

# 级配碎石塑性变形特性及其安定行为的数值模拟

蒋应军<sup>1</sup>, 陈浙江<sup>2</sup>, 李寿伟<sup>2</sup>, 曹帆<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 金华市公路管理局, 浙江 金华 321000)

**摘要:** 应用颗粒流理论构建了级配碎石动三轴数值试验方法. 通过动三轴室内试验验证了数值方法的可靠性, 模拟了级配碎石在动荷载作用下的塑性变形规律. 通过塑性变形累积方程探讨了级配碎石破坏临界应力与破坏临界应变. 结果表明, 级配碎石塑性变形数值试验结果与实际安定行为规律吻合; 级配碎石的合理破坏临界应变为 2.5%, 在此临界应变标准下, 级配碎石临界应力与围压呈现比例相关关系, 比例系数为 4.95; 提高围压可以显著强化级配碎石的抗塑性变形性能.

**关键词:** 道路工程; 级配碎石; 数值模拟; 安定变形规律; 临界应力; 临界应变

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

## Plastic Deformation Characteristics and Numerical Simulation of Shakedown Behavior of Graded Broken Stone

JIANG Yingjun<sup>1</sup>, CHEN Zhejiang<sup>2</sup>, LI Shouwei<sup>2</sup>, CAO Fan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Highway Administration Bureau of Jinhua, Jinhua 321000, China)

**Abstract:** A contacting constitutive model was established by using the particle flow theory and a numerical simulation of biaxial test on GBS (graded broken stone) was proposed based on PFC<sup>2D</sup>. The reliability of the numerical method was verified by dynamic triaxial laboratory test. The plastic deformation characteristics of GBS were studied by simulation. The destruction of critical stress and that of critical strain of GBS were studied by the equation of accumulative plastic deformation. The results show that numerical test results of plastic deformation law of GBS meet the actual shakedown law. The rational damage critical strain of GBS is 2.5%. Under this critical strain, the relationship between critical stress and confining pressure is proportional

with a proportional coefficient of 4.95. The increasing of confining pressure has a great effect on the resistance performance of plastic deformation of graded broken stone.

**Key words:** road engineering; graded broken stone (GBS); numerical simulation; deformation law of shakedown; critical stress; critical strain

级配碎石主要用于基层或沥青面层与半刚性基层过渡层, 是典型的弹塑性颗粒材料. 级配碎石塑性变形过大, 易使路面产生严重的车辙变形破坏<sup>[1]</sup>. 因此, 揭示并研究级配碎石在重复车辆荷载作用下的塑性变形特性具有重要的实际工程意义.

安定理论是研究弹塑性材料塑性变形的基本理论之一, 其最早应用于金属体在荷载和温度场共同作用下的塑性变形特性领域, 1984 年被首次引入道路领域<sup>[2]</sup>. 随后, 国内外学者对柔性路面粒料基层的安定行为进行了系统研究, 并取得了一定的研究成果. Chen 等<sup>[3]</sup>用线性匹配法 (Linear Matching Method) 建立了滚动和滑动荷载作用下路面结构安定上限 (shakedown limit) 分析的有限元数学规划算法; Gaskin 等<sup>[4]</sup>在探讨 Sydenham 砂在反复荷载下的行为时, 指出破坏的类型属永久变形破坏, 认为破坏发生的时机是应变率达到最大时; Werkmeister 等<sup>[5]</sup>介绍了安定理论在路面设计中的应用, 并给出了一种通过室内三轴试验确定安定上限的方法; 魏密等<sup>[6]</sup>讨论了 2 种求解柔性路面在车辆重复荷载作用下安定下限的方法, 对安定理论在柔性路面设计领域的应用前景进行了展望; 廖化荣<sup>[7]</sup>结合安定理论和能量耗散观点, 确定了不同含水量的红黏土在循环荷载作用下的临界应力水准, 并确定了不同含水量的路基红黏土在循环荷载作用下的破坏包络

线;王龙等<sup>[8]</sup>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.上述关于道路材料安定行为研究的主要方法和手段是室内动三轴试验.室内动三轴试验可以较真实地模拟现场实际受力状况,但试验操作复杂、效率低、成本高,在实际应用中普及程度不高,加之影响级配碎石塑性变形因素较多,因而关于道路材料安定行为研究的成果相对较少,研究深度也略显不足.

近年来,颗粒流数值模拟技术发展迅速,为深入研究级配碎石塑性变形行为提供了强有力手段<sup>[9]</sup>.本文采用颗粒流理论构建了级配碎石动三轴数值试验方法(Numerical Simulation Method of Dynamic Triaxial Test, DTT-NSM),并根据室内动三轴试验结果验证了级配碎石 DTT-NSM 结果的可靠性.在此基础上,利用级配碎石 DTT-NSM 研究了重复荷载作用下级配碎石塑性变形规律,并分析了级配碎石的安定行为.

## 1 级配碎石 DTT-NSM 的构建及其可靠性验证

利用 DTT-NSM 研究级配碎石安定行为的关键在于本构模型的选用、物理模型的构建以及模型参数的获取.本文采用颗粒流理论和 PFC<sup>2D</sup> 软件构建的 DTT-NSM,是以室内实际试验结果为基础,通过反复调整 DTT-NSM 模型并确定模型参数得到的,能够确保试验结果的准确性与实用性.

### 1.1 DTT-NSM 的构建

#### 1.1.1 物理模型及本构关系

级配碎石 DTT-NSM 物理模型的构建过程中,采用四面墙体形成的封闭区域模拟试模;在模拟试模内根据级配要求随机生成不同粒径集料颗粒直至满足压实度要求,从而生成模拟试件;采用线性接触刚度模型与滑动模型表征级配碎石接触本构关系.为便于动三轴数值试验动载的施加,在模拟试模顶面与底面墙体两侧生成一排球体并黏结成“块”,以模拟级配碎石动三轴试验压头,保留两侧墙体模拟橡皮膜施加围压.

线性接触刚度模型通过两个接触实体(颗粒与颗粒或颗粒与“墙”)间的法向刚度  $k_n$ 、切向刚度  $k_s$  与摩擦系数  $\mu$  定义颗粒单元的物理力学行为,颗粒与颗粒、颗粒与“墙”假设为串联状态,法向刚度  $k_n$  和切向刚度  $k_s$  计算方法见式(1)和式(2).

$$k_n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (1)$$

$$k_s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (2)$$

式中:A,B 表示互相接触的实体.

滑动模型是颗粒实体相互接触时的固有特性,当颗粒与颗粒、颗粒与“墙”间的重叠量等于零,则接触实体间法向接触力  $F_n$  和切向接触力  $F_s$  均为零.接触实体间发生滑动的判别条件见式(3).

$$|F_n| > F_{smax} \quad (3)$$

构建成功后的 DTT-NSM 模型见图 1. DTT-NSM 模型中,  $k_n, k_s$  间接反映了颗粒表面的接触状态以及集料颗粒的弹性模量等,  $\mu$  间接反映了集料表面粗糙程度、含水率等.

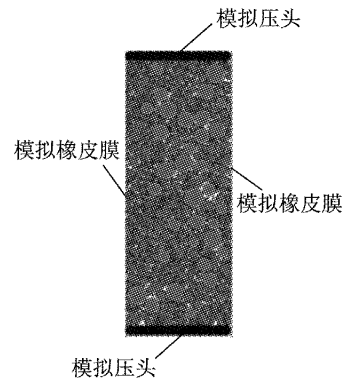


图1 级配碎石 DTT-NSM 模型

Fig.1 DTT-NSM model of GBS

#### 1.1.2 数值试验条件

(1)级配碎石在动载作用 1 000 次下的轴向应变  $\epsilon_{1000}$  随试件高度  $h$ 、直径  $\Phi$  变化规律分别见图 2、图 3,其中  $D_{max}$  为集料公称最大粒径.由图 2、3 可知,试件尺寸为 20 cm×40 cm( $\Phi \times h$ )时,碎石粒径对试验结果影响趋于稳定,并能保证数值试验高效率.

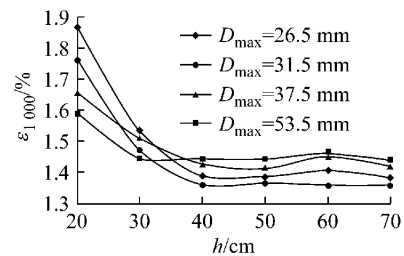


图2  $\epsilon_{1000}$ - $h$  曲线

Fig.2  $\epsilon_{1000}$ - $h$  curve

(2)围压.利用伺服机制控制墙体速度以保持墙体和颗粒之间的应力恒定,实现围压的控制.研究表明,围压水平一般为 50~150 kPa,本文采用三种围压,分别为 50,100,150 kPa.

(3)动载.模拟激振设备对试样施加正弦波荷载,偏应力  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{d0} \sin \omega t$ ,  $\sigma_1$  为轴向应力,  $\sigma_3$

为围压,  $\sigma_{d0}$  为初始偏应力,  $\omega$  为简谐应力的圆频率; 动载作用时间  $t_z$  取 0.2 s, 包括加载时间和卸载时间; 动载间隔时间  $t_i$  取 1.8 s.

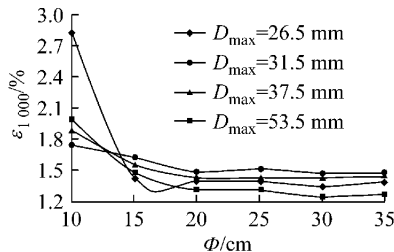


图 3  $\varepsilon_{1000}-\Phi$  曲线  
Fig. 3  $\varepsilon_{1000}-\Phi$  curve

## 1.2 DTT-NSM 的可靠性验证

### 1.2.1 试验材料及参数

数值试验中, 根据室内动三轴试验反演获取的级配碎石 DTT-NSM 微力学参数, 可间接地体现集料特性、含水率、压实度等因素对数值试验结果的影响. 下述研究以文献[9]为例, 原材料为石灰岩碎石, 级配见表 1, 微力学参数见表 2.

表 1 矿料级配

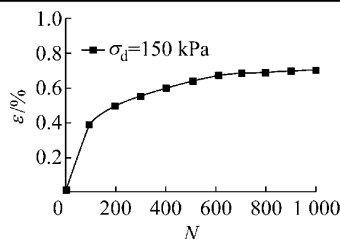
Tab. 1 Gradation of aggregate

筛孔尺寸/mm	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6
质量通过百分率/%	100	72	37	37	22	10

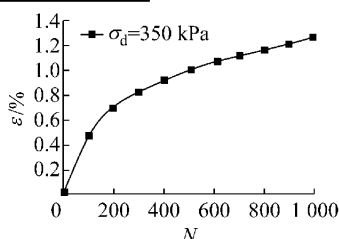
表 2 微力学参数

Tab. 2 Micro mechanics parameters

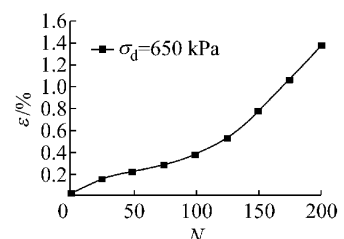
$k_n$ /GPa	$k_s$ /GPa	$\mu$
20	15	0.5



a 塑性安定行为



b 塑性蠕变行为



c 累积破坏行为

图 5 不同  $\sigma_d$  下  $\varepsilon-N$  曲线

Fig. 5  $\varepsilon-N$  curve at different  $\sigma_d$

由图 5 可知, 当材料承受循环荷载较小时, 随着循环荷载次数的增加, 塑性变形率逐渐减小, 直至接近于零. 级配碎石  $\varepsilon$  不再增大并趋近于某一值, 称为塑性安定上限, 这是由于在承受较小循环荷载时, 材料逐渐密实, 弹性变形逐渐占据主导, 塑性变形逐渐趋于定值, 此时材料表现为塑性安定行为; 当材料承受的循环荷载较大时, 随着循环荷载次数的增加, 塑性变形率先较大后变小, 并逐渐趋近于一个定值, 直到材料应变达到一个界限而出现破坏, 这个界限称

### 1.2.2 可靠性验证

级配碎石 DTT-NSM 的可靠性验证结果见图 4, 其中  $\varepsilon$  表示级配碎石轴向应变,  $N$  为动载作用次数. 由图 4 可知, 级配碎石  $\varepsilon-N$  曲线和实测结果基本符合, 证明了级配碎石 DTT-NSM 的可靠性.

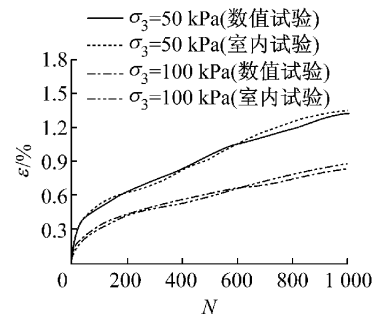


图 4 数值模拟与室内试验结果对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulation and indoor test

## 2 级配碎石安定行为模拟

### 2.1 级配碎石塑性变形模拟

级配碎石  $\varepsilon-N$  关系呈安定行为规律, 具体表现为三类变形行为: 塑性安定行为, 见图 5a; 塑性蠕变行为, 见图 5b; 累积破坏行为, 见图 5c. 图 5 采用级配碎石 DTT-NSM 计算得到, 计算时  $\sigma_3 = 100$  kPa, 动载作用次数  $N$  为 1 000 次.

为蠕变安定上限, 这是由于材料在承受较大循环荷载时, 材料迅速密实, 但由于荷载较大, 材料发生了局部结构破坏, 颗粒位置重新调整, 形成次生结构, 并在荷载作用下以固定的变形率蠕变的过程, 此时材料表现为塑性蠕变行为; 当材料承受的荷载很大时, 塑性变形率很大, 材料在承受少量循环荷载作用后就已达到破坏应变, 此时塑性变形曲线不存在安定上限, 这是由于材料承受循环荷载过大, 材料在几乎没有发生压密变形时, 就已经发生很大的剪切变

形,材料塑性变形主要由剪切变形作用形成,此时材料表现为累积破坏行为。

如图5所示, $\sigma_d=150$  kPa时,材料表现为塑性安定行为; $\sigma_d=350$  kPa时,材料表现为塑性蠕变行为; $\sigma_d=650$  kPa时,材料表现为累积破坏行为。这表明随着循环荷载逐渐增大,材料逐渐由塑性安定行为表现为塑性蠕变行为进而表现为累积破坏行为。三种行为区间形成两种临界应力,即稳定临界应力与破坏临界应力,与之对应的临界应变为稳定临界应变与破坏临界应变。破坏临界应力 $\sigma_p$ 与破坏临界应变 $\epsilon_p$ 对于指导级配碎石设计与施工具有重要意义。

## 2.2 塑性变形累积方程

假设在各种 $\sigma_d$ 下,级配碎石均存在安定上限 $\epsilon_\infty$ ,因此,级配碎石塑性变形累积方程应满足下列边界条件:

$$N=0 \text{ 时, } \epsilon=0$$

$$N=\infty \text{ 时, } \epsilon=\epsilon_\infty$$

利用上述边界条件,通过分析,建立级配碎石塑性变形累积方程为

$$\epsilon = \epsilon_\infty - \frac{\epsilon_\infty}{\xi N + 1} \quad (4)$$

式中: $\xi$ 为塑性变形累积系数。

根据式(4)得到50,100,150 kPa三种围压下级配碎石的 $\epsilon_\infty$ 和 $\xi$ ,见表3。

## 2.3 级配碎石破坏临界应变

根据表3数据整理得到级配碎石 $\sigma_d/\sigma_3-\epsilon_\infty$ 关系曲线,见图6。

如图6所示,级配碎石 $\epsilon_\infty$ 随 $\sigma_d/\sigma_3$ 增大而增大;当级配碎石 $\epsilon_\infty \leq 2.5\%$ 时,不同 $\sigma_3$ 下的 $\sigma_d/\sigma_3-\epsilon_\infty$ 关系曲线几乎重合,且呈近线性关系,此时材料内部发生压密作用,次生结构逐渐产生并趋于稳定,材料表现为塑性蠕变行为;当 $\epsilon_\infty > 2.5\%$ 时, $\sigma_d/\sigma_3-\epsilon_\infty$ 曲线出现拐点,且 $\epsilon_\infty$ 随 $\sigma_d/\sigma_3$ 增大急剧增大,这是由于当 $\sigma_d$ 增大到一定程度,材料内部发生破坏,出现急剧的塑性变形累积,此时材料已经表现为累积破坏行为。因此,本文根据数值模拟结果,确定级配碎石破坏临界应变为2.5%。文献[11]通过室内中型三轴剪切仪,分析了级配碎石破坏临界应变,提出了级配碎石临界动应力以4%以内塑性应变为标准确定;文献[12]通过双轴数值试验,分析了级配碎石剪切性能,提出级配碎石峰值偏应力对应的轴向应变约为2.5%~3.5%。文献[11-12]结论与本文研究成果吻合,再次证明了本文构建的级配碎石动三轴数值试验方法的可靠性。

表3 级配碎石塑性变形累积方程

Tab.3 Equation of accumulative plastic deformation of GBS

$\sigma_3/\text{kPa}$	$\sigma_d/\text{kPa}$	$\epsilon_\infty/\%$	$\xi$	$R^2$
50	50	1.169	0.002	0.98
	150	1.792	0.002	0.98
	250	2.365	0.002	0.97
	350	2.674	0.002	0.97
	450	3.527	0.002	0.99
	550	4.417	0.002	0.99
	650	7.366	0.002	0.98
100	100	1.065	0.002	0.99
	200	1.415	0.002	0.99
	300	1.808	0.002	0.99
	400	2.214	0.002	0.99
	500	2.496	0.002	0.99
	600	2.634	0.002	0.99
	700	3.463	0.002	0.99
	800	7.620	0.002	0.99
150	150	1.121	0.002	0.97
	250	1.199	0.002	0.97
	350	1.745	0.002	0.99
	450	1.967	0.002	0.99
	550	2.196	0.002	0.99
	650	2.604	0.002	0.99
	750	3.047	0.002	0.99
	850	4.850	0.002	0.99
	950	6.541	0.002	0.99

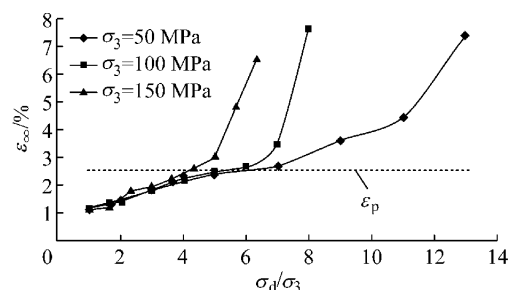


图6  $\epsilon_\infty-\sigma_d/\sigma_3$  曲线

Fig.6  $\epsilon_\infty-\sigma_d/\sigma_3$  curve

## 2.4 级配碎石破坏临界应力

截取图6中 $\epsilon_\infty \leq 2.5\%$ 部分的 $\epsilon_\infty-\sigma_d/\sigma_3$ 曲线得到图7。

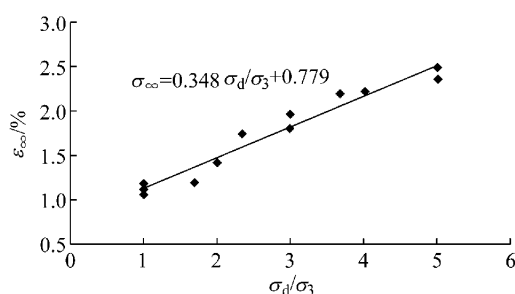
当 $\epsilon_\infty \leq 2.5\%$ 时,级配碎石 $\epsilon_\infty-\sigma_d/\sigma_3$ 呈线性关系,见式(5)。

$$\epsilon_\infty = 0.348 \frac{\sigma_d}{\sigma_3} + 0.779 \quad (5)$$

在2.5%破坏临界应变标准下,级配碎石 $\sigma_p$ 与 $\sigma_3$ 呈现正比例关系,见式(6)。

$$\sigma_p = 4.95\sigma_3 \quad (6)$$

由式(6)可得,在级配碎石 $\epsilon_p$ 为2.5%标准下, $\sigma_3$ 对级配碎石临界应力影响很大,提高围压可以显著强化级配碎石的抗塑性变形性能。当级配碎石所受

图 7  $\varepsilon_{\infty}-\sigma_d/\sigma_3$  曲线 ( $\varepsilon_{\infty} \leq 2.5\%$ )Fig. 7  $\varepsilon_{\infty}-\sigma_d/\sigma_3$  curve ( $\varepsilon_{\infty} \leq 2.5\%$ )

$\sigma_d \leq \sigma_p$  时,加载初期材料轴向应变增长较快但很快达到安定上限,动荷载反复作用下塑性变形  $\varepsilon$  始终小于破坏临界应变,材料表现为塑性安定行为和塑性蠕变行为;随着  $\sigma_d$  的逐渐增加,轴向变形逐渐趋近于级配碎石破坏临界应变,当  $\sigma_d$  增大到一定程度,安定上限  $\varepsilon_{\infty}$  达到 2.5%,级配碎石在  $\sigma_3$  与  $\sigma_d$  共同作用下发生破坏,从而材料表现为累积破坏行为。

荷载响应分析表明,级配碎石作为路面基层和半刚性基层沥青路面过渡层时  $\sigma_3$  分别为 20~50 kPa 和 30~70 kPa,由式(6)可得相应的  $\sigma_p$  分别为 99.0~247.5 kPa 和 148.5~346.5 kPa。因此,在路面结构设计时,应保证级配碎石基层和过渡层偏应力水平分别不大于 247.5 kPa 和 346.5 kPa;作为基层和过渡层级配碎石材料的设计抗压强度分别不应小于 247.5 kPa 和 346.5 kPa。

### 3 结论

(1)基于 PFC<sup>2D</sup> 软件,构建了级配碎石 DTT-NSM,并验证了数值试验的可靠性。结果表明,DTT-NSM 的  $\varepsilon-N$  曲线和实测结果基本相符,证明了该数值试验方法的可靠性。

(2)基于 DTT-NSM,模拟了级配碎石在动载作用下的塑性变形行为,并构建了塑性变形累计方程。结果表明,随着  $\sigma_d$  的增大,级配碎石分别表现出明显的塑性安定行为、塑性蠕变行为与累积破坏行为。

(3)通过塑性变形累积方程研究了级配碎石塑性破坏临界应变和临界破坏应力,并分析了围压对临界破坏应力的影响。结果表明,级配碎石的合理破坏临界应变为 2.5%,在此临界应变标准下,级配碎石临界应力与围压呈现比例相关关系,提高围压可以显著强化级配碎石的抗塑性变形性能。

### 参考文献:

[1] 金刚. 级配碎石三轴试验研究[D]. 大连:大连理工大学,

2007.

JIN Gang. Laboratory study of triaxial test on graded broken stone[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.

[2] Sharp R W, Booker J R. Shakedown of pavements under moving surface loads [J]. Journal of Transportation Engineering, 1984, 110(1): 1.

[3] Chen H F, Ponter A R S. The Linear matching method for shakedown and limit analyses applied to rolling and sliding point contact problems [J]. Road Materials and Pavement Design, 2005(6): 9.

[4] Gaskin P N, Raymond G P, Addo-Abedi F Y. Repeated compressive loading of sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16: 798.

[5] Werkmeister S, Dawson A R, Wellner F. Permanent deformation behavior of granular materials[J]. Road Materials and Pavement Design, 2005(6): 31.

[6] 魏密,杨群,郭忠印. 安定理论在柔性路面设计中的应用[J]. 公路交通技术, 2007, 2(1): 5

WEI Mi, YANG Qun, GUO Zhongyin. Application of shakedown theory in flexible pavement design[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 2(1): 5

[7] 廖化荣. 红黏土路基循环动荷载下塑性力学行为及预测模型研究[D]. 广州:中山大学, 2004.

LIAO Huarong. Research on mechanical behavior and predicting model of subgrade red clay under repeated dynamic load[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2004.

[8] 王龙,解晓光,冯德成. 级配碎石材料强度及塑性变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 944.

WANG Long, XIE Xiaoguang, FENG Decheng. Characteristics of the modulus and distortion of the graded aggregate material [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6): 944.

[9] 王龙,解晓光,巴恒静. 长期动载下级配碎石的塑性变形与临界应力[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(9): 1293.

WANG Long, XIE Xiaoguang, BA Hengjing. Critical stress and plastic deformation of graded aggregate material under long-term dynamic repeat load[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(9): 1293.

[10] 任蛟龙. 级配碎石 CBR 数值试验方法及其应用[D]. 西安:长安大学, 2011.

REN Jiaolong. CBR simulation test method of graded broken stone and its appliance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

[11] 李福普,严二虎. 沥青稳定碎石与级配碎石结构设计与施工技术应用指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2009.

LI Fupu, YAN Erhu. The applied technology guide of structure design and construction for asphalt pavement with asphalt treated base and dense graded aggregate base[M]. Beijing, China Communications Press, 2009.

[12] 徐寅善. 级配碎石剪切强度数值试验方法及其应用[D]. 西安:长安大学, 2012.

XU Yinshan. Shear strength simulation test method of graded broken stone and its appliance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.