

文章编号: 1002-0268 (2008) 12-0080-04

碾压混凝土劈裂抗拉强度及其尺寸效应的细观数值研究

屈彦玲¹, 杨 茜², 张相龙³

(1. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041; 2. 石家庄铁道学院 河北 石家庄 050043;
3. 河北路桥集团, 河北 石家庄 050080)

摘要: 为了从细观结构上研究碾压混凝土的劈裂抗拉强度及其尺寸效应, 采用随机骨料模型, 在细观层次上将碾压混凝土看成是由硬化水泥粉煤灰砂浆体、粗骨料颗粒、二者间的黏结带和砂浆层面构成的三相非均质复合材料; 利用有限元方法数值模拟研究碾压混凝土的细观损伤断裂和劈裂抗拉, 对其劈裂抗拉强度及其尺寸效应进行了研究。结果表明: 黏结带和层面是碾压混凝土劈裂抗拉破坏的薄弱环节; 碾压混凝土试件的劈裂抗拉强度存在明显的尺寸效应, 和一般的试验规律基本吻合; 随机生成骨料结构的方法, 可以有效地研究碾压混凝土的细观损伤断裂。

关键词: 道路工程; 碾压混凝土; 有限元; 劈裂抗拉强度; 尺寸效应

中图分类号: U414.1+8

文献标识码: A

Numerical Study of Split-tensile Strength and Size Effect of Rolled Compacted Concrete on Meso-level

QU Yan-ling¹, YANG Qian², ZHANG Xiang-long³

(1. Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang Hebei 050041, China;
2. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang Hebei 050043, China;
3. Hebei Highway and Bridge Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050080, China)

Abstract: For studying the split-tensile strength of roller compacted concrete (RCC) and its size effect on meso-level, the random aggregate model was used and RCC was taken as three-phase heterogeneous composites consisting of mortar smut matrix and pulverized coal ash, aggregate, smut matrix plane and bond between matrix and aggregate on meso-level. The extension of cracks and the mechanical properties of RCC in split-tensile test were simulated using the finite element method to find out the split-tensile strength of RCC and its size effect. The result indicates that (1) the contact surface and plane are the weak place of split-tension of RCC; (2) the split-tensile strength of RCC specimen exists significant size effect which is consistent with the laws of the usual trials basically. The way of generating aggregates structure randomly is an effective method to study the micro-fracture injury of RCC.

Key words: road engineering; roller compacted concrete; FEM; split-tensile strength; size effect

0 引言

碾压混凝土作为一种工程材料, 在路基工程、水电工程中应用比较广泛。室内进行碾压混凝土力学性

能试验研究中采用的试件尺寸由于测试条件限制, 难以接近实际尺度, 而进行大尺度试验受到技术上和资金上的限制。目前计算机技术的发展, 为从细观层次研究宏观层次的力学问题开辟了广阔的前景。国际上

收稿日期: 2007-10-10

基金项目: 水利部科技基金资助项目 (SJ-9701)

作者简介: 屈彦玲 (1972-), 男, 黑龙江海龙人, 副教授, 研究方向为路桥、结构工程. (quyan98@tom.com)

在碾压混凝土细观数值试验方面的研究工作刚刚开始, 国内则还很少见^[1]。采用混凝土随机骨料生成技术及有限元数值模拟技术研究碾压混凝土的细观损伤断裂机理、强度特性及其尺寸效应与宏观力学性能的关系, 可以为碾压混凝土力学性能的数值模拟开辟新途径。

采用混凝土随机骨料模拟技术^[2,3]及有限元数值分析技术, 在细观层次上重点研究了碾压混凝土的劈裂抗拉强度及其破坏机理, 并对其尺寸效应进行了研究。

1 计算模型

1.1 随机骨料模型

把混凝土视为由粗骨料、水泥砂浆及两者界面粘结带组成的复合材料。骨料分成细骨料和粗骨料, 骨料的大小可用颗粒分配曲线表示。假定其颗粒为球状, 可借助于富勒 (Fuller) 抛物线确定骨料颗粒的三级级配曲线, 由该级配浇注的混凝土可产生优化的结构密度和强度。

采用试件截面为 16.7 cm×16.7 cm 的三级配混凝土, 将小于 5 mm 的细骨料计入砂浆匀质体, 计算得出的各级骨料颗粒数: 6 cm 粒径的骨料 2 粒, 3 cm 粒径的骨料 6 粒, 1.2 cm 粒径的骨料 50 粒。按各种粗骨料在截面上不相重叠的条件, 借助蒙特卡罗方法^[4], 在试件截面上随机确定骨料的位置、形状和尺寸, 产生出随机骨料模型。在试件中部设置一层 1 cm 厚的水泥砂浆层以模拟碾压混凝土层面连接, 据此生成碾压混凝土随机骨料模型。考虑到骨料随机分布的影响, 本文对 14 种不同骨料分布的试件进行了模拟计算, 取劈裂抗拉强度的统计平均值作为计算值。这样计算出的结果就更具有代表性, 更能接近实验室的实际情况。该尺寸试件的一种随机分布骨料模型如图 1 所示。

1.2 有限元模型

利用自编的有限元分析程序, 对碾压混凝土层面劈裂抗拉试件作仿真模拟分析。根据 Delaunay^[5~7]三角剖分的原理, 通过引进程序来实现对随机骨料颗粒分布区域的全自动剖分, 对不同单元分配不同的材料特性。以上材料类型的判断通过编程由计算机实现。图 1 中碾压混凝土层面劈裂抗拉试件的有限元计算网格如图 2 所示。

1.3 材料参数

综合文献[8~10]及有关试验资料^[11]后, 随机骨料模型材料性能的取值见表 1。

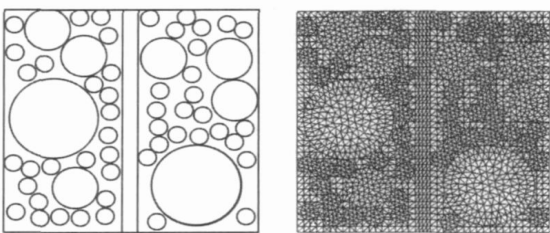


图 1 随机颗粒分布图 图 2 有限元网格剖分图
Fig 1 Distribution of random aggregates Fig 2 Finite element grids

表 1 随机骨料模型材料性能

Tab 1 Material properties of random aggregate model

材料	抗压强度 f_c/MPa	抗拉强度 f_t/MPa	弹性模量 E_0/GPa	泊松比 μ
水泥砂浆界面层	25.0	2.5	26.0	0.22
水泥粉煤灰砂浆	25.0	2.5	26.0	0.22
骨料	80.0	10.0	55.5	0.16
粘结带	22.0	1.5	25.0	0.16

2 劈裂抗拉数值模拟

2.1 劈裂抗拉强度数值模拟计算

劈裂抗拉强度按式 (1) 计算:

$$R_{pl} = 0.637 \frac{P}{A_0}, \tag{1}$$

式中, R_{pl} 为试样的劈裂抗拉强度; P 为破坏荷载; A_0 为劈裂面积。

对河北省桃林口水库碾压混凝土试件进行了劈裂抗拉强度试验^[11]。劈裂抗拉强度试样 36 个, 最大值 3.84 MPa, 最小值 1.26 MPa, 平均值为 2.71 MPa。模拟计算结果与试验结果的对比如表 2。计算结果与试验结果基本吻合。

表 2 计算劈裂抗拉强度与试验强度的对比

Tab 2 Contrast of split-tensile strengths of computation and experiment

模拟类型	数值计算值 (14 个模拟试件平均值)	试验值 (36 个试件平均值)
劈裂抗拉强度/MPa	2.57	2.71

2.2 劈裂抗拉破坏机理

模拟试件劈拉破坏时的裂纹分布图如图 3 所示。

从破坏裂纹分布图 3 可以看出, 带层面碾压混凝土试件受劈裂抗拉时, 因粘结带的强度比硬化水泥砂浆的强度低, 所以靠近层面的粘结带单元先破坏, 随后裂缝沿碾压混凝土的层面扩展开来, 直到破坏。同时可以看出裂纹起源于荷载作用点处, 然后沿着荷载作用面传播; 破坏先是在粘结带进行, 在其大部破坏以后, 破坏区转移到层面, 最后直到粘结带和层面

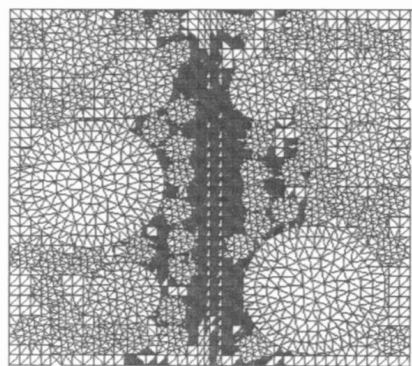


图 3 碾压混凝土模拟试件劈裂抗拉破坏裂纹分布图

Fig 3 Distribution of simulated split-tension crack of RCC specimen

完全破坏。

3 劈裂抗拉强度尺寸效应

为了模拟碾压混凝土劈裂抗拉试验的尺寸效应,再取 25.1 cm×25.1 cm 和 33.4 cm×33.4 cm 两种不同尺寸的试件进行计算。25.1 cm×25.1 cm、33.4 cm×33.4 cm 碾压混凝土模拟试件劈裂抗拉破坏时的裂纹情况分别见图 4。

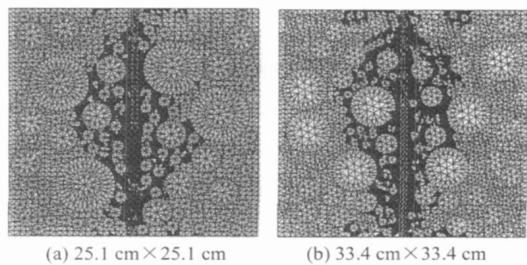


图 4 试件劈拉破坏裂纹分布图

Fig 4 Distribution of split-tension crack of specimen

不同试件尺寸的劈裂抗拉强度 (平均值) 及其相对值列于表 3。从表 3 中可以看出,劈裂抗拉强度随试件尺寸的加大降低。

表 3 碾压混凝土试件尺寸对劈拉强度的影响

Tab 3 Influence of the size of RCC specimen on split-tensile strength

试件尺寸/cm	16.7×16.7	25.1×25.1	33.4×33.4
劈拉强度/MPa	2.57	2.28	2.04
劈拉强度百分数/%	100	89	79

清华大学、河海大学、大连理工大学和水利部成都勘测设计院共同进行常规混凝土材料研究的二滩混凝土劈裂抗拉强度试验的成果^[12]如表 4 所示。

对常规碾压混凝土试验成果和混凝土的模拟计算成果进行对比,可以看出表 3 与表 4 的变化规律较为

表 4 混凝土试件尺寸对劈拉强度的影响

Tab 4 Influence of the size of concrete specimen on split-tensile strength

试件尺寸/cm	10×10×10	15×15×15	20×20×20	30×30×30
劈拉强度百分数/%	125	100	89	78

吻合。

碾压混凝土劈裂抗拉强度存在尺寸效应的原因,要从碾压混凝土的细观结构来分析。碾压混凝土试件是由硬化水泥粉煤灰砂浆基底、粗骨料、基底与骨料之间的粘结带和水泥砂浆中间层面所形成的非均质复合材料,试件的宏观破坏实质上是细观结构损伤断裂行为的积累和发展。在碾压混凝土试件内部,以骨料和基底之间的粘结带抗拉强度最低,故最易由粘结带开裂。试件尺寸越大,骨料数就越多,粘结带也就越多,越容易受载开裂。因此,大试件的抗拉强度常低于小试件,表现出尺寸效应。

4 结论

(1) 数值计算表明:碾压混凝土骨料与砂浆的界面与常规混凝土一样是薄弱的环节,不同的是,由于碾压混凝土存在薄弱的层面,所以破坏更容易从层面发生;在实际工程中,应采用有效措施提高碾压混凝土粘结界面的力学性能和工作状态。

(2) 碾压混凝土试件劈拉强度存在明显的尺寸效应这一点和一般试验规律基本吻合。

(3) 仿真模拟计算得到的劈裂抗拉强度与桃林口水库试验中的劈裂抗拉强度值基本吻合,表明这种随机骨料模型具有广泛的应用前景,为碾压混凝土结构的细观力学性能研究提供了一条新的途径。

(4) 数值计算所采用的随机生成骨料结构的方法,是一种研究碾压混凝土细观损伤断裂的有效工具。

参考文献:

References:

[1] 唐春安,朱万成.混凝土损伤与断裂-数值试验[M].北京:科学出版社,2003.
TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Injury and Fracture of Concrete: Numerical Test [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] BRANDTZAEG Z P, TABBARA M R, KAZEMI M T, et al. Random Particle Models for Fracture of Aggregate of Fiber Composites [J]. Journal of Engineering Mechanical, ASCE, 1990, 116 (8): 1 686- 1 705.

[3] DE SCHUTTER G, TAERWE L. Random Particle Model for Concrete Based on Delaunay Triangulation [J]. Materials and

- Structures, 1993, 26: 67– 73.
- [4] 裴鹿成, 王仲奇. 蒙特卡罗方法及其应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1998.
PEI Lu-cheng, WANG Zhong-qi. Monte Carlo Method and Its Application [M]. Beijing: Ocean Press, 1998.
- [5] WALRAVEN J C, REINHARD H W. Theory and Experiments on the Mechanical behavior of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading [J]. HERON, 1981, 26 (1A): 25– 29.
- [6] 丁永祥, 夏巨谟, 王英, 等. 任意多边形的 Delaunay 三角剖分 [J]. 计算机学报, 1994, 17 (4): 270– 275.
DING Yong-xiang, XIA Ju-zhan, WANG Ying, *et al.* Delaunay Triangulation of Arbitrary Polygon [J]. Journal of Computers, 1994, 17 (4): 270– 275.
- [7] SCHLANGEN E, GRBOCAI E J. Fracture Simulation of Concrete Using Lattice Models: Computational Aspects [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 57 (2/3): 319– 322.
- [8] JAN G M, VAN MIER. Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models [M]. New York: CRC Press, 1997: 253– 265.
- [9] 刘光廷, 王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟碾压混凝土材料的断裂 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1996, 36 (1): 84– 89.
- LIU Guang-ting, WANG Zong-min. Numerical Simulation for the Fracture of RCC by Using Random Aggregate Model [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1996, 36 (1): 84– 89.
- [10] 高政国, 刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2003, 43 (8): 1120– 1123.
GAO Zheng-guo, LIU Guang-ting. Research of Two-dimensional Random Aggregate Model of Concrete [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2003, 43 (8): 1120– 1123.
- [11] 河北省水利基本建设工程质量检测中心. 桃林口水库大坝混凝土芯样试验报告 [R]. 1996.
Water Conservancy Project Quality Inspection Center of Hebei Province. The Report of Core Sample Test on the Concrete Dam of Tao Lin-kou Reservoir [R]. 1996.
- [12] 能源部水利部成都勘测设计院. 高混凝土坝设计计算方法与设计准则 [R]. 1990: 172.
Chengdu Survey and Design Institute of Ministry of Energy and Ministry of Water Resources. Designing Methodology and Designing Guidelines on High Concrete Dam [R]. 1990: 172.

(上接第 79 页)

- SHEN Jin-an. Service Performance of Asphalt and Asphalt Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 郑健龙, 周志刚, 张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
ZHENG Jian-long, ZHOU Zhi-gang, ZHANG Qi-sen. Design Theory and Method for Prevent Crack of Asphalt Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [3] 陈传尧. 疲劳与断裂 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
CHEN Chuan-yao. Fatigue and Fracture [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [4] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
SHA Ai-min. Structure and Performance for Material of Semi-rigid Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [5] 元松, 谈至明. 沥青路面荷载型竖向反射裂缝疲劳断裂分析 [J]. 同济大学学报, 2007, 35 (10): 1352– 1356.
YUAN Song, TAN Zhi-ming. Analysis of Fatigue Fracture on Vertical Reflective Crack under Traffic Load on Asphalt Pavement [J]. Journal of Tongji University, 2007, 35 (10): 1352– 1356.
- [6] JTG 50-2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG 50-2006, Specification for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [7] 元松. 半刚性基层沥青路面结构疲劳断裂分析 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
YUAN Song. Analysis of Fatigue Fracture on Asphalt Pavement of Semi-rigid Base [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [8] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
ZHU Bo-fang. Theory and Application of Finite Element Method [M]. Beijing: China Waterpower Press, 1998.
- [9] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Theory and Method for Pavement Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [10] 孙立军. 沥青路面结构行为理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
SUN Li-jun. Theory of Structural Behavior for Asphalt Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 黄晓明, 张玉宏, 李昶, 等. 水泥混凝土路面碎石化层应力强度因子有限元分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (2): 52– 55.
HUANG Xiao-ming, ZHANG Yu-hong, LI Chang, *et al.* Stress Intensity Factor Analysis of PCC Slab after Rubblization by FEA [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (2): 52– 55.