

## 引張試験法および試験体寸法の相違が コンクリートの動的引張強度に及ぼす影響

Effects of testing method and specimen size on dynamic tensile strength of concrete

江田 智\*, 別府万寿博\*\*, 大野友則\*\*\*, 藤掛一典\*\*\*\*, 佐藤紘志\*\*\*\*\*

Satoshi EDA, Masuhiro BEPPU, Tomonori OHNO, Kazunori FUJIKAKE and Hiroshi SATO

\* 防衛大学校理工学研究科前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\* 博(工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\* 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\* 博(工) 防衛大学校講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*\* 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

This study is to investigate the effects of testing method and size effect on the dynamic tensile strength of concrete. Thus the results from both the direct tensile test and the splitting tensile test for cylindrical concrete specimens were examined. To find the effects of strain-rates and specimen size on the tensile strength, four types of cylindrical concrete specimens with different heights and diameters were tested under rapid loadings.

*Key Words:* direct tensile test, splitting tensile test, rapid load, strain-rate effect, size effect

### 1. はじめに

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物に発生するひび割れ、付着・せん断破壊、裏面剥離などの現象はコンクリートの引張および圧縮特性が重要な因子として挙げられる<sup>1)</sup>。したがって、これらの現象を解明するためには、ひずみ速度がコンクリートの引張・圧縮強度特性に及ぼす影響を十分に把握することが重要であると考え、圧縮強度特性に関しては、急速荷重を受けるコンクリートの力学特性に関する研究報告<sup>2),3),4),5)</sup>も多く、動的圧縮特性を反映した構成モデルを提案する段階に至っている。これに対して、動的荷重を受けるコンクリートの引張特性に関する研究は非常に少ない。

一般に、引張試験法には、直接一軸引張試験、割裂試験および曲げ試験などがある。コンクリートの直接一軸引張試験は、供試体の形状決定や引張力を伝達するための治具の作製、圧縮試験装置を利用する場合には引張荷重ができる別の装置を組み込む必要がある、など試験の実施には特別の工夫が必要である。これに対して割裂試験は、圧縮試験に用いるのと同じ円柱供試体および圧縮試験装置をそのまま使用できるので、直接一軸引張試験に比べると準備や実施が格段に容易であることが特徴である。ただし、この試験法は、加圧板と供試体接触部分の処置が結果に影響を及ぼす等の問題点もある。一般に、静的割裂試験により

求められた引張強度(以下、割裂強度という)は、直接一軸引張試験による引張強度とほぼ等しいと言われている。しかしながら、急速荷重のような動的荷重を受ける場合については、両試験法による結果の比較は行われていない。ところで、既往の静的一軸引張試験結果によれば、コンクリートの引張強度は試験に用いる供試体の形状や寸法に影響(いわゆる、寸法効果)を受けることが指摘されている。したがって、動的荷重を受ける場合の引張強度特性を把握するためには、ひずみ速度効果とともに供試体の寸法効果がコンクリートの引張特性に及ぼす影響を調べることも重要である。この観点から、著者らは、高さ寸法(75~225mm)が異なる円柱供試体(直径 71.4mm)を用いて急速一軸引張試験を行い、寸法効果およびひずみ速度効果が引張特性(引張強度、引張弾性係数など)に及ぼす影響について調べている<sup>6)</sup>。その結果、供試体の高さ寸法の違いは、①いずれのひずみ速度レベルにおいても引張強度の大きさに影響を及ぼす、②弾性係数に及ぼす影響は無視できる、③円柱供試体の高さ(H)と直径(D)の比(H/D)が2以上で引張強度はほぼ一定値となる、④ひずみ速度の影響である動的強度増加率(あるひずみ速度における引張強度と静的引張荷重に対する引張強度の比)は寸法の影響を受けない、ことを明らかにしている。一方、動的割裂試験における寸法効果やひずみ速度効果については未検討であり、不明な点が多い。さらに、引張強度の把握を目的

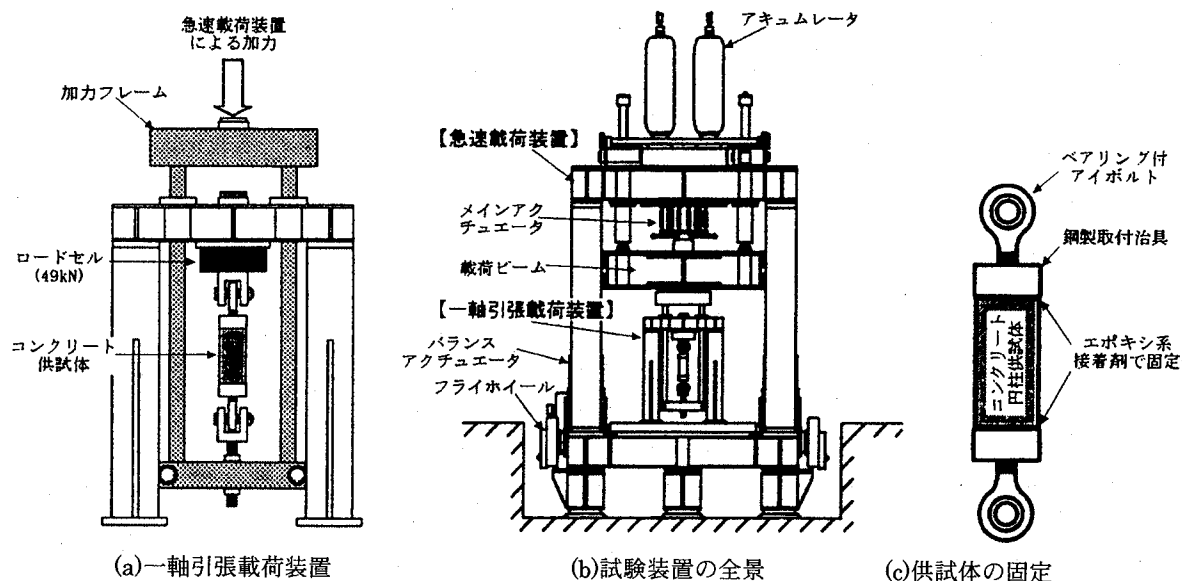


図-1 一軸引張装置の概要

とする場合には、できるだけ簡便な試験を行う方が都合が良いと考える。本研究は、急速割裂試験における寸法効果とひずみ速度効果が引張強度に及ぼす影響を調べるとともに、急速直接一軸引張試験による結果との比較から、両者の適合性について検討するものである。試験では、供試体の寸法（直径、長さ）および荷重速度をパラメータとした急速割裂試験を行い、急速割裂試験による引張強度と急速直接一軸引張強度との適合性、供試体の寸法やひずみ速度が割裂強度に与える影響について調べている。

## 2. 試験の概要

### 2.1 急速直接一軸引張試験

#### (1) 試験装置

急速直接一軸引張試験装置の概要を図-1 に示す。この装置は、図-1(a)に示す一軸引張荷重装置を既存の急速荷重装置に取り付けたものである。一軸引張荷重装置は、加力フレームを下方方向に移動させることで、固定枠の上端のロードセルに取り付けた円柱供試体に一軸引張応力を加える方式である。急速荷重装置は、本体フレーム、490kN 荷重ジャッキ、バランスアクチュエータ、アキュムレータ、油圧ポンプユニットおよび荷重制御装置等から構成されている。

供試体は、図-1(c)に示すように両端をエポキシ系の接着剤で鋼製の取付治具（直径：75mm、厚さ：35mm）に接着固定した。さらに、供試体に軸方向の荷重のみを作用させるため、上下にベアリング付アイボルトを取り付け、

このアイボルトを介して一軸引張荷重装置に固定した。

#### (2) 試験パラメータ

試験パラメータは、コンクリート円柱供試体の高さ寸法および荷重速度である。コンクリート円柱供試体は、直径を一定（71.4mm）とし、高さが 75mm、100mm、150mm および 225mm の 4 種類である。荷重速度は静的、低速、中速および高速の 4 段階とした。

#### (3) 供試体と計測項目

コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>）を使用し、細骨材には山砂（岩井寺産、密度 2.54 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 2.45%）を、粗骨材には最大粗骨材寸法 20mm 以下の川砂利（密度 2.64 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.82%）を使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。試験体は打設後 1 日で脱型、水中養生を 7 日間行なった。その後は実験室内にて気中養生を行った。打設から 18 日目に、コンクリート円柱供試体の両端を研磨して所定の高さに調整した。試験期間中の圧縮強度の平均値は 32.10MPa であった。

計測項目は、コンクリート円柱供試体に作用する荷重およびひずみである。供試体に作用する荷重は、図-1(a)に示すように急速一軸引張荷重装置の固定側に取り付けられたロードセル（最大荷重 490kN、最大応答周波数 11k Hz）で計測した。ポリエステルゲージ（60mm）用いてひずみを計測した。ただし、コンクリート円柱供試体のど

表-1 一軸引張試験に用いたコンクリートの配合

| 粗骨材最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 粗骨材率<br>s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |                            |
|-----------------|--------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|----------------------------|
|                 |              |            |                      |                    | 水<br>W                   | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | 混和剤<br>(L/m <sup>3</sup> ) |
| 20              | 8.0          | 4.0        | 65                   | 40.0               | 181                      | 278       | 702      | 1095     | 0.70                       |

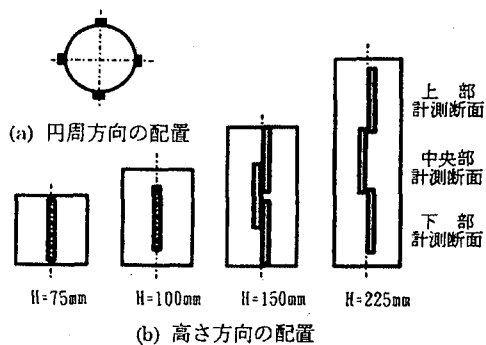
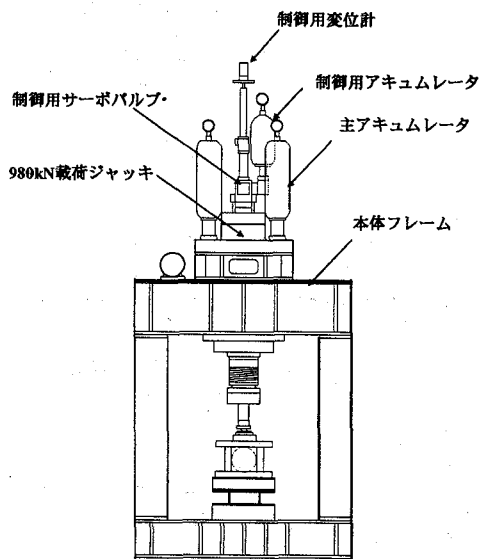
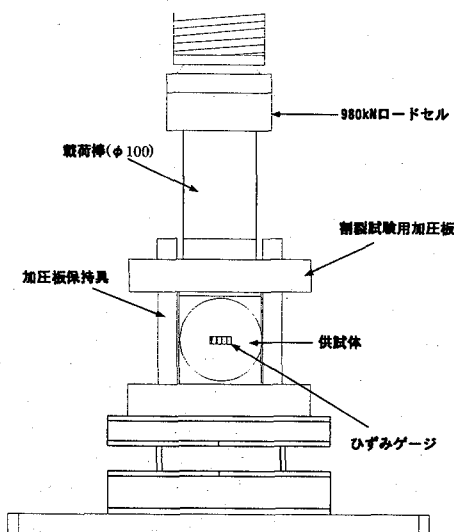


図-2 ひずみゲージの配置



(a) 高速度急速載荷装置



(b) 割裂試験用治具

図-3 割裂試験の概要

表-2 割裂試験パラメータの一覧

| 試験ケース | 直径<br>mm | 載荷速度 |    |    |    | 試験数 |
|-------|----------|------|----|----|----|-----|
|       |          | 静的   | 低速 | 中速 | 高速 |     |
| N150S | 150      | ○    |    |    |    | 3   |
| N150L | 150      |      | ○  |    |    | 3   |
| N150M | 150      |      |    | ○  |    | 3   |
| N150H | 150      |      |    |    | ○  | 3   |
| N100S | 100      | ○    |    |    |    | 3   |
| N100L | 100      |      | ○  |    |    | 3   |
| N100M | 100      |      |    | ○  |    | 3   |
| N100H | 100      |      |    |    | ○  | 3   |
| N75S  | 75       | ○    |    |    |    | 3   |
| N75L  | 75       |      | ○  |    |    | 3   |
| N75M  | 75       |      |    | ○  |    | 3   |
| N75H  | 75       |      |    |    | ○  | 3   |
| N50S  | 50       | ○    |    |    |    | 3   |
| N50L  | 50       |      | ○  |    |    | 3   |
| N50M  | 50       |      |    | ○  |    | 3   |
| N50H  | 50       |      |    |    | ○  | 3   |

の部分に破断面が形成されても、その付近のひずみの計測ができるように図-2 のようにひずみゲージを配置した。

## 2.2 急速割裂試験

### (1) 試験装置および試験パラメータ

試験は、図-3(a)に示す最大載荷力 980kN、最大載荷速度 4 m/sec の能力を有するサーボ制御式急速載荷装置を用いた。本載荷装置は、本体フレーム、980kN 載荷ジャッキ、制御用サーボバルブ、アキュムレータ、油圧ポンプユニットおよび載荷制御装置等から構成されている。載荷ジャッキは、メインアクチュエータ、バランスアクチュエータおよび加圧制御用アクチュエータの 3 つから構成されている。これに図-3(b)の割裂試験用治具を取り付けて行った。

### (2) 試験パラメータ

試験パラメータは、表-2 に示すように円柱供試体の寸法（直径、長さ）および載荷速度である。コンクリート円柱供試体の直径は、50mm、75mm、100mm および 150mm の 4 種類であり、供試体の長さは直径の 2 倍（それぞれ 100、150、200、300mm）である。載荷速度については、

表-3 割裂試験に用いたコンクリートの配合

| 粗骨材最大寸法<br>(mm) | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 粗骨材率<br>s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |                            |
|-----------------|--------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------------|-----------|----------|----------|----------------------------|
|                 |              |            |                      |                    | 水<br>W                   | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | 混和剤<br>(L/m <sup>3</sup> ) |
| 10              | 19           | 4.0        | 55                   | 54.4               | 205                      | 373       | 894      | 748      | 0.64                       |

表-4 割裂試験と直接一軸引張試験結果の比較

| 試験法      | 試験体寸法               | 載荷区分 | 静的圧縮強度 (MPa)<br>$f'_{cs}$ | ひずみ速度 (1/sec) | 引張強度 (MPa)<br>$f_t$ | 平均引張強度 (MPa)  | 引張強度増加率<br>$f_t/f_s$ | 平均引張強度増加率 | 無次元化強度<br>$f_t/f'_{cs}$ | 平均無次元化強度 |
|----------|---------------------|------|---------------------------|---------------|---------------------|---------------|----------------------|-----------|-------------------------|----------|
| 直接一軸引張試験 | 直径71.4mm<br>高さ150mm | 静的   | 32.1                      | 1.65E-06      | 2.58                | 2.65<br>$f_s$ | 0.97                 | 1.00      | 0.080                   | 0.08     |
|          |                     |      |                           | 1.41E-06      | 2.88                |               | 1.09                 |           | 0.090                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.53E-06      | 2.44                |               | 0.92                 |           | 0.076                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.99E-06      | 2.50                |               | 0.95                 |           | 0.078                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.00E-06      | 2.83                |               | 1.07                 |           | 0.088                   |          |
|          |                     | 低速   |                           | 2.40E-03      | 3.79                | 3.47          | 1.43                 | 1.31      | 0.118                   | 0.11     |
|          |                     |      |                           | 4.02E-03      | 3.22                |               | 1.22                 |           | 0.100                   |          |
|          |                     |      |                           | 3.15E-03      | 3.26                |               | 1.23                 |           | 0.101                   |          |
|          |                     |      |                           | 3.92E-03      | 3.42                |               | 1.29                 |           | 0.106                   |          |
|          |                     |      |                           | 3.17E-03      | 3.66                |               | 1.38                 |           | 0.114                   |          |
|          |                     | 中速   |                           | 1.56E-01      | 5.21                | 4.36          | 1.97                 | 1.65      | 0.162                   | 0.14     |
|          |                     |      |                           | 0.60E-01      | 3.90                |               | 1.47                 |           | 0.122                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.26E-01      | 4.15                |               | 1.57                 |           | 0.129                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.14E-01      | 4.55                |               | 1.72                 |           | 0.142                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.02E-01      | 3.99                |               | 1.51                 |           | 0.124                   |          |
|          |                     | 高速   |                           | 5.53E-01      | 8.25                | 8.04          | 3.12                 | 3.04      | 0.257                   | 0.25     |
|          |                     |      |                           | 6.50E-01      | 8.89                |               | 3.36                 |           | 0.277                   |          |
|          |                     |      |                           | 4.79E-01      | 8.04                |               | 3.04                 |           | 0.250                   |          |
|          |                     |      |                           | 3.89E-01      | 7.34                |               | 2.78                 |           | 0.229                   |          |
|          |                     |      |                           | 4.32E-01      | 7.68                |               | 2.90                 |           | 0.239                   |          |
| 割裂試験     | 直径150mm<br>長さ300mm  | 静的   |                           | 0.59E-06      | 3.33                | 3.33<br>$f_s$ | 1.00                 | 1.00      | 0.086                   | 0.09     |
|          |                     |      |                           | 0.69E-06      | 3.32                |               | 1.00                 |           | 0.086                   |          |
|          |                     |      |                           | 0.63E-06      | 3.33                |               | 1.00                 |           | 0.086                   |          |
|          |                     | 低速   |                           | 6.73E-03      | 4.10                | 4.46          | 1.23                 | 1.34      | 0.106                   | 0.12     |
|          |                     |      |                           | 7.26E-03      | 4.84                |               | 1.46                 |           | 0.126                   |          |
|          |                     |      |                           | 7.29E-03      | 4.43                |               | 1.33                 |           | 0.115                   |          |
|          |                     | 中速   |                           | 0.78E-01      | 4.77                | 4.71          | 1.43                 | 1.41      | 0.124                   | 0.12     |
|          |                     |      |                           | 0.66E-01      | 4.64                |               | 1.39                 |           | 0.120                   |          |
|          |                     |      |                           | 0.74E-01      | 4.74                |               | 1.42                 |           | 0.123                   |          |
|          |                     | 高速   |                           | 1.21E-01      | 5.40                | 5.65          | 1.62                 | 1.70      | 0.140                   | 0.15     |
|          |                     |      |                           | 1.00E-01      | 5.88                |               | 1.77                 |           | 0.152                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.14E-01      | 5.67                |               | 1.71                 |           | 0.147                   |          |
|          | 直径100mm<br>長さ200mm  | 静的   | 38.5                      | 1.36E-06      | 3.08                | 3.07<br>$f_s$ | 1.00                 | 1.00      | 0.080                   | 0.08     |
|          |                     |      |                           | 0.60E-06      | 3.08                |               | 1.00                 |           | 0.080                   |          |
|          |                     |      |                           | 0.47E-06      | 3.07                |               | 1.00                 |           | 0.080                   |          |
|          |                     | 低速   |                           | 9.23E-03      | 3.42                | 4.57          | 1.11                 | 1.49      | 0.089                   | 0.12     |
|          |                     |      |                           | 9.31E-03      | 4.98                |               | 1.62                 |           | 0.129                   |          |
|          |                     |      |                           | 9.18E-03      | 5.32                |               | 1.73                 |           | 0.138                   |          |
|          |                     | 中速   |                           | 1.19E-01      | 5.97                | 5.57          | 1.94                 | 1.81      | 0.155                   | 0.14     |
|          |                     |      |                           | 1.02E-01      | 5.31                |               | 1.73                 |           | 0.138                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.28E-01      | 5.43                |               | 1.77                 |           | 0.141                   |          |
|          |                     | 高速   |                           | 2.06E-01      | 6.08                | 5.99          | 1.98                 | 1.95      | 0.158                   | 0.16     |
|          |                     |      |                           | 2.05E+01      | 5.89                |               | 1.91                 |           | 0.153                   |          |
|          |                     |      |                           | 2.16E+01      | 6.02                |               | 1.96                 |           | 0.156                   |          |
|          | 直径75mm<br>長さ150mm   | 静的   |                           | 0.87E-06      | 3.16                | 3.47<br>$f_s$ | 0.91                 | 1.00      | 0.082                   | 0.09     |
|          |                     |      |                           | 0.78E-06      | 3.61                |               | 1.04                 |           | 0.094                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.22E-06      | 3.63                |               | 1.05                 |           | 0.094                   |          |
|          |                     | 低速   |                           | 23.4E-03      | 4.02                | 4.39          | 1.16                 | 1.27      | 0.104                   | 0.11     |
|          |                     |      |                           | 16.9E-03      | 4.19                |               | 1.21                 |           | 0.109                   |          |
|          |                     |      |                           | 22.5E-03      | 4.97                |               | 1.43                 |           | 0.129                   |          |
|          |                     | 中速   |                           | 1.03E-01      | 5.54                | 5.41          | 1.60                 | 1.56      | 0.144                   | 0.14     |
|          |                     |      |                           | 1.42E-01      | 5.68                |               | 1.64                 |           | 0.147                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.26E-01      | 5.02                |               | 1.45                 |           | 0.130                   |          |
|          |                     | 高速   |                           | 1.92E-01      | 8.62                | 6.88          | 2.48                 | 1.98      | 0.224                   | 0.18     |
|          |                     |      |                           | 1.98E-01      | 6.08                |               | 1.75                 |           | 0.158                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.76E-01      | 5.96                |               | 1.72                 |           | 0.155                   |          |
|          | 直径50mm<br>長さ100mm   | 静的   |                           | 0.38E-06      | 4.11                | 4.09<br>$f_s$ | 1.00                 | 1.00      | 0.107                   | 0.11     |
|          |                     |      |                           | 0.55E-06      | 3.76                |               | 0.92                 |           | 0.098                   |          |
|          |                     |      |                           | 0.42E-06      | 4.40                |               | 1.08                 |           | 0.114                   |          |
|          |                     | 低速   |                           | 18.0E-03      | 5.68                | 4.95          | 1.39                 | 1.21      | 0.147                   | 0.13     |
|          |                     |      |                           | 22.4E-06      | 4.56                |               | 1.11                 |           | 0.118                   |          |
|          |                     |      |                           | 28.3E-06      | 4.63                |               | 1.13                 |           | 0.120                   |          |
|          |                     | 中速   |                           | 1.86E-01      | 6.88                | 7.20          | 1.68                 | 1.76      | 0.179                   | 0.19     |
|          |                     |      |                           | 1.94E-01      | 6.98                |               | 1.71                 |           | 0.181                   |          |
|          |                     |      |                           | 1.83E-01      | 7.73                |               | 1.89                 |           | 0.201                   |          |
|          |                     | 高速   |                           | 2.22E-01      | 8.35                | 8.80          | 2.04                 | 2.15      | 0.217                   | 0.23     |
|          |                     |      |                           | 2.33E-01      | 8.15                |               | 1.99                 |           | 0.212                   |          |
|          |                     |      |                           | 2.20E-01      | 9.89                |               | 2.42                 |           | 0.257                   |          |

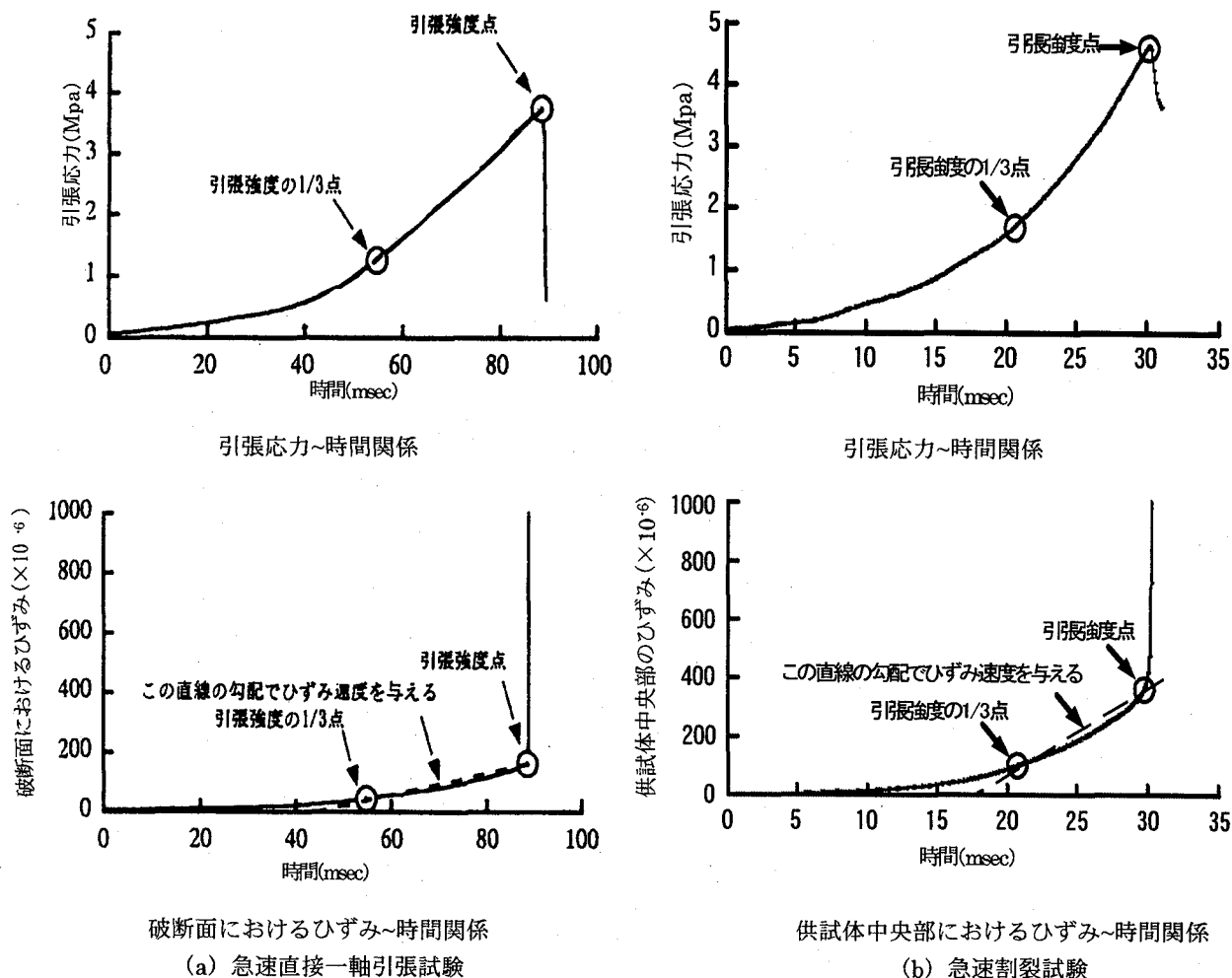


図 - 4 ひずみ速度の定義

静的载荷、低速载荷(0.1m/s)、中速载荷(1.0m/s)および高速载荷(4.0m/s)の4段階である。試験数は各ケースとも3回(総試験体数は48)行っている。

### (3) 供試体と計測項目

コンクリートの材料は、普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm<sup>3</sup>)を使用し、細骨材には山砂(岩井寺産、密度 2.57g/cm<sup>3</sup>、吸水率 2.02%)を、粗骨材には最大粗骨材寸法 10mm の硬質砂岩砕石(青梅産、密度 2.65 g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.54%)を使用した。コンクリートの配合を表-3 に示す。試験体は打設後 1 日で脱型、水中養生を 7 日間行なった。その後は実験室内にて気中養生を行った。打設から 17 日目に、コンクリート円柱供試体の両端を研磨して所定の高さに調整した。本実験に用いたコンクリートの強度は材令 28 日で 38.53MPa であった。

ちなみに、急速直接一軸試験と急速割裂試験では、用いたコンクリートの配合が異なるが、コンクリート材料の引張挙動は脆性的で骨材によるひび割れの形成や進展は、ポストピーク領域で顕著になると考えられる。したがって、強度のみを対象として比較する場合は、配合の影響は小さ

いと考えている。

供試体に作用する荷重は、供試体直上の载荷側に設置したロードセル(最大荷重 980kN、最大応答周波数 11 kHz)によって計測している。また、供試体中央、载荷直交方向に貼付したひずみゲージ(30mm)によって载荷軸直交方向の引張ひずみを計測している。さらに破壊の様子を高速ビデオ(1/200 秒)で撮影した。

### 3. 試験結果および考察

急速直接一軸引張試験における基準供試体(φ71.4mm、高さ 150mm)に対する結果、および急速割裂試験における全供試体の結果を表-4 示す。また、急速割裂試験における引張強度は、以下の式を用いて算出した。

$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

ここに、 $P$  = 荷重、 $d$  = 供試体直径、 $l$  = 供試体長さである。

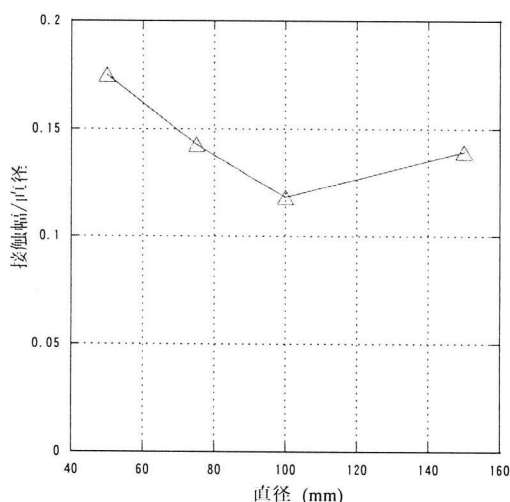
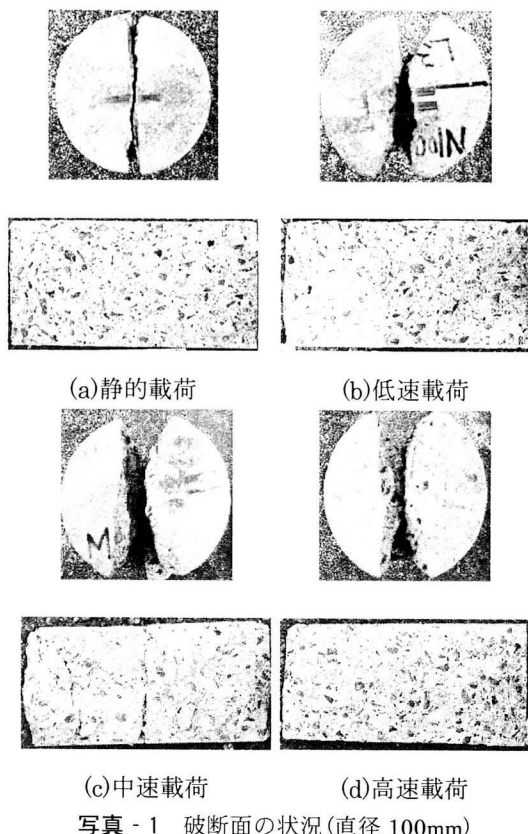


図-5 寸法による接触幅の変化

### 3.1 ひずみ速度の定義

コンクリートの速度効果に関する既往の研究では、載荷速度を示す指標として一般にひずみ速度あるいは応力速度が用いられている。ここでは、以下に述べるひずみ速度を用いた。図 - 4 に、急速直接一軸引張試験および急速割裂試験のそれぞれに対して得られた代表的な引張応力の時刻歴およびひずみの時刻歴を示す。図から、いずれの試験の場合も破壊に至る応力およびひずみの挙動はほぼ同様であることがわかる。すなわち、載荷初期にコンクリー

ト円柱供試体に作用する引張応力の立ち上がりは緩慢で、引張強度の 1/3 点以降から引張強度点まで直線的に増加する傾向にある。そこで、図 - 4 に示すように引張強度の 1/3 点に対応するひずみから引張強度点までのひずみ～時間関係の勾配をひずみ速度と定義した。

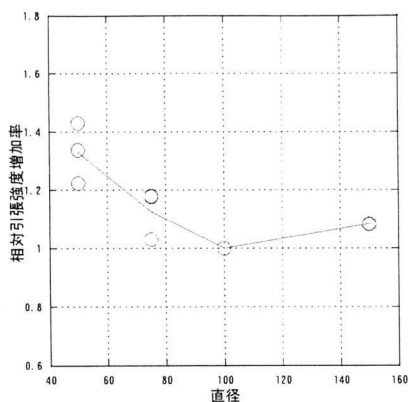
### 3.2 供試体の破壊状況

写真 - 1 に、直径 100mm 供試体の破断面を示す。破断面の目視観察より、静的載荷および急速載荷(低速～高速)において粗骨材とモルタルとの界面で付着破壊の差異は確認されなかった。

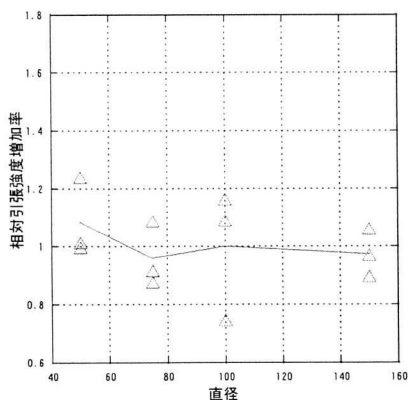
さて、長谷川ら<sup>7)</sup>や椎名ら<sup>8)</sup>によると、割裂試験における供試体と載荷板の接触幅の変化は、破壊時の供試体のひずみ、応力状態に変化をもたらすことが報告されている。そこで、本試験においてもこの影響を調べるために、静的載荷での接触面の幅を上下それぞれ 3 箇所ずつ(計 6 箇所)ノギスで計測した。この平均値を直径で無次元化したものを、図 - 5 に示す。本試験の結果では、直径 50mm が相対的に最も接触幅が大きく、直径 100mm が最も小さいという結果となった。つまり、本試験では、直径 100mm が最も線の載荷であったことを示している。町田<sup>9)</sup>によると、載荷幅が大きくなるにつれて、相対的に載荷点付近の載荷軸直交方向に生ずる圧縮応力部分が大きくなり、載荷軸方向に分布する引張応力領域が短くなることを指摘している。よって本試験においても、加圧板と供試体との接触幅が引張強度の大きさに影響を与えている可能性が考えられる。

### 3.3 供試体の寸法が割裂(引張)強度に及ぼす影響

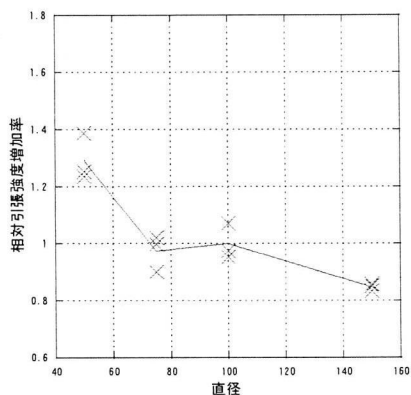
ここで、直径 100mm の円柱供試体に対して得られた引張強度(静的、低速、中速および高速)を基準とした場合の寸法効果を述べる。図 - 6 において、縦軸は直径が異なる(50mm, 75mm, 100mm, 150mm)供試体の各載荷速度における引張強度を各載荷速度における直径 100mm の引張強度で除した値(相対引張強度増加率と呼ぶ)を示している。まず、静的載荷は、寸法が大きくなるにつれて強度は下がっており、いわゆる寸法効果が確認できる。しかし、直径 150mm の供試体の場合は、100mm よりも引張強度がやや大きい。これは、長谷川らの実験結果と同じ傾向で次の理由が考えられる。すなわち、図 - 5 に示す相対的接触幅の変化と同じ傾向であり、載荷幅によって応力分布が異なったためと考えられる。接触幅が増大すると、供試体には接触幅に応じた分布荷重が加えられることになる。吉本<sup>10)</sup>も指摘しているが、先に述べたように載荷幅の増大に伴い、載荷軸方向に分布する引張応力領域が短くなる。したがって、引張応力場における欠陥部分の存在する確率が減少し引張強度が増加することも考えられる。また、町田が行なった静的な割裂試験では、載荷点付近に発生したひび割れは、中心に向かって進展しにくいことが報告されている。この理由は、載荷点に近い部分に生じる圧縮



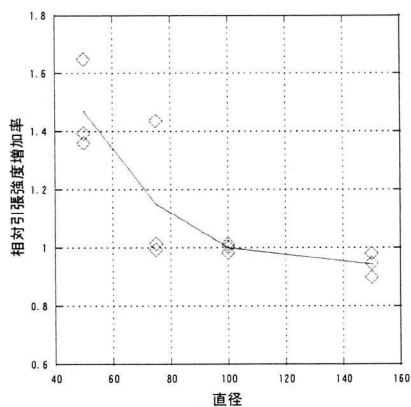
(a) 静的載荷



(b) 低速載荷



(c) 中速載荷



(d) 高速載荷

図 - 6 各載荷速度における寸法効果

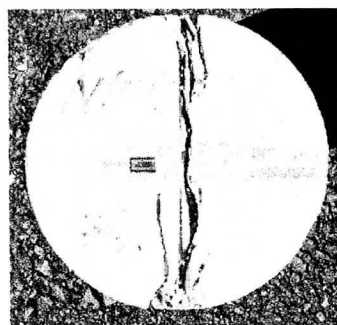
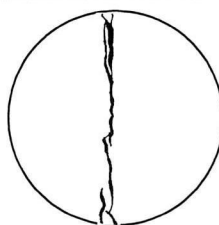
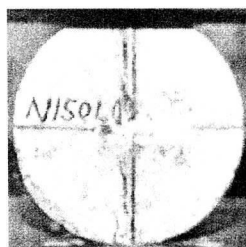
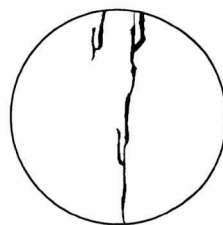
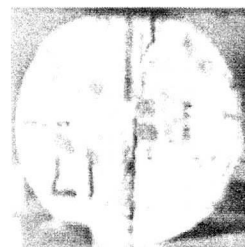


写真-2 静的なひび割れ発生状況



(a) 直径 150mm



(b) 直径 75mm

写真-3 低速載荷の破壊状況

応力がひび割れの進展を妨げるためである。本試験でも、写真 - 2 に示す静的な載荷の場合、載荷点付近にみられるひび割れは、供試体の中心に進展していないことが確認できる。一方、図 - 6 において、載荷速度が大きくなると直径寸法の大小によって相対引張強度増加率が変動する傾向は静的と同じであるが、その変動状況がやや異なっている。この理由について、高速ビデオの映像から考察を行なってみる。載荷速度ごとのひび割れ発生、進展の様子を写真 - 3～写真 - 5 に示す。低速載荷した写真 - 3 を見ると直径 150mm では載荷点付近でひび割れが発生しているが、載荷軸方向に進展し破壊したひび割れに連結していない。しかし、直径 75mm では、上側接点右側から発生したひび割れが進展して破壊に連結している。次に、写真 - 4 の中速載荷では、直径 150mm は、載荷方向に破壊したひび割れが形成されている。しかし、直径 75mm、100mm では載荷点付近のひび割れが複数発生し破壊したひび割れに連結している。また、直径 50mm は、破壊したひび割れが繋がった時には、供試体下部の破壊が進んでいる。高速載荷の写真 - 5 は、ビデオの性能上ひび割れの発生と進展が明確に判断できないが、やはり複数のひび割れが見られる。すなわち、供試体の寸法が小さいほど、また、載荷速度が大きいほど、複数のひび割れが発生していると考えられる。これは、先に述べた載荷幅とも関係があると考

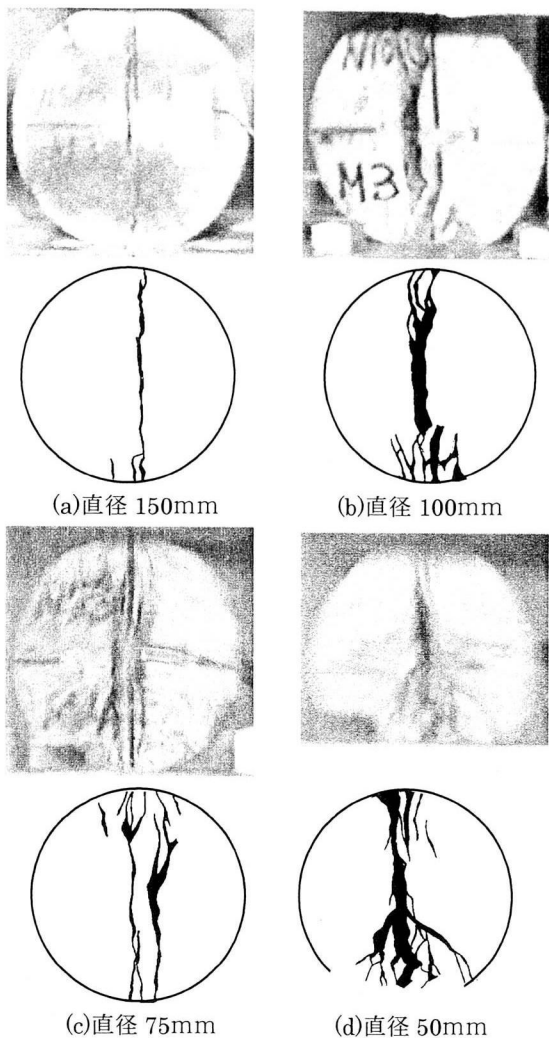


写真-4 中速載荷の破壊状況

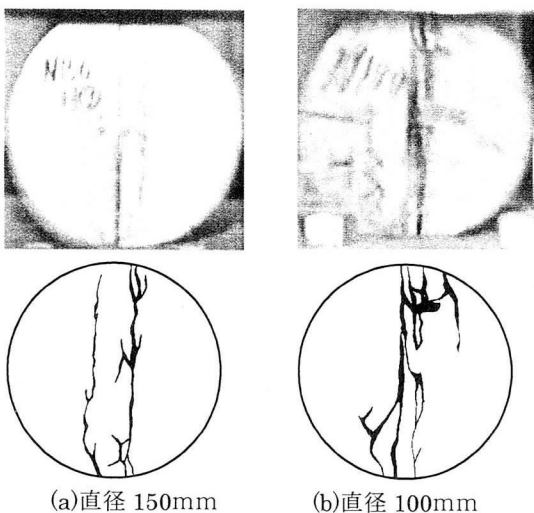


写真-5 高速載荷の破壊状況

えられ、相対的な載荷幅が大きいほど上下の拘束が大きくなり、これがひび割れを多く発生させている可能性もあると考えられる。この複数のひび割れが形成される際により多くのエネルギーを消費していると考えられ、これらがす

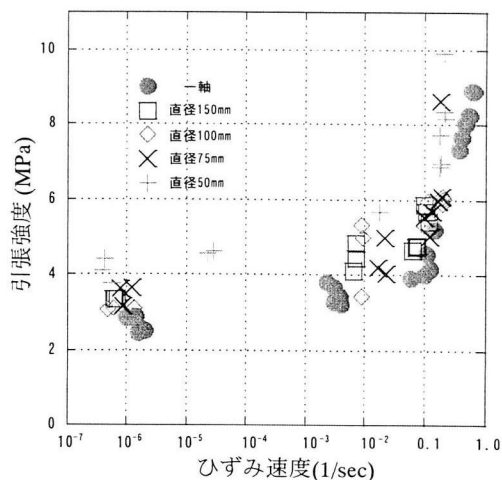


図-7 割裂強度と一軸引張強度の比較

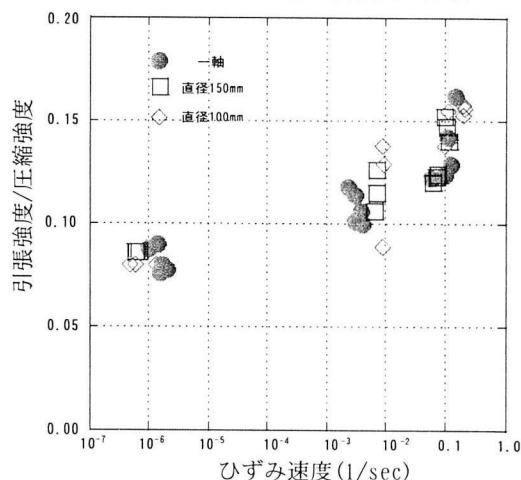


図-8 無次元化した場合の比較

法効果の原因の一つとも考えられる。また、載荷速度が大きくなると結果のばらつきが大きくなり、寸法が小さくなるとばらつきはさらに大きくなる傾向にある。

### 3.4 割裂(引張)強度と一軸引張強度の比較

吉本<sup>10)</sup>によると、一軸引張強度は、単純応力状態の下での最大応力であるのに対して、割裂強度は引張応力の他にも応力場が形成される2軸応力状態下で得られる値であるため、割裂強度の方が小さく評価されることが報告されている。一方、P.Kumar Mehta<sup>11)</sup>らは、割裂試験の値の方が約20%~15%高い値を示すことを指摘している。

図-7に、急速直接一軸引張試験による引張強度と急速割裂試験によって得られた引張強度を比較して示す。両試験に用いたコンクリート供試体は、配合が異なるため(表-1, 表-3)静的圧縮強度に相違(32.1MPa, 38.5MPa)がある。したがって、ひずみ速度とともに強度が増大する傾向は同じであるが、当然、一軸引張強度と割裂強度とは一致していない。そこで、それぞれの引張強度を静的圧縮強度で無次元化した値を比較した(図-8)。割裂(引張)強度は直径100mm, 150mmのものだけを示している。図から、静的圧縮強度が異なる場合でも、静的圧縮強度で除した強度比(無次元化強度)は、急速直接一軸引張試験と急速割裂

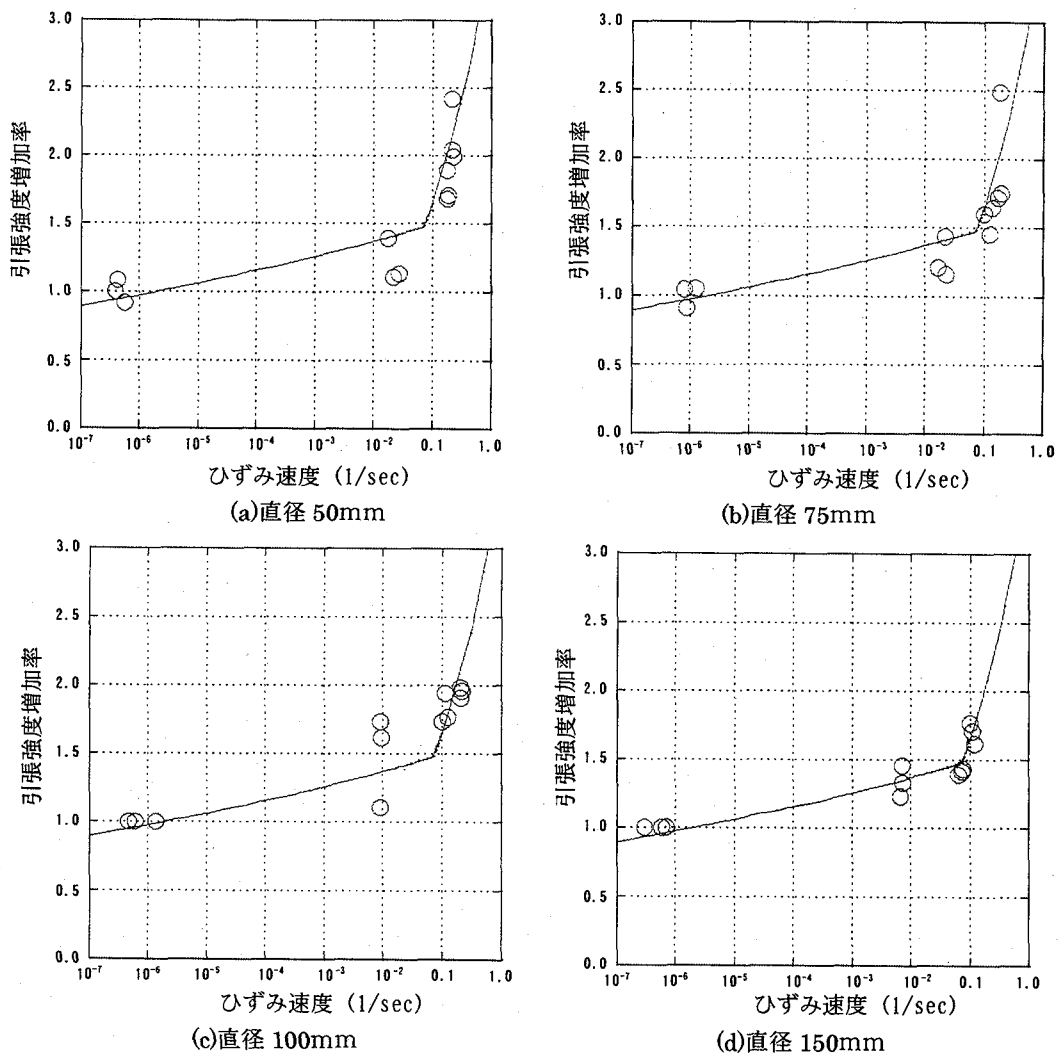


図-9 割裂強度の増加率

試験でほぼ等しい値となっていることがわかる。次に、割裂試験で得られた引張強度の増加率をひずみ速度との関係で図-9に示す。図中には、急速直接一軸引張試験の結果に基づいて定式化した引張強度増加率の評価式(式2)による関係も示している。

$\dot{\epsilon} \leq 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) に対して

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0371} \quad (2a)$$

$\dot{\epsilon} \geq 7.22 \times 10^{-2}$  (1/sec) に対して

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = 0.0433 \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.3363} \quad (2b)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  は静的載荷のひずみ速度  $2.0 \times 10^{-6}$  (1/sec)

$\dot{\epsilon}$  は急速載荷のひずみ速度

$f_{ts}$  は静的引張強度 MPa

$f_{td}$  はひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  で載荷した引張強度 MPa

図より、引張強度の増加率で評価することにより、直径および長さが異なる結果に対しても、式(2)により引張強度の増加率が評価できることがわかる。すなわち、引張強度増加率については、寸法の影響をあまり受けないことがわかる。ただし、4種類の直径の中でも、直径100mm、150mmの結果に対して式(2)の適合性が良い。

本試験は、ひずみ速度が  $10^{-1}$  (1/sec) までの実験結果であるので、今後、さらに高ひずみ速度の場合について検討する必要がある。また、載荷速度が大きくなるとばらつきが大きくなる。その傾向は、寸法が小さくなると顕著になるため直径100mm～150mm以上の大きな供試体を用いる必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、コンクリートの円柱供試体の寸法および載荷速度をパラメータとする急速一軸引張試験および急速割

裂試験を行い、試験法の違いによる引張強度の差異を検討するとともに寸法および載荷速度が動的引張強度に及ぼす影響を調べたものである。本実験の範囲内において得られた結果を、まとめて以下に示す。

- (1) 急速直接一軸引張試験による引張強度と割裂強度は、ひずみ速度にかかわらず、それぞれの静的な圧縮強度で無次元化することによってほぼ一致する。
- (2) 直径寸法が小さいほど得られるデータのばらつきが大きい。寸法効果については、円柱供試体のひずみ速度が大きいほど顕著になる傾向がある。また、静的載荷時の寸法効果は直径 50mm から直径 75mm までは顕著に現れる。直径 100mm 以上に対しては、影響の度合いは小さくなる。
- (3) 高速ビデオによる観察から、直径が小さく、載荷速度が大きくなるにしたがい、ひび割れの発生モードが異なることがわかった。
- (4) 急速直接一軸引張試験の結果に基づいて定式化した引張強度増加率の式が急速割裂試験による結果とよく一致した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会：構造物の衝撃挙動と設計法、構造工学シリーズ 6, 1993.12.
- 2) 竹田仁一, 立川博之：高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学的諸性質とその基本関係式, 日本建築学会論文報告集第 78 号, 昭和 37 年 10 月
- 3) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤：急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, 37-54, 1999, 8
- 4) 柳下拓也, 白井孝治, 伊藤千浩, 塩尻弘雄：コンクリートの含水率がひずみ速度依存性に及ぼす影響, 土木学会第 54 回年次学術講演会, V-428
- 5) 白井孝治, 島村和夫, 寛晃司, 伊藤千浩, 大沼博：コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A(1998 年 3 月)
- 6) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤：急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83-95, 1998.5
- 7) 長谷川俊昭, 塩屋俊幸, 岡田武二：コンクリートのひびわれと寸法効果：セメントコンクリート No.474, Aug.1986
- 8) 椎名国雄, 大藪孝治：コンクリートの割裂試験における載荷軸上のひずみに関する一考察：日本建築学会学術講演便概集（関東）1993 年 9 月, pp769～pp770
- 9) 町田篤彦：コンクリートの圧裂試験に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 297・1978 年 11 月
- 10) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊 学献社 1990 年 7 月 11 日初版発行
- 11) P.Kumar Mehta., Paulo J.M.Monteiro 共著, 田澤榮一, 佐伯昇監訳：コンクリート工学 技報堂出版 1998 年 10 月 1 日 1 版 1 刷発行

(2002年9月13日受付)