

级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法

蒋应军,任蛟龙,徐寅善,李 頔

(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)

摘要: 为了从本质上揭示级配碎石组成结构与力学性能的内在关系,基于 2 维颗粒流软件提出了级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法,并通过该方法以安康瀛湖石灰岩碎石为例研究了级配碎石的力学性能. 结果表明:不同级配碎石的 CBR(california bearing raio)、剪切强度和抗压强度的实测值分别为 495%~692%,592~802 kPa,1.29~1.54 MPa;相应的模拟值分别为 525%~736%,636~839 kPa,1.34~1.54 MPa;平均误差分别为 4.50%,5.07%,5.15%. 模拟结果与实测结果基本吻合,证明颗粒流数值模拟方法应用于级配碎石力学性能研究中的可行性.

关键词: 道路工程; 级配碎石; 颗粒流; 力学性能; 数值模拟

中图分类号: U 414

文献标识码: A

Simulation Method of Mechanical Properties of Graded Broken Stone Based on Particle Flow Code

JIANG Yingjun, REN Jiaolong, XU Yinshan, LI Di

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to reveal the intrinsic relation between composition and mechanical properties of graded broken stone, the simulation method for mechanical properties of graded broken stone is put forward on the basis of particle flow code (PFC^{2D}). A case study of Yinghu Limestone aggregate shows that the measured values of California bearing ratio (CBR), shear strength and compressive strength of graded broken stone under different graduations are 495%~692%, 592~802 kPa, 1.29~1.54 MPa, respectively. The corresponding simulation values are 525%~736%, 636~839 kPa and 1.34~1.54 MPa, with respective average errors of 4.50%, 5.07% and 5.15%, and the simulation results are basically consistent with the measured results. Finally, particle

flow numerical simulation method proves to be feasible in the study of mechanical properties of graded broken stone.

Key words: road engineering; graded broken stone; particle flow code; mechanical properties; numerical simulation

级配碎石是一种由粗、细碎石集料和石屑按一定比例组成的具有空间网络的多相体系,属颗粒性材料. 目前,国内外级配碎石的研究主要以连续介质的弹塑性模型为理论基础,以室内试验或试验路的大量数据累积为研究手段,探讨其级配、力学性能等方面的关系与规律,并进行材料优化设计和路面设计指标研究,取得了一定的成果. 然而,连续介质的弹塑性模型难以准确描述级配碎石组成结构的颗粒性与力学的非线性,也无法在颗粒尺度范围内讨论某些重要力学特性;以室内试验为主要手段的级配碎石物理力学特性研究存在试验工作量大、周期长、数据离散性高等问题. 这都在一定程度上影响了级配碎石的研究与应用^[1-3].

颗粒流离散单元法是近年来迅速发展起来的针对颗粒性材料力学理论及其数值模拟技术,已成功地应用于堆石体、岩土工程、沥青混合料等领域^[4-9]. 将其应用于具有颗粒结构特性的级配碎石中,一方面可以从细观力学特征出发扩展级配碎石的理论研究,深化对试验结果的分析;另一方面可以通过数值模拟完成一些由于经费、时间、技术等因素所制约而无法实施的试验,从而提高试验效率,丰富研究手段.

因此,本文基于 2 维颗粒流软件(PFC^{2D})中的 Hertz 模型和滑动模型确定了级配碎石的颗粒接触本构关系,提出了级配碎石加州承载比(California bearing ratio, CBR)、剪切强度和抗压强度的颗粒流

收稿日期: 2010-07-27

基金项目: 中央高校基本科研业务/长安大学基础研究支持计划(CHD2009JC108);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0749)

第一作者: 蒋应军(1975—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为道路工程. E-mail: jyj@gl.chd.edu.cn

数值模拟方法.并以安康瀛湖石灰岩碎石为例,通过室内试验实测数据验证了数值模拟结果.

1 基本原理

1.1 颗粒流离散单元法

颗粒流离散单元法是基于颗粒流理论的研究非线性介质力学的计算方法,而 PFC^{2D}则是基于该方法的 2 维数值模拟软件.它通过圆形单元来模拟颗粒介质的运动及其相互作用关系,利用接触本构关系描述颗粒的受力状态,采用牛顿第二定律建立运动方程,以动态松弛法迭代求解,获得材料整体的运动形态与宏观力学性能.其计算循环如图 1 所示.

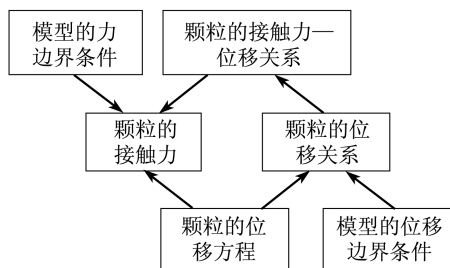


图 1 颗粒流离散单元法的计算循环

Fig.1 Calculation circle of discrete element method of particle flow code

1.2 颗粒接触本构模型

PFC^{2D}中提供了 3 种基本的接触本构模型,分别为接触刚度模型、滑动模型和黏接模型.接触刚度模型描述了颗粒接触力与相对位移间的关系,滑动模型描述了颗粒间的切向相对移动的力学与运动关系,黏结模型则适用于颗粒间存在黏结关系的情况.其中,接触刚度模型又包括了描述线性力—位移关系的线性接触刚度模型和描述非线性力—位移关系的 Hertz 接触刚度模型.考虑到级配碎石为非线性力学特征明显的无结合料材料,本文选用 Hertz 接触刚度模型和滑动模型描述级配碎石的接触本构关系.

Hertz 接触刚度模型是基于 Hertz 理论和 Mindlin-Deresiewicz 理论^[1]得出的非线性的接触模型.它通过泊松比、剪切模量定义,在该模型下颗粒间力学关系通过法向割线刚度 K_n 和切向割线刚度 K_s 计算,其表达式如下:

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

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

式中: U 为颗粒接触重叠量; F_{ni} 为法向接触力; G 为剪切模量; ν 为泊松比; R 为任意两接触颗粒的平均半径.

滑动模型通过摩擦系数定义,即

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

式中: F_s 为滑动摩擦力; μ 为摩擦系数.

2 级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法

2.1 研究思路

级配碎石的力学性能受诸多因素影响,包括集料物理特性、矿料级配、试件成型方式、试验条件等.本文基于颗粒流数值模拟技术,通过构建虚拟试件、模拟力学试验、反演获取微力学参数等手段来表征这些影响因素,提出级配碎石力学性能的颗粒流模拟方法,从而在保证模拟结果精度的前提下再现荷载作用下级配碎石力学性状变化的全过程,为深入研究级配碎石提供强有力的手段.基于上述考虑,本文提出了如图 2 所示的研究思路.

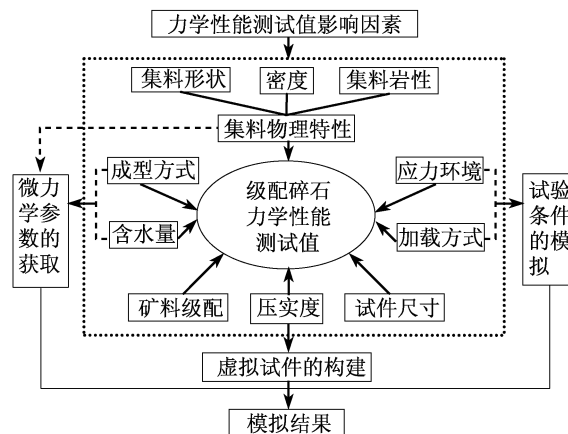


图 2 级配碎石力学性能颗粒流数值模拟方法的构建思路

Fig.2 Construction approaches of particle flow code numerical simulation of mechanical properties of graded broken stone

2.2 力学性能影响因素的模拟

由图 2 可知,级配碎石的力学性能受试验条件、集料物理特性、矿料级配、压实度、成型方式等因素的影响.其中,矿料级配和密实度的影响体现在虚拟试件中,试验条件的影响体现在力学模拟试验中,密度则统一采用实测值.

但在 PFC^{2D}中,为了提高计算效率,将颗粒模型化为圆形,无法直接反映棱角性、针片状等颗粒形状

及孔隙结构;成型方式也由于颗粒本构模型的力—位移关系而难以表征.为了反映这些因素对模拟结果的影响,本文根据在特定集料及成型方式下测试所得的级配碎石力学性能,反演获取模型的微力学参数(泊松比、剪切模量、摩擦系数),并通过这些参数潜在地反映集料形状、孔隙结构、试件成型方式等因素对级配碎石力学性能的影响.

2.3 微力学参数的获取

准确获取级配碎石模型的微力学参数是影响数值模拟效果的关键环节之一.本文采取如图3所示的技术路线实现上述目的,具体获取过程如下:①通过室内试验获取3—5组不同级配的级配碎石力学性能指标(CBR、剪切强度、抗压强度)的实测值;②根据原材料性能试验结果,初拟微力学参数,并通过模拟试验获取①中所选级配的级配碎石各力学性能指标的模拟值;③比较①和②中的实测值与模拟值,若各力学性能指标的误差均小于10%,即认为该组微力学参数为所需参数;否则调整参数,重新进行模拟试验,直至符合要求为止.

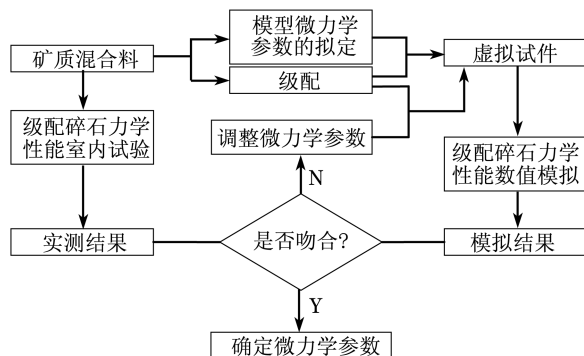


图3 级配碎石颗粒流微力学参数获取流程图

Fig.3 Flow chart of obtaining particle flow code material parameters of graded broken stone

2.4 虚拟试件的构建

虚拟试件是级配碎石力学性能试验标准试件(简称标准试件)在2维状态下的颗粒流表现形式,其构建方法如下.

2.4.1 矿料的生成

根据标准试件的尺寸要求,构建预设区域以供颗粒生成,如图4中墙体 a, b, c, d 围成的方形区域;根据矿料级配、集料密度、试件尺寸和密度计算第 i 种规格集料颗粒应生成的面积 S_i ,并以 S_i 控制第 i 种规格集料颗粒的生成;对依次生成各规格集料颗粒,赋予其密度、泊松比、剪切模量、摩擦系数等微力学参数;设置重力加速度,使混合料颗粒在自

重作用下达到静力平衡状态,如图4所示.这里,由于集料颗粒的圆心坐标是随机产生的,因此在预设区域有限的空间内必然会发生颗粒重叠的现象.当循环开始后,重叠的颗粒会产生较大的初速度,以至穿墙飞出,从而影响模型精度.为了消除这种不良影响,在开始的循环中,每隔一定时间步长将动能归零,然后再令集料颗粒正常收敛到接触力平衡状态.

2.4.2 虚拟试件成型

竖直推动墙体 c 压实上述混合料模型,并通过设置计算时步控制墙体移动距离,使其符合标准试件的尺寸要求,最后令虚拟试件收敛到接触力平衡状态,如图5所示.这里,由于模型颗粒较多,在模拟压实过程中易发生部分小颗粒瞬时速度过大而穿墙飞出和接触力收敛时间过长的情况,这都不利于模型的生成.因此,本文采用分段压实、逐级收敛的方式缩短接触力收敛时间,并消除颗粒过大的动能,防止其穿墙飞出,从而保证模型精度.

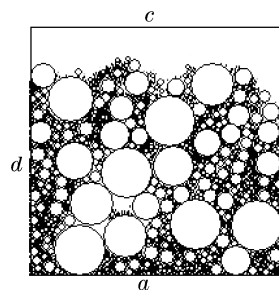


图4 矿料颗粒流模型
Fig.4 Particle flow model of mineral aggregate graded broken stone

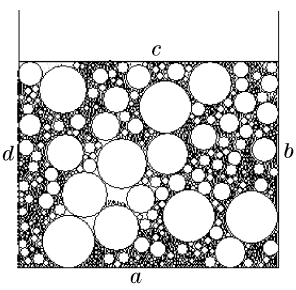


图5 级配碎石虚拟试件
Fig.5 Virtual specimens of mineral aggregate graded broken stone

2.5 力学模拟试验的实现

级配碎石沥青路面在车辆荷载作用下,级配碎石基层主要表现为剪切破坏,因此,抗剪强度是最能评价级配碎石技术性能优劣的指标.然而,实际中由于各种原因剪切试验并未推广应用,而是较多地采用CBR试验.已有研究表明,级配碎石也具有一定的抗压强度^[10-11].因此,本文重点讨论CBR试验、直剪试验和抗压强度试验的颗粒流数值模拟方法.

2.5.1 CBR试验的模拟

试验条件的模拟.以上述级配碎石虚拟试件为基准,移除墙体 c ,同时生成刚性墙体单元 r_1, r_2 用于模拟压板,生成刚性墙体单元 r_3, r_4, r_5 用于模拟压头,各部分尺寸按《公路工程土工合成材料试验规程(JTG E50—2006)》确定,如图6所示.

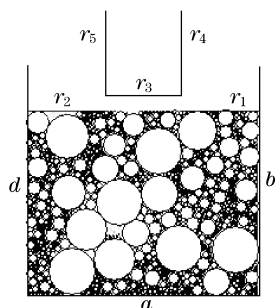


图 6 CBR 试验标准试件数值模型

Fig.6 Numerical model of standard samples of CBR test

加载过程的模拟. 以固定速度竖直推动墙体 r_3 , r_4 , r_5 , 模拟压头贯入试件的过程, 同时监测每个计算时步墙体 r_3 的位移和接触力. 当模拟压头作用于集料颗粒后, 便可得到如图 7 的模拟压头贯入量与贯入力的关系曲线.

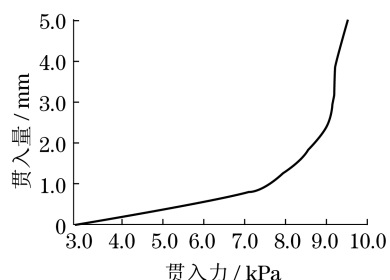


图 7 CBR 试验数值模拟结果

Fig.7 Numerical simulation results of CBR test

从图 7 的关系曲线中分别读取压头贯入量为 2.5 mm 和 5.0 mm 时所对应的贯入力, 并按《公路工程土工合成材料试验规程(JTG E50—2006)》计算 CBR 值.

2.5.2 直剪试验的模拟

试验条件的模拟. 为了模拟剪切盒, 在上述级配碎石虚拟试件的基础上分别用刚性墙体单元 z_1, z_2 和 z_3, z_4 代替墙体 b, d 以模拟剪切盒, 同时生成水平刚性墙体单元 z_5, z_6 , 以防止颗粒在模拟剪切的过程中飞出, 如图 8 所示.

加载过程的模拟. 以固定的速度水平推动墙体 a, z_1, z_4, z_6 剪切上述模型, 利用伺服机制控制墙体 a, c 的接触力以保持围压, 同时监测每个计算时步墙体 z_1 的位移和墙体 z_2, z_3 的接触力. 当剪切作用发生后, 便可得到如图 9 的剪切位移与剪应力的关系曲线. 这里, 通过控制墙体 a, z_1, z_4, z_6 的推动速度可模拟不同的剪切速率; 通过伺服机制控制墙体 a, c 的接触力可模拟不同的围压.

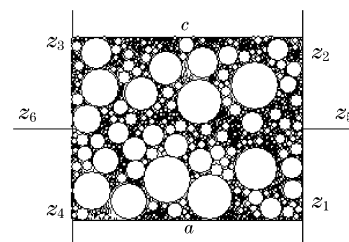


图 8 直剪试验标准试件数值模型

Fig.8 Numerical model of standard samples of direct shear test

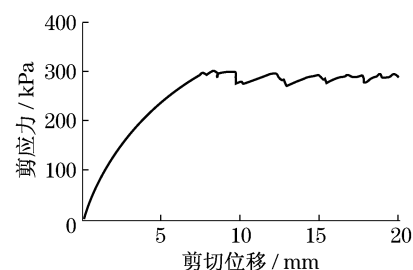


图 9 直剪试验数值模拟结果

Fig.9 Numerical simulation results of direct shear test

从图 9 的关系曲线中, 可以得到如下信息: ①曲线的峰值即级配碎石抗剪强度; ②曲线的形态显示了级配碎石在固定围压下受剪切作用的力学性状的变化规律. 可以看出, 曲线初期呈线性增长直至达到峰值, 反映了试件抵抗剪切破坏的能力; 达到峰值后, 曲线趋于平缓, 代表了试件破坏的过程. 此外, 文献[4]的研究证明, 围压和剪切速率的不同会导致曲线形态产生较大差异.

2.5.3 抗压强度试验的模拟

试验条件的模拟. 在上述级配碎石虚拟试件的基础上竖直提升墙体 b, d 以模拟试件脱模的过程, 效果如图 10 所示. 移除墙体 a, c , 同时生成刚性墙体单元 k_1, k_2 用于模拟压力机压板, 如图 11 所示.

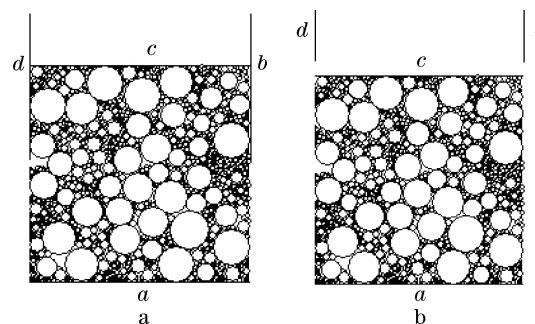


图 10 抗压强度试件脱模示意图

Fig.10 Schematic diagram of compressive strength samples

加载过程的模拟. 以固定的速度竖直推动墙体 k_2 , 模拟试件的压缩破坏过程, 同时监测该墙体每个

计算时步的位移和接触力.当该墙体作用于颗粒后,便可得到如图 12 所示的压缩位移与抗压强度的关系曲线.这里,通过改变墙体 k_2 的推动速度,可模拟压力机的不同加载速度.

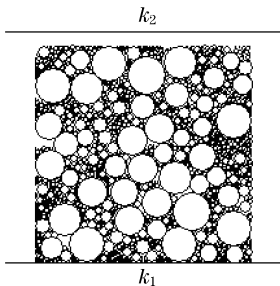


图 11 抗压强度试验标准试件数值模型
Fig.11 Numerical model of standard samples of compressive strength test

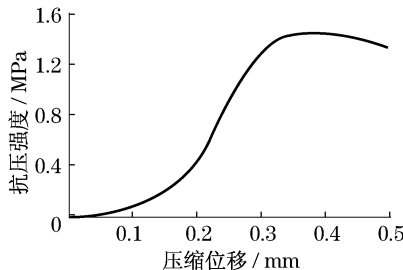


图 12 抗压强度试验数值模拟结果
Fig.12 Numerical simulation results of compressive strength

从图 12 的关系曲线中,可以得到如下信息:曲线的峰值代表了抗压强度的大小;曲线的斜率代表了回弹模量的大小;曲线的形态显示了级配碎石在单轴压缩作用下力学性状的变化规律.可以看出,曲线初期呈幂指数形式增大,表示试件被进一步压密;中期呈线性增长直至达到峰值,反映了试件抵抗荷载作用的能力;达到峰值后,曲线急剧下降,代表了试件的破坏阶段.

3 试验验证

下面以安康瀛湖石灰岩集料为例,论证级配碎石力学性能颗粒流数值模拟方法的可靠性.

3.1 原材料、矿料级配及微力学参数

所用的原材料为安康瀛湖石灰岩,其表观密度见表 1.所采用矿料级配见表 2.

选取表 2 中级配 G,H,I 并按图 3 获取微力学参数,见表 3.

表 1 安康瀛湖石灰岩集料的表观密度
Tab.1 Apparent density of limestone material of Yinghu Ankang

集料粒径/mm	31.5~19.0	19.0~9.5	9.50~4.75	≤4.75
表观密度/(kg·m ⁻³)	2 712	2 709	2 692	2 681

表 2 矿料级配
Tab.2 Mineral aggregate gradation

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
A	100	64	52	40	34	25	15
B	100	64	52	40	32	21	11
C	100	64	52	40	30	17	7
D	100	61	48	35	30	22	13
E	100	61	48	35	28	18	9
F	100	61	48	35	26	15	6
G	100	58	44	30	25	18	11
H	100	58	44	30	24	15	8
I	100	58	44	30	22	13	5

表 3 安康瀛湖石灰岩集料的微力学参数
Tab.3 Micro mechanics parameters of limestone aggregates of Yinghu Ankang

泊松比	剪切模量/GPa	摩擦系数
0.2	8.0	0.35

3.2 模拟结果的验证

级配碎石的 CBR 试验、直剪试验和抗压强度试验的实测结果^[10-11]和数值模拟结果见表 4.

由表 4 可看出,不同级配的级配碎石 CBR、剪切强度和抗压强度的实测值分别为 495%~692%, 592~802 kPa,1.29~1.54 MPa;相应的模拟值分别为 525%~736%,636~839 kPa,1.34~1.54 MPa;平均相对误差分别为 4.50%,5.07%,5.15%.说明数值模拟结果与实测结果基本吻合,从而证明了颗粒流数值模拟方法应用于级配碎石研究中的可行性.

4 结论

(1)本文基于 PFC^{2D}软件中的 Hertz 模型和滑动模型确定了级配碎石的颗粒接触本构关系,提出了级配碎石力学性能(CBR、剪切强度、抗压强度)的颗粒流数值模拟方法.

(2)以安康瀛湖石灰岩集料为例,通过室内试验和数值模拟研究级配碎石的力学性能,结果表明:级配碎石力学性能实测值与模拟值间的误差均在 8%以内,平均误差约为 5.0%,证明级配碎石力学性能的颗粒流数值模拟方法的可靠性.

表 4 数值模拟结果与实测结果对比

Tab.4 Comparison of numerical simulation results and the measured results

级配	CBR				直剪试验				抗压强度试验			
	实测值/ %	模拟值/ %	误差/ %	平均误差/ %	实测值/ kPa	模拟值/ kPa	误差/ %	平均误差/ %	实测值/ kPa	模拟值/ kPa	误差/ %	平均误差/ %
A	495	525	6.06		592	636	7.43		1.29	1.38	6.98	
B	564	580	2.84		639	660	3.29		1.38	1.34	2.90	
C	595	627	5.37		669	716	7.03		1.41	1.31	7.09	
D	518	552	6.56		642	677	5.45		1.37	1.46	6.57	
E	579	595	2.76	4.50	683	710	3.95	5.07	1.54	1.44	6.49	5.15
F	655	676	3.21		770	800	3.90		1.52	1.41	7.24	
G	626	642	2.56		746	772	3.62		1.49	1.54	3.37	
H	657	688	4.72		766	816	6.39		1.41	1.45	2.84	
I	692	736	6.36		802	839	4.61		1.38	1.42	2.90	

(3)颗粒流数值模拟结果分析表明,本文提出的颗粒流数值模拟方法能够较好地再现荷载作用下级配碎石力学性状变化的全过程.此外,利用颗粒流数值模拟研究级配碎石的力学性能,极大地缩短了试验周期,减轻了试验工作量.

参考文献:

[1] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社,2005.
DENG Xuejun. Pavement and subgrade engineering[M]. 2 nd Ed. Beijing:China Communications Press,2005.

[2] 黄晓明, 赵永利, 高英. 高速公路沥青路面设计理论与方法[M]. 北京: 人民交通出版社,2006.
HUANG Xiaoming, ZHAO Yongli, GAO Ying. Theory and method of high way asphalt road design [M]. Beijing: China Communications Press,2006.

[3] 李福晋, 严二虎, 吴大元, 等. 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 Fujin, YAN Erhu, WU Dayuan, et al. Application guide of structural design and constraction technology for asphalt-treated base and graded broken stone [M]. Beijing: China Communications Press,2009.

[4] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物力学导论[M]. 北京: 科学出版社,2009.
SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to particulate matter mechanic[M]. Beijing: Science Press,2009.

[5] 鲍德松, 张训生. 颗粒物与颗粒流[J]. 浙江大学学报: 理学版,2003,30(5):514.
BAO Desong, ZHANG Xunsheng. Granular matter and granular flow[J]. Journal of Zhejiang University: Science Edition,2003,

30(5):514.

[6] 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 asp-halt mixture with discrete element method[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2009,37(7):37.

[7] 任磊, 肖昭然, 胡霞光. 级配碎石直剪试验的细观分析[J]. 公路,2008(5):152.
REN Lei, XIAO Zhaoran, HU Xiaguang. Micro-mechanical analysis for direct shear tests of grade crushed stones [J]. Highway,2008,NO. 5:152.

[8] 唐炯, 戴经梁. 基于颗粒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.

[9] 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.

[10] 蒋应军, 李颀, 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.

[11] 李颀. 基于振动法的级配碎石设计标准与设计方法研究[D]. 西安: 长安大学公路学院,2010.
LI Di. Research on graded broken stone design standard and design method based on vibrating compaction [D]. Xi ' an: Chang ' an University. Highway School,2010.