

带裂纹隧道二次衬砌承载能力的 平面有限元计算分析

张玉军¹, 李治国²

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2.中铁隧道集团有限公司科研所, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 以平面有限元位移法分析了带裂纹隧道二次衬砌裂纹尖端的应力强度因子及衬砌承载安全系数, 其中主要考虑了裂纹深度、宽度及条数的影响。从计算结果得知, 随着裂纹深度、条数的增加, 应力强度因子增大, 衬砌承载安全系数减小, 而裂纹宽度的影响不太明显。

关 键 词: 隧道衬砌; 裂纹; 应力强度因子; 平面有限元分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

2D finite element analysis of bearing capacity of tunnel lining with cracks

ZHANG Yu-jun¹, LI Zhi-guo²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Scientific Institute of China Railway Tunneling Group, Luoyang 471009, China)

Abstract: The authors analyze the stress intensity factors at the tips of cracks in a tunnel lining and the safety factors for bearing capacity of the tunnel lining by using a 2D FEM code, in which the influences of lengths, widths and number of cracks are mainly considered. The computation results show that the stress intensity factors raise and the safety factors of bearing capacity decrease with the increase of lengths and number of cracks, but the effect of crack widths is not so obvious.

Key words: tunnel lining; crack; stress intensity factor; 2D finite element analysis

1 引 言

受铁道部隧道工程局科学研究所的委托, 并结合中国科学院知识创新工程项目——深部地下空间围岩加固新技术的部分相关课题, 笔者就“二次衬砌含有裂纹的隧道结构的稳定性问题”进行了数值计算及分析, 所完成的主要研究内容有: (1) 对巴-彭公路铁山隧道和开万公路大垭口隧道的 2 个典型剖面的进行平面弹塑性有限元计算, 分析围岩中的应力、变形和考察初期支护及二次衬砌结构的承载能力; (2) 对上述隧道典型剖面, 以有限元位移法计算分析带裂纹隧道二次衬砌裂纹尖端的应力强度因子及衬砌承载安全系数, 其中考虑了裂纹深度、宽度及条数的影响; (3) 对带裂纹隧道二次衬砌内设钢筋混凝土衬砌的补强效果进行有限元计算分析。第一部分工作的研究成果已经发表^[1], 现将第二部分的研究工作叙述如下。

2 复合型裂纹的断裂判据

2.1 复合型裂纹断裂判据

处于平面应变状态下的隧道二次衬砌结构, 由于是在拉-剪或压-剪的复合加载条件下, 故其中的裂纹可看成是 I-II 复合型裂纹, 如图 1 所示。对于这种复合型裂纹, 目前流行的断裂判据主要有两大类, 即断裂力学理论判据和工程实用近似判据^[2~5]。在后一类判据中, 于晓中等针对混凝土提出如下公式与试验数据很接近, 即

$$K_I^2 + 4.2K_{II}^2 = K_{IC}^2 \quad (1)$$

本文采用该判据。

2.2 混凝土的断裂韧性 K_{IC}

常用的混凝土的断裂韧性 K_{IC} 的测试方法有:

(1) 三点(或四点)弯曲梁法, (2) 紧凑拉伸试件法, (3) 直接拉伸试件法, (4) 其它如双悬臂梁试

件法、双扭转试件法、立方体劈裂试件法等。一些研究者给出了 K_{IC} 的实测数据^[2], 从中可以看出, K_{IC} 的离散性较大, 一般 $K_{IC} = 0.3 \sim 1.3 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。由于本文是定性研究, 从偏于安全考虑, 故在本计算中取 $K_{IC} = 0.4 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。

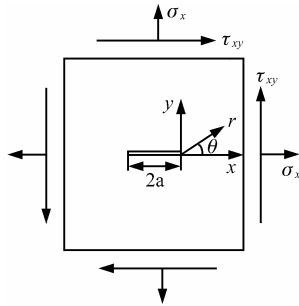


图1 I-II复合型裂纹

Fig.1 Crack of compound type I-II

3 裂纹力学模型建立及裂纹单元确定

由于要考虑的二次衬砌上不同的裂纹条数、深度及宽度的工况较多, 故划分网格的工作量很大 (特别是采用奇异等参数单元时)。为了在预定的期限内完成研究任务, 同时便于使用通用程序, 本次采用了计算裂纹尖端的应力强度因子的有限元直接法, 即先将二次衬砌离散成细分的网格 (特别在裂纹尖端部位), 其边界上的荷载已由先前的围岩——支护结构模式的有限元计算得出, 故可求得裂纹尖端附近的应力分量或位移分量的数值解, 再利用裂纹尖端应力场或位移场的表达式, 直接推算裂纹尖端的应力强度因子, 在这种方法中位移法精度较高, 说明如下^[2]:

如图2所示一带裂纹平面物体的裂纹尖端附近的有限元网格。对于I型裂纹, 裂纹尖端附近的位移可按下式计算:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k-1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]; \\ v &= \frac{K_I}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k+1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 u 为平行于裂纹的位移; v 为垂直于裂纹的位移; G 为剪切弹性模量; $k = \begin{cases} 3-4\mu \\ 3-\mu \\ 1+\mu \end{cases}$ 分别为平面应变状态和平面应力状态; μ 为泊松比。

取 $\theta = 180^\circ$, $r = r_{AB}$, 则应力强度因子:

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \frac{2G}{(k+1)} (v_B - v_A) \quad (3)$$

对于II型裂纹, 对应应有

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k+3) \sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right]; \\ v &= \frac{K_{II}}{4G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left[(2k-3) \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

取 $\theta = 180^\circ$, $r = r_{AB}$, 则有

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \frac{2G}{(k+1)} (v_B - v_A) \quad (5)$$

若取 $r = r_{AB} = r_A$, 则

裂纹张开位移: $COD = v_B - v_C$

裂纹错动位移: $CSD = u_B - u_C$

$$\text{则} \quad K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \frac{G}{(k+1)} (v_B - v_C) \quad (6)$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}}} \frac{G}{(k+1)} (u_B - u_C) \quad (7)$$

从式(7)可以看出, K_I , K_{II} 的计算精度与 $\sqrt{r_{AB}}$ 有关。

计算 K_I , K_{II} 的精度与单元划分, 特别是与单元边长 L 的长度有关。经实际计算研究, 取 $L/a = 0.05 \sim 0.15$, 对工程应用已有足够的精度^[2], 这里 a 为裂纹的长度。

当 K_I , K_{II} 求出后, 就可以带入复合型的裂纹断裂判据中。如果衬砌上有若干条裂纹时, 彼此会产生相互影响, 此时可将每条裂纹的 K_I , K_{II} 算出, 再分别带入断裂判据, 取其中安全系数最小值作为衬砌承载能力或承载安全系数的控制值, 也可将此控制值作为衬砌的承载安全系数。

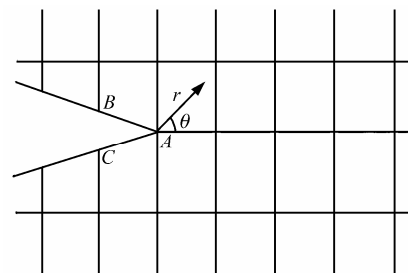


图2 裂纹尖端有限元网格示意图

Fig.2 FEM mesh of crack tip part

4 隧道衬砌的裂纹应力强度因子和承载安全系数

4.1 理论解与有限元数值解的对比

4.1.1 I型裂纹

对一承受单向拉伸的无限平板内的有限长裂纹, 其尖端的应力强度因子的解析解为^[3]

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

取 $\sigma = 10.0 \text{ MPa} = 10^7 \text{ N/m}^2$, $a = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$, 则 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} = 1\,772\,453 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。而图3为相应问题的有限元网格(由于问题是轴对称的,故取半结构),计算域尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 裂纹半长度 $a = 1 \text{ cm}$, 宽度为 0.2 cm , 并在裂纹尖端附近将网格局部加密, 共有 $7\,609$ 个三角形单元, $3\,932$ 个节点。取材料的弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.15$, 由计算所得的裂纹尖端附近的位移可反算出 $K_I = 1\,792\,982 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$, 与解析结果对比, 可见二者相当接近。

4.1.2 I-II 复合型裂纹

对一承受单向拉伸的无限平板内长度为 $2a$ 的 I-II 复合型裂纹, 其尖端应力强度因子的解析式为^[3]

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \sin^2 \beta \sigma \sqrt{\pi a}; \\ K_{II} &= \sin \beta \cos \beta \sigma \sqrt{\pi a} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

取 $\beta = 45^\circ$, $\sigma = 10.0 \text{ MPa}$, $a = 1 \text{ cm}$, 则得 $K_I = \sin^2 45^\circ \times 10^7 \sqrt{3.141\,59 \times 0.01} = 626\,657 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$, $K_{II} = \sin^2 45^\circ \times 10^7 \sqrt{3.141\,59 \times 0.01} = 626\,657 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

图4为相应问题的有限元网格。计算域尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 裂纹长度 $2a = 2 \text{ cm}$, 宽度为 0.2 cm , 在裂纹尖端附近将网格局部加密, 共有 $9\,684$ 个三角形单元, $4\,997$ 个节点。取材料的弹性模量 $E = 2.8 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.15$, 由计算所得的裂纹尖端附近的位移可反算出: $K_I = 630\,235 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$, $K_{II} = 628\,453 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。其与解析解对比, 可见二者很接近。

4.1.3 裂纹宽度的影响

为了考察裂纹宽度对应力强度因子的影响, 这里以 I 型裂纹为例, 对应图3, 变化裂纹宽度(以 b 来表示)为 $2, 1, 0.5, 0.1 \text{ cm}$, 计算结果见表1。

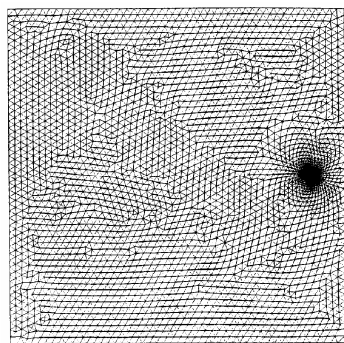


图3 I型裂纹力学模式的有限元网格
(半结构, 裂纹半长度 $a = 1 \text{ cm}$)

Fig.3 FEM mesh for mechanical model of crack of type I
(half structure, half crack length $a = 1 \text{ cm}$)

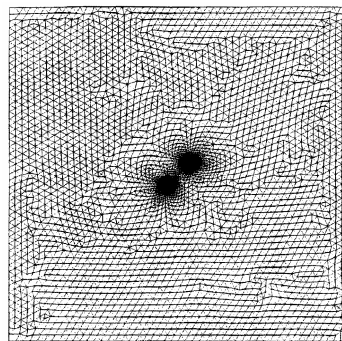


图4 I-II 复合型裂纹力学模式的有限元网格
(裂纹长度 $2a = 2 \text{ cm}$)

Fig.4 FEM mesh for mechanical model of crack of compound type (crack length $2a = 2 \text{ cm}$)

表1 裂纹宽度 b 对 K_I 的影响 ($a = 1 \text{ cm}$, $\sigma = 10.0 \text{ MPa}$)

Table 1 Influence of crack width b on stress intensity factor K_I ($a = 1 \text{ cm}$, $\sigma = 10.0 \text{ MPa}$)

解析解	b / cm			
	2.0	1.0	0.5	0.1
$K_I / \text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$	1 750 443	1 743 542	1 740 969	1 814 115
相对变化 / %	0.0	0.39	0.54	3.64

从表1可以看出, 与解析解 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} = 1\,772\,453 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 相比, 当裂纹宽度 b 由 2 cm 变为 0.1 cm 时, K_I 变化很小, 如以 $b = 2.0 \text{ cm}$ 时的 K_I 值作为基准 K_{I1} , 其余的 K_I 值作为 K_{I2} , 则相对变化为

$$\left| \frac{K_{I1} - K_{I2}}{K_{I1}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

即当 b 为 2 cm 变为 0.1 cm 时, K_I 的变化为 $0.39\% \sim 3.64\%$, 可见当裂纹长度一定时, 在一定范围内其宽度 b 的变化对应力强度因子的影响很小。

4.2 带裂纹隧道二次衬砌裂纹尖端的应力强度因子

4.2.1 力学模型

(1) 衬砌结构及荷载

由前述已完成的围岩-支护结构的平面弹塑性有限元分析^[1], 可得二次衬砌上的作用荷载见图5和表2。

(2) 有限元断裂力学计算模型

在图5的基础上将二次衬砌的网格进一步细化, 同时在裂纹尖端附近将网格加密。考虑的工况为衬砌上分别出现2条和4条裂纹。由于结构及荷载均对称, 故计算时在半结构上只分别有1条和2条裂纹, 其位置如图6中所示。当只计算1条裂纹时, 取 $\beta_1 = 45^\circ$ 的那条裂纹。令裂纹深度 $a = 5, 10, 15, 20, 25 \text{ cm}$ 和 30 cm , 宽度 $b = 1.0, 0.5, 0.1, 0.05, 0.03, 0.02 \text{ cm}$ 和 0.01 cm 。

需要指出, 由于隧道二次衬砌结构及荷载条件与前述的 I 型及 I-II 复合型裂纹力学模型的理想

状态差别很大, 故这里用裂纹尖端附近的位移反算应力强度因子的方法是一种近似地处理。同时, 这里裂纹的深度和宽度对结构受力与变形的影响要比理想力学模型的情况大, 使得裂纹尖端的应力强度因子的变化不能呈现理想力学模型那样强的规律性。

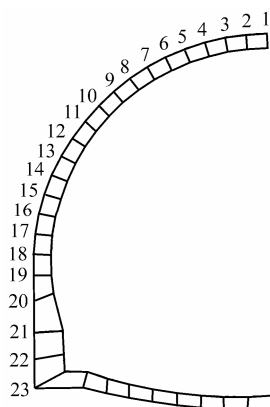


图 5 二次衬砌上荷载作用点号

Fig.5 Number of loading points of lining

表 2 铁山隧道二次衬砌上作用的荷载
Table 2 Loading on lining of Tieshan Tunnel

点号	隧道衬砌/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$		点号	隧道衬砌/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	
	X 向	Y 向		X 向	Y 向
1	-5.9	2.9	13	82.5	-173.8
2	8.0	-60.7	14	111.1	-157.3
3	12.2	-115.2	15	135.2	-134.6
4	-16.8	-101.1	16	155.0	-104.3
5	-33.1	-103.8	17	156.8	-52.3
6	-36.4	-114.5	18	130.5	45.6
7	-31.8	-126.4	9	95.2	36.3
8	-21.2	-135.8	20	164.6	-110.1
9	-4.4	-140.2	21	355.4	-304.3
10	5.4	-164.6	22	771.0	-685.9
11	20.6	-186.0	23	-232.0	1773.3
12	52.1	-180.9			

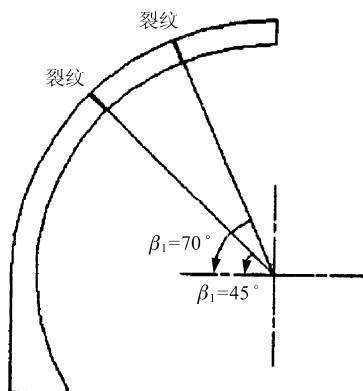


图 6 二次衬砌上的裂纹位置

Fig.6 Locations of cracks in lining

如前所述, 于晓中等针对混凝土提出的 I-II 复

合型裂纹断裂判据式 (1) 与试验数据很接近, 这里采用之。对于压剪复合型裂纹, K_I 为负值可略去, 故此时有

$$4.2K_{II}^2 = K_{IC}^2 \quad (11)$$

由式 (11) 可得带裂纹隧道衬砌的承载安全系数为

$$f = \frac{K_{IC}^2}{4.2K_{II}^2} \quad (12)$$

4.2.2 计算结果

在计算中看到, 由于铁山隧道衬砌特定的受力状态, 使得裂纹处于 I-II 复合型的压剪状态。故因 K_I 为负值而略去不计, 只求 K_{II} 值及其承载安全系数。

(1) 存在一条裂纹: 有限元网格见图 7, 裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 及衬砌承载安全系数 f 见表 3, 而 K_{II} , f 随裂纹深度 a 及宽度 b 的变化曲线见图 8 和图 9。

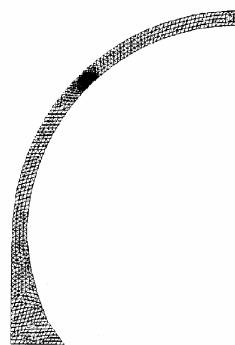


图 7 具有单条深度为 5 cm, 宽度为 1 cm 裂纹的铁山隧道二次衬砌有限元网格

Fig.7 FEM mesh for lining of Tieshan Tunnel with one crack of which the length and width are 5 cm and 1 cm respectively

表 3 铁山隧道二次衬砌裂纹尖端 K_{II} 和承载安全系数 f (一条裂纹, $\beta_1 = 45^\circ$, 单位: $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$)

Table 3 Stress intensity factors K_{II} and safety factors f of bearing capacity at crack tip of lining of Tieshan Tunnel (one crack, $\beta_1 = 45^\circ$, unit: $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$)

裂纹长度 a/cm	裂纹宽度 b/cm						
	1.0	0.5	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01
5.0	K_{II} 25 402	21 145	15 116	15 836	15 476	15 094	14 836
	f 59.04	85.20	166.72	151.91	159.06	167.21	173.08
10.0	K_{II} 28 442	28 030	23 710	23 125	22 765	22 134	21 913
	f 47.09	48.49	67.77	71.24	73.51	77.76	79.34
15.0	K_{II} 28 303	28 493	24 370	23 457	24 641	25 321	25 955
	f 47.55	46.92	64.14	69.24	62.74	59.42	56.55
20.0	K_{II} 49 841	46 491	54 943	63 485	59 931	60 891	55 189
	f 12.62	9.45	10.61	10.27	11.05	11.95	12.51
25.0	K_{II} 77 968	76 497	78 925	80 666	79 643	79 024	78 985
	f 6.27	6.51	6.15	5.85	6.01	6.10	6.11
30.0	K_{II} 181 242	178 640	173 828	170 603	168 792	166 441	165 382
	f 1.16	1.19	1.26	1.31	1.34	1.38	1.39

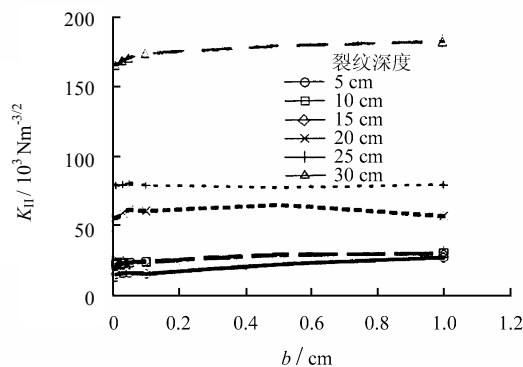


图8 具有单条裂纹的铁山隧道二次衬砌的 K_{II} 与裂纹深度 a , 宽度 b 的关系曲线

Fig.8 Curves of relationship between stress intensity factors and crack lengths as well as crack widths (for lining of Tieshan Tunnel with one crack)

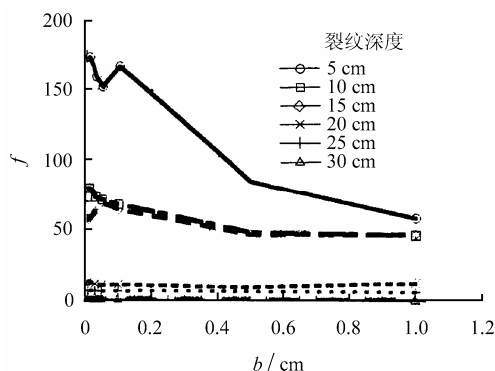


图9 具有单条裂纹的铁山隧道二次衬砌的承载安全系数 f 与裂纹深度 a , 宽度 b 的关系曲线

Fig.9 Curves of relationship between safety factors of bearing capacity and crack lengths as well as crack widths (for lining of Tieshan Tunnel with one crack)

从计算结果来看, 在 $\beta_1 = 45^\circ$ 的一条裂纹存在的特定条件下随着裂纹深度的增长, 裂纹尖端的应力强度因子增大, 衬砌承载安全系数减小, 但其始终大于 1。同时也看到, 当裂纹深度较短 ($a \leq 10 \text{ cm}$) 时, 其宽度对 K_{II} 的影响较大, 而当裂纹深度较长 ($a \geq 15 \text{ cm}$), 其宽度对 K_{II} 的影响就不大了。

(2) 存在二条裂纹: 有限元网格见图 10, 裂纹尖端应力强度因子 K_{II} 及衬砌承载安全系数 f 见表 4, 而 K_{II} , f 随裂纹深度 a 及宽度 b 的变化曲线见图 11 和图 12。

由计算结果可知, 随裂纹条数的增多, 与存在一条裂纹时的同样情况相比, 最不利裂纹尖端的应力强度因子 K_{II} 增加, 衬砌承载安全系数减小。当裂纹深度 $a = 30.0 \text{ cm}$ 时, 其 $f < 1$ (而一条裂纹的对应情况时 $f > 1$)。其原因在于由于裂纹的增多, 使得结构的刚度降低, 导致裂纹尖端处更容易产生剪切变形, 裂纹宽度对 K_{II} , f 的影响规律基本与存在一条裂纹时相同。

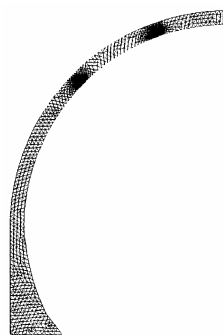


图10 具有双条深度为 5 cm, 宽度为 1 cm 裂纹的铁山隧道二次衬砌有限元网格

Fig.10 FEM mesh for lining of Tieshan Tunnel with two cracks of which the lengths and widths are 5 cm and 1 cm respectively

表4 铁山隧道二次衬砌裂纹尖端 K_{II} 和承载安全系数 f (二条裂纹, $\beta_1 = 45^\circ, \beta_2 = 70^\circ$, 单位: $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$)

Table 4 Stress intensity factors K_{II} and safety factors f of bearing capacity at crack tip of lining of Tieshan Tunnel (two cracks, $\beta_1 = 45^\circ, \beta_2 = 70^\circ$, unit: $\text{N} \cdot \text{m}^{-3/2}$)

裂纹长度 a/cm		裂纹宽度 b/cm						
		1.0	0.5	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01
5.0	K_{II}	30 023	21 660	19 632	17 855	17 435	17 012	16 315
	f	42.26	81.20	98.84	119.50	125.32	131.12	143.12
10.0	K_{II}	31 456	34 460	31 077	33 237	32 569	32 174	31 712
	f	38.50	32.08	39.45	34.48	35.91	36.80	37.88
15.0	K_{II}	49 558	47 943	44 750	46 221	45 358	44 776	43 304
	f	15.51	16.57	19.02	17.83	18.52	19.34	20.31
20.0	K_{II}	54 919	54 855	53 451	53 540	53 432	53 178	52 449
	f	12.63	12.66	13.33	13.29	13.34	13.47	13.85
25.0	K_{II}	81 468	81 077	76 440	77 774	77 663	77 541	77 446
	f	5.74	5.80	6.52	6.30	6.32	6.34	6.35
30.0	K_{II}	270 917	286 604	304 379	300 272	298 796	297 435	297 306
	f	0.52	0.46	0.41	0.42	0.43	0.43	0.43

注: K_{II} 取二条裂纹中的相对大值。

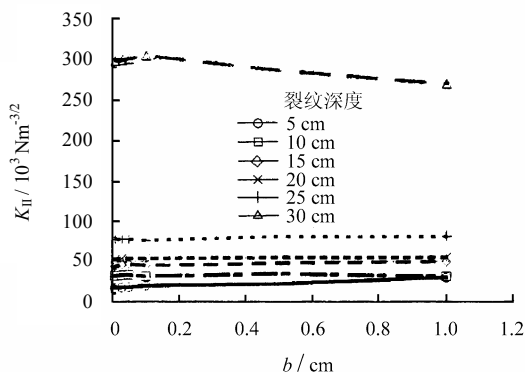


图11 具有双条裂纹的铁山隧道二次衬砌的 K_{II} 与裂纹深度 a , 宽度 b 的关系曲线

Fig.11 Curves of relationship between stress intensity factors and crack lengths as well as crack widths (for lining of Tieshan Tunnel with two cracks)

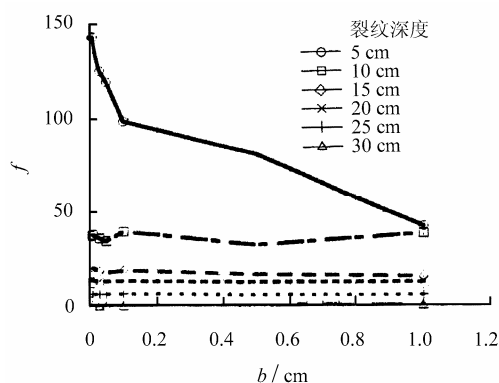


图 12 具有双条裂纹的铁山隧道二次衬砌的承载安全系数 f 与裂纹深度 a , 宽度 b 的关系曲线

Fig.12 Curves of relationship between bearing safety factors and crack lengths as well as crack widths (for lining of Tieshan Tunnel with two cracks)

5 结 语

首先将处于受拉状态下的 I 型及 I-II 复合型裂纹的解析解与有限元数值解作了对比, 发现二者相当一致, 然后在确定的荷载作用下用有限元法计算分析了带裂纹二次衬砌裂纹尖端的应力强度因子和衬砌承载安全系数。从中看到, 随着裂纹深度、

条数的增加, 应力强度因子增大, 衬砌承载安全系数减小, 而裂纹宽度对计算结果的影响不太明显。

参 考 文 献

- [1] 张玉军, 李治国. 铁山隧道和大垭口隧道围岩——支护体系稳定性的平面弹塑性有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 24(12): 1 969—1 972.
ZHANG Yu-jun, LI Zhi-guo. 2D elastoplastic finite element analysis of stability of surrounding rock-supporting system of Tieshan Tunnel and Dayakou Tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 24(12): 1 969—1 972.
- [2] 江见鲸, 冯乃谦. 混凝土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [3] 黄克智, 余寿文. 弹塑性断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [4] 尹双增. 断裂判据与在混凝土工程中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 李贺, 尹光志, 徐江, 等. 岩石断裂力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.
- [6] 黄维扬. 工程断裂力学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

书 讯

地下与基础工程防参加固技术

建工版 建筑科学类 李相然等编著 16 开 800 千字 640 页 精装 估价: 56 元

2005 年 7 月出版 ISBN—112—074112—6

该书全面系统地介绍了防参加固在土木工程和水利工程中的应用。全书共分 5 篇, 即防参加固工程的基础工作, 防参加固工程设计与施工方法、防参加固技术的应用和处理问题、防参加固工程的施工与管理 and 防参加固工程实践。

读者对象: 大专院校相关专业师生。

新编建筑地基处理工程手册

建筑科学类 徐至钧等编著 16 开 900 千字 987 页 平装估计 100.00 元

2005 年出版 7 月出版 ISBN—80159—932—2

该文主要按中华人民共和国标准“建筑地基处理技术规范”(JGJ79—2002)的主要地基处理方法的内容进行分章列节, 按加固机理、设计计算施工方法、质量检验等进行介绍, 每章都附有工程实例。全书系统地介绍了各种地基处理方法, 包括换填、预压、强夯和强夯置换、振冲、砂石桩锤冲扩桩、注浆加固及深基坑支护等十多种地基处理方法。

读者对象: 建筑、水利、交通、铁路施工等系统勘察、设计、施工、监理工程技术人员。