

冲击速度及骨料率对混凝土动强度的影响研究

党发宁¹, 王宝生², 李玉涛¹, 任 劼¹, 方建银¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国电建集团 昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 混凝土结构抗爆炸冲击能力研究具有很重要的军事防护意义。国内外学者已对混凝土动强度的提高机理进行了大量研究, 但大多探讨单个因素对混凝土动强度的影响, 缺乏对多因素耦合作用下混凝土动强度规律的研究, 并且对混凝土抗压动强度和抗拉动强度间的关系研究也较少。通过霍普金森压杆试验仪的单轴压缩试验和巴西圆盘劈裂试验, 测定了不同骨料率和冲击速度下混凝土的抗压动强度和抗拉动强度, 再对试验结果进行研究分析, 得到混凝土动强度的理论表达式, 并将混凝土抗拉抗压动强度进行了对比分析。结果表明: 混凝土抗压动强度与混凝土骨料率和冲击速度呈正相关, 且随着混凝土骨料率的增大, 冲击速度越小, 混凝土抗压动强度增加幅度越大, 受动载时, 混凝土抗压动强度提高幅值大于抗拉动强度提高幅值。

关键词: 混凝土动强度; 骨料率; 冲击速度; 增加幅度; 霍普金森压杆试验

中图分类号: TU502

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0007-07

Study on influence of impact velocity and aggregate ratio on dynamic strength of concrete

DANG Faning¹, WANG Baosheng², LI Yutao¹, REN Jie¹, FANG Jianyin¹

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Power China, Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: The research on the explosive impact resistance of concrete structure is very important for military protection. Scholars at home and abroad have done a lot of research on the mechanism of improving the dynamic strength of concrete. However, most studies have explored the influence of a single factor on the dynamic strength of concrete, lacking research on the dynamic strength law of concrete under the coupling of multiple factors, and there is also limited research on the relationship between compressive dynamic strength and tensile strength of concrete. Through the uniaxial compression test and Brazilian disc splitting test of Hopkinson pressure bar tester, the compressive and tensile dynamic strength of concrete under different aggregate ratios and impact velocities are measured. Then the theoretical expression of concrete dynamic strength is obtained by studying and analyzing the test results, and the tensile and compressive dynamic strength of concrete is compared. It is found that the compressive dynamic strength of concrete is positively correlated with the aggregate ratio and impact velocity of concrete. With the increase of aggregate ratio, the smaller the impact velocity is, the greater the increase of compressive dynamic strength of concrete is. When subjected to dynamic load, the increase of the compressive dynamic strength of concrete is greater than that of the pull strength.

Key words: dynamic strength of concrete; aggregate rate; impact velocity; increase rate; Hopkinson pressure bar test

无论是军用掩体建筑还是重要的民用建筑, 历来都是军事攻击和恐怖袭击的重点目标, 这些建筑一般以混凝土为主要建筑材料, 所以混凝土的强度研究不仅要考虑承受静载的能力, 更要考虑抵抗可能出现的爆炸冲击等动荷载的能力。

早期, 丁卫华等^[1]使用自行研制的循环加载系

统, 在 CT 试验机上对混凝土进行动态加载试验, 并进行了相关的研究分析, 发现混凝土试件受动荷载时, 裂纹发展速度更快且起裂点更多。随后, 马怀发等^[2]基于混凝土损伤过程观测结果, 对混凝土动强度影响因素, 如惯性效应等进行了研究分析, 之后结合混凝土损伤滞后效应, 对混凝土动

收稿日期: 2022-05-05

修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979225; 51679199)

第一作者: 党发宁(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程数值分析、计算力学等方面的教学与研究工作。E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn

通信作者: 王宝生(1998—), 男, 硕士生, 主要从事混凝土细观力学特性、水工结构与岩石力学研究。E-mail: 199157679@qq.com

强度进行了更进一步的研究分析,认为混凝土的变形滞后效应与混凝土受压时间有关,且混凝土变形滞后终将导致损伤滞后,最终的表现就是应变率强化效应。吴胜兴等^[3]建立了微观角度上的混凝土抗拉强度模型,对混凝土抗拉强度的机理进行了研究,在此基础上将以前的试验结果带入模型进行计算,进一步验证了模型的可行性。杜成斌等^[4]结合细观力学对混凝土动强度的提高机理进行了进一步的研究,并使用 ABAQUS 对混凝土的动拉弯破坏过程进行数值模拟,分析了应变率效应和惯性效应对混凝土材料强度增强因子的影响。在现场试验中,李毅敏等^[5]通过室内爆破冲击模型试验和现场爆破测试,结合有限元数值计算,得到了爆破冲击作用下早龄期混凝土强度随受振龄期、冲击速度的变化规律。而秦川等^[6]通过进行 SHPB 试验,得到了混凝土抗拉强度在 $3 \sim 13 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的动力增强系数,证明了混凝土抗拉强度以及混凝土试件的损伤程度都和应变率呈正相关关系。刘建忠等^[7]对不同钢纤维掺量下的高性能混凝土的动态力学性能进行了研究,发现混凝土往往是在多次冲击后,损伤不断累积才破坏的。李晓琴等^[8]建立了 FRP 混凝土搭接接头有限元模型,对其在动荷载下的滑移变形进行了研究,讨论了高加载速率对混凝土强度的影响。理论研究方面,潘峰等^[9]基于对三点弯曲梁在不同冲击速度下破坏形态的分析,认为混凝土材料的不均匀性和惯性效应共同作用是混凝土动强度提高的主要原因。同时提出混凝土破坏后的裂纹发展路径也会影响混凝土的静、动强度。在国外,Hao 等^[10]采用中尺度混凝土材料模型模拟冲击试验,研究了高应变速率下骨料对混凝土材料抗压强度的影响,检查并量化了骨料对混凝土材料的 DIF 的影响。Mu 等^[11]通过进行三维数值试验研究,对抗压强度与应变率进行了研究,证明了混凝土在受动荷载时,其所受侧向约束与应变率有关。Savinykh 等^[12]研究了抗压静强度为 30 MPa 的混凝土受动力冲击时的动强度演变,使用各种直径的混凝土棒进行试验,通过测量断裂带末端的压缩脉冲参数,发现混凝土动抗压强度比静态强度高 3.5 倍。Pan 等^[13]通过建立粒子模型,对混凝土的动态劈裂拉伸进行了数值模拟研究,并提出了一种新的等效动量方案,研究发现惯性力对混凝土动态劈裂破坏起主导作用。而基于霍普金森压杆试验 Ren 等^[14]研究了混凝土破坏过程中弹性应变能变化率与强度之间的关系,根据能量

转换的基本原理,提出混凝土动态强度的提高是由于能量释放的滞后效应引起的,并通过 SHPB 试验对此进行了验证。Lee 等^[15]研究出一种新的混凝土模型,此种混凝土模型通过考虑应变加速度和试样的几何形状排除了惯性效应,克服了现有混凝土模型在动态抗压强度提高因子(DIF)上的局限性。Zhao 等^[16]提出混凝土材料的抗拉强度在非常高的应变率下具有极大值,并讨论了仅由应变率引起的混凝土类材料的最大单轴抗拉强度的物理意义及其确定方法。在国内,李晓琴等^[17]对混凝土的 SHPB 试验进行了数值模拟研究,分析了不同混凝土界面摩擦效应及应变率变化对混凝土动强度的影响。任劼^[18]从研究混凝土动态破坏过程中的能量转化过程出发,通过动态试验验证以及数值试验分析的方法,提出了能量角度的混凝土动态强度提高机理,并验证了所提机理的合理性及适用性,最后进一步分析了细观非均匀性对混凝土动态强度的影响。之后,利用大型多功能动静力三轴仪,孙尚鹏等^[19]通过压剪复合受力状态下的剪切试验,对此状态下的混凝土动强度进行了研究。程卓群等^[20]通过对混凝土抗压试验结果进行研究分析,发现随应变速率的增大,混凝土峰值应变先减小后增大,弹性模量先增大后减小。张修文等^[21]进行了不同孔隙率下的混凝土单轴压缩试验,并通过改变水压力及应变速率,对混凝土抗压强度等进行了研究分析,同时证明了孔隙水的存在起初会降低混凝土的强度,而随着水压力增大,孔隙水的存在反而会增大混凝土强度。王志航等^[22]对碳纤维增强混凝土进行 SHPB 试验,研究了应变率和聚合物掺量对混凝土动态压缩强度及韧性的影响,发现聚合物会在一定程度上增强其动态力学性能,但当聚合物掺量过大时,会在混凝土中形成“软弱夹层”,对其动强度产生不良影响。白卫峰等^[23]对再生混凝土进行动态压缩试验,研究不同应变率、再生骨料取代率等对抗压强度等的影响,发现不同应变率下混凝土单轴压缩应力-应变全曲线具有相似性特征。

国内外学者现在普遍研究单个影响因素对混凝土动强度的影响,对两种因素耦合作用下混凝土动强度的变化规律少有研究,但现实中往往是多个因素同时发生变化。因此,有必要对爆炸冲击荷载下的混凝土动强度进行进一步研究。本文通过使用霍普金森压杆试验仪进行单轴压缩试验和巴西圆盘劈裂试验,得到混凝土在不同冲击速度和骨料率下的动态抗拉压强度。再将试验结果

进行归类对比分析, 对两种因素同时变化时混凝土的动强度进行研究分析, 得到混凝土动强度在骨料率与冲击速度都发生改变时的变化规律. 同时对混凝土受动载时的抗拉压强度比进行研究分析, 为以后的混凝土动强度研究奠定基础.

1 试验方案

1.1 原材料及配合比

试验采用 32.5 级水泥、骨料粒径为 5 ~

20 mm, 将混凝土灌注在长方体模具中, 并养护 28 d, 待试件凝固成型后通过钻机进行取样. 试件尺寸约为: 高 45 mm、底部直径 98 mm, 最后将试件上下底面打磨平整, 使上下底面平行度相差不超过 2 mm.

将试件分为 4 组, 分别配制了纯砂浆、以及骨料体积率分别为 32%、37%、42% 的混凝土试样, 并做相应编号. 4 组混凝土试件的具体配合比设计如表 1 所示.

表 1 混凝土配合比设计
Tab. 1 Concrete mix design

试件编号	骨料率/%	水泥/kg · m ⁻³	水/kg · m ⁻³	砂/kg · m ⁻³	碎石/kg · m ⁻³	减水剂/%
A	0	321	135	1 943	0	3.2
B	32	321	135	1 073	870	3.2
C	37	321	135	937	1 006	3.2
D	42	321	135	801	1 142	3.2

1.2 试件的制备

混凝土制备采用强制式搅拌机, 制作流程为: 量取适量的水泥, 砂, 碎石, 倾倒入混凝土搅拌机进行搅拌, 并在 20 s 时倒水(水+减水剂, 搅拌均匀). 将搅拌好的混凝土灌入模具中并放置在振捣台上进行振捣, 最后进行抹面并放置 24 h 后进行拆模和养护.

1.3 单轴压缩试验

1.3.1 试验设备

如图 1、图 2 所示, 霍普金森压杆试验仪是一种可以有效测得材料动态力学性能的试验设备, 通过测得试件受冲击时的应变情况, 再结合试验参数就能得到相应的动态应力、应变、应变速率、应变能、入射能、透射能、反射能等数据.

此次选用的设备输入杆长 6.0 m, 输出杆长 4.0 m, 直径为 100 mm. 本次试验波形整形器所用材料为 T2 紫铜, 使用惠斯通电桥公式将试验所测电压转换为应变.



图 1 霍普金森压杆试验仪
Fig. 1 Hopkinson pressure bar tester

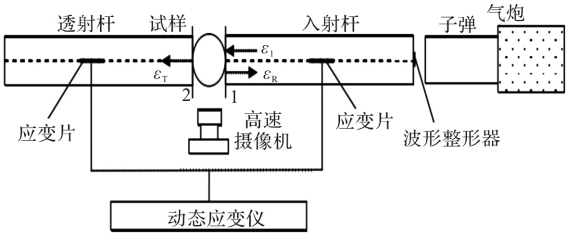


图 2 霍普金森压杆试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Hopkinson pressure bar test

1.3.2 单轴压缩试验方案设计

为了得到混凝土动强度与冲击速度间的变化规律, 通过霍普金森压杆试验仪对制备好的混凝土进行单轴压缩试验, 将每种骨料率的混凝土试件制作 9 块, 每 3 块为一组, 给同一骨料率的三组试件分别设定不同的冲击速度, 具体试验方案见表 2.

表 2 单轴压缩试验方案
Tab. 2 Uniaxial compression test scheme

编号	骨料率/%	冲击速度/m · s ⁻¹	编号	骨料率/%	冲击速度/m · s ⁻¹
A-1	0	5	C-1	37	5
A-2	0	6	C-2	37	6
A-30		7	C-3	37	7
B-1	32	5	D-1	42	5
B-2	32	6	D-2	42	6
B-3	32	7	D-3	42	7

1.3.3 巴西圆盘劈裂试验方案设计

为测得混凝土抗拉动强度, 采用图 1 所示霍普金森压杆试验仪, 进行巴西圆盘劈裂试验, 混凝土配合比见表 1. 已知霍普金森压杆应变计可记录

入射波 $\epsilon_i(t)$ 、反射波 $\epsilon_r(t)$ 和透射波 $\epsilon_t(t)$ ，通过下式计算可得到试件两端受力大小。

$$F(t)=\frac{\pi D^2}{8}E[\epsilon_i(t)+\epsilon_r(t)+\epsilon_t(t)] \quad (1)$$

式中： D 为压杆直径； E 为压杆的弹性模量。

根据巫绪涛等^[24]的研究，试件中心处的拉应力基本符合集中力作用下巴西圆盘的静态弹性力学解，所以试件中心处的拉应力可由下式计算。

$$\sigma_r(t)=\frac{2F(t)}{\pi dh} \quad (2)$$

式中： d 为试样直径； h 为试样高度。当 $\sigma_r(t)$ 达到最大值时即为混凝土试样的抗拉动强度，所以通过霍普金森压杆试验可得到各混凝土试件的抗拉动强度。

巴西圆盘劈裂试验制作了 4 组骨料率的混凝土试件，骨料率分别为 0%（纯砂浆）、32%、37%、42%，每种骨料率的混凝土试件制作 9 块，每 3 块为一组，具体试验方案如表 3 所示。

表 3 巴西圆盘劈拉试验试验方案
Tab. 3 Brazilian disc split pull test scheme

编号	骨料率/%	冲击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	编号	骨料率/%	冲击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
A-4	0	4	C-4	37	5
A-5	0	5	C-5	37	6
A-6	0	6	C-6	37	7
B-4	32	4	D-4	42	5
B-5	32	5	D-5	42	6
B-6	32	6	D-6	42	7

2 试验结果分析

2.1 同一骨料率不同冲击速度下试验结果分析

为了得到子弹冲击速度对混凝土抗压动强度的具体影响，将各组混凝土抗压动强度平均值绘制为图表，混凝土抗压动强度均值表如表 4 所示。由图 3 和表 4 可见，随着骨料率和冲击速度的增大，混凝土抗压强度不断增大。

表 4 混凝土抗压动强度均值 (MPa)

骨料率/%	冲击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	5	6	7
0	38.95	95.08	99.22
32	75.66	99.02	111.71
37	85.69	108.39	119.03
42	98.87	115.41	121.59

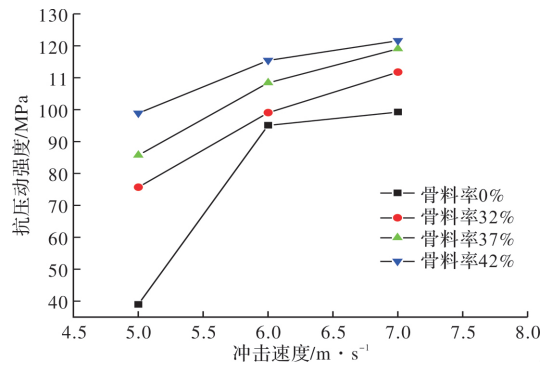


图 3 抗压动强度随冲击速度变化图

Fig. 3 Variation of compressive dynamic strength with impact velocity

通过图 4 可知，混凝土抗压动强度随骨料率变化曲线的斜率随骨料率的增大而逐渐增大，而且冲击速度越小，斜率越大，这也就说明，随着骨料率增加时，冲击速度越小的试件，抗压动强度增长越快。这是因为子弹的冲击速度与冲击力有正相关的关系，冲击速度越大，子弹冲击力越大，混凝土在接触子弹瞬间受到的动压力越大，反之越小。为了更进一步证实这一现象，得到混凝土不同冲击速度下抗压动强度差值表并绘制相应曲线图，即表 4 和图 5。

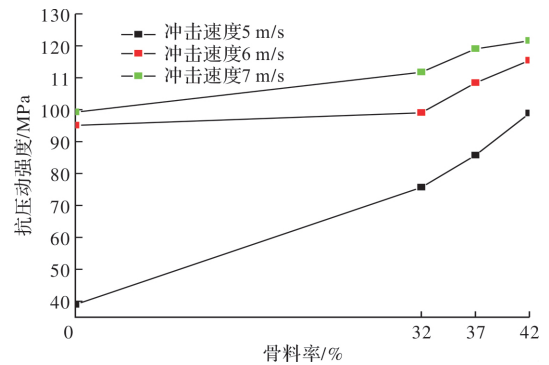


图 4 抗压动强度随骨料率变化图

Fig. 4 Variation of compressive dynamic strength with aggregate ratio

由表 5 和图 5 可见，混凝土抗压动强度在不同冲击速度下的强度差值随着骨料率的增大而不断减小，即随着混凝土骨料率的增大，小冲击速度下的混凝土抗压动强度增加幅度大于大冲击速度下的混凝土抗压动强度增加幅度。

对这一现象的原理进行分析，由党发宁等^[25]关于混凝土抗折动强度的研究可得，混凝土受动载时，裂纹沿能量释放最快路径发展，冲击速度越大，裂纹发展路径越短。如图 6 所示，冲击速度越小，裂纹发展路径越长。此时，提高混凝土骨

料率, 并将在原骨料率基础上新加入的骨料取名为 X 骨料。假定骨料分布均匀, 如图 7 所示, 冲击速度越小, 裂纹发展路径越长, 穿过的 X 骨料也就越多, 而穿过的 X 骨料数量越多, 动强度增加幅度就越大, 所以当骨料率增加时, 冲击速度越小, 混凝土抗压动强度增加幅度越大。

表 5 混凝土不同冲击速度下抗压动强度差值(MPa)

Tab. 5 Difference of dynamic compressive strength of concrete at different impact speeds/MPa

骨料率/%	冲击速度 m/s		
	6~5	7~6	7~5
0	56.13	4.14	60.27
32	23.35	12.69	36.04
37	22.7	10.64	33.34
42	16.53	6.18	22.71

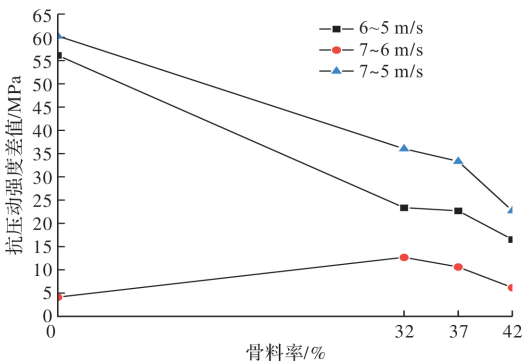


图 5 混凝土不同冲击速度下抗压动强度差值

Fig. 5 Difference of dynamic compressive strength of concrete at different impact speeds

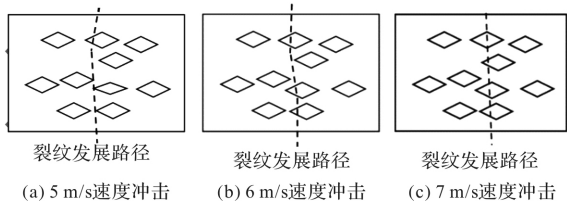


图 6 裂纹发展路径随冲击速度变化图

Fig. 6 Variation of crack development path with impact velocity

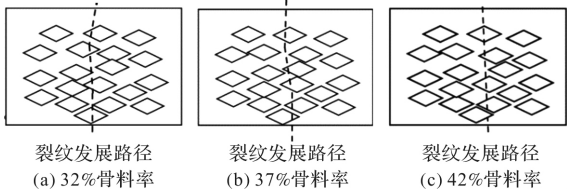


图 7 骨料率增加后裂纹发展路径随冲击速度变化图

Fig. 7 Variation of crack development path with impact velocity after the increase of aggregate rate

结合相关数据及上述理论, 可得到理论性的公式:

$$F = \frac{f_c [n(s+1)]}{k \frac{L}{v}} \quad (3)$$

式中: F 为混凝土动强度; f_c 为不加骨料时混凝土静抗压强度; s 为混凝土骨料率; L 为混凝土两受压面的直线距离; v 为混凝土试件在 SHPB 试验中所受动力荷载的冲击速度; $\frac{L}{v}$ 为裂纹发展路径; n 和 k 为不确定性参数。

由式(3)可知, 当冲击速度增大, 裂纹发展路径减小, 此时混凝土动强度增大, 当骨料率增大, 混凝土动强度也增大, 所以此公式基本可解释混凝土动强度与冲击速度及骨料率间的规律。

2.2 抗拉动强度与抗压动强度关系研究

通过巴西圆盘劈裂试验对不同冲击速度下不同骨料率的混凝土抗拉动强度进行研究, 将各组混凝土抗拉动强度平均值绘制为图表, 混凝土抗拉动强度均值表如表 6 所示。

表 6 混凝土抗拉动强度均值表(MPa)

Tab. 6 Table of mean tensile strength of concrete/MPa

骨料率/%	冲击速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
	4	5	6	7
0	6.57	8.94	12.51	
32	8.32	12.9	17.13	
37		16.04	20.56	21.7
42		18.65	21.53	22.2

从图 8 和图 9 可见, 混凝土抗拉动强度随混凝土骨料率和冲击速度的增大而增大, 这和混凝土抗压动强度变化规律相同。

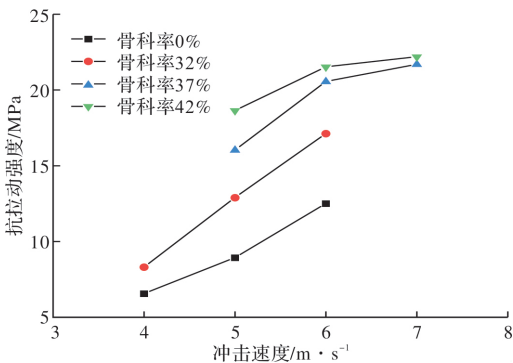


图 8 抗拉动强度随冲击速度变化图

Fig. 8 Variation of tensile strength with impact velocity

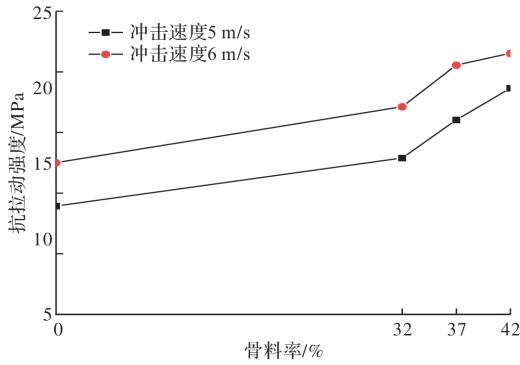


图9 抗拉强度随骨料率变化图

Fig. 9 Variation of tensile strength with aggregate ratio

由表7可知,在混凝土骨料率与冲击速度基本相同时,混凝土抗压强度基本为抗拉强度的4~6倍,且由图10可见,骨料率不变的情况下,冲击速度越大,混凝土抗压强度值与抗拉强度的比值越大,可见受动载时的混凝土抗拉强度与抗压强度两者增长幅度不同,混凝土抗压强度增长更明显。

表7 混凝土抗拉强度与抗压强度关系

Tab. 7 Relationship between tensile strength and compressive dynamic strength of concrete

骨料率/%	冲击速度/ $m \cdot s^{-1}$	平均抗压 强度/MPa	平均抗拉 强度/MPa	抗压强度与 抗拉强度 倍数关系
0	5	38.94	8.94	4.36
0	6	81.25	14.18	5.73
32	5	75.66	12.9	5.56
32	6	99.01	17.13	5.86
37	5	85.69	16.04	5.34
37	6	109.69	20.56	5.33
37	7	122.02	21.7	5.62
42	5	98.87	18.65	5.30
42	6	115.41	21.53	5.36
42	7	121.58	22.2	5.47

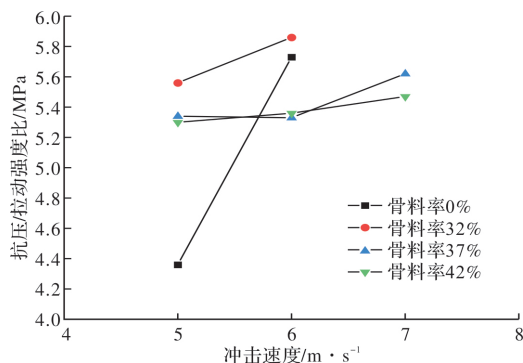


图10 混凝土不同冲击速度下抗压/拉强度比值

Fig. 10 Dynamic compressive/tensile strength ratio of concrete at different impact speeds

2.3 不同加载速度下混凝土抗拉强度的变化

由表6可知,混凝土动强度与冲击速度关系为正相关,为进一步探究混凝土抗拉强度与冲击速度关系,以5 m/s和6 m/s冲击速度下的混凝土抗拉强度值为例,如表8所示,对表6数据进行进一步分析。

表8 混凝土抗拉强度与冲击速度间关系

Tab. 8 Relationship between concrete tensile strength and impact velocity

骨料率/%	混凝土抗拉强度/MPa		不同冲击速度 下混凝土抗拉 强度间倍数关系
	6 m/s 冲击速度	5 m/s 冲击速度	
0	14.18	8.94	1.58
32	17.13	12.9	1.32
37	20.56	16.04	1.28
42	21.53	18.65	1.15

由表8可知,在骨料率相同时,6 m/s的冲击速度是5 m/s的1.1~1.6倍,且两者间倍数随骨料率增大而不断减小。

3 结论

本文通过单轴压缩试验和巴西圆盘劈裂试验,得出以下结论:

(1)混凝土抗压强度和抗拉强度都与混凝土骨料率和冲击速度呈正相关关系,且随着混凝土骨料率的增大,小冲击速度下的混凝土抗压强度增加幅度大于大冲击速度下的混凝土抗压强度增加幅度;

(3)当骨料率和冲击速度相同时,混凝土抗压强度基本为抗拉强度的4~6倍,且随着冲击速度增大,混凝土抗压强度增加幅度大于抗拉强度增加幅度;

(4)当骨料率相同时,6 m/s冲击速度下的混凝土抗拉强度是5 m/s的1.1~1.6倍,且两者间倍数随骨料率增大而不断减小。

参考文献 References

- [1] 丁卫华,陈厚群,刘少聪,等.基于CT的混凝土动力破坏过程的试验研究[J].水力发电,2009,35(5):21-23.
DING Weihua, CHEN Houqun, LIU Shaocong, et al. Experimental study on the dynamic failure process of concrete based on CT[J]. Water Power, 2009, 35(5): 21-23.
- [2] 马怀发,王立涛,陈厚群,等.混凝土动态损伤的滞后特性[J].水利学报,2010,41(6):659-664.

- MA Huaifa, WANG Litao, CHEN Houqun, et al. Hysteresis characteristics of dynamic damage to concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 659-664.
- [3] 吴胜兴,周继凯,陈厚群. 基于微观结构特征的混凝土动态抗拉强度提高机理及其统一模型[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 419-428.
- WU Shengxing, ZHOU Jikai, CHEN Houqun. Mechanism of improving dynamic tensile strength of concrete based on microstructure characteristics and its unified model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 419-428.
- [4] 杜成斌,孙立国,江守燕,等. 全级配混凝土梁动强度提高机理研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 294-299.
- DU Chengbin, SUN Liguang, JIANG Shouyan, et al. Research on the mechanism of improving the dynamic strength of fully graded concrete beams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(3): 294-299.
- [5] 李毅敏,高政国,朱庆庆,等. 爆破冲击对早龄期混凝土强度影响的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 243-248.
- LI Yimin, GAO Zhengguo, ZHU Qingqing, et al. Experimental study on the effect of blasting impact on the strength of early age concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3): 243-248.
- [6] 秦川,武明鑫,张楚汉. 混凝土冲击劈拉试验与细观离散元数值仿真[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 196-205.
- QIN Chuan, WU Mingxin, ZHANG Chuhan. Concrete impact splitting tensile test and meso discrete element numerical simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1): 196-205.
- [7] 刘建忠,孙伟,刘加平,等. 多次冲击压缩作用下大掺量粉煤灰超高性能钢纤维混凝土的动态力学行为[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(6): 43-46.
- LIU Jianzhong, SUN Wei, LIU Jiaping, et al. Dynamic mechanical behavior of ultra high performance steel fiber reinforced concrete with high content of fly ash under multiple impact compression[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2014, 43(6): 43-46.
- [8] 李晓琴,陈建飞,陆勇,等. 基于局部损伤混凝土模型的FRP-混凝土界面有限元分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 62-65.
- LI Xiaolin, CHEN Jianfei, LU Yong, et al. Finite element analysis of FRP concrete interface based on local damage concrete model[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 62-65.
- [9] 潘峰,党发宁,焦凯,等. 冲击荷载作用下不均匀脆性材料动态弯拉强度提高机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3948-3955.
- PAN Feng, DANG Fanning, JIAO Kai, et al. Study on the mechanism of improving dynamic flexural tensile strength of heterogeneous brittle materials under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3948-3955.
- [10] HAO Yifei, HAO Hong. Numerical evaluation of the influence of aggregates on concrete compressive strength at high strain rate[J]. International Journal of Protective Structures, 2011, 2(2): 177-206.
- [11] MU Z C, DANCYGIER A N, ZHANG W, et al. Revisiting the dynamic compressive behavior of concrete-like materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49: 91-102.
- [12] SAVINYKH A S, GARKUSHIN G V, KANEL G I, et al. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading [J]. International Journal of Fracture, 2018, 209(1/2): 109-115.
- [13] PAN Jianwen, ZHONG Wen, WANG Jinting, et al. Size effect on dynamic splitting tensile strength of concrete: Mesoscale modeling[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 128: 104435.
- [14] REN Jie, DANG Fanning, WANG Huan, et al. Enhancement mechanism of the dynamic strength of concrete based on the energy principle [J]. Materials, 2018, 11(8): 1274-1274.
- [15] LEE S, KIM K M, PARK J, et al. Pure rate effect on the concrete compressive strength in the split Hopkinson pressure bar test[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113: 191-202.
- [16] ZHAO F Q, WEN H M. A comment on the maximum dynamic tensile strength of a concrete-like material[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 115: 32-35.
- [17] 李晓琴,陈前均,陈保淇,等. sss 混凝土 SHPB 试验端面摩擦效应研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(2): 209-213, 241.
- LI Xiaolin, CHEN Qianjun, CHEN Baoqi, et al. Study on end friction effect of SSS concrete in SHPB test[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(2): 209-213, 241.
- [18] 任劼. 基于能量及细观应力分析的混凝土动强度变化规律研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- REN Jie. Research on dynamic strength of concrete based on energy and meso stress analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.