

文章编号: 1000-7598(2012)10-2929-08

软岩下桥隧相连段车辆冲击效应模型试验研究

孙广臣^{1,2}, 傅鹤林¹, 巢万里³

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 长沙 410007;
3. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘 要: 为研究软弱围岩(IV、V级)条件下桥、隧相连段在后期运营中车辆荷载及其冲击作用下的力学行为、作用效应等, 依托相关工程实例开展了系统的室内模型试验研究。结合桥、隧相连工程的实际特点, 依据相似理论, 给出了模型试验中桥、隧结构及洞周岩土体各物理量间的相似关系, 对模型试验方法进行了系统的分析和阐述。通过模型试验研究表明, IV、V级围岩条件下的桥、隧相连段中, 运营中的汽车荷载及其冲击作用, 易使桥梁、隧道衬砌关键部位产生不利力学效应或结构损伤, 使桥梁跨中、搭接端及洞底产生过大位移或沉降, 并易使隧道洞口围岩稳定性降低等。因此, 对桥隧相连段的桥、隧及洞口围岩各关键部位宜采取局部加强措施, 以避免各种损伤或病害的发生。

关 键 词: 软弱围岩; 桥隧相连段; 室内模型试验; 试验方法; 车辆冲击; 力学行为; 作用效应

中图分类号: TU 317⁺.1; U 448.14; U 459.2

文献标识码: A

Study of model test of vehicle impact effects on bridge and tunnel connected project in weak surrounding rock

SUN Guang-chen^{1,2}, FU He-lin¹, CHAO Wan-li³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, China;
3. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical and deformation characteristics or action effects caused by vehicles and impacts on important parts of bridge or tunnel connecting sections under weak surrounding rocks especially grade IV or V surrounding rocks, systematical indoor model tests have been carried out. The relationship among physical quantities and the similarity indexes have been worked out under the dimensional analysis method of the similarity theorem considering the characteristics of bridge and tunnel connecting projects. The model test methods such as test contents, working conditions, test equipments and instruments etc., have been systematically analyzed and elaborated. Through analyzing the test phenomena and results, some conclusions are drawn as follows: the vehicle loads with impact actions during post operation stage cause harmful mechanical effects or structure damages on some key parts of bridge or tunnel, such as oversize displacement on bridge mid-span and lap joint tip or oversize settlement of tunnel bottom, or lower stability of surrounding rocks nearby tunnel entrance etc. Consequently, for bridge and tunnel connecting projects under IV or V surrounding rocks, some key parts of bridge, tunnel lining and surrounding rocks nearby the entrance should be strengthened in order to avoid damages or diseases.

Key words: weak surrounding rocks; bridge and tunnel connected section; indoor model tests; test methods; vehicle impact; mechanical behaviors; action effects

1 引 言

由于近年来公路建设事业的快速发展, 我国西部出现了大量的山区高速公路, 导致桥、隧相连^[1]现象尤为普遍。桥隧相连工程是桥梁与隧道的距离

足够小以致两者之间存在相互影响的一类工程, 是桥梁、隧道结构及围岩、洞口边仰坡岩土体及其防护工程的复杂组合体。工程实际中根据其连接形式的不同, 将其分为桥隧搭接和桥隧邻接工程两大类。然而, 目前国内外对桥、隧相连工程这一特殊工程

收稿日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(No. 50878213); 贵州省重大科技专项项目(No. 2008015); 湖南省交通建设计划项目(No. 200928)。

第一作者简介: 孙广臣, 男, 1981年生, 博士研究生, 主要从事桥隧相连工程结构分析与研究工作。E-mail: sailor811022@yahoo.com.cn

实体的研究^[1-4]却存在以下几点问题:

(1) 国内外鲜有对桥、隧相连工程中桥、隧、岩三者相互作用的力学行为特征和损伤机制的系统理论研究。独立的隧道计算理论或方法、仰边坡防护工程的计算分析及隧道的设计和施工, 均很少考虑桥梁及基础的干扰或不利影响^[2-4]。

(2) 国内外对路桥、路涵相连处出现的跳车等问题, 已开展了大量研究^[2-4], 而对于桥隧相连工程中, 由于运营中的车辆荷载及其冲击作用可能引起的结构的损伤、疲劳效应及机制、洞口岩土体的工程病害及控制等问题缺乏研究。

(3) 目前, 关于斜坡与桥梁相互影响的分析较多^[5], 而对桥台、桥头斜坡与隧道洞口段相互影响的研究则很少。

(4) 另外, 近年来我国各地公路的车辆超载现象日益突出。长期的车辆荷载及其冲击作用对软弱围岩(尤其是IV、V级围岩)条件下的桥隧相连段各部位将会产生何种程度的不利影响, 也已引起越来越多工程人员与学者的关注。

为此, 作者结合相关工程实例^[1,6]并依据相似理论和模型试验^[7-11]的方法, 以形式简单的单跨简支梁桥与单孔两车道隧道相连的形式为蓝本, 开展软岩下桥隧相连段车辆冲击效应模型试验研究。

2 软岩中桥隧相连的特点

据不完全统计, 既有许多软岩条件下的桥、隧相连工程中多存在如下所述问题^[3,6]: ①桥梁墩台、隧洞内路面和洞口附近围岩的存在差异沉降现象, 引起桥面和伸缩装置的破裂或损坏, 造成许多地方坑坑洼洼以致跳车严重, 不但影响车辆行使的舒适和安全, 有时甚至危及桥、隧等结构的稳定与安全; ②由于车辆由桥梁驶入隧道内或由隧上桥时光线明暗变化明显, 司机一般难以适应, 致使桥隧相连段多次发生交通事故; ③受长期的汽车荷载及其冲击的反复加、卸载等循环或突变动荷载的影响以及地质情况的变化, 隧道洞口段衬砌易产生裂缝或破损并易使洞内出现渗漏水现象, 或使洞口段排水设施损坏以致排水不畅, 以致有时引起隧道内、桥面上排水困难或长期积水等现象; ④隧道洞口边、仰坡在长期雨水冲刷和过往车辆振动影响下或在其保护植被破坏时, 易崩落碎石、泥沙等, 有时常冲入桥面或隧道内路面, 严重影响车辆的通行安全等。

而实际上, 桥、隧相连工程中桥、隧、岩之间由于存在明显的相互影响, 其中某些关键部位(如

相连处的桥梁上部结构、墩台及基础、桥面伸缩装置、隧道洞门及洞口段衬砌各部位、桥面、隧道内路面以及洞口附近围岩及其防护结构等)在经受长期汽车荷载及其冲击作用的反复加、卸载等循环动荷载作用的影响后, 其力学行为、病害机制将是互相关联且复杂多变的, 因而易产生各种损伤或病害。

对于上述问题, 若在设计、施工时未充分考虑或不及时处理(养护、维修或加固时), 则极可能导致二次损伤或病害, 不但影响桥隧相连段的行车安全, 严重时还将危及桥梁、隧道等结构物的安全。

3 模型试验方法

3.1 相似分析

3.1.1 相似条件

模型试验的几何相似比取 $C_L = 1/50$, 各主要物理量^[7]的相似关系及相似常数如表 1 所示。

表 1 模型试验中的相似关系及相似常数
Table 1 Similarity relation and constants in model test

物理量	相似关系	相似比	物理量	相似关系	相似比
几何尺寸	C_L	1/50	应变	C_ε	1
位移	$C_\delta = C_L$	1/50	密度	C_ρ	1
集中荷载	$C_F = C_E C_L^2$	1/2 500 (1/125 000)	弹性模量	$C_E = C_\rho C_L$	1(1/50)
泊松比	C_μ	1	围岩压力	C_q	1/50

注: 括号外数据为桥、隧模型相似比, 括号内数据为围岩相似比。

3.1.2 模型尺寸及围岩材料制备

(1) 桥梁模型

模型桥以实际工程中 30、40、50 m 简支 T 梁桥为原型^[12]。桥梁模型尺寸, 见表 2。

表 2 桥梁模型尺寸表
Table 2 Model dimension of bridge

类型	桥梁跨度 / m	梁高 / m
模型 1	0.6	0.044
模型 2	0.8	0.050
模型 3	1.0	0.056

试验中, 模型桥梁板、桥台及桩基础分别采用 C50 或 C30 钢筋微混凝土材料制作, 如图 1 所示。

(2) 隧道衬砌模型

软岩条件下桥隧相连中, 隧道洞口衬砌常采用钢筋混凝土结构^[1,3]且一般均予以加厚, 因此, 试验中将原型衬砌近似简化为 2 cm 厚内配直径为 0.5 mm 钢丝网的 C30 微钢筋混凝土衬砌模型。隧道断面及其模型^[13], 如图 2 所示。

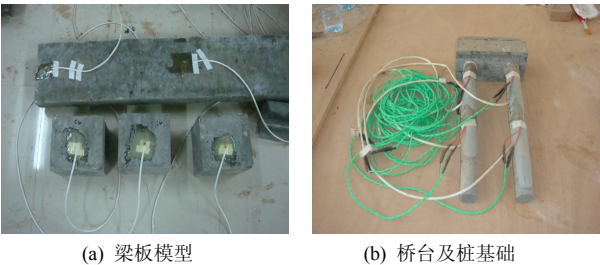


图 1 桥梁模型图
Fig.1 Model of bridge with its foundation

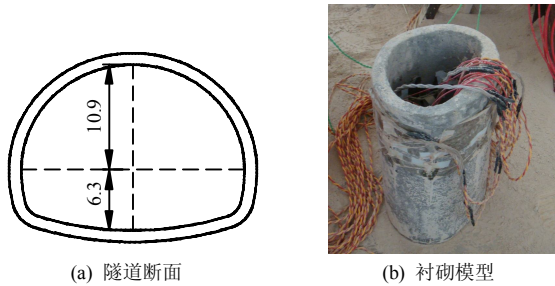


图 2 隧道衬砌模型图 (单位: cm)
Fig.2 Model of tunnel lining (unit: cm)

(3) 围岩材料的模拟

试验中的围岩^[13]模拟材料用复合材料配制^[11],其原材料为重晶石粉、石英砂和锂基润滑油,配合比(重量比)为 10: 5: 1,材料参数见表 3。

表 3 围岩材料物理力学参数
Table 3 Mechanical parameters of surrounding rocks

围岩 级别	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	重度 γ / (kN/m ³)
IV 级	0.091	0.31	35	32	20.3
V 级	0.054	0.38	30	26	18.4

3.2 模型试验平台简介

3.2.1 试验平台组成

试验平台由隧道洞口段围岩模型箱、桥梁模型和试验测试平台组成。其中,围岩模型箱由高强度木模板及槽钢支架做成,见图 3。为便于试验过程中观察,中间 100 cm×70 cm 部分采用有机玻璃模板。隧道模型位于模型箱中心部位。另外,围岩中埋设土压力盒,沿衬砌外侧 1/2 倍、1 倍隧道宽度布置 2 层。试验中,桥梁、隧道的相互位置关系,见图 4。

3.2.2 仪器设备

模型试验中的主要仪器设备,如表 4 所示。

3.3 试验工况组合

为分析主要影响因素和简化分析,试验工况组合情况(原型尺寸)如表 5 所示。

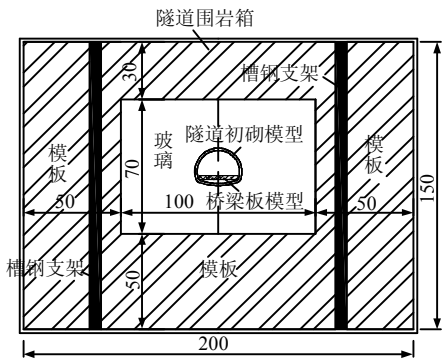
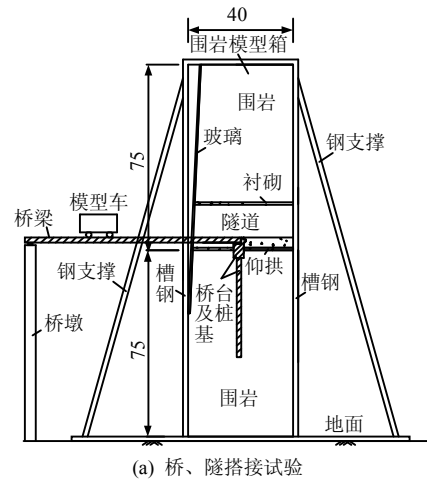
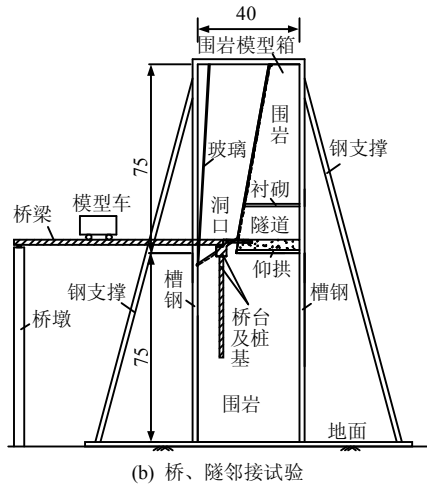


图 3 隧道围岩模型箱示意图 (单位: cm)
Fig.3 Surrounding rock box (unit: cm)



(a) 桥、隧搭接试验



(b) 桥、隧邻接试验

图 4 模型试验平台示意图 (单位: cm)
Fig.4 Model test devices and platform (unit: cm)

表 4 仪器、设备汇总
Table 4 Summary of equipments and instruments

仪器、设备名称	数量
DH-3818 静态应变仪	3 台
JMZX-7000 型土压力盒数据采集仪	1 台
振弦式土压力盒	10 只
测缝计	1 只
微型计算机	1 台
数码照相机	1 部

表 5 模型试验工况
Table 5 Working conditions

工况序号	桥梁跨度 / m	梁端基础	围岩等级	搭(邻)接长度 / m
1	40	加厚仰拱	IV	5
2	40	桩基础	IV	5
3	40	桩基础	IV	10
4	50	桩基础	IV	10
5	30	桩基础	IV	10
6	40	桩基础	V	10
7	40	桩基础	IV	5
8	40	桩基础	IV	10
9	40	桩基础	V	5
10	40	桩基础	V	10
11	50	桩基础	V	5
12	30	桩基础	V	5

注：工况 1-6 为桥隧搭接，工况 7-12 为桥隧邻接。

3.4 测试方法

3.4.1 加载及测试系统的选择

为模拟桥、隧相连段隧道洞口段围岩在天然状态下对桥梁和隧道的作用，本试验中围岩上部不再额外加载，即试验的外部加载荷载相对较小，为非破坏性试验。因而其加载方式与一般模型试验常用千斤顶等设备^[7]加载不同。因此，基于以上原因并根据本次模型试验的特点，试验采用更为方便和灵活的重物堆载和人工激励加载的方式，模拟隧道开挖、桥隧相连施工、汽车荷载及冲击作用。

另外，对比既有类似试验测试方法^[7]，针对常规动载激励与测试方法（例如，采用小型激振器实现激励作用，而试验结果或数据经由拾振器或加速度传感器等采用动态电阻应变仪或示波器采集等）满足不了模型试验中模拟汽车荷载及其冲击作用的大小、作用方式、作用次数和作用位置多变要求的情况，本着仪器操作简单、试验结果可靠和易于读取的原则，本试验采用静态应变仪分批次整体提取桥梁和隧道衬砌模型各关键部位的瞬时应变值而其他部位的位移（如桥梁跨中、洞底沉降等）采用百分表量测的办法进行测试。

3.4.2 模型桥自重和汽车荷载的模拟

试验中模型桥需额外配重，以满足模型试验要求^[7-8]。于是，参照桥梁原型按相似比换算并减去模型桥自重后得出各模型桥的配重，用重物悬挂法均匀地施加到模型桥上。

对于汽车荷载及冲击作用的模拟，因工程实际中桥、隧相连段的汽车荷载及其冲击的作用形式及组合情况非常复杂，为简化分析、方便操作及探讨主要规律，试验中用重物堆载和人工激励的方法模

拟。其中，汽车荷载分 3 种等级：公路 I 级、超载工况 1、超载工况 2；其原型车辆重分别为 55、80、110 t（分别表示为 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 ）。

试验中各模型车重量及竖向、水平冲击荷载值（质量），如表 6 所示。

表 6 模型车自重及其冲击的等效重量
Table 6 Equivalent weights of vehicle model and impact

模型车重量 / kg	竖向冲击 / kg			水平冲击 / kg
	10% Q_i	20% Q_i	30% Q_i	10% Q_i
模型车 Q_1	22	2.2	4.4	6.6
模型车 Q_2	32	3.2	6.4	9.6
模型车 Q_3	44	4.4	8.8	13.2

此外，对汽车冲击作用做出如下假定或规定：假设同种汽车荷载以引起竖向冲击作用为主，水平冲击的次数较少，并取每种汽车荷载的竖向冲击随荷载增大（10% Q_i ~30% Q_i ， Q_i 为模型车重）的冲击次数分别为 50、30 和 20 次，水平冲击荷载值为 10% Q_i 且冲击次数均为 20 次。

4 隧道部分的试验结果及分析

以下主要对桥隧搭接模型试验中隧道部分的试验结果作分析和讨论。

4.1 隧道拱顶围岩压力

试验中，隧道拱顶处围岩土压力变化见图 5。

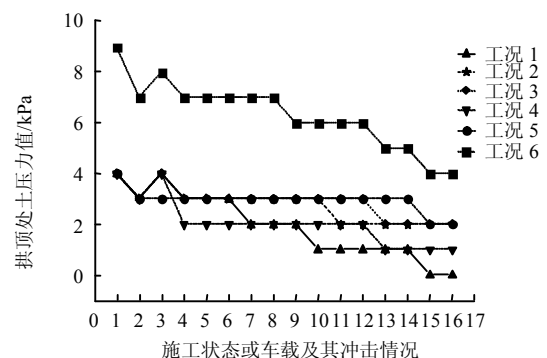


图 5 拱顶处土压力值变化

Fig.5 Changes of soil pressure of the vault of tunnel

图 5 中，各横坐标（数字 1~16）表示的施工状态或模拟车辆荷载及其冲击情况分别为：1 为围岩未开挖时；2 为围岩开挖后未支护时；3 为衬砌支护后；4 为桥隧搭接完成后；5 为以 10%的 Q_1 汽车荷载作为竖向冲击力重复作用 50 次后的状态；6 为以 20%的 Q_1 汽车荷载作为竖向冲击力重复作用 30 次后；7 为以 30%的 Q_1 汽车荷载作为竖向冲击力重复作用 20 次后；8 为以 10%的 Q_1 汽车荷载作为水

平冲击力重复作用 20 次后;其他情况,9~12 和 13~16 分别为 Q_2 和 Q_3 两种汽车荷载的冲击按 Q_1 的作用方式和冲击次数施加后的状态。

由图 5 可知:桥、隧搭接后期运营阶段的汽车荷载及其冲击作用,将明显减小隧道拱顶的围岩土压力(57%~100%不等),其数值大小随围岩等级的降低(V 级相对于 IV 级)、搭接端基础形式的弱化(如只加厚仰拱而不采用桩基础)、搭接段的缩短、桥梁跨度的增大、汽车荷载及其冲击的增大而增大,反之则减小。而若任由隧道洞顶围岩压力持续降低,长期状态下可导致洞顶土体松动或坍塌,对洞口围岩的稳定不利;其次,若隧道衬砌局部长期暴露在自然环境中,在大气降水等因素的影响下,易出现隧道渗漏水、衬砌破损等工程病害,对隧道衬砌等钢筋混凝土结构的耐久性不利^[13]。

因此,鉴于上述试验结果及分析,对桥、隧搭接工程运营期的隧道洞口围岩的力学行为及变化情况,应特别关注,避免各类结构损伤或工程病害的发生。

4.2 衬砌应变

试验中的隧道衬砌拱顶、仰拱应变变化情况分别见图 6、7。

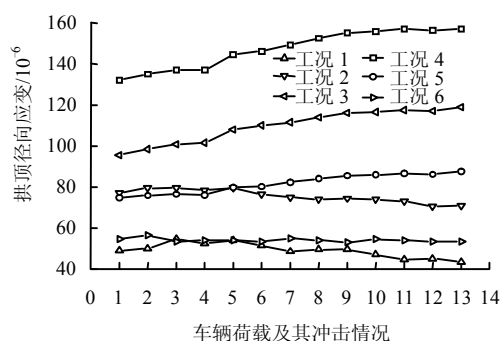


图 6 衬砌拱顶径向应变变化

Fig. 6 Changes of radial stress curves of vault lining

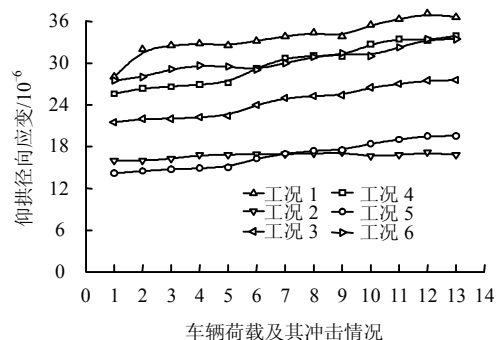


图 7 衬砌仰拱径向应变变化

Fig. 7 Changes of radial stress curves of tunnel invert

图 6、7 中,横坐标中的模拟车辆荷载及其冲击情况:1 为桥隧搭接施工后;2 为 13 同图 5 中 5~16。此外,试验结果图 8~11 中,除图 8、9 与图 10、11 中横坐标中的 1 分别表示搭接施工后与邻接施工后外,其余 2~13 所表示的模拟车辆荷载及其冲击情况均与图 6、7 相同。

由图 6、7 可知:①各工况下,隧道衬砌拱顶、仰拱处的径向应变随汽车荷载等级及冲击作用的增大而增大;②工况 2 较工况 1 的仰拱应变值偏小,说明 IV 级围岩中同样搭接长度(5 m)的情况下,采用桩基础可明显减小衬砌的变形;③因搭接段较长,工况 3 较工况 2 中的衬砌应变值分别偏大 18.8%~60.1%和 33.3%~58.8%;④同样的汽车及冲击荷载作用下, V 级围岩中衬砌径向应变较 IV 级围岩相比,工况 6 比工况 3 拱顶应变值减少 42.1%~55.8%,而仰拱应变则增大 22.2%~27.7%;⑤桥梁跨度的明显增大,导致工况 4 比工况 3 时的应变值分别增大 29.2%~36.8%和 20.5%~22.2%。

因此,由上述结果可知:桥隧搭接工程后期运营的汽车荷载会引起隧道衬砌拱顶和仰拱处应变的显著变化。另外,从结构损伤的角度来看,图中拱顶和仰拱处应变数值的渐变或正、负交替变化,长期状态下易使结构局部损伤甚至破坏^[11, 13],须特别注意且必要时对既有工程应采取局部加强或后补强措施。

4.3 隧道洞底沉降

隧道洞底沉降反映隧道底部及桥梁搭接端的沉降情况,可为桥、隧相连时桥台、隧道衬砌及基础等结构的设计和施工提供重要参考。试验中隧道洞底(桥、梁搭接端)沉降变化情况,见图 8。

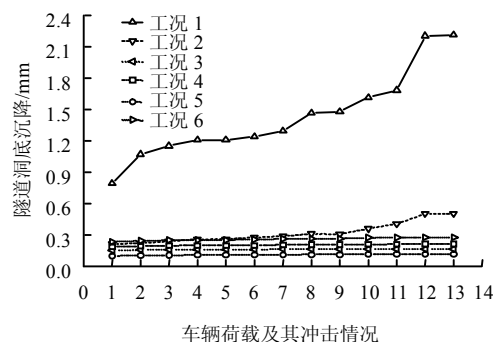


图 8 隧道洞底(梁端)沉降曲线

Fig. 8 Settlements of tunnel bottom (beam end)

由图中各工况的试验结果可见:①从绝对沉降数值来看,汽车荷载及其冲击力对各工况下的隧道洞底(桥、梁搭接端)沉降均有明显影响:随汽车

荷载的增大及其冲击次数的增加,工况 2~6 中该数值达 0.1~0.46 mm,而工况 1 中甚至高达 2.27 mm。②在汽车和其冲击作用下,隧道洞底(桥、梁搭接端)沉降受基础形式的影响最明显,基础较弱(采用加厚仰拱基础)时较采用桩基础时明显增大,图中工况 1 较工况 2 增大 208.0%~393.3%;③其次为搭接长度,搭接长度越短,且汽车及其冲击荷载越大,则洞底沉降值越大,如工况 1 较工况 2 增大 0%~83.9%。

实际工程中,较大的洞底沉降值无论对桥梁、隧道还是对洞口围岩及边、仰坡都是非常不利的。这是因为较大的沉降值不但会导致桥、隧结构本身的损伤甚至破坏,也会对洞口围岩或边仰坡岩土体的稳定性产生影响;另外,若桥、隧搭接段在后期运营中长期受较大的汽车荷载及其冲击作用,则不排除桥、隧等结构物发生局部破坏、洞口土体滑塌或出现交通安全事故等现象的发生。因此,应采取措施减少汽车荷载及其冲击作用,从而控制隧道洞底沉降值,使其不致于过大地影响桥、隧结构及围岩的安全与稳定。

此外,由于工况 1 为软岩中采用加厚的仰拱作为桥梁和隧道共同的基础(即桥台、仰拱合为一体),其隧道洞口洞底沉降的数值,换算到原型达 113.5 mm,其数值明显偏大而不满足工程要求,可见这种桥、隧相连的基础处理方式明显欠合理。因此,工况 1 较其他较强的基础处理或组合方式(如工况 2~6 中的桩基础)而言,在软岩的桥、隧搭接工程中的适用性较差,在实际工程中不宜采用。

4.4 隧道结构的安全性评价

从图 5~8 的试验结果以及试验过程中隧道衬砌未出现明显的破损、开裂等现象来看,隧道衬砌在本次模型试验中所施加的车辆荷载及其冲击作用下是安全和稳定的(个别情况除外,如工况 1)。但显而易见的是,长期的汽车荷载及其冲击作用对隧道及洞口围岩的安全性将只会产生更加明显的不利作用效应或损伤,因此需要引起足够重视。

5 桥梁部分的试验结果及分析

5.1 桥、隧搭接模型试验

桥、隧搭接中桥梁跨中竖向位移的变化,可反映桥梁上部结构跨中挠度和梁板的刚度大小以及汽车荷载及其冲击引起的不利作用效应(如桥梁搭接端的沉降情况)的大小,可为搭接端的桥梁及基础设计或加固提供重要参考,是评定桥梁结构耐久性和运营安全性的重要指标。试验工况 2~6 中的桥梁

跨中竖向位移值分布如图 9 所示。

由图 9 不难看出:对于采用桩基础的工况 2~6(工况 1 因在软弱围岩桥隧搭接中不宜采用,因而对其试验结果暂不作讨论),桥梁在经受车辆荷载及冲击后的跨中竖向位移的模型试验值换算到原型后,分别为 28.28、22.4、24.05、15.21、27.4 mm,均小于其限值 $L/600$ ^[12](分别为 66.67、66.67、83.33、50.0、66.67 mm), L 为桥梁跨径。可见,在模型试验过程中所施加的车辆荷载及其冲击作用下,桥梁跨中产生了较大的竖向位移值,但仍在限值范围内,因此,可认为桥梁在整体上仍处于安全和稳定状态。

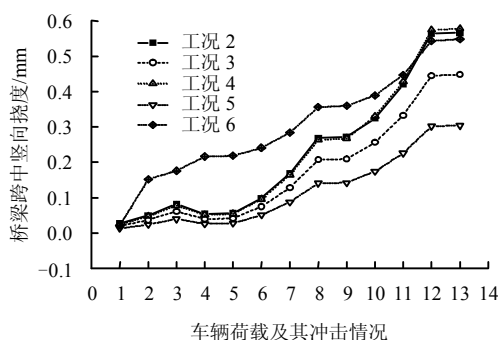


图 9 桥梁跨中竖向位移

Fig.9 Vertical displacements of beam mid-span

5.2 桥隧邻接模型试验

5.2.1 桩顶水平位移

试验中,邻接端(桩顶)水平位移变化见图 10。

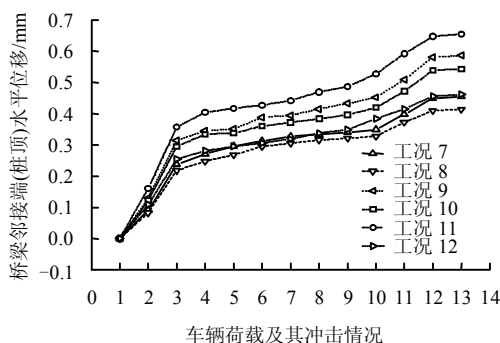


图 10 桥梁邻接端(桩顶)水平位移的变化

Fig.10 Adjacent beam (pile) end horizontal displacements

由图可知,各工况下桩基础顶部外侧(靠洞口外侧)水平位移变化规律:①各工况下桥梁邻接端(桩顶)水平位移,随过桥后的车辆冲击荷载的增大而增大,尤其车辆水平冲击荷载对其有明显的增大效应;②工况 11 的桥梁桩顶水平位移,由于围岩

等级低、桥梁跨度大且邻接距离短, 导致其结果较其他工况偏大 38.9%~161.2%; ③工况 8、10 分别与工况 7、9 相比, 桥隧邻接段越长, 同等级的车辆荷载及其冲击作用将会引起较大的桩顶水平位移; ④工况 9、10 分别与工况 7、8 相比, 说明 V 级围岩时桩顶产生较大的水平位移; ⑤工况 9、11 比工况 12 桩顶水平位移增大, 说明同等条件下, 桩顶水平位移随桥梁跨度的增大而增大。

由于桥梁邻接端(桩顶)水平位移可反映桩身的受力和变形情况、地基对桩基础约束的强弱程度等, 因此, 其数值变化规律对桥、隧邻接段的基础设计、地基处理及加固等均有一定的参考价值。试验中, V 级围岩相对 IV 级围岩情况下, 运营车辆荷载及其竖向或水平冲击作用将导致桩顶产生较明显的水平方向位移, 同时也反映其对洞口附近的围岩压力、洞底沉降有一定的不利影响。在长期作用下易导致桥、隧邻接处产生差异沉降或水平错位, 影响隧道衬砌、桥台及桩基础的耐久性, 对桥隧邻接段的行车安全与舒适不利。

5.2.2 桥梁跨中竖向位移

邻接试验中桥梁跨中竖向位移变化, 见图 11。

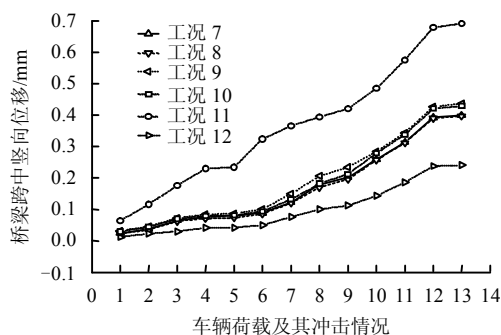


图 11 桥梁跨中竖向位移变化

Fig.11 Vertical displacements of beam mid-span

综合图 9、11 可见: 桥、隧相连时桥梁跨中竖向位移受汽车荷载及其冲击力的影响较大, 且随基础的弱化、围岩等级的降低、汽车荷载及其冲击力的增大而数值明显变大; 但对桥梁跨度的变化反映不显著, 仅随桥梁跨度的增大而略有增加。

5.3 桥梁结构的安全性评价

从图 9~11 来看, 桥梁竖向位移值暂未超过限值, 桥梁其他部位也未出现明显的破损或开裂现象, 证明其在本次模型试验中所施加的车辆荷载及其冲击作用下还是处于安全和稳定状态的。但从长远来看, 长期的汽车荷载及其冲击, 对桥梁结构内部所造成的损伤终将难以全部消除, 甚至将逐渐累积,

最终将会对其安全性和稳定性产生不可预计的影响, 因而成为诱发各种桥梁病害的原因。

6 对试验结果的综合分析与讨论

综合图 5~11 可知, 在汽车荷载及其冲击作用下的软岩条件下的桥、隧相连工程中有如下规律:

(1) 桥隧结构和洞口围岩各关键部位在运营中汽车荷载及其冲击作用下考虑桥、隧、岩的相互作用影响时, 随围岩等级、桥梁搭接端基础形式、桥梁跨径大小、搭接段的长短、汽车荷载等级及冲击荷载的作用次数等单个或多个因素的变化, 会产生各种不同程度的不利力学行为和作用效应, 长期作用下不排除成为诱发桥梁与隧道等结构局部损伤或破坏, 桥头差异沉降, 斜坡岩土体或隧道洞口围岩失稳、滑坡、坍塌以及桥面与隧洞内路面破裂、腐蚀或损毁, 渗漏水或积水等工程病害的原因。

(2) 桥隧结构和洞口围岩各关键部位受汽车荷载及其冲击作用而产生的各种力学行为或效应, 随着围岩等级的降低、桥梁搭接端基础形式的弱化(如采用加厚仰拱基础相比桩基础时)、桥梁跨度的增加、搭(邻)接段长度的缩短、汽车及冲击荷载的增大及作用次数的增加等有明显的增大趋势。

(3) IV、V 级围岩条件下, 桥、隧搭接工程相比桥、隧邻接工程, 同样的汽车荷载与冲击作用将使桥、隧结构及洞口围岩各关键部位产生较明显的不利作用效应(如应变、沉降、位移等)。

(4) 隧道、桥梁结构的安全性: 单就本模型试验来看, 试验中既定作用次数内的汽车荷载及其冲击作用, 对桥梁、隧道和围岩各关键部位产生了明显的不利作用或影响(如较大的竖向位移、明显的沉降等), 但由各结构或围岩各部位并未出现明显超限变位、开裂、破损或失稳现象等整体结果来看, 桥梁和隧道结构以及洞口围岩是安全和稳定的。但若软岩中的桥、隧相连段长期处于上述甚至其他各种重车或超载车辆的作用或冲击影响状态, 则其所造成的影响无疑将会更大, 而其产生的病害或灾害后果也将是难以预计的。因此, 若在设计或施工中不采取适当的处理措施或在出现初始问题时不及时处理, 则上述不利作用的长期影响或逐渐的损伤累积将最终导致各种病害甚至灾害事故的发生。

7 结 论

(1) 软岩条件下的桥、隧相连工程的模型试验研究表明, 桥、隧相连处的汽车荷载及冲击作用, 易导致桥梁跨中、搭接端及隧道洞底产生过大沉降,

增大桩基础顶部水平位移,降低隧道洞顶附近的围岩压力等。若在长期的汽车荷载及其冲击作用下,易导致桥梁、隧道各关键部位的结构损伤或不力学效应,或使洞口围岩的稳定性降低,继而易成为诱发桥头差异沉降,斜坡岩土体或隧道洞口围岩失稳、滑坡、坍塌,以及桥面与隧洞内路面破裂、腐蚀或损毁,渗漏水或积水等工程病害的原因。

(2) 为防止桥、隧结构各关键部位在汽车荷载及其冲击作用下产生结构损伤甚至破坏,避免洞口围岩产生过大沉降或出现失稳、滑坡等病害,软岩条件下的桥、隧相连工程中,在条件允许的情况下宜尽量采用桥、隧邻接的形式;若受施工条件或地形等因素限制必须采用桥、隧搭接的形式时,应对桥梁、隧道衬砌的各关键部位及洞口岩土体等采取加强或支护措施,且宜同时采用桩基础等较强的基础形式,减小桥梁跨度,加大搭(邻)接段长度,采取措施减小汽车荷载及其冲击影响等。

此外,还必须认识到的是受本次模型试验较小的相似比及操作误差等的限制,试验结果在一定程度上显得过于粗糙(甚至有时较实际工程偏差较大)。因而,本次模型试验可较好地适用于对桥、隧相连工程在车载及其冲击作用下力学行为或多源损伤的普遍规律或趋势的定性分析,而更准确的定量分析或深入的分析研究,还有待于后续深入的理论研究、有限元分析或现场测试试验等去验证或解决。

参考文献

- [1] 王飞. 山区高速公路桥隧相连技术的研究与应用[J]. 交通标准化, 2008, (11): 124—126.
WANG Fei. Research and application of link between bridge and tunnel of highway in mountainous areas[J]. **Communications Standardization**, 2008, (11): 124—126.
- [2] KERR A D, MORONEY B E. Track transition problems and remedies[J]. **Bulletin American Railway Engineering Association**, 1995, 742: 267—298.
- [3] 罗强. 高速铁路路桥过渡段动力学性能分析及工程试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [4] 陈雪华, 律文田, 王永和. 高速铁路路桥过渡段路基响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(3): 95—98.
CHEN Xue-hua, LÜ Wen-tian, WANG Yong-he. Study on the dynamic response high speed railway bridge-subgrade transition section[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2006, 25(3): 95—98.
- [5] 刘佑荣, 贾洪彪, 唐辉明, 等. 湖北巴东长江公路大桥斜坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1828—1831.
LIU You-rong, JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, et al. Study on stability of slope at Batong Yangtze highway bridge site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1828—1831.
- [6] 湖南省交通科学研究院. 桥隧相连工程多源损伤力学行为与控制技术研究可行性研究报告[R]. 长沙: 湖南省交通科学研究院, 2008.
- [7] 李德寅, 王邦楣, 林亚超. 结构模型试验[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [8] 刘自明. 桥梁结构模型试验研究[J]. 桥梁建设, 1999, (4): 1—7.
LIU Zi-ming Test study of bridge structure models[J]. **Bridge Construction**, 1999, (4): 1—7.
- [9] 王涛. 桩-土相互作用影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1589—1593.
WANG Tao. Research of model tests on pile-soil interaction influence[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 1589—1593.
- [10] 董昌周, 杨建辉, 胡挺. 公路隧道围岩模型试验相似材料的试验研究[J]. 公路, 2010, (3): 207—211.
DONG Chang-zhou, YANG Jan-hui, HU Ting. Research on analogous material model test for highway tunnels[J]. **Highway**, 2010, (3): 207—211.
- [11] 王成平. 破碎围岩隧道的模拟试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [12] 裘伯永, 盛兴旺, 乔建东, 等. 桥梁工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [13] 王毅才. 隧道工程(第二版), 上册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.