

钢筋混凝土深梁局部承压的 试验研究及可靠度分析

龚绍熙 刘立新*

(郑州工学院土建系)

提 要

本文论述了钢筋混凝土深梁局部承压的特点和破坏形态。通过对34个发生局压破坏的深梁试件的分析表明,深梁的局部承压可靠度按TJ10—74规范的公式进行验算时能满足要求。但按新修订的规范验算时,因局部承压计算底面积 A_b 取值偏大,使局压强度提高系数 β_c 的取值偏高,无论按新规范的公式或按局压专题组原建议的公式验算,其可靠度均不能满足要求。本文给出深梁局压强度提高系数 β_c 的修正公式,进行了可靠度分析,并给出了深梁不需进行局压验算的最小支承长度。

关键词: 梁深, 局部承压, 可靠度分析。

一、概 述

局部承压是钢筋混凝土结构中常见的受力形式之一。在工程实践中因局部承压区混凝土开裂或强度不足引起的事故时有发生。在钢筋混凝土深梁中局压破坏也是一种主要的破坏形态^{[1][2]}。关于混凝土构件局部承压问题,国内外研究甚多。理论分析和试验研究都表明,集中荷载或支承反力通过局面积加于构件时将使垫板下混凝土处于多轴受压状态,其强度有明显提高。我国“钢筋混凝土结构设计规范”(TJ10—74)根据“套箍”强化理论^{[4][10]}导出了局压强度提高系数 β_c 的计算公式并规定无间接配筋的混凝土构件的局部承压按下式计算:

$$N_{cp} = \omega \beta_c R_a A_c \quad (1)$$

式中, N_{cp} 是破坏时的局压荷载, A_c 是局压面积, R_a 是混凝土轴心抗压设计强度,局压强度提高系数 β_c 按下式计算:

$$\beta_c = \sqrt{\frac{A_d}{A_c}} \quad (2)$$

式中, A_d 是按TJ10—74规范确定的局部承压计算底面积, ω 是荷载分布影响系数,荷载均匀分布时 $\omega = 1.0$,荷载非均匀分布时 $\omega = 0.75$ 。深梁因其抗弯刚度远远大于浅梁,支座处受力较均匀,故 ω 可取1.0。

*参加试验的还有尹水文,李天玉,秦长明,王贞祥,王春光,孙伟通,冯桂英等。

**为与可靠度指标 β 相区别,本文局压强度提高系数用 β_c 表示。

本文1986年12月24日收到。

近年来,局压专题组在理论分析和试验的基础上提出了局压的“楔劈破坏机理”,并建议新的 β_c 表达式为:^[3]

$$\beta_c = 0.8 \sqrt{\frac{A_b}{A_L}} + 0.2 \quad (3)$$

和TJ10—74规范不同,式中 A_b 按“同心、对称、有效面积”的原则确定。

新修订的“钢筋混凝土结构设计规范”(送审稿)及编制说明^[4]指出,考虑公式(3)和TJ10—74规范公式在本质上都是开方公式,且两式的计算误差不是很大,仍维持原规范 β_c 的表达式,但局压计算底面积 A_b 按同心、对称的方法取值,并规定局部承压强度按下式计算:

$$N \leq \omega \beta_c f_c A_L \quad (4)$$

式中 N 表示局部承压的设计轴向力, f_c 是混凝土轴心抗压设计强度, A_b 和 A_L 分别表示局压计算底面积和局压面积,局压强度提高系数仍为:

$$\beta_c = \sqrt{\frac{A_b}{A_L}} \quad (5)$$

深梁一般是指跨高比 $l/h \leq 2$ 的简支梁或 $l/h \leq 2.5$ 的连续梁。深梁在顶面荷载作用下当临界斜裂缝出现后可模拟为变截面拉杆拱的受力体系,纵筋为“拉杆”,拱腹为“压杆”(图1)。当纵筋配筋率大于弯剪界限配筋率 ρ_b 时,深梁的破坏形式主要是剪切破坏。荷载通过拱腹传到支座,使支座和集中荷载作用处的局部压应力比浅梁大得多。大量的深梁试验,尤其是

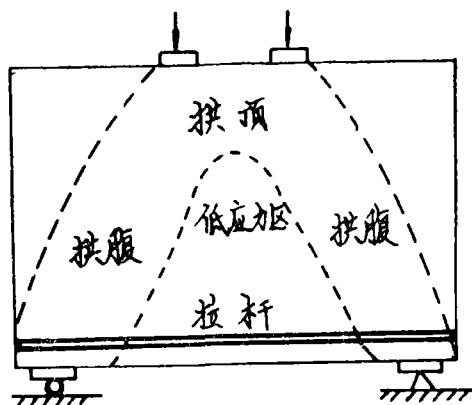


图 1

是郑州工学院、郑州第二建筑公司和华南工学院所作约束深梁试验表明,深梁的局压破坏远较浅梁严重。由于深梁的局压多为两面临空或三面临空的边角局压,破坏发生在同时受压、弯、剪联合作用的构件加荷处或支座垫板处的混凝土中。尤其是深梁支座上方的混凝土处于竖向压应力和纵筋锚固区复合应力作用下,受力十分复杂。为了充分发挥深梁的承载能力防止过早发生局压破坏,在以往试验的基础上,我们又做了6个发生局压破坏的深梁试验,并包括以前试验共收集了34个发生局压破坏的深梁的试验结果进行分析。对深梁局压的特点、破坏形态、局压强度提高系数 β_c 以及局压强度验算等问题进行了讨论,并作了可靠度分析。

二、试 验 概 况

6个局压深梁试件采用相同的尺寸,配置相同的纵筋和腹筋,加载方式及剪跨比也相同,垫板的宽度与深梁的宽度相同,仅改变垫板长度。试件Ⅲ—D—1~Ⅲ—D—4垫板的长度 l_L 分别为17cm、14cm、10cm和7cm,Ⅲ—D—5、Ⅲ—D—6的垫板长度 l_L 也为7cm,但在局压区内分别加配了钢筋网片和钢筋骨架以了解间接配筋对混凝土局部承压的影响。试件尺寸、配筋方式见图2,试件参数见表1。

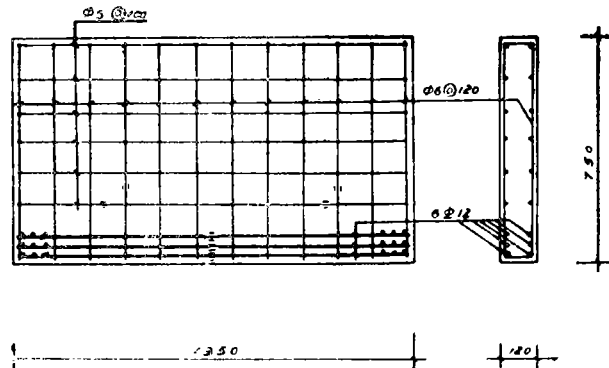


图 2

表1 试验构件一览表

构件编号	几 何 尺 寸								纵 筋			腹 筋		f_c^t
	L mm	b mm	H mm	L_0 mm	h_0 mm	$\frac{a}{h_0}$	L_0 H	垫板长	配筋	μ %	f_y^t N/ mm ²	水平 μ kH %	垂直 μ kV %	N/ mm ²
								Lc mm						
Ⅲ-D-1	1350	120	750	1125	680	0.55	1.5	170	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	30.5
Ⅲ-D-2	1350	120	750	1125	680	0.55	1.5	140	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	31.9
Ⅲ-D-3	1350	123	751	1125	680	0.55	1.5	100	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	32.8
Ⅲ-D-4	1350	124	749	1125	680	0.55	1.5	70	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	26.1
Ⅲ-D-5	1350	120	750	1125	680	0.55	1.5	70	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	24.1
Ⅲ-D-6	1350	122	750	1125	680	0.55	1.5	70	6Φ12	0.83	409.4	0.48	0.4	25.4

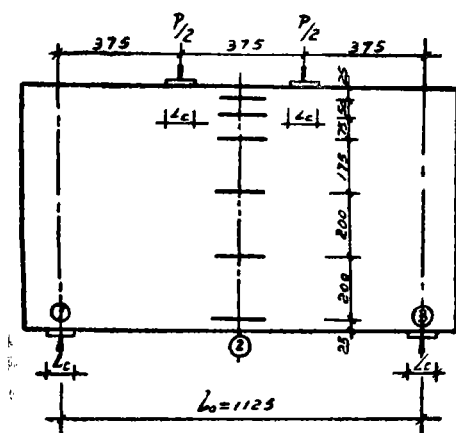


图 3

试件在500tf压力机上加荷。用电阻应变仪量测钢筋和混凝土的应变。用百分表量测挠度。借助放大镜观察和量测裂缝。用X—Y函数仪记录跨中荷载——挠度曲线。仪表布置及加荷方式见图3。

加荷初始和中间阶级试件的变化和一般有腹筋深梁相同。先出现垂直裂缝,随后出现斜裂缝。随着荷载增大,裂缝伸延,宽度增大。X—Y函数仪的记录曲线在出现垂直裂缝及斜裂缝处均发生转折。当试件接近破坏时,有的试件在局压区先现出裂缝,随后荷载稍有增加局压区即被压坏,局压区的开裂荷载和破坏荷载很接近。

有的试件破坏前基本没有予兆,当荷载增加到某一数值时局压区突然破坏,大块混凝土被剥落。6个试件均为局压破坏,试验结果见表2。

表2 试验结果

构件编号	垂直裂缝出现荷载 F_{cr}^v (kN)	斜裂缝出现荷载 F_{cr}^s (kN)	劈裂裂缝出现荷载 F_{cr}^s (kN)	破坏荷载 F_u (kN)	破坏形式
Ⅲ-D-1	390	410		1010	支座处压坏
Ⅲ-D-2	350	410	810	960	支环处压坏
Ⅲ-D-3	330	470	490	890	支座处压坏
Ⅲ-D-4	330	410	650	850	加荷端压坏
Ⅲ-D-5	290	390	410	850	加荷端, 支座 均压坏
Ⅲ-D-6	280	400	490	730	加荷端, 支座 均压坏

三、破坏形态

根据对收集到的34个局压破坏深梁试件的分析,深梁的局压破坏形态大致有以下三种:

1. 垫板处混凝土局部压碎。这种破坏在支座垫板和加荷垫板下都有可能发生,如图4所示。局压区混凝土先出现细短裂缝,以后随着荷载的增加,垫板处混凝土压碎的范围扩大,破坏时梁的其它部分尚无明显破坏的迹象。

2. 局压、斜压破坏同时发生。这种破坏大多发生在支座上方的局压锚固区,如图5所示。首先在支座上方出现辐射状裂缝,随后相当于支座和“拱腹”处的混凝土出现许多大致平行于支座加荷点连线的斜裂缝,呈斜压破坏迹象,最后支座上方混凝土局部压碎。

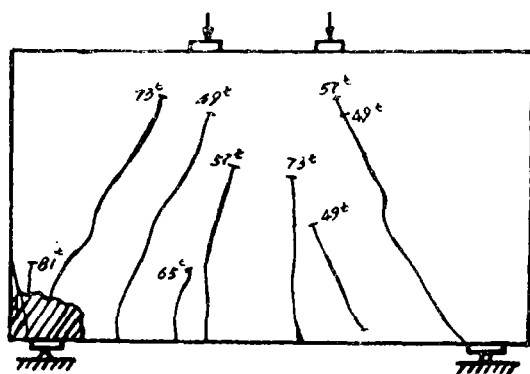


图4 (Ⅲ-D-3)

3. 局部纵向劈裂破坏。这种破坏发生于梁顶加荷垫板之下,如图6所示。由垫板传来的竖向压应力在局压区混凝土内产生的横向拉应变使加荷垫板下的混凝土产生沿梁纵向的裂缝。破坏时局压区混凝土被大块劈掉,垫板下混凝土明显下凹,破坏突然,一般无明显予兆。

四、局部承压验算

我们首先对深梁局压强度提高系数进行分析。通过反算34个局压破坏的深梁试件实际的

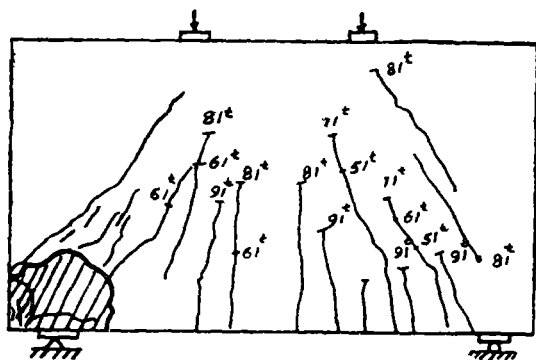


图5 (Ⅲ-D-2)

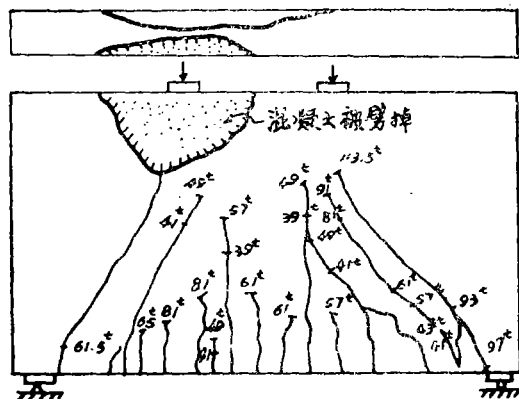


图6 (Ⅲ-D-2)

β_c 的值并与按TJ10—74规范求得的 β_c 进行对比, 结果见表3。表中1~18号试件为支座处局压破坏, 19~34号试件为加荷处局压破坏, 可以看出, 不论是支座处局压破坏的试件还是加荷处局压破坏的试件其实际的 β_c 值都与按规范求得的 β_c 值相差不远, 说明支座和加荷处的局压验算可统一考虑。从表中还看出, 局压区间接配筋的Ⅲ—D—5、Ⅲ—D—6号试件的 β_c 值大为提高, 说明间接配筋对提高深梁的局压强度是有效的。31个无间接配筋的局压试件(Ⅲ—D—4试件的 β_c 值大大高于其它试件, 其原因尚待进一步分析, 暂未计入)的 β_c/β_{c1} 的平均值为1.028, 变异系数为0.13。说明按TJ10—74规范的方法求得的 β_c 与深梁局压实际的 β_c 值较为符合。图7是 β_c/β_{c1} 值的频率和频数直方图, 可以看出 β_c/β_{c1} 的值基本符合正态分布, 按TJ10—74规范取 A_d 按(1)式计算局压强度, 其可靠度指标 $\beta = 3.766 \sim 3.936$, 是满足要求的。(表5)

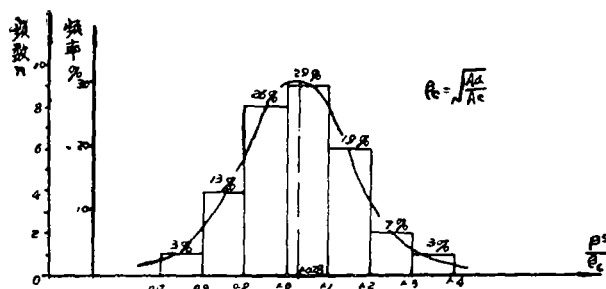


图 7

但新修订的规范^[4]规定局压计算底面积 A_b 按“同心、对称、有效面积”的原则确定, 沿局压面积 A_1 各边向外扩大的有效距离不超过承压板短边尺寸 b , 这在三面临空或邻边临空的局压情况下 $A_b = A$ 。 $\beta_{c1} = 1$ 偏于安全。但在深梁常见的两对边临空的局压情况下, TJ10—74规范规定局压计算底面积沿承压板向外扩大的有效距离不超过短边尺寸 b 的一半, 而新规范局压计算底面积取值偏大, 因而使深梁情况下相应的 β_{c1} 也偏大。按新规范计算的 A_b 及相应的 β_{c1} 和 β_c/β_{c1} 的值列于表4。 β_c/β_{c1} 平均值为0.905, 变异系数为0.186。可靠度分析结果见表5。

序 号	构件编号	R_o kg/cm ²	A_c cm ²	Λ_d (按 T_1 10—74) cm ²	σ_c kg/cm ²	$\beta_c = \frac{\sigma_c}{R_o}$	规范 $\beta_c = \sqrt{\frac{\Lambda_d}{\Lambda_c}}$	$\frac{\beta_c}{\beta_c}$
1	Ⅲ-D-1	214	204	309	248	1.21	1.23	0.98
2	Ⅲ-D-2	223	168	291	286	1.28	1.32	0.97
3	Ⅲ-D-3	230	120	240	371	1.61	1.41	1.14
4	Ⅲ-F-12	184	168	291	271	1.47	1.32	1.11
5	Ⅲ-F-13	200	168	291	339	1.70	1.32	1.29
6	Ⅲ-F-14	169	168	291	265	1.56	1.32	1.18
7	R-1	245	168	312	332	1.35	1.36	0.99
8	R-3	249	168	312	360	1.45	1.36	1.07
9	R-5	256	168	312	425	1.66	1.36	1.22
10	R-6	285	168	312	407	1.43	1.36	1.05
11	R-7	260	168	312	280	1.08	1.36	0.79
12	Ⅱ-1	158	120	220	251	1.59	1.35	1.18
13	Ⅱ-15	204	120	220	297	1.45	1.35	1.07
14	Ⅱ-16	211	120	220	306	1.45	1.35	1.07
15	Ⅱ-23	202	150	250	240	1.19	1.29	0.92
16	Ⅲ-D-4	183	84	168	482	2.63	1.41	
17	Ⅲ-D-5	169	84	168	505	2.99	1.41	
18	Ⅲ-F-6	178	84	168	434	2.44	1.41	
19	Ⅲ-F-1	236	168	312	289	1.22	1.36	0.90
20	Ⅲ-F-2	298	168	312	345	1.16	1.36	0.85
21	Ⅲ-F-3	320	168	312	360	1.12	1.36	0.82
22	Ⅲ-F-4	257	168	312	360	1.40	1.36	1.03
23	Ⅲ-F-5	246	168	312	245	1.40	1.36	1.03
24	Ⅲ-F-6	213	168	312	299	1.40	1.36	1.03
25	Ⅲ-F-8	263	168	312	312	1.19	1.36	0.88
26	Ⅲ-F-9	282	168	312	311	1.10	1.36	0.81
27	Ⅲ-F-10	255	168	312	338	1.32	1.36	0.97
28	Ⅱ-6	160	120	220	287	1.79	1.35	1.32
29	Ⅱ-8	186	120	220	229	1.22	1.35	0.91
30	Ⅱ-12	199	120	220	260	1.31	1.35	0.97
31	Ⅱ-13	211	120	220	292	1.38	1.35	1.02
32	Ⅱ-14	226	120	220	350	1.55	1.35	1.14
33	Ⅱ-18	195	120	220	275	1.41	1.35	1.04
34	Ⅱ-19	182	120	220	275	1.51	1.35	1.12
								$\bar{\mu}=1.028$ $\sigma=0.134$ $\delta=0.130$

表4

序号	试件编号	局压面积 A_L (cm^2)	按新规范计算 $\beta_{c1} = \sqrt{\frac{A_b}{A_1}}$	$\beta_{c1} = \sqrt{\frac{A_b}{A_1}}$	$\beta_{c2} = 0.8 \sqrt{\frac{A_b}{A_1} + 0.2}$	β_{c2} / β_{c1}	$\beta_{c3} = 0.7 \sqrt{\frac{A_b}{A_1} + 0.3}$	β_{c3} / β_{c2}	$\beta_{c4} = 0.8 \sqrt{\frac{A_b}{A_1}}$	β_{c4} / β_{c3}	β_{c4} / β_{c1}
1	Ⅲ-D-1	204	1.150	1.051	1.120	1.080	1.105	1.094	1.000	1.094	1.210
2	Ⅲ-D-2	168	1.267	1.009	1.214	1.054	1.187	1.077	1.014	1.077	1.262
3	Ⅲ-D-3	120	1.500	1.073	1.400	1.150	1.350	1.192	1.200	1.192	1.341
4	Ⅲ-F-12	168	1.267	1.159	1.214	1.210	1.187	1.237	1.014	1.237	1.449
5	Ⅲ-F-13	168	1.267	1.340	1.21	1.400	1.187	1.431	1.014	1.431	1.676
6	Ⅲ-F-14	168	1.267	1.230	1.214	1.284	1.187	1.313	1.014	1.313	1.538
7	R-1	168	1.67	0.819	1.518	0.889	1.453	0.928	1.318	0.928	1.024
8	R-3	168	1.647	0.880	1.518	0.955	1.453	0.997	1.190	0.997	1.104
9	R-5	168	1.647	1.007	1.518	0.955	1.453	1.142	1.318	1.142	1.259
10	R-6	168	1.647	0.867	1.518	0.942	1.453	0.983	1.318	0.983	1.084
11	R-7	168	1.647	0.655	1.518	0.711	1.453	0.743	1.318	0.743	0.819
12	Ⅱ-1	120	1.443	1.101	1.354	1.173	1.310	1.213	1.154	1.213	1.376
13	Ⅱ-15	120	1.443	1.004	1.354	1.070	1.310	1.106	1.154	1.106	1.255
14	Ⅱ-16	120	1.443	1.004	1.354	1.070	1.310	1.106	1.154	1.106	1.255
15	Ⅱ-23	150	1.290	0.921	1.232	0.965	1.203	0.988	1.032	0.988	1.152
19	Ⅲ-F-1	168	1.647	0.740	1.518	0.803	1.453	0.839	1.318	0.839	0.925
20	Ⅲ-F-2	168	1.647	0.704	1.518	0.764	1.453	0.770	1.318	0.770	0.880
21	Ⅲ-F-3	168	1.647	0.679	1.518	0.737	1.453	0.770	1.318	0.770	0.849
22	Ⅲ-F-4	168	1.647	0.849	1.518	0.922	1.453	0.963	1.318	0.963	1.062
23	Ⅲ-F-5	168	1.647	0.849	1.518	0.922	1.453	0.963	1.318	0.963	1.062
24	Ⅲ-F-6	168	1.647	0.849	1.518	0.922	1.453	0.963	1.318	0.963	1.062
25	Ⅲ-F-8	168	1.647	0.722	1.518	0.783	1.453	0.818	1.318	0.818	0.902
26	Ⅲ-F-9	168	1.647	0.667	1.518	0.724	1.453	0.756	1.318	0.756	0.834
27	Ⅲ-F-10	168	1.647	0.801	1.518	0.869	1.453	0.908	1.318	0.908	1.001
28	Ⅱ-6	120	1.632	1.096	1.506	1.188	1.443	1.240	1.306	1.240	1.370
29	Ⅱ-8	120	1.632	0.747	1.506	0.809	1.443	0.845	1.306	0.845	0.933
30	Ⅱ-12	120	1.632	0.802	1.506	0.869	1.443	0.907	1.306	0.907	1.002
31	Ⅱ-13	120	1.632	0.845	1.506	0.916	1.443	0.956	1.306	0.956	1.056
32	Ⅱ-14	120	1.632	0.949	1.506	1.028	1.443	1.074	1.306	1.074	1.186
33	Ⅱ-18	120	1.632	0.863	1.506	0.936	1.443	0.977	1.306	0.977	1.079
34	Ⅱ-19	120	1.632	0.924	1.506	1.002	1.443	1.046	1.306	1.046	1.155
n=31				$\mu = 0.905$		$\mu = 0.972$		$\mu = 1.006$			$\mu = 1.133$
				$\delta = 0.168$		$\delta = 0.169$		$\delta = 0.169$			$\delta = 0.209$
				$\delta = 0.186$		$\delta = 0.174$		$\delta = 0.168$			$\delta = 0.184$

表5 可靠度分析结果

序号	公式形式	砼等级	K_R	σ_R	β
1	$\beta_{c1} = \sqrt{\frac{A_b}{A_L}}$	C20	1.502	0.296	3.165
		C30	1.276	0.267	2.901
		C40	1.222	0.246	2.955
2	$\beta_{c2} = 0.8 \sqrt{\frac{A_b}{A_L}} + 0.2$	C20	1.613	0.263	3.763
		C30	1.371	0.237	3.488
		C40	1.312	0.220	3.529
3	$\beta_{c3} = 0.7 \sqrt{\frac{A_{bot}}{A_L}} + 0.3$	C20	1.670	0.252	4.026
		C30	1.418	0.230	3.706
		C40	1.358	0.214	3.748
4	$\beta_{c4} = 0.8 \sqrt{\frac{A_{bct}}{A_L}} \geq 1$	C20	1.881	0.295	3.895
		C30	1.598	0.265	3.706
		C40	1.530	0.244	3.811
5	按TJ10-74 $\beta = \sqrt{A_d/A_c}$	C20	1.706	0.265	3.933
		C30	1.448	0.231	3.776
		C40	1.388	0.207	3.936

从表5中看出：按新规范计算的 β_{c1} 在局压验算时可靠度指标 $\beta = 2.901 \sim 3.165$ ，不满足要求， β_{c1} 的值应予降低。表4、表5中还列出了按局压专题组织出的(3)式计算及可靠度分析的结果，可见 β 仍嫌偏低。仿照(3)式的形式取：

$$\beta_c = 0.7 \sqrt{\frac{A_b}{A_L}} + 0.3 \quad (6)$$

进行同样的计算和分析，从表4、表5可看出平均值为1.000，变异系数为0.168， $\beta = 3.706 \sim 4.026$ ，满足要求。采用(6)式计算 β_{c3} 可自动满足 $\beta_c \geq 1$ ，平均值和变异系数都较好，但因采用两顶表达式和新规范的一顶式不协调，为和新规范公式协调，建议采用

$$\beta_c = 0.8 \sqrt{\frac{A_b}{A_L}} \quad (7)$$

当按(7)式求得的 $\beta_c < 1$ 时取 $\beta_c = 1$ 。按(7)式计算的 β_{c4} 及 β_{c4}/β_{c4} 的值见表4，平均值为1.133，变异系数为0.184，从表5中看出 $\beta = 3.706 \sim 3.895$ ，可靠度满足要求。

根据专题组深梁设计方法的建议，深梁抗剪强度上限取

$$V_{umax} = 0.15f_c b h \quad (8)$$

当局压强度大于抗剪强度即 $\beta_c f_c A_L \geq 0.15f_c b h$ 时局压破坏不会发生。设 $A_L = l_c b$ ， l_c 为支承长度， b 为梁宽。 β_c 取最小值1代入(8)式可得 $l_c \geq 0.15h$ 时可不进行局压验算。

参 考 文 献

- 〔1〕 深梁专题组: “钢筋混凝土简支深梁的试验研究” 建筑技术通讯 建筑结构 1984年第1期
- 〔2〕 深梁专题组 “钢筋混凝土简支深梁的试验研究”: (综合报告) 1982. 10.
- 〔3〕 局压专题组: “混凝土与钢筋混凝土的局部承压问题” 建筑技术通讯 建筑结构 1982年第2期
- 〔4〕 《钢筋混凝土结构设计规范》(送审稿)及编制说明 1986. 2. 北京.
- 〔5〕 《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10--74)
- 〔6〕 蔡绍怀: “混凝土及配筋混凝土的局部承压强度” 土木工程学第四卷第6期 1963. 11.
- 〔7〕 《建筑结构设计统一标准GBJ98--84(试行)》 1968年 北京
- 〔8〕 深梁专题组: “钢筋混凝土深梁设计建议” 1983. 8.

EXPERIMENTAL RESEARCH AND RELIABILITY ANALYSIS OF LOCAL COMPRESSION IN REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

Gong Shaoxi Liu Lixin

(Civil Engineering and Architecture Department, Zhengzhou Institute
of Technology)

Abstract

In this paper, the behaviour and the modes of local compressive failure in reinforced concrete deep beams are specially discussed. The analysis results of the experiments on 34 specimens of reinforced concrete deep beams occurring local compressive indicate that the reliability index of local compressive strength calculated by the formula of PRC code TJ10—74 is satisfied, but the reliability index of local compressive strength calculated by the formulas of new PRC code and the research group of local compression can not be satisfied. The improved formula and result of reliability analysis are given in this paper, the minimal supporting length that needn't to calculate local compressive strength in reinforced concrete deep beams is also given by authors.

Key words: deep beams, local compression, reliability analyse.