DOI: 10.11779/CJGE2019S2050

小半径平面曲线隧道地震响应分析

穆嘉豪,王国波

(武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430070)

摘要:基于某实际工程,建立了小半径平面曲线隧道三维分析模型,探讨其在单向水平激振下的地震响应规律。其中考虑了隧道弯曲角度、地震动幅值和类型等因素的影响。通过分析得出了小半径平面曲线隧道的地震响应规律:① 响应幅值方面,横向抗震段的响应最大,曲线段其次,纵向抗震段最小;②响应差异方面,曲线部分对隧道加速度影响较小,主要影响隧道的变形;③震动能量方面,随着隧道从横向抗震逐渐过渡到纵向抗震,其震动能量逐渐降低。 关键词:小半径;曲线隧道;弯曲角度;地震响应;数值计算 中图分类号:TU435 文献标识码:A 文章编号:1000-4548(2019)S2-0197-04 作者简介:穆嘉豪(1996—),男,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事地下结构抗震分析方面的研究工作。Email: suibian0601@sina.com。

Seismic response of small-radius planar curved tunnels

MU Jia-hao, WANG Guo-bo

(Hubei Key Laboratory of Roadway, Bridge & Structure Engineering; Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A three-dimensional model for small-radius planar curved tunnels with different bending angles is established to investigate their seismic response. The influences of bending angle, amplitude and type of ground motion are considered. The seismic response laws of the small-radius planar curved tunnels are obtained: (1) For the response amplitude, the transverse seismic section is the largest, the curve section is the second, and the longitudinal seismic section is the least. (2) For the response difference, the curve part has little effect on tunnel acceleration, which mainly affects the deformation of tunnel; (3) For the vibration energy, the energy decreases gradually with the transition from transverse seismic section to longitudinal one.

Key words: small radius; curved tunnel; bending angle; seismic response; numerical calculation

0 引 言

如今小半径曲线隧道的工程案例越来越多。以武 汉地铁 6 号线为例,为了避开沿线障碍,琴台站至武 胜路站的地铁线路共有 3 个半径为 350 m 的曲线隧道 (图 1),如同"S"型。



图 1 琴台站至武胜路站地铁线路图

Fig. 1 Metro line from Qintai Station to Wusheng Road Station 地下结构抗震虽然发展历史较短,但已经获得了

丰富的研究成果^[1-3]。目前针对曲线隧道地震响应的理论分析和试验研究都较少^[4-5],因此对于曲线隧道地震响应的研究具有一定的应用价值。

1 计算模型及计算工况

1.1 计算模型

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立计算模型。 (1) 计算范围及边界条件

本文仅考虑 350 m 弯曲半径,弯曲角度定义为直 线隧道轴向延长线的夹角(图 2)。

建立弯曲角度为 150°, 135°, 120°, 90°的 曲线隧道模型(图 3)。模型由曲线段和两段 100 m 的 直线段组成。地震动采用横向输入。其中与地震动输 入方向垂直的为直线段 1, 另一段为直线段 2。隧道外 径 6 m, 内径 5.4 m。隧道顶部埋深 10 m。



图 2 弯曲角度定义示意图

Fig. 2 Schematic diagram of definition of bending angle



图 3 曲线隧道模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of curved tunnel model

土体计算宽度取 70 m。竖向取至基岩面,深度为 50 m。隧道和土体网格尺寸均取 2 m。边界条件设置 情况为:模型底部及侧边设置纵向和竖向的位移约束,释放沿激振方向的约束,顶部自由。

(2) 本构模型及计算参数

本文采用等价线性模型 Davidenkov 模型^[6]来模拟 土体的非线性特性。土体采用分层土,根据地质勘察 报告中的土体参数结合计算模型进行适当的简化,共 将土体分为 6 层,其材料参数如表 1 所示。

衬砌混凝土采用线弹性模型,密度为 2500 kg/m³, 弹性模量为 30000 MPa, 泊松比为 0.2。

(3) 地震动输入与动力时步

选取 EL 波及 Kobe 波作为输入地震动。在输入 地震波时,将地震波的幅值统一调整为 0.1g 和 0.4g, 在基岩处沿横向输入。本次计算采用显示算法,计算

表1 土体材料参数表

土层	厚度	密度	剪切波速	泊松	动剪切模	动弹性模
名称	/m	$/(kg \cdot m^{-3})$	$/(m \cdot s^{-1})$	比	量/MPa	量/MPa
人工填土	2	1750	180	0.32	57	150
粉质黏土	6	1900	242	0.26	111	280
细-中砂	10	2000	296	0.23	175	430
细-粉砂	8	2000	300	0.24	180	446
圆砾卵石1	12	2250	451	0.22	458	1118
圆砾卵石2	12	2300	507	0.22	591	1442

1.2 计算工况

计算工况见表 2。

表 2 工况表

工况	弯曲角度/(°)	地震波
1	150	0.1gEL
2	150	0.4gEL
3	150	0.1gKobe
4	150	0.4gKobe
5	135	0.1gEL
6	135	0.4gEL
7	135	0.1gKobe
8	135	0.4gKobe
9	120	0.1gEL
10	120	0.4gEL
11	120	0.1gKobe
12	120	0.4gKobe
13	90	0.1gEL
14	90	0.4gEL
15	90	0.1gKobe
16	90	0.4gKobe

1.3 监测方案

在直线段正中处取截面 *A*, *K*;在曲线段上均匀 取截面 *B*~*J*(图 4)。分别监测各截面上隧道顶部的 横向加速度和速度,顶部和底部的横向相对位移。



图 4 曲线隧道监测点布置图

Fig. 4 Layout of monitoring points of curved tunnel

2 加速度响应分析

2.1 曲线段和直线段加速度响应对比分析

提取测点 A, F, K 的加速度, 以 A 的加速度幅值 为基准, 计算 F 和 K 的相对变化百分比 α_1 :

$$\alpha_1 = \frac{A - A_A}{A_A} \times 100\% \quad , \tag{1}$$

式中, A 为测点 A, F, K 的加速度幅值, A_A 为测点 A

合。

的加速度幅值,以90°曲线隧道为例,计算各工况的 相对变化百分比,结果如表3所示。

表 3 90° 曲线隧道 *A*, *F*, *K*加速度幅值相对变化百分比 Table 3 Relative percentages of acceleration amplitude of *A*, *F*, *K*

in curve tunnel of 90° 地震动 隧道部位 加速度幅值/(m·s⁻²) $\alpha_1 / \%$ 1.833 0 A F -4.801 1.745 0.1gEL Κ 1.744 -4.855 4.248 0 A -5.697 0.4gEL F 4.006 K 3.899 -8.216 2.325 A 0 0.1gKobe F2.233 -3.957 K 2.153 -7.398 A 4.804 0 0.4gKobe F4.527 -5.767 Κ 4.323 -10.012

 K
 4.323
 -10.012

 由表 3 可知:
 ①直线段 1 测点 A 的加速度最大,

 曲线段次之,直线段 2 测点 K 响应最小;
 ②各段的响

 应幅值差异较小,说明曲线段对整个曲线隧道加速度

 响应的影响并不显著,这与地下结构地震响应特点吻

2.2 不同弯曲角度对加速度影响分析

提取曲线段测点 F 加速度,以 90° 曲线隧道 F 的加速度幅值为基准,计算其余曲线隧道测点 F 的相 对变化百分比 α ,:

$$\alpha_2 = \frac{A - A_{90^\circ}}{A_{90^\circ}} \times 100\% \quad , \tag{2}$$

式中, *A* 为各曲线隧道测点 *F* 加速度幅值, *A*₉₀ 为 90° 曲线隧道测点 *F* 加速度幅值,计算各工况的相对变化百分比,结果如表 4 所示。

表4 不同弯曲角度下 F 加速度幅值相对变化百分比

Table 4 Relative percentages of acceleration amplitude of F at

different bending angles

		*	
地震动	弯曲角度/(°)	加速度幅值/g	α_2 /%
0.1gEL	150	1.785	2.292
	135	1.762	0.974
	120	1.801	3.209
	90	1.745	0
0.4gEL	150	4.170	4.094
	135	4.196	4.743
	120	4.053	1.173
	90	4.006	0
0.1gKobe	150	2.264	1.388
	135	2.268	1.567
	120	2.253	0.896
	90	2.233	0
0.4gKobe	150	4.734	4.573
	135	4.659	2.916
	120	4.896	8.151
	90	4.527	0

由表 4 可知: 90°曲线隧道模型曲线段测点 F 的加速度幅值小于其余几种曲线隧道模型,但相差不大。

由此可见弯曲角度对结构加速度响应影响不显著。

总的来说,曲线段对于整个隧道加速度响应的影 响并不显著,这与地下结构地震响应的特点相符。

3 位移响应分析

3.1 曲线段和直线段相对位移响应对比分析

提取测点 *A*, *F*, *K* 的相对位移, 以 *A* 的相对位移 幅值为基准, 计算 *F* 和 *K* 的相对变化百分比 *B*.

$$\beta_1 = \frac{\Delta U - \Delta U_A}{\Delta U_A} \times 100\% \quad , \tag{3}$$

式中, ΔU 为测点A,F,K的相对位移幅值, ΔU_A 为测点A的相对位移幅值,以90°曲线隧道为例,计算 各工况的相对变化百分比,结果如表 5 所示。

表5 90°曲线隧道 A, F, K 最大相对位移相对变化百分比

Table 5 Relative percentages of maximum relative displacement of

A, F, K in curved tunnel of 90°

地震动	测点	最大相对位移/mm	$eta_{ m l}$ /%
	A	6.21	0
0.1gEL	F	3.32	-46.54
	Κ	0.74	-88.08
	A	22.98	0
0.4gEL	F	11.46	-50.13
	Κ	1.61	-92.99
	A	7.53	0
0.1gKobe	F	4.13	-45.15
	Κ	0.78	-89.64
0.4gKobe	A	31.22	0
	F	15.21	-51.28
	Κ	1.63	-94.78

由表 5 可知: ①在同一弯曲角度下,直线段 1 的 *A* 点相对位移最大,曲线段次之,直线段 2 的 *K* 点最 小。②相同地震动幅值时,Kobe 波作用下测点*A*,*F*, *K* 的最大相对位移大于 EL 波作用时,反映了地震动 特性对于结构响应的影响较为显著^[7]。

3.2 不同弯曲角度对相对位移影响分析

提取各曲线隧道模型曲线段测点 *F* 的相对位移, 以 90°曲线隧道测点 *F* 的相对位移幅值为基准,计算 其余各曲线隧道测点 *F* 的相对变化百分比 β₂:

$$\beta_2 = \frac{\Delta U - \Delta U_{90^\circ}}{\Delta U_{90^\circ}} \times 100\% \quad , \tag{4}$$

式中, ΔU 为各曲线隧道测点 F 的最大相对位移, ΔU_{90} 为 90° 曲线隧道测点 F 的最大相对位移,计算 各工况的相对变化百分比,结果如表 6 所示。

由表 6 可知: ①90°曲线隧道曲线段的相对位移 远小于其余 3 种曲线隧道; ②弯曲角度对隧道相对变 形的影响十分显著,这对于地下结构的抗震是十分不 利的。

总之,曲线段对于曲线隧道相对位移的影响较大, 应成为曲线隧道抗震设计中的重点关注问题。

表 6 不同弯曲角度下 F 最大相对位移的相对变化百分比

Table 6 Relative percentages of maximum relative displacement of

地震动	弯曲角度	最大相对位移	B /0/2
	/(°)	/mm	$p_2 / 70$
0.1gEL	150	6.02	81.33
	135	5.68	71.08
	120	6.07	82.83
	90	3.32	0
	150	22.19	93.63
$0.4 \sigma EI$	135	20.89	82.29
0.4gEL	120	20.45	78.45
	90	11.46	0
	150	7.13	72.64
0.1gKobe	135	6.67	61.50
	120	7.73	87.17
	90	4.13	0
	150	32.90	116.31
0.4 gK obe	135	28.50	87.38
0.4gK00e	120	26.78	76.07
	90	15.21	0

F in curved tunnels at different bending angles

4 能量分析

提取测点 $A \sim K$ 速度,由式 (5) 计算振动能量: $E = \int_{-}^{T} v^2 dt$ (5)

式中,*T*为地震动持续时间 30 s,*v* 取各测点横向速度。 由于不同曲线隧道的总横向宽度不同,为了便于 比较不同弯曲角度下的振动能量,对各弯曲角度下各 测点的横向宽度进行归一化处理,即

$$b = \frac{c}{c_{\nu}} \quad , \tag{6}$$

其中, b 为各测点归一化的横向宽度, c 为各测点的横向宽度(以测点 A 的横向宽度为 0), a_K为测点 K 的横向宽度。以 0.1gEL 作用下为例, 绘制出各曲线隧道能量——归一化横向宽度曲线, 如图 5 所示:



图 5 0.1gEL 作用下曲线隧道能量 - 归一化横向宽度曲线 Fig. 5 Curve of energy-normalized transverse width of curved tunnel under action of 0.1gEL

由图 5 可知:①随着隧道从横向抗震逐渐过渡到 纵向抗震,其震动能量逐渐降低;②120°曲线隧道的 震动能量要大于其余曲线隧道。 (1)响应幅值方面,横向抗震段的响应最大,曲 线段其次,纵向抗震段最小。

(2)响应差异方面,曲线部分对隧道加速度影响 较小,主要影响隧道的变形。

(3) 震动能量方面,随着隧道从横向抗震逐渐过 渡到纵向抗震,其震动能量逐渐降低。

参考文献:

- 刘晶波,李 彬. 地铁地下结构抗震分析及设计中的几个 关键问题[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(6): 106 - 110. (LIU Jing-bo, LI Bin. Issues on the seismic analysis and design of subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(6): 106 - 110. (in Chinese))
- [2] 陶连金,王文沛,张 波,等. 竖向强震作用下密贴地铁地下交叉结构动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3):
 433 437. (TAO Lian-jin, WANG Wen-pei, ZHANG Bo. Dynamic response of closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 433 437. (in Chinese))
- [3] HUO H, BOBET A, FERNANDEZ G. et al. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: Evaluation of the failure of the Daikai station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1522 - 1533.
- [4] 周彦良. 曲线隧道的地震响应特性及抗震减震方法研究[D]. 西安科技大学, 2013. (ZHOU Yan-liang. Study on seismic response properties and anti-seismic and seismic-relieving measures of curved tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [5] 周彦良,戴 俊,曹 东. 曲线隧道的震害机理及抗震分析方法探讨[J]. 公路交通技术, 2013(2): 107 110. (ZHOU Yan-liang, DAI Jun, CAO Dong. Discussion on seismic damage mechanism and seismic analysis method of curvedd tunnel[J]. Technology of Highway and Transport, 2013(2): 107 110. (in Chinese))
- [6] ZHUANG Hai-yang, HU Zhong-hua, WANG Xue-jian, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modeling[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(12): 3645 - 3668.
- [7] 安军海,陶连金,李积栋,等. 地铁双层交叉隧道非线性地 震响应分析[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(3): 66 - 7. (AN Jun-hai, TAO Lian-jin, LI Ji-dong, et al. Nonlinear seismic response analysis of subway double-decked tunnel[J]. China Railway Science, 2015, 36(3): 66 - 72. (in Chinese))

5 结 论