

钢筋混凝土深梁最小腹筋率的实验研究*

龚绍熙 王贞祥** 刘立新 尹水文***

(土建系结构教研室)

提 要

本文给出两组共14根深梁最小腹筋率的试验研究成果。综合研究了钢筋混凝土深梁专题组已进行的有腹筋深梁的试验成果。在此基础上,从不同的角度分析了深梁最小腹筋率的取值问题,最后提出最小腹筋率的合理取值及相应的构造措施和建议。

一、引 言

文献[1][2]指出:深梁中配置腹筋对提高斜截面抗裂度作用甚微,但可限制斜裂缝的开展,适量提高抗剪强度,防止劈裂破坏和增加破坏时的延性。对形成钢筋骨架,保证梁的整体性也是必要的。若深梁的最小腹筋率规定过小,则不能有效地发挥上述各种作用。反之,则增加了不必要的用钢量,造成浪费。因此,确定适宜的最小腹筋率,是深梁十分重要的构造问题。

综合报告[1]和分项报告[2]在参考其他国家规范关于深梁最小腹筋率的规定,并根据深梁专题组有限的几组实验结果,建议最小腹筋率为:对于光圆钢筋的绑扎骨架,竖向0.15%,水平0.20%,对于螺纹钢筋的绑扎骨架或光圆钢筋的焊接骨架,竖向0.10%,水平向0.15%。

“港口工程技术规范——混凝土和钢筋混凝土设计部分(JTJ220—82)”[3]附录八深梁中规定:对于光圆钢筋,竖向0.15%,水平向0.25%;对于螺纹钢筋,竖向0.10%,水平向0.20%。

“钢筋混凝土筒仓设计规范(送审稿)”[4]关于矩形筒仓仓壁的构造规定:仓壁最小厚度不宜小于15cm,宜配置内外侧双层钢筋。其竖向和水平钢筋直径,对于柱支低壁浅仓不宜小于 $\phi 8$,对于柱支高壁浅仓和深仓的分散配筋,不宜小于 $\phi 10$;间距不宜大于200mm。对最小壁厚,分别相当于配筋率为0.34%和0.52%。

文献[5]用分项表达式的形式并采用具有一定保证率的下包线给出深梁抗剪强度计算公式的建议。公式的下限值对应的最小腹筋率为 $\mu_{\min} = 0.035 R_s / R_c$ 。

这一形式与浅梁类似,但取值要高。

本文首先给出两组共14个深梁最小腹筋率的试验研究成果。综合深梁专题组已进行的有腹筋深梁的试验成果,分别从不同角度探讨深梁最小腹筋率的合理取值问题。最后得出适宜

* 参加实验工作的还有土建系李天玉、秦长明、王春光、苏克俭、陈列等。郑州市建二公司;冯桂英、孙伟通等、

** 工民建专业83年毕业生、*** 郑州市第二建筑公司

的最小腹筋率和构造要求的建议。

二、试验研究

1. 试验构件：通过两组不同高跨比和不同剪跨比的深梁试验，研究不同腹筋率对限制斜裂缝宽度的作用以及对深梁破坏形态，抗剪强度和延性的影响。

试验构件基本特征见表1。钢筋的力学特性见表2。

构体在加工厂采用525号硅酸盐水泥，中砂5—20mm碎石，用搅拌机拌和混凝土。卧式浇捣，小振动棒振实。室外浇水自然养护。

2. 试验简况：试验在500t压力弯曲试验机上进行。在构件顶面对称施加两个集中荷载。用2×10预埋电阻片测钢筋应变；用5×100电阻片及手持引伸仪测混凝土应变；用百分表测挠

表 1

序 号	构 件 编 号	几 何 尺 寸cm				纵 筋		竖 向 腹 筋		水 平 腹 筋		R
		b	H	H ₀	L ₀	A _g	u%	配 筋	μ _k v%	配 筋	μ _k H%	
1	Ⅲ—F—1	12.4	75	68.2	74.9	(6.9) 6Φ42	0.814	Φ2.73⊙200	0.047	Φ2.73⊙100	0.094	337
2	—2	12.5	75	68.2	75	(6.9) 6Φ12	0.807	Φ4.27⊙210	0.11	Φ4.27⊙140	0.164	426
3	—3	12.2	75	68.2	74.8	(6.9) 6Φ12	0.827	Φ4.27⊙140	0.168	Φ4.27⊙105	0.224	457
4	—4	12.1	75.5	68.6	75.5	(6.9) 6Φ12	0.832	Φ6.48⊙240	0.227	Φ6.48⊙190	0.287	367
5	—5	12.1	74.9	68.1	75.2	(6.9) 6Φ12	0.839	Φ6.48⊙190	0.287	Φ6.48⊙160	0.341	351
6	—6	12.2	75.3	68.5	75.2	(6.9) 6Φ12	0.827		0		0	305
7	—7	12.3	75.1	68.3	112.5	(6.9) 6Φ12	0.823	Φ2.73⊙200	0.047	Φ2.73⊙100	0.094	438
8	—8	12	75.5	68.7	112.3	(6.9) 6Φ12	0.838	Φ4.27⊙210	0.114	Φ4.27⊙140	0.17	376
9	—9	12.3	75	68.2	111.5	(6.9) 6Φ12	0.82	Φ4.27⊙140	0.166	Φ4.27⊙105	0.222	403
10	—10	12.7	75.5	68.7	112.5	(6.9) 6Φ12	0.792	Φ6.48⊙240	0.216	Φ6.48⊙190	0.273	364
11	—11	12.4	75.1	68.3	112.4	(6.9) 6Φ12	0.829	Φ6.48⊙190	0.282	Φ6.48⊙160	0.538	339
12	—12	12.3	75	68.2	114	(6.9) 6Φ12	0.82		0		0	263
13	—13	12.2	75	68.2	112.4	(6.9) 6Φ12	0.827	Φ6.48⊙120	2.451	Φ6.48⊙100	0.541	285
14	—14	12.5	75	68.2	111.8	(6.9) 6Φ12	0.807	Φ6.48⊙120	0.44	Φ6.48⊙100	0.526	241

注: III-F-13 两层钢筋网之间加了S形箍

III-F-14 两层钢筋网之间加了环箍

表 2

名 义 直 径	实 际 直 径	屈 服 强 度 Kg/cm^2	极 限 强 度 Kg/cm^2	延 伸 率 %	备 注
$\Phi 2.8$	2.73mm	3011	3792	18	12# 丝
$\Phi 4$	4.27	3100	3893	26	8# 丝
$\Phi 6$	6.48	4975	5264	21	
$\Phi 12$	12.11	4094	5946	29	

度及水平变位;用X—Y函数仪记录通过电测挠度计及压力传感器测得的荷载——挠度曲线。试验时记录了竖直裂缝和斜裂缝出现时的荷载,以及裂缝宽度分别为0.2mm及0.3mm时的荷载和极限荷载。观测各级荷载下的裂缝宽度。

构件试验装置和仪表布置详见图1。

3. 试验结果

深梁从加荷到破坏经历了弹性带垂直、斜裂缝工作以及破坏等工作阶段。其典型的荷载——挠度曲线如图2所示。

当加荷到 $(0.2 \sim 0.4) P_F$ 时,首先出现垂直裂缝。但当斜裂缝稍后出现时,垂直裂缝宽度即不再增长。或者当新斜裂缝出现时,附近斜裂缝增长缓慢甚至不再增长。如图3所示。

劈裂裂缝大约在 $0.5 \sim 0.9 P_F$ 时出现。延伸很长, δ_f 约为 $0.15 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$,常常伴有响声。因此劈裂裂缝出现带有突然性。

裂缝出现引起深梁内应力重分布,因此在荷载挠度曲线(图2),荷载——钢筋应变曲线(图4、5)中引起转折或突变。其中尤以斜裂缝出现引起的变化最为显著。支座边截面纵筋应力突然增大,并与跨中截面纵筋应力趋于一致。深梁转化为拉杆拱的受力模型。穿过斜裂缝的垂直腹筋应力由压变拉,和水平腹筋应力同时增大。斜压破坏时都能达到屈服。

由电阻应变仪测得的或由手持引伸仪测得的深梁跨中竖直接面水平应变分布表明,深梁跨中水平应变分布不符合平截面假定(图6、7)。

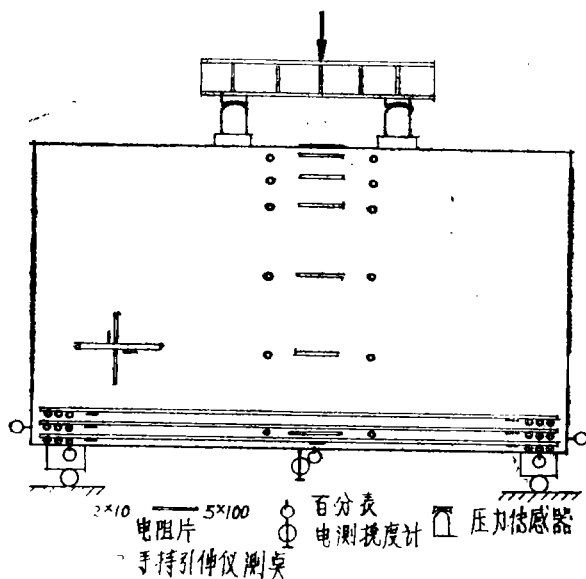


图 1

本试验在加荷点设置两台压力传感器,在跨中放置一个电测挠度计,通过Y₅D-2动态应变仪接到一台双笔X-Y函数记录仪上。故可自动记录两条荷载—挠度全过程曲线。如图8所示。通过该曲线可以准确测得 P_1 和 P_2 , 敏感地反映裂缝出现时的荷载,并可看出深梁发生斜压或局压破坏时仍然具有一定的延性。

其 $K_i = \frac{f_u}{f_y} = 1.23$ 。

全部构件主要试验结果详见表3。

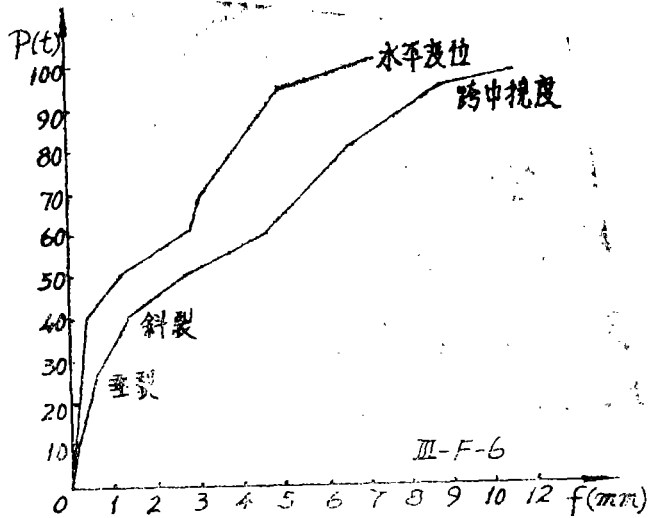


图 2

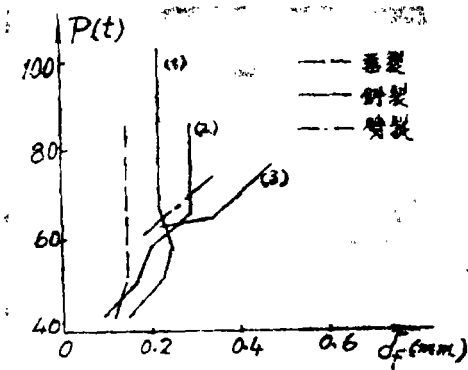


图 3

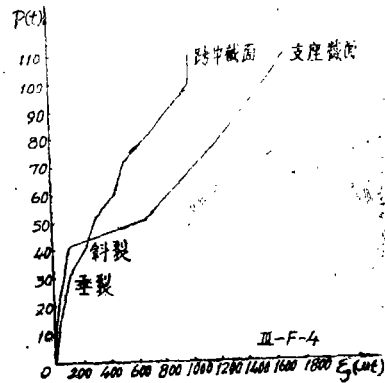


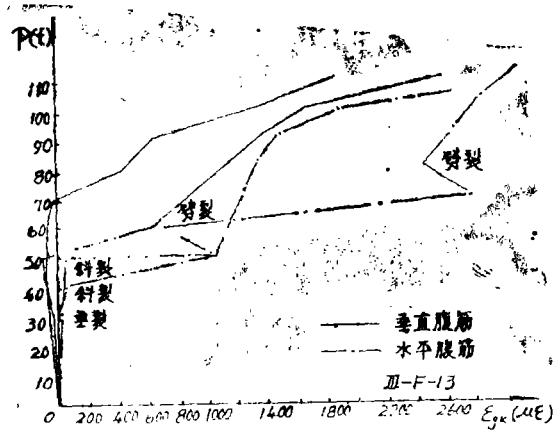
图 4

三、最小腹筋率的确定

我们试图从以下几个方面来分析和确定最小腹筋率:

1. 腹筋对抗剪强度的作用

文献[5]指出:腹筋对抗剪强度的作用比浅梁小得多,最大不超过总值的30%。当腹筋配置太少时,则对抗剪强度几乎没有什么影响。我们从这一角度出发,根据实验结果,给出最小腹筋率为:



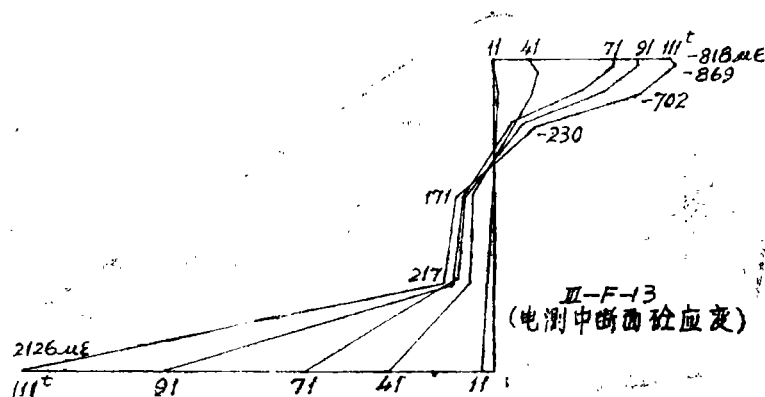


图6

表3

序号	构件编号	Q _F (t)	Q _{fl} (t)	Q _f (0.2) (t)	Q _p (t)	6f _{max} (mm)	Δ f (mm)	破坏特征	破坏形态
1	Ⅲ-F-1	33.5	30.5	36.5	48.5	0.32	0.48	加荷点偏局压、斜压坏	偏局压 (斜压)
2	-2	30.5	22.5	40.5	58	0.45	0.55	加荷点偏局压坏, 支座纵筋屈服	偏局压 (斜弯)
3	-3	30.25	24.5	40.5	60.5	0.50	0.32	加荷点混凝土下陷0.8cm局、压斜压坏	局压 (斜压)
4	-4	20.5	25.5	40.5	60.5	0.4	0.59	加荷点纵裂偏局压坏	偏局压
5	-5	25.5	30.5	35.5	58	0.62	0.53	加荷点局压斜压坏	局压 (斜压)
6	-6	23	25.5	30.5	50.3	0.60	0.50	加荷点混凝土局压坏	局压
7	-7	16.5	19.75	20.5	48.5	0.90	0.97	加荷点至支座斜压坏	斜压 (偏局压)
8	-8	20.5	20.5	24.5	52.5	0.70	1.25	加荷点局压坏支座纵筋屈服	局压 (斜弯)
9	-9	16.5	16.25	20.5	52.25	0.65	1.76	沿加荷点至支座边缘斜向压坏纵筋屈服	斜压 (斜弯)
10	-10	19.5	20.5	24.5	56.5	0.95	1.26	加荷点混凝土偏局压坏支座纵筋腹筋屈服	偏局压 (斜弯)
11	-11	18	18	25.5	53.75	1.2	1.31	加荷点至支座出行斜裂缝外鼓	斜压
12	-12	15.5	18	20.5	45.5	1.3	1.38	支座混凝土斜压坏纵筋屈服	斜压 (局压斜弯)
13	-13	18.5	20.5	30.5	57	1.5	2.61	加荷点处压碎下凹0.7cm纵腹筋屈服	局压 (剪弯)
14	-14	13.5	20	25.5	44.5	0.55	0.91	支座处偏局压坏水平腹筋屈服	偏局压

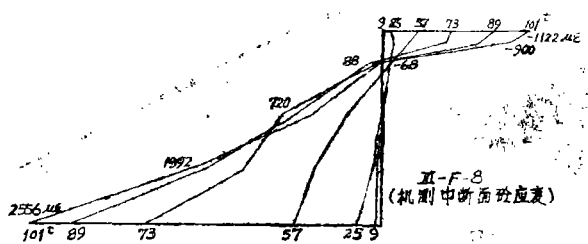


图 7

$$\mu_{kmin} = 0.035 R_a / R_d$$

根据此式算出的深梁最小腹筋率见表4。

表 4

混凝土	150*	200*	250	300*	400*
钢 筋					
I 级	0.12%	0.16%	0.21%	0.26%	0.34%
II 级	0.09%	0.11%	0.15%	0.18%	0.24%
III 级	0.08%	0.10%	0.13%	0.16%	0.21%

2. 腹筋对限制斜裂缝宽度的作用

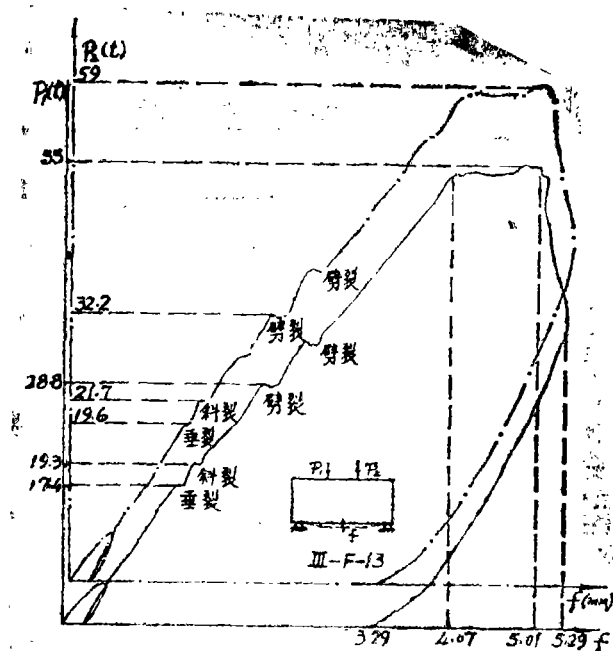


图8 (局压破坏的典型p-f曲线)

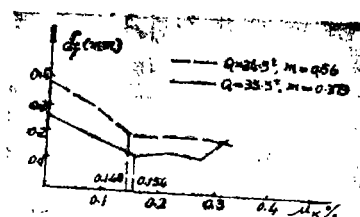


图9

配置一定数量的腹筋能够限制斜裂缝的开展。腹筋直径愈小, 间距愈小, 这种作用愈大。表五给出本次试验构件的斜裂缝开展情况。可以看出, 一定数目的细直径的间距不太大的腹筋限制斜裂缝开展的作用是很明显的。

为了进一步说明问题, 图9 给出了两条不同 m , 当 Q 一定时, δ_f 随 μ_k 增加而减少并趋于稳定的曲线。可以看出, 当 $\mu_k = 0.15\%$ 以后, 再增加 μ_k 时, δ_f 变化不大。故从限制斜裂缝宽度的角度考虑, 可取最小腹筋率 $\mu_{kmin} = 0.15\%$

3. 腹筋对增加深梁剪切破坏时延性的作用

表 5

序号	构件号	$0/H_0$	$\mu_k\%$	剪力(t)及斜裂缝宽度(mm)											
				Q	25.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5	48				
1	Ⅲ-F-6	0.373	0	δ_f	裂	0.12	0.2	0.3	0.4	0.55	0.6				
2	-1	0.373	0.088	Q	30.5	30.5	33.5	36.5	39.5	42.5					
				δ_f	裂	0.1	0.15	0.20	0.22	0.28					
3	-2	0.373	0.154	Q	22.5	22.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5	50.5	53	55.5	
				δ_f	裂	0.05	0.06	0.1	0.13	0.2	0.2	9.35	0.45	0.95	
4	-3	0.373	0.211	Q	24.5	35.5	40.5	45.5	50.5	53	55.5	58			
				δ_f	裂	0.15	0.2	0.3	0.35	0.37	0.45	0.50			
5	-4	0.373	0.28	Q	25.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5	50.5	55.4			
				δ_f	裂	0.08	0.1	0.13	0.2	0.29	0.35	0.4			
6	-5	0.373	0.333	Q	30.5	30.5	35.5	40.5	45.5	50.5	55.5				
				δ_f	裂	0.15	0.2	0.26	0.38	0.5	0.62				
7	-12	0.56	0	Q	18	20.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5				
				δ_f	裂	0.3	0.4	0.5	0.7	0.95	1.7				
8	-7	0.56	0.075	Q	19.75	20.5	24.5	28.5	32.5	36.5	38.5	40.5	42.5	44.5	46.5
				δ_f	裂	0.2	0.3	0.38	0.45	0.55	0.7	0.85	0.9	0.95	1.0
9	-8	0.56	0.148	Q	20.5	20.5	24.5	28.5	32.6	36.5	43.5	46.5	50.5		
				δ_f	裂	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.5	0.7		
10	-9	0.56	0.204	Q	16.25	16.5	20.5	24.5	28.5	32.5	36.5	38.5	40.5	42.5	
				δ_f	裂	0.15	0.2	0.25	0.35	0.5	0.5	0.55	0.62	0.65	
11	-10	0.56	0.27	Q	20.5	20.5	24.5	28.5	32.5	36.5	40.5	44.5	48.5	52.5	
				δ_f	裂	0.15	0.20	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.8	0.95	
12	-13	0.56	0.52	Q	20.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5	50.5	55.5			
				δ_f	裂	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.15			
13	-14	0.56	0.52	Q	20	20.5	25.5	30.5	35.5	42.5					
				δ_f	裂	0.1	0.2	0.35	0.45	0.55					
14															

图10给出Ⅲ—F—7构件的P—f全过程曲线。该构件为斜压破坏， $\mu_{kV} = 0.047\%$ ， $\mu_{kH} = 0.094\%$ 。破坏时， $K_f = \frac{f_u}{f_y} = 1.32$ 。和无腹筋深梁破坏时延性相近。

图11为Ⅲ—F—9构件的P—f全过程曲线。该构件亦为斜压破坏， $\mu_{kV} = 0.166\%$ ， $\mu_{kH} = 0.222\%$ 破坏时， $K_f = \frac{f_u}{f_y} = 1.44$ ，延性有所提高。

因此，从提高延性的角度考虑，腹筋至少要配置0.2%以上。

综合以上几方面分析结果，并考虑腹筋对承受温度和收缩应力的作用以及在工程中实践中便于应用，建议深梁最小腹筋率按表6采用。

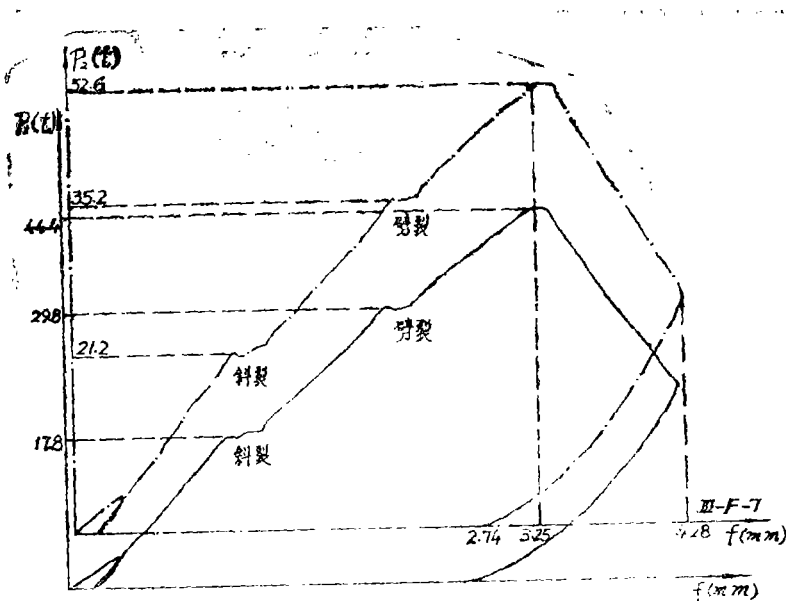
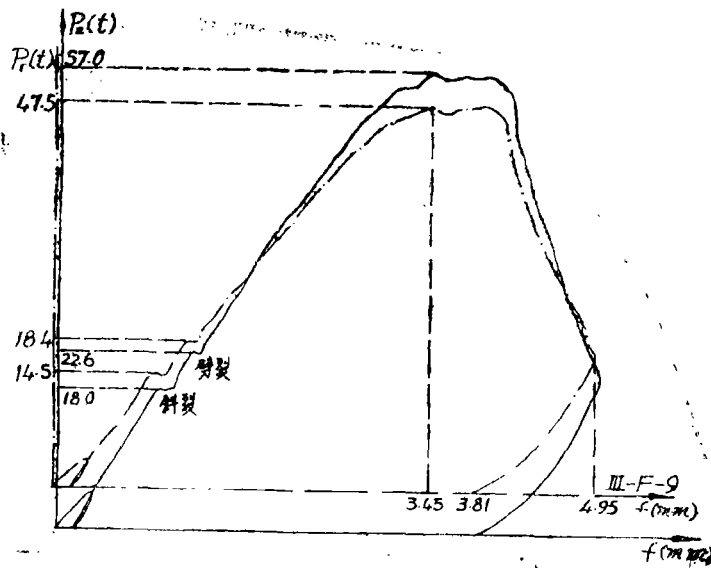


图10 (斜压破坏 μ_{kV} 较少) 表 6

钢筋类型	竖向腹筋	水平腹筋
I 级	0.20%	0.25%
II 级	0.15%	0.20%

此外，腹筋宜采用细直径钢筋，间距不宜过大。一般腹筋间距不得大于梁宽的2倍和300毫米。最小梁宽为140mm。

沿梁宽方向每隔500~700mm加一道 S 箍或环箍以加强两层钢筋网片的联系。并对提高抗剪强度，防止纵向劈裂破坏，限制斜裂缝开展有好处。

图11 (斜压破坏, μ 较大)

参 考 文 献

- (1) 深梁专题研究组: 钢筋混凝土简支深梁的试验研究(综合报告) 1982.10.
- (2) 龚绍熙执笔: 钢筋混凝土深梁斜截抗裂度、最小腹筋率和构造要求(分项报告) 郑州工学院土建系 1982.11
- (3) “港口工程技术规范——混凝土和钢筋混凝土设计部分”(JTJ 220—82)
- (4) 钢筋混凝土筒仓设计规范〈送审稿〉 1983.3
- (5) 龚绍熙, 王贞祥: 简支有腹筋深梁的抗剪强度 郑州工学院土建系 1983.7.
- (6) 钢筋混凝土深梁最小腹筋率的试验研究 郑州工学院工民建79级学生王贞祥毕业论文 1983.6