周云东,上官子恒,褚飞飞,等.地震动非一致性对隧道动力响应的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(1):0008-0012.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0008

ZHOU yun-dong, SHUANGGUAN Zi-heng, CHU Fei-fei, et al. Seismic Response Analysis of Tunnel under Multi-point Seismic Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1):0008-0012. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.01.0008

地震动非一致性对隧道动力响应的影响分析。

周云东1,上官子恒1,褚飞飞2,吴勇信1

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室、河海大学岩土工程科学研究所,江南南京 210098;2.河海大学文天学院,安徽 马鞍山 243051)

Seismic Response Analysis of Tunnel under Multi-point Seismic Motion

ZHOU yun-dong¹, SHANGGUAN Zi-heng¹, CHU Fei-fei², WU Yong-xing¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China;

Abstract: To guarantee the safety of a tunnel, a nonlinear numerical analysis of an earthquake is carried out by using the FEM software. The elastic model was used to model the characteristics of concrete tunnel under circulating load. The Mohr-Coulomb model was adopted for soils, and the artificial boundary was chosen as the boundary condition. For the purpose of comparing the responses of uniform waves, traveling waves, coherent waves, and traveling-coherent waves, artificial multi-point earthquake acceleration was encoded into the FEM model. Compared with the calculation results of consistent excitation, the analysis shows that non-uniform seismic excitation can significantly increase both the force and displacement of the tunnel, which can have adverse effects on the seismic performance of the tunnel. This research conclusion can provide scientific basis for anti-seismic design and further analysis of long-tunnel structures.

Key words: long tunnel; Elastic model; Mohr-Coulomb model; artificial boundary; multi-point earthquake; FEM

① **收稿日期:**2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51308191);安徽省自然科学基金青年项目(1508085QE88) 作者简介:周云东,男,副教授,硕士生导师,主要从事道路、堤防与土坝工程的研究。E-mail: ydzhou@hhu.edu.cn。 通信作者:上官子恒,男,硕士研究生,主要从事隧道地震响应的研究。E-mail: 224148358@qq.com。

0 引言

自 1894 年美国用沉管法建成世界第一座沉管 隧道以来,至今世界上已建成沉管隧道 150 多座,近 几年我国在这一工程领域也有突飞猛进的发展。而 1985 年的墨西哥地震、1995 年的日本阪神地震和 2008 年的中国汶川地震,均出现了地下结构破坏的 大量案例。鉴于大型地下工程的重要经济价值及社 会效益,其地震安全性引起学术界和工程界的广泛 关注。

早在 1995 年, Klyomlya^[1] 就通过理论分析对 比,总结日本所建沉管隧道的抗震设计情况,并且建 议沉管隧道采用柔性接头; 1999 年韩大建等^[2-4]建 立广州珠江水下沉管隧道等效质点一弹簧模型并分 别通过动力时程法和行波法对珠江沉管隧道进行了 地震反应分析; 2004 年严松宏等^[5]采用多质点-弹 簧模型对南京沉管隧道纵向抗震性能进行了分析; 2006 年 Ding 等^[6]运用显式有限元和高性能计算 机,通过建立了土体-沉管隧道-柔性接头的全三维 分析模型,对沉管隧道进行三维地震反应分析; 2007 年 Anastasopoulos 等^[7]采用梁与弹簧模型对 深水条件下沉管隧道的非线性抗震性能进行了分 析;2008 年 Lyngs^[8]采用不同计算模式对沉管隧道 的抗震精度进行了对比分析。

目前对隧道抗震分析的输入地震动较多采用一 致输入,而这种输入方式只考虑了地震动的时间变 化性而忽略了其随空间变化的特点,在结构跨度较 小时这样的地震动输入条件是可以接受的,但对于 尺寸较大隧道则显得过于粗糙。地震动密集台网得 到的强震记录表明,在50 m 的范围内,地震动即 有明显的差异,且地震动空间随机场的差异对大跨 度结构有较大的影响^[9]。因此,对隧道采用考虑地 震动空间变化效应的多点输入分析方法是非常必 要的。

本文首先人工合成考虑地震动随机性和传播特性的多点地震动;然后在场地土底部分别施加一致输入、行波、相干波及行波加相干波,并将计算结果进行对比,从而得出一致输入和非一致地震输入下隧道地震响应^[10]的一般规律。

1 多点地震动的合成

由于目前国内外实际测得的多点地震记录很 少,研究中大多采用人工合成多点地震动的方法。 国内外学者提出了一些合成多点地震动的方法。本 文采用 Wu 等^[11]提出的基于开方分解的多点地震 动模拟方法。该方法克服了屈铁军等^[12-13]方法在模 拟前面的地震动时不能考虑后面的点与其相关性的 缺陷。

各点地震动 $x_{j}(t)$ ($j=1,2,\dots,N$)的模拟公式 可以表示为:

$$x_{j}(t) = \sum_{k=1}^{N} \sum_{l=1}^{M} \alpha_{jk}(\omega_{1}) \sqrt{2S_{jj}^{0}(\omega_{l})\Delta\omega} \times \cos\left[\omega_{l}t - \omega_{l}d_{1j}^{L}/v_{a} + \varphi_{kl}\right]$$
(1)

其中: φ_{kl} 为随机相位角,它在[0,2 π]区间上均匀分 布,且它们之间相互独立; $S_{jj}^{0}(\omega_{l})$ 为各点的自功率 谱谱; $\omega_{l}d_{1j}^{L}/v_{a}$ 为考虑行波效应的项,其中 v_{a} 为视 波速; $a_{jk}(\omega_{l})(j,k=1,2,\dots,n)$ 表示考虑第j个点 的地震动 $x_{j}(t)$ 与第k个点的地震动 $x_{k}(t)$ 在频率 ω_{l} 下的相关性,可以通过下述对迟滞相干函数矩阵 进行开方分解的方法确定。

迟滞相干函数矩阵的定义为:

$$P(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12}(\omega) & \cdots & \rho_{1n}(\omega) \\ \rho_{21}(\omega) & 1 & \cdots & \rho_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}(\omega) & \rho_{n2}(\omega) & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n}$$
(2)

其中: $\rho_{jk}(\omega)$ ($j,k=1,2,\dots,N$)是如公式中所指的体现部分相干效应项的相干函数。

本文选用的自功率谱为 Clough and Penzien 谱^[14](克拉夫-彭津谱),该自功率谱的可以表示为:

$$S(\boldsymbol{\omega}) = S_0 |H_g(\boldsymbol{\omega})|^2 |H_f(\boldsymbol{\omega})|^2 \qquad (3a)$$

$$H_{g}(\omega) = \frac{\omega_{g}^{2} + 2i\xi_{g}\omega_{g}\omega}{\omega_{g}^{2} - \omega^{2} + 2i\xi_{g}\omega_{g}\omega}$$
(3b)

$$H_f(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_f^2 - \omega^2 + 2i\xi_f\omega_f\omega}$$
(3c)

本研究中其模型参数取值为 $S_0 = 0.002$ 63, ω_g =13 rad/s, $\omega_f = 1.5$ rad/s, $\xi_g = 0.6$ 。

选用的迟滞相干函数模型为 Harichandran and Vanmarcke 模型也是基于 SMART-1 的观测数据 所得到。该相干函数模型可以表示为:

$$\rho_{jk}(\omega) = A \exp\left[\frac{-2d_{jk}}{\alpha\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] + (1 - A) \exp\left[\frac{-2d_{jk}}{\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] \quad (4a)$$

$$\theta(\boldsymbol{\omega}) = K \left[1 + \left(\frac{\boldsymbol{\omega}}{2\pi f_0}\right)^b \right]^{-1/2}$$
(4b)

选取的模型参数取为:A = 0.376, $\alpha = 0.147$,K = 5210, $\omega_0 = 6.85$,b = 2.78。

式(1)所合成的各点的地震动是平稳的,然而 实际地震记录表明地震动是非平稳的。为了得到非 平稳地震动,只需将式(1)合成的地震动乘以强度 包络函数 *f*(*t*)^[15],即可得到多点、多向非平稳地震 加速度,用于边坡地震稳定性分析。其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & t < t_1 \\ 1 & t_1 < t < t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t > t_2 \end{cases}$$
(5)

式中:t₁为地震动平稳段开始的时间;t₂为地震动 平稳段结束的时间;c 为地震动衰减系数。

本文中 $t_1 = 6 s, t_2 = 10 s, c = 0.5$ 。

2 有限元模型

本文采用圆形隧道,隧道中心埋深 30 m,隧道 外径 10 m、内径 9 m,全长 1 000 m。有限元模型范 围:1 000 m(长)×300 m(宽)×100 m(高)(图 1), 长度方向为 Z 轴,宽度方向为 X 轴,高度方向为 Y 轴。土体和隧道统一采用六面体实体单元 C3D8R。 土体采用服从 Mohr-Coulomb 模型屈服准则的理想 弹塑性模型。场地土体分为 4 层:第一层为 20.6 m,第二层为 23.9 m,第三层为 24.2 m,第四层为 31.5 m。各层的相关参数见表 1。隧道采用弹性模 型,其力学参数为:弹性模量 3.6e7 kN/m²,泊松比 为 0.2,容重为 25.7 kN/m³。用人工边界^[16]模拟无 限域的影响,在模型的侧面用人工边界,在模型的底 部即基岩处采用固定边界固定竖向位移,在基岩处 输入平行与隧道方向的地震波。



图 1 隧道三维有限元模型 Fig.1 Three-dimensional finite element model of tunnel

表 1 各层土体的参数

Table 1 The layers of soil parameters

层数	弾性模 量/MPa	泊松比	密度/ (kg・m ⁻³)	内聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
1	3.029	0.45	1 760	10.8	14.2
2	6.135	0.36	1 810	17.7	18.9
3	6.319	0.47	1 870	22	22.9
4	6.251	0.36	1 950	24.9	18.2

3 计算和分析

根据隧道所在场地的地质条件,本文计算模型 中基岩面的行波速度取为 500 m/s,模拟三维隧道 非一致地震动场,进行三维隧道动力响应分析^[17]。 下面在分析隧道位移和加速度时,取 Z = 250 m 和 Z = 750 m 处的截面进行分析,主要对隧道底部外 侧进行竖直方向(Y 轴方向)的位移和加速度时程 分析。

3.1 位移响应时程分析

现取隧道 Z=250 m 和 Z=750 m 处的底部外 侧对一致输入和非一致输入的情况下做位移时程分 析对比(图 2)。



图 2 隧道底部外侧竖向位移时程



从图 2 可以看出,由于地震动输入模式的不同, 导致隧道同一位置处的位移响应在频率和幅值变化 上差别甚大。非一致激励下隧道位移响应幅值均大 于一致激励输入,非一致输入下的频率大于一致输 入下的频率。

3.2 加速度响应时程分析

现取隧道 Z=250 m 和 Z=750 m 处的底部外







从图 3 可以看出,由于地震动输入模式的不同,导致隧道同一位置处的加速度时程在频率和幅 值变化上差别甚大。非一致激励下隧道加速度幅值 均大于一致激励输入。且非一致输入下的频率大于 一致输入下的频率。

3.3 最大应力和位移分析

非一致激励对隧道的应力响应影响见表 2。非 一致激励会显著增大隧道的应力响应幅值,最大拉 应力响应幅值增量比在行波、相干波和行波加相干 波输入时分别增加了 56.2%、106.2%和 56.2%;最 大压应力幅值增加了 9.3%,153.1%和 112.5%;而 位移幅值的变化却不是很大,在 3.1%~15.6%间, 这是由于存在相位差的地震波在基岩处沿 Z 轴方 向的叠加作用引起了场地放大效应。由于隧道结构 动力响应受控于周围场地运动,场地的放大效应必 然会增大隧道的内力和位移响应。

以上分析结果均表明,相比一致激励,非一致激励会显著增加长距离隧道结构的地震动响应,因此

在实际工程的抗震设计中必须要考虑非一致地震输 入的影响。

表 2 隧道应力和位移

Table 2 Stress and displacement of tunnel

	新命人	非一致输入		
	"以制八	行波	相干波	行波加相干波
纵向最大位移响应/mm	60.8	66.5(9.4%)	64.8(6.6%)	66.4(9.2%)
水平最大位移响应/mm	3.2	3.7(15.6%)	2.7(-15.6%)	3.1(-3.1%)
最大拉应力响应/MPa	3.2	5.0(56.2%)	6.6(106.2%)	5.0(56.2%)
最大压应力响应/MPa	3.2	3.5(9.3%)	8.1(153.1%)	6.8(112.5%)

4 结论

针对地基土长距离隧道体系的地震响应问题建 立了非一致激励下大规模地震响应分析方法,针对 沉管隧道的抗震安全性,借助 FEM 软件平台对其 地震时程响应进行非线性有限元分析。分析结果表 明:

(1)非一致输入下某特定点的位移-时间曲线 中的震动频率和位移幅值均大于一致输入下的震动 频率和位移幅值;

(2) 非一致输入下某特定点的加速度-时间曲 线中的震动频率和加速度幅值均大于一致输入下的 震动频率和加速度幅值;

(3) 与一致激励的计算结果对比表明,非一致 地震激励会显著增加隧道结构的内力与位移响应, 从而对隧道抗震产生不利影响。

本文研究结论可为长隧道结构的抗震设计和分 析提供科学依据。

参考文献(References)

- Klyomlya O. Earthquake-resistant Design Features of Immersed Tunnels in Japanl[J]. Tunneling and Under-ground Space Technology, 1995, 10(4):463-475.
- [2] 韩大建,周阿兴.沉管隧道地震响应分析的等效质点系模型探讨[J].华南理工大学学报:自然科学版,1999,27(11):108-114.
 HAN Da-jian, ZHOU A-xing. A Atudy of the Equivalent Mass-system Models for the Analysis of Earthquake Response of an Immersed Tunnel[J].Journal of south China University of Technology: Naturnal Science Edition, 1999, 27(11):108-114.(in Chinese)
- [3] 韩大建,周阿兴,黄炎生.珠江水下沉管隧道的抗震分析与设 计:I.时程响应法[J].华南理工大学学报:自然科学版,1999,27 (11):115-121.

HAN Da-jian, ZHOU A-xing, HUANG Yan-sheng. A Seismic Analysis and Design of the Pearl River Tunnel (I): Time Domain Response Method[J]. Journal of south China University of Technology: Naturnal Science Edition, 1999, 27 (11): 115-121. (in Chinese) [4] 韩大建,唐增洪.珠江水下沉管隧道的抗震分析与设计:Ⅲ.行 波法[J].华南理工大学学报:自然科学版,1999,27(11):122-130.

HAN Da-jian, TANG Zeng-hong. A Seismic Analysis and Design of the Pearl River Tunnel (II): Travelling Wave Method [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 1999, 27(11): 122-130.

- [5] 严松宏,高峰,李德武,等.沉管隧道地震响应分析若干问题的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):846-850.
 YAN Song-hong,GAO Feng,LI De-wu, et al.Studies on Some Issues of Seismic Response Analyses for Submerged Tunnel
 [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004, 23 (5):846-850.(in Chinese)
- [6] Ding J H, Jin X L, Guo Y Z, et al. Numerical Simulation for Large-scale Seismic Response Analysis of Immersed Tunnel [J].Engineering Structures, 2006, 28(10):1367-1377.
- [7] Anastasopoulos I.Gerolymos N.Drosos V.et al.Nonlinear Response of Deep Immersed Tunnel to Strong Seismic Shaking
 [J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(9):1067-1090.
- [8] Lyngs J H. Model Accuracy in a Seismic Design of Immersed Tunnel[D].Greece: Aalborg University, 2008.
- [9] Feng Q M, Hu Y X.Spatial Correlation of Earthquake Motion and Its Effect on Structural Response[C]// Proceedings of US-PRC Bilateral Workshop on Earthquake Engineering. Beijing: Science Press, 1982:5-14.
- [10] 刘飞成,张建经,邓小宁,等.地下管线三向地震动一致激励与 非一致激励数值分析[J].地震工程学报,2015,37(2):355-361.

LIU Fei-cheng, ZHANG Jian-jing, DENG Xiao-nong, et al. Numerical Analysis of Underground Pipeline under Uniform and Non-uniform Excitations of Three-directional Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37 (2):355-361.(in Chinese)

- [11] WU Yong-xin,GAO Yu-feng,LI Da-yong.Simulation of Spatially Correlated Earthquake Ground Motions for Engineering Purposes[J]. Earthquake Engineering and Engineering and Engineering Vibration,2011,10(2):163-173.
- [12] 屈铁军,王前信.空间相关的多点地震动合成(I) 基本公式
 [J].地震工程与工程振动,1998,18(1):8-15.
 QU Tie-jun, WANG Qian-xin.Simulation of Spatial Correlative Time Histories of Multi-point Ground Motion, Part I: Fundamental Formulas[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1998,18(1):8-15.(in Chinese)
- [13] 屈铁军,王前信.空间相关的多点地震动合成(II)合成实例
 [J].地震工程与工程振动,1998,18(2):25-32.
 QU Tie-jun, WANG Qian-xin. Simulation of Spatial Correlative Time Histories of Multi-point Ground Motion, Part II: Application of Fundamental Formulas[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(2): 25-32. (in Chinese)
- [14] Clough R W, Penzien J. Dynamics of Structure [M]. New York: Mc Graw-Hill Inc, 1975.
- [15] Amin M, Ang H S.Non Stationary StochasticModel of Earthquake Motions[J]. ASCE, Engineering Mechanics, 1968, 94 (2):159-183.
- [16] Yu H T, Yuan Y, Bobet A.Multi-scale Method for Long Tunnels Subjected to Seismic Loading [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011,10.1002/nag.1102.
- [17] 苏永奇,马巍,李明永,等.地震荷载作用下兰州地铁隧道结构 动力响应[J].地震工程学报,2015,37(4):938-943.
 SU Yong-qi, MA Wei, LI Ming-yong, et al. Dynamic Response of the Lanzhou Subway Tunnel Structure under Seismic Load
 [J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(4):938-943. (in Chinese)