

双向预应力混凝土叠合板抗剪强度试验研究

赵新铭¹, 郑恒祥², 刘 瑞¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏南京 210098; 2. 华北水利水电学院, 河南郑州 450045)

摘要 本文对九块在中置集中荷载作用下对边简支、对边自由的双向预应力无腹筋叠合板进行了试验研究. 通过对其破坏形态、破坏机理以及受力状态的分析, 提出了板的抗剪承载力计算公式, 该式与试验结果有较好的拟合优度, 具有较高的应用价值.

关键词 横向预应力; 抗剪强度; 剪跨比

中图分类号: TU375.2; TU312 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2000)03-0086-04

在《港口工程技术规范》(JTJ220-87)^[1]中, 对于混凝土和钢筋混凝土的无箍筋板的抗剪强度计算是列于附录中, 采用按主拉应力计算的许可应力法进行计算, 而该规范^[1]正文所列的斜截面强度计算则是按极限状态法给出的, 显然两者不够协调. 另外, 该规范^[1]在计算斜截面强度时没有考虑剪跨比这一重要影响因素, 而且按规范容许应力法计算, 集中荷载作用位置距支座越远(即剪跨比越大), 板的抗剪能力越大, 这与试验结果不符.

迄今为止, 各国学者对于板的弯曲强度与冲切强度研究较多, 而对剪切强度的研究并不多, 并且板型多限于普通钢筋混凝土板和纵向施加预应力的板, 而对双向施加预应力的板的研究报告和公开发表的论文资料还没有看到. 同时, 双向预应力混凝土叠合板目前还没有列入规范, 本试验将建立双向预应力钢筋混凝土叠合板抗剪强度计算公式. 同时, 通过与普通钢筋混凝土板、单向预应力混凝土板的试验资料进行对比分析, 揭示双向预应力混凝土叠合板在斜截面抗剪强度方面的优越性, 最后将这三类板的抗剪强度计算公式协调统一, 为工程设计和规范的增补提供可靠的依据.

1 试验概况

1.1 试验装置及试件制作

支承梁上放置试验板, 用同步液压千斤顶正向施加荷载, 以压力传感器并用 ZY-01 型智能应变仪控制荷载. 在试验板与支承梁间设反力计, 实测支承反力分布. 板顶沿双向布置千分表, 测读纵向(x 向)和横向(y 向)应变. 板底架设百分表, 量测板的跨中挠度. 测点布置见图 1. 图中加荷垫板尺寸为 250 mm × 250 mm.

试件纵向预应力采用先张法、有粘结工艺, 张拉控制应力为 405 MPa; 横向预应力采用后张法无粘结工艺, 张拉控制应力为 353.7 MPa. 叠合面在首层混凝土终凝前自然扫毛, 以求完整结合. 首层混凝土设计厚度为 100 mm, 叠合层混凝土设计厚度为 100 mm, 实测厚度见文献[2].

对 C 型板, 板中纵向布置 12 Φ 12 预应力筋和 11 Φ 12 非预应力筋; 横向布置 14 Φ 12 预应力筋. 对 F 型板, 纵向布置 17 Φ 12 预应力筋和 16 Φ 12 非预应力筋; 横向布置 10 Φ 12 预应力筋和 9 Φ 12 非预应力筋.

1.2 测试内容及实测结果

测试内容包括: 逐级荷载下的板面挠度; 混凝土表面应变; 支承反力分布; 裂缝的出现、分布和开展宽度; 板的破坏特征等.

试验板的主要特征值及实测结果见表 1、表 2.

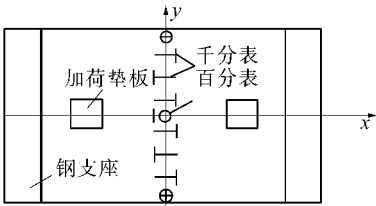


图 1 板测点布置

Fig.1 Scheme of measuring points

表 1 试件主要特征值
Table 1 Main parameters of samples

板 号	试件尺寸/mm				混凝土强度/MPa		纵向钢筋			横向钢筋			
	L	L_o	b	h	h_o	f_{cup}	f_{cu}	f_y /MPa	f_u /MPa	ρ_x /%	f_y /MPa	f_u /MPa	ρ_x /%
C ₁ - I	2700	2200	1520	210	177	41.28	30.20	445.3	603	1.387	445.3	603	0.301
C ₂ - II	2700	2200	1520	215	175	39.24	27.29	445.3	603	1.412	445.3	603	0.293
C ₆ - III	2680	2200	1500	196	167	37.24	27.19	445.3	603	1.489	445.3	603	0.323
C ₅ - IV	2690	2200	1500	216	178	34.63	27.16	445.3	603	1.398	445.3	603	0.290
C ₃ - V	2700	2200	1500	192	160	40.61	42.44	445.3	603	1.555	445.3	603	0.331
C ₄ - VI	2720	2200	1500	202	175	41.90	42.87	445.3	603	1.422	445.3	603	0.310
F ₅ - I	2000	1600	2200	204	190	47.50	30.13	445.3	603	0.623	445.3	603	0.958
F ₉ - II	2000	1600	2210	192	185	51.30	34.33	445.3	603	0.575	445.3	603	1.060
F ₈ - III	2000	1600	2200	188	180	43.23	25.56	445.3	603	0.597	445.3	603	1.060

注： L ——板长； L_o ——支座间净距； b ——板宽； h ——板厚（包括预应力混凝土层和叠合层）； h_o ——板的有效高度； f_{cup} ——预应力混凝土的立方体抗压强度； f_{cu} ——叠合层混凝土的立方体抗压强度； f_y ——实测钢筋屈服强度； f_u ——实测钢筋极限强度； ρ_x ——所有纵向钢筋配筋率； ρ_y ——横向钢筋配筋率。

表 2 板主要试验结果
Table 2 Main test results of samples

板 号	剪跨比	开裂荷载 P'_{aL}	极限荷载 V'_u	破坏形态
	$\lambda = a/h_o$	/kN	/kN	
C ₁ - I	1.00	350.00	606.63	冲陷—剪压破坏
C ₂ - II	2.00	300.00	450.00	冲陷—剪压破坏
C ₆ - III	2.50	274.83	447.41	冲陷—剪压破坏
C ₅ - IV	2.75	300.00	381.05	冲陷—斜拉破坏
C ₃ - V	3.00	229.31	354.48	弯曲破坏
C ₄ - VI	4.00	250.00	279.31	弯曲破坏
F ₅ - I	1.00	324.83	656.21	冲陷破坏
F ₉ - II	2.00	350.00	610.34	冲陷破坏
F ₈ - III	4.75	300.00	610.34	冲陷破坏

2 板的破坏形态

受集中荷载作用的两对边简支、两对边自由的板，其受力为空间工作状态，此已被弹性理论解所论证。就本论文观测的试验现象来看，板的受力一直处于空间工作状态。

根据板的破坏特征，在试验条件和材料相同的情况下，板的破坏形态主要取决于剪跨比 λ 和板的宽跨比 (b/L_o)。总的来说，本次试验的 9 块板除宽跨比较小的 C 类板，当剪跨比较大时 ($\lambda = 3$ ， $\lambda = 4$) 发生正截面弯曲破坏，其余都发生了剪切破坏。剪切破坏的破坏形态大体上可分为以下几种。

2.1 冲陷破坏

对于宽跨比较大的 F 型板 ($b/L_o = 1.11$)，在 $\lambda = 1 \sim 4.75$ 的板中，板的破坏是由于加荷垫板冲陷入混凝土中引起的。板顶沿加荷垫板四周被冲下，深度最大达 15 mm。从板底看，在加荷点下较大范围被冲下形成环状闭合冲陷缝或不闭合冲陷缝（当荷载作用在跨中时，冲陷缝闭合，否则不闭合），板顶冲陷缝和板底冲陷缝形成一冲切锥体。冲陷破坏发生较突然，破坏时有响声，属脆性破坏。

2.2 冲陷—剪压破坏

对于 $\lambda = 1 \sim 2.5$ 的 C 型板，当加载至破坏荷载的 80% 时，板侧出现斜裂缝。随后，板顶沿加荷垫板三边冲陷入混凝土中，板体即告破坏。破坏时，板侧斜裂缝的末端剪压区混凝土局部被挤压成块状碎片。板的破坏虽然不很突然，但过程不长，属脆性破坏。

2.3 冲陷—斜拉破坏

对于 $\lambda = 2.75$ 的 C 型板，斜裂缝出现后，很快向板顶延伸，同时加荷垫板冲陷入混凝土中，板体即告破坏。这种破坏比较突然，并伴有爆响声，属脆性破坏。

总的来说，板的破坏形态主要受剪跨比、宽跨比的影响。与梁的破坏形态不同之处主要在于加荷垫板冲陷入混凝土中。

3 板的抗剪强度

3.1 抗剪强度的影响因素

a. 板体几何尺寸. 板体几何尺寸的影响可以用板的宽跨比 (b/L_o) 来表达. 宽跨比越大, 板的双向作用程度越强烈, 抗剪承载力越高.

b. 混凝土强度. 混凝土强度越高, 板的抗剪承载力越大, 可用混凝土抗压强度 f_c 或者抗拉强度 f_t 来表达.

预应力叠合板的抗剪承载力与普通混凝土和预应力混凝土两种材料有关. 为了计算简便, 在计算抗剪强度时, 统一采用普通混凝土的强度, 考虑到预应力混凝土对抗剪承载力的影响, 另设抗剪强度提高系数.

c. 剪跨比. 剪跨比 λ 是板抗剪强度的重要影响因素. 图 2 为本次试验 C 型板 $V_u^t/b_c h_o f_t \sim \lambda$ 关系曲线, 曲线显示, 在其它条件相同的情况下, 剪跨比小时板的抗剪强度高, 而当剪跨比增大时板的抗剪强度降低. 两者之间呈双曲线关系.

d. 板的配筋率. 板的纵横向配筋率愈大, 板的抗剪强度愈高, 主要是因为钢筋存在梢栓力, 但板配筋率对抗剪强度的影响没有梁的大, 因为板属于分散配筋又未布置箍筋.

e. 预应力的作用. 预应力混凝土梁的抗剪强度因预应力的作用而比普通钢筋混凝土梁高, 这已被试验资料和理论研究所论证. 本文通过对双向预应力叠合板的试验资料的分析认为, 双向施加预应力的板比仅在纵向施加预应力的板的抗剪强度提高 23%, 并提出了双向预应力对抗剪强度的提高系数 β .

3.2 抗剪强度计算公式

3.2.1 计算公式

根据以上对抗剪强度影响因素的分析, 通过对本试验发生剪切破坏的 7 块板以及其它普通钢筋混凝土板和单向预应力钢筋混凝土板的试验数据的回归分析, 得到适用于双向、单向预应力混凝土叠合板及普通钢筋混凝土板两对边简支、两对边自由在中置集中荷载作用下的抗剪强度计算公式:

$$V_u = C_\lambda C_\rho \gamma \beta b_c h_o f_t \tag{1}$$

式中: C_λ ——剪切因子, 文献 [2] 给出了剪切因子的表达式, $C_\lambda = 1.232 - 0.382\lambda + 0.048\lambda^2$; C_ρ ——配筋率系数, $C_\rho = 1 + 10 V_{\rho_x} + 6 \rho_y$, V 为纵向钢筋折减系数, 当 $\rho_x > 0.6\%$ 时, $V = 1.25 - 42 \rho_x$; γ ——板的宽跨比影响系数, $\gamma = 0.8 + \frac{0.3b}{L_o}$, γ 的取值范围为 $1 < \gamma \leq 1.2$; β ——预应力混凝土参与系数, $\beta = 1 + \alpha \frac{f_{cup} h_1}{f_{cup} h_1 + f_{cu} h_2}$, 对单向预应力板 $\alpha = 0.45$, 双向预应力板 $\alpha = 0.93$, h_1 为预应力混凝土层厚度, h_2 为叠合层厚度; b_c ——板的抗剪强度计算宽度, 参照文献 [2], $b_c = b_o + 3.6 h_o + 0.6 a$, 其中 b_o 为加荷垫板宽度, a 为剪跨, $a = \lambda h_o$, 剪跨比 $\lambda < 0.7$ 时取 $\lambda = 0.7$, $\lambda > 4.5$ 时取 $\lambda = 4.5$, 当 b_c 大于实际板宽 b 时取 $b_c = b$; h_o ——板的有效高度; f_t ——后浇混凝土的抗拉强度, $f_t = 0.23 f_{cu}^{2/3}$.

3.2.2 试验值与计算值的比较

根据抗剪强度计算公式 (1) 对本文双向预应力叠合板计算结果列于表 3, 得到 V_u^t/V_u 的总体均值 M 为 1.054, 均方差 σ 为 0.121, 离散系数 C_v 为 0.114, 可见公式的符合性良好.

由公式 (1) 对郑州工业大学的 6 块钢筋混凝土板和河海大学的 5 块单向预应力混凝土叠合板的试验资料的计算汇总于表 4, 得到 V_u^t/V_u 的总体均值 M 为 1.071, 均方差 σ 为 0.133, 离散系数为 0.124, 其符合性尚可, 可见本文给出的抗剪强度计算公式同样适用于钢筋混凝土板和单向预应力钢筋混凝土叠合板.

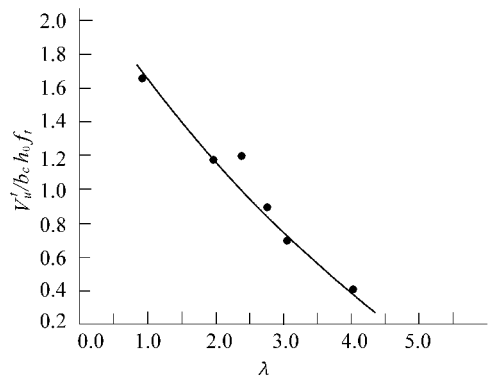


图 2 $V_u^t/b_c h_o f_t \sim \lambda$ 关系

Fig.2 $V_u^t/b_c h_o f_t$ versus λ

表 3 板抗剪强度计算

Table 3 Calculated results of shear strength of samples

板号	板尺寸/mm				剪跨比	实测值	计算值	V_u^t/V_u
	L_o	b	h_1	h_2	λ	V_u^t/kN	V_u/kN	
C ₁ - I	2 200	1 520	100	110	1	606.63	566.77	1.070
C ₂ - II	2 200	1 510	100	115	2	450.00	425.27	1.058
C ₆ - III	2 200	1 500	100	96	2.5	447.41	364.43	1.220
C ₅ - IV	2 200	1 500	100	116	2.75	381.05	379.04	1.005
F ₅ - I	1 600	2 000	100	104	1	656.21	751.02	0.874
F ₉ - II	1 600	2 020	100	92	2	610.34	649.02	0.940
F ₈ - III	1 600	2 000	100	88	4.75	600.00	493.48	1.216

表 4 板抗剪强度计算

Table 4 Calculated results of shear strength of samples

板 型	板 号	板尺寸/mm				剪跨比	实测值	计算值	V_u^t/V_u
		L_o	b	h_1	h_2	λ	V_u^t/kN	V_u/kN	
钢 筋 混 凝 土 板 (郑 州 工 业 大 学)	TB - 4a	2 200	1 501	-	-	2.00	276.5	272.93	1.013
	DB - 17	2 200	1 499	-	-	1.97	464.2	370.19	1.254
	DB - 18	2 200	1 500	-	-	2.97	391.0	384.11	1.018
	DB - 19	2 200	1 499	-	-	2.97	325.3	331.60	0.981
	TB - 3d	2 200	1 201	-	-	0.99	309.0	302.16	1.023
	TB - 3c	2 200	1 203	-	-	2.98	168.0	202.82	0.828
预 应 力 混 凝 土 叠 合 板 (河 海 大 学)	A ₁	2 200	1 510	105	105	0.95	515.4	391.12	1.318
	A ₂	2 200	1 520	105	100	2.036	367.8	377.98	0.973
	A ₃	2 200	1 510	105	103	2.965	296.3	276.88	1.106
	E ₁	2 200	2 210	112	100	0.939	624.1	529.57	1.179
	E ₂	2 200	2 205	104	100	2.073	361.8	330.77	1.094

4 结 语

中置集中荷载下,对边简支、对边自由的双向预应力无腹筋叠合板的抗剪破坏形态分为冲陷破坏、冲陷—剪压破坏和冲陷—斜拉破坏.本文以试验资料为基础建立的双向预应力混凝土叠合板抗剪强度计算公式,其形式简单,应用方便,符合性良好,且适用于不同板型.双向预应力叠合板较单向预应力叠合板的抗剪强度提高 23%.

参考文献：

[1] JTJ220—87 港口工程技术规范[S]. 北京：人民交通出版社,1988.

[2] 赵新铭.双向预应力混凝土无腹筋叠合板抗剪性能试验研究及非线性分析[D][学位论文]. 南京：河海大学,1994.

[3] 彭天明,王南.集中荷载两对边支承钢筋混凝土板的抗剪强度[J].河海大学学报,1991,(19(1)) 65 ~ 72.

Experimental Study on Shear Strength of Two-Way Prestressed Composite Concrete Slabs without Web Reinforcement

ZHAO Xin-ming¹, ZHENG Heng-xiang², LIU Rui¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract Experiments are conducted of nine web-reinforcement absent two-way prestressed composite concrete slabs with simply supported and free boundary on the opposite sides subjected to concentrated load at the center. The results are presented in this paper. The failure mode, failure mechanism and the state of stresses are analysed. Furthermore, formulas are proposed for the calculation of shear strength of slabs. The calculated results are in good agreement with the measured ones.

Key words transverse prestress ; shear strength ; shear-span ratio