

级配碎石双轴数值试验方法及其影响因素

蒋应军¹, 李寿伟², 陈浙江², 方 剑³

(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; 3. 金华市交通工程质量监督站, 浙江 金华 321000)

摘要: 利用颗粒流理论建立了级配碎石(GBS)接触本构模型, 同时构建了级配碎石双轴数值试验方法. 分析了双轴数值试验的影响规律, 并验证了双轴数值试验方法的可靠性. 结果表明: 采用应变率控制模式比采用位移控制模式所得数值试验结果更稳定; 加载速率为 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$ 、试件尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$ 时, 加载速率和试件尺寸对数值试验结果影响甚微; 偏应力随围压的增大呈线性增大; 泊松比对数值试验结果影响较小; 偏应力峰值随摩擦系数与剪切模量的增大接近于线性增大.

关键词: 道路工程; 级配碎石(GBS); 颗粒流; 双轴数值试验; 微力学参数

中图分类号: U414

文献标志码: A

Biaxial Numerical Simulation on Graded Broken Stone and Its Influence Factors

JIANG Yingjun¹, LI Shouwei², CHEN Zhejiang², FANG Jian³

(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;
3. Quality Supervision Station of Jinhua Communications Department, Jinhua 321000, China)

Abstract: A contacting constitutive model was established and a biaxial numerical test method on graded broken stone(GBS) was proposed based on particle flow code. Influence laws of the numerical test were studied, and the reliability and practicality of the numerical test were verified. The results show that compared with displacement control mode, the results of the numerical test are more stable than that of strain rate control mode. When the value of loading rate is $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$ and the size of specimen is $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$, the loading rate and size of specimens have little effect on the results of the numerical test. The deviatoric stress increases linearly with confining stress. Poisson's ratio has a little

effect on the numerical test results. The peak point of deviatoric stress increases linearly with the increase of friction coefficient and shear modulus.

Key words: road engineering; graded broken stone(GBS); particle flow code; numerical simulation of biaxial test; micro mechanical parameters

级配碎石常用作路面柔性结构层, 主要缺陷在于车辆荷载作用下易产生较大的塑性变形破坏^[1]. 因此, 研究并揭示级配碎石强度变形特性具有重要工程意义. 三轴试验因其试验原理和操作方法相对简单, 被广泛应用于研究土工材料的强度变形特性. 自 20 世纪 60 年代以来, 随着土石坝工程的不断发展, 墨西哥、美国和日本等应用大型三轴压缩仪对粗粒料的强度与变形特性进行了较系统的试验研究. 金刚^[2]采用三轴试验研究了级配碎石剪切性能影响因素. 日本学者 Kokusho^[3]对大型三轴试验仪微小应变的连续测试方法进行了研究. Janoo 等^[4]利用三轴试验研究了级配碎石粗集料形状、纹理等对级配碎石剪切性能的影响规律. 然而, 对于颗粒尺寸较大的粗粒土来说, 室内三轴试验必须在中或大型三轴仪上进行; 其次, 三轴仪受应变测试精度制约, 较难获取连续应变过程中的变形特性. 这些因素都是国内外有关级配碎石三轴试验研究相对较少的主要原因.

鉴于目前国内拥有大型三轴试验仪的单位较少, 试验成本较高, 且在深入研究试件尺寸效应、加载方式和加载速率等因素对三轴试验结果影响规律及变形精确测量方面具有一定困难, 因此本文引入颗粒流理论^[5], 并基于颗粒流分析程序 PFC^{2D} 构建了级配碎石双轴数值试验方法. 级配碎石双轴数值试验方法以室内三轴试验为基础, 在获取模型参数

后可进一步深入研究级配碎石的力学行为和破坏机制,因此级配碎石双轴试验是室内三轴试验的延伸和补充^[6-8].

1 双轴数值试验方法的构建

PFC^{2D}软件由依泰斯卡(ITASCA)集团开发,通过离散单元模拟颗粒介质运动及其相互作用,再利用接触本构关系描述颗粒的受力状态,以获得材料整体运动形态与宏观、细观力学机制^[9-10].

1.1 物理模型的构建

(1)试模的生成.利用命令 wall 生成两片竖直墙体和两片水平墙体组成封闭的矩形,墙体所围成的区域即为试模.

(2)级配碎石的生成.利用命令 ball 在模拟料筒内生成集料颗粒,通过监测生成颗粒的面积控制每档集料的用量,以达到目标级配.

(3)模拟试件的成型.将顶面的水平墙体(下文称模拟压板)以恒定速率竖直向下推动,以压实料筒内的集料颗粒,直至试件高度符合要求,压实成型后的模拟试件见图 1.

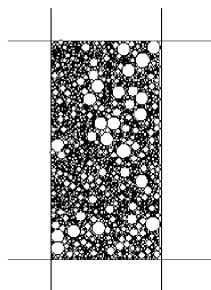


图 1 模拟试件

Fig.1 Virtual specimen

1.2 力学模型的构建

1.2.1 接触本构模型选取

颗粒流的力学行为是通过颗粒与颗粒或者颗粒与墙体之间的接触本构关系确定的,因此接触本构模型直接影响颗粒流数值模拟过程的仿真性和模拟结果的可靠性^[11-12].接触本构模型包括接触刚度模型、滑动模型和黏结模型^[13-14].接触刚度模型描述了接触力和相对位移的关系,滑动模型描述了相对滑动时颗粒的剪切接触力和法向接触力的关系,黏结模型则限定了接触位置所能承受的黏结力^[15].考虑到级配碎石具有颗粒性结构特征和非线性力学特性,故采用 Hertz 刚度模型和滑动模型描述级配碎石接触本构关系^[16-17].

Hertz 刚度模型是基于 Hertz 和 Mindlin -

Deresiewicz 理论得出的一种非线性接触刚度模型,它通过泊松比 ν 和剪切模量 G 定义材料特性,并利用法向割线刚度 K_n 和切向切线刚度 K_s 计算颗粒之间的力学关系,其表达式如下所示:

$$K_n = \left[\frac{2G\sqrt{2R}}{3(1-\nu)} \right] \sqrt{U} \quad (1)$$

$$K_s = \left\{ \frac{2[3G^2(1-\nu)R]^{1/3}}{2-\nu} \right\} |F_{ni}|^{1/3} \quad (2)$$

式中: U 为颗粒间接触重叠量; F_{ni} 为法向接触力; R 为任意两接触颗粒的平均半径.滑动模型通过摩擦系数 μ 定义,如下所示:

$$F_s = \mu |F_{ni}| \quad (3)$$

式中: μ 为摩擦系数; F_s 为滑动摩擦力.因此,描述级配碎石颗粒流模型的微力学参数有泊松比、剪切模量和摩擦系数.

1.2.2 力学模型的生成

赋予模拟试件以微力学参数,生成力学模型.微力学参数可通过室内试验结果予以标定,标定的微力学参数能够反映试验条件、集料特性和含水量等因素对力学性能的影响.

1.3 加载过程的模拟

(1)围压 σ_3 控制.通过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^[18].

(2)稳压阶段.为了消除第 1.1 节中物理模型构建(3)中水平墙体对集料向下压实时造成的试前应力,需要在加载前对试件进行稳压,使试模上下墙体和左右墙体都满足试验所需的围压水平.

(3)加载模拟.在图 1 所示模拟试件的基础上,令围压 $\sigma_3 = 50$ kPa,将模拟压板以恒定速率竖直向下推动,以压缩模拟试件,并记录每个计算时步内模拟压板的位移和接触力,然后计算偏应力 σ_d ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$),得到如图 2 所示的应力-应变($\sigma_d - \epsilon$)曲线.

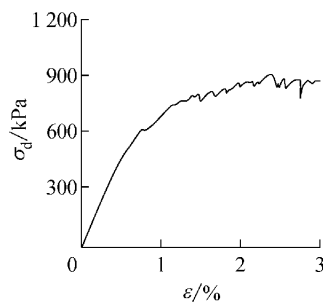


图 2 级配碎石应力-应变关系模拟结果($\sigma_3 = 50$ kPa)

Fig.2 Simulation results of stress-strain curve ($\sigma_3 = 50$ kPa)

1.4 双轴数值试验可靠性分析

文献[2]采用高精度静三轴试验仪研究了级配

碎石的剪切性能. 本文利用文献[2]中室内试验结果验证级配碎石双轴数值模拟的可靠性. 室内试验与数值试验所采用的级配碎石颗粒组成如表1所示. 通过反复试算, 得到了一组较理想的微力学参数: $\nu=0.2$, $\mu=5.0$, $G=1\ 500$ GPa(若无特殊说明, 后续研究均采用该组数据). 文献[2]中室内试验测试值与本文数值试验模拟值的对比见表2和图3.

表1 级配碎石颗粒组成

Tab.1 Granulometric composition of graded

broken stone		%	
粒径/mm	质量分数	粒径/mm	质量分数
<40.0~20.0	10	<5.0~2.0	0
<20.0~10.0	28	<2.0~0.5	15
<10.0~5.0	35	<0.5	12

表2 级配碎石偏应力峰值 σ_{dmax} 测试值与模拟值比较

Tab.2 Comparison of measured and simulation results

σ_3 /kPa	σ_{dmax} /kPa		误差/%	平均误差/%
	测试值	模拟值		
50	882.5	903.5	2.32	
100	1 177.3	1 126.0	4.36	4.29
150	1 481.7	1 390.0	6.19	

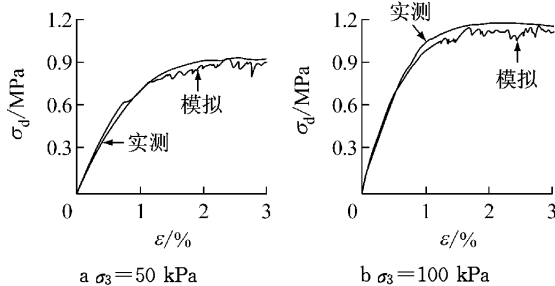


图3 级配碎石应力-应变关系实测结果与模拟结果对比

Fig.3 Comparison of measured and simulation results for stress-strain curve

由表2可以看出, 不同 σ_3 条件下, σ_{dmax} 模拟误差小于等于 6.19%, 平均误差为 4.29%. 由图3可看出, 级配碎石数值试验与室内试验应力-应变曲线基本吻合, 破坏应变大小接近, 证明了级配碎石双轴数值试验的可靠性.

2 试验条件的影响

2.1 加载模式

双轴试验加载方式有两种: 应变率控制模式和位移控制模式. 应变率控制模式是以试件高度和应变率来确定加载速率, 如对于尺寸为 $\Phi 300$ mm \times $h 600$ mm 的试件, 按 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$ 速率加载, 等效于以 $3\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率模拟加载, 令围压 $\sigma_3 = 50$

kPa. 两种模式对数值模拟结果的影响见图4.

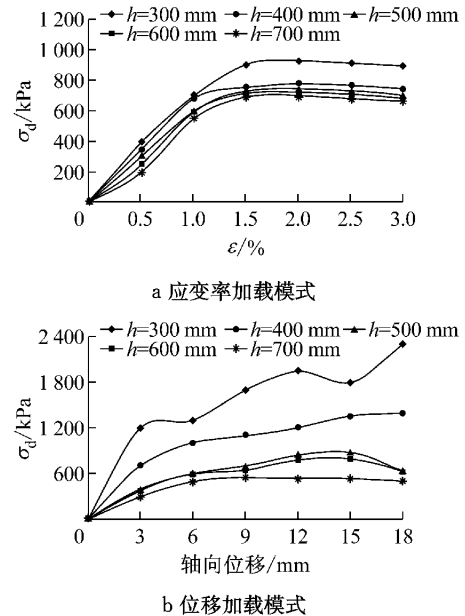


图4 不同加载模式对应力-应变曲线的影响

Fig.4 Effect of different loading modes on stress-strain curve

由图4可看出, 与位移控制模式相比, 按应变率控制模式加载时, 应力-应变曲线模拟值较为稳定, 峰值明显, 且试件尺寸对曲线峰值影响不大. 因此, 为保证模拟结果的稳定性, 本文后续研究均采用应变率控制模式加载.

2.2 加载速率

加载速率对级配碎石双轴数值试验结果的影响规律见图5和6. 试件尺寸取 $\Phi 300$ mm \times $h 600$ mm.

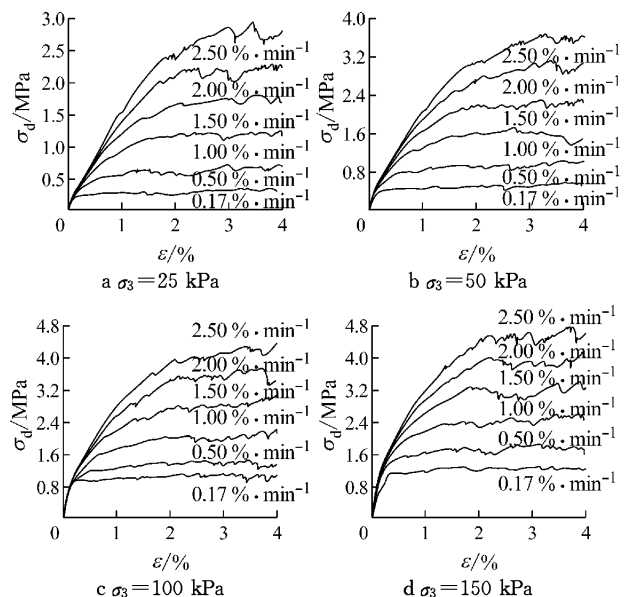
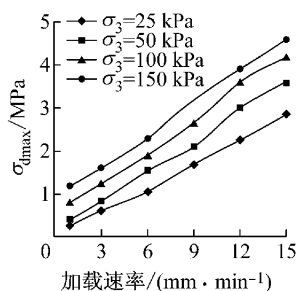


图5 加载速率对数值试验结果的影响

Fig.5 Effect of loading rate on numerical results

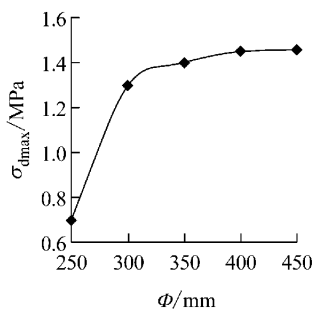
图6 加载速率对 σ_{dmax} 的影响Fig.6 Effect of loading rate on σ_{dmax}

由图5和6可看出,随着加载速率的增大, σ_{dmax} 随之增大.为确保模拟试验结果具有可比性,结合室内三轴试验加载速率要求,建议加载速率取 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$.

2.3 试件尺寸

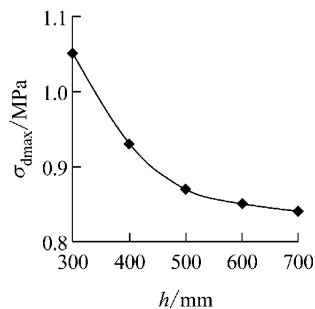
(1) 试件直径 Φ

试件直径对级配碎石 σ_{dmax} 的影响见图7,试件高度 $h=300 \text{ mm}$.由图7可知,当试件直径 $\Phi < 300 \text{ mm}$ 时, σ_{dmax} 随试件直径增大而增大;当 $\Phi \geq 300 \text{ mm}$ 后,直径对 σ_{dmax} 影响可以忽略不计.因此,宜取 $\Phi \geq 300 \text{ mm}$.

图7 Φ 对 σ_{dmax} 的影响Fig.7 Effect of Φ on σ_{dmax}

(2) 试件高度 h

试件高度对级配碎石 σ_{dmax} 的影响见图8,试件直径 $\Phi=300 \text{ mm}$.由图8可知,当试件高度 $h < 500 \text{ mm}$

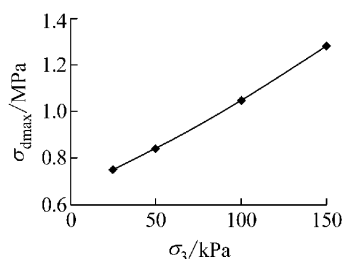
图8 h 对 σ_{dmax} 的影响Fig.8 Effect of h on σ_{dmax}

时, σ_{dmax} 随着 h 减小近似线性减小;当 $h \geq 500 \text{ cm}$ 后, σ_{dmax} 随 h 增大而减小,但减小幅度也随之变小.

考虑数值试验仿真性与计算速度,同时为确保模拟试验结果和室内试验具有可比性,试件尺寸取为 $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$.

2.4 围压影响

围压对级配碎石双轴数值试验的影响规律见图9,计算时,试件尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$,加载速率为 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$.由图9可知, σ_3 是影响级配碎石强度的主要因素,随着 σ_3 的增大,试件 σ_{dmax} 迅速增大,且两者具有很好的线性关系.

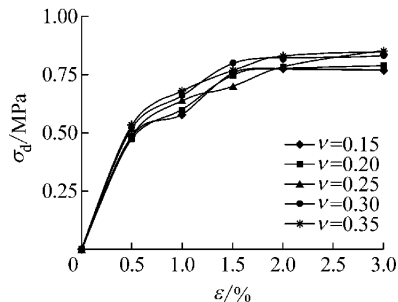
图9 σ_3 对 σ_{dmax} 的影响Fig.9 Effect of σ_3 on σ_{dmax}

3 微力学参数的影响

采用应变率控制模式加载,加载速率为 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$,试件尺寸为 $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$,试验围压 $\sigma_3=100 \text{ kPa}$,研究微力学参数对级配碎石双轴数值试验的影响规律.

3.1 泊松比

泊松比对级配碎石应力-应变关系曲线影响规律见图10.计算时, $\mu=5.0$, $G=1500 \text{ GPa}$.由图10可知,各应力-应变曲线集成簇,相互间差别不明显,表明泊松比对级配碎石双轴数值试验的模拟结

图10 泊松比对应力-应变关系曲线的影响 ($\mu=5.0$, $G=1500 \text{ GPa}$)Fig.10 Effect of Poisson's ratio on stress-strain curve ($\mu=5.0$, $G=1500 \text{ GPa}$)

果影响不大. 因此, 建议根据集料岩性选取泊松比, 并将其作为固定值, 以简化微力学参数调整过程. 如无特殊说明, 本文后续研究中 $\nu=0.20$.

3.2 摩擦系数

摩擦系数对级配碎石应力-应变关系曲线影响规律见图 11. 计算时, 剪切模量 $G=1\ 500\ \text{GPa}$. 由图 11 可知, 应力-应变关系曲线峰值和初始弹性模量随摩擦系数的增加而提高. 当 $\mu \leq 0.4$ 时, 应力-应变曲线呈现持续上升的趋势, 峰值不明显, 这与实际情况差异较大, 但当 $\mu > 0.4$ 后, 这种不利情况得到缓解. 这是因为当轴向应变积累到一定程度后, 由于摩擦系数较小, 颗粒间摩擦力不足, 部分颗粒会向空隙处迅速滑移, 导致颗粒体系的密实度迅速改变, 曲线则发生异常上升, 从而影响数值模拟结果的稳定性. 为了使模拟结果真实反映实际情况, 建议 μ 在 $0.4 \sim 0.5$ 范围内选取.

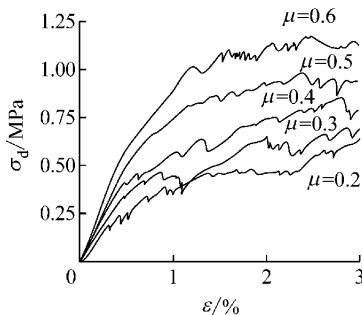


图 11 摩擦系数对应力-应变关系曲线的影响 ($G=1\ 500\ \text{GPa}$)

Fig. 11 Effect of friction coefficient on stress-strain curve ($G=1\ 500\ \text{GPa}$)

3.3 剪切模量

剪切模量对级配碎石应力-应变关系曲线影响规律见图 12. 计算时, $\mu=5.0$. 由图 11 和 12 可看出, 与摩擦系数相比, 剪切模量对应力-应变曲线形态影响较小, 但峰值随剪切模量的增加而增加, 剪切模量

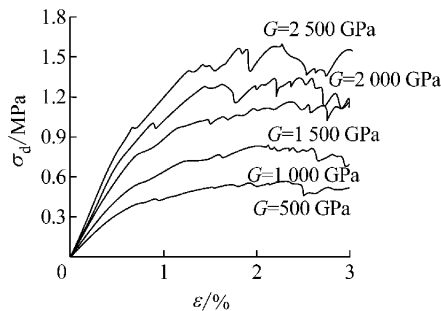


图 12 剪切模量对应力-应变关系曲线的影响 ($\mu=5.0$)

Fig. 12 Influence of shear modulus on stress-strain curve ($\mu=5.0$)

每增大 $500\ \text{GPa}$, 峰值约增大 $200 \sim 300\ \text{kPa}$. 因此, 建议对 G 初选后, 根据室内试验结果适当放大或缩小.

4 双轴数值试验的细观机制

级配碎石双轴数值试验初始状态和 360 万时步下对应的细观接触力图 and 位移矢量图如图 13~14 所示.

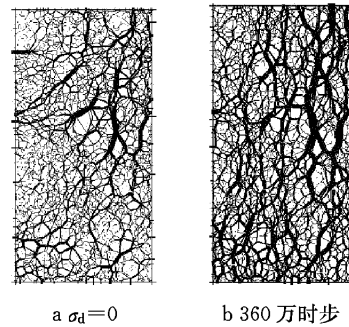


图 13 加载前后细观接触力矢量图 ($\sigma_3=100\ \text{kPa}$)

Fig. 13 Vector diagram of meso contact force before and after loading ($\sigma_3=100\ \text{kPa}$)

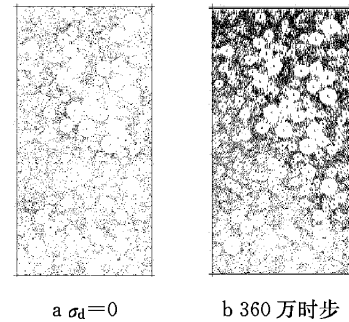


图 14 加载前后位移矢量图 ($\sigma_3=100\ \text{kPa}$)

Fig. 14 Vector diagram of displacement before and after loading ($\sigma_3=100\ \text{kPa}$)

从图 13~14 中可看出, 在 $\sigma_d=0$ 时, 试件仅受到 σ_3 作用, 颗粒间接触力较小; 随着 σ_d 增加, 颗粒间接触力逐渐增大, 并形成贯穿试件的力柱. 颗粒位移矢量也随着 σ_d 增加而逐渐变大, 并形成明显的剪切带. 试件底部的颗粒位移矢量很小, 说明加载对于试件的底部影响较小.

5 结论

(1) 基于 PFC^{2D} 软件, 构建了级配碎石双轴数值试验方法, 并通过室内试验, 验证了数值试验方法的可靠性. 结果表明: 应力-应变关系曲线模拟值和实测值基本吻合, σ_{dmax} 模拟误差小于等于 6.19% .

(2)研究了不同试验条件对级配碎石双轴数值试验的影响规律.结合试验结果与室内试验条件,并考虑数值试验仿真性和计算速度,建议级配碎石双轴数值试验条件为:应变率控制模式、加载速率 $0.5\% \cdot \text{min}^{-1}$ 、试件尺寸 $\Phi 300 \text{ mm} \times h 600 \text{ mm}$.

(3)研究了微力学参数对级配碎石双轴数值试验的影响规律,提出级配碎石双轴数值试验微力学参数的取值范围为: $\nu=0.20$, $\mu=0.4 \sim 0.5$, G 根据级配碎石 σ_{dmax} 随 G 呈线性增长的规律结合室内试验结果确定.

(4)分析了双轴试验的细观机制,结果表明: $\sigma_d=0$ 时,试件受 σ_3 作用,颗粒间接触力较小;随着 σ_d 增加,颗粒间接触力和位移矢量逐渐增大,并形成贯穿试件的力柱和明显的剪切带.

参考文献:

- [1] 张维全,魏星,周适,等.级配碎石室内大型剪切试验性能研究[J].中外公路,2009,29(2):218.
ZHANG Wei-quan, WEI Xing, ZHOU Shi, *et al.* Study of indoor large shear test performance on graded broken stone[J]. Journal of Chinese and Foreign Highway, 2009, 29(2): 218.
- [2] 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.
- [3] Kokusho T. Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range[J]. Soil and Foundation, 1980, 20(2): 45.
- [4] Janoo V C, Bayer J J. The effect of aggregate angularity on base course performance[D]. [S. l.]: US Army Corps of Engineers Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 2000.
- [5] Cundall P A, Strack O D L. The distinct element method as a tool for research in granular media(ENG76-20711, Part I, Part II)[R]. Minnesota: The National Science Foundation, 1979.
- [6] Bardet J P, Proubet J. A numerical investigation of structure of persistent shear bands in granular media[J]. Geotechnique, 1991, 41(4): 599.
- [7] Bardet J P, Proubet J. Shear-band analysis in idealized granular material[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(8): 397.
- [8] 蒋应军,李岷,马庆伟,等.级配碎石力学性能影响因素的试验研究[J].交通科学与工程,2010,26(1):6.
JIANG Yingjun, LI Di, MA Qingwei, *et al.* Experimental research on influencing factors of strength properties for graded broken stone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(1): 6.
- [9] 蒋应军,李思超,王天林.级配碎石动三轴试验的数值模拟方法[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(3):604.
JIANG Yingjun, LI Sichao, WANG Tianlin. Numerical method of dynamic triaxial test on graded crushed rock[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(3): 604.
- [10] 郭培玺,俞缙,林绍忠,等.颗粒材料力学特性的数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(6):806.
GUO Peixi, YU Jin, LIN Shaozhong, *et al.* Numerical simulation on mechanical properties of granular materials[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 806.
- [11] 周健,王家全,曾远,等.土坡稳定分析的颗粒流模拟[J].岩土工程,2009,30(1):86.
ZHOU Jian, WANG Jiaquan, ZENG Yuan, *et al.* Simulation of slope stability analysis by particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 86.
- [12] 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.
- [13] 王端宜,赵熙.沥青混合料单轴压缩试验的离散元仿真[J].华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(7):37.
WANG Duanyi, ZHAO Xi. Simulation of uniaxial compression test for asphalt mixture with discrete element method[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 37.
- [14] 唐炯,戴经梁.基于颗粒流程序的沥青混合料颗粒接触模拟[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(1):111.
TANG Xian, DAI Jingliang. Simulation of particle contact of asphalt mixture based on particle flow code[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2009, 30(1): 111.
- [15] 蒋应军,任蛟龙,徐寅善,等.级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(5):699.
JIANG Yingjun, REN Jiaolong, XU Yinshan, *et al.* Simulation method of mechanical properties of graded broken stone based on particle flow code[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(5): 699.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. Particle flow code in 2 dimensions (version 2101) [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 1999.
- [17] Itasca Consulting Group Inc. PFC^{2D} user's guide [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [18] 常明丰,裴建中.围压对双轴试验力学参数影响的数值模拟研究[J].公路,2010(11):179.
CHANG Mingfeng, PEI Jianzhong. Numerical simulation study on influence of confining pressure on mechanical parameters of biaxial test [J]. Highway, 2010(11): 179.