文章编号:1009-6582(2019)01-0107-07

近场地震动作用下背后空洞圆形隧洞的 动力损伤特性试验研究

王建宁¹ 窦远明¹ 赵华杰¹ 魏 明² 田贵州¹ (1河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;2 南通大学交通学院,南通 226019)

摘 要 文章考虑近场地震动作用,对背后存在空洞的圆形隧洞进行了振动台模型试验,对比分析了地基场 域加速度反应、土一结构接触动土压力、隧洞结构加速度反应及其动应变规律,并基于损伤模型研究了近场地震动 作用对隧洞结构的动力损伤行为。研究结果表明(1)地震波加载过程中,圆形隧洞不同位置横截面处的加速度反应 存在少许差别,隧洞结构的存在会对两侧地基土峰值加速度产生影响,但频谱特性变化并不明显;2)当输入近场地 震动强度较小时,结构顶部空洞横截面的平均峰值加速度较小、平均动应变反应较大,而结构顶部密实状态横截面 的平均峰值加速度较大、平均动力变反应较小;3)若采用应变损伤模型衡量结构的破坏程度,在衬砌背后存在空洞 的横截面顶部±30°附近圆形隧洞损伤程度最大,这与已有的圆形隧洞震害现象吻合。

关键词 圆形隧洞 背后空洞 地震反应 振动台试验 动力损伤 中图分类号:U451;TU317 文献标识码:A

1 引 言

地下结构受周围土体向步运动,结构本身所受到的 惯性力和振动效应较小,因而其出现地震破坏的记录远不及地上结构普遍^[1,2]。但近年来的研究表明, 地下结构并没有人们想象的那样安全,其在地震往 复荷载作用下仍会发生十分严重的破坏,处于抗震 设防地区的地下建筑结构仍面临着地震破坏或倒塌 的威胁^[3,4]。针对地下隧道结构的抗震性能,一些学 者的研究结果表明:地震作用下衬砌背后密实的地 下隧道结构受力状态及抗震性能均表现良好;而一 旦地基中的隧洞衬砌背后存有空洞区域,结构的抗 震性能将远不及密实状态下的抗震性能,并且在该 横断面有可能会发生更为严重的地震破坏^[5,6]。目 前,震害调查是对结构最好的地震原位分析,但由于 地震发生的未知性,实际记录的地下结构地震数据 十分缺乏,进而数值模拟的结果也无法得到准确验 证。因此,土工离心机Ng振动台和地震模拟1g振 动台划揭示地下结构震害机理的相关研究起到了重 要作用^[7-11]。然而,关于衬砌背后空洞对隧道结构动 力响应影响的研究大多是利用理论推导或数值模拟 的方法进行分析^[12-14],专门对此问题所进行的振动 台试验鲜有报道。鉴于此,笔者针对衬砌背后存在 空洞的圆形隧洞开展了室内大型振动台模型试验, 本文是该系列模型试验的组成部分,分析了圆形隧 洞在近、中远场地震动作用下的场地加速度反应、土 一结构动土压力变化、隧洞结构加速度反应及结构 动应变规律,并基于已有的应变损伤模型简要分析 了近场地震动作用下隧洞结构不同观测面的动力损 伤规律。

2 试验概况

2.1 试验设备

修改稿返回日期:2018-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61503201);河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2018038).

作者简介:王建宁(1992-),男,博士,主要从事地下结构抗震与综合防灾减灾等方面的研究工作,E-mail:wangjianninghebut@163.com.

 \bigcirc

第56卷第1期(总第384期),2019年2月出版 107

Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019

现代隧道技术 MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

近场地震动作用下背后空洞圆形隧洞的动力损伤特性试验研究

本次试验采用单向水平激振电液伺服地震模拟 振动台进行加载,其台面尺寸为3.0 m×3.0 m,工作 频率范围为0.2~50 Hz,最大有效载重为10 t,最大加 速度为1.2 g,最大位移为±100 mm。采集系统为多 台32通道动态数据采集仪,其中加速度计、激光位 移计、动土压力计和应变片分类连接进行采集。考 虑振动台设备承载能力、台面尺寸及模型场域边界 效应等因素,本次试验采用的模型箱尺寸为长(*l*)× 宽(*b*)×高(*h*)=2.0 m×1/5 m×1.4 m。模型箱框架支撑 由热轧等边角钢焊接而成,激振方向采用斜向角钢 加肋,模型箱底和钢板边缘预留螺栓孔,位置与振动 台台面螺栓孔位置重合。

2.2 相似比设计

本次1g振动台模型试验中的隧洞结构模型尺 寸较小,因而采用重力失真模型,忽略重力的影响, 选取 C_l, C_p, C_E作为基本物理量,其它参数的相似比 由相似原理推导得出,如表1所示。

表1 振动台模型试验相似关系

Table 1 Similarity relations of the shaking table model test

类型	物理量	相似关系	相似比
几何	几何尺寸1	C_l	1/30
特征	衬砌厚度 h	$C_h = C_l$	1/30
	密度 _ρ	$C_{ ho}$	1
材料	弹性模量 E	C_E	1/30
特征	应力 σ	$C_{\sigma} = C_{\varepsilon} C_{E}$	1/30
	应变 <i>ε</i>	C_{ε}	1
	位移u	$C_u = C_l$	1/30
	速度v	$C_v = (C_E/C_\rho)^{1/2}$	1/5.477
动力	加速度a	$C_a = C_l^{-1} (C_E / C_\rho)$	1
特征	重力加速度g	$C_g = C_l^{-1} (C_E / C_\rho)$	1
	时间 t	$C_t = C_l (C_E/C_\rho)^{-1/2}$	1/5.477
	频率f	$C_f = C_l^{-1} (C_E / C_{\rho})^{1/2}$	5.477

隧洞结构模型采用水膏比为0.75的高强石膏粉、 重晶石粉及石英砂等混合材料制作,内嵌直径为0.5 mm、孔隙间距为10mm的铁丝网片,模型地基选用土 质相似材料填筑^[2,15]。隧洞结构模型如图1所示。

2.3 传感器布置

试验采集的数据包括控制系统输入加速度、振动台台面实际加速度、模型地基加速度、隧洞模型结构加速度及动应变、土一结构接触动土压力等。隧洞模型结构上从前至后共设置5个观测面,其中B-B(衬砌背后空洞)、D-D(衬砌背后密实)为主要观测面;空洞构造观测面B-B距端部约为362.5 mm,其

108 第56卷第1期(总第384期),2019年2月出版

Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019



图 1 隧洞结构模型 Fig.1 Model of the circular tunnel structure

高度为3.5 cm,沿隧洞结构纵向长度为8 cm,沿环向 圆心角范围约为30°,采用纯石膏及内衬钢丝网制 作。模型地基及模型结构各观测面及相应传感器布 置详见文献[16]。

2.4 加载工况

考虑近场地震动影响的试验中选取加载波形分 别为LWD波及Taft波。LWD波为1994年1月17日 美国加州Northridge地震中Lake Wood Del Amo台站 记录的南北向地震波,又称北岭地震波,时间间隔为 0.02 s,记录时间为35 s,震级M=6.9,水平向加速度 峰值为129 cm/s²,属于近场地震动。Taft波为1952 年7月21日美国Kern County林肯学校No.1095地震 台的地震记录,震级M=7.4,时间间隔为0.02 s,记录 时间为54 s,最大加速度为175.71 cm/s²,震中距为 41.45 km、属于中远场地震动。加载地震波的加速 度时德曲线及傅氏谱如图2所示。





试验采用多波形混合加载和逐级加载方式进 行,在不同阶段用小振幅白噪声(0.05g)进行扫描, 观察模型体系动力特性变化,加载方案及工况编号 见表2。

表2 加载工况 Table 2 Loading conditions

序号	输入波类型	工况代号	加速度峰值/g					
1	White Noise	W-1	0.05					
2	LWD wave	LWD-1	0.10					
3	Taft wave	Taft-1	0.10					
4	White Noise	W-2	0.05					
5	LWD wave	LWD-2	0.20					
6	Taft wave	Taft-2	0.20					
7	White Noise	W-3	0.05					
8	LWD wave	LWD-3	0.30					
9	Taft wave	Taft-3 0.30						
10	White Noise	W-4	X.					
试验结果分析 地基场域加速度反应 打风代书》								

试验结果分析 3

3.1 地基场域加速度反应

为监测模型地基不同位置处的加速度反应,试 验分析了各监测点处的加速度传感器记录。

图3给出了输入近、中远场地震动时竖直方向 不同深度测点A2~A11的峰值加速度。总体上看,土 体的峰值加速度与台面输入地震动强度呈正相关, 但其放大系数却在不断减小,其原因应为土体的强 非线性所致。模型地基中的峰值加速度反应由下至 上呈先增大、后减小、最后逐渐增大的规律,地表处 的加速度放大系数最大;场地沿深度方向的峰值抓 速度曲线在隧洞埋深附近发生弯曲,隧洞结构的存 在对周围场地土的加速度反应产生了影响,令结构 下部土体峰值加速度大于上部土体,且近场地震动 的激振效果明显大于中远场地震波的作用。



图3 模型地基峰值加速度反应



图4为输入LWD波0.2g时的地表中心测点A1 的加速度时程曲线及其傅氏谱,与台面输入波的频 谱特性相比,地表处0~3 Hz之间的频率成分减少, 而4~9 Hz之间的频率成分明显增多,且主要集中在 5Hz附近,场地土将地震波中的低频成分过滤掉,放 大了5Hz附近的波形组成。



图4 地表测点A1加速度时程曲线及傅氏谱 Fig.4 Time-history curves of the acceleration and Fourier spectra of test point A1 on ground surface

3.2 土—结构动土压力

3.3 隧洞结构加速度反应

如图5所示,结构拱腰处土压力计测点P5和P6 对应观测面不同,当输入不同峰值加速度的LWD波 及Taft波时,土一结构接触动土压力总体变化不大, 总的趋势是随台面输入峰值加速度的提高而增大, 衬砌背后是否密实并未影响土—结构侧面接触动土 压力峰值。



图6给出了输入LWD波及Taft波时沿结构高度 方向测点的峰值加速度变化曲线。由图6可知,结 构不同高度对应的峰值加速度不同,在近场地震动 作用时结构由下至上的峰值加速度逐渐变大,且这 种趋势随着台面输入地震动的增大越发明显,而在 中远场地震动作用时则上下部分的峰值加速度差别

> 第56卷第1期(总第384期), 2019年2月出版 109 Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019

现代隧道技术 MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

近场地震动作用下背后空洞圆形隧洞的动力损伤特性试验研究



图6 模型结构峰值加速度反应

Fig.6 Peak acceleration response of the model structure

十分微小。在近场小地震动作用下,隧洞结构两主 观测面上拱顶处的峰值加速度比仰拱处略大,输入 台面峰值为0.1g、0.2g、0.3g时的B-B观测面拱顶 峰值加速度比仰拱分别增长了9.69%、8.91% 15.66%;D-D观测面对应的增长百分比为11.73% 4.14%、17.78%,均是在0.2g时差距最小且呈现出 了增长率提高趋势;背后设置空洞的横截面地震反 应始终比背后密实的大,且两截面的峰值加速度在 拱腰处区别最大,分别为6.58%、6.74%、4.33%,说 明衬砌背后存在空洞在近场小地震动作用下会放大 截面的地震加速度响应,对结构不利。在中远场小 地震动作用下,衬砌背后存在空洞的横截面地震反 应比背后密实的小,且只有在0.3g时空洞截面峰值 加速度比密实截面大,衬砌背后空洞的存在反而缩 小了截面地震加速度反应:同时,隧洞结构沿高度方 向峰值加速度差别微小,但两观测面间的区别仍然 明显,输入台面峰值为0.1g、0.2g、0.3g时的B-B观 测面与D-D观测面拱顶峰值加速度差值比分别为 3.50% 5.12% 2.75% .

3.4 模型结构动应变反应

3.4.1 结构最大动应变分析

主观测面上的应变幅值在拱顶与拱腰之间、拱 腰与拱底之间数值较大,在仰拱、拱腰和拱顶处的应 变幅值较小。表3给出了试验0.1g~0.3g时两主观 测面上不同测点的应变观测数据,其中对称布置的 测点只列取一半。由表3可知,当输入地震波类型 相同时,隧洞横截面环向应变幅值与台面输入地震 动峰值强度呈正相关,近场地震动作用时的应变增 长幅度要比中远场地震动作用时更为明显;仰拱处 的应变幅值较两侧偏小,拱腰处的应变幅值较两侧 也偏小,若以拱顶为0°圆心角,则应变幅值在逆时

110 第56卷第1期(总第384期), 2019年2月出版

Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019

表3 隧洞模型动应变幅值

测点位置		0.1	l g	0.2	2 g	0.3	3 g
		LWD	Taft	LWD	Taft	LWD	Taft
В-В	<i>S</i> 14	119.2	143.4	131.2	149.5	167.8	167.8
	<i>S</i> 13	112.9	119.1	119.3	137.3	167.8	167.8
	<i>S</i> 11	137.3	142.9	143.4	161.7	180.4	181.7
	<i>S</i> 10	106.8	112.7	112.9	125.1	131.2	137.3
D-D	<i>S</i> 29	125.1	173.8	149.5	198.3	216.6	210.5
	S28	178.6	198.3	186.1	222.7	243.6	241.1
	<i>S</i> 26	161.7	186.1	180	198.3	234.9	228.5
	<i>S</i> 25	167.8	180.4	173.9	198.3	228.8	222.7

Table 3 Amplitudes of dynamic strains of the tunnel model

针方向上0°~30°间逐渐增大,在30°~90°间逐渐减 小,90°~120°时幅值增大,而120°~180°时逐渐减小, 应要幅值极大值出现在30°与120°圆心角的上拱肩 和下拱脚处;两种加载波形在小地震动作用下,衬砌 背后设置空洞的截面环向应变幅值普遍要比背后密 实的截面小,并且结构环向应变幅值在近场小地震 动作用下较小,而在中远场地震动作用下的应变响 应更大,当加载到0.3g时二者动应变幅值相近;衬 砌背后空洞的存在缩小了结构的环向动应变反应, LWD 波作用下密实截面的平均应变在加载0.1g、 0.2g、0.3g时分别比有空洞的横截面大32.97%、 36.05%、42.75%,Tati 波作用时密实截面的平均应 变在加载0.1g、0.2g、0.3g时分别比空洞截面大 42.56%、42.54%、37.92%,近场地震动的差值在增 大,而在中远场地震动的差值没有太大变化。

3.4.2 结构动力损伤分析

隧洞结构在地震动作用下产生了瞬间的拉伸与 压缩变形,这种变形并不属于单一方向的应力变化, 而是在空间应力作用下产生的空间应变效应。模型

$$SD = \frac{ES}{RS}$$
 (1)

式中:SD为应变损伤度指标;RS为基准应变,取值 为模型材料弹性极限应变;ES为等效应变,采用拉 伸应变和压缩应变的线性叠加,即:

地震动损伤程度,并定义应变损伤度为等效应变与

基准应变之比,即四:

$$ES = \alpha \cdot S_{t} + (1 - \alpha) \cdot S_{c}$$
 (2)

式中: α 为小于1的比例因子, 针对不同材料取值不同, 考虑石膏与铁丝网的共同作用, α 取 0.7; S, 为拉伸应变; S, 为压缩应变。

表4给出了模型隧洞两主观测面的应变损伤度 指标计算值。由表4可知:在0.1g~0.3g地震动作 用下隧洞结构损伤逐渐增加,且在拱肩与拱脚处的 损伤最大,是结构的薄弱部位;输入小振幅近、中远

表4 隧洞模型动应变损伤度指标

Table 4 Dynamic strain damage indexes of the tunnel model

测点位置		0.1 g		0.2 g		0.3 g	
		LWD	Taft	LWD	Taft	LWD	Taft
В-В	<i>S</i> 3	0.26	0.28	0.28	0.29	0.27	0.29
	<i>S</i> 14	0.28	0.33	0.31	0.35	0.39	0.39
	<i>S</i> 13	0.26	0.28	0.28	0.32	0.39	0.39
	<i>S</i> 12	0.25	0.29	0.25	0.29	0.25	0.29
	<i>S</i> 11	0.32	0.33	0.33	0.38	0.42	0.42
	<i>S</i> 10	0.25	0.26	0.26	0.29	0.31	0.32
	<i>S</i> 9	0.26	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29
D-D	<i>S</i> 18	0.29	0.31	0.31	0.36	0.37	0.38
	<i>S</i> 29	0.29	0.41	0.35	0.46	0.51	0.49
	<i>S</i> 28	0.42	0.46	0.43	0.52	0.57	0.56
	S27	0.32	0.33	0.33	0.36	0.38	0.38
	<i>S</i> 26	0.38	0.43	0.42	0.46	0.55	0.53
	S25	0.39	0.42	0.41	0.46	0.53	0.52
	<i>S</i> 24	0.29	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32

场地震动作用时的结构动力损伤存在差异,Taft波 的结构动力反应较LWD波略大,说明隧洞结构损伤 在中远场小地震动作用时更为明显,近场小地震动 的作用次之,在0.3g时二者结构动力损伤反应基本 一致;衬砌背后密实的截面损伤明显比背后存在空 洞伤最大,是结构的薄弱部位;输入小振幅近、中远

现代隧道技术

MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

洞伤最大,是结构的薄弱部位;输入小振幅近、中远 场地震动作用时的结构动力损伤存在差异,Taft 波 的结构动力反应较LWD波略大,说明隧洞结构损伤 在中远场小地震动作用时更为明显,近场小地震动 的作用次之,在0.3g时二者结构动力损伤反应基本 一致;衬砌背后密实的截面损伤明显比背后存在空 洞的截面大,且在近场小地震动0.1g~0.3g作用下 的截面平均损伤值分别增大26.33%、28.66%、 39.11%,而在中远场小地震动作用下的平均损伤值 增幅分别为29.91%、34.27%、32.61%,近场地震动 的差值在增大,而在中远场地震动的差值没有太大 变化。

4 结 语

考虑近、中远场地震动作用,对衬砌背后存在空 洞的圆形隧洞进行了振动台模型试验,对比分析了 地基场域加速度反应、土一结构接触动土压力、模型 结构加速度反应,隧洞结构动应变反应及其动力损 伤规律,得出以下结论:

(1)在近场小地震动作用下,衬砌背后空洞会 放大断面的加速度响应,而在中远场小地震动作用 下会缩小断面的加速度反应;

(2)在近场小地震动作用下隧洞结构环向应变 幅值随加载峰值加速度的提高而增大,且增幅速度 较中远场地震波更大,二者差值在台面输入峰值加 速度逐渐增大的过程中逐渐缩小,当输入台面地震 波为0.3g时大致相近;

(3)当输入地震波类型相同时,隧洞横截面环 向应变幅值与台面输入地震动峰值强度呈正相关, 近场地震动作用时的应变增长幅度要比中远场地震 动作用时更为明显,在衬砌背后存在空洞的横截面 顶部±30°的圆形隧洞上拱肩附近损伤程度最大。



参考文献 References

- HUO H, BOBET A, FEMANDEZ 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, ASCE, 2005, 131 (12): 1522–1533.
- [2] 王建宁, 窦远明, 田贵州, 等. 圆形隧道衬砌背后空洞对隧道结构影响的振动台模型试验[J]. 工业建筑, 2017, 47 (3): 118-124+147.

()

第56卷第1期(总第384期),2019年2月出版

111

Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019

现代隧道技术 MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY

WANG Jianning, DOU Yuanming, TIAN Guizhou, et al. Shaking Table Mode Test Study of the Effect on Tunnel Structure Existing Void behind Lining of Circular Tunnel[J]. Industrial Construction, 2017, 47 (3): 118–124+147.

[3] 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+69.

DU Xiuli, MA Chao, LU Dechun, 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+69.

- [4] 欧阳志勇,崔杰,李亚东,等. 液化土层中不同刚度隧道结构的振动台试验研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (4): 97-105+131. OUYANG Zhiyong, CUI Jie, LI Yadong, et al. Shaking Table Test for a Tunnel Structure with Different Stiffnessces in a Layer of Soil Liquefaction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (4): 97-105+131.
- [5] 朱正国, 耿亚帅, 武杰, 等: 地震作用下隧道衬砌背后空洞影响机制研究[J]. 铁道工程学报, 2015, (9): 79-84. ZHU Zhengguo, GENG Vashuai, WU Jie, et al. Research on the Effect Mechanism of Cavity behind Tunnel Lining under the Earthquake Action[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, (9): 79-84.
- [6] 聂子云, 张春语, 李凤翔. 衬砌背后空洞对隧道抗震性能影响分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37 (1): 138-143. NIE Ziyun, ZHANG Chunlei, LI Fengxiang. Effect of Void behind Lining on Seismic Performance of Tunnel[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37 (1): 138-143.
- [7] 权登州, 王毅红, 叶丹, 等. 黄土地区地铁车站振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49 (11): 79-90.
 QUAN Dengzhou, WANG Yihong, YE Dan, et al. Shaking Table Test Study on Subway Station Built in Loess Area[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (11): 79-90.
- [8] MASOUD R M, MOHAMMAD H B. Seismic Ground Motion Amplification Pattern Induced by a Subway Tunnel: Shaking Table Testing and Numerical Simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83: 81–97.
- [9] CHEN Z Y, SHEN H. Dynamic Centrifuge Tests on Kotation Mechanism of Tunnels Subjected to Seismic Shaking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 67–77.
- [10] CHEN G X, CHEN S, ZUO X, et al. Shaking Table Tests and Numerical Simulations on a Subway Structure in a Soft Soil[J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2015, 76: 13–28.
- [11] 安军海, 陶连金, 王焕杰, 等. 可液化场地下盾构扩挖地铁车站结构地震破坏机制振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (8): 2018-2030.

AN Junhai, TAO Lianjin, WANG Huanjie, et al. A Shaking Table-based Experimental Study of Seismic Response of a Shield-enlarge-dig Type Subway Station Structure in Liquefiable Ground[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (8): 2018–2030.

- [12] 邓 涛,章仕灵,姚金梅,等.考虑地震作用的山岭隧道空洞加固方案优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (3): 640-645. DENG Tao, ZHANG Shiling, YAO Jinmei, et al. Research on Optimized Tunnel Cavity Reinforcement Scheme Considering the Earthquake Action[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (3): 640-645.
- [13] 应国刚, 张顶立, 陈立平, 等. 荷载结构模型在拱顶空洞存在情况下的修正[J]. 土木工程学报, 2015, 48 (增1): 181-185. YING Guogang, ZHANG Dingli, CHEN Liping, et al. Amendment of Load-structure Model with Voids behind Tunnel Lining at Vault[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (S1): 181-185.
- [14] 刘敦文,杨光,彭怀德.爆破作用下拱顶衬砌脱空对隧道结构安全的影响分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2013, 44 (10): 4214-4220.

LIU Dunwen, YANG Guang, PENG Huaide. Analysis for Impact of Structural Safety of Tunnel Induced by Cavity on Vault of Lining under Blasting[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44 (10): 4214–4220.

[15] 窦远明, 王建宁, 田贵州, 等. 软弱土质相似材料配比的正交试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37 (4): 65-71.

DOU Yuanming, WANG Jianning, TIAN Guizhou, et al. Orthogonal Test Study on the Ratio of Soft Soft Similar Materials[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37 (4): 65–71.

[16] 王建宁, 窦远明, 魏明, 等. 土-隧道结构动力相互作用振动台模型试验中传感器位置的优选[J]. 长江科学院院报, 2018.

WANG Jianning, DOU Yuanming, WEI Ming, et al. Optimization of Sensor Positions in a Shaking Table Test for Soil-tunnel Structure Interactions[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018.

[17] 陈国兴, 左熹, 王志华, 等. 近远场地震作用下液化地基上地铁车站结构动力损伤特性的振动台试验[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (12): 120-126.

 (\bullet)

CHEN Guoxing, ZUO Xi, WANG Zhihua, et al. Large Scale Shaking Table Test Study of the Dynamic Damage Behavior of Subway Station Structures in Liquefiable Foundation under Near-fault and Far-field Ground Motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (12): 120–126.

112 第56卷第1期(总第384期), 2019年2月出版

Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019

Shaking Table Test on Dynamic Damage Behaviors of a Circular Tunnel with Voids behind the Lining Subjected to Near-field Ground Motions

WANG Jianning¹ DOU Yuanming¹ ZHAO Huajie¹ WEI Ming² TIAN Guizhou¹

(1 School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology , Tianjin 300401; 2 School of Transportation,

Nantong University, Nantong 226019)

Abstract Considering the effect of near-field ground motion, a shaking table model test was conducted to the circular tunnel with voids behind the lining. A comparative analysis was taken with aspects of acceleration response of foundation field domain, dynamic earth pressure of soil-structure contact surface, acceleration response of tunnel structure and dynamic strain rules. Meanwhile, the effect of near field ground motion on dynamic damage behaviors of the tunnel structure was studied based on a damage model. The results show that: 1) there is slight difference in the acceleration response at the different cross sections of the circular tunnel in the process of seismic wave loading, and tunnel structure affects the peak acceleration of subsoil at two sides while the changes of spectrum characteristics are not obvious; 2) when the intensity of input near-field ground motion is small, the average peak acceleration at the cross section with top voids is also small but the average dynamic strain response is large while the average peak acceleration at the cross section with dense top is large but the average dynamic strain response is small; 3) the damage is most serious at the scope of $\pm 30^\circ$ of the top of the cross section with voids behind the lining, which agrees with the seismic damage of existing circular tunnel.

Keywords Circular tunnel; Voids behind lining; Seismic response; Shaking table test; Dynamic damage

(上接第98页)

Analysis of the Stability of River-crossing Ripelines against Uplift Based on the Strength Reduction Method

ZHU Qinghua¹ HUANG Jianfeng² HE Yong³ SHAO Yong³

(1 Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resource Co, Ltd, Yangzhou 225000; 2 Hohai University, Nanjing 211100; 3 Jiangsu Water Conservancy Department, Nanjing 210093)

Abstract Traditional finite element method has been successfully applied in the analysis of the capability against uplift of pipelines, but it didn't give the safety factors of the anti-uplift stability relating to the burded depth of pipelines. An ABAQUS model of anti-uplift of pipelines was established by using strength reduction method to take a two-dimensional numerical simulation of the behaviors of river-crossing pipelines under the effect of buoyancy, to observe the development process of plastic zone of soils and to determine the safety factor of anti-uplift stability. The results show that the factors of anti-uplift capability increase linearly as the function of the buried depth and the slope is governed by the friction angle of soil mass; equivalent values of and used in gravity analysis method, which may be taken as the applicable conditions in practical application cases, are obtained by comparing with the traditional gravity analysis method.

Keywords Pipeline; Anti-uplift; Safety factor; Gravity analysis method; Strength reduction method; ABAQUS

۲

第56卷第1期(总第384期), 2019年2月出版 113 Vol.56, No.1(Total No.384), Feb.2019