

円柱供試体による曲げ強度試験

愛知工業大学 正員○森野 登二
K.K. キラックス 白木 央

(1) まえがき

JISの曲げ強度試験は、一辺15cmの正方形断面で三等分点截荷と定められているが、これを円柱供試体で中央集中截荷とした場合にはどうなるかについて検討した。例えば、打設されたコンクリートのある程度深い位置から曲げ供試体を採取する場合には、先ずコアドリルによって円柱供試体を切り取り、それからハリ供試体を作製しなければならないが、この作業は容易なことではない。しかも、骨材最大寸法が大きい場合には、断面を小さくできないので、円形断面のまま強度試験を行ないたい場合がある。また、コア供試体に限らず、普通の強度試験の場合でも円柱供試体によって曲げ試験ができれば、圧縮、引張試験と同じ供試体を使用できるので便利である。

しかし、曲げ強度は、一定の仮定の下で求められる実験値であるから、断面形状および、スパン、截荷方法の違いによって異なった値を示す。そこで、円柱供試体と角柱供試体によって曲げ強度試験を行ない、比較検討した。

(2) 曲げ試験について

曲げ試験は、供試体を弾性体と仮定して、最大曲げモーメントによって引張縁に生じた引張応力度を曲げ強度としているが、破壊付近ではコンクリートは塑性的となっているので、この応力状態は成立してなく、塑性変形した分だけ、加えられた応力は減少している。しかし、計算では直線分布（弾性体）としているため試験値は引張強度よりも大きくなる。矩形断面（正方形断面を含む）による既往の実験結果では、引張強度の1.36倍～2.15倍となっている。

本論では、円形断面による上記の値を求め、矩形断面との違いを明確にしようとした。まず最初、計算によって求めてみた。そのために、次のように仮定した梁の曲げ応力度分布¹⁾を円形断面にも採用した。即ち、圧縮側は直線で、引張側は2次の放物線とし、中立軸の位置では曲線の接線が直線と一致するとする。この仮定にもとづく応力度分布を円形断面の計算に便利なように三角関数で示すと、圧縮側（ σ_c ）、引張側（ σ_t ）は

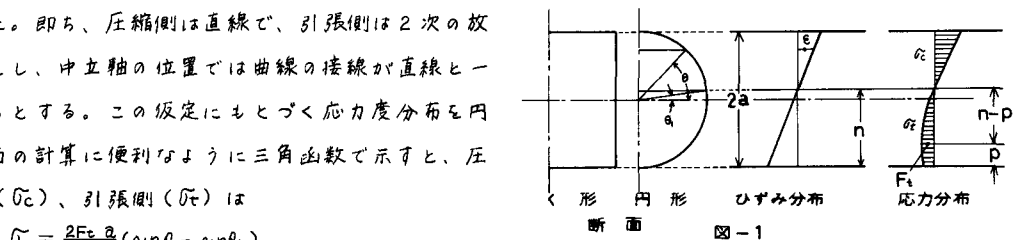


図-1

$$\sigma_c = \frac{2Fc}{n-p} (\sin\theta - \sin\theta_1)$$

$$\sigma_t = \left\{ \frac{2a(\sin\theta + \sin\theta_1)}{n-p} - \frac{a^2(\sin\theta + \sin\theta_1)^2}{(n-p)^2} \right\} \cdot F_t$$

$$n-p = \frac{a}{4\sin\theta_1} \left(\frac{1}{3} + \sin\theta_1 + \sin^3\theta_1 + \frac{1}{3} \sin^3\theta_1 \right)$$

となる。ただし、 F_t は引張強度を示す。その他 a 、 $(n-p)$ 、 θ および θ_1 の意味は図-1に示した。

次に、曲げ強度（ F_b ）は引張強度（ F_t ）の何倍（ $F_b = K F_t$ ）になるかを求めると、1表のようになる。

その計算式は、矩形断面

n(xa)	P(xa)	n-p(xa)	F _b = K · F _t	
			K (矩形)	K (円形)
1.08	-0.23	1.31	1.26	1.37
1.10	-0.01	1.11	1.42	1.60
1.12	0.14	0.98	1.52	1.81
1.14	0.26	0.88	1.59	2.00
1.16	0.35	0.81	1.62	2.18
1.18	0.41	0.77	1.63	2.34
1.20	0.48	0.72	1.61	2.53
1.30	0.69	0.61	1.29	3.39
1.40	0.83	0.57	0.77	4.25

1表 中立軸の位置とKの関係

$$F_b = \frac{6 \sin \theta_1}{(1 + \sin \theta_1)} \{ 3(1 + \sin \theta_1)^2 - 15(1 + \sin \theta_1) + 16 \} \cdot F_t$$

円形断面

$$F_b = \frac{a}{n-p} \left\{ 2 + 5 \sin \theta_1 + \frac{a}{n-p} \left(\frac{3}{10} \sin \theta - \frac{16}{15\pi} \cos \theta_1 \right) \right\} \cdot F_t$$

である。1表に示したように、矩形断面では中立軸の位置が $1.176a$ のとき $K=1.63$ で、 K は最大となるが、円形断面では中立軸が圧縮側に入るほど K が大きくなっていく。中立軸の位置が断面の中心近くなると上記の仮定は成立しなくなるので、また別の直線に近い応力分布を考える必要がある。曲げモーメントの増加と共に中立軸は圧縮側に移動し、破壊の直前ではかなり圧縮側に入っているものと思われる。その移動に伴う応力度分布を図-2に示した。

なお、軟鋼の降伏直後のように、引張側と圧縮側とが共に塑性的挙動を示し、完全塑性体の応力分布を示す場合には、矩形断面で $F_b=1.50F_t$ 、円形断面で $F_b=1.70F_t$ となる。

以下は、円形断面と矩形断面の曲げ強度試験に関する実験の概要である。

(3) 実験方法

使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント。骨材は愛知県産山砂利（ほとんどビチャートよりなる）をフルイ分け、骨材最大寸法ごとに粒度調整して使用。砂は矢作川産川砂。極微砂は 0.1mm 以下の珪砂。

配合

コンクリート

シリーズ1. $\%C=40, 50, 60$ および 70% について、スランパ 5cm および 10cm 。

シリーズ2. $\%C=55\%$ 一定。単位水量 $181, 185, 190$ 、および 195kg/m^3 。各水量に対して骨材最大寸法 $25, 20, 15$ 、および 10mm を用いる。

極微砂+セメント+水からなる均質硬化体

シリーズ3. $\%S=0.25 \sim 5$ のオートクレープ養生硬化体。ヤング率は $1.4 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ の間で任意に選ぶことができる。等方均質な硬化体であるから、模式的な曲げひずみ分布測定のために作成した。

材料 コンクリートは7日および28日、水中養生。29日以降は室内放置。オートクレープ硬化体は前養生1日で、 $180^\circ\text{C}(10.2\%C_m)$ -5時間のオートクレープ養生。養生後室内放置。

強度試験方法 (特記事項以外はJISの方法に準じた。)

曲げ試験 円柱状供試体による曲げ試験は図-3に示すような半円形の載荷装置によって荷重を加えた。載荷方法およびスパンを2表に示す。曲げ強度の算出は一般的弾性式による。 $F_b = \frac{2Pl}{3bZ^2}$ (3等分)、 $F_b = \frac{Pl}{bZ^2}$ (中央載荷)

引張試験 JISの方法以外に曲げ試験を行なった供試体(円形、正方形)の折片によって圧

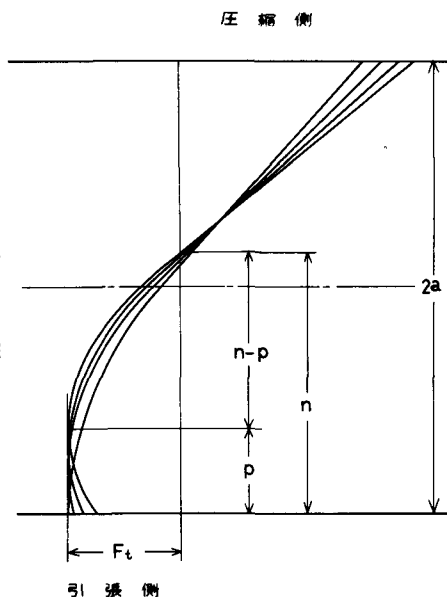


図-2 応力度分布

裂試験を行なった。一部の供試体で単純引張試験を行なった。

圧縮試験 円柱供試体およびハリの折片によって求めた。

ひずみ測定

ワイヤストレーンゲージを使用した。測定機は1測点、5秒のデジタルストレーンメーターによった。ゲージは70、30、20、10mmを用いた。三等分点載荷には70mmゲージを用い、中央集中載荷の場合には短いゲージを用いた。しかし、後者には最大曲げモーメント(M)に対して $M \cdot (1 - \frac{g}{L})$ 、(L:スパン、g:ゲージ長さ)の補正を行なう必要がある。

(4)実験結果

実験シリーズ1のうち、すでに得られた強度試験結果を3表に示す。

実験シリーズ2のうち、すでに得られた強度試験結果を4表～6表に示す。

実験シリーズ3の結果を7表に示す。

ヤング率の測定結果の1例を図-4に、曲げひずみ分布の測定結果の1例を図-5、図-6に示す。

(5)考察

シリーズ1～3およびひずみ測定結果をまとめると次のようになる。

① $\phi 10 \times 20$ cm供試体による曲げ強度は、JISに

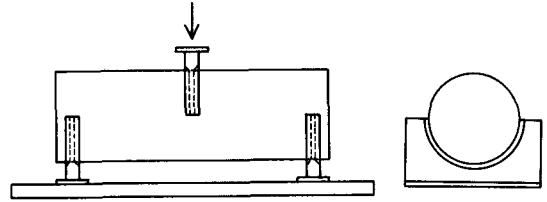


図-3 円柱供試体載荷状態

供試体形状		三等分点載荷 スパン(cm)	中央集中載荷 スパン(cm)		
円形断面	$\phi 10$	30	30	18	15
	$\phi 15$	45	45	28	23
正方形断面	10×10	30	30	18	15
	15×15	45	45	28	23

2-表

3-表 円柱供試体による強度試験結果

W/C (%)	スパン (cm)	曲げ強度 F_b (kg/cm^2) スパン18cm 中央集中載荷	引張強度 F_t (kg/cm^2) 圧裂試験 $\phi 10 \times 20$ と折片	圧縮強度 F_c (kg/cm^2) $\phi 10 \times 20$ cm	F_b/F_t	F_c/F_b	F_c/F_t
40	2	61.9	25.1	26.1	2.47	4.22	10.4
50	4	49.5	21.5	22.8	2.30	4.61	10.6
60	3	41.6	17.0	17.1	2.45	4.11	10.1
70	5	38.9	13.2	12.9	2.94	3.65	9.6

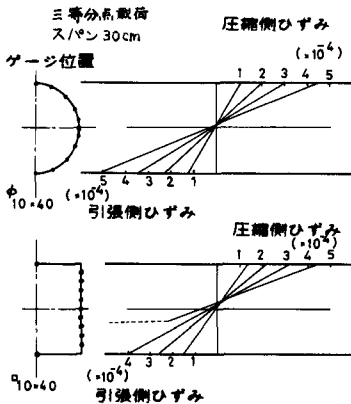
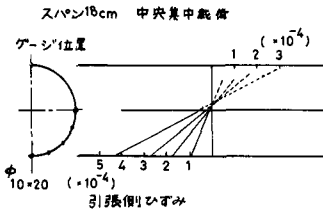


図-5 ひずみ分布(円筒質供試体)

W/C (%)	W (kg/m ³)	M.A. (mm)	曲げ強度 F _b (l=18cm)		引張強度 F _t (kg/cm ²)	圧縮強度 F _c (kg/cm ²)	
			10 (kg/cm ²)	10 (kg/cm ²)			
55	181.5	25	60.6	59.8	1.01	24.8	38.5
		20	74.6	53.0	1.41	27.8	34.4
		15	70.1	56.0	1.25	28.2	30.8
		10	63.8	55.8	1.14	30.8	30.9
	185.0	25	62.8	51.0	1.23	27.3	35.0
		20	63.9	56.8	1.13	29.4	31.4
		15	65.6	57.4	1.15	26.5	33.7
		10	70.9	60.4	1.17	29.0	32.2
	190.0	25	62.5	58.9	1.06	32.0	38.3
		20	64.1	58.3	1.10	29.0	35.5
		15	67.6	60.2	1.09	26.1	37.6
		10	61.4	56.0	1.10	25.8	36.7

4-表 曲げ試験: 円形断面と正方形断面の比較

よる曲げ強度の1.5~1.7倍程度となる。しかし、この値は

②断面形による影響よりもスパンによる影響の方が大きい。

③円形断面による値は正方形断面の1.15~1.20倍程度である。

④載荷方法とスパンの影響は、円形も正方形も同率で受ける。

⑤強度試験および歪測定による中立軸の位置を考慮して $F_b = K F_t$ の値を総合的に推定すると、円形では $K=1.8 \sim 2.3$

正方形では、 $K=1.5 \sim 1.9$ 程度であろう。

(b)あとがき

以上の数値は、取敢えず得られた結果をまとめてみたもので、一つの目安に過ぎないものである。もっと多くの結果から判断すべきものと考えている。目下、実験中である。

表-6 JIS方法の曲げ強度と他の方法による曲げ強度との比較

$w/c = 55\%, w = 182 \text{ kg/m}^3, 25^\circ\text{C}$

	正方形断面		円形断面	
寸法 cm	15x15	10x10	$\phi 15$	$\phi 10$
載荷方法				
スパン cm	45	30	28	18
曲げ強度 kg/cm^2	32.8	34.9	52.9	55.7
JISの方法を100としたときの値	1.00	1.06	1.61	1.70
供試体寸法の比較	1.00	1.06	1.00	1.05

供試体 3本の平均

表-5の結果による

表-7 円形断面による曲げ試験と正方形断面による曲げ試験の比較

(均等質供試体による強度試験結果, セメント・砂 = 1:1, 骨材なし)

	正方形断面 (10x10 cm)		円形断面 ($\phi 10$ cm)	
載荷方法	30	18	30	18
スパン cm	30	18	30	18
曲げ強度 (F_b) kg/cm^2	77.1	92.2	78.9	91.9
$K = F_b / F_t$	1.81	2.16	18.5	2.16
スパンの比較 $\frac{L}{L_0}$	1.00	1.195	1.00	1.193
断面形の比較 $\frac{A}{A_0}$	1.00	1.00	1.19	1.19

供試体 3本, 引張試験 16本

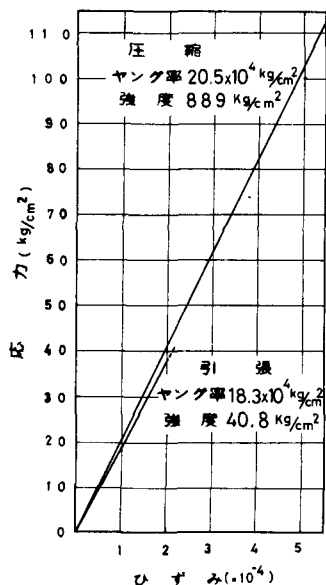


図-4 応力・ひずみ線図

3-表 載荷方法およびスパンが異なる場合の曲げ強度

w/c (%)	W (kg/m^3)	M.A. (mm)	正方形断面強度 kg/cm^2 $15 \times 15 \text{ cm}$				円形断面強度 kg/cm^2 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$		
									引張強度
55	182	25	33.3	35.7	48.8	51.3	51.6	1.55	26.7
		20	37.2	41.4	59.6	55.3			
		15	43.5	54.9	56.4	56.3	68.4	1.57	26.4
		10	22.4	32.0	35.1	36.2			
55	190	25		49.8	58.9		62.5	59.5	32.0
		20		42.7	58.3		64.1	62.0	29.0
		15		48.7	60.2		67.6	69.7	26.1
		10		45.7	56.0		61.4	63.6	25.8

参考文献

1) 決田 稔 著

材料試験法

理化学院