

冯伟栋, 曹均锋, 彭刘亚, 等. 地震安评中天然地震波选取方法研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 97-101. FENG Weidong, CAO Junfeng, PENG Liuya, et al. Study on the Selection Method of Natural Seismic Wave in Earthquake Safety Evaluation[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 97-101]

地震安评中天然地震波选取方法研究

冯伟栋¹, 曹均锋¹, 彭刘亚¹, 王伟²

(1. 安徽省地震局, 合肥 230031; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 近年来工程场地地震安全性评价工作日趋规范化, 安评相关方法与技术也在不断的发展与完善。而超高、超限等复杂结构类型越来越成为城市建筑建设重点, 根据《建筑抗震设计规范》要求, 此类建筑在抗震设计工作中需要进行时程分析, 时程分析输入地震动的选用需考虑与规范反应谱在“统计意义上相符”。在总结常用选择方法的基础上, 提出一种新的选波思路, 即按照安评结果反应谱作为目标反应谱, 基于强震记录数据库, 利用 PEER 强震记录数据库及搜索平台, 寻找最优匹配天然地震波, 作为结构时程分析输入地震波, 通过实例对比分析, 该方法选取的地震波在结构时程分析中具有良好的适用性。

关键词: 地震安全性评价; 时程分析; 输入地震波

中图分类号: P315.91

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0097-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.13

Study on the Selection Method of Natural Seismic Wave in Earthquake Safety Evaluation

FENG Weidong¹, CAO Junfeng¹, PENG Liuya¹, WANG Wei²

(1. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China; 2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: In recent years, the seismic safety evaluation of engineering sites has become increasingly standardized, and safety evaluation methods and technologies have also been developed and improved. Buildings with complex structure types such as ultra-high and over-limit are increasingly becoming the focus of urban construction. According to the requirements of the "Code for Seismic Design of Buildings", time history analysis is required for high rise buildings in seismic design work, and the selection of input ground motion for time history analysis needs to be considered "statistically consistent" with the code response spectrum. Based on the summary of commonly used selection methods, a new wave selection for the input motion idea is proposed, that is, the response spectrum of the safety evaluation result is used as the target response spectrum, the strong earthquake record database, and the PEER strong earthquake record database and the search platform are used to find the best matching natural seismic wave as the input seismic wave for structural time history analysis. Through comparative analysis of examples, the seismic waves selected by this method have good applicability in structural time history

收稿日期: 2021-05-10

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19068Y)

作者简介: 冯伟栋(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工程抗震工作。

E-mail: forweidong@gmail.com

通讯作者: 王伟(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土地震工程研究。

E-mail: wwwiem@163.com

analysis.

Keywords: Seismic safety evaluation; Time history analysis; Input seismic wave

0 引言

《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)中明确指出:为保证甲类建筑和超高层建筑的抗震安全,在进行抗震设计验算时除了采用反应谱法外,还应采用时程分析法计算多遇地震下结构的抗震承载力^[1]。时程分析法分析结果的可靠性,主要取决于建筑结构模型和输入地震动的精确性,输入地震波不同,时程分析法所得结构地震反应相差甚远,计算出的弹塑性位移和内力相差可达几倍、甚至几十倍之多^[2]。因此,地震波的合理选择是时程分析结果能否满足工程抗震设计要求的必要前提。但是,由于地震动是时频非平稳随机过程,不仅受到震源性质、传播介质和场地条件等诸多因素的影响,还要考虑地震环境、地震波数量、地震幅值和持时等综合因素。因此合理选择输入地震动进行结构时程分析是地震安评工作中面临的巨大挑战。

2010规范5.1.2-3条给出了时程分析法选择输入地震波的简要准则:应按照建筑场地类别和设计地震分组来选择输入地震动,以考虑场地条件和近远震输入地震动的差异性,且选择的天然地震动数量不应少于总输入地震动的三分之二,多组时程曲线的平均地震影响系数曲线(即反应谱)应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符^[1-2]。但是,这一选波准则比较笼统,从而致使其可操作性较差,设计人员应用起来比较困难。为了降低错误率,设计人员往往选用几条经典的地震动时程如El Centro、Taft记录等,而无视与项目相关的场地条件和地震构造背景等相关因素,致使同一结构在多组相同强度地震动输入下的计算结果差异很大,较难满足规范要求。本文旨在总结常用输入地震动选择方法的基础上,提出了一种新的选波思路,即按照安评结果反应谱作为目标反应谱,基于强震记录数据库,利用PEER强震记录数据库及搜索平台,寻找最优匹配天然地震波,作为结构时程分析输入地震波。

1 工程中常用的选波方法概述

时程分析法实施的前提是地震波输入的确定

性,地震动输入时程选取的好坏直接决定了建筑结构未来遭受地震时动力响应的合理性。一般认为,应从地震动峰值、频谱特性及持时等三要素与抗震规范给出的设计反应谱相近作为选波的控制条件,从而使选择的多样本地震动输入下结构地震反应具有一定的群聚效应,否则多波验算结果产生过大的离散性将很难指导设计。因此,国内外共识性的选波规则是将输入地震动的反应谱与规范给出的设计反应谱进行频谱对照以获取相似的频谱特征,然后进行等比例的峰值调整以获取相似的幅值特征,我国的抗震设计规范即采用了这种思路,即指出了用于时程分析的地震动记录的反应谱应与振型分解反应谱法采用的反应谱在统计意义上相似^[1]。在安评工程应用中常用的选波方法如下所述^[3]。

1.1 按场地类别选波

根据建筑物所在场地类别、地震分组,再考虑建筑物的抗震设防烈度,选择以往地震中获取的具有相同场地类别和抗震设防烈度地区的天然地震动记录。但是这一方法存在如下局限性:烈度和场地类别的判别都是半经验的方法,所谓的相同烈度、相同场地类别在物理含义上往往相差甚远,从而选择的地震动差异具有很大的不确定性。

1.2 按地震加速度记录反应谱特征周期 T_g 和地震动持时 T_d 选波

以选择的地震动记录的反应谱卓越周期与目标场地抗震规范规定的反应谱特征周期接近为目标,且为了充分激励建筑结构,输入地震动持时不小于结构基本自振周期的5~10倍。但是这一方法在实际工程中较少使用,这是因为试图以反应谱曲线上某个到几个控制点,使得输入的地震动反应谱与规范设计反应谱相一致较难操作。

1.3 按地震加速度反应谱特征周期 T_g 和结构基本自振周期 T_1 双指标选波

该方法选波时将地震动加速度反应谱分成两段:“ $[0.1-T_g]$ 平台段”和“结构基本周期 T_1 附近段”。其中 $[0.1-T_g]$ 平台段以输入地震记录加速度反应谱均值来控制,要求其 with 规范设计反应谱在该段的相对误差低于10%;除此之外,结构基本周期 T_1 附近段的输入地震加速度反应谱均值与规范

设计反应谱相对误差均值也应低于10%。该方法相对于(2)中的方法有了一定的改进,采用相对误差均值来控制输入地震动反应谱与规范设计反应谱的一致性,来代替反应谱曲线某几个控制点作为衡量指标,避免了唯一的反应谱特征周期选取时的人为误差,在实际工程中应用较多。

1.4 按反应谱面积选波

该方法以选择的输入地震动反应谱和规范设计反应谱分别与横坐标所围面积作为类比对象,以实现所选地震动的反应谱与标准反应谱“统计意义上相符”。由于忽视了地震波的频谱特性,因此这种方法将会大大的增加了时程分析过程中的不确定性,并且利用两曲线所围面积来近似完成两曲线间的逼近在数学上也是不合理的。

2 利用安评结果选择天然波

地震发生具有极大的不确定性,如何合理设置工程抗震设防等级,是抗震设防面临的一项重要工作,经过多年的探索研究,目前广泛应用的概率地震危险性分析方法是较好的解决地震发生不确定性的较优解决方案。地震危险性分析概率方法通过计算场地具有概率含义的地震动参数(如峰值加速度,PGA)为抗震设防提供重要依据^[3]。

此方法的基本理论框架最早由 Cornell(1968)提出^[4],此后 McGuire 将其编制成计算机程序,极大促进了其推广和应用,其核心思想是给出具有概率意义的地震动参数,以作为抗震设计地震动参数。20世纪80年代,该理论被我国学者引入,并依据中国国情进行了优化,发展出考虑时空不均匀性的概率地震危险性分析方法并一直沿用至今^[5],且服务于大量重要工程的地震区划和工程场地地震安全性评价工作中,发挥了不可磨灭的贡献,并写入《工程场地地震安全性评价》中^[6]。

工程场地地震安全性评价的主要目标是获取地表设计地震动参数,为实现这一目标,需要通过地震活动性评价和地震构造评价获取震源参数,并通过以往地震震害和地震动观测记录经验获取地震动衰减关系,然后利用考虑时空非均匀的概率地震危险性分析方法获取场地基岩地震动参数,最后经过土层地震反应获取场地地表地震动参数(峰值、反应谱和时程)。

最终获取的不同超越概率水平下的地表水平峰值加速度及地表反应谱如图1所示,以此为依据最终标定针对具体场地条件的设计反应谱,为工程建筑物提供合理的抗震设计依据。利用安评结果选择地震动时程,即以图1给出的目标反应谱,利用强震记录数据库平台,选择最优匹配天然地震波,提供为结构设计时程分析使用。

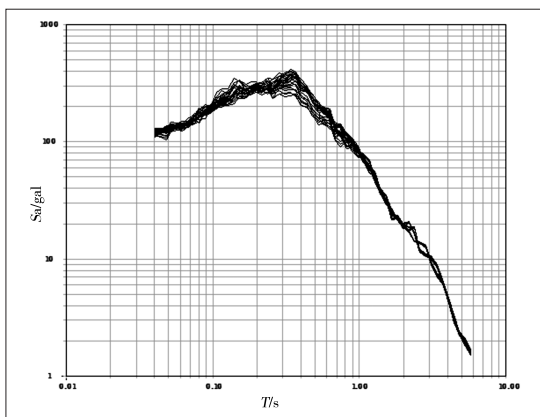


图1a 安评结果反应谱

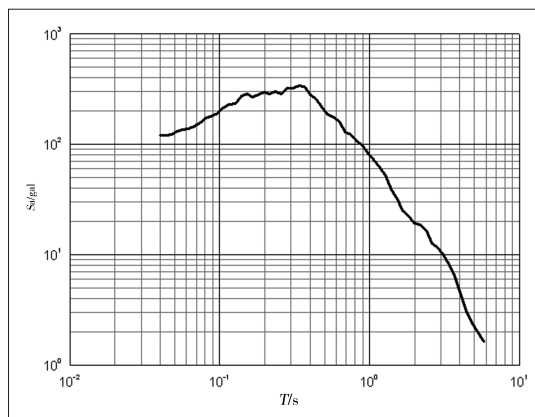


图1b 安评结果反应谱均值谱

图1 安评结果反应谱

Fig.1 Response spectrum of safety assessment results

2.1 强震记录数据库

近年来,一些强震数据库的建立和发布,可以方便地获取全球地震动加速度时程数据,特别是强震记录数据库网站的建立,更方便研究者使用强震数据,使用者可以根据需要搜索和下载地

震动记录数据^[3]。其中应用较广泛的强震记录数据库网站有美国太平洋地震工程研究中心强震记录数据库 PEER(peer.berkeley.edu)^[7],强地面运动观测系组织委员会(COSMOS)强地面运动虚拟数据中心^[8],日本强地面运动记录数据库(K-Net)^[9]以及欧洲强震记录数据库^[10]。其中 PEER/NGA 强震记录

数据库收集了自 1935 年至今的 3000 多条地震动记录,震级范围为 4.2~7.9,所有地震动记录均经过统一的校正和滤波处理,并开发了完善的搜索工具,方便按需查找及下载使用^[1]。中国强震动台网中心(CSMNC)在 2008 年汶川地震中也获得 420 组 1253 条宝贵的主震加速度记录^[12]。

本文从 PEER/NGA 及汶川地震记录数据库中挑选出关键数据齐全的地震动记录,作为本文研究的地震动数据库,这些关键数据包括台站的场地条件和断层距等。同时要求强震仪有效频率不小于 0.16 Hz,即其有效周期不小于 6 s;另外,排除了地面峰值加速度 PGA 小于 40 Gal 或地面峰值速度 PGV 小于 5 cm/s 的地震记录;所以选择的地震动记录均包含双水平分量,尽量包含竖向分量。

2.2 目标谱设定及地震波选择

选择合理的地震动记录与给定的工程地震危险性相关信息有着直接的关系^[3]。确定地震危险性评价(deterministic seismic hazard assessment, DSHA)以及概率地震危险性评价(probabilistic seismic hazard assessment, PSHA)是当前工程场地危险性评价的主流分析手段,规范给出的设计反应谱就是基于 PSHA 得到的。不同的评价方法得到的地震学参数信息会有所不同,从而也使选波思路和方法

会有差异^[3]。DSHA 方法可方便获取震级、断层距等地震学参数,然后可以根据场地土类型选择满足地震学参数要求和目标谱要求的地震动记录;PSHA 方法同样可以通过解集方法得到震级和断层距等地震学参数,从而可以与 DSHA 方法相同的方式选择地震动记录。但是,大部分分析和设计都是以规范给定的设计反应谱作为目标谱,并没有明确的地震学参数可供参考,只提供反映这些地震学参数的地震动参数,因而只能通过拟合反应谱来选波,并使获取记录的地震动参数与设定参数相近。从而选择地震动记录的思路可分为三步:①根据强震记录的地震学参数或已知条件,如场地条件、震级和震中距等选择与设定地震和设计场地特征相近的记录;②根据地震动参数,如强震持时、峰值加速度和卓越周期等,选择与设定的参数相近的记录;③从上述两步筛选出的记录中选择一组记录,计算记录的平均反应谱,使其与目标谱在设定周期段吻合。从上述步骤中可以看出,第三步是整个选波过程的关键。另外,要使选择的记录具有代表性,各记录之间的相关性应尽量小,其次要使记录的平均谱可以较好地拟合目标谱。图 3、图 4 为基于安评结果所得地表反应谱均值谱作为目标反应谱,利用 PEER/NGA 数据库搜索匹配所得结果。

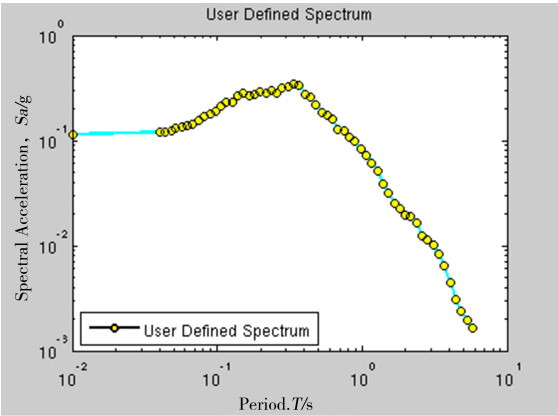


图 3 目标反应谱
Fig.3 Target response spectrum

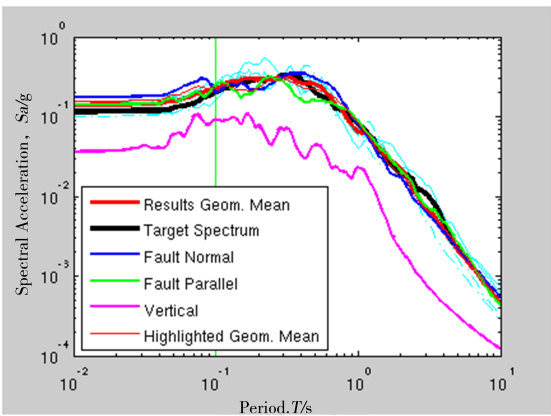


图 4 根据目标反应谱选择地震波
Fig.4 Selection of seismic waves according to the target response spectrum

3 算例分析

算例选择为 7 度区某混凝土框架核心筒体结构,地上 44 层,总高度为 161.4 m,第一、第二振型自振周期分别为 3.12 s、2.94 s。利用结构分析与设计软件 ETABS 建立结构计算模型如图 5 所示。

根据本文提出的选波方法,利用安评结果地表反应谱均值谱作为目标谱,利用 PEER/NGA 及汶川地震强震记录数据平台,共选择四条天然波,编号如表 1 所示。同时,选择结构分析时常用的 El Centro 波、Taft 波、Kobe 波及迁安波,作为输入地震波,对分析结果进行比较。

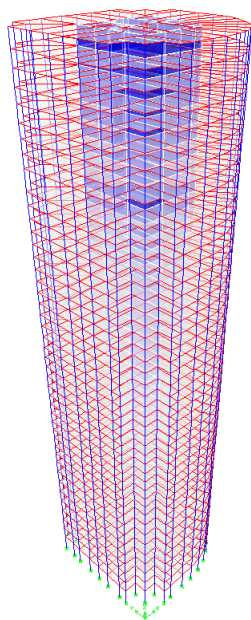


图5 计算模型
Fig.5 Computational model

由于目标建筑位于7度区且高度超过100 m,按抗震规范要求应该进行多遇地震下的弹性时程分析。根据《规范》表 5.1.2-2 要求^[1],峰值调为 35 Gal,得到基底剪力值,并与7度小震下反应谱法进行比较如表 1。

表 1 不同输入地震动基底剪力及与反应谱法偏差
Table 1 Base shear of different input ground motion and deviation from response spectrum method

时程曲线	基底剪力/10 ⁷ N	偏差
反应谱法	1.52	—
El Centro	1.88	24%
Taft	1.436	-6%
Kobe	2.28	50%
迁安	0.3513	-77%
51DYB	1.61	6%
NGA1605	1.39	-9%
NGA1169	1.203	-21%
NGA 1594	1.559	3%

根据《规范》相关要求,“时程分析所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法结果的65%”^[1],从表 1 可知,常用的 El Centro 波、Taft 波、Kobe 波及迁安波计算结果离散性较大,其中 El Centro 波和 Taft 波分析结果符合规范要求, Kobe 波和迁安波偏差较大。但是通过本文方法从 PEER/NGA 数据库选择的四条天然波的时程分析结果离

散性较小,且与振型分解反应谱法最大偏差不超过 25%,均满足规范对输入地震波的要求。

4 结论

本文总结了目前工程界常见的时程反应分析的选择输入地震动记录的方法,并提出了一种基于地震安评结果所获取的地震动反应谱作为目标谱选择地震记录的方法,并对一中长周期的钢筋混凝土框架核心筒体结构进行了弹性时程分析以对选择的地震动记录进行验证,根据不同的地震动记录选取方法所对应的结构弹性地震响应结果,得到以下结论:

- (1)结构时程分析时通常采用的经典记录计算结果离散性较大,不能完全满足规范要求,对于不同结构,不加选择地使用同样的几条经典记录,易造成设计结果偏差较大,难以满足设计要求;
- (2)基于地震安评结果,提出了优化选择地震动记录样本的方法,可使选择的样本记录平均谱与目标谱较好的吻合,并且各记录反应谱之间的离散性较小,算例验证了提出的方法的正确性和有效性。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[2] 王亚勇.结构时程分析输入地震动准则和输出结果解读[J].建筑结构,2017,47(11):1-6.

[3] 王德才.基于能量分析的地震动输入选择及能量谱研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.

[4] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis [J]. BSSA, 1968,58(5):1583—1606.

[5] 胡聿贤.地震安全性评价技术教程[M].北京:地震出版社,1999.

[6] 中国国家标准化管理委员会.工程场地地震安全性评价:GB17741-2005[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

[7] Power M., Chiou B., Abrahamson N., et al. An Overview of the NGA Project[J]. Earthquake Spectra,2008, 24(1):3.

[8] Archuleta R. J., Steidl J., Squibb M. The COSMOS virtual data center:a web portal for strong motion data dissemination [J]. Seismological Research Letters,2006,77(6):651-658.

[9] Kinoshita S. Kyoshin Net (K-NET) [J]. Seismological Research Letters,1998, 69(4):309-332.

[10] Ambraseys N. N., Smit P., Douglas J., et al. Internet site for European strong-motion data[J]. Bollettino di Geofisica-Teorica ed Applicata,2004, 45(3):113-129.

[11] Chiou B., Darragh R., Gregor N., et al. NGA Project strong-motion database[J]. Earthquake Spectra,2008,24(1):23-44

[12] 中国地震局震害防御司.汶川 8.0 级地震未校正加速度记录[M]/中国强震记录汇报(第十二集).北京:地震出版社,2008.