

## 論文 コンクリートの一軸圧縮応力 ひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響

疋田 次峰<sup>\*1</sup>・倉本 洋<sup>\*2</sup>・田中 仁史<sup>\*3</sup>・中治 弘行<sup>\*4</sup>

要旨: コンクリートの応力 ひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響を明らかにするため, 無筋角柱および角型横補強筋を用いて横拘束した角柱について一軸圧縮試験を行い, 断面寸法の増大に伴う最大応力の低減を確認した。さらに, 応力 ひずみ関係に及ぼす諸要因の影響を明らかにした。

キーワード: 寸法効果, 一軸圧縮試験, 最大耐力, 応力 ひずみ関係

## 1. はじめに

現在日本では, 超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の建設が盛んであり, その耐震設計においては高軸力を受ける大断面柱部材の地震時力学的挙動の正確な把握が急務となっている。しかしながら, 横補強筋の拘束効果に関する既往の研究の多くは, 通常の試験機能力の限界から, 縮尺 1/5 程度といった小型模型試験体を使った準静的試験が行われるのが一般的である。これらの小型模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。

本研究では, 無筋角柱(以下, 無筋タイプと略称)および角型横補強筋を用いて横拘束した角柱(以下, 横拘束タイプと略称)について一軸圧縮実験を行い, これらの応力 ひずみ関係に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を検討する。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験概要

試験体の概要および使用コンクリートの特性をそれぞれ表 1 および表 2 に示す。実験要因には試験体寸法, コンクリート強度, 横補強筋体積比および横補強筋降伏強度を選択した。

図 1 に試験体形状・寸法の例を示す。試験体は,

無筋タイプが 21 体および横拘束タイプが 14 体(横補強筋体積比で 1.0%:5 体, 1.5%:3 体, 2.0%:3 体および 2.5%:3 体)の計 35 体である。なお, 試験体には主筋を用いていないが, 角型横補強筋を配筋する際に組み立て筋として 6mm の丸鋼を隅角部に配した。また, 試験体の製作に際し, コンクリートの打設はすべて縦打ちとした。

## 2.2 载荷および測定方法

実験は圧縮能力 10MN (剛性:  $8.4 \times 10^{-8}$ mm/N) の大型構造物試験機を用いて行った。試験体の支持条件は, 上端がピン支持(球座)で下端が固定となっており, 圧盤と試験体は無収縮グラウト材を介して密着させ, 圧縮応力が均等に作用するように配慮したが, 試験体と圧盤の間の摩擦を取り除く処理は行っていない。実験は変位制御とし, 各試験体の载荷条件がほぼ同一となるように, ひずみ速度を 4~5micro/秒とした。無筋タイプ試験体では, 静的単調载荷を基本としたが, 同一断面寸法で複数体あるシリーズでは, 2 体目以降の試験体で弾性域において静的繰返し载荷を行った。横拘束タイプ試験体では, 無筋タイプで得られた圧縮応力 ひずみ曲線の履歴を考慮して弾性域・ひずみ軟化領域で静的繰返し载荷を行った。圧縮荷重は, 試験機上部に取り付けられたロードセルによって測定した。図 2 にひずみ測定方法の例を示す。測定区

\*1 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻 (正会員)

\*2 豊橋技術科学大学工学教育国際協力研究センター 助教授・工博 (正会員)

\*3 京都大学防災研究所 教授・Ph.D. (正会員)

\*4 豊橋技術科学大学建設工学系 助手・工博 (正会員)

間は、試験体の上部から下部とし、検長は表 1 に示すように試験体断面寸法の 1.4 倍～1.6 倍である。変位は、試験体両側に設置された最大検長 25mm の変位計によって測定した。なお、試験体の変位は 2 本の変位計の平均とした。

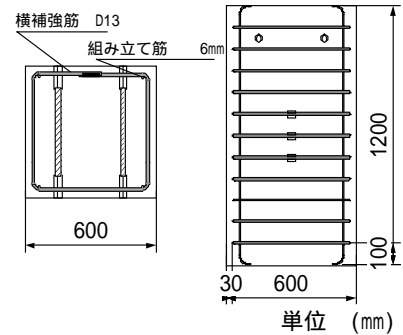


図 1 試験体形状・寸法例(600mm 角 1.0%タイプ)

### 3. 実験結果

#### 3.1. 無筋タイプについて

無筋タイプの代表的な最終破壊状況を、写真 1 に示す。写真より、公称コンクリート強度 20MPa においては、試験体寸法の違いによって、破壊状況が異なっており、600mm 角試験体では、破壊位置は上部に集中し、194mm 角試験体では全体にわたって破壊している。また、公称コンクリート強度 50MPa 試験体(400mm 角および 194mm 角)では、ひび割れは試験体全体で発生し、破壊状況の違いは見られない。

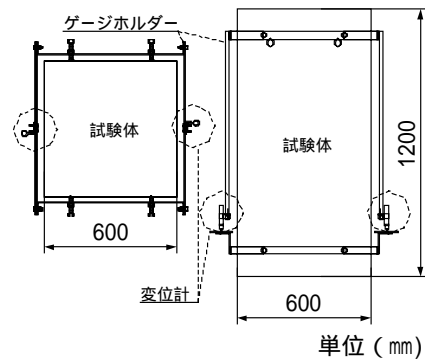


図 2 ひずみ測定方法の例(600mm 角)

図 3 は、無筋タイプにおける載荷方法の違い

表 1 試験体の概要

| 試験体寸法<br>(mm)    | 検長<br>(mm) | 公称<br>コンクリート強度<br>(MPa) | 100mm標準<br>シリンダー強度<br>(MPa) | 横補強筋 |               |             |             |            | 試験体数 |
|------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|------|---------------|-------------|-------------|------------|------|
|                  |            |                         |                             | 呼び径  | 降伏強度<br>(MPa) | ピッチ<br>(mm) | かぶり<br>(mm) | 体積比<br>(%) |      |
| 194 × 194 × 388  | 300        | 20                      | 32.4                        | -    | -             | -           | -           | -          | 3    |
|                  |            |                         |                             | D6   | 396           | 77          | 10          | 0.99       | 1    |
|                  |            | 50                      | 64.0                        | -    | -             | -           | -           | -          | 3    |
|                  |            |                         |                             | D6   | 396           | 77          | 10          | 0.99       | 1    |
|                  |            |                         | 61.2                        | -    | -             | -           | -           | -          | 1    |
|                  |            |                         |                             | D10  | 1069          | 100         | 10          | 1.67       | 1    |
| 75               | -          | -                       | -                           | -    | 2.23          | 1           |             |            |      |
| 60               | -          | -                       | -                           | -    | 2.78          | 1           |             |            |      |
| 244 × 244 × 488  | 375        | 50                      | 61.2                        | -    | -             | -           | -           | 1          |      |
| 294 × 294 × 588  | 450        | 50                      | 61.2                        | D10  | 1069          | 80          | 12.5        | 1.65       | 1    |
|                  |            |                         |                             |      |               | 60          |             | 2.20       | 1    |
|                  |            |                         |                             |      |               | 50          |             | 2.64       | 1    |
| 400 × 400 × 800  | 600        | 20                      | 32.4                        | D10  | 373           | 80          | 20          | 1.01       | 1    |
|                  |            |                         |                             |      |               | 50          |             | 2.20       | 1    |
|                  |            |                         |                             |      |               | 40          |             | 2.70       | 1    |
| 500 × 500 × 1000 | 750        | 20                      | 31.2                        | -    | -             | -           | -           | 3          |      |
|                  |            |                         | 20.3                        | -    | -             | -           | -           | 3          |      |
| 600 × 600 × 1200 | 1000       | 20                      | 29.1                        | -    | -             | -           | -           | 2          |      |
|                  |            |                         | D13                         | 364  | 100           | 30          | 0.96        | 1          |      |

\* 体積比は横補強筋中心間距離により計算した

表 2 使用コンクリートの特性

| 公称強度<br>(MPa) | シリン<br>ダー強<br>度 | 粗骨材  |     |     |      |      | 粗骨材<br>最大寸<br>法 | スラ<br>ンプ |
|---------------|-----------------|------|-----|-----|------|------|-----------------|----------|
|               |                 | セメント | 水   | 細   | 粗骨   | 混和   |                 |          |
| 20            | 20.3            | 284  | 170 | 847 | 1002 | 0.57 | 20              | 120      |
|               | 29.1            |      |     |     |      |      |                 |          |
|               | 32.4            |      |     |     |      |      |                 |          |
|               | 31.2            |      |     |     |      |      |                 |          |
| 50            | 64.0            | 446  | 165 | 738 | 989  | 3.12 | 20              | 120      |
|               | 61.2            | 454  | 168 | 827 | 974  | 3.41 |                 |          |

による包絡線形状を比較した一例である。同図より、載荷方法の違いによる包絡線形状への影響は見られない。よって、本研究では載荷方法の影響を考慮しないものとして考察を行った。

図4は、公称コンクリート強度別に無筋タイプの応力 ひずみ関係を各試験体断面寸法で比較したものである。公称コンクリート強度20MPaの試験体では、寸法の増大に伴う初期剛性および圧縮強度の減少が明確に現れている。一方、公称コンクリート強度50MPaの試験体では、最大強度に関して明確な寸法効果の影響は認められないが、400mm角と294mm角の試験体の最大強度は194mm角の試験体のものに対して若干小さくなっている。さらに、50MPaの試験体に関しては、寸法が大きいほどひずみ軟化域での応力の低下が大きくなる傾向が認められる。この傾向は小池等による研究結果<sup>5)</sup>と同様のものである。

### 3.2. 横拘束タイプについて

横拘束タイプの代表的な最終破壊状況を、写



(a) 600mm角(20MPa) (b) 194mm角(20MPa)



(c) 400mm角(50MPa) (d) 194mm角(50MPa)

写真1 無筋タイプの最終破壊状況

真2に示す。写真より、横拘束タイプでは、無筋タイプで見られたような、試験体による破壊状況の違いは見られず、いずれの試験体も破壊領域が検長全域に亘っている。なお、横拘束タイプの試験体では中央部3本の横補強筋のひずみを測定しているが、ひずみ推移状況は類似しており、補強筋位置による明確な差異は認められなかった。

図5は、1.0%の横拘束タイプの応力 ひずみ関係について断面寸法の影響を比較したもので

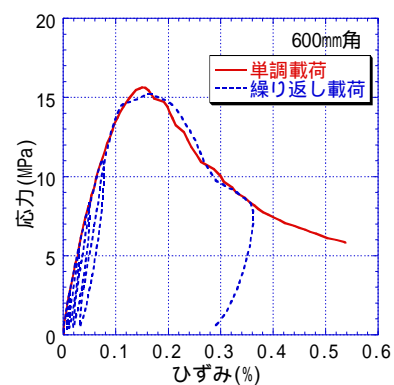


図3 包絡線形状の比較(600mm角)

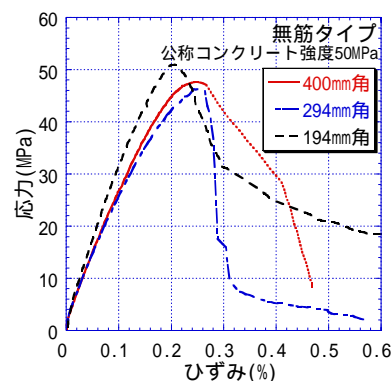
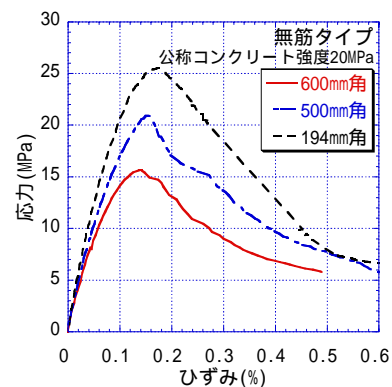


図4 応力 ひずみ関係(無筋タイプ)

ある。1.0%タイプにおいても無筋タイプと同様に、寸法の増大に伴う初期剛性および圧縮強度の減少が認められる。また、194mm 角試験体は400mm 角試験体に比して、ひずみ軟化領域における靱性改善効果が小さい結果となった。これは配筋計画の際、各試験体寸法の横補強筋とコアコンクリートの体積比を、600mm 角試験体を基準として行ったため、寸法が小さくなるにしたがって横補強筋間隔が広がり、有効に横拘束されない領域が大きくなり、十分な横拘束効果が得られなかったためと推測される。

図6は、1.5%、2.0%および2.5%の横拘束タイプの応力 ひずみ関係について断面寸法の影響を比較したものである。同図より無筋タイプおよび1.0%タイプ公称コンクリート強度20MPaの試験体で見られたような、寸法の増大による最大応力の低下は見られない。この理由として、ひび割れ発生後の横拘束効果により応力の再分配がなされたことが挙げられる。つまり、他の



(a) 600mm 角(20MPa) (b) 194mm 角(20MPa)



(c) 400mm 角(50MPa) (d) 194mm 角(50MPa)

写真2 横拘束タイプの最終破壊状況

横拘束タイプに比して横補強筋を多く配した横拘束効果が大きいものでは、寸法効果の影響が少なくなったと推察される。

### 3.3. 横拘束効果について

図7は、194mm 角および294mm 角の試験体の応力 ひずみ関係を横補強筋体積比で比較したものである。同図より、横補強筋体積比の増加に伴うひずみ軟化領域における靱性改善効果が認められる。また、その効果は試験体の寸法によらず、類似した傾向を示した。

## 4. 寸法効果に関する考察

### 4.1. 無筋タイプについて

図8は、100mm 標準シリンダー強度(以下、シリンダー強度と略称)に対する無筋タイプの最大強度の比率(以下、相対強度比と呼称)と試験体断面寸法の関係を示したものである。図中には、寸法効果に関する既往の提案式である Neville 式<sup>2)</sup>および張式<sup>3)</sup>も併せて示している。なお、Neville 式におけるシリンダー強度は150mm 角柱供試体を使用しているため、L'Hermite 式<sup>4)</sup>を用いて本実験に適用できるように変換した

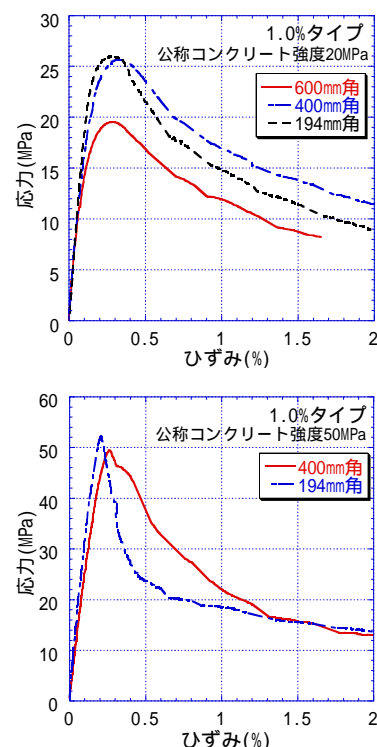


図5 応力 ひずみ関係(横拘束タイプ)

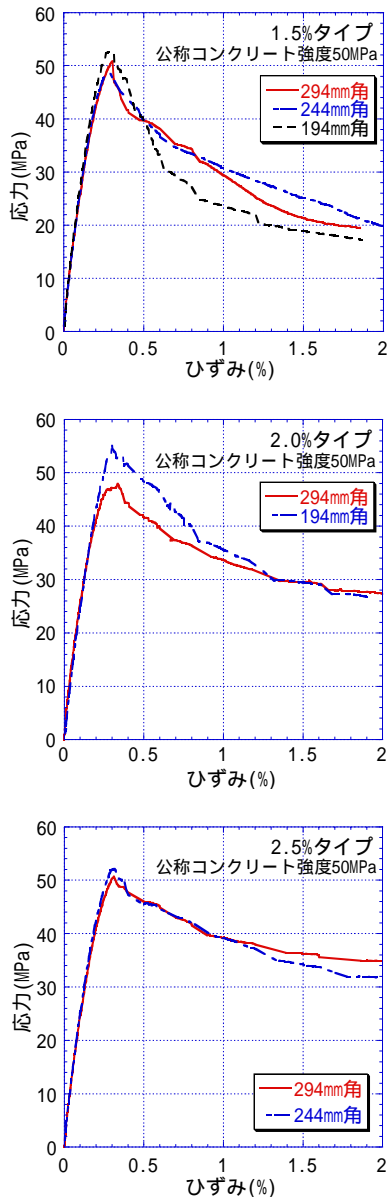


図6 応力 ひずみ関係（断面寸法の影響比較）

（修正 Neville 式と表記）。

同図から試験体の寸法が最大強度に及ぼす影響は明らかであり、特に 600mm 角試験体では、55%程度にまで低下している。また、修正 Neville 式並びに張式による算定結果と実験結果の間には、試験体断面寸法が大きくなるにしたがって強度が低下するという同様の傾向が認められるものの、相関は認められない。特に、修正 Neville 式では、コンクリート強度が高いほどシリンダー強度に対する低下率が大きくなる式となっているが、実験結果はその逆の傾向を示している。この理由としては、コンクリートの縦方向打設

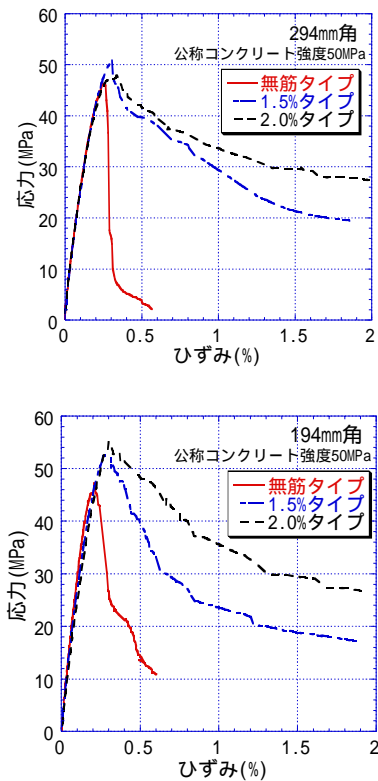


図7 応力 ひずみ関係（横補強筋量の影響比較）

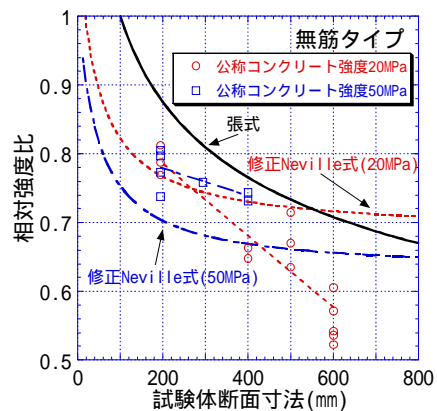


図8 相対強度比と試験断面寸法の関係（無筋タイプ）

による骨材の沈降の影響が挙げられる。すなわち、断面寸法が大きな試験体ほど、試験体高さが大きくなるため、試験体下部に骨材が多く分布し、相対的に強度が小さい試験体上部で最大強度が決定されたものと考えられる。これについては、写真 1 に示した破壊状況からも容易に推察される。

また、コンクリート強度の低い試験体では、高いものに比して水セメント比が大きいため、



骨材の沈降が顕著であったと考えられる。この傾向については、張等<sup>3)</sup>の実験でも確認されている。張等の実験では、試験体高さ 750mm の区間でコア抜きしたシリンダーの圧縮実験を行い、試験体上部で採取したシリンダー強度が試験体下部のものに対して約 0.8 倍であったという結果が得られている。

#### 4.2. 横拘束タイプについて

図 9 は、横拘束タイプに対する相対強度比と試験体断面寸法の関係を示したものである。

同図より、無筋タイプと同様に、横拘束タイプにおいても試験体の寸法が最大強度に及ぼす影響が認められ、特に試験体の寸法の最も大きい 600mm 角試験体で顕著に確認できる。しかしながら、その影響は無筋タイプに比して若干小さい。また、1.0%の横拘束タイプの 194mm 角と 400mm 角の試験体を比較すると、無筋タイプで見られたようなコンクリート強度の違いによる最大強度への影響は認められない。無補強タイプでは写真 1 の(a)および(b)で見られるように上部に縦ひび割れが発生し、そのひび割れの拡幅によって最大強度が決定されたものと推察されるが、横拘束タイプでは試験体上部における縦ひび割れの顕著な拡幅は認められず、写真 2 に見られるように試験体中央部が破壊している。すなわち、横拘束タイプでは前述した骨材の沈降による試験体上部でのひび割れの拡幅が横補強筋によって抑制され、結果として耐力が上昇

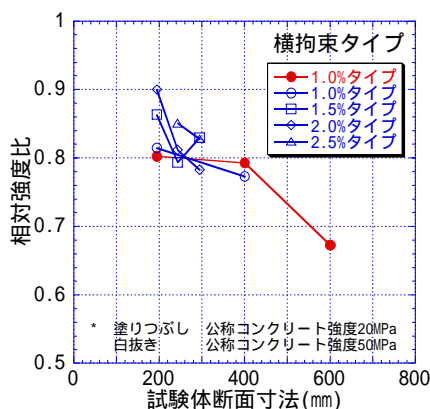


図 9 相対強度比と試験断面寸法の関係 (横拘束) タイプ

し、少なくとも 400mm 角の試験体までは寸法効果の影響が顕著には表れなかったものと推測される。

なお、同一断面について横補強筋量を比較すると、横拘束筋量が増加するに伴い相対強度比が大きくなる。すなわち、寸法効果の影響が少なくなる傾向が認められる。

#### 6. まとめ

無筋角柱および角型横補強筋を用いて横拘束した角柱について一軸圧縮試験を行い、応力ひずみ関係に及ぼす試験体寸法と諸要因の影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 無筋タイプ試験体では、試験体の寸法の増大に伴う最大応力の低下率は、既往の予測式に比して大きく、600mm 角試験体では 55%程度にまで低下した。また、コンクリート強度が低いほど寸法効果の影響が大きく、従来の予測式と逆の結果が得られた。
- (2) 横拘束タイプ試験体では、横補強筋量の増加に伴い、寸法効果の影響は少なくなる。また、コンクリート強度の違いによる、最大強度への寸法効果の影響は顕著ではなかった。
- (3) 本研究の実験結果は、特に無筋タイプにおいてコンクリートの縦方向打設による影響が支配的であった。

#### 参考文献

- 1) H. Tanaka, T. Hikida, and H. Nakaji: The Scale Effects on the Reinforced Concrete Columns with High Axial Load, Proceedings of The 3rd Japan-Korea-Taiwan Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, SEEBUS 2001, pp.147-158, 2001
- 2) A.M. Neville: A General Relation for Strengths of Concrete Specimens of Different Shapes and Sizes, J. ACI, Vol.63, No.10, pp.1095-1109, (Oct. 1966).
- 3) 張 冠華 「実大コンクリート柱の圧縮耐力と変形特性に関する研究」, 広島大学修士学位請求論文, 1997.3
- 4) R.L'Hermite: Idees Actuelles sur la Technologie du Beton, Documentation Technique du Batiment et des Travaux Publics, (Paris, 1955).
- 5) 小池 狭千朗 「高強度域を含む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」, 日本建築学会構造系論文集, 第 538 号, pp.131-138, 2000.12