



采用声发射技术测试的疏浚砂混凝土 断裂性能研究

宁英杰¹, 楼树桢¹, 叶林杰², 白丽辉¹, 徐慧颖³

(1. 浙江交工集团有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江交工新材料有限公司, 浙江 杭州 310051;
3. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为探讨疏浚砂混凝土的断裂力学性能, 对5种不同疏浚砂取代率(0%、12.5%、25%、37.5%、50%)的混凝土开展三点弯断裂试验, 并结合声发射技术监测混凝土断裂破坏全过程。基于声发射事件数构建混凝土Weibull损伤模型, 分析模型参数的变化规律。结果表明, 随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土的起裂断裂韧度和失稳断裂韧度先减小后增大; 混凝土断裂过程中声发射振铃计数和能量反映了疏浚砂混凝土断裂破坏过程的3阶段特征, 且随着疏浚砂掺量的增加, 声发射振铃计数及能量累计值呈逐渐增大的趋势。随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土的脆性增大, 其损伤累积速率加快, 混凝土产生初始损伤的变形逐渐减小。

关键词: 疏浚砂混凝土; 三点弯断裂试验; 断裂参数; 声发射; Weibull分布

中图分类号: U615; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0022-08

Fracture properties of dredged sand concrete tested by acoustic emission technology

NING Yingjie¹, LOU Shuzhen¹, YE Linjie², BAI Lihui¹, XU Huiying³

(1. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

2. Zhejiang Communications Construction New Material Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: To investigate the fracture mechanical properties of dredged sand concrete, three-point bending fracture tests are carried out on the concrete specimens with different dredged sand replacement rates (0%, 12.5%, 25%, 37.5%, 50%). The whole fracture process of concrete is monitored with acoustic emission technology. The Weibull distribution damage model based on acoustic emission event is built, and the variation rules of model parameters are analyzed. The results show that with the increase of dredged sand content, the initial and unstable fracture toughnesses decrease firstly and then increase. The acoustic emission ringing count and energy reflect the three stages of fracture failure process of dredged sand concrete. With the increasing of dredged sand content, the accumulated acoustic emission count and energy increase. With the increasing of the dredged sand content, the brittle of concrete increases, the damage accumulation rate increases and the displacement corresponding to initial damage of the concrete decreases.

Keywords: dredged sand concrete; three-point bending fracture test; fracture parameter; acoustic emission; Weibull distribution

为保证航道正常运输, 需要对航道定期进行疏浚。疏浚工程产生的疏浚砂从以往的指定地区抛弃和吹填造陆^[1-2], 已逐步成为用于道路建设、

水泥生产、替代混凝土制备的集料、砖块制备等的建筑材料^[3-7]。疏浚沉积物的资源化利用, 对保护环境、节约资源具有重要意义。

收稿日期: 2023-05-22

作者简介: 宁英杰 (1972—), 男, 教授级高工, 研究方向为新材料与新技术。

Limeira 等^[8]对疏浚砂取代 15%~50%原砂的混凝土展开物理力学性能试验,表明疏浚砂代替细集料制备的混凝土力学性能良好、耐磨性好、渗透性好;诸裕良等^[9-10]制备疏浚砂砂浆,发现其强度高、抗水侵蚀性好;Luan 等^[11]发现当疏浚砂取代率为 25%时,抗压强度最大。

断裂力学性能的研究能够揭示裂缝扩展的规律^[12]。范思琦等^[13]对纤维再生微粉水泥基复合材料展开三点弯曲试验,表明断裂韧度随水胶比和再生微粉取代率的增大先增大后减小;张瑶等^[14]对掺铁尾矿砂的混凝土展开三点弯曲试验;Karimi 等^[15]发现混凝土中掺入 4%橡胶颗粒可提高其力学性能和抗裂性;Paresh 等^[16]对将声发射参数及声发射 b 值与断裂行为相联系,研究混凝土断裂的全过程。

目前国内外学者关于疏浚砂混凝土断裂性能的研究较少。基于此,本文对 5 种不同疏浚砂取代率的混凝土展开三点弯曲试验,同时借助声发射技术检测混凝土裂缝扩展的全过程,并建立基于声发射特征参数的混凝土断裂损伤模型,可为疏浚砂混凝土在实际工程中的应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用 P·O 52.5 型水泥,掺入 II 级粉煤灰,细集料为疏浚砂和机制砂,颗粒级配曲线见图 1。可以看出,疏浚砂处于特细砂区,机制砂处于中砂区,细度模数分别为 0.25 和 3.0。粗集料采用最大粒径为 31.5 mm 的碎石;掺入聚羧酸高效减水剂。本文配制 0%、12.5%、25%、37.5% 和 50% 5 种疏浚砂取代率的混凝土,分别用 M_0 、 $M_{12.5}$ 、 M_{25} 、 $M_{37.5}$ 、 M_{50} 表示,配合比见表 1。疏浚砂与机制砂的颗粒形貌见图 2。可以看出,疏浚砂颗粒小、圆滑度低、棱角分明,而机制砂颗粒大、棱角多。采用塑料试模分别成型尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm(宽×高×长)的棱柱体试件,24 h 后脱模,并在标准养护室养护 28 d 后进行试验。每组 3 个试件。

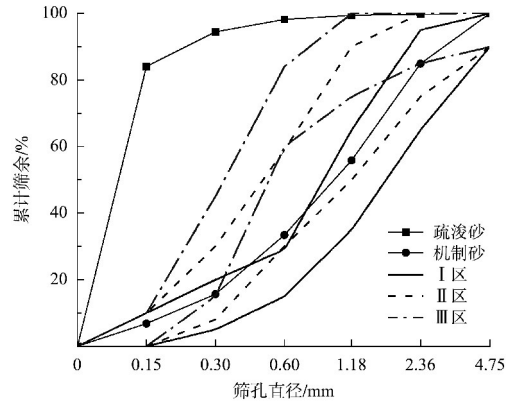


图 1 细集料级配曲线

表 1 疏浚砂混凝土配合比 kg/m^3

编号	水泥	粉煤灰	水	减水剂	疏浚砂	机制砂	碎石
M_0	320	172	173	5	0	444	1 207
$M_{12.5}$	320	172	173	5	55	388	1 207
M_{25}	320	172	173	5	111	333	1 207
$M_{37.5}$	320	172	173	5	166	277	1 207
M_{50}	320	172	173	5	222	222	1 207

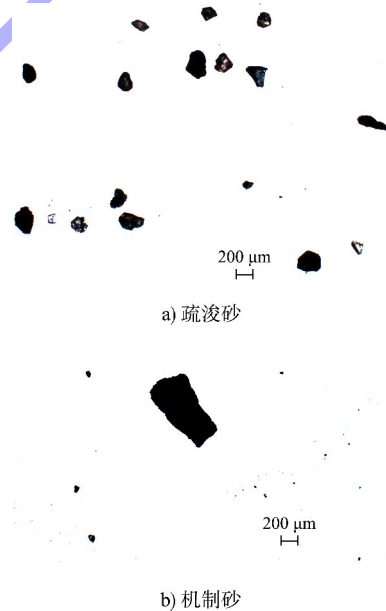


图 2 疏浚砂和机制砂的形貌

1.2 三点弯曲梁试验

试验前对试件预制深度 30 mm、宽 2 mm 的裂缝。采用液压闭环微机伺服材料试验机 MTS322 对疏浚砂混凝土棱柱体试件展开三点弯断裂试验,加载速率为 0.001 mm/s。在进行断裂试验过程中,运用美国物理声学公司生产的 Sensor Highway III 16 通道采集系统采集混凝土断裂过程声发射信号。

声发射门槛值为 40 dB，滤波频率为 20~400 kHz。在试件前后分别布置 2 个声发射探头，在声发射探头与试件接触面涂抹凡士林，并用绷带固定声发射传感器，装置布置如图 3 所示。

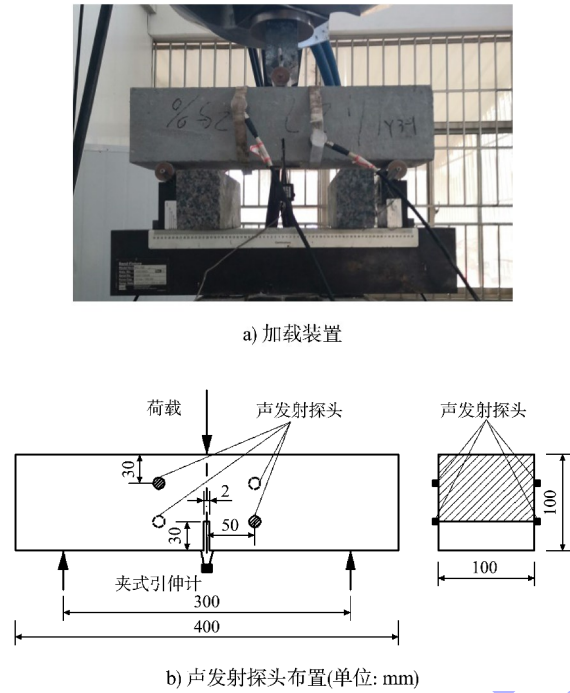
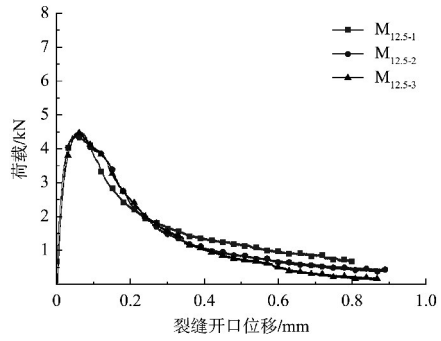
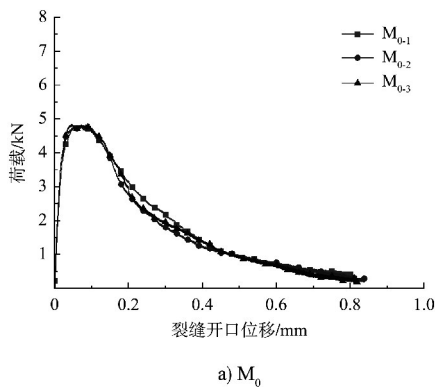


图 3 加载装置及声发射探头布置

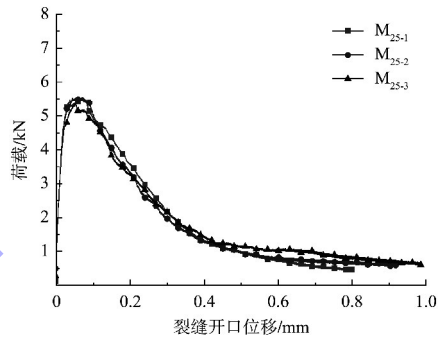
2 试验结果与分析

2.1 断裂参数

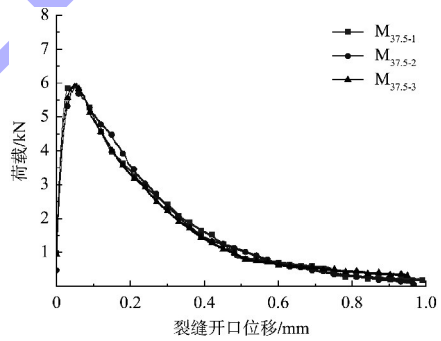
不同疏浚砂掺量混凝土的荷载-裂缝开口位移曲线见图 4。可以看出，随着疏浚砂掺量的增加，混凝土试件的峰值荷载先减小后增大，说明掺入适量的疏浚砂能够提高混凝土的断裂性能；随着疏浚砂掺量的增加，混凝土试件的曲线斜率也逐渐增大，说明掺入适量的疏浚砂能够提高混凝土的强度和刚度。



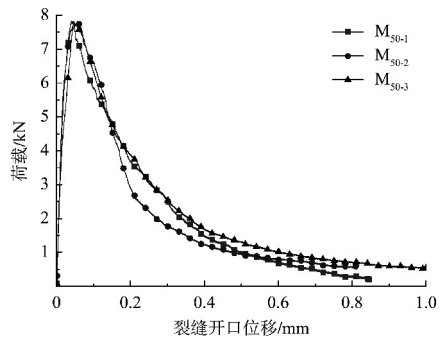
b) $M_{12.5}$



c) M_{25}



d) $M_{37.5}$



e) M_{50}

图 4 不同疏浚砂掺量混凝土的荷载-裂缝开口位移曲线

根据 DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》^[17]，基于双 K 断裂理论确定混凝土的断裂

参数, 见表 2。可以看出, 随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土起裂荷载和失稳荷载先减小后增大, 因为适量的疏浚砂能够提高混凝土内部的密实度, 所以当掺入 25%、37.5%、50% 的疏浚砂后混凝土承受荷载的能力提高。随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土的起裂断裂韧度和失稳断裂韧度先减小后增大, 说明适量疏浚砂的掺入能够提高混凝土抵抗裂缝扩展的能力。断裂能是混凝土在拉应力的作用下从裂纹起裂、扩展至试件断裂过程中单位断裂面上所消耗的总能量, 反映了混凝土抵抗裂缝扩展的能力^[18]。疏浚砂混凝土断裂能随着疏浚砂取代率的增加先减小后增大, 有效裂缝长度随疏浚砂取代率的增大先增大后减小, 说明适量疏浚砂的掺入能够提高混凝土的断裂性能。

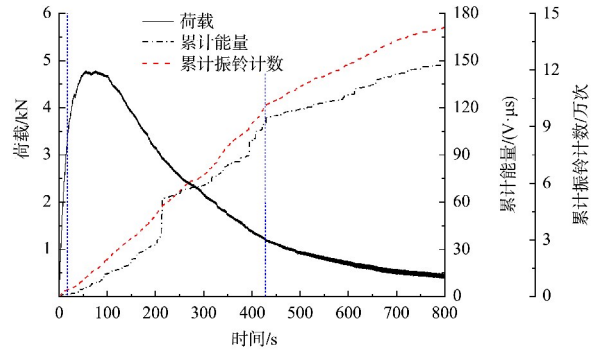
表 2 疏浚砂混凝土断裂参数

编号	起裂荷载/ kN	失稳荷载/ kN	起裂韧度/ (MPa·m ^{1/2})	失稳韧度/ (MPa·m ^{1/2})	有效裂 缝长度/ mm	断裂能/ (N·m ⁻¹)
M ₀	3.35	4.78	0.54	1.09	44.08	164.86
M _{12.5}	3.12	4.46	0.50	1.03	16.13	141.25
M ₂₅	4.50	5.46	0.70	1.19	43.00	178.01
M _{37.5}	5.00	5.95	0.77	1.25	41.96	186.55
M ₅₀	5.87	7.83	0.90	1.34	35.00	202.87

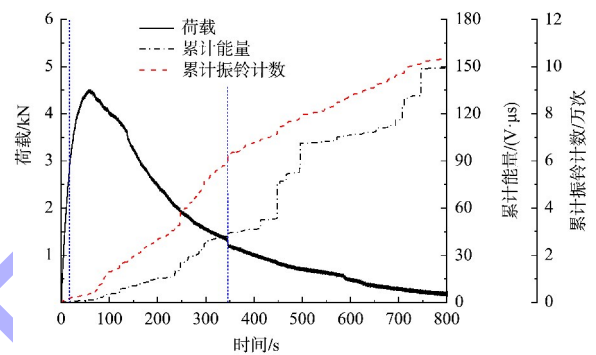
2.2 声发射特征参数

2.2.1 振铃计数和能量

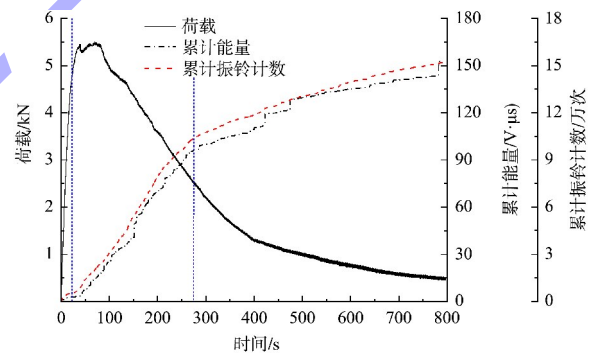
声发射累计振铃数与能量常用于声发射活性评价, 能够反映混凝土试件内部裂缝的发展过程^[19]。疏浚砂混凝土振铃计数和能量随时间变化的曲线见图 5。可以看出, 累计振铃计数可以将疏浚砂混凝土的裂缝扩展过程分为 3 个阶段: 1) 初始阶段振铃计数较小, 此时混凝土内部裂纹处于萌生阶段, 声发射信号较少; 2) 随着加载的继续, 振铃计数快速增加, 说明微观裂纹不断产生聚集形成宏观裂纹, 试件不断破坏, 发出的弹性波多, 声发射信号活跃度高; 3) 随后振铃计数增长速率减小, 此时试件内宏观裂缝较大, 试件内部发出的弹性波较少, 声发射活跃度降低。



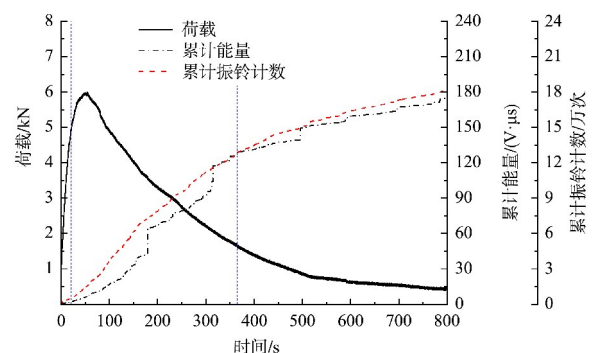
a) M₀



b) M_{12.5}



c) M₂₅



d) M_{37.5}

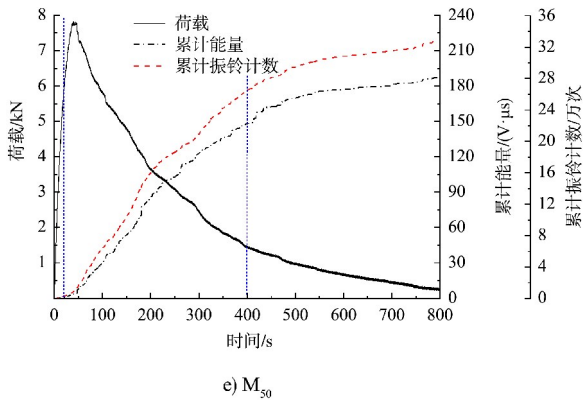


图5 疏浚砂混凝土荷载、振铃计数和能量-时间变化曲线

声发射能量也表现出类似的特征，在峰值荷载前，声发射信号数较少，接近峰值荷载后，声发射能量开始逐渐增加。此外，由图5可以发现，随着疏浚砂掺量的增加，能量曲线跳跃增长时刻减少。由于疏浚砂取代率少的混凝土的密实度相对较小，混凝土内部孔隙、微裂缝较多，受力后，微裂纹逐渐扩展形成宏观裂缝的速度加快，能量得到迅速释放；另一方面微裂纹存在的不均匀性，混凝土内部微观裂缝扩展为宏观裂缝具有突变性，这也使得声发射能量的波动表现得更为显著。

由不同疏浚砂掺量混凝土的振铃计数和能量累计值可以看出，随着疏浚砂取代率的增加，声发射振铃计数及能量累计值基本呈增大趋势，说明声发射振铃计数、能量的变化规律能够反映疏浚砂取代率对混凝土力学性能的影响规律。

2.2.2 声发射 b 值

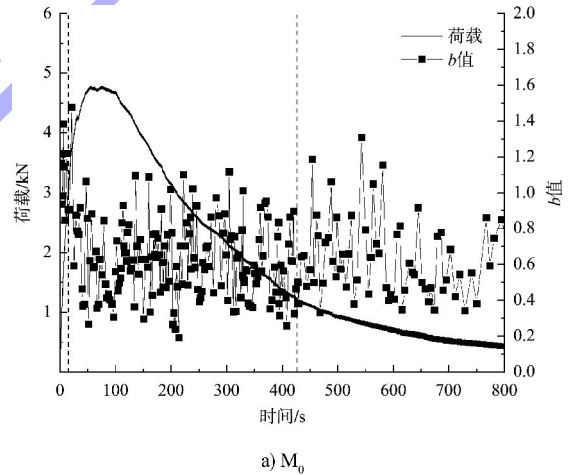
混凝土破坏时所产生的声发射活动类似于地震活动的声发射，因此用于地震学领域的 b 值理论也可以分析混凝土断裂破坏的发展过程^[20]。改进地震学中的 G-R 公式，得到适用于声发射参数的公式：

$$\lg N_A = a - b \left(\frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (1)$$

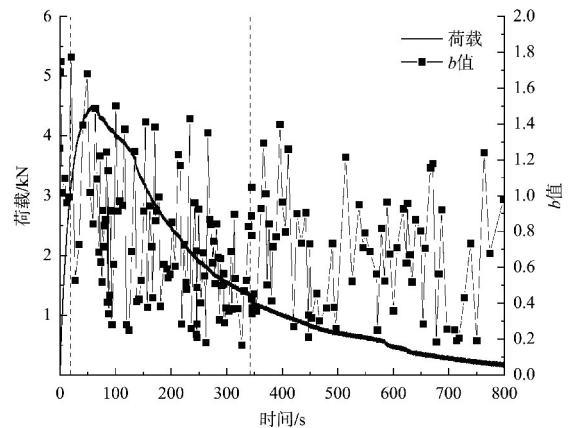
式中： N_A 为声发射事件数； A_{dB} 为振幅值，dB； a 为经验系数； b 为声发射 b 值。

声发射 b 值反映的是不同振幅值的事件数所

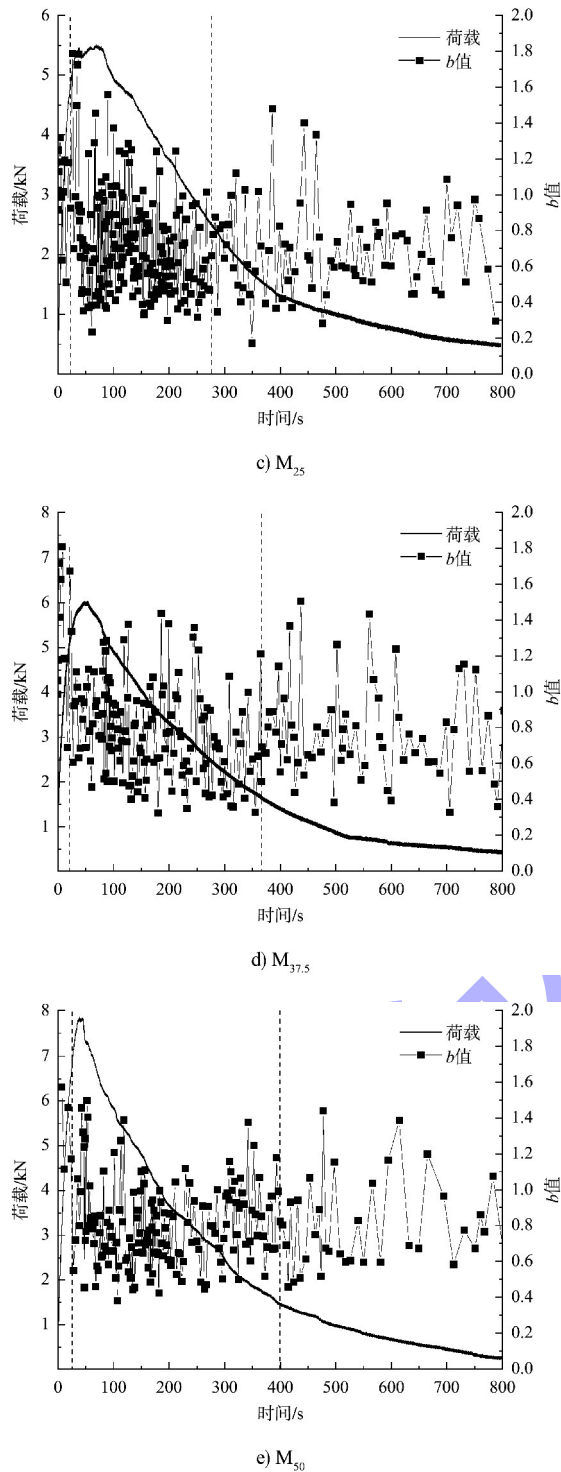
占的比例，小振幅事件数占比比大振幅事件数多则声发射 b 值较大，当大振幅事件数占比较大时则声发射 b 值相对较小。疏浚砂混凝土试件的 b 值随时间的变化规律见图6。可以看出，声发射 b 值随时间的变化总体呈现下降的趋势。声发射 b 值随加载过程呈波动式下降，说明试件内部微裂纹和宏观裂缝形成是同时进行的，声发射 b 值很好地体现了混凝土损伤破坏的过程。声发射 b 值的变化可以分为3个阶段：1) 微裂纹形成和聚集阶段，在峰值荷载前，混凝土试件内部以微裂缝为主，还未产生宏观裂缝，因此小振幅事件数占比较多，b 值较大；2) 宏观裂缝形成和扩展阶段，峰值荷载之后，试件内部形成的大量微裂缝开始聚集形成宏观裂缝并逐渐扩展，此时大振幅事件数占比增多，b 值变小；3) 裂缝失稳扩展阶段，此时声发射活动减弱，大振幅事件数占比仍较多，b 值逐渐减小。



a) M₀



b) M_{12.5}

图6 疏浚砂混凝土试件的 b 值随时间的变化规律

由图6也可明显看出, 声发射 b 值的变化在疏浚砂掺量不同时, 也表现出不同之处。当疏浚砂掺量为 25% 及以上时, 随着疏浚砂取代率的增加, 第1阶段逐渐推迟, 说明掺入疏浚砂之后改善了混凝土材料的微观结构, 提高了其密实性, 使其宏观裂缝的形成向后推迟, 抵抗裂缝扩展能

力提高。

2.3 断裂损伤模型

假设混凝土由大量的细观单元组成, 在外力荷载作用下, 单元发生破坏产生声发射信号, 因此, 声发射事件数可以从细观层面反映混凝土的损伤。而混凝土的损伤演化过程可视为裂缝扩展和聚合的过程。在混凝土材料、试件尺寸及加载方式一定条件下混凝土破坏过程中产生的声发射事件数总量是一定的, 因此, 可以用声发射事件数与试件破坏时的声发射事件总数之比定义损伤 D , 公式为:

$$D = N_{\text{CMOD}} / N_{\text{tot}} \quad (2)$$

式中: N_{CMOD} 为变形值为裂缝开口位移时对应的声发射累计事件数, N_{tot} 为试件破坏时的累计声发射事件数。

根据式(2)得到的不同疏浚砂掺量的混凝土损伤演化过程如图7所示。可以看出, 不同疏浚砂取代率混凝土试件的损伤变量随着裂缝开口位移时增长的发展过程可以划分为3个阶段: 1) 当 $D < 0.1$ 时, 试件受损缓慢, 此时试件仅有少量微裂纹的萌生与扩展; 2) 当 $0.1 \leq D < 0.8$ 时, 试件内部有大量裂纹, 试件受损加快; 3) 当 $D \geq 0.8$ 时, 试件已基本破坏, 试件损伤演化趋于稳定。

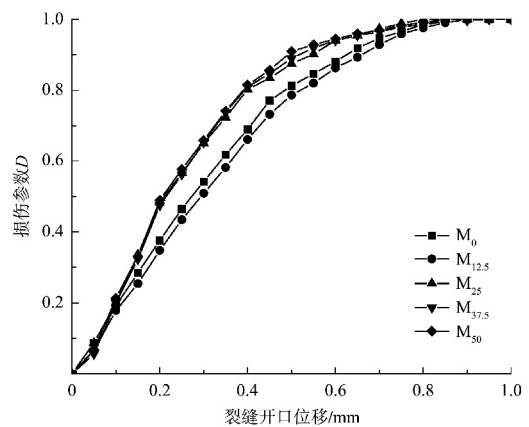


图7 基于声发射事件数的混凝土损伤演化曲线

试件断裂破坏过程中, 组成混凝土的细观单元的破裂通常符合 Weibull 分布, 其概率密度函数为^[21]:

$$f(\delta) = \theta m (\delta - \delta_0)^{m-1} \quad (3)$$

式中: δ 为细观单元的变形, $f(\delta)$ 为概率密度函

数, θ 为 Weibull 分布的几何参数, m 为 Weibull 分布的形状参数, δ_0 为 Weibull 分布的位置参数。因此, 当试件的变形达到一定数值时, 混凝土破坏的概率 P 可以表示为:

$$P = F(\delta) = \int_0^\delta f(\delta) d\delta = 1 - \exp[-\theta(\delta - \delta_0)^m] \quad (4)$$

式中: $F(\delta)$ 为细观单元的破坏概率。声发射事件的发生是混凝土细观单元断裂破坏的表现, 因此, 可以认为混凝土试件在某一时刻的变形所对应的断裂破坏概率可由此刻累计声发射事件数与试件完全破坏的累计声发射事件数表示:

$$P = N_{\text{CMOD}}/N_{\text{tot}} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得:

$$N_{\text{CMOD}}/N_{\text{tot}} = 1 - \exp[-\theta(\delta - \delta_0)^m] \quad (6)$$

对式(6)两边同时取对数, 得到:

$$\ln[-\ln(1 - N_{\text{CMOD}}/N_{\text{tot}})] = m \ln(\delta - \delta_0) + \ln\theta \quad (7)$$

根据式(7), 对不同疏浚砂掺量的混凝土的试验结果进行模拟, 拟合结果如图 8 所示, 拟合参数见表 3。从拟合结果可知, 拟合度达 0.99 以上, 模拟效果好。几何参数 θ 先减小后增大, 表现为混凝土损伤演化 3 阶段的特征先减弱后增强。随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土抵抗裂缝扩展的能力增强, 第 2 阶段混凝土微裂纹逐渐扩张为宏观裂缝的活动剧烈程度增加, 声发射活性增强, 损伤累积速率增加, 损伤曲线更陡。不掺疏浚砂的情况下试件内部孔隙、微裂纹增多, 在荷载作用下, 会触发更多的内部微裂纹扩展成为宏观裂缝, 声发射活动相对增多, 损伤演化阶段特征更明显。疏浚砂取代率越高的形状参数 m 越小, 表明试件脆性较大。位置参数 δ_0 则随疏浚砂掺量的增加呈减小趋势, 试件初始损伤变形有所减小。

表 3 疏浚砂混凝土 Weibull 分布损伤模型拟合参数

编号	几何参数 θ	形状参数 m	位置参数 δ_0	拟合度 R^2
M ₀	4.41	1.388	0.001 5	0.997
M _{12.5}	4.08	1.398	0.001 8	0.997
M ₂₅	5.53	1.363	0.000 9	0.999
M _{37.5}	5.54	1.362	0.000 5	0.999
M ₅₀	5.71	1.360	0.000 2	0.999

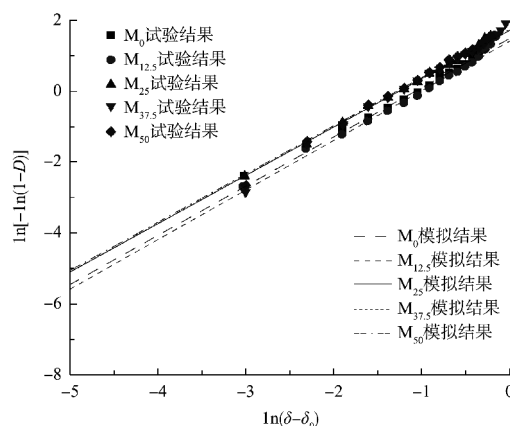


图 8 疏浚砂混凝土的损伤演化模型

3 结论

- 1) 随着疏浚砂取代率的增加, 起裂荷载、峰值荷载、断裂韧度和断裂能均先减小后增大, 有效裂缝长度先增大后减小, 疏浚砂的掺入能够提高混凝土的断裂性能。
- 2) 声发射振铃计数和声发射能量较好地反映了混凝土破坏的 3 个阶段; 声发射 b 值能较好地反映疏浚砂混凝土的断裂过程。
- 3) 采用声发射事件数确定的疏浚砂混凝土损伤演化模型具有 3 阶段特征, 由模拟的参数变化规律可以发现, 随着疏浚砂掺量的增加, 混凝土试件的脆性增强, 且阶段性特征更明显, 第 2 阶段损伤累积速率加快, 而产生初始损伤的变形则随着疏浚砂掺量的增加而减小。

参考文献:

- [1] 陈秀英, 古浩, 孙萍. 长江下游航道疏浚砂综合利用研究[J]. 中国水运, 2021(10): 126-128.
- [2] OZER-ERDOGAN P, BASAR H M, ERDEN I, et al. Beneficial use of marine dredged materials as a fine aggregate in ready-mixed concrete: Turkey example [J]. Construction and building materials, 2016, 124: 690-704.
- [3] LIMEIRA J, AGULLO L, ETXEBERRIA M. Dredged marine sand in concrete: an experimental section of a harbor pavement[J]. Construction and building materials, 2009, 24(6): 863-870.
- [4] BEDDAA H, OUAZI I, FRAJ AB, et al. Reuse potential of dredged river sediments in concrete: effect of sediment variability [J]. Journal of cleaner production, 2020, 265: 121665.

- [5] LIMEIR J, AGULLÓ L, ETEBERRIA M. Dredged marine sand as construction material[J]. European journal of environmental and civil engineering, 2012, 16 (8): 906-918.
- [6] BHAIAPPANAVAR S, LIU R, SHAKOOR A. Eco-friendly dredged material-cement bricks [J]. Construction and building materials, 2021, 271: 121524.
- [7] HASSOUNE M, CHRAIBI G, FATMAOUI H, et al. Stability of quay wall made on concrete blocks with a formulation based on dredging sand[J]. Materials today: proceedings, 2021, 36(1): 47-53.
- [8] LIMEIRA J, ETEBERRIA M, AGULLÓ L, et al. Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand[J]. Construction and building materials, 2011, 25(11): 4165-4174.
- [9] 诸裕良, 臧英平, 江朝华, 等. 基于长江下游疏浚砂的砂浆力学性能试验研究[J]. 水运工程, 2020(9): 56-60, 96.
- [10] 诸裕良, 林明泽, 陈磊, 等. 疏浚砂水泥基材料含泥量及成型工艺影响研究[J/OL]. 长江科学院院报, 2022(4): 1-6[2022-07-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220428.1703.008.html>.
- [11] LUAN J J, CHEN X D, NING Y J, et al. Beneficial utilization of ultra-fine dredged sand from Yangtze River channel as a concrete material based on the minimum paste theory [J]. Case studies in construction materials, 2022, 16: e01098.
- [12] 吴新宇. 基于 DIC 和声发射技术的水工混凝土断裂性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [13] 范思琦, 李秀领, 郭强. 纤维再生微粉水泥基复合材料断裂性能分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 279-285.
- [14] 张瑶, 刘凯亮, 康洪震, 等. 基于双 K 准则的不同掺量铁尾矿砂混凝土断裂特性研究[J]. 混凝土, 2022(9): 34-37, 43.
- [15] KARIMI H R, ALIHA M R M, KHEDRI E, et al. Strength and cracking resistance of concrete containing different percentages and sizes of recycled tire rubber granules [J]. Journal of building engineering, 2023, 67: 106033.
- [16] PARESH M, KUMAR S R, SAUVIK B. Acoustic and fracture energy correlation in mode I fracture with concrete damage plasticity model and three-point bend experiment[J]. Journal of materials in civil engineering, 2023, 35(4): 04023002.
- [17] 河海大学. 水工混凝土断裂试验规程: DL/T 5332—2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [18] 徐颖, 卜静武, 刘雨夕, 等. 循环荷载下橡胶混凝土的断裂特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(1): 142-148.
- [19] 刘恒杰, 李宗利, 谭聪, 等. 不同含水率混凝土断裂过程声发射试验研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 153-161.
- [20] SAGAR R V, PRASAD B K R, KUMAR S S. Comparison of acoustic emission b-values with strains in reinforced concrete beams for damage evaluation [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2012, 165(4): 233-244.
- [21] CHEN B, LIU J Y. Experimental study on AE characteristics of three-point-bending concrete beams [J]. Cement and concrete research, 2004, 34(3): 391-397.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部