

文章编号:1673-9469(2022)04-0068-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.010

方向性脉冲型地震动对沉管隧道动力响应分析

张钰琦,汪俊诚,吴勇信*

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:为揭示地震动的脉冲效应对沉管隧道动力响应的影响,参考广州佛山沉管隧道建立了一个双向四车道沉管隧道动力分析有限元模型。动力有限元模型中引入了土体的非线性动力本构模型,通过在模型底部水平向输入地震动,对比分析了40组具有方向性效应脉冲型地震动(FD)及相应剔除速度脉冲后的无脉冲地震动(NP)作用下沉管隧道的地震响应。研究表明:(1)FD地震动相对于NP地震动对沉管隧道的响应更大(位移、加速度及应力);(2)随着地震动峰值速度(PGV)的增大,结构的响应也都呈现出增大的趋势,同时峰值速度影响系数 R 较大时,相对应的结构响应脉冲影响系数 K 也大,说明具有速度脉冲的地震动对结构的响应更大;(3)随着脉冲周期 T_p 的增大,结构响应的脉冲影响系数 K 都是先增后减,并且脉冲周期在结构第一自振周期附近区间时,结构响应都较大,说明脉冲型地震动的脉冲周期对沉管隧道的地震响应也有显著影响。

关键词:隧道工程;沉管隧道;方向性脉冲地震动;数值分析;动力响应分析

中图分类号:U452

文献标识码:A

Response Analysis of Directional Pulse Type Ground Motion to Immersed Tunnel

ZHANG Yuqi, WANG Juncheng, WU Yongxin*

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to reveal the influence of the pulse effect of ground motion on the dynamic response of the immersed tunnel, a finite element model for the dynamic analysis of a bi-directional four-lane immersed tunnel was established based on the Foshan immersed tunnel structure in Guangzhou. The non-linear dynamic constitutive model of soil was introduced into the dynamic finite element model, and the seismic responses of 40 groups of forward directional pulse ground motions (FD) as well as the corresponding non pulse ground motions (NP) with velocity pulse excluded were compared and analyzed by inlaying ground motions horizontally at the bottom of the model. The results show that: (1) the response of FD ground motion of immersed tunnel is larger than NP ground motion (displacement, acceleration and stress); (2) with the increase of PGV of ground motion, the structural responses also show an increasing trend. At the same time, the corresponding influence coefficient K of structural responses pulse is large when the influence coefficient R of peak velocity is large, indicating that the ground motion with velocity pulse has a greater response to the structure; (3) with the increase of pulse cycle T_p , structural responses of pulse influence coefficient K increased at first and then decreased, Moreover the structural responses are larger when T_p performed in the interval near the first natural vibration period of the structure, The damage performed similarly showed that there was significant influence of pulse period of pulsed ground motion on the seismic response of the immersed tunnel.

Key words: tunnel engineering; immersed tunnel; directional pulse ground motion; numerical analysis; dynamic response analysis

收稿日期:2022-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助(52078186)

作者简介:张钰琦(1998-),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事地震工程研究。

* 通讯作者:吴勇信(1985-),男,江苏盐城人,博士,教授,主要从事岩土工程可靠度研究。

自20世纪以来,沉管隧道因其适应性强、埋置浅、航运干扰小、防水性能好等优势,已在全世界作为穿越江河、港湾、海底的重要交通设施。沉管隧道大多数修建于水域软弱地层中,周围受到土体的约束,在地震作用下,其动力响应相对于地面结构较为柔和,被认为相对不易受到破坏,导致其地震响应分析研究较晚^[1]。但由于沉管隧道所处位置相对特殊,一旦发生震害,将难以修复,因此吸引了不少学者对于沉管隧道的抗震分析。常见的沉管隧道抗震分析方法有数值模拟和模型试验。袁勇等^[2-4]以港珠澳大桥沉管隧道为工程背景,开展了沉管隧道的振动台模型试验,研究得出沉管隧道的管节加速度响应及接头最大张开量,提出隧道关键节点的减震控制方法。闫维明等^[5-6]通过沉管隧道的振动台试验,关于沉管隧道减震进行了研究。陈贵红等^[7-8]、曾朗杰^[1]及程新俊^[8]采用有限元软件分别对沉管隧道进行了二维和三维模型的动力响应分析,研究得出在水平地震作用下,沉管隧道的动力响应受水的影响不大,且提出了耗能减震式局部沉管隧道接头。Miao等^[9]基于 Davidenkov 骨架曲线的土体非线性动力粘弹性本构模型,分别对武汉三阳路跨江隧道工程和汕头苏埃隧道工程进行模拟,发现土体动力特性和场地非均匀性对不同激励地震动作用下的结构响应影响很大,并且近场地震动对隧道结构响应更大,造成破坏更严重。近断层地震的方向性效应和滑冲效应是产生速度脉冲的主要原因。目前近断层脉冲型地震动对结构的响应已受到许多学者研究,李帅等^[10-11]以苏通大桥斜拉桥为研究对象,得出脉冲速度峰值、奇数个脉冲数及有脉冲型地震动对结构响应更显著的规律。宋健等^[12]通过研究近断层地震动作用下的土质边坡动力响应,发现速度脉冲型地震动对边坡的破坏作用远强于无速度脉冲型地震动。朱育才等^[13-15]研究发现近断层地震动作用下对隧道的动力响应与远场地震动相比,会产生更大的应力、位移响应。

以上研究从原理、试验方法和数值分析上得到沉管隧道响应规律,提出了减震方法;在上部结构、土质边坡以及隧道结构中都有考虑具有长周期、大幅值、短持时的脉冲特性地震动的影响,这种地震动相对于普通地震动对结构的响应大的多,破坏也严重的多^[16]。而在沉管隧道的研究上考虑脉冲型地震动对其动力响应分析的影响几乎没有,并且未保证所选的有无速度脉冲地震动的

同源性及反应谱的相似性。本文基于 Davidenkov 骨架曲线的土体非线性动力粘弹性本构模型,采用 ABAQUS 软件建立了沉管隧道的有限元模型,再通过 MATLAB 对地震动数据进行处理,一方面可以得到所选站台水平两条正交方向的最大合成加速度时程,另一方面对地震动中速度脉冲进行提取。主要研究分析由方向性效应引起的双向速度脉冲地震动(forward directional pulse ground motions,FD)及相应剔除速度脉冲的无脉冲地震动(non-pulse ground motions,NP)作用下对沉管隧道的动力响应(位移、加速度、应力),研究结果为近断层区域沉管隧道的抗震提供一定的参考。

1 沉管隧道地震响应数值模拟

1.1 模型建立及参数选取

三维数值模型的建立不仅工作量巨大,并且所占电脑内存更多,模型尺寸及网格划分大大限制了其计算速度,根据张国强^[17]的研究发现将三维结构模型简化为二维模型的计算结果相差不大,因此本文以广州佛山市沉管隧道^[1]为参考采用 ABAQUS 有限元软件建立了二维的沉管隧道模型。模型设计以公路段为双向四车道三孔的箱型结构,单跨结构净宽 8.65 m,中间设净宽为 1.5 m 的电缆廊道。沉管段标准横断面宽为 23 m,高度为 9 m,管节横断面如图 1。

采用有限元软件进行计算分析时,需对模型边界进行一定近似的有界处理。目前动力计算分析中比较常用的为黏弹性边界^[18],其稳定性良好并且精度较高,但其计算效率低,对于批量工况的计算实属不易,并且其占用内存较高,大多用于均质土体的边界设置,对于多层土适用情况有待研究。因此为了尽可能消除边界影响,在时间域内求解非线性问题,只能把边界取得尽可能远一些来实现^[19]。根据楼梦麟等^[20]的研究表明,当地基侧向宽度与地下结构宽度之比大于 5 倍时,可以忽略边界效应带来的影响。因此本文有限元模型取左右对称,地基宽度取 500 m,竖向取 60 m,两侧边界为自由边界,底部为固定边界。土层参数如表 1。沉管隧道及周围土体采用四结点平面应变实体单元模拟,并且隧道结构简化为弹性体进行计算,参数如表 2。

1.2 材料的动力非线性本构

本文采用基于 Davidenkov 骨架曲线的土体非

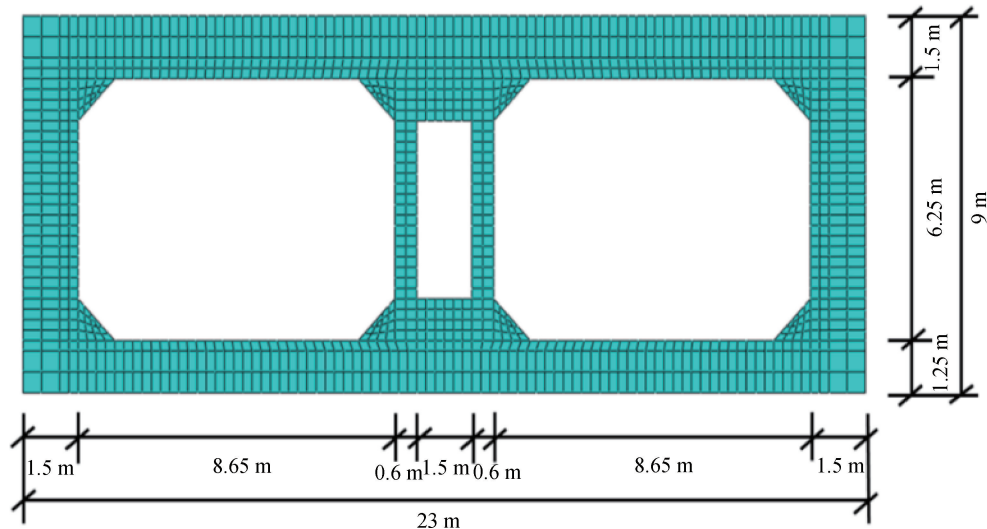


图1 沉管隧道横断面图

Fig. 1 Cross-section view of immersed tunnel

表1 土层参数

Tab. 1 Soil parameters

土层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大剪切 模量/MPa	泊松 比	厚度 /m
黏土	1 880	100	18.8	0.4	5
粘质砂土	1 920	190	69.3	0.4	10
碎石砂土	1 940	220	93.9	0.4	15
粉砂	1 980	270	144.3	0.4	30

表2 沉管隧道参数

Tab. 2 Structural parameters of immersed tunnel

材料名称	弹性模量/ GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
混凝土	30	2 300	0.18

线性动力粘弹性本构模型^[21-23]。Davidenkov 模型是由 Martin 等人通过提出三参数 A、B 和 γ_0 去拟合各类土体的动剪切模量比 $G/G_{\max} - \gamma$ 曲线的实验结果的方法,基于此方法的骨架曲线建立了一维加卸载应力-应变关系为:

$$\tau = \tau_c + G_{\max}(\gamma - \gamma_c) \left[1 - H\left(\frac{1}{n} |\gamma - \gamma_c|\right) \right] \quad (1)$$

该式描述了当施加的应力转向后,后续的应力-应变曲线沿当前拐点指向历史最大(小)点的方向前进,应力-应变滞回曲线由初始骨架曲线放大 n 倍来构造,代替了 Masing 法则中的放大倍数 2。

式中 τ_c 、 γ_c 别为应力-应变滞回曲线加卸载转折点对应的应力和应变; G_{\max} 最大剪切模量; H 为描述应力-应变关系的基本形状函数;参数 n 分别取 1 和 2,代表初始加载和卸载情况。

在对沉管隧道进行非线性动力反应分析时,

定义其周围土体和岩石的应力-应变关系通常用八面体的应力-应变关系,通过瑞利阻尼的概念定义黏性阻尼矩阵来考虑土体材料的黏性效应,并且假设阻尼矩阵只与刚度矩阵有关,可以定义最终的应力-应变关系为:

$$\sigma_{ij}^{t+\Delta t} = \tilde{\sigma}_{ij}^{t+\Delta t} + \alpha_1 D^{el} \dot{\epsilon} t + \Delta t_{ij} \quad (2)$$

式中: α_1 为瑞利阻尼系数; D^{el} 为初始弹性刚度矩阵。

本文采用隐式积分求解非线性动力问题,编制 Jacobi 矩阵 $\partial \Delta \sigma / \partial \Delta \epsilon$,在每一时步结束时都按(2)式进行应力更新。

2 脉冲地震动参数选取

近断层一般表示断层距小于 20~60 km 之间^[24-25]。为分析近断层方向性速度脉冲型地震动对沉管隧道的地震响应,本文基于 Shahi 所记录的 243 条脉冲型地震动数据,其中具有方向性效应的地震动与断层距分布关系如图 2,可见大部分具有方向性效应的地震动的断层距小于 30 km,从中选择 40 组作为计算的脉冲地震动数据。图 3 以 NGA_182 地震动为代表描述了方向性脉冲效应的地震动加速度、速度及位移时程曲线。由图可知,该地震动具有明显的速度和位移脉冲,而且脉冲曲线呈双向往复形式,地震动最终位移趋向于 0。

地震发生在空间和时间域上均具有高度的不确定性。通常地震动加速度记录仪监测到的地震动在空间上会被分解成三条两两互相垂直的分量:两条水平分量和一条竖直分量,已有研究^[26]通

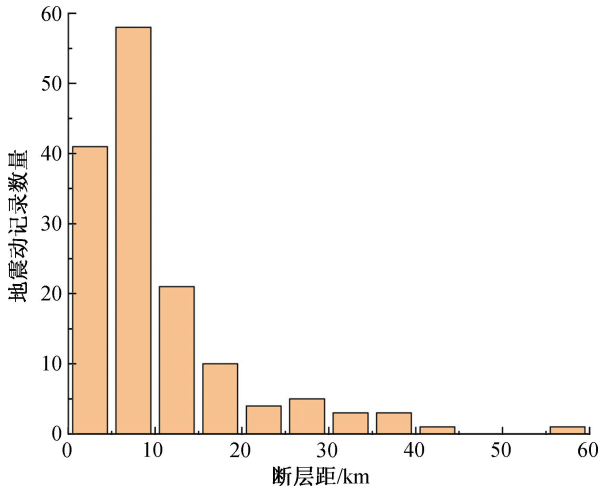


图2 方向性脉冲地震动断层距分布图

Fig. 2 Fault distance distribution map of directional pulse ground motion

过水平方向上两条正交的地震动分量定量分析脉冲效应的方向性,对于同一站台记录的脉冲地震动在两条水平地震动分量上可能不都具备方向性,因此按照式(3)对其按照平行四边形法则进行合成,可以得到任意方位角的地震动^[27]。

$$\alpha(t; \theta) = \alpha_1 \cos(\theta) + \alpha_2 \sin(\theta) \quad (3)$$

式中: $\alpha(t; \theta)$ 为对应 θ 方向的地震动加速度时程; α_1, α_2 为原始地震动所记录的两条加速度水平分量; θ 为在原始地震动记录的基础上旋转的角度。

本文以正北方向为 0° ,按顺时针变化,通过以每 1° 进行旋转,得到最大合成 PGA 的地震动加速

度时程及其方位角,判定其具有明显的脉冲效应,同时为了对比分析有无脉冲型地震动作用下结构的响应,不可忽略地震动时程具备同源性和反应谱相似性的特性^[28]。因此采用 LSF 法^[26]对脉冲进行提取,可以得到与 FD 地震动同源但不含速度脉冲的 NP 地震动,经过处理的 NP 地震动在长周期段是不含有速度脉冲成分。已有研究近场地震动作用下基于非线性时程分析地下结构的地震动强度参数,以地表峰值加速度作为地震动强度指标更适合于预测结构在地震作用下的动力响应^[29-30]。因此本文分析近场方向性脉冲型地震动对沉管动力响应的数值计算时,将输入地震波 PGA 均调整为 $0.3g$ 。所选 40 组脉冲地震动基本信息见表 3,表中 R 为峰值速度影响系数,即 PGV_{FD}/PGV_{NP} 比值,反映的是 FD 地震动和 NP 地震动在 PGV 上的差异,该值越大表明差异越大。

图 4 对 40 组地震动的加速度反应谱进行分析,从中可以看出,在中长周期部分,FD 地震动较于 NP 地震动存在有明显的脉冲,并且在高频部分,两者几乎重合。

图 5 从 40 组地震动中选择 4 组地震动为代表进行加速度反应谱分析,从图中可以看出,通过 LSF 法除去速度脉冲后,NP 地震动的加速度反应谱除了在长周期段与 FD 地震动有所不同外,其余地方基本相似,并且脉冲部分均在脉冲周期的附近周期段,满足了同源性和反应谱相似性。

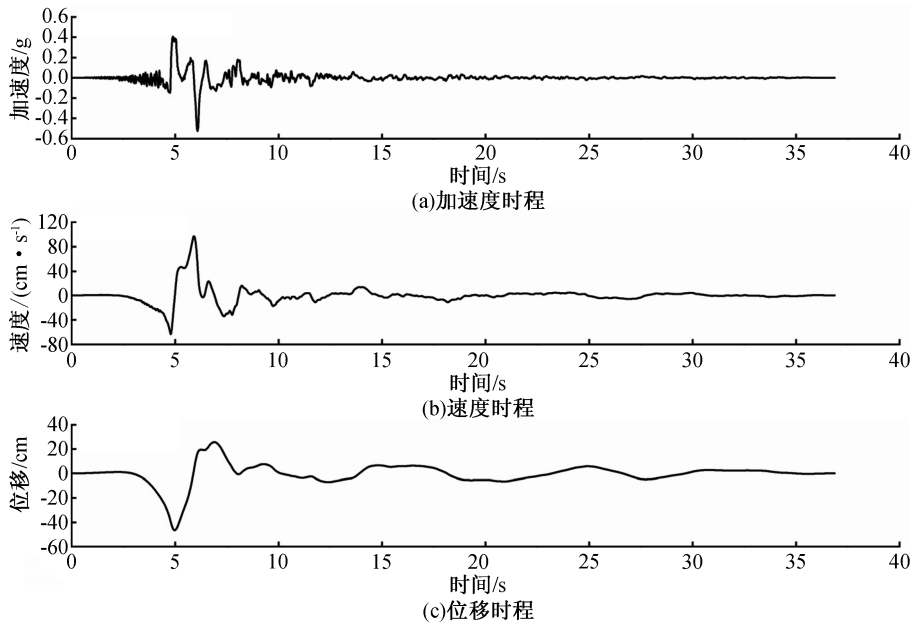


图3 方向性效应脉冲地震动(NGA_182)

Fig. 3 Directional effect pulsed ground motion (NGA_182)

表3 地震动特性参数

Tab. 3 Ground motion characteristic parameters

NGA 编号	地震事件	矩震级	断层距/km	PGV_FD/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	PGV_NP/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	R	T_p /s	
147	Coyote Lake	5.74	9.02	28.92	11.54	2.51	1.1	
148		5.74	7.42	26.31	17.85	1.47	1	
149		5.74	5.7	22.15	24.04	0.92	0.8	
170	Imperial Valley-06	6.53	7.31	79.99	71.06	1.13	3.1	
173		6.53	8.6	44.11	33.75	1.31	1.8	
178		6.53	12.85	34.34	31.71	1.08	2.5	
179		6.53	7.05	33.59	34.77	0.97	1.1	
180		6.53	3.95	32.57	28.27	1.15	3.5	
181		6.53	1.35	56.47	26.50	2.13	3.5	
182		6.53	0.56	55.93	49.35	1.13	3.1	
185		6.53	7.5	72.30	54.03	1.34	4.3	
316	Westmorland	5.90	16.66	53.67	43.81	1.23	5	
459	Morgan Hill	6.19	9.87	20.43	11.31	1.81	1	
764	Loma Prieta	6.93	10.97	40.16	26.38	1.52	1.4	
766		6.93	11.07	35.40	27.34	1.295	1.4	
802		6.93	8.5	20.44	13.81	1.48	1.6	
803		6.93	9.31	55.47	43.33	1.28	1.1	
982	Northridge-01	6.69	5.43	43.58	30.56	1.43	1.3	
983		6.69	5.43	21.03	17.55	1.20	0.8	
1004		6.69	8.44	24.06	23.45	1.03	3.2	
1013		6.69	5.92	54.16	32.27	1.68	1.2	
1054		6.69	7.46	40.91	21.76	1.88	1.2	
1084		6.69	5.35	31.17	31.17	1.00	1.4	
1161		Kocaeli, Turkey	7.51	10.92	43.11	37.02	1.16	0.5
1165	7.51		7.21	43.11	40.05	1.08	2.6	
3744	Cape Mendocino	7.01	12.24	31.71	29.27	1.08	1.9	
4065	Parkfield-02, CA	6.00	2.85	23.01	11.42	2.02	1.1	
4098		6.00	3	31.88	25.92	1.23	1	
4100		6.00	3.01	30.59	21.98	1.39	0.8	
4101		6.00	5.55	9.69	8.20	1.18	0.3	
4102		6.00	3.63	20.52	13.18	1.56	0.7	
4103		6.00	4.23	19.04	11.70	1.63	0.6	
4107		6.00	2.51	23.26	21.27	1.09	0.8	
4113		6.00	2.85	50.03	37.55	1.33	1.1	
4115		6.00	2.65	45.08	36.35	1.24	1.1	
4126		6.00	3.79	13.79	14.12	0.98	0.5	
4482		L' Aquila, Italy	6.30	6.55	19.54	16.62	1.18	0.6
4483			6.30	5.38	33.79	23.43	1.44	1.7
6928	Darfield, New Zealand	7.00	25.67	19.93	16.24	1.23	3.2	
8119	Christchurch, New Zealand	6.2	1.98	48.81	34.45	1.42	1.8	

*表中 PGV_FD、PGV_NP 分别为 PGA=0.3 g 时有脉冲和剔除脉冲后的地震动 PGV; T_p 为 LSF 法确定的脉冲周期。

3 计算结果分析

本文由频率分析步先计算出结构的自振周

期,取其第一阶自振周期结果 $T_1, T_1 = 0.9723 \text{ s}$ 。将选定的 FD 地震动与 NP 地震动共 80 组地震动输入沉管隧道进行地震响应分析,主要分析 FD、

NP 地震动在不同峰值速度及脉冲周期下的沉管隧道加速度、位移及其应力响应的影响。定义位移反应脉冲影响系数为 K_U , 沉管底部和顶部加速度反应脉冲影响系数分别为 $K_{A_{bot}}$ 和 $K_{A_{top}}$ 以及应力反应脉冲影响系数为 K_S , 相应计算公式如下:

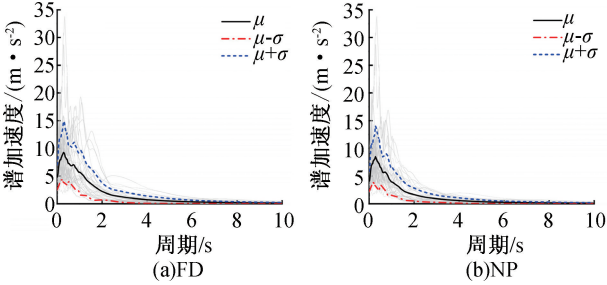


图 4 40 组地震动加速度反应谱

Fig. 4 40 sets of ground motion acceleration response spectrum

$$K_U = \frac{U_{FD}}{U_{NP}} \quad (4)$$

$$K_{A_{bot}} = \frac{A_{bot_FD}}{A_{bot_NP}}, K_{A_{top}} = \frac{A_{top_FD}}{A_{top_NP}} \quad (5)$$

$$K_S = \frac{S_{FD}}{S_{NP}} \quad (6)$$

式中: U_{FD} 、 U_{NP} 分别为 FD、NP 地震动作用下沉管隧道位移响应的最大值; A_{bot_FD} 、 A_{bot_NP} 、 A_{top_FD} 、 A_{top_NP}

分别为 FD、NP 地震动作用下沉管底部、顶部加速度响应的最大值; S_{FD} 、 S_{NP} 分别为 FD、NP 地震动作用下沉管应力响应的最大值。

3.1 位移响应分析

由于沉管隧道的结构对称,通过提取左、右墙的底、顶部之间的水平向相对位移时程,发现数据相差较小,因此仅对隧道左墙的相对水平位移进行分析。图 6 中显示 4 组代表性地震动作用下,最大相对水平位移时刻的沉管隧道侧墙随高度的相对水平位移变化。由图可知,左墙相对水平位移随高度的变化曲线接近于双曲线,并且 FD 地震动产生的相对水平位移要大于 NP 地震动。

图 7 反映了 40 组 FD、NP 地震动输入沉管隧道的位移响应,提取结构左墙相对水平位移的最大值,随着 PGV 的增大,FD、NP 地震动作用下左墙相对水平位移都呈现出增大趋势,并且 FD 地震动产生的相对水平位移要大于 NP 地震动;图 8 揭示了峰值速度影响系数 R 对隧道位移响应的影响,可见随着 R 的增大, K_U 也呈现出增大趋势,表明地震动存在速度脉冲会增大沉管隧道的位移响应;图 9 呈现了脉冲周期对隧道位移响应的影响规律,研究发现,随着脉冲周期的增大, K_U 呈现出先

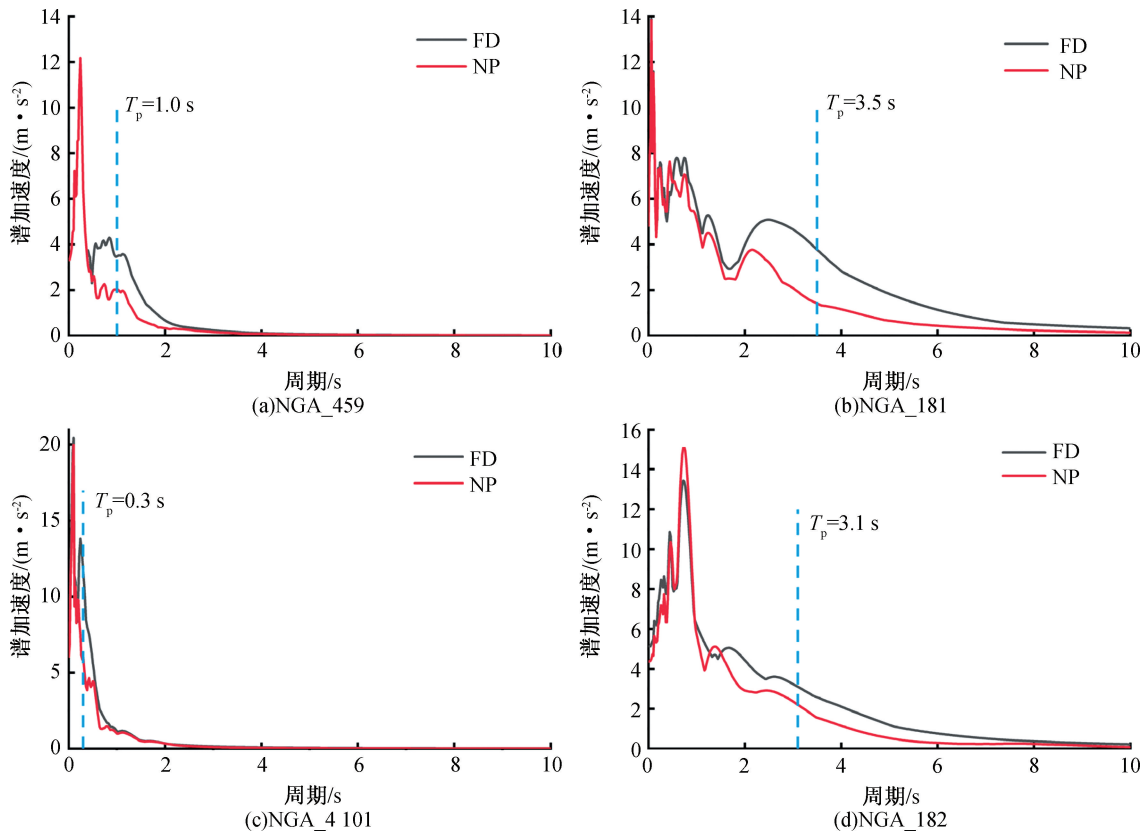


图 5 4 组代表性地震动加速度反应谱

Fig. 5 Four groups of representative ground motion acceleration response spectra

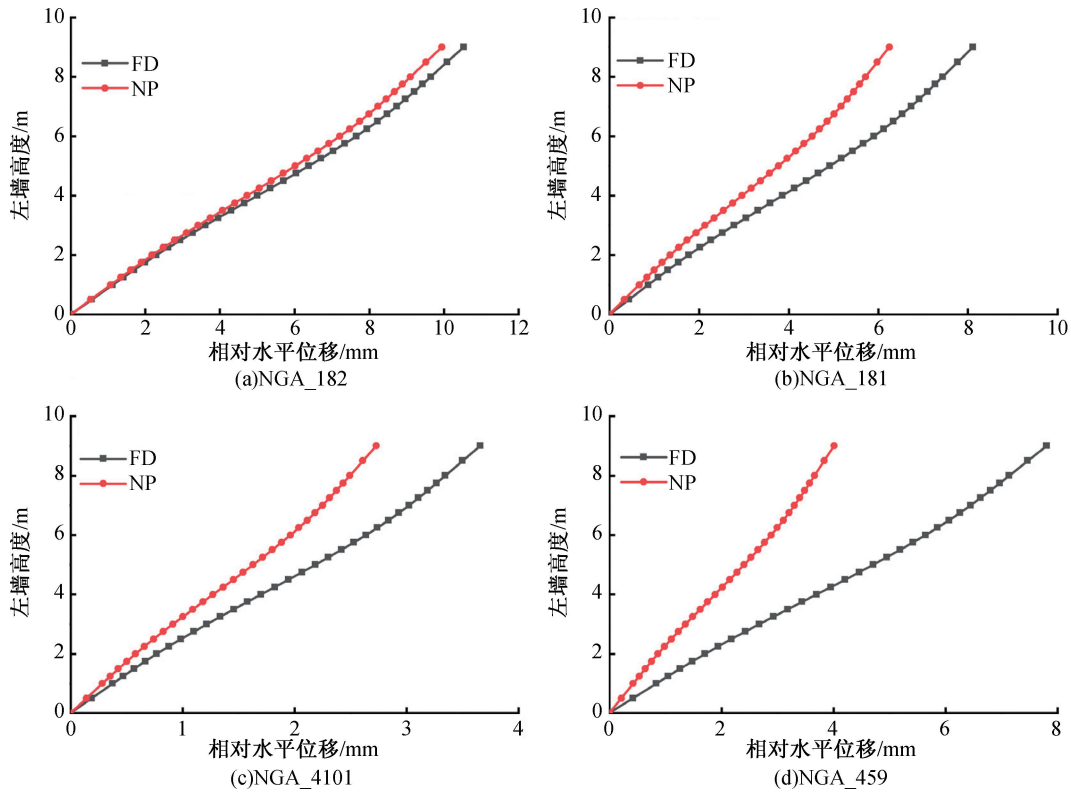


图 6 4组地震动作用下沉管隧道侧墙随高度的相对水平位移

Fig. 6 Relative horizontal displacements of the side walls of immersed tunnels with height under four groups of ground motions

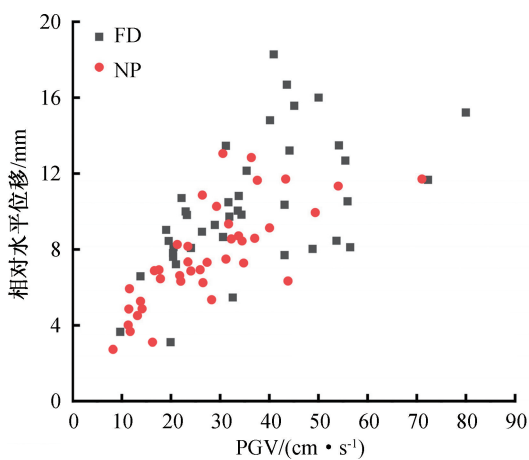


图 7 PGV 对沉管隧道的相对水平位移影响

Fig. 7 PGV affects the relative horizontal displacement of immersed tunnel

增后减趋势,并且脉冲周期在结构第一阶自振周期附近区间时, K_U 值较大,说明此时脉冲周期对沉管隧道位移响应影响较大。

3.2 加速度响应反应

图 10、图 11 分别给出了 4 组代表性 FD、NP 地震动作用下沉管隧道结构底部、顶部的水平加速度反应时程。从图中可知:FD、NP 地震动作用下沉管隧道的加速度时程上大部分处于重合,FD

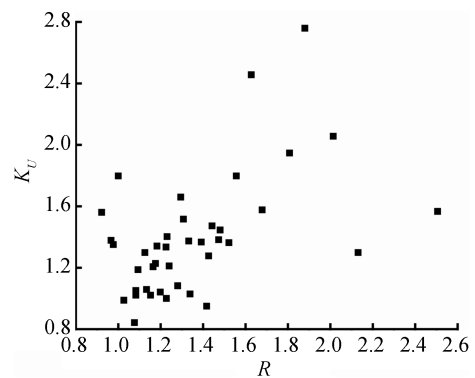


图 8 R 对沉管隧道位移响应影响

Fig. 8 Influence of R on displacement response of immersed tunnel

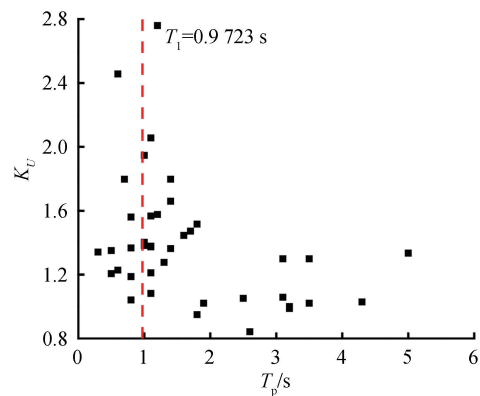


图 9 T_p 对沉管隧道位移响应影响

Fig. 9 Influence of T_p on displacement response of immersed tunnel

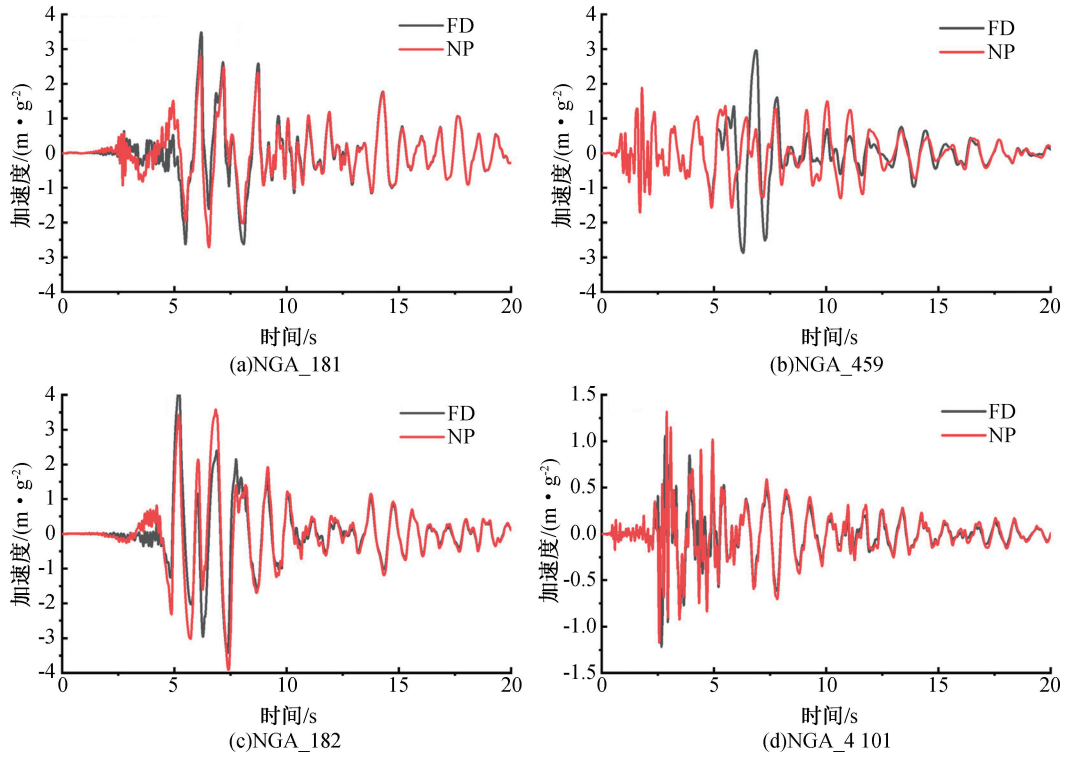


图 10 4 组地震动沉管隧道底部的加速度时程

Fig. 10 Acceleration time history of the bottom of four groups of ground motion immersed tunnel

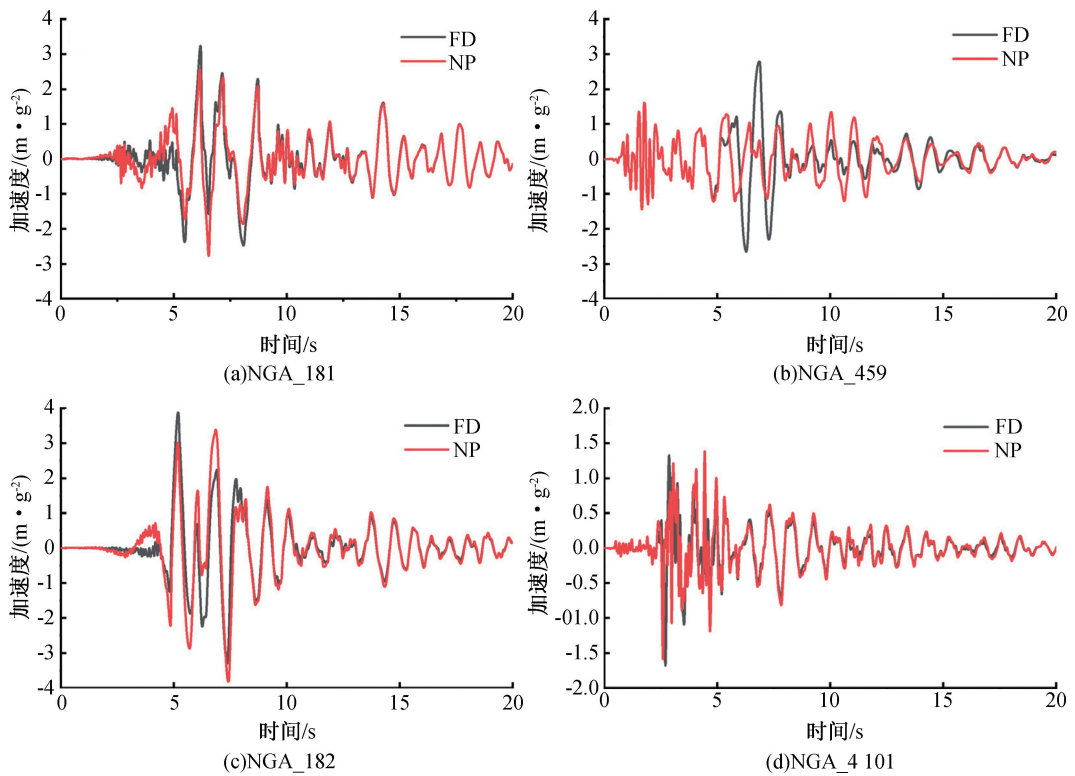


图 11 4 组地震动沉管隧道顶部的加速度时程

Fig. 11 Acceleration time history of the top of four groups of ground motion immersed tunnel

地震动作用下沉管隧道的 PGA 要大于 NP 地震动,且隧道顶部的 PGA 都要比隧道底部大,可见地

震动存在速度脉冲时,对沉管隧道的加速度响应都有一定的增大。

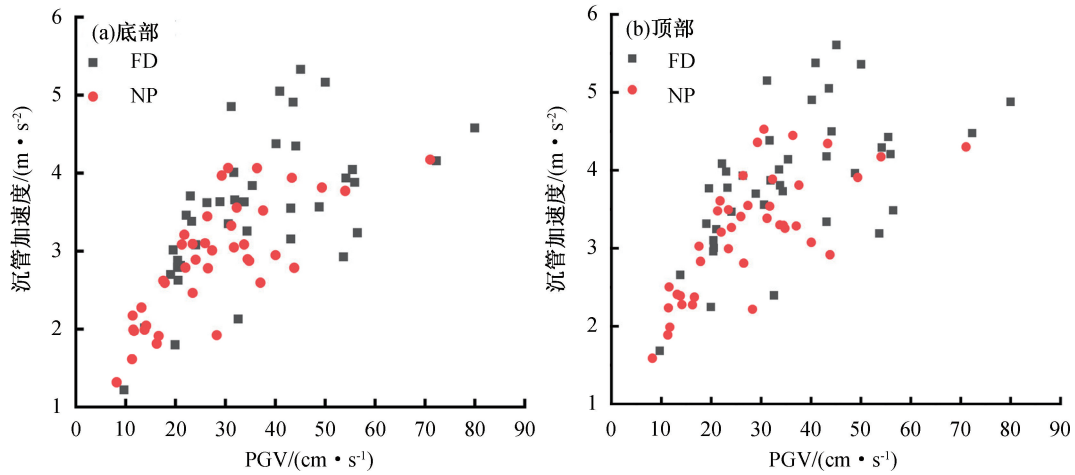


图 12 PGV 对沉管隧道峰值加速度影响

Fig. 12 Influence of PGV on peak acceleration of immersed tunnel

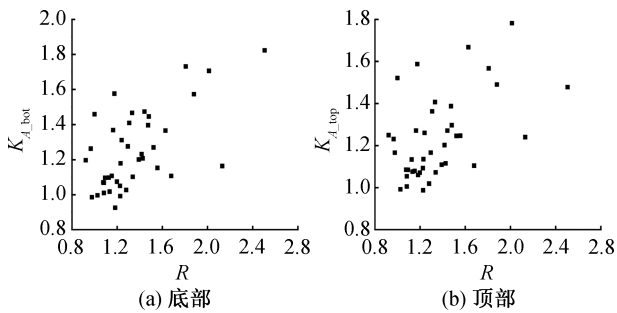


图 13 R 对沉管隧道加速度响应影响

Fig. 13 Influence of R on acceleration response of immersed tunnel

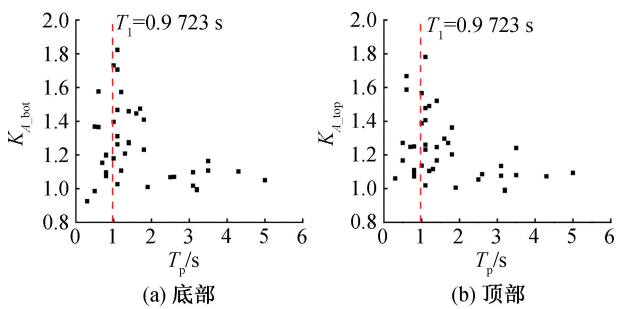
图 14 T_p 对沉管隧道加速度响应影响Fig. 14 Influence of T_p on acceleration response of immersed tunnel

图 12 反映了 40 组 FD、NP 地震动作用下沉管隧道底部和顶部的峰值加速度响应结果,随着 PGV 的增大,沉管隧道底部、顶部的峰值加速度也增大,并且 FD 地震动作用下产生的峰值加速度要大于 NP 地震动(黑点部分整体偏高于红点部分);图 13 揭示了峰值速度影响系数 R 对隧道加速度响应的影响,随着 R 的增大, K_{A_bot} 、 K_{A_top} 也都呈现

出增长的趋势,其中 R 值越大,FD 地震动和 NP 地震动的响应相差也大,表明地震动中存在速度脉冲会增大沉管隧道的加速度响应;图 14 呈现了脉冲周期对隧道加速度响应的规律,研究发现,随着脉冲周期的增大, K_{A_bot} 、 K_{A_top} 表现为先增后减的趋势,并且脉冲周期在结构第一阶自振周期附近区间时,加速度反应脉冲影响系数值较大,说明此时脉冲周期对沉管隧道的加速度响应影响较大。

3.3 应力响应分析

图 15 给出了代表性地震动(NGA_182)作用下沉管隧道最大相对位移时刻的 Mises 应力云图,从图中可以发现,在中柱部分以及结构边角部分的应力较大,并且最大 Mises 应力都出现在中柱上,同时 FD 地震动对沉管响应产生的最大 Mises 应力(14.41 MPa)都大于 NP 地震动(12.17 MPa)。

图 16 反映了 40 组 FD、NP 地震动作用下沉管隧道的最大 Mises 应力响应,随着 PGV 的增大,沉管隧道的应力响应也增大,并且 FD 地震动作用下产生的应力响应要大于 NP 地震动;图 17 呈现了峰值速度影响系数 R 对隧道应力响应的规律,随着 R 的增大, K_s 也都呈现出增长的趋势,其中 R 值越大,FD 地震动和 NP 地震动的应力响应相差也大,表明地震动中存在速度脉冲会增大沉管隧道的应力响应;图 18 揭示了脉冲周期对隧道应力响应的规律,研究发现,随着脉冲周期的增大, K_s 表现为先增后减的趋势,并且脉冲周期在结构第一阶自振周期附近区间时,应力反应脉冲影响系数值较大,说明此时脉冲周期对沉管隧道应力响应影响较大。

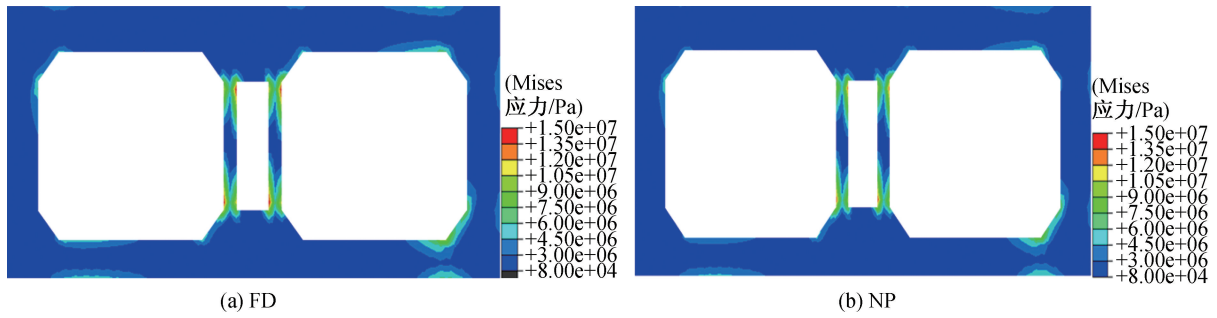


图 15 沉管隧道应力云图(NGA_182)

Fig. 15 Stress nephograms of immersed tube tunnel (NGA_182)

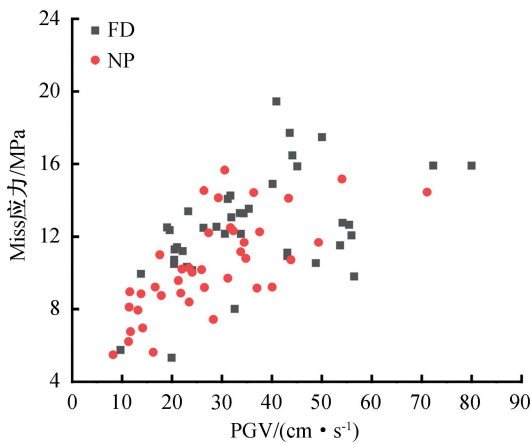


图 16 PGV 对沉管隧道应力影响

Fig. 16 Influence of PGV on stress of immersed tunnel

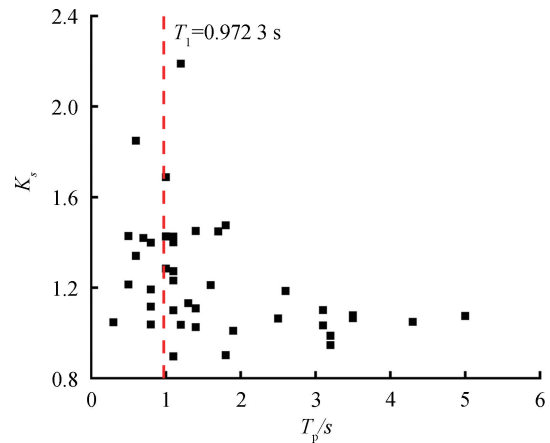


图 18 T_p 对沉管隧道应力响应影响

Fig. 18 Influence of T_p on stress response of immersed tunnel

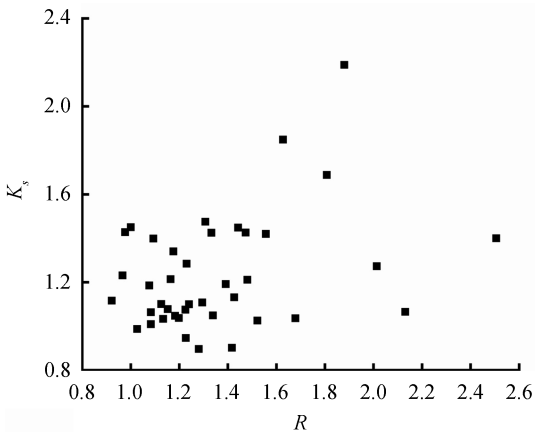


图 17 R 对沉管隧道应力响应影响

Fig. 17 Influence of R on stress response of immersed tunnel

4 结论

1) 随着地震动 PGV 的增大,FD、NP 地震动对沉管隧道的位移、加速度和应力响应都呈现出增长的趋势,并且 FD 地震动相对于 NP 地震动作用下对沉管隧道的响应要大,具体体现在:FD 地震动作用下产生的沉管隧道左墙相对水平位移、结构底部及顶部的加速度峰值、提取最大相对位移时刻的 Mises 应力都要更大。

2) 峰值速度影响系数 R 越大,说明 FD、NP 地震动的 PGV 相差越大。随着 R 的增大,沉管隧道各响应的脉冲影响系数也呈现增大趋势,表明地震动中存在方向性速度脉冲对结构响应的影响更大,因此在结构抗震中考虑地震动的速度脉冲效应很有必要。

3) 随着脉冲周期的增大,位移、加速度和应力响应的脉冲影响系数都表现为先增后减的趋势,并且脉冲周期在结构第一阶自振周期附近区间时,各响应脉冲影响系数数值都较大,表明此时 FD 地震动作用下相对于 NP 地震动对沉管隧道的破坏更大。

参考文献:

[1] 曾朗杰. 地震作用下沉管隧道反应数值分析[D]. 广州:华南理工大学,2015.
 [2] 袁勇,禹海涛,燕晓,等. 超长沉管隧道多点振动台试验模拟与分析[J]. 中国公路学报,2016,29(12):157-165.
 [3] 禹海涛,袁勇. 长大隧道地震响应分析与试验方法新进展[J]. 中国公路学报,2018(10):19-35.

- [4]程新俊,景立平,崔杰,等.不同场地沉管隧道振动台模型试验研究[J].西南交通大学学报,2017,52(6):1113-1120.
- [5]闫维明,谢志强,张向东,等.隔舱式颗粒阻尼器在沉管隧道中的减震控制试验研究[J].振动与冲击,2016,35(17):7-12+25.
- [6]张学明,闫维明,陈彦江,等.考虑行波效应的沉管隧道抗震性能:振动台阵试验研究[J].振动与冲击,2018,37(2):76-84.
- [7]陈贵红.沉管隧道抗震数值分析[D].成都:西南交通大学,2002.
- [8]程新俊.沉管隧道抗震性能试验研究与数值分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2018.
- [9]MIAO Y, YAO E, RUAN B, et al. Seismic Response of Shield Tunnel Subjected to Spatially Varying Earthquake Ground Motions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77(JUL.):216-226.
- [10]李帅,张凡,王景全,等.近断层地震动合成方法及其对超大跨斜拉桥地震响应影响[J].中国公路学报,2017,30(2):86-97+106.
- [11]张凡,李帅,王景全,等.近断层脉冲型地震动作用下大跨斜拉桥地震响应分析[J].振动与冲击,2017,36(21):163-172+184.
- [12]宋健,高广运,陈青生,等.近断层地震动作用下土质边坡动力响应研究[J].地震工程学报,2013,35(1):62-68+90.
- [13]朱育才.近断层脉冲型地震动作用下隧道抗减震研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [14]易谊.近断层脉冲型地震动下隧道动力响应规律研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [15]李昉阳.近断层地震动作用下地铁隧道动力响应分析[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [16]申彦利,杨庆山.近场脉冲型地震作用下结构响应预测研究[J].工程力学,2011,28(7):117-123.
- [17]张国强.城市地下车站结构减隔震措施研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [18]刘晶波,谭辉,王东洋,等.土-结构动力相互作用问题分析中地震动输入的一种新方法[J].地震工程学报,2019,41(1):1-8.
- [19]庄海洋.土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006.
- [20]楼梦麟,王文剑,朱彤,等.土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J].地震工程与工程振动,2000(4):30-36.
- [21]庄海洋,陈国兴,梁艳仙,等.土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J].岩土力学,2007(3):436-442.
- [22]陈国兴,庄海洋.基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J].岩土工程学报,2005(8):11-15.
- [23]赵丁凤,阮滨,陈国兴,等.基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J].岩土工程学报,2017,39(5):888-895.
- [24]STEWART J P, CHIOU S J, BRAY J D, et al. Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2002, 22(9):765-772.
- [25]BRAY J D, RODRIGUEZ-MAREK A. Characterization of Forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2004, 24(5):815-828.
- [26]常志旺.近场脉冲型地震动的量化识别及特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [27]BOORE D M. Orientation-Independent, Nongeometric-Mean Measures of Seismic Intensity from Two Horizontal Components of Motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(4):1830-1835.
- [28]秦秋实.近断层脉冲型地震动作用下基础隔震结构动力分析[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [29]钟紫蓝,赵密,杜修力,等.基于 IDA 方法的地铁车站结构抗震性能评价[J].北京工业大学学报,2021,47(7):680-690.
- [30]钟紫蓝,赵密,杜修力,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,2020,42(3):486-494.

(责任编辑 周雪梅)