

DOI: 10.11779/CJGE202104012

# 浅埋地下结构耐震时程分析法最优持时研究

钟紫蓝, 甄立斌, 陈 群, 赵 密\*, 杜修力

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 为研究持时对地下结构耐震时程分析结果的影响, 选取 II 类和 III 类工程场地中典型的两层三跨地铁车站为原型, 以基岩场地地震动均值反应谱为目标谱, 构造了 6 种典型持时的耐震加速度时程曲线作为输入。通过将耐震分析结果与增量动力分析基准结果对比表明, 耐震加速度时程曲线的持时对分析结果影响显著。根据目标时间点与地震动能量指标阿里亚斯强度值的变化规律, 给出了最优目标时间点的确定公式并进行验证。由研究结果可知, 对于 II 和 III 类工程场地, 耐震时程曲线较优持时分别为 30 s 和 45 s; 给出的目标时间点的确定公式对上述两类场地中的地下结构抗震性能评价具有一定适用性, 当构造的耐震时程曲线在目标时间区间内的能量值与实际地震动的能量值较为接近时, 耐震时程分析结果最为精确。

**关键词:** 耐震时程分析法; 地铁车站; 增量动力分析; 目标时间点; 阿里亚斯强度指标

中图分类号: TU311

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)04-0698-08

**作者简介:** 钟紫蓝(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事生命线地震工程方面的研究工作。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

## Optimal duration of endurance time acceleration functions for shallow buried underground structures

ZHONG Zi-lan, ZHEN Li-bin, CHEN Qun, ZHAO Mi, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The effects of duration of the endurance time analysis on the seismic response of the underground structures are investigated. The typical two-story three-span subway station embedded in the sites of classes II and III is used as the prototype. The response spectra at the engineering bedrock is used as the target ones to develop six endurance time acceleration functions as the input motions for the nonlinear soil-structure interaction system. Using the results from the incremental dynamic analysis as the reference, the effects of time duration of the endurance time analysis on the seismic analysis of underground structures are significant. A formula to compute the optimal time duration based on the variations of earthquake ground motion energy measure, Arias intensity, with the target time is proposed and validated. It can be seen from the numerical results that endurance time acceleration functions with durations of 30 and 45 s are more favorable for the underground structures embedded in the sites of classes II and III, respectively. Moreover, the proposed formula for the optimal duration estimation is feasible for the seismic performance evaluation of underground structures in the above two site classes. The results from the endurance time analysis are more accurate when the total energy in the artificial endurance time acceleration function is close to the actual earthquake records.

**Key words:** endurance time analysis; underground structure; incremental dynamic analysis; target time; Arias intensity

## 0 引 言

1995 年日本阪神地震中, 大开地铁车站几乎完全塌毁, 是历史上首次记录到的大型地下结构遭受严重震害的实例<sup>[1]</sup>; 2008 年汶川特大地震中, 成都市在建的地铁车站遭受了不同程度的破坏<sup>[2]</sup>; 2013 年中国的庐山地震和 2016 年日本的熊本地震, 均对山岭隧道造成了严重破坏。这些震害清楚地表明, 地下结构同样

面临着地震灾害的威胁, 因此, 近年来对地下结构开展抗震性能评价成为土木工程领域和地震工程领域热门的研究课题。基于性能的结构抗震设计(performance-

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51978020); 国家自然科学基金联合基金项目(U1839201); 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305)

**收稿日期:** 2020-08-31

\*通信作者(E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn)

based seismic design, PBSD) 要求结构能够在不同的地震危险水准下满足不同的性能要求, 进而对结构多目标抗震性能提出需求<sup>[3]</sup>。目前, 对地下结构常用的抗震性能评价方法有拟静力分析方法, 如地下结构 Pushover 法<sup>[4-6]</sup>和非线性动力时程分析方法, 如增量动力分析法<sup>[7]</sup> (increment dynamic analysis, IDA)、云分析法<sup>[8]</sup>、多条带分析法<sup>[9]</sup>等。钟紫蓝等<sup>[10]</sup>总结了上述两类方法存在的局限性, 同时将耐震时程分析法 (endurance time analysis, ETA) 引入到地下结构抗震性能评价中来, 以大开地铁车站为原型, 验证了该方法在地下结构抗震性能评价中的适用性与精度, 为地下结构抗震性能快速评价提供了新思路。

耐震时程分析法的关键在于根据预先定义的目标反应谱构造一条随着持时增加而地震动强度不断增强的加速度时程曲线 (endurance time acceleration function, ETAF)<sup>[11]</sup>, 其构造函数<sup>[12]</sup>如下式所示:

$$S_{aT}(T, t) = \frac{t}{t_{\text{Target}}} \times S_{aC}(T) \quad (1)$$

式中,  $t_{\text{Target}}$  为目标时间点,  $t$  为任一时间点,  $S_{aC}(T)$  为目标反应谱 (通常为规范设计谱或者预先定义的地震动反应谱),  $T$  为结构的自振周期,  $S_{aT}(T, t)$  为  $0 \sim t$  时刻所构造的 ETAF 反应谱。由式 (1) 可知, 只需确定目标时间点  $t_{\text{Target}}$  和目标反应谱  $S_{aC}(T)$ , 所构造的  $0 \sim t$  时刻内的 ETAF 的加速度反应谱便与持时  $t$  成线性关系。将式 (1) 转化为无约束优化问题, 便可通过不断迭代求解, 构造一条较优的耐震时程曲线<sup>[10]</sup>。

目标时间点  $t_{\text{Target}}$  是耐震时程曲线构造函数中较为关键的参数, 它的确定理论上应与结构的自振周期以及代表性地震动持时有关<sup>[12]</sup>。刘向阳<sup>[13]</sup>以 4 种不同层高的钢框架为研究对象, 分析了持时长短对钢框架结构耐震响应的影响, 结果表明持时过长或较短均会导致 ETA 结果与 IDA 基准结果离散度较大, 且对于不同层高的钢框架结构, 持时为 45 s 的耐震时程曲线分析结果, 均具有较好的准确性与可靠性; Valamanesh 等<sup>[14]</sup>研究了耐震时程曲线的特征参数随目标时间点的变化规律, 通过与地震动特性进行差异对比, 发现在特定的目标时间段内 ETAF 与有效的地震动特征参数之间存在较好的一致性。然而, 现阶段针对  $t_{\text{Target}}$  的确定还未形成统一认识, 钟紫蓝等<sup>[10]</sup>也指出, 关于目标时间点的确定有待进一步研究。

本文在文献<sup>[10]</sup>的研究基础上, 选取 15 条基岩场地地震动记录, 并基于基岩场地地震动反应谱生成  $t_{\text{Target}}$  分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30 s 的 ETAFs 各 3 条, 研究两种典型场地下持时长短对地铁车站耐震时程分析结果的影响, 并根据耐震时程的阿里亚斯强度指标与目标时间点的变化规律, 给出地下结构耐震时

程分析法持时的确定公式并进行验证。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 计算模型与参数

本文以南京某两层三跨地铁车站结构<sup>[15]</sup>为研究对象, 结构的横断面尺寸如图 1 所示。该地铁车站结构的顶、底板的配筋率为 1.10%, 中层隔板的配筋率为 1.70%, 左右侧墙配筋率为 0.65%, 中柱配筋率为 1.0%。

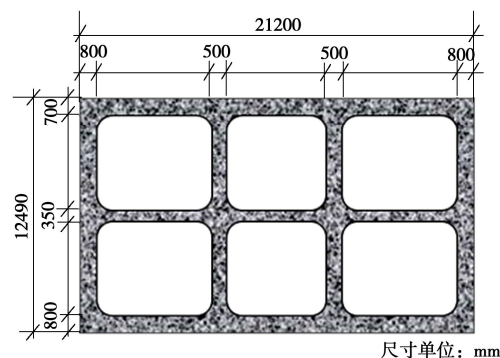


图 1 地铁车站横断面示意图

Fig. 1 Cross-sectional details of subway station

中国城市的地铁结构大多是在沉积土层中建造的, 地震动参数和场地条件对基岩地震动都具有不同的放大效应, 使得场地表现出不同的地震响应规律, 进而影响结构在地震下的反应。针对这一情况, 本文选取了两种典型场地条件, 土层厚度均为 60 m, 地下结构埋深为 10 m。表 1, 2 分别给出了两类场地的土层划分及物理参数, 两类场地均是由砂性土和黏性土组成, 按照中国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)<sup>[16]</sup>对工程场地的划分标准, 所选两类场地的等效剪切波速分别为 251, 147 m/s, 分别属于 II 类与 III 类工程场地。

### 1.2 有限元模型建立

基于文献<sup>[10]</sup>已验证的建模分析方法, 本文在 OpenSees 有限元软件中建立二维的土-地下结构相互作用分析模型, 如图 2 所示, 模型宽度为 120 m, 场地高度取至距地表为 60 m 的工程基岩面。地铁车站为典型的钢筋混凝土结构, 采用 C30 等级混凝土, 钢筋及混凝土材料参数及本构模型参见文献<sup>[10]</sup>。周围土场采用四节点平面应变单元模拟, 土体材料均采用多屈服面弹塑性材料: 砂性土为 Pressure depend multi yield 材料, 其屈服面是 Drucker-Prager 本构模型<sup>[17]</sup>; 黏性土为 Pressure independ multi yield 材料, 其屈服面是内嵌的 Von Mises 本构模型<sup>[18]</sup>。模型在初始地应力平衡后, 再进行动力时程分析。

表 1 II 类场地土层物理参数表

Table 1 Physical parameters of site class II soil

土层	类别	厚度 /m	密度 $\rho$ /( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切波速 $V_s$ /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )
1	人工填土	4.0	1.90	180	20.0	12.0
2	粉质黏土	4.0	1.90	230	30.0	20.0
3	细中砂	17.0	2.00	300	1.0	35.0
4	细粉砂	15.0	2.00	320	1.0	35.0
5	粗砂	20.0	2.23	380	1.0	35.0

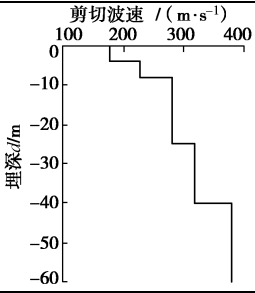


表 2 III 类场地土层物理参数表

Table 2 Physical parameters of site class III soil

土层	类别	厚度 /m	密度 $\rho$ /( $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切波速 $V_s$ /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	黏聚力 $c$ /kPa	摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )
1	淤泥质土	5.5	1.90	120	13.5	12.0
2	淤泥 粉质黏土	16.5	1.90	160	15.0	12.0
3	粉细砂	17.0	1.90	205	1.0	35.0
4	黏土	21.0	2.02	263	20.0	20.0

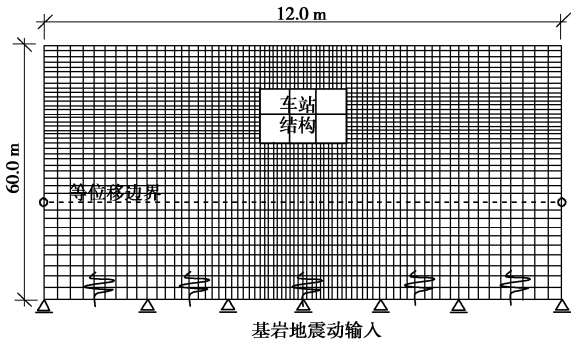
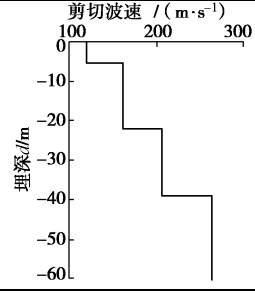


图 2 地铁车站二维整体有限元模型示意图

Fig. 2 2D finite element model for soil-underground structure

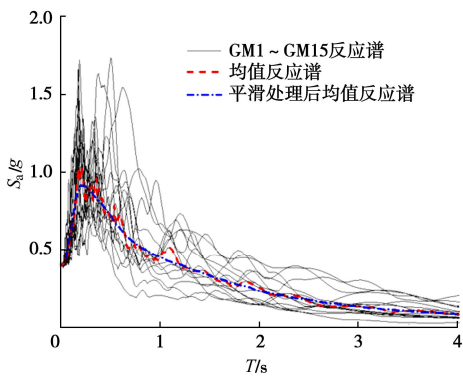


图 3 基岩场地地震动加速度反应谱( $\zeta=5\%$ )

Fig. 3 Elastic acceleration response spectra of bedrock earthquake records ( $\zeta=5\%$ )

2 地震动记录的筛选与生成

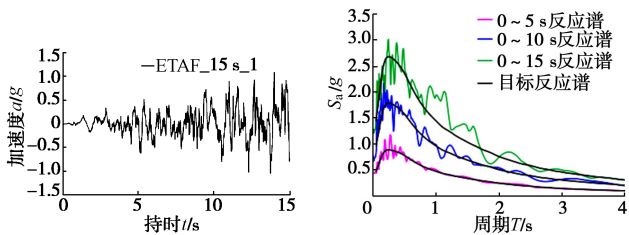
2.1 基岩场地地震动记录筛选

本文基于美国 ASCE 规范<sup>[19]</sup>依据剪切波速对场地类型的划分,在美国太平洋强震数据库中筛选了 15 条露头基岩场地的地震动 (ground motion, GM), 根据 8 度设防规定将所选 15 条天然地震动调幅至 0.4g, 计算所选地震动的反应谱及其均值反应谱如图 3 所示。对所选的露头基岩地震动的 PGA 先进行幅值折半, 后按比例进行调幅以进行 IDA 分析, 调幅范围为 0~0.8g, 增幅为 0.05g, 每条地震动共缩放 16 次, 经调幅的地震动由模型底部下卧工程基岩处进行输入, 如图 2 所示。

2.2 不同持时的 ETAFs 生成

本文基岩场地地震动的均值反应谱作为预先定义

的目标反应谱  $S_{ac}(T)$ , 利用地震动信号处理程序 EQSignal<sup>[20-21]</sup>生成持时分别为 15, 30, 45, 60, 75, 90 s 的 6 种 ETAFs 各 3 条,  $t_{\text{Target}}$  分别为 5, 10, 15, 20, 25, 30 s。由于版面有限, 仅取持时为 15, 45, 75 s 其中一条作为展示, 如图 4 所示, 所生成的 ETAFs 在各目标时间段内的反应谱与目标谱吻合良好, 表明所生成的 ETAFs 具有足够的精度。



(a) ETAF\_15 s\_1

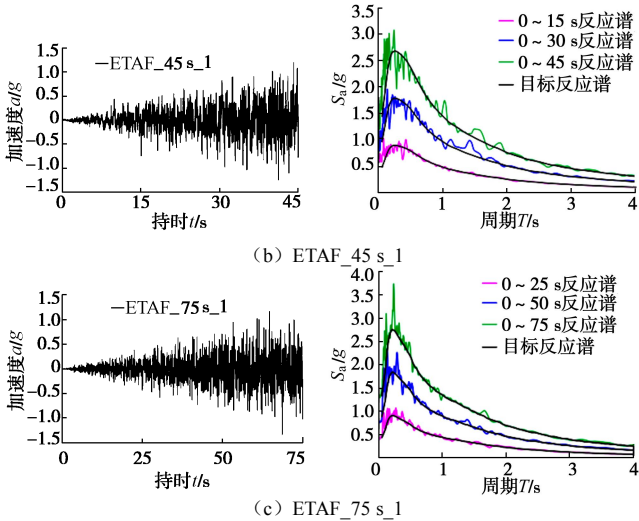


图 4 基于基岩地震动反应谱的不同持时耐震时程曲线示意图  
Fig. 4 Different durations of ETAFs based on response spectra of bedrock

本文为研究持时对地下结构 ETA 分析结果的影响, 选择考虑地震动持时的 Arias 强度指标  $I_A$  作为表征物理量<sup>[22]</sup>, 其定义为

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} a^2(t) dt \quad , \quad (2)$$

式中,  $t_d$  为总持时,  $I_A$  可以有效反映地震动的滞回能量。对不同持时 ETAFs 进行参数统计, 如表 3 所示, 无论是在全时程内还是在 0~1 倍目标时间区段内, 不同持时的 ETAFs 的 PGA 基本处于同一水准, 相差较小, 但是随着持时的增加, 所构造的耐震时程曲线的 Arias 强度  $I_A$  值不断增大。

表 3 不同持时耐震加速度时程参数

Table 3 Parameters of different durations of ETAFs						
参数	15 s	30 s	45 s	60 s	75 s	90 s
全时程 PGA	1.16	1.24	1.26	1.24	1.25	1.21
0~ $t_{\text{Target}}$ 间 PGA	0.41	0.37	0.42	0.39	0.40	0.39
全时程 $I_A$ 值	2.07	3.32	4.79	5.90	6.61	7.32
0~ $t_{\text{Target}}$ 间 $I_A$ 值	0.11	0.16	0.21	0.25	0.29	0.32

### 3 持时对 ETA 结果影响

#### 3.1 ETA 分析结果

为与 IDA 结果进行对比, 本文根据式 (3) 提取结构上、下两层地震响应的最大峰值层间位移角 (interstory drift ratio, IDR) 作为地铁车站结构地震响应指标, 选择工程基岩面处输入地震动的峰值加速度 PGA 作为地震动强度指标 (intensity measure, IM)<sup>[23]</sup>。通过式 (4), (5) 分别计算车站结构 IDR 的耐震响应和耐震时程曲线的加速度的累积最大值, 以 PGA 为纵坐标, 以  $IDR_{\max}$  为横坐标, 得到 ETA 分析的地下结构性能曲线, 如图 5 所示, 随着输入地震动强度的增

大, 地下结构 IDR 呈阶梯型增加; 为消除这种阶梯特性的影响, 对其进行平滑处理, 最终 ETA 分析结果取 3 次耐震分析的平均值, 并与 IDA 基准结果进行对比, 如图中红线与黑线所示。由图 5 可知, 在 II 类场地中, 持时为 45 s 的 ETA 结果与 IDA 基准结果趋势一致, 吻合较好。

$$IDR_{\max} = \text{MAX}|(IDR_i)| \quad (i = \text{上层、下层}) \quad , \quad (3)$$

$$EDP(t) = \text{MAX}|EDP(\tau)| \quad (\tau \in [0, t]) \quad , \quad (4)$$

$$IM(t) = \text{MAX}|a(\tau)| \quad (\tau \in [0, t]) \quad . \quad (5)$$

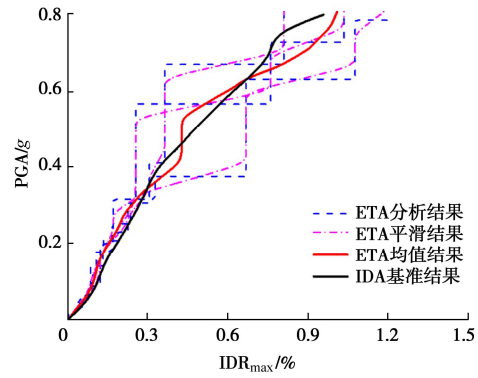


图 5 II 类场地中 ETA 结果( $t=45$  s)  
Fig. 5 Results of ETAs in site class II ( $t=45$  s)

将两类场地中不同持时的 ETA 结果均值与 IDA 均值进行对比, 如图 6 所示。由图可知, 持时不同的

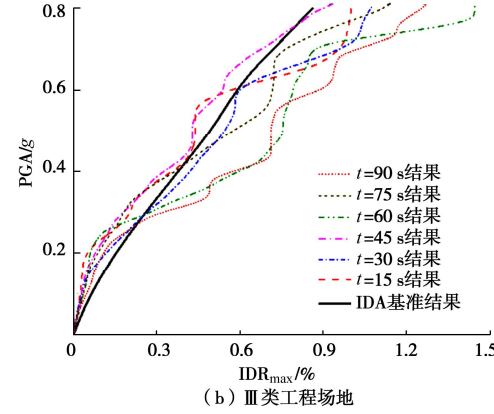
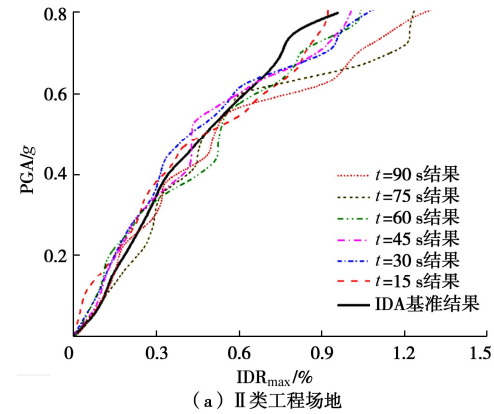


图 6 不同持时的 ETA 结果与 IDA 结果对比

Fig. 6 Comparison between ETA results at different durations and IDA results

ETA 分析结果与 IDA 基准曲线之间差异明显,特别是在 III 类工程场地中,其中持时为 45 s 的 ETA 结果与 IDA 结果吻合较好,而采用其他持时的 ETAF 作输入时,分析结果与 IDA 结果差异较明显。

为进一步直观评价不同持时的 ETA 结果与 IDA 结果吻合情况,对二者的均值曲线进行插值取点,即提取相同 PGA 下的 ETA 数据与 IDA 数据,以 IDA 数据作为横坐标,以 ETA 数据为纵坐标,进行散点绘制和直线拟合,如图 7 所示。线性拟合系数  $b$  可以较直观反应不同地震强度下 ETA 结果与 IDA 结果整体吻合度, $b$  值越接近于 1.0,表明二者结果相当,ETA 可以较好的替代 IDA; $b$  值小于 1.0,表明 ETA 低估了结构的地震响应,结果偏于危险; $b$  值大于 1.0,表明 ETA 高估了结构的地震响应,结果偏于安全。引入均方根误差  $\sigma$  可以反映 ETA 数据偏离 IDA 基准数据的程度, $\sigma$  越小,表示二者吻合精度越高, $\sigma$  的计算如下式所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (ETA_i - IDA_i)^2}{N}}$$

(6)

式中,  $N$  为插值取点次数。

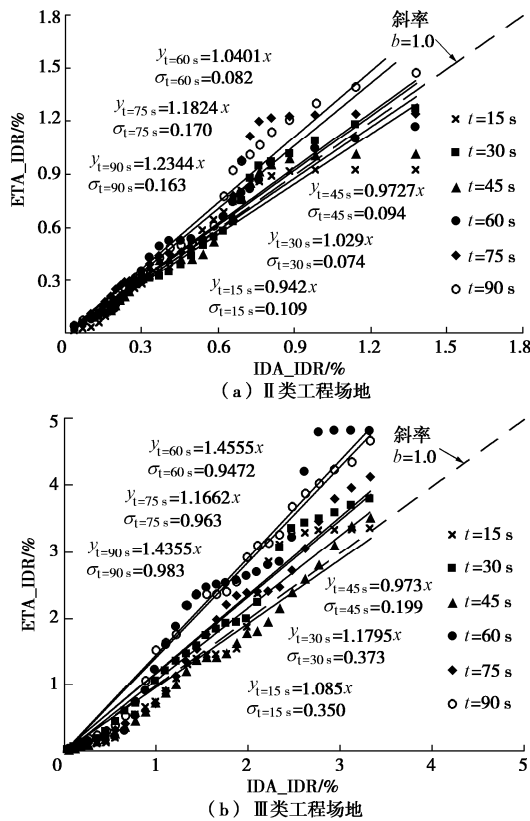


图 7 不同持时的 ETA 结果与 IDA 结果相关性拟合  
Fig. 7 Correlation between ETA at different durations and IDA results

将两类场地中不同持时的评价参数汇总,见表 4。

为综合考虑斜率  $b$  与均方根误差  $\sigma$  对评价结果的影响,本文提出效率指标  $\xi$ , 计算如下式所示:

$$\xi = \sigma \times (|1 - b|)$$

(7)

效率指标  $\xi$  值越小,一定程度上代表了该持时的 ETA 结果与 IDA 结果吻合越好。由统计结果可知,II 类场地中较优持时为 30 s;III 类场地中持时为 45 s 的 ETA 结果的效率指标最小,与 IDA 基准曲线吻合最好。

表 4 不同持时 ETA 结果与 IDA 结果拟合参数汇总  
Table 4 Summary of fitting parameters of ETA results at different durations and IDA results

参数	场地	15 s	30 s	45 s	60 s	75 s	90 s
斜率	II	0.942	1.0290	0.9730	1.040	1.182	1.234
$b$	III	1.085	1.1800	0.9730	1.456	1.166	1.436
均方	II	0.109	0.0740	0.0940	0.082	0.170	0.163
根 $\sigma$	III	0.350	0.3730	0.1990	0.947	0.963	0.983
效率	II	0.006	0.0021	0.0030	0.003	0.031	0.038
$\xi$	III	0.030	0.0670	0.0054	0.431	0.160	0.428

3.2 持时公式拟合

由表 3 可知,在 0 到 1 倍  $t_{\text{Target}}$  区间内,不同持时的 ETAFs 的 PGA 处于同一水准,约为 0.40g,但随着持时的增加,其  $I_A$  值也逐渐增加,二者存在一定的正相关关系。将不同持时的  $t_{\text{Target}}$  与  $I_A$  值变化规律进行公式拟合,  $I_A$  值与目标时间点成指数分布,见下式所示:

$$t_{\text{Target}} = 195.41(I_A)^{1.64}$$

(8)

拟合优度  $R^2$  为 0.97,表明拟合的公式与数据点之间具有较好的相关性,如图 8 所示。

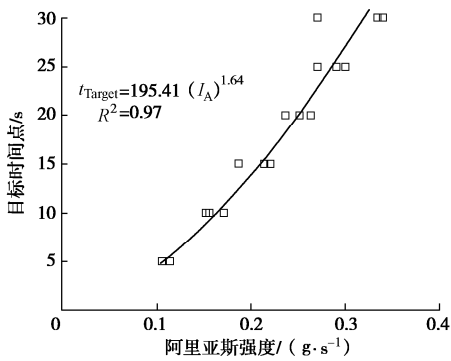


图 8 数据点分布与公式拟合

Fig. 8 Distribution data points and formula fitting

3.3 持时公式验证

统计所选 15 条天然地震动在峰值 0.40g 下的平均  $I_A$  值约为 0.195  $\text{g}\cdot\text{s}$ , 位于目标时间点 10~15 s, 推断在目标时间点 10~15 s 存在最优目标时间点。基于式 (8)可求得对应 ETAFs 的目标时间点  $t_{\text{Target}}$  约为 13 s, 由此生成 3 条总持时为 39 s 的 ETAFs, 图 9 展示了其



中一条 ETAF 及其在各目标时间段内的反应谱。

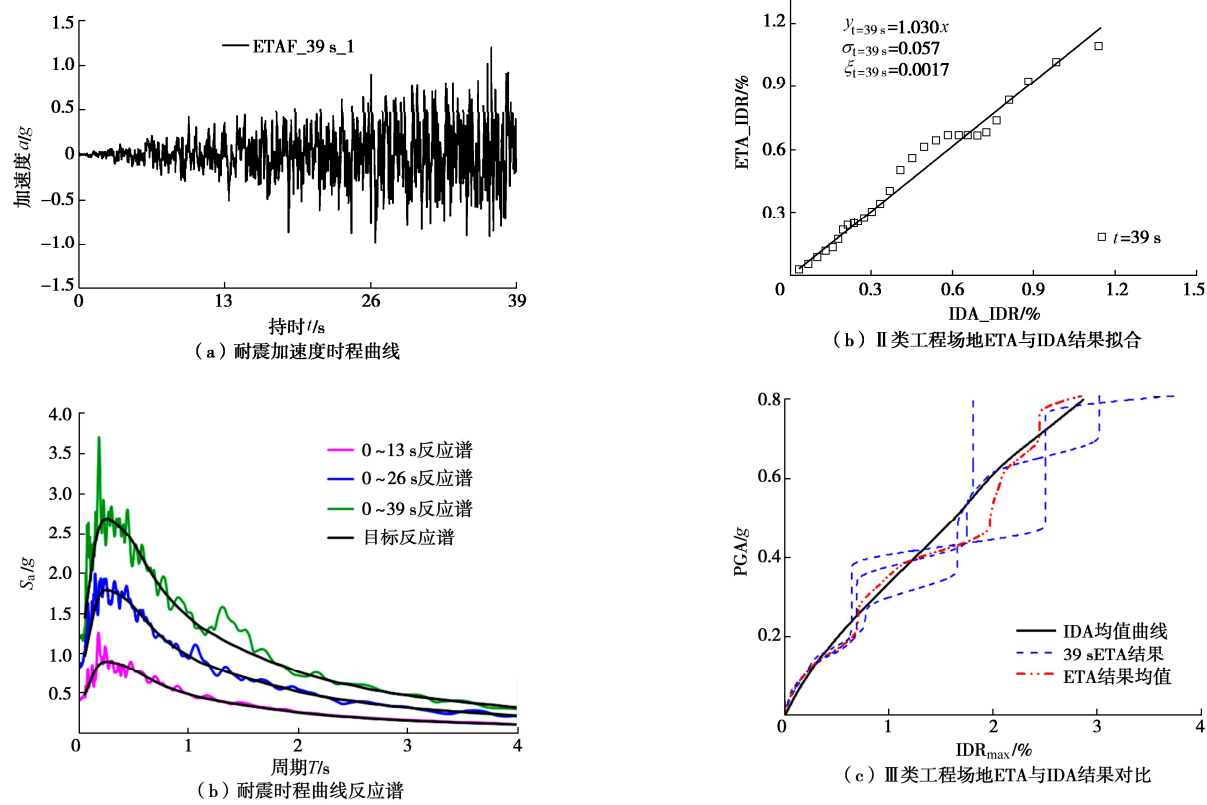
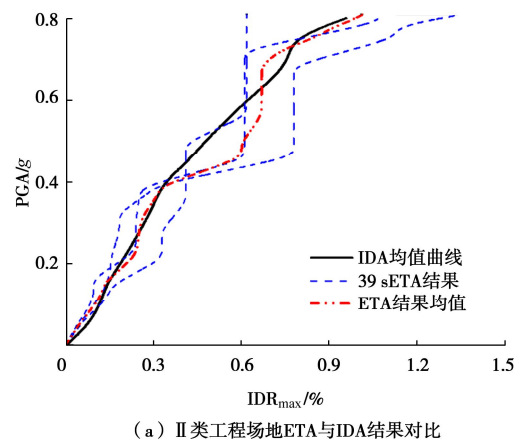


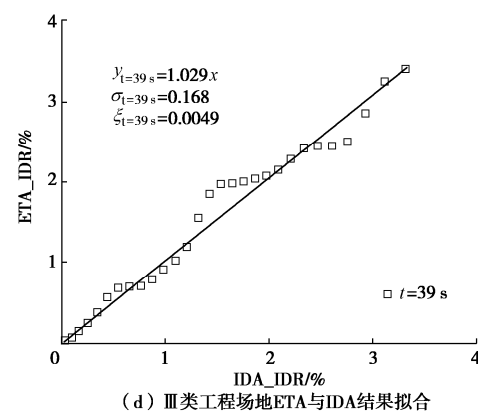
图 9 持时为 39 s 的耐震时程曲线及其反应谱

Fig. 9 ETAF at duration of 39 s and its response spectra

将构造的 3 条持时为 39 s 的 ETAFs 作为工程基岩处地震动进行输入,得到 39 s 的 ETA 分析结果与 IDA 结果如图 10 所示,并对二者性能曲线进行参数评价,由结果可知,在 II 类场地中,持时为 39 s 的 ETA 结果效率指标  $\xi$  为 0.0017,比持时为 30 s 的效率指标缩小了约 19%;在 III 类场地中,该持时的效率指标  $\xi$  为 0.0049,与持时为 45 s 的效率指标较为接近,缩小了约 9%。由斜率  $b$  值 ( $b>1.0$ ) 可知,在两类场地中,持时为 39 s 的 ETA 评价结果也更加安全。因此,本文所拟合的目标时间点确定公式具有一定的准确性和适用性。



(a) II类工程场地ETA与IDA结果对比



(d) III类工程场地ETA与IDA结果拟合

图 10 持时为 39 s 的 ETA 结果与 IDA 结果对比

Fig. 10 Comparison between ETA and IDA results ( $t=39$  s)

## 4 结 论

本文在 ETA 对地下结构抗震性能评价的基础上,针对 ETAFs 的持时确定展开研究,以两类场地中的两层三跨地铁站为研究对象,生成不同持时的 ETAFs,根据各持时 ETAFs 的阿里亚斯强度值与目标时间点的变化规律,给出地下结构耐震时程分析法持时的确定公式并进行验证,得到如下结论:

(1) 耐震时程分析方法能以较少的非线性分析次数和较小的误差达到评价地下结构峰值地震响应的目的,为地下结构抗震性能分析、预测和评价提供了一种高效率方法。

(2) 耐震加速度时程曲线的持时长短对地下结构 ETA 分析结果存在影响, II 类场地中较优持时为 30 s, III 类场地中较优持时为 45 s。

(3) 依据阿里亚斯强度  $I_A$  值随目标时间点变化的分布规律, 给出的目标时间点的确定公式对于 II 类和 III 类场地中地下结构抗震性能评价具有一定的准确性和适用性; 当耐震时程曲线在目标时间点处的能量值与天然地震动的能量值接近时, ETA 分析结果较为准确。

## 参考文献:

- [1] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(1): 53 - 62. (DU Xiu-li, MA Chao, LU De-chun, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(1): 53 - 62. (in Chinese))
- [2] 李田彬. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 742 - 750. (LI Tian-bin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 742 - 750. (in Chinese))
- [3] SEAOC. Performance Based Seismic Engineering of buildings[R]. Version 2000 Committee. Sacramento: Structural Engineers Association of California, 1995.
- [4] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(4): 73 - 80. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, LI Bin. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(4): 73 - 80. (in Chinese))
- [5] 刘晶波, 刘祥庆, 薛颖亮. 地下结构抗震分析与设计的 Pushover 方法适用性研究[J]. 工程力学, 2009, **26**(1): 49 - 57. (LIU Jing-bo, LIU Xiang-qing, XUE Ying-liang. Study on applicability of a pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. Engineering Mechanics, 2009, **26**(1): 49 - 57. (in Chinese))
- [6] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 循环往复加载的地下结构 Pushover 分析方法及其在地震损伤分析中的应用[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(1): 21 - 28. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Pushover analysis method of underground structures under reversal load and its application in seismic damage analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(1): 21 - 28. (in Chinese))
- [7] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, **31**(3): 491 - 514.
- [8] HARIRI-ARDEBILI M, SAOUMA V. Probabilistic seismic demand model and optimal intensity measure for concrete dams[J]. Structure Safety, 2016, **59**: 67 - 85.
- [9] JALAVAR F, CORNELL C. Alternative non-linear demand estimation methods for probability-based seismic assessments[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, **38**(8): 951 - 972.
- [10] 钟紫蓝, 甄立斌, 申轶尧, 等. 基于耐震时程分析法的地下结构抗震性能评价[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1482 - 1490. (ZHONG Zi-lan, ZHEN Li-bin, SHEN Yi-yao, et al. Seismic performance evaluation of underground structures using endurance time analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1482 - 1490. (in Chinese))
- [11] ESTEKANCHI H E, VAFAI A, SADEGHAZAR M. Endurance time method for seismic analysis and design of structures[J]. Scientia Iranica, 2004, **11**(4): 361 - 370.
- [12] ESTEKANCHI H E, VALAMANESH V, VAFAI A. Application of endurance time method in linear seismic analysis[J]. Engineering Structure, 2007, **29**(10): 2551 - 2562.
- [13] 刘向阳. 增量地震激励分析法的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (LIU Xiang-yang. Research and Application on Structural Dynamic Analysis Using Incremental Earthquake Excitation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] VALAMANESH V, ESTEKANCHI H E, VAFAI A. Characteristics of second generation endurance time acceleration functions[J]. Scientia Iranica, 2010, **17**(1): 53 - 61.
- [15] 陈国兴, 庄海洋, 杜修力, 等. 土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, **27**(2): 171 - 176. (CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, DU Xiu-li, et al. Analysis of large shaking table test of dynamic soil-subway station interaction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2007, **27**(2): 171 - 176. (in Chinese))
- [16] 建筑抗震设计规范: B50011—2010[S]. 2010. (Code for Seismic Design of Buildings: B50011—2010[S]. 2010. (in Chinese))

- [17] YANG Z, ELGAMAL A, PARRA E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1119 - 1127.
- [18] PARRA-COLMENARES E J. Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems[D]. Corvallis: Oregon State University, 1996.
- [19] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE/SEI 7-10[S]. 2011.
- [20] 潘超, 张瑞甫. EQSignal: 地震波处理与生成工具[CP/OL]. www.eqsignal.com. (PAN Chao, ZHANG Rui-fu. A useful tool to process and generate earthquake signals[CP/OL]. www.eqsignal.com. (in Chinese))
- [21] PAN C, ZHANG R, LUO H, et al. Target-based algorithm for baseline correction of inconsistent vibration signals[J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 24(12): 2562 - 2575.
- [22] ARIAS A. A Measure of Earthquake Intensity. Seismic Design of Nuclear Power Plants[M]. Cambridge MA: MIT Press, 1970.
- [23] 钟紫蓝, 申轶尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 42(3): 486 - 494. (ZHONG Zi-lan, SHEN Yi-yao, ZHEN Li-bin, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 42(3): 486 - 494. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于1979年,是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办,国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿,倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿,并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊,并在建筑类核心期刊中位于前列;本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录;本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录;本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录;本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址(www.cgejournal.com)全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部