

文章编号: 1000-7598(2009)02-0399-07

提速条件下粉土铁路路基动态稳定性研究

刘建坤, 肖军华, 杨献永, 陈立宏

(北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 路基的动态响应及稳定直接决定了提速列车运行的舒适度和安全性。通过室内循环三轴试验, 模拟了路基在湿度变化与提速列车动荷载作用下的动态特性。根据试验结果, 结合既有线提速路基的动应力变化规律发现: 在最优含水率附近, 当压实系数为 0.90, 提速情况下路基可保持稳定状态; 若压实系数为 0.85, 在动应力不超过 70 kPa 时, 路基稳定性较好, 但随着动应力水平增加和加载频率增大, 路基的累积变形加剧并产生动强度破坏。列车提速使路基的弹性变形增大, 但对路基的回弹模量影响较小。路基湿度增加导致临界动应力、回弹模量显著降低, 而回弹应变、循环累积应变迅速增加, 有可能导致路基产生动强度破坏, 因此, 雨季时应限速行车。

关 键 词: 列车提速; 路基; 粉土; 动态稳定性; 循环三轴试验

中图分类号: U 213.1⁺5

文献标识码: A

Study on dynamic stability of silt subgrade subjected to train moving loading

LIU Jian-kun, XIAO Jun-hua, YANG Xian-yong, CHEN Li-hong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Comfort and safety of moving train is directly determined by dynamic response and stability of railroad subgrade. In order to investigate behaviors of silt subgrade soils subjected to moving train loading, cyclic triaxial tests including conditions of soil compacting factor, water content, deviator stress, and loaded frequency were conducted in laboratory. Based on the test results and field measurements of subgrade stress during train loading, it is found that with train speed increasing, silt railroad subgrade should be stable if its natural moistness is near to optimum water content and compacting factor is not less than 0.9; moreover, if subgrade compacting factor is only 0.85 and deviator stress of subgrade surface is less than 70 kPa, subgrade is also stable; but it would lose stability at higher deviator stress level. With train speed increasing, the elastic deformation of subgrade rises linearly, but resilient modulus changes negligibly. With increase in saturation, the threshold stress and resilient modulus of subgrade decrease significantly, while the elastic strain and cumulative strain increase sharply; and it may result in failure of subgrade, so train speed should be limited in wet season in order to reduce subgrade deviator stress.

Key words: train speed-increasing; subgrade; silt; dynamic stability; cyclic triaxial test

1 引 言

随着我国既有线提速, 铁路路基的强度、变形和稳定性越来越重要。提速试验已将列车平稳性指标和车体振动加速度作为提速的重要指标来评判, 这就要求作为轨道基础的路基具有更高的强度和更好的均匀性。但对于我国铁路既有线, 由于建成时的标准偏低, 在不良土质条件、气候水文环境和列车动荷载作用下各种路基病害频繁发生, 随着列车

行车速度加快、行车密度增加、牵引质量和车辆轴重加大, 将加剧线路和列车的振动, 增加路基承受动荷载与振动频率的水平, 提高路基的振动加速度和弹性变形, 加快路基的累积变形和疲劳破坏。

当前, 围绕提速列车荷载下路基稳定性这一课题, 铁路部门目前主要采取路基原位试验、开行试验列车进行动态测试和数值仿真等研究手段^[1]。这些是行之有效的方法, 但也存在某些不足。如不能考虑路基在不利自然条件下的稳定性, 也不能考虑

收稿日期: 2007-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(No.50678020); 北京交通大学科技基金(No.2005SM034); 联合资助项目。

第一作者简介: 刘建坤, 男, 1965年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事路基工程与工程冻土方面的研究。E-mail: jkliu@bjtu.edu.cn

通讯作者: 肖军华, 男, 1980年生, 博士研究生, 主要从事路基结构及动力特性研究。E-mail: xjh1221@sohu.com

长期列车荷载下路基的疲劳特性等。

现行的既有线提速路基技术条件^[2]没有考虑列车荷载对路基的动力作用,使得列车运行对路基的影响难以定量计算,路基的评判与加固缺乏理论指导,给铁路运输带来安全隐患。因此,为适应铁路新的发展要求,有必要研究提速列车荷载下既有线路基的动态稳定性及路基产生破坏的主要条件及控制性参数。

粉土广泛分布在我国黄河流域地区,它具有弱可塑性、低黏结性、高分散性等特点。干时,虽稍有黏结性,但易被压碎、扬沙;浸水时,则很快被湿透,无侧限下易形成流动状态,作为路基填料其工程性质很不稳定。从京秦、京九等线粉土路基地段的调查中发现^[3],路基基床发生了不同程度的下沉松软、翻浆冒泥、道碴陷槽等病害,列车提速、重载和行车密度的增加又将加大病害的发展。

文献[4]表明,可以借助室内循环三轴试验来模

拟现场路基在一定物理力学状态下受列车荷载作用表现的弹性变形、回弹模量、累积塑性变形及临界动应力等动态特征,为研究路基在提速列车动荷载与自身物理状态变化下的变形、强度特性及稳定性提供参考。

基于上述考虑,本文通过循环三轴试验,模拟了提速列车荷载作用下,由于路基动应力水平和加载频率的提高,不同压实系数、湿度状态的粉土路基的力学响应。根据试验结果,结合既有线提速路基动应力的变化规律,分析了提速下粉土路基的动态稳定性条件。

2 试验设计

2.1 土样性质

试验用土取自京九铁路曲线改造后废弃路段原路基填土,里程 K381+000~K594+434,位于鲁西南境内,其基本物理力学性质如表 1。

表 1 粉土的基本物理力学性质指标
Table 1 Basic physico-mechanical indices of silt

取土部位	比重	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	颗粒百分比 /%			最优含水率 /%	最大干密度 /(g/cm ³)
					0.25~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm		
K381+000	2.657	30.4	21.4	9.0	11.38	78.71	9.91		
K392+000	2.643	29.5	20.8	8.7	19.73	66.80	13.47	11.96	1.87
K594+434	2.623	27.6	20.7	6.9	20.99	70.85	8.16		

2.2 动三轴试验条件

(1) 试验仪器: 试验在 MTS858.2/TESTSTARII 双向液压伺服多功能循环三轴仪上进行。该仪器可进行应力或应变控制模式的单向或双向循环三轴试验,并满足多种型式的加载波形和频率。

(2) 试样条件

根据文献[5],土的动力性质的主要影响因素有:①荷载条件,包括循环荷载作用次数、加载时间和频率、围压与偏应力水平等;②土的物理状态,包括含水率和干密度;③应力历史等。因此,试验中从试样条件、动荷载水平两方面尽可能模拟既有线提速路基的物理状态与应力状态。

京九线黄泛区粉土路基当前的基床压实系数最大为 0.95,平均为 0.89;京秦线 DK414~416 粉土路基基床的压实系数为 0.79~0.96^[3]。现行的提速线路路基技术条件规定^[2],路基基床的压实系数应满足 0.89~0.91 的要求。为此,本次试验选取 0.85、0.90 两个压实系数进行对比试验,文中统一以 K 表示压实系数。

含水率是影响土体动力性质的又一最主要因素(Seed(1955 年)^[6],Li 和 Selig(1994 年)^[5],Muhanna

(1998 年)^[7])。路基遇到不利季节(如雨季和冻融期)含水率增加,导致服务性能下降,在列车动荷载作用下可能失稳。因此,应主要考察路基土在最优含水率湿侧状态的动态特性。为此,本文按最优、自由浸泡及 18%配置 3 种含水率进行试验,试验完成后测定试样含水率。

(3) 应力状态

① 动应力波形: 图 1 中秦沈线路路基基床表面的动应力实测曲线^[8]表明,室内可采用半波正弦曲线近似模拟路基面上的动应力。

② 动应力幅值: 动应力大小是影响土体动力性质的重要因素^[5-7]。提速列车荷载下路基动应力增加,可使路基土的累积塑性变形和弹性变形增大,甚至发生动强度破坏。根据研究,路基动应力的幅值与机车车辆运行特性(机车车辆类型、轴重及运行速度)、线路(线路结构及状态、线路平面及纵断面、线路平顺情况、钢轨类型、枕木类型及间距、道碴种类、厚度)及其基础状态(路基土质与刚度)等诸多因素有关。国内近些年对几条提速干线的路基动应力测试表明^[9],路基动应力随列车速度和轴重的增大线性增加,但 95%的路基面动应力不超过

46.95 kPa (动车组)、87 kPa (货车机车)、71.86 kPa (货车车辆) 和 86.83 kPa (双层集装箱列车); 99 % 的动应力不超过 59.63 kPa (动车组)、110.5 kPa (货车机车)、91.27 kPa (货车车辆) 和 110.3 kPa (双层集装箱列车)。因此, 试验时应主要考察土体在动应力水平 σ_d 低于 110 kPa 时的变形、强度特性及动态稳定性。

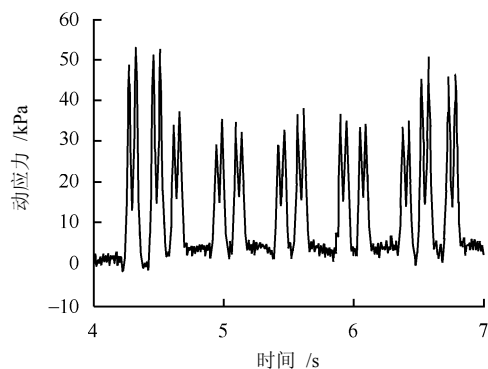


图1 路基面上的实测动应力^[8]

Fig.1 Typical stress pulse wave on subgrade surface

③ 列车荷载作用频率: 路基土的加载频率 f 与列车运行速度、车长、转向架、轴距等有关, 但对路基影响最大的频率是车辆的通过频率, 即 $f = v/l$, v 为列车运行速度, l 为车长。加载频率增大可使土体的临界动应力降低、塑性累积应变增加^[8], 因此, 列车提速对路基的动应力、加载频率加大, 可使路基产生疲劳破坏。根据既有提速列车的运输条件, 取 $v \leq 200$ km/h, $l = 23.6$ m, 则 $f \leq 2.35$ Hz。循环三轴试验时, 取 f 为 1、2 Hz 进行对比试验。除研究频率的影响外, 其余试验按 $f = 1$ Hz 进行。

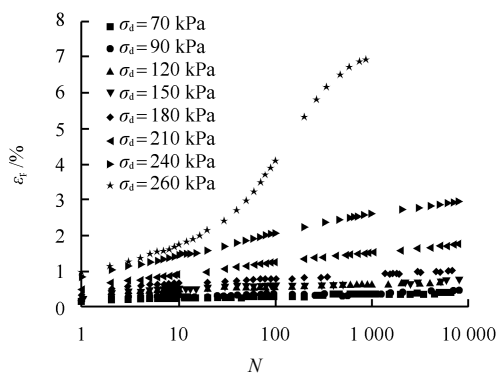
④ 围压: 路基应力实测表明^[1], 基床表层的侧压力较低, 为 20~60 kPa。此次试验取围压 $\sigma_3 = 20$ kPa 是偏安全的。

(4) 排水条件: 认为列车瞬时动荷载作用下路基土的水来不及排出, 采取固结不排水试验。

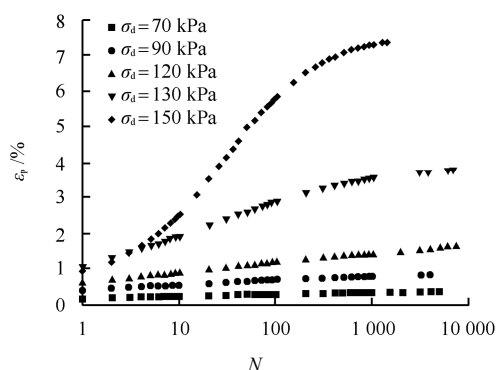
3 试验结果及分析

3.1 动应力、加载频率对路基动变形及临界动应力的影响

图2为最优含水率和振动频率 $f = 1$ Hz 时, 土体在不同动应力下的累积塑性应变 ε_p 与振次半对数 $\lg N$ 关系曲线。图3为在其他条件相同、振动频率 $f = 2$ Hz 时, 不同动应力下的 ε_p - $\lg N$ 关系曲线。



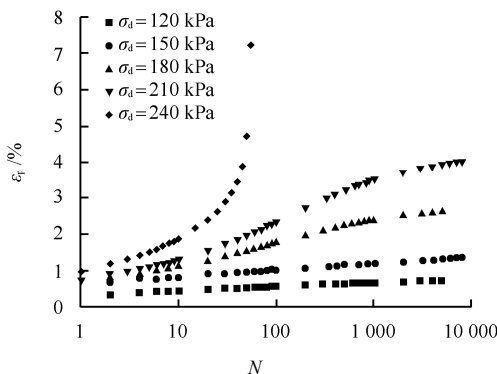
(a) $K = 0.90$



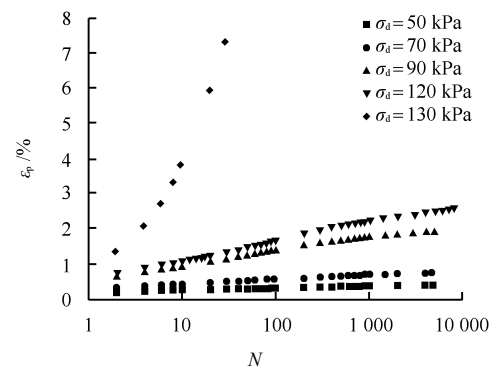
(b) $K = 0.85$

图2 不同动应力下的振次-累积应变关系曲线 ($f = 1$ Hz)

Fig.2 Effect of deviator stress on permanent deformation



(a) $K = 0.90$



(b) $K = 0.85$

图3 不同动应力下的振次-累积应变关系曲线 ($f = 2$ Hz)

Fig.3 Effect of deviator stress on permanent deformation

由图 2、3 可知,循环荷载下粉土路基土存在临界动应力 σ_{cr} (Larew 和 Leonard (1962 年); Heath (1972 年); Raymond 等 (1979 年))^[10]: 即动应力超过一定水平时,塑性应变迅速增大直至试样破坏,而动应力小于该值时,随着振动次数的增加,塑性应变趋于稳定,试样强化。从图中还可以看出,在既有线路基动应力水平范围内,路基土的累积塑性变形相对较小。

图 2 表明,在最优含水率下,加载频率 $f = 1 \text{ Hz}$ 时,压实系数为 0.90 的土体临界动应力约为 240 kPa,压实系数为 0.85 的土体临界动应力约为 130 kPa,均比既有线路基的动应力水平大,但压实系数对粉土的临界动应力有显著影响,压实系数为 0.90 的临界动应力比 0.85 的要高约 1 倍。

同样,从图 3 可以看出,加载频率 f 增加到 2 Hz,压实系数为 0.90、0.85 的土体的临界动应力分别约为 210、120 kPa,均比 $f = 1 \text{ Hz}$ 的临界动应力低。这说明,列车提速对路基的加载频率加快,导致路基的临界动应力略有下降,但变化相对不明显。

英国 Heath 等 (1972 年)^[11]最早提出以路基土的临界动应力作为路基设计的控制参数,至今一些国家的铁路组织也采用了该指标。但作为以变形控制为目的的路基,在通过循环三轴试验确定路基土的临界动应力时,其关键是指定合适的路基土应变破坏标准(时机)以及在现场相对应的动荷载循环作用次数,目前对这方面的研究还不够。

图 2、3 对临界动应力的取值直接采用了土体结构破坏的原则。事实上,由于许多时候路基在没有破坏之前,已经产生了超过容许的塑性变形而影响其正常使用(如高塑性黏土)。因此,作为路基土临界动应力的应变破坏标准,应低于土体结构破坏时的应变水平。如 Cheung (1994 年)^[12]认为,可采用使土体在 1 000 次循环加载中产生的塑性应变达到 1 %对应的应力水平作为路基土的临界动应力,但不同土体类型和变形要求的路基在正常使用期限内的应变破坏标准是不一样的。

图 4 是循环荷载次数为 5 000 次时两种压实系数的路基土在不同加载频率下的 $\varepsilon_p - \sigma_d$ 曲线。由图可知,频率增加,导致路基的累积变形加剧,动应力水平越高,或路基压实系数越低,频率的增大对土体累积应变的影响越明显。如压实系数为 0.9 的土体,在动应力 120 kPa 下,频率分别为 1、2 Hz 时的累积塑性应变只相差 0.23 %,在上述其他条件相同,而动应力水平分别为 150、180、210 kPa

时,不同频率下土体的累积应变分别相差 0.55 %、1.48 %、2.02 %。对于压实系数为 0.85 的土体,在动应力为 70 kPa 时,不同频率下的累积塑性应变相差 0.33 %,随着动应力水平越高,差值越大。

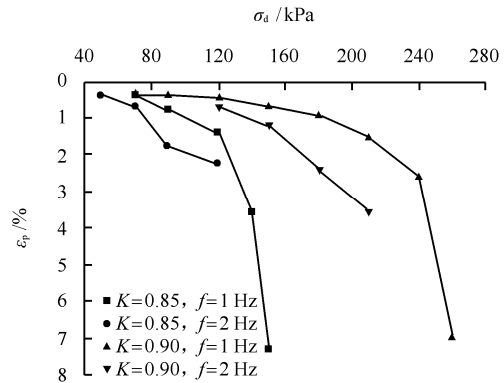


图 4 $\varepsilon_p - \sigma_d$ 曲线
Fig.4 Curves of $\varepsilon_p - \sigma_d$

根据上述试验结果,并结合既有提速路基的动应力变化规律,在 $\sigma_d < 70 \text{ kPa}$ 时,压实系数为 0.85 的路基土不会因频率增大而变形加剧,但在动应力水平较高时,变形随频率增大急剧上升,动应力为 120 kPa 时试样产生破坏,而在 $\sigma_d < 120 \text{ kPa}$ 内,压实系数为 0.90 的路基则不会由于频率的增大而导致变形加剧和破坏。因此,列车提速时应防止压实系数低的路基产生疲劳破坏。

图 5、6 分别为不同压实系数的路基土在不同加载频率下的回弹模量 M_r 、弹性应变 ε_e 与动应力 σ_d 的关系曲线。

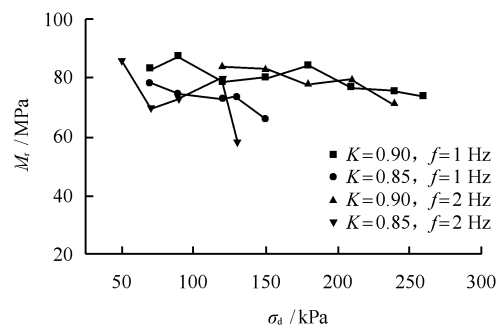


图 5 $M_r - \sigma_d$ 曲线
Fig.5 Curves of $M_r - \sigma_d$

由图 5 可知,动应力小于土体临界动应力时,回弹模量随动应力增加呈波动状,有略减小的趋势,且加载频率对回弹模量影响较小;达到临界动应力土体的回弹模量最小;动应力大于土体的临界动应

力,回弹模量随动应力增加逐渐减小,且频率越高回弹模量越低;此外,压实系数高的土体具有较高的回弹模量。根据既有提速路基的动应力水平可知,列车提速对路基土的回弹模量影响不大。

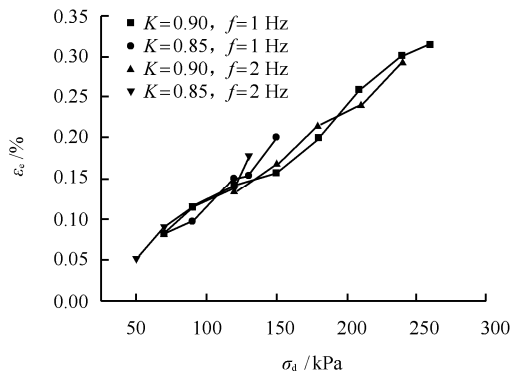


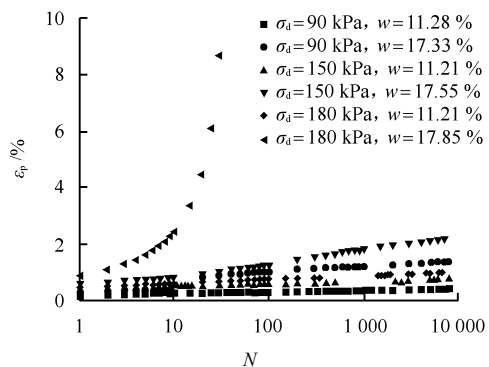
图6 $\varepsilon_e - \sigma_d$ 曲线
Fig.6 Curves of $\varepsilon_e - \sigma_d$

由图6可知,回弹应变随动应力增加而近似线性增大,破坏试样的回弹应变较大。动应力小于临界动应力时,频率对回弹应变影响很小。试验中 $\sigma_d < 120$ kPa时,回弹应变为0.08%~0.16%,与既有线路基面的弹性应变实测值(0.06%~0.22%)^[13]比较接近。与临界动应力一样,土体也存在“临界应变”(Sheeran(1980年)、杨灿文(1987年))^[13]:当重复荷载下土体的回弹应变不超过这一值时,试样强化,反之就破坏,且土体的临界应变具有相对恒定的数值,可作为现场测定路基状态的参数。

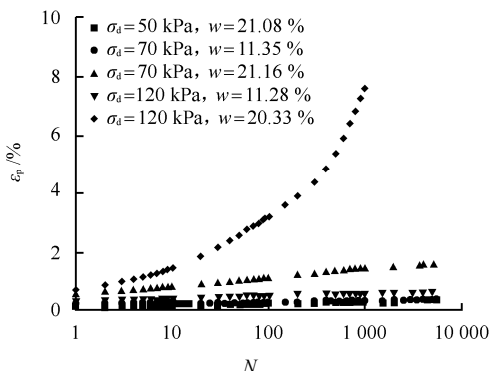
3.2 湿度增加路基土的动变形及临界动应力

铁路路基完全暴露于自然环境中,受气候水文条件的变化路基土的湿度状态容易改变。笔者通过对不同饱和度的压实粉土的强度试验可知^[14],粉土的抗剪强度参数,尤其是凝聚力随含水率的增加呈幂函数递减,因此,压实粉土的水稳性较差。图7给出了 $\sigma_d < 120$ kPa范围内不同含水率的路基土的变形曲线,图8为不同压实系数、不同动应力水平的 $\varepsilon_p - w$ 变化规律。

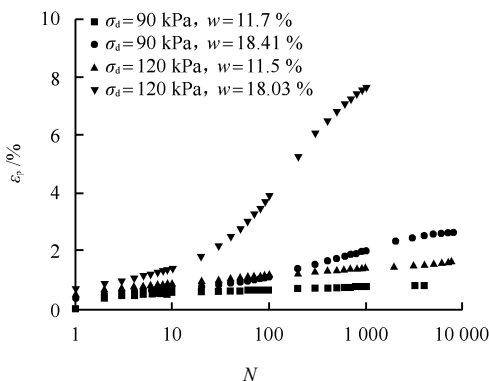
从两幅图可以看出,含水率增加,土体的累积应变迅速增大,且动应力水平越高或土体压实系数越低时,变化规律更加明显。因此,不同含水率的土体的变形特性存在明显差异。在同样的动应力水平下,高含水率的土体可呈破坏型,而低含水率的土体可呈强化型。



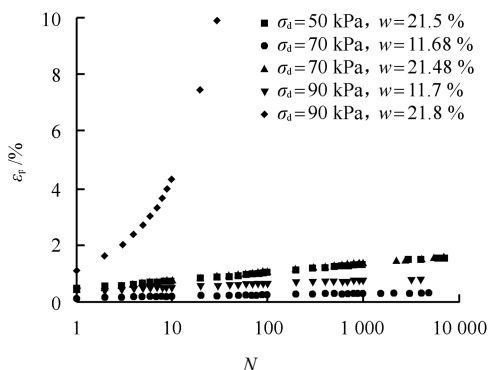
(a) $K = 0.90$



(b) $K = 0.90$



(c) $K = 0.85$



(d) $K = 0.85$

图7 不同含水率下的振次-累积应变关系曲线
Fig.7 Effect of water content on permanent deformation

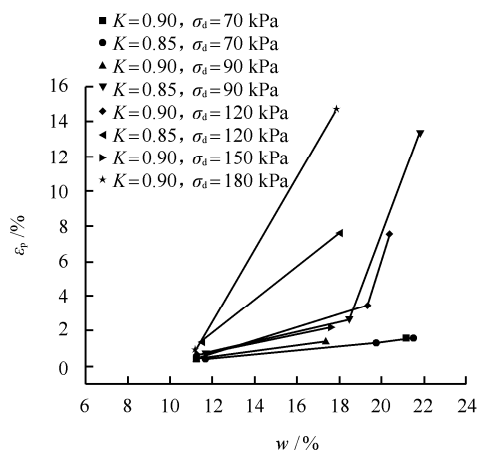
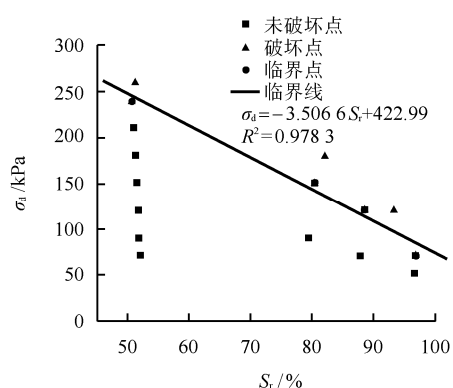
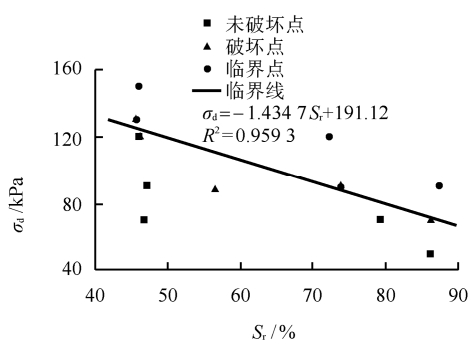


图8 ε_p - w 曲线
Fig.8 Curves of ε_p - w

图9研究了路基土在不同湿度下的临界动应力。图中各个点代表每次试验中试样的饱和度与施加的动应力大小,将所有的点绘于 σ_d - S_r 坐标中,再根据每次试验得出的 ε_p - $\lg N$ 典型曲线,判别试样是趋于强化、破坏还是临界状态,并绘出由所有的临界点回归得到的区分破坏点和未破坏点的直线,即为临界状态线。



(a) $K = 0.90$



(b) $K = 0.85$

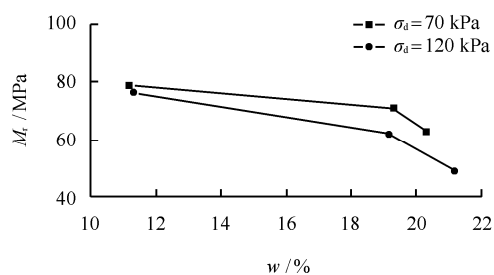
图9 湿度变化对临界动应力的影响

Fig.9 Effect of water content on threshold stress

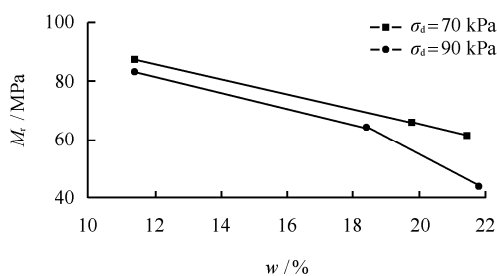
从图9可以看出,路基土饱和度增加,临界动

应力线性降低,处于同一饱和度的土体,压实系数高的临界动应力高。若考虑路基完全饱和这一最不利状态,压实系数为0.9的路基临界动应力约为70 kPa,而压实系数为0.85的路基临界动应力约为50 kPa,均大大低于既有线路基的最大动应力水平。由于路基的动应力随速度增加线性增大,因此雨季应限速行车以减少路基的动应力。

图10、11分别为含水率对回弹模量和回弹应变的影响。



(a) $K = 0.90$



(b) $K = 0.85$

图10 含水率对回弹模量的影响

Fig.10 Effect of water content on resilient modulus

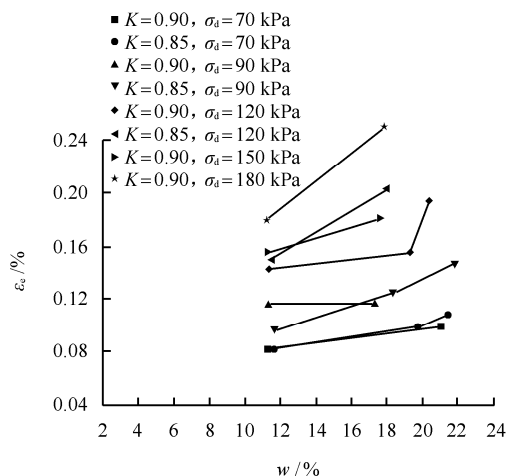


图11 含水率对回弹应变的影响

Fig.11 Effect of water content on resilient strain

由图10可知,路基土的回弹模量随含水率增加逐渐降低,土体越趋近于饱和,减小速率越大;

弹性应变随含水率增加而逐渐增大(图11),动应力水平越大、或试样饱和度越高、或压实系数越低,其增加速率越大。

上述研究表明,路基土的湿度增加导致线路状态的急剧恶化。一方面,由于路基刚度减小、动变形增加,影响了列车行驶速度的提高(Fortin, 1984年)^[15];另一方面,还有可能由于列车荷载下路基的动应力超过了路基土的临界动应力,而导致路基动强度破坏。

4 结 论

根据室内循环三轴试验,并结合既有线提速路基的动应力变化规律,本文得到以下结论:

(1) 提速列车荷载下路基动应力增加、加载频率加快,当路基在最优含水率附近、压实系数不低于0.90,路基稳定性较好;对于压实系数只有0.85的路基,当路基面 $\sigma_d < 70$ kPa,路基可保持稳定;而 $\sigma_d > 70$ kPa,路基因为加载频率增加导致累积变形加剧,并在更大的动应力下产生动强度破坏。

(2) 路基的弹性应变随动应力增加而近似线性增长,最大弹性应变在0.2%左右,提速列车荷载对路基的回弹模量影响较小。

(3) 路基湿度增加导致线路状况急剧恶化。路基临界动应力、回弹模量显著降低,而回弹应变、循环累积应变迅速增加,有可能导致路基产生动强度破坏,因此雨季时应限速行车。

(4) 为了将室内循环三轴试验结果更好地应用到提速线路路基动态稳定性分析中,在今后的研究中,还应结合具体线路的运量、养护维修、路基容许弹塑性变形等确定合理的路基基床设计参数与结构型式。

参 考 文 献

- [1] 韩自力. 既有线提速路基的对策研究[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 53—58.
HAN Zi-li. Research on the countermeasure of railway subgrade on existing railways[J]. *China Railway Science*, 2002, 23(2): 53—58.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 既有线提速200 km/h技术条件(试行)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [3] 王立军, 张千里, 赵洪勇. 重载铁路路基病害及对策[J]. 铁道建筑, 2005, (7): 67—68.
WANG Li-jun, ZHANG Qian-li, ZHAO Hong-yong. Subgrade disease problem and its countermeasure of heavy load railway[J]. *Railway Construction*, 2005, (7): 67—68.
- [4] MILLER G A, TEH S Y, LI D Q, et al. Cyclic shear strength of soft railroad subgrade[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(7): 139—147.
- [5] LI D Q. Railway track granular layer thickness design based on subgrade performance under repeated loading[D]. Boston: University of Massachusetts, 1994.
- [6] SEED H B, CHAN C K, MONISMITH C L. Effects of repeated loading on the strength and deformation of compacted clay[J]. *Highway Research Record*, 1955, 34: 541—558.
- [7] MUHANNA A S, RAHMAN M S, LAMBE P C. Model for resilient modules and permanent strain of subgrade soils[R]. [S. l.]: Transportation Research Record No 1619, Transportation Research Board, National Research Council, 1998: 85—93.
- [8] 刘建坤. 路基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [9] 铁道科学研究院铁建所. 既有线提速200 km/h非改建地段试验报告[R]. 北京: 铁道科学研究院, 2006.
- [10] QIU Y J. Permanent deformation of subgrade soils laboratory investigation and application in mechanistic based pavement design[D]. Arkansas: University of Arkansas, 1998.
- [11] HEATH D L, SHENTON M J, SPARROW R W, et al. Design of conventional rail track foundation[J]. *Proc. Inst. Civil Engineering*, 1972, 51: 251—267.
- [12] CHEUNG L W. Laboratory assessment of pavement foundation materials[D]. Nottingham: University of Nottingham, 1994.
- [13] 铁道科学研究院铁建所. 不同线路等级、土质条件基床结构及技术条件的研究[R]. 北京: 铁道科学研究院, 1990.
- [14] 肖军华, 刘建坤, 彭丽云, 等. 黄河冲积粉土的干密度及含水率对力学性质影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 409—414.
XIAO Jun-hua, LIU Jian-kun, PENG Li-yun, et al. Effect of dry density and moisture content on behaviors of Yellow-River alluvial silt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 409—414.
- [15] FORTIN. Dynamic track deformation[J]. *France Railway Review*, 1984, 2(1): 23—26.