

煤矸石砼轴心受拉构件的裂缝与变形*

林雨生 陈本沛

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

摘要 对不同强度等级的砼、不同直径的圆钢和变形钢筋制成的 18 根煤矸石砼轴心受拉构件裂缝的开展, 以及其变形规律进行分析讨论, 并提出裂缝宽度和刚度的计算公式。

关键词 平均裂缝宽度, 最大裂缝宽度, 刚度

分类号 TU378. 201

我国煤炭资源丰富, 产量居世界之首位。随着矿产的逐年开采, 煤矸石的处理已成为环境保护的一个相当重要的课题。推广运用煤矸石砼, 变废为宝, 为综合处理煤矸石提供了广阔的前景。本文通过对 18 根煤矸石砼轴心构件的试验, 分析并讨论了煤矸石砼在荷载作用下裂缝的开展与刚度的变化规律, 从而提出裂缝宽度和刚度的计算公式。试件由 3 种不同强度等级的砼、3 种不同直径的圆钢和变形钢筋制成。试件的规格及其具体制作方法文[1]中已有较详细介绍, 试验的关键在于加载过程中尽量使试件处于中心受拉状态, 以减少扭矩的影响。

1 裂缝宽度

试件裂缝基本分布在中段均匀受拉长度 600 mm 的范围内。少数试件只有中部 1 条或 2 条裂缝, 大多数是 3 条裂缝。其中 1 条裂缝在试件中部, 另外 2 条裂缝在均匀受拉段的两个端部, 裂缝间距基本在 300 mm 左右。影响裂缝间距的参数与普通砼轴心受拉构件基本相同, 但与普通砼平均裂缝间距计算式^[2] $L_{cr,m}=1.1-(2.7c+0.1d/\rho_{te})\nu$ 的计算值不同, 平均裂缝间距试验值比文[2]计算式计算值大得多, 7 个配置圆钢的试件平均大 1.59 倍, 配置变形钢筋的试件平均裂缝间距试验值比计算值偏大更多, 8 个配置变形钢筋的试件平均大 1.98 倍, 部分计算结果及统计参数见表 1。

从试验得到配置圆钢和变形钢筋的最大裂缝宽度对比(表 2, 其它条件基本相同)结果看, 15 组数据的最大裂缝宽度与平均裂缝宽度之比的平均值为 1.32, 其值小于规范条文说明给出的煤矸石砼的比值(1.47), 与普通砼相比该比值相当于 $\nu=0.76$ 。对于圆钢 $C_m=2$, 变形钢筋 $C_m=1.52$ 。如按 $\nu=0.76$, 则变形钢筋的平均裂缝间距比普通砼公式的计算值平均大 1.8 倍, 与圆钢接近。

由于裂缝间距较大, 裂缝宽度较受弯构件偏大, 所以, 应更严格控制裂缝宽度。按轻骨料砼设计规程 JGJ32-82^[3]的规定, 受拉构件在长期荷载作用下裂缝宽度限值为 0.2 mm; 短期荷载相当于 0.14 mm。对此, 只有当轴向拉力与开裂轴力之比不超过 1.3, 且不大于屈服轴力的

* 本文 1996-06-08 收到; 国家规范第五批课题基金资助项目

表 1 裂缝平均间距试验值及其影响参数

试件 ^①	$d \cdot \rho_{ct}^{-1}$ /mm	c /mm	L_{crn}^s /mm	L_{crn} /mm	$\frac{L_{crn}^s}{L_{crn}}$	试件 ^②	$d \cdot \rho_{ct}^{-1}$ /mm	c /mm	L_{crn}^s /mm	L_{crn} /mm	$\frac{L_{crn}^s}{L_{crn}}$
M20-1	1170	30	320	218	1.47	M25-4	1140	25	270	140	1.93
M20-2	1103	28	310	206	1.51	M30-4	1140	30	285	150	1.90
M25-2	1026	30	305	202	1.51	M20-5	1113	28	280	144	1.94
M30-2	1111	35	380	226	1.68	M25-5	1060	30	270	144	1.88
M20-3	928	28	300	186	1.61	M30-5	1075	28	280	141	1.99
M25-3	923	20	275	161	1.71	M20-6	994	25	270	128	2.11
M30-3	905	25	290	174	1.67	M25-6	994	30	280	139	2.01

① $x_m=1.59, \sigma_{n-1}=0.097, C_v=0.06$; ② $x_m=1.98, \sigma_{n-1}=0.08, C_v=0.04$

表 2 裂缝宽度试验值与计算值比较

试件	N/kN	N/N_c^s	N/N_y	W_m/mm	W_{max}^s/mm	$W_{max}^s/W_m^{①}$	W_{max}/mm	$W_{max}^s/W_{max}^{②}$
M20-1	100.9	1.04	0.91	0.20	0.30	1.50	0.46	0.65
	108.9	1.12	0.78	0.30	0.35	1.17	0.50	0.7
M30-2	124.8	1.44	0.46	0.20	0.25	1.25	0.30	0.83
	144.8	1.67	0.53	0.25	0.35	1.40	0.36	0.97
	184.8	2.13	0.68	0.35	0.50	1.43	0.48	1.04
M25-4	124.9	1.29	0.69	0.20	0.25	1.25	0.45	0.56
	144.9	1.50	0.81	0.30	0.40	1.33	0.53	0.75
M20-5	144.8	1.63	0.56	0.15	0.20	1.33	0.27	0.74
	184.8	2.08	0.72	0.20	0.30	1.50	0.36	0.83
M30-6	124.7	1.15	0.50	0.10	0.15	1.50	0.16	0.94
	144.7	1.33	0.58	0.20	0.25	1.25	0.19	1.32
	184.7	1.70	0.74	0.27	0.35	1.30	0.26	1.35
P ₁	104.8	1.00	0.94	—	0.50	—	—	—
P ₂	104.8	1.02	0.58	0.20	0.30	1.50	—	—
	112.8	1.10	0.63	0.25	0.35	1.40	—	—
	120.8	1.17	0.67	0.30	0.45	1.50	—	—

① $x_m=1.41, \sigma_{n-1}=0.16, C_v=0.11$; ② $x_m=0.930, \sigma_{n-1}=0.266, C_v=0.286$

0.5 倍时方能满足要求。虽然裂缝平均间距试验值远大于文[2]的计算值,但比值变化范围很小(约 5%),只需要乘上一个调整系数即可与普通砼规范公式保持一致的形式。取短期荷载下的最大裂缝宽度为

$$W_{max} = \psi \frac{\sigma_s}{E_s} a \cdot b (2.7c + 0.1 \frac{d}{\rho_{et}}) \nu,$$

(1)

式中 a 为最大裂缝宽度与平均裂缝宽度的比值。本文根据试验的 38 个数据的统计结果可知,该比值的平均值 $x_m=1.41, C_v=0.11$,离散性较小。 b 为平均裂缝间距增大系数,可取圆钢和变形钢筋的平均值 1.7,于是 $b=1.1 \times 1.7=1.87$,因此得

$$W_{max} = 2.64 \psi \sigma_s (2.7c + 0.1d/\rho_{et}) \nu / E_s.$$

按文[2]以骨料系数 C_m 代替 ν ,则得

$$W_{max} = 1.32 \psi \sigma_s (2.7c + 0.1d/\rho_{et}) C_m / E_s.$$

(2)

式中对于圆钢, $C_m=2.0$; 对于变形钢筋, $C_m=1.5$, $\sigma_s=N/A_c$. 由于受弯构件的受拉钢筋附近的受力状态与受拉构件类似, 取

$$\psi = (0.94 \sim 0.18) \frac{f_{tu}}{\rho_{el} \sigma_s},$$

式(2)计算值与试验值比较及统计数据见表 2.

2 刚度

构件开裂前的荷载-应变($N \sim \epsilon$)曲线基本呈直线关系(见图 1 和图 2), 说明构件开裂前材料基本处于弹性状态. 刚度试验值($B=N/\epsilon$)与弹性刚度计算值 $E_c A_c$ 的比值基本为常数, 部分试验结果及统计参数见表 3. 由于 51 个试验数据得到的平均比值为 0.92, 而且离散系数仅为 0.059, 故可近似取煤矸石砼轴心受拉构件短期刚度为 $B_s=0.90E_c A_c$.

表 3 开裂前刚度^①

试件	N /kN	$\epsilon \times 10^6$	$B \times 10^{-6}$ /kN	$E_c A_c$ /kN	$\frac{B}{E_c A_c}$	试件	N /kN	$\epsilon \times 10^6$	$B \times 10^{-6}$ /kN	$E_c A_c$ /kN	$\frac{B}{E_c A_c}$
M20-1	24.9	25	0.996		0.87		104.9	80	1.311		0.97
	60.9	56	1.088	1.142	0.95	M25-4	24.9	23	1.083		0.98
	84.9	80	1.061		0.93		64.9	58	1.117	1.108	1.01
M30-1	24.8	20	1.240		1.01		80.9	80	1.011		0.91
	64.8	56	1.157	1.222	0.96	M20-5	24.8	23	1.078		0.90
	80.8	66	1.224		1.00		64.8	62	1.045		0.88
M30-2	24.8	19	1.305		0.97		40.8	40	1.020	1.194	0.85
	56.8	43	1.321	1.343	0.98	M25-5	24.8	23	1.078		0.92
	80.8	67	1.206		0.86		56.8	48	1.183	1.176	1.01
M20-3	24.7	23	1.074		0.90		80.8	70	1.154		0.98
	48.7	44	1.107	1.192	0.93	M30-5	24.8	19	1.305		0.93
	64.7	65	0.995		0.84		64.8	50	1.296	1.404	0.93
M25-3	24.7	22	1.123		0.92		80.8	67	1.206		0.86
	48.7	44	1.107	1.224	0.90	M20-6	24.7	24	1.029		0.89
	64.7	65	0.995		0.84		40.7	40	1.018	1.158	0.85
M20-4	48.9	46	1.063	1.071	0.99		64.7	60	1.078		0.93
	64.9	66	0.983		0.92	M25-6	24.7	23	1.074		0.90
M30-4	24.9	18	1.383		1.03		40.7	40	1.018	1.194	0.85
	56.9	42	1.355	1.355	1.01		64.7	62	1.044		0.87

① $n=51, x_m=0.92, \sigma_{n-1}=0.054, C_v=0.059$

构件开裂后的刚度变化较大, 明显表现出以下几个特点:

(1) 开裂后构件刚度下降较多, 从图 1 和图 2 所示的 $N \sim \epsilon$ 曲线可看出, 开裂后曲线有明显转折, 斜率下降明显, 开裂后的刚度一般不超过弹性刚度的 25%, 部分试验结果及统计参数见表 4.

(2) 其它条件相同时, 构件刚度随砼强度提高而提高.

(3) 其它条件相同时, 配置圆钢的构件比配变形钢筋的构件刚度大(图 1 与图 2 比较).

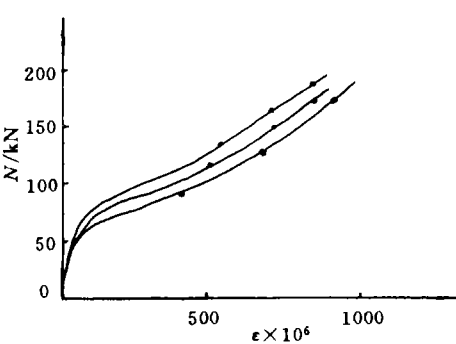


图 1 圆钢荷载-应变曲线

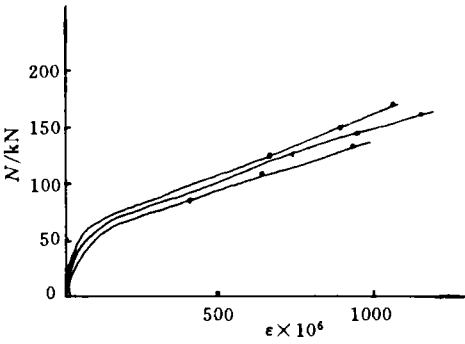


图 2 变形钢荷载-应变曲线

表 4 开裂后刚度^①

试件	N /kN	$\epsilon \times 10^6$	$B \times 10^{-6}$ /kN	$E_c A_c$ /kN	$\frac{B}{E_c A_c}$	试件	N /kN	$\epsilon \times 10^6$	$B \times 10^{-6}$ /kN	$E_c A_c$ /kN	$\frac{B}{E_c A_c}$
M20-1	100.9	0.91	750	0.135	0.12		100.9	0.56	600	0.168	0.16
	108.9	0.98	1000	0.109	0.10		112.9	0.63	850	0.133	0.12
M30-4	120.9	0.67	600	0.202	0.15	M25-4	124.9	0.69	650	0.192	0.17
	144.9	0.81	800	0.181	0.13		144.9	0.81	850	0.170	0.15
	164.9	0.92	1050	0.157	0.12		164.9	0.92	1200	0.137	0.12
M25-2	114.8	0.42	450	0.255	0.22		144.8	0.56	650	0.223	0.19
M25-5	112.8	0.56	500	0.226	0.19		184.8	0.72	900	0.205	0.17
	144.8	0.53	600	0.241	0.21		224.8	0.87	1200	0.187	0.16
	174.8	0.65	800	0.219	0.19		144.8	0.72	700	0.207	0.18
M20-3	144.7	0.55	650	0.223	0.19	M30-5	184.8	0.87	1000	0.185	0.16
	184.7	0.70	900	0.205	0.17		128.8	0.50	500	0.258	0.18
	224.7	0.85	1200	0.187	0.16		144.8	0.56	600	0.241	0.17
M30-3	144.7	0.55	600	0.241	0.19		204.7	0.82	1200	0.171	0.15
	184.7	0.70	850	0.217	0.17		124.7	0.50	600	0.208	0.17
	224.7	0.85	1250	0.180	0.14		164.7	0.66	900	0.183	0.15
	80.9	0.45	400	0.202	0.19		184.7	0.74	1000	0.187	0.13

① $n=47, x_m=0.165, \sigma_{n-1}=0.027, C_v=0.162$.

(4) 开裂后的刚度随荷载增大明显下降, 相对刚度 $B/E_c A_c$ 与 N/N_y (荷载与构件屈服荷载计算值之比) 基本呈线性关系 (见图 3).

取参数 $B/E_c A_c$ 与 N/N_y 线性回归, 得到开裂后短期刚度为

$$B_d = (0.3 - 0.2N/N_y)E_c A_c, \quad (3)$$

式 (3) 的计算值与试验值比较, 可得 $N=47, x_m=0.998, C_v=0.112$.

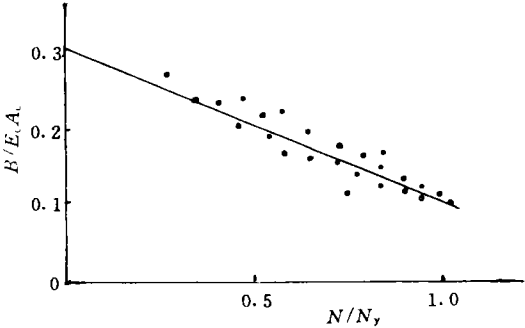


图 3 荷载-刚度曲线

3 结论

(1) 裂缝间距比普通砼轴心受拉构件裂缝间距公式计算值偏大 70% 左右, 这是否与配筋形式(只在构件断面四角配筋)有关, 尚有待进一步试验证实.

(2) 与轻骨料砼受弯构件相比, 裂缝宽度略显均匀, 最大裂缝宽度与平均裂缝宽度比值平均为 1.41, 小于轻骨料砼受弯构件(后者该比值平均为 1.485); 而受弯构件裂缝宽度计算式中的骨料系数 C_m 对变形钢筋而言为 1.5, 比受弯构件偏大(后者为 1.36).

(3) 建议用文中式(2)估算煤矸石砼轴心受拉构件短期荷载下的最大裂缝宽度. 试验值与计算值的比值平均为 0.93, 偏安全; $C_v=0.286$ 与一般砼构件裂缝计算公式相当.

(4) 构件开裂前的刚度变化不大, 可取式 $B_e=0.90E_cA_c$ 来计算.

(5) 构件开裂后的刚度随荷载增大下降较明显, 可用式(3)计算, 计算值与试验结果相当吻合.

参 考 文 献

- 1 陈本沛, 林雨生. 煤矸石砼的强度和变形性能研究. 工业建筑, 1996. 46~51
- 2 滕志明. 钢筋砼基本构件. 北京: 清华大学出版社, 1987. 317~334
- 3 国家建筑工程总局. 钢筋轻骨料砼结构设计规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. 50~51

Break and Deformation of a Stretched Member with Coal Gangue-Concrete Shaft

Lin Yusheng Chen Benpei

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Eighteen stretched members with coal gangue-concrete shafts are made of concrete of different strength grade and round steel and deforming iron reinforcement of different diameter. The authors analyse and discuss the development of their breaks and regular pattern of their deformation; and present a formula for computing the breadth of the break.

Keywords average width of the break, maximum width of the break, rigidity