

# 論文 高側圧下におけるコンクリートの変形・破壊特性に及ぼす最大骨材径及び歪み速度の影響に関する実験的研究

李 小春<sup>\*1</sup>・呉 智深<sup>\*2</sup>・高橋 学<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、高側圧を受けるコンクリートの変形・破壊特性を明かにすることを目的として、異なる骨材の最大寸法を有する4種類のコンクリートに対して、40MPaまでの側圧下及び $1\mu\epsilon/s$ ,  $10^2\mu\epsilon/s$ ,  $10^3\mu\epsilon/s$ の歪み速度下での三軸試験を行った。その結果、いずれのコンクリートとも、側圧の増加につれ、脆性挙動から延性挙動に次第に移行するが、最大骨材径の高い程、または歪み速度の高い程、脆性から延性に移行するのに必要な最小側圧は大きくなることがわかった。また、異なる歪み速度及び高側圧下におけるコンクリートの強度、圧縮タフネス、軟化性状などを検討し、有用な基礎データが得られた。

**キーワード:** 高側圧、変形、破壊、最大骨材径、歪み速度、脆延性移行

## 1. はじめに

一定の横拘束を受けるコンクリートはその強度や延性が高くなることがよく知られている<sup>1)</sup>。そのため、鋼板や炭素繊維シート、帯筋などを用いて、コンクリート柱構造の耐震補強がよく用いられている。補強したコンクリートの圧縮韌性改良効果は、主に臨界応力(critical stress)以後のコンクリートの横向変形が繊維シートや帯筋によって横拘束されることによるものである<sup>2)</sup>。高い軸変形下では、炭素繊維ラップによる拘束圧は30MPa以上に至る場合もある<sup>2)</sup>。このようなコンクリート構造物の補強設計や変形挙動解析を行うためには、まず、さまざまな拘束圧下におけるコンクリートの変形特性に関する依頼し得る知識が必要である<sup>3)</sup>。また、最近、原子力発電所などの立地難の解決策として、地下原子力発電所が提案されている<sup>4)</sup>。地下式原子力発電所の特長の一つとしては、空洞による耐圧設計などの合理化は可能である。その他、さまざまな地下構造物や放射性廃棄物の深地層処分施設の建設におけるセ

メント系材料の適用も比較的大きい。従って、高側圧下におけるコンクリートの強度・変形特性に関する研究はその重要性が期待されるようになって来ている。

今まで、三軸圧縮下におけるコンクリートの変形・破壊挙動に関する実験データのほとんどは、受動側圧試験から得られている<sup>1), 2), 5), 6), 7)</sup>。即ち、側圧は供試体を囲むスチール管などによって受動的に生じたものである。このような方法では、大寸法供試体の試験ができ、載荷や計測が便利であるなどの利点があるが、ラップ材と供試体との間に摩擦力やすきまが存在するため、応力状態の不確定性の影響が存在し、供試体変位の直接計測が困難であるなどの問題がある。このため、高側圧下において、コンクリートの変形破壊に関する詳細な計測データはまだ希である。

本研究では、高側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす骨材の最大寸法及び歪み速度の影響を明かにすることを目的として、油を圧力媒体とし、6つの高精度変位計を

\*1 茨城大学大学院情報・システム専攻 博士後期1年(正会員)

\*2 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博(正会員)

\*3 通商産業省工業技術院地質調査所環境地質部 主任研究官 工博

用いて、以下の2シリーズの実験を行った。

実験Ⅰでは、骨材の最大径が1.2(モルタル)、2.5、5.0及び15mmの4種類のコンクリートを用いて、0~40MPaの側圧下での三軸試験を行った。

実験Ⅱでは、骨材の最大寸法が1.2mmのモルタルを用いて、0~40MPaの側圧変化及び準静的範囲における $1\mu\epsilon$ ,  $10^2\mu\epsilon/s$ ,  $10^3\mu\epsilon/s$ の歪み速度下での三軸試験を行った。

## 2. 実験方法

供試体( $\phi 50 \times 100\text{mm}$ )は、普通ポルトランドセメント、川砂及び砂利を使用し、Table 1で示されているように製作した。粒度分布の影響を最小限にするため、均一な粒度分布を持つ骨材を用いた。また、28日養生した後、2端面を研磨した。その後、90~110日間室内に放置し、

Table 1 Mixture of Concrete

骨材の最大径D (mm)	w/c	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			空 気 量(%)
			セメ ント	細骨 材	粗骨 材	
15	59.3	47.0	185	852	986	1.6
5	59.1	—	295	1355	—	2.3
2.5	59.1	—	295	1355	—	2.7
1.2	59.1	—	295	1365	—	3.4

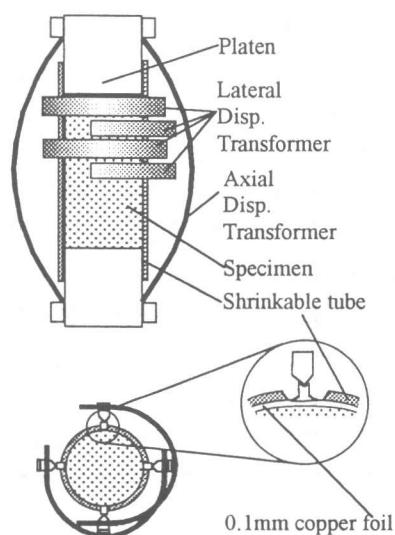


Fig.1 Specimen assembly

試験に用いた。

三軸圧縮試験において、供試体の組み立てはFig.1に示している。フッ素樹脂熱収縮チューブを用いて、供試体及びエンドピースをジャケットした。ジャケットした供試体には、2つの軸方向及び4つの横方向変位計を取り付けている。変位計は4枚の歪みゲージを貼ったイタバネである。不均一な変形を把握するため、径向変位計はそれぞれ異なる高さに取り付けた。変位計の出力に及ぼす静水圧の影響があるものの、すべて精密なキャリブレーションを行い、修正した値を用いた。

## 3. 実験結果とその考察

### 3.1 骨材最大寸法効果

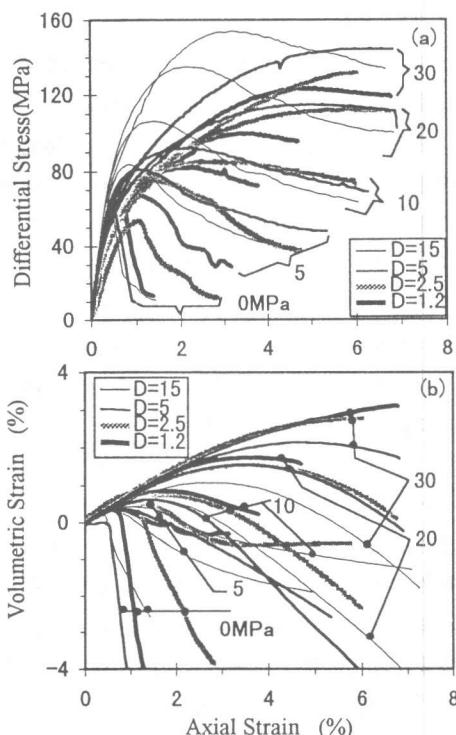


Fig.2 Differential stress and volumetric strain vs axial strain for concrete with different max. sizes of aggregates(strain rate:  $1-5\mu\epsilon/s$ )

Fig.2は、骨材最大寸法の異なるコンクリートの軸差応力～軸歪み、横歪み体積歪み～軸歪み曲線を示すものである。軸歪みは2つの軸変位計によって計測された歪みの平均値であり

(Fig.1), 体積歪みは軸歪み及び 4 つの横変位計によって計測された平均横歪みから計算したものである。図中の数値は側圧の値を示す。試験中では、軸歪み速度が  $1\sim5\mu\epsilon/s$  である。Fig.2 によれば、いずれの種類のコンクリートとも、側圧レベルの増加に伴い、ピーク後の軸差応力～軸歪み曲線の歪み軟化から歪み硬化への移行が見受けられる。また、体積歪み～軸歪み曲線に関して、ダイラタンシー性状より持続コンパクション性状へと移行する。

一方、最大骨材寸法の相異によって、応力～歪み曲線の形状には顕著な相異が存在している。具体的には、後出の強度や変形及び破壊特性について述べることにする。

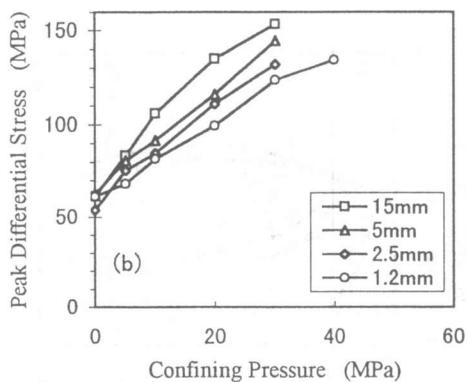


Fig.3 Peak differential stress vs confining pressure for concrete with different max. sizes of aggregates

**強度特性**：側圧の増加に伴い、ピーク軸差応力は増加する。また、同じ側圧下において、骨材の最大寸法が大きい程、より高いピーク軸差応力を示していることが認められる。(Fig.3)。

**圧縮タフネス**：Fig.4 は 4 種類のコンクリートについて、ピーク応力時の軸方向歪み(圧縮タフネスとも呼ぶ)と側圧との関係を示す。側圧の増加につれ、圧縮タフネスの増加が顕著に現れた。また、最大骨材寸法 1.2mm を有するモルタルの場合を除けば、骨材最大寸法の減少につれ、圧縮タフネスに及ぼす側圧の影響は大きくなるようです。但し、コンクリートの強度と違って、圧縮タフネスに及ぼす影響について、

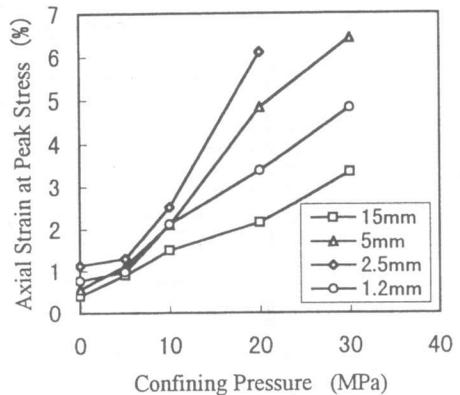


Fig.4 The axial strains at peak stress vs confining pressures

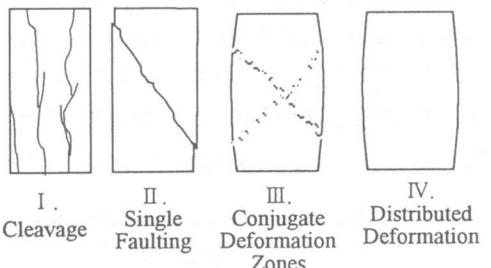


Fig.5 Observed 4 types of failure patterns

骨材寸法による一致的な関係を持たない場合もある。

**破壊パターン**：X 線 CT を用いた供試体の観察によって、Fig.5 に示しているような 4 つの破壊モードに分類することができる。各種のコンクリートとも、一軸試験では、供試体はへき開モード(I)で破壊している。比較的低側圧下では、供試体には一つのせん断面を有する破壊形狀が示される(II)。側圧が更に高くなるにつれ、供試体には 2 つ以上の共役破断面が存在し、また、破断面以外の部分が塑性的変形も生じる(III)。側圧が高い程、共役破断面の幅が広くなり、最後に、巨視的せん断面が認められなく、供試体の全体が均一的変形している様子を示す(IV)。異なる側圧下における各種のコンクリート供試体の破壊モードは Fig.6 のようにまとめられている。

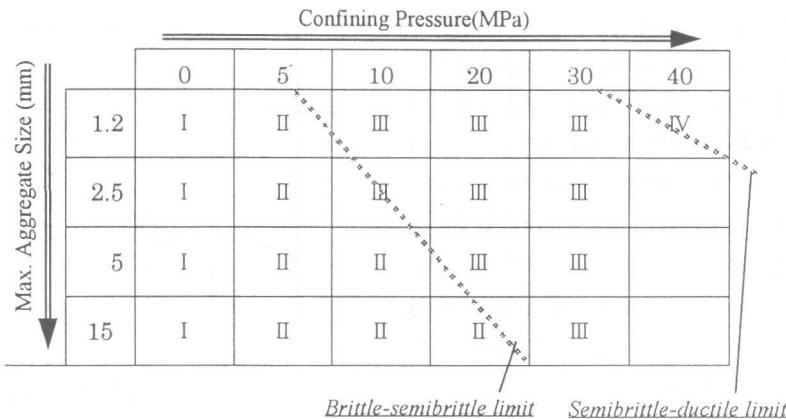


Fig.6 Effects of confining pressure and maximum aggregate size on failure mode and brittle-ductile transitional behavior

**脆・延性移行挙動**：概述したように、側圧の増加に伴い、供試体の変形特性がダイラタンシーや歪み軟化挙動から持続コンパクションや歪み硬化挙動に移行する。また、破壊モードは、単一破断面、複数共役破断面、そして全体均一

Table 2 Brittle-Ductile Transitional Limits

Inelastic deformation behavior	Confining pressure		
	Dilatancy		Compaction
	Strain softening	Strain hardening	
Failure mode	Localized fracture	Conjugate deformation zone	Attributed deformation
	Brittle	Semi-brittle	Ductile

破壊モードへ移行する。これらのことから、コンクリート供試体は脆性挙動から次第に延性挙動に移行しているように思われる。

**脆延性移行限界側圧**：Wong<sup>8)</sup>は砂岩の変形試験及び観察に基づき、高間隙率岩石の脆延性限界として、Table2のような基準を提案した。

ダイラタンシーや歪み軟化及び局所的せん断挙動を示すと、脆性破壊とし、逆に持続コンパクションや歪み硬化及び全体均一破壊挙動を満たすと、延性流動とする。共役破断挙動を示す場合に関して、半脆延破壊とする。こうして、脆性・半脆性移行側圧及び半脆性・延性移行側圧が決められる。それらの基準に従い、各種のコンクリート供試体の脆性・半脆性移行側圧を

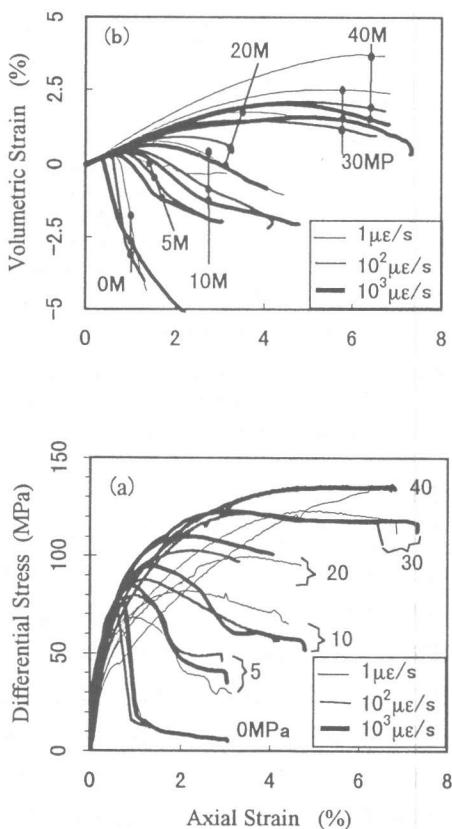


Fig.7 Volumetric strain and differential stress vs axial strain for mortar with max. aggregate size of 1.2mm under axial strain rates of  $1\mu\epsilon/s$ (finest lines),  $10^2\mu\epsilon/s$ (finer lines) and  $10^3\mu\epsilon/s$ (thick lines)

**Fig.6** に示した。図に示しているように、骨材の最大寸法が大きい程、移行側圧が高い。いわゆる骨材の最大寸法の大きいコンクリートについて延性挙動が現されるための必要な側圧が高いと考えられる。

**3.2 歪み速度効果** Fig.7 は、骨材の最大寸法が 1.2mm のモルタル供試体の軸差応力、体積～軸歪み曲線を示している。図中の数値は側圧の値を示す。試験中では、軸歪み速度は 1, 100, 1000με/s の三段階とした。Fig.7 によれば、い

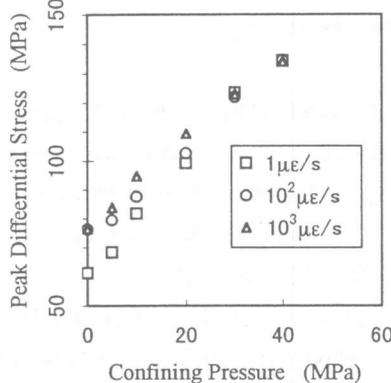


Fig.8 Peak differential stress vs confining pressure for mortar with max. aggregate size of 1.2mm under different strain rates  
いずれの歪み速度の場合とも、側圧の増加に伴い、軸差応力～軸歪み曲線は歪み軟化から歪み硬化に移行し、体積歪み曲線はダイラタンシー挙動から持続コンパクション挙動に移行する。すなわち、脆性挙動から延性挙動に遷移することが認められる。

**強度特性** : Fig.8 は異なる歪み速度下におけるピーク軸差応力と側圧との関係を示している。いずれの歪み速度下とも、側圧の増加とともに、ピーク応力は増加する。ピーク応力に及ぼす歪み速度の影響については、同じ側圧下で、歪み速度が大きい程、ピーク軸差応力が高くなるように見受けられる。また、その影響量は、低側圧下では明瞭であるが、高側圧下では、小さくなる傾向が考えられる。30MPa 以上側圧になると、歪み速度の変化によるピーク軸差応力の変化がなくなる。

**圧縮タフネス** : Fig.9 は異なる歪み速度下に

おける圧縮タフネスと側圧との関係を示している。側圧の増加につれ、圧縮タフネスは顕著に大きくなるが、歪み速度の増加によって、圧縮タフネスは顕著に小さくなることがわかる。また、高い側圧の場合、圧縮タフネスに及ぼす歪み速度の影響量は大きくなることが認められる。

**脆延性移行側圧** : 異なる歪み速度及び側圧下における各供試体の破壊モードは Fig.10 にまとめられている。各歪み速度下における脆性・半脆性移行側圧及び半脆性・延性移行側圧は同

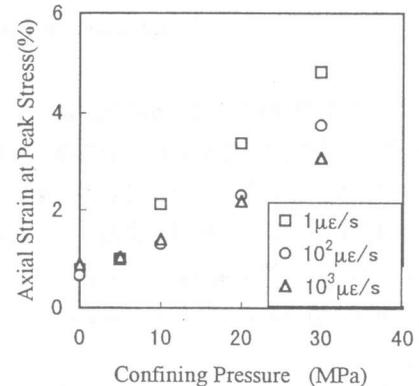


Fig.9 The axial strain at peak stress vs confining pressure for mortar with max. aggregate size of 1.2mm under different strain rates

図に示している。図に示しているように、歪み速度が大きい程、脆性・遷移限界側圧は高い。いわゆる高い歪み速度下におけるコンクリート材料の延性挙動を出現させるためには高い拘束圧が必要であることを意味している。

#### 4. まとめ

異なる最大骨材径を有する 4 種類のコンクリートに対して、40MPaまでの側圧下及び 1με/s, 10<sup>2</sup>με/s, 10<sup>3</sup>με/s の歪み速度下での三軸試験を行った。試験中には、4 つの横方向の変位計を用いて、供試体の全体的変形特性や体積変形を精確に計測した。その結果、次のようにまとめられる。

- 1) いずれのコンクリートとも、側圧の増加に伴い、歪み軟化やダイラタンシー、局所的破壊などの脆性挙動から歪み硬化や持続コンパクション、均一的な全体変形による破壊などの延

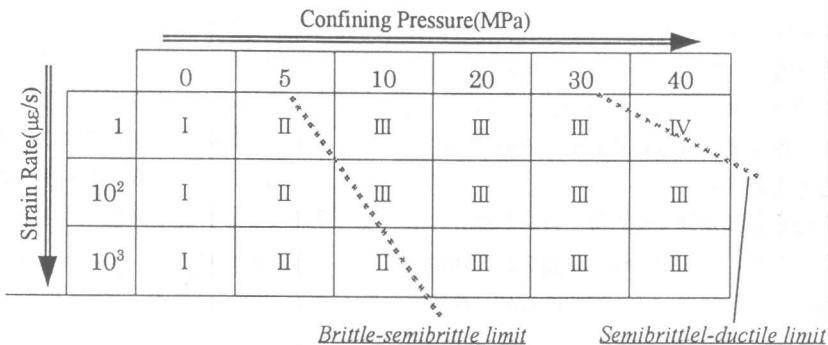


Fig.10 Effects of confining pressure and strain rate on failure mode and brittle-ductile transitional behavior

性挙動に次第に移行することが再現された。

2) 骨材の最大寸法の影響については、骨材の最大寸法が大きい程、脆性・延性移行側圧は大きくなることが認められる。また、いずれの側圧下でも、最大骨材径の大きいコンクリートは強度が高い値を示し、圧縮タフネスは小さい値を示す。

3) 歪み速度の影響について、歪み速度が大きい程、脆性・延性移行側圧は大きくなることが認められる。また、いずれの側圧下でも、歪み速度が大きい場合、より高い強度を示す。高側圧下では、歪み速度が強度に及ぼす影響は無くなるが、圧縮タフネスに及ぼす影響は顕著になる。

今回得られた異なる歪み速度、骨材寸法及び高側圧下で応力～歪み曲線などのコンクリートの力学特性に関する基礎的データとして、今後より精度の高い材料構成式を検証するのに、有用であると思われるが、これらの供試体の破壊に関する微視的観察を通じて、巨視的挙動をより明らかにし、また、高圧真三軸応力状態下におけるコンクリートの変形・破壊挙動を調べる予定である。

## 参考文献

- 1) 小阪義夫ほか：低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動、第6回コンクリー

ト工学年次講演会、pp. 257-260、1984

- 2) Thomas, G., et al : Confined Concrete Subjected to Uniaxial Monotonic Loading, J. of Eng. Mech., Vol. 124, No. 12, pp. 1303-1309, Dec. 1998
- 3) Bazant, Z. P., et al. : Endochronic Theory of Inelasticity and Failure of Concrete, J. of Eng. Mech., Vol. 102, No. EM4, pp. 701-723, Dec. 1974
- 4) 木下直人ほか：岩盤構造物の設計法に関する研究報告書、pp. 67-69、1997.12
- 5) 小阪義夫ほか：多軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に関する研究、第5回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 133-136、1983
- 6) Ahmad, S. H. : Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete, J. of Struct. Div., ASCE, Vol.108, No. ST4, pp.728-743, April 1982
- 7) Kinoshita, M. et al.: Behavior of Concrete Under Passive Confinement, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, No.502/V-25, pp.131-142, Nov. 1994
- 8) Wong, T. F. : Mechanical Compaction and the Brittle-Ductile Transition in Porous Sandstones, in Deformation Mechanics, Rheology and Tectonics, edited by R. J. Knipe, pp.111-122. 1990