

人工地震波的模拟及其反应特征研究

陈红星, 戴源, 倪文龙, 周浩

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 2151231]

摘要:从加速度反应谱出发,结合国内外人造地震波的主要合成方法,通过软件的拟合对比分析,研究讨论了一些参数对拟合结果的影响,并生成了与我国建筑抗震规范的标准反应谱拟合结果较好的人工地震波。还将其应用于苏州多处隧道与管廊实际工程的弹性动力时程分析中。根据实例分析结果表明:拟合的人工地震波用于时程分析,所得到的响应结果与反应谱法以及天然波分析得到的响应结果偏差较小,满足我国相应规范对时程分析的要求。

关键词:建筑规范反应谱;人工地震波;隧道;管廊;反应特性

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)01-0191-05

0 引言

随着计算机的发展与科技水平的提高,在隧道与管廊的抗震设计时,仅仅采用反应谱法分析已不再满足现在结构抗震设计的要求,因此时程分析的方法也愈来愈得到工程师的重视。按照国家相关规范^[1-2],在对隧道或管廊进行时程分析时,应选取两组天然波和一组人工波,或选取五组天然波和两组人工波。而在实际工程中,适用于工程建设场地的天然波较少,往往不能满足多方面的需求,因此拟合出与反应谱相对应的人工地震波作为抗震设计验算的依据,就为更有价值,也是抗震设计与分析过程中一个重要的环节。

自20世纪70年代以来,人造地震波的理论和技术得到了很快的发展,国内外不少学者通过对已有地震记录的研究,提出了各种随机模型,并在此基础上归纳分析出了一些具有代表性的参数。也有学者根据抗震设计的实际需要,发展了以反应谱为目标谱的模拟方法^[3]。鉴于规范中采用反应谱作为抗震设计的依据,故拟合出与之相对应的人工地震波就显得特别有意义,也特别适用于抗震设计工作中。

本文以规范谱为目标谱,结合国内外的研究现状,通过对比分析讨论人工地震波的中各参数的取值对拟合结果的影响,并拟合出合理的人工波参与实际工程中计算分析,并将响应结果与反应谱、天然

波的响应结果做比较,以验证其合理性。

1 人工波模拟的研究现状

经过国内外专家学者多年的努力,大量学者根据随机振动理论,建立了多种功率谱的模型。如:Housner^[4]提出把地面运动简化为平稳脉冲系列,把加速度功率谱密度函数假定为白噪声模型;Kanai-Tajimi^[5]提出了过滤白噪声模型,即假设基岩的地震动符合白噪声假定,并考虑了基岩上面的覆盖层的滤波特性,从而提出了有明显物理意义的地震动功率谱表达式。

$$S_a(\omega) = \frac{1+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1-(\omega/\omega_g)^2]^2+1+4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} S_0 \quad (1)$$

式中: ω_g 为场地频率; ω 为固有频率; ξ_g 为阻尼比; S_0 为基岩地震动白噪声强度。

在此基础上,胡聿贤^[6]等对功率谱的模型进行了改进,使其在应用上更为简便。

也有学者按特定地区的地面加速度反应谱曲线来构造相应的功率谱曲线,并给出地震动反应谱与功率谱之间的转换关系。其中Maharaj K.Kaul^[7]提出了的近似转换公式。

$$S_a(\omega) = \frac{T\xi}{\pi^2} \frac{S^2}{\ln[(-\frac{T}{2t_d} \ln p)^{-1}]} \quad (2)$$

式中: $S_a(\omega)$ 为功率谱密度函数; S 为阻尼比; ξ 为周期; T 为处的绝对加速度反应谱值; p 为反应不超过反应谱值的概率; t_d 为持续时间。

目前较多的人工波模拟是根据程序中输入的谱数据,通过迭代法求解功率谱密度函数,从而由功率

收稿日期: 2021-04-19

作者简介: 陈红星(1979—),男,本科,高级工程师,从事桥梁、隧道设计工作。

谱求解傅立叶幅值谱,后经傅立叶变换后,得到平稳地震加速度时程曲线。为了反应地震运动的非平稳性,一般采用包络函数乘以该曲线则得到所需要的非平稳的加速度时程曲线。

$$x(t)=f(t) \cdot a(t) \quad (3)$$

$$f(t)=\begin{cases} (t/t_1)^2 & t < t_1 \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 < t \leq t_3 \end{cases}$$

式中: $f(t)$ 为时间包络函数; $a(t)$ 为平稳的地震加速度时程; c 为峰值点两侧强度变换快慢系数; t_1 、 t_2 分别为平稳段起终点时刻。

关于强度包络函数与参数的确定,目前工程界广泛采用三段函数,陈永祁等^[8]根据不同持续时间给出了参数值;也有霍俊荣^[9]等基于强震动观测资料的统计建立了回归公式。

2 人工波的模拟

地震波持续时间的长短是地震记录的一个重要特性,对结构的反应特性影响很大。如果时间过短,不能充分反应出结构在地震作用下的响应,如果时间过长会增加计算时间。故一般取地震波周期有效持续时间为结构基本周期的5~10倍。

本文分别取10 s、20 s、30 s、40 s的持续时间来拟合人工波的波谱。拟合结果如图1。

由图1可知,持续时间为10 s的人工地震波的反应谱与规范标准谱的对比,有较大的偏离;持续时间为20 s的人工波谱与标准谱对比,亦存在一定的偏离;而持续时间30 s及40 s的人工波谱与标准谱拟合较好。故认为,在进行周期隧道或管廊结构分析时,一般采用30 s或稍长持时的人工地震波为宜。

由公式(3)可知,地震动时程强度包络函数,体现了模拟地震地面运动的时间变化特征,若平稳段较小、下降段较大,利用这样的强度包络函数合成的人工波会严重低估地震动的输入能量。本文分别取平稳段占比10%、30%、50%、70%的包络函数来拟合人工波的波谱。拟合结果如图2。

图2可以看出,强度函数中平稳段的占比对人工波的拟合有较大的影响,占比不低于70%时,人工波与反应谱的拟合程度较好。

由于公式(2)为近似公式,地震波的随机生成,容易导致未经迭代的人工地震波反应谱与标准谱之间的离散。为了更好地拟合,可以通过一个反复迭代的过程。用经运算处理求得的反应谱和标准反应谱进行比较,再对原功率谱进行修正,如此反复,直到

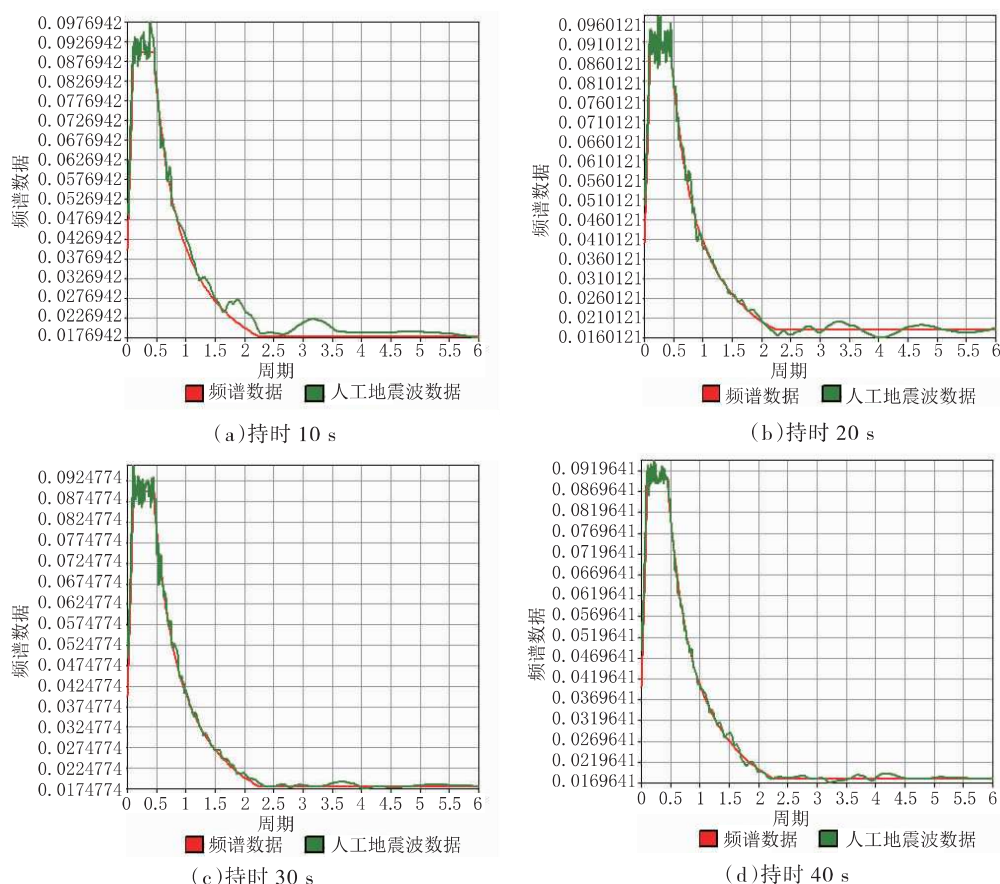


图1 不同持时的人工波拟合

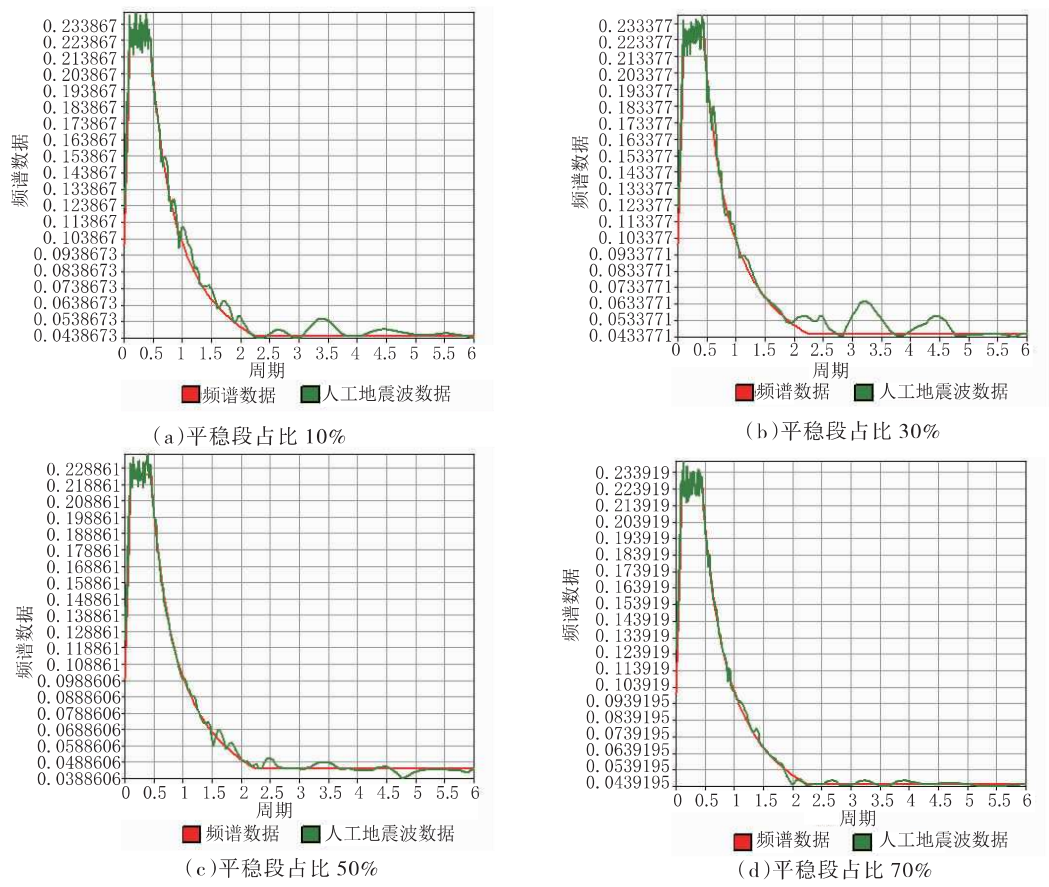


图 2 不同平稳段的人工波拟合

相对误差满足要求为止。本文分别取迭代 1 次、5 次、10 次、15 次来拟合人工地震波谱,拟合结果如图 3。

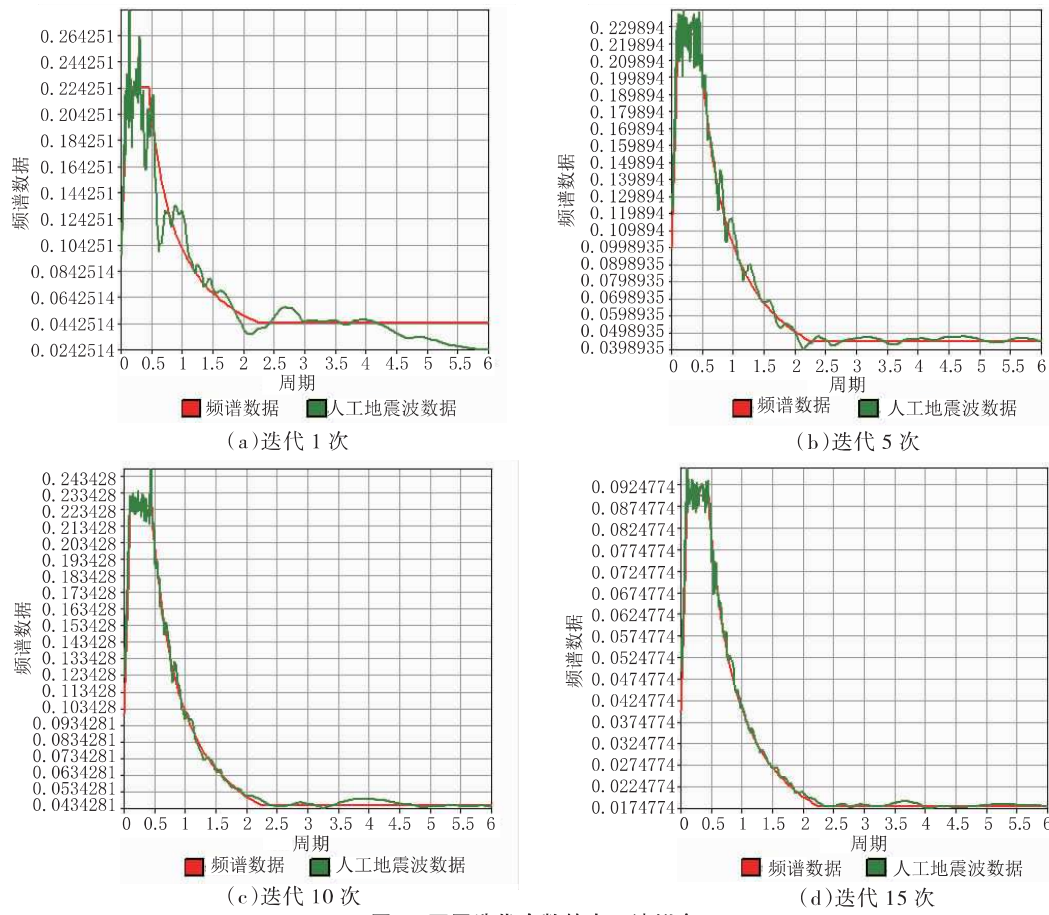


图 3 不同迭代次数的人工波拟合

从图3中的计算结果看来,迭代的效果是明显的,正常迭代10至15次,即能拟合较好。

根据以上拟合结果可知,在用于隧道及管廊抗震分析的地震曲线中,持续时间为30s,强震平稳段持时21s以上,迭代次数为15次的人工地震波与规

范反应谱拟合效果较好。图4为按以上步骤生成的拟合度较好的人工波的波形。

4 反应特性分析

本文结合苏州多处隧道与管廊的抗震计算进行

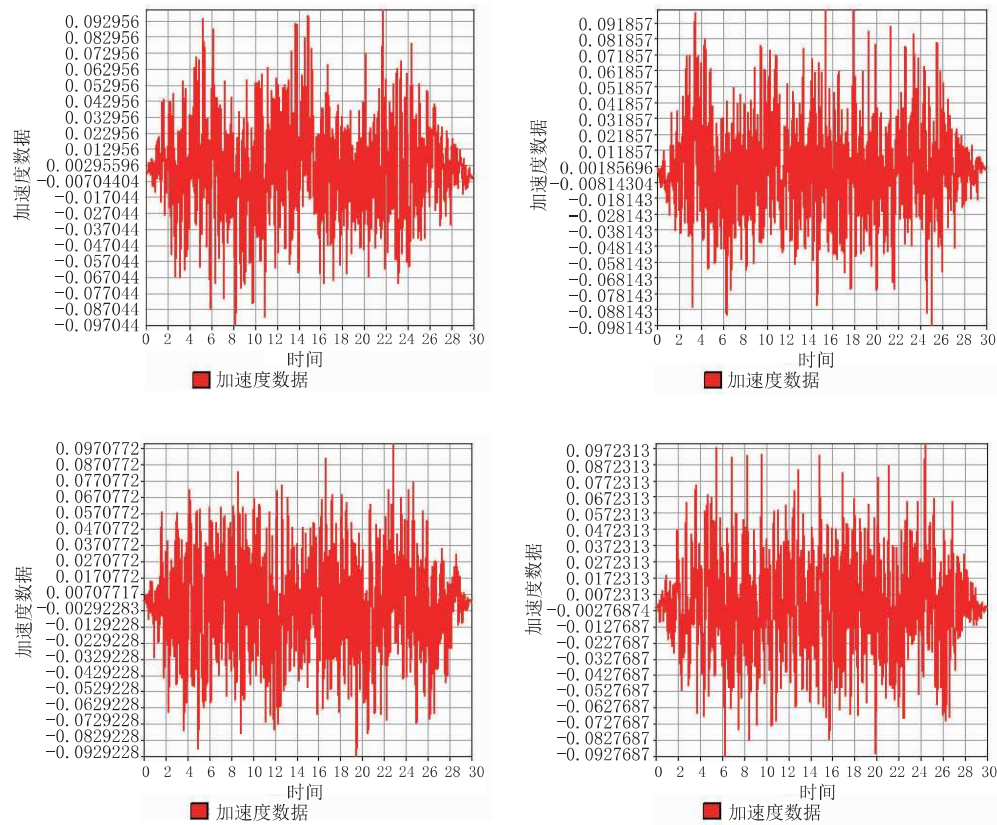


图4 拟合度较好的人工波

分析,以此来探讨苏州隧道与管廊的抗震的设计,并对其受力特性进行分析与研究。

根据区域地质资料,苏州五百年来共发生过16次地震,震级均未超过5.2级,亦未发现冒水、涌砂现象。全新世以来未受新构造运动影响,区域地势平缓,无滑坡、危岩、地面塌陷、泥石流等不良地质作用。土层以粘性土、砂质粉土及砂土为主,地层分布较稳定。根据国家规范规定,苏州主要地区地区抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.10g,设计地震分组为第一组。

本文采用按上述方法拟合的人工波分别对苏州吴江区、高新区、姑苏区、相城区、工业园区及吴中区多处管廊及隧道进行时程计算分析,并将其计算结果与采用天然波输入的时程分析结果及采用反应位移法的计算结果进行对比。其相应的场地特征统计如表1,其地震响应分析结果统计如表2。

通过计算分析表明,依照本文方法生成的人工地震波参与计算所得的基底剪力与反应位移法计算

表1 苏州多处场地特征

编号	场地类别	场地特征周期	场地平均波速	土体平均重度
吴江区太湖新城管廊	III	0.45	150	18.6
高新区渔业街管廊	II	0.35	180	19
高新区胥涛路隧道	III	0.45	180	19.1
姑苏区城北路管廊	III	0.45	173	19
姑苏区东汇公园隧道	III	0.45	162	18.9
相城区春申湖隧道	III	0.45	173	19.5
工业园区总部基地管廊	III	0.45	165	19.2
吴中区太湖新城管廊	III	0.45	162	18.7

表2 苏州多处隧道与管廊地震分析结果

编号	反应位移法	天然波1	天然波2	天然波3	人工波
吴江区太湖新城管廊	187	167	194	174	176
高新区渔业街管廊	131	126	127	123	128
高新区胥涛路隧道	164	154	158	154	149
姑苏区城北路管廊	179	160	167	165	158
姑苏区东汇公园隧道	153	147	153	149	152
相城区春申湖隧道	251	237	246	237	234
工业园区总部基地管廊	131	136	149	136	135
吴中区太湖新城管廊	213	199	195	192	189

注:所列计算效应为隧道或管廊的基底剪力值,单位kN/m

结果相比,均不小于 88%,也不大于 103%;与自然波的计算结果相比,均不小于 90%,也不大于 112%。满足相应规范中对时程分析时的要求,可用于实际工程的计算。

6 结 论

本文结合国内外人造地震波的主要合成方法,通过软件的拟合对比分析,研究讨论了地震波持续时间、强震平稳段时间与总持时的占比以及迭代次数对拟合结果的影响,并生成了与我国建筑抗震规范的标准反应谱拟合结果较好的人工地震波。并将所得的人工波应用于苏州多处隧道与管廊实际工程的弹性动力时程分析中。根据实例分析结果表明:拟合的人工地震波用于时程分析,所得到的响应结果与反应谱法以及天然波分析得到的响应结果偏差较小,满足我国相应规范对时程分析的要求。

参考文献:

[1] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].

[2] JTG/T 2232-01—2019,公路隧道抗震设计规范[S].

[3] Gasparini Dario and Vanmarcke Erik H. Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra [R]. Boston: M.I.T Department of civil engineering research report R76-4, Order NO. 527, 1976.

[4] Housner G W. Characteristics of strong-motion earthquakes [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1947, 37 (1): 19-31.

[5] Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristic of ground [R]. Tokyo: Institute of seismology, University of Tokyo, 1957, 35(2): 1-12.

[6] 胡聿贤,何训.考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J].地震工程与工程振动,1986,6(2),37-50

[7] Maharaj K Kaul. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1978, 6(5): 497-509.

[8] 陈永祁.拟合标准反应谱的人工地震波[J].建筑结构学报,1981,2(4):34-42.

[9] 霍俊荣.近场强地面运动的衰减规律[D].哈尔滨:国家地震局工程力学研究所,1989.

(上接第 157 页)

河段疏浚划分不同的施工时序,不同时序对应不同的桥梁计算工况,在不同工况下计算桥梁下部结构的相关数据,评估下部结构的安全性,提出可靠的数据供管养单位、河段疏浚单位进行参考,此计算模型和方法可供类似工程参考。

参考文献:

[1] JTG D62—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[2] 浙江省交通设计院,温州市东瓯大桥工程施工图设计[Z].1998.11

[3] 南京水利科学研究院,瓯江江心屿河段整治深化研究之整治方案专题[Z].2020.07.

[4] 南京水利科学研究院,瓯江江心屿河段整治深化研究之综合影响专题[Z].2020.07.