

[159] 中空スラブの直交2方向の剪断耐力比に関する実験的研究

正会員 佐藤立美 (広島工業大学工学部)
正会員 和田 勉 (和田建築技術研究所)

1 まえがき

中空スラブでは、中空管方向はI型梁の連続と考えられ設計がなされているが、中空管と直交する方向では、開口率 H/D の大きい円孔がスラブ厚ピッチで並んだ単位巾の有孔梁と見ることができる。従って、中空スラブは直交2方向の断面性能の差の非常に大きい直交異方性板となっている。更に、近年の2方向性中空スラブでは、各方向とも途中で断面性能の急変する箇所を有し、そこでの応力伝達機能も明らかにされていない。そのため、応力解析が複雑となるばかりでなく、中空管と直交する方向の剪断補強が困難である事により、剪断力に対する検討が非常に重要となってくる。通常の2方向性中空スラブの設計では、既応の研究成果に基づき^{1) 2)} 直交2方向の耐力比を30%として剪断力の検討が行なわれている。本論文では、上記の現状を考え、2方向性中空スラブの設計のための基礎資料の作製を目的として中空スラブの直交2方向の剛性と剪断耐力比を実験的に検証した。

2 実験の概要

中空スラブの直交2方向における剪断耐力と剛性を比較するため、直交2方向をそれぞれ単位幅の梁と考え、I型断面梁と3つの円孔を有する梁の試験体を作製した。試験体の種類と概要は表1に示す通りであり直交方向の試験体をシリーズI、中空管方向の試験体をシリーズIIとした。各々の試験体の幅はスラブ厚さと等しくすることを原則としたが、試験装置の関係により、スラブ厚50cm以上の試験体ではスラブ厚の $1/2$ としている。シリーズIの開口部、シリーズIIのウェブ部は市販のワインディングパイプを使用し、実際の中空スラブの形状の再現に留意した。試験体の断面及び配筋図の例を図1に示したが、実験計画いずれも試験体が試験区間で剪断破壊する様配筋量を決定した。また、各試験体とも $M_{Qd} \geq 3$ と剪断スパン比による影響を極力排除した。また支点・加力点の局部破壊を防止するための補強筋等により、各々試験体の種類毎に試験体長は異なっている。なお、スラブ厚に対するワインディングパイプ径は、通常 $t = \phi = 1.25 \text{ cm}$ であるが

表1 試験体の種類と概要

シリーズ	種類	試験体番号	断面 $b \times D$ (cm)	主筋	保開口部数 - 径H (mm)	剪断補強筋
I 直交方向	1	83A01 83A02	30×30	上端 2-D19 下端 2-D19	3- ϕ 175	D10@300
	2	83A03 83A04	40×40	上端 3-D16 下端 2-D19L-D16	3- ϕ 275	D10@400
	3	83A05 83A06	25×50	上端 2-D16 下端 2-D16	3- ϕ 375	D10@500
	4	83A07 83A08	30×60	上端 3-D16 下端 2-D19L-D16	3- ϕ 450	D10@600
II 中空管方向	5	83B01 83B02	I型 30×30	上端 2-D13L-D16 下端 2-D13L-D16	ϕ 175 L=70	D10@200
	6	83B03 83B04	I型 40×40	上端 3-D16 下端 3-D16	ϕ 275 L=100	D10@200

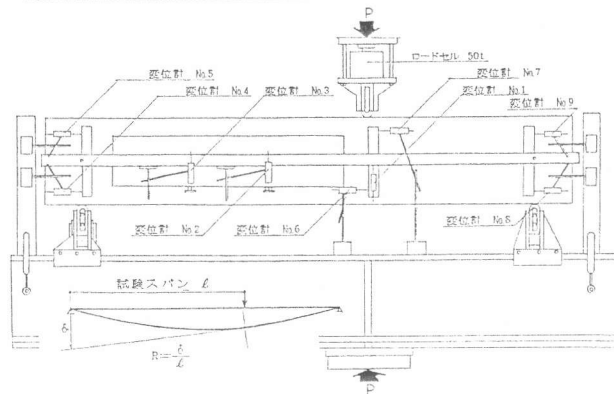


図1 実験方法及び変形の測定

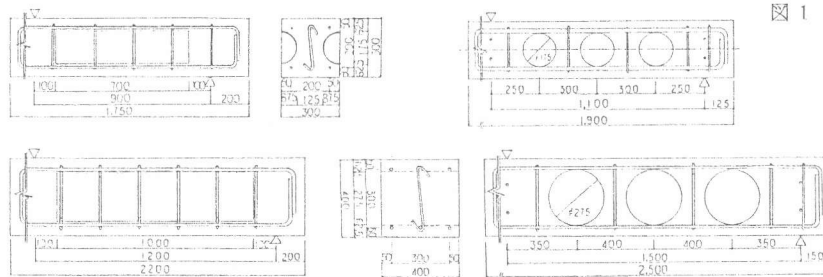


図2 試験体配筋図の例

表2 使用鉄筋引張試験結果

種類	試験数	伸び率 (%)	降伏強度 (kg/cm ²)	最大強度 (kg/cm ²)
D-19	6	24.3	3545.9	5628.4
D-16	19	26.8	3411.8	5340.4
D-13	2	25.4	3212.6	5177.2
D-10	7	26.8	3591.5	5336.0

厚さ 60 cm 以上では $t - \phi = 15 \text{ cm}$ であり、試験体も実施設計での一般的使用に準拠させている。コンクリートはレディミクストコンクリートを使用しており、試験日材角での圧縮試験結果を表 3 中に示した。使用鉄筋の力学的性値は表 2 に示す通りである。実験方法は、図 1 に示した装置による 3 点曲げ試験とし、単調増加荷重により図 1 中に示した変形をマイクロコンピュータ制御の計測システムを使用し測定した。⁵⁾

3 実験結果及び破壊性状

表 3 に実験結果一覧表を示す。また、図 3 は各々の試験体の荷重-変形関係を、試験区間の部材角を用いて表わしたものである。但し、シリーズ I の A 0 5 ~ A 0 8 は試験体の梁巾が梁背の $1/2$ となっているため、荷重を実験値の 2 倍とし図化している。実験結果による各々の試験体の破壊過程を以下に述べる。曲げ初亀裂はシリーズ I では $R < 1/2500$ シリーズ II では $R \leq 1/2000$ で発生し、梁背の大きいものほど初亀裂発生変位も大きくなっている。この曲げ初亀裂は主筋位置以上には進展せず、剪断亀裂が発生する。剪断亀裂はシリーズ I では、初め $R \approx 1/1000$ で開口円周囲で、円の中心より 45° の剪断応力度集中位置から法線方向に生じるが、変形の増大とともに、材軸方向にしたいに向きを変えていく。最大耐力以後では、主筋に沿う付着割裂亀裂とともに、コンクリートは上下フランジ部とウェブ部に 3 分割され、ウェブ部のコンクリートの剪断力による回転変形により、中空管は楕円形に変形し、かつ、圧縮フランジ部の圧壊により終局に至った。シリーズ II では、 $R \approx 1/600$ で、いずれも荷重点からは 45° 線上のウェブ中央に剪断亀裂が発生し、降伏及び最大耐力時には、この亀裂の拡大と、荷重点と支点を結ぶ対角線に沿う亀裂の発生が見られる。最大耐力時以後、支点近傍の下端筋に沿う付着割裂亀裂の発生及び亀裂巾の拡大とともに終局に至った。最大耐力時における各試験体の亀裂発生状況を図 4 に示した。

表 3 実験結果一覧表

シリーズ	内 容	種 類	試験体 No.	b × D (cm)	コンクリート			開口 率 $\frac{H}{D}$	曲げ初亀裂			剪断初亀裂			降伏耐力			最大耐力		
					材令 (r)	強度 (kg/cm ²)	ヤング率 ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)		P	δ	R	P	δ	R	P	δ	R	P	δ	R
I	直 変 形 方 向	1	83A01	30 × 30	38	292.09	2.47	0.58	2.13	0.17	0.15	5.12	0.87	0.79	7.50	2.19	1.99	8.14	11.31	10.28
			83A02	30 × 30	38	292.09	2.47	0.58	2.45	0.19	0.17	4.76	0.52	0.47	8.83	4.89	4.45	9.70	5.90	5.36
		2	83A03	40 × 40	33	301.37	2.34	0.69	3.54	0.25	0.17	7.00	0.84	0.56	8.30	1.63	1.09	8.99	4.71	3.14
			83A04	40 × 40	33	301.37	2.34	0.69	4.32	0.37	0.25	7.13	0.99	0.66	7.95	2.12	1.41	8.83	2.76	1.84
	3	3	83A05	25 × 50	32	304.79	2.37	0.75	3.63	0.65	0.36	4.75	2.56	1.42	5.00	2.86	1.59	5.19	5.25	2.92
			83A06	25 × 50	32	304.79	2.37	0.75	2.82	0.70	0.39	4.39	2.72	1.51	4.50	4.13	2.29	5.34	18.48	10.26
		4	83A07	30 × 60	39	322.38	2.28	0.75	3.35	0.88	0.40	4.45	1.87	0.85	7.50	4.73	2.15	7.99	6.09	2.77
			83A08	30 × 60	39	322.38	2.28	0.75	2.92	0.47	0.21	5.18	0.98	0.45	7.65	3.94	1.79	8.29	7.15	3.25
II	中 空 管 方 向	5	83B01	30 × 30	37	294.18	2.29	0.58	4.83	0.20	0.22	7.70	0.95	1.05	14.50	2.44	2.71	18.00	11.52	12.80
			83B02	30 × 30	37	294.18	2.29	0.58	4.81	0.16	0.18	8.45	0.64	0.71	14.43	2.60	2.89	17.85	9.27	10.30
		6	83B03	40 × 40	34	304.38	2.43	0.69	9.75	0.39	0.32	14.43	1.91	1.60	19.68	5.15	4.29	24.25	12.82	52.35
			83B04	40 × 40	35	306.83	2.29	0.69	9.68	0.54	0.45	13.79	1.95	1.63	21.00	4.84	4.03	22.38	17.06	14.22

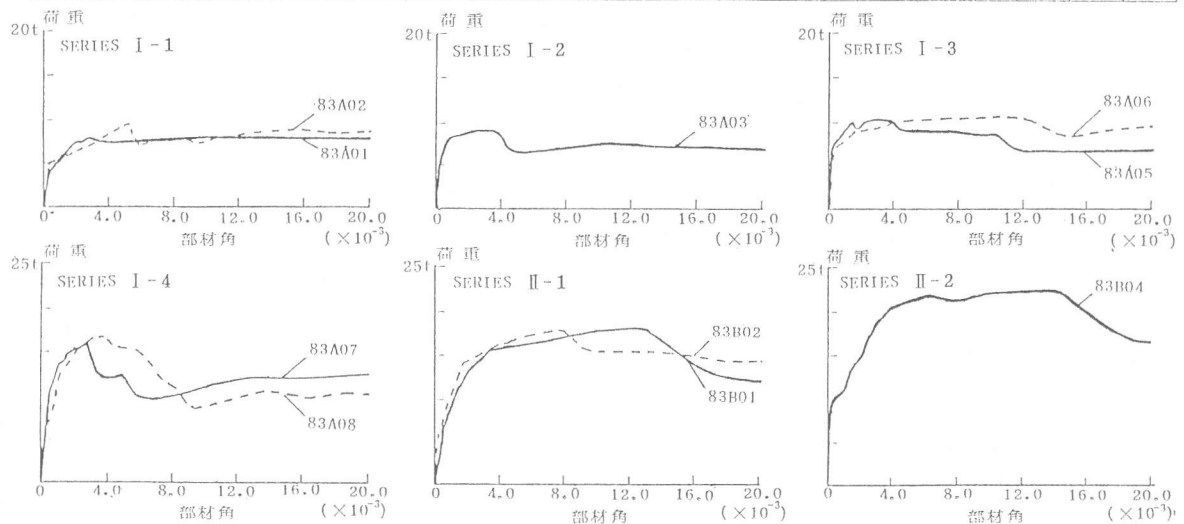


図 3 荷重-変形曲線

4 実験結果の検討

本論の実験のように開口率が大きくしかも複数の円孔を有する部材は、いわゆる有孔梁 ($H/D \leq 0.4$) の性状とも異なり、又、この様な部材の実験報告も少ない。したがって、本論文ではシリーズ I は既応の長方形梁の実験式と比較し、シリーズ II は I 形断面と比較する事により、本実験結果の検討を行った。表 4 は上記の方法により、本実験結果を既応の実験式と比較した結果の一覧表である。

曲げ初亀裂荷重は、シリーズ II では I 型断面梁の平均値以上となっており、等価断面置換の適用が可能である事が明らかであるが、シリーズ I では、開口部を控除した Z_e を使用しても、長方形梁の初亀裂強度をかなり下まわっており、むしろ、長方形梁の曲げ強度式の下限值 $1.2\sqrt{F_c} Z_e$ がよく一致している。

シリーズ II の剪断初亀裂強度については、等価 I 型断面梁と比較すると若干小さくなっているが、ウェブ部の最小厚さを有効幅と考えると、計算値と比較的よく一致する事と、剪断亀裂がウェブ部の剪断斜張力によるものである事より、荒川式の適用は可能であると考えられる。

シリーズ I の剪断初亀裂強度は、無開口長方形梁と比較すると 10 ~ 22 % の範囲にあり、梁背の大きいものほど強度比が小さくなっている。開口部を控除したコンクリート実断面積に対する平均剪断応力度は $\tau_{cr}/F_c = 0.9\% \sim 0.4\%$ となっており、これも開口率に逆比例している。

しかし、有効断面積を $b \cdot j \cdot (1 - H/D)$ として長方形梁の計算値と比較すると、いずれも 0.5 ~ 0.6 の範囲にある。円孔周囲の剪断応力集中率は大きく、(光弾性実験では $H/D = 0.5$ のとき集中率約 10 倍) 実験による初亀裂発生位置も応力集中点と一致している事より、シリーズ I の剪断初亀裂強度は、応力集中の関数として考えるべきである。しかし、剪断亀裂の発生機構は通常の RC 梁と異ってはいるが、既応の実験式の形の適用を考えるならば、 $Q_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{2} \cdot b \cdot d \cdot (1 - H/D)$ とするといずれも安全側になる。これは剪断亀裂に関しては上部フランジのコンクリート断面積のみ有効と考える事と等しい。

試験体の亀裂状況等の観察よりシリーズ I では剪断降伏・シリーズ II では主筋の降伏による曲げ降伏となっている。曲げ降伏するシリーズ II では、耐力も I 型等の計算値と比較的良く一致し、降伏後、剪断破壊となるが、シリーズ II では、ウェブ部の亀裂の増大とウェブ部コンクリートの回転変形の増大に併せて、主筋が降伏する。したがって、主筋降伏位置も、最大曲げモーメントの生じる位置でなく開口に近い部分となる。

初期剛性は、中空スラブの直交 2 方向への荷重配分上重要である。実験結果より中空管と直交方向についても長方形断面梁の剛性に比較し $1/3 \sim 1/2$ 以上の剛性を有している事が判明した。弾性範囲での初等理論では開口によ

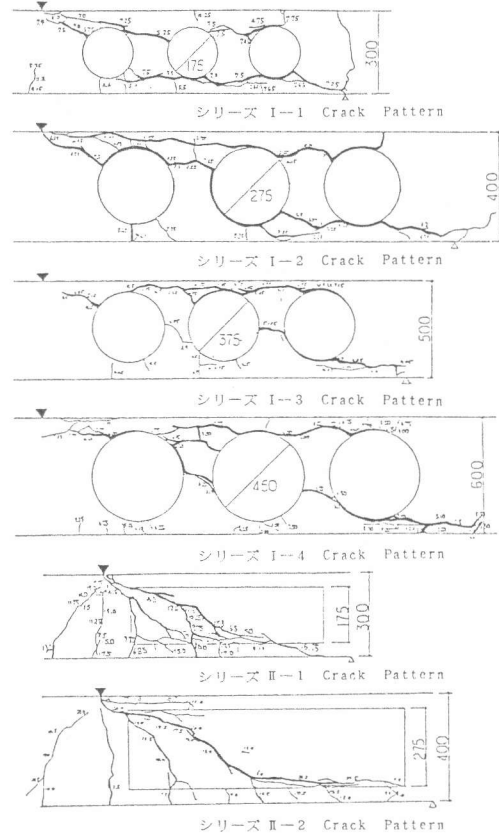


図4 最大耐力時の亀裂図

表4 実験値と計算値の比較

シリーズ	内 容	試験体 No	b × D (cm)	開口率 H/D	曲 げ 初 亀 裂		降伏耐力 P_y ex / P_y cal	最大耐力 Q_{max} ex / Q_{max} cal	初期剛性 K_s ex / K_s cal
					M_{cr} ex / M_{cr} cal	P_{cr} ex / P_{cr} cal			
I	直交方向	83A01	30 × 30	0.58	0.60	0.23	0.62	0.55	0.49
		83A02			0.69	0.22	0.73	0.65	0.63
		83A03	40 × 40	0.69	0.66	0.18	0.48	0.34	0.59
		83A04			0.80	0.18	0.46	0.34	0.57
	中空管方向	83A05	25 × 50	0.75	0.97	0.15	0.53	0.27	0.47
		83A06			0.75	0.14	0.47	0.23	0.61
		83A07	30 × 60	0.75	0.58	0.09	0.40	0.26	0.43
		83A08			0.51	0.11	0.41	0.27	0.33
II	中空管方向	83B01	30 × 30	0.58	0.98	0.73	1.27	1.15	0.78
		83B02			0.98	0.80	1.26	1.14	0.97
		83B03	40 × 40	0.69	1.19	0.95	1.18	1.05	0.62
		83B04			1.17	0.90	1.26	0.96	0.62

(1) 曲げ初亀裂モーメント: $M_{cr} cal = 1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e$ (5) I型断面への置換

(2) 剪断初亀裂荷重: $P_{cr} cal = 3b \cdot j \cdot k_c \frac{0.08 \sqrt{100 + F_c}}{M/Qd + 1.7}$

(3) 降伏モーメント: $M_y = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d$

(4) 最大剪断耐力: $Q_{max} cal = \left\{ \frac{0.05 F_c^2 (100 + F_c)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{w \cdot s_y} \right\} b \cdot j$



る剛性低下は、剪断に対して $1 - H/D$ 、曲げに対して $1 - (H/D)^3$ となるが、実験結果による初期剛性の低下は、ほぼ $1 - (H/D)^2$ とみることができる。

シリーズ I の最大剪断耐力について、図 5 に開口率による最大耐力の低下の関係を示した。建築学会有孔梁研究委員会では、開口率の小さい ($H/D \leq 0.4$) 有孔梁の耐力低下率を $1 - 1.61 H/D$ としているが、本実験結果にも、開口率を適用するとはほぼ次式で下限値を与える事ができる。

$$Q_u \approx b \cdot j \cdot \tau_u (1 - 1.25 H/D) \text{ 但し } H/D > 0.4$$

上式は、 H/D が 0.42 ~ 0.58 の有孔梁の正負交番荷重時の実験結果に基づき、既報で提案した式である。³⁾ 本論の実験は、単調荷重であるが、安全率を考え、上式の適用が良いと考えている。

なお、変形性能についてみると、シリーズ I では、最大耐力は $R = 1/500$ 程度迄に生じ、以後若干耐力が低下したのち再び耐力はほぼ最大耐力迄増加し、非常に靱性の大きい $P - \delta$ 関係を示している。一方、シリーズ II では降伏耐力、最大耐力時の変形はシリーズ I に比較して大きい。最大耐力以後は、耐力は急速に低下する剪断型破壊となる。中空スラブの設計では、直交 2 方向に変位の等しい時の耐力比が問題となる。図 6 に $D = 30 \text{ cm}$ 及び $D = 40 \text{ cm}$ の試験体の実験結果より、直交 2 方向の耐力比と変形の関係を示した。

$R < 1/300$ では変形の増大とともに耐力比は急激に低下するが、 $R \geq 1/250$ ではほぼ一定値に収束する。スラブの設計上の許容変形量程度では、耐力比は 0.5 以上と考えてよい。

5 結 論

以上の実験結果及び既報の結果より、^{3) 4) 5)} 中空スラブの直交 2 方向の耐力比等に関し、以下のように結論する。

- (1) 中空管方向については、等価 I 型断面に置換することにより、既報の実験式・理論式の適用が可能であり良く一致する。但し、剪断力に対する検討の場合には、ウェブ部の最小厚を有効巾と考える事が望ましい。
- (2) 中空管と直交方向曲げ亀裂強度は、円孔を控除した Z_e を用い、かつ下限式 $M_{cr} = 1.2 \sqrt{f_c} Z_e$ で評価できる。
- (3) 直交方向の剪断亀裂強度は、円孔周囲の応力集中を考慮する必要があるが、上フランジ部のコンクリート全断面積のみ有効として推定する事も可能である。但し、中空管周辺から生じる剪断亀裂は、スラブ表面には表われない事は、設計上特に留意しておく必要がある。
- (4) 直交方向の有孔梁のコンクリート部分の最大の剪断耐力は、長方形梁の耐力に $1 - 1.25 H/D$ を乗じ下限値を得る。
- (5) 直交 2 方向の初期剛性の比は、実験結果の検討より $1 - (H/D)^2 / 1 - 0.6 (H/D)^4$ 程度となっている。これは $t = 30 \text{ cm}$ の場合 0.7、 $t = 40 \text{ cm}$ の時 0.6 となり初期剛性比は、断面性能比ほど小さい結果になっていない。
- (6) 直交 2 方向の耐力比を考える場合、各々の方向の最大耐力比を設計に使用せず、各方向の破壊形式と変形性能を十分考慮して考える必要がある。現行設計に用いられている耐力比 30% は $t \leq 40 \text{ cm}$ の場合十分安全側である。
- (7) 中空管と直交する方向へ荷重を伝達させる 2 方向性中空スラブでは、中空管と主筋が接する事により主筋のかぶり量が少なく、剪断応力の大きい部分の付着破壊に留意する必要がある。

なお、今後は面材としての実験を行い、剛性・耐力に関する検討を行っていく必要があると考えている。

- [参考文献] 1. 入江「中空スラブの剪断性状に関する研究」その 1、その 2、日本建築学会論文報告書 213 ~ 214 号
 2. 松井源吾「中空スラブ構造」彰国社
 3. 佐藤「中空スラブの中空管と直交する方向の剪断耐力に関する実験的研究」 建築学会中国支部研究報告 58・3
 4. 佐藤「剪断補強方法の差異による中空スラブの剪断補強効果に関する研究」 同 57・10
 5. 佐藤「マイコンによるデータ収集システムを使用した中空スラブの剪断耐力に関する研究」第 5 回計算機利用シンポジウム論文集 1988・3

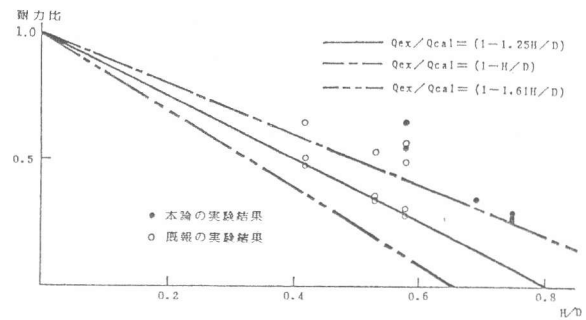


図 5 開口率と最大剪断耐力の関係

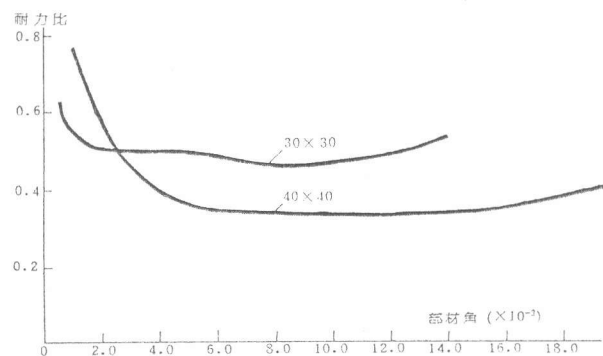


図 6 変形量に対する直交 2 方向の耐力比