

中苏合作丰台科学研究基点專題之九

具有預应力鑚筋的薄腹版 預应力鋼筋混凝土梁的研究

鐵道科學研究院編

人 民 鐵 道 出 版 社

前 言

本專題的研究工作是在唐山鐵道學院橋梁教研組、鐵道科學研究院和中蘇合作
丰台科學研究基點共同領導下進行的。

本研究題目的蘇方負責人是 M. C. 魯登科工程師（兼），中方負責人是張萬久
教授。

本文包括三次中間報告。第一和第二次中間報告的工作是由張萬久，何廣漢，
肖墨芳，孫天啓和陸乾文等同志集體完成的。第三次中間報告和附篇的工作是由張
萬久、何廣漢、張開敬、王福惠和孫天啓等同志共同完成的。許成業、朱穎、孫和
松、關書清、張之洲、趙成灝、周紹烈、趙庚羣等同志先後參加了梁的試驗工作。

全部試驗梁是在丰台橋梁工廠試驗車間製造的。梁的試驗工作是在鐵道科學研
究院結構試驗室內進行的。

目 录

前言

一、第一次中間报告的摘要	1
I 緒言	1
II 对現有普通鋼筋混凝土和預应力鋼筋混凝土梁抗剪强度研究資料的分析	2
III 試驗梁的基本尺寸及分組	12
IV 試驗梁制造方法簡述	16
二、第二次中間报告的摘要	16
I 試驗梁的設計	16
II 試驗梁的制造	20
三、第三次中間报告	20
I 試驗梁的構造和施工	20
II A 組梁的試驗	22
III 六片梁的动載試驗	32
IV 混凝土强度对梁的抗剪强度的影响	62
V 总结	65
四、双向預应力鋼筋混凝土薄腹版試驗梁的制造研究报告	66
I 混凝土的試驗研究	70
II 預应力鉚筋錨栓形式的試驗研究	76
III 鋼絲束的制造和試驗	88
五、用电阻应变仪測量 $\phi 3\text{mm}$ 鋼絲应变的試驗研究	94
I 概述	94
II 电阻絲片的粘貼手續和方法	94
III 防水層的做法	95
IV 試驗結果	95
V 結論	98
符号表	99
参考文献	100

一、第一次中間報告的摘要

1956 年 12 月

本文綜述了普通及預应力鋼筋混凝土梁的受剪破壞方式和原因。并根據試驗資料分析了鋼筋混凝土梁的受剪破壞現象。我們用摩列托 (O. Moretto), 波里山斯基 (M. C. Боришанский), 克拉克 (A. P. Clark), 莫地 (K. G. Moody) 和斯和耶 (E. M. Zwoyer) 等抗剪強度公式對幾種文獻所載的 322 根試驗梁進行了計算, 借以檢查這些公式的精確性及適用範圍。我們利用現有的試驗資料, 對影響工字形截面鋼筋混凝土梁的抗剪強度的各因素作了新的分析, 因此, 決定了試驗研究的方向及試驗梁的設計, 製造和試驗方法。

I 緒 言

為了增加鋼筋混凝土梁的跨度, 預应力鋼筋混凝土已得到廣泛的應用, 若同時採用預应力釐筋的薄腹版梁, 減輕腹版重量, 則可以獲得更大的效果。

1938 年在德國建造了一座具有預应力釐筋的公路簡支預应力鋼筋混凝土梁橋, 跨度為 33 m, 腹版厚度僅為 12 cm⁽¹⁾。

法國佛烈西涅 (E. Freyssinet) 於 1941 至 1950 年間, 先後築了跨越馬恩河的 6 座預应力鋼筋混凝土橋, 都是具有預应力釐筋的。橋式為兩鉸拱, 跨度 55~78 m。拱肋截面為箱形及工字形, 腹版厚度僅 10 cm⁽²⁾⁽³⁾。

1953 年蘇聯格里哥列夫 (Д. А. Григорьев), 設計並建造了一座跨度為 20.5 m 的預应力鋼筋混凝土鐵路梁橋, 橋跨的腹版厚 10 cm, 并具有預应力釐筋⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

各國工程師在設計預应力鋼筋混凝土梁的釐筋時, 都是將梁作為一個彈性體以計算主拉應力的數值並作為設計根據的⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。然而, 超載時則主拉應力比荷載增加的更快, 所以, 假如超載是可能的話, 就必需按極限抗剪強度來核算⁽⁴⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

計算預应力鋼筋混凝土梁抗剪強度還沒有可靠的公式。1935~37 年在德國曾經進行過具有預应力釐筋的預应力鋼筋混凝土梁的試驗, 梁的中部受撓曲破壞, 沒有得到關於梁的抗剪強度的資料⁽¹⁰⁾。1942 年英國艾云斯 (R. Evans) 也作過具有預应力釐筋的預应力鋼筋混凝土梁的試驗, 但沒有得到比較肯定的結論⁽¹¹⁾。蘇聯格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 近年進行了三根預应力鋼筋混凝土薄腹版梁的試驗, 其中兩根是具有預应力釐筋的。試驗結果認為可以用波里山斯基 (M. C. Боришанский) 公式來計算這種梁的抗剪強度⁽¹²⁾。

美國斯和耶 (E. M. Zwoyer) 曾經用沒有腹筋的長方形截面預应力鋼筋混凝土梁來進行試驗, 結果建議用類同於受壓破壞的抗彎強度公式來計算梁的抗剪強度⁽¹³⁾。

1953 年在倫敦舉行的國際預应力力學會中對預应力鋼筋混凝土梁的抗剪強度進行了很廣泛的討論, 英國愛比利斯 (P. W. Abeles) 和艾云斯 (R. Evans), 比國馬格涅爾 (G. Magnel) 都認為這是一個未解決的問題, 而且, 假如最大剪力和最大力矩

發生在同一截面上，則梁的抗剪強度將大大降低，更應特別注意⁽¹⁴⁾。

近年以來，在普通鋼筋混凝土梁抗剪強度方面也做了一些研究工作，如克拉克(A. P. Clark)⁽¹⁵⁾，維爾比(G. B. Wilby)⁽¹⁶⁾，卡拉巴斯(В. Т. Карабаш)⁽¹⁷⁾，莫地(K. G. Moody)⁽¹⁸⁾，摩列托(O. Moretto)⁽¹⁹⁾，波里山斯基(М. С. Боршанский)⁽²⁰⁾等。

上述研究工作指出鋼筋混凝土梁的抗剪強度隨，

1. 混凝土的截面 $b \times h_0$ 和強度 R 而增加；
2. 縱向鋼筋率 μ 而增加；
3. 腹筋率 $\frac{f_x}{b a_s}$ 而增加；
4. 梁高與受剪跨度*之比 $\frac{h_0}{a}$ 而增加；
5. 鋼筋的有效預應力（包括縱向和橫向）而增加；
6. 預應力縱向筋所受的剪力而增加。

然而必須指出由於試驗研究資料的缺乏，我們至今仍未能清楚地知道鋼筋混凝土和預應力鋼筋混凝土梁受剪破壞的原因。至於要比較準確地來計算梁的抗剪強度則更有待於進行大量的關於這方面的研究工作。

由於要推廣薄腹版預應力鋼筋混凝土梁的應用，我們便要更準確地來計算梁的抗剪強度。同時，靜不定預應力鋼筋混凝土結構的應用日益廣泛，又迫使我們經常遇到最大剪力和最大力矩同時發生的截面的計算問題。要很好地把這些問題加以解決，就有必要對梁的抗剪強度作進一步的研究。

本專題之研究目的在於，

1. 尋求薄腹版預應力鋼筋混凝土梁受剪破壞的原因；
2. 尋求混凝土強度、縱筋率、腹筋率、梁高與受剪跨度之比和鋼筋的有效預應力對於薄腹版預應力鋼筋混凝土梁的抗剪強度的影響；
3. 尋求薄腹版預應力鋼筋混凝土梁抗剪強度的計算方法；
4. 尋求斜裂縫出現時荷載的計算方法；
5. 比較幾種預應力配筋的形式。

研究的範圍將限於簡支梁。在同時受彎與扭轉作用下薄腹版梁的問題也暫不考慮。

II 對現有普通鋼筋混凝土和預應力鋼筋混凝土 梁抗剪強度研究資料的分析

1. 鋼筋混凝土梁的受剪破壞的方式及原因——在剪力和力矩的作用下，梁的腹部就會出現斜裂縫。由於斜裂縫的出現，可能引起以下方式的破壞（在此情況下梁的抗彎強度須大於抗剪強度），

* 梁的支點與最近集中荷載施力點的距離稱為受剪跨度。

(1) 梁在斜裂縫出現的同時即行破壞，亦即斜裂縫是在梁的極限荷載下出現的⁽¹⁸⁾。

(2) 斜裂縫出現以後，如荷載繼續增加，裂縫即繼續向上伸展，終于使裂縫上部的混凝土受壓破壞⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

(3) 斜裂縫出現以後，如荷載繼續增加，則裂縫即繼續向上伸展，終于使裂縫上部的混凝土受剪割破壞。⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

(4) 斜裂縫出現以後，由于沿斜裂縫截面上內力的重分布，受拉主筋的應力增加。對於比較短的梁如果又用光滑鋼筋的話，則主筋可能大量滑動而發生裹握力的破壞⁽¹⁸⁾。但是，這種方式的破壞是不多的（當然，在斜裂縫出現以前，也可能有裹握力的破壞。這是眾所周知的）。

(5) 斜裂縫出現以後或在出現的同時，梁沿拉筋被撕開，成水平裂縫而破壞。⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾

(6) 斜裂縫出現以後，在梁端附近沿主筋出現裂縫而使梁破壞。這種裂縫出現的原因是由于在很大的裹握應力作用之下，鋼筋與混凝土之間起楔著作用，混凝土受周界拉力而破壞⁽²²⁾。

上面主要是敘述長方形截面梁的受剪破壞方式。對於工字形截面的鋼筋混凝土梁來說，試驗研究的結果指出，主要的破壞方式是：

(1) 腹版混凝土沿豎向腹筋被壓碎并剝落⁽²³⁾，或在腹版沿豎向腹筋被壓碎后下翼緣被剪裂⁽¹²⁾。這種破壞可能是由于腹筋占去腹版的厚度過多，腹版在斜壓力下產生許多局部壓碎的點而拼成的。

(2) 腹版混凝土沿縱向腹筋被壓碎并剝落⁽²³⁾。

(3) 腹版混凝土沿斜裂縫被壓碎⁽²³⁾，或與沿斜裂縫壓碎的同時，腹版和上下翼緣接縫處的水平裂縫大量發展。腹版破壞時，斜裂縫并伸入下翼緣的上部⁽¹³⁾。

(4) 腹版沿斜裂縫被拉裂⁽²³⁾。

由上所述，可以認為斜裂縫的出現是受剪破壞的必需條件。在斜縫出現以後，梁的受剪破壞方式就可以是如上所述的多种多样。在這些破壞方式中可以有一種以上在同一試件上發生，而與極限荷載同時出現的就是破壞的主要原因，梁的抗剪強度由它來決定。

2. 從試驗觀察所得的受剪破壞現象——從試驗觀察所得的受剪破壞現象可概括如下：

(1) 斜裂縫一般是从梁腹的下半部开始的。但是，台尔伯脱 (A. N. Talbot) 同时又認為斜裂縫有可能是从已达到主筋水平的豎向裂縫开始的⁽²¹⁾。莫地 (K. C. Moody) 等在試驗中也有与之相同的發現⁽¹⁸⁾。摩列托 (O. Moretto) 則確認斜裂縫是从梁腹的下半部开始，只当荷載增加之后，才又有从梁底出現的豎向裂縫，向上延伸，轉成 45° 傾角，而与其他已有的斜裂縫平行發展⁽¹⁹⁾。然而，莫拉謝夫 (B. И. Мора-шев)，又肯定地認為斜裂縫是从受拉部分的豎向裂縫發展而成，而且認為由于斜裂縫發生于受拉的混凝土开裂之后，所以它的發生與主拉應力數值沒有明确的關

系，但却受力矩数值的影响⁽²⁴⁾。至于工字形截面梁的斜裂缝则都是从腹版开始的^{(12) (23)}。

(2) 台尔伯脱 (A. N. Talbot) 认为斜裂缝的倾角和开始点与支点间的距离视混凝土强度、梁的长度和钢筋数量而定⁽²¹⁾。摩列托 (O. Moretto) 和斯来脱 (W. A. Slater) 试验所得的倾角均约为 45° ^{(19) (23)}。莫地 (K. G. Moody) 等确认斜裂缝的开始点与支点之间的距离随 $\frac{a}{h_0}$ 而增大⁽¹⁸⁾。格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 的试验表明斜裂缝的倾角与横向预应力有关⁽¹²⁾。

(3) 波里山斯基 (М. С. Боришанский) 所试验的梁中有许多是斜裂缝上部的混凝土受剪破坏的⁽²⁰⁾。摩列托 (O. Moretto) 的梁也主要地具有这种破坏方式。然而钢筋率为 1.12% 的梁，则系混凝土受压破坏⁽¹⁸⁾。至于莫地 (K. G. Moody) ^{(18) (23)} 和斯和耶 (E. M. Zwoyer) 等的试验梁则全是由于斜裂缝上部混凝土压碎而破坏的。所以，可以认为对于长方形截面梁，斜裂缝所引起的主要是以上两种破坏方式。而 P 、 r 和 $\frac{a}{h_0}$ 的数值对于所发生破坏方式有所影响。

从斯来脱 (W. A. Slater) 和格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 的试验结果看来，薄腹版工字形截面梁的破坏方式似乎主要地是腹版被压碎或拉裂。压碎的方向可以是水平的、坚直的和沿斜裂缝的^{(23) (12)}。这与混凝土截面被钢筋所占厚度有极大关系。

(4) 梁破坏时的荷载一般大于斜裂缝出现时的荷载，但也有与斜裂缝出现的同时破坏的^{(18) (21)}。后者通常是没有腹筋而且 $\frac{a}{h_0}$ 的数值比较大的梁。

(5) 混凝土沿主筋被撕裂的现象主要发生于无腹筋和无压筋的梁中。斯和耶 (E. M. Zwoyer) 指出这种现象发生于梁受压部分的混凝土被压碎之后⁽¹⁸⁾。其它试验结果也没有指出梁的破坏是由于混凝土被水平撕裂而产生的。所以，可以认为这是一种引发性的破坏。

3. 几种抗剪强度公式及其比较——为了研究各种抗剪强度公式的精确性和适用范围，我们用摩列托 (O. Moretto) ⁽¹⁹⁾，波里山斯基 (М. С. Боришанский) ⁽²⁰⁾，克拉克 (A. P. Clark) ⁽¹⁵⁾，莫地 (K. G. Moody) ⁽¹⁸⁾ 和斯和耶 (E. M. Zwoyer) ⁽¹³⁾ 等公式进行了几种文献所载的试验梁 (共 322 根) 的计算，结果列于表 1-1。

从上述计算结果看来，按力矩数值来计算抗剪强度的公式比之按剪力或剪应力来计算的要精确些，适用范围也比较广。然而无论如何，这些公式有一个共同缺点，那就是适用范围都受一定的限制。

4. 工字形截面梁的抗剪强度——从表 1-1 所示的计算结果看来，工字形截面梁抗剪强度的计算比之长方形截面梁是存在着更多问题的。斯和耶 (E. M. Zwoyer) 公式对于摩列托 (O. Moretto)、波里山斯基 (М. С. Боришанский)、克拉克 (A. P. Clark) 莫地 (K. G. Moody) 和斯来脱 (W. A. Slater) 等试验梁都是比较精确的。然

表 1-1

各种抗剪强度公式的计算结果

公 司	式	摩 列 托	波 里 山 斯 基	克 拉 克	莫	地	斯 和 耶
试 验 梁	梁 数 破 坏 方 式	$\frac{\tau}{\sigma}$ 平均值	$\frac{Q}{Q_0}$ 平均值	$\frac{\tau}{\sigma}$ 平均值	$\frac{M}{M_0}$ 平均值	标准误差	$\frac{M}{M_0}$ 平均值
康列托无腹筋	2 斜拉裂	1.23	1.43	1.14	1.22	0.0363	1.22
1 $\frac{1}{4}$ " 8 腹筋	12 斜拉裂	0.990	1.15	0.854	0.987	0.0701	0.950
1 $\frac{1}{2}$ " 8 腹筋	6 压碎	1.13	1.31	0.762	0.887	0.0542	0.902
1 $\frac{1}{4}$ " 4, 8 腹筋	2 斜拉裂	1.12	1.40	0.835	0.980	0.00708	0.885
波里山斯基	27 斜拉裂	1.07	0.815	0.169	0.752	0.233	0.954
克 拉 克	65 斜拉裂	1.26	3.62 (4 根梁)	0.114	0.966	0.100	1.078
莫 里 山 斯 基	14 压碎 12 压碎 16 压碎	0.835 1.36 2.46	0.946 (5 根梁) 1.85 (3 根梁)	0.243 0.305	0.887 (12 根梁) 1.022 1.044	0.113 0.142 0.118	0.957 1.123 1.07
斯 和 耶	28 压碎	2.23	—	0.757	0.463	0.217	1.02
格 里 哥 列 夫	1 斜压碎 1 斜压碎 1 斜压碎	0.764 0.823 1.010	0.696 0.613 0.460	0.696 0.613 0.460	0.612 0.620 0.457	—	—
平 均	—	0.867	1.11	0.592	0.563	0.120	1.39
斯 米 脱	58 斜拉裂 32 斜压碎 水平向压碎	1.13 1.68	0.354 0.628	0.293 0.323	0.805 0.78	0.161 0.193	0.951 1.08
台 尔 伯 脱	3 斜拉裂 40 斜拉裂 4 斜拉裂 5 斜拉裂	1.523 1.878 3.355 2.730	—	1.21 1.353 2.53 2.031	1.078 1.01	0.238 0.215	1.32 1.175 1.78 1.61
李 察 特	11 斜拉裂 2 斜拉裂 5 斜拉裂 4 斜拉裂	2.01 2.06 1.84 1.021	3.76 1.97 0.78 0.890 (4 根梁) 2.730 (2 根梁)	1.42 1.56 1.406 0.855	1.225 (5 根梁) 1.320 0.822 0.889	0.086 0.142 0.059 0.095	1.35 1.39 0.848 0.937
1910	—	—	—	—	—	—	—
1913	—	—	—	—	—	—	—
1917	—	—	—	—	—	—	—
1922	—	—	—	—	—	—	—

而，对于格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 預应力梁的計算結果就不能令人滿意了。此外，我們在工字形截面梁的計算中加入許多假定，如將梁寬作為等於肋寬，略去翼緣的影響；略去受壓縱向筋的作用；略去縱向及橫向鋼筋的預应力作用等。不這樣地假定會使計算結果與試驗數值相去更遠。但這些假定又使計算所根據的出發條件與梁的實際情況不符，增加了計算結果偶然湊合的可能性。

此外，還要注意到以上所用的公式都是根據長方形截面梁的試驗資料推演出來的。而且，只有斯和耶 (E. M. Zwoyer) 公式是考慮到預应力影響的。腹筋預应力問題在各種公式推演時固然沒有考慮到，而且只有 2 根這樣的梁的試驗資料，實在太少。所以，目前的分析只能主要地借助於斯來脫 (W. A. Slater) 鋼筋混凝土工字形截面梁。

從斯來脫 (W. A. Slater) 的試驗資料⁽²³⁾ 可以進一步檢查一下薄腹版鋼筋混凝土梁抗剪強度的各有關主要問題。取 R_u, p, r 和 $\frac{a}{h_0}$ 大約相同的梁來看，僅是 $\frac{h_0}{b_p}$ 和 $\frac{h_0}{b_N}$ 值對梁的抗剪強度是沒有多大影響的，表 1-2。

$\frac{Q_{試}}{b_p h_0 R_u}$ 或 $\frac{M_{試}}{k_1 k_2 R' b_p h_0^2}$ 與 $\frac{h_0}{b_p}$ 或 $\frac{h_0}{b_N}$ 的關係

表 1-2

斯來脫梁號	R_u , lb/in ²	$p, \%$	$r, \%$	$\frac{a}{h_0}$	$\frac{h_0}{b_p}$	$\frac{h_0}{b_N}$	$\frac{Q_{試}}{b_p h_0 R_u}$	$\frac{M_{試}}{k_1 k_2 R' b_p h_0^2}$	破壞方式
57	3900	11.5	1.15	3.8	5.77	7.13	0.226	0.760	斜拉裂
58	3840	12.2	1.24	3.8	6.12	8.15	0.232	0.780	斜拉裂
60	4340	12.4	1.28	3.8	6.25	9.08	0.198	0.670	斜拉裂
56	4030	11.5	1.16	3.8	12.30	14.40	0.222	0.742	斜拉裂

斯來脫 (W. A. Slater) 梁按其破壞方式來說可分為腹版斜拉裂和腹版斜壓碎，豎向或水平壓碎等兩類。腹版斜拉裂破壞的情況和長方形截面梁的相似，可以說是普遍的受剪破壞。而腹版斜壓碎，豎向或水平壓碎則是薄腹版所特有的。這種破壞方式帶有局部破壞性質，對於梁的抗剪強度起削弱作用（表 1-3）。由此看來，腹版斜壓碎，豎向或水平壓碎的破壞方式是應該儘力避免的。

分析一下各種不同破壞方式的梁之 $\frac{h_0}{b_N}$ 值，可以有如下的結果：腹版豎向壓碎的 $\frac{h_0}{b_N}$ 為 14.0~19.0，其中一根達 36.9；水平壓碎梁的為 8.98~13.6；斜壓碎梁的為 11.2~14.4；斜拉裂梁的達 15.6，而 $\frac{h_0}{b_N}$ 在 10 以上的占 58 根中的 43%。

結合腹筋的形式來看，16 根具有水平和豎向腹筋的梁當中，有 14 根是腹版被水平壓碎而破壞的。其餘 2 根則為斜拉裂破壞。前 12 根梁的腹版厚度被水平腹筋

占去 11.6~24.3%，后 2 根被占 8.34~11.6%。腹版豎向压碎的梁都是仅有豎向腹筋的。腹筋所占腹版厚度为 17.8~29.5%。斜拉裂梁中有许多是有豎向腹筋的，其中 2 根梁的腹筋占去腹版厚度各达 30.0 和 31.2%，但这 2 根梁的 $\frac{h_0}{b_N}$ 仅各为 8.57 和 9.08。此外，尚有 5 根斜拉裂破坏梁的腹版被占厚度超过 17.8%（各为 19.0, 20.6, 21.0, 22.8 和 24.8%），但它们的 $\frac{h_0}{b_N}$ 各为 7.13、13.2、13.7、12.6 和 8.15，均在豎向压碎梁的 $\frac{h_0}{b_N}$ 值 14.0~19.0 之下。在腹版斜压碎的梁中，有的仅有豎向腹筋有的则豎向、水平腹筋兼有之。腹版被占厚度为 14.0~18.5%。值得注意的是用 45° 斜向腹筋的梁虽然 $\frac{h_0}{b_N}$ 已达 15.6，腹版被占厚度达 24.4%，但没有不是斜拉裂破坏的。主要原因可能是由于斜向腹筋引起较小的腹版斜压力。

格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 梁 №1 和 3 是具有豎向腹筋的。它们的 $\frac{h_0}{b_N}$

薄腹版鋼筋混凝土梁的破坏方式对抗剪强度的影响

(各梁的 $R_u, \gamma, \frac{a}{h_0}, p$ 值大致相同)

表 1-3

斯来脱梁 梁号	$R_u, \text{lb/in}^2$	$\gamma, \%$	$\frac{a}{h_0}$	$p, \%$	$\frac{Q_N}{b_p h_0 E_u}$	$\frac{M_N}{h_1 E_u b_p h_0^2}$	破坏方式
4	5620	3.50	1.78	9.10	0.206	0.319	水平压碎
2	5320	3.40	1.78	9.24	0.227	0.464	水平压碎
5	5710	3.35	1.78	9.08	0.282	0.527	斜拉裂
8	5520	2.60	1.78	7.06	0.178	0.355	水平压碎
9	5750	2.63	1.78	7.15	0.194	0.370	水平压碎
23	5450	2.60	1.78	7.63	0.283	0.540	斜拉裂
33	5020	1.51	1.78	9.24	0.213	0.398	水平压碎
32	5000	1.46	1.78	8.97	0.245	0.457	水平压碎
31	5300	1.44	1.78	8.82	0.249	0.480	水平压碎
34	5450	1.55	1.78	9.51	0.262	0.497	斜拉裂
73	5160	1.49	1.78	9.08	0.307	0.577	斜拉裂
72	5300	1.58	1.78	9.66	0.311	0.577	斜拉裂
20	5150	2.34	1.78	9.24	0.236	0.442	水平压碎
22	5550	2.52	1.78	9.81	0.297	0.560	斜拉裂
69	5400	2.38	1.78	9.36	0.321	0.604	斜拉裂
70	5250	2.52	1.78	9.80	0.322	0.601	斜拉裂
4	5620	3.50	1.78	9.10	0.206	0.391	水平压碎
2	5320	3.40	1.78	9.24	0.227	0.464	水平压碎
5	5710	3.35	1.78	9.08	0.282	0.527	斜拉裂
45	3800	1.78	1.78	10.90	0.304	0.540	豎向压碎
79	3720	1.72	1.78	10.50	0.439	0.788	斜拉裂
27	3650	2.64	1.78	10.40	0.328	0.588	豎向压碎
71	3820	2.69	1.78	10.50	0.472	0.852	斜拉裂

值各为 22.7 和 58.8。腹版被占厚度各为 21.5 和 55.5%，前者为腹版斜压碎破坏，后者则是竖向压碎破坏的⁽¹²⁾。

由上所述，可知腹版的破坏方式将受 $\frac{h_0}{b_N}$ 值，腹筋所占腹版厚度和腹筋斜度的影响。上述试验结果列于表 1-4。对于腹版受斜压碎、竖向或水平压碎的梁，由于腹版被占厚度已将截面削弱至局部破坏的程度，所以再用增加箍筋直径的方法来提提高梁的抗剪强度将是无效的，如图 1-1 和 1-2。如果用斜拉裂破坏梁的试验结果作图，则没有抗剪强度随腹筋率 γ 的增加而减小的趋势，图 1-3，1-4，1-5。

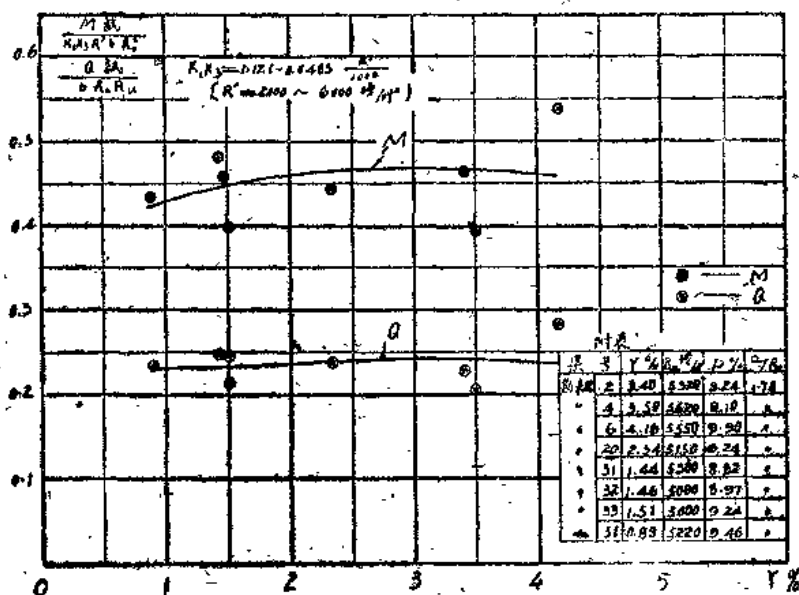


图 1-1 γ 对于抗剪强度的影响 (水平、竖向压碎)

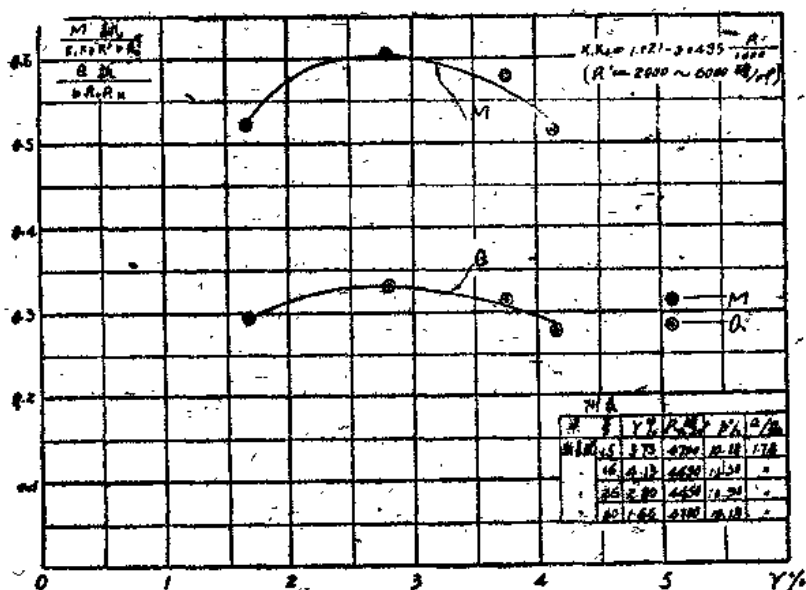


图 1-2 γ 对于抗剪强度的影响 (水平、竖向压碎)

梁的上翼緣對抗剪強度的影响尚待进一步确定。从斯来脱(W. A. Slater)梁的試驗結果看来,上翼緣破坏时的荷載已比最大的为小,翼緣的破坏只是引發性的⁽²³⁾。格里哥列夫(Д. А. Григорьев)試驗梁的上翼緣則根本沒有破坏⁽¹²⁾。这都說明上翼緣的作用在于將梁加强,并避免了如在長方形梁所發生的斜裂縫上部混凝土的剪裂或压碎。但从各种公式的計算結果来看,波里山斯基(М. С. Боришанский)、克拉克(A. P. Clark)、莫地(K. G. Moody)和斯和耶(E. M. Zwoyer)等公式都以略去上翼緣的作用,將梁作为 $b_p \times h_0$ 的矩形截面梁来計算,結果才較為准确,表1-1。如果將梁当作 $b_n \times h_0$ 的矩形截面,則計算結果的誤差更大。摩列托(O. Moretto)公式

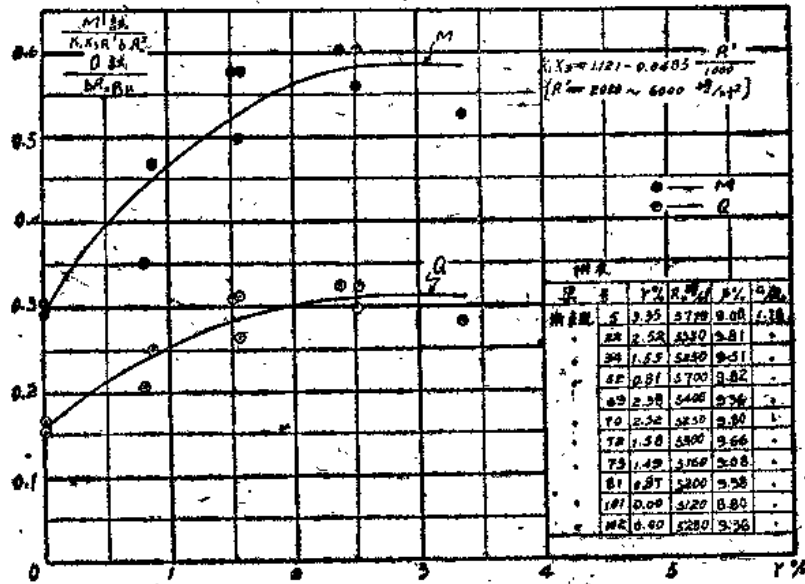


圖 1-3 γ 对于抗剪强度的影响 (斜拉裂)

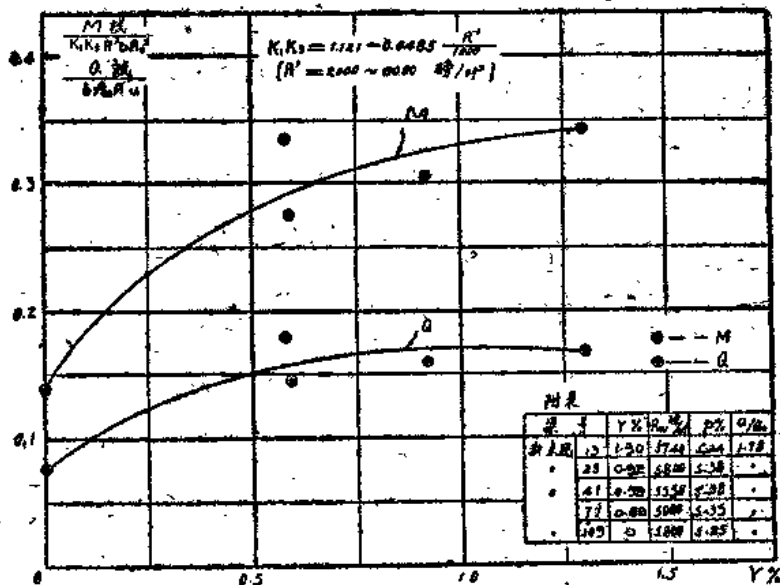


圖 1-4 γ 对于抗剪强度的影响 (斜拉裂)

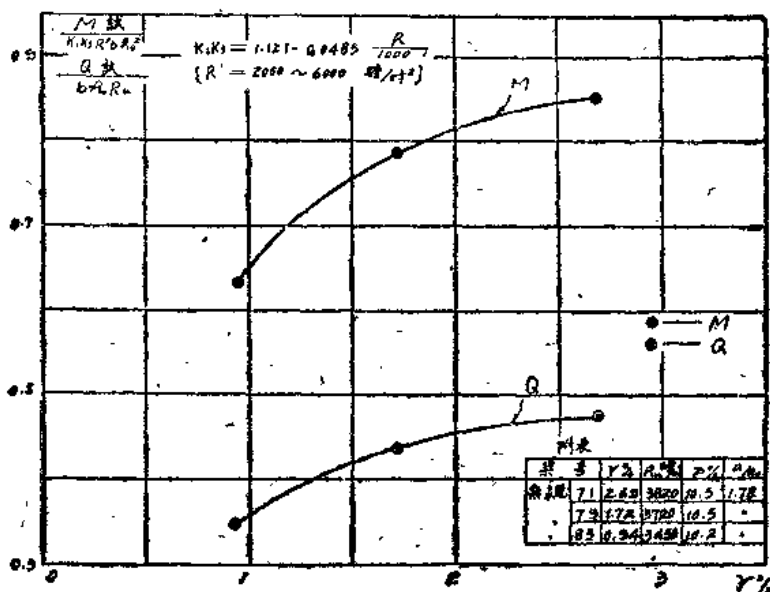


图 1-5 γ 对于抗剪强度的影响 (斜拉裂)

几种破坏方式的梁的 $\frac{K_0}{b_N}$, 腹版被占厚度和腹筋斜度的比较 表 1-4

梁 号	破 坏 方 式	$\frac{K_0}{b_N}$	腹版被占厚度 %	腹 筋 斜 度
斯 来 脱				
19	腹版竖向压碎	17.9	29.5*	90°
24	腹版竖向压碎	19.0	27.0*	90°
27	腹版竖向压碎	14.0	21.7*	90°
45	腹版竖向压碎	14.1	17.8*	90°
123	腹版竖向压碎	36.9	19.3*	90°
1	腹版水平压碎	13.6	24.3*	0°和90°
7	腹版水平压碎	8.98	17.2*	0°和90°
9	腹版水平压碎	9.26	11.6*	0°和90°
54	腹版斜压碎	13.7	14.0*	90°
120	腹版斜压碎	14.4	18.5*	90°
119	腹版斜压碎	14.4	18.3*	0°和90°
121	腹版斜压碎	11.2	15.0*	0°和90°
122	腹版斜压碎	13.1	17.2*	0°和90°
5	腹版斜拉裂	12.6	22.8*	90°
22	腹版斜拉裂	13.2	20.6*	90°
23	腹版斜拉裂	13.7	21.0*	90°
56	腹版斜拉裂	14.4	14.5*	90°
57	腹版斜拉裂	7.13	19.0*	90°
58	腹版斜拉裂	8.15	24.8*	90°
59	腹版斜拉裂	8.57	30.0*	90°
60	腹版斜拉裂	9.08	31.2*	90°
75	腹版斜拉裂	15.6	24.4*	45°
10	腹版斜拉裂	8.5	8.34*	0°和90°
36	腹版斜拉裂	8.4	11.6*	0°和90°
格里哥列夫				
1	腹版斜压碎	22.7	21.5	90
3	腹版竖向压碎	58.8	55.5	90

* 按竖向腹筋所占厚度算。

* 按水平向腹筋所占厚度算。

的計算結果則与此正好相反、即將梁作為 $b_n \times h_0$ (計算 γ 時, 仍用 b_p) 的矩形梁時, 計算結果才比較準確。

波里山斯基 (М. С. Боришакский) 也認為將梁寬作為等於腹版厚度時, 他的公式的計算結果對於工字形和 T 形截面梁都是準確的⁽²⁵⁾。但波氏在 1946 年的論文中又曾指出: T 形截面梁 № 957、967 和 977 的 $\frac{Q_{0\text{сгсг}}}{b_p h_0 R_u}$ 值各為 0.25、0.246 和 0.358。它們的抗剪強度大大超過 $b_p \times h_0$ 。長方形截面的梁⁽²⁶⁾。

5. 斜裂縫出現時荷載的計算——前面已經提及斜裂縫的出現情況, 在長方形截面梁中, 斜裂縫有從梁的腹部開始, 也有是從受拉部分的豎向裂縫發展而成的。至於工字形截面梁的斜裂縫, 則都是從腹部開始的。從腹部開始的斜裂縫的發生應與腹版混凝土的主拉應力有關。從豎向裂縫發展而成的斜裂縫的發生, 則應受力矩數值的影響。

由上述兩個不同的條件出發, 計算斜裂縫的方法也基本上可分為兩種: 按主拉應力計算的理論方法; 考慮到力矩影響的試驗公式。

— 格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 用前一方法計算他的三根試驗梁, 結果列於表 1-5⁽¹²⁾。

格里哥列夫試驗梁斜裂縫出現時剪力的計算 表 1-5

梁號	斜裂縫出現時的 計算荷載 (t)	斜裂縫出現時的 實際荷載 (t)	$\frac{Q_{\text{сгсг}}}{Q_{\text{TKR}}}$
1	14.0	8	1.75
2	10.5	11.5	0.914
3	27.6	28.1	1.19
			平均值 1.28 標準誤差 0.427

鍾斯 (R. Jones) 也是用計算主拉應力的方法來決定斜裂縫出現時的荷載的, 結果列於表 1-6⁽²⁶⁾。

上述計算結果是不夠精確的。

莫地 (K. G. Moody) 根據試驗結果做出考慮到力矩影響的斜裂縫出現時的剪應力計算公式, 對於他自己的三組梁的計算結果如下⁽¹⁸⁾。

上述計算結果頗好。可是, 當用莫地 (K. G. Moody) 公式來計算鍾斯 (R. Jones) 和格里哥列夫 (Д. А. Григорьев) 的試驗梁時, $\frac{Q_{\text{сгсг}}}{Q_{\text{TKR}}}$ 的平均值各為 0.502 和 0.511, 標準誤差各為 0.145 和 0.221, 就不很精確了。

6. 結論* ——綜上所述, 關於薄腹版預應力鋼筋混凝土梁的抗剪強度可有如

* 本文發表以後, 關於預應力鋼筋混凝土梁抗剪強度的研究有了新的發展⁽²⁷⁾。然而, 問題仍未得到解決。在 1958 年國際預應力學會第三次大會中, 西德呂希 (H. Räscher) 在第一分組的總報告中發表了以下的意見: “在能夠提出一個合適的剪力破壞理論之前, 必須首先從進一步的試驗中將各種影響因素加以明確。這些影響因素就是截面形狀, 預應力的大小, 受剪彎度荷載和支點的形式, 腹筋, 混凝土的強度, 和在複合應力下的強度。必須指出上面所提到的都只是一些最重要的因素。”⁽²⁸⁾

這個意見與本專題之研究目的有若干相同之點。

紐斯試驗梁斜裂縫出現時剪力的計算

表 1-6

梁 号	斜裂縫出現時的計算荷載 (t)		斜裂縫出現時的實際荷載 (t)	$\frac{Q_{TK 實}}{Q_{TK 計}}$	
	a. 計及混凝土收縮應力	b. 不計混凝土收縮應力		計及混凝土收縮應力	不計及混凝土收縮應力
J 12	0	7.4	9.0	0	0.832
J 7	8.0	14.5	9.0	0.889	1.61
J 6	8.0	16.0	10.0	0.800	1.60
J 13	6.9	19.6	10.0	0.690	1.96
J 8	12.7	16.1	11.0	1.150	1.46
J 16	9.1	20.5	10.0	0.910	2.05
J 11	11.5	22.0	11.0	1.040	2.00
J 14	0	14.3	10.0	0	1.43
J 4A	0	15.0	11.0	0	1.36
J 10A	0	24.7	12.0	0	2.06
J 9A	0	20.0	15.0	0	1.33
平均值				0.498	1.61
標準誤差				0.49	0.382

用莫地公式計算斜裂縫出現時的荷載

表 1-7

組 別	梁 数	$\frac{Q_{TK 實}}{Q_{TK 計}}$ 平均值	標準誤差
莫地梁 III	12	1.152	0.117
莫地梁 A	12	0.932	0.087
莫地梁 B	16	1.005	0.090

下結論：

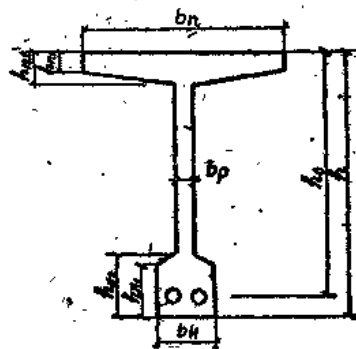
(1) 梁的受剪破壞方式受梁高與腹版厚之比、腹版被占厚度的百分率、腹筋斜度等因素的影響，但是，影響的程度尚未能確定。

(2) 梁的破壞方式對於抗剪強度的影響很為顯著。然而，影響的程度尚未能確定。

(3) 混凝土強度、縱筋率、腹筋率、梁高與受剪跨度之比、縱和橫向鋼筋有效預應力、翼緣寬度、厚度和所含受壓鋼筋率等對於梁的抗剪強度都有大小不等的影響。但是，影響的程度尚不能確定。

(4) 計算抗剪強度的公式都各有其局限性，已有的公式對薄腹版預應力梁是不適用的。

(5) 斜裂縫的出現是剪力破壞的必需條件。當斜裂縫出現時的荷載大於梁的抗剪強度時，就由它來決定梁的抗剪強度。然而目前計算斜裂縫出現時荷載的方法尚很不精確。



III 試驗梁的基本尺寸及分組

1. 試驗梁的基本尺寸

圖 1-6

(1) 梁全長 3.30m, $l_p=3.00$ m

(2) 梁截面, cm:

h	h_0	b_n	h_{n1}	h_{n2}	b_p	h_{n1}	h_{n2}	b_n
38.0	35	36	3.0	4.5	3.0	6.0	6.5	12.0
48.0	45	40	3.5	5.5	3.0	6.0	7.0	16.0
58.0	55	44	4.0	6.5	3.0	6.0	7.0	16.0
68.0	65	48	4.5	7.5	3.0	6.0	7.0	16.0
78.0	75	52	5.0	8.5	3.0	6.0	7.0	16.0

(3) 縱向鋼筋

h_0 , cm	$\phi 3$ mm 鋼絲數目	F_a , cm ²	$p = \frac{F_a}{h_0 b_p}$, %	鋼絲束數目及其直徑
35	30	2.12	2.02	2 根, 21mm
35	36	2.54	2.42	2 根, 24mm
35	42	2.96	2.82	2 根, 26mm
35	50	3.53	3.36	2 根, 28mm
45	60	4.52	3.14	2 根, 31mm
55	80	5.65	3.42	2 根, 36mm
65	90	6.35	3.26	2 根, 42mm
75	100	7.06	3.14	2 根, 46mm

(4) 縱筋組成及距離

	%
$\left\{ \begin{array}{l} 1 \phi 3 @ 10 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 1 \phi 3 @ 10 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right.$	$\begin{array}{r} 0.236 \\ 0.236 \\ \hline 0.472 \end{array}$
$\left\{ \begin{array}{l} 1 \phi 3 @ 8 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 1 \phi 3 @ 8 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right.$	$\begin{array}{r} 0.294 \\ 0.294 \\ \hline 0.588 \end{array}$
$\left\{ \begin{array}{l} 1 \phi 3 @ 6 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 1 \phi 3 @ 6 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right.$	$\begin{array}{r} 0.393 \\ 0.393 \\ \hline 0.786 \end{array}$
$\left\{ \begin{array}{l} 1 \phi 3 @ 4 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 1 \phi 3 @ 4 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right.$	$\begin{array}{r} 0.590 \\ 0.590 \\ \hline 1.180 \end{array}$
$\left\{ \begin{array}{l} 2 \phi 3 @ 8 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 2 \phi 3 @ 8 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right.$	$\begin{array}{r} 0.590 \\ 0.590 \\ \hline 1.180 \end{array}$
$\left\{ \begin{array}{l} 2 \phi 3 @ 8 \text{cm (高強鋼絲)} \\ 2 \phi 3 @ 8 \text{cm (普通鋼絲)} \end{array} \right. 10 \text{mm 套筒}$	$\begin{array}{r} 0.590 \\ 0.590 \\ \hline 1.180 \end{array}$

2. 檢查 $R, p, \gamma, \frac{\sigma}{h_0}, \sigma_{a1}, \sigma_y$ 的影响

試驗梁 組別	h_0 , cm	檢 查 因 素	$R, \text{kg/cm}^2$	$p = \frac{F_a}{5ph_0}, \%$	$\gamma, \%$	$\frac{\sigma}{h_0}$	$\sigma_{a1}, \text{kg/cm}^2$	$\sigma_y, \text{kg/cm}^2$	配筋 斜度	梁 數
A	35	R (400, 500, 600, 700)	—	2.82	0.236 ($\gamma_0 = 0.236$)	1.71	5500	20	90°	2×4=8
B	35	p (2.02, 2.42, 2.82, 3.36)	500	—	0.236 ($\gamma_0 = 0.236$)	1.71	5500	20	90°	2×4=8
C	35	γ (0.236, 0.294, 0.393, 0.590) γ_0 (0.236, 0.294, 0.393, 0.590)	500	3.36	— 0.236 ($\gamma_0 = 0.236$)	1.71	5500	20	90°	2×4=8
D	35	$\frac{\sigma}{h_0}$ (1.47, 1.71, 2.94, 4.42)	500	3.36	0.236 ($\gamma_0 = 0.236$)	—	5500	20	90°	2×4=8
E	35	σ_{a1} (3500, 4500, 5500, 6500)	500	3.36	0.236 ($\gamma_0 = 0.236$)	1.71	—	20	90°	2×4=8
F	35	σ_y (0, 20, 35, 50)	500	3.36	0.590 ($\gamma_0 = 0.590$)	1.71	5500	—	90°	2×4=8

其中 A—2=B—3

B—4=C—1=D—2=E—3

C—4=F—2

兩小組相同的用一小組作動力試驗共 5 根，四小組相同的只制薄弱小組，共制薄弱 44 根。