

偏压构件

极限承载力

偏压木构件的极限承载能力的研究

周仕禎
(建筑工程学院)

TU 366.202

摘要 按强度确定偏压木构件的极限承载能力, 计算中考虑了构件的二阶弯矩和截面抗弯的弹塑性工作。文中提出了偏压构件折断时, 跨中央最大破坏挠度的近似理论计算方法; 并导出了矩形截面偏压木构件的破坏挠度计算公式。所有的理论计算结果均与试验数据吻合良好。

关键词 偏压构件, 二阶弯矩, 偏压构件的破坏挠度, 偏压木构件的极限承载能力

中图法分类号 TU366.202

前言

构件试验的实际观测证实, 大尺寸有疵材木构件在偏心压力短期作用下, 表现出与横向弯曲构件相类似的变形和截面应力分布。先就构件变形而言。偏压构件自荷载开始作用, 就与横向弯曲构件一样, 立即产生挠度, 尔后随荷载增加, 其挠度逐步增大, 直至构件折断为止。然而, 两者的变形发展又存在本质的差别。这就是两者的每级荷载的挠度差(即每级荷载所产生的挠度增量)的增长速度各不相同。如图1所示为大尺寸有节横向弯曲试件的荷载—挠度差图。图中显示, 构件横向弯曲时, 随荷载逐级增加, 每级荷载所产生的挠度增量都只有微小的增减, 大致保持恒定。因此, 挠度的逐级增长速度基本上无明显变化; 只是构件临近折断时, 其挠度增量才有所增大。但大尺寸有节偏压试件的荷载—挠度差图(图2)表明, 构件偏心受压时, 其每级荷载的挠度增量, 随荷载逐级增加, 一般呈逐渐增大的势态。不过, 总的来看, 构件在加荷的前阶段的挠度增量, 其逐级的变化较小; 但尔后挠度的逐级增长速度则越来越快, 直至引起

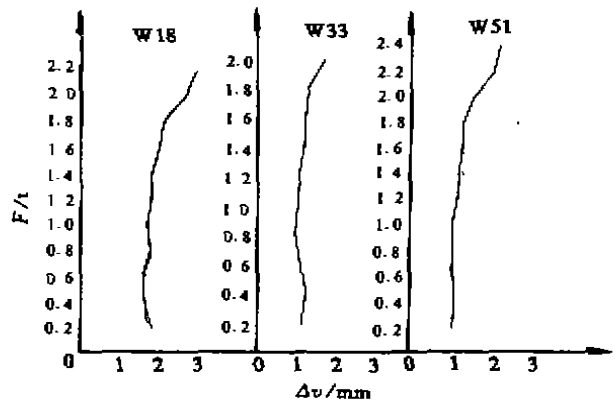


图1 受弯构件的荷载(F)—挠度差(Δv)图

构件折断。尽管构件临近折断时, 其挠度增长颇为迅速, 但折断时构件的破坏挠度值始终有一定限度。同时, 构件的挠度增量的逐级变化的整个过程是大致平缓的, 不出现突变。

收稿日期: 1995-12-25

周仕禎, 男 1930年生, 教授, 重庆建筑大学建筑工程学院(630045)

再看截面的应力状况。在偏压构件受力工作的后阶段,其截面应力发展势态与横向弯曲

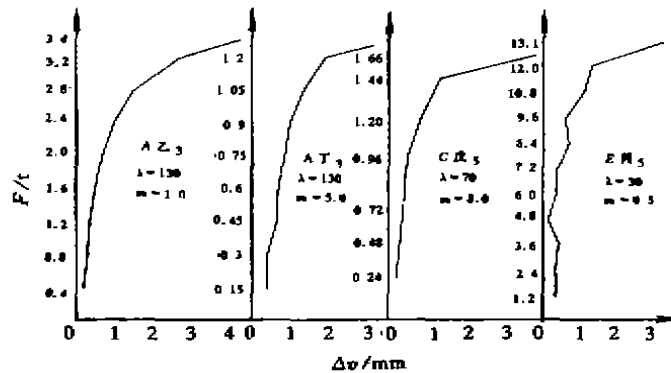


图 2 偏压构件的荷载(F)—挠度差(Δv)图

构件完全一致。先是当荷载达到一定大小后,截面受压区边缘纤维应力达到抗压极限强度,受压区边缘纤维失稳,产生折皱,截面开始进入弹性工作;接着折皱随荷载增加而向截面内部伸延,塑性区逐渐深入截面,截面中性轴逐渐向受拉区移动,受拉区纤维应力继续增大;最后,当外弯矩(构件的偏心弯矩与二阶弯矩之和)增大到导致构件最危险截面的抗弯内弯矩达到极限。与此同时,受拉区边缘纤维应力达到抗拉极限强度,于是受拉区边缘纤维断裂,裂缝急速扩展,构件随即折断。

在偏压木构件的上述力学行为表现中,以下特点对探讨偏压木构件的极限承载能力具有指导意义。(1)偏压木构件临近折断时,其挠度增长速度加快,但挠度的增长有一定限度,因此构件的破坏挠度值有一定大小。(2)受压边缘纤维失稳发生在应力相对较大,而木材强度又相对较低的截面。但直至构件折断,在整个构件中,只有个别(或不连续的极少数几个)截面处于弹塑性工作,至于其它截面仍保持弹性工作。(3)截面受压区的塑性区深入截面内部是有限的,且塑性区沿构件长度方向并无扩展;加之有疵木材的抗拉和抗压极限强度都比较低,这便限制了偏压木构件的最危险截面的抗弯内弯矩的增长,使抗弯内弯矩的极限较低。(4)在偏压木构件临近折断前,由于挠度快速增长,构件的二阶弯矩越来越大,致使偏心弯矩与二阶弯矩之和迅速达到最危险截面的抗弯内弯矩的极限;与此同时,受拉区边缘纤维的应力达到抗拉极限强度,纤维发生断裂,裂缝急速开展,构件随即折断而破坏。由此,构件终于因强度问题而丧失承载能力。

基于上述分析,对偏压木构件来说,采用考虑二阶弯矩和截面抗弯弹塑性工作的强度计算来确定其极限承载能力,不仅与构件受力工作的力学行为表现相符合,而且力学概念清晰,易于理解和掌握。

1 偏压木构件考虑二阶弯矩和截面抗弯弹塑性工作的强度计算

图 3 为偏压木构件的工作示意图,其中虚线表示构件折断时(或折断前瞬间)的变形状态。对此类处于轴心压力和弯矩共同作用的构件,其强度计算一般可采用轴力和弯矩的二项

相关式。由图3, 构件折断时轴心压力产生的附加弯矩为: $F \cdot v_p$ 。木构件弯曲时, 其截面抗弯的弹塑性工作是通过采用折算的抗弯极限强度来考虑的。因为木材的抗弯极限强度, 是将构件折断时的截面正应力按弹性线性分布而算得的一个折算值。虽然正应力的弹性线性分布与实际的弹塑性分布不符, 但两种分布各自构成的截面抗弯内弯矩是等效的。由此, 考虑二阶弯矩和截面抗弯弹塑性工作, 按强度条件确定偏压木构件的极限承载能力, 可采用下述二项相关式:

$$\frac{F}{R_c A} + \frac{F(e + v_p)}{R_m W} = 1 \quad (1)$$

式中 F — 偏心压力;

e — 偏心压力的偏心距;

v_p — 构件折断时的跨中央最大挠度;

A — 构件的截面面积;

W — 构件的截面抵抗矩;

R_c — 木材的顺纹抗压极限强度;

R_m — 木材的抗弯极限强度, 假设构件折断时的截面正应力为弹性线性分布而算出。

为验证相关式(1)是否符合客观规律, 现将我们所做的19组106根大尺寸有疵材木试件的偏心受压试验数据, 代入相关式(1)进行检验。考虑到木材的力学性能离散性很大, 因而每组试件的强度和变形值的组平均值, 比单根试件的更具有代表意义, 但从充分揭示问题的矛盾考虑, 本文采用单根试件的数据对每根试件都进行计算。相关式(1)中的 F 取试件的破坏荷载, v_p 取试件的破坏挠度, R_c 取试件的清材标准小试件顺纹受压极限强度乘以相应的疵病及尺寸影响系数, R_m 取试件的清材标准小试件横向弯曲极限强度乘以相应的疵病及尺寸影响系数。这两个疵病及尺寸影响系数, 对所有试件均取同一个固定的值: 对顺纹受压强度为0.754; 对横向弯曲强度为0.558。这些系数是在构件试验期间, 采用专门的大尺寸有疵材木试件, 进行顺纹受压和横向弯曲试验而获得的。检验结果详见表1。

表1中相关式(1)左边的计算值多数大于1, 少数小于1。该计算值等于1, 即表示按相关式(1)求得的试件的计算破坏荷载, 等于该试件试验时测定的实际破坏荷载。但大于1, 则该试件的计算破坏荷载一般比其实际的破坏荷载小; 而小于1, 则计算破坏荷载一般比实际破坏荷载大。

试件的计算破坏荷载与其实际破坏荷载之所以出现不一致, 其原因主要有两方面。首先是由于计算中用以考虑疵病及尺寸影响的系数, 其单一的固定计算值(即0.754和0.558), 肯定与所有试件的实际的疵病及尺寸影响系数不可能完全一致, 而多多少少存在某些差异。若单一的固定计算值比实际值大, 那么计算中该试件的抗压或抗弯极限强度取值偏大, 于是便可能导致该试件的计算破坏荷载比其实际破坏荷载大; 反映在相关式(1)中, 便出现该式右边小于1的情况。反之, 若单一的固定计算值小于实际值, 则可能引起计算破坏荷载小于实际破坏荷载。试观察表1, 相关式(1)左边的弯矩项的计算值, 有少数竟大于1或非常接近于1, 这与事实相违背是显而易见的。显然, 不能排除抗弯极限强度的计算值偏低是造成这一异常情况的一个主要因素。其次, 是由于试验时测定的试件的破坏荷载或破坏挠度存在误差。因受测试手段的技术限制, 本次试验对试件的荷载和变形未能做到同步读数, 自动记录。所以, 在试件折

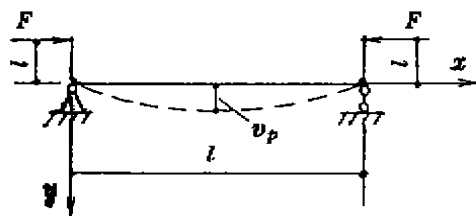


图3 偏压构件示意图

断时挠度增长迅速的情况下,或者荷载,或者变形,或者两者同时产生某种误差的可能性很难完全避免。

表 1 相关式(1)的检验计算

试件编号	长细比 λ	偏心距 e cm	截面面积 A cm^2	截面抵抗矩 W cm^3	顺纹抗压极限强度 R_c kg/cm^2	抗弯极限强度 R_m kg/cm^2	破坏荷载 F t	破坏挠度 v_p cm	$\frac{F}{R_c A}$	$\frac{F(e+v_p)}{R_m W}$	$\frac{F}{R_c A} + \frac{F(e+v_p)}{R_m W}$
A甲1	130	3.4	81.6	138.72	258	365	3.0	13.205	0.1425	0.9838	1.1263
A甲3					241	346	2.8	10.08	0.1424	0.7864	0.9288
A甲4					261	390	3.1	10.291	0.1456	0.7845	0.9301
A甲5					247	365	3.4	10.727	0.1687	0.9486	1.1173
A甲6		2.6	46.8	60.84	227	322	1.56	7.929	0.1468	0.8384	0.9852
A乙1		130	1.7	81.6	138.72	208	301	2.8	10.118	0.1650	0.7925
A乙2	248					359	3.1	10.547	0.1532	0.7624	0.9156
A乙3	255					379	3.4	11.44	0.1634	0.8498	1.0132
A乙4	296					433	4.5	10.62	0.1863	0.9230	1.1093
A乙5	274					378	2.8	11.126	0.1252	0.6849	0.8101
A乙6	277					378	2.9	8.576	0.1283	0.5683	0.6966
A丙1	130	0.85	81.6	138.72	297	432	4.1	9.08	0.1692	0.6794	0.8486
A丙2					290	458	4.6	9.86	0.1944	0.7754	0.9698
A丙3					238	368	3.4	10.029	0.1751	0.7246	0.8997
A丙4					287	427	4.7	9.675	0.2007	0.8351	1.0358
A丙5					295	446	4.3	10.31	0.1786	0.7756	0.9542
A丁1	130	6.5	46.8	60.84	290	416	1.23	9.901	0.0906	0.7991	0.8877
A丁2					290	416	1.24	10.736	0.0914	0.8445	0.9359
A丁3					294	436	1.26	10.538	0.0928	0.8093	0.9021
A丁4					348	457	1.3	10.579	0.0798	0.7985	0.8783
A丁5					300	413	1.3	9.698	0.0926	0.8380	0.9306
A戊2	130	10.4	46.8	60.84	301	417	0.85	10.289	0.0603	0.6866	0.7469
A戊3					300	417	0.77	6.804	0.0548	0.5221	0.5769
A戊4					293	408	0.8	8.349	0.0583	0.6043	0.6626
A戊5					327	441	1.09	9.362	0.0712	0.8028	0.8740
A戊6					283	379	1.0	8.727	0.0755	0.8295	0.9050
A戊7					345	461	1.02	10.954	0.0632	0.7765	0.8397
B甲1					90	3.4	81.6	138.72	252	391	4.32
B甲3	299	454	5.7	5.572					0.2336	0.8120	1.0456
B甲4	254	337	4.2	6.14					0.2026	0.8571	1.0597
B甲5	253	378	4.4	5.925					0.2131	0.7825	0.9956
B甲6	310	422	6.0	3.361					0.2372	0.6929	0.9301

(续表 1)

试件 编号	长细 比 λ	偏心 距 e cm	截面 面积 A cm^2	截面抵 抗矩 W cm^3	顺纹抗压 极限强度 R_c kg/cm^2	抗弯极 限强度 R_w kg/cm^2	破坏 荷载 F t	破 坏 挠 度 v_p cm	$\frac{F}{R_c A}$	$\frac{F(e + v_p)}{R_w W}$	$\frac{F}{R_c A} + \frac{F(e + v_p)}{R_w W}$
BZ1	90	1.7	81.6	138.72	240	403	3.6	7.096	0.1838	0.5665	0.7503
BZ2					261	394	4.1	6.419	0.1925	0.6090	0.8015
BZ3					290	408	7.4	5.644	0.3127	0.9602	1.2729
BZ4					242	363	4.6	5.917	0.2329	0.6958	0.9287
BZ5					263	421	5.8	5.615	0.2703	0.7265	0.9968
BZ6					268	376	6.6	6.025	0.3018	0.9775	1.2793
B丙2	90	0.85	81.6	138.72	274	365	6.7	5.575	0.2997	0.8502	1.1499
B丙3					234	330	5.2	5.508	0.2723	0.7222	0.9945
B丙4					223	324	5.6	6.027	0.3077	0.8568	1.1645
B丙5					280	425	7.1	5.393	0.3107	0.7518	1.0625
B丙6					273	378	7.5	4.987	0.3367	0.8349	1.1716
B丙7					273	372	5.8	5.64	0.2604	0.7238	0.9842
C甲1	70	3.4	81.6	138.72	215	352	5.9	3.439	0.3363	0.8263	1.1626
C甲2					213	376	5.2	3.837	0.2992	0.7215	1.0207
C甲3					305	450	6.4	3.027	0.2572	0.6589	0.9161
C甲4					244	384	5.9	4.557	0.2963	0.8813	1.1776
C甲5					255	378	5.9	3.054	0.2835	0.7262	1.0097
CZ1	70	1.7	81.6	138.72	250	388	9.1	4.191	0.4461	0.9960	1.4421
CZ2					259	405	7.2	3.605	0.3407	0.6799	1.0206
CZ3					284	468	8.6	3.558	0.3711	0.6965	1.0676
CZ4					262	398	7.9	5.355	0.3695	1.0095	1.3790
CZ5					377	540	11.0	4.385	0.3576	0.8936	1.2512
CZ6					220	350	5.8	3.945	0.3231	0.6266	0.9497
C丙1	70	0.85	81.6	138.72	324	436	8.9	4.206	0.3366	0.7440	1.0806
C丙2					251	403	11.3	3.6	0.5517	0.9015	1.4532
C丙3					207	322	6.2	4.61	0.3671	0.7579	1.1250
C丙4					244	388	7.3	4.814	0.3666	0.7682	1.1348
C丙5					340	516	10.1	2.872	0.3640	0.5252	0.8892
C丙7		0.65	46.8	60.84	365	502	7.0	4.13	0.4098	1.0956	1.5054
CT1	70	6.5	46.8	60.84	299	420	2.84	5.359	0.2030	1.3180	1.5210
CT2					300	413	2.26	3.959	0.1610	0.9407	1.1017
CT3					304	466	2.2	4.313	0.1546	0.8391	0.9937
CT4					338	441	2.96	2.892	0.1871	1.0361	1.2232
CT5					346	507	2.06	3.621	0.1272	0.6759	0.8031

(续表 1)

试件编号	长细比 λ	偏心距 e cm	截面面积 A cm^2	截面抵抗矩 W cm^3	顺纹抗压极限强度 R_c kg/cm^2	抗弯极限强度 R_m kg/cm^2	破坏荷载 F t	破坏挠度 v_p cm	$\frac{F}{R_c A}$	$\frac{F(e+u_p)}{R_m W}$	$\frac{F}{R_c A} + \frac{F(e+u_p)}{R_m W}$
C戊1	70	10.4	46.8	60.84	299	398	1.34	3.766	0.0958	0.7839	0.8797
C戊2					270	362	1.2	3.45	0.0950	0.7546	0.8496
C戊3					342	514	1.86	4.346	0.1162	0.8771	0.9933
C戊5					318	408	1.66	5.295	0.1115	1.0496	1.1611
C戊6					271	304	1.52	3.196	0.1198	1.1174	1.2372
C戊7					274	420	1.42	3.8	0.1107	0.7891	0.8998
D甲2					50	3.4	81.6	138.72	241	301	7.6
D甲3	278	435	8.6	1.69					0.3791	0.7254	1.1045
D甲4	208	338	6.9	3.558					0.4065	1.0239	1.4304
D甲5	231	319	6.8	2.7					0.3608	0.7837	1.1445
D甲6	2.6	46.8	60.84	312		428	4.26	1.893	0.2917	0.7350	1.0267
D甲7				311		373	4.03	2.14	0.2769	0.8418	1.1187
D乙2				50		1.7	81.6	138.72	237	361	8.9
D乙4	233	305	9.0		1.65				0.4734	0.7126	1.1860
D乙5	251	365	9.5		2.067				0.4638	0.7068	1.1706
D乙6	188	311	7.2		1.8				0.4693	0.5841	1.0534
D乙7	195	330	8.4		2.317				0.5279	0.7371	1.2650
D丙1	50	0.85	81.6	138.72	235	316	9.9	2.237	0.5163	0.6972	1.2135
D丙2					235	316	10.6	3.0	0.5528	0.9310	1.4838
D丙3					279	418	11.9	2.184	0.5227	0.6227	1.1454
D丙4					261	368	12.5	1.77	0.5869	0.6415	1.2284
D丙5		0.65	46.8	60.84	275	397	11.6	1.84	0.5169	0.5666	1.0835
D丙6					273	407	5.6	2.007	0.4383	0.6009	1.0392
E甲2	30	3.4	81.6	138.72	233	305	6.1	0.541	0.3208	0.5682	0.8890
E甲3					197	318	7.2	1.11	0.4479	0.7361	1.1840
E甲4					228	359	9.0	0.979	0.4837	0.5975	1.0812
E甲5					194	278	6.3	0.55	0.3980	0.6453	1.0433
E甲6					312	428	5.42	0.545	0.3712	0.6546	1.0258
E甲7		2.6	46.8	60.84	302	445	5.45	1.15	0.3856	0.7549	1.1405
E乙1					30	1.7	81.6	138.72	242	367	13.0
E乙2	184	336	10.7	1.015					0.7126	0.6233	1.3359
E乙3	192	298	10.7	1.526					0.6830	0.8350	1.5180
E乙4	216	354	11.6	1.51					0.6581	0.7583	1.4164
E乙5	247	434	10.5	1.402					0.5210	0.5410	1.0620

(续表 1)

试件 编号	长细 比 λ	偏心 距 e cm	截面 面积 A cm ²	截面抵 抗矩 W cm ³	顺纹抗压 极限强度 R_c kg/cm ²	抗弯极 限强度 R_m kg/cm ²	破坏 荷载 F t	破坏 挠度 v_p cm	$\frac{F}{R_c A}$	$\frac{F(e + v_p)}{R_m W}$	$\frac{F}{R_c A} + \frac{F(e + v_p)}{R_m W}$
E丙1	30	0.85	81.6	138.72	345	533	16.8	0.818	0.5968	0.3790	0.9758
E丙4					220	338	15.1	1.128	0.8411	0.6470	1.4781
E丙5					230	339	13.1	0.878	0.6980	0.4814	1.1794
E丙7					275	402	11.6	1.345	0.5170	0.4172	0.9342
E丙8					345	461	9.03	0.565	0.5593	0.3912	0.9505
E丙9		0.65	46.8	60.84	274	420	8.78	1.24	0.6847	0.6494	1.3341

从表 1 的计算结果来看, 只有少数试件的计算值少于 1, 且除极少数试件外, 一般与 1 的差异不大。若按试件的组平均值进行计算, 则误差必将有所减小(参见后面的有关计算)。因此, 对力学性能离散性相当大的木材而言, 相关式(1)的计算值与试验结果符合的程度是良好的。相关式(1)能较正确地反映偏压木构件的极限承载能力。

2 偏压构件破坏挠度的近似理论计算

前面采用偏压木试件的实际试验数据, 对相关式(1)进行验证, 式中的 v_p 可取试件折断时的实际破坏挠度代入计算。但若应用相关式(1)来设计验算偏压木构件, 则由于所设计验算的构件, 其折断时的破坏挠度为未知, 从而无法考虑二阶弯矩的影响。因此, 如何计算偏压构件折断时的破坏挠度值, 是相关式(1)应用于实际设计计算的关键问题。

为了解决此一关键问题, 本文从偏压构件折断时的挠曲线着手研究。对木构件来说, 由于木材的组织构造不均匀, 且各个构件的疵病状况又千差万别。因此, 偏压构件折断时的挠曲线实际上是各不相同的。对这种个体之间存在一定差异的复杂情况, 欲在理论上寻求一个能包含方方面面的理想解答是非常困难的, 而且也没有什么实用意义。既然无法找出适合于所有情况的真实的挠曲线; 因此, 从实用的观点考虑, 可以采用假设的挠曲形状函数, 作为偏压构件折断时的挠曲线。给定偏压构件折断时的挠曲形状函数, 可以有多种选择。一般选用多项式函数或三角函数较为合适。当然, 不论何种函数都应满足图 3 所示偏压构件的几何边界条件, 而且跨中央的斜率为零。

在图 3 中, 设 xy 平面为偏压构件的对称平面。偏压构件两端为铰接。其两端的偏心压力 F 作用于 xy 平面内。坐标系如图所示: 以构件左端支座为原点, x 轴向右为正, y 轴向下为正。

作为例子, 本文采用简支梁的几种已知的挠曲线方程作为偏压构件折断时的挠曲形状函数进行分析研究。

先假设偏压构件折断时的挠曲形状函数为半波正弦曲线:

$$y = a \sin \frac{\pi x}{l} \quad (0 \leq x \leq l) \quad (2)$$

式中 a —挠度参数; l —偏压构件的跨度。

那么,在构件折断时,其挠曲线的曲率为: $y'' = \frac{1}{\rho} = -\frac{a\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi x}{l}$,

式中负号表示构件的挠曲凹面朝上。将 $x = l/2$ 代入上式,便得构件折断时,其跨度中央截面(即二阶弯矩最大的最危险截面)的曲率等于:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{a\pi^2}{l^2} \sin \frac{\pi \times \frac{l}{2}}{l} = -\frac{a\pi^2}{l^2} \quad (3)$$

同时,将 $x = l/2$ 代入(2),则得构件折断时,其跨度中央截面的最大挠度(即破坏挠度):

$$v_p = a \sin \frac{\pi \times \frac{l}{2}}{l} = a \quad (4)$$

将式(3)等号右边取绝对值,并解出 a : $a = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{l^2}{\rho}$,

将其代入式(4),则偏压构件折断时的破坏挠度为: $v_p = \frac{1}{\pi^2} \cdot \frac{l^2}{\rho}$ (5)

再采用下述含有两个正弦项的三角函数(如一个集中荷载作用于跨度中央时,简支梁的近似挠曲线方程)作为挠曲形状函数:

$$y = a \left(81 \sin \frac{\pi x}{l} - \sin \frac{3\pi x}{l} \right), \quad (0 \leq x \leq l)$$

式中符号的意义同前。重复上述对式(2)的运算步骤,可得:

$$v_p = \frac{10}{9\pi^2} \cdot \frac{l^2}{\rho} \quad (6)$$

若以简支梁均布荷载作用下的挠曲线方程(四次多项式)作挠曲形状函数:

$$y = a(l^3 x - 2lx^3 + x^4), \quad (0 \leq x \leq l)$$

则有破坏挠度: $v_p = \frac{5}{48} \cdot \frac{l^2}{\rho}$ (7)

另取简支梁两端支座作用力偶时的二次多项式挠曲线方程为挠曲形状函数:

$$y = a(lx - x^2), \quad (0 \leq x \leq l)$$

则破坏挠度为: $v_p = \frac{1}{8} \cdot \frac{l^2}{\rho}$ (8)

将上列按各种挠曲形状函数得出的破坏挠度进行比较,变化仅仅在于它们的常系数各不相同,且常系数的变动不大。由此可见,偏压构件的破坏挠度的近似表达式,并不因挠曲形状函数的不同,而产生很大的实质性的变化;破坏挠度的大小,主要取决于构件的跨长和构件折断时其跨度中央截面的曲率。偏压构件的破坏挠度既与跨长的平方,也与折断时其跨度中央截面的曲率成正比,至于比例常数,对不同的挠曲形状函数,其大小有所差异。因此,计算偏压构件的破坏挠度的关键,在于如何求得构件折断时,其跨度中央截面的曲率值。

3 矩形截面偏压木构件的破坏挠度计算式

考虑到前言中列举的偏压木构件的力学行为表现的有关特点,在进行偏压木构件的破坏挠度的分析计算时,采用了以下基本假设:

- 1) 构件折断时, 其最危险截面的正应力呈理想的弹塑性分布, 见图 4a 所示。
- 2) 构件折断前, 包括最危险截面在内的所有截面, 均始终保持平面变形。

3) 构件的顺纹受压及顺纹受拉弹性模量与偏心受压弹性变形模量相等。

4) 最危险截面的纤维应变, 沿截面高度的分布如图 4b 所示, 其受压区和受拉区边缘纤维的应变分别为:

$$\epsilon_c = R_c / E, \quad \epsilon_t = R_t / E$$

式中 R_c —试件顺纹抗压极限强度;

R_t —试件的顺纹抗拉极限强度;

E —试件的偏心受压弹性变形模量。

5) 构件折断时的最危险截面一律为跨度中央截面。

木构件的偏心受压弹性变形模量, 可根据偏压试件在加荷初期的荷载值和与之相应的挠度值计算得出。因此, 所得的弹性变形模量已包含了试件的疵病及尺寸的影响, 而无需再引入调整系数。由于偏心受压时不存在切力增大构件挠度的问题, 故在数值上, 木构件的偏心受压弹性变形模量要比木构件横向弯曲时的弹性模量大一点。偏心受压弹性变形模量的测定与计算见另文。

根据上述有关基本假设, 由图 4b 可得偏压木构件折断时, 其最危险截面的纤维应变与该截面的曲率间的关系:

$$\epsilon_c + \epsilon_t = h / \rho$$

式中 ϵ_c —最危险截面受压区边缘纤维的应变; ϵ_t —最危险截面受拉区边缘纤维的应变;
 h —最危险截面的截面高度; $1/\rho$ —最危险截面的曲率。

从上式解出曲率, 并用极限强度表达纤维应变。于是得曲率与极限强度间的关系:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_t}{h} = \frac{\frac{R_c}{E} + \frac{R_t}{E}}{h} = \frac{R_c (1 + \frac{R_t}{R_c})}{Eh} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5), 则偏压木构件的破坏挠度, 可用木材的有关力学性能来表达:

$$v_p = \frac{l^2}{\pi^2 h} \cdot \frac{R_c (1 + \frac{R_t}{R_c})}{E} \quad (10)$$

考虑到矩形截面简支构件的长细比可写成:

$$\lambda^2 = \frac{12 l^2}{h^2}$$

则

$$\frac{l^2}{h} = \frac{\lambda^2 h}{12}$$

将其代入式(10), 便得出矩形截面偏压木构件折断时, 其相对破坏挠度的计算式:

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{12\pi^2} \cdot \frac{R_c (1 + \frac{R_t}{R_c})}{E} \quad (11)$$

再将式(9)分别代入式(6)和式(7), 并进行同样的代换和化简, 即得另两种挠曲形状函数

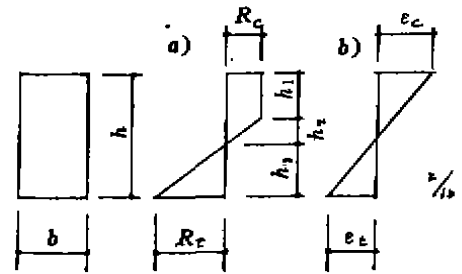


图 4 截面的应力及应变分布

的相对破坏挠度:

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{10.8\pi^2} \cdot \frac{R_c \left(1 + \frac{R_t}{R_c}\right)}{E} \quad (12)$$

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{115.2} \cdot \frac{R_c \left(1 + \frac{R_t}{R_c}\right)}{E} \quad (13)$$

式(11)~(13)表明,矩形截面偏压木构件折断时的相对破坏挠度,取决于构件的长细比和木材的力学性能,而与偏压荷载的偏心距无明显关系。此一结论得到偏压试验结果的基本证实。

考虑到大尺寸有疵材木试件的抗拉极限强度,难以通过试验直接获得。因此,本文利用木构件的抗弯极限强度与抗拉极限强度间的关系,来间接确定比值 R_t/R_c 。至于木构件的抗弯极限强度,众所周知,是非常容易做试验取得的。

木构件的抗弯极限强度与抗拉极限强度间的关系,可根据偏压木构件的最危险截面的抗弯极限承载能力(即 $R_m \cdot W$),与该截面的极限内弯矩相等的条件求得。偏压木构件折断时,其最危险截面的正应力呈图 4a 所示的弹塑性分布。因此,最危险截面的内弯矩为:

$$M = \frac{1}{2}R_t h b \cdot \frac{2}{3}h_3 + R_t h b \left(\frac{1}{2}h_1 + h_2\right) + \frac{1}{2}R_c h_2 b \cdot \frac{2}{3}h_2$$

式中 b —最危险截面的截面宽度;

h_1, h_2 —最危险截面受压区的塑性区和弹性区高度;

h_3 —最危险截面受拉区的高度;

其它符号意义同前。

再按最危险截面的轴力平衡条件,变形条件和几何条件,可建立下列方程组:

$$R_t h b + \frac{1}{2}R_c h_2 b - \frac{1}{2}R_t h_3 b = 0$$

$$R_c / R_t = h_2 / h_3$$

$$h_1 + h_2 + h_3 = h$$

联立求解,得出:

$$h_1 = \frac{\left(\frac{R_t}{R_c}\right)^2 - 1}{\left(1 + \frac{R_t}{R_c}\right)^2} \cdot h \quad h_2 = \frac{2}{\left(1 + \frac{R_t}{R_c}\right)^2} \cdot h \quad h_3 = \frac{2 \frac{R_t}{R_c}}{\left(1 + \frac{R_t}{R_c}\right)^2} \cdot h$$

将 h_1, h_2, h_3 的解代入内弯矩方程,并加以化简,最后求得:

$$M = \frac{R_c \left(\frac{3R_t}{R_c} - 1\right)}{1 + \frac{R_t}{R_c}} \cdot \frac{bh^3}{6}$$

令 $M = R_m W$,

即

$$\frac{R_c \left(\frac{3R_t}{R_c} - 1\right)}{1 + \frac{R_t}{R_c}} \cdot \frac{bh^3}{6} = R_m \cdot \frac{bh^3}{6}$$

所以木构件的抗弯极限强度可用 R_t 和 R_c 来表达:

$$R_m = \frac{R_c \left(\frac{3R_t}{R_c} - 1 \right)}{1 + \frac{R_t}{R_c}}$$

从上式解出 R_t/R_c :

$$\frac{R_t}{R_c} = \frac{1 + \frac{R_m}{R_c}}{3 - \frac{R_m}{R_c}} \quad (14)$$

将式(14)分别代入式(11)、(12)和(13)并化简整理,便得出与前面几种不同挠曲形状函数相对应的,可用于矩形截面偏压木构件的实际设计验算的相对破坏挠度计算式:

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{3\pi^2} \cdot \frac{R_c}{E \left(3 - \frac{R_m}{R_c} \right)} \quad (15)$$

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{2.7\pi^2} \cdot \frac{R_c}{E \left(3 - \frac{R_m}{R_c} \right)} \quad (16)$$

$$\frac{v_p}{h} = \frac{\lambda^2}{28.8} \cdot \frac{R_c}{E \left(3 - \frac{R_m}{R_c} \right)} \quad (17)$$

为了验证所导出的相对破坏挠度计算式,特将本次试验所做 19 组偏压木试件的力学性能的组平均值,分别代入式(15)、(16)和(17),计算结果见表 2。

表 2 的数据说明,不同公式的计算值彼此差别不大,但都与试验测定的实际相对破坏挠度有一定差异,且误差大小各有千秋。然而,后面进一步的计算显示,这些差异在计算偏压木构件的计算极限承载能力(即构件的计算破坏荷载)时,所产生的误差并不大,完全可以接受。

4 偏压木构件的极限承载能力的计算

已知相对破坏挠度后,便能在按强度计算偏压构件时,考虑二阶弯矩的影响。现将本文提出的近似理论计算方法所求得计算相对破坏挠度代入式(1),以便通过偏压木构件极限承载能力的计算,来进一步评价本文导出的计算相对破坏挠度计算式的正确性和实用性。为此,从式(1)解出偏心压力:

$$F = \frac{R_c A}{1 + \frac{6(e + v_p)}{h} \cdot \frac{R_c}{R_m}} \quad (18)$$

采用本次试验 19 组试件的抗压和抗弯极限强度的组平均值,并分别取表 2 中不同的计算相对破坏挠度和实际相对破坏挠度代入式(18),算出各组试件的计算破坏荷载(即各组试件的计算极限承载能力),列入表 3。

考虑到大母体的统计参数更具有代表性和实用意义,因而为更深入地检验本文提出的计算方法,有必要采用本次试验所做的 19 组共 106 根试件的力学性能的平均值,代入式(15)、(16)和(17),分别算出三种不同挠曲形状函数的计算相对破坏挠度。然后又一一代入式(18)

分别求出相应的计算破坏荷载。见表 4 和表 5。

表 2 三种挠曲形状函数的计算相对破坏挠度

组别及试件编号	长细比 λ	抗压极限强度 R_c kg/cm ²	比值 R_m/R_c	弹性变形模量 E kg/cm ²	计算相对破坏挠度			实际相对破坏挠度 v_s/h
					v_1/h	v_2/h	v_3/h	
A甲1, 3, 4, 5, 6	130	247	1.4494	97206	1.0393	0.9616	0.9353	1.0720
A乙1, 2, 3, 4, 5, 6		260	1.4269	86334	1.2141	1.1234	1.0927	1.0200
A丙1, 2, 3, 4, 5		281	1.5160	101492	1.1832	1.0948	1.0649	0.9599
A丁1, 2, 3, 4, 5		304	1.4079	97077	1.2474	1.1542	1.1227	1.3193
A戊2, 3, 4, 5, 6, 7		308	1.3636	94796	1.2592	1.1651	1.1333	1.1642
B甲1, 3, 4, 5, 6	90	273	1.4505	106148	0.5045	0.4668	0.4541	0.5453
B乙1, 2, 3, 4, 5, 6		261	1.5123	84762	0.6291	0.5821	0.5662	0.5999
B丙2, 3, 4, 5, 6, 7		260	1.4077	89227	0.5563	0.5147	0.5006	0.5413
C甲1, 2, 3, 4, 5,	70	246	1.5772	92854	0.3424	0.3168	0.3082	0.3513
C乙1, 2, 3, 4, 5, 6		275	1.5454	93008	0.3738	0.3458	0.3364	0.4091
C丙1, 2, 3, 4, 5, 7		289	1.4810	81174	0.4310	0.3988	0.3879	0.4169
C丁1, 2, 3, 4, 5		317	1.4164	114840	0.3205	0.2966	0.2885	0.5165
C戊1, 2, 3, 5, 6, 7		296	1.3885	95078	0.3552	0.3287	0.3197	0.5097
D甲2, 3, 4, 5, 6, 7	50	264	1.3864	89711	0.1711	0.1583	0.1540	0.2562
D乙2, 4, 5, 6, 7		221	1.5113	79960	0.1742	0.1612	0.1568	0.1998
D丙1, 2, 3, 4, 5, 6		260	1.4231	79630	0.1943	0.1797	0.1748	0.2231
E甲2, 3, 4, 5, 6, 7	30	244	1.4549	71745	0.0743	0.0688	0.0669	0.0882
E乙1, 2, 3, 4, 5		216	1.6574	71811	0.0757	0.0700	0.0681	0.1216
E丙1, 4, 5, 7, 8, 9		282	1.4752	67379	0.0927	0.0858	0.0834	0.1089

注: 表中 v_1/h 按式(16); v_2/h 按式(17); v_3/h 按式(15)算出;

取实际破坏荷载对计算破坏荷载的比值列成表 6。为比较不同情况的优劣, 可对表 6 的八种比值分别进行统计分析。不同情况的统计参数显示: (1) 按实际相对挠度求得的计算破坏荷载, 其比值的变异性比按各种计算相对破坏挠度算出的都大。这表示从总体看, 按计算相对破坏挠度算出的偏压木构件的计算极限承载能力, 更接近于其实际极限承载能力。(2) 按全部 (106 根) 试件的力学性能平均值计算的比值, 其变异性较按各组试件的力学性能平均值计算的要小些。从而说明本文提出的, 关于偏压木构件折断时的破坏挠度和构件极限承载能力的计算方法, 能较准确地表达偏压木构件受力工作的客观规律。(3) 在所取三种不同的挠曲形状函数之间, 各自算得的计算相对破坏挠度稍有不同, 因而导致各自的计算破坏荷载略有差异, 但三者比值的变异性彼此出入很小。(4) 在各种比值中, 计算破坏荷载与实际破坏荷载相差非常悬殊的都只是 C 丙 7 一根试件, 且以按实际相对破坏挠度计算的差别更大。在按全部试件的力学性能平均值计算的结果中, F_s 的比值小于 1 者只有六个, 且其差异均没超过 15%; 而大于 1 者, 有三个组在 15%~20% 左右。 F_c 的比值在小于 1 的之中, 仅一个组差异达 17%; 而

大于1者,有二个组在15%~20%之间。 F_7 的比值,仅一个小于1的组,其差异达18%,其它则全都不大于15%(多数小于10%)。由此可见,理论计算值与试验值是值是很接近的。

综上所述,本文提出的计算方法,具有良好的实用价值。

表3 各组试件的计算破坏荷载

组别及试件编号	偏 心 距 e cm	截 面 高 度 h cm	截 面 面 积 A cm ²	抗 压 极 限 强 度 R_c kg/cm ²	比 值 R_c/R_m	计算破坏荷载				实际破 坏荷载 F_b kg
						F_1 kg	F_2 kg	F_3 kg	F_4 kg	
A甲1,3,4,5	3.4	10.2	81.6	247	0.6899	3016	3169	3224	2957	3075
A甲6	2.6	7.8	46.8	247	0.6899	1730	1817	1849	1696	1560
A乙1,2,3,4,5,6	1.7	10.2	81.6	260	0.6993	3123	3308	3376	3548	3250
A丙1,2,3,4,5	0.85	10.2	81.6	281	0.6596	3814	4049	4136	4471	4220
A丁1,2,3,4,5	6.5	7.8	46.8	304	0.7103	1442	1502	1524	1398	1266
A戊2,3,4,5,6,7	10.4	7.8	46.8	308	0.7333	1162	1202	1216	1202	922
B甲1,3,4,5,6	3.4	10.2	81.6	273	0.6894	4989	5169	5233	4807	4924
B乙1,2,3,4,5,6	1.7	10.2	81.6	261 260	0.6613	5123	5363	5450	5270	5350
B丙2,3,4,5,6,7	0.85	10.2	81.6		0.7104	5693	5978	6081	5793	6317
C甲1,2,3,4,5	3.4	10.2	81.6	246	0.6340	5622	5780	5835	5569	5860
C乙1,2,3,4,5,6	1.7	10.2	81.6	275	0.6470	7243	7507	7599	6936	8267
C丙1,2,3,4,5	0.85	10.2	81.6	289	0.6752	7648	7985	8107	7792	8760
C丙7	0.65	7.8	46.8	289	0.6752	4386	4580	4649	4469	7000
C丁1,2,3,4,5	6.5	7.8	46.8	317 296	0.7060	2520	2564	2579	2208	2464
C戊1,2,3,5,6,7	10.4	7.8	46.8		0.7202	1670	1693	1701	1545	1500
D甲2,3,4,5	3.4	10.2	81.6	264	0.7213	6768	6888	6929	6066	7475
D甲6,7	2.6	7.8	46.8	264	0.7213	3882	3950	3974	3479	4145
D乙2,4,5,6,7	1.7	10.2	81.6	221	0.6617	7663	7835	7895	7346	8600
D丙1,2,3,4,5	0.85	10.2	81.6	260 260	0.7027	9774	10060	10159	9257	11300
D丙6	0.65	7.8	46.8		0.7027	5606	5770	5827	5309	5600
E甲2,3,4,5	3.4	10.2	81.6	244	0.6873	7426	7490	7512	7271	7150
E甲6,7	2.6	7.8	46.8	244	0.6873	4259	4296	4308	4170	5435
E乙1,2,3,4,5	1.7	10.2	81.6	216	0.6034	9388	9492	9528	8625	11300
E丙1,4,5,7	0.85	10.2	81.6	282 282	0.6778	13411	13634	13713	13357	14150
E丙8,9	0.65	7.8	46.8		0.6778	7691	7819	7865	7661	8905

注:表中 F_1 , F_2 , F_3 和 F_4 系分别按表2中的 v_1/h , v_2/h , v_3/h 和 v_4/h 计算出。

5 小 结

1) 考虑二阶弯矩和截面抗弯弹塑性工作的强度计算方法,能较正确地表达偏压木构件

表 4 各大组试件的计算相对破坏挠度

试件大组	长细比 λ	抗压极限强度 R_c kg/cm ²	比值 R_m/R_c	弹性变形模量 E kg/cm ²	计算相对破坏挠度			实际相对破坏挠度 v_p/h
					v_1/h	v_2/h	v_6/h	
A	130	269	1.4572	88717	1.2464	1.1218	1.1533	1.0665
B	90	269	1.4572	88717	0.5974	0.5527	0.5377	0.5632
C	70	269	1.4572	88717	0.3614	0.3344	0.3252	0.4411
D	50	269	1.4572	88717	0.1844	0.1706	0.1659	0.2279
E	30	269	1.4572	88717	0.0664	0.0614	0.0597	0.1045

注: ① 表中 v_1/h , v_2/h , v_6/h 分别按式(16)、(17)和(15)计算。 v_p/h 为长细比相同大组试件的实际相对破坏挠度平均值。

② 本次试验所做 19 组共 106 根偏压木试件的有关力学性能的统计参数:

顺纹受压极限强度平均值 $R_c = 269 \text{ kg/cm}^2$; 横向弯曲极限强度平均值 $R_m = 392 \text{ kg/cm}^2$;

偏心受压弹性变形模量平均值 $E = 88717 \text{ kg/cm}^2$; 比值 $R_m/R_c = 1.4572$; $R_c/R_m = 0.6862$ 。

的极限承载能力,其计算结果与试验数据颇为一致。

2) 采用假设的挠曲形状函数,作为偏压木构件折断时的挠曲线方程,来确定其跨中央破坏挠度的方法是切实可行的,其精确性完全满足工程实践的要求。

3) 偏压木构件的承载能力可按下式进行设计验算:

$$\frac{F}{f_c A_n} + \frac{F(e + w_p)}{f_m W_n} \leq 1$$

式中 F —构件的偏心压力; f_c —木材的顺纹抗压强度设计值;
 f_m —木材的抗弯强度设计值; e —偏心压力的偏心距;
 W_n —构件的净截面面积; W_n —构件的净截面抵抗矩;
 w_p —偏压木构件的破坏挠度,按下式计算(对矩形截面构件):

其中

$$w_p = \frac{\lambda^2}{k} \cdot \frac{f_c}{E \left(3 - \frac{f_m}{f_c} \right)} \cdot h$$

λ —构件在弯矩平面内的长细比;

h —构件在弯矩平面内的截面高度;

E —木材的偏心受压弹性变形模量,可按木材在纯弯矩作用下的弯曲弹性模量取设计值;

k —计算系数,一般可根据需要,宜在 10~15 范围左右取值;

其它符号意义同前。

4) w_p 计算式中的系数 k ,理论上其大小取决于所假设的挠曲形状函数。但综合考虑到以下问题:理论推导中基本假设及其它假设引起的误差;需与设计规范计算式保持大致相当的安

全度水平; 单一的疵病及尺寸影响系数产生的影响; 以及长柱与短柱间和大偏心与小偏心间可能存在的差异等。因而, 系数 k 的实用上的取值范围值得进一步深入探讨。

表 5 各组度件的计算破坏荷载

组别及试件编号	偏心距 e cm	截面 高度 h cm	截面 面积 A cm^2	抗压极 限强度 R_c kg/cm^2	比值 R_c/R_{c0}	计算破坏荷载				实际破 坏荷载 F_p kg
						F_1 kg	F_2 kg	F_3 kg	F_4 kg	
A甲1, 3, 4, 5	3.4	10.2	81.6	269	0.6862	2925	3083	3140	3245	3075
A甲6	2.6	7.8	46.8			1600	1768	1801	1861	1560
A乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.7	10.2	81.6			3220	3411	3481	3612	3250
A丙1, 2, 3, 4, 5	0.85	10.2	81.6			3390	3603	3682	3828	4220
A丁1, 2, 3, 4, 5	6.5	46.8	46.8			1317	1371	1391	1427	1366
A戊2, 3, 4, 5, 6, 7	10.4	46.8	46.8			1083	1120	1133	1157	922
B甲1, 3, 4, 5, 6	3.4	10.2	81.6	269	0.6862	4543	4722	4786	4679	4924
B乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.7					5295	5541	5628	5481	5350
B丙2, 3, 4, 5, 6, 7	0.85					5772	6066	6171	5994	6317
C甲1, 2, 3, 4, 5	3.4	10.2	81.6	269	0.6862	5686	5855	5914	5241	5860
C乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.7	10.2	81.6			6915	7166	7256	6267	8267
C丙1, 2, 3, 4, 5	0.85	10.2	81.6			7753	8070	8184	6948	8760
C丙7	0.65	7.8	46.8			4447	4629	4694	3985	7000
C丁1, 2, 3, 4, 5	6.5	7.8	46.8			2127	2168	2182	2015	2464
C戊1, 2, 3, 5, 6, 7	10.4	7.8	46.8			1578	1600	1608	1516	
D甲2, 3, 4, 5	3.4	10.2	81.6	269	0.6862	7009	7139	7184	6630	7475
D甲6, 7	2.6	7.8	46.8			4020	4094	4120	3803	4145
D乙2, 4, 5, 6, 7	1.7	10.2	81.6			8976	9190	9265	8364	8600
D丙1, 2, 3, 4, 5	0.85	10.2	81.6			10441	10731	10834	9621	11300
D丙6	0.65	7.8	46.8			5988	6155	6213	5518	65600
E甲2, 3, 4, 5	3.4	10.2	81.6			269	0.6882	8296	8361	8384
E甲6, 7	2.6	7.8	46.8	4758	4795			4808	4492	5435
E乙1, 2, 3, 4, 5	1.7	10.2	81.6	11202	11320			11362	10373	11300
E丙1, 4, 5, 7	0.85	10.2	81.6	13579	13574			13815	12381	14150
E丙8, 9	0.65	7.8	46.8	7788	7888			7923	7107	8905

注: 表 F_1 , F_2 , F_3 和 F_4 分别按表 4 的 v_1/h , v_2/h , v_3/h 和 v_4/h 计算。

5) 本文引用的木材顺纹受压和横向弯曲极限强度的考虑疵病及尺寸影响的系数, 系根据本次试验的结果而提出, 有一定局限性。所以对这些系数的取值, 有必要进行更全面的试验研究。但在没有更完善的数据以前, 本文给出的系数值, 在一般情况下可以考虑使用。

表 6 实际破坏荷载与计算破坏荷载的比值

组别及试件编号	F_p/F_1	F_p/F_2	F_p/F_3	F_p/F_4	F_p/F_5	F_p/F_6	F_p/F_7	F_p/F_8
A甲1, 3, 4, 5	1.0196	0.9703	0.9538	1.0399	1.0513	0.9974	0.9793	0.9476
A甲6	0.9017	0.8586	0.8437	0.9198	0.9297	0.8824	0.8662	0.8383
A乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.0407	0.9825	0.9627	0.9160	1.0093	0.9528	0.9336	0.8998
A丙1, 2, 3, 4, 5	1.1064	1.0422	1.0203	0.9439	1.2448	1.1712	1.1461	1.1024
A丁1, 2, 3, 4, 5	0.8779	0.8429	0.8307	0.9056	0.9613	0.9234	0.9138	0.8872
A戊2, 3, 4, 5, 6, 7	0.7935	0.7671	0.7582	0.7671	0.8513	0.8232	0.8138	0.7969
B甲1, 3, 4, 5, 6	0.9870	0.9526	0.9410	1.0243	1.0839	1.0428	1.0288	1.0524
B乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.0443	0.9976	0.9817	1.0152	1.0104	0.9655	0.9506	0.9761
B丙2, 3, 4, 5, 6, 7	1.1096	1.0567	1.0388	1.0905	1.0944	1.0414	1.0237	1.0539
C甲1, 2, 3, 4, 5	1.0423	1.0138	1.0043	1.0523	1.0306	1.0009	0.9909	1.1181
C乙1, 2, 3, 4, 5, 6	1.1414	1.1012	1.0879	1.1919	1.1955	1.1536	1.1393	1.3191
C丙1, 2, 3, 4, 5	1.1454	1.0971	1.0805	1.1242	1.1299	1.0855	1.0704	1.2608
C丙7	1.5960	1.5284	1.5057	1.5663	1.5741	1.5122	1.4913	1.7566
C丁1, 2, 3, 4, 5	0.9778	0.9610	0.9554	1.1159	1.1584	1.1365	1.1292	1.2228
C戊1, 2, 3, 5, 6, 7	0.8982	0.8860	0.8818	0.9709	0.9506	0.9375	0.9328	0.9894
D甲2, 3, 4, 5	1.1045	1.0852	1.0788	1.2323	1.0665	1.0471	1.0405	1.1274
D甲6, 7	1.0677	1.0494	1.0430	1.1914	1.0311	1.0125	1.0061	1.0899
D乙2, 4, 5, 6, 7	1.1223	1.0976	1.0893	1.1707	0.9581	0.9358	0.9282	1.0282
D丙1, 2, 3, 4, 5	1.1561	1.1233	1.1123	1.2207	1.0823	1.0530	1.0430	1.1745
D丙6	0.9989	0.9705	0.9610	1.0548	0.9352	0.9098	0.9013	1.0149
E甲2, 3, 4, 5	0.9628	0.9546	0.9518	0.9834	0.8619	0.8552	0.8528	0.9129
E甲6, 7	1.2761	1.2651	1.2616	1.3034	1.1423	1.1335	1.1304	1.2099
E乙1, 2, 3, 4, 5	1.2037	1.1905	1.1860	1.3101	1.0087	0.9982	0.9945	1.0894
E丙1, 4, 5, 7	1.0551	1.0378	1.0319	1.0594	1.0421	1.0288	1.0242	1.1429
E丙8, 9	1.1578	1.1389	1.1322	1.1624	1.1434	1.1289	1.1239	1.2530

注：表中 F_1 , F_2 和 F_3 系采用各组试件的力学性能的组平均值，分别按式(16)、(17)和(15)的计算相对破坏挠度算得的计算破坏荷载。 F_5 , F_6 和 F_7 则采用全部试件的力学性能平均值，分别按式(16)、(17)和(15)计算。 F_4 按力学性能和实际破坏挠度的组平均值计算。 F_8 按全部试件的力学性能平均值和实际破坏挠度的大组(长细比相同者)平均值计算。

(编辑:刘家凯)

(下转 109 页)