

钢纤维聚合物水泥砂浆三点弯曲断裂特性研究

梅迎军¹, 魏河广², 徐建平³, 樊文胜³

(1. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通建设(集团)有限责任公司, 重庆 400010;

3. 江西省高速公路投资集团有限责任公司抚州至吉安高速公路项目建设办公室, 江西 南昌 330000)

摘 要:通过对带有切口的砂浆试样进行三点弯曲试验测试, 得到了质量掺量为 0~18 % 的 SBR(styrene-butadiene rubber, 简称 SBR)乳液改性水泥砂浆、体积掺量为 0~0.9 % 的钢纤维砂浆和钢纤维聚合物改性水泥砂浆荷载-变形曲线及相应裂缝嘴张开位移($CMOD$), 并通过理论计算得到了砂浆的有效裂纹长度(a_{eff})、临界应力强度因子(K_{Ic})及裂纹尖端张开位移($CTOD$)等断裂特征参数. 研究结果表明: 钢纤维和聚合物乳液在单掺的情况下, 均能改善砂浆的断裂性能, 掺量越大, 效果越好, 且钢纤维对砂浆断裂性能的作用效果好于 SBR 乳液, SBR 乳液和钢纤维复掺效果又明显优于单掺; 与普通砂浆相比, 钢纤维聚合物改性水泥砂浆临界荷载增加了 32.3 %~64.4 %, 临界荷载对应的变形增加了 115.8 %~209.2 %, 且荷载-变形曲线下降段更加平缓、饱满, 荷载-变形曲线下降段甚至出现了二次峰值; 与断裂能、有效裂纹长度、临界应力强度因子及裂缝嘴张开位移等断裂特征参数相比, 采用裂纹尖端张开位移作为评价指标更能体现钢纤维和聚合物乳液对砂浆断裂性能作用效果的差异.

关键词:钢纤维; 聚合物乳液; 水泥砂浆; 断裂参数; 临界应力强度因子; 裂纹尖端张开位移

中图分类号: TU 528.41, TU 528.58

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)05-0652-06

纤维混凝土的性能主要取决于混凝土基体与纤维特性、两者的相对含量及界面粘结. 其中界面粘结与界面效应是发挥纤维对混凝土增强、增韧与阻裂能力的关键, 界面粘结性状直接影响到纤维对混凝土增强、增韧与阻裂发挥的程度^[1-3], 因此, 纤维混凝土界面的研究, 引起了国内外学者的广泛关注^[4-5]. 与基体相比, 纤维-水泥石界面区具有水灰比大、孔隙大、结构松散的特点, 界面粘结性状, 直接影响到纤维对混凝土增强、增韧与阻裂发挥的程度. 为最大限度地发挥纤维的作用, 增进界面粘结、提高界面效应是十分重要的. 为此, 可在水泥基体中掺入不同掺量有机聚合物^[6-7]、无机矿物掺合料^[8-9]及两者的复合物, 则有可能使界面薄弱区得以强化甚至消失. K. Morino 等^[10]、孙伟等^[11]研究了硅灰、聚合物在复掺情况下对界面过渡区的显微硬度的影响, 研究认为硅灰和聚合物的掺入提高了界面过渡区的显微硬度, 且掺量越大, 显微硬度也越大. 梅迎军^[12]等研究了硅灰和丁苯乳液对钢纤维砂浆微观结构和力学性能的影响, 研究结果认为硅灰属于刚性增强钢纤维-水泥基界面区, 而丁苯乳液则属于柔性增强钢纤维-基体界面区.

采用聚合物乳液对钢纤维混凝土进行改性后, 对钢纤维-水泥石界面特征产生了较大的影响, 进而对钢纤维混凝土断裂特征有显著的影响. 目前对混凝土断裂能及其测试, 所见报道多限于普通混凝土以及纤维增强混凝土, 而对界面改性后的钢纤维混凝土断裂性能测试结果的报告却不多, 因而对其断裂特性的研究也是一个亟待解决的问题. 本文参照 RILEM TC 50-FMC^[13]公布的“用切口梁三点弯曲试验测定砂浆和混凝土的断裂能”方法, 测定钢纤维、聚合物乳液在单掺、复掺时水泥砂浆荷载-变形曲线及相应裂缝嘴张开宽度, 并通过理论计算断裂能、有效裂纹长度、临界应力强度因子及裂纹尖端张开位移等断裂特征参数.

收稿日期: 2013-04-26 **修改稿日期:** 2013-09-13

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20105522120001); 重庆市科委科技攻关基金资助项目(2011GGC006); 江西省交通厅科技基金资助项目(2012C0024)

作者简介: 梅迎军(1976-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 主要从事道路工程及高性能建筑材料研究.

1 原材料及材料配合比组成

1.1 原材料技术性能

水泥:上海海豹水泥厂普通硅酸盐 42.5 水泥. 砂:普通河沙,细度模数为 1.95;丁苯乳液:上海 BASF 公司羧基丁苯胶乳 (Styrofan SD 623 ap, styrene-butadiene rubber, 简称 SBR 乳液), 密度为 1.01 g/cm³, 平均粒径为 150 nm, 玻璃化温度为 13℃, 含固量为 50 %~52 %, pH=7.8~10, 25℃ 的粘度为 35~150 MPa·s, 表面张力为 30~48 mN/m. 钢纤维:扭曲型矩形截面钢纤维 (简称 S), 其几何尺寸为 0.25 mm×0.25 mm×10 mm, 抗拉强度>380 MPa, 抗拉模量为 200 GPa, 拉断延伸率为 3.5 %, 密度为 7.8 g/cm³.

1.2 材料配合比组成

三点弯曲试验试样尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm, 测试龄期为 35 d, 砂浆配合比如表 1 所示 (所加水量包括 SBR 乳液中的水量).

表 1 三点弯曲试验砂浆配合比
Tab. 1 Mix properties of mortar for three-point bending test

Sample	L0	L1	L2	L3	S3	S6	S9	SL32	SL62	SL92
Content of steel fiber (by volume) / %	—	—	—	—	0.3	0.6	0.9	0.3	0.6	0.9
Content of SBR (by mass of SBR to cement) / %	0	6	12	18	—	—	—	12	12	12
cement: sand: water=1:1.5:0.43										

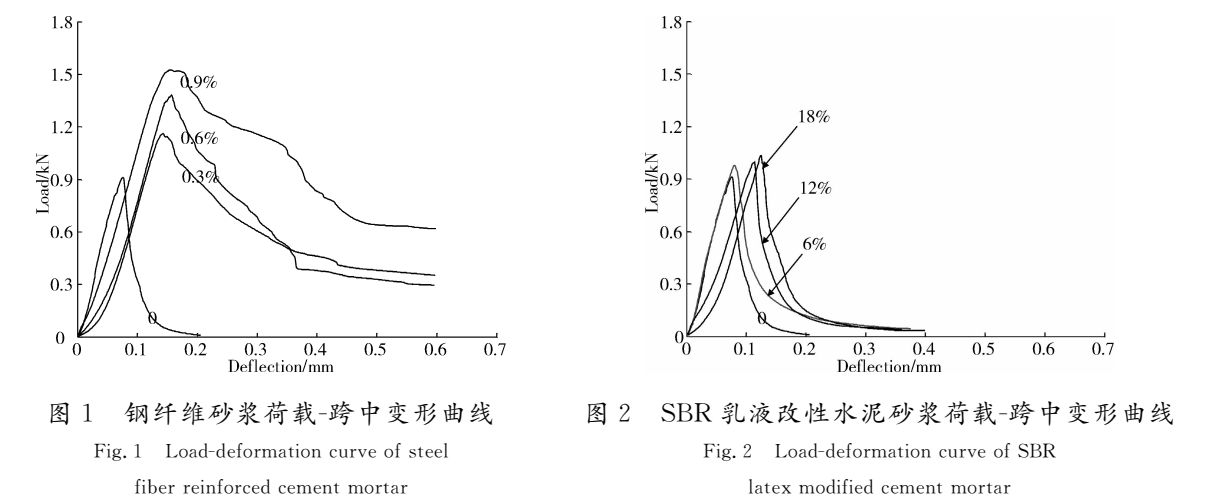
2 试验方法

试验前两天将试样从养护水池中取出,用切割机在试件侧面跨中切口,切口宽度为 2 mm,高度为 10 mm. 处理完毕之后继续放在养护室晾干备用. 加载设备为 CSS-44020 型电子万能材料试验机,加载速率为 0.002 mm/s,数据采集频率为 2 次/s,两支点之间的距离为 100 mm. 荷载和试件跨中变形量分别通过荷载传感器和位移计测量,同时采用引伸计测量裂缝口张开位移.

3 测试结果

3.1 荷载-跨中挠度变形特性

钢纤维砂浆、SBR 乳液改性水泥砂浆、钢纤维聚合物改性水泥砂浆三点弯曲试验荷载-跨中变形曲线分别如图 1~3 所示.



3.2 临界荷载、相应变形及裂缝嘴张开量

根据试验测试结果,不同配合比时砂浆的临界荷载、临界荷载对应的变形量及裂缝嘴张开宽度如表2所示.对于体积掺量较高的钢纤维砂浆或钢纤维聚合物砂浆,变形量及裂缝嘴张开宽度在某一范围内时,临界荷载能保持不变.表明在受荷过程中,钢纤维与基体界面间的粘结滑移作用承担了相当部分的外荷载,对增加试样抗荷及能量吸收具有显著的提高作用.

4 实验结果分析

4.1 荷载-变形特性

钢纤维、聚合物乳液对水泥砂浆三点弯曲荷载-变形特性的影响规律如下:

(1)随着聚合物乳液的掺入,砂浆临界荷载、临界荷载对应的变形略增大;相应地荷载-变形曲线的斜率有所降低.表明:随着乳液掺量的增加,砂浆的模量减小,柔韧性在增大;随着变形的增加,普通砂浆荷载-变形曲线陡然下降,而聚合物乳液改性砂浆的荷载-变形曲线下降端较平缓,且乳液掺量越大,曲线下降端越平缓.黄培彦^[14]及 Lech Czarnecki^[15]也得出相似的研究结论.

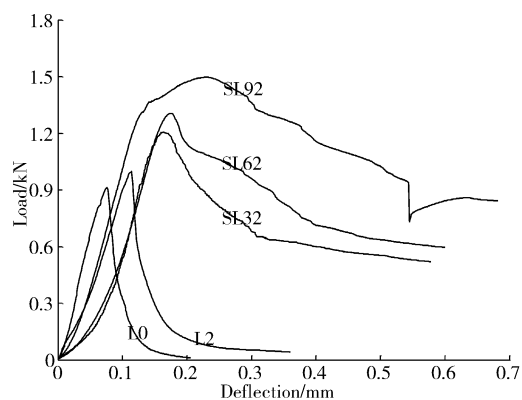


图3 钢纤维聚合物改性水泥砂浆荷载-跨中变形曲线

Fig. 3 Load-deformation curve of steel fiber reinforced polymer modified cement mortar

表2 临界荷载以及相应变形、裂缝嘴张开宽度测试结果

Tab. 2 Test result of critical load, deformation and crack mouth opening displacement

Testresult	L0	L1	L2	L3	S3	S6	S9	SL32	SL62	SL92
Critical load /kN	0.911	0.978	0.996	1.033	1.162	1.382	1.524	1.205	1.306	1.498
Deformation/mm	0.076	0.08	0.114	0.125	0.143	0.157	0.154~0.158	0.164	0.176~0.177	0.227~0.235
CrackMouth Open Displacement /mm	0.019	0.022	0.024	0.032	0.032	0.039	0.047~0.052	0.036	0.045	0.166~0.169

(2)钢纤维掺入后,显著提高了砂浆的临界荷载及相应变形,对比聚合物乳液砂浆荷载-变形曲线,钢纤维砂浆临界荷载明显大于聚合物砂浆,钢纤维砂浆荷载-变形曲线下降段比聚合物砂浆平缓,且随着钢纤维掺量的增加而更趋于平缓.钢纤维对改善砂浆韧性的效果好于聚合物乳液.如掺量为6%~18%的聚合物乳液砂浆变形性能比普通砂浆提高了5.3%~64.5%,而掺量为0.3%~0.9%的钢纤维砂浆变形性能比普通砂浆提高了88.2%~106.6%.

(3)钢纤维和聚合物乳液复掺对改善砂浆韧性的作用效果明显好单掺.如体积掺量为0.9%的钢纤维砂浆,临界荷载对应的变形为0.154~0.158,裂缝嘴张开宽度为0.047~0.052,比普通水泥砂浆则分别提高了108%和174%;而复掺聚合物乳液后,临界荷载对应的变形为0.227~0.235,裂缝嘴张开宽度为0.166~0.169,比普通砂浆分别提高了209%和789%.

(4)复掺聚合物乳液后,对钢纤维砂浆的临界荷载作用效果不是很明显,但聚合物乳液的掺入增加了临界荷载对应的变形,同时使荷载-曲线的下降段更加平缓、饱满.对于体积掺量为0.9%的钢纤维砂浆复掺12%聚合物后,在荷载-变形曲线的下降段甚至出现了二次峰值现象,表明聚合物增强了钢纤维与水泥基体界面之间的粘结作用,使钢纤维在拔出过程中能吸收更多的能量,进一步强化了砂浆的变形能力.

4.2 断裂特征参数

采用断裂能(G_f)、弹性裂纹嘴张开宽度($CMOD^e$)、有效裂纹长度(a_{eff})、临界应力强度因子(K_{IC}^s)及裂纹尖端张开位移($CTOD$)等断裂特征参数来评价钢纤维和聚合物乳液对水泥砂浆断裂性能的影响.上述参数计算过程见文献[16].

计算断裂能过程中,泊松系数取值为 0.25.同时,为了便于与普通砂浆进行对比分析,变形量 δ_0 取至跨度的 1/250,即取变形量为 0.4 mm 时砂浆的断裂能(在图 1 及图 3 中,对于钢纤维砂浆、钢纤维聚合物改性水泥砂浆,变形量大于 0.4 mm 的下降段未纳入断裂能计算范围).

断裂能等断裂特征参数计算结果如表 3 所示.

表 3 带切口砂浆试样断裂特征参数计算结果
Tab. 3 Calculation of fracture parameters for notch mortar sample

Fracture Parameters	L0	L1	L2	L3	S3	S6	S9	SL32	SL62	SL92
$G_f / \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	1 002.1	1 277.3	1 260.2	1 299.6	2 590.3	2 914.7	3 994.2	2 703.0	3 136.7	4 257.0
$CMOD^e / \text{mm}$	0.006	0.008	0.011	0.015	0.015	0.024	0.029	0.017	0.023	0.041
$a_{\text{eff}} / \text{cm}$	1.07	1.20	1.43	1.64	1.52	1.58	1.68	1.57	1.75	2.06
$K_{\text{IC}}^s / \text{MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$	0.143	0.172	0.216	0.275	0.275	0.346	0.422	0.299	0.388	0.621
$CTOD / \text{mm}$	0.005	0.007	0.010	0.013	0.013	0.021	0.025	0.015	0.020	0.035

注: G_f :断裂能; $CMOD^e$:弹性裂纹嘴张开宽度; a_{eff} :有效裂纹长度; K_{IC}^s :临界应力强度因子; $CTOD$:裂纹尖端张开位移.

4.3 钢纤维和聚合物对断裂性能影响

以普通水泥砂浆断裂特征参数为基准,钢纤维(掺量为 0~0.9 %)和聚合物乳液(掺量为 0~18 %)在单掺和复掺情况下对砂浆断裂特征参数的影响见表 4 所示.

由表 4 结果得知,钢纤维和聚合物乳液在单掺的情况下,均能显著提高砂浆的断裂特征参数,且钢纤维的作用效果好于聚合物乳液;钢纤维和聚合物乳液复掺时,作用效果明显优于单掺.以裂纹尖端张开位移为例,单掺聚合物乳液对该参数的提高幅度仅为 40 %~160 %,单掺钢纤维时,提高幅度为 160 %~400 %,而复掺钢纤维和聚合物乳液时,提高幅度为 200 %~600 %.

表 4 断裂特征参数提高幅度(与普通水泥砂浆相比)/%

Tab. 4 Increased ranges of fracture parameters (compared with blank mortar)/%

Fracture Parameters	Addition of SBR Solely	Addition of Steel Fiber Solely	Compound Addition of SBR and Steel Fiber
G_f	25~30	160~300	170~330
$CMOD^e$	30~150	150~380	10~580
a_{eff}	10~50	40~60	50~90
K_{IC}^s	20~90	90~200	110~330
$CTOD$	40~160	160~400	200~600

对比表 4 结果可知,采用裂纹尖端张开位移作为评价指标更能体现出钢纤维和聚合物乳液对砂浆断裂性能作用效果的差异性.

5 结 论

本文通过对带有切口的砂浆试样进行三点弯曲试验测试,得到了普通砂浆、聚合物砂浆、钢纤维砂浆和钢纤维聚合物砂浆的荷载-变形曲线、荷载-裂缝嘴张开宽度.在此基础上,采用断裂理论计算得到了砂浆试块的断裂特征参数,包括:断裂能、弹性裂纹嘴张开宽度、有效裂纹长度、临界应力强度因子及裂纹尖端张开位移等评价指标.主要研究结论如下:

- (1)临界荷载后,普通砂浆荷载-变形曲线随着变形的增加陡然下降,掺入质量掺量为 6 %~18 %的聚合物乳液后试件临界荷载、相应变形分别增加了 6.1 %~11.1 %和 5.2 %~64.4 %,而掺量为 0.3 %~0.9 %的钢纤维砂浆变形性能比普通砂浆提高了 88.2 %~106.6 %,钢纤维和 SBR 乳液复掺时则分别增加了 26.8 %~53.5 %和 115.8 %~209.2 %;
- (2)钢纤维和聚合物乳液复掺对改善砂浆韧性作用效果明显好单掺.钢纤维砂浆复掺聚合物乳液后,临界荷载略有增加,但临界荷载对应的变形增加幅度较大,荷载-变形曲线更加饱满,荷载-变形曲线下降段甚至出现了二次峰值现象,表明聚合物乳液的掺入增强了钢纤维与水泥石基体界面之间的粘结作用,使钢纤维在拔出过程中能吸收更多的能力,进一步提高了砂浆的韧性;
- (3)与临界荷载、断裂能、有效裂纹长度、临界应力强度因子及裂缝嘴张开位移等断裂特征参数相

比,采用裂纹尖端张开位移作为评价指标更能体现出钢纤维和聚合物乳液对砂浆断裂性能作用的效果的差异。

参考文献 References

- [1] QIAO Pi-zhong, ZHANG Lei, CHEN Fang-liang, et al. Fracture characterization of Carbon fiber-reinforced polymer-concrete bonded interfaces under four-point bending[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(6): 1247-1263.
- [2] 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.
WANG Yao, ZHOU Ji-kai, SHEN De-jian, et al. Review of study on mechanical property of aggregate-mortar interface transition zone of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(2): 89-94.
- [3] 杜明干,李庆斌. 纤维混凝土界面应力传递机制的三维弹性分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(3): 310-314.
DU Ming-gan, LI Qing-bin. 3-D elastic analysis of stress transference mechanism at the interfaces in fiber reinforced concrete [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(3): 310-314.
- [4] TAHER Abu-Lebdeh, SAMEER Hamoush, WILLIAM Heard, et al. Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very high strength concrete composites [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 39-46.
- [5] 邹笃建,刘铁军,滕 军. 表面改性技术对纤维混凝土阻尼性能影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(2): 186-190.
ZOU Du-Jian, LIU Tie-jun, TENG Jun. Experimental investigation on damping capacity of hybrid fiber reinforced concrete affected by surface treatments[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 186-190.
- [6] MORIN Vincent, MOEVUS Mariette, BRUGGER Isabelle-Dubois, et al. Effect of polymer modification of the paste-aggregate interface on the mechanical properties of concretes [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(5): 459-466.
- [7] LI Geng-ying, ZHAO Xiao-hua, RONG Chui-qiang, et al. Properties of polymer modified steel fiber-reinforced cement concretes [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(7): 1201-1206.
- [8] 孙增智,申爱琴,赵永祥. 外掺材料对混凝土弯曲韧性的影响[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(6): 905-911.
SUN Zeng-zhi, SHEN Ai-qin, ZHAO Yong-xiang. Influence of additives on flexural toughness of the concrete [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech: Natural Science Edition, 2011, 43(6): 905-911.
- [9] NILI Mahmoud, AFROUGHSABET V. Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(8): 879-886.
- [10] GAO J M, QIAN C X, WANG B, et al. Experimental study on properties of polymer modified cement mortars with silica fume [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1): 41-45.
- [11] 孙 伟,严 云. 钢纤维高强水泥基复合材料的界面效应及其疲劳特性的研究[J]. 硅酸盐学报, 1994, 22(2): 107-116.
SUN Wei, YAN Yun. Study of the interfacial effect and fatigue behavior of steel fiber reinforced high strength cement based composite materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1994, 22(2): 107-116.
- [12] 梅迎军,王培铭,李志勇,等. 硅灰和 SBL 对钢纤维砂浆结构和强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2): 183-188.
MEI Ying-jun, WANG Pei-ming, LI Zhi-yong, et al. Effect of Silica Fume and Styrene-Butadiene Latex on the Microstructure and Mechanical Performance of Steel Fiber Mortar [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(2): 183-188.
- [13] RILEM Technical Committee 50-FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests of notched beams[J]. Materials and Structures, 1985, 18 (106): 285-296.
- [14] 胡若邻,黄培彦. 钢纤维增强聚合物改性高强混凝土断裂韧性的试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19

- (6): 963-970.
- HU Ruo-lin, HUANG Pei-yan. Experimental Study on Fracture Toughness of Steel Fiber-reinforced and Polymer modified High-strength Concrete [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(6): 963-970.
- [15] CZARNECKI L, GARBACZ A, KURACH J. On the characterization of polymer concrete fracture surface[J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(4-5): 399-409.
- [16] 梅迎军, 王培铭, 李志勇, 等. SBR 乳液改性水泥砂浆断裂性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 77-81.
- MEI Ying-jun, WANG Pei-ming, LI Zhi-yong, et al. Fracture performance of SBR latex modified cement mortar [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2): 77-81.

Three-point bending fracture performance of steel fiber reinforced polymer modified cement mortar

MEI Ying-jun¹, WEI He-guang², XU Jian-ping³, FAN Wen-sheng³

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chong Qing Communications Construction Group, Chongqing 400010, China;

3. Fuzhou-Ji'an Expressway Construction Project Department of Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co. Ltd, Nanchang 330000, China)

Abstract: The load-deformation curves and crack mouth open displacements ($CMOD$) of mortar were acquired by means of three-point bend test on notched mortar samples. Those mortars are named SBR latex modified cement (with the content of 0~18% SBR, by weight of cement), steel fiber reinforced mortar (with the content of 0~0.9% steel fiber, by volume of mortar), steel fiber reinforced SBR latex modified cement mortar. Fracture parameters such as efficient crack length (a_{eff}), critical stress intensity factor (K_{IC}^*) and crack tip open displacement ($CTOD$) were obtained from theoretical calculation. The results show that the addition of steel fiber and SBR latex help improve fracture properties of mortar respectively, and the effect may increase the content of the SBR latex and steel fiber. Effect of steel fiber on fracture properties of mortar is superior to SBR latex, while compound addition of SBR latex and steel fiber is superior to employ respectively. Compared with blank mortar, critical load of steel fiber reinforced SBR latex modified cement mortar increased by 32.3%~64.4%, while corresponding deformation increased by 115.8%~209.2%. The descent segment of load-deformation curves for steel fiber reinforced polymer mortar falls gently, and there even appeared a secondary peak load. The adoption of $CTOD$ in appraising the effect of SBR latex and steel fiber on the fracture performances of mortar is more efficient than fracture energy, a_{eff} , K_{IC}^* and $CMOD$.

Key words: Steel fiber; polymer latex; cement mortar; fracture parameter; critical stress intensity factor; crack tip open displacement