

## 論文 側面水圧による円柱供試体の切断現象

松林 博文\*<sup>1</sup>・田澤 榮一\*<sup>2</sup>・大下 英吉\*<sup>3</sup>・梅津 啓史\*<sup>4</sup>

**要旨**：コンクリートが表面に直接水圧を受けた場合の挙動を明らかにするため、円柱供試体の側面のみ水圧を加え、その破壊性状および変形特性の調査を行った。その結果、一軸圧縮強度以下の非常に低い応力レベルで破壊し、破壊形態は供試体軸に直交する単一面で劈開破壊を生じた。また、水の浸透を妨げた状態での試験においても、同様の結果が得られたが、破壊時の水圧がわずかに大きくなることがわかった。

**キーワード**：水圧、浸透、間隙圧、劈開破壊、引張ひずみ

### 1. はじめに

近年コンクリートの力学的性質に関する研究は一軸状態に留まらず、二軸、三軸といった多軸応力状態についての検討が数多くなされている。通常、多軸圧縮応力を受けるコンクリートはその一軸圧縮強度以上の応力レベルまで耐えることができる。同様に、水圧により多軸圧縮を受ける場合にも、高い強度が得られるものと予想される。

しかし、本来コンクリートは多孔質材料であり、内部に水または空気を含む間隙相が存在する。そのため、コンクリートに直接水圧が作用する際には内部に水が浸透することにより間隙圧が上昇し、材料特性に影響を及ぼすと考えられる。また、水圧作用面での摩擦が小さいため、載荷方向に直交する方向のひずみがほとんど拘束されず、これが強度に及ぼす影響も無視できないものと思われる。

以上のことから、水圧作用時には、鋼製の載荷板による機械的な圧縮応力が作用した場合と異なった現象が生じると考えられる。そこで、本研究ではコンクリートに直接水圧が作用した場合の挙動を明らかにすることを目的として、円柱供試体の側面のみ水圧を加え、その破壊性状および変形特性を調査すると共に、これらに影響を及ぼすと思われる内部間隙圧の測定を試みた。また、供試体破壊時の軸方向ひずみに着目し、最大引張ひずみによる破壊基準を定義し、実験結果との比較を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および配合

コンクリートに使用する材料は、セメントに普通および早強ポルトランドセメント(比重 それぞれ3.15, 3.13)、細骨材に風化花崗岩系山砂(比重 2.57)、粗骨材に流紋岩系砕石(比重 2.67, 最大寸法 20mm)を使用した。また、混和剤としてポリカルボン酸系高分子界面活性剤を用いた。

\*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)

\*2 広島大学教授 工学部第四類 (建設系), 工博 (正会員)

\*3 広島大学助手 工学部第四類 (建設系), 工博 (正会員)

\*4 広島大学 工学部第四類 (建設系)

表 1 コンクリートの配合

Mix.	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit Content (kg/m <sup>3</sup> )					f <sub>c</sub> ' (MPa)	f <sub>t</sub> ' (MPa)
					W	C	S	G	SP		
1	7±2	2±0.5	20	41	180	899	530	806	5.38	85	5.4
2	14±2	4±0.5	40	45	186	464	735	948	0.46	54	3.6
3	9±2	4±0.5	60	49	192	320	851	935	0.32	33	2.6
4	10±2	2±0.5	60	54	226	377	906	732	0.00	15	—

実験に使用したコンクリートの配合は表 1に示すように、W/C=0.2, 0.4, 0.6とした。Mix. 1~3は早強セメント，Mix. 4は普通セメントを使用したものである。表中には、一軸圧縮強度 $f_c'$ および割裂引張強度 $f_t'$ を同時に記載している。ただしMix. 4の $f_t'$ については、強度試験を行っていないため、値が記されていない。

### 2.2 供試体の作成・養生

供試体は全てφ148×300mmのコンクリート円柱である。これは、φ150×300mmの鋼製型枠の内側に厚さ1mmの天然ゴムシートを貼り付けた型枠を使用し作製したものである。Mix. 1~3は打設後24時間、Mix. 4についてはおよそ40時間で脱型を行い、実験直前まで水中養生を施した。

### 2.3 実験方法

実験は基本的に材齢7日、Mix. 4についてのみ4日で行ったが、この理由については後に述べることにする。

実験装置を写真 1および図 1に示す。この装置では、供試体の側面にのみ水圧が作用するようになっており、漏水防止用にO-Ringが装備されている。

供試体を実験装置にセットするにあたり、試験時にO-Ringとコンクリート表面の気泡との隙間から漏水するのを防ぐため、供試体側面のO-Ringと接する位置にポリプロピレンテープを巻いた。さらに、O-Ringによる摩擦の影響を低減するため、ポリプロピレンテープの表面にグリスを塗った。

供試体を実験装置にセットした後、注入口から水圧ポンプを用いて水を注入し、エア抜き口から水が出始めると直ちにバルブを閉じ、この状態を圧力ゼロとした。その後、ほぼ一定の増加速度(0.04MPa/sec)で水圧を上昇させた。

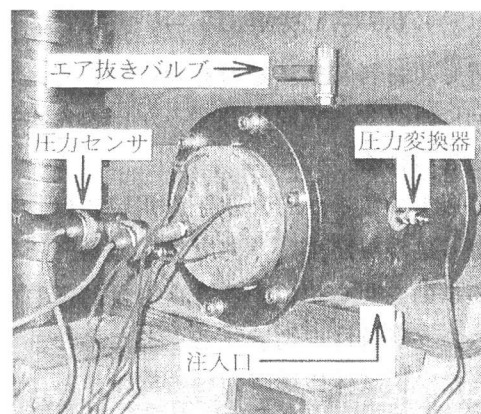


写真 1 実験装置

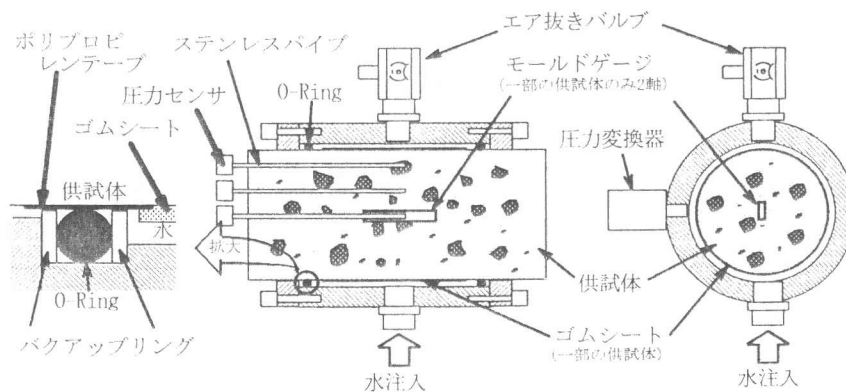


図 1 実験装置の断面概略図

作用させた水圧を実験装置に取り付けた圧力変換器で、供試体中心部の軸ひずみをモールドゲージを用いて測定した。また、一部の供試体についてのみ直径方向のひずみを同じくモールドゲージで測定した。さらに、あらかじめ供試体内部に埋め込んだφ1mmのステンレスパイプ内を試験直前に水で満たし、これに圧力センサを取りつけてコンクリート内部の間隙圧を測定した。

また、コンクリート内部への水の侵入を妨げるため、供試体表面を天然ゴムシート（厚さ1mm）で覆った供試体も準備し、同様の実験を行った。ただし、この供試体については、水圧上昇時に表面の気泡でゴムシートが破れるのを防ぐため、実験直前に1mm程度以上の気泡を石膏で充填した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊形態および破壊時の水圧

本実験により破壊した供試体は、写真2に見られるように、そのほぼ中央部で軸方向に直交する単一面で破壊している。この破壊形態は、あたかも供試体が刃物で切断されたような劈開破壊である。見かけ上引張応力は作用していないにも関わらずこのような破壊が起こるのは、非常に興味深いことである。

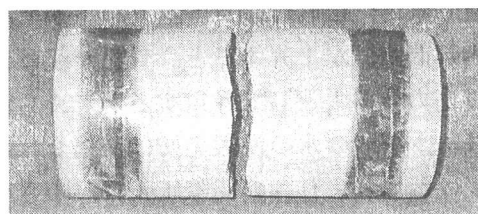
O-Ringによる摩擦の影響を無視し、本実験により作られた環境を等二軸圧縮応力状態と想定すれば、小谷ら[1]の実験にあるようにコンクリートに複数のひびわれが生じて破壊することが予想される。しかし本実験では写真2にあるように破壊面は単一であり、それ以外に肉眼で確認できるひびわれは存在しなかった。

また写真2には、破壊時の水圧と共に一軸圧縮強度および割裂引張強度を記載している。この供試体の破壊時の水圧は、一軸圧縮強度よりもかなり小さな値であり、その他の供試体についても同様の結果を得ている。等二軸圧縮試験では、破壊時の応力は一軸圧縮強度のおよそ1.2倍となるという報告が多く、小谷ら[1]の実験においても図2に示す結果となっている。本実験で得られた結果を図2に示す二軸圧縮応力下の破壊限界線[2]と比較すると、その相違は明らかである。この図は破壊時の応力を一軸圧縮強度で除して無次元化したもので、本実験結果は一軸圧縮強度のおよそ5分の1程度となっている。

#### 3.2 破壊時の水圧

本実験において、機械的な圧縮応力が作用した場合と明らかに異なる点は、コンクリート内への水の浸透を許容していることである。ところが、水の浸透を妨げた場合についての同様の実験においても、類似の結果が得られた。

図3は、Mix.1~3のコンクリート供試体について破壊時の水圧を水セメント比の相違により比較したものであり、さらに供試体の側面を天然ゴムシートでシールしたものとシールしていないものについても、その違いがわかるようにプロットしたものである。ただし、水セメント比0.20の場合には、破壊した供試体が2つしかなく、その他は作用させた水圧が実験装置の使用限界を越



W/C=0.4 破壊時の水圧 8.0MPa

一軸圧縮強度 54.7 MPa

割裂引張強度 3.3 MPa

写真2 供試体の破壊状況

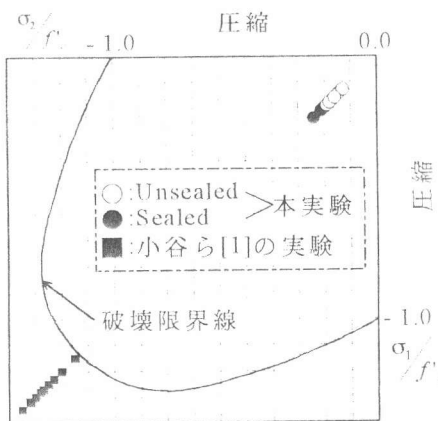


図2 二軸圧縮応力下におけるコンクリートの破壊限界線[2]と実験結果

え、供試体とO-Ringの隙間から水漏れが発生したため、実験を中止した。そのため図中では、矢印でこれ以上であることを示している。それ以外の供試体は図 3に示す水圧で破壊している。またこれらの平均値を点の形を区別して同図中にプロットした。

ゴムシートにより供試体側面をシールした場合の方が、若干ではあるが破壊時の水圧が大きくなる傾向が見られる。これは、コンクリートが直接水圧を受けて内部間隙圧が上昇すると、骨格が受け持つ軸方向の有効応力が引張として作用すると考えられるが、コンクリート中への水の浸透を妨げた場合には、直接水圧を受けた場合よりこの間隙圧上昇が小さいためと思われる。しかし、Mix. 1~3はいずれも間隙圧が測定されおらず、シールの有無による破壊水圧の差が、間隙圧の上昇によるものとは必ずしも言いきれない。

また、供試体内部への水の浸透がなければ、機械的な圧縮応力が作用した場合と同様に、一軸圧縮強度以上の水圧に耐え得ることが予想されるが、本実験結果は図 3から明らかのように非常に小さい水圧で破壊している。

### 3.3 破壊時の軸方向ひずみ

本実験における破壊時の水圧が非常に小さいことから、ここでの供試体の破壊は、側面の水圧が等二軸圧縮強度に達した点ではなく、貫通ひびわれが発生し、供試体が二分割された点であると考えられる。

一般に、ひずみがゼロまたは圧縮であればひびわれは発生しないが、ある方向の引張ひずみが増大すればそれに直交してひびわれが発生する。また、引張ひずみは引張応力によって生じるだけでなく、圧縮応力を受けた場合の非載荷方向にもポアソン効果による引張ひずみが発生する。本実験においても、見かけ上引張応力は作用していないが、供試体軸方向に引張ひずみが生じている。

したがって、貫通ひびわれの発生つまり供試体の破壊は、軸方向に発生した引張ひずみがある限界値に達したために起こったものと考えられることができる。

そこで、供試体の軸方向ひずみに着目し、図 3に示した供試体の破壊時のひずみを調べた結果が図 4のグラフである。これは、あらかじめ供試体軸方向に配置したモールドゲージにより測定した結果である。いずれも破壊時の軸方向ひずみは $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ の引張ひずみである。

本実験において供試体軸方向にこのような引張ひずみを生じさせた直接の要因は、側面の水圧であることに相違ないが、内部の間隙圧がどのような影響を及ぼしているかについては、さらに検討が必要であると思われる。

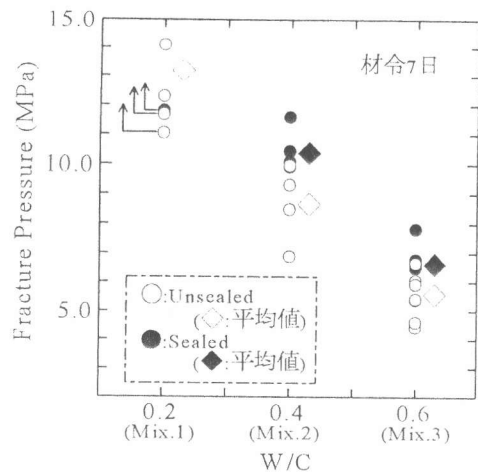


図 3 W/C と破壊時の水圧 (Fracture Pressure)

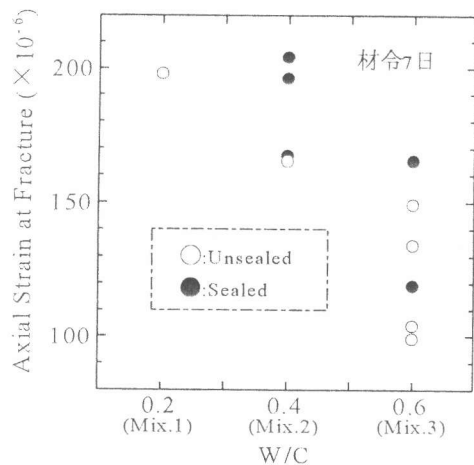


図 4 W/C と破壊時の軸方向ひずみ (Axial Strain at Fracture)

### 3.4 変形特性

図5にMix. 1~3のコンクリート供試体の側圧と軸方向ひずみの関係を示す。図中の黒い点は供試体の側面をゴムシートでシールしたもの、白い点はシールしていないものを表している。なお、破壊が急激に起こりその直後に側圧の値がゼロになるため、破壊後の水圧降下過程のひずみデータは全く残されていない。

軸ひずみは破壊直前までほとんど直線的に増加していることから、破壊直前まで弾性的に振舞い、そして、破壊の瞬間にひびわれは急激に進行し、全断面に貫通するものと思われる。

### 3.5 間隙水圧測定結果

Mix. 1~3の供試体では、間隙圧が全く測定されなかったため、比較的ポーラスな若材齢コンクリートを使用して同様の実験を行った。図6はMix. 4 供試体の材齢4日における側圧と間隙圧の関係である。

間隙圧の測定は、供試体中央部の中心、中心からおよそ2.5および5cmの位置である。中心から5cmの所では、ほぼ側圧に近い間隙圧が発生しているが、中心から少なくとも半径2.5cm以内の領域においてはほとんど変化が現れていない。この実験事実は、水の浸透がない領域では外部の側圧が間隙圧として伝達されていないことを示している。

しかし、表層付近では図6のように間隙圧が発生しており、コンクリートが直接水圧を受ける際の破壊性状を考える上で、この存在は無視できないと思われる。

ここで、中心から $r$ 離れた位置よりも外側で側圧に等しい間隙圧 $p$ が発生しているのであれば、0-Ringによる摩擦の影響を無視すると、供試体の全断面に作用する平均的な引張応力 $\sigma$ は、次式で表される。

$$\sigma = \frac{p(\pi R^2 - \pi r^2)}{\pi R^2} = p \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、 $R$ は供試体の半径である。

今 $r$ は、 $2.5 < r \leq 5\text{cm}$ の範囲に存在するから、破壊時の $\sigma_{\max}$ は、そのときの間隙圧 $p_{\max}$ を用いて、

$$p_{\max} \left\{ 1 - \left( \frac{5}{7.4} \right)^2 \right\} \leq \sigma_{\max} < p_{\max} \left\{ 1 - \left( \frac{2.5}{7.4} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

となる。間隙圧が発生している領域で $p$ の値が一定であると仮定すると、図6に示した供試体の破壊時の間隙圧 $p_{\max}$ は2.0MPaであるから、 $\sigma_{\max}$ の値は $1.1 < \sigma_{\max} < 1.8\text{MPa}$ となり、図3に示したシールしたものとししないものの破壊圧力の差として現れるものと思われる。

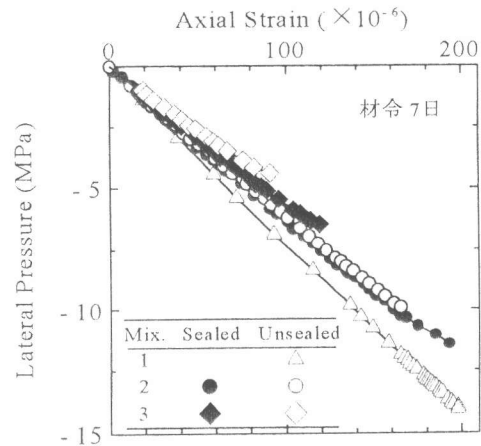


図5 側圧(Lateral Pressure)と軸方向ひずみ(Axial Strain)

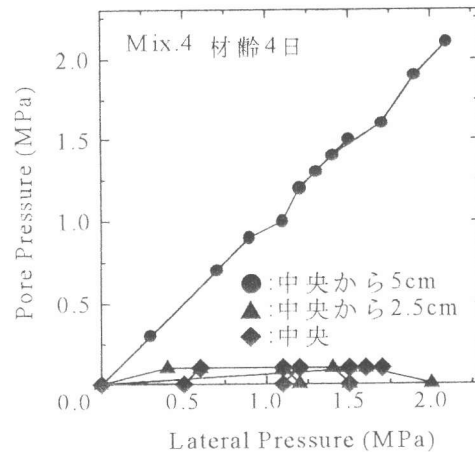


図6 側圧(Lateral Pressure)と間隙圧(Pore Pressure)

#### 4. 最大引張ひずみによる破壊基準

コンクリートの破壊基準はその三次元的な応力状態によって定義されるが、先にも述べたように、コンクリートの引張ひずみが限界値  $\varepsilon_{t0}$  (以下“限界引張ひずみ”と呼ぶ) に到達することにより破壊が起こるとすれば、ひずみを用いて表現された破壊基準が必要となる。そこで、最も簡単に基本的な1パラメータモデルの最大引張ひずみ基準で表される破壊曲面を次式のように定義する。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{t0}, \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{t0}, \quad \varepsilon_3 = \varepsilon_{t0} \quad (3)$$

変数  $I'_1, \sqrt{J'_2}, \theta$  を用いると、次式になる。

$$2\sqrt{3}\sqrt{J'_2} \cos\theta + I'_1 - 3\varepsilon_{t0} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $I'_1$  はひずみの第一不変量、 $J'_2$  は偏差ひずみの第二不変量、 $\theta$  は相似角 ( $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ ) である。また、限界引張ひずみ  $\varepsilon_{t0}$  は、割裂引張強度  $f'_t$  をコンクリートの弾性係数  $E_c$  で除したものをを用いた。

図7にこの破壊曲面の引張子午線 ( $\theta = 0^\circ$ ) および圧縮子午線 ( $\theta = 60^\circ$ ) の形状を示し、同図中に本実験結果をプロットしている。供試体のひずみを軸及び直径方向の2軸で測定したものが、一部のものについてのみであるため実験のデータ数は少ないが、ほぼ破壊曲面上にあり、この破壊基準が供試体の破壊を定義し得ると思われる。

また限界引張ひずみ  $\varepsilon_{t0}$  は、直接引張試験から求めた値ではないため多少信頼度に乏しく、この点は今後の課題である。

#### 5. 結論

- (1) コンクリート円柱供試体が側面のみ水圧を受けた場合、軸方向に直交する単一面で切断されたような劈開破壊を生じる。
- (2) この際の破壊時の水圧は、鋼製載荷板による機械的な等二軸圧縮強度より遥かに小さな値となる。
- (3) コンクリート内部の間隙圧が上昇すると、固相部分の有効応力が引張として生じると推定される。
- (4) コンクリートの引張ひずみが限界値に達することにより貫通ひびわれが生じると仮定すると、4章に述べた破壊基準が考えられる。

#### 【参考文献】

- [1] 小谷一三, 阿部保彦, 丸山久一: 2軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度およびひずみ性状, セメント技術年報, XXV II, pp261-266, 1973
- [2] Chen, W.F. 著, 色部誠・河角誠・安達洋 訳: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, pp27-35, 1985

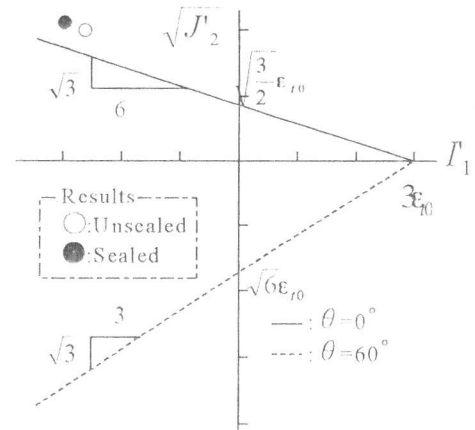


図7 最大引張ひずみ基準の子午面と実験結果