

三点弯曲梁法下的铁尾矿砂混凝土断裂行为研究

张 瑶, 马卫华

(唐山学院 a. 土木工程学院; b. 河北省建筑工程与尾矿综合利用重点实验室, 河北 唐山 063000)

摘要: 文章从断裂力学的角度开展对铁尾矿砂混凝土的研究, 采用三点弯曲梁法对铁尾矿砂混凝土和河砂混凝土进行断裂试验, 测定荷载—裂缝口张开位移 (P - $CMOD$) 曲线和荷载—应变 (P - ϵ) 曲线, 依据混凝土双 K 模型确定起裂荷载 (P_{ini})、失稳荷载 (P_{max})、起裂韧度 (K_{Ic}^{ini}) 和失稳韧度 (K_{Ic}^u), 并利用扫描电镜对断裂面进行观测。通过比较断裂过程曲线和断裂参数发现, 两种混凝土的断裂过程没有明显差异, 铁尾矿砂混凝土的 P_{ini} , P_{max} , K_{Ic}^{ini} 和 K_{Ic}^u 均高于河砂混凝土, 其中 P_{ini} 和 K_{Ic}^{ini} 更加明显。扫描电镜结果显示, 加入铁尾矿砂能够改善混凝土界面过渡区的微观形貌。

关键词: 铁尾矿砂混凝土; 断裂力学; 三点弯曲梁法; 扫描电镜

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2023)03-0015-06

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.03.003

Study of Fracture of Iron Tailing Sand Concrete with Three-Point Bending Beam Method

ZHANG Yao, MA Wei-hua

(a. School of Civil Engineering; b. Hebei Key Laboratory of Building Engineering
and Tailing Utilization, Tangshan University, Tangshan 063000, China)

Abstract: In this paper, a study was carried out on the iron trailing sand concrete from the perspective of fracture mechanics, where the three-point bending beam method was used to conduct fracture tests on iron trailing sand concrete and river sand concrete, and the load-crack opening displacement (P - $CMOD$) curve and load-strain (P - ϵ) curve were measured. The concrete double-K model was used to determine the initial cracking load (P_{ini}), unstable cracking load (P_{max}), initial cracking toughness (K_{Ic}^{ini}) and unstable cracking toughness (K_{Ic}^u); and a scanning electron microscope was used to observe the fracture surface. By comparing the fracture process curves and fracture parameters, it was found that there was no significant difference between the fracture processes of the two kinds of concrete, and the P_{ini} , P_{max} , K_{Ic}^{ini} and K_{Ic}^u of iron trailing sand concrete were higher than those of river sand concrete, in which P_{ini} and K_{Ic}^{ini} were significantly higher. The SEM results showed that the addition of iron trailing sand could improve the microscopic morphology of the concrete interfacial transition zone.

Key Words: iron trailing sand concrete; fracture mechanics; three-point bending beam; SEM

基金项目: 唐山市科技计划项目(20130224b); 河北省建设科技研究项目(2022-2162)

作者简介: 张瑶(1989-), 女, 河北保定人, 讲师, 硕士, 研究方向为混凝土断裂力学与结构分析;
马卫华(1978-), 男, 河北唐山人, 副教授, 硕士, 研究方向为混凝土结构工程。

0 引言

一方面,随着中国基础设施建设的不断发展,各项工程建设对混凝土的需求急剧增加,消耗掉了大量的用于生产混凝土的河砂^[1],而河砂的过度开采又造成了一系列严重的环境问题^[2],因此,迫切需要寻求替代河砂的混凝土细骨料。另一方面,钢铁生产的大幅增加产生了大量的铁尾矿砂^[3]。铁尾矿砂通常储存在尾矿坝中,占用面积大,管理成本高,而且有害重金属的泄漏还可能造成严重的环境污染。由此,铁尾矿砂的二次利用得到了广泛关注。铁尾矿砂的成分与天然骨料相似^[4],将其作为细骨料用于生产建筑材料是可行的。这意味着,如果将铁尾矿砂大量用于混凝土和砂浆的生产,将有助于解决河砂供不应求的问题,同时也能保证矿石开采业经济和环境的可持续性。

近年来,研究人员在铁尾矿砂混凝土的制造和测试方面取得了一定进展。Liu 等^[5]以铁尾矿砂等量替代天然砂制备了喷射混凝土,经过多次试验,得到了满足强度要求和工程需要的铁尾矿砂混凝土。康洪震等^[6]利用铁尾矿砂替代普通砂制备了强度等级为 C20~C55 的混凝土,并测试了不同强力等级的铁尾矿砂混凝土受压应力—应变全曲线与普通混凝土试件之间的差异。Zhu 等^[7]验证了利用铁尾矿砂制备超高性能混凝土的可行性,探讨了细骨料种类、替代比例以及最大粒径对其性能的影响。Tian 等^[8]基于工作性与力学性能评价了铁尾矿砂混凝土,并通过试验证实替代率为 35% 的铁尾矿砂混凝土具有与天然砂混凝土基本相当的耐久性。马卫华等^[9]制作了钢筋铁尾矿砂混凝土梁用于研究其受剪性能,经过对比试验,验证了其与普通钢筋混凝土梁有相似的受剪破坏形态以及与之相比有较高的抗剪承载力。目前的研究表明,经过合理的配合比设计,铁尾矿砂混凝土在一定范围内具有与河砂混凝土相似的工作性、抗压能力和较好的耐久性能。

铁尾矿砂混凝土作为一种由水泥、砂、石、水等复合而成的材料,必然有众多的结合面,但

受温度、湿度、收缩、膨胀等因素的影响,部分结合面之间会形成微裂缝。微裂缝的产生与发展会影响混凝土工程结构的正常使用,甚至对整个工程结构的安全构成威胁^[10]。作为研究裂缝和裂缝稳定性问题的学科,断裂力学在结构设计和材料选择方面越来越重要。因此,研究人员利用断裂力学,根据混凝土断裂的特点相继提出了一些模型,包括两参数模型^[11]、等效裂缝模型^[12]、钝裂缝带模型^[13]以及虚拟裂缝模型^[14]等。徐世烺等^[15-16]综合上述模型的优点提出了双 K 断裂模型,用起裂断裂韧度(K_{lc}^{ini})和失稳断裂韧度(K_{lc}^{un})两个参数来描述混凝土裂缝扩展的全过程,得到了学术界以及工程界的认可^[17]。

关于铁尾矿砂的利用研究已经取得了很多成果,但关于铁尾矿砂替代河砂对混凝土断裂特性的影响研究却鲜有涉及。因此,本文采用三点弯曲梁法分别对铁尾矿砂混凝土和河砂混凝土的断裂行为进行测试,并利用扫描电镜观测其断裂面的形貌,从而从宏观和微观角度综合评价铁尾矿砂混凝土的断裂特性。

1 试验概况

1.1 材料与配合比

试验设置了试验组(EG)和对照组(CG),两组的配合比见表 1。两组材料中均包含相同用量的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥、普通矿粉和 I 号粉煤灰。在粗集料中,65% 为 10~20 mm 粒径的碎石,35% 为 5~10 mm 粒径的碎石。在细骨料中,河砂的细度模数为 2.2~2.5,铁尾矿砂的细度模数为 2.0~2.2。用自来水进行混凝土的拌合,并在制备过程中加入高性能减水剂。

1.2 试件制备

试验所采用的三点弯曲梁如图 1 所示,各方向的尺寸如表 2 所示。每组各浇筑 4 个试件,另外,为测定立方体抗压强度,每组制作 3 个 100 mm×100 mm×100 mm 的伴随试件,获得的立方体抗压强度平均值见表 1。

表 1 混凝土配合比及立方体抗压强度

试件 编号	材料用量/(kg·m ⁻³)								立方体抗压强度/MPa
	水泥	河砂	铁尾矿砂	石子	水	粉煤灰	矿粉	外加剂	
CG	191	815	/	1 118	142	31	72	1.56	38.43
EG	191	/	815	1 118	170	31	72	1.56	44.17

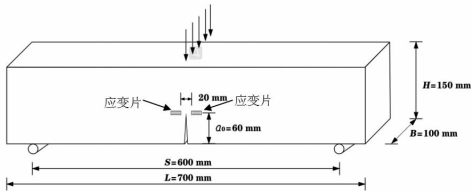


图 1 三点弯曲梁示意图

表 2 试件尺寸

总长 <i>L</i>	跨长 <i>S</i>	高度 <i>H</i>	宽度 <i>B</i>	初始缝长 <i>a</i> ₀	初始缝高比 (<i>a</i> ₀ / <i>H</i>)
/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	
700	600	150	100	60	0.4

在混凝土浇筑之前,将一块两面涂有油性脱模剂的 2 mm 厚的钢板放在试模中。混凝土初凝 3 h 后,松开钢板,脱模时抽出钢板,从而形成预制缝。试件浇筑完成后,在 20±5 ℃下放置 3 d。脱模后用草袋覆盖,洒水养护 28 d。

1.3 试验过程

1.3.1 宏观测试

三点弯曲梁试验由电子万能试验机完成,试验机的量程为 100 kN,使用位移速率控制加载,加载速度为 0.05 mm/min,加载装置如图 2 所示。由试验机输出荷载值,用 4 mm 量程的夹式引伸计测量裂缝口张开位移(CMOD)。在预制缝中心两侧各 10 mm 处对称地粘贴标距为 20 mm 的应变片。通过静态采集系统 DH3820 以 10 Hz 的频率采集试验过程中的荷载、应变和裂缝口张开位移。

1.3.2 微观测试

为了观察水化产物和界面过渡区(ITZ)的微观形貌,在三点弯曲梁试验后,用切割机在断裂面表面处切取大概尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样。将切割试样放入仪器中抽取真空,并对观测位置所在表面进行喷金。将处理完成的试样载入扫描电镜系统(JSM7900F),通过设置电压、电流、清晰度等参数调节倍率和焦距,观测其形貌。



图 2 加载装置

2 试验结果与讨论

2.1 宏观部分

2.1.1 破坏过程

图 3—图 5 分别为三点弯曲梁试验测得的部分试件加载过程的照片、载荷—裂缝口张开位移(*P*-*CMOD*)曲线和载荷—应变(*P*- ϵ)曲线。如图 4 所示,裂缝口张开位移(*CMOD*)在加载初期随着荷载的增加基本呈线性增长,铁尾矿砂混凝土和河砂混凝土的曲线非常接近;裂缝口张开位移的增长速度在达到起裂荷载后有明显提高,曲线呈现非线性特征;达到失稳荷载后,试件进入裂缝扩展的不稳定阶段,荷载减小的同时裂缝不断向上扩展,最后试件断裂,如图 3 所示。试验证明,铁尾矿砂混凝土与河砂混凝土的断裂过程没有明显差异。

2.1.2 起裂荷载(*P*_{ini})

采用电阻应变法测定三点弯曲梁试件的起裂荷载(*P*_{ini})。荷载(*P*)和应变(ϵ)在加载初期基本上是线性的。当荷载增加到一定程度时,由于高度的应力集中,裂缝尖端的混凝土出现裂缝,此时混凝土释放能量,进而导致裂缝两侧的应变回缩。如图 5 所示,应变达到最大值后反而随着荷载的增加而减小,该点对应的荷载值就是试件的 *P*_{ini}。各试件 *P*_{ini} 详见表 3。



(a) 裂缝扩展中



(b) 试件断裂

图 3 部分试件加载过程照片

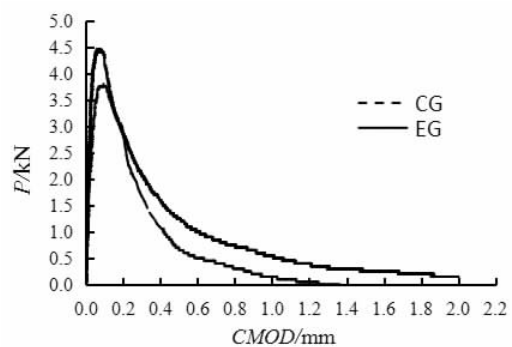
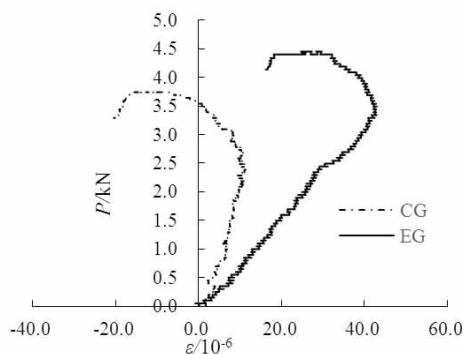
图 4 部分试件 P - $CMOD$ 曲线图 5 部分试件 P - ε 曲线

表 3 各试件双 K 断裂参数

试件编号	P_{ini} /kN	P_{max} /kN	a_c /mm	K_{Ic}^{ini} /($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	K_{Ic}^m /($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)
CG-1	2.40	3.80	79	0.514	1.176
CG-3	2.85	4.35	75	0.606	1.235
CG-4	2.20	3.55	70	0.473	0.906
平均值	2.48	3.90	75	0.531	1.106
EG-2	2.90	4.80	80	0.617	1.512
EG-3	3.20	4.25	75	0.678	1.197
EG-4	3.40	4.45	76	0.719	1.275
平均值	3.17	4.50	77	0.671	1.328

2.1.3 起裂韧度(K_{Ic}^{ini})与失稳韧度(K_{Ic}^m)

将试验测得的 P_{ini} 和预制裂缝长度(a_0)代入我国相关规范^[18]中的公式(1)和(2),从而计算得到起裂韧度(K_{Ic}^{ini}):

$$K_I = \frac{3(P+mg/2)S}{2H^2B} \sqrt{a} F_I \left(\frac{a}{H} \right). \quad (1)$$

$$F_I \left(\frac{a}{H} \right) =$$

$$\frac{1.99 - \frac{a}{H} (1 - \frac{a}{H}) [(2.15 - 3.93 \frac{a}{H} + 2.7 (\frac{a}{H})^2)]}{(1 + 2 \frac{a}{H}) (1 - \frac{a}{H})^{3/2}}.$$

(2)

式中, K_I 为断裂韧度; P 为跨中集中荷载; mg 为试件两支座间的质量(用试件总质量按 S/L 比折算, L 为试件总长度; g 为重力加速度; S 为试件两支座间的跨度); H 为试件截面高度; B 为试件截面宽度; a 为裂缝长度。

将试验测得的失稳荷载(P_{max})与临界有效裂缝长度(a_c)分别替代 P_{ini} 与 a_0 代入公式(1)和(2),可以得到失稳韧度 K_{Ic}^m 。其中, a_c 可依据线性叠加原理将 P_{max} 与对应的裂缝口张开位移 $CMOD_c$ 带入式(3)求得:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (H + H_0) \tan^{-1} \sqrt{\frac{BE}{32.6P_{max}} CMOD_c - 0.1135 - H_0} \quad (3)$$

式中, E 代表计算杨式模量, 由公式(4)计算得到:

$$E = \frac{1}{Bc_i} \left[3.70 + 32.60 \tan^2 \left(\frac{\pi a_0 + H_0}{2H + H_0} \right) \right] \quad (4)$$

$c_i = CMOD_i / P_i$, 为初始柔度, 可由荷载—裂缝口张开位移 (P - $CMOD$) 曲线中荷载到达 P_{ini} 前的某一点对应的 ($CMOD_i, P_i$) 求出。

通过双 K 断裂模型得到的 K_{Ic}^{ini} 与 K_{Ic}^{un} 计算结果见表 3。由于操作不当造成的损坏, 每组试件个数不足 4 个。

2.1.4 断裂参数变化规律

根据表 3 的计算结果, 绘制图 6 所示的铁尾矿砂混凝土 (EG) 与河砂混凝土 (CG) 的断裂参数对比图。

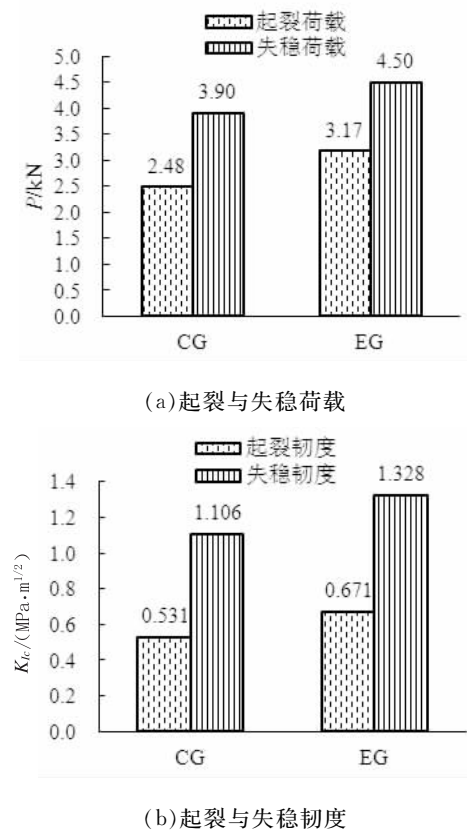


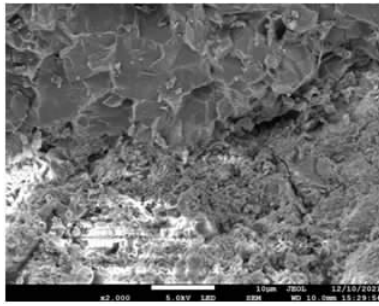
图 6 断裂参数对比图

由图 6(a) 可知, 铁尾矿砂混凝土的起裂荷载 (P_{ini}) 与失稳荷载 (P_{max}) 均高于河砂混凝土,

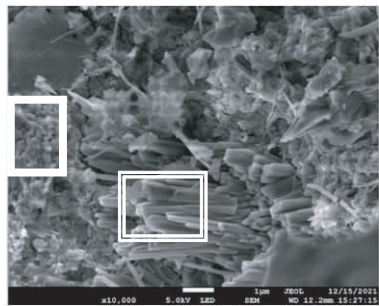
其中铁尾矿砂混凝土的 P_{ini} 是河砂混凝土的 1.28 倍, P_{max} 是河砂混凝土的 1.15 倍, P_{max} 的增大幅度稍低于 P_{ini} 。由图 6(b) 可知, 铁尾矿砂混凝土的起裂韧度 (K_{Ic}^{ini}) 与失稳韧度 (K_{Ic}^{un}) 均高于河砂混凝土, 其中铁尾矿砂混凝土的 K_{Ic}^{ini} 是河砂混凝土的 1.26 倍, K_{Ic}^{un} 是河砂混凝土的 1.20 倍。对于以上断裂参数, 铁尾矿砂混凝土表现出明显的优势, 特别是在起裂状态下。究其原因, 主要是铁尾矿砂比河砂更加坚固、有更多的棱角、不规则性更加显著、接触点多, 形成的铁尾矿砂砂浆具有更坚实的骨架, 抗裂能力更高。而失稳状态下抵抗外力的能力还需考虑骨料的黏聚咬合作用, 铁尾矿砂替代河砂后此项作用的提高程度不及砂浆的抗裂能力显著, 故铁尾矿砂混凝土 P_{max} 与 K_{Ic}^{un} 的提高程度稍差。

2.2 微观部分

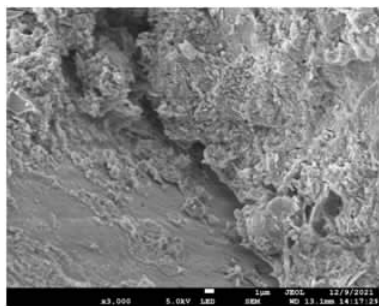
混凝土中最薄弱的部分是有较多孔隙的界面过渡区 (ITZ), 其显著影响混凝土的宏观断裂行为。图 7 为铁尾矿砂混凝土和河砂混凝土的扫描电镜照片, 其中图 7(a) 和图 7(c) 分别为二者放大后的界面过渡区部分, 放大倍数为 2 000~3 000 倍, 其中致密部分为粗骨料, 浅灰色部分为砂浆, 黑色带状部分为裂纹。铁尾矿砂砂浆的形貌相对致密, 而河砂混凝土中粗骨料与砂浆的界面以及砂浆中裂缝缺陷相对明显。进一步放大到 10 000 倍, 得到图 7(b) 和图 7(d), 从中可见, 在铁尾矿砂混凝土中呈团絮状的 C-S-H 凝胶更加致密均匀, 而在河砂混凝土中呈棒状的钙矾石在界面过渡区更多 (其中单线方框中的物质代表 C-S-H 凝胶, 双线方框中的物质代表钙矾石), 这使得河砂混凝土在荷载作用下更加容易产生裂缝并断裂。铁尾矿砂具有棱角分明的特点, 它与水泥基质组合得更牢固而不易剥落, 此外, 铁尾矿砂中具有更多细小的颗粒, 这样的颗粒能够起到“微填充”效应, 可以增加砂浆及界面过渡区的致密性。所以说, 与河砂混凝土相比, 铁尾矿砂混凝土具备更好的 ITZ 特性, 这也解释了铁尾矿砂混凝土表现出更好的宏观断裂特性的原因。



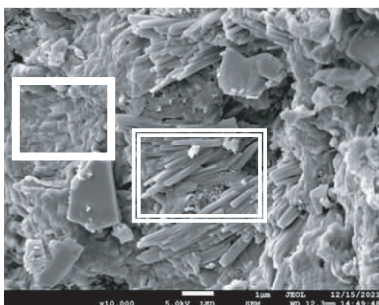
(a)铁尾矿砂混凝土界面过渡区



(b)铁尾矿砂混凝土水化产物



(c)河砂混凝土界面过渡区



(d)河砂混凝土水化产物

图 7 扫描电镜照片

3 结论

(1)铁尾矿砂混凝土与河砂混凝土的 P - $CMOD$ 曲线变化趋势一致,断裂过程无显著差异。

(2)铁尾矿砂混凝土的 P_{ini} , P_{max} , K_{lc}^{ini} 以及

K_{lc}^{m} 均高于河砂混凝土,其中 P_{ini} 与 K_{lc}^{ini} 提高程度显著,这表明铁尾砂替代河砂后形成的铁尾矿砂砂浆的抗裂性能更好。

(3)铁尾矿砂棱角分明的特点使得它与水泥基质的组合得更牢固而不易剥落,“微填充”效应使得微观结构更加致密均匀。相比河砂混凝土,铁尾矿砂混凝土的界面过渡区中砂子与水泥基质结合状态更好,能够更好地抵抗开裂。

因此,从断裂力学的角度评估,铁尾矿砂可以等量替代河砂制备混凝土,这将为铁尾矿砂的二次利用提供巨大潜力。

参考文献:

- [1] 卢佳涛,孔丽娟,樊子瑞,等. 铁尾矿砂—地聚物复合材料的界面与性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(6):585-590.
- [2] SHETTIMA A U, HUSSIN M W, AH-MAD Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. Construction and Building Materials,2016,120:72-79.
- [3] 刘云霄,李晓光,张春苗,等. 铁尾矿砂水泥基灌浆料性能研究[J]. 建筑材料学报,2019,22(4):538-544.
- [4] ZHANG W F, GU X W, QIU J P, et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials,2020,260:119917.
- [5] LIU W Y, XU X L, AN Y Y. Study on the sprayed concrete with iron tailings[J]. Advanced Materials Research,2011,347-353:1939-1943.
- [6] 康洪震,张凯,马卫华,等. 铁尾矿砂混凝土轴心受压应力—应变全曲线试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(S2):373-378.
- [7] ZHU Z G, LI B X, ZHOU M K. The influences of iron ore tailings as fine aggregate on the strength of ultra-high performance concrete[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2015,2015:1-6. (下转第 26 页)

4 结语

京雄城际铁路上跨南水北调天津干渠连续梁桥上部结构为(72+128+72) m 变截面连续梁,运用球铰测试法进行不平衡称重试验,得到 152#墩和 153#墩的摩阻力矩、不平衡力矩、球铰静摩阻系数以及转动体偏心距等相关参数。根据试验结果,对转动体进行配重,最终 152#墩竖向偏心距设置为 0,153#墩竖向偏心距设置为 0.001 m,保证了转体施工连续梁的顺利安全合龙,由此验证了配重方案的可行性及现有的不平衡称重试验原理计算方法的合理性。

参考文献:

- [1] 高庚元. 武汉市姑嫂树路跨铁路立交桥高位转体施工技术[J]. 铁道建筑, 2017(6): 44-48.
- [2] 徐飞. 大跨度连续梁桥转体施工监控及力学特性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [3] 李秀东. 荣乌高速公路孤庄营跨线桥转体不平衡称重试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2012(4): 25-29.
- [4] 王朝丰. 论转体桥施工关键技术[J]. 城市建设理论研究, 2012(9): 2095-2104.
- [5] 徐勋倩, 冯旭阳, 项宏亮, 等. MIDAS 仿真技术在桥梁工程虚拟实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10): 115-118.
- (责任编辑: 冯兆娜)
- [1] 高庚元. 武汉市姑嫂树路跨铁路立交桥高
- (上接第 20 页)
- [8] TIAN Z X, ZHAO Z H, DAI C G, et al. Experimental study on the properties of concrete mixed with iron ore tailings[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016(42): 1-9.
- [9] 马卫华, 孟庆娟, 康洪震, 等. 铁尾矿砂混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1): 322-329.
- [10] 李庆斌, 卿龙邦, 管俊峰. 混凝土裂缝断裂全过程受黏聚力分布的影响分析[J]. 水利学报, 2012, 43(S1): 31-36.
- [11] JENG Y S, SHAH S P. Two parameter fracture model for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(10): 1227-1241.
- [12] KARIHALOO B L, NALLATHAMBI P. An improved crack model for the determination of fracture effective toughness of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19(4): 603-610.
- [13] BAZANT, Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete. [J]. Materials and Structures, 1983, 16(93): 155-177.
- [14] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-782.
- [15] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, Part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams[J]. International Journal of Fracture, 1999, 98, 151-177.
- [16] XU S L, REINHARDT H W. A simplified method for determining double-K fracture parameters for three point bending tests[J]. International Journal of Fracture, 2000, 104: 181-209.
- [17] 吴瑶, 徐世娘, 吴建营, 等. 双 K 断裂准则在丹江口大坝安全性评定中的应用[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 366-372.
- [18] DL/T 5332-2005 水工混凝土断裂试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- (责任编辑: 冯兆娜)