

不同震级作用下的设备-结构动力相互作用体系地震反应分析

姜忻良^{1,2}, 冀晨歌^{1,2}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:为研究是否考虑设备-结构动力相互作用在不同地震阶段的差别,对建筑结构中常见的设备-结构相互作用体系进行了小震、中震和大震阶段的地震时程反应分析。分析了不同震级作用下考虑相互作用后给结构与设备的地震反应带来的变化。结果表明:考虑设备-结构动力相互作用与不考虑相互作用相比,结构的地震反应有较明显的区别,设备的地震反应有很大的区别,处于完全失真的状态。大震阶段由于设备和结构均进入了弹塑性阶段,刚度等主要参数发生了变化,导致动力相互作用的影响降低。虽然设备质量占结构总地震质量的比例很小,但仍会对结构位移与内力造成较大的影响。

关键词:设备-结构;动力相互作用;设备位置;非线性;地震反应

中图分类号:TU313 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2016)04-0008-08

0 引言

随着设备在现代建筑中所占的比例越来越高,设备-结构相互作用体系成为现代建筑中常见的结构形式,地震时,相互作用体系中往往存在着复杂的动力相互作用。长期以来,忽略动力相互作用的影响进行设备和结构的抗震分析,使得抗震设计结果不准确,对造成的震害难以预估,设备-结构相互作用体系的抗震问题突出。因此,近年来,对于设备-结构动力相互作用的研究成为抗震领域的研究热点。当前研究中对于设备-结构相互作用体系的分析方法有两种:一是楼面反应谱法,二是设备与结构耦合分析方法。对于楼面反应谱法的研究经历了两个阶段,第一代楼面反应谱法只考虑结构的反应,不考虑设备的反作用,将不含设备的结构楼面反应作为设备的输入激励;第二代楼面反应谱法考虑了设备对结构的反作用,综合了设备与结构质量比、谐振等因素的影响。传统方法建立楼面反应谱时,需要考虑的参数众多,任务量较大,20世纪90年代,苏经宇等^[1]提出了确定楼面反应谱的简化方法,秦权等^[2-3]系统地研究了第二代楼面反应谱在设备抗震设计中的应用。设备与结构的耦合分析方法是建立设备与结构的整体分析模型进行计算分析,能准确反映设备与结构共同作用的性质,可较精确地得到设备与结构的动力响应^[4]。李杰等^[5-8]就设备-结构耦合体系,进行了大量的理论分析和实验研究,重点分析了设备-结构相互作用对设备和结构动力反应的影响。以上这些研究均是在弹性范围内进行的。杨涛^[9]在进行桥梁的地震反应分析时将反应谱法与时程分析法进行了对比,指出在非弹性阶段,反应谱法存在一定的误差。Villaverde et al^[10]针对设备-结构体系中结构非线性对线性设备动力反应的影响进行了一个比较全面的参数研究,发现结构的非线性变形对设备的动力反应有非常显著的影响,但没有涉及各参数对结构动力反应的影响。然而在实际工程中,根据我国“三水准两阶段”的抗震设防标准,设备和建筑结构在不同震级作用下的变形状态会发生变化,因此,研究体系在不同地震阶段中设备-结构动力相互作用对设备和结构动力反应的影响显得十分必要。

收稿日期:2015-12-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2016.04.02

基金项目:国家自然科学基金(51478312);国家自然科学基金(51278335)

作者简介:姜忻良(1951-),男,博士,教授,主要从事结构工程的研究。E-mail:jiangxinliang@126.com

姜忻良,冀晨歌.不同震级作用下的设备-结构动力相互作用体系地震反应分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4):8-15.

首先利用 ANSYS 有限元分析软件建立了设备-钢框架结构空间相互作用模型,当不考虑设备-结构动力相互作用时,将设备质量作为附加质量作用于楼面,考虑设备-结构动力相互作用时,则建立完整的设备-结构相互作用整体分析模型。然后对两种模型进行动力时程反应分析,对比不同地震阶段以及设备所在楼层发生变化时,考虑设备-结构相互作用对结构与设备带来的影响。

1 计算模型

在实际工程中,许多建筑结构中设置专门的设备层,以解决冷却塔、水泵、空调器、热交换机、大型储物架等建筑设备的放置问题,为了方便研究考虑相互作用前后结构或设备抗震性能的变化,以及为今后进行地震模拟振动台试验做准备,选取了一个简单的 4 层钢框架作为结构的计算模型,设备模型固定于结构的某一层。考虑到抗震设计中的设备,通常指设备的支架,并不包括设备自身的抗震设计^[11]。据此对设备的计算模型做了相应的简化,用无缝圆钢管替代设备支架,设备自身简化为集中质量块。设备-结构动力相互作用模型如图 1 所示。

钢框架结构模型为单跨 4 层结构,层高 3.15 m,平面尺寸为 8 m×8 m,实际高度为 $3.15 \times 4 + 0.25 = 12.85$ m, X 轴方向是结构的弱轴方向。第 1~3 层的地震质量为每层 41.2×10^3 kg,第 4 层地震质量为 37.6×10^3 kg,总地震质量为 161.2×10^3 kg。梁柱采用 H 型钢,梁的规格为 $500 \times 225 \times 30 \times 40$ mm,柱的规格为 $500 \times 235 \times 30 \times 40$ mm,为 Q345 号钢,由于翼缘厚度超过 35 mm,计算时按照规范取其实际强度为 295 MPa。设备质量取 6×10^3 kg,占结构总地震质量的 3.7%,圆钢管的高度为 1.5 m,外径 130 mm,管壁厚度 15 mm,为 Q235 号钢。钢材的弹性模量取 2.0×10^5 MPa。楼板为 80 mm 厚钢筋混凝土板,混凝土强度等级为 C20。设备布置在次梁上,设备与结构之间通过次梁传力。在 ANSYS 中建立的设备-结构动力分析模型如图 2 所示,结构中的梁、柱单元和设备中的圆钢管单元均采用支持弹、塑性模型中剪切变形的三维有限应变梁单元——BEAM189 单元,结构柱的单元尺寸为 1.05 m,结构梁的单元尺寸为 1.33 m,设备圆钢管的单元尺寸为 0.375 m,单元总数为 196 个。结构梁、柱之间刚性连接,结构柱底部固结。设备与结构通过连接点的变形协调建立约束方程,实现设备与结构的连接。材料为双线性等向强化模型,屈服后刚度为屈服前的 1/100。采用集中法形成质量矩阵,阻尼矩阵基于 Rayleigh 阻尼假定,阻尼比取 0.04。

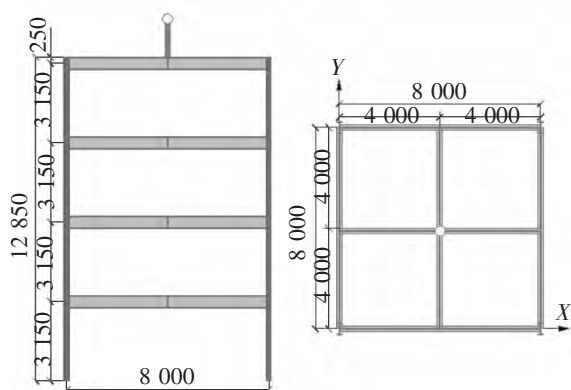


图 1 设备-结构相互作用模型示意图(单位:mm)

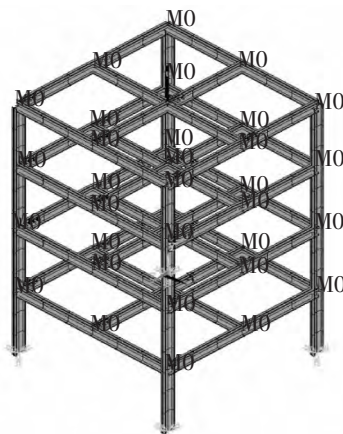


图 2 ANSYS 动力分析模型示意图

为了对比分析在不同地震阶段以及设备在不同楼层时设备-结构动力相互作用对结构和设备动力反应的影响,针对设备在 4 层和 1 层时分别建立 2 种工况进行对比分析。工况 1:将设备作为附加质量考虑,即将设备质量附加到所在楼层质量的结构模型;工况 2:考虑设备与结构的动力相互作用,即设备-结构相互作用的整体模型。设备动力反应取设备相对于结构楼层连接点处的相对反应值,其中工况 1 首先进行带有设备附加质量的结构动力时程反应分析,然后将设备所在楼层连接点处的绝对加速度作为设备的输入激励,计算得到设备顶端相对于所在楼层连接点处的相对反应;工况 2 中需将设备反应与设备所在楼层连接点处的反应相减,计算得到设备相对于结构楼层连接点处的反应。

2 结构动力时程反应分析

选取了 Elcentro 波(E 波)、Kobe 波(K 波)和人工波(R 波)作为 2 种工况的加载激励。各地震波的加速度时程曲线如图 3 所示,采样时间间隔为 0.02 s。调幅后的地震波加速度峰值取小震 0.55 m/s^2 ,中震 1.50 m/s^2 ,大震 3.10 m/s^2 。在水平 X 轴方向输入,依次对 2 种工况进行小震、中震和大震作用下的动力时程反应分析,研究设备与结构处于线性与非线性状态时,考虑设备-结构动力相互作用前后,结构和设备地震反应的区别。计算表明,小震阶段,设备和结构均处于线性工作状态,中震阶段,设备处于非线性工作状态,结构处于线性工作状态,大震阶段,设备和结构均处于非线性工作状态。

为研究设备-结构相互作用体系在不同地震阶段的反应,即设备与结构在线性与非线性状态时受到动力相互作用的影响程度,现对小震、中震、大震阶段的时程反应计算结果分别进行比较分析。选取结构各层最大位移与层间总剪力作为结构地震反应分析的参考指标,剪力峰值发生的时刻与位移峰值发生的时刻相比稍微有所滞后。定义两种工况地震反应的差异用工况 2 与工况 1 最大地震反应的比值来表示,比值越接近 100% 则说明差异越小。

2.1 小震阶段结构反应分析

如图 4、图 5 所示,结合表 1、表 2 数据可以发现:设备在 4 层时,E 波作用下,考虑相互作用以后结构的位移反应和剪力反应增大,位移变化最大处位于结构 4 层,工况 2 相对于工况 1 增大 16.4%,剪力变化最大处位于结构 2 层,工况 2 相对于工况 1 增大 16.5%;K 波作用下,考虑相互作用后对结构的影响不明显,两工况位移和剪力的差异均在 6% 以内;R 波作用下,考虑相互作用后结构 1 层的地震反应减小,4 层的地震反应增大,位移变化最大处位于结构 1 层,工况 2 相对于工况 1 减小 16%,剪力变化最大处位于结构 4 层,工况 2 相对于工况 1 增大 13%。

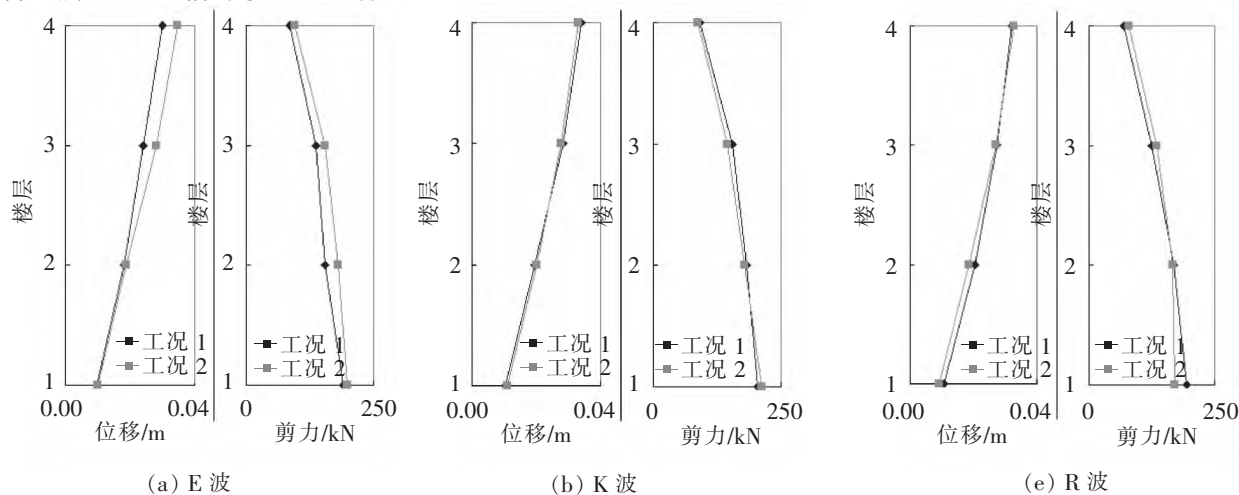


图 4 小震阶段设备在 4 层时结构各层最大位移与层间总剪力图

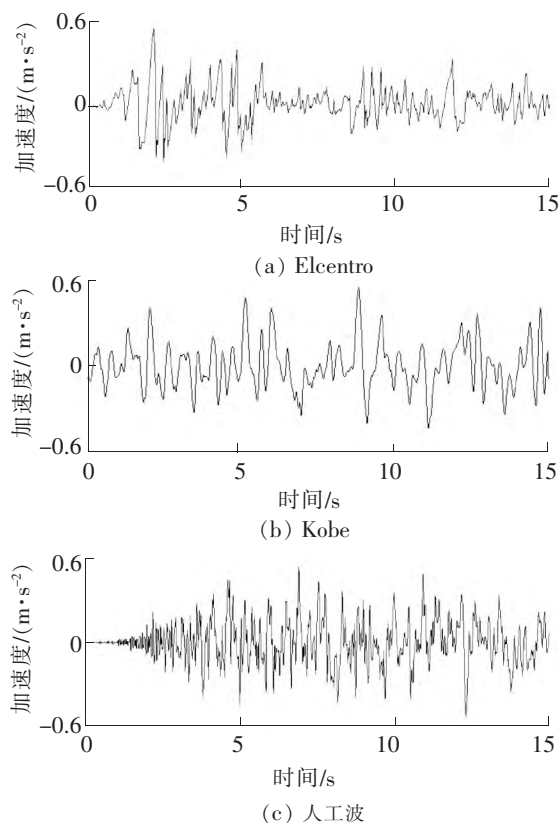


图 3 小震 7 度 (0.15 g) 加速度时程曲线

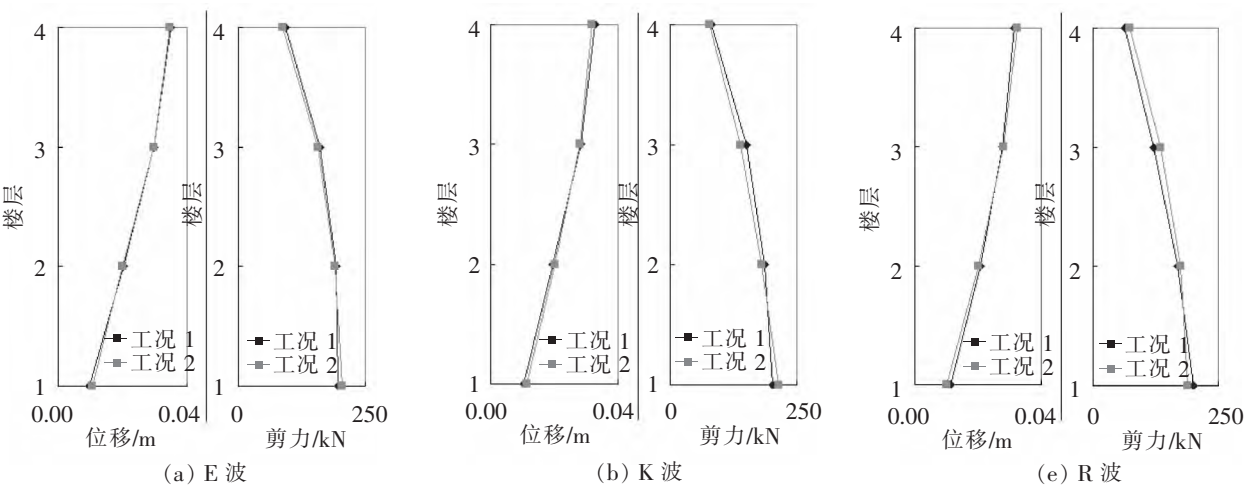


图 5 小震阶段设备在 1 层时结构各层最大位移与层间总剪力图

表 1 小震阶段设备在 4 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 设	1	0.029 9	0.024 1	0.018 2	0.009 8	86.243	136.949	154.886	189.536
	2	0.034 8	0.028 0	0.018 8	0.010 1	94.538	154.808	180.471	198.085
	比值/%	116.4	116.2	103.3	103.2	109.6	113.0	116.5	104.5
K 波	1	0.033 9	0.028 2	0.019 4	0.010 5	91.556	154.631	181.670	205.261
	2	0.033 2	0.027 6	0.020 3	0.010 9	87.106	145.599	177.917	211.990
	比值/%	97.9	97.9	104.6	103.8	95.1	94.2	97.9	103.3
R 值	1	0.024 0	0.020 6	0.015 3	0.008 1	55.978	99.831	135.315	156.260
	2	0.024 6	0.020 3	0.013 9	0.006 8	63.257	107.926	132.814	137.268
	比值/%	102.5	98.5	90.8	84.0	113.0	108.1	98.2	87.8

表 2 小震阶段设备在 1 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 波	1	0.035 1	0.029 6	0.020 3	0.009 6	92.731	161.337	192.726	196.975
	2	0.034 8	0.029 5	0.020 1	0.010 6	87.456	156.597	190.055	203.496
	比值/%	99.1	99.9	99.0	110.4	94.3	97.1	98.6	103.3
K 波	1	0.032 9	0.028 3	0.019 5	0.010 3	81.868	150.496	186.151	202.536
	2	0.031 7	0.028 0	0.020 3	0.011 3	78.164	138.254	180.096	213.401
	比值/%	96.4	98.9	104.1	109.7	95.5	91.9	96.7	105.4
R 波	1	0.023 6	0.020 9	0.015 6	0.008 5	51.079	97.031	134.402	161.012
	2	0.024 4	0.021 1	0.015 2	0.007 5	58.381	107.333	140.194	150.949
	比值/%	103.4	101.0	97.4	88.2	114.3	110.6	104.3	93.8

设备在 1 层时,3 种地震波作用下,两工况的位移变化最大处均位于结构 1 层,E 波作用下,工况 2 相对于工况 1 的 1 层位移增大 10.4%,剪力变化最大处位于结构 4 层,相对于工况 1 减小 5.7%;K 波作用下,工况 2 相对于工况 1 的 1 层位移增大 9.7%,剪力变化最大处位于结构 3 层,相对于工况 1 减小 8.1%;R 波作用下,工况 2 相对于工况 1 的 1 层位移减小 11.8%,剪力变化最大处位于结构 4 层,相对于工况 1 增大 14.3%。

以上结果可以看出,就结构地震反应而言,不同地震波对结构的影响不同,考虑相互作用后结构的位移与剪力有增大也有减小,这与地震波分布的频段密切相关;相互作用对结构地震反应的影响也与设备所在楼层有关,同一种地震波作用下,设备在 4 层和 1 层时考虑相互作用前后结构地震反应的变化趋势有

较大区别,设备在 4 层时动力相互作用对结构各层位移和剪力均有不同程度的影响,而设备在 1 层时主要对结构 1 层位移和 3、4 层剪力产生影响。

2.2 中震阶段结构反应分析

如表 3、表 4 所示,与小震阶段相比两工况的比值没有发生明显变化,其位移比值的变化幅度在 1.5% 以内,剪力比值的变化幅度在 0.5% 以内。计算表明,中震阶段结构仍处于弹性阶段,而设备已进入了弹塑性,产生这些微小差异的原因是设备进入非线性状态后,设备的弹塑性变形以及刚度等方面的变化导致两工况中结构的地震反应产生差异,但由于设备质量较小,所以这些变化对结构地震反应的影响十分微小。

表 3 中震阶段设备在 4 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 波	1	0.081 5	0.065 6	0.049 6	0.026 7	235.207	373.496	422.415	516.918
	2	0.094 5	0.076 1	0.051 1	0.027 4	256.778	422.021	491.276	536.975
	比值/%	116.0	116.0	103.0	102.6	109.2	113.0	116.3	103.9
K 波	1	0.092 5	0.076 9	0.052 8	0.028 6	249.699	421.721	495.464	559.802
	2	0.090 4	0.075 2	0.055 4	0.029 6	235.524	396.105	485.526	574.143
	比值/%	97.7	97.8	104.9	103.5	94.3	93.9	98.0	102.6
R 波	1	0.065 3	0.056 2	0.041 7	0.022 1	152.666	272.267	369.041	426.164
	2	0.067 0	0.055 3	0.037 8	0.018 5	172.519	294.334	362.219	374.367
	比值/%	102.6	98.4	90.6	83.7	113.0	108.1	98.2	87.8

表 4 中震阶段设备在 1 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 波	1	0.095 6	0.080 8	0.055 3	0.025 9	252.904	440.009	525.615	537.203
	2	0.095 0	0.080 7	0.054 7	0.029 0	238.613	426.899	518.159	554.211
	比值/%	99.4	99.9	98.9	111.9	94.3	97.0	98.6	103.2
K 波	1	0.089 6	0.077 3	0.053 3	0.028 1	223.277	410.444	507.685	552.370
	2	0.086 6	0.076 3	0.055 3	0.030 6	212.218	375.881	490.802	580.373
	比值/%	96.7	98.7	103.8	108.9	95.0	91.6	96.7	105.1
R 波	1	0.064 4	0.057 0	0.042 6	0.023 2	139.306	264.631	366.551	439.134
	2	0.066 6	0.057 6	0.041 5	0.020 4	159.124	292.605	382.308	411.764
	比值/%	103.4	101.1	97.4	87.9	114.2	110.6	104.3	93.8

2.3 大震阶段结构反应分析

如表 5、表 6 所示,表中的“△”指将表 5、表 6 大震时两工况的比值与表 1、表 2 小震时比值逐项相减得到的差值,可以发现:大震阶段,设备在 4 层时,E 波作用下两工况结构 3 层位移的比值变化最大,比小震时下降了 12.7%,2 层剪力的比值下降了 5.7%;K 波作用下两工况的比值变化不明显,变化幅度在 5% 以内;R 波作用下两工况结构 1 层位移的比值增加了 4.7%,1 层剪力的比值增加了 6.1%。设备在 1 层时,E 波作用下两工况结构 1 层位移的比值比小震时下降了 10.6%,1 层剪力的比值下降了 9.5%;K 波作用下两工况结构 1 层位移的比值增加了 17.7%,1 层剪力的比值增加了 4.1%;R 波作用下两工况的比值变化不明显,变化幅度在 5% 以内。

通过以上数据可以发现,大震阶段两工况结构地震反应的比值有增大也有减小,与小震时相比,设备在 4 层时两工况的比值最大变化了 12.7%,设备在 1 层时两工况的比值最大变化了 17.7%。说明大震阶段工况 1 与工况 2 结构位移与剪力反应的差异与小、中震阶段明显不同,差异的变化主要受地震波及设备所在楼层的影响,设备在 1 层时两工况的差异更大。这是由于大震阶段设备与结构均进入非线性工作状态,设备和结构的刚度、频率等主要参数与线性计算时相比发生了变化。这些结果充分说明,为了正确反映具有设备的结构在各震级作用下的地震反应情况,即结构在弹性、弹塑性阶段的地震反应,建立完整的

设备-结构相互作用模型对结构的设计与计算具有实际意义。

表 5 大震阶段设备在 4 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 波	1	0.142 3	0.123 8	0.094 6	0.056 2	410.300	650.345	725.334	877.565
	2	0.152 9	0.128 1	0.096 7	0.057 8	438.893	725.136	803.452	884.701
	比值/%	107.4	107.4	102.2	102.8	107.0	111.5	110.8	100.8
	Δ /%	-9	-12.7	-1.1	-0.4	-2.6	-1.5	-5.7	-3.7
K 波	1	0.181 6	0.150 9	0.105 3	0.053 3	453.066	743.854	854.529	871.542
	2	0.179 6	0.150 8	0.105 8	0.055 9	424.843	728.261	846.210	879.200
	比值/%	98.9	98.9	100.5	104.9	104.9	97.9	99.0	100.9
	Δ /%	1	2	-4.1	1.1	-1.3	3.7	1.1	-2.5
R 波	1	0.135 0	0.116 2	0.086 3	0.045 9	308.660	541.018	723.448	826.247
	2	0.134 0	0.111 6	0.078 7	0.040 7	334.172	573.169	717.431	776.143
	比值/%	99.3	96.0	91.2	88.7	108.3	105.9	99.2	93.9
	Δ /%	-3.2	-2.5	0.4	4.7	-4.7	2.2	1	6.1

表 6 大震阶段设备在 1 层时结构各层最大位移与层间总剪力

地震波	工况	各层最大位移/m				各层间总剪力/kN			
		4 层	3 层	2 层	1 层	4 层	3 层	2 层	1 层
E 波	1	0.158 0	0.131 0	0.094 5	0.058 8	415.562	701.889	814.746	885.058
	2	0.153 9	0.126 3	0.092 6	0.058 7	414.511	629.079	788.475	830.447
	比值/%	97.5	96.4	98.0	99.8	99.7	98.6	96.8	93.8
	Δ /%	-1.6	-3.6	-1	-10.6	5.4	1.5	-1.8	-9.5
K 波	1	0.179 9	0.156 3	0.110 9	0.0570	394.027	705.509	858.529	901.388
	2	0.175 5	0.153 9	0.113 9	0.072 6	366.433	648.623	816.768	986.916
	比值/%	97.6	98.5	102.7	127.4	93.0	91.9	95.1	109.5
	Δ /%	1.2	0.4	-1.4	17.7	-2.5	0	-1.6	4.1
R 波	1	0.133 1	0.117 7	0.088 1	0.048 3	281.292	528.840	715.313	835.206
	2	0.136 1	0.118 3	0.086 6	0.044 0	309.975	565.102	747.177	820.646
	比值/%	102.3	100.5	98.3	91.1	110.2	106.9	104.5	98.3
	Δ /%	-1.1	-0.5	0.9	2.9	-4.1	-3.7	0.2	4.5

3 设备动力时程反应分析

现在来分析设备-结构动力相互作用对设备地震反应的影响,选取设备顶端相对于所在楼层连接点处的相对位移与底部剪力作为设备分析的参考指标,底部剪力峰值发生的时刻与位移峰值发生的时刻相比稍微有所滞后。表 7、表 8、表 9 分别给出了小震、中震和大震阶段工况 1 与工况 2 中设备顶端位移和底部剪力的反应情况。

3.1 小震阶段设备反应分析

如表 7 所示,设备在 4 层时两工况设备地震反应的比值在 30%~40%之间,设备在 1 层时两工况的比值在 20%~30%之间,可见小震阶段考虑相互作用后得到的计算结果远远小于不考虑相互作用的结果。

以上数据充分说明小震阶段考虑与不考虑设备-结构动力相互作用对设备地震反应的影响很大,远比对结构地震反应的影响要大,不考虑相互作用时的计算结果约为考虑相互作用真实反应的 3~4 倍,处于完全失真的状态。同时也说明设备-结构动力相互作用对设备地震反应的影响与地震波类型有关,并与设备所在的楼层有关,设备在 1 层时的偏离程度更大。

表 7 小震阶段设备顶端最大位移与底部剪力

地震波	工况	4 层设备		1 层设备	
		位移/m	剪力/kN	位移/m	剪力/kN
E 波	1	0.025 7	42.269	0.027 5	42.278
	2	0.009 8	15.478	0.007 4	11.683
	比值/%	38.1	36.6	26.9	27.6
K 波	1	0.025 4	35.673	0.025 8	37.716
	2	0.009 0	14.158	0.007 1	11.280
	比值/%	35.4	39.7	27.5	29.9
R 波	1	0.022 9	39.718	0.023 6	38.675
	2	0.007 7	12.160	0.006 1	9.571
	比值/%	33.6	30.6	25.8	24.7

3.2 中震阶段设备反应分析

如表 8 所示,中震阶段两工况地震反应的比值在 65%~85%之间,与小震时相比两工况的比值大幅度增加,即两工况的差异大幅度减小。表明中震阶段动力相互作用对设备地震反应的影响大大减弱了,此时结构处于线性状态而设备已进入非线性状态,且结构的楼面波与小震时相比无性质上的变化,仅数值有所增大,所以这种变化主要是由设备的弹塑性变形及刚度退化引起的。

表 8 中震阶段设备顶端最大位移与底部剪力

地震波	工况	4 层设备		1 层设备	
		位移/m	剪力/kN	位移/m	剪力/kN
E 波	1	0.030 9	37.784	0.030 1	36.593
	2	0.024 1	33.925	0.020 1	28.125
	比值/%	78.0	89.8	66.8	76.9
K 波	1	0.037 9	39.823	0.026 1	37.038
	2	0.028 9	32.796	0.019 6	28.002
	比值/%	76.3	82.4	75.1	75.6
R 波	1	0.033 3	39.091	0.024 5	37.114
	2	0.021 7	31.339	0.016 5	25.512
	比值/%	65.2	80.2	67.3	68.7

与此时结构的地震反应相比,设备在 4 层时结构地震反应的最大差异为 16.3%,设备地震反应的最大差异为 34.8%;设备在 1 层时结构地震反应的最大差异为 14.2%,设备地震反应的最大差异为 33.2%。说明中震阶段考虑动力相互作用对设备地震反应的影响仍大于对结构地震反应的影响。

3.3 大震阶段设备反应分析

如表 9 所示,大震阶段两工况地震反应的比值在 75%~90%之间,与中震时相比两工况的比值进一步增大,即差异进一步减小。表明大震阶段动力相互作用对设备的影响进一步减弱,此时设备与结构均已进入非线性状态,设备与结构的刚度、固有频率等参数发生变化,从而导致了设备与结构之间相互作用力的变化。

表 9 大震阶段设备顶端最大位移与底部剪力

地震波	工况	4 层设备		1 层设备	
		位移/m	剪力/kN	位移/m	剪力/kN
E 波	1	0.075 0	48.052	0.041 2	44.491
	2	0.057 8	42.988	0.032 6	37.054
	比值/%	77.1	89.5	79.1	83.4
K 波	1	0.075 7	48.632	0.038 4	42.037
	2	0.057 5	42.335	0.030 3	34.000
	比值/%	76.0	87.1	78.9	80.9
R 波	1	0.062 5	48.191	0.035 6	41.962
	2	0.047 0	40.875	0.027 7	35.484
	比值/%	75.2	84.8	77.8	84.6

与此时结构的地震反应相比,设备在 4 层时结构地震反应的最大差异为 11.5%,设备地震反应的最大差异为 24.8%;设备在 1 层时结构地震反应的最大差异为 27.4%,设备地震反应的最大差异为 22.2%。说明大震阶段动力相互作用对设备和结构地震反应的影响与设备所在的楼层密切相关,设备在 4 层时动力相互作用对设备的影响更大,而设备在 1 层时则对结构的影响更大。

以上关于结构与设备地震反应的数据表明,考虑设备-结构动力相互作用后对结构的地震反应有较大的影响,虽然设备质量仅占结构总地震质量的 3.7%,但在文中所给的 3 种地震波作用下,造成结构的最大位移增加了 27.4%(大震阶段)、总剪力增加了 16.5%(小震阶段)。考虑设备-结构动力相互作用后对设备的地震反应的影响则远远大于结构,尤其是在弹性阶段,不考虑相互作用计算得到的设备反应处于完全失真的状态,这些现象应引起足够的重视。

4 结论

应用 ANSYS 有限元分析软件,对设备-结构动力相互作用体系进行了全面系统的地震时程反应分析,讨论了在不同的地震阶段以及设备所在楼层变化时,考虑与不考虑设备-结构动力相互作用对结构和设备地震反应的影响。得到如下结论:

(1) 考虑与不考虑设备-结构动力相互作用相比,结构的地震反应有较明显的区别,不同地震波对结构影响不同,考虑相互作用后结构的位移与剪力有增大也有减小,设备-结构动力相互作用对结构地震反应的影响也与设备所在楼层密切相关。

(2) 考虑与不考虑设备-结构动力相互作用对设备的地震反应影响很大,远比对结构地震反应的影响要大,不考虑相互作用时的计算结果处于完全失真的状态,且设备在 1 层时其偏离程度比在 4 层时大。

(3) 在经历小震、中震、大震的过程中,考虑设备-结构动力相互作用后对结构及设备的影响明显不同,一般来说,大震阶段由于设备和结构均进入了弹塑性阶段,刚度等主要参数发生了变化,导致相互作用的影响降低。

(4) 虽然设备质量仅占结构总地震质量的 3.7%,但在所给的 3 种地震波作用下,造成结构最大位移增加了 27.4%(大震阶段)、总剪力增加了 16.5%(小震阶段),可见仍会对结构位移与内力造成较大的影响,应引起足够的重视。

参 考 文 献

- [1] 苏经宇,樊水荣,谭健. 确定楼面反应谱的简化方法[J]. 建筑科学, 1991, 2: 29-36.
- [2] 秦权,李瑛. 非结构构件和设备的抗震设计楼面谱[J]. 清华大学学报:自然科学版, 1997, 37(6): 184-88.
- [3] 秦权,聂宇. 非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 15-20.
- [4] 国巍. 基于耦合效应的主-附结构体系地震响应研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [5] 李杰,陈淮,赵晓. 结构-设备动力相互作用研究综述[J]. 世界地震工程, 1994, 1(2): 5-12.
- [6] 李杰,陈淮,孙增寿. 工业结构-设备体系在地震作用下的动力相互作用研究[J]. 地震工程与工程震动, 1997, 17(2): 98-105.
- [7] 陈建兵,李杰. 结构-设备体系动力相互作用研究[J]. 地震工程与工程震动, 2001, 21(3): 52-58.
- [8] 李杰,陈淮,孙增寿. 结构-设备动力相互作用试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 157-161.
- [9] 杨涛. 连续梁拱组合体系桥梁地震反应分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2014, 27(4): 13-18.
- [10] Samit Ray Chaudhuri, Roberto Villaverde. Effect of building nonlinearity on seismic response of nonstructural components: a parametric study[J]. Struct. Eng., 2008, 134: 661-670.
- [11] 戴国莹. 非结构构件的抗震设计要求[J]. 建筑结构, 2002, 18(6): 57-62.

(下转第 32 页)

- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [7] 国家质量技术监督局. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTJ 025—86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1986.

Seismic Analysis of A Large-span Steel Truss Bridge

Li Xiaolu¹, Zhou Li²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Bridge Seismic Innovation Team, Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300072, China)

Abstract: In the urban bridge construction, the multifunctional large span bridges have appeared as the landmarks frequently. The analysis of bridge seismic performance has become a major factor in designing. The assumption of the tradition bridge design ignoring the nonlinear ability of the bearing destruction is not realistic. Spectrum analysis and the time-history analysis for the large-span steel truss bridge is done and the stress of the upper steel truss has been checked in this paper by MIDAS CIVIL. The structure response has been compared before and after the destruction of the FPS bearing. According to the analysis, the response force of the pier has been largely decreased which is considered the bearing destruction. Seismic design such as seismic bearings is effective and the seismic responses of both piers and truss are much more reduced and the nonlinear analysis is more reliable.

Key words: large-span steel truss bridge; seismic analysis; seismic bearings

(上接第 15 页)

Response Analysis of Equipment-Structure Dynamic Interaction Under Different Earthquake Phases

Jiang Xinliang^{1,2}, Ji Cheng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety

Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Time history analysis of the equipment-structure systems was conducted under the small, middle and big earthquake, to study the differences with and without considering equipment-structure dynamic interaction. The impacts of equipment-structure interaction to the dynamic response of structure and equipment was analyzed. The results indicate that: The dynamic response of structure is obviously different when considering and without considering equipment-structure interaction. The impacts on equipment is much bigger than on structure, which makes equipment in a state of complete distortion. When under big earthquake, the non-linearity of the equipment and structure will decline the equipment-structure dynamic interaction between them. Although the proportion of equipment is very small in the total mass, the interaction still has a great influence on the structural displacement and internal force.

Key words: equipment-structure; dynamic interaction; equipment position conversion; non-linearity; seismic response