

DOI: 10.11779/CJGE201408006

# 跨断层隧道抗减震措施性能振动台试验研究

信春雷, 高波, 周佳媚, 申玉生, 全晓娟

(西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 跨断层的隧道工程在中国高烈度地震区已经越来越普遍。针对目前土木工程抗震设计规范对跨断层隧道的不适用性, 通过振动台模型试验研究了隧道结构常规与新型抗减震措施在地震动力荷载作用下的响应特性和破坏机理。结果表明: 断层滑动装置在单体模型箱中模拟断层滑动状况良好; 套管式可变形结构的抗减震性能最好; 减震层可以提高隧道结构整体的耐震性能; 减震缝通过提高隧道结构纵向自由度而减轻震害。分析了隧道结构在地震中发生破坏的初始位置与破坏过程, 揭示了各种抗减震措施的作用机理。最后, 将地震烈度与隧道结构破坏过程相结合, 提出了各种抗减震措施的适用条件。为研发新型隧道抗减震措施与隧道抗震设防提供参考。

**关键词:** 隧道工程; 振动台模型试验; 抗减震措施; 水平激震; 破坏形态

中图分类号: U451.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)08-1414-09

作者简介: 信春雷(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和科研。E-mail: raymond\_xin@qq.com。

## Shaking table tests on performances of anti-seismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures

XIN Chun-lei, GAO Bo, ZHOU Jia-mei, SHEN Yu-sheng, QUAN Xiao-juan

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Fault-crossing tunnel structures are more and more universal in high intensity seismic regions of western China. The current code for aseismic design of civil engineering cannot be used for them. To deal with this problem, the seismic response characteristics and failure mechanism of routine and new anti-seismic and damping measures for tunnel structures are investigated based on shaking table tests. The results show that the self-developed sliding device can simulate fault movement successfully in a single model box. The casing-shape damping measure can provide the most effective protection, and it is the best-performing aseismic and damping measure for fault-crossing tunnels. The damping layer can enhance the general vibration strength of tunnel structures. The absorbing joint can reduce the post-seismic destruction by increasing longitudinal freedom degrees of tunnel structures. The initial destructive position and the whole destructive process of tunnels during the earthquake are analyzed. The action mechanism of various anti-seismic and damping measures are released. Finally, by analyzing the relationship between seismic intensity and destructive process of tunnel structures, the service conditions of various anti-seismic and damping measures are put forward. The above results certainly contribute to studying and developing new types of anti-seismic and damping measures for tunnels and provide references for seismic fortification of tunnels as well.

**Key words:** tunnel engineering; shaking table test; anti-seismic and damping measure; horizontal seismic excitation; destructive pattern

## 0 引言

跨断层的隧道结构在汶川大地震中破坏严重, 作为生命线工程的控制性环节, 这不仅直接造成了国民经济损失, 更加阻碍和延误了抢险救灾的进程。为了促进汶川地震灾后重建以及完善隧道结构抗震设计规范, 高波等<sup>[1]</sup>针对隧道工程的震害展开了全面而深入的调查与分析。震后调查显示, 所统计的56座隧道中共有33座遭受到不同程度的破坏, 发生破坏的隧道长

度占调查隧道总长度的60.18%。跨断层的隧道结构全部受损, 说明隧道结构在地震动力与断层错动的联合作用下更易发生破坏。通常情况下, 地震中的隧道结构与围岩之间存在惯性和运动相互作用。前者取决于两者的密度, 后者取决于两者的刚度<sup>[2]</sup>。因此, 二者

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178398, 51078319); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41102220, 51208435)

收稿日期: 2014-02-27

的密度或刚度差别较大时, 隧道结构极易发生破坏。此外, 隧道是长线形结构物, 地震波的相位衍生应力和变形在轴线方向上会产生很大变化, 这实际上构成了隧道结构破坏的重要方面<sup>[3]</sup>。这两种情况集中并且极端的体现在跨断层的隧道结构上。因此, 跨断层隧道结构的抗震设计中设置抗减震措施是十分必要的。

由于地震荷载与断层错动的联合作用使隧道结构发生循环累积变形, 造成衬砌混凝土开裂、渗水、破损、错台和坍塌, 从而影响隧道结构整体的正常服役性能甚至导致其失效破坏, 这一问题是隧道结构抗震设计中亟待解决的关键难题。目前, 中国还没有专门针对山岭隧道的抗震设计规范, 可以借鉴的规范条文以定性描述为主, 工程设计的可操作性不强<sup>[4]</sup>。美国和日本的地下结构抗震设计标准同样多为定性描述。国内外学者针对跨断层的隧道与地下工程抗减震特性与措施开展了一些理论和试验研究。Burridge 等<sup>[5]</sup>研究了隧道衬砌结构应力与断层竖直向位移之间的关系, 认为二者在破坏之前为线性关系; 建议衬砌结构在跨断层位置断开, 并辅以钢制衬砌与断开的混凝土衬砌协同工作。Honegger 等<sup>[6]</sup>认为通过浅埋、设置沟槽和松软土回填等措施使得管状地下结构在地震过程中产生相应的变形是保护其不受损伤的有效方法。Hou 等<sup>[7]</sup>通过沿隧道轴线每隔 6 m 设置一个伸缩缝降低地震对隧道结构的破坏, 而且便于震后修复。Anastasopoulos 等<sup>[8]</sup>同样建议设置变形缝来削弱断层错动的影响, 认为降低变形缝数量直接导致隧道结构内力增大与变性损伤加剧。Moradi 等<sup>[9]</sup>认为管道的轴向应变是引起破坏的关键原因。降低围岩刚度与增大管道直径是防止结构在地震中被断层剪坏的有效方法。

上述研究成果主要是通过离心机试验获得, 受到离心机挂篮容积等方面的限制, 试验模型通常较小, 获得数据较为有限。而且由于地震荷载作用下断层内砂石土颗粒错动、致密化等机理非常复杂, 导致数值分析方法难以获得理想的结果。振动台模型试验则能够较好地控制试验条件, 模型尺寸更加接近于原型, 是一种有效而理想的研究手段。国内外已开展的跨断层隧道振动台模型试验非常有限, 代表性工作有: Sim 等<sup>[10]</sup>在丰蒲干砂中开展了小直径管道穿越直立断层的振动台试验, 发现将管道埋置于轮胎派生骨料与干砂混合的地层中, 跨断层区段的弯矩较小而且地震加速度也较低; 王明年等<sup>[11]</sup>开展了隧道浅埋段和断裂黏滑段抗震设计方法与试验研究, 重点研究了穿越黏滑错动断层的隧道减震层减震技术。

本文通过振动台模型试验研究跨断层的隧道结构

在有无抗减震措施情况下的地震响应特征和破坏形态, 为隧道结构特别是高烈度地震区跨断层隧道工程的抗减震设计提供必要的理论参考和技术支持。

## 1 振动台试验设计

### 1.1 依托工程概况

本系列试验以在汶川地震中受损严重的龙洞子隧道为依托工程。龙洞子隧道位于岷江左岸楠木堰庙子坪至龙溪新房子石灰窑厂一带, 穿越龙洞子山。岩体受构造影响严重, 岩体较为破碎, 节理裂隙较发育。隧道共跨越 4 个断层,  $F_2$  和  $F_5$  断层位于隧道洞口处,  $F_3$  和  $F_4$  断层穿过隧道结构的洞身段。隧道区地震活动强烈, 地震基本烈度为 VII 度。

振动台试验模拟对象为隧道跨  $F_3$  和  $F_4$  断层的洞身区段。实际断层面光滑平直, 断层碎裂岩宽 2~5 m, 倾角为 82°, 走向与隧道轴线基本垂直。为了尽可能降低变量对试验结果的影响, 突出抗减震措施对特殊情况的适应能力, 进而推广到一般情况。遵照依托工程, 在试验中模拟的断层宽度为 2.5 m, 倾角为 90°, 走向与隧道轴线垂直。

### 1.2 试验系统介绍

本系列试验在中国地震局工程力学研究所的地震工程与工程振动开放实验室进行。实验室的地震模拟振动台系电液伺服驱动, 可同时或单独模拟三向地震动, 相关技术参数见表 1。配套有先进的 Pacific Instruments 高性能动态信号采集系统, 实现对加速度和应变数据等多达 128 个输入通道的独立采样 (如图 1 所示)。同时采用 SigLab 数据采集器进行辅助采集。

表 1 振动台系统主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of shaking table system

技术指标	技术参数
台面尺寸/(m×m)	5.0×5.0
频率范围/Hz	0.5~40
振动自由度数	三向六自由度
最大模型重量/t	30
最大位移/cm	水平: ±8, 竖向: ±5
最大速度/(cm·s <sup>-1</sup> )	单项振动: ±60, 三向振动: 30
最大加速度/g	水平: 1.0, 竖向: 0.7
最大抗倾覆力矩/(t·m)	75



图 1 模型箱与数据采集系统

Fig. 1 Model box and data acquisition system

### 1.3 相似关系设计

目前的振动台模型试验，有关边界条件的模拟与模型材料的相似等方面还无法圆满解决。根据所研究动力问题的特点确定模型对原型的相似程度是目前地下工程振动台试验常用的方法<sup>[12]</sup>。既然试验的内容是对围岩大变形和隧道结构动力破坏机理的研究，则应保持结构模型材料抗力、阻尼特性、应力应变关系和惯性力与原型材料的相似。因此，本系列试验忽略重力效应的影响，采用重力失真模型<sup>[13]</sup>。

为了确定模型箱边界效应的影响, 对试验模型进行了三维数值分析。根据计算结果、模型箱尺寸与隧道原型尺寸确定了试验的几何相似比为 1:25。根据 Buckingham  $\pi$  定理以及重力失真模型对试验相似比的要求, 以长度、质量密度和弹性模量为基本物理量, 推导其他物理量, 则模型系统中的相似关系见表 2。

表 2 模型试验相似关系与相似比

Table 2 Similarity relations and their likelihood rates for shaking table tests

物理量	相似关系	相似比
长度 $l$	$C_l$	1/25
密度 $\rho$	$C_\rho$	1/1.5
弹性模量 $E$	$C_E$	1/45
应变 $\varepsilon$	$C_\varepsilon$	1/1
应力 $\sigma$	$C_\sigma = C_E C_\varepsilon$	1/45
泊松比 $\nu$	$C_\mu$	1/1
时间 $t$	$C_t = C_l (C_\rho / C_E)^{1/2}$	1/4.56
频率 $f$	$C_f = 1/C_t$	4.56
位移 $d$	$C_d = C_l$	1/25
速度 $v$	$C_v = (C_E / C_\rho)^{1/2}$	1/5.5
加速度 $a$	$C_a = C_E / (C_l C_\rho)$	1/1.2

## 1.4 模型设计制作

### (1) 模型箱

试验采用的模型箱由型钢焊接而成, 内部尺寸为  $3.7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高)。通过螺栓固定于振动台台面上。沿长度方向一面安装有透明玻璃, 以便在试验过程中随时观测围岩模型的破坏形态。为了尽量减小模型箱刚性边界对模型系统的影响, 在模型箱内部与激震方向垂直的两侧壁上铺设一层聚乙烯膜; 模型箱内部与激震方向平行的两侧壁各铺设了一层  $17 \text{ cm}$  厚的聚苯乙烯泡沫板。模型箱底部原本有一层约  $10 \text{ cm}$  厚的砂浆混凝土垫层, 可以防止试验中围岩模型与模型箱发生相对滑移。为避免发生共振, 模型箱与模型系统的自振频率差别较大。

## (2) 围岩模型

由于围岩性质随其成分,填筑情况,加载频率,振动持时以及应力历史等条件的不同而变化,能全面考虑这些特点的模拟材料很难配置<sup>[14]</sup>。围岩相似材料一般由骨料、胶结料和辅助材料构成,对应的原材料

为干河砂、机油和粉煤灰。根据依托工程的围岩等级，调整三者之间的配比关系，最终选取的粉煤灰、河砂与机油的比例为57:31:12，所得围岩模型材料的黏聚力 $c=3.01\text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi=21^\circ$ 。制备完成的围岩相似材料以松散状均匀填入模型箱内，用专用重锤反复夯实至预定标线，然后环刀取样复核容重值，合格后再填第二层。每个结构体分多层填入，每层压实完毕，用铁钩在表面划毛后再填下一层，以使围岩模型无成层现象。填料完毕，再静放7~8 h，使其经过土体的自平衡阶段。结合依托工程地勘报告中有关断层的力学参数，考虑到断层带破碎的实际情况，断层采用直径为1.0~1.5 cm的砾石模拟。

### (3) 隧道模型

本系列试验的隧道模型材料选用微粒混凝土，其弹性模量和抗压强度低于普通混凝土，利于模型相似率的实现。通过试验最终确定水泥与中砂质量比为1:6，水灰比为1:1。采用现成的定型钢筋网模拟钢筋，钢筋网的纵向与横向钢筋直径均为1.06 mm，纵横向间距均为25.4 mm。将钢筋网置于模具中，浇筑隧道模型，浇筑完毕的模型7 d后可拆除外膜，为使得隧道模型强度尽可能达到试验要求，对拆除外模后的模型进行喷水养护7 d，之后再拆除内模。拆除完毕后还需再养护14 d方可上台进行试验。每节隧道模型长度为80 cm。

## 1.5 试验方案设计

本系列振动台模型试验的目的是考察地震作用下跨断层隧道各抗减震措施的动力响应特征与破坏机理以及地震动参数对动力响应特征和破坏机理的影响。为了深入细致的研究每种抗减震措施的效果，制定试验方案时采用对比的思路进行设计，以期明确每种措施的作用机理且达到改进的目的。因此，本系列试验以无抗减震措施为对比例，逐一研究了套管式可变结构、减震层和减震缝3种措施的抗减震效果，试验分为两组进行（如图2，3所示）。其中，两组试验的B，C和D三段衬砌通过环氧树脂植筋胶连接成整体。

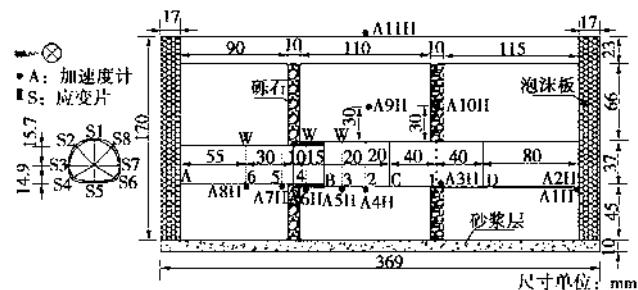


图 2 第一组试验方案

Fig. 2 Scheme for first group of tests

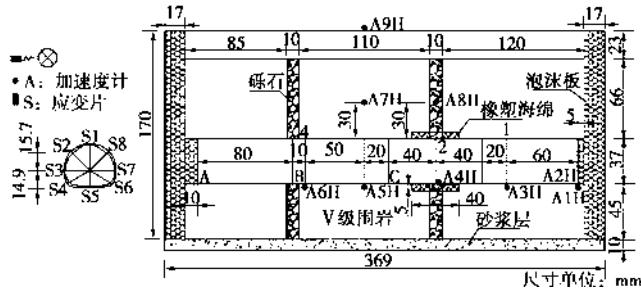


图3 第二组试验方案

Fig. 3 Scheme for second group of tests

目前所做有关断层的振动台试验, 较为理想的是采用两个振动台上各固定一个模型箱, 两模型箱之间不连续的部分模拟断层, 两振动台输入有相位差的两条地震动实现断层错动。尽管这种方法能够较好的实现隧道结构被断层剪坏的现象, 却忽略了断层内部物质对隧道结构地震响应的影响。将断层设置在一个模型箱内可以根据依托工程将其还原, 但是受到模型箱边界的限制, 断层错动效果又不尽如人意。本系列试验的断层设置方案兼顾了真实还原断层与实现错动效果, 采用了如下设计方案模拟断层(如图4所示)。

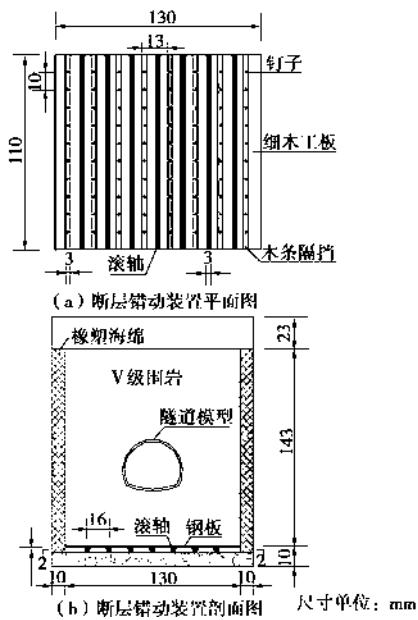


图4 断层错动装置

Fig. 4 Dislocation device for simulating fault movement

该装置的基本构造为: 首先在两断层之间围岩模型所在区域的模型箱底部搁置一厚度为2 cm的细木工板; 在其上钉若干截面为3 cm×2 cm的木条隔挡以避免滚轴错位; 在木条之间放上滚轴(如图4(a)所示)。再在滚轴上搁置一厚度为1 cm的钢板用以承受上覆围岩的重量。同时, 在两断层中间围岩模型与激震方向垂直的两个侧面设置橡塑海绵(如图4(b)所示)。试验过程中, 断层滑动装置上部的围岩产生滑动, 又因为橡塑海绵而产生回弹, 从而实现断层的错动。从试

验过程中的监测录像来看, 断层错动效果良好。

试验中采用的抗减震措施如图5所示。由于减震缝是由两节隧道模型共同构成, 为了避免两侧的模型发生不必要的摩擦错动破坏, 保证附近的应变片与加速度计能够在地震动力作用下正常工作。在减震缝断面的表面涂以704硅胶并外贴OPP胶带(如图5(a)所示); 减震层结构采用厚度为5 cm的橡塑海绵模拟, 敷设长度为40 cm(如图5(b)所示); 套管式可变形抗减震措施采用两节断面面积不同的隧道模型进行组合, 其中外部隧道断面各处内径比内部隧道断面各处外径均大3 cm, 其间的间隙采用橡塑海绵填充(如图5(c)所示)。

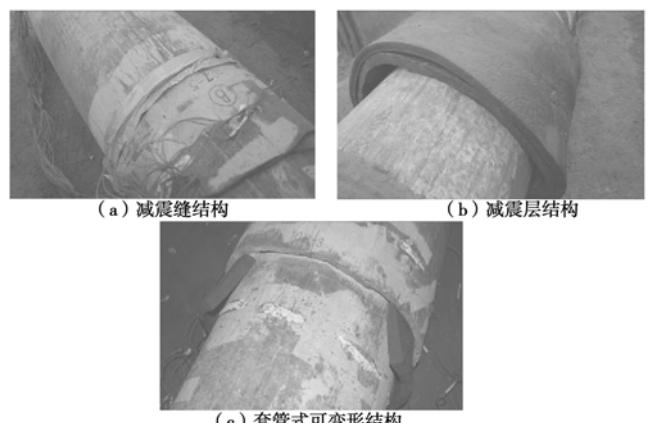


图5 隧道结构的抗减震措施

Fig. 5 Anti-seismic and damping measures of tunnel structures

减震缝可以将隧道结构分为相互独立的若干段, 将其设置在隧道结构跨断层的部位可以利用其产生的相对变位应对断层的错动。将减震层同样设置在隧道结构跨断层部位, 主要是利用材料较大的阻尼吸收地震能量和较好的缓震性能抵抗断层的错动。套管式可变结构综合了上述两种方案的特点, 衬砌结构不但可以相对变位, 同时还能发挥内外套管之间减震层材料的作用, 将其设置在跨断层部位发挥作用。

## 1.6 监测方案制定

本系列试验主要采用的数据采集传感器为加速度计与应变片。在进行振动台试验之前, 已经对试验模型系统进行了深入细致的三维数值模拟, 明确了跨断层隧道结构在地震过程中受力较为不利与变形较大的部位。试验之前, 有针对性的在这些部位布设传感器(如图2, 3所示)。

图2中传感器编号首字母A代表加速度计, H代表加速度计为水平放置, 垂直于隧道结构轴线且与激震方向平行。1, 2加速度计用于考察模型箱的边界效应; 3加速度计用于监测隧道结构穿越断层部位无抗减震措施的加速度; 3, 4, 5加速度计联合用于监测断层对

隧道结构地震动力响应的影响范围; 5, 6 加速度计用于监测套管结构中外套管的加速度; 7, 8 加速度计用于监测内套管的加速度; 5, 6, 7, 8 加速度计联合用于监测套管式可变结构的抗减震效果与破坏机理。9, 10 加速度计位于同一高度, 9 用于监测两断层之间围岩模型的动力响应特征, 10 用于监测断层内部的加速度响应; 11 加速度计固定于模型箱上边沿, 其中 4, 9, 11 加速度计在一条竖直线上, 11 加速度计用来监测模型箱所获得的地震动加速度, 既可与箱体内各加速度计相比较研究, 也是对台面加速度计获得数据的补充。

图 2 中 S 代表应变片, 图中虚线表示应变片所在断面。本组试验的应变片共设置 6 个监测断面, 其中 1, 2 断面所在位置的隧道模型内外表面各贴 8 个应变片。考虑到模型尺寸变更后便于贴置应变片以及研究重点的改变, 3, 4, 5, 6 断面仅在模型外表面贴置了 8 个应变片。其中, 1, 2, 3 断面联合用于监测断层对隧道结构动力响应的影响范围。3, 4 断面用于监测外套管的应变响应特征, 5, 6 断面用于监测内套管的应变响应特征。3, 4, 5, 6 断面联合用于监测套管式可变结构的抗减震效果与破坏机理。

图 3 中 4 加速度计用于监测跨断层隧道设置减震层后的地震加速度响应。3, 4, 5 加速度计联合用于监测断层对隧道结构动力响应的影响范围与减震层的减震效果。6 加速度计用于监测减震缝的减震效果。其余相应位置处的加速度计作用与试验一相同。图 3 中共设置 4 个应变片断面, 全部在隧道模型内外表面各贴 8 个应变片。其中, 2, 4 断面分别用于监测设置了减震层和减震缝的隧道结构地震动应变响应特征。1, 2 和 3 断面联合用于监测断层对隧道结构动力响应的影响范围与减震层的效果。

### 1.7 试验加载方案

依托工程龙洞子隧道基本呈南北走向, 汶川地震震中在其正西方向 6.6 km 处。试验选取对隧道结构影响最大的卧龙地震波东西向分量作为台面输入, 与隧道轴线垂直的水平方向进行激震。目的是考察在最不利地震情况下隧道结构跨断层部位与抗减震措施的地震响应特征和破坏形态。地震波的加速度峰值与持时均根据相似关系进行了调整。调整后的试验波持时为 50 s, 调整后的卧龙波加速度时程曲线如图 6 所示。

为了研究隧道模型在地震作用下的渐进破坏形态和机理, 两组试验均输入 5 条地震动。按照加速度峰值为 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g 和 1.0g 由小到大逐步进行试验。试验起始输入的地震动加速度峰值是按照依托工程所在地区为 7 度设防, 结合隧道工程耐震性较好的特点所确定的; 试验结束的条件是以隧道模型能够明显展现破坏形态但仍保持整体不发生坍塌为准则。

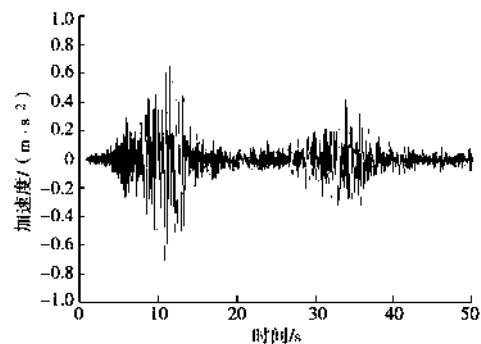


图 6 东西向卧龙地震波加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of acceleration of E-W Wolong seismic wave

## 2 试验结果分析

### 2.1 地震加速度响应分析

分析各项抗减震措施的地震加速度响应, 选取了第一组试验中的 3, 6, 7 加速度计以及第二组试验中的 4, 6 加速度计, 分别用于监测无措施、外套管、内套管、减震层和减震缝的加速度响应 (如图 7 所示)。

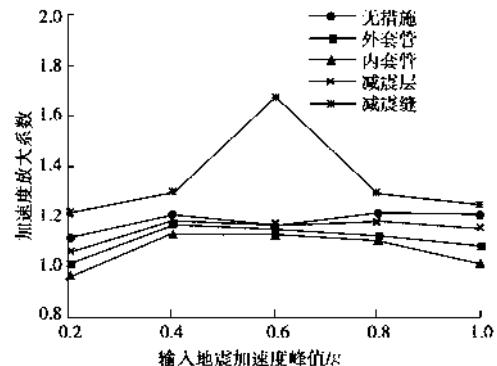


图 7 抗减震措施的地震加速度响应

Fig. 7 Seismic acceleration response of anti-seismic and damping measures

因实际输入的地震加速度峰值与试验设计要求有一定差别, 不便于直接相互比较, 将监测点响应的加速度峰值与台面实际输入的地震加速度峰值之比定义为加速度放大系数。由于监测抗减震措施的加速度计全部位于同一高度, 因此, 不存在高度不同对放大系数的影响。套管式可变结构中的内套管加速度放大系数最小, 其平均值比无措施情况小 9.6%。在初始工况 0.2g 时的加速度放大系数还小于 1, 这说明内套管在外套管和内外套管之间缓冲层的保护下减震效果显著。外套管的减震效果仅次于内套管, 其加速度放大系数平均值比无措施情况小 6.4%。外套管受到内套管的约束, 在地震过程中限制了其震动, 二者组成的套管式可变结构减震效果明显。减震层的效果略逊于套

管式可变结构, 其加速度放大系数平均值比无措施情况小2.9%。设置减震缝的思路不同于以上两种抗减震措施, 减震缝的存在可以提高隧道结构沿纵向的自由度, 从而降低内力, 减小隧道结构发生破坏的可能。因此, 其地震加速度放大系数平均值比无措施情况大14.0%。

通过选取第一组试验的4, 5, 8, 9, 10加速度计以及第二组试验的3, 5, 7, 8加速度计进行围岩模型的地震加速度响应分析(如图8所示)。

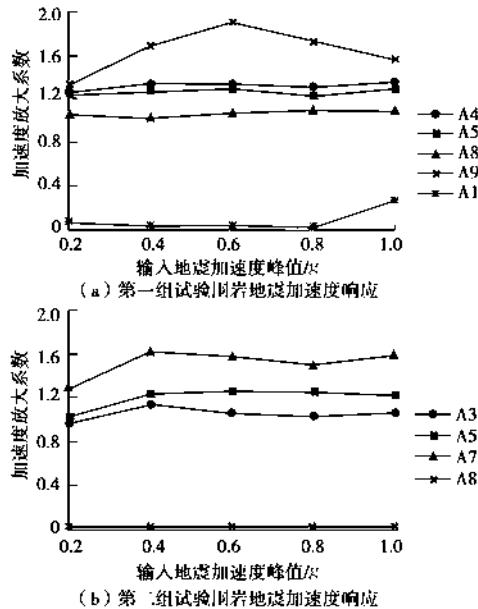


图8 围岩的地震加速度响应

Fig. 8 Seismic acceleration responses of surrounding rock

第一组试验中, 4, 5, 8 加速度计位于同一高度, 4, 5 加速度计位于滑动的围岩模型中, 8 加速度计位于相对于模型箱固定的围岩模型中。8 加速度计放大系数接近于 1, 4, 5 加速度计放大系数平均值分别比 8 大 23.4% 和 18.4%。说明断层错动装置效果良好, 断层滑动现象明显。9, 10 加速度计位于同一高度, 9 位于滑动的围岩模型中, 10 位于断层破碎带中。10 加速度计的加速度放大系数接近于 0, 将 9, 10 加速度计数据相比较也可以说明断层滑动现象明显(如图 8 (a) 所示)。同理, 第二组试验的 3, 5 加速度计分别位于相对于模型箱固定和滑动的围岩模型中。3 加速度计的放大系数接近于 1, 5 加速度计放大系数平均值比 3 大 13.9%, 也说明了断层滑动良好(如图 8 (b) 所示)。将位于同一高度分别埋置于滑动围岩模型和断层中的 7, 8 加速度计数据相比较同样可以得到相同的结论。

## 2.2 隧道结构应变响应分析

对隧道结构的地震动应变响应进行分析, 选取了用于监测无抗减震措施的第一组试验 1 断面, 监测套

管式可变结构的第一组试验 4, 5 断面, 监测减震层结构的第二组试验 2 断面和监测减震缝结构的第二组试验 4 断面。各监测断面上各监测点随试验加载情况的地震动应变响应如图 9 所示。

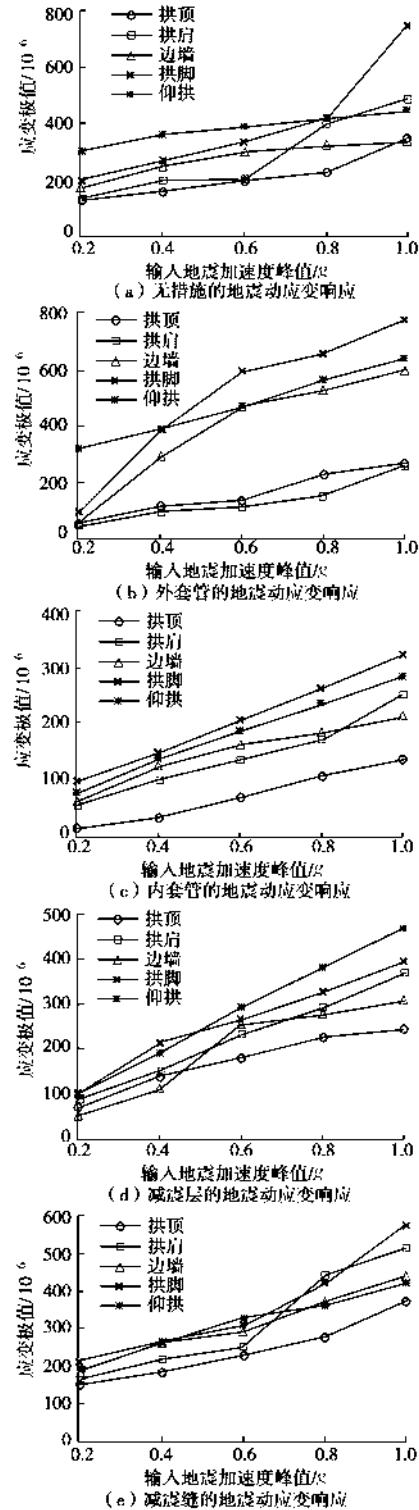


图9 抗减震措施的地震动应变响应

Fig. 9 Seismic strains responses of anti-seismic and damping measures

本系列试验隧道模型所采用的微粒混凝土材料多次经过 70.7 mm<sup>3</sup> 立方体的抗压强度测试, 试验结果证

明当材料产生约  $300 \times 10^{-6}$  应变即发生开裂。

当隧道结构无抗减震措施保护, 在输入  $0.2g$  地震加速度的情况下, 仰拱部位已经达到破坏的临界值。随后的试验中, 仰拱首先发生破坏。拱脚的应变值仅次于仰拱, 在加载工况为  $0.6g$  时, 拱脚发生破坏而边墙部位达到破坏的临界值。加载工况为  $0.8g$  时, 边墙和拱肩同时发生破坏。拱顶的破坏发生在加载工况为  $1.0g$  时 (如图 9 (a) 所示)。试验结束后, 拱脚的破坏最为严重, 其次为仰拱隆起。分析认为仰拱在上覆围岩与隧道结构作用下承受较大弯矩, 已达破坏临界状态, 在进行动力试验过程中加剧了破坏。在该断面型式下位于仰拱两侧的拱脚半径最小, 易于出现应力集中, 在动力作用下破坏最为严重。

采用套管式可变结构的外套管仰拱部分, 在尚未进行地震动试验之前的静力阶段已经发生破坏。与无措施情况相比, 外套管仰拱不仅承受了围岩和自身结构的压力, 还承受了内套管的重力。此外, 在  $0.2g$  工况下, 隧道结构的拱顶、拱肩、边墙和拱脚的应变平均值比无措施情况小  $58.64\%$ 。这得益于内套管的支撑作用和内外套管之间橡塑海绵的缓冲作用。但是随着地震的加剧, 垂直于激震方向的边墙和拱脚较易发生破坏。 $0.4g$  工况下, 拱脚直接发生破坏而边墙处于发生破坏的临界值。从  $0.6g \sim 1.0g$  工况, 边墙、拱脚和仰拱发生比无措施情况下更为严重的破坏, 而拱顶和拱肩应变值尽管逼近破坏临界值却始终未发生破坏 (如图 9 (b) 所示)。内套管在  $0.2g \sim 1.0g$  所有工况下, 断面所有监测点的应变值均小于外套管 (如图 9 (c) 所示)。在试验结束后, 仅有拱脚部位发生轻微开裂。由于围岩重力并未直接作用于内套管, 故其上的拱顶、拱肩和边墙应变值均小于外套管和无措施情况。其次, 由于内套管断面缩小, 刚度提高, 质量降低, 惯性较小, 在地震过程中产生的力较小, 加之橡塑海绵的缓冲作用, 则边墙、拱脚和仰拱的应变值也较小。

敷设了减震层的隧道结构直到  $0.6g$  工况, 仰拱部位的应变值才接近于破坏临界值。 $0.8g$  工况拱脚和仰拱发生破坏, 拱肩应变接近于破坏临界值。 $1.0g$  工况结束后, 拱肩、拱脚和仰拱发生较为严重的破坏, 边墙破坏轻微 (如图 9 (d) 所示)。减震层可以显著提高隧道结构的耐震能力, 但是围岩与自身结构的重力加之断面型式仍然是拱脚和仰拱破坏的主要原因。拱肩部位发生破坏的现象与原因同日本学者 Asakura 等<sup>[15]</sup>的分析相同, 由于减震层对隧道结构的约束作用弱于围岩, 则在水平激震作用下, 衬砌结构随着减震层缓冲发生往复的剪切变形, 引起了结构断面上正负交替的附加弯矩, 地震荷载造成了衬砌结构沿共轭  $45^\circ$  对

角线 (拱肩和拱脚) 的方向发生开裂。

设置减震缝的隧道结构在  $0.6g$  工况下, 拱脚和仰拱开始发生破坏, 边墙应变值接近发生破坏的临界值。 $0.8g$  工况下, 除拱顶外, 其余部位全部发生破坏。 $1.0g$  工况后, 全部测点发生破坏 (如图 9 (e) 所示)。减震缝通过增加隧道结构沿纵向的自由度而减小内力, 应变值随之减小, 可以起到一定的减震作用, 但整体减震效果不及减震层和套管式可变结构。

### 2.3 隧道结构震后破坏形态分析

隧道结构在试验结束后被完整取出, 在其内外表面辅以手工标示裂纹的方法展现最终破坏的形态。与通过应变值判断其破坏的方法相结合, 研究隧道结构的地震动力破坏机理。

采用了套管式可变结构的内套管是所分析 6 段衬砌中破坏程度最轻微的, 仅在拱脚处附近有一贯通裂缝 (如图 10 所示)。内套管相对于其他衬砌段具有刚度较大, 质量较轻, 受到缓冲保护和围岩重力不直接作用其上等优势, 故受损轻微。与之对应, 从最终破坏现象来看, 外套管是 6 段衬砌中受损最为严重的。拱脚处完全破坏, 仰拱受压碎裂呈平板状, 但隧道断面上部裂纹较少 (如图 11 所示), 这与通过应变值分析一致。内套管, 自身结构和围岩三者的重力在地震中的作用是导致其拱脚和仰拱受损严重的直接原因。由于内外套管之间橡塑海绵的存在, 缓冲了来自围岩和内套管沿激震方向的地震动力作用。故外套管的拱顶、拱肩和边墙破坏较轻。无措施情况下隧道结构的拱脚和仰拱是抗震最为薄弱的环节, 裂纹遍布拱顶、拱肩和边墙, 且都是贯通裂缝 (如图 12 所示)。



图 10 第一组试验 A 段衬砌裂纹(内套管)

Fig. 10 Cracks on lining A in test one (inner casing)

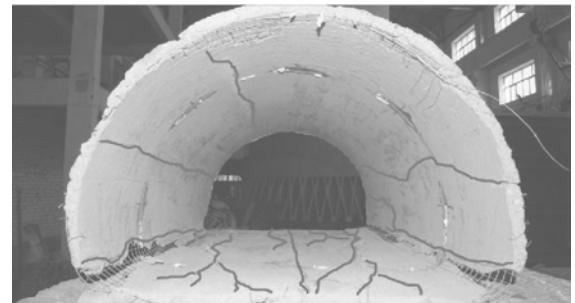


图 11 第一组试验 B 段衬砌裂纹(外套管)

Fig. 11 Cracks on lining B in test one (outer casing)

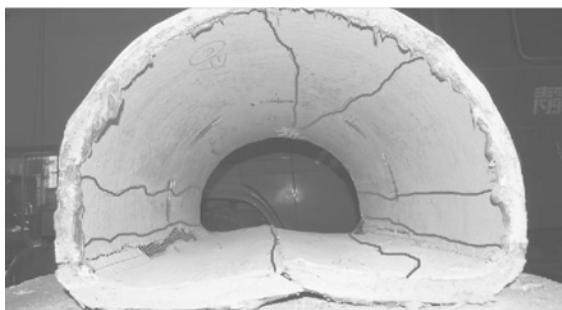


图 12 第一组试验 C 段衬砌裂纹 (无措施)

Fig. 12 Cracks on lining C in test one (no measures)

设置了减震缝的两段衬砌裂纹集中于除边墙外的各个部位, 但是拱脚和仰拱仅为开裂, 并未损毁, 其受损程度较无措施和外套管轻微(如图 13, 14 所示)。通过设置减震缝, 增加隧道结构沿纵向自由度而减小内力, 则垂直于激震方向的边墙表现最为明显, 沿隧道纵向所受内力较小, 裂缝极少。其次, 减震缝所在位置恰为断层处, 试验模拟断层的砾石密度为  $1.26 \text{ g/cm}^3$ , 而围岩模型的密度为  $1.43 \text{ g/cm}^3$ , 作用于隧道结构上的围岩压力较小, 这是导致拱脚和仰拱开裂却未损毁的原因。敷设了减震层的隧道结构在拱脚和仰拱处有贯通裂缝, 仰拱轻微隆起, 两侧拱肩均是非贯通裂缝(如图 15 所示)。减震层在地震过程中可以起到缓冲作用, 但并不能降低隧道结构受到的静压力, 因此, 拱脚和仰拱依然发生破坏。减震层的缓冲作用对于保护拱顶、拱肩和边墙是十分显著的。

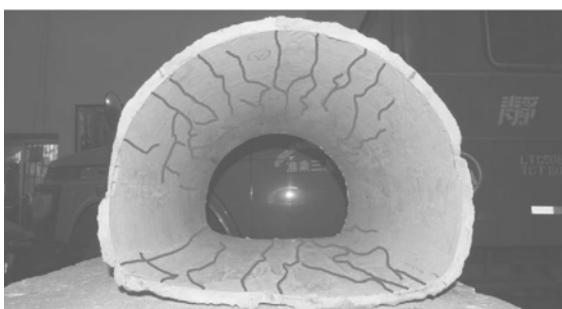


图 13 第二组试验 A 段衬砌裂纹 (减震缝)

Fig. 13 Cracks on lining A in test two (absorbing joint)

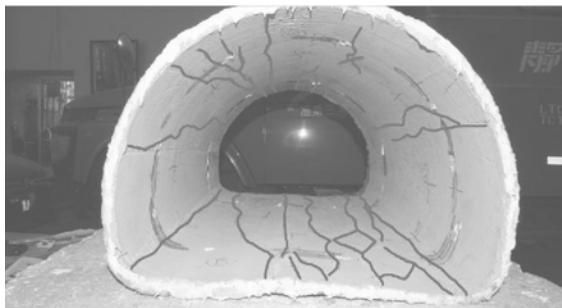


图 14 第二组试验 B 段衬砌裂纹 (减震缝)

Fig. 14 Cracks on lining B in test two (absorbing joint)

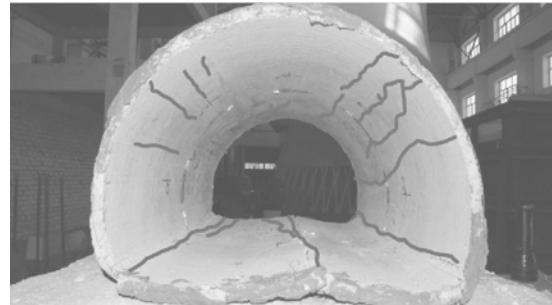


图 15 第二组试验 C 段衬砌裂纹 (减震层)

Fig. 15 Cracks on lining C in test two (damping layer)

### 3 结论与建议

本文通过开展振动台模型试验研究了隧道结构在跨断层部位分别采用套管式可变结构、减震层、减震缝和无措施情况下的地震响应特性与破坏机理。初步结论与建议如下:

(1) 本系列试验所研发的断层错动装置工作状况良好, 可以按照依托工程还原断层的同时兼顾错动效果, 获得理想的试验结果。

(2) 套管式可变形抗减震结构在地震过程中, 内外套管之间互相制约。内套管断面最小, 刚度提高, 质量降低, 惯性较小, 在地震过程中产生的力较小, 加之橡塑海绵的缓冲作用和外套管的保护作用, 抗减震性能最优。地震过程中, 外套管上部受到内套管的支持力, 下部受到内套管的压力, 震后受损最为严重。

(3) 采用减震层并不能降低隧道结构受到的静压力, 但是其缓冲作用可以显著提高隧道结构整体的耐震能力。

(4) 减震缝的存在可以提高隧道结构沿纵向的自由度, 从而降低内力, 减小隧道结构发生破坏的可能, 但整体减震效果不及减震层和套管式可变结构。

(5) 无论设置何种抗减震措施, 都无法避免隧道结构的仰拱和拱脚破坏, 且均是仰拱最先破坏, 拱脚其次。试验结束后拱脚的破坏最为严重, 其次为仰拱隆起。但设置抗减震措施可以降低二者的破坏程度。各种抗减震措施在该隧道衬砌断面型式下, 对保护拱顶、拱肩和边墙 3 个部位的效果差别较大。

(6) 根据试验结果, 建议抗震设防烈度为  $8^\circ$ , 设计基本地震加速度值为  $0.20g$  地区的跨断层隧道结构设置减震缝, 同时注意防水和提高衬砌混凝土强度; 抗震设防烈度为  $8^\circ$ , 设计基本地震加速度值为  $0.30g$  地区的跨断层隧道结构设置减震层; 抗震设防烈度为  $9^\circ$ , 设计基本地震加速度值为  $0.40g$  地区的跨断层隧道结构设置套管式可变形抗减震措施。

### 参考文献:

- [1] 高波, 王峥峥, 袁松, 等. 汶川地震公路隧道震害启

- 示[J]. 西南交通大学学报, 2009, **44**(3): 336 - 342. (GAO Bo, WANG Zheng-zheng, YUAN Song, et al. Lessons learnt from damage of highway tunnels in wenchuan earthquake[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, **44**(3): 336 - 342. (in Chinese))
- [2] 王峥峥. 跨断层隧道结构非线性地震损伤反应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (WANG Zheng-zheng. Nonlinear seismic damage response of tunnel structure across fault[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [3] CHEN J, SHI X J, LI J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform earthquake wave excitation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(11): 1400 - 1416.
- [4] 耿萍. 铁路隧道抗震计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (GENG Ping. Research on the seismic calculation method of railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [5] BURRIDGE P B, SCOTT R F, HALL J F. Centrifuge study of faulting effects on tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(7): 949 - 967.
- [6] HONEGGER D G, NYMAN D J, JOHNSON E R, et al. Trans-alaska pipeline system performance in the 2002 Denali fault, Alaska earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2004, **20**(3): 707 - 738.
- [7] HOU J S, TSENG D J, LEE Y H. Monitoring and evaluation after repair and reinforcement of damage 3-line freeway tunnel located within fault influenced zone[C]// 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress. Prague, 2007.
- [8] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Behaviour of deep immersed tunnel under combined normal fault rupture deformation and subsequent seismic shaking[J]. Bulletin of Earthquake Engineering 2008, **6**(2): 213 - 239.
- [9] MORADI M, ROJHANI M, GALANDARZADEH A, et al. Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to normal faulting[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, **12**(1): 155 - 164.
- [10] SIM W W, TOWHATA I, YAMADA S, et al. Shaking table tests modelling small diameter pipes crossing a vertical fault[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, **35**: 59 - 71.
- [11] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 穿越黏滑错动断层隧道减震层减震技术模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(9): 1753 - 1758. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Model tests on damping shake technology of shock absorption layer of tunnels crossing stick-slip faults[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(9): 1753 - 1758. (in Chinese))
- [12] 曲宏略, 张建经. 地基条件对挡土墙地震土压力影响的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1227 - 1233. (QU Hong-lue, ZHANG Jian-jing. Shaking table tests on influence of site conditions on seismic earth pressures of retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1227 - 1233. (in Chinese))
- [13] 王峥峥, 高波, 索然绪. 双洞隧道洞口段抗减震振动台试验[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(2): 71 - 76. (WANG Zheng-zheng, GAO Bo, SUO Ran-xu. Shaking table tests on entrance anti-seism of double track tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, **22**(2): 71 - 76. (in Chinese))
- [14] 曲宏略, 张建经, 王富江. 预应力锚索板桩墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 313 - 320. (QU Hong-lue, ZHANG Jian-jing, WANG Fu-jiang. Seismic response of prestressed anchor sheet pile wall from shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 313 - 320. (in Chinese))
- [15] ASAKURA T, KOJIMA Y. Study on the damage mechanism of mountain tunnel under earthquake and improvement of earthquake resistance[R]. Kyoto: Railway Technical Research Institute, 2006.