

# 长期动载下级配碎石的塑性变形与临界应力

王 龙<sup>1</sup>, 解晓光<sup>1</sup>, 巴恒静<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 采用中型动三轴仪, 在不同围压、不同动应力条件下, 研究了级配碎石基层在长期车辆荷载作用下塑性变形的发展规律和分布状态。结果表明, 在围压一定时, 随着动应力的增加, 级配碎石的塑性变形曲线可分为稳定型、衰减型和破坏型, 3类塑性变形的分布确定了2个临界状态; 临界动应力随围压线性增加, 临界动应力比随围压呈对数递减, 且两临界应力比在高围压下有趋同态势; 级配碎石的塑性变形与动应力水平为指数关系, 稳定临界和破坏临界的动应力水平分别为0.79和1.00; 典型路面结构应力分析表明, 标准荷载下级配碎石过渡层的应力水平为0.72~0.92, 小于破坏临界应力水平, 级配碎石在长期荷载作用下的塑性变形处于较稳定状态。

**关键词:** 道路工程; 级配碎石; 三轴试验; 塑性变形; 临界应力

**中图分类号:** U 416.1

**文献标识码:** A

## Critical Stress and Plastic Deformation of Graded Aggregate Material Under Long-term Dynamic Repeat Load

WANG Long<sup>1</sup>, XIE Xiaoguang<sup>1</sup>, BA Hengjing<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A research was made of the graded aggregate base bitumen pavement to investigate the rule of plastic deformation and its distribution in different confining stresses and dynamic stresses by using the middle dynamic triaxial instrument and sample compacted by vibration. Test proves that when confining pressure is fixed, the graded aggregate material's plastic deformation curve is stabilization type, disintegration type and destroy type with the increasing of dynamic load, two critical state can be confirmed by plastic deformation distribution. Critical dynamic stress increases in linearity and dynamic stress ratio descends in logarithm with confining stress, two critical dynamic stress ratio tends to the

same when confining pressure is high. The relationship between plastic deformation and critical dynamic stress is exponential, stabilization critical stress level and destroy critical stress is 0.79 and 1.0, respectively. The analysis of representative pavement structure indicates that graded aggregate transition base's critical stress level is from 0.72 to 0.92 in standard axial load, which is lower than the destroy critical stress level. The graded aggregate base plastic deformation is stabilization under long-term vehicle load.

**Key words:** highway engineering; graded aggregate; triaxial test; plastic deformation; critical stress

级配碎石柔性基层沥青路面的一种主要病害是车辙, 按车辙的分类可知, 与路面材料和结构相关的车辙可分为3类: 结构性车辙、压密型车辙和剪切型车辙。对于级配碎石基层沥青路面, 其车辙主要来源于级配碎石和沥青混凝土的压密, 属压密型车辙; 对于沥青碎石基层路面, 表现为沥青层的压密变形和剪切变形; 对于半刚性基层沥青路面, 其车辙的主要形式为剪切型, 主要来源于沥青混凝土的剪切流动, 产生的塑性变形占路面车辙总量的90%以上<sup>[1]</sup>。因此在以无粘结松散粒料基层为主的沥青路面在车辙控制方面主要研究级配碎石材料的塑性变形变化规律及防制措施。我国对级配碎石材料在长期荷载作用下的塑性变形研究相对较少, 对于一种材料来说, 变形的大小和所受的应力和荷载的重复次数有关, 为此采用中型动三轴试验, 在不同围压、不同动应力条件下, 对级配碎石材料在长期荷载下的变形规律进行研究。

## 1 试验设备及方法

级配碎石在长期动载作用下的塑性变形试验采用

中型三轴剪切仪进行,试样直径为 20 cm,高为 50 cm.

### 1.1 试验设备

试验采用高精度中型静-动三轴仪<sup>[2]</sup>.其主要特点是在三轴压力室内测力和位移,因此,试验精度比普通三轴仪至少提高了一个数量级.试样成型方式采用分层振动成型.振动成型仪采用上置式振动压实仪<sup>[3]</sup>.

### 1.2 试样性质与制备

试验用石料均为石灰岩,采用骨架-密实级配振动成型试样.将试料分成 3 份,第一份控制高度为 20 cm,其余每份控制高度为 15 cm,振动成型参数为频率  $f = 30$  Hz,离心力  $F = 10$  kN,压实度为 98%.

### 1.3 试验方法

为了比较在长期动载作用下级配碎石的塑性变形特性,试验过程采用 3 种围压,分别为 50, 100 和 150 kPa,每个围压分 3 种动应力来覆盖其临界状态.每个试样振动 10 000 次,采用半正弦波加载,加载时间为 0.2 s,卸载时间为 1.8 s,周期为 2 s.

## 2 长期动载下级配碎石的塑性变形

由图 1 可知,永久变形曲线与振次的关系因材料和应力的不同而不同<sup>[4]</sup>,对于常侧限的情况,试件的变形曲线分布可分为 3 类变形区间,分别为稳定区间、衰减区间和破坏区间,处于各区间的应变曲线分别为稳定型、衰减型和破坏型,3 类变形区间形成 2 种临界应力,分别为稳定临界应力和破坏临界应力.

稳定区间塑性变形曲线的特点是,加载的初期,应变增加较快,但很快就进入稳定状态,塑性应变几

乎不再增加,其原因在于试样在较小的动应力比作用下,逐渐压密,密度达到一定程度后,试样只产生弹性应变,塑性变形增量趋于定值.其最大特点是试件只有压缩变形.若不考虑最初振次的影响,其塑性变形曲线可表示为

$$\epsilon = a + bN \quad (1)$$

式中: $a$  和  $b$  为与动应力水平和试样性质有关的参数,其中  $b$  值几乎为零; $N$  为加载次数.

衰减区间塑性变形曲线的特点是,试件加载初期变形量较大,进入稳定期的振次较多,一定的加载次数后,由于重复荷载导致试件的局部结构破坏,强度降低,同时较大的动应力比作用促使颗粒重新调整,形成次生结构.其最大特点是塑性变形既包括试件压密变形又包括少许剪切变形,且随着加载次数非线性增加<sup>[5]</sup>.其变形曲线可表示为

$$\epsilon = a + b \ln N \quad (2)$$

式中: $a$  和  $b$  为与动应力水平和试样性质有关的参数; $N$  为加载次数.

破坏区间塑性变形曲线特点是,当加载动应力很大时,试件几乎没有经过压密状态就进入了剪切破坏状态,此时由于围压的作用,塑性变形呈线性增加,增加幅度很大,在较少的荷载作用次数下完成了很大的变形.此状态的最大特点是几乎只产生剪切变形<sup>[6]</sup>.其变形曲线可用直线表示为

$$\epsilon = a + bN \quad (3)$$

式中: $a$  和  $b$  为与动应力水平和试样性质有关的参数,其中  $b$  值较大; $N$  为加载次数.

表 1 为级配碎石在动三轴长期荷载作用下塑性应变与动载次数的回归曲线汇总.

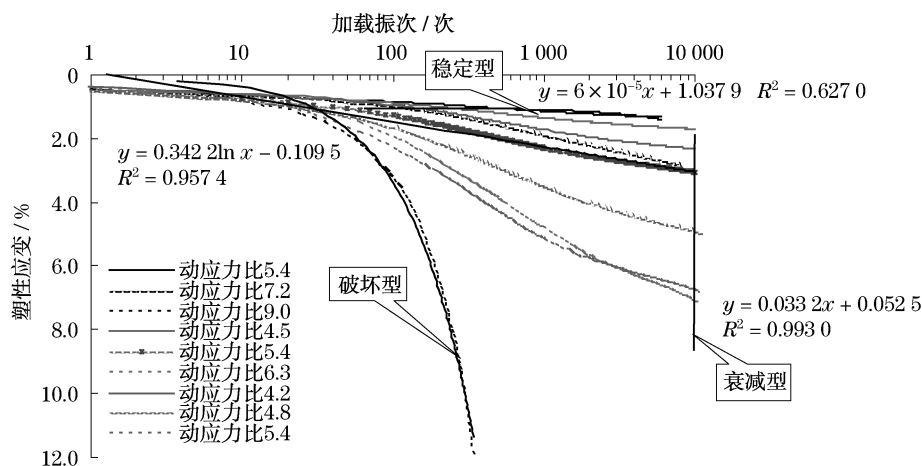


图 1 级配碎石在长期荷载作用下塑性变形线型分类

Fig.1 Permanent deformation curves classification of aggregates under long-term load test

表 1 级配碎石塑性变形回归曲线  
Tab.1 Permanent deformation regression curve of aggregates

偏应力/kPa	$\sigma_3$ /kPa	应力不变量/kPa	$\sigma_d/\sigma_3$	回归方程	$R^2$
269	50	369.28	5.4	$\epsilon = 6 \times 10^{-5} N + 1.037\ 9$	0.63
359	50	459.04	7.2	$\epsilon = 0.000\ 2\ N + 1.433\ 2$	0.78
449	50	548.80	9.0	$\epsilon = 0.0332\ N + 0.052\ 5$	0.99
449	100	648.80	4.5	$\epsilon = 5 \times 10^{-5}\ N + 1.311\ 7$	0.63
539	100	738.56	5.4	$\epsilon = 0.342\ 2\ln\ N - 0.109\ 5$	0.96
628	100	828.32	6.3	$\epsilon = 0.957\ 9\ln\ N - 1.836\ 6$	0.93
628	150	928.32	4.2	$\epsilon = 0.268\ 1\ln\ N - 0.151\ 1$	0.95
718	150	1\ 018.08	4.8	$\epsilon = 0.620\ 9\ln\ N - 0.819\ 4$	0.94
808	150	1\ 107.84	5.4	$\epsilon = 0.837\ 8\ln\ N - 0.870\ 3$	0.93

注: $\sigma_3$  为围压; $\sigma_d$  为临界动应力.

3 级配碎石动载下的临界应力

3 类塑性变形区间可以确定 2 个临界动应力(动应力比),称之为稳定临界应力和破坏临界应力,可以用来表征级配碎石在不同动应力状态下的变形状态.但工程实际却是以可接受的最大塑性变形量来判断土体是否进入破坏状态.在规定的振次下产生可接受的最大塑性变形量所对应的动应力(动应力比)就为临界应力.由于级配碎石车辙破坏形态与传统的岩土工程中土体滑动破坏形态不同,无法以传统的岩土工程 10%或 15%的塑性应变定义土体破坏.研究表明,在道路铺面中,4%以上轴向应变即不

可接受.在相同的围压下,粒料的塑性变形破坏与所承受的应力水平和振动次数有关,因此临界应力会因标准的不同而不同.同时,由于临界应力是区分变形稳定、衰减和破坏的界限,在相同条件下,因试样个体的差异,临界应力处于波动状态,是某一应力区间,而不是一个固定的应力.

3.1 临界应力的确定

以动应力重复 10 000 次,塑性应变 4%为标准确定临界动应力.此时三轴试件产生的变形为 20 mm,若级配碎石基层厚度为 15~35 cm,则由塑性变形产生的车辙贡献量为 6~14 mm;对于级配碎石由稳定区间向衰减区间过渡的临界应变可假定为破坏应变的 40%,即塑性应变为 1.6%.图 2 为确定临界应力的示意图,表 2 为临界应力的确定结果.

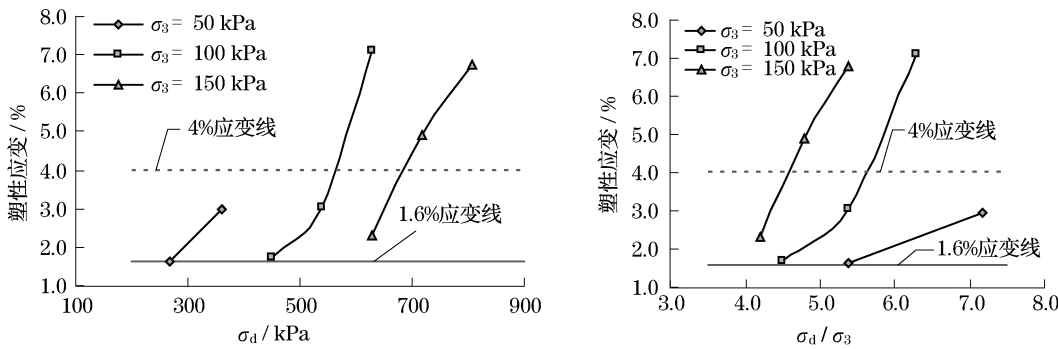


图 2 级配碎石临界应力确定图示  
Fig.2 Aggregates critical stress confirming chart

表 2 级配碎石在长期动载作用下临界状态应力应变参数  
Tab.2 Stress and strain parameters of aggregates critical state under long-term load

围压/kPa	稳定临界应变/%	稳定临界应力/kPa	稳定临界应力比	破坏临界应变/%	破坏临界应力/kPa	破坏临界应力比
50	1.6	270	5.4	4.0	390	7.8
100	1.6	440	4.4	4.0	560	5.6
150	1.6	600	4.0	4.0	675	4.5

3.2 围压对临界应力的影响

由图 2 可以看出,动应力比不能使临界应力得到很好的归一,围压对临界应力有很大的影响.由图 3 可以看出,围压越大,达到相同应变所需的偏应力越大.临界动应力  $\sigma_d$  与围压近呈线性关系,稳定临界应力和破坏临界应力为平行关系,二者相差约 100 kPa,单位围压临界动应力的增量为 3 kPa.围压对临界动应力比的影响与对临界动应力的影响不同,随着围压的增加,临界动应力比下降,与围压  $\sigma_3$  呈对数关系.在围压  $\sigma_3$  较小时,稳定临界动应力比与破坏临界动应力比相差较大,此时级配碎石的变形衰减区较宽,两临界应力清晰;随着围压的增加,级配碎石抗剪强度增大,脆性加强,塑性变形的“蠕变”衰减区被压缩,级配碎石的“延性”减弱,稳定临界动应力比与破坏临界动应力比将趋于一致.

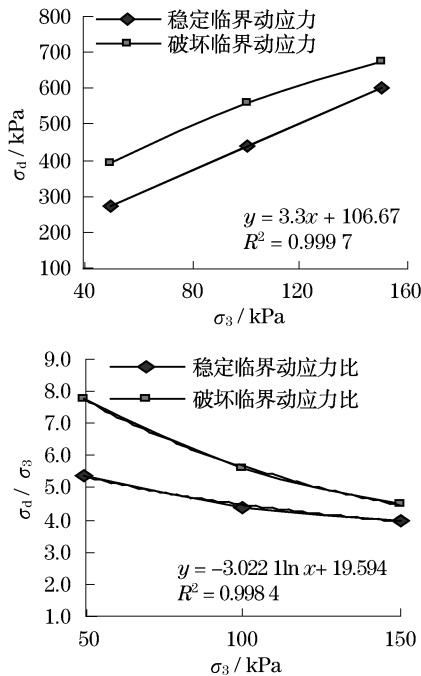


图 3 围压与临界动应力的关系  
Fig.3 Relation between critical stress and  $\sigma_3$

3.3 动应力水平对塑性变形的影响

把衰减型和破坏型的动应力分界点作为土体动强度的指标,定义为临界破坏动应力  $\sigma_\alpha$ ,将级配碎石所受到的动应力与临界破坏动应力之比定义为动应力水平,其值的大小表征土体承受动荷载的强度水平.图 4 为动应力水平与塑性变形的关系.可以看出,动应力水平可以使级配碎石的塑性变形归一化,消除围压对塑性变形的影响.通过回归分析可知,塑性变形与动应力水平成指数关系

$$\epsilon = \alpha e^{bK} \tag{4}$$

式中: $\alpha$  和  $b$  为与试样性质有关的参数; $K$  为动应力水平.

同时确定出 3 种塑性变形模态的临界动应力水平,如表 3 所示.当动应力水平在 0~0.79 时,级配碎石处于压密状态,塑性变形稳定;当动应力水平在 0.79~1.00 时,级配碎石处于损伤积累状态,塑性变形衰减;当动应力水平  $>1.00$  时,级配碎石处于屈服状态,塑性变形线性增长.

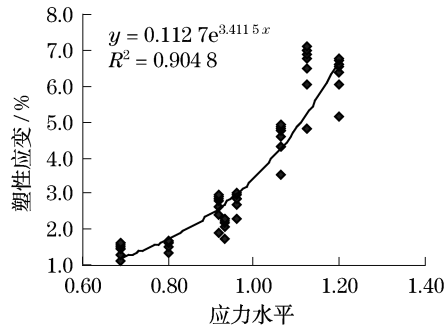


图 4 动应力水平与塑性变形的关系  
Fig.4 Normalization between permanent strain and dynamic stress level

表 3 级配碎石的临界动应力水平

Tab.3 Critical dynamic stress level of aggregates				
围压/ kPa	稳定临界 动应力/kPa	稳定临界动 应力水平	破坏临界动 应力/kPa	破坏临界动 应力水平
50	270	0.69	390	1.0
100	440	0.79	560	1.0
150	600	0.89	675	1.0
平均值		0.79		1.0

文献[7]对 3 种含级配碎石基层的典型沥青路面进行了结构应力分析,表明在标准荷载作用下,级配碎石为过渡层时其 3 向应力状态最为不利,侧向应力变化范围为 32~70 kPa,平均为 50 kPa,所以顶面压应力为 280~360 kPa;以围压为 50 kPa 的破坏临界应力为标准,其应力水平为 0.72~0.92,小于破坏临界应力水平,因此级配碎石过渡层在路面结构中处于安全状态,不会产生较大的车辙变形.

4 结论

采用骨架-密实级配,对级配碎石材料在长期荷载作用下的塑性变形进行了研究,主要结论有:

(1) 重复荷载次数与塑性变形的试验曲线可分为 3 类:稳定型、衰减型和破坏型.

(2) 围压对临界动应力和动应力比有较大影响,临界动应力随围压线性增加;临界动应力比随围

压呈对数递减,且两临界应力比在高围压下有趋同趋势.

(3) 动应力水平可以消除围压的影响,两临界状态的动应力水平分别为 0.79 和 1.00.级配碎石的塑性变形与动应力水平为指数关系.

(4) 对典型路面结构应力分析表明,标准荷载下级配碎石过渡层的应力水平为 0.72~0.92,小于破坏临界应力水平,变形处于较稳定状态.

#### 参考文献:

- [1] Verstraeten J Bituminous. Materoals with a high resistance to flow rutting [R]. [S. l.]: PLARC Technical Committee on Flexible Roads, 1994.
- [2] 孔宪京,张涛,邹德高,等. 中型动三轴仪研制及微小应变测试技术应用[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(1): 79.  
KONG Xianjing, ZHANG Tao, ZOU Degao, et al Development of medium scale dynamic triaxial apparatus and application of small strain measurement technique [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(1): 79.
- [3] 王龙,解晓光. 级配碎石材料标准振动成型方法的研究[J]. 公

路交通科技, 2005, 22(7): 26.

WANG Long, XIE Xiaoguang. Research on the vibrating compaction method of graded aggregate material[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(7): 26.

- [4] 王红. 道渣弹性与累计变形的试验研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(6): 106.  
WANG Hong. Test and study on ballast elasticity and accumulated deformation[J]. China Railway Science, 2001, 22(6): 106.
- [5] Stewart Harry E. Pavement strain from cyclic variable-amplitude loadings[J]. Geotechnical Engineering ASCE, 1986, 112(6): 653.
- [6] 蔡英,曹新文. 重复荷载下路基土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1.  
CAI Ying, CAO Xinwen. Study of the critial dynamic stress and permanent strain in of the subgrade under t he repeated load[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1996, 31(1): 1.
- [7] 王龙. 基于振动成型下级配碎石强度与变形特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2006.  
WANG Long. Study of intensity and deformation of granular materials on vibration compaction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. School of Transportation Science and Engineering, 2006.

(上接第 1265 页)

- [5] Suresh S, Sujit P B, Rao A K. Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design[J]. Composite Structures, 2007, 81: 598.
- [6] Tang Hesheng, Fukuda M, Xue Songtao. Particle swarm optimization for structural system identification[C/CD]//The 6th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford: Stanford University, 2007.
- [7] 李峰,唐和生,薛松涛,等. 粒子群优化算法在桁架优化设计中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(1): 7.  
LI Feng, TANG Hesheng, XUE Songtao, et al. Application of a particle swarm optimization algorithm in truss structure optimal design [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(1): 7.
- [8] de Castro L N, Timmis J I. Artificial immune systems: a new computational intelligence approach [M]. Berlin: Springer, 2002.
- [9] 于瀛,侯朝桢. 一种用于函数优化的免疫算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(10): 167.  
YU Ying, HOU Chaozhen. An immune algorithm applied to function optimization [J]. Computer Engineering, 2006, 32(10): 167.
- [10] Gong Maoguo, Jiao Licheng, Du Haifeng, et al. Multiobjective immune algorithm with nondominated neighbor-based selection evolutionary computation [J]. Evolutionary Computation, 2008, 16(2): 225.
- [11] Leandro Nunes de Castro. Fundamentals of natural computing: an overview[J]. Physics of Life Reviews, 2007, 4: 1.
- [12] Janeway C A, Travers P, Walport M, et al. Immunobiology: the immune system in health and disease[M]. 6th ed. London: Garland Science Publishing, 2005.
- [13] Allen D, Cumano A, Dildrop R, et al. Timing, genetic requirements and functional consequences of somatic hypermutation during B-cell development[J]. Immunological Reviews, 1987, 96: 5.
- [14] Kalyanmoy Deb, Hans-Georg Beyer. Self-adaptive genetic algorithms with simulated binary crossover [J]. Evolutionary Computation, 2001, 9(2): 197.
- [15] Venkayya V. Design of optimum structures[J]. Computers & Structures, 1971, 1(12): 265.