

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0006-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.002

基于双 K 断裂模型的海水对混凝土断裂性能的影响研究

李 靖, 丁晓唐, 丁力栋

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于双 K 断裂模型, 通过三点弯曲试验研究了海水养护、海水搅拌对混凝土断裂性能的影响。试验结果表明: 海水拌制明显降低了混凝土的起裂荷载及峰值荷载, 对混凝土的起裂断裂韧度 K_{Ic}^{ini} 及失稳韧度 K_{Ic}^{un} 也均有降低作用, 降幅最大分别达到 52.6% 和 25.6%; 海水养护对双 K 断裂参数影响相对较小, 起裂断裂韧度及失稳韧度降幅范围分别为 3.2%~23.4%、12.7%~20.8%。此外在海水影响下, 计算得到的断裂能有较明显的降低, 降幅范围在 14.5%~28.1%。海水对混凝土立方体抗压强度影响较小。

关键词: 混凝土; 双 K 断裂模型; 海水; 断裂性能

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

Research on the effect of seawater on the fracture performance of concrete based on double- K model

LI Jing, DING Xiaotang, DING Lidong

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China)

Abstract: Based on the double- K model, the effect of seawater curing and seawater agitation on the fracture properties of concrete was studied by three-point bending test in this paper. The test results show that: Seawater mixing reduces significantly the initiation load and peak load of concrete, and also reduces the initiation fracture toughness and instability fracture toughness of concrete. The maxima of decreasing are 52.6% and 25.6% respectively. The effect of seawater maintenance on the fracture parameters of double- K is relatively small, and the ranges of fracture toughness and instability toughness are 3.2%~23.4% and 12.7%~20.8%, respectively. In addition, under the influence of seawater, the calculated fracture energy is obviously reduced, and the range of decrease is 14.5%~28.1%. The effect of seawater on the compressive strength of concrete cubes is fairly minor.

Key words: concrete; double- K model; seawater; fracture properties.

混凝土作为应用最广的建筑材料, 已广泛应用于临海工程的建设中。混凝土在其服役寿命期间内长期处于海水环境中, 由于海水侵蚀, 结构往往出现过早破坏。尤其近年来跨海大桥及隧道等临海工程暴露出的问题已引起学者们对海水环境下混凝土的耐久性的高度重视。作为一种准脆性材料, 相对于抗压性能, 混凝土的抗裂性能较差, 裂缝的开展对于海水环境中混凝土耐久性有着重要影响。国内外大量的试验研究已表明^[1-3], 混凝土的断裂过程分

为三个阶段: 裂缝的起裂、裂缝的稳定发展和裂缝的失稳扩展。基于混凝土断裂力学, 使用传统的单参数理论模型作为理论判据, 例如临界应力强度因子 K 、临界应变能释放率 G 等来分析混凝土结构, 对于严格控制裂缝产生的结构, 如过海隧道、高坝、输水结构等显然是不够的。本文以徐世烺提出的双 K 断裂模型^[4]为理论基础, 采用带初始切口梁的三点弯曲试验, 对自来水拌置, 饱和石灰水养护; 自来水拌置, 饱和石灰水养护 28 d, 再用海水养护;

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51139001)

作者简介: 李靖 (1992-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 从事混凝土结构基本理论及近代计算方法方面研究。

自来水拌置,海水养护;海水拌置,饱和石灰水养护;海水拌置,海水养护,五种工况的混凝土试件进行了荷载-裂缝张开口位移曲线(P-CMOD)的测试,以此来研究海水影响下混凝土的断裂性能。

1 混凝土双 K 断裂模型

混凝土裂缝的发展是一个过程量,且断裂过程区的发展,造成了混凝土断裂荷载一位移曲线出现明显的非线性。因此徐世烺^[5]认为应引入两个断裂控制参数起裂断裂韧度 K_{lc}^{ini} 和失稳断裂韧度 K_{lc}^{un} 来判定裂缝的起裂和失稳,对应的断裂准则为:当 $K < K_{lc}^{ini}$ 时,裂缝处于不起裂阶段;当 $K = K_{lc}^{ini}$ 时,裂缝开始稳定扩展;当 $K_{lc}^{ini} < K < K_{lc}^{un}$ 时,裂缝处于稳定扩展阶段; $K = K_{lc}^{un}$,裂缝开始失稳扩展; $K > K_{lc}^{un}$,裂缝处于失稳扩展阶段。 K_{lc}^{ini} 为混凝土的起裂断裂韧度,对应于起裂荷载 P_{ini} 和初始裂缝长度 a_0 ; K_{lc}^{un} 为混凝土的失稳断裂韧度,对应于最大荷载 P_{max} 和临界裂缝长度 a_c 。在实际工程应用中, $K = K_{lc}^{ini}$ 可以作为结构裂缝开始扩展判断准则; $K_{lc}^{ini} < K < K_{lc}^{un}$ 可以作为结构裂缝失稳扩展前的安全警报; $K = K_{lc}^{un}$ 可以作为一般结构裂缝扩展的判断依据。

相比于国际上其他学者提出的断裂模型,双 K 断裂模型不仅综合了等效弹性方法及虚拟裂纹方法,并且在此基础上给出了闭合解析解,提出了便于实际工程应用的简化公式。也考虑了两参数模型中被忽略的塑性变形,且无需进行尺寸效应模型所必须的回归分析,避免了虚拟裂缝模型及裂缝带模型繁琐的数值计算。此外双 K 断裂参数的测定只要求试验进行单调加载,简化了试验技术和方法;无需两参数断裂模型要求的循环加载、卸载的过程,也降低了对试验设备的要求,试验简易可行,便于试验研究的开展。

2 试验材料与过程

试验原材料包括南京中联水泥有限公司生产的P·O42.5普通硅酸盐水泥,细骨料采用粗细程度为中

砂的河砂,粗骨料为碎石,采用连续级配。试件的配合比为水泥:砂:石子:水=1:2.16:3.84:0.60,其中石子的级配为26.5~31.5 mm,约占2.5%;16~19 mm,约占47.5%;4.75~9.5 mm,约占45%;2.36~4.75 mm,约占5%。受地理位置限制,本试验采用人工海水,按美国ASTM D1141-98(2013)规范建议配比,如表1所示。

试件浇注前在试模内表面涂一薄层机油作为脱模剂,浇注后立即用不透水的薄膜覆盖在试模上表面密封试件以防止水分散失,试件浇筑成型后,按规范在温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的养护环境中静置48 h,然后拆模、编号。拆模后将试件放入温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的静置的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液中养护,试件在养护溶液中两两间隔10~20 mm。初始缝在试件浇筑成型7 d后,按照逢高比要求采用金刚石锯片干切而成。

为扩大海水的影响效应,便于试验观察,本试验从试件浇筑完成到试件加载周期为180 d。试验以海水为控制因素将试件分为五种工况,控制五种工况的海水影响因子,使其逐渐变大,分别为,工况一:自来水拌置,饱和石灰水养护至180 d,试件编号为TPB-101至TPB-104;工况二:自来水拌置,饱和石灰水养护28 d,再用海水养护至180 d,试件编号为TPB-201至TPB-204;工况三:自来水拌置,海水养护至180 d,试件编号为TPB-301至TPB-304;工况四:海水拌置,饱和石灰水养护至180 d,试件编号为TPB-401至TPB-404;工况五:海水拌置,海水养护至180 d,试件编号为TPB-501至TPB-504。为减少试验误差,每组工况浇筑4个梁试件。除浇筑相应的三点弯曲梁试件之外,每种工况还浇注了3个标准立方体试件,用于测定混凝土立方体

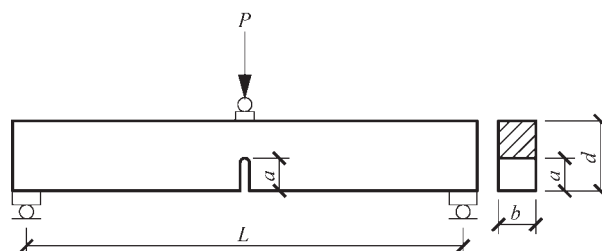


图1 三点弯曲梁试件

Fig.1 Three-point bending beam specimen

表1 美国 ASTM D1141-98(2013) 规范建议人工海水配比

Tab.1 Artificial seawater ratio recommended by ASTM D1141-98 (2013) specification of the United States

氯化钠 $\text{NaCl}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	氯化镁 $\text{MgCl}_2/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	硫酸钠 $\text{Na}_2\text{SO}_4/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	氯化钙 $\text{CaCl}_2/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	水 $\text{H}_2\text{O}/\text{L}$
24.53	5.20	4.09	1.16	1

抗压强度 f_{cu} 。

目前国际材料与结构研究所和实验室联合会(RILEM)对于基于双K断裂模型的断裂试验还未给出标准的试验方法,因此本文采用RILEM^[6]推荐的针对三点弯曲试验用的带切口梁(图1)来研究其

断裂性能。试件长 $L=515$ mm,宽 $b=100$ mm,高 $d=100$ mm,初始缝宽为3 mm,缝高比为0.3,支座间跨度为400 mm,跨高比为4。

为消除试件自重的影响,本试验采用反向加载的加载方式。荷载 P 通过最大量程为16 t的螺旋千

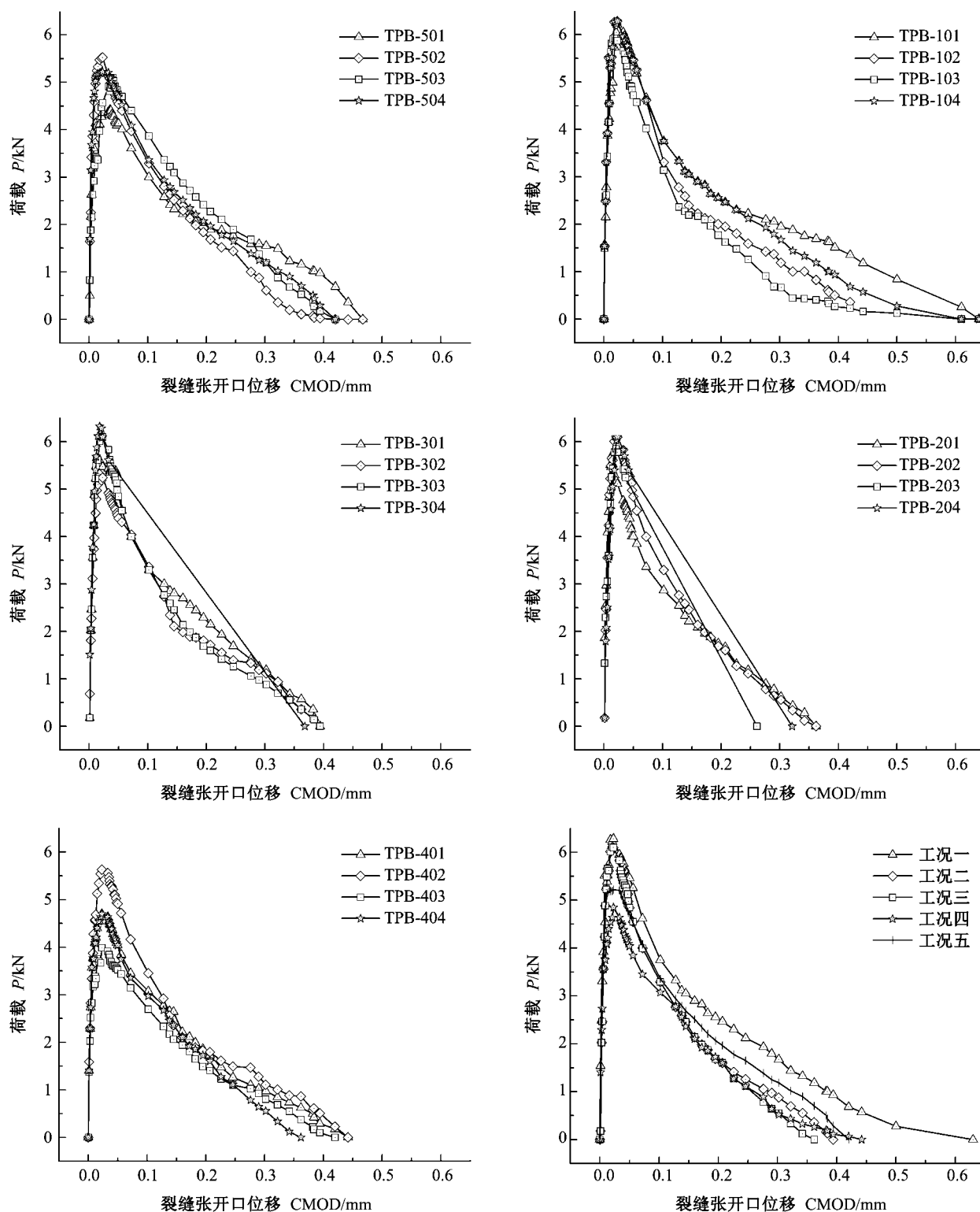


图2 不同工况试件的荷载—裂缝张开口位移

Fig.2 P-CMOD of specimens with different working conditions

斤顶施加,荷载的变化通过 BHR-4 型荷重传感器反映,最大量程为 5 t,挠度 δ 和裂缝张开口位移 CMOD 用电测千分表记录,精度为 0.001 mm。立方体抗压强度的测量采用最大量程为 200 t 的 TYA-2000 型电液式压力试验机。

3 海水对混凝土双 K 断裂参数的影响

五组混凝土试件三点弯曲试验的 P -CMOD 曲线如图 2 所示。

起裂荷载 P_{ini} 的确定是计算双 K 断裂参数的关键, P_{ini} 可通过试验技术确定,如电阻应变片法、声发射法、光弹贴片法等,也可通过曲线法来确定。本试验采用最简单可行的曲线法来确定起裂荷载,即 P -CMOD 曲线线性到非线性的转折对应的荷载便

是起裂荷载。具体方法为:通过拟合 P -CMOD 曲线线性段,找出偏离拟合直线较为明显的折点为起裂点。双 K 断裂参数的计算采用徐世烺^[5]给出的解析公式,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可看出,随着海水影响程度的增加,混凝土的双 K 参数——起裂断裂韧度 K_{Ic}^{ini} 及失稳断裂韧度 K_{Ic}^{un} 逐渐降低。两个断裂参数均在工况四降幅达到最大分别为 52.6% 和 25.6%。分析表格数据可知试件测得的双 K 断裂参数有一定的离散性,因为当试件尺寸一致时, K_{Ic}^{ini} 的计算结果主要取于 P_{ini} , K_{Ic}^{un} 的计算结果主要取于 P_{max} 和 CMOD_c,即双 K 参数的计算结果取决于曲线 P -CMOD 的测定质量。结合本试验实际情况,分析其原因主要有:(1)本试验机量程为 16 t,外接荷载传感器测量最小分度相对较大,而试验最大荷载为 3.984~6.324 kN。导

表 2 双 K 断裂参数计算结果
Tab.2 Calculation results of fracture parameters of double K

工况	试件 编号	CMOD _c /mm	a_c /mm	P_{ini} /kN	P_{max} /kN	K_{Ic}^{ini} /(MPa·m ^{1/2})	K_{Ic}^{un} /(MPa·m ^{1/2})
一 (对照组)	TPB-101	0.033	35.19	4.153	6.210	0.401	0.900
	TPB-102	0.032	34.39	3.917	6.282	0.312	0.899
	TPB-103	0.034	36.66	2.614	5.922	0.208	0.876
	TPB-104	0.035	36.09	3.917	6.282	0.312	0.922
均值	/	/	/	/	/	0.308	0.899
二	TPB-201	0.023	29.88	4.523	5.521	0.399	0.737
	TPB-202	0.024	28.77	4.235	6.107	0.393	0.800
	TPB-203	0.024	29.58	2.292	5.850	0.130	0.777
	TPB-204	0.023	27.99	2.508	6.097	0.269	0.788
均值	/	/	/	/	/	0.298	0.776
三	TPB-301	0.018	24.80	2.464	5.655	0.201	0.688
	TPB-302	0.018	25.98	3.114	5.315	0.294	0.662
	TPB-303	0.021	26.27	3.773	6.107	0.301	0.765
	TPB-304	0.018	22.65	2.055	6.324	0.147	0.735
均值	/	/	/	/	/	0.236	0.712
四	TPB-401	0.023	33.61	2.291	4.698	0.143	0.665
	TPB-402	0.023	30.17	2.292	5.630	0.142	0.755
	TPB-403	0.023	36.74	2.024	3.984	0.155	0.590
	TPB-404	0.023	33.61	2.291	4.698	0.143	0.665
均值	/	/	/	/	/	0.146	0.669
五	TPB-501	0.033	41.54	3.186	4.40	0.301	0.693
	TPB-502	0.027	33.42	2.25	5.526	0.143	0.780
	TPB-503	0.04	42.39	2.148	5.099	0.201	0.811
	TPB-504	0.023	31.45	3.145	5.221	0.177	0.715
均值	/	/	/	/	/	0.206	0.750

致试验荷载的测量精度降低，对于寻找曲线由线性转为非线性的拐点和曲线峰值的临界点不利，使得按测量曲线得到的 P_{ini} 和 P_{max} 的存在试验误差。(2) 电子千分表的测量精度为 0.001 mm，而 CMODc 在 0.018~0.040 mm 范围内，测量精度低。(3) 试验尺寸小，对试件浇筑时的变形、试件平整度和预制缝尖质量更敏感。

4 海水对混凝土断裂能及强度的影响

通过 P -CMOD 曲线采用日本混凝土协会试验标准中 (JCI-S-001-2003) 中的计算公式^[7] 计算的断裂能如表 3 所示，不同工况试件的立方体抗压强度如表 4 所示。

由表 3 可以看出，与按规范配置养护的对

照组相比，受海水环境的影响，混凝土的断裂能和强度都有不同程度的降低。断裂能降幅范围在 14%~28.1%，其中在海水拌制饱和和石灰水养护条件下，混凝土断裂能下降明显，达到 28.1%。受海水侵蚀作用越大，对断裂能的影响也更为明显。其原因可能是，海水中的 Mg、Cl、CO₂，尤其是 SO 容易与碳化水泥浆体发生反应，生成的钙矾石、二水石膏会显著地引起混凝土的体积膨胀，而反应生成水镁石属于无胶凝性的沉淀物，因此会对混凝土产生危害作用。

5 结论

1) 基于双 K 断裂模型，随着海水影响程度的增加，双 K 断裂参数起裂断裂韧度和失稳断裂韧度

表 3 不同工况试件的断裂能
Tab.3 Fracture energy of specimens with different working conditions

工况	试件编号	断裂能 /(N·m ⁻¹)	断裂能均值 /(N·m ⁻¹)	降低程度 /%
一 (对照组)	TPB-101	142.82	115.26	/
	TPB-102	103.63		
	TPB-103	88.57		
	TPB-104	125.96		
二	TPB-201	78.88	86.03	25.3
	TPB-202	85.11		
	TPB-203	80.07		
	TPB-204	100.08		
三	TPB-301	99.72	98.49	14.5
	TPB-302	87.59		
	TPB-303	90.12		
	TPB-304	116.54		
四	TPB-401	86.15	82.88	28.1
	TPB-402	71.88		
	TPB-403	97.75		
	TPB-404	75.76		
五	TPB-501	98.28	96.37	16.3
	TPB-502	86.51		
	TPB-503	102.07		
	TPB-504	98.62		

表 4 不同工况试件的立方体抗压强度
Tab.4 Cube compressive strength of specimens with different working conditions

工况	一	二	三	四	五
立方体抗压强度 f_{cc} /MPa	44.6	39.1	39.5	44.4	43.1

3 结论

1) 随着锚索预应力值的增加, 洞库围岩拱顶各监测点的位移、最大剪应变以及锚杆拉力、衬砌最大主应力均呈现减小的趋势, 但锚索最大应力呈现先增加再减小的趋势, 建议锚索预应力值取 2 000 kN 较为合理。

2) 随着锚索间距的增加, 拱顶位移、衬砌最大主应力在逐渐升高, 而锚索最大应力同样呈现先增加后减小的趋势, 建议锚索间距取 5 m 较为适宜。

参考文献:

- [1] EINAR B, ARNE M M, GSILE S. Support of large rock caverns in Norway [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(1): 11-19.
- [2] SAGEFORS I, DAERGA P A. An excavation method for large vertical cylindrical caverns [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(3): 279-285.
- [3] 孙博, 胡功笠, 刘新宇, 等. 大跨度洞库施工开挖稳定性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2005(5): 689-

692.

- [4] 肖从苗. 深埋大跨地下工程稳定性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [5] 李友华, 黄应军, 李景元. 溪洛渡水电站左岸地下厂房大跨度高边墙开挖施工技术 [J]. 水力发电, 2008, 34(9): 9-14.
- [6] 王晓伟. 龙滩水电站地下厂房大跨度高边墙开挖施工技术 [J]. 广东科技, 2009, 221: 267-268.
- [7] 刘保国, 徐干成. 大跨度高边墙地下洞室分层间隔施工方法 [J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2759-2764.
- [8] 杨明举, 常艏东. 超大型地下洞室群施工开挖程序及围岩稳定分析 [J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(1): 32-35.
- [9] 赵奎银. 大跨度高边墙地下工程施工技术 [J]. 铁道建筑技术, 2004(4): 34-36.
- [10] 朱维申, 李术才, 陈锋. 能量耗散模型在大型地下洞群施工顺序优化分析中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2001, 3(3): 333-336.
- [11] 段建立, 孙炎光, 尤峻. 特大跨度扁平洞室开挖施工离散元数值模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(Z2): 1882-1885.

(责任编辑 王利君)

(上接第 10 页) 均降低。相应的混凝土起裂荷载和峰值荷载也下降。海水拌制对混凝土断裂参数的影响大于海水养护条件。海水养护条件下, 起裂断裂韧度降幅范围为 3.2%~23.4%, 失稳断裂韧度降幅范围为 13.7%~20.8%; 海水拌制条件下, 起裂断裂韧度降幅范围为 33.1%~52.6%, 失稳断裂韧度降幅范围为 16.6%~25.5%

2) 受海水环境的影响, 四种工况的混凝土断裂能降幅范围在 14%~28.1%。相比于海水养护条件, 在海水拌制条件下, 混凝土受海水侵蚀更严重, 对断裂能的影响也更为明显。海水对混凝土立方体抗压强度影响较小。

参考文献:

- [1] FERRETTIE. A discussion of strain softening in concrete [J]. International Journal of Fracture, 2004, 126(1): 3-10.

- [2] 徐世烺. 我国混凝土断裂力学发展三十年 [J]. 水利学报, 2014, 45(Z): 1-9.
- [3] 朱榆. 混凝土断裂及阻裂理论的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [4] XU S L, REINHARD H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasibrittle fracture Part II: Analytical evaluating and practical measuring methods for three point bending notched beams [J]. International Journal of Fracture, 1999(98): 151-177.
- [5] 徐世烺. 混凝土断裂力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] BAZANT Z P, KIM J K, PFEIFFER P A. Determination of fracture properties from size effect tests [J]. Journal of Structural Engineering, 1986(112): 289-307.
- [7] JCI-S-001-2003, Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam [S].

(责任编辑 王利君)