

文章编号:1001-4888(2005)01-0057-08

铁路隧道基底破坏力学形态的试验研究^{*}

施成华, 彭立敏, 王 伟

(中南大学 土木建筑学院, 长沙 410075)

摘要: 针对既有铁路隧道底部病害严重的现状,采用模型试验方法对该问题进行了研究。试验中主要对不同隧道铺底工况进行疲劳试验,以了解不同铺底工况疲劳裂纹的出现时间、扩展情况以及使用寿命等,同时对作用于铺底结构上的压应力及弯应力也进行了测试。试验结果表明,在机车轴重荷载作用下,作用于隧道铺底结构顶面的竖向压应力基本在 0.2MPa 以内,而铺底底面的弯拉应力一般在 0.8MPa 以上,铺底结构属于受弯破坏;另外,通过试验得到了 20cm 厚钢筋混凝土的隧道基底结构更优的结论。在试验成果的基础上,对隧道铺底结构的受力状态及其计算方法进行了探讨。

关键词: 铁路隧道; 基底病害; 模型试验

中图分类号: U455 **文献标识码:** A

1 前言

隧道基底病害是指既有铁路隧道经过一定时间的运营后,在隧道底部出现的铺底开裂,破损,下陷,向两侧外挤,以及翻浆、冒泥等现象。根据资料统计^[1],我国铁路隧道病害,尤其是隧道底部病害严重。全国现有运营铁路隧道近 5000 座,总延长 3000km,其中 3800 座约占 65% 的隧道存在不同程度的病害问题,而其中铺底病害又占有很高的比例。隧道基底病害对铁路运营会造成严重危害,它恶化了行车条件,限制了行车速度,严重地段还会危及行车安全。随着社会经济的发展,既有线路的运营日趋繁忙,行车速度也越来越高,隧道基底病害与繁忙运营间的矛盾日益尖锐;另外,随着隧道修建向长、大、深方向发展,地质条件也愈加复杂,今后遇到的隧道病害问题也会更加突出,因此,对铁路隧道基底病害整治问题进行研究具有非常重要的意义。

对于铁路隧道铺底病害问题,目前在国外已引起足够的重视,他们不仅局限于隧道病害的整治,更着重强化隧道底部结构的设计。目前我国工务部门在既有铁路隧道的病害整治方面也取得了一定的成效,积累了一定的经验。但是要从根本上解决隧道基底的病害问题,还必须从隧道基底结构形式的改进上做更深入的理论研究及试验测试。

2 试验概况及试验测试系统

2.1 试验概况

根据试验目的,试验模型的设计不考虑隧道衬砌,其影响通过采用具有一定刚度的约束来模拟(试

^{*} 收稿日期: 2004-01-27; 修订日期: 2004-07-25

基金项目: 贵州省科委计划项目(编号: 黔科 20021078)

通讯作者: 施成华(1973-),男,讲师,中南大学桥隧专业博士生,主要从事隧道与地下工程方面的教学与科研工作。E-mail: csusch@mail.csu.edu.cn

验中两端采用钢板、前后正面为观察裂纹采用有机玻璃),同时只考虑主要原因——列车冲击荷载的作用。试验中针对不同铺底结构形式进行多次重复振动试验,直至隧道铺底结构产生裂纹并最终破坏为止,记录最终的试验次数,即可选出最优的隧道铺底结构形式。

根据试验条件和实际需模拟的试验范围,取几何比例系数为 2:1,即 $C_l=2$ 。试验模型具体设计尺寸如图 1 所示。

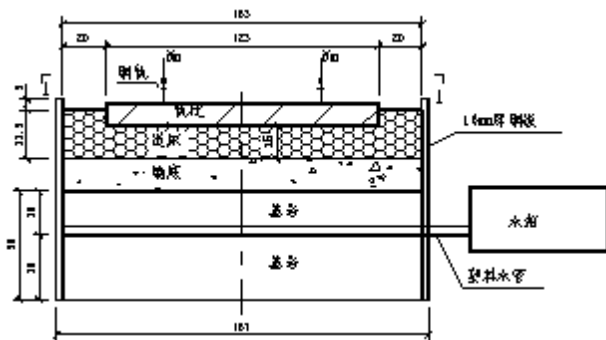


图 1 模型试验设计图(单位:cm)

Fig. 1 Sketch diagram of model experiment (unit: cm)

工况三的隧道铺底为 20cm 厚 C25 钢筋混凝土(双层钢筋,细筋密布,横向为受力筋),工况四的隧道铺底为 20cm 厚 C25 少筋混凝土(单层配筋且只有少数构造钢筋),工况五的隧道铺底结构为 20cm 厚钢筋混凝土(双层钢筋),且铺底与基岩之间加铺沥青垫层,工况六的隧道铺底结构为 30cm 厚素混凝土,每种工况进行三组试验。为真实反映现场基底所处的状态,试验中采用水箱在铺底底部基岩中加水进行模拟。

2.2 试验测试项目、测试仪器及测点布置

试验测试内容主要包括隧道铺底结构在等幅应力下的裂纹出现时间及使用寿命,隧道铺底结构顶面的压应力,不同加载次数下铺底结构顶底面的动、静应变以及疲劳裂纹的分布和扩展情况等。

铺底结构顶底面的动、静应变采用胶基丝绕式应变片进行测试,具体铺底混凝土板底部应变测点布置位置见图 2(图中尺寸单位为 cm)。另外板上部布置一个测点(对应图 2 中 5 号点的位置,点号为 7),轨枕底部布置了两个应变测点,测点布置成应变花的形式,以求出各测点的主应变和主应力。

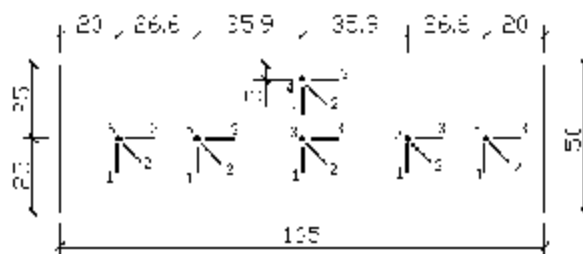


图 2 铺底应变测点布置图

Fig. 2 The strain testing point on tunnel bed

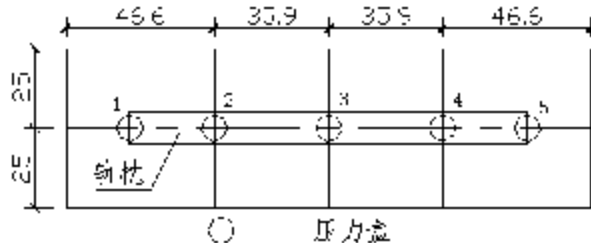


图 3 铺底压力测点布置图(单位:cm)

Fig. 3 The press testing point on tunnel bed(unit: cm)

试验中,采用 PMS-500 型数显式疲劳试验机实施加载,试验机最大加载压力为 500kN,加载频率为 2~8Hz,试验过程中可调整加载频率。在进行静载试验时为控制加载试验力的大小,采用 SCLY-2 型

由于不考虑材料自重的影响,测试结构中的应力只与外加荷载有关,模型试验材料的选取可不受相似判据的控制,因此模型试验采用与实体结构完全相同的材料制作。对于隧道基底围岩,同样采用混凝土材料进行模拟。

模型试验中考虑了六种不同隧道铺底结构形式的工况,工况一的隧道铺底为 10cm 厚 C15 素混凝土(模型试验铺底结构厚度为实际厚度的 1/2,以下同),工况二的隧道铺底为 20cm 厚 C20 素混凝土,

隧道铺底结构顶面的压应力采用单膜钢弦式压力盒进行测试,压力盒量程为 1.0MPa。压力盒布置在铺底混凝土板上部,具体位置见图 3(图中尺寸单位为 cm)。测试仪器采用 JMZX-300 振弦检测仪。

铺底结构的疲劳裂纹则采用放大镜进行观察,加载一定次数即观察一次。

数字测力仪对加载压力进行精确控制。模型与原型的荷载比关系为 $C_N=4$, 将作用在轨道上的机车轴重 23.0t 进行换算, 则作用在模型轨道单轴的重量为 5750kg。由于钢轨的作用, 机车单轴的重量并不完全作用于单根轨枕上, 按较不利工况考虑, 可得最大枕上静压力约为轴重的 0.4 倍, 实际加载时取该值, 即疲劳试验时的加载压力振幅为 0~2300kg。

3 试验结果及分析

3.1 铺底裂纹扩展情况及分析

各组试验疲劳裂纹的出现时间及描述见表 1, 试验后铺底板的典型裂纹分布见图 4, 由试验结果可知:

(1) 在机车轴重静载的作用下, 各种工况下的隧道铺底混凝土板均未产生裂纹, 而在机车振动冲击荷载的作用下, 经过一定的加载次数后, 隧道铺底混凝土板均产生了裂纹, 而且随着加载次数的增加, 裂纹不断扩展加宽, 这说明隧道铺底混凝土板是在列车振动冲击荷载的循环反复作用下产生疲劳破坏的。



图 4 试验后铺底混凝土板的典型裂纹分布图

Fig. 4 The distribution of the cracks on tunnel bed after experiment

(2) 20cm 厚双层配筋铺底混凝土板(包括铺底与基岩间加垫层和不加垫层两种工况)一般在加载 100 万次以上才开始出现疲劳裂纹, 且裂纹扩展缓慢, 其疲劳寿命估计至少在 300~400 万次; 而 20cm 素混凝土铺底结构出现裂纹的时间一般在加载 2 万次左右, 且裂纹扩展迅速, 加载 40 万次左右后铺底即已基本断裂, 可以认为该种隧道铺底混凝土结构的疲劳寿命为 40 万次左右; 30cm 素混凝土铺底结构出现裂纹的时间一般在加载 10 万次左右, 且裂纹扩展也较为迅速, 加载 80 万次左右后铺底即已基本断裂, 由此可见钢筋混凝土铺底结构的疲劳性能要大大优于素混凝土铺底结构。

(3) 从总体分布来说, 铺底混凝土破损及裂纹基本出现在沿线路纵向, 两根钢轨的正下方附近。这说明隧道铺底混凝土在机车荷载作用下以出现沿线路纵向的纵裂为主, 因此对于铺底混凝土结构应从横向予以加强。

3.2 竖向应力测试结果及分析

各次试验静载作用下铺底混凝土板顶面的竖向压应力测试结果见表 2。表中统计结果是按照式(1)计算得到。

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm 1.645\delta_{\sigma} \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 和 δ_{σ} 分别为竖向压应力测试结果的均值和均方差。

从表 2 中数据可知, 机车轴重荷载传递到隧道铺底上部各点的应力值大部分在 0.05~0.2MPa 之间。由于碎石道碴、铺底、基岩等不均匀性的影响, 虽然在试验过程中尽量保证了每个压力盒埋置要均匀, 但各次试验中相同位置的数据还是有一定的离散性。从总体统计分析, 在隧道铺底混凝土板上部, 以 2、4 点处的应力为最大, 1、5 点处的应力次之, 3 点处的应力为最小。从各点的应力大小来看, 隧道铺底混凝土板上的应力基本可认为是对称分布的。

将各工况下测试得到的铺底混凝土板上各点的应力进行统计分析, 可得各工况下铺底混凝土板的应力分布趋势见图 5。

表 1 各板疲劳试验裂纹分布结果表
Tab.1 The result of the cracks on each tunnel bed after fatigue experiment

工况	板号	裂纹出现时试验次数(万次)	最终试验次数(万次)	板 况 及 裂 缝 扩 展 情 况 描 述
板厚 20cm, 无筋	A	2	25	裂缝在板底部连通,并扩展至板上部,裂缝宽度 1.0mm 以上
	B	1	70	裂缝已完全贯通并将板切断
	C	2.5	40	裂缝在板底部连通,并扩展至板上部,裂缝宽度 1.0mm 以上
板厚 10cm, 无筋	D	1	47	有一条贯通裂缝将板完全切断,并出现多条裂缝
	E	0.8	15	裂缝宽度达 2mm 以上,混凝土板已完全碎裂为小块
	F	1.1	15	裂纹最宽处达 5mm 以上,并出现多条裂纹,裂缝在两条钢轨以下位置已基本将铺底混凝土板切断为三节
板厚 20cm, 双层配筋	G	10.4	80	裂缝仅出现在板底面,裂缝宽度在 0.5mm 以下
	H	124.1	124.3	加载至 80 万次后将应力幅加大为 0~46.0kN;裂缝仅在底面出现,裂缝宽度在 0.5mm 以下
	I	131	131.5	加载至 80 万次后将应力幅加大为 0~46.0kN;裂缝仅在底面出现,裂缝宽度在 0.5mm 以下
板厚 20cm, 单层少筋	J	6	60	板底裂缝已贯通,并扩展至板面,但板未完全断开
	K	4.5	60	板底裂缝已贯通,并扩展至板面,板已基本被裂缝切断,仅钢筋处有部分相连
	L	5	12	该工况由于试验机故障停止试验;裂缝在板底部连通,但仅出现在板底面,裂缝宽度为 1.0mm 左右
板 厚 20cm, 双层配筋, 且加垫层	M	138	150	裂缝仅出现在板底面,且特别细微,裂缝未在板底贯通
	N	115	150	裂缝在板底面贯通,但仅出现在板底面,且裂纹特别细微
	O	无	150	加载至 150 万次时,混凝土板表面没有出现可见微裂纹
板厚 30cm, 无筋	P	17	80	裂缝在混凝土板底面贯通,但未扩展到板上部,裂缝宽度达 1.0mm
	Q	15	80	有两条裂缝在板底部连通,裂缝宽度在 1.0mm 以内
	R	8.7	80	有一条裂缝在板底部连通,裂缝宽度在 1.0mm 以内

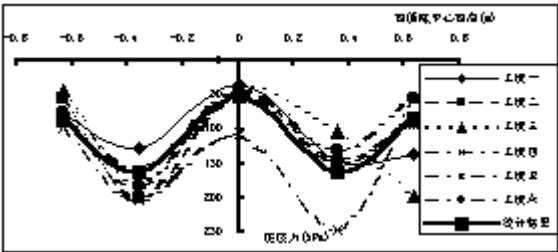


图 5 铺底混凝土板顶面的竖向压应力分布

Fig.5 The distribution of vertical press stress on tunnel bed

从图 5 可看出,各工况下隧道铺底混凝土板上的竖向压应力分布趋势没有明显的差异,可以认为是基本相同的,对测试结果进行综合统计分析,可得在上部机车静载作用下隧道铺底结构顶面的竖向压应力分布趋势线如图 5 中粗线所示。其统计公式可用式(2)表示为:

$$\sigma = -2871x^4 + 1223x^2 + 53 \tag{2}$$

式中: σ 为隧道铺底结构上的竖向压应力 (kPa); x 为距隧道铺底结构中心的距离 (m), $(-0.8\text{m} \leq x \leq 0.8\text{m})$ 。

表 2 静载作用下各铺底混凝土板顶面的竖向压应力 (MPa)

Tab. 2 The vertical press stress on the top of each tunnel bed under static load (MPa)

工况	点号 板号	1	2	3	4	5
板厚 20cm, 无筋	A	0.112	0.064	0.052	0.140	0.168
	B	0.060	0.148	0.032	0.180	0.136
	C	0.068	0.164	0.020	0.112	0.104
	均 值	0.080	0.125	0.035	0.144	0.136
板厚 10cm, 无筋	D	0.064	0.208	0.060	0.144	0.116
	E	0.060	0.112	0.056	0.148	0.020
	F	0.048	0.276	0.032	0.148	0.132
	均 值	0.057	0.199	0.049	0.147	0.089
板厚 20cm,双 层配筋	G	0.040	0.144	0.012	0.180	0.252
	H	0.008	0.160	0.064	0.020	0.136
	I	0.088	0.224	0.048	0.112	0.200
	均 值	0.045	0.176	0.041	0.104	0.196
板厚 20cm, 少筋	J	0.116	压力盒坏	0.120	0.244	0.020
	K	0.084	0.200	0.104	0.072	0.068
	L	0.088	0.204	0.092	0.424	0.076
	均 值	0.096	0.202	0.105	0.247	0.055
板厚 20cm,双 层配筋,加 垫层	M	0.036	0.132	0.044	0.152	0.124
	N	0.052	0.180	0.032	0.140	0.088
	O	0.080	0.168	0.052	0.128	0.060
	均 值	0.056	0.160	0.043	0.140	0.091
板厚 30cm, 无筋	P	0.072	0.208	0.048	0.116	0.072
	Q	0.056	0.164	0.036	0.124	0.048
	R	0.100	0.176	0.044	0.144	0.048
	均 值	0.076	0.183	0.043	0.128	0.056
总平均值 $\bar{\sigma}$		0.068	0.174	0.053	0.152	0.104
均方差 δ_{σ}		0.027	0.046	0.027	0.080	0.060
统计结果 σ		0.025~0.112	0.096~0.249	0.008~0.098	0.021~0.283	0.005~0.202

3.3 铺底结构底面的弯应力测试结果及分析

隧道铺底结构中的弯应力根据铺底上所贴应变片的测试数据进行计算得到,试验中浇注混凝土铺底结构的同时浇注立方体试块,通过压力机试验可得各板的弹性模量和泊松比,而后求得应力值,具体计算结果见表 3,从表中各工况的试验结果可看出:

(1) 从铺底混凝土板上应力的大小来看,局部最大弯拉应力在 0.8MPa 以上,其值接近于混凝土结构的弯曲抗拉允许应力,而局部最大弯压应力达到 1.2MPa 以上,但其值远小于混凝土的弯曲受压允许应力,这说明隧道铺底混凝土板在机车反复动载作用下的开裂破坏是因为混凝土受弯拉引起的。

表 3 静载作用下铺底结构上的弯应力测试结果(kPa)

Tab. 3 The bend stress on each tunnel bed under static load (kPa)

工况	板号	1		2		3		4		5		6		7	
		σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2
板厚 20cm, 无筋	A	450	-264	798	-120	756	198	402	-150	840	-192	786	-90	174	-1110
	B	852	198	应变片坏		516	-594	708	-426	498	-54	-144	-396	132	-558
	C	708	-36	810	-78	192	-270	288	-300	312	-168	114	-54	66	-336
板厚 10cm, 无筋	D	744	660	648	-1404	612	-480	108	-1608	654	-18	-102	-528	36	-786
	E	696	582	732	-348	714	150	702	246	612	426	612	-792	60	-714
	F	-120	-780	606	-360	276	-90	18	-450	-12	-1056	-138	-228	780	264
板厚 20cm,双 层配筋	G	390	-540	780	-1266	应变片坏		应变片坏		780	-138	-114	-366	-72	-990
	H	810	450	798	264	642	-366	246	-1266	816	6	798	-6	-252	-612
	I	258	-450	768	342	462	240	84	-354	834	222	-54	-450	-288	-1494
板厚 20cm, 少筋	J	498	-258	450	-1110	366	-246	498	276	822	372	未测		672	252
	K	应变片坏		-24	-1470	618	120	798	540	应变片坏		未测		应变片坏	
	L	应变片坏		216	-1314	498	-888	306	54	516	252	未测		-264	-636
板厚 20cm, 双层配 筋,加 垫层	M	应变片坏		863	389	552	-172	537	-39	应变片坏		378	-144	250	-460
	N	715	63	748	158	585	343	564	89	932	270	472	-466	425	-781
	O	573	149	866	370	349	64	151	85	711	211	624	269	-46	-505
板厚 30cm, 无筋	P	369	257	789	486	677	330	289	187	369	311	582	517	未测	
	Q	390	50	748	431	443	-353	691	254	565	380	-300	-605	未测	
	R	431	-87	867	12	514	114	526	-31	754	404	172	-144	未测	

(2) 根据测试结果,对铺底结构上最大主拉应力的方向进行了计算,计算结果显示,最大主拉应力的方向基本垂直于实际铺底混凝土板开裂的方向,这也进一步说明了隧道铺底混凝土板的破坏是因为混凝土的受弯拉造成的。

4 隧道铺底结构受力状态分析

在我国铁路工程结构基础计算时,对隧道铺底结构的设计与计算一直不是很重视,铁路隧道设计手册和设计规范对铺底的计算方法也没有提出具体要求。长期以来我国铁路隧道所采用的标准图对基底设计的要求,在Ⅳ、Ⅴ类围岩直墙式衬砌铺底仅为 10cm 厚的 10 号素混凝土,现改为 20cm 厚素混凝土

仍显薄弱。对隧道铺底结构的受力状态也缺乏足够的认识,现场工务技术人员将铺底看作是一种受压结构,在进行隧道铺底病害整治时就一味地加厚铺底混凝土的厚度,调查发现即使铺底混凝土厚度达到1.0 m以上仍出现了铺底断裂,一侧明显下沉的现象^[9]。

当隧道铺底结构和基岩粘结良好且基岩致密均匀时,其横断面受力状态可用图6简化表示。铺底结构受到由道碴传递过来的上部列车荷载的压力并产生变形,其变形在竖向受到基岩抗力的约束,在水平方向受到水沟壁抗力的约束以及基岩与铺底粘结力的约束,另外在梁的两端还受到转角约束,此时铺底结构的工作状态可看作是两端受到部分约束的弹性地基梁(在空间上就是弹性地基板)。铺底地基梁在上部荷载的作用下处于受弯和受剪作用状态,在铺底结构中产生弯矩和剪力。试验结果很好地证明了这一点。

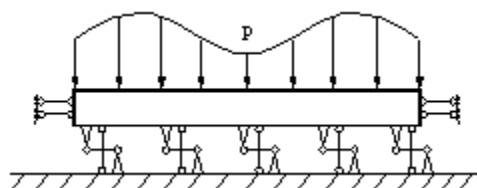


图6 隧道铺底结构受力状态示意图

Fig. 6 Diagram of mechanics pattern of tunnel bed structure

在实际隧道中,由于施工条件等因素的影响,隧道铺底结构与基岩不可能很好的粘结共同变形。特别是在长期运营过程中,在列车动载及水的共同作用下,铺底与基岩之间产生空洞。此时,隧道铺底结构的受力状态有所改变,在水平向铺底与基岩间的粘结力约束不再存在,在竖向由于铺底与基岩之间空洞而使得基岩的抗力约束只部分存在,铺底结构相当于底部部分悬空的多跨弹性支承的连续梁(板),其所承受的弯及剪应力将大增,并最终导致铺底结构的开裂破坏,从而产生基底翻浆冒泥等病害。

5 结论

针对既有铁路隧道底部病害严重的现状,采用模型试验方法对该问题进行了研究。试验中主要对六种不同隧道铺底工况进行疲劳试验,以了解不同铺底工况疲劳裂纹的出现时间、扩展情况以及使用寿命等,同时对作用于铺底结构上的竖向压应力及弯应力也进行了测试,以了解在机车荷载作用下隧道铺底结构上的应力分布。试验结果表明:

(1) 在机车轴重荷载作用下,作用于隧道铺底结构顶面的竖向压应力在0.2 MPa以内,而铺底结构中的弯拉应力一般在0.8 MPa以上,由此可知隧道铺底结构是在弯拉应力的作用下破坏的;

(2) 从总体分布来说,铺底混凝土破损及裂纹基本出现在沿线路纵向,两根钢轨的正下方附近。这说明隧道铺底混凝土在机车荷载作用下以出现沿线路纵向的纵裂为主,因此对于铺底混凝土结构应从横向予以加强;

(3) 根据试验结果,20cm厚钢筋混凝土的隧道基底结构疲劳寿命最长;

(4) 在试验结果的基础上,对隧道铺底结构的受力状态进行了分析,所得结论为进一步进行隧道基底病害的彻底整治提供了依据。

参考文献:

- [1] 朱万听,李兰勤. 隧道基底病害现状及成因分析[J],现代隧道技术,2001,38(5):42~44(Zhu Wantin, Li Lanqin. Base diseases in tunnel and their cause analysis. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(5): 42~44 (in Chinese))
- [2] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册—隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1995 (The second surveying and designing institute of railway department. Design manual of railway engineering—orbit; Tunnel. Beijing: China Railway Publishing House, 1995 (in Chinese))
- [3] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册—轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,1999 (The first surveying and designing institute of railway department. Design manual of railway engineering—tunnel; Rail. Beijing: China Railway Publishing House, 1999 (in Chinese))
- [4] 曾树谷. 铁路轨道动力测试技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1988 (Zeng Shugu. Dynamical testing technology of railway orbit. Beijing: China Railway Publishing House, 1988 (in Chinese))

- [5] 上海铁道学院. 铁路轨道及路基[M]. 北京:人民铁道出版社,1979 (Shanghai railway university. Railway orbit and foundation. Beijing: China Railway Publishing House, 1979 (in Chinese))
- [6] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京:高等教育出版社,1988 (Xu Hao. Fatigue strength. Beijing: Higher Education Press, 1988 (in Chinese))
- [7] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1982 (Xu Zhilun. Elastic mechanics. Beijing: Higher Education Press, 1982 (in Chinese))
- [8] 王其昌,陆银根. 铁路新型轨下基础应力计算[M]. 北京:中国铁道出版社,1987 (Wang Qichang, Lu Yinggen. Stress calculation of new foundation under rail of railway. Beijing: China Railway Publishing House, 1987 (in Chinese))
- [9] 唐先国. 隧道铺底破裂及防治[J]. 路基工程,1998,(1):59~61 (Tang Xianguo. The destruction and repairing of tunnel bed. Roadbed Engineering, 1998,(1): 59~61 (in Chinese))

An Experimental Study on Mechanics Pattern of Bed Disease in Railway Tunnel

SHI Cheng-hua, PENG Li-min, WANG Wei

(Civil Engineering Department, Center South University, Changsha, 410075)

Abstract: In view of the severe situation about the bed disease in the existed railway tunnel, the model experimental method is used to study the problem. Fatigue tests were performed on the different tunnel bed modes in order to know the emerge time and the expansion condition of fatigue cracks and the service life of them. And the compressive stress and bending stress on the tunnel bed were also tested. The experimental results show that the tunnel bed is destroyed by bending stress when the compressive stress acting on tunnel bed is less than 0.2 MPa and the bending stress in it is generally larger than 0.8 MPa under the axial load of locomotive, the tunnel bed is destroyed because the bending stress is circularly acted on and it is large. A conclusion also can be drawn that the tunnel bed construction can be optimized if it is made of 20 cm—thick reinforced concrete. Based on the experimental results, the mechanics pattern of tunnel bed construction is analyzed at the end.

Key words: railway tunnel; bed disease; model test