

# プレーンおよびコンファインドコンクリートの圧縮特性の 寸法効果に関する実験的研究

## SIZE EFFECT ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF PLAIN AND CONFINED CONCRETE

小池 狭千朗\*, 畑中 重光\*\*, 谷川 恭雄\*\*\*

*Sachio KOIKE, Shigemitsu HATANAKA and Yasuo TANIGAWA*

**Abstract** The effects of the specimen size and aggregate size on the inelastic stress-strain behavior of plain and confined concrete were examined. The following statement can be drawn from the study.

For air cured plain microconcrete in which the size of aggregate is reduced in proportion to the size of a specimen, the compressive strength increased and the descending portion of stress-strain curve showed more brittle behavior with increasing size of specimen or aggregate.

The compressive strength of confined concrete increased with increasing size of specimen when cured in air. On the other hand, the size effect was almost negligible in water cured specimens. The stress-strain curve of confined concrete showed more brittle behavior with increasing size of specimen and degree of such size effect depended on the spacing of hoops.

### 1. はじめに

コンクリートおよび鉄筋コンクリート（以後、RCと略記）部材の強度は、断面寸法の大きさに依存する。一般に、これを「寸法効果」という。

RC部材やRC構造物を実大で実験するには大型の載荷設備を必要とし、多額の経費と手間がかかるため、小型試験体を使用することが多い。これらの小型試験体の実験結果を実大構造物や部材に適用する際には、実大と小型の相互関係、すなわち寸法効果をあらかじめ確認しておく必要がある<sup>3)-7)</sup>。

コンクリートの圧縮強度の寸法効果は、引張・曲げ・せん断強度の寸法効果に比べて小さく、実大部材の圧縮強度は、通常の試験体（直径 $\phi$  10 cm~15 cm）の圧縮強度のおよそ80~90%と考えられているが<sup>8)</sup>、高強度になるほど寸法効果が大きくなるとの報告<sup>9)-11)</sup>もみられる。また、圧縮下のコンクリートのピーク応力後の破壊

性状は、試験体寸法の増大に伴い、かなり脆性的になり、このような寸法効果もまたコンクリート強度に依存して異なるようである<sup>2),11)</sup>。

RC部材の圧縮部のコンクリートは、せん断補強筋による拘束効果のために、プレーンコンクリートに比べてその力学性能が改善され、せん断補強筋の多いRC部材ほど延性的な力学挙動を示す<sup>12)-14)</sup>。RC部材の力学挙動の寸法効果を論じるには、部材の圧縮域を想定して横補強されたコンファインドコンクリートの塑性変形挙動に及ぼす試験体寸法の影響についても知る必要がある。これまでも、コンファインドコンクリートの変形挙動に関する研究例は多く、応力-ひずみ曲線の表示式も種々提案されているが、試験体寸法の影響を考慮した研究例は少ない<sup>15)-17)</sup>。

近年、設計・施工技術の進歩と社会的要請が重なって、RC構造物は大型化・高層化する傾向にあるが、実大柱の実験例は少ない<sup>18),19)</sup>。これらの構造物の実物大実験を行い得る載荷試験機の容量は、研究費の制約等からこの大型化に追従できず、実物大実験ができなくなってきており、昨今のコンクリートの高強度化はこの傾向を加速している。このような大型構造物の安全性を、実物

\* 愛知工業大学工学部建築学科（豊田市）

\*\* 三重大学工学部建築学科（津市）

\*\*\* 名古屋大学工学部建築学科（名古屋市）

大実験を行うことなく合理的に確保するためにも、「寸法効果」の究明は極めて大切な研究課題である<sup>20)</sup>。

模型実験を行う場合、縮小試験体に使用する材料の力学特性は原型と同じものが望ましい。縮小試験体のコンクリートとして原型試験体と同じものを使用すると、模型試験体中の粗骨材の寸法が試験体寸法に比べて相対的に大きくなり、これがコンクリートの力学挙動に影響することがあり、模型材料に使用するコンクリートの骨材寸法の選択には注意を要する<sup>3)-5), 21), 22)</sup>。

これらのリスクを避けるために、しばしばコンクリート中の骨材の寸法を試験体寸法に合わせて縮小したマイクロコンクリートを用いた縮小試験体による模型実験も試みられ、併せてマイクロコンクリートの圧縮特性に関する研究<sup>23)-25)</sup>も行われている。コンクリートをマイクロ化することによって、原型の圧縮強度にかなり近づけ得るとの報告<sup>26), 27)</sup>もみられる。また、変形性状についても、応力上昇域については再現性がよいとの報告<sup>28)</sup>もあるが、圧縮強度並びに圧縮強度時のひずみとは逆にマイクロコンクリートの弾性係数は縮小化に伴って減少すると報告<sup>29)</sup>もある。また、骨材寸法が小さくなると圧縮強度が増大し、かつ弾性係数も増大すると報告<sup>24)</sup>もみられ、その結論とするところは各研究者によって必ずしも一致していない。

構造物の大変形時の塑性変形挙動をマイクロコンクリートを用いた縮小試験体によって調べるには、これらのコンクリートの応力下降域の変形挙動の寸法効果に関する調査が必要不可欠であるが、研究例は極めて少ない。

本研究では、まず、既に多くの実験結果が報告されているプレーンコンクリートの圧縮強度の寸法効果について取りまとめ、各種要因の位置づけを明らかにする。次に、プレーン並びにコンファインドコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を行い、これらのコンクリートについて圧縮強度のみならず、高ひずみ域に至るまでの圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を明らかにすることを目的とする。この種の研究では実大試験体の実験データを含めて検討することが望まれるが、載荷試験機の制約から本実験で取り扱っている試験体の寸法の範囲は「縮小模型」と「超縮小模型」の範囲に限られている。「縮小模型」と「実大試験体」の関係については、別途検討する必要がある。

## 2. プレーンコンクリートの圧縮強度に関する既往の研究

プレーンコンクリートの圧縮強度の寸法効果に関する研究は比較的早くから多くの研究がなされている。ここでは、寸法効果に関わる要因を大きく次の4つに分類した。

### i) 試験体寸法の影響

#### ii) 骨材寸法の影響

#### iii) コンクリートの内部組織の影響

#### iv) 実験条件の影響

以下、それぞれの要因の影響について概要をまとめる。

### (1) 試験体寸法の影響

多くの国で、RC構造物の設計の基準強度として $\phi 15 \times 30\text{cm}$ または $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱体の圧縮強度を使用している。これらの円柱体と種々の寸法をもつ構造物の強度との比や力学特性の違いを検討する必要上、コンクリート強度の寸法効果に関する研究が、多くの研究者によって古くから行われてきた。これらの研究例については、谷川・山田<sup>6)</sup>が詳しく紹介しており、以下にその後の文献も含めて紹介する。

Gonnerman<sup>21)</sup>、Blanks・McNamara<sup>30)</sup>、Gyengo<sup>31)</sup>、Neville<sup>4)</sup>、Hollis<sup>32)</sup>、Rajendran<sup>33)</sup>、Sabnis・Mirza<sup>7)</sup>、Malhotra<sup>34)</sup>などの研究者は、コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体寸法の影響について調べた。その結果、これらの研究者は、一般に試験体寸法が大きいほどコンクリート強度は低下すると述べている。Blanks・McNamara<sup>30)</sup>やSabnis・Mirza<sup>7)</sup>らは、コンクリートの圧縮強度は直径の約10乗根に反比例して減少する弱い寸法効果を示すことを報告している。

Kim<sup>35)</sup>らは、Bazantの提案した非線形破壊力学に基づく寸法効果則に初期クラックの相対長さの影響を考慮した修正式を提案し、圧縮強度の寸法効果の予測に応用し、Blanks<sup>30)</sup>らの実験結果に本提案式を適用し、試験体寸法に依存しない強度比( $d$ が無大の時の値)として0.63を得ている。

このような試験体寸法の増大とともに圧縮強度が減少する傾向を説明するモデルとして、次の2つがある。すなわち、

i) Tucker<sup>36)</sup>、堀<sup>37)</sup>、永松<sup>38)</sup>、Hobbs<sup>39)</sup>、Kamesu-wara Rao・Swamy<sup>40)</sup>、三橋<sup>41), 42)</sup>、谷川<sup>43), 44)</sup>らの研究による確率論的な考察: 材料の強度は、試験体中に潜在する材料の欠陥の分布状態、大きさ、量などが一定ではなく、ランダムにばらつく性質をもつためであると、寸法効果は一般に、試験体中の欠陥量の多少に依存する容積効果によるとする考えから、確率論を用いた説明がなされている。コンクリートのような脆性材料の破壊強度はWeibull分布に従うとし、とくに、そのモデルとしては、Weibullの最弱リンクモデル並びにそれを改良したモデルを用いている。

ii) 近年、金属材料の破壊現象の説明にめざましい成果を挙げている破壊力学、損傷力学をコンクリートの破壊に適用して、寸法効果を解明しようとするGriffith理論に代表される「エネルギー変換機構」に基礎を置く理論<sup>45), 46)</sup>。

これらの理論で説明できるコンクリートは、コンクリート中の骨材の寸法が試験体寸法に比べて相対的に小さ

く、コンクリートを等質連続体とみなし得る場合<sup>38)</sup>であり、これらの理論によればコンクリート強度は、試験体寸法の増大とともに減少する。

## (2) 骨材寸法の影響

これらの研究と併行して、コンクリート中の骨材寸法がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響についても注目が集まり、Powers<sup>47)</sup>、Collier<sup>48)</sup>、並びにその後のWalker・Bloem<sup>49)</sup>、Cordon・Gillespie<sup>50)</sup>、Hughes・Chapman<sup>24)</sup>らの研究では、一般的に骨材寸法が大きいかほど圧縮強度が低下するとの結論を得ている。

一方、Sangha・Dhir<sup>5)</sup>は、試験体寸法と骨材寸法の相互効果がコンクリート強度に及ぼす影響について調べ、試験体寸法と骨材寸法の比が小さい範囲では、試験体寸法が大きくなるほど強度が増大する場合のあることを報告している。

わが国でも、笠井<sup>51)</sup>が約2000個の円柱体の実験から $\phi 15 \times 30$ cm円柱体の圧縮強度が、わずかであるが $\phi 10 \times 20$ cm円柱体のそれよりも大きいことを報告している。

谷川・山田<sup>6)</sup>は、試験体寸法が大きいかほど圧縮強度が増大するこれらの傾向は、最小値確率論などでは全く説明できない現象であり、コンクリートのような極度に非均質な材料の寸法効果は試験体の容積効果のみでは理解できず、試験体寸法と骨材寸法の相対的な大きさに依存するシステム全体としての幾何学的な非均質性が寸法効果に対する重要な影響因子となることを指摘した。そして試験体寸法を種々に組み合わせたコンクリートの圧縮実験を行い、圧縮強度の寸法効果を、試験体中の欠陥量の多少に起因する容積効果と試験体内部の幾何学的非均質性に起因する効果との複合効果として表示した。この表示式によれば、試験体寸法に比べて相対的に骨材寸法が小さい場合には、試験体寸法の増大とともに強度は低下し、骨材寸法が大きく試験体内部の幾何学的非均質性が増すと、試験体体積の増大とともに強度も増大しており、後者の現象はSangha・Dhir<sup>5)</sup>や笠井<sup>51)</sup>の実験結果に基づいた骨材寸法の影響として説明することができるとしている。

## (3) コンクリートの内部組織の影響

コンクリートの内部組織に関わる要因<sup>7), 52), 53)</sup>としては、以下のものが挙げられる。

i) 試験体側面の型枠のせき板効果に起因する寸法効果<sup>54), 55)</sup>： 型枠(せき板)とコンクリートの接する粗骨材1個分程度の厚さの周辺では、粗骨材の移動が型枠壁面によって拘束されるため、粗骨材の充填割合が内部より低下して、モルタル量の多いコンクリートになり、この部分のコンクリートの強度が増大する。試験体寸法の小さなものほど、この表層部分の占める割合が大きくなって強度が増大し、寸法効果の原因の一つとなる。

ii) 部材寸法の違いによる施工条件の変化に起因する寸法効果<sup>56)</sup>： 試験体寸法の小さなものほどよく締め

固められ、コンクリートが緻密になり強度が高くなる。これに対して、寸法の大きな試験体では、締固め不足による空隙や欠陥を内部に含みやすく、強度が低くなる可能性がある。

iii) 水や骨材などの材料の偏りに起因する寸法効果<sup>57)</sup>： まれに、寸法の大きな部材には寸法の大きな粗骨材を使用することがある。大きな粗骨材は欠陥の原因となりやすく、またコンクリート内部で水や骨材の偏りが生じやすく、これが強度を低下させる原因となる。

iv) コンクリートの強度レベル(水セメント比)に起因する寸法効果<sup>9), 11)</sup>： コンクリートが高強度になるほど、強度の寸法効果が大きくなる。また、コンクリートの強度レベルによって応力軟化域の負剛性の寸法依存性が相違する。

## (4) 実験条件の影響

実験条件に関わる要因としては、以下のものが挙げられる。

i) 載荷速度に起因する寸法効果<sup>56)</sup>： 試験体寸法が小さいものほど載荷速度が速くなりやすい。この注意を怠ると、小さい試験体ほど強度が高くなる可能性がある。

ii) 試験体の載荷面の平滑度に起因する寸法効果<sup>53), 58)</sup>： 試験体寸法が大きいかほど平滑な端面に仕上げるのが困難になる。試験体端面の仕上げが悪く載荷中に端部が破壊するような試験条件下では、端面の仕上げの程度で強度が異なる。

iii) 養生時の水分の散逸による水和反応の阻害に起因する寸法効果<sup>2), 59)</sup>： 比較的乾燥した大気中で養生されたコンクリートは、水中養生されたコンクリートに比べて試験体寸法の小さなコンクリートほど水分の散逸が顕著で、水和反応が阻害される可能性が高い。このような乾燥条件下で養生されたコンクリートでは、確率論やエネルギー変換機構に基づく寸法効果とは逆に、試験体寸法が大きいかほど強度が増大する場合もある。本研究のうち、ブレンコンクリートに関する実験はこれに該当する。

## 3. ブレンコンクリートの一軸圧縮実験

表1 ブレンコンクリート試験体の一軸圧縮実験の概要

角柱体の寸法	円柱体の寸法	水セメント比	粗骨材の最大寸法
$b \times b \times H$ (H=3b) (cm)	$d \times H$ (H=2d) (cm)	W/C (%)	$\phi_a$ (mm)
4.5 × 4.5 × 13.5	$\phi 7.5 \times 15$	45	15, 25
5.6 × 5.6 × 16.8			Mortar
7.3 × 7.3 × 21.9			10, 15, 20,
9.7 × 9.7 × 29.1	$\phi 10 \times 20$	60	25, 30
12.5 × 12.5 × 37.5			15, 25
15.0 × 15.0 × 45.0			$\phi 15 \times 30$

[註] b：角柱体の断面の一辺、d：円柱体の直径

3. 1 実験方法

(1) 実験の概要

ブレンコンクリート試験体の一軸圧縮実験の概要を表1に示す。実験要因として試験体寸法、水セメント比、および粗骨材の最大寸法を取り上げた。試験体の個数は、各要因の組み合わせごとに20体、合計1800体である。円柱体は縦打ち、角柱体は横打ちとした。

(2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(5mm未満)と川砂利を使用した。粗骨材の粒度分布は、骨材最大寸法 $\phi_a=25\text{mm}$ の分布を基本とし、その他の骨材最大寸法( $\phi_a=10, 15, 20$ および $30\text{mm}$ )については、無次元化粒度分布が等しくなるように粒度調整を行った。水セメント比(W/C)は45、60および70%の3種類、スランブは15cmとした。表2に、コンクリートの調合表を示す。コンクリートの混練には、容量600ℓのスミス式可傾ミキサを使用した。角柱試験体の型枠には、試験体の端面を平滑に、また端面の平行度を高めるために、鋼製型枠を使用した。コンクリートの打設に際しては、粗骨材が分離しないように注意し、パイプレタおよび木づちによって十分に締め固めた。すべ

表2 ブレンコンクリートの調合表

粗骨材の最大寸法 $\phi_a$ (mm)	水 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 s/a (%)
(Mortar)	283	472	1571	0	-
10	191	319	737	1092	40
15	186	310	756	1094	41
20	182	303	737	1131	40
25	178	297	722	1161	39
30	174	290	705	1195	37

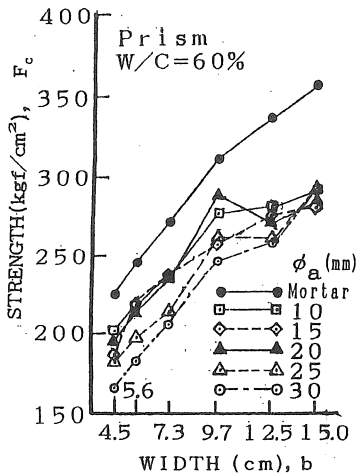


図1 ブレンコンクリートの圧縮強度 ( $F_c$ ) と試験体寸法 ( $b$ ) の関係 (角柱体)

ての試験体は材齢3日目に脱型し、室内(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $75\pm 10\%$ )で空中養生を行った。実験材齢は、およそ6週とした。

(3) 載荷および測定方法

加圧板の寸法は試験体の断面寸法と同一とし、厚さは試験体の断面の一边 $b$ の1/4以上のものを使用した。載荷には、名古屋大学の変位制御型高剛性圧縮試験機を用い、ひずみ速度を毎分およそ $1\times 10^{-3}$ の一定とし、試験体の縦ひずみ( $\epsilon$ )が $10\times 10^{-3}$ になるまで継続載荷した。試験体の縦ひずみは、後述の図10に示すように、試験体の中央部に取り付けた一対の変位計によって測定した。測定長は、角柱体では試験体の中央部 $2b$ 、円柱体では(H-2)cmである(ここに、 $b$ :試験体の断面辺長、 $H$ :試験体高さ)。

3. 2 実験結果とその考察

(1) 圧縮強度

図1および図2に、それぞれ角柱体および円柱体の圧縮強度( $F_c$ )に及ぼす試験体寸法の影響を示す。これらの図によれば、i) 打込み方向の相違にも拘らず、角柱体および円柱体の圧縮強度の寸法効果は極めて類似しており、圧縮強度は試験体寸法が大きいほど増大すること(ここで、粗骨材の最大寸法( $\phi_a$ )は一定)、およびii) 同一寸法の試験体であれば、一般に $\phi_a$ の値の増加に伴って圧縮強度が減少することが分かる。ここで、すべてのコンクリート試験体は前述のように、空中養生(相対湿度 $75\pm 10\%$ )を行っていることに注意されたい。森田ら<sup>59)</sup>は、実験条件を広範囲に変化させてコンクリートの圧縮強度の寸法効果を検討している。すなわち、円柱試験体の直径 $d$ を1.25~15cmの間で、また、粗骨材最大寸法 $\phi_a$ を2.5~10mmの間で変化させ、これらの種々の組合わせに対して、水中養生(温度 $20^\circ\text{C}$ 、4週間)され

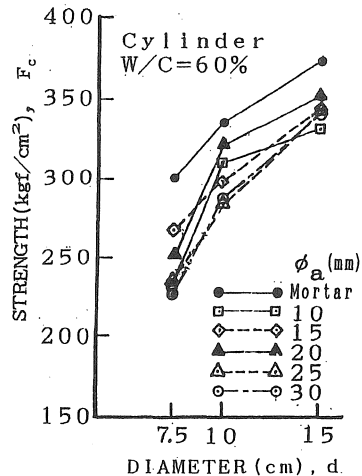


図2 ブレンコンクリートの圧縮強度 ( $F_c$ ) と試験体の直径 ( $d$ ) の関係 (円柱体)

たコンクリートの圧縮強度を調べた。その結果、 $d/\phi_a$ 。比が5~60の範囲では、 $\phi_a$ の値が一定の場合、コンクリートの圧縮強度は円柱体の直径 $d$ が5~10cmのものではほぼ等しく、縮小率が高くなるほど、すなわち $d$ が2.5cm、1.25cmと小さくなるほど強度が低下する傾向を示し、さらに、 $\phi_a$ の値が大きくなるほど圧縮強度が低下する傾向にあると報告している。

本研究では、モルタル ( $d/\phi_a = 9\sim 30$ ) およびコンクリート ( $d/\phi_a = 1.5\sim 15$ ) 試験体のいずれの場合も、 $d/\phi_a$ 比に拘らず試験体寸法の増大とともに圧縮強度が増加し、また $\phi_a$ が大きくなるほど強度が低下する傾向を示した。すなわち、森田ら<sup>59)</sup>の実験結果と定性的に類似し、定量的にはより寸法効果が明瞭に現れている。

ここで、養生条件と試験時の試験体の乾湿条件は、セメントの水和反応と硬化コンクリートの乾燥状態に関わる要因であり、その影響の程度は試験体の寸法によって大きく異なるものと考えられる。本実験では、相対湿度が $75\pm 10\%$ と低く、乾燥の影響により寸法効果がより明瞭に現れたものと考えられる。

(2) 最大圧縮応力時のひずみ

図3および図4に、それぞれ角柱体および円柱体の最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) に及ぼす試験体寸法の影響を示す。これらの図から、以下の3点を指摘できる。

i) 角柱体および円柱体の最大圧縮応力時のひずみの寸法効果は、圧縮強度の場合と同様に極めて類似している。図3によれば、 $b=4.5\sim 9.7$ cmの範囲では、 $\epsilon_m$ の値は試験体寸法の増大とともに増加するが、 $b=9.7\sim 15$ cmの範囲では、ほぼ一定となる。また、同様な傾向が図4においても見られる。

ii) 試験体寸法が同一の場合、コンクリートの  $\epsilon_m$ の値は、 $\phi_a$ の値の増大に伴って減少する。

iii) モルタルの  $\epsilon_m$ の値は、試験体寸法の増大に伴って増大する。

森田ら<sup>59)</sup>は、同一調合のコンクリート ( $\phi_a=2.5、5、$ または10mm) で比較した場合、 $\epsilon_m$ の値に及ぼす試験体寸法 ( $d=1.25\sim 15$ cm) の影響はあまり見られないと報告している。また、 $d/\phi_a$ の比を5の一定としたマイクロコンクリート ( $d=1.25\sim 15$ cm) の場合、 $\epsilon_m$ の値は、試験体寸法の増大とともに小さくなることも報告している。本研究では、 $b/\phi_a=4.5\sim 5.0$ および $b/\phi_a=8.3\sim 10$ としたマイクロコンクリートの  $\epsilon_m$ の値に関して顕著な寸法効果は見られなかった (図7(a)または(c)参照)。

(3) 応力-ひずみ曲線

図5は、コンクリートの応力 ( $\sigma$ ) -ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす試験体寸法の影響を示した一例である。図によれば、試験体寸法の増大とともに初期剛性および圧縮強度が増大し、軟化域の負勾配が急になる。Bazant<sup>60)</sup>は、試験体寸法が大きいほど応力下降域の勾配が急となり、脆性的に破壊すると指摘しており、本実験結果の傾向と同様である。軟化域のおよそ  $\epsilon = (3\sim 4) \times 10^{-3}$  のひずみ域において、応力-ひずみ曲線が収束する傾向が見られる。この傾向は、水セメント比 $W/C$ 、すなわち圧縮強度の異なるコンクリートの応力-ひずみ曲線に見られる傾向と同様である。本研究の範囲では、他の場合にもほぼ同様な結果が得られた。

図6は、コンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす粗骨材の最大寸法  $\phi_a$ の影響を示した一例である。図によれば、 $\phi_a$ の値の増加に伴い、圧縮強度および圧縮強度

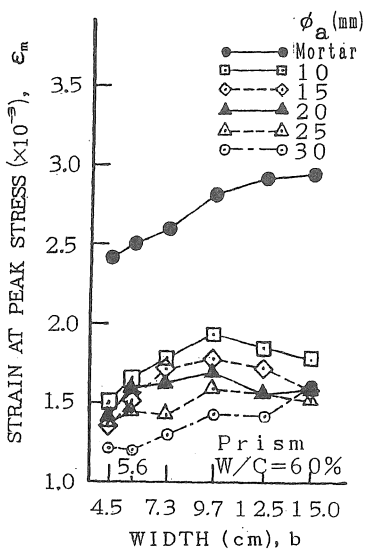


図3 最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) と試験体寸法 ( $b$ ) の関係 (角柱体)

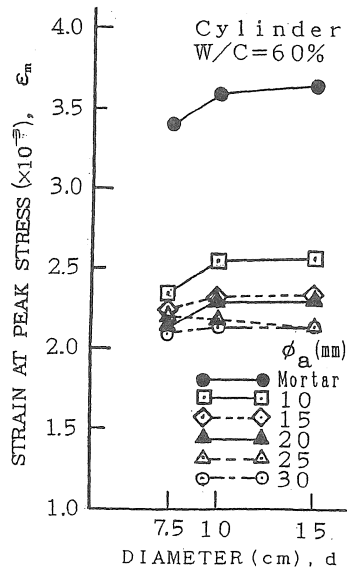


図4 最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) と試験体の直径 ( $d$ ) の関係 (円柱体)

時のひずみは減少し、軟化域の負勾配は若干緩やかになる。本研究の範囲では、他の場合にも、ほぼ同様な結果が得られた。

図7 (a) ~ (c) は、ほぼ等しい  $b/\phi_a$  比を有するコンクリートの応力-ひずみ曲線を比較したものである。図によれば、 $b$  または  $\phi_a$  の値の減少、すなわち、寸法の縮小に伴い、コンクリートの圧縮強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降域はより延性的となることが分かる。したがって、本実験時のように比較的乾燥した条件下で空中養生したコンクリートでは、たとえ、試験体寸法に応じて骨材径を縮小したマイクロコンクリートを用いても、小型試験体から得られる応力-ひずみ曲線は、実部材のコンクリートの挙動よりも強度が小さく、より延性的になることが予想される。

4 コンファインドコンクリートの一軸圧縮実験

4.1. 実験方法

(1) 実験の概要

表3に、コンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要を示す。実験要因として帯筋比、試験体の高さ-辺長比、

試験体寸法および養生条件の相違を取り上げた。図8および図9に、試験体の寸法と帯筋の配置を示す。帯筋はすべて口型とし、帯筋の中心間距離は角柱体の断面の一边  $b$  の0.8倍とした。また、帯筋のピッチを一定に保つために、コンクリートの断面積に比べて十分に小さい断面積の鉄線 ( $\phi 2.7\text{mm}$ ) を帯筋の四隅に縦方向に配置して結束した。RC梁の曲げ試験<sup>16)</sup> に用いた梁部材の曲げ圧縮部に関わる要因を考慮して、角柱体の断面の一边を梁幅  $b$  と等しく取り、帯筋間隔は梁のあばら筋に対応するように  $b/4$ 、 $b/2$ 、 $b$  の3種類とした。RC梁には、

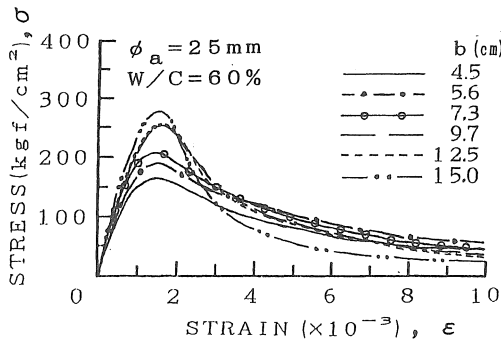
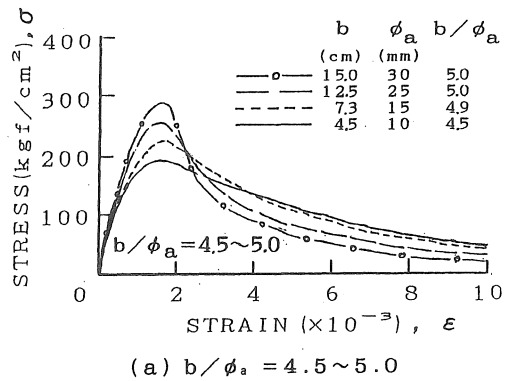


図5 応力 ( $\sigma$ ) -ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす試験体寸法 ( $b$ ) の影響 ( $\phi_a = 25\text{mm}$  の角柱体)

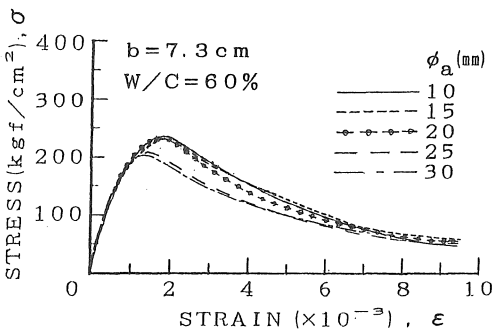
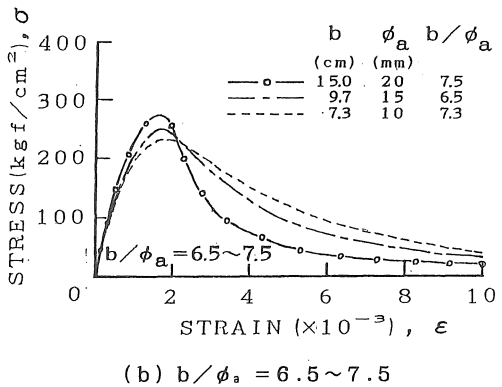


図6 応力 ( $\sigma$ ) -ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす骨材の最大寸法 ( $\phi_a$ ) の影響 ( $b = 7.3\text{cm}$  の角柱体)

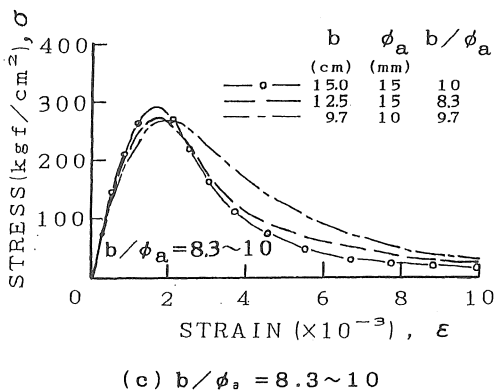


図7 ほぼ等しい  $b/\phi_a$  比を有する角柱体の応力 ( $\sigma$ ) -ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線の寸法効果

曲率測定用の変位計を取り付けるためネジ鋼棒を埋め込んだ。今回の実験でも、これらの梁の曲げ圧縮部を模擬するため図9のように、角柱体に $\phi 6\text{mm}$ ネジ鋼棒( $b=7.3\text{cm}$ シリーズでは、 $\phi 4\text{mm}$ )を、間隔 $b$ ごとに配置した。また、帯筋および鋼棒を配置しない試験体(Plain)も製作した。帯筋径は、帯筋間隔 $S$ が辺長 $b$ と等しい角柱体で、帯筋比が約0.3%となるように選んだ。角柱体は横打ちとし、高さ $H$ と幅 $b$ の比( $H/b$ )は2とした。試験体の個数は、各要因ごとに2体、合計80体である。

(2) 試験体の製作および養生方法

コンクリートの製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(5mm未満)と川砂利(5~25mm)を使用した。水セメント比は55%、単位水量は $180\text{kg}/\text{m}^3$ 、およびスランプは15cmとした。コンクリートの混練には容量600 $\ell$ のスミス式ミキサを使用し、混練は6バッチに分けて行った。コンクリートの打設および締固め方法は、前節のプレーンコンクリートの実験と同様とした。水中養生した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コンクリートシリンダーの平均圧縮強度は $402\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、各バッチの平均値の強度差の最大値は $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。表4に、使用した帯筋の力学特性を示す。なお、表中には帯筋の拘束指標( $\sigma_y \cdot A_s / A_c$ )も併示した。この値より、断面が $12.5 \times 12.5\text{cm}$ の角柱体

表3 コンファインドコンクリート角柱体の一軸圧縮実験の概要

試験体寸法		帯筋		主筋	養生条件
断面: $b \times b$ (cm)	高さ: $H$ $H/b=2$ (cm)	鉄筋径 (mm)	間隔 $S$	鉄筋径 (mm)	
7.3×7.3	14.5	$\phi 3.2$	$b/4$	2.7	空中
9.7×9.7	19.4	$\phi 3.9$	$b/2$		
12.5×12.5	24.9	$\phi 4.9$	$b$		水中
15.0×15.0	30.0	$\phi 5.7$	Plain		
20.0×20.0	40.0	$\phi 8.0$			

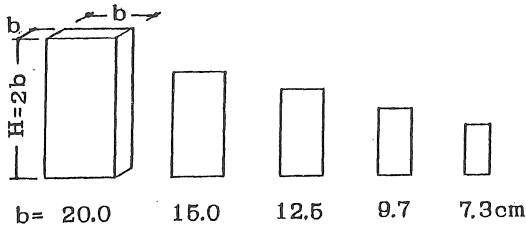


図8 コンファインドコンクリート角柱体の寸法

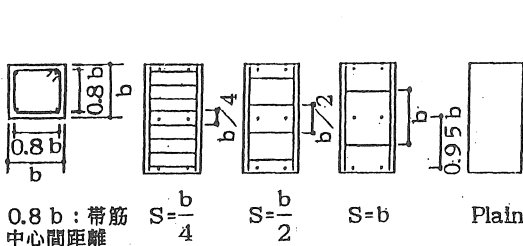


図9 帯筋の配置

(帯筋に $\phi 4.9\text{mm}$ 鉄筋を使用)は、他の寸法の試験体に比べて拘束力が若干小さくなることが予想される。試験体は、先に報告した乾燥状態で空中養生した実験結果と比較するために、試験体の半数は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生とし、残りの半数は恒温恒湿空中養生(材齢8週までは温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $90 \pm 10\%$ 、その後16週間は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $85 \pm 5\%$ )とし、材齢24週で圧縮試験を行った。

(3) 載荷および測定方法

図10に、角柱体のひずみの測定方法を示す。角柱体の圧縮ひずみの測定域( $l_0$ )は、試験体の高さ中央部の $1.8b$ の領域とした。加圧板の寸法は試験体の断面寸法と同一とし、厚さは試験体の断面の一边 $b$ の $1/4$ 以上のもので使用した。載荷には、最大容量200tのアクチュエータを使用した。応力上昇域において最大応力の $2/3$ の時点から荷重変動をフィードバック信号として用いた制御方法を併用して、毎分約 $1 \times 10^{-3}$ のひずみ速度で、試験体の中央部 $1.8b$ 区間の縦ひずみが $15 \times 10^{-3}$ に至るまで継続載荷した。

4.2 実験結果とその考察

(1) 圧縮強度

以下の考察では、応力下降域を含むすべての領域において、耐荷力をかぶりコンクリートを含めた全断面積で除した値を”応力”と定義する。主筋の断面積は、コンクリート断面積に比して十分に小さいものとみなし、主筋の軸方向耐荷力の寄与分は無視する。

図11(a)および(b)に、コンファインドコンクリートの圧縮強度( $F_c$ )と試験体寸法の関係に及ぼす養生条件の影響を、帯筋のピッチ( $S$ )別に示す。図11

表4 帯筋の力学的性質

種類	実測直径 (mm)	降伏点: $\sigma_y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	引張強さ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	伸び率 (%)	$\sigma_y \cdot A_s / A_c$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
$\phi 3.2$	3.19	2420	3430	29.2	6.37
$\phi 3.9$	3.90	2280	3350	40.9	5.04
$\phi 4.9$	4.98	1940	3070	41.6	4.19
$\phi 5.7$	5.93	2980	3890	31.5	6.34
$\phi 8.0$	7.96	2650	3530	32.5	5.71

[註]  $A_s$ : 帯筋の断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $A_c$ : 帯筋で囲まれたコアコンクリートの断面積 ( $\text{cm}^2$ )

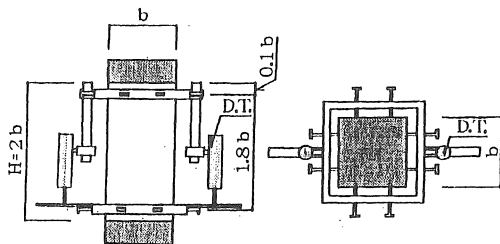
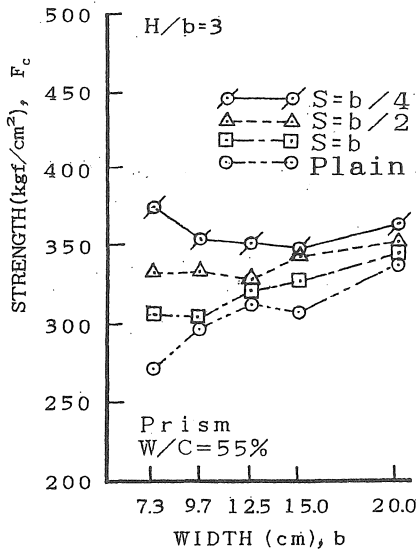
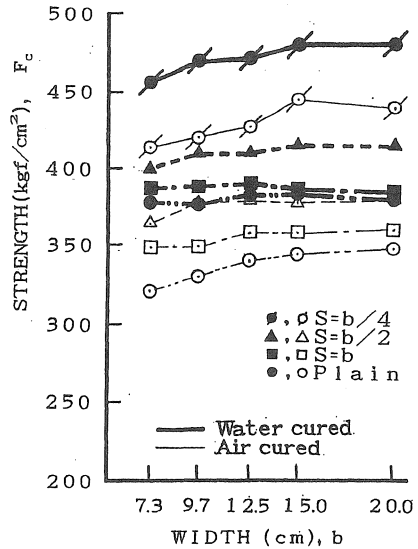


図10 ひずみの測定方法



(a) 実験室内空中養生 (H/b=3, RH=60±20%)<sup>16)</sup>



(b) 本実験 (H/b=2)

図1 1 圧縮強度 ( $F_c$ ) と試験体寸法 (b) の関係に及ぼす養生条件の影響

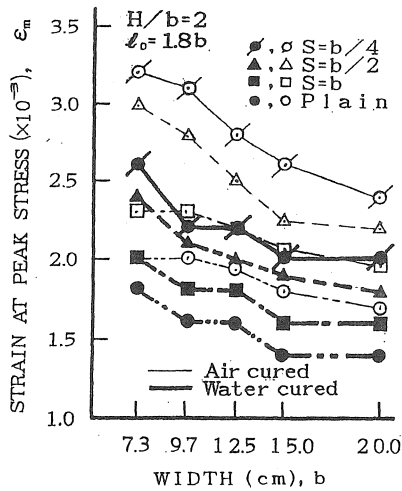


図1 2 最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) と試験体寸法の関係に及ぼす養生条件の影響 (H/b=2,  $l_0=1.8b$ )

(a) は、さきに報告<sup>16)</sup> した実験室内のヤード (相対湿度  $60 \pm 20\%$  と変動) で空中養生した場合の実験データを示したものである。同図によれば、プレーンコンクリートやあばら筋のピッチの粗いもの ( $S=b$ ) では、試験体寸法が小さくなると若干低い強度を示す。しかし、この寸法効果は、あばら筋のピッチの減少に伴ってほとんど見られなくなる。一方、本実験結果を示した図1 1 (b) によれば、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $90 \pm 10\%$  の恒温室内で空中養生されたコンクリートでは、試験体の縮小化とともに強度が低下する寸法効果は僅かに認められる程度である。これは、図1 1 (a) に示した比較的乾燥した

実験室内のヤードで空中養生したコンクリートと比較すると、初期強度の発現時における水分の散逸が少ないためと考えられる。水中養生試験体では、強度の寸法効果は極めて小さい。

ここで、養生時の水分の散逸による水和反応の阻害に起因する寸法効果をより詳しくみるために、相対湿度  $75 \pm 10\%$  の恒温室内で養生された  $\phi_a=25\text{mm}$  シリーズのコンクリート (図1参照) と水中および相対湿度  $90 \pm 10\%$  の恒温室内で養生されたプレーンコンクリート ( $\phi_a=25\text{mm}$ 、図1 1 (b) 参照) を比較する。両者で材齢、H/b 比および水セメント比はやや異なるものの、比較的乾燥した恒温室内で養生されたコンクリート (図1参照) では、寸法効果が顕著であるのに対して、湿空養生されたコンクリート (図1 1 (b) 参照) では、試験体の縮小化とともに強度が低下する寸法効果は僅かに認められる程度である。すなわち、水分の散逸の程度が大きくなるような養生を行ったコンクリートほど、水和反応の阻害に起因する寸法効果が大きくなるといえよう。

(2) 最大圧縮応力時のひずみ

図1 2に、コンファインドコンクリートの最大圧縮応力時のひずみ ( $\epsilon_m$ ) と試験体寸法の関係に及ぼす養生条件の影響を、帯筋のピッチ (S) 別に示す。プレーンコンクリートの場合にすでに指摘されてきている傾向<sup>61), 62)</sup> と同様に、コンファインドコンクリートにおいても恒温室内で空中養生されたものは、水中養生のものよりも  $\epsilon_m$  の値が大きい。また、その増大量は一般に試験体寸法が小さくなるほど、また帯筋のピッチが密になるほど大きくなっている。なお、本報の恒温恒湿空中養生



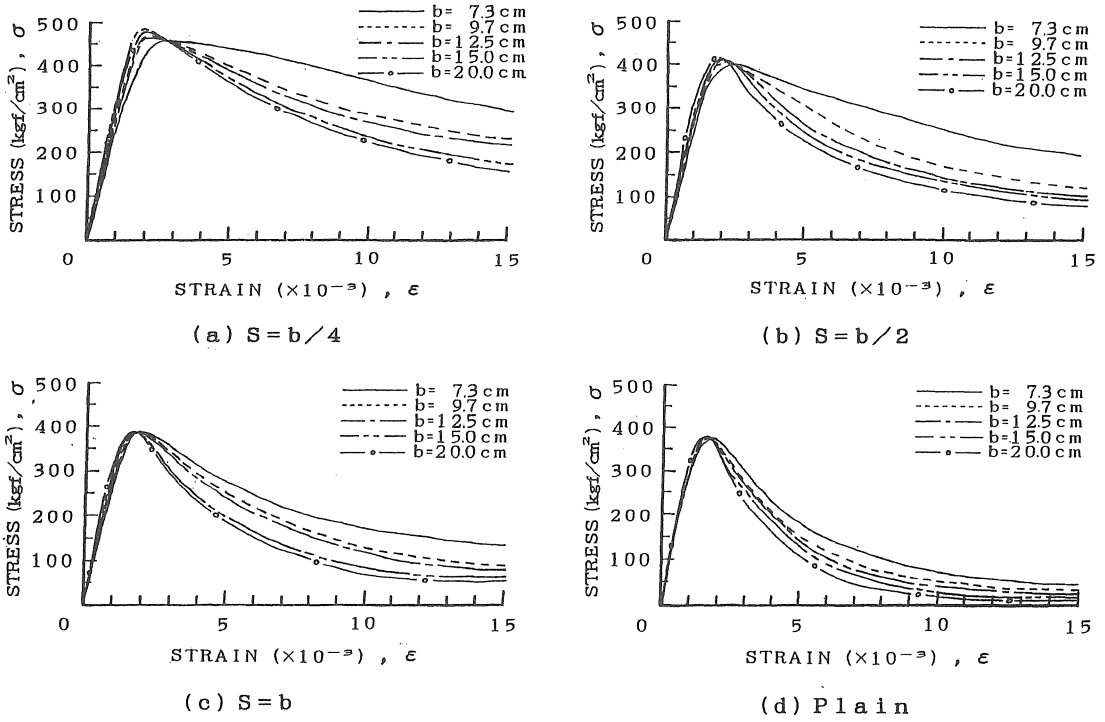


図13 応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす試験体寸法 ( $b$ ) の影響 ( $H/b=2$ , 水中養生)

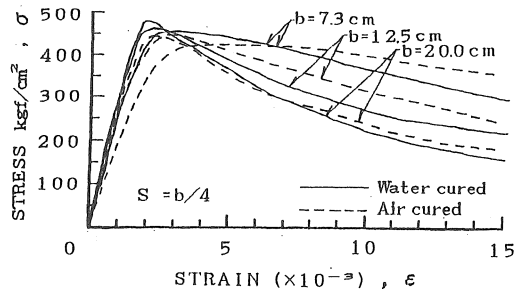


図14 応力 ( $\sigma$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 曲線に及ぼす養生条件の影響 ( $H/b=2$ ,  $S=b/4$ )

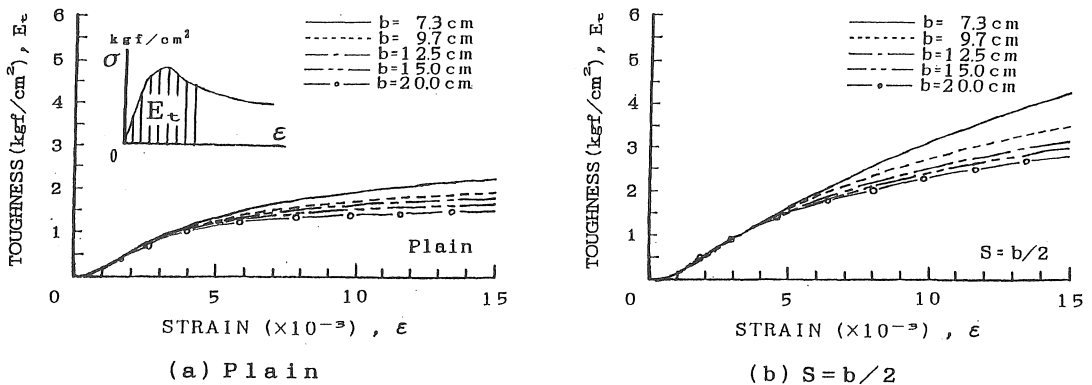


図15 コンクリートの吸収エネルギー ( $E_t$ ) とひずみ ( $\epsilon$ ) の関係に及ぼす試験体寸法 ( $b$ ) の影響 ( $H/b=2$ , 水中養生)

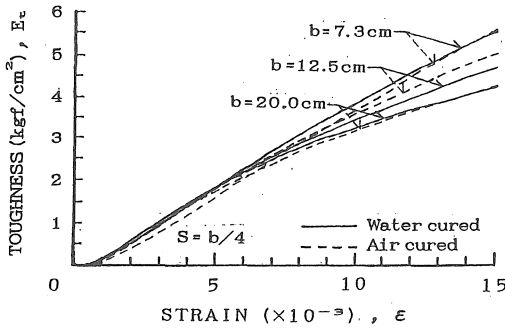


図16 吸収エネルギー ( $E_t$ ) とひずみ ( $\epsilon$ ) の関係の寸法効果に及ぼす養生条件の影響 ( $H/b=2, S=b/4$ )

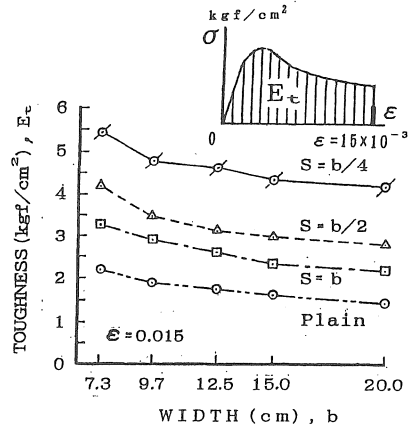


図17  $\epsilon=0.015$  時の吸収エネルギー ( $E_t$ ) と試験体寸法 ( $b$ ) の関係に及ぼす帯筋ピッチの影響 ( $H/b=2, 水中養生$ )

試験体の最大応力時のひずみの寸法効果は、さきに報告<sup>16)</sup>した実験室内で空中養生したコンファインドコンクリートのそれとほぼ等しい。また、圧縮強度の場合とは異なり、水中養生されたコンクリートでも試験体寸法が小さいほど  $\epsilon_n$  の値がやや大きくなる傾向も示している。

(3) 応力-ひずみ曲線

1) 帯筋のピッチの影響

図13(a)~(d)に、水中養生したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす試験体寸法の影響を、帯筋のピッチ ( $S$ ) 別に示す。これらの図によれば、一般に帯筋のピッチに拘らず、試験体寸法が大きなものほど応力下降域の形状は脆性的となる。この傾向は、さきに報告<sup>22)</sup>した空中養生したコンクリートのそれとほぼ同じである。しかし、図13によれば、 $b=7.3\text{cm}$  の場合を除いて、水中養生時の応力-ひずみ曲線間の相違はさほど大きくなく、とくに帯筋ピッチが  $S=b/2$  と  $b/4$  のように比較的密な場合には、試験体断面の辺長  $b$  が  $10\sim 20\text{cm}$  の範囲における寸法効果は、極めて小さいといえる。

2) 養生条件の影響

図14は、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を示した一例である。一般に、恒温室内で空中養生されたコンクリートは、水中養生されたものよりも圧縮強度が小さく、応力下降域が延性的である。

(4) エネルギー吸収能

コンクリートのエネルギー吸収能に及ぼす試験体寸法の影響<sup>63), 64)</sup>を定量的に論じるため、ここでは、ひずみの増加に伴うタフネス (応力-ひずみ曲線下の面積) の変動について調べる。

図15(a)および(b)に、水中養生したコンファインドコンクリートのタフネス ( $E_t$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 関

係に及ぼす試験体寸法の影響を示す。これらの図によれば、タフネス曲線は  $\epsilon=4\times 10^{-3}$  付近から分岐しはじめ、ひずみの増加とともに、寸法効果が顕著になる。すなわち、帯筋のピッチに拘らず、試験体寸法が大きなものほどタフネスが小さくなる傾向を示す。

図16は、コンファインドコンクリートのタフネス ( $E_t$ ) - ひずみ ( $\epsilon$ ) 関係の寸法効果に及ぼす養生条件の影響を示した一例である。恒温室内で空中養生されたコンクリートのタフネスは、水中養生されたものとほぼ同じ値を示す。

図17に、縦ひずみが  $15\times 10^{-3}$  の時のタフネスに及ぼす試験体寸法の影響を、帯筋のピッチ ( $S$ ) 別に示す。図によれば、いずれの帯筋のピッチについても同様の寸法効果が見られる。すなわち、試験体寸法が大きなものほどタフネスが低下し、 $S$  が  $b/4$  以下の本実験の範囲では、 $b=20\text{cm}$  の試験体のタフネスは、 $7.3\text{cm}$  のものに比べて帯筋ピッチにかかわらず、およそ70~75%に低下する。

5. 結論

本研究では、まず、プレーンコンクリートの圧縮強度の寸法効果について取りまとめ、各種要因の位置づけを明らかにした。次に、プレーン並びにコンファインドコンクリートに関する一連の一軸圧縮実験を行い、これらのコンクリートについて圧縮強度のみならず、高ひずみ域に至るまでの圧縮応力-ひずみ曲線に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を明らかにした。なお、本実験では断面寸法の一辺  $b$  の範囲は、実験室レベルの試験体寸法 (プレーンコンクリート:  $b=4.5\sim 20\text{cm}$ , コンファインドコンクリート:  $b=7.3\sim 20\text{cm}$ ) での寸法効果について論じたものである。本研究の結果は、およそ次のようにま

とめられる。

1) 温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $75 \pm 10\%$ で6週間空中養生したマイクロコンクリート(粗骨材の最大寸法を試験体の寸法と比例させて縮小したコンクリート)の場合でも、実験によって得られる応力-ひずみ曲線は試験体寸法によって異なる。すなわち、試験体寸法の縮小、または粗骨材の最大寸法の減少によって圧縮強度は低下し、応力-ひずみ曲線の下降域は延性的となる。したがって、比較的乾燥した条件下で空中養生されたコンクリートでは、小型モデル試験体をたとえマイクロコンクリートで作成しても、小型試験体から得られる応力-ひずみ曲線は、実部材の挙動よりも強度が小さく、より延性的になると考えられる。

2) コンファインドコンクリートの圧縮強度の寸法効果は、養生時の湿度が低いほど顕著に現れ、試験体の縮小化とともに強度が低下する。しかし、水中養生の試験体では、このような寸法効果は無視できるほど小さい。

3) コンファインドコンクリートの最大応力時のひずみ( $\varepsilon_m$ )は、試験体寸法が小さいほど大きく、その傾向は帯筋のピッチが密になるほど著しい。また、 $\varepsilon_m$ の値は水中養生時に比べて、空中養生時には10~40%ほど増大する。

4) コンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線は、試験体寸法が大きくなるほど脆性的な形状となる。また、恒温室で空中養生されたコンクリートでは、水中養生のものよりも応力下降域が延性的となる。

5) 以上のような圧縮強度、最大応力時のひずみおよび応力-ひずみ曲線における試験体の形状・寸法および養生の影響は、定性的には従来ブレンコンクリートについて指摘されている傾向<sup>2), 16)</sup>と一致する。コンファインドコンクリートの場合も、ブレンコンクリートの延長線上にあるといえるが、定量的にはこれらの要因の影響の程度は帯筋のピッチに依存して変動する。

6) 恒温室で空中養生されたコンクリートのタフネス-ひずみ関係は、水中養生されたものとはほぼ同じ値を示す。縦ひずみが $15 \times 10^{-3}$ の時のタフネスは、試験体寸法が大きくなるほど低下する。すなわち、帯筋ピッチが $b/4$ 以下の本実験の範囲では、帯筋ピッチにかかわらず $b=20\text{cm}$ の試験体のタフネスは、7.3cmのものに比べておよそ70~75%に低下する。

【謝辞】 本研究に際し、ご助力を得た名古屋大学助教授・水野英二先生に深謝致します。また、本実験に協力していただいた愛知工業大学院生・坂東浩貴君並びに卒業生・釜谷充哉君、小長谷一樹君、杉浦展浩君、鈴木義男君、多田茂君、山田登君、良知文啓君の諸君に感謝します。

#### 【参考文献】

- 1) S.Koike and S.Hatanaka: Size Effect on Stress-Strain Behavior of Plain and Confined Concrete Under Compression, Proceedings of the Japan Congress on Materials Research, Vol. 33, pp.55-61, 1990.4
- 2) 小池狭千朗・畑中重光: 横拘束コンクリートの圧縮特性に及ぼす供試体の形状・寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12, No.2, pp.707-712, 1990
- 3) Blanks, R.F. and McNamara, C.C.: Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Journal of ACI, Vol.31, No.3, pp.280-303, 1935. 1-2
- 4) Neville, A.M.: The Influence of Size of Concrete Test Cubes on Mean Strength and Structural Deviation, Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.23, pp.101-110, 1956.8
- 5) Sangha, C.H. and Dhir, R.K.: Strength and Complete Stress-Strain Relationships for Concrete Tested in Uniaxial Compression under Different Test Conditions, Matériaux et Constructions, Vol.5, No.30, pp.361-370, 1972
- 6) 谷川恭雄・山田和夫: コンクリートの圧縮強度の寸法効果について、日本建築学会論文報告集、No.262, pp.13-21, 1977.12
- 7) Sabnis, G.H. and Mirza, S.M.: Size Effects in Model Concretes, Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division, Vol.105, No.ST 6, pp.1007-1020, 1979.6
- 8) 塩屋俊幸・長谷川俊昭: コンクリート構造物の寸法効果、コンクリート工学、Vol.30, No.8, pp.5-15, 1992.8
- 9) Department of the Interior: Cement and Concrete Investigations—Mass Concrete Investigations, US Bureau of Reclamation, Boulder Canyon Project, Final Report, Part VII, Bulletin 4, 1965
  - 10) 香田伸次・田中博幸・坂田昇・山崎廣行: 中心圧縮力を受ける超高強度コンクリート柱の寸法効果と横拘束効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C分冊(構造II)、pp.751-752, 1989.10
    - 11) 小池狭千朗・畑中重光: コンファインド超高強度コンクリートの圧縮特性の形状・寸法効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No.2, pp.949-954, 1992
      - 12) 小阪鶴夫・小池狭千朗: 正負繰返し荷重を受ける軽量RCばりのせん断耐力と期性に及ぼすあばら筋比と主筋比の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1365-1366, 1973.10
      - 13) 六車照・渡辺史夫・福伊佐男・滝井政宏: 横拘束コンクリートによるコンクリート系部材のじん性改善—片持ち梁によるじん性改善効果の確認、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.2529-2530, 1974.10
      - 14) 小池狭千朗: 正負繰返し荷重を受けるRCばりの力学特性におよぼす供試体寸法の影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1361-1362, 1976.10
      - 15) 小池狭千朗: 純曲げを受けるRC梁の曲げ塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、日本建築学会東海支部研究報告集、Vol.29, pp.197-200, 1991.2
      - 16) 小池狭千朗・畑中重光・奥谷伸幸: 鉄筋コンクリート梁の塑性変形性能に及ぼす供試体寸法の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11-2, pp.27-32, 1989
      - 17) 鈴木野夫・中塚信・吉田晴彦: 円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性、材料、第34巻、第376号、pp.33-39, 1985
      - 18) 大石哲哉・嶋津孝之・荒木秀夫・張冠華: 実大無筋コンクリート柱の耐力と変形能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15-2, pp.513-518, 1993.6
      - 19) Lejano, B.A., Adachi, H., Shirai, N., Nakanishi, M., Tanaka, K. and Yagenji, A.: Size Effect on Stress-Strain Characteristics of High Strength Reinforced Concrete Columns Confined by Lateral Reinforcement, JCI International Workshop on Size Effect in Concrete Structures, Preprints, Sendai, Japan, pp.75-86, 1993.10
      - 20) 破壊力学の応用研究委員会報告書: コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状、コンクリート構造の破壊に関する

- る共通解析および実験、日本コンクリート工学協会、215pp., 1993.10
- 2 1) Gonnerman, H.F. : Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete, Proceedings of ASTM, Vol.25, Part II, pp.237-250, 1925
- 2 2) Koike, S., Okufuji, K. and Kobayashi, N. : Size Effect on Inelastic Deformation Behavior and Expression for Stress-Strain Curves of Concrete, Cement Association of Japan, Review of the 41th General Meeting / Technical Session, pp.244-247, 1987
- 2 3) Roll, F. : Materials for Structural Models, Proceedings of the ASCE, Journal of Structural Division, Vol.94, No.ST 6, pp.1353-1381, 1968.6
- 2 4) Hughes, B.P. and Chapman, G.P. : The Deformation of Concrete and Microconcrete in Compression and Tension with Particular Reference to Aggregate Size, Magazine of Concrete Research, Vol.18, No.54, pp.19-24, 1968.3
- 2 5) Pons, G., Ramoda, S.A. and Maso, J.C. : Influence of the Loading History on Fracture Mechanics Parameters of Microconcrete: Effects of Low-Frequency Cyclic Loading, ACI Material Journal, No.85-H37, pp.341-346, 1988.9-10
- 2 6) Alaml, Z.Y., and Ferguson, P.M. : Accuracy of Models Used in Research on Reinforced Concrete, Journal of ACI, Vol.60, No.11, pp.1643-1664, 1963.11
- 2 7) 山田稔・河村廣・谷明敏・原野昇・中川博・真船敏和：コンクリートのスケールイフェクトに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.193-194, 1985.10
- 2 8) 杉木六郎・福沢公夫：コンクリート構造物の模型実験、コンクリートジャーナル、Vol.6, No.6, pp.74-79, 1968.6
- 2 9) 石塚秀敏・森田司郎・藤井栄・小松勇二郎：マイクロコンクリートについての基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.467-468, 1984.10
- 3 0) Blanks, R.F. and McNamara, C.C. : Mass Concrete Tests in Large Cylinders, Journal of ACI, Vol.31, No.3, pp.280-303, 1935.1-2
- 3 1) Gyengo, T. : Effect of Type of Test Specimen and Gradation of Aggregate on Compressive Strength of Concrete, Journal of ACI, Vol.34, pp.269-282, 1938
- 3 2) Hollis, G.R. : The Effect of Shape and Size on the Compressive Strength of Concrete Test Specimens, Honours Project Report, University of Manchester, 1960
- 3 3) Rajendran, S. : Effect of the Size of the Specimen on the Compressive Strength of Concrete, RILEM Bulletin, No.26, 1965.3
- 3 4) Malhotra, N.M. : Are 4x8 Inch Concrete Cylinders as good as 6x12 Inch Cylinder for Quality Control of Concrete?, Journal of ACI, Vol.73-1, pp.33-36, 1976.1
- 3 5) Kim, J.K. and Eo, S.H. : Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks, Magazine of Concrete Research, Vol.42, No.153, pp.233-238, 1990.12
- 3 6) Tucker, J.J. : Statistical Theory of the Effect of Dimensions and of Method of Loading upon the Modulus of Rupture of Beams, Proceedings of the ASTM, Vol.41, pp.1072-1088, 1941. : Effect of Dimensions of Specimens upon the Precision of Strength Data, Proceedings of the ASTM, Vol.45, pp.952-959, 1945
- 3 7) 堀 素夫：確率過程論によるコンクリートの曲げ破壊強度の解析、応用物理、Vol.27, No.11, pp.690-698, 1958
- 3 8) 永松静也：コンクリートなどの破断現象についての確率過程理論による考察、日本建築学会論文報告集、No.200, pp.1-8, 1972
- 3 9) Hobbs, D.W. : The Compressive Strength of Concrete : A Statistical Approach to Failure, Magazine of Concrete Research, Vol.24, No.80, pp.127-138, 1972.9
- 4 0) Kamesuwar Rao, C.V.S. and Swamy, R.N. : A Statistical Theory for the Strength of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.4, No.4, pp.669-681, 1974.7
- 4 1) 三橋博三：確率過程論に基づいたコンクリートの破壊現象の基礎的統一理論、東北大学学位論文、198pp., 1976
- 4 2) 和泉正哲・三橋博三：確率過程論に基づいたコンクリートの破壊理論、Part III、日本建築学会論文報告集、第310号、pp.1-9, 1984.12
- 4 3) Tanigawa, Y., Yamada, K. and Yokoyama, Y. : Statistical Aspect of Strength of Cement Paste, Proceedings of the Japan Congress on Materials Research, Vol.20, pp.184-189, 1977.3
- 4 4) 谷川恭雄・山田和夫・小阪義夫：セメントペーストおよびモルタルの強度の確率統計性質に関する一考察、材料、Vol.26, No.290, pp.73-78, 1977.11
- 4 5) 文献20) 破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.253-256
- 4 6) 三橋博三・金 鏡根・桐越一紀・成田 健：コンクリートの破壊力学特性と寸法効果に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.4, No.2, pp.57-67, 1993.7
- 4 7) Powers, T.C. : Concrete Studies at the Bull. Run Dam, City of Portland, Oregon, Journal of ACI, Vol.25, pp.388-431, 1929
- 4 8) Collier, I.I. : Variation of Compressive Strength of Concrete within the Water-Cement Ratio Law, Proceedings of the ASTM, Vol.30, Part 2, pp.731-750, 1930
- 4 9) Walker, S. and Bloem, D.L. : Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete, Journal of ACI, Vol.57, No.3, pp.283-298, 1960.9
- 5 0) Cordon, W.A. and Gillespie, H.A. : Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete, Journal of ACI, Vol.60, No.8, pp.1029-1050, 1963.8
- 5 1) 笠井芳夫：供試体寸法とコンクリートの圧縮強度ならびに強度のバラツキとの関係、日本建築学会論文報告集、No.100, pp.1-12, 1964.7
- 5 2) 文献20) 破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.258-259
- 5 3) コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.374-381, 1981.11
- 5 4) Neville, A.M. : Properties of Concrete, Pitman(Canada), 216pp., 1963 (後藤幸正・尾坂芳夫監訳：コンクリートの特性、技報堂、211pp., 1979)
- 5 5) ACI Committee 446 : Fracture Mechanics of Concrete : Concept, Models and Determination of Material Properties, Fracture Mechanics of Concrete Structure, Bazant, Z.P. (ed.), Elsevier Applied Science, pp.1-140, 1992
- 5 6) Hirza, M.S. : Size Effects in Plain and Structural Concrete, Small Scale Modelling of Concrete Structures, Noor, F. A. and Boswell, L.F. (ed.), Elsevier Applied Science. pp.41-88, 1992
- 5 7) 文献20) 破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.258-259
- 5 8) 文献20) 破壊力学の応用研究委員会報告書、pp.227-228
- 5 9) 森田司郎・藤井栄・石塚秀敏・中西浩：鉄筋コンクリートの縮小モデル化に伴う寸法効果(その1、コンクリートの縮小化と寸法効果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.477-478, 1985.10
- 6 0) Bazant, Z.P. : Instability, Ductility, and Size Effect in Stress-Softening Concrete, Proceedings of the ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.102, No.EM2, pp.331-344, 1976.4
- 6 1) Popovics, S. : A Review of Stress-Strain Relationships for Concrete, Journal of ACI, Vol.67-3, pp.243-248, 1970.3
- 6 2) 谷川恭雄・畑中重光・小阪義夫：高ひずみ領域に至るまでのコンクリートの応力変ひずみ曲線の表示式、セメント技術年報、Vol.34, pp.242-245, 1980
- 6 3) 畑中重光・水野英二・小池狭千朗・谷川恭雄：供試体寸法の異なるコンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.65-73, 1994.1
- 6 4) 水野英二・畑中重光・伊藤誠：コンクリートの圧縮構成関係に関するエネルギー論的考察とコンクリート充填鋼管柱解析への応用、コンクリート工学論文集、Vol.5, No.1, pp.75-87, 1994.1