的差异，定义放大系数  $\eta$  = 近断层地震动反应幅值 / 普通地震动反应幅值。

1) 纵向+竖向地震输入下的对比分析

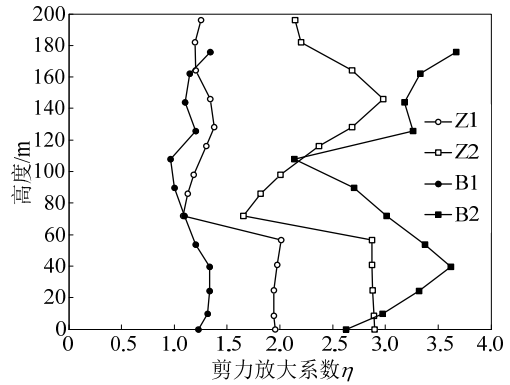
图 8(a)是纵向+竖向地震输入下桥塔纵向位移的放大系数曲线。图中，Z1 和 Z2 分别为坚硬场地和软土场地上中塔的放大系数，B1 和 B2 分别为坚硬场地和软土场地上边塔的放大系数。从图中可以看出：① 坚硬场地下中塔和边塔的纵向位移放大系数平均值分别为 2.0 和 1.5，而软土场地的纵向位移放大系数平均值分别为 3.4 和 3.7。软土场地下中塔和边塔的纵向位移放大系数明显大于坚硬场地；② 坚硬场地下中塔的纵向位移放大系数由塔中部往上递减，而边塔的纵向位移放大系数沿塔高基本不变，只是在塔上部略有增大。软土场地下纵向位移放大系数变化规律与坚硬场地正好相反；③ 坚

硬场地下中塔的纵向位移放大系数总体上大于边塔，而软土场地下边塔的纵向位移放大系数总体上大于中塔。

图 8(b)是纵向+竖向地震输入下桥塔纵向剪力的放大系数曲线。从图中可以看出：① 坚硬场地下中塔和边塔的纵向剪力放大系数平均值分别为 1.5 和 1.2，而软土场地的纵向剪力放大系数平均值分别为 2.5 和 3.1。软土场地下中塔和边塔的纵向剪力放大系数明显大于坚硬场地；② 中塔剪力放大系数存在两个极大值，分别位于塔高 140 m 左右和弹性拉索处；边塔剪力放大系数极大值分别出现在塔顶、塔高 120 m 和 40 m 左右；③ 坚硬场地下中塔的纵向剪力放大系数总体上大于边塔，而软土场地下边塔的纵向剪力放大系数总体上大于中塔。



(a) 纵向位移放大系数



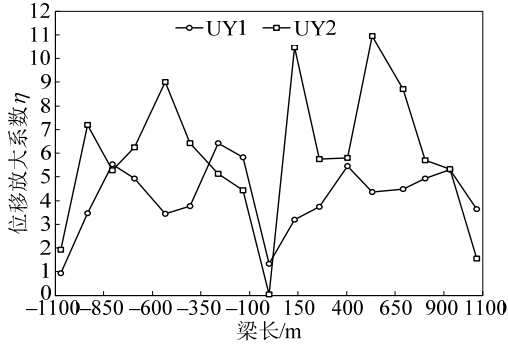
(b) 纵向剪力放大系数

图 8 纵向+竖向地震输入下桥塔放大系数图

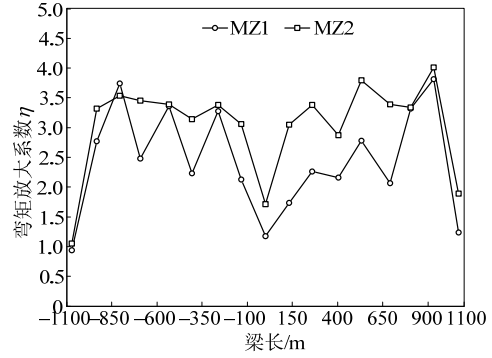
Fig.8 Amplification coefficients of bridge tower subject to the longitudinal and vertical earthquake actions

图 9 是纵向+竖向地震输入下主梁的放大系数曲线。图中，UY1 和 UY2 分别为坚硬场地和软土场地上主梁竖向位移的放大系数，MZ1 和 MZ2 分别为坚硬场地和软土场地上主梁竖向弯矩的放大系数。从图中可以看出：① 坚硬场地下主梁竖向位移和竖向弯矩的放大系数平均值分别为 4.2 和 2.4，而软土场地的竖向位移和竖向弯矩放大系数的平

均值分别为 5.9 和 3.0。软土地下主梁竖向位移和竖向弯矩的放大系数总体上大于坚硬场地；② 坚硬场地和软土地下主梁竖向位移的放大系数均大于竖向弯矩。



(a) 竖向位移放大系数



(b) 竖向弯矩放大系数

图 9 纵向+竖向地震输入下主梁放大系数图  
Fig.9 Amplification coefficients of bridge girders subject to the longitudinal and vertical earthquake actions

表 4 纵向+竖向地震输入下放大系数 η 平均值

Table 4 Average values of amplification coefficients η subject to the longitudinal and vertical earthquake actions

场地分类	主梁		中塔		边塔	
	竖向位移	竖向弯矩	纵向位移	纵向剪力	纵向位移	纵向剪力
坚硬	4.2	2.4	2.0	1.5	1.5	1.2
软土	5.9	3.0	3.4	2.5	3.7	3.1

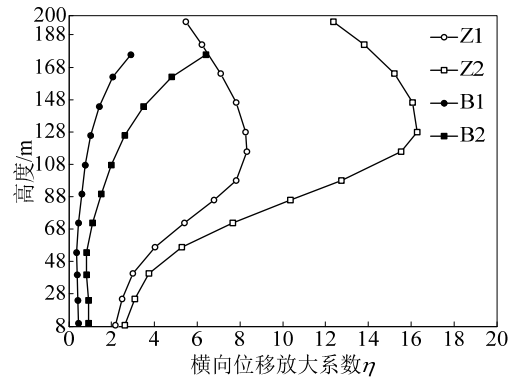
根据上述分析结果，表 4 列出了多塔悬索桥桥塔和主梁地震反应的放大系数 η 平均值。可见，坚硬场地条件下近断层地震动对多塔悬索桥主梁竖向位移的影响最大，对主梁竖向弯矩的影响次之，对桥塔纵向位移和纵向剪力的影响相对较小。然而，当场地土由硬变软时，多塔悬索桥边塔的地震反应增幅明显，中塔增幅次之，主梁增幅相对较小。

2) 横向+竖向地震输入下的对比分析

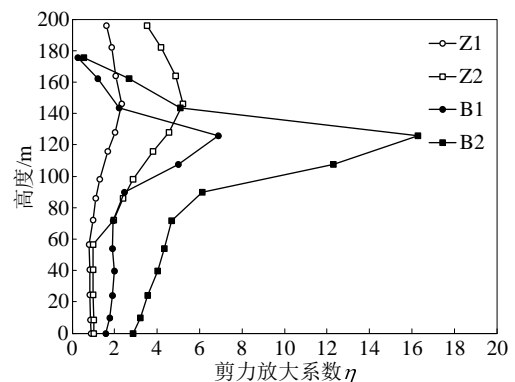
图 10(a)是横向+竖向地震输入下桥塔横向位移的放大系数曲线。从图中可以看出：1) 坚硬场地下中塔和边塔的横向位移放大系数平均值分别为 5.8 和 1.1，而软土地下的横向位移放大系数平均值分别为 10.4 和 2.3。软土地下中塔和边塔的横向位移放大系数明显大于坚硬场地；2) 坚硬场地下中塔的横向位移放大系数在塔高 120 m 左右出现极大值，而边塔的横向位移放大系数沿塔高递增。软土地下的横向位移放大系数变化规律与坚硬场地类似；3) 坚硬场地下和软土地下，中塔的横向位移放大系数明显大于边塔。

图 10(b)是横向+竖向地震输入下桥塔横向剪力的放大系数曲线。从图中可以看出：1) 坚硬场地下中塔和边塔的横向剪力放大系数平均值分别为 1.4 和 2.4，而软土地下的横向剪力放大系数平均值分别为 2.7 和 5.5。软土地下中塔和边塔的横向剪力放大系数明显大于坚硬场地；2) 中塔剪力放大系数

在塔高 150 m 左右存在极大值，塔高 80 m 以下放大系数小于 1，80m 以上大于 1；边塔剪力放大系数



(a) 横向位移放大系数



(b) 横向剪力放大系数

图 10 横向+竖向地震输入下桥塔放大系数图  
Fig.10 Amplification coefficients of bridge tower subject to the transverse and vertical earthquake actions

在塔高 120 m 左右存在极大值，在塔顶附近放大系数小于 1；3) 坚硬场地下和软土场地下，边塔的横向剪力放大系数明显大于中塔。

图 11 是横向+竖向地震输入下主梁的放大系数曲线。图中，UY1 和 UY2 分别为坚硬场地下和软土场地上主梁竖向位移的放大系数；MX1 和 MX2 分别为坚硬场地下和软土场地上主梁横向弯矩的放大系数。从图中可以看出：1) 坚硬场地下主梁竖向位移和横向弯矩的放大系数平均值分别为 4.6 和 2.6，而软土场地的竖向位移和竖向弯矩放大系数的平均值分别为 5.6 和 10.1。软土场地下主梁竖向位移和竖向弯矩的放大系数总体上大于坚硬场地；2) 坚硬场地下主梁竖向位移的放大系数大于横向弯矩，软土场地下正好相反。

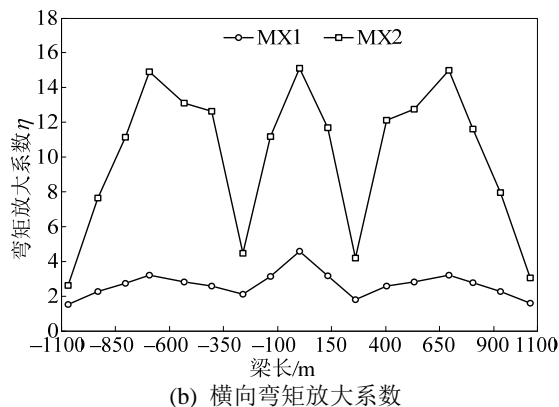
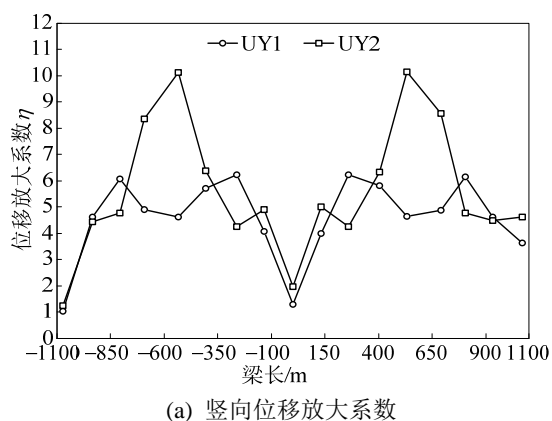


图 11 横向+竖向地震输入(工况 2)下主梁放大系数图  
Fig.11 Amplification coefficients of bridge girder subject to the transverse and vertical earthquake actions

根据上述分析结果，表 5 列出了横向+竖向地震输入下多塔悬索桥桥塔和主梁地震反应的放大系数  $\eta$  平均值。可见，坚硬场地条件下近断层地震动对多塔悬索桥中塔横向位移的影响最大，对主梁竖向位移的影响次之，对桥塔横向剪力和主梁横向弯矩的影响相对较小。然而，当场地土由硬变软时，多塔悬索桥主梁的横向弯矩增幅明显，桥塔增幅次之，主梁竖向位移增幅相对较小。上述变化规律与纵向+竖向地震输入下的变化规律存在明显差异，说明近断层地震动作用下多塔悬索桥边塔、中塔以及主梁的抗震设计必须考虑近断层地震动的速度脉冲特性以及场地土固有周期特性的共同作用。

表 5 横向+竖向地震输入下放大系数  $\eta$  平均值

Table 5 Average values of amplification coefficients  $\eta$  subject to the transverse and vertical earthquake actions

场地分类	主梁		中塔		边塔	
	竖向位移	横向弯矩	横向位移	横向剪力	横向位移	横向剪力
坚硬	4.6	2.6	5.8	1.4	1.1	2.4
软土	5.6	10.1	10.4	2.7	2.3	5.5

### 3 结论

本文以泰州大桥为原型研究了多塔悬索桥近断层地震动作用下的结构地震反应特点，分析结果表明，近断层地震动和普通地震动作用下多塔悬索桥桥塔和主梁的位移和内力分布规律基本相同。其中，边塔和中塔的地震反应主要受主缆约束作用和主塔截面形式的影响，主梁的地震反应主要与梁端约束有关。

在此基础上以近断层地震动反应幅值与普通地震动反应幅值的比值作为放大系数，进一步研究了速度脉冲效应和场地土效应对桥塔和主梁地震反应的影响规律。分析结果表明：

(1) 纵向+竖向地震输入下坚硬场地上近断层地震动对多塔悬索桥主梁竖向位移的影响最大，对主梁竖向弯矩的影响次之，对桥塔纵向位移和纵向剪力的影响相对较小。然而，当场地土由硬变软时，多塔悬索桥边塔的地震反应增幅明显，中塔增幅次之，主梁增幅相对较小；

(2) 横向+竖向地震输入下坚硬场地条件下近断层地震动对多塔悬索桥中塔横向位移的影响最大，对主梁竖向位移的影响次之，对桥塔横向剪力和主梁横向弯矩的影响相对较小。然而，当场地土由硬变软时，多塔悬索桥主梁的横向弯矩增幅明显，桥塔增幅次之，主梁竖向位移增幅相对较小。因此，近断层地震动速度脉冲特性以及场地土固有



周期特性的共同作用下多塔悬索桥边塔、中塔以及主梁的地震反应存在明显差异,在抗震设计时需要引起重视。

#### 参考文献:

- [1] 张新军, 赵孝平. 多塔悬索桥的研究进展[J]. 公路, 2008, 52(10): 1—7.  
Zhang Xinjun, Zhao Xiaoping. Advances in researches on multi-tower suspension bridges [J]. Highway, 2008, 52(10): 1—7. (in Chinese)
- [2] 阮静, 马如进. 三塔双跨悬索桥动力特性分析[J]. 中国工程科学, 2010, 12(8): 82—85.  
Ruan Jing, Ma Rujin. Dynamic behavior analysis of Taizhou Bridge [J]. Engineering Science, 2010, 12(8): 82—85. (in Chinese)
- [3] 邓育林. 大跨度三塔悬索桥动力特性及抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(9): 105—110.  
Deng Yulin. Study on dynamic characteristic and aseismic performance of a long-span triple-tower suspension bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 105—110. (in Chinese)
- [4] 邓育林, 何雄君. 行波效应对大跨多塔悬索桥地震反应的影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 443—447.  
Deng Yulin, He Xiongjun. Effect of seismic wave passage on seismic response of long-span multi-tower suspension bridges [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 443—447. (in Chinese)
- [5] Cavdar O. Probabilistic sensitivity analysis of two suspension bridges in Istanbul, Turkey to near- and far-fault ground motion [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(2): 459—473.
- [6] Adanur S, Altunisik A C, Bayraktar A, et al. Comparison of near-fault and far-fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges [J]. Natural Hazards, 2012, 64(1): 593—614.
- [7] Liao W I, Loh C H, Lee B H. Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions [J]. Engineering Structures, 2004, 26(14): 2173—2183.
- [8] Jonsson M H, Bessason B, Haflidason E. Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(6): 447—455.
- [9] Somerville P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137(1/2/3/4): 201—212.
- [10] George P M, Apostolos S P. A mathematical representation of near-fault ground motions [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099—1131.
- [11] 符蓉, 叶昆, 李黎. LRB 基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的碰撞响应[J]. 工程力学, 2010, 27(增刊 2): 298—302.  
Fu Rong, Ye Kun, Li Li. Seismic response of LRB base-isolated structures under near-fault pulse-like ground motions considering potential pounding [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(Suppl 2): 298—302. (in Chinese)