

コンクリートの円柱供試体による曲げ強度試験方法について

森野 奎二・西野 昭

On the Method of Test for Flexural Strength of Concrete in Cylindrical Specimens

Keiji MORINO and Akira NISHINO

コンクリートの曲げ強度を円柱供試体によって求めることを提案し、従来の角柱供試体による値との関係を明らかにした。その結果、直径15cm及び直径10cmの円柱供試体による曲げ強度(b_2)から15×15cm角柱供試体の曲げ強度(b_1)を推定するための換算式は $\sigma_{b1}=0.91\sigma_{b2}$ となった。なお、両直径の違いによる強度差はなかった。その他、骨材最大寸法の影響及びコア採取による骨材の切断の影響など、この試験方法に関連する諸点を調べた。

1. まえがき

コンクリート構造物が老朽化したり、使用材料あるいは施工に難点があった場合などは、構造物の安全性を再検討しなければならなくなる。この場合、簡単にはシュミットハンマー等による非破壊試験がなされるが、最終的にはコアを採取して、直接に強度試験を行わなければならないことが多い。

コア供試体の強度試験は、一般に圧縮試験で行われるが、その前に曲げ試験を行い、その折片を圧縮試験に使用すれば、より信頼性が増す。特に、圧縮試験結果には現われないようなマイクロクラックでも、曲げ試験結果には顕著に現われるので、曲げ試験を行うことによってコンクリートの劣化の程度をより厳しくとらえることができる。

しかし、従来の曲げ試験のように、コア供試体の四方を切り取ってはり供試体を作成していたのでは、作業がたいへんであり、また、骨材最大寸法が大きい場合には、一層大きなコア断面が必要となり、実用的でない。

また、はり供試体作成の本来の目的である舗装のような平坦な箇所でも、深い位置からの採取はできなく、この場合もやはり、コアによらなければならない上述の困難が伴う。

そこで、コアをそのまま曲げ試験の供試体として用いることができれば、構造物の直接試験は比較的容易となる。

以上のような観点からコア供試体による曲げ強度試験を提案するものであるが、この値を評価するためには、

従来からの曲げ強度との対応が必要となる。

従ってコアの円形断面とはりの矩形断面との断面形状による曲げ強度の相違を、まず、型枠により作成した円柱供試体（コアドリルにより採取した供試体をコア供試体と呼ぶ）と角柱供試体（カッターにより切り取った供試体をはり供試体と呼ぶ）とによって調べた。この実験の目的は、JISの15×15cm供試体の曲げ強度に換算できるような換算係数を求めることであり、載荷方法、配合などを種々変えて求めた。次にコンクリートからコアおよびはり供試体を採取し、骨材の切断による影響を調べた。

2. 曲げ強度試験について

コンクリートの曲げ強度試験では、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最大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体となるので、この応力状態は成り立たなく、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、計算においては実用上から直線分布（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。矩形断面による既往の実験結果^{1),2),3),4)}では、引張強度の1.50倍～2.64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。まず最初に、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⁵⁾を円形断面にも採用した。すなわち、圧縮側は直線で、引張側は2次の放物線とし、中立軸の位

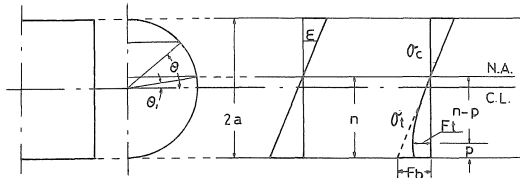


図1 曲げ応力度分布

置では、曲線の接線が直線と一致するとする。この仮定に基づく応力度分布を円形断面の計算に便利のように三角関数で表わすと、圧縮側(σ_c)および引張側(σ_t)は

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

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

$$n-p = \frac{a}{4\sin \theta_1} \left(\frac{1}{3} + \sin \theta_1 + \sin^2 \theta_1 + \frac{1}{3} \sin^3 \theta_1 \right)$$

となる。各記号の意味は図1に示したように、F_tは引張強度を表わし、aは供試体半径、(n-p)は中立軸からF_tまでの距離、θは中立軸から任意の位置までの角度、θ₁は供試体中央から中立軸までの角度を表わす。

次に、曲げ強度(F_b)が引張強度(F_t)の何倍(F_b=K・F_t)になるかを求めると、表1のようになる。その計算式は

矩形断面

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

円形断面

$$F_b = \frac{a}{n-p} \left\{ 2 + 8\sin^2 \theta_1 - \frac{a}{n-p} \left(\frac{3}{2}\sin \theta_1 + \frac{16}{15\pi} \cos \theta_1 \right) \right\} \cdot F_t$$

である。表1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度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、破壊の直前でも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の計算結果を図2に示した。なお、軟鋼の降伏直後のように、引張側と圧縮側が共に完全塑性体の応力度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。

3. 実験方法

1. 実験項目

実験項目を次のように分類した。

- (1) 載荷装置の影響：全面、90°、120°、180°

表1 中立軸の位置とkの関係

n(x _a)	n - p(x _a)	p(x _a)	F _b = k · F _t		k ₂ /k ₁
			k ₁ (矩形)	k ₂ (円形)	
1.08	1.31	-0.23	1.26	1.30	1.03
1.10	1.11	-0.01	1.41	1.48	1.05
1.12	0.98	0.14	1.52	1.62	1.07
1.14	0.88	0.26	1.59	1.75	1.10
1.16	0.81	0.35	1.62	1.85	1.14
1.18	0.76	0.42	1.63	1.93	1.18
1.20	0.72	0.48	1.61	2.00	1.24
1.22	0.69	0.53	1.58	2.07	1.31
1.24	0.66	0.58	1.52	2.14	1.41

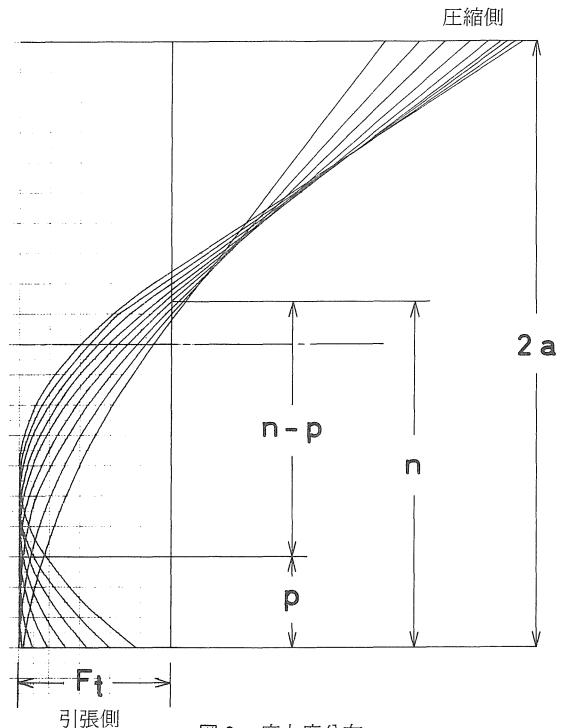


図2 応力度分布

- (2) 断面形状の相違：15×15×53 cm 供試体と15φ×60 cm 供試体、10×10×40 cm 供試体と10φ×40 cm 供試体。
 - (3) 断面寸法の影響：7.5φ、10φ、15φ cm 供試体。
 - (4) 載荷方法の相違：三等分点載荷、中央集中載荷。
 - (5) スパンの影響：18、20、25、30、35、40、50 cm。
 - (6) 水セメント比の影響：45、50、55、60、65%。
 - (7) 骨材最大寸法の影響：10、20、25、30、40 mm。
 - (8) 各供試体間の関係：ハリ供試体と角柱供試体、コア供試体と円柱供試体、ハリ供試体とコア供試体。
2. 使用材料
セメント：普通ポルトランドセメントを使用し、セメ

ントの物理試験の結果を表2に示した。

骨材：細骨材は、愛知県矢作川産川砂（比重：2.59，吸水率：1.5%）を使用し，粒度分布を図3に示した。粗骨材は，愛知県瀬戸地方産山砂利（比重：2.60，吸水率：0.8%，実験項目(1)~(6)に使用）及び静岡県天竜川産川砂利（比重：2.65，吸水率：0.6%，実験項目(7)，(8)に使用）を使用粒度にフルイ分けし，図3に示す粒度分布とした。

配合：コンクリーの配合を表3に示した。また，モルタルの配合はC：S：W=1：2：0.45，1：3：0.60の2種類とし，記号Y，Zとする。

3. 供試体の作成方法

供試体の作成はJIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠した。なお，締め固めにはテーブルバイブレーター（振幅1mm，振動数6000rpm）と突き棒を使用した。

材令は，28日水中養生とした。ただし，コア及びハリ採用用供試体とその比較のための供試体は49日水中養生とした。

コア供試体(10φ×40cm)の採取は，ダイヤモンド・ドリル（主軸回転数：1720rpm，ビットの周速：540m/min）を使用し，図4に示す位置から採取した。供試体はブロック2個から取り，打ち込み方向に対して，平行方向には6個，垂直方向には上段，中段，下段において，それぞれ各4個とした。ハリ供試体（15×15×53cm）の採取は，ダイヤモンド・カッター（主軸回転数：750rpm，ブレードの周速：1200m/min）を使用し，図5のように切り取った。

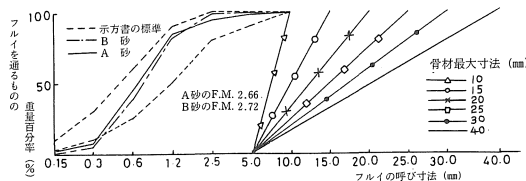


図3 使用骨材の粒度分布

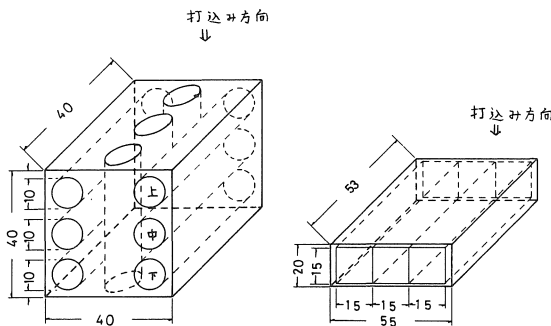


図4 コア供試体の採取位置

図5 ハリ供試体の採取状態

表2 セメントの物理試験結果

項目	比重	粉末度		安(定沸性)	凝結					
		比表面積 (cm ² /g)	88μ 残分 (%)		始発 (時-分)	終結 (時-分)	軟度 (mm)	水量 (%)	室温 (°C)	湿度 (%)
成績	3.16	3,160	1.1	良	2-42	4-26	6	27.7	20	90

項目	強さ (kg/cm ²)						養生温度 (°C)
	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)			
	3日	7日	28日	3日	7日	28日	
成績	35	53	74	147	238	404	20

(セメント成績表による)

表3 コンクリートの配合表

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 ポリス NO 5 L
A	10	5.5	55	41.0	221	402	655	942	—
B	10	5.0	55	41.0	205	373	689	993	—
C	10	8.0	55	62.0	231	420	966	591	—
D	15	2.5	45	40.9	168	373	729	1,050	—
E	15	4.0	50	41.0	187	373	710	1,020	—
F	15	4.0	55	41.0	200	364	695	1,000	—
G	15	6.0	55	41.0	205	373	689	993	—
H	15	9.0	60	41.0	224	373	668	966	—
I	15	14.5	65	41.0	243	373	650	934	—
J	20	1.5	55	41.0	187	340	728	1,047	—
K	20	7.0	55	46.0	190	345	809	945	—
L	20	8.0	55	46.0	190	345	809	945	—
M	25	3.5	55	41.0	173	315	753	1,092	—
N	25	5.0	55	41.0	178	324	750	1,080	—
O	25	5.4	55	41.0	178	324	750	1,080	—
P	25	8.0	55	42.4	197	358	732	1,006	—
Q	25	9.0	46	41.5	150	326	777	1,097	0.815
R	25	12.0	55	41.0	200	364	713	1,027	—
S	25	6.5	55	41.0	190	346	731	1,050	—
T	30	8.0	55	38.0	170	309	721	1,177	—
U	30	8.5	55	40.1	199	362	696	1,039	—
V	40	8.0	55	38.8	183	333	671	1,137	—

4. 曲げ強度試験およびひずみ測定

(1) 曲げ強度試験は，JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠したが，円柱供試体に使用した載荷装置は図6に示したものである。また，載荷方法は三等分点載荷および中央集中載荷で行った。曲げ強度の算出は，一般的な弾性式によった。すなわち，円柱供試体

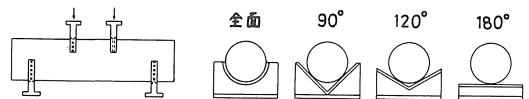


図6 円柱供試体用およびコア供試体用載荷装置

の場合は，三等分点載荷： $\sigma_b = \frac{16P\ell}{3\pi d^3}$ ，中央集中載荷：

$$\sigma_b = \frac{8P\ell}{\pi d^3} \quad (\text{破断位置の補正値は } 1 - \frac{2x}{\ell})$$

また，角柱供試体の場合は，三等分点載荷： $\sigma_b = \frac{P\ell}{bh^2}$ である。ここで，P：供試体破壊時の荷重(kg)， ℓ ：スパン(cm)，d：供試体の径(cm)，x：スパン中央より供試体下面における破断位置までの距離(cm)，b：供試体の幅(cm)，h：供試体の高さ(cm)を示す。

(2) 曲げ試験時のひずみ測定は，三等分点載荷方法で行った。ひずみゲージ（ゲージ長さ：60mm）を円柱供試体の軸方向に12枚，角柱供試体には10枚，それぞれ図7に示したように貼付した。

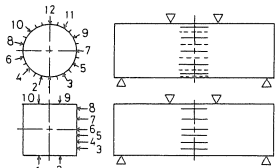


図7 ひずみゲージの貼付位置

4. 実験結果および考察

1. 載荷装置の影響

円柱供試体に使用する載荷装置の影響を調べるために行った実験結果を表4に示した。表4は，全面載荷の場合の強度を100としたときの強度比を示したものである。この実験に使用した配合は表3のF，QおよびZであり，このことを表4の右側に記した。なお，試験値は供試体3～6個の平均値である。この結果から，4種類の載荷装置の強度比は100～103となり，ほとんど強度差が認められない。ただし，強度のバラツキについては，全面載荷の場合が最も小さく，他のものは2～3%程度大きい値となっている。しかし，全面載荷装置をいちいち径に

表4 各種曲げ載荷装置の比較

断面寸法φ	載荷装置方法	載荷装置				配合
		全面	90°	120°	180°	
三等分点載荷	15	100 (39.8) 3.8	97 7.7	99 8.7	103 2.1	Q
	45	100 (40.0) 1.8	96 9.4	101 7.2	104 7.7	Z
	15	100 (40.3) 3.1	98 3.8	104 7.5	99 3.4	Q
	45	100 (40.1) 3.2	106 1.9	105 7.1	105 3.8	Q
中央集中載荷	10	100 (50.2) 1.9	100 7.8	105 1.1	94 4.9	Q
	30	100 (52.4) 6.8	102 7.0	105 4.5	支点破壊	Q
	18	100 (46.5) 5.7	100 7.1	101 6.3	支点破壊	Z
	27	100 (47.7) 3.1	103 12.8	94 11.7	94 13.5	Z
平均	比率 (強度 kg/cm ² 変動係数%)	100	101	103	100	
		4.2	7.5	6.4	6.3	

合わせて作ることは不経済である。また，コア供試体には凹凸がある場合が多いので，装置に全断面を密着させることは難かしい。このような場合には，V字型（90°，120°）もしくは棒状（180°）の装置の方が載荷位置がはっきりする。したがって，JISの矩形断面と同じような載荷装置は全面載荷ではあるが，実際に円柱供試体を使用するときの載荷装置には，多少バラツキが大きくとも試験の簡便さを考慮すれば，矩形断面の載荷装置をそのまま使用できる棒状（180°）の装置が便利であり，実用上もっとも使用価値が高いと思われる。

なお，全面載荷装置を使用するときには，端部をほとんど残さなくても支点破壊しない。が，V字型の装置のときは1cm以上，棒状の装置では2cm以上残さないと支点上から破壊する場合があるので，できるだけ端部から離す必要がある。

2. 断面形状の相違

角柱供試体と円形供試体との強度の関係を求めるために，JISの15×15×53cm供試体と15φ×60cm供試体を用いて実験を行なった。最初に，骨材の影響をぬきにした断面形状のみの違いを求めるためにモルタルによって実験を行なった。その結果を表5に示した。表5は同

表5 モルタル供試体による円形断面と矩形断面の曲げ強度の関係

No	φ15x60cm (三等分点載荷)				平均変動係数	□15x15x53cm (三等分点載荷)			平均変動係数	$\frac{\sigma_{b2}}{\sigma_{b1}}$
	$\bar{\sigma}_{b1}$ (kg/cm ²)					$\bar{\sigma}_{b2}$ (kg/cm ²)				
15	76.2	72.1	74.5	60.7	70.5	52.8	64.9	65.4	61.0	1.16
	66.6	68.4	74.8	70.8	6.8				9.6	
16	77.2	65.3	69.4		70.6	66.7	64.0	64.7	65.1	1.08
					7.0				1.8	
17	71.6	70.2	71.2	73.0	71.5	69.6	67.2	70.0	68.9	1.04
					1.4				1.8	
18	63.2	66.9	72.8	69.9	67.6	62.2	61.2	58.4	60.6	1.12
	65.2				5.0				2.7	
19	63.8	66.0	65.0	70.7	66.3	56.5	61.8	63.4	60.6	1.09
					4.0				4.9	
総平均					69.4				63.3	1.10 (±0.05)
					4.8				4.2	

配合1：2：0.45の一定（±0.05は曲げ強度比の標準偏差）

一配合（C：S：W=1：2：0.45）で5回実験を繰り返した結果である。一回ごとの角柱供試体に対する円柱供試体の曲げ強度比は1.16, 1.08, 1.04, 1.12および1.09となり平均値は1.10となった。

次に各種の配合によるモルタル及びコンクリートについて実験を行い，その結果を表6に示した。コンクリートの強度比は1.02～1.15で平均値は1.08となり，また，モルタルの強度比は1.04～1.16で平均値は1.09で，いずれもほぼ等しく，平均値をとると1.09（逆数0.91）となった。両形状の実測値の相関関係を示すと図8となる。図8では，角柱供試体（ σ_{b1} ）と円柱供試体（ σ_{b2} ）との関係は $\sigma_{b1} = 0.91\sigma_{b2} + 0.60$ となり相関係数 $r = 0.986$ で非常に強い相関性を示した。

表6 円形断面と矩形断面の曲げ強度の関係
— 供試体寸法 15cm —

種類	配合 番号	15×15×53cm (スパン45cm, 三等分点載荷)				φ15×60cm (スパン45cm, 三等分点載荷)				曲げ強度比 σ_{b2}/σ_{b1}
		曲げ強度 σ_{b1} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		曲げ強度 σ_{b2} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		
モルタル	Y 15	61.0	3	9.6	70.5	8	6.8	1.16		
	Y 16	65.1	3	1.8	70.6	3	7.0	1.08		
	Y 17	68.9	3	1.8	71.5	4	1.4	1.04		
	Y 18	60.6	3	2.7	67.6	5	5.0	1.12		
	Y 19	60.6	3	4.9	66.3	4	4.0	1.09		
	Y 20	65.9	3	5.3	69.5	3	3.9	1.05		
	Z 1	39.9	3	5.3	42.2	3	6.3	1.06		
	Z 2	31.0	3	10.8	35.8	3	8.0	1.15		
	平均	—	—	5.0	—	—	5.3	1.09(±0.05)		
	コンクリート	F 1	49.5	3	3.9	55.8	6	4.0	1.13	
J 1		50.8	3	5.6	54.6	3	5.4	1.07		
K 1		44.0	3	2.6	50.5	3	2.4	1.15		
M 1		45.3	5	7.4	46.0	6	5.3	1.02		
N 1		44.6	3	9.2	45.6	4	8.9	1.02		
O 1		35.8	3	6.5	40.9	3	9.6	1.14		
P 1		36.7	3	3.5	39.9	3	6.3	1.09		
Q 1		38.4	3	1.7	39.8	3	3.8	1.04		
T 1		46.4	3	5.9	48.7	3	3.5	1.05		
S 1		37.6	3	3.2	39.7	3	4.1	1.06		
平均	—	—	5.3	—	—	5.3	1.08(±0.05)			
総平均	—	—	5.1	—	—	5.3	1.08(±0.05)			

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

表7 円形断面と矩形断面の曲げ強度の関係
— 供試体寸法10cm, モルタル —

種類	配合 番号	10×10×40cm (スパン30cm, 三等分点載荷)				φ10×40cm (スパン30cm, 三等分点載荷)				曲げ強度比 σ_{b4}/σ_{b3}
		曲げ強度 σ_{b3} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		曲げ強度 σ_{b4} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		
モルタル	Y 3	58.9	3	4.9	69.7	3	6.7	1.18		
	Y 4	54.9	3	6.8	66.2	10	5.7	1.21		
	Y 5	57.6	3	7.8	68.7	10	8.7	1.19		
	Y 6	60.6	3	5.7	73.9	10	4.2	1.22		
	Y 7	66.0	3	7.4	73.7	10	8.0	1.13		
	Y 8	48.0	3	1.0	69.8	8	6.3	1.45		
	Y 9	67.1	3	2.7	80.0	10	7.6	1.19		
	Y 10	67.3	3	3.5	78.2	10	6.5	1.16		
	Y 11	68.1	3	1.1	80.3	9	4.8	1.18		
	Y 12	64.4	3	3.8	76.4	10	5.7	1.19		
	Y 13	69.6	3	8.9	78.3	10	8.2	1.13		
	Y 14	58.1	3	5.0	73.5	10	5.1	1.27		
	Y 15	59.1	3	14.2	69.4	10	7.6	1.17		
	Y 16	55.4	3	5.2	66.2	10	7.6	1.19		
	Y 17	56.8	3	5.8	70.2	10	5.1	1.24		
	Y 18	53.8	3	3.1	70.3	10	7.7	1.31		
	Y 19	56.1	3	5.8	69.5	10	7.5	1.46		
	平均	—	—	5.5	—	—	6.6	1.23(±0.10)		

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

表8 円形断面と矩形断面の曲げ強度の関係
— 供試体寸法 10cm, コンクリート —

種類	配合 番号	10×10×40cm (スパン30cm, 三等分点載荷)				φ10×40cm (スパン30cm, 三等分点載荷)				曲げ強度比 σ_{b4}/σ_{b3}
		曲げ強度 σ_{b3} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		曲げ強度 σ_{b4} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数(%)		
コンクリート	K	43.3	3	2.9	52.8	5	8.6	1.22		
	M	47.3	3	6.3	48.9	8	10.1	1.03		
	N	33.0	3	4.7	44.0	8	10.0	1.33		
	Q	36.9	3	3.0	41.3	3	2.8	1.12		
	T	43.5	3	10.7	47.2	7	14.5	1.09		
平均	—	—	5.5	—	—	9.2	1.16(±0.12)			

平均値の () は曲げ強度比の標準偏差

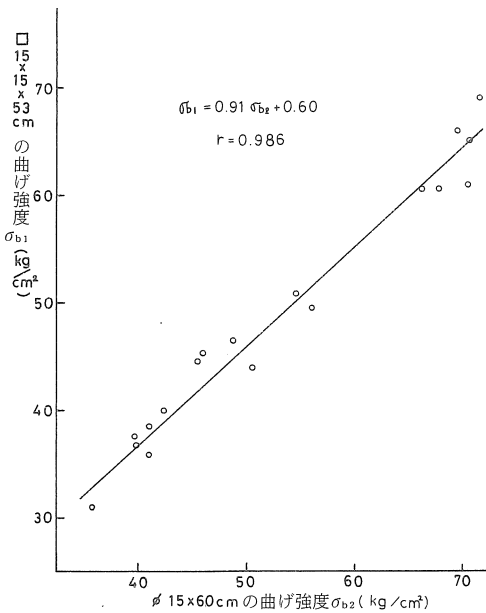


図8 円形断面と矩形断面の関係

次に断面寸法を小さくして、10×10×40cmと10φ×40cm供試体の関係を調べた。表5と同様に、まず同一配合(C:S:W=1:2:0.45)のモルタルについて実験を行った。その結果を表7に示した。表7は各バッチごとの比較であるが、特に円柱供試体の個数が多いのはバッチ内とバッチ間のバラツキをみるためである。両形状の強度比は1.13~1.46で平均値は1.23となるが、バッチ間のばらつきが大きい。次にコンクリートの結果を表8に示した。その結果は1.03~1.33で平均値は1.16と

なった。この場合も、直径15cmの結果に比べ強度比の差が大きくなった。これらは10×10×40cm供試体の結果が弱かったためで、その原因は1つには載荷装置の悪さに原因しているのではないと思われる。そこで、15×15×53cmと10φ×40cm供試体とを直接比較してみると、モルタルの平均値は1.08となり、コンクリートの平均値は1.11で、総平均では1.09となり、直径10cmと直径15cmでは差が生じなかった。(詳しくは次項参照)

以上、円柱供試体から角柱供試体の強度を推定するには、上記の逆数の0.91倍を円柱供試体の結果に掛ければよいことになる。なお、この結果を表1の理論計算値と比較すると中立軸の位置 $n \times a$ は1.135となる。これを確認するために、角柱供試体および円柱供試体について図7のようにストレインゲージを貼り、ひずみ測定を行った。多くの測定結果の中で1番良好な結果を図9、図10に示した。両図の結果においてさえも1測点0.5秒のデジタルストレインメーターを使用したために、破壊の瞬間の最大引張縁のひずみを測定することができていないが、この場合の中立軸は、角柱の場合が1.10で円柱の場合が1.12となった。破壊瞬間では、間違いなくさらに上に上がるものと思われる。したがって、中立軸の位置は計算値に近くなり、おおよそ0.91倍は妥当な係数と思われる。

3. 断面寸法の影響

さらに、実用価値を高めるには、断面寸法の小型化への適用性が必要となる。そこで、円柱供試体の寸法効果を調べるために、三等分点載荷による15φ×60cm供試体の曲げ強度(σ_{b2})と10φ×40cm供試体の曲げ強度(σ_{b4})との関係を求め表9に示した。表9によるとモルタル、

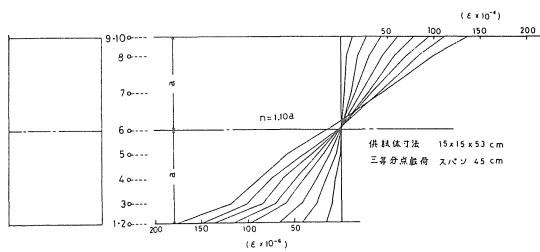


図9 角柱供試体によるヒズミ測定

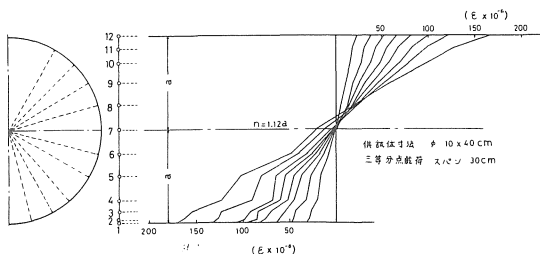


図10 円柱供試体によるヒズミ測定

表9 円形断面寸法と曲げ強度の関係
— 三等分点載荷 —

種類	配合 配号 バッチ 番号 No	φ15×60cm (スパン45 cm, 三等分点載荷)			φ10×40cm (スパン30 cm, 三等分点載荷)			曲げ強度比 σ_{b4}/σ_{b2}
		曲げ強度 σ_{b2} (kg/cm ²)	供試 体数	変動 係数 (%)	曲げ強度 σ_{b4} (kg/cm ²)	供試 体数	変動 係数 (%)	
モルタル	Y 15	70.5	8	6.8	69.4	10	7.6	0.99
	Y 16	70.6	3	7.0	66.2	10	7.6	0.94
	Y 17	71.5	4	1.4	70.2	10	5.1	0.98
	Y 18	67.6	5	5.0	70.3	10	7.7	1.04
	Z 1	42.2	3	6.3	42.9	4	7.0	1.02
	Z 2	35.8	3	8.0	39.6	4	6.0	1.11
	平均	—	—	5.8	—	—	6.8	1.01(±0.05)
コンクリート	J 1	54.6	3	5.4	52.4	5	5.9	0.96
	K 1	50.5	3	2.4	52.8	5	8.6	1.05
	M 1	46.0	6	5.3	48.9	8	10.1	1.06
	N 1	45.6	4	8.9	44.0	8	10.0	0.96
	O 1	40.9	3	9.6	44.2	3	6.2	1.08
	Q 1	39.8	3	3.8	40.1	4	3.2	1.01
	S 1	39.7	3	4.1	40.6	3	6.2	1.02
	T 1	48.7	3	3.5	47.2	7	14.5	0.97
	平均	—	—	5.4	—	—	8.1	1.01(±0.05)
	総平均	—	—	5.5	—	—	7.6	1.01(±0.05)

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

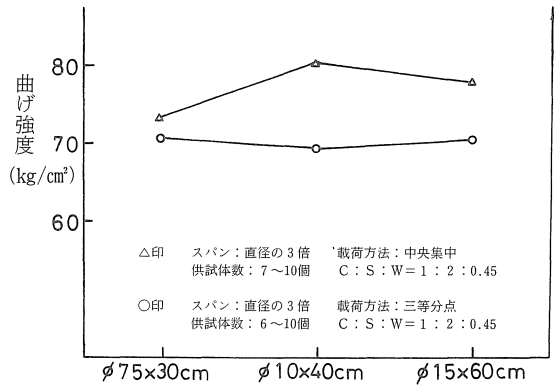


図11 供試体寸法と曲げ強度の関係

コンクリート共に両寸法の強度比の平均は1.01となり、ほぼ等しいといえる。なお、参考までに7.5φ×30cm供試体をも加えて比較すると図11となり、やはり強度差はない。

薄い構造物から、コアを採取する場合に、直径に対して何倍かの長さ確保するためにはコアの直径を小さくせざるを得ない。しかし、骨材最大寸法との関係もあるのであまり小さくできない。このときには直径に対して供試体長さが短くなる。このような場合には、三等分点載荷は無理で中央集中載荷にしなければならない。中央集中載荷と三等分点載荷の比較およびスパンの関係等

表10 円形断面寸法と曲げ強度の関係
—— 中央集中載荷 ——

種類	配合 配号 番号 No	φ10×40cm (スパン30 cm, 中央集中載荷)			φ7.5×30cm (スパン 22.5cm, 中央集中載荷)			曲げ強度比 σ_{b6}/σ_{b5}
		曲げ強度 σ_{b5} (kg/cm ²)	供試体 数	変動係 数(%)	曲げ強度 σ_{b6} (kg/cm ²)	供試体 数	変動係 数(%)	
モ ル タ ル	Y 1	74.9	5	4.0	84.0	5	7.9	1.12
	Y 3	73.2	9	10.1	61.7	5	12.9	0.84
	Y 4	71.8	10	6.7	62.2	7	5.6	0.87
	Y 5	77.2	10	5.9	64.6	6	2.9	0.84
	Y 6	88.3	10	6.2	72.7	7	4.3	0.82
	Y 7	78.1	10	5.3	71.5	7	10.0	0.92
	Y 8	88.2	8	10.6	71.1	7	9.8	0.81
	Y 9	87.6	10	6.7	85.8	7	9.3	0.98
	Y 10	90.8	10	2.0	89.3	7	5.0	0.98
	Y 11	88.4	10	7.4	87.6	7	6.1	0.99
	Y 12	84.3	10	6.0	88.1	7	3.3	1.05
	Y 13	89.0	9	4.8	83.3	7	4.0	0.94
	Y 14	85.1	10	5.6	77.2	7	4.4	0.91
	Y 15	76.0	10	3.7	68.7	7	7.1	0.90
	Y 16	78.3	10	6.0	78.1	7	5.5	1.00
	Y 17	78.5	10	5.5	73.7	7	5.9	0.94
	Y 18	76.4	10	3.8	74.7	7	3.0	0.98
	Y 19	69.0	5	6.4	64.4	5	2.6	0.93
	平均	—	—	5.9	—	—	6.1	0.93(±0.08)
コ ン ク リ ー ト	K 1	65.1	5	5.1	57.2	3	2.4	0.88
	M 1	55.9	7	10.3	65.9	4	7.8	1.18
	N 1	52.5	6	9.2	51.4	3	5.6	0.98
	T 1	52.8	9	13.1	49.6	3	0.2	0.94
	平均	—	—	9.4	—	—	4.0	1.00(±0.13)
総平均	—	—	6.6	—	—	5.7	0.95(±0.09)	

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

については次項で述べるので、ここでは、断面寸法の違いによる強度差のみを求めた。その結果は図11のようになり、7.5φ×30cm供試体の強度が低下している。そこで更に詳しく、10φ×40cm供試体と7.5φ×30cm供試体と比較した。その結果を表10に示した。これは図11と同様であった。

すなわち、三等分点載荷では、強度比の平均値において差は生じていないが、中央集中載荷のときには、強度差が直径7.5cm供試体の方が小となっている。これは圧縮強度などで言われている供試体寸法が小さくなると強度が大となる傾向とは反対で、更に検討を要すると思われる。

4. 載荷方法の相違

従来角柱供試体による三等分点載荷と中央集中載荷では、後者は前者の1.02~1.26⁹⁾、平均値で1.18倍となっているが、円柱供試体ではどのように相違するかを調べ

た。上述の図12と比較すれば分かるが、更に詳細にみるために、供試体寸法10φ×40cmで、スパン30cmでの実験を行った。その結果を表11に示した。図12は、中央集中載荷の曲げ強度(σ_{b3})に対応する三等分点載荷の曲げ強度(σ_{b4})をプロットしたものである。表11によると、その強度比は、実測値では角柱供試体と同様に中央集中載荷の方が大きく1.01~1.28、平均値は1.16であり、上述の角柱供試体とほぼ等しくなった。補正值では、その強度比が0.91~1.21、平均値で1.07となり、補正前と比べて相当小さくなっている。一般に最大曲げモーメントの分布区間が、三等分点載荷の場合は広いので、その区間内の最も弱い箇所破壊するのに反し、中央集中載荷の場合では、最大曲げモーメント付近で強制的に破壊する。しかし、円柱供試体の場合では、最大引張応力を受ける部分が極めて狭いので弱点の影響を受けやすい。このために、中央集中載荷の場合では、より弱い箇所破壊して上記のように、三等分点載荷の値に近づいたものと思われる。ただし、補正はモルタルでは機械的に行うことはできるが、コンクリートでは骨材の幅だけはずれるので、この点を考慮しなければならないが、表11では機械的に破壊位置の補正を行ったために、より必要以上に三等分点載荷に近づいた可能性がある。以上、いずれにしろ三等分点載荷が出来ないような薄い構造物から採取したコア供試体で、中央集中載荷しかできない場合には、上記の点を配慮する必要がある。

5. スパンの影響

実際に円柱供試体で曲げ強度の必要性が生じるのは、

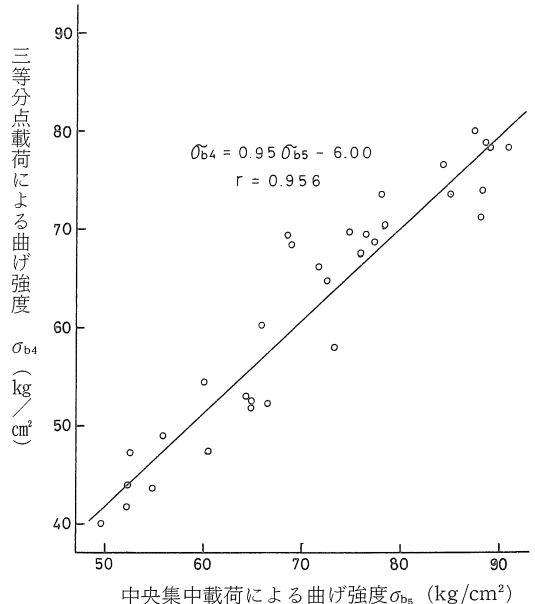


図12 φ10×40cm供試体による三等分点載荷と中央集中載荷の関係

打設コンクリートから採取されたコア供試体の場合と思われるが、コア供試体の寸法は採取状態によって、長さおよび径が様々である。概して、長いコア供試体は得られにくい。したがって、短い供試体では中央集中載荷によって求めることになる。

基礎実験として、10φ cmの円柱供試体を用いて、径の5倍までスパンを変えて行った結果を図13に示した。なお、コンクリートの配合は配合表の(H)を用い、試験値は5個の平均である。図13より、既往の結果⁷⁾と同様にスパンが長くなるほど強度低下の傾向を示し、ばらつき

次に、圧縮および引張試験に用いる円柱供試体(10φ×20cm)を曲げ強度試験に適用した場合にはどうなるかを求めてみた。この場合は、最大スパン長さでも18cmで、直径の1.8倍しかとれなく、直径の3倍の場合と比較した結果、表12となった。これは、図13の結果より小さくなったが、ばらつきが大きいので、その範囲内といえる。

6. 水セメント比の影響

15×15×53cm供試体に対する円柱供試体の曲げ強度比を各水セメント比について求めた。その結果を図14に示した。なお、配合は配合表の(D,E,G,H,I)を使用し、供

表11 三等分点載荷と中央集中載荷の比較

配 合	φ10×40cm (スパン30cm, 三等分点載荷)				φ10×40cm (スパン30cm, 中央集中載荷)				供試体数	σ ₀₅ /σ ₀₄	σ ₀₇ /σ ₀₄
	種別	配合番号	バッチNo.	曲げ強度 σ ₀₄ (kg/cmf)	供試体数	変動係数 (%)	曲げ強度 σ ₀₅ (kg/cmf)	変動係数 (%)			
モ ル タ	Y 2	67.4	10	6.8	77.2	4.4	69.0	5.0	10	1.15	1.02
	Y 3	58.1	10	1.4	73.2	10.1	67.5	8.7	9	1.26	1.16
	Y 4	66.2	10	5.7	71.8	6.7	67.8	6.3	10	1.08	1.02
	Y 5	68.7	10	8.7	77.2	5.9	72.4	7.8	10	1.12	1.05
	Y 6	73.9	10	4.2	88.3	6.2	84.0	6.8	10	1.19	1.14
	Y 7	73.7	10	8.0	78.1	5.3	73.2	6.2	10	1.06	0.99
	Y 8	69.8	8	6.3	88.6	10.6	84.4	11.1	8	1.26	1.21
	Y 9	80.0	10	7.6	87.6	6.7	82.9	6.8	10	1.10	1.04
	Y 10	78.2	10	6.5	90.8	2.0	86.1	3.4	10	1.16	1.10
	Y 11	80.3	9	4.8	88.4	7.4	84.1	9.8	10	1.10	1.05
	Y 12	76.4	10	5.7	84.3	6.0	77.5	5.6	10	1.10	1.01
	Y 13	78.3	10	8.2	89.0	4.8	84.4	4.8	9	1.14	1.08
	Y 14	73.5	10	5.1	85.1	5.6	80.2	5.3	10	1.16	1.09
	Y 15	69.4	10	7.6	78.6	7.9	73.4	8.4	10	1.13	1.06
	Y 16	67.3	10	7.6	76.0	3.9	70.2	5.6	10	1.13	1.04
	Y 17	70.2	10	5.1	78.3	6.0	73.6	7.7	10	1.12	1.05
	Y 18	70.3	10	7.7	78.5	5.5	73.6	4.7	10	1.12	1.05
	Y 19	69.5	10	7.5	76.4	3.8	71.0	4.5	10	1.10	1.02
	Y 20	47.5	8	1.7	60.6	5.8	57.7	4.2	4	1.28	1.21
	Y 21	68.5	5	3.9	69.0	6.4	62.5	4.5	5	1.01	0.91
	Y 22	65.2	5	4.8	72.7	4.2	68.9	3.6	5	1.12	1.06
	Y 23	69.7	5	6.7	74.9	4.0	69.2	5.8	5	1.07	0.99
	平均	—	—	6.0	—	5.9	—	6.2	—	1.13 (±0.07)	1.06 (±0.07)
コ ン ク リ ー ト	A 1	53.0	3	5.2	65.6	9.3	59.9	8.7	3	1.24	1.13
	D 1	60.2	4	5.4	66.0	4.8	61.1	9.6	4	1.10	1.01
	E 1	52.3	4	3.9	66.6	6.1	60.4	6.9	4	1.27	1.15
	G 1	51.8	4	7.4	64.9	5.8	57.1	6.8	4	1.25	1.10
	H 1	54.6	4	3.2	60.1	4.4	47.1	3.7	3	1.28	0.86
	I 1	43.8	4	11.3	54.9	6.0	51.3	1.5	4	1.25	1.17
	K 1	52.8	5	8.6	65.1	5.1	56.8	11.9	5	1.23	1.08
	M 1	48.9	8	10.1	55.9	10.3	49.1	12.4	7	1.14	1.00
	N 1	44.0	8	10.0	52.5	9.2	48.9	7.3	6	1.19	1.11
	Q 1	40.1	4	3.2	49.8	9.4	45.5	11.1	3	1.24	1.13
	R 1	41.7	4	4.9	52.3	5.1	48.2	9.8	4	1.25	1.16
	T 1	47.2	7	14.5	52.8	13.1	46.3	10.7	9	1.12	0.98
平均	—	—	7.3	—	7.4	—	8.4	—	1.21 (±0.06)	1.07 (±0.09)	
総平均	—	—	6.5	—	6.4	—	7.0	—	1.16 (±0.07)	1.07 (±0.08)	

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

試体数は各3～5個である。図中の数値はJISの15×15×53cm供試体に対する各円柱供試体の強度比を各水セメント比ごとに求めたものである。なお、各強度比の平均を右端に記入した。図14によると水セメント比が増加すると、中央集中載荷の円柱供試体の強度比は、増加する傾向が見られるが、三等分点載荷においては水セメント比に関係なく一定の傾向を示した。

7. 骨材最大寸法の影響

骨材最大寸法が円柱供試体の曲げ強度に及ぼす影響を表13に示した。表13は、骨材最大寸法別の15×15×53cm供試体に対する円柱供試体の曲げ強度比である。まず、15×15cm供試体の骨材寸法に対する変化をみると、骨材寸法が大きくなると、強度低下の傾向がみられる。また、円柱供試体の方は、その断面が小さいこともあって骨材寸法の影響を顕著に受けた。即ち、小さい寸法から

表12 スパンの相違による曲げ強度の比較

種類	配合番号	バッチNo.	φ10×40cm (スパン30cm, 中央集中載荷)			φ10×20cm (スパン18cm, 中央集中載荷)			曲げ強度比 σ_{bs}/σ'_{bs}
			曲げ強度 σ_{bs} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数 (%)	曲げ強度 σ'_{bs} (kg/cm ²)	供試体数	変動係数 (%)	
モルタル	Y 2	77.2	10	4.4	86.8	10	8.1	1.12	
	Y 3	73.2	9	10.1	78.4	10	7.2	1.07	
	Y 4	71.8	10	6.7	77.9	10	4.7	1.08	
	Y 5	77.2	10	5.9	81.7	10	9.1	1.06	
	Y 6	88.3	10	6.2	82.6	10	5.1	0.94	
	Y 7	78.1	10	5.3	80.8	10	7.2	1.03	
	Y 8	87.6	10	6.7	98.5	10	5.1	1.12	
	Y 10	90.8	10	2.0	96.5	10	5.4	1.06	
	Y 11	88.4	10	7.4	98.4	9	9.3	1.11	
	Y 12	84.3	10	6.0	87.9	10	4.3	1.04	
タ	Y 13	89.0	9	4.8	94.4	10	8.2	1.06	
	Y 14	85.1	10	5.6	90.4	10	8.8	1.06	
	Y 15	78.6	10	7.9	86.7	10	4.1	1.10	
	Y 16	76.0	10	3.9	79.4	10	6.0	1.04	
	Y 17	78.3	10	6.0	89.6	10	3.5	1.14	
	Y 18	78.5	10	5.5	85.3	10	6.2	1.09	
	Y 19	76.4	10	3.8	80.0	10	7.5	1.05	
ル	Y 20	60.6	4	5.8	73.4	5	9.5	1.21	
	Y 21	69.0	5	6.4	75.6	5	8.2	1.10	
平均		—	—	5.8	—	—	6.7	1.08(±0.05)	
コンクリート	B 1	64.3	4	9.4	64.4	6	4.8	1.00	
	D 1	66.0	4	6.0	77.2	4	9.0	1.17	
	E 1	66.6	4	6.1	74.4	4	3.7	1.12	
	F 1	65.6	4	9.2	61.8	3	4.2	0.94	
	G 1	64.9	4	4.4	64.3	4	5.5	0.99	
	H 1	60.7	3	3.4	67.3	4	5.7	1.11	
	I 1	57.8	4	6.0	62.7	3	4.6	1.08	
	K 1	65.1	5	5.1	57.0	9	9.6	0.88	
	M 1	55.9	7	10.3	59.2	4	10.2	1.06	
	N 1	52.5	6	9.2	54.9	7	4.6	1.05	
ト	Q 1	49.8	3	9.4	52.4	3	6.8	1.05	
	T 1	52.8	9	13.1	55.2	4	3.8	1.05	
	平均	—	—	7.6	—	—	6.0	1.04(±0.08)	
総平均		—	—	6.8	—	—	6.5	1.06(±0.06)	

平均の () は曲げ強度比の標準偏差

大きくなるほど曲げ強度比が低下する傾向を示した。しかし、骨材寸法が供試体の直径の $\frac{1}{3}$ 以上になると逆に増加する傾向を示した。前項までの15×15×53cm供試体に対する10φ×40cm供試体の曲げ強度比は、モルタルとコンクリートで大きな違いがなく、両方を併せても1.02～1.18で平均値は1.09であった。このときには、骨材寸法が15～30mmで配合もいろいろであった。ところが

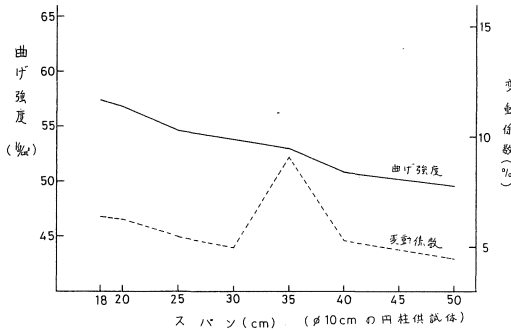


図13 スパンと曲げ強度の関係 (中央集中載荷による)

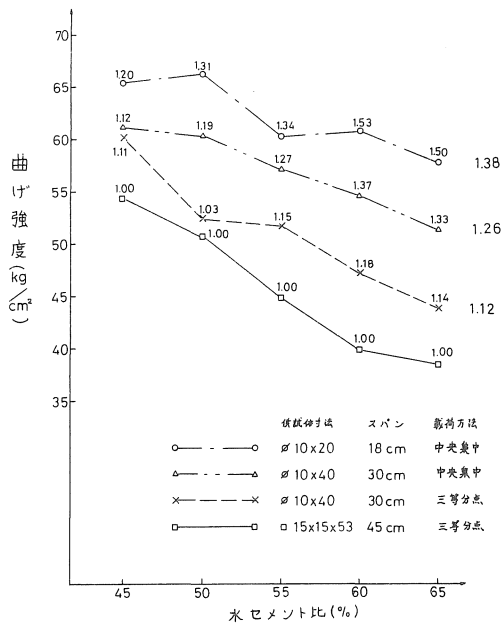


図14 各種供試体による水セメント比と曲げ強度の関係

今回はW/Cとスランプを一定にして特に骨材寸法の影響をみたものであるが、その結果の方が大きく変動した。すなわち、骨材寸法が小さい順に1.36, 1.34, 1.10, 1.00, 1.32と変化し、平均値は1.22となり大きな相違を示した。この結果は、15×15 cm供試体が小さく求められたことに原因していると考えられる。表13には、JIS 供試体に対する円柱供試体の骨材寸法ごとの強度比を求めるのが主目的であったから載せなかったが、10×10×40 cm供試体による曲げ強度との関係も併せてみると図15のようになり第2, 第3項のときは逆の結果であることが分る。図15の10×10×40 cmと10φ×40 cmとの比較では、断面寸法による強度比は骨材寸法の小さい順に1.15, 1.05, 1.04, 1.05, 1.01となり、上記の値とは著しく異なる。いずれにしろ、10 mm骨材以外では骨材寸法の影響は顕著でない。

8. 各供試体間の関係

打設コンクリートより直接採取したハリ供試体およびコア供試体を用いて、切断が曲げ強度に与える影響を調べた。

ハリ供試体および角柱供試体の曲げ強度と骨材最大寸法の関係を図16に示した。なお、配合は配合表のD, E, G, H, Iの5種類であり、試験値は各3個の平均値である。図16より、両供試体とも骨材寸法が増加するほど、

表13 骨材最大寸法による強度比の変化

配合	骨材最大寸法 (mm)	15		10		7.5		10	
		15	4.5	10	3.0	7.5	2.5	10	1.8
C	10	1.00	5.0	1.36	6.8	1.59	4.0	1.59	9.3
L	20	1.00	1.5	1.34	6.1	1.52	3.9	1.49	5.1
P	25	1.00	4.5	1.10	6.9	1.19	3.9	1.39	11.2
U	30	1.00	8.2	1.00	2.2	1.52	4.5	1.22	9.3
V	40	1.00	2.8	1.32	5.1	1.32	17.7	1.73	12.2
	平均	1.00		1.22		1.43		1.48	

左上: 15×15×53 cm 供試体に対する各供試体の強度比
右下: 変動係数(%) : 曲げ強度, 供試体数: 3~6

曲げ強度は低下する傾向を示した。角柱供試体に対するハリ供試体の曲げ強度比は、骨材寸法の小さい順に1.01, 0.95, 0.83, 0.83, 0.92となり、平均値で0.91となった。これは、骨材寸法10 mmを除けばすべて切断の影響を受けている。

コア供試体および円柱供試体の曲げ強度と骨材寸法の影響を図17に示した。配合は前述と同じで、試験値は各4~6個である。骨材寸法による強度低下は、前述と同様な傾向を示した。円柱供試体に対するコア供試体の曲げ強度比は、骨材寸法の小さい順に0.82, 0.76, 1.02, 0.81, 0.79となり、平均値は0.84となった。この値は、他の文献^{8),9)}の結果ともよく似た値であって、切断による影響はこの程度の強度低下があるものと思われる。

コア供試体の曲げ強度とハリ供試体の曲げ強度の関係を図18に示した。ハリ供試体に対するコア供試体の曲げ強度比は、骨材寸法の小さい順に1.11, 1.09, 1.39, 0.99, 1.14となり、平均値は1.14となった。

採取位置によるコア供試体の曲げ強度と骨材最大寸法の影響を図19に示した。図19によると、最上段のコア供試体が高くあらわれている。これは、一般的傾向と異なっている。すなわち、ブリージングによって上段が低くなるが、今回の結果はこの逆となった。これは、スラ

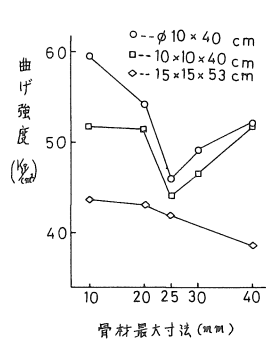


図15 供試体寸法が異なる場合の骨材最大寸法と曲げ強度の関係

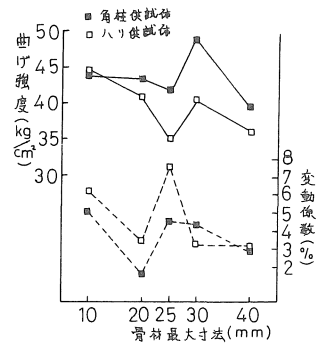


図16 角柱とハリ供試体の骨材最大寸法別による曲げ強度の比較

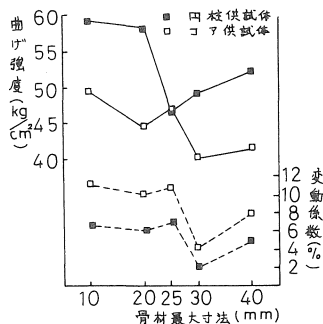


図17 円柱とコア供試体の骨材最大寸法と曲げ強度別による曲げ強度の比較

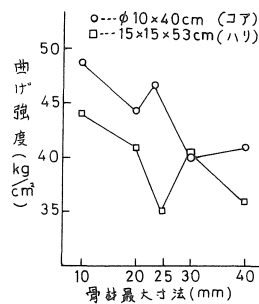


図18 コア供試体とハリ供試体による骨材最大寸法と曲げ強度の比較

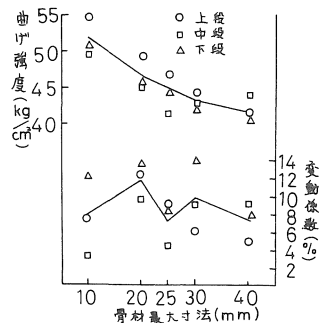


図19 コア供試体採取位置別の骨材最大寸法と曲げ強度の比較

ンブが小さかったので、ブリージングの影響がなく、実験上のばらつきによるものと思われる。

5. まとめ

本研究は、円柱供試体による曲げ強度試験を行うために必要な基本的な事項を検討したものである。試験の結果を要約すると次の通りである。

- (1) 円柱供試体の曲げ強度からJIS供試体(15×15×53cm)の曲げ強度を推定するには、以下に示した換算係数を乗ずればよい。①, 15φ×60cm, スパン45cm, 三等分点載荷の場合: 0.91倍。②, 10φ×40cm, スパン30cm, 三等分点載荷の場合: 0.91倍。③, 7.5φ×30cm, スパン22.5cm, 中央集中載荷の場合: 0.87倍。④, 10φ×20cm, スパン18cm, 中央集中載荷の場合: 0.74倍。
- (2) 円柱供試体を曲げ強度試験用供試体として使用するために必要な載荷装置について検討した結果、載荷装置の相違による強度差はほとんど認められなかった。したがって、試験の簡便さを考慮すれば、JISの載荷装置と同様な180°(棒状)の装置が実用的である。
- (3) 円柱供試体の載荷方法において15φと10φとでは強度差がない。ただし、7.5φになると三等分点載荷の場合は強度低下しないが、中央集中載荷の場合では15φ, 10φに比べて低下する。もちろん、中央集中載荷の方が三等分点載荷より強度は大きい。また、ばらつきの点などからは、三等分点載荷の方が良好であるが、やむを得ず短い供試体を用いる場合には、適当な係数を用いることによって、中央集中載荷による推定も可能である。
- (4) 打設コンクリートより直接採取したコア供試体およびハリ供試体を試験した結果、①, ハリ供試体と角柱供試体の強度差は骨材最大寸法によって変化した。②, コア供試体と円柱供試体の強度は、骨材寸法に関係なく前者の方が15~20%程度低いようである。③, コア供試体はハリ供試体に比べ10%程度高い。④, 採取位置による強度の相違は、ばらつきが大きいため認められなかった。

参考文献

- (1) 赤澤常雄: コンクリートの圧縮に依る内部応力を求める新試験法(圧裂強度試験法に就て)(その一), 土木学会誌, 第29巻第11号, p. 777-787, 1943.
- (2) 岡田清: コンクリートの単純引張強度と曲げ引張強度について, 土木学会誌, 第35巻第10号, p. 444-449, 1950.
- (3) 神山一: コンクリートバリの形状と曲げ強度について, セメント技術年報, VI, p. 328-332, 1952.
- (4) F. ARREDI; W.F. CHANG and R.H. WRIGHT; A.B. LINGAM; V.M. MALHOTRA; R. SELL; L.L.

SIMON; B. TREMPER; K.T.S.R. IYENGAR, K. CHANDRASEKHARA and K.T. KRISHNAWAMY; and AUTHORS; Correlation Between Tensile Splitting Strength and Flexural Strength of Concrete, ACI Journal, Vol.60, p.1263-1278, 1963.

- (5) 浜田稔: 材料試験法, p. 121-136, 理化書院.
- (6) セメント協会: コンクリートの曲げ試験における供試体の寸法および載荷方法, セメント・コンクリート, No.311, p. 41-49, 1973.
- (7) 山田順治, 磯崎正晴: コンクリートバリの曲げ強度に及ぼす諸因子の影響について, セメント技術年報, IV, p. 274-282, 1950.
- (8) 大林組技術研究所: 構造体コンクリートの強度に関する実態調査, セメント・コンクリート, No.372, 1978.
- (9) 溜渕誠一, 松下博通, 牧角龍憲: コア供試体と標準供試体の圧縮強度の関係, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第5部, p. 40-41, 1977.