文章编号：1000-8608(2009)01-0115-06

带裂纹碾压混凝土层面强度尺寸和边界效应

张小刚*[1,2]， 王学志[3]， 孙荣书[3]， 吴智敏[4]

（1.深圳大学 土木工程学院，广东 深圳 518060；
2.深圳大学 深圳市土木工程耐久性重点实验室，广东 深圳 518060；
3.辽宁工业大学 土木建筑工程学院，辽宁 锦州 121001；
4.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：研究了碾压混凝土层面中带不同削弱度裂纹时远场强度的尺寸和边界效应，指出对强度影响的不仅仅是试件尺寸，也包括试件边界、裂纹长度和裂纹数量等因素.应用界面断裂力学理论和混凝土Ⅰ-Ⅱ复合型断裂准则，对Hu和Wittmann的强度效应律做了理论上的扩展，使之符合碾压层面抗拉强度的断裂特性；最后建立了碾压混凝土层面强度的尺寸与边界效应回归曲线.

关键词：碾压混凝土层面；远场强度；尺寸和边界效应；复合型断裂准则；预制裂纹

中图分类号：TV313 **文献标志码**：A

0 引 言

随着试验研究的逐步深入，越来越多的结论表明，混凝土强度和断裂参数具有或强或弱的尺寸效应[1].当含裂纹混凝土受载后，缝端会出现一个微裂纹区，随着荷载的增加，该区裂纹数量增多，最终合并成宏观裂纹继续扩展，在达到极值荷载前，裂纹的发展过程是稳定的.在这个裂纹扩展的亚临界过程中，混凝土呈现出某种程度的非线性，其受力特性与裂纹扩展有密切的关系.目前部分学者认为：断裂参数和基于断裂理论得到的远场强度具有尺寸效应的原因就在于对裂纹亚临界扩展的忽视，尺寸效应则成为诸如混凝土这样的准脆性材料的一种固有特征.虽然此方面的研究众多[1]，但仍有很多问题尚待解决.其一，这些研究主要集中在抗压强度、抗弯强度、断裂韧度和断裂能等参数上，而对于抗拉强度的效应研究比较缺乏.其二，以往的研究主要集中在无宏观裂纹的实体混凝土尺寸效应方面，关注的是试件尺寸的变化带来的强度和断裂参数的变化，而很少关心试件的边界、裂纹的数量和长度等对这些参数的影响，根据文献[2]的研究，若试件的边界很小（即裂纹的断裂过渡区不是足够大）时，仍然可能发生所谓的尺寸效应现象.本文认为，此时并不是尺寸变化带来的强度和断裂参数的效应问题，主要影响因素是试件的边界，因而称之为边界效应.强度和断裂参数的尺寸效应和边界效应孰大孰小，值得进一步深入的分析.其三，以往的研究主要集中在普通混凝土和高强混凝土方面，而对碾压混凝土的尺寸和边界效应研究较少.由于碾压混凝土自身干硬性等特点，其强度和断裂参数与普通混凝土存在较大区别，因而它的尺寸和边界效应能否用已有的经验公式来定量描述值得试验验证.此外，碾压混凝土是分层铺设进行碾压施工的，其新老混凝土之间的层面对整个结构体的力学参数有较大影响[3]，这种影响无疑会对强度和断裂参数的效应问题产生相关的关联影响.

针对以上分析，通过制作不同裂纹长度的有

收稿日期：2007-01-10； **修回日期**：2008-12-03.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50709013)；深圳市科技计划资助项目(QK200601)；深圳大学科研启动基金资助项目(200603)；深圳市土木工程耐久性重点实验室开放基金资助项目(CED08-11).
作者简介：张小刚*(1978-)，男，大连理工大学2005届博士，副教授.

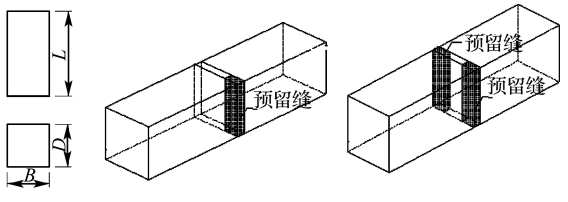
层面碾压混凝土轴拉试件，在考虑不同试件尺寸、不同裂纹长度和试件边界、碾压层面等因素的影响下，基于解决裂纹扩展的断裂理论，本文研究碾压混凝土远场抗拉强度的尺寸和边界效应. 值得注意的是，本文旨在从断裂的角度来分析强度的尺寸和边界效应，揭露隐藏在强度尺寸和边界效应背后的碾压混凝土层面裂纹的断裂行为.

1 试验过程与结果分析

为了分析碾压混凝土远场抗拉强度的尺寸和边界效应，制作了一批长方体轴拉试件，主要考虑了以下因素对远场抗拉强度尺寸效应的影响：(1)初始裂纹长度(即边界影响)；(2)裂纹个数(1条裂纹或2条裂纹)，1条裂纹时本文以下简称单缝，2条裂纹时本文以下简称双缝；(3)试件尺寸；(4)层面. 有层面碾压混凝土试件的制作过程、预留缝形成方式及裂纹布置方式见文献[4]. 我国实际拱坝一般取初凝时间为6 h，在6 h前允许直接进行铺筑，本文的层面间隔时间为4 h，未对层面进行处理，结合我国碾压混凝土对间隔时间属性的界定，本文的层面间隔时间应在初凝之前，属于热缝系列. 所有试件的层面都设置在有初始裂纹的横断面上. 试验采用的配合比为 m(水)：m(水泥)：m(粉煤灰)：m(砂子)：m(骨料)：m(外加剂)＝130：134：90：805：1 280：0.75，试验用水为生活用自来水，水泥为P0.325R普通硅酸盐水泥，砂子为河砂，筛出粒径大于5 mm的颗粒，粗骨料采用最大粒径为20 mm的一级配碎石. 轴拉试验的对中问题一直是一个世界性的难题，本研究在对中及防止试件端头局部破坏等方面采取了大量的技术处理，见文献[5]. 试件形式和裂纹布置见图1；轴拉试件的尺寸、裂纹长度、削弱度和试件个数等详见表1，表1中的试件编号分别为R(单缝)和RD(双缝)，紧接字母后面的两位数字代表试件的尺寸，最后一位数字代表削弱度的影响. 削弱度 α 定义为在试件的横截面上裂纹面积与试件横截面面积的比值，它表示试件横截面上裂纹面积所占的比例. 在断裂力学中，代表裂纹顶端应力强弱程度的应该是包含远场应力 σ 和预留缝尺寸 a 两个因素的应力强度因子 K_{I}，公式如下：

$$K_{\mathrm{I}} = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{1}$$

当预留缝尺寸为已知时，K_{I} 随 σ 增大而增大，直到达到断裂韧度 K_{Ic}，裂纹开始失稳扩展，这时，诱导缝的远场应力 σ 也达到了它所能承受的最大值，本文称为远场抗拉强度. 因而，这一概念实际上是从断裂理论中引申出来的，而不是单纯意义上的材料强度概念，它的尺寸和边界效应也是基于断裂力学而得到. 碾压混凝土属于干硬性混凝土，其离散性比普通混凝土大，再加上层面、裂纹布置等因素的影响，结果离散性更加偏大. 为了避免试验数据的离散性，本文对于所有型号的试件，均采集得到4个试件的相关数据，在数据处理时，删除了偏离试验平均值10%的试验数据，以保证试验数据的可靠性. 本文所有表格中试件个数均是指有效数据的试件量. 试验测得有层面碾压混凝土的层面抗拉强度为1.82 MPa，碾压混凝土本体抗拉强度为2.415 MPa. 轴拉试件的最大荷载值和远场强度等结果见表2，这些数据是指有效试验值的平均值. 对于单缝，采集得到对应于最大荷载的临界裂纹口张开位移 $CMOD_{\mathrm{c}}$ 见表2. 从表2可以看到，在相同削弱度的情况下，双缝的碾压混凝土远场强度均比单缝低，这说明双缝比单缝更有利于削弱断面的强度. 此外，无论是单缝还是双缝，随着削弱度的增加，远场强度均有规律地降低，对于单缝试件，$CMOD_{\mathrm{c}}$ 却随着削弱度的增加而增加. 在相同的削弱度下，$CMOD_{\mathrm{c}}$ 随着试件尺寸的增大而有规律地降低，远场强度也随着试件尺寸的增大而有规律地降低. 在以上试验研究的基础上，接下来建立有层面碾压混凝土的远场强度随试件尺寸、削弱度和裂纹形式的变化规律.



(a) 试件尺寸 (b) 单缝布置 (c) 双缝布置

图1 试件尺寸和层面裂纹布置

Fig. 1 The size of the specimens and the location of crack on the interface

表 1　带宏观裂纹的有层面碾压混凝土轴拉试件参数

Tab. 1　Interfacial parameters of RCC tension specimens with crack

$B\times D\times L$	单缝				双缝			
mm×mm×mm	编号	裂纹长度/mm	削弱度	试件个数	编号	裂纹长度/mm	削弱度	试件个数
100×100×200	R101	10	0.1	4	RD101	5×2	0.1	3
	R102	20	0.2	4	RD102	10×2	0.2	3
	R103	30	0.3	4	RD103	15×2	0.3	2
150×150×300	R151	15	0.1	4	RD151	7.5×2	0.1	3
	R152	30	0.2	4	RD152	15.0×2	0.2	3
	R153	45	0.3	4	RD153	22.5×2	0.3	2
200×200×400	R201	20	0.1	4	RD201	10×2	0.1	3
	R202	40	0.2	4	RD202	20×2	0.2	3
	R203	60	0.3	3	RD203	30×2	0.3	3

表 2　带宏观裂纹的有层面碾压混凝土试件远场抗拉强度试验值

Tab. 2　Test values of far field interfacial strength of RCC specimens with crack

单缝				双缝		
编号	荷载值/kN	$CMOD_c$/mm	远场强度/MPa	编号	荷载值/kN	远场强度/MPa
R101	20.598	83.625	2.059 8	RD101	18.464	1.846 4
R102	14.526	90.425	1.452 6	RD102	11.374	1.137 4
R103	10.496	98.850	1.049 6	RD103	7.520	0.752 0
R151	39.404	52.600	1.751 3	RD151	34.636	1.539 4
R152	24.351	67.750	1.082 3	RD152	23.718	1.054 2
R153	17.366	106.100	0.771 8	RD153	18.736	0.832 7
R201	48.603	38.333	1.215 1	RD201	60.339	1.508 5
R202	38.643	62.000	0.966 1	RD202	41.799	1.045 0
R203	32.679	95.667	0.817 0	RD203	29.499	0.737 5

2　带裂纹碾压混凝土层面强度尺寸和边界效应

对于诸如混凝土这样的准脆性材料，在失稳破坏之前存在裂纹的稳定扩展过程，因而其尺寸效应问题必须采用考虑裂纹前缘断裂过程区局部损伤的断裂力学来分析. 为此，Bazant 提出了可用来描述经过稳定裂纹扩展后，准脆性材料名义强度的尺寸效应，这一理论主要考虑了长裂纹引起的应力重分布，它是基于这样的假设：裂纹长度无论是在小结构和大结构中，比例都是相同的，仅对于开切口、几何相似的试件成立. Bazant 的尺寸效应定律为[6]

$$\sigma_n = \frac{B \cdot f_t}{\sqrt{1 + d/\lambda_0 d_a}} \tag{2}$$

式中：σ_n 为名义强度，d 为试件的特征尺寸，f_t 为材料的抗拉强度，B、λ_0 为待定系数，d_a 为骨料的最大粒径. Bazant 尺寸效应律的公式形式简单，应用方便，理论也较严密，但是这一公式是基于线弹性断裂力学理论的，当尺寸较大时，抗拉强度趋于零，这与实际有差别，使得其应用也受到一定的限制. 因而 Carpinteri 等提出了基于间隙分形理论的多重分形尺寸定律[7]：

$$\sigma_n = f_t\left(1 + \frac{\alpha d_a}{d}\right)^{1/2} \tag{3}$$

式中 α 为由试验确定的常数. 由该公式可以看出，当试件特征尺寸趋于零时，抗拉强度趋于无穷大，这也与实际情况不相符合，且以上两种效应律均没有考虑含裂纹体的边界影响. 针对以上理论的不足，对于带宏观切口的结构，Hu 和 Wittmann 则提出了进一步的改进公式[8]：

$$\sigma_f = A(\alpha_0) f_t\left(1 + B(\alpha_0)\frac{a}{a^*_\infty}\right)^{-1/2} \tag{4}$$

式中：σ_f 为破坏时远场强度，a 为裂纹长度，α_0 为初始缝高比，$B(\alpha_0) = [A(\alpha_0)Y(\alpha_0)/1.12]^2$；$a^*_\infty = \frac{1}{1.255\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{f_t}\right)^2$，$K_{Ic}$ 是材料的断裂韧度（无尺寸效应），$A(\alpha_0)$ 和 $Y(\alpha_0)$ 随结构形式不同而变化，是初始缝高比 α_0 的函数. 初始缝高比 α_0 与初始裂纹长度和试件尺寸均有关，因而该公式同时反映了

裂纹长度(试件宽度一定时,该因素也反映了试件边界的影响)和试件尺寸对强度效应的影响,而式(2)、(3)仅仅反映了试件尺寸的影响,公式形式基本相同,但是其本质内涵是不相同的. Hu 和 Wittmann 单独研究了不同几何尺寸、相同初始缝高和相同几何尺寸、不同初始缝高的尺寸效应律的变化情况,而对于不同几何尺寸、不同缝高的尺寸效应情况并未深入研究,针对于此,本文在以上试验研究的基础上,对不同几何尺寸、不同初始缝高的碾压混凝土层面强度效应做了深入的研究,对式(4)做了深入探讨和使用范围的扩展. 把式(4)做一个变换,可得到如下的线性方程:

$$Y = A_1 X + C_1 \tag{5}$$

其中 $Y = 1/\sigma_n^2$; $X = a$; $C_1 = 1/(A(\alpha_0) f_t)^2$, $A_1 = C_1 \dfrac{B(\alpha_0)}{a_\infty^*}$.

对于本文试件的 Ⅰ 型断裂,有限宽板条边裂纹裂尖应力强度因子的近似表达式为

$$K_{\mathrm{I}} = F\left(\frac{2b}{\pi a}\tan\frac{\pi a}{2b}\right)^{1/2}\sigma\sqrt{\pi a} \tag{6}$$

式中

$$F = \frac{0.752 + 2.02\left(\dfrac{a}{b}\right) + 0.37\left(1 - \sin\dfrac{\pi a}{2b}\right)^2}{\cos\dfrac{\pi a}{2b}}$$

由式(6)计算得到混凝土的断裂韧度 K_{Ic},代入式(5),再通过试验确定式(5)所述直线的斜率和截距,则可得到不同初始缝高的碾压混凝土层面强度的尺寸和边界效应. 但是与普通混凝土不同,碾压混凝土结构体由于存在层面,层面对断裂行为有较大的影响,普通的断裂力学在分析碾压混凝土层面的断裂行为时将受到一定限制,若采用界面断裂力学分析则具有较为合适的理论基础,所得结论也更符合实际的力学变形行为. 关于界面断裂力学,Comninou 建立了界面断裂力学的接触区模型理论,Delale 和 Erodgan 提出了界面域模型理论,在以上基础上,Rice 提出的小范围接触理论得到了越来越广泛的应用[9],应力强度因子 K_{I}、K_{II} 为

$$K_{\mathrm{I}} + \mathrm{i}K_{\mathrm{II}} = \lim_{\substack{\theta\to 0\\ r\to 0}}(\sigma_y + \mathrm{i}\tau_{xy})\sqrt{2\pi r};$$

$$K_{\mathrm{I}} + K_{\mathrm{II}} = \sqrt{\pi}\cosh(\pi\varepsilon)(k_1 + \mathrm{i}k_2)(r/l_k)^{\mathrm{i}\varepsilon} \tag{7}$$

其中 $(\sigma_y + \mathrm{i}\tau_{xy})\Big|_{\substack{\theta\to 0\\ r\to 0}} = \dfrac{1}{\sqrt{2r}}\cosh(\pi\varepsilon)(k_1 + \mathrm{i}k_2)(r/l_k)^{\mathrm{i}\varepsilon}$.

显然应力强度因子 K_{I}、K_{II} 在 $r\to 0$ 时不再是常数,此处 l_k 为裂纹特征长度,本文中也就是指缝长,ε 是与本体混凝土剪切模量及平面应变相关的参数,采用碾压混凝土剪切模量和平面应变计算确定.

本文的层面并没有填充料,是一个较薄的面,大量试验现象表明,裂纹的扩展基本位于层面之中,这同大多数实际工程不完全一致,实际拱坝工程中的裂纹往往偏离层面,进入到本体混凝土中,这主要是由于本试验的层面未作处理,层面是一个很薄的软弱夹层. 虽然如此,无论是本文的试验还是实际工程,裂纹在层面中的开展方向并不是完全垂直于拉力的方向,裂纹面上除了 Ⅰ 型断裂的受拉之外,还承受剪力的作用,也即还存在裂纹的 Ⅱ 型断裂,只不过两者的拉力和剪力的大小分配不同罢了. 式(6)单纯的 Ⅰ 型应力强度因子 K_{I} 并不能完全地表征裂纹的开展. 因此,本文的试验应该属于受拉力的 Ⅰ-Ⅱ 复合型断裂,复合型裂纹的扩展与单纯的 Ⅰ 型裂纹的不同之处,在于裂纹的扩展不是沿着原裂纹面,而是与裂纹面成某个角度方向进行. 对于 Ⅰ-Ⅱ 复合型断裂,其 Ⅱ 型断裂韧度 K_{IIc} 目前测试仍较困难,一般采用复合型断裂准则来建立 K_{IIc} 与 K_{Ic} 之间的关系. 目前的 Ⅰ-Ⅱ 复合型断裂准则一般有:最大周向应力理论、最大能量释放率理论,两者从不同的角度得到了相同的结论:

$$\cos\frac{\theta_0}{2}\left(K_{\mathrm{I}}\cos^2\frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2}K_{\mathrm{II}}\sin\theta_0\right) = K_{\mathrm{Ic}} \tag{8}$$

其中 θ_0 为开裂角. 这些理论都是基于线弹性理论提出的,而对于混凝土,这些理论的计算结果有一定的偏差. 因而,此处应采用针对于准脆性材料的相应断裂准则,目前较为准确描述混凝土 Ⅰ-Ⅱ 复合型断裂的有:

(1) Ⅰ-Ⅱ 型复合断裂的最小 J_2 准则[10]

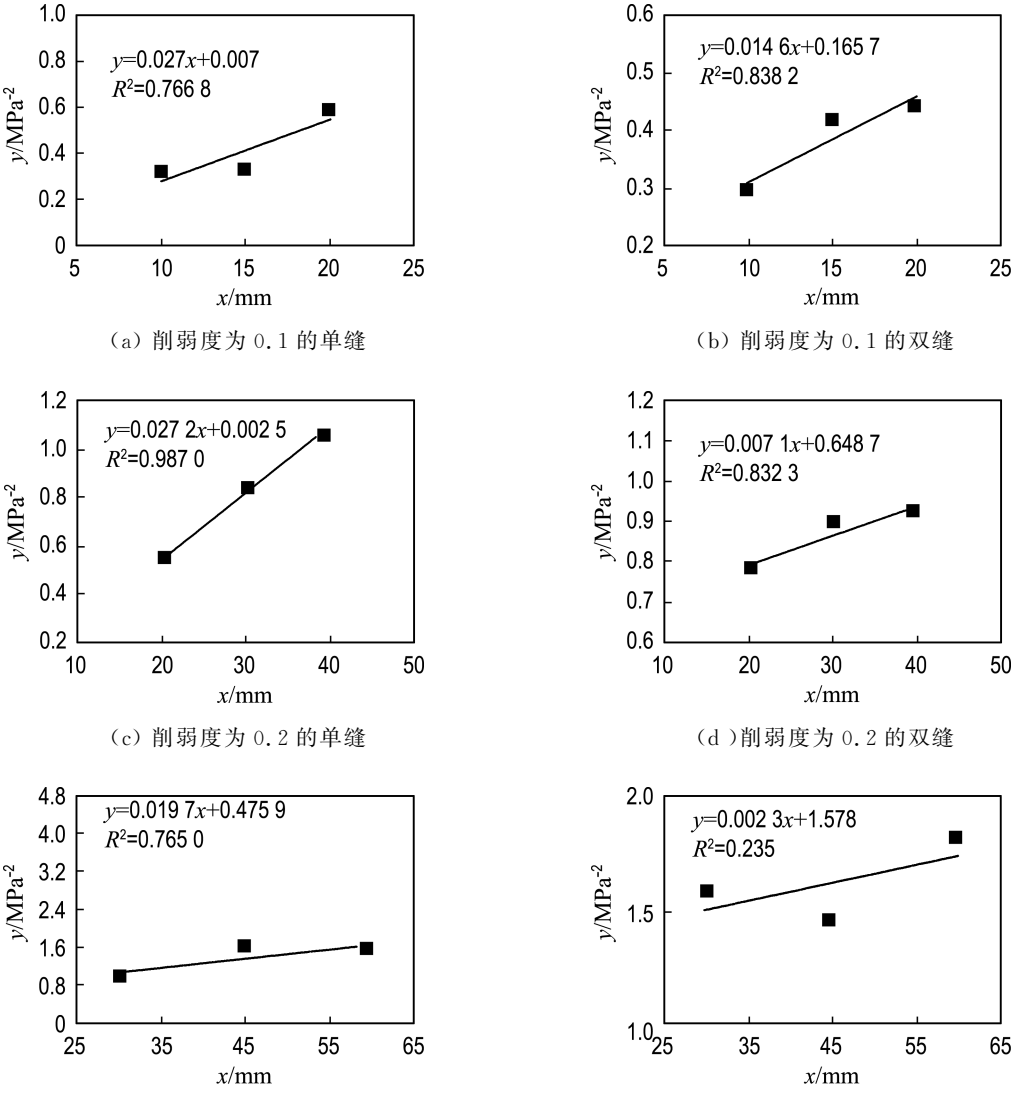
$$J_2 = j_2^1(K_{\mathrm{I}}, K_{\mathrm{II}}, \theta) + j_2^2(K_{\mathrm{I}}, K_{\mathrm{II}}, \theta) = J_{2c} = \frac{1}{3}\left[\frac{K_{\mathrm{Ic}}(1-2\nu)}{\sqrt{2\pi r_0}}\right]^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{K_{\mathrm{Ic}}}{\sqrt{2\pi r_0}}\right)^2 \times [\alpha^2 T_3 - (4\alpha T_1 + 2\alpha T_2)] \tag{9}$$

其中 T_1、T_2、T_3 是与泊松比相关的系数,$\alpha = \sqrt{2r_0/a}$,r_0 为裂纹尖端的临界半径.

(2) 文献[11]的复合断裂判据

$$\frac{3\sqrt{6}}{2}\frac{k_2^3(3\sqrt{6k_2^2+k_1^2}+k_1)}{(9k_2^2-k_1\sqrt{6k_2^2+k_1^2}+k_1^2)^{3/2}}=1 \quad (10)$$

其中 $k_1=K_{\mathrm{I}}/K_{\mathrm{Ic}}$，$k_2=2\sqrt{3}K_{\mathrm{II}}/3K_{\mathrm{Ic}}$. 以上复合断裂准则都有一定的精度，可选择代入计算. 由以上准确的试验研究和合理的理论公式选择，得到的尺寸效应和边界效应见图 2，图 2 表明建立的尺寸和边界效应与试验结果有较好的吻合程度，层面强度很好地符合直线分布.



(a) 削弱度为 0.1 的单缝　　(b) 削弱度为 0.1 的双缝

(c) 削弱度为 0.2 的单缝　　(d)削弱度为 0.2 的双缝

(e) 削弱度为 0.3 的单缝　　(f) 削弱度为 0.3 的双缝

图 2　带宏观裂纹的碾压混凝土层面强度的尺寸与边界效应回归曲线

Fig. 2　The regressive curves of size and boundary effect on interfacial strength of RCC with crack

3　结　论

(1)对带宏观裂纹碾压混凝土层面强度效应影响的不仅仅是试件尺寸，也包括试件边界、裂纹长度和裂纹数量等因素. 轴拉力作用下，碾压混凝土层面中裂纹的扩展并不完全垂直于拉力方向，属于轴拉应力下的Ⅰ-Ⅱ复合型断裂.

(2)应用界面断裂力学理论和混凝土Ⅰ-Ⅱ复合型断裂准则，对 Hu 和 Wittmann 的效应律做了理论上的扩展，使之符合碾压层面的断裂特性；在此基础上建立了碾压混凝土层面强度尺寸与边界效应回归曲线，但对于尺寸和边界效应的各自影响程度仍需进一步深入研究.

参考文献：

[1] 黄煜镔. 混凝土脆性与力学参数的尺寸效应及其相互关系的研究[D]. 重庆：重庆大学，2002

[2] DUAN Kai, HU Xiao-zhi, WITTMANN F H. Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution [J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2003, **70**:2257-2268

[3] 张仲卿. 碾压混凝土层面抗剪特性的尺寸效应研究[J]. 水力发电，2003，**29**(6)：23-25

[4] 孙荣书，吴智敏，叶 冶. 有层面碾压混凝土轴拉断裂试验研究[J]. 混凝土，2005(10)：40-43

[5] 张小刚. 碾压混凝土诱导缝断面强度、断裂的试验研究和数值模拟[D]. 大连：大连理工大学，2005

[6] BAZANT Z P. Size effect in blunt fracture concrete, rock, metal [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1984, **110**(4):518-535

[7] CARPINTERI A, CHIAIA B. Embrittlement and decrease of apparent strength in large-size concrete structures [M] // **Computational Modelling of Concrete Structures**. Rotterdam:Balkema, 1998: 715-730.

[8] DUAN Kai, HU Xiao-zhi, WITTMANN F H. Size effect on fracture resistance and fracture energy of concrete [J]. **Materials and Structures**, 2003, **36**: 73-80

[9] RICE J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks [J]. **ASME Journal of Applied Mechanics**, 1988, **55**:98-103

[10] 赵艳华，徐世烺. Ⅰ-Ⅱ 复合型裂纹脆性断裂的最小 J_2 准则[J]. 工程力学，2002，**19**(4)：94-98

[11] 杨新辉，栾茂田，杨 庆，等. 简化脆性断裂裂尖模型及复合型断裂判据[J]. 大连理工大学学报，2005，**45**(5)：712-716
(YANG Xin-hui, LUAN Mao-tian, YANG Qing, *et al*. A simplified crack tip brittle fracture model and fracture criterion for mixed mode of loading [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, **45**(5):712-716)

Size and boundary effect on interfacial strength of RCC with pre-embedded crack

ZHANG Xiao-gang[*1,2], WANG Xue-zhi[3], SUN Rong-shu[3], WU Zhi-min[4]

(1. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Shenzhen Municipal Key Laboratory for Durability of Civil Engineering Structure, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. College of Civil Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;
4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The size and boundary effect on far field interfacial strength of rolled compacted concrete (RCC) with pre-embedded cracks, which had different weakening degrees, was studied. It is found that, the size and boundary of specimen, as well as the length of Ⅰ-Ⅱ cracks and its number are the influence factors in interfacial strength of RCC. Based on the theory of interfacial fracture mechanics and the criteria of compound fracture, Hu and Wittmann′s fracture mechanics formula of size effect is extended to adapt the mixed fracture characteristics of interface of RCC. And the curves of size and boundary effect on far field interfacial strength of RCC are established.

Key words: interface of rolled compacted concrete (RCC); far field strength; size and boundary effect; criteria of compound fracture; pre-embedded crack