

## モルタル円柱の径高比が圧縮強度と ひずみ特性に与える影響

渡辺正平\*

平成4年6月30日受付

### Effects of Ratio of Diameter to Height of Mortar Cylinder on the Compressive Strength and the Strain Characters

Shouhei WATANABE\*

The compressive strength of concrete and mortar cylinder changes with the ratio of diameter to height. It has been widely recognized that such a character originates in the friction between cylinder and platen. The objective of the present study is to investigate not only strength but also strain behavior and cracked form of the specimen. Unconfined compression tests were carried out for mortar cylinder and circular disc with several sizes. In order to change the friction between cylinder and platen, tefron sheet was also used during the compression test. The obtained results indicated that a rate of axial and lateral strain increased rapidly when the compressive stress approached to the rupture strength. Such a phenomenon appeared evidently on the lateral tensile strain. The compressive strength increased with the increase of the ratio of diameter to height and with the coefficient of static friction. The value of Poisson's ratio was 0.2-0.3, and this value had a tendency to approach 0.3 as the compressive stress approaches to its ultimate value. When the ratio of diameter to height changed, a different type of cracked form was appeared.

#### ま え が き

コンクリートの強度試験には、圧縮、引張、曲げ、せん断などがあるが、なかでも圧縮強度試験は最も重要視される。それは、圧縮強度の測定方法が他の強度試験に比べて簡単であるうえ、圧縮強度がそれ以外の強度や変形特性などとも密接な関係があり、圧縮強度を知って他

の力学特性をある程度推定できるなどの理由による。ところがコンクリートの圧縮強度が使用材料の品質、配合、打込み方法、養生方法などのほか、供試体の形状、寸法、寸法比ならびに載荷速度によっても相違することはよく知られている<sup>2,3,7)</sup>。このうち、供試体の寸法比が圧縮強度に与える影響は、供試体と加圧面との間の摩擦によって供試体の端面の横方向の自由変位が拘束され、それに

\*鳥取大学農学部農林総合科学科生産環境工学講座

\* *Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture, Tottori University*

よって応力やひずみの分布が複雑になることに原因している。そこで、モルタルやコンクリート供試体の寸法比や供試体と加圧面との接触部の条件を変えた実験や理論的研究が行われている<sup>1,5,9)</sup>。しかしそのような実験では、強度の測定が主な目的となっている。また、供試体の半径方向変位の拘束度が応力、ひずみ、変位や圧縮強度に及ぼす影響について研究された例もある<sup>4,11)</sup>。モルタルはコンクリートよりも等方等質的であり、しかも小寸法の供試体の実験が可能である。そこでここでは直径は同じであるが高さが異なるモルタル円柱供試体を作製し、またテフロンシートによって加圧面の摩擦を変えて一軸圧縮試験を行った。そして圧縮強度のほかには載荷中の荷重とひずみを測定し、寸法、応力、ひずみ、および加圧面の環境などの相互関係について検討した。さらに、供試体の破壊形状についても観察・記録し考察した。

### 実験方法

モルタルの材料には砂丘砂と普通ポルトランドセメントを用い、その配合をセメント：砂＝1：2.5、水セメント比67%に決定した。この配合は事前に予備的に供試体を作製し、供試体の成形具合（ゲージの接着が可能であるか）や強度などを判断して決定したものである。円柱供試体の寸法は直径を15cmとし、高さをTable 1に示す2.5～30cmの間で7種類に変えた。練り混ぜの後、同じバッチのモルタルから円柱供試体を3本作製すると共に、JIS R 5201に準拠してフロー試験と角柱供試体（4×4×16cm）4本の曲げと圧縮の強さ試験を行った。

円柱供試体の作製のために使用した型枠はJIS A 1108に定められた直径15cm、高さ30cmのものである。高さ15cm以下の供試体を作製するときは、Fig. 1に示すように厚さ2.5cmの鉄製のスペンサーと数種類の高さで切断した外径140cm、内径125cmのプラスチックパイプを用いた。打込みは3層に分けて行い、各層毎に特に周辺部をできるだけ入念に突いた。これは、供試体の側表面の気泡をなくしてひずみゲージの貼付けを容易にするためである。また、供試体は硬化収縮によって上面が下がるので、モルタルを盛り上げ気味に打ち込んだ。その後、20°Cで24時間養生し、普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストで厚さ3～4mmのキャッピングをした。セメントペーストの配合はw/c＝30%とし、キャッピングを開始する約1時間前に練り混ぜて使用直前まで湿った布をかぶせておき、水を加えずにもう一度練り返した。キャッピングの仕上げの際に厚板ガラスにグリースを塗布してセメントペーストを押しつけると、仕上がりの平

面度はよいものの、ガラス板がセメントペーストの乾燥収縮を妨げてキャッピング面がひび割れる現象が見られた。このため、ガラス板とセメントペーストの間にファイル用のシート（三菱ファイルLAO、材質は不明）をはさんでセメントペーストを押し付けるとひび割れがみられなくなり、また平面度も良好であったのでこの方法を採用した。キャッピングの翌日に脱型し、供試体をビニール袋に密閉して、20°Cでさらに5日合計7日間養生した。これは、水中養生を行うと、ひずみゲージを接着するために長時間の表面乾燥が必要になるという理由による。

ひずみゲージはポリエステルゲージを使用した。Fig. 2に示すように、中央部と加圧面付近の縦方向には3cmゲージ（T0, T1）、横方向には6cmゲージ（Y0, Y1）を貼り付けた。いずれのゲージも、ひずみ計の挙動の安定性を得るために円柱の軸に対称な位置にも同じゲージを貼付けて2枚ゲージとした。また、同じ恒温室で管理した別の供試体にも同様なひずみゲージを貼付け、これを温度補償用のダミーゲージとして使用し4枚のひずみゲージをブリッジボックスに結線した<sup>8,10)</sup>。Fig. 2は供試体の高さが30cmの場合であり、その他の寸法の供試体のひず

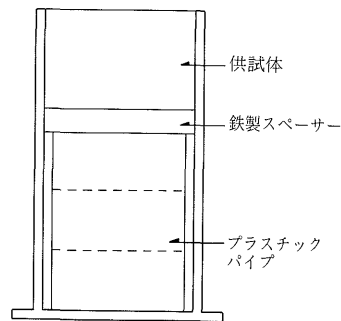


Fig. 1 小寸法円柱供試体の作製

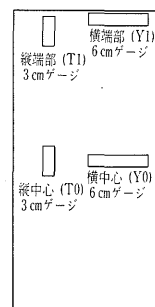


Fig. 2 ひずみゲージの貼付け位置 (h=30cm)

Table 1 円柱の寸法とひずみゲージおよびモルタルの性質

テフロン	円柱の規定 高さ (mm)	ひずみゲージ				フロー値 (mm)	$\sigma_{bm}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{bm}/\sigma_{cm}$ (%)
		T 0	T 1	Y 0	Y 1			
なし	300	○	○	○	○	201	57.7	22.8
	150	○	○	○	○	222	51.9	20.7
	100	○		○	○	184	53.0	22.7
	75	○		○	○	211	54.4	22.0
	50			○	○	197	50.7	19.4
	30			○		206	57.2	23.3
	25			○		177	53.8	21.5
あり	300	○	○	○	○	202	55.0	23.7
	150	○	○	○	○	197	47.0	22.7
	100	○		○	○	193	47.2	20.4
	50			○	○	180	51.6	21.7
	25			○		196	46.0	21.1

$\sigma_{bm}$  : 平均曲げ強度,  $\sigma_{cm}$  : 平均圧縮強度

Table 2 静摩擦係数

	上方加圧板	下方加圧板	平均
供試体と加圧面	0.27~0.34	0.20~0.34	0.29
テフロンと加圧面	0.19~0.21	0.14~0.19	0.18

みゲージ貼付位置はTable 1に示す。供試体の高さが小さくなれば中心部にしかひずみゲージを貼ることができない。高さ5cm以下では縦方向にゲージを貼ることができず、また高さ3cm以下では中心部の横方向のみとなった。なお、ひずみの測定は同じ条件の供試体3本のうちの2本について行った。Table 1には使用したモルタルのフロー値と角柱供試体の曲げ強度と強度比も示しているが、これらの値に幾分のばらつきがみられる。円柱の平均高さも規定の値と最大で1mm異った、これは型枠の中に入れられたパイプや鉄製スペーサーの寸法誤差によるものと考えられる。円柱の一軸圧縮試験は、あらかじめひずみ計の挙動を見るために約10tfまでプレロードして除荷し、次に破壊まで載荷するという方法で行った。

圧縮試験は通常行われるように供試体と加圧板を直接接触させた状態で、加圧面の摩擦状況を変えるために厚さ0.3cmのテフロンシートを供試体と上下の加圧板との間に敷いた状態で載荷した。スプリングバランスを用いて測定した供試体と加圧板の間およびテフロンシートと加圧板の間の静摩擦係数の値をTable 2に示す。テフロンがないときの静摩擦係数は0.3程度、テフロンがあると

きのそれは0.2程度となってテフロンを使用することによって静摩擦係数が小さくなっている。

実験結果と考察

(1) 荷重・応力とひずみの挙動

圧縮試験は油圧による荷重制御方式で載荷を行った。そのとき、荷重つまり軸方向圧縮応力の合力の増加速度はほぼ一定となるように制御した。そのような場合、一定速度で送られた記録紙に現れた荷重とひずみの例を、Fig. 3に示す。これは荷重とFig. 2に示した4か所のひずみを表したものであるが、時間差を有している。荷重の増加に伴ってひずみの絶対値も増加するが、縦ひずみ(圧縮)の増加速度は荷重が大きくなるに伴って大きくなっている。横ひずみ(引張)の増加速度は初期は小さくほぼ一定であるが、最大荷重に達する少し前から横ひずみの増加速度が急激に大きくなる傾向をもっている。最大荷重に達した直後にひずみはスケールアウトする。

応力-ひずみ曲線の例をFigs. 4(a)-(d)に示す。縦ひずみは負であるが、その絶対値をFig. 4に示している。Table 1に示したように、供試体の高さが小さいものは、ひずみゲージの数が制限される。縦ひずみと横ひずみの挙動をみると、供試体の破壊の兆候は縦ひずみよりも横ひずみに顕著に現れる傾向がある。つまり、圧縮強度の7割程度の平均圧縮応力に達すると、横方向の引張りひずみ速度が急激に増加し始める傾向が認められる。このことは、一軸圧縮試験による供試体の破壊は横方向の引張

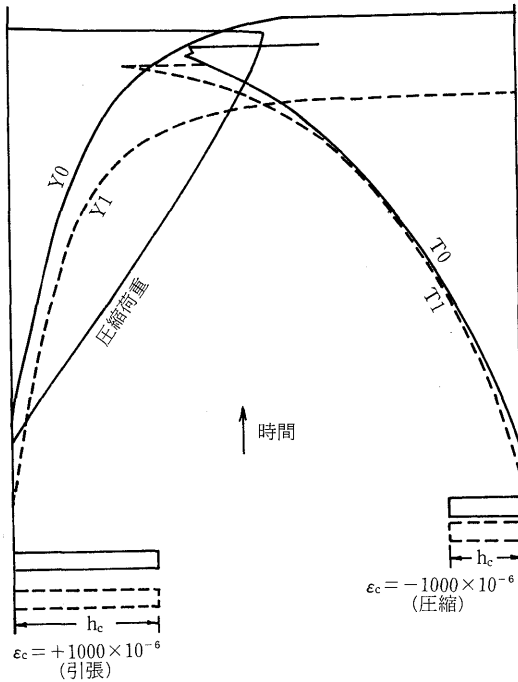


Fig. 3 荷重とひずみの時間的変化例

ひずみによる要素が大きいことを意味しているとも推察できる。供試体の高さが小さいものにこの現象が明確に現れる。横ひずみと破壊との関連が大きいことは、軸方向の応力-ひずみ関係のみで塑性や破壊の議論をすることに問題があることを示唆している。横ひずみは一般的に供試体の端部のものよりも中央部のものの方が大きい。供試体の端部は加圧板との摩擦によって膨張の変位が拘束されたことによるものである。弾性解析によると、高さ (h) が直径 (d) の2倍の供試体では高さの中央の横ひずみが最大となるものではなく、中央から少し離れたところで最大となる。つまり、表面の形状は2段階のようになる<sup>11)</sup>。しかしながら、これらの2点での横ひずみの差は微妙であるから、ひずみゲージによる測定でそのような結果を得るのは非常に困難なようである。なお、横ひずみが供試体の位置によって異なることは、軸と直角方向の断面積が場所によって異なることを意味している。また、荷重の大きさと共にその断面積も異なってくる上に、断面内での応力の分布も一様ではない。したがって、Fig. 4に示された圧縮応力はみかけの値である。

## (2) 横ひずみの比率

荷重Pの3つの段階における供試体の端部と中央部の横ひずみの比率 ( $\epsilon_{r1}/\epsilon_{r0}$ ) をFig. 5に示す。荷重が大き

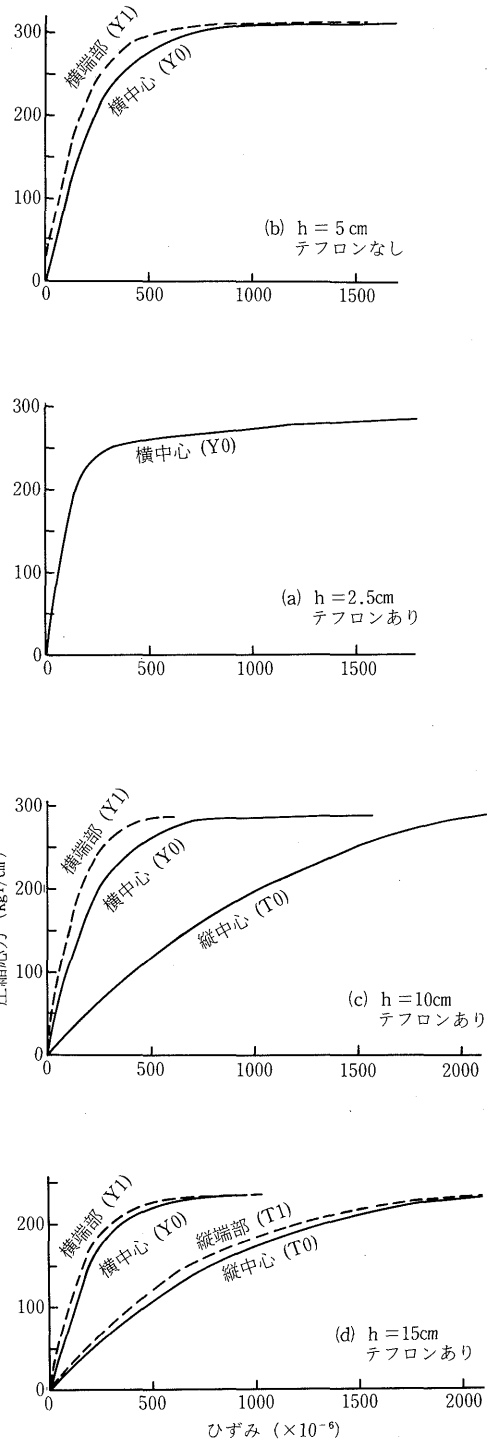


Fig. 4 応力-ひずみ曲線

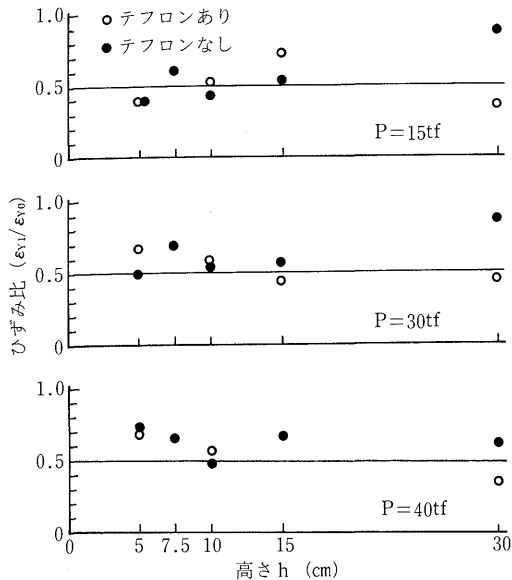


Fig. 5 端部と中央部の横ひずみの比率

くなれば横方向のひずみが大きくなるが、ひずみの比率も荷重の大きさや寸法、摩擦の大きさなどに応じて変化すると予想のもとにこのような図を描いた。ひずみの測定のためには、ひずみのゲージの接着の良否、ひずみ測定器や記録計の安定性などが測定値に微妙に影響を与える。Fig. 5によると、端面の摩擦の差異や供試体の寸法の差が横ひずみの比率に与える影響は特に認められない。また、荷重が大きくなれば横ひずみの比率が大きくなり、供試体の端部と中央部での横ひずみの値が接近するがその傾向は顕著ではない。しかし、端部では供試体と加圧板との摩擦によって横ひずみが中央部のものより小さくなっている傾向が認められる。つまり、供試体の端部と中央部での横ひずみの比は0.4-0.7の範囲となっている。

(3) 圧縮強度と供試体の高さとの関係

コンクリートやモルタル、岩石などの圧縮強度と供試体の高さや寸法比との関係については実験的な研究が以前から行われている<sup>2,5,6,9)</sup>。そして、寸法比が圧縮強度に与える影響は、加圧板と供試体の横方向変位が拘束されるためと議論されているようである。そこで供試体の高さあるいは径高比 (d/h) と圧縮強度の関係を求めてみた。その結果をFig. 6に示す。Fig. 6によるとテフロンシートを用いたときの方が用いないときよりも圧縮強度が小さくなっている。そして、供試体の高さが小さくな

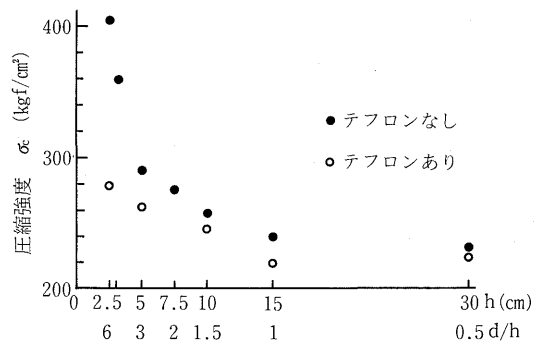


Fig. 6 円柱の径高比と一軸圧縮強度の関係

るに伴って、あるいは径高比が大きくなるに伴って、圧縮強度が大きくなっており、その傾向は径高比の増大に伴って大きくなっている。

寸法比が異なると圧縮強度が異なるのは、供試体の端面で横方向変位が摩擦によって拘束されるためとされている。文献<sup>9)</sup>によると、径高比が2.0のときは0.5のときよりも2倍以上の圧縮強度となった例もみられ、圧縮強度に与える径高比の効果がFig. 6の場合よりも顕著に現れている。その場合は供試体と加圧面との静摩擦係数が0.5程度となっており、Table 2に示された値よりも大きくなっている。このことは、圧縮強度に与える端面の変位拘束効果を示すものと言えよう。Fig. 6によると、圧縮強度に与える径高比の影響は径高比が大きいときの方が顕著である。著者が行った弾性解析によると、 $d/h \geq 0.5$ の弾性円柱が端面で半径方向変位の拘束を受けたときは、拘束を受けないときよりも側表面の全面において横方向の膨らみが小さくなる。ところが、 $d/h \leq 1.0$ の場合には、端面での半径方向の変位拘束を受けたことによって、円柱の高さの中央部での横方向の膨らみが端面での変位拘束を受けないときよりもかえって大きくなり、円柱内部のひずみの差が大きくなる<sup>11)</sup>。弾性解析によって円柱の圧縮強度を直接には議論できないにしても、このような解析結果は、径高比が1より小さいときの圧縮強度に対する径高比の効果が小さいことと関連があると言えよう。

(4) 破壊直前の横ひずみ

端面での半径方向の変位拘束が圧縮強度に影響を及ぼすことと、Fig. 4に示されたように破壊の兆候が横ひずみに現れたことから、破壊直前の横ひずみの値を調べた。ここで、圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) の85, 90, 95%での供試体の高さの中央における横ひずみをFig. 7に示す。Fig. 7では供試

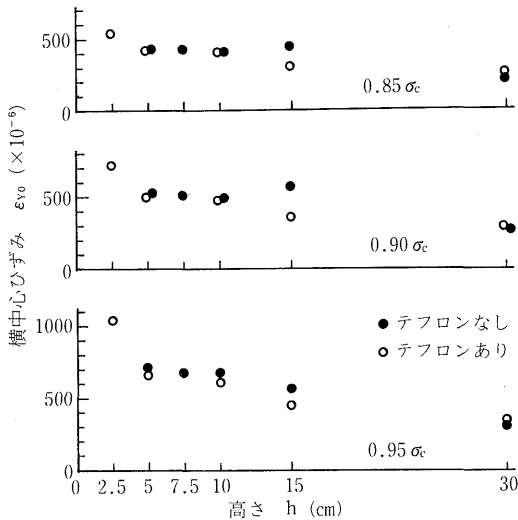


Fig. 7 破壊直前の横ひずみ

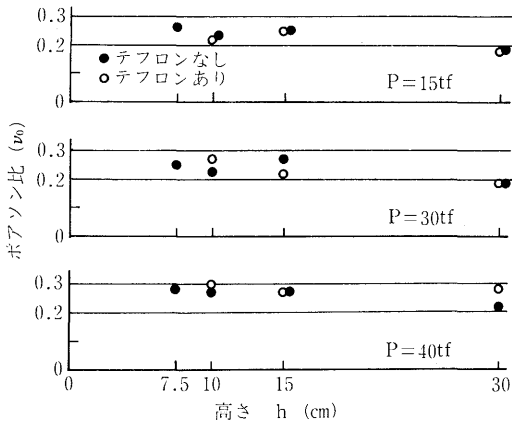


Fig. 8 ポアソン比と荷重および円柱の高さの関係

体の高さが5—10cmのものは横ひずみがほぼ同じであるが、高さが15, 30cmのものはそれより小さいひずみを示している。後述の破壊形状をみると、供試体の高さが小さいものは破壊断面は軸方向に平行であるが、高さが大きいものでは円錐状の破壊断面が現れるようになる。このことは、径高比が大きい供試体、つまり、高さが小さい供試体は軸方向圧縮力を受けることによる横方向の引張ひずみによって破壊するが、径高比が小さな供試体ではそれ以外の要素によっても破壊するようにも推察できる。また、上述のように弾性解析によると、径高比が

小さな円柱では高さの中央で横ひずみが最大となるわけではない。高さ15, 30cmの供試体の破壊直前の横ひずみが高さ10cm以下のものよりは小さくなったことは、そのようなことも原因になっているとも考えられる。

#### (5) ポアソン比

弾性解析においては、ポアソン比の値は重要な意味を持っている。上述の通り応力—ひずみ関係は単純な直線関係ではなく、また応力やひずみは供試体内での位置によっても異なる。そのようなことから、ポアソン比の値も荷重の大きさや供試体の高さ、供試体の位置などによって異なることも予想される。ともかくここでは、供試体の高さの中央におけるポアソン比の値( $\nu_0$ )を、3種類の荷重値について算定した。その結果をFig. 8に示す。高さが5 cm以下の供試体では縦方向のひずみゲージを貼付けることが困難であるから、ポアソン比の値は求められない。また、高さ7.5, 10cmの供試体では、縦ひずみの測定は中央部のみとなる。そこで、中央部でのポアソン比のみをFig. 8に示した。Fig. 8によると、ポアソン比の値は荷重(P)の大きさ、あるいは平均圧縮応力( $\sigma$ )の大きさや供試体の高さに依存する傾向は顕著ではない。それでも詳細にみると、荷重が大ききときの方が小さいときよりも $\nu_0$ の値が大きくなる傾向がみられる。つまり、 $\nu_0$ の値はほぼ0.2—0.3であるが、 $P=15\text{tf}$  ( $\sigma=85\text{ kgf/cm}^2$ )のときは0.2に近く、 $P=40\text{tf}$  ( $\sigma=226\text{ kgf/cm}^2$ )のときは0.3に近い値となっている。このことは、荷重が破壊荷重に近付くと、 $\nu_0$ の値は増大する傾向をもって示している。

#### (6) 破壊の形状

通常行われる円柱供試体の一軸圧縮試験では、圧縮強度やひずみ挙動を求めることが主な目的とされて、圧縮強度が求まった時点で試験が終了したとみなし直ちに除荷される。そのような試験を行った後の供試体は、外見上は破壊はみられないのが通例である。ここでは、供試体がどのような形に破壊しているかを調べるために、荷重が最大値になった後も載荷を続けてみた。この場合は、荷重は最大値以下であるが、軸方向の圧縮ひずみは進行する。そのとき、やがて破裂音を伴って供試体は急激に砕ける。そのようにして得た供試体の破壊形状の代表的な例をFigs. 9(b)–(h)に示す。なお、Fig. 9(a)は最大荷重に達した時点でみられた破壊例であり、Fig. 9(i)はテフロンシートの裂け目の例である。破壊面の形状も、圧縮強度などと同様にばらつきがみられ、常に同じ形状を示すとは限らない。Figs. 9(b), (c)は $d/h \geq 3$ の円盤状の供試体でみられた破壊形状であり、軸方向に平行な割

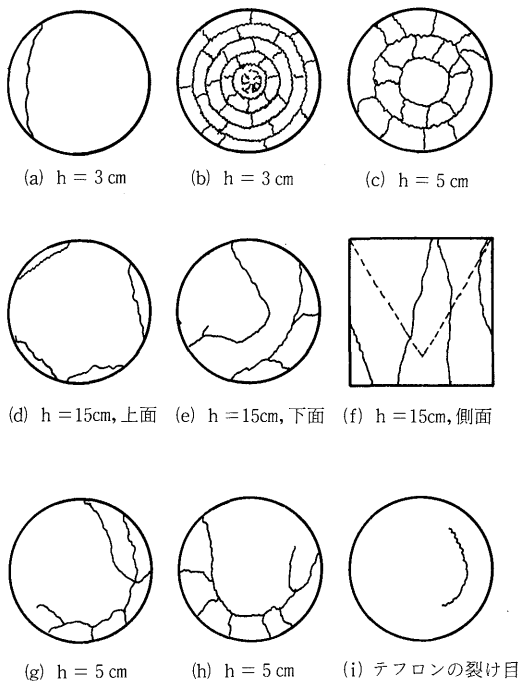


Fig. 9 円柱の破壊形状とテフロンシートの裂け目

れ目となる。この図の円環状と半径方向の割れ目は円周方向と半径方向の引張によって破壊したものと考えられる。Figs. 9(d)–(f)は  $d = h$  の円柱供試体のものであるが、供試体の高さが高くなって  $d/h$  の値が小さくなると、供試体内部の破壊面が円錐形となる傾向を持つてくる。

Figs. 9(g), (h)はFig. 9(c)と同じ高さの供試体の破壊形状であるが、Fig. 9(c)のように軸対称の破壊形状となっていない。これは、偏心荷重が作用したことが原因と考えられる。この実験で使用した圧縮試験機の下方向荷板には円形の溝が刻んであることから、供試体の設置位置が試験の度に大きく異なる可能性は少ない。したがって、上方荷板の球座の機能が発揮されていないことによって偏心荷重が作用したと考えられる。このような偏心荷重も圧縮強度やひずみのばらつきの原因になっている可能性がある。つまり、強度やひずみなどの実験値にばらつきがみられる原因は、個々の供試体の性質のばらつきや実験技術の問題の他にこのような要素も考えられる。Fig. 9(i)は、圧縮試験の後にみられたテフロンシートの裂け目の例である。この図のように円弧状の裂け目となるが、それが、必ずしも全円周に及ぶものではなかった。これも偏心荷重によるものと考えられる。なお、テフロ

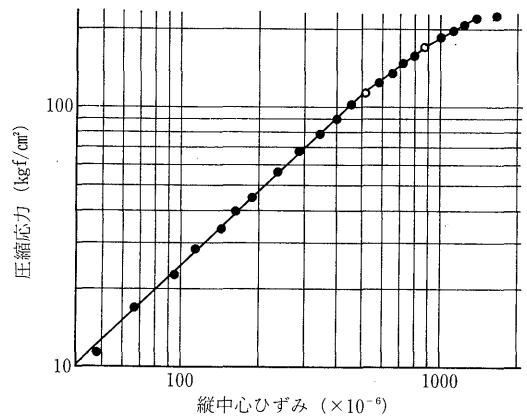


Fig. 10 両対数で表した応力-ひずみ関係の例

ンシートが引き裂かれるということは、そのために供試体の半径方向の変形のエネルギーが消耗されたことを意味している。測定された静摩擦係数と変位拘束度の関係にはこのことが考慮されていない。したがって、この種の実験にシートを使用することは必ずしも適当でないとも言える。

(7)  $\log \sigma - \log \epsilon$  関係

供試体に作用する軸方向荷重を一定速度で増加させると、Fig. 3に示すように荷重の増大に伴ってひずみ速度が増大する。このことから、応力-ひずみ関係を通常の日盛で表せば、Fig. 4のように応力の値が大きくなるに伴って曲線の勾配が次第に小さくなる。ところが、吉本<sup>12)</sup>は、応力-ひずみ関係を両対数で表せば、両者の関係は直線となるが、途中で2つの折れ点が現れそこでひずみ速度が急変するとしている。そしてその折れ点と破壊との関係が論じられている。そこで、そのような現象の存在を確かめようとして、両対数で応力-ひずみ関係 ( $\log \sigma - \log \epsilon$ ) を表してみたのがFig. 10である。ここのひずみは、高さ30cmの供試体の中央部の圧縮ひずみである。Fig. 10に示した直線を描くときには、ある程度の主観を伴うものである。Fig. 10によると、縦ひずみが  $500 \times 10^{-6}$  と  $870 \times 10^{-6}$  のところで折れ点が現れている。しかしながら、吉本が指摘しているような明確な折れ点とは言い難い。元来、端面の摩擦が零でない限り、圧縮荷重によって供試体に生じる応力やひずみは場所的により様でなくローカル性を有している。実験によって得られる応力は平均圧縮応力であるが、測定されたひずみは局所的なものである。このようなことから、両対数表示による応力-ひずみ関係の折れ点と破壊との関連性の議

論には、以上のことも考慮する必要がある。

### 総 括

砂丘砂と普通ポルトランドセメントを用いたモルタル円柱の高さを変え、またテフロンシートを用いて加圧面の摩擦を変えて一軸圧縮試験を行った。そのとき、強度のほかに載荷中の軸方向と横方向のひずみの測定を行うと共に、破壊形状を観察した。この実験によって得られた結果の要点は次の通りである。

- 1) 一軸圧縮試験を行って荷重を次第に増加させると、破壊荷重の近くでひずみ速度が急激に大きくなり破壊の兆候がひずみに現れる。その兆候は、縦ひずみよりも横ひずみに顕著に現れる。つまり平均圧縮応力が圧縮強度の約7割に達すると横ひずみの速度が急増する。このことは、一軸圧縮試験による円柱供試体の破壊は横方向の引張ひずみに起因すると推察できる。径高比が大きな供試体で、この現象が顕著である。
- 2) 供試体と加圧板との間の摩擦によって、軸方向圧縮に伴う端面での半径方向の自由変位がある程度拘束される。この拘束の影響は載荷面の摩擦や供試体の径高比によって異なるから、一軸圧縮強度もそれに応じて異なる。径高比が大きくなれば一軸圧縮強度は大きくなるが、その傾向は径高比が大きいときに顕著になる。また、供試体と加圧板との間の静摩擦係数が大きくなれば、一軸圧縮強度に対する径高比の効果は大きくなる。
- 3) 供試体の中央部で測定されたポアソン比の値はほぼ0.2—0.3であるが、荷重が小さいときのポアソン比の値は0.2に近く、荷重が破壊荷重に近付くとこの値は0.3に近付く傾向をもっている。
- 4) 一軸圧縮試験の後の破壊形状は、径高比が3以上の円盤状の供試体では円周状、円環状の破壊形状を示し、軸に平行な割れ目となる。これは横ひずみに破壊の兆候が顕著に現れることと関連している。しかし、径高比がそれよりも小さな円柱供試体では円錐状の破壊面が現れる傾向となる。また、供試体の破壊形状から偏

心荷重が作用したと推定できるものもある。個々の供試体の力学的特性のばらつきや測定技術の問題のほかに、偏心荷重もこの種の実験で強度やひずみの測定値にばらつきが現れる原因の1つと考えられる。円柱供試体が一軸圧縮を受けると、供試体の表面が半径方向に膨らむために、供試体と加圧板との間のテフロンシートが円弧状に裂けることがある。そのとき供試体の変形のエネルギーが奪われると考えられるので、摩擦の減少のためにこの種のシートを使用することは必ずしも適当ではない。

この研究に伴う実験は、卒論研究の一環として加藤浩久、米山秀一の両氏の協力を得て行ったものである。

### 引用文献

- 1) Filon, L.N.G.: *Philosophical Transactions of Royal Society*, 198, 147—233 (1902)
- 2) 福田武雄：鉄筋コンクリート理論。生産技術センター、東京、(1976)、pp.26—33
- 3) Gonnerman, H.F.: *Proc. ASTM*, Part II 237—250 (1925)
- 4) 梶田建夫、秋本昌胤、川本朧万：土木論集、166 27—38(1969)
- 5) 木村二郎：土木誌、17 713—731+付録(1931)
- 6) 木下重教、加藤逸朗：北海道鉱山会誌、13(1) 26—35 (1957)
- 7) 小阪義夫：コンクリートジャーナル、12(11) 66—69 (1974)
- 8) 中根博司、泉良和：コンクリートジャーナル、12 (4)70—79 (1974)
- 9) 奥島正一、小阪義夫：セメント技術年報、17 381—385 (1963)
- 10) 菅野昭、他：応力ひずみ解析。朝倉書店、東京、(1987)；pp.25—43
- 11) 渡辺正平：土木論集、450/ I—12 67—77 (1992)
- 12) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊。学献社、東京、(1990) pp.32—47