

集集地震作用下异形大跨单层网壳结构抗震性能影响研究

魏凯¹ 张海馨²

1 黑龙江大学建筑工程学院, 黑龙江哈尔滨, 150086;

2 黑龙江省建筑安装集团有限公司, 黑龙江哈尔滨, 150086;

摘要: 为研究异形钢结构在脉冲型地震作用下的抗震性能研究。现以一座极限馆作为研究对象, 选取一组包含7条脉冲型地震动 (PGM) 以及对应的7条剔除速度脉冲分量的残余地震动 (RGM) 和一组7条非脉冲型地震动 (NGM) 作为地震输入, 并将其调幅为 0.11g 并对其进行动力响应分析, 通过数值模拟系统评估了地震动分量和断层位置对结构节点位移、最大杆件应力及最大支座反力的放大系数影响。结果表明: 不同地震动分量和断层位置情况下, PGM 和 RGM 对结构响应与 NGM 作用下的相应值之比不小于 1, 表明: PGM 与 RGM 对结构动力响应具有放大效应; 但地震动分量和断层位置对结构最大位移、最大杆件应力和最大支座反力的影响和相应放大系数影响较小。

关键词: 近场脉冲地面运动; 脉冲识别; 单层球形网壳; 非线性动力分析

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.027

引言

随着基础设施建设的持续扩展, 部分区域正迎来机场、体育场馆等大跨度公共建筑的集中兴建。在此类建筑中, 单层网壳结构凭借其轻质高强、空间适应性强以及综合经济性能优越等突出特点, 已成为大跨度屋盖体系的主流结构形式。然而, 在地震活动频繁、抗震设防要求较高的地带, 许多大跨度结构因邻近活动断层而面临更为复杂的地震作用与潜在灾害风险。而近断层地震动具有破裂向前方向性及滑冲效应等特点, 其速度时程表现为长周期、短持时和高能量的脉冲特性。与普通地震动相比, 这类地震动对结构造成的破坏更为显著^[1-3]。为评估近断层脉冲地震动对结构的不利影响, 首先需有效识别此类地震动。对此, Baker^[4]提出了基于小波分析的识别方法; Zhai 等和常志旺^[5]提出一种基于能量的脉冲地震动识别方法, 并与 Baker 提出的进行比较。基于此, 目前国内外许多学者对通过脉冲识别筛选地震动后进行网壳结构动力响应研究, 例如: 石文杰^[6]等以基础隔震网壳-支撑为研究对象采用基于能量法对地震波进行筛选, 证实速度脉冲对上部网壳的最大节点位移、杆件轴力和塑型杆件比例等均有放大效应开展近断层地震作用下网壳结构的动力响应研究具有重要意义。张明等^[7]指出, 相比于远场地震动, 近场地震动作用下单层球形网壳结构具有更大的地震响应。钟杰等^[8-9]研究发现, 网壳结构在遭受近场速度脉冲型地震动时表现出更为

严重的结构损伤和更大的失效概率。丁阳等^[10]讨论了隔震单层球形网壳结构在近场地震下的位移响应, 表明隔震层竖向摇摆对水平位移响应具有较大影响。然而, 现有研究对异形网壳脉冲型地震动力响应较少, 为此, 本文选取某一极限馆为研究对象, 并根据冀昆^[11]的研究及基于能量的脉冲识别方法选择七条脉冲型地震动与7条与之对应的剔除脉冲的残余地震动和7条非脉冲型地震动作为输入, 研究不同地震动分量和断层位置对异型体育馆的放大效应影响。

1 地震动处理与选取

为了减少震源机制和地震记录间差异的影响, 选取了 1999 年中国台湾地区集集地震作为唯一震源事件。本文以断层距为 0~30km 为条件筛选近断层地震动记录, 在地震动记录的筛选过程中, 首先, 基于能量的脉冲识别算法, 将原始地震动记录划分为脉冲型地震动 (Pulse-like Ground motion, PGM) 与非脉冲型地震动 (Non-pulse Ground motion, NGM) 两类。在记录数量选取方面, 本文参照冀昆的研究方法每组选取 7 条地震动, 但由于集集地震上盘处台站数量较少, 因此本文采用平行四边形法则 (见式 1), 进行选取。最终, 以不同类别地震动作用下结构动力响应结果的平均值作为对比分析的依据。

$$V(\theta) = V_E \times \cos \theta + V_N \times \sin \theta \quad (1)$$

最终, 基于同源事件及能量法脉冲识别的综合筛选

准则，并同时考虑地震动的水平与竖向分量，共构建了本文地震动输入的数据集，详细信息见表1。

表1 地震波数据表

RNS	台站名称	纬度 (°)	经度 (°)	断层距 (km)
3459	TCU052	24.1977	120.739	1.76
3469	TCU068	24.2700	120.7650	1.46
3470	TCU072	24.0406	120.8490	13.27
3456	TCU049	24.1788	120.6900	3.26
3468	TCU067	24.0912	120.6158	0.46
3488	TCU100	24.1858	120.6153	10.59
2873	TCU089	23.9037	120.8565	15.27
2616	TCU063	24.1083	120.6158	9.04
3467	TCU065	24.0587	120.6910	0.10
2622	TCU071	23.9855	120.7883	10.59
3471	TCU075	23.9827	120.6778	0.33
2625	TCU074	23.9622	120.9618	26.68
2871	TCU084	23.8830	120.8998	19.50
3172	TCU045	24.5399	120.9205	26.00
3467	TCU065	24.0587	120.6910	0.10
3472	TCU076	23.9079	120.676	3.17
3490	TCU103	24.3098	120.7072	5.47
3502	TCU120	23.9803	120.6130	6.92
3503	TCU122	13.8128	120.6097	9.07
3474	TCU079	23.8395	120.8942	19.48

为系统比较 PGM、NGM 与 RGM 的频谱特性，本文绘制了阻尼比为 2% 的归一化平均加速度反应谱，如图 2 所示。在水平分量上，脉冲型地震动的平均加速度反应谱在周期小于 1.5 s 的范围内显著高于非脉冲型地震动与残余地震动，而在周期超过 1.5 s 后，三者之间的差异逐渐减小。竖向分量的反应谱特征则有所不同：PGM 与 RGM 在整个周期范围内谱值较为接近，而 NGM 在 0~1 s 区间呈现一明显峰值，显示其在此周期段具有更强的频谱集中性。这一现象表明，基于能量法剔除脉冲型地震动中脉冲信号在水平分量下效果较好，而对于竖向分量的效果较差。

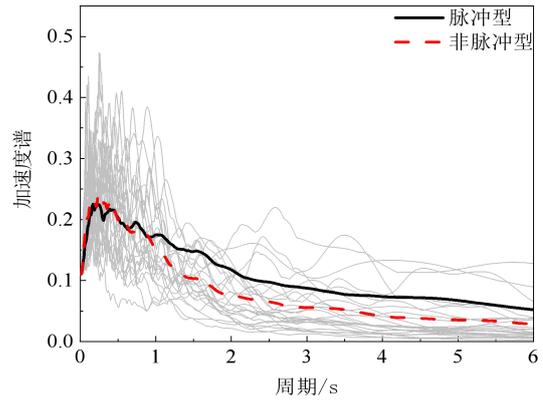
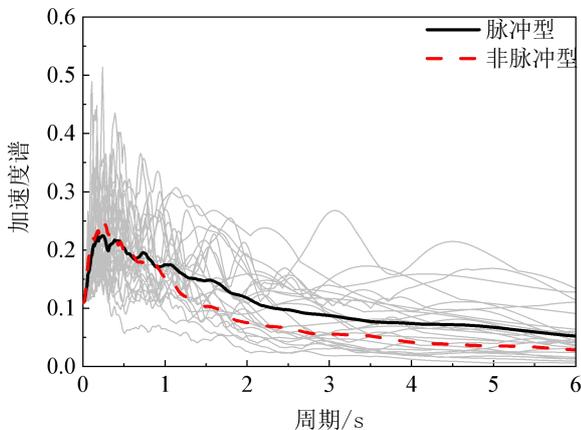


图1 加速度反应谱 (阻尼比 2%)

2 有限元模型建立及地震动输入

2.1 有限元模型建立

本研究以某异型极限馆为研究对象，采用参数化建模方法构建了平面尺寸为 179.52 米乘以 191.24 米，其结构最高点位于中柱，高度达到 52 米的模型(见图 2)，在材料选择上，本研究选用了 Q235 钢材，并采用双折线模型来描述钢材的滞回特性，并选择屈服强度为 235 MPa，弹性模量为 206 GPa 用以描述钢材的弹塑性行为。结构最外圈节点采用固定铰支座约束。在模拟下部支撑时，采用了一般支承模型进行简化处理，忽略了土层对结构的影响。为准确模拟薄壁杆件的力学性能，所有杆件均采用 Beam188 梁单元建模，该单元可考虑剪切变形与初始曲率的影响。屋面均布荷载经静力等效转化为节点集中力施加。风荷载按照 0.6kN/m² 的标准进行考虑，并通过面荷载的形式施加。

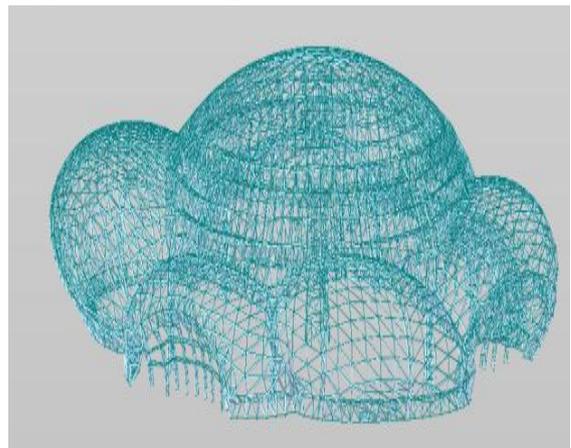


图2 有限元模型图

基于上述模型，本研究选用了 Newmark-β 直接积分法进行结构动力学分析。该方法在各类有限元软件中广泛应用，亦是大跨空间结构抗震分析的常用方法。通过计算可知结构阻尼为 0.02 和结构的前三阶自振周期，

周期详情见表2。

表2 模态周期

模态	频率		周期
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)
1	5.8647	0.9334	1.0714
2	6.1915	0.9854	1.0148
3	6.3585	1.0120	0.9881

2.2 动力时程分析

运用时程分析法可以获得结构在动力作用, 该方法是大跨空间结构抗震分析的常用方法。其瞬态动力分析的结构基本平衡方程为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F(t) \quad (2-1)$$

上式中, M 为结构质量矩阵, C 为结构阻尼矩阵, K 为结构刚度矩阵, $F(t)$ 为荷载列向量, \ddot{U} 为加速度向量, \dot{U} 为速度向量, U 为位移向量。

根据式(2-1)可知结构阻尼是影响动力响应的重要因素, 在结构动力分析中, Rayleigh 阻尼因其形式简单、应用广泛, 其表达式为:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2-2)$$

式中, $[C]$ 、 $[M]$ 、 $[K]$ 分别为阻尼矩阵、质量矩阵、刚度矩阵; α 为质量阻尼系数, β 为刚度阻尼系数。

3 时程响应分析

为定量评估 PGM 与 RGM 对结构响应的放大效应, 本研究引入两个无量纲放大系数: PN 表示 PGM 与 NGM 作用下结构响应的平均比值, RN 表示 RGM 与 NGM 作用下结构响应的平均比值。二者均基于所选地震动逐条计算后取平均值得到, 在此基础上, 进一步分析不同地震动分量结构地震响应的放大系数 PN、RN 的影响。

图3至图5展示了该极限馆结构在不同地震动输入及断层位置下的关键响应参数结果(图中实线代表断层上盘台站记录下的响应值, 虚线代表下盘台站记录下的响应值)。从图中可以得出以下主要规律: 在脉冲型地震动(PGM)作用下, 结构的最大节点位移、最大支座反力及最大杆件应力均达到最大值。当断层位置相同时, 水平地震动分量激励下的最大节点位移与最大支座反力均大于竖向激励; 然而, 最大杆件应力则呈现相反规律, 即竖向激励下的杆件应力值更高。在同一地震动输入方向下, 断层上盘分量引起的最大节点位移与最大支座反力普遍大于下盘; 但对于杆件应力, 则是断层下盘记录下的数值更大。为具体量化上述规律, 所有工况下

的关键响应数据及其对应的放大系数如下所述。对于水平地震动分量, 在断层上盘处, PGM、RGM、NGM 作用下的最大节点位移分别为 42.9、42.4 和 41.4cm, 最大杆件应力分别为 5840.83、5808.01 和 5551.4MPa, 最大支座反力分别为 65.3、64.5 和 64.43kN; 其对应的放大系数 PN 分别为 1.04、1.05、1.01, RN 分别为 1.02、1.05、1.00。在断层下盘处, 水平分量下的最大节点位移分别为 41.9、39.0 和 38.6cm, 最大杆件应力分别为 5476.58、5419.46 和 5218.67MPa, 最大支座反力分别为 66.4、66.2 和 65.5kN; 放大系数 PN 分别为 1.09、1.05、1.01, RN 分别为 1.01、1.04、1.01。对于竖向地震动分量, 在断层上盘处, 最大节点位移分别为 35.5、35.5 和 33.7cm, 最大杆件应力分别为 5108.87、5078.97 和 4786.02MPa, 最大支座反力分别为 67.7、66.4 和 66.09kN; 放大系数 PN 分别为 1.05、1.07、1.02, RN 分别为 1.05、1.06、1.00。在断层下盘处, 竖向分量下的最大节点位移分别为 34.6、34.5 和 33.7cm, 最大杆件应力分别为 4958.26、4811.03 和 4786.02MPa, 最大支座反力分别为 68.8、68.1 和 68.0kN; 放大系数 PN 分别为 1.03、1.05、1.01, RN 分别为 1.02、1.04, 而支座反力的 RN 值极为接近, 为 1.01 与 1.00。基于上述数据, 为进一步分析断层位置的影响程度, 选取对比上盘与下盘响应值可知: 在不同地震动类型下, 断层位置对响应参数比值的影响幅度较小, 基本在 1.00 倍上下微幅波动。如, 在 PGM 作用下, 水平与竖向分量的不同断层间最大节点位移、最大支座反力和最大杆件应力分别为 1.02 和 1.03; 1.07 和 1.03; 约为 0.98。NGM 与 RGM 作用下也呈现类似的小幅度特征, 其水平与竖向分量的节点位移、支座反力和杆件应力分别在 1.01 至 1.09 以及 1.00 至 1.03 之间; 1.00 至 1.07 之间; 0.97 至 0.98 之间。

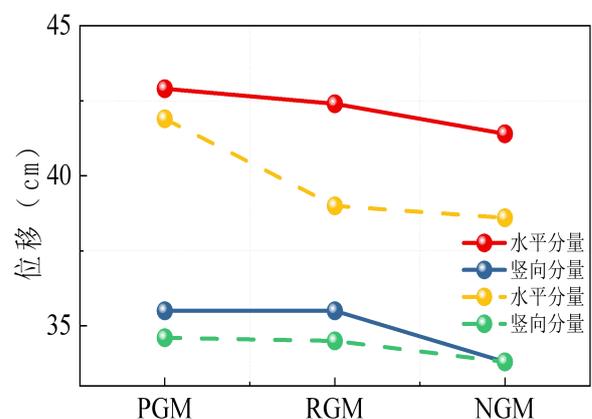


图3 最大节点位移

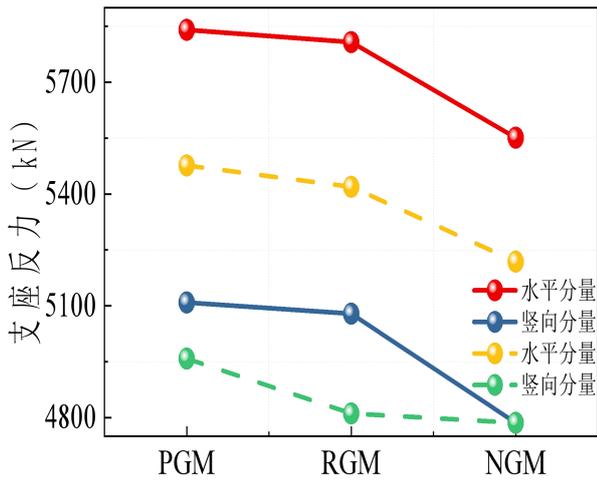


图4 最大节点支座反力

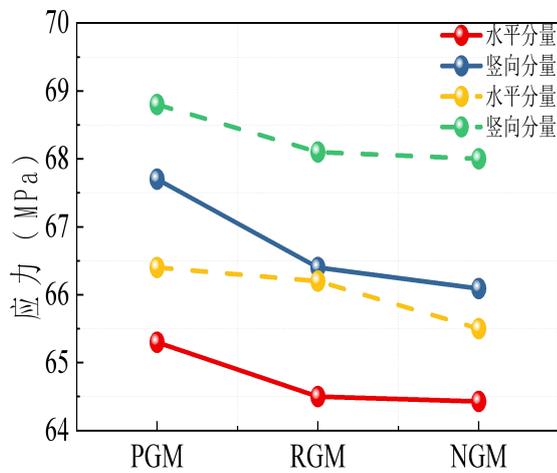


图5 最大节点应力

4 结论

本研究针对异形钢结构体育馆在地震作用下的动力响应进行了深入分析。通过对一座典型的异形结构极限馆进行研究，选取一组包含7条 PGM 记录以及对应的7条剔除速度脉冲分量的 RGM 记录和一组7条 NGM 记录作为地震输入，并将其调幅为 0.11g 并对其进行动力响应分析，通过数值模拟系统评估了地震动分量对结构节点位移、最大杆件应力及最大支座反力的影响，并为了评估 PGM 与 RGM 对结构响应的放大效应，引入两个无量纲放大系数：PN 表示 PGM 与 NGM 作用下结构响应的平均比值，RN 表示 RGM 与 NGM 作用下结构响应的平均比值，最后得出以下结论：

(1) 对于不同地震动分量和不同断层位置，结构的关键响应参数的放大系数 PN、RN 不小于 1.00，表明 PGM、RGM 对结构响应具有放大效应。但是水平分量与竖向分量下间的关键响应参数的放大系数间差异不

明显，因此竖向分量在进行结构抗震时亦是不可忽视的。

(2) 在水平地震动下，断层上盘的最大节点位移与最大支座反力大于下盘，而杆件应力最大值则普遍出现在断层下盘，且竖向激励下的最大杆件应力整体更高。

(3) 对比放大系数 PN 与 RN 可知，二者对支座反力的放大效应强于对杆件应力的影响，但是 PN、RN 间的差异不明显。台站在断层位置不同对脉冲的放大效应本身影响较小，表明地震动特性中的脉冲效应或上盘效应对结构影响较弱。

(4) PGM 作用下支座反力的放大系数稳定高于其他结构响应参数，是抗震设计的敏感指标；断层位置与竖向激励共同导致的杆件应力增加不容忽视，建议在类似场地将脉冲型地震动作为支座设计的控制工况，并单独计算竖向地震动下的构件强度。

参考文献

[1]Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W., & Wald, D. J. (1995). Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings. *Earthquake Spectra*, 11(4), 569~605. <https://doi.org/10.1193/1.1585828>

[2]ALAVI B, KRAWINKLER H. (2001), Effects Of Near-fault Ground-motion On Frame Structures: Report No. 138[R]. Stanford: Technical Report of Blume Center.

[3]Mavroeidis, G. P., Dong, G., & Papageorgiou, A. S. (2004). Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(9), 1023~1049. <https://doi.org/10.1002/eqe.391>.

[4]Baker, J. W. (2007). Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486~1501. <https://doi.org/10.1785/0120060255>.

[5]Zhai, C., Chang, Z., Li, S., Chen, Z., & Xie, L. (2013). Quantitative Identification of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions Based on Energy. *Bulletin of the Seismological Society of*

- f America, 103(5), 2591~2603. <https://doi.org/10.1785/0120120320>.
- [6]石文杰,孙贵洪,钟杰,等.近断层地震动下基础隔震网壳-支承结构的地震响应研究[J].地震工程与工程振动,2025,45(05):142-153.
- [7]ZHANG Ming, PARKE G, CHANG Zhiwang. The dynamic response and seismic damage of single-layer reticulated shells subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake and Structures, 2018, 14 (5) : 399-409.
- [8]钟杰,支旭东,范峰,等.近场与远场地震动作用下单层柱面网壳结构易损性分析[J].土木工程学报, 2020, 53 (增刊2) : 177-182. ZHONG Jie, ZHI Xudong, FAN Feng, et al. Analyses of seismic fragilities of single-layer cylindrical reticulated shells under near-fault and farfield ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53 (S2) : 177-182. (in Chinese).
- [9]钟杰.网壳结构的概率地震易损性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016. ZHONG Jie. Probabilistic Seismic Fragility Analysis of Reticulated Shells [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese).
- [10]丁阳,崔中豪,石运东.近场地震作用下三维隔震网壳隔震层位移响应研究[J].地震工程与工程振动,2019,39(4):65-72. DING Yang, CUI Zhonghao, SHI Yundong. Study on the isolation displacement response of three-dimensional isolated reticulated shells under near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39 (4) : 65-72. (in Chinese).
- [11]冀昆,温瑞智,任叶飞,尹建华.我国抗震规范时程分析中地震动的输入数量[J].西南交通大学学报,2020,55(4):743-751.