

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0091-05

砂浆—骨料粘结界面力学性能

向祖超，李 扬，沈子豪

(湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 水泥砂浆—骨料粘结界面较水泥砂浆相比，因其孔隙率较大、密度小、强度低等特点，通常被视为混凝土中的薄弱区域，因此，研究水泥砂浆—骨料粘结界面的力学性能，对于掌握混凝土开裂特征以及力学性能有重大意义。通过进行三点弯曲试验和劈裂拉伸试验，获得不同配合比下水泥砂浆—骨料粘结界面的断裂能和抗拉强度，建立以水灰比为变量的水泥砂浆—骨料粘结界面参数计算模型。研究表明，水泥砂浆—骨料粘结界面的断裂能以及抗拉强度随着水灰比的增大而逐渐减小，同时，它的界面参数还受石材种类影响。所取得成果可为增强界面的粘结强度研究，以及改善混凝土的力学性能提供参考和借鉴。

[关键词] 砂浆—骨料界面；混凝土；力学性能；界面参数

[中图分类号] TU501 [文献标识码] A

混凝土作为世界上应用最广泛的一种建筑材料，其高强度及高性能的特点为世界所公认。钢筋因其抗拉强度高，且热膨胀系数与混凝土相近，可弥补混凝土抗拉强度上的不足，钢筋混凝土构件也因此结构中得到广泛应用。但当钢筋混凝土结构中的钢筋局部布置较为拥挤以及钢筋混凝土结构超载时，混凝土会因为抗拉强度低而产生若干不均匀裂缝，最终裂缝延伸，生成肉眼可见裂缝，直到混凝土断裂，构件破坏^[1-2]。对于混凝土构件的宏观破坏，实则是由细观角度不均匀裂缝的累积和延伸造成的，马怀发等^[3]提出从细观角度看，混凝土构件在加载前，内部已存在微裂缝，即砂浆和骨料界面的初始粘结裂缝，这些裂缝是由于砂浆的干缩现象以及温度变化导致而成。Lybimove 等^[4]认为界面过渡区(Interfacial Transition Zone, ITZ)的力学性能对混凝土的影响很大。

界面过渡区作为混凝土组分中的薄弱部分，其粘结强度直接关系到混凝土的强度。水泥砂浆—骨料界面的粘结强度与水泥品种、水灰比、骨料类型、养护条件等众多因素有关，当采取的试验方法不同时，测得的砂浆—骨料界面的粘结强度也会有所不同。国内外学者在研究砂浆、骨料以及 ITZ 对混凝土强度的影响方面取得如下成果：王瑶等^[5]提出砂

浆—骨料界面的抗拉强度直接影响混凝土的抗拉强度，而抗压强度的影响很小；王嘉^[6]指出将硅灰材料加入混凝土中可改善砂浆—骨料界面的性能，从不同程度上提高了混凝土的抗拉压强度，达到增强混凝土整体性能的目的；Tülin Akçaoglu^[7]等通过间接拉伸试验得到界面粘结是拉伸强度的决定因素，对抗压强度的影响不大。抗拉强度随骨料粒径的增大而减小；Vishalakshi K P^[8]通过研究骨料类型对混凝土强度性能和断裂能的影响得出：骨料类型对高强混凝土的强度影响很大，但对普通强度混凝土的影响并不明显，其强度受界面过渡区特性的影响，而不受骨料的影响，高强混凝土的断裂能和弹性参数也呈现类似趋势。G Appa Rao^[9]等发现界面的强度随着骨料的粗糙度和相角的增加而增大，水泥砂浆强度也是影响界面强度的重要因素。Wang^[10]等通过仿真粘结界面的细观损伤演化，总结出：较高的初始界面损伤导致较低的粘结强度和较小的最终位移，较高的砂浆模量可以大大改善初始粘结性能和粘结强度，但会稍微增加最终破坏。

结合现有资料表明：ITZ 的性能对混凝土材料性能的具体影响程度还尚未形成统一认识，有关 ITZ 力学性能的试验研究及分析较少，据此，通过三点弯试验和劈裂拉伸试验来测得水泥—砂浆界面的

[收稿日期] 2020—11—27

[基金项目] 湖北省科技厅自然科学基金面上项目(2020CFB860)

[第一作者] 向祖超(1997—)，男，湖北襄阳人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为混凝土裂缝控制及极端温度下混凝土构件力学性能

[通信作者] 李 扬(1986—)，男，宁夏石嘴山人，工学博士，湖北工业大学副教授，研究方向为混凝土裂缝控制及极端温度下混凝土构件力学性能

抗拉压强度、断裂能及弹性模量等参数对混凝土材料力学性能的影响,并通过试验数据建立了界面参数计算模型,对增强混凝土强度及混凝土细观结构的研究有很大一定的参考和借鉴作用。

1 试验

1.1 试验方法

1.1.1 抗拉强度 T_n 采用劈裂试验来测得试件的抗拉强度,加载方式按照规范^[11]通过设置加载速率为 0.06 MPa/s 的应力控制模式进行加载,可得到试验的荷载—位移曲线。试验测试试件分为三批次,分别测试了水泥砂浆、石材、水泥砂浆及石材各一半的复合试件的抗拉强度。加载示意图见图 1。

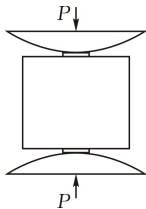


图 1 劈裂试验加载示意图

在得出荷载—位移曲线后,可按下式计算水泥砂浆—骨料粘结界面的抗拉强度:

$$T_n = \frac{2P}{\pi A} = 0.637 \frac{P}{A}$$
 (1)

式中: P 表示最大荷载,kN; A 表示试件的断裂面积,mm²。

1.1.2 断裂能 G_f 参考 RILEM 的提议^[12],本研究采用三点弯曲试验测得断裂能,控制试验的加载速率为 0.4 mm/min,最终可获得试件的荷载—挠度曲线。试验共测试了水泥砂浆、骨料、砂浆及骨料各一半的复合试件的断裂能,三种立方体试件见图 2。在测得这三批试件的断裂能后,可得到水泥砂浆、骨料以及砂浆—骨料粘结界面的断裂能^[13],加载示意图见图 3。

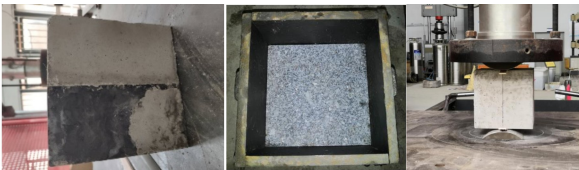


图 2 立方体试件

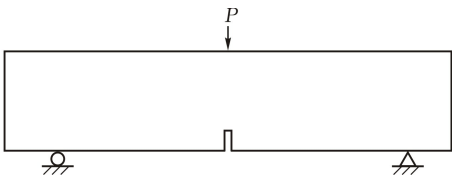


图 3 带缺口梁的三点弯曲试验加载示意图

断裂能指的是裂纹扩展单位面积所消耗的表面能,这一参数可通过试验所得的荷载—挠度曲线计

算得到,具体计算公式如下:

$$G_f = W_f/A = (W_0 + mg \delta_0)/A$$
 (2)

式中: G_f 为试件单位面积上的断裂能,N · mm⁻¹; W_f 为试件的断裂能,N · mm; A 为试件的断裂面积, $A=b(h-a)$,mm²; b 为梁的宽度,mm; h 为梁的高度,mm; a 为开口深度,mm; W_0 为荷载—挠度曲线下的面积,mm²; mg 为两跨间梁的自重,N; δ_0 为试件破坏时的挠度,mm。

1.2 试验装置

两个试验均在湖北工业大学工程结构及数字化模拟实验室完成,试件的拉压强度及弹性模量在微机控制电液伺服压力试验机(YAW-3000G)测得,可施加的最大荷载为 3000 kN,精确度等级为 0.5 级(图 4);带缺口梁的三点弯曲试验在微机控制电子压力试验机(CBT1105-D)上完成,试验机对试件可施加的最大荷载为 100 kN,精确度等级为 1 级(图 5)。



图 4 劈裂拉伸试验

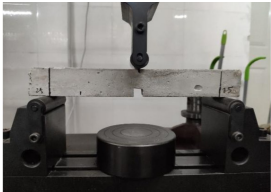


图 5 三点弯曲试验

在试验准备阶段,清除机器表面浮灰,将试件置于试验机的指定位置加载,记录荷载—位移曲线,可观察到在试验初期,曲线大致呈线性增长,随着位移逐渐增加,荷载持续增大但增长速率变慢,且出现往复下降,最终试件破坏。

1.3 试件制备

已有研究表明,在测试断裂能和抗拉强度的过程中均存在尺寸效应^[14],根据 GB/T 50152《混凝土结构试验方法标准》^[15]规定,劈裂拉伸试验应采用边长为 150 mm 的立方体试件,对于非标准试件乘以对应的换算系数。三点弯曲试验采用的是较小的梁试件,尺寸为 30 mm × 35 mm × 250 mm,最终测得试件的荷载—挠度曲线,计算出断裂能。

水泥砂浆的立方体试件浇筑按照程序在可拆卸的钢模中完成即可,在制作砂浆—骨料复合材料试件时,需先将石材置于模具底部,再自上往下浇筑砂浆(图 6)。

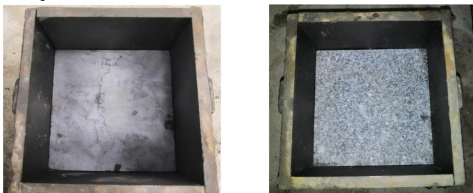


图 6 立方体模具

三点弯曲试验中采用的较小梁试件在木模中完成浇筑,在浇筑前在模具中部放置一木条以预制裂缝,裂缝深、宽均为 10 mm。在进行水泥砂浆试件的制作时,应从木模侧边进行浇筑(图 7)。



图 7 带缺口梁模具

粗骨料采用花岗岩和石灰岩两种不同石材进行对比研究。正式浇筑前,石材需先进行精加工处理,使得石材满足试验精度要求,应用砂纸对石材表面打磨 3 min(图 8)。



(a)带缺口梁 (b)立方体试件

图 8 石材表面

试验采用三种砂浆配合比和两种石材进行对比研究。水泥采用标号 32.5 的矿渣硅酸盐水泥,砂采用中砂,配合比见表 1,试件制作方案见表 2。试验制作 22 个带缺口梁试件用作测试断裂能,22 个立方体试件用作测试抗拉压强度,剩余 10 个立方体试件用作测试弹性模量,共计 54 个。

表 1 水泥砂浆配合比				kg/m ³
编号	水灰比	水	水泥	砂
M-1	0.5	195	355	665
M-2	0.44	195	443	580
M-3	0.36	180	500	619.5

表 2 试件设计方案					
水泥砂浆配合比			石材		
M-1	M-2	M-3	花岗岩	石灰岩	
✓			✓		
✓				✓	
	✓		✓		
	✓			✓	
		✓	✓		
		✓		✓	

试验对三种砂浆配合比、两种石材及砂浆-石材界面的抗拉压强度、弹性模量及断裂能同时进行了测试。

2 试验结果与分析

试验主要测试了三种砂浆配合比、两种石材以及砂浆-石材界面的断裂能、抗拉压强度、弹性模

量。用测得的力学参数数据分析三批试件各项性能随水灰比的变化规律,得出水泥砂浆、石材材料性能和水泥砂浆-石材界面性能间的函数关系,进而建立界面参数计算模型。

2.1 水泥砂浆和石材的性能

水泥砂浆和石材的抗压强度和弹性模量均遵照 GB/T 50081《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[16]所给出的方法测得。材料的各项力学参数见表 3。

	试验编号				
	M-1	M-2	M-3	石灰岩	花岗岩
密度/(kg·m ⁻³)	2100	2100	2100	2400	2700
弹性模量/GPa	14.65	17.45	22.7	102.15	23.40
抗压强度/MPa	27.8	32.15	37.51	61.5	103.7
抗拉强度/MPa	3.75	4.82	4.33	6.29	7.23
断裂能/(N·mm ⁻¹)	0.018	0.023	0.03	0.075	0.131

从上表中可看出水灰比对砂浆的力学性能有着重要影响,能够得出在 0.36~0.5 范围内的水灰比与砂浆性能变化的函数关系:

1)当水灰比降低时,水泥砂浆的抗拉强度先增后减。

如图 9 所示,在水灰比大于 0.44 时,抗拉强度随水灰比的减小而增大;当水灰比小于 0.44 时,抗拉强度随水灰比的减小而减小,因此在抗拉强度和水灰比间的关系可用两段线性函数关系式表达,如

$$F_t = \begin{cases} -17.77C/W + 12.64C/W \geq 0.44 \\ 6.09C/W + 2.14C/W \leq 0.44 \end{cases} \quad (3)$$

式中: C/W 表示水灰比; f_t 表示抗拉强度,MPa。

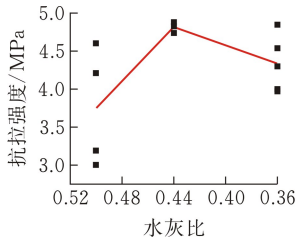


图 9 水泥砂浆抗拉强度与水灰比关系

2)当水灰比降低时,水泥砂浆的抗压强度不断提高。

如图 10 所示,抗压强度与水灰比间的关系可用线性函数关系式表达,如

$$f_c = -69.17C/W + 62.46 \quad (4)$$

式中: C/W 表示水灰比; f_c 表示抗压强度,MPa。

3)当水灰比减小时,水泥砂浆的弹性模量增大。

如图 11 所示,弹性模量和水灰比间的关系可用线性函数关系式表达,如

$$E = -55.96C/W + 42.23 \quad (5)$$

式中, C/W 表示水灰比; E 表示弹性模量,GPa。

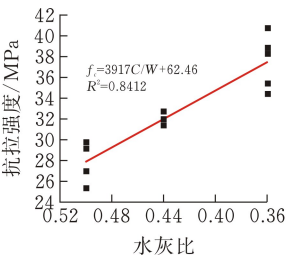


图 10 水泥砂浆抗压强度与水灰比关系

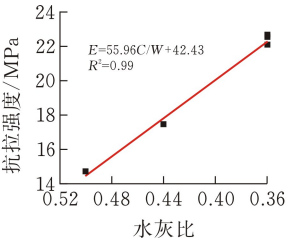


图 11 水泥砂浆弹性模量与水灰比关系

2.2 水泥砂浆-石材粘结界面的性能

表 4 为试验测得的三种水灰比以及两种石材条件下的水泥砂浆-石材粘结界面的力学参数,由试验数据可知,水泥砂浆-石材界面的断裂能和抗拉强度均小于水泥砂浆和石材单一材料下的断裂能和抗拉强度,这也解释了水泥砂浆-骨料粘结界面是混凝土中的薄弱层的原因。同时,也有多位学者给出相似论证,粘结界面的断裂能大致是水泥砂浆的 1/10,抗拉强度大致是水泥砂浆的 1/3^[5]。

表 4 水泥砂浆-石材粘结界面参数

水泥砂浆-石材界面	断裂能/ (N · mm ⁻¹)	抗拉强度/MPa
M-1/石灰岩界面	0.0025	2.52
M-2/石灰岩界面	0.003	2.76
M-3/石灰岩界面	0.0035	3.18
M-1/花岗岩界面	0.001	1.77
M-2/花岗岩界面	0.0015	1.87
M-3/花岗岩界面	0.0021	2.02

2.3 砂浆-骨料粘结界面参数计算模型

从测得数据可看出,石材的抗拉强度最高,水泥砂浆其次,水泥砂浆-石材界面抗拉强度最低,此外,当石材种类为花岗岩时,试件的抗拉强度要高于石灰岩(图 12)。

从与石材的粘结强度看,砂浆配合比最小的试件 M-3 中,砂浆与石材的粘结强度最高,配合比居中的 M-2 试件其次,配合比最大的 M-1 试件最小,说明水灰比是影响界面粘结强度的重要因素。

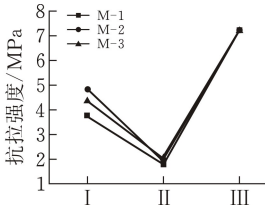
如图 13,14 所示,以水灰比作为自变量,拟合界面抗拉强度 f_t 与水灰比 C/W 的线性函数关系式,关系式如下:

$$f_{t1} = -4.7432C/W + 4.8754 \tag{6}$$

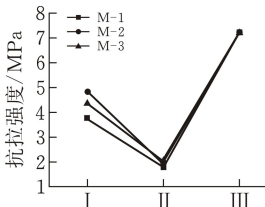
$$f_{t2} = -1.7905C/W + 2.6626 \tag{7}$$

式中: C/W 表示水灰比, f_{t1} 表示砂浆-石灰岩粘结

界面的抗拉强度,MPa; f_{t2} 表示砂浆-花岗岩界面的抗拉强度,MPa。



I — 水泥砂浆; II — 水泥砂浆-花岗岩界面; III — 花岗岩
(a) 砂浆、花岗岩及界面断裂能



I — 水泥砂浆; II — 水泥砂浆-石灰岩界面; III — 石灰岩
(b) 砂浆、石灰岩及界面断裂能

图 12 水泥砂浆、石材和水泥砂浆-石材界面的抗拉强度

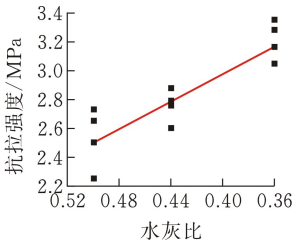


图 13 砂浆-石灰岩界面抗拉强度与水灰比关系

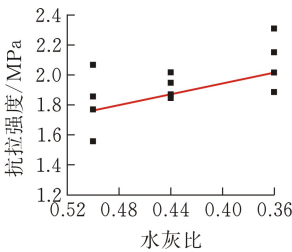


图 14 砂浆-花岗岩界面抗拉强度与水灰比关系

将式(3)代入式(6)、(7)可得水泥砂浆与界面两者抗拉强度之间的关系,如

$$f_{t1} = \begin{cases} 0.27 f_t - 1.5095C/W \geq 0.44 \\ -0.78 f_t + 6.5421C/W \leq 0.44 \end{cases}, \tag{8}$$

$$f_{t2} = \begin{cases} 0.1 f_t + 1.3986C/W \geq 0.44 \\ -0.3 f_t + 3.2918C/W \leq 0.44 \end{cases} \tag{9}$$

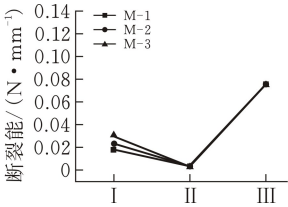
三批试件的断裂能见图 15。可知,石材的断裂能最大,水泥砂浆次之,水泥砂浆-石材界面的断裂能最小。试件 M-3 的砂浆与石材间的粘结强度最大,M-2 次之,M-1 最小,由此可知,水泥砂浆的水灰比对其断裂性能有至关重要的影响。

以水灰比作为自变量,拟合出水泥砂浆-石材界面的断裂能的线性函数关系式,关系式如下:

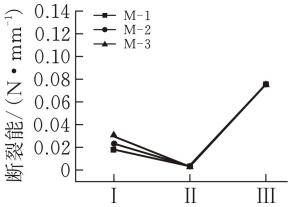
$$G_1 = -0.0071C/W + 0.0061, \tag{10}$$

$$G_2 = -0.0078C/W + 0.0049 \tag{11}$$

式中: G_1 表示水泥砂浆-石灰岩粘结界面的断裂能, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$; G_2 表示水泥砂浆-花岗岩粘结界面的断裂能, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。



I—水泥砂浆; II—水泥砂浆-花岗岩界面; III—花岗岩
(a)水泥砂浆、石材



I—水泥砂浆; II—水泥砂浆-石灰岩界面; III—石灰岩
(b)水泥砂浆-石材界面

图 15 水泥砂浆、石材和水泥砂浆-石材界面的断裂能

由试验数据可知,水泥砂浆断裂能 G 与水灰比 C/W 同为线性关系,并将其关系式代入(10)和(11),可得水泥砂浆断裂能 G 与水泥砂浆-骨料界面断裂能 G_1 、 G_2 的关系式:

$$G_1 = 0.83G + 0.0011 \tag{12}$$

$$G_2 = 0.09G - 0.0006 \tag{13}$$

式中: G 表示水泥砂浆的断裂能, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

3 结论

通过劈裂拉伸和带缺口梁的三点弯曲试验测得的试验参数建立了水泥砂浆-骨料粘结界面的参数计算模型,对改善界面的力学性能以及研究混凝土的开裂特征具有重要作用。在试验研究中可得出:

- 1) 水灰比对水泥砂浆-骨料界面的力学性能有重要影响,水泥砂浆-骨料粘结界面的断裂能和抗拉强度随着水灰比的增大而逐渐减小;
- 2) 水泥砂浆-骨料界面的粘结强度还与石材种类相关。水泥砂浆-石灰岩的抗拉强度小于水泥砂浆-花岗岩,而石灰岩的弹性模量远大于花岗岩;
- 3) 通过试验测得的数据得到了水泥砂浆与水泥砂浆-骨料界面两者断裂能的函数关系式,建立了水泥砂浆-骨料粘结界面的参数计算模型,对改善混凝土界面性能有重大意义。

[参 考 文 献]

[1] 王文彬.水泥混凝土路面裂缝成因与防控[J].混凝土与水泥制品,2019(6):84-87.

[2] 陈萌.混凝土结构收缩裂缝的机理分析与控制[D].武汉:武汉理工大学,2006.

[3] 马怀发,陈厚群,黎保琨.混凝土细观力学研究进展及评述[J].中国水利水电科学研究院学报,2004,2(2):124-130.

[4] LYBIMOVE C T Y,PINNS E R.Crystallization structure in concrete contact zone between aggregate and cement in concrete[J].Colloid Journal,1962(24):491-498.

[5] 王瑶,周继凯,沈德建,等.混凝土中骨料-浆体界面过渡区的力学性能研究综述[J].水利水电科技进展,2008,28(2):89-94.

[6] 王嘉.水泥石-石灰石集料界面过渡层结构和性能的研究[J].硅酸盐学报,1987,15(2):114-121.

[7] TÜLIN AKÇAOLU,MUSTAFA TOKYAY,TAHIR ÇELİK. Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2):358-363.

[8] VISHALAKSHI K P, REVATHI V, REDDY S SIVAMURTHY. Effect of type of coarse aggregate on the strength properties and fracture energy of normal and high strength concrete[J].Engineering Fracture Mechanics,2018,194:52-60

[9] APPA RAO G, Raghu Prasad B K.Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(2):253-257.

[10] YING WANG, YUQIAN ZHENG, XUAN WANG. Mesoscopic damage evolution on bonding interface and its influence on macroscopic performance deterioration of reinforced concrete member[J].International Journal of Computational Materials science and Engineering, 2019, 8(2):35.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[12] RILEM. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, draft recommendation (50-FMC) [J]. Materials and Structures, 1985, 18(106):287-297.

[13] CHANG L,JIANG G.Cracking simulation of asphalt concrete beam specimen using cohesive zone model[J]. Construction and Building Materials,2019,214:49-60.

[14] 徐世熄,赵国藩,刘毅,等.三点弯曲梁法研究混凝土断裂能及其试件尺寸影响[J].大连理工大学学报,1991(1):79-86.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构试验方法标准:GB/T50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[16] 中华人民共和国建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.