DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.06.26

基于 ETM 的水电站厂房抗震分析

朱少坤[1], 宋志强[1], 张大伟[2]

(1.西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2.中冶沈勘工程技术有限公司, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 耐震时程法是一种动力弹塑性抗震分析方法,该方法的关键在于耐震加速度时程曲线的合成。基于我国水工抗震设计规范的标准设计反应谱人工合成4条耐震加速度时程曲线,并以某实际工程的水电站厂房为例,分别对其进行7条天然地震动下的增量动力分析和4条耐震时程曲线输入下的非线性分析,对比研究了水电站厂房在不同地震强度下的最大层间位移角、上下游墙顶点最大相对位移,并对水电站厂房在设计地震作用下的典型节点的相对地面峰值位移与峰值加速度进行了对比。结果表明:耐震时程方法可有效地预测水电站厂房在不同等级地震作用下的地震响应,其结果处于增量动力分析结果的包络值之内,且在设计地震作用下,耐震时程方法在一定的容许范围之内可有效地对厂房结构作出地震响应评价,较增量动力分析,耐震时程方法避免了多次的调幅计算,大大提高了计算效率。

关键词: 耐震时程分析; 水电站厂房结构; 增量动力分析; 抗震分析

中图分类号:TV731; TV312 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)06-0172-08

Anti-earthquake analysis of hydropower station building based on ETM

ZHU Shaokun[1], SONG Zhiqiang[1], ZHANG Dawei[2]

(1. *Faculty of Resources and Hydro-electric Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xian* 710048, *China*;
2. *Shenkan Engineering & Technology Corporation*, *MCC*, *Shenyang* 110169, *China*)

Abstract: Endurance time method is a dynamic elastoplastic anti-earthquake analysis method, the key of which is the synthesis of Endurance time accelerograms. In this paper, four time-history acceleration curves of seismic resistance were synthesized based on the response spectra of Chinese seismic design code. Taking a hydropower station as an example, seven incremental dynamic analyses and four nonlinear analysis were performed. Comparison of the maximum interstory drift ratio and maximum relative displacements at the vertexes of upstream under different seismic intensities, the relative peak ground displacement and peak acceleration of typical joints of hydropower plant under design earthquake were compared. The results showed that endurance time method can effectively predict the seismic response of hydropower plant under different magnitude earthquakes. the result was within the envelope value of the incremental dynamic analysis result. In addition, Endurance time method can effectively evaluate the seismic response of the plant structure under the design earthquake within a certain allowable range. Compared with incremental dynamic analysis, the Endurance time method avoids multiple amplitude modulation calculation and greatly improves the calculation efficiency.

Key words: endurance time method(ETM); structure of hydropower house; incremental dynamic analysis; anti-earthquake analysis

1 研究背景

我国水资源丰富,但分布不均,主要集中于我国西南地区。近年来在我国水资源丰富的西南地区修建了一大批巨型水电站,如溪洛渡、锦屏、大岗山、白鹤滩水电站等。该地区属于高地震烈度区,水电工程选址难

收稿日期:2019-06-05; **修回日期**:2019-07-11
基金项目:国家自然科学基金项目(51479165); 陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(2017KJXX-64)
作者简介:朱少坤(1993-),男,甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事水工结构抗震研究。
通讯作者:宋志强(1981-),男,辽宁开原人,博士,教授,硕士生导师,主要从事水工结构抗震和水电站厂房机组振动研究。

以避让,厂房抗震安全受到了严重威胁。因此开展对水电站厂房的抗震安全研究及评价具有重要意义。传统的抗震分析方法有:反应谱法、时程分析法、pushover 分析方法和增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis,IDA)方法等。这些方法优缺点明确,pushover 方法是一种静力分析方法,该方法具有预测结构地震响应的直观性、简便性以及对结构输入地震动的无依赖性[1-4],但该方法不能有效地考虑高阶振型及地震动特性的影响,对结构地震响应的结果会造成一定的误差。IDA 方法以大量的时程分析结果作为结构预测地震的基础,该方法有效地考虑地震动作用的随机性并且能够较为准确地预测结构在不同强度等级地震作用下的地震响应[5],但由于每条地震波需进行多次地震峰值加速度调幅,造成大型复杂结构的非线性计算,效率过低。Estekanchi 等[6]、Riahi 等[7]、Nozari 等[8] 将 pushover 方法与 IDA 方法相结合,提出了耐震时程法(Endurance Time Method,ETM),该方法考虑时程分析中的动力效应并且结合了 pushover 方法中的简便性,在有效预测结构地震响应的同时,大大提高了计算效率。目前国内外对于 ETM 的应用主要集中于混凝土框架结构、混凝土重力坝以及钢结构领域[9-11],对于水工领域内的水电站厂房结构还未涉及。由于水电站厂房规模巨大,结构复杂,地震作用对其影响较大,发生震损将严重影响水电站枢纽的运行并威胁站内工作人员的安全。因此有必要开展 ETM 对于水电站厂房结构的抗震分析的适用性研究。

本文结合 ETM 理论,基于我国水工抗震设计规范的标准设计反应谱,生成了 4 条用于水电厂房抗震的耐震时程加速度曲线(Endurance time accelerograms,ETA),综合考虑结构的材料,荷载等参数,建立了水电站厂房三维有限元模型, 并对水电站厂房分别进行了 IDA 和 ETM 分析,对比研究了结构在不同地震动强度下的最大层间位移角、上下游墙顶点最大相对位移,并对比结构在设计地震(7 度)作用下典型节点处相对地面的峰值位移和峰值加速度的地震响应,对比讨论了 IDA 与 ETM 分析下的结构加速度分布系数,以验证 ETM 在水电站抗震的适用性。对比结果表明,ETM 在节约了时间成本,提高了计算效率的同时,可以有效地对水电站厂房结构地震响应作出评价。

2　ETA 合成

2.1　ETA 合成的基本原理

ETM 以动力推覆进行结构抗震性能评估,该方法对结构输入一条地震动强度随持时增大的加速度时程曲线,以实现结构从线性到非线性,直至结构破坏失稳的全过程分析。ETM 的关键在于合成 ETA,要求该加速度曲线在某一时程内,其目标加速度反应谱和目标位移反应谱与时间呈线性增大的关系。

$$S_a(T,t) = \frac{t}{t_{Target}} S_{ac}(T) \tag{1}$$

$$S_u(T,t) = \frac{t}{t_{Target}} S_{ac}(T) \frac{T^2}{4\pi^2} \tag{2}$$

式中:t_{Target} 为目标时间点; $S_{ac}(T)$ 为预先指定的反应谱; $S_a(T,t)$ 和 $S_u(T,t)$ 分别为目标加速度反应谱与目标位移反应谱。在一定精度条件下耐震加速度时程曲线上每个点不能同时满足公式(1)和公式(2),利用 Matlab 编程对该问题进行优化求解如公式(3):

$$\min F(a_g) = \int_0^{T_{\max}} \int_0^{t_{\max}} \left\{ \begin{array}{l} [S_a(T,t) - S_{aT}(T,t)^2 + \\ \alpha[S_u(T,t) - S_{uT}(T,t)]^2 \end{array} \right\} \mathrm{d}t\mathrm{d}T \tag{3}$$

2.2　基于我国水工抗震设计规范合成 ETA

在合成 ETA 时,需要预先指定的反应谱,一般情况下取规范反应谱或地震动记录形成的反应谱[4]。本文采用我国水工抗震设计规范中的标准设计反应谱作为预先指定的反应谱 $S_{ac}(T)$,反应谱形状如图 1 所示,具体参数详见水工抗震设计规范[12]。

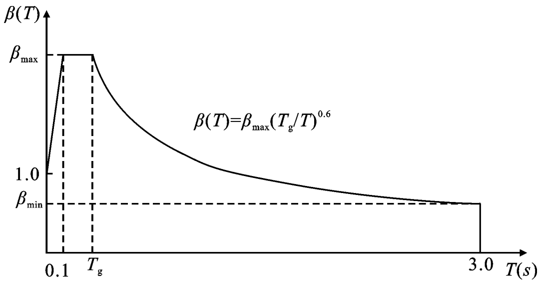
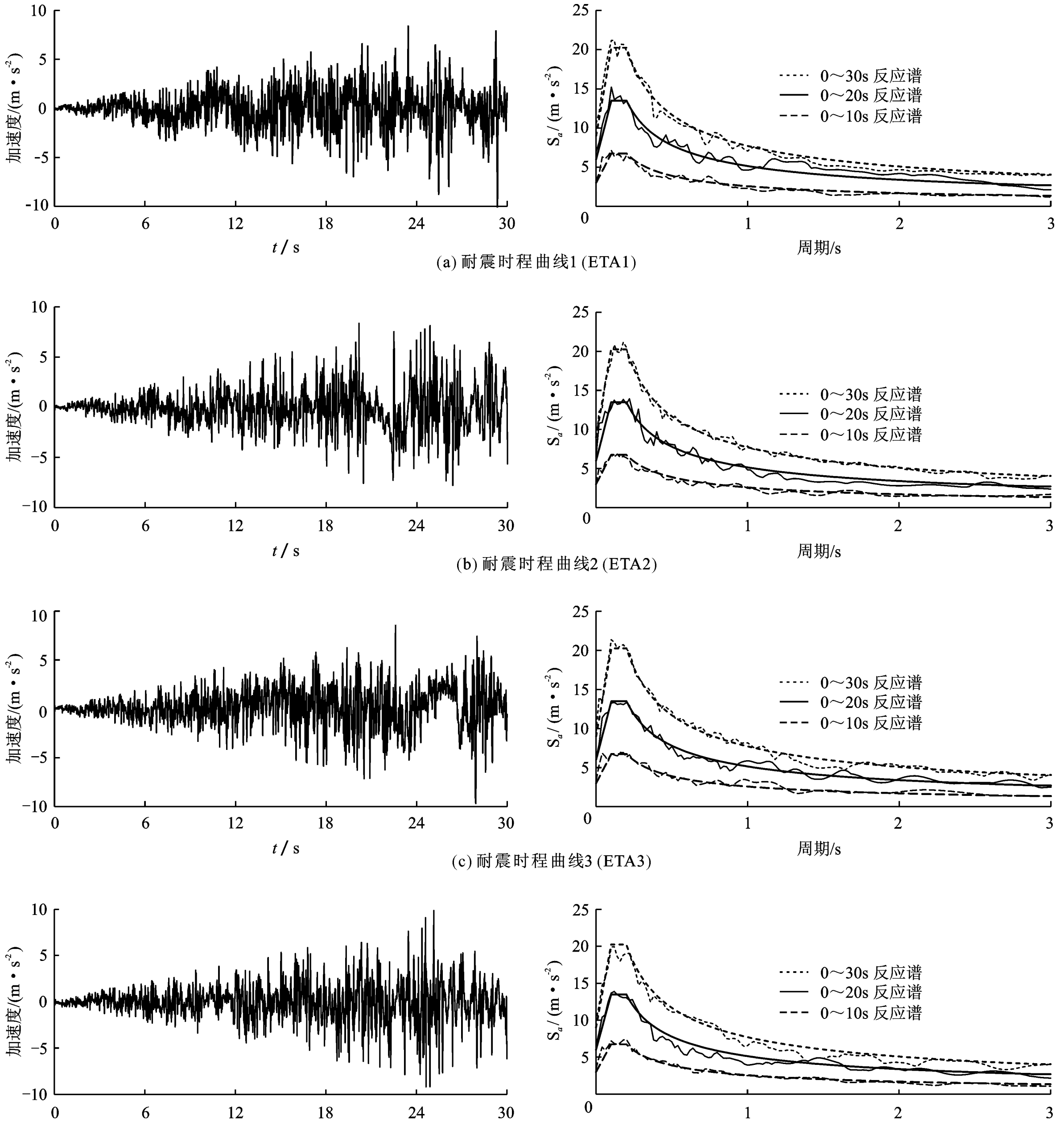


图 1　标准设计反应谱

水平设计峰值加速度 a_h 的取值大小将影响 ETA 的强度大小,故 a_h 的取值大小不受规范限制,由需要合成 ETA 的大小进行调整。基于水工抗震规范的标准设计反应谱,取目标时间点 $t_{Target} = 10$ s,水平峰值加速度代表值 $a_h = 0.3g$,场地的特征周期 $T_g = 0.20$ s,阻尼比 $\zeta = 0.05$,合成了 4 条持时为 30 s 的 ETA,如图 2 所示。图 2 中同时给出了每条 ETA 中 0 ~ 10、0 ~ 20、0 ~ 30 s 的反应谱与目标规范谱的拟合情况,可以看出每条 ETA 均与规范谱具有良好的拟合。需要注意的是初始地震动的形状对 ETA 合成有着重要影响,本文采用 SIMQKE 软件人工合

成初始地震动,使其只有上升段,没有下降段与平台段与 ETA 形状保持一致。



(a) 耐震时程曲线1 (ETA1)

(b) 耐震时程曲线2 (ETA2)

(c) 耐震时程曲线3 (ETA3)

(d) 耐震时程曲线4 (ETA4)

图 2　合成的 4 条耐震时程曲线及其反应谱(30 s)

从图 2 的 ETA 可以看出,每条 ETA 在频谱特性上具有一定的差异,并且 ETA 的强度是随时间线性增大而一般地震加速度时程的强度并非随时间线性增大[13]用一条 ETA 进行结构分析,难免会造成分析结果的离散性,所以本文采用 4 条 ETA 对水电站厂房结构进行计算分析。图 3 给出了 4 条 ETA 在 0 ~ 10 s 的反应谱与规范谱的的相对误差,由图 3 可以看出 4 条 ETA 的 0 ~ 10 s 反应谱的中位值与规范谱的相对误差控制在 20% 以内,故采用 4 条 ETA 的中位值对结构进行计算分析时,其反应谱误差较一条 ETA 要低。

3　有限元模型

本文以某实际工程的坝后式水电站厂房为研究对象,并对中间标准机组段建立基础 - 厂房三维有限元模型,如图 4 所示。坐标原点位于地基上游底部角点处,并规定顺水流向为 X 轴向下游为正;垂直水流向为 Y 轴向左岸为正;竖直方向为 Z 轴向上为正;沿厂房建基面分别向 Z 轴负向、上下游以及左右岸两侧延深 1 倍厂房高度从而建立结构的地基。

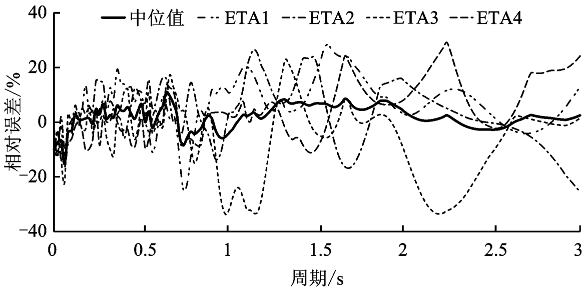
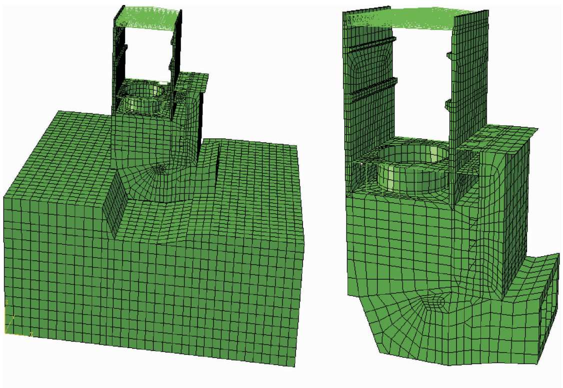


图 3　持时为 30 s 的各 ETA 加速度反应谱误差分析



(a) 水电站基础-厂房有限元模型　　(b) 水电站厂房有限元模型

图 4　水电站厂房结构三维有限元模型

地基、厂房下部大体积混凝土结构以及上下游墙均采用 C3D8 单元离散,楼板、风罩、尾水管、钢蜗壳采用采用 S4 单元离散,梁、柱采用 B33 单元模拟,钢网架以及厂房上下游墙的配筋采用 T3D2 单元模拟。水电站厂房上下游墙顶部与顶部网架通过铰接相连,水轮发电机组、吊车、屋面荷载、流道内的动水压力等荷载在相应的位置以附加质量模拟。厂房两侧设为自由边界,忽略相邻机组段的相互影响。基础底面全约束,四周法向约束,逐步积分法采用 H. H. T 法求解。

厂房主体混凝土的力学参数如表 1 所示。混凝土材料采用 ABAQUS 有限元软件中的混凝土损伤塑性模型(CDP 模型),本文利用《混凝土结构设计规范》(GB50010－2010)规定的 C25 等级混凝土应力－应变关系,根据 Najar 损伤理论计算混凝土的拉伸压缩损伤因子,建立出 C25 等级混凝土的损伤塑性模型。考虑到厂房的上部结构是抗震关注的重点,所以仅对有限元模型的上下游墙进行了配筋,上下游墙内外两侧分别布置 2 层钢筋,竖向钢筋布置为 Φ36@200,横向钢筋布置为 Φ20@20 。钢筋单元(T3D2)采用*EMBEDED 方式嵌入到混凝土单元中,采用双线性随动强化本构模拟其力学行为。地基岩体及钢构件假定为线弹性模型。

表 1　厂房主体混凝土材料主要力学参数表

材料	质量密度/($kg \cdot m^{-3}$)	静态弹模/GPa	泊松比	静态抗拉强度标准值/GPa	静态抗压强度标准值/GPa
C25 混凝土	2500	28	0.17	1.78	16.7
基岩	2700	35	0.20		
钢构件	7850	200	0.28	400	400
钢筋	7850	200	0.30	400	400

4　水电站厂房抗震分析

4.1　地震波的选取

为对比分析 ETM 与 IDA 结构地震响应预测的差异,本文以水工抗震设计规范中的标准设计反应谱为目标谱,从地震数据库中心选取 6 条天然地震波,并基于水工抗震设计规范的标准设计反应谱人工合成一条地震波,地震波具体信息如表 2 所示。图 5 给出了 6 条天然地震波调幅后与水工设计规范标准设计反应谱的对比情况,从图 5 中可以看出,地震动反应谱的中位值与规范谱能够较好地吻合。将上述地震波记录进行调幅,每条地震波调整 PGA 为(0.1～1.0)g 之间的地震波记录,每条地震波记录调幅 10 次,调幅增量为 0.1g 。

表 2　选取的 6 条天然地震波及人工波详细信息

编号	地震名称	记录台站	震级	年份	PGA(g)
DZ1	Chi－Chi_Taiwan	CHY029	7.62	1999	0.289
DZ2	Chi－Chi_Taiwan	TCU045	7.62	1999	0.473
DZ3	Imperial Vally－02	EI Centro Array#9	6.95	1940	0.211
DZ4	parkfield	Shandon Array#12	6.19	1966	0.063
DZ5	san Fernando	Hollywood stor FF	6.61	1971	0.195
DZ6	san Fernando	Narrows dam	6.61	1971	0.108
DZ7	人工波				0.100

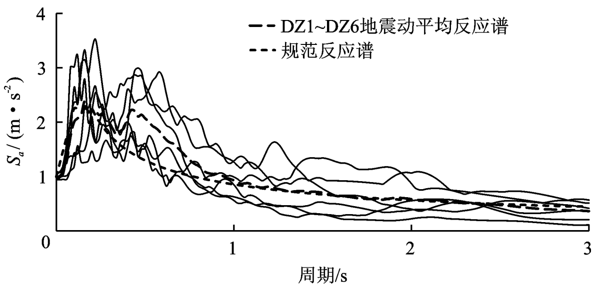


图 5 6 条天然地震波反应谱与规范反应谱

4.2 ETM 分析结果处理

ETA 是一种动力激励,结构在其作用下的动力分析结果是往复滞回的,故采用下式确定 ETM 分析的结果[13]:

$$f(t)^{EDP} = \max(\mathrm{Abs}(f(\tau)),\ \tau \in [0,t]) \quad (4)$$

式中:$f(t)^{EDP}$ 为结构 t 时刻结构响应的工程需求参数(engineering demand paramaters,EDP);$f(\tau)$ 为 $[0,t]$ 内结构的响应。

对于耐震分析结果,时间 t 为横坐标以表示不同强度的地震动(intensity measure,IM),结构响应为纵坐标。IDA 中,通过对单一地震动的调幅来获取不同地震动强度下的结构响应。为方便与 ETM 分析的结果进行对比,将 IDA 中的地震动强度转化为 ETM 分析中的地震强度-时间。在 IDA 中,PGA、PGV 以及结构第一周期 T_1 对应的谱加速度 $S_a(T_1)$ 常作为地震动强度指标,现有研究表明,当采用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标时,可以有效地减小结果的离散型[14],所以以 $S_a(T_1)$ 作为基准, IDA 分析中的地震动强度指标转化可以表示为:

$$\frac{t_{ET}}{\gamma \cdot S_{as}(T)} = \frac{t_{Target}}{S_{ac}(T)} \quad (5)$$

式中:t_{ET} 为转化后的 ETM 时间;γ 为 IDA 中地震动的调幅系数;$S_{as}(T)$ 为地震动记录的反应谱值;$S_{ac}(T)$ 规范反应谱值。

4.3 ETM 分析与 IDA 结果对比

4.3.1 最大层间位移角 在水电站厂房的地震响应评价中,鲜有专门的研究或说明[15]。结构最大层间位移角值的大小与其本身的抗倒塌能力紧密相关,并且不同地震动强度作用下结构的最大层间位移角值也在我国抗震设计规范中有着相应规定[16],因此最大层间位移角成为工程领域内结构抗震设计重要的指标之一,本文中最大层间位移角为厂房上游墙顶靠右岸一侧与厂房上游墙和发电机楼板连接处靠右岸一侧结点间的位移角。图 6(a) 给出了水电站厂房在 6 条天然地震波加 1 条人工地震波作用下的 IDA 结果和 4 条 ETA 输入下的结果,从图 6(a)中可以看出,ETM 分析的结果整体处于 IDA 结构的包络值之内,并且 ETM 分析结果的中位值与 IDA 结果的中位值相近,这个结果表明,运用 ETM 可以有效地预测对水电站厂房结构在不同强度等级地震动作用下的最大层间位移角。为量化评价 ETM 分析的结果,将 IDA 与 ETM 分析的最大层间位移角结果进行相关性分析,在耐震时间内每隔2 s 取一个分析结果,共 15 点的数据进行相关性分析。拟合结果表明对于水电站厂房的 ETM 与 IDA 的分析结果非常接近,如图 6(b)所示。由图 6(b)可知, ETM 分析结果是 IDA 结果的 1.2499 倍,相关性分析中拟合系数 R^2 为 0.9772,这说明对于水电站厂房,ETM 可以有效地预测结构在不同强度等级地震动作用下的最大层间位移角。

4.3.2 上下游墙顶点最大相对位移 在水电站厂房的抗震设计中,其上下游墙顶点位移往往成为关注的重点。由于“鞭梢效应”以及上、下游墙柱体系存在刚度差异,水电站厂房的变形成为评价体系的重要部分[15],而上下游墙顶点的最大相对位移可以表征厂房结构的地震响应中的变形安全水平。图 7(a)给出了水电站厂房在 6 条天然地震波和 1 条人造地震波作为输入的 IDA 结果和 4 条 ETA 输入的 ETM 分析结果。从图 7(a)中可以看出,ETM 分析的结果处于 IDA 结果的包络值之中,并且 ETM 分析结果的中位值与 IDA 结果相近,这说明 ETM 方法可以有效地预测水电站厂房在不同强度等级地震作用下结构的上下游墙顶最大相对位移。图 7(b)给出了IDA与 ETM 分析结果的上下游墙顶点最大位移相关性分析,从图 7(b)中可以看出,IDA 结果与 ETM 分析结果近似相等,其 ETM 分析结果是 IDA 结果的0.9976倍,相关性分析的拟合系数 R^2 为 0.9479,这说明对于水电站厂房就结构,耐震时程分析能够有效地预测结构在不同强度等级地震作用下的上下游墙顶点最大相对位移。

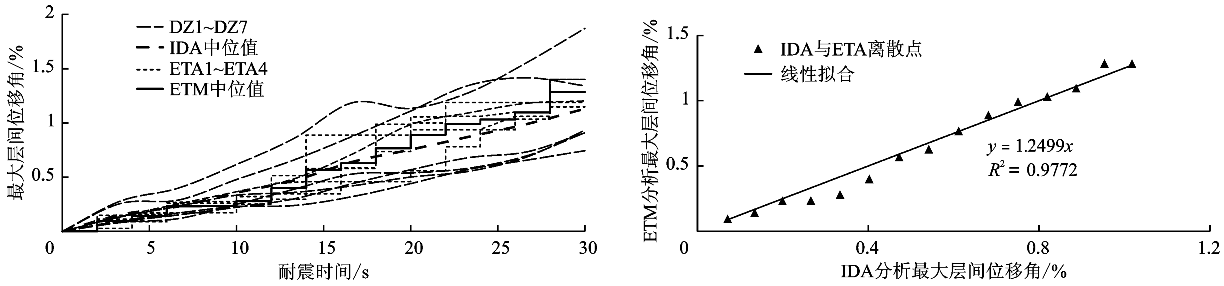
5 ETM 分析结果

5.1 典型节点处的地震响应

本文中实际工程的水电站厂房结构是按照 7 度(0.1g) 进行设计,对 IDA 结果取 0.1g 峰值加速度对应的结果,对于 ETM 分析结果同样取 0.1g 峰值加速度对应的结果。为更加全面地反映厂房结构地震响应结果,在厂房结构有限元模型中选取 5 个典型节点作为评价对比的依据,分别为节点 8076(下游墙顶部中部)、节点 6626(下游墙与发电机楼板连

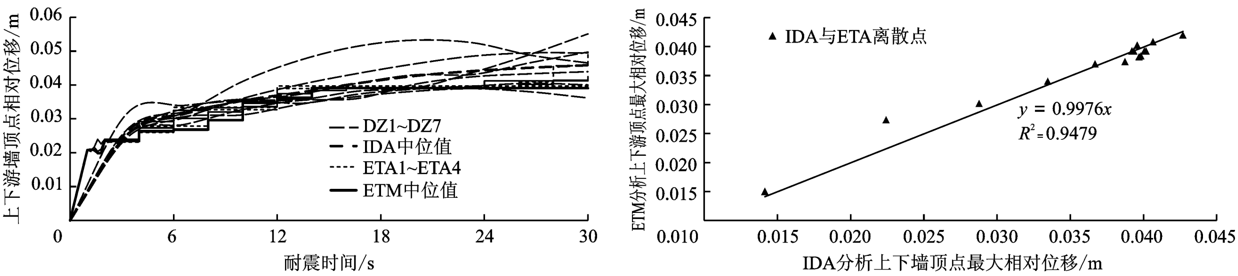
接处中部)、节点 8235(发电机层楼板跨中某一点)、节点 8068(风罩靠下游侧某一点)和节点 3001(座环靠下游侧某一点),分别读取其相对地面峰值加速度值和相对峰值位移值作为厂房结构的地震响应,以应证 ETM 在水电站厂房结构抗震中的应用。表 3、4 分别给出了厂房结构 5 个关键节点处的时程分析与 ETM 分析的相对地面峰值位移与峰值加速度响应,分别对时程分析结果与 ETA 分析结果求其响应的平均值,并对时程分析与 ETA 响应的平均值进行差值分析。

从表 3、4 中可看出,对于相对地面峰值位移与峰值加速度响应的相对差值,节点 3001(座环靠下游侧某一点)分别为 9.57%、17.81%,节点 6626(发电机层楼板同下游墙连接处中部)分别为 2.284%、17.42%,节点 8076(下游墙顶中部)分别为 6.202%、19.93%,节点 8068(风罩靠下游侧某一点)分别为 1.377%、18.61%,节点 8235(发电机层楼板跨中某一点)分别为 2.549%、17.45%。结果表明,在一定的误差容许范围内,ETM 可以有效的预测水电站厂房结构地震响应。



(a) 厂房结构最大层间位移角对比　　(b) 厂房结构IDA与ETA结果相关性分析

图 6　最大层间位移角对比及相关性分析



(a) 结构上下游墙顶点最大相对位移对比　　(b) 结构IDA与ETA结果相关性分析

图 7　上下游墙顶点最大相对位移对比及相关性分析

表 3　厂房 5 个关键节点相对地面位移值比较　cm

比较项目	地震动	3001	6626	8076	8068	8235
IDA	DZ1	0.351	0.859	3.812	0.713	0.847
	DZ2	1.124	1.149	4.762	1.068	1.145
	DZ3	1.312	1.636	5.102	1.346	1.617
	DZ4	1.185	2.112	3.270	1.482	2.066
	DZ5	1.148	2.121	4.178	2.110	2.124
	DZ6	0.744	1.520	4.635	1.290	1.480
	DZ7	1.210	1.186	4.280	1.771	1.816
ETM	ETA1	0.956	2.492	3.092	2.263	2.487
	ETA2	0.865	1.462	2.837	1.317	1.458
	ETA3	0.862	1.407	3.512	1.198	1.399
	ETA4	0.973	1.194	6.659	0.899	1.158
IDA 均值		1.010	1.602	4.291	1.397	1.585
ETM 均值		0.914	1.639	4.025	1.416	1.625
相对差值/%		9.57	2.284	6.202	1.377	2.549

表 4　厂房 5 个关键节点相对地面加速度值比较　m/s^2

比较项目	地震动	3001	6626	8076	8068	8235
IDA	DZ1	0.045	0.214	6.407	0.181	0.211
	DZ2	0.034	0.254	3.214	0.186	0.247
	DZ3	0.050	0.227	4.985	0.185	0.223
	DZ4	0.051	0.284	5.864	0.230	0.280
	DZ5	0.039	0.189	3.702	0.161	0.187
	DZ6	0.044	0.229	3.784	0.187	0.225
	DZ7	0.037	0.172	5.598	0.146	0.168
ETM	ETA1	0.040	0.211	4.156	0.176	0.208
	ETA2	0.033	0.171	2.445	0.138	0.168
	ETA3	0.036	0.197	4.919	0.142	0.192
	ETA4	0.032	0.162	3.830	0.138	0.159
IDA 均值		0.043	0.224	4.793	0.182	0.220
ETM 均值		0.035	0.185	3.838	0.148	0.182
相对差值/%		17.81	17.42	19.93	18.61	17.45

5.2 加速度分布系数

在水电站厂房的抗震设计中,水平地震加速度沿厂房高度的分布是设计过程中关注的重点[17],为对比研究ETM在水电站厂房结构抗震分析的适用性,将时程分析与ETM分析的厂房结构加速度分布对比研究,图8给出了厂房结构在设计地震(7度)作用下时程分析与ETM分析下的水平地震加速度沿高度的变化,从图8中可以看出,时程分析的中位值与ETM分析的中位值近似的接近。当水电站厂房的高度大于发电机楼板(33.80 m)时,由于鞭梢效应的存在,使得加速度分布系数开始显著的增大。对于水平地震加速度沿厂房高度的分布,时程分析与ETM分析的变化趋近似相同,这说明ETM可以有效地运用在水电站厂房的抗震设计中。

5.3 大震时损伤状况对比

在水电站厂房遭遇大震时,通过对其累积损伤的研究可大概了解水电站厂房在大震作用时的损伤情况。为对比大震作用下(9度)水电站厂房结构的损伤状况,分别取人造地震动时程分析对应的0.4 g 损伤状况与ETA2作用时ETM分析对应的0.4 g 损伤状况对比研究。图9和10分别为人工波和ETA2作用下厂房结构累积压损伤和拉损伤云图。由于受输入地震动的持时和频谱特性影响,水电站厂房在累计压损伤和累计拉损伤表现出一定的差异,但在人工波和ETA2作用下其累计损伤出现的部位表现出一致性。由图9可以看出人工波与ETA2的累计压损伤均出现于电机层楼板在与厂房上游墙的连接处以及下游墙牛腿处;由图10可以看出人工波与ETA2的累计拉损伤均出现于上游墙的牛腿处、发电机层楼板在与厂房上游墙的连接处以及副厂房楼板在靠近厂房下游墙和下游墙牛腿处。对于大震作用下水电站厂房的损伤状况,时程分析和ETM分析均可以作出有效的评价,虽然存在一定的误差,但考虑到输入地震动的持时以及频谱特性影响,这种误差是可以接受的,ETM分析可以作为一种简化的水电站厂房损伤评价方法。

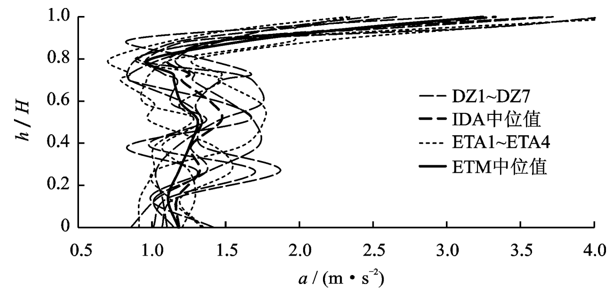


图8 水电站厂房水平地震加速度沿高度变化

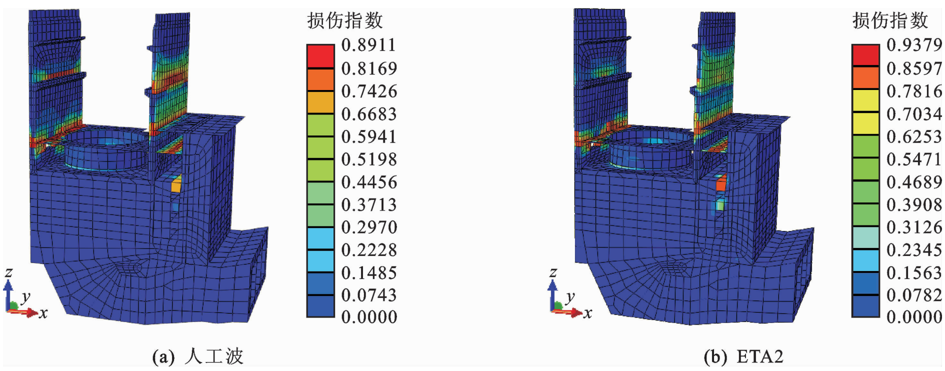


图9 厂房结构累积压损伤云图

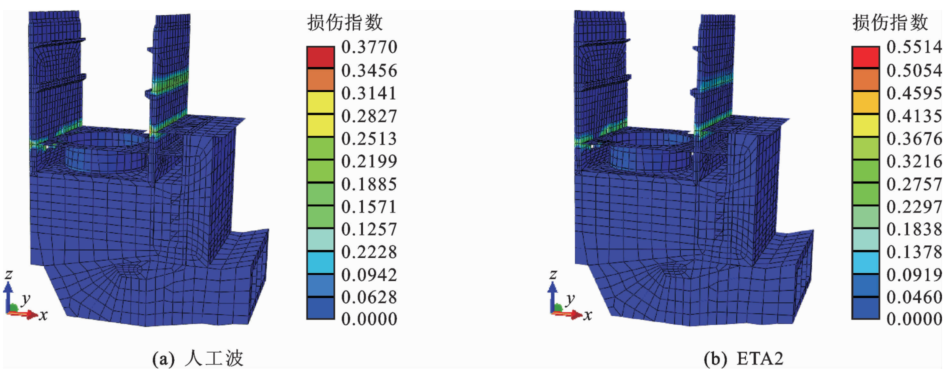


图10 厂房结构累积拉损伤云图

6 结　论

本文基于我国水工抗震设计规范的标准设计反应谱,人工合成了 4 条持时为 30 s 的 ETA,并建立了某实际工程水电站厂房的三维有限元分析模型,分别对水电站厂房进行 6 条天然地震波加 1 条人工波的 IDA 以及 4 条 ETA 的 ETM 分析,得到以下结论:

(1)在基于水工设计规范生成 ETA 的过程当中,由于 ETA 的地震强度等级持续增大,所以设计水平地震动峰值 a_h 可不按照规范选取,而是根据需要合成 ETA 的强度自行调整。如本文中以水平地震动峰值 $a_h = 0.3g$,人工合成目标时间点 $t_{Target} = 10$ s、持时 30 s 的 4 条 ETA 曲线。

(2)人工合成 ETA 曲线时,初始地震动的形状将会影响 ETA 的合成,严重时有可能造成 ETA 曲线的失真。本文在合成 ETA 曲线的过程中,采用 SIMQKE 人工合成初始地震动,通过控制参数使初始地震动的波形只有上升段,没有平台段和下降段,与 ETA 曲线的形状相似。

(3)对比 IDA 与 ETM 分析结果的最大层间位移角、上下游墙顶点最大相对位移,尽管由于输入地震动的随机性导致其结果出现了一定的离散性,但 IDA 与 ETM 分析结果非常接近,而 ETM 分析只进行了 4 次运算就可以得出与 IDA 70 次运算相近似的结果,大大提高了计算的效率。

(4)研究对比了在设计地震下(7 度)作用下,时程分析与 ETM 分析的相对地面峰值位移与峰值加速度响应以及加速度分布系数,结果表明在一定的容许误差范围内 ETM 分析可以有效地对水电站厂房进行抗震响应评价。

(5)当水电厂房遭遇大震(9 度)作用时,对比研究了时程分析与 ETM 分析的损伤状况,结果表明尽管由于输入地震动的持时和频谱特性对损伤结果造成了一定的误差,但作为一种简化的抗震分析方法是可以接受的。

综上所述,对于水电站厂房结构,ETM 在预测不同强度等级地震作用下的地震响应时能与 IDA 的结果较为吻合,可以大大提高计算效率。对于研究水电站厂房的地震易损性[18-20]具有极大的潜力,但需要更近一步的研究。

参考文献:

[1] ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [S]. Redwood City (CA): Applied Technology Council, 1996.

[2] 马千里, 叶列平, 陆新征, 等. 采用逐步增量弹塑性时程分析方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的研究[J]. 建筑结构学报, 2008,29(2):132-140

[3] 吴 京,梁仁杰,王春林,等. 基于非线性静力分析的地震强度直接计算方法[J]. 建筑结构学报,2011,32(9):44-49.

[4] 白久林,欧进萍. 基于耐震时程法的钢筋混凝土框架结构抗震性能评估[J]. 工程力学,2016,33(10):86-96.

[5] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2002,29(10):2551-2562

[6] ESTEKANCHI H E, VALAMANESH V, VAFAI A. Application of endurance time method in linear seismic analysis [J]. Engineering Structure,2007,29(10):2551-2562.

[7] RIAHI H T, ESTEKANCHI H E. Seismic assessment of steel frames with endurance time method[J]. Journal of Construction Steel Research,2010,66(6):780-792.

[8] NOZARI A, ESTEKANCHI H E. Optimization of endurance time acceleration functions for seismic assessment of structures[J]. International Journal of Optimization in Civil Engineering, 2011,21(2):257-277.

[9] RAMIN M, HOMAYOONN M, AKBER M. Estimating seismic demand parameters using the endurance time method[J]. Journal of Zhejiang University - Science A (Applied Physics & Engineering),2011,12(8):616-626.

[10] VALAMANESH V, ESTEKANCHI H E, VAFAI A et al. Application of the endurance time method in seismic analysis of concrete gravity dams[J]. Scientia Iranica A, 2011,18(3):326-337(in Chinese).

[11] 白久林,杨 乐,欧进萍. 结构抗震分析的耐震时程法[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1):8-18.

[12] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB35047-2015 [S]. 北京:中国电力出版社,2015.

[13] 白久林. 钢筋混凝土框架结构地震主要失效模式分析与优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015:65-90.

[14] VAMVATSIKOS D, CORNELL CA. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2002,31(3):491-514.

[15] 苏晨辉,宋志强,耿 丹. 水电站地面厂房地震响应分析研究综述[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(5):137-145.

[16] 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,2016.

[17] 李锦成,于丽伟. 河川式水电站厂房地震荷载分布规律[J]. 中国农村水利水电,2007(3):75-78.

[18] 张洪超,张 蕊. 土木工程结构地震易损性分析的研究进展[J]. 价值工程,2013,32(26):61-62.

[19] 吕西林,苏宁粉,周 颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2012,32(5):19-25.

[20] 周 奎,林 杰,祝 文. 基于增量动力分析(IDA)方法的地震易损性工程实例分析[J]. 地震工程与工程振动, 2016,36(1):135-140.