

# 土木研究所資料

## ダムコンクリートの直接引張強度に ついての実験的検討（その3）

平成5年12月

建設省土木研究所  
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1993) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## ダムコンクリートの直接引張強度に ついての実験的検討（その3）

ダム構造研究室 室 長 永 山 功  
主任研究員 渡 辺 和 夫  
研 究 員 佐々木 隆  
首 藤 美 誠  
元 研 究 員 庄 司 俊 介  
元部外研究員 向 江 幸 介

### 要 旨

本報告は、コンクリートダムの耐震性評価の際に必要なダム用コンクリートの引張強度、引張変形特性について検討した結果をとりまとめたものである。試験は、円柱供試体に直接的に引張応力、引張圧縮交番応力を載荷して行った。この試験結果から、載荷速度が引張強度、変形特性に与える影響、繰り返し荷重が引張強度、変形特性に与える影響を明かにすることができた。また、コンクリートの減衰特性についても明かにすることができた。

キーワード：コンクリート、圧縮強度、引張強度、減衰定数、弾性係数

## は じ め に

現行のダム設計基準に基づく重力式コンクリートダムの構造設計では、鉄筋等によって補強される局所的な部位に発生する引張応力を除いて、基本的にダム堤体内に引張応力が発生することを認めていない。一方、アーチ式コンクリートダムの場合には、その堤体内に多少の引張応力が発生することを認めているが、万が一にも引張ひび割れが生じるような場合には、応力の再配分によってダム堤体の二次的な安定性が確保されることを確認するようになっている。このため、コンクリートダムの構造設計においては、コンクリートの圧縮強度が設計上の主要な要素となるのが一般的であって、コンクリートの引張強度が設計上の問題となることは少なかった。

しかし、近年、動的解析法を用いたコンクリートダムの耐震性の評価、RCD 工法によるコンクリートダムの施工時の温度規制のための温度応力解析等、ダム堤体内に発生する引張応力とダム用コンクリートの引張強度の関係を詳細に取り扱わなければならない問題が増えてきている。

このような背景から、ダム構造研究室ではダム用コンクリートの引張強度、引張変形特性に関する調査研究を進めてきている。本報告書は、その中で、特にコンクリートの動的特性に重点を置いた検討結果についてとりまとめたものである。

# 目 次

|       |                        |    |
|-------|------------------------|----|
| 1     | 試験の目的 .....            | 1  |
| 2     | 試験の概要 .....            | 2  |
| 2.1   | 試験の方法および装置 .....       | 2  |
| 2.2   | 供試体の諸元 .....           | 4  |
| 2.2.1 | コンクリートの配合 .....        | 4  |
| 2.2.2 | 供試体の寸法 .....           | 4  |
| 2.3   | 試験の種類 .....            | 6  |
| 2.3.1 | 一軸圧縮試験 .....           | 6  |
| 2.3.2 | 荷重速度を変えた直接引張試験 .....   | 6  |
| 2.3.3 | 正弦波荷重による交番荷重試験 .....   | 6  |
| 2.3.4 | 正弦波荷重による減衰特性試験 .....   | 7  |
| 3     | 試験の結果 .....            | 8  |
| 3.1   | 一軸圧縮試験 .....           | 8  |
| 3.1.1 | 圧縮強度 .....             | 8  |
| 3.1.2 | 弾性係数 .....             | 8  |
| 3.2   | 荷重速度を変えた直接引張試験 .....   | 11 |
| 3.2.1 | 荷重速度と引張強度の関係 .....     | 11 |
| 3.2.2 | 引張強度と圧縮強度の関係 .....     | 11 |
| 3.2.3 | 荷重速度と弾性係数の関係 .....     | 15 |
| 3.3   | 正弦波荷重による交番荷重試験 .....   | 26 |
| 3.3.1 | 荷重周波数と引張強度の関係 .....    | 26 |
| 3.3.2 | ひずみ振幅と弾性係数の関係 .....    | 28 |
| 3.4   | 正弦波荷重による減衰特性試験 .....   | 39 |
| 3.4.1 | 弾性係数および減衰定数 .....      | 39 |
| 3.4.2 | 弾性係数および減衰定数の算定結果 ..... | 41 |
| 4     | まとめと今後の課題 .....        | 47 |
| 4.1   | まとめ .....              | 47 |
| 4.2   | 今後の課題 .....            | 48 |

## 1 試 験 の 目 的

現在、ダムの耐震設計は震度法に基づいて行われている。震度法によって設計されたダムの安全性は、過去に地震を経験したダムがなんら重大な被害を被ってないことで十分保証されている。しかし、地震時におけるダムの挙動は震度法における仮定とは異なることが知られており、したがって、震度法によって設計されたダムの安全性は経験によって保証されたものであるといえる。そこで、ダムの耐震性をより合理的に評価するためには、地震時におけるダムの挙動特性を的確に取り入れた耐震設計手法の確立が必要となっている。

このような背景から、近年、ダムの耐震性を評価する方法として動的解析法が盛んに用いられるようになってきている。また、従来の震度法に代わるダムの構造設計法として、動的解析法で得られるダムの振動特性を考慮した修正震度法の採用が検討されている。これらの解析法または構造設計法では、堤体内に発生する応力と堤体材料の強度の関係を照査してダムの安全性を評価することから、これらの手法の適用にあたってはダム用コンクリートの動的引張強度を正確に把握することが必要不可欠となっている。そこで、本研究室では、これまでにダム用コンクリートの動的引張強度特性について種々の検討を加え、その結果をとりまとめている<sup>1)2)</sup>。

本報告書は、動的解析法や修正震度法を用いてダムの耐震設計を行う際に必要となるダムコンクリートの引張強度、減衰特性などの基本的な特性値について、標準供試体を用いた直接引張試験を行った結果について報告するものである。

## 2 試験の概要

### 2.1 試験の方法および装置

現在、コンクリートの引張強度を求める一般的な方法としては、JIS A 1113-1976「コンクリートの引張強度試験」がある。この試験方法は、割裂試験と呼ばれることもあり、円柱供試体を割裂破壊させて間接的に引張強度を求めるものである。一方、コンクリートの引張強度を直接求めることは容易ではなく、このため、確立した試験方法もない。本検討では、コンクリートの引張強度を直接的に求めるため、円柱供試体に直接引張力を与える試験を行った。これは、図-2.1に示したように供試体の上下両端にエポキシ系の接着剤によって鋼性のアタッチメントを接着し、これを「動的万能試験装置」に固定して引張荷重（または圧縮、引張の動的交番荷重）を直接載荷する試験である。

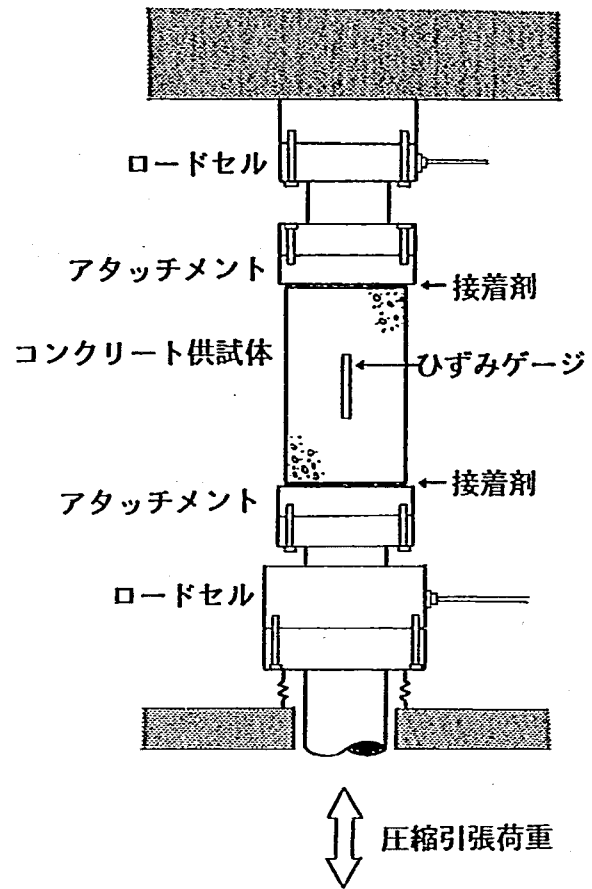


図-2.1 試験装置の概要

本検討に用いた動的万能試験装置の諸元を表-2.1に示す。また、その外観を写真-2.1に示す。本試験装置は、電気式油圧サーボ方式によって荷重制御を行い、載荷波形としては、三角波、正弦波、矩形波などを入力することが可能となっている。なお、本装置では圧縮、引張の動的交番荷重を載荷するため、その駆動部と載荷板とは剛結された構造となっている。

本試験装置を用いたコンクリートの直接引張試験の手順は次のとおりである。

- ① 試験装置に鋼製の専用アタッチメントを取り付ける。
- ② アタッチメントに接着剤を塗布して供試体を据え、僅かに圧縮荷重を加えながら供試体とアタッチメントを接着させる。
- ③ このままの状態、上下のアタッチメント間を治具で結合する。
- ④ 接着剤がある程度硬化した後（約40分後）、試験装置からアタッチメントと供試体を取り外す。
- ⑤ 接着剤が完全に硬化した後（約24時間後）、アタッチメントを結合していた治具を取り外す。
- ⑥ アタッチメントの付いた供試体を試験装置に据え付け、載荷試験を実施する。

なお、試験後の供試体を乾燥機の中に入れて約200℃の熱を加えると、供試体とアタッチメントを接着している接着剤が溶け、アタッチメントを供試体から容易に取り外すことができる。このため、アタッチメントは再利用することが可能である。

表-2.1 試験装置の概要

| 項 目     | 機 能                                       |
|---------|-------------------------------------------|
| 最 大 荷 重 | $\pm 40\text{tf}$ (载荷盤直径20cm)             |
| 最 大 変 位 | $\pm 10\text{mm}$                         |
| 加 振 波 形 | 正弦波・三角波・矩形波 (0.01~25Hz)                   |
| 最 大 速 度 | 4 cm/sec                                  |
| 制 御 方 式 | 電気油圧サーボ方式                                 |
| 荷 重 計   | $\pm 45\text{tf}$ (ひずみ式)                  |
| 変 位 計   | $\pm 12.5\text{mm}$ (差動トランス式)             |
| 荷重変換部   | $\pm 10\text{v}/\pm 40\text{tf}$ (モニター出力) |
| 変位変換部   | $\pm 10\text{v}/\pm 10\text{mm}$ (モニター出力) |
| 载荷盤の構造  | 剛結 (球座ではない)                               |

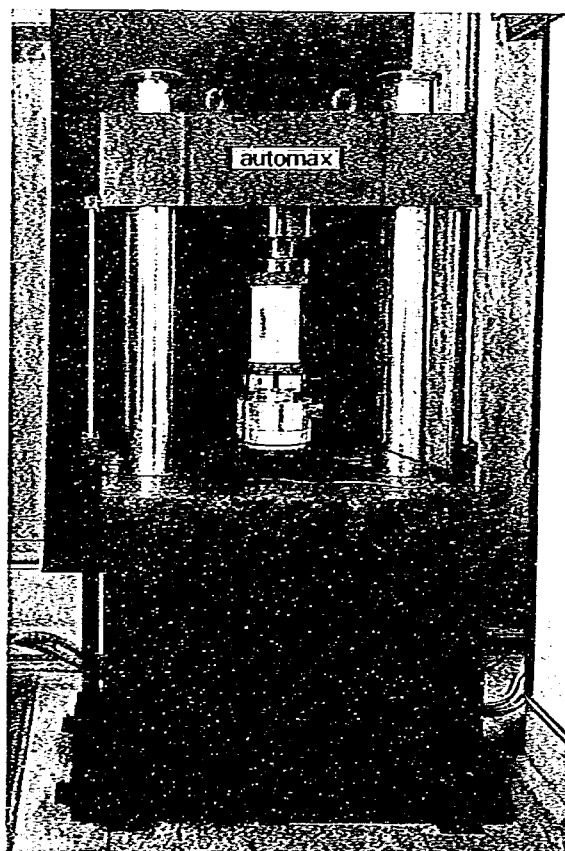


写真-2.1 試験装置の外観

## 2.2 供試体の諸元

### 2.2.1 コンクリートの配合

今回の試験に用いたコンクリートの配合を表-2.2に示す。本配合は、表-2.3に示したアーチダムのコンクリートの一般的な配合を参考にして、40mmのスクリーンでウェットスクリーニングしたものを想定し、粗骨材の最大寸法  $G_{max}=40\text{mm}$  として設計したものである。なお、本配合に用いたセメントは中庸熟ポルトランドセメントで、骨材は笠間産砂岩の碎石である。また、混和剤として遅延型 AE 減衰剤ボゾリス N<sub>8</sub> をセメント重量の0.5%添加した。

### 2.2.2 供試体の寸法

コンクリートの供試体は、直径15cm、高さ30cmの鋼性モールドを用いて作製した。なお、一軸圧縮試験時には高さ30cmの供試体で試験を行ったが、引張荷重を載荷する試験においては、フリージングの影響を受けて強度的に弱くなったと考えられる供試体端面のゆるみを除去するため、上下端とも3cmずつ切断除去し、高さ24cmとした供試体で試験を行った。

表-2.2 試験に用いたコンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法<br>G <sub>max</sub><br>(mm) | スランプの範囲<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<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 G |         |         | 混和剤   |
|                                      |                 |            |                      |                    |                            |           |          | 5~10mm  | 10~20mm | 20~40mm |       |
| 40                                   | 3.5±1           | 2.5±1      | 50                   | 46                 | 150                        | 300       | 874      | 221     | 306     | 527     | 0.750 |

セメント：中庸熱ポルトランドセメント、比重3.21

細 骨 材：笠間産砂岩碎石、比重2.60

粗 骨 材：笠間産砂岩碎石、比重2.67

表-2.3 参考としたアーチダム用コンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法<br>G <sub>max</sub><br>(mm) | スランプの範囲<br>(cm) | 空気量<br>(%) | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<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 G |         |         |          | 混和剤   |
|                                      |                 |            |                      |                    |                            |           |          | 5~20mm  | 20~40mm | 40~80mm | 80~150mm |       |
| 150                                  | 2.5±1           | 2.5±0.5    | 50                   | 26.3               | 97                         | 194       | 565      | 341     | 341     | 455     | 488      | 0.485 |

## 2.3 試験の種類

試験は、以下の4種類の試験を行った。試験材令は91日を目標としたが、実際の試験材令は、91～112日の間であった。

試験にあたっては、試験を行う7日前に養生水槽から供試体を取り出し、供試体を室内で自然乾燥させるものとした。また、供試体の側面に載荷方向に4枚のひずみゲージ（ゲージ長：80mm）を貼って試験時の供試体のひずみを計測し、載荷重は荷重計（容量：45tf）によって計測した。

### 2.3.1 一軸圧縮試験

静的な圧縮荷重をコンクリート供試体に載荷して、コンクリートの圧縮強度、弾性係数を求める試験。これは、本試験で用いた配合のコンクリートの一般的な特性を求めるための試験である。

- (1) 供試体寸法：直径15cm、高さ30cmの円柱供試体
- (2) 材 令：91日（実際には91～93日）
- (3) 載 荷 条 件：載荷速度  $2 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ （JISに準じて）
- (4) 試 験 本 数：15本

### 2.3.2 載荷速度を変えた直接引張試験

載荷速度を種々に変えた引張荷重をコンクリート供試体に載荷して、コンクリートの引張強度、弾性係数を求める試験。

- (1) 供試体寸法：直径15cm、高さ24cmの円柱供試体
- (2) 材 令：91日（実際には91～108日）
- (3) 載 荷 条 件：載荷速度 1, 10, 100,  $1000 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の4種類
- (4) 試 験 本 数：各載荷速度ごとに10本

### 2.3.3 正弦波荷重による交番載荷試験

振幅を連続的に増加させながら、供試体が破壊するまで正弦波荷重を載荷する試験。

- (1) 供 試 体：直径15cm、高さ24cmの円柱供試体
- (2) 材 令：91日（実際には92～106日）
- (3) 載 荷 条 件：載荷応力波形

$$\sigma = \sigma_s \cdot t \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$$

ここに、

$\sigma$  : 載荷応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$t$  : 載荷経過時間 (sec)

$f_s$  : 載荷周波数 (Hz)

$\sigma_s$  : 応力振幅の増加速度 ( $\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ )

なお、応力振幅の増加速度  $\sigma_s$  は  $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、載荷周波数  $f_s$  は 1, 2, 5 Hz の 3 ケースとした。

(4) 試験本数：各載荷周波数ごとに10本

#### 2.3.4 正弦波荷重による減衰特性試験

種々の振幅をもった正弦波荷重を供試体に載荷して、コンクリートの減衰特性を調査する試験。

なお、各試験は、表-2.4 に示すような試験順序で行ったため、前試験までの応力履歴を受けた供試体に対する試験となっている。

(1) 供試体：直径15cm、高さ24cmの円柱供試体

(2) 材 令：91日（実際には97～112日）

(3) 載荷条件：載荷応力波形

$$\sigma = \sigma_A \cdot \sin(2\pi \cdot f_s \cdot t)$$

ここに、

$\sigma$  : 載荷応力 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$t$  : 載荷経過時間 (sec)

$f_s$  : 載荷周波数 (Hz)

$\sigma_A$  : 応力振幅 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

なお、載荷波数は各ケース10波、載荷周波数は 2, 5 Hz の 2 ケース、応力振幅は  $5 \text{ kgf/cm}^2$  を初期値として順次  $5 \text{ kgf/cm}^2$  ずつ増加して破壊するまでとした。

(4) 試験本数：各載荷周波数ごとに10本

表-2.4 試験順序（正弦波荷重による減衰特性試験）

| 試験順序 | 周波数(Hz) | 応力振幅( $\text{kgf/cm}^2$ )          |
|------|---------|------------------------------------|
| 1    | 2       | 5                                  |
| 2    | 5       | 5                                  |
| 3    | 2       | 10                                 |
| 4    | 5       | 10                                 |
| ⋮    |         | ⋮                                  |
| ⋮    |         | 以下同様に $5 \text{ kgf/cm}^2$ ずつ増加させる |
| ⋮    |         |                                    |

### 3 試 験 の 結 果

#### 3.1 一軸圧縮試験

##### 3.1.1 圧縮強度

表-3.1に示したように、一軸圧縮強度の平均値は444kgf/cm<sup>2</sup>となった。また、変動係数は5%であった。

表-3.1 一軸圧縮試験における圧縮強度

| 打設パッチ | 供試体番号 | 材令(日) | 圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------|-------|-------|----------------------------|
| 1     | 1     | 93    | 473.1                      |
|       | 2     | 93    | 429.0                      |
|       | 3     | 93    | 447.0                      |
| 2     | 4     | 93    | 446.2                      |
|       | 5     | 93    | 401.8                      |
|       | 6     | 93    | 460.5                      |
| 3     | 7     | 91    | 411.4                      |
|       | 8     | 91    | 443.6                      |
|       | 9     | 91    | 413.1                      |
| 4     | 10    | 93    | 470.7                      |
|       | 11    | 95    | 450.9                      |
|       | 12    | 95    | 415.4                      |
| 5     | 13    | 95    | 464.0                      |
|       | 14    | 95    | 449.9                      |
|       | 15    | 95    | 476.5                      |
| 平 均   |       | 93.3  | 443.5                      |
| 標準偏差  |       | 1.44  | 23.4                       |
| 変動係数  |       | —     | 0.053                      |

##### 3.1.2 弾性係数

線形弾性体においては弾性係数の定義は1通りの方法しかないが、コンクリートのように応力-ひずみ関係が僅かではあるが非線形性を示す材料では、定義の方法が種々ある。コンクリートの弾性係数を表現する場合、接線弾性係数と割線弾性係数が良く用いられる。応力を $\sigma$ 、ひずみを $\epsilon$ とした場合、接線弾性係数は $\sigma - \epsilon$ 曲線上の任意の点における接線の勾配であり、割線弾性係数は $\sigma - \epsilon$ 曲線上の任意の点と原点とを結ぶ直線の勾配である。したがって、弾性係数を求める際に着目する任意の点の応力レベルあるいはひずみレベルによって弾性係数の値は種々変わることになる。

図-3.1は、弾性係数を求める際のひずみレベルを変えたときの接線弾性係数および割線弾性係数の変

化を示した代表的な例（供試体番号6）である。なお、ひずみの値 $\epsilon$ には、供試体側面に貼り付けた4本のひずみゲージの計測値の平均値を用いている。また、図-3.2は同じデータについて横軸を応力レベルに変えて整理したものである。図によれば、载荷初期においては割線弾性係数と接線弾性係数は概ね等しいが、载荷レベルが大きくなると割線弾性係数は接線弾性係数よりも幾分大きい値を示すことがわかる。

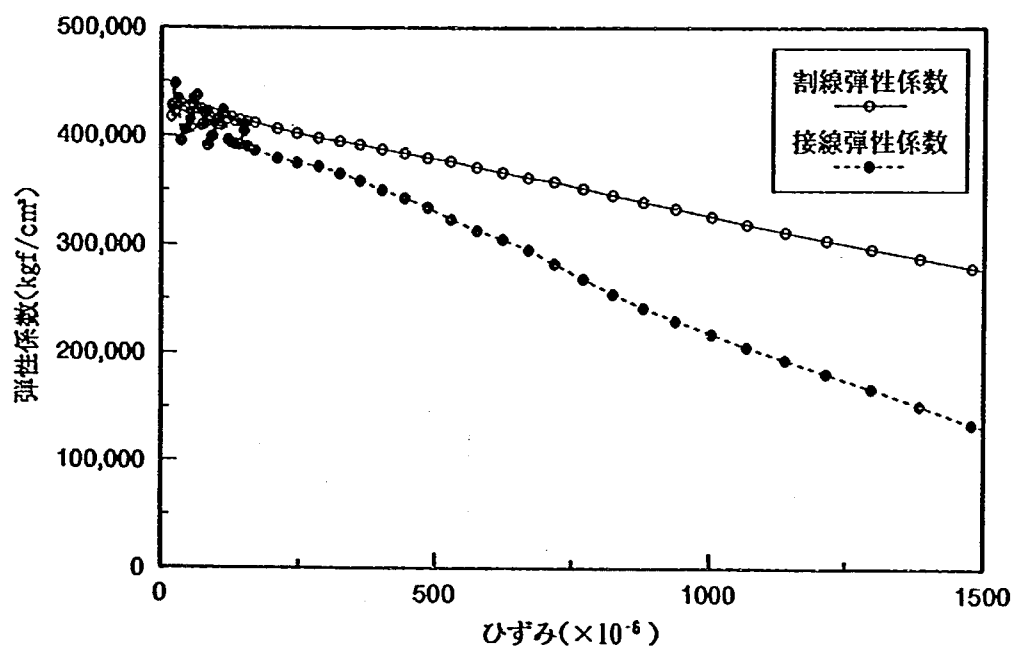


図-3.1 ひずみレベルと弾性係数の関係  
(一軸圧縮試験)

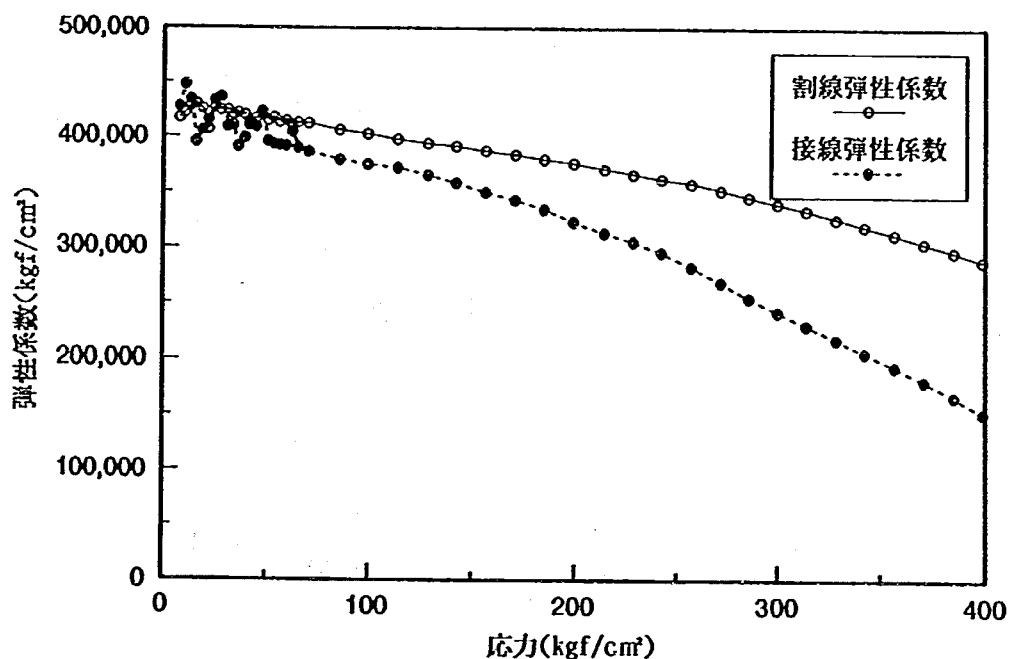


図-3.2 応力レベルと弾性係数の関係  
(一軸圧縮試験)

ところで、載荷初期においては載荷レベルと弾性係数の関係を表すグラフの凹凸が目立つ。これは、載荷初期の低ひずみレベルにおける計測されたひずみ値の信頼性の問題であると思われる。特に、信頼性の問題は、接線弾性係数の評価に大きな影響を与えており、割線弾性係数よりも接線弾性係数の方がグラフの凹凸が大きく、したがって載荷レベルが低い場合には割線弾性係数の方が信頼性が高いと考えられる。このグラフの凹凸に関して全ケースについて調べてみると、応力が $100\text{kgf/cm}^2$ 以下の応力レベルではグラフに凹凸がみられるが、応力が $100\text{kgf/cm}^2$ 以上の応力レベルではグラフに凹凸がみられなくなることがわかった。以上のようなことから低ひずみレベルでのひずみの信頼性を考慮して、ここでは、弾性係数は圧縮強度のほぼ $1/4$ の応力に相当する $100\text{kgf/cm}^2$ の応力レベルにおける割線弾性係数として定義する。

表-3.2に一軸圧縮試験における弾性係数の算定結果を示す。今回の配合によるコンクリートの弾性係数の平均値は $405,000\text{kgf/cm}^2$ となった。

表-3.2 一軸圧縮試験における弾性係数

| 打設バッチ | 供試体番号 | 弾性係数( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|-------|-------|---------------------------|
| 1     | 1     | 430,000                   |
|       | 2     | 406,000                   |
|       | 3     | 405,000                   |
| 2     | 4     | 406,000                   |
|       | 5     | 400,000                   |
|       | 6     | 402,000                   |
| 3     | 7     | 414,000                   |
|       | 8     | 392,000                   |
|       | 9     | 386,000                   |
| 4     | 10    | 389,000                   |
|       | 11    | 404,000                   |
|       | 12    | 390,000                   |
| 5     | 13    | 399,000                   |
|       | 14    | 402,000                   |
|       | 15    | 448,000                   |
| 平 均   |       | 405,000                   |
| 標準偏差  |       | 16,000                    |
| 変動係数  |       | 0.039                     |

## 3.2 載荷速度を変えた直接引張試験

### 3.2.1 載荷速度と引張強度の関係

表-3.3 および図-3.3 に載荷速度毎の引張強度の試験結果を示した。なお、変動係数は21%から43%と比較的大きな値となっている。

図によると、引張強度の載荷速度毎の平均値、最大値、最小値は、載荷速度  $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  と  $10 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  では大きな差はないが、100,  $1000 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  になるにつれて大きくなる傾向が読み取れる。すなわち、載荷速度  $10 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の結果に比較して  $1000 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の結果は、最大値では  $10.3 \text{ kgf/cm}^2$ 、平均値では  $11.4 \text{ kgf/cm}^2$ 、最小値では  $15.0 \text{ kgf/cm}^2$  大きくなっている。なお、変動係数についてみると、その値は載荷速度の増加に伴って小さくなっていることがわかる。

表-3.3 載荷速度毎の引張強度（載荷速度を変えた直接引張試験）

| 打設バッチ | 供試体番号 | 載荷速度( $\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ) |      |      |      | 載荷速度( $\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ) |      |      |      |
|-------|-------|--------------------------------------|------|------|------|--------------------------------------|------|------|------|
|       |       | 1                                    | 10   | 100  | 1000 | 1                                    | 10   | 100  | 1000 |
|       |       | 材令(日)                                |      |      |      | 引張強度( $\text{kgf/cm}^2$ )            |      |      |      |
| 1     | 1     | 92                                   | 92   | —    | 95   | 13.8                                 | 31.2 | —    | 22.9 |
|       | 2     | 100                                  | 100  | 99   | 99   | 7.0                                  | 12.7 | 43.3 | 37.0 |
| 2     | 3     | 92                                   | 92   | 95   | —    | 35.4                                 | 29.1 | 31.3 | —    |
|       | 4     | 100                                  | 100  | 99   | 99   | 34.7                                 | 21.8 | 19.8 | 35.1 |
| 3     | 5     | 91                                   | 91   | 91   | 91   | 13.2                                 | 20.1 | 24.3 | 39.0 |
|       | 6     | 95                                   | 95   | 95   | 95   | 16.6                                 | 7.9  | 18.3 | 25.1 |
| 4     | 7     | 93                                   | 93   | 95   | 95   | 26.3                                 | 34.2 | 27.8 | 44.5 |
|       | 8     | 108                                  | 108  | 107  | —    | 23.5                                 | 19.5 | 23.9 | —    |
| 5     | 9     | 93                                   | 93   | 95   | 95   | 16.2                                 | 28.2 | 43.6 | 36.2 |
|       | 10    | 108                                  | 108  | 107  | —    | 33.2                                 | 24.3 | 31.1 | —    |
| 平均    |       | 97.2                                 | 97.2 | 98.1 | 95.6 | 22.0                                 | 22.9 | 29.3 | 34.3 |
| 標準偏差  |       | 6.2                                  | 6.2  | 5.3  | 2.6  | 9.6                                  | 7.8  | 8.7  | 7.1  |
| 変動係数  |       | —                                    | —    | —    | —    | 0.44                                 | 0.34 | 0.30 | 0.21 |

### 3.2.2 引張強度と圧縮強度の関係

一軸圧縮試験の載荷速度は  $2 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ 、引張試験の載荷速度は 1, 10, 100,  $1000 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  であるため、同じ載荷速度で圧縮強度と引張強度の比較はできないが、3.2.1の引張試験の結果から、載荷速度  $1 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の範囲では引張強度に大きな差がないことがわかったので、ここでは、

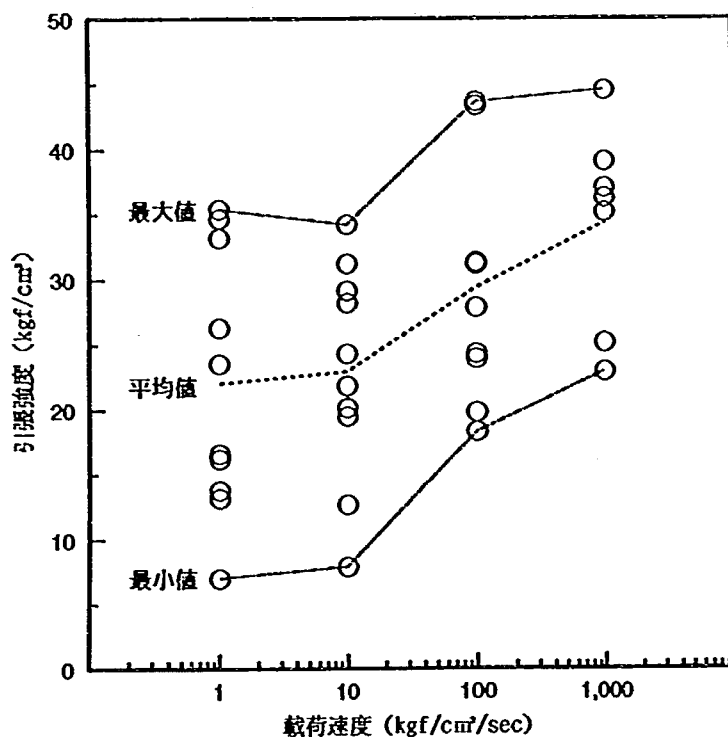
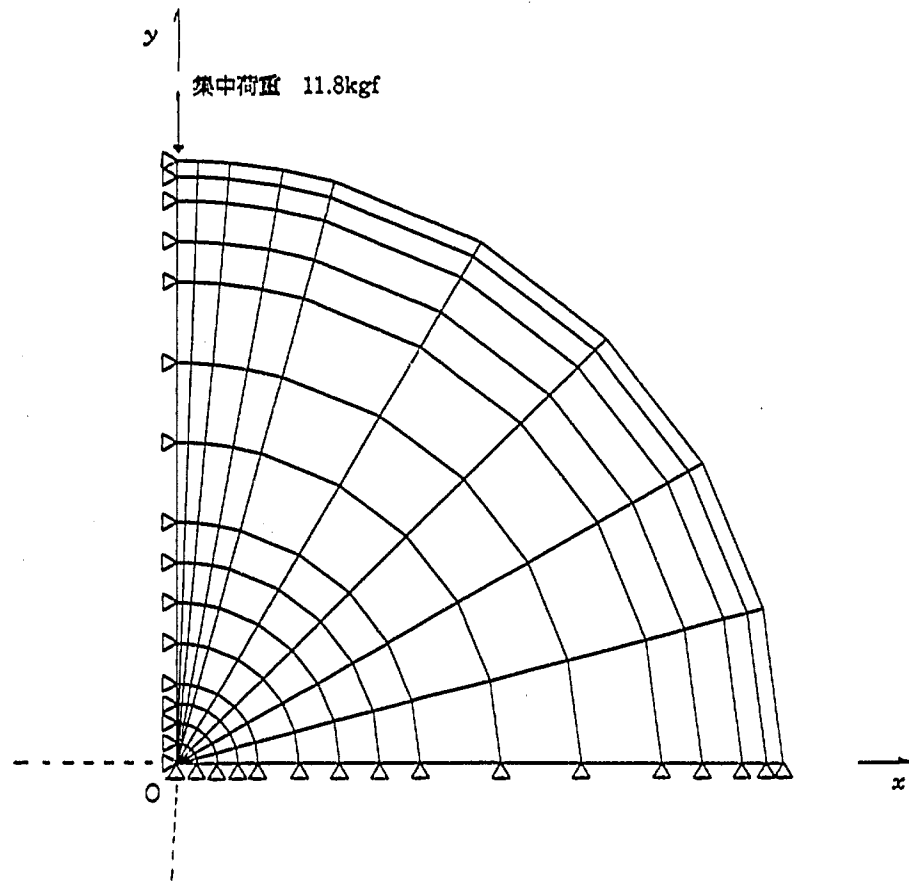


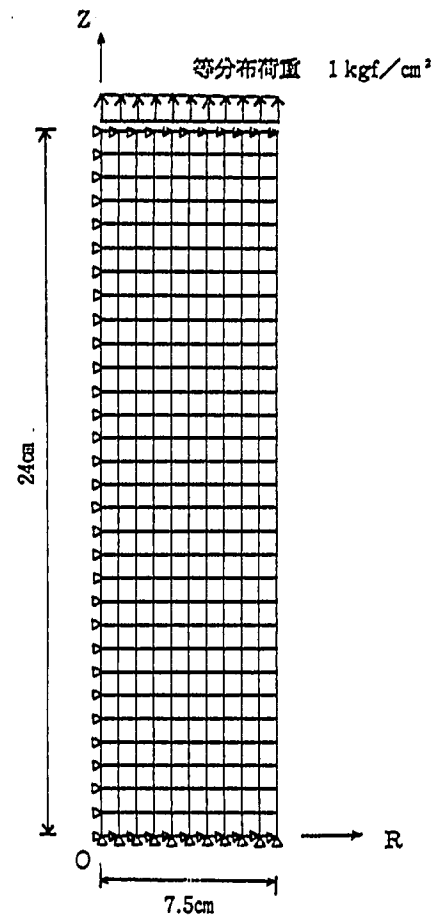
図-3.3 荷重速度と引張強度の関係  
(荷重速度を変えた直接引張試験)

荷重速度  $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の時の引張強度と圧縮強度を比較してみる。その結果、両者の平均値で評価すると引張強度は圧縮強度の約  $1/20$  の大きさとなる。一方、割裂試験での引張強度を既往の実験結果<sup>3)</sup> から求めると、圧縮強度  $440 \text{ kgf/cm}^2$  程度のコンクリートでは引張強度は圧縮強度の約  $1/13$  程度であり、直接引張試験での引張強度は割裂試験での引張強度よりも小さな値となっている。なお、直接引張試験での引張強度の最大値は圧縮強度の平均値の  $1/12.5$  程度であり、割裂試験による引張強度と同程度となっている。

一般に、直接引張試験によるコンクリートの引張強度は、割裂試験による引張強度よりも小さいと言われている。これは、割裂試験ではコンクリートの破壊面が規定されるのに対して、直接引張試験では供試体の最も弱い部分で破断が生じるためと考えられている。また、その他の要因として、両試験では想定される破壊面上における応力分布の状態が大きく異なることが考えられる。そこで、割裂試験と直接引張試験の応力状態を調べるために有限要素法を用いた解析を行ってみた。計算モデルは図-3.4 に示した通りである。図-3.5 に割裂試験における想定破壊面上の応力分布および直接引張試験における中央水平断面での応力分布を示した(引張応力を正)。図によると、直接引張試験では荷重方向に一律の引張応力が作用し、他の応力成分は 0 となるが、割裂試験では圧縮と引張の組み合わせ応力下にあることがわかる。

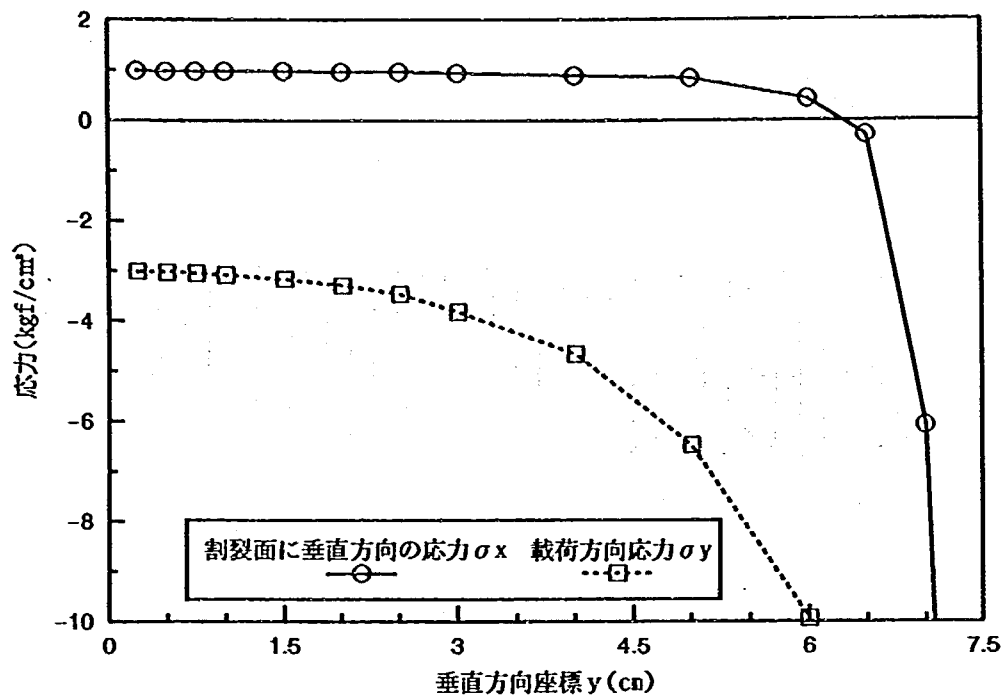


(a) 割裂試験

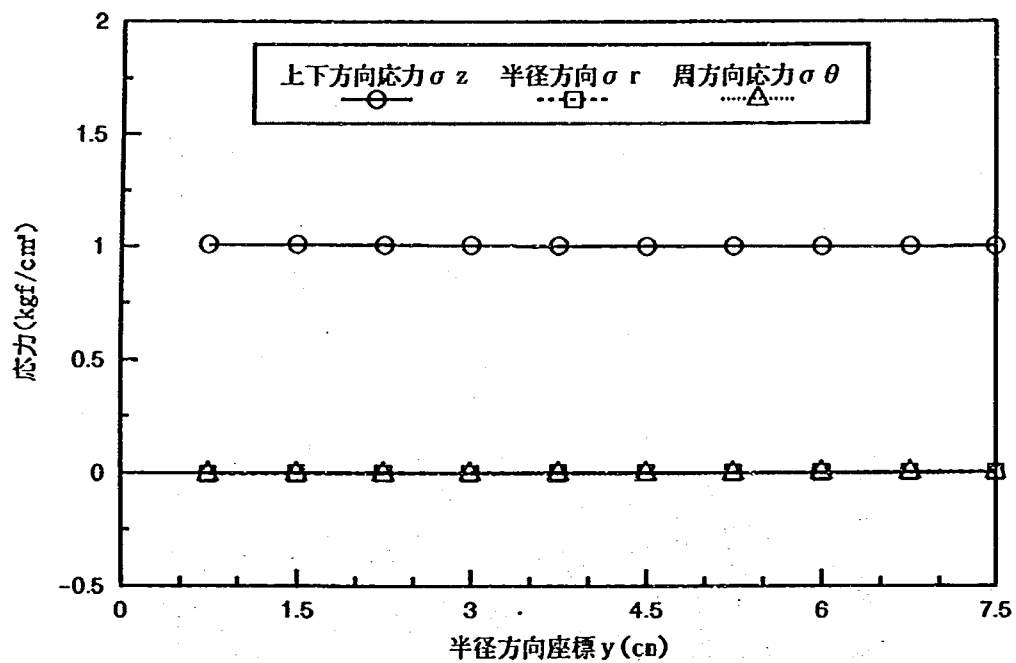


(b) 直接引張試験

図-3.4 有限要素モデル



(a) 割裂試験  $x = 0$  (cm)



(b) 直接引張試験  $z = 12$  (cm)

図-3.5 応力計算結果

### 3.2.3 載荷速度と弾性係数の関係

次に、引張試験における弾性係数について考察する。圧縮試験の場合と同様に、引張試験においても、供試体側面の4本のひずみゲージでひずみを計測したが、圧縮試験時と異なり、引張試験時には4つのゲージの応力-ひずみ曲線は各々異なった挙動を示すものが多くみられ、このような挙動は、当研究室で実施した一連の引張試験でも同様に認められた。このような現象は、応力とひずみの線形関係が失われたひずみゲージの近傍で、微少な破壊が進行しているために生じる現象と考えられる。そこで、この現象を局部破壊と呼び、また、この局部破壊が発生するときの応力を局部破壊応力と呼ぶこととする。今回の実験では4つのゲージを用いているため、局部破壊応力は4つ存在する。そこで、図-3.6に示したように、局部破壊応力を小さいものから順にそれぞれ $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、 $\sigma_4$ と定義する。表-3.4に各供試体毎の局部破壊応力を示した。また、図-3.7は、引張強度と局部破壊応力の関係を示したものである。これによると、引張強度の30%以下の応力では局部破壊はほとんど発生していないことがわかる。次に、図-3.8、図-3.9、図-3.10、図-3.11は、載荷速度別に引張強度と局部破壊応力の関係を示したものである。載荷速度別に見た場合にも全ケースに対して同様のことが言える。

次に、4つのひずみゲージの平均ひずみを用いた応力-ひずみ曲線において応力とひずみの線形関係が失われるときの応力を平均ひずみ線形限界応力 $\sigma_m$ と呼ぶこととし（図-3.12参照）、表-3.4にその値を示した。図-3.13は引張強度と平均ひずみ線形限界応力の関係を示したものであるが、当然のことながら平均ひずみ線形限界応力の下限值も引張強度の30%程度である。次に、個々のデータについて局部破壊応力と平均ひずみ線形限界応力の大きさを比較してみる。図-3.14は最小の局部破壊応力 $\sigma_1$ と平均ひずみ線形限界応力 $\sigma_m$ の関係を示したもので、図-3.15、図-3.16、図-3.17はそれぞれ局部破壊応力 $\sigma_2 \sim \sigma_4$ と平均ひずみ線形限界応力 $\sigma_m$ の関係を示したものである。これらの図において、45°の方向に引いた点線よりも上の領域、すなわち、平均ひずみ線形限界応力が局部破壊応力よりも大きくなる領域にも点がプロットされる場合が、 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ の各図について確認されるが、これは、4つのひずみゲージのうちの幾つかのひずみゲージが応力とひずみの線形性を失ったときでも4つのひずみゲージを平均するとほぼ線形な応力・ひずみ関係が保たれる場合があること、すなわち、局部破壊を生じた後も個々のゲージの平均ひずみは供試体の全体的挙動を示す場合があることを示している。しかし、ここでは、応力とひずみの線形関係が十分に保たれている最小の局部破壊応力 $\sigma_1$ 以下の応力の範囲で、引張状態における弾性係数を算定するものとした。具体的には、4つのゲージの平均ひずみを用いて、引張強度の30%以下の応力状態での応力-ひずみ曲線の平均勾配から弾性係数を算出した（図-3.18参照）。表-3.5に各載荷速度毎に直接引張試験における弾性係数の算定結果を示す。なお、表の空欄は引張試験自体を失敗した4例と、明かにひずみの計測不良と認められる2例である。表より、載荷速度1 kgf/cm<sup>2</sup>/secの引張試験の弾性係数は平均値が421,000kgf/cm<sup>2</sup>となり、圧縮試験時の弾性係数よりやや大きい値となった。しかし、圧縮試験と引張試験の弾性係数は異なる方法で算定しており単純に比較することはできない。そこで、圧縮試験も載荷初期（25kgf/cm<sup>2</sup>まで）の応力-ひずみ曲線の平均勾配による弾性係数を算定し直し、表-3.6に示した。表より、圧縮試験の弾性係数は平均値が422,000kgf/cm<sup>2</sup>となり、載荷速度1 kgf/cm<sup>2</sup>/secの引張試験での弾性係数と極めて近い値となった。

一方、図-3. 19は、載荷速度と弾性係数の関係を示したものである。これによると、弾性係数は載荷速度の増加に伴ってわずかに増加することがわかる。また、図-3. 20は、載荷速度  $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  の引張試験の引張強度と弾性係数を基準として、引張強度と弾性係数の載荷速度に伴う伸び率を比較したものである。これによると、載荷速度の増加に伴う弾性係数の伸び率は引張強度の伸び率に比べてかなり小さいことがわかる。

表-3. 4 局部破壊応力と平均ひずみ線形限界応力（載荷速度を変えた直接引張試験）

| 載荷速度<br>( $\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ ) | 供試体<br>番号 | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 局部破壊応力( $\text{kgf/cm}^2$ ) |            |            |            | 平均ひずみ<br>線形限界応力<br>$\sigma_m(\text{kgf/cm}^2)$ |
|------------------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------------------------------------------|
|                                          |           |                               | $\sigma_1$                  | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $\sigma_4$ |                                                |
| 1                                        | 1         | 13.8                          | 5.5                         | 7.3        | 8.8        | 11.7       | 6.3                                            |
|                                          | 2         | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |
|                                          | 3         | 35.4                          | 17.8                        | 19.1       | 26.3       | 32.5       | 18.3                                           |
|                                          | 4         | 34.7                          | 23.4                        | 29.3       | 30.6       | 32.5       | 23.8                                           |
|                                          | 5         | 13.2                          | 4.3                         | 6.3        | 6.8        | 7.3        | 5.1                                            |
|                                          | 6         | 16.6                          | 8.3                         | 14.2       | 15.1       | 15.7       | 8.3                                            |
|                                          | 7         | 26.3                          | 10.5                        | 14.1       | 14.3       | 16.0       | 16.0                                           |
|                                          | 8         | 23.5                          | 7.1                         | 8.8        | 11.2       | 11.4       | 11.2                                           |
|                                          | 9         | 16.2                          | 8.5                         | 9.0        | 9.7        | 10.6       | 10.6                                           |
|                                          | 10        | 33.2                          | 15.7                        | 15.7       | 25.3       | 26.1       | 15.7                                           |
| 10                                       | 1         | 31.2                          | 21.9                        | 24.5       | 25.6       | 25.6       | 24.5                                           |
|                                          | 2         | 12.7                          | 4.1                         | 4.4        | 7.2        | 8.9        | 8.0                                            |
|                                          | 3         | 29.1                          | 14.8                        | 16.6       | 22.2       | 27.8       | 14.8                                           |
|                                          | 4         | 21.8                          | 9.0                         | 12.0       | 12.4       | 20.6       | 18.6                                           |
|                                          | 5         | 20.1                          | 6.1                         | 12.2       | 12.8       | 15.6       | 7.4                                            |
|                                          | 6         | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |
|                                          | 7         | 34.2                          | 12.9                        | 13.5       | 19.1       | 25.6       | 21.4                                           |
|                                          | 8         | 19.5                          | 6.0                         | 6.0        | 10.6       | 12.6       | 7.0                                            |
|                                          | 9         | 28.2                          | 12.2                        | 17.4       | 20.7       | 20.7       | 13.1                                           |
|                                          | 10        | 24.3                          | 12.3                        | 12.8       | 17.9       | 21.7       | 19.0                                           |
| 100                                      | 1         | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |
|                                          | 2         | 43.3                          | 16.7                        | 33.3       | 34.3       | 38.7       | 27.7                                           |
|                                          | 3         | 31.3                          | 14.8                        | 18.7       | 23.7       | 25.1       | 17.5                                           |
|                                          | 4         | 19.8                          | 4.7                         | 9.3        | 10.2       | 11.3       | 6.6                                            |
|                                          | 5         | 24.3                          | 11.4                        | 11.4       | 14.8       | 16.0       | 11.4                                           |
|                                          | 6         | 18.3                          | 6.5                         | 6.8        | 8.2        | 8.7        | 6.8                                            |
|                                          | 7         | 27.8                          | 8.0                         | 8.6        | 13.0       | 15.4       | 8.6                                            |
|                                          | 8         | 23.9                          | 10.9                        | 11.1       | 12.2       | 14.9       | 10.9                                           |
|                                          | 9         | 43.6                          | 14.9                        | 18.7       | 28.3       | 32.3       | 14.9                                           |
|                                          | 10        | 31.1                          | 10.5                        | 16.3       | 21.2       | 25.9       | 12.3                                           |
| 1000                                     | 1         | 22.9                          | 16.8                        | 19.1       | 21.2       | 21.5       | 19.1                                           |
|                                          | 2         | 37.0                          | 26.1                        | 27.2       | 29.9       | 30.7       | 26.1                                           |
|                                          | 3         | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |
|                                          | 4         | 35.1                          | 17.2                        | 28.3       | 28.3       | 28.3       | 21.1                                           |
|                                          | 5         | 39.0                          | 18.0                        | 24.3       | 27.7       | 32.8       | 22.1                                           |
|                                          | 6         | 25.1                          | 7.0                         | 7.9        | 17.6       | 23.6       | 7.6                                            |
|                                          | 7         | 44.5                          | 13.9                        | 35.9       | 37.9       | 41.7       | 19.4                                           |
|                                          | 8         | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |
|                                          | 9         | 36.2                          | 17.6                        | 27.9       | 28.3       | 29.1       | 20.7                                           |
|                                          | 10        | —                             | —                           | —          | —          | —          | —                                              |

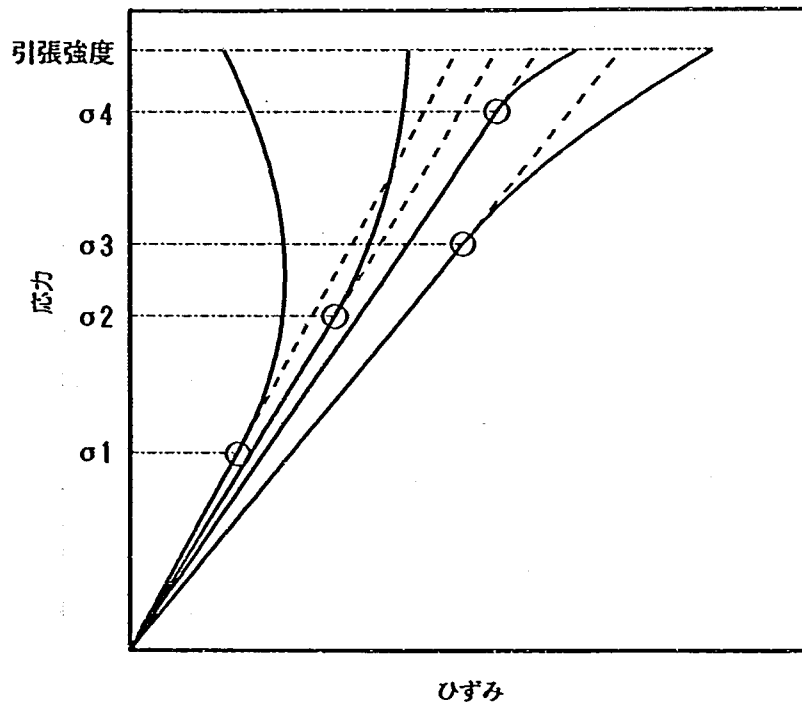


図-3.6 局部破壊応力の定義  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

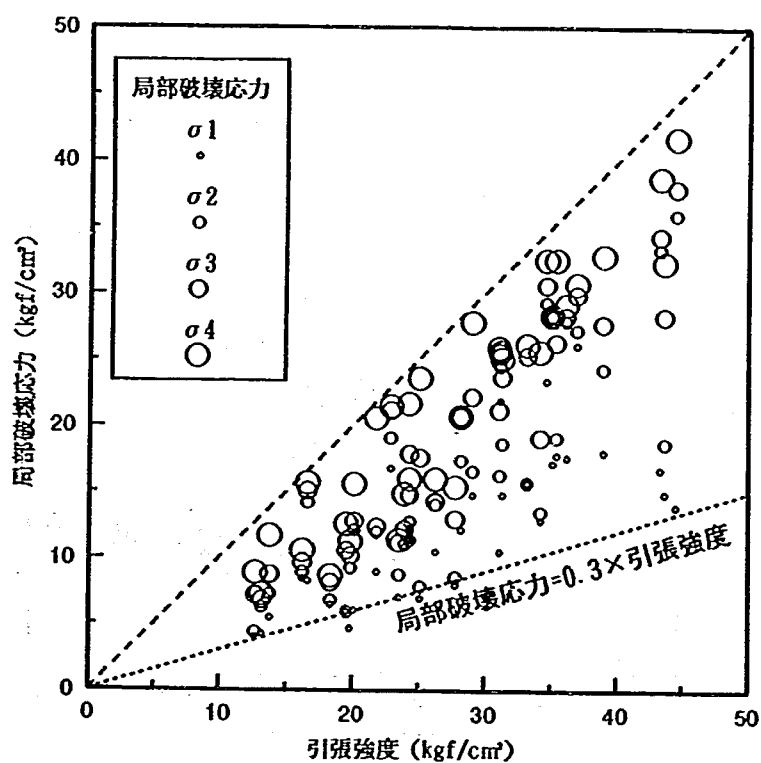


図-3.7 引張強度と局部破壊応力の関係  
(載荷速度を変えた直接引張試験, 全載荷速度)

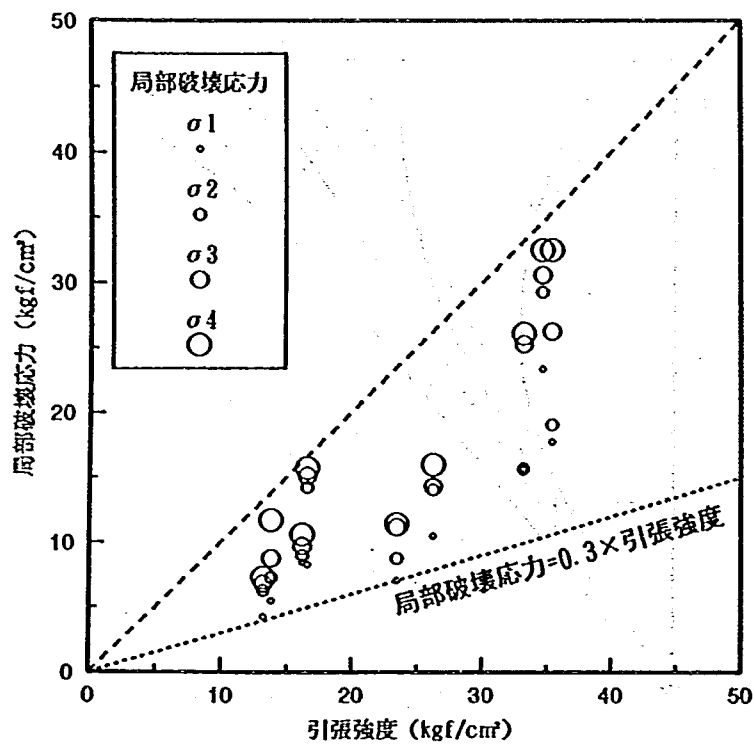


図-3.8 引張強度と局部破壊応力の関係  
(載荷応力速度 1 kgf/cm²/sec)

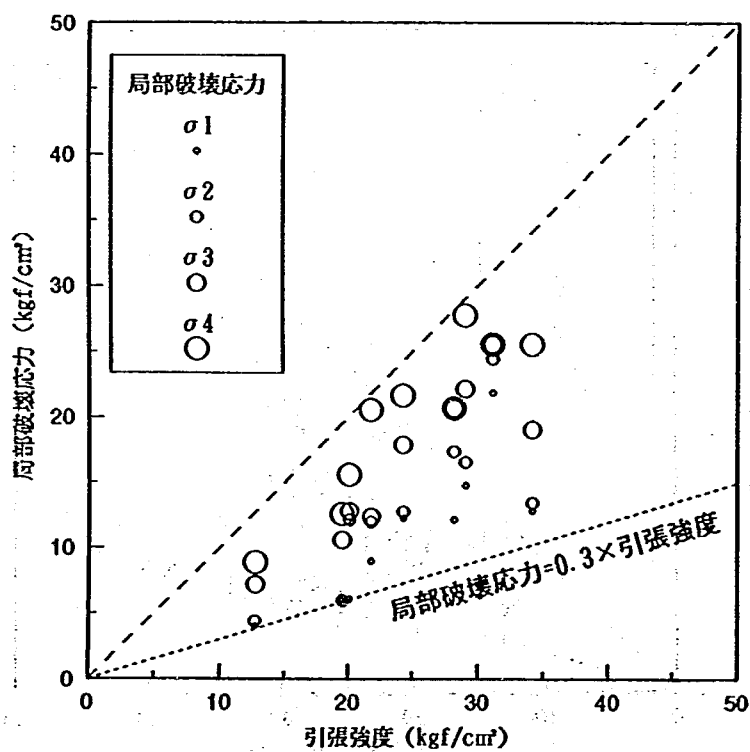


図-3.9 引張強度と局部破壊応力の関係  
(載荷応力速度 10kgf/cm²/sec)

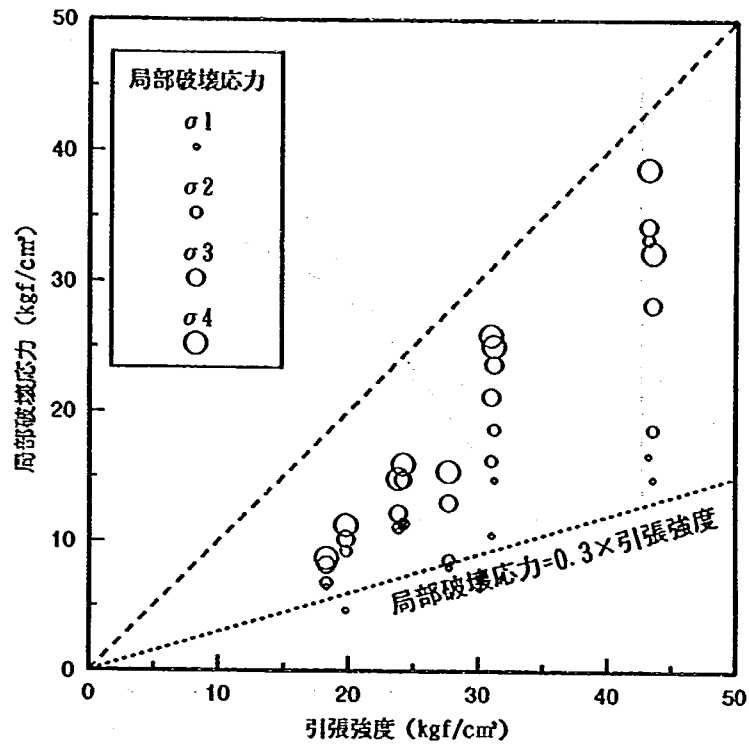


図-3.10 引張強度と局部破壊応力の関係  
(載荷応力速度 100kgf/cm<sup>2</sup>/sec)

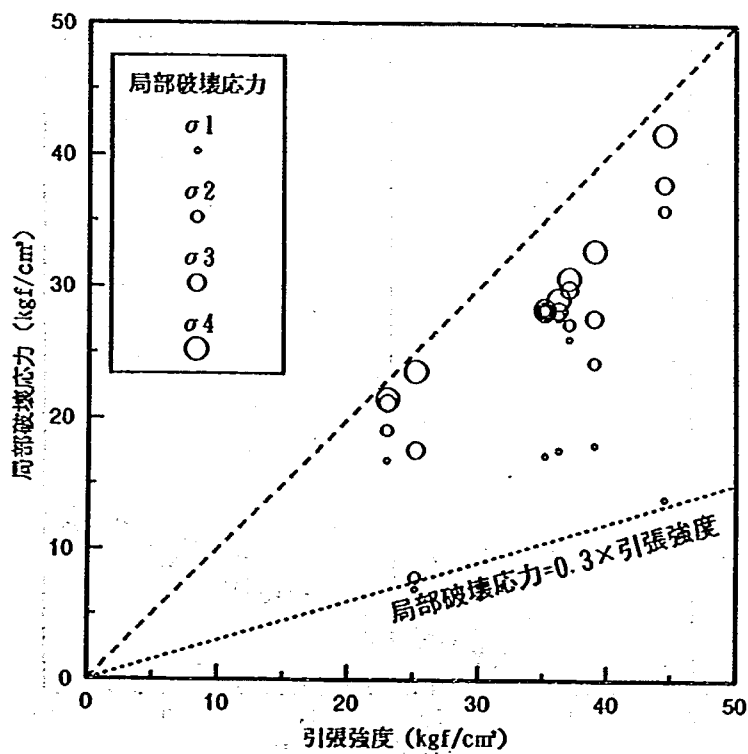


図-3.11 引張強度と局部破壊応力の関係  
(載荷応力速度 1000kgf/cm<sup>2</sup>/sec)

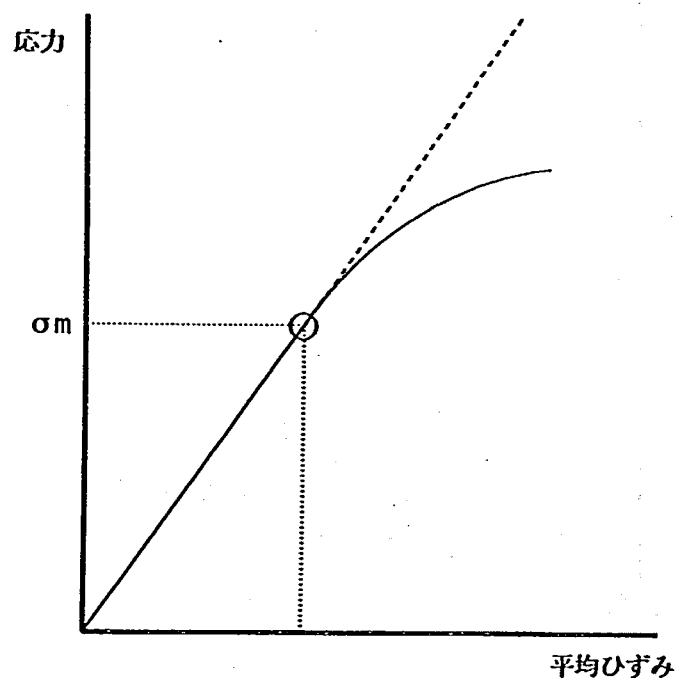


図-3.12 平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の定義

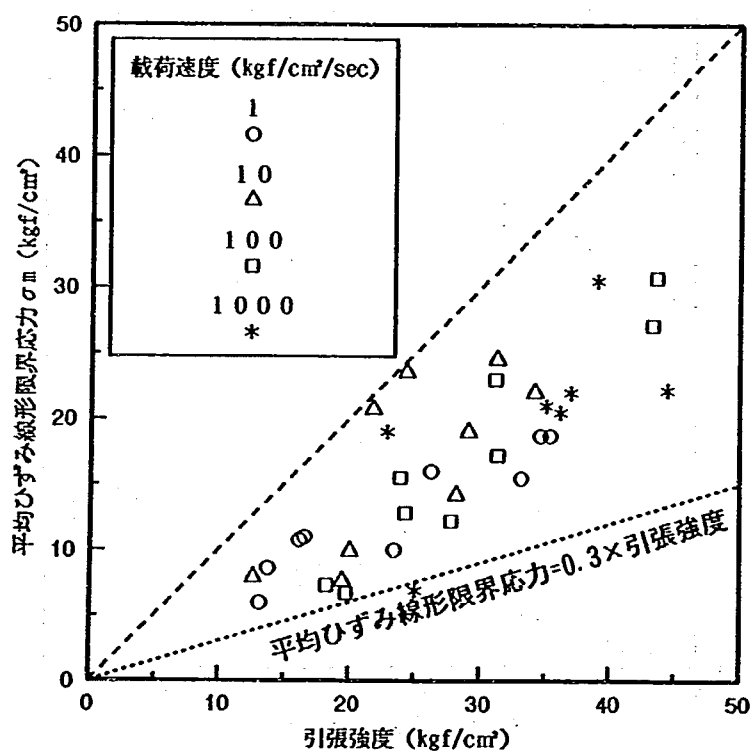


図-3.13 引張強度と平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の定義  
(载荷速度を変えた直接引張試験)

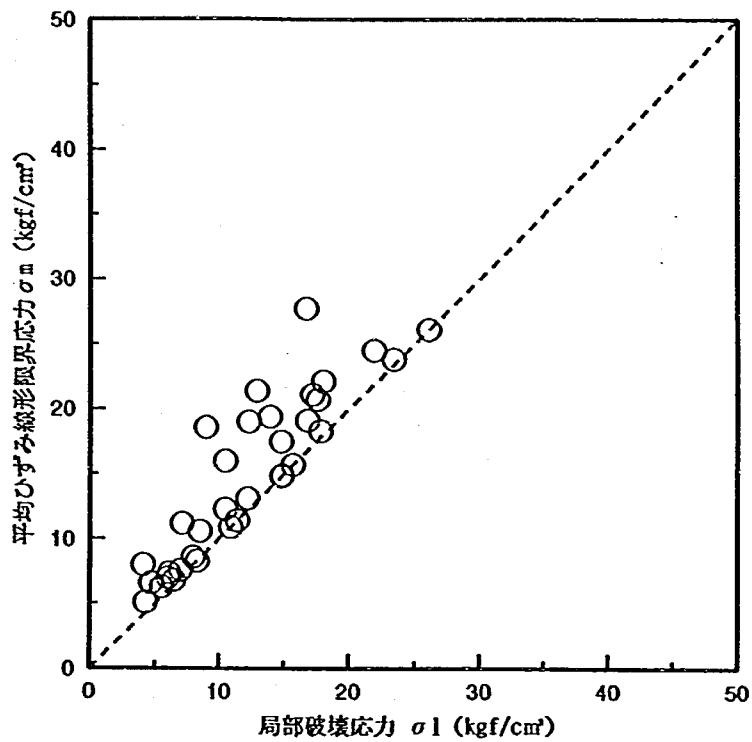


図-3.14 局部破壊応力  $\sigma_1$  と平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の関係  
(载荷速度を変えた直接引張試験)

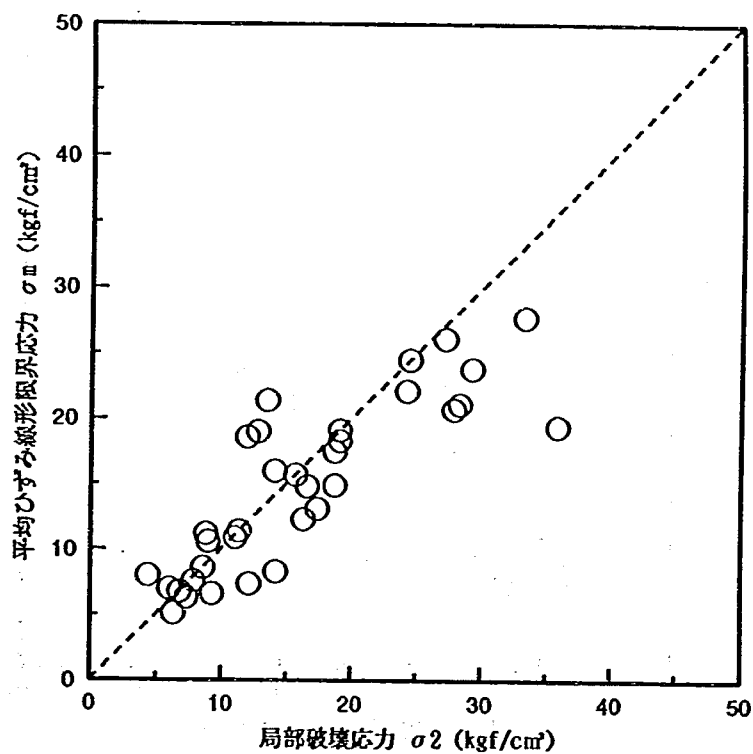


図-3.15 局部破壊応力  $\sigma_2$  と平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の関係  
(载荷速度を変えた直接引張試験)

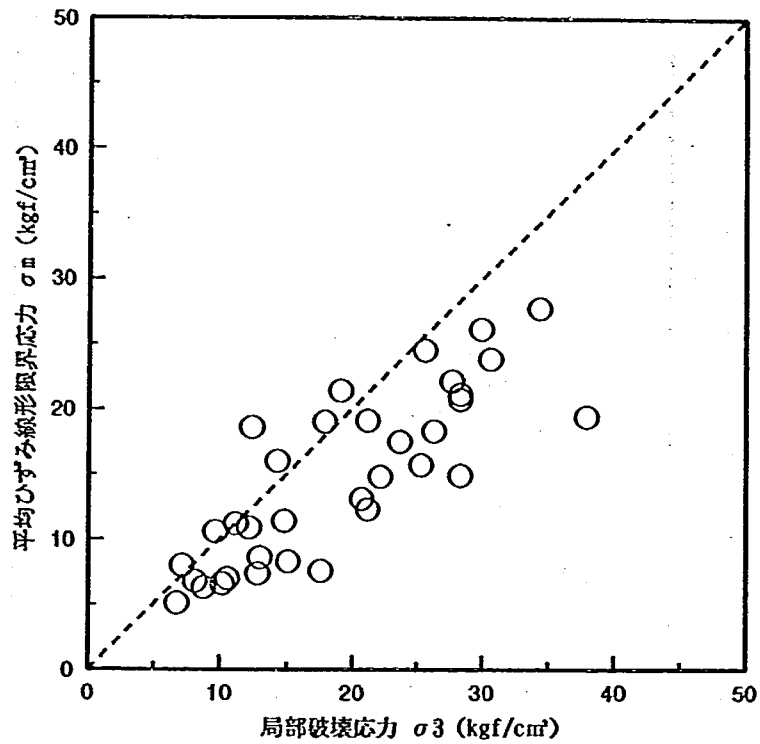


図-3.16 局部破壊応力  $\sigma_3$  と平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の関係  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

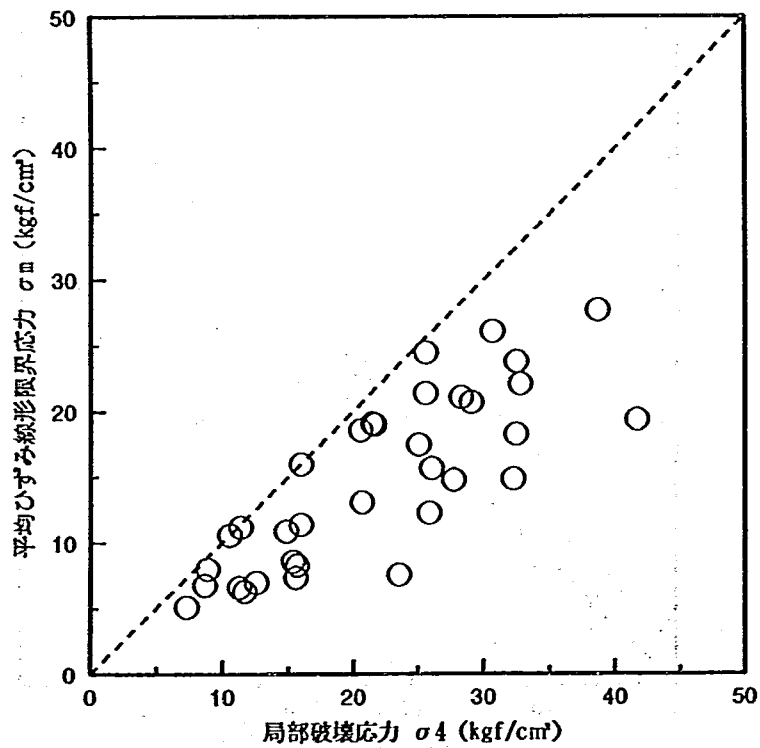


図-3.17 局部破壊応力  $\sigma_4$  と平均ひずみ線形限界応力  $\sigma_m$  の関係  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

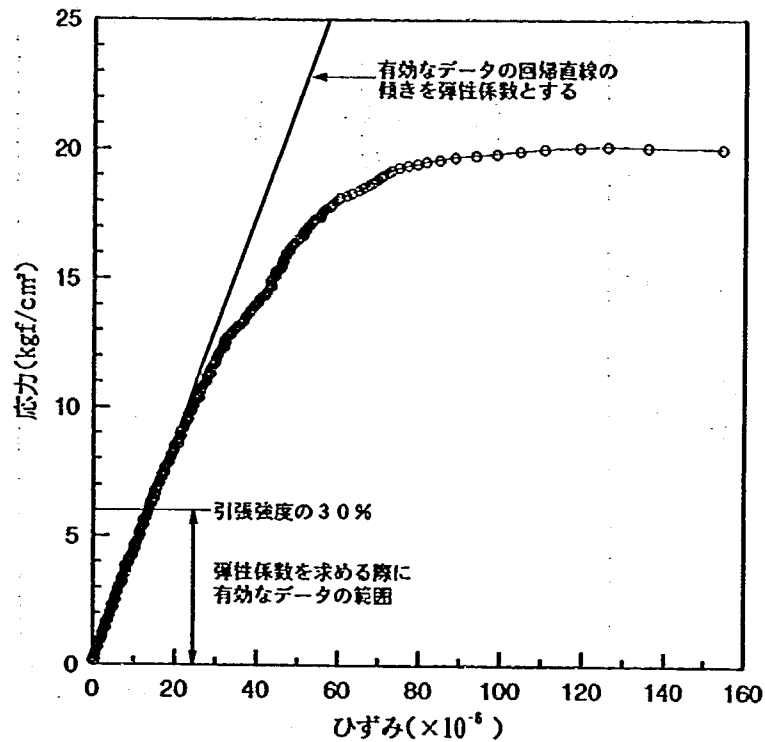


図-3.18 弾性係数の定義  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

表-3.5 載荷速度毎の弾性係数 (載荷速度を変えた直接引張試験)

| 打設バッチ | 供試体番号 | 載荷速度(kgf/cm <sup>2</sup> /sec) |         |         |         |
|-------|-------|--------------------------------|---------|---------|---------|
|       |       | 1                              | 10      | 100     | 1000    |
|       |       | 弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )     |         |         |         |
| 1     | 1     | 432,000                        | 395,000 | —       | 469,000 |
|       | 2     | —                              | 415,000 | —       | 452,000 |
| 2     | 3     | 404,000                        | 449,000 | 396,000 | —       |
|       | 4     | 431,000                        | 415,000 | 443,000 | 459,000 |
| 3     | 5     | 437,000                        | 430,000 | 459,000 | 443,000 |
|       | 6     | 409,000                        | 429,000 | 426,000 | 374,000 |
| 4     | 7     | 414,000                        | 471,000 | 431,000 | 417,000 |
|       | 8     | 427,000                        | 399,000 | 417,000 | —       |
| 5     | 9     | 427,000                        | 402,000 | 411,000 | 442,000 |
|       | 10    | 407,000                        | 456,000 | 441,000 | —       |
| 平均    |       | 421,000                        | 426,000 | 428,000 | 437,000 |
| 標準偏差  |       | 12,000                         | 24,000  | 19,000  | 30,000  |
| 変動係数  |       | 0.028                          | 0.057   | 0.044   | 0.068   |

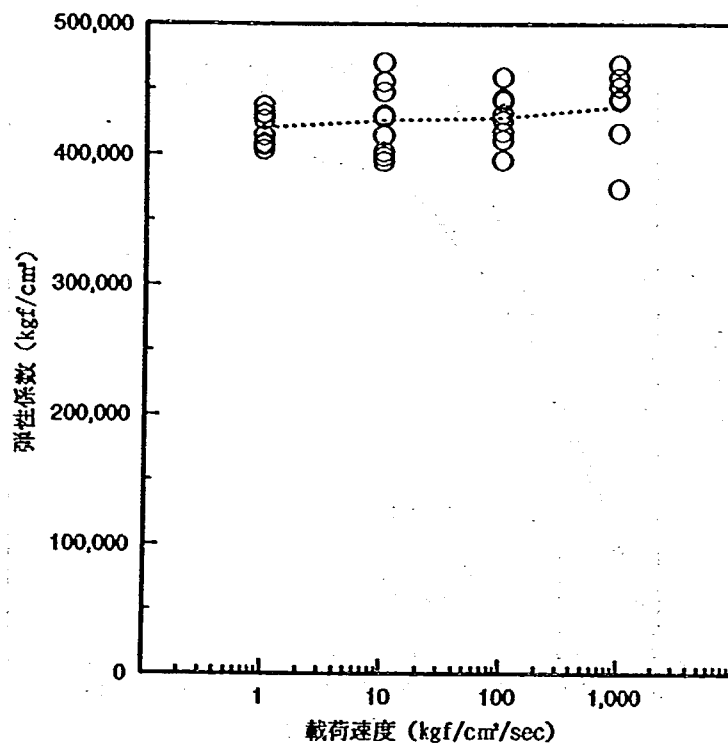


図-3.19 載荷速度と弾性係数の関係  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

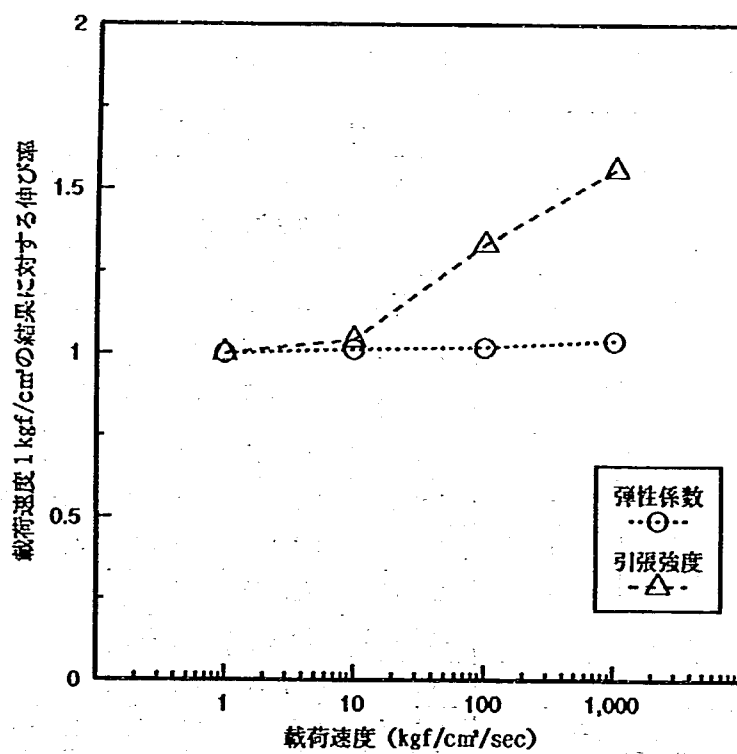


図-3.20 引張強度と弾性係数の伸び率  
(載荷速度を変えた直接引張試験)

表-3.6 一軸圧縮試験における弾性係数  
(引張試験における弾性係数の算出方法による)

| 打設バッチ   | 供試体番号 | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|-------|--------------------------------|
| 1       | 1     | 439,000                        |
|         | 2     | 424,000                        |
|         | 3     | 430,000                        |
| 2       | 4     | 429,000                        |
|         | 5     | 439,000                        |
|         | 6     | 421,000                        |
| 3       | 7     | 443,000                        |
|         | 8     | 407,000                        |
|         | 9     | 401,000                        |
| 4       | 10    | 401,000                        |
|         | 11    | 418,000                        |
|         | 12    | 400,000                        |
| 5       | 13    | 420,000                        |
|         | 14    | 413,000                        |
|         | 15    | 449,000                        |
| 平 均     |       | 422,000                        |
| 標 準 偏 差 |       | 150,000                        |
| 変 動 係 数 |       | 0.036                          |

### 3.3 正弦波荷重による交番載荷試験

#### 3.3.1 載荷周波数と引張強度の関係

表-3.7に正弦波荷重による交番載荷試験で得られた引張強度を示した。なお、ここで交番載荷試験での引張強度とは、図-3.21に示すように破壊が生じた直前の応力波形の最大値とした。また、図-3.22に載荷周波数と引張強度の関係を示す。なお、図には、比較のため、載荷周波数0の位置に載荷速度  $1 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$  での直接引張試験の結果を示した。これによると、載荷周波数2 Hzで極小値をとるような特性となっているが、載荷周波数1 Hzの引張強度のばらつきが大きいこと、載荷周波数の設定ケースが少ないことを考慮すれば、その特性を正しいものと断定することは難しい。また、引張強度の下限値および上限値と荷重周波数の関係も明確ではない。また、本試験で得られた各載荷周波数毎の引張強度の平均値と破壊直前の応力載荷サイクルにおける応力増加時（あるいは応力減少時）の載荷速度の平均値  $4\pi\sigma_s f_s t_f$ （ここで、 $t_f$ は載荷から破壊までに要した時間）の関係を示したものが図-3.23である。なお、図には参考までに3.2節で示した載荷速度を変えた直接引張試験の結果も示してある。図によれば、本試験のような交番載荷による動的引張強度は載荷速度を変えた単調な動的引張強度に比べて小さくなるように見える。

表-3.7 載荷周波数毎の引張強度（正弦波荷重による交番載荷試験）

| 打設パッチ   | 供試体番号 | 載荷周波数(Hz) |      |       | 載荷周波数(Hz)                  |      |      |
|---------|-------|-----------|------|-------|----------------------------|------|------|
|         |       | 1         | 2    | 5     | 1                          | 2    | 5    |
|         |       | 材 令(日)    |      |       | 引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |      |
| 1       | 1     | 96        | 97   | 98    | 21.2                       | 8.9  | 18.1 |
|         | 2     | 96        | 97   | 98    | 15.9                       | 10.8 | 18.4 |
| 2       | 3     | 96        | 97   | 98    | 8.8                        | 21.4 | 23.7 |
|         | 4     | 96        | 97   | 98    | 26.1                       | 14.0 | 27.2 |
| 3       | 5     | 92        | 92   | 92    | 42.6                       | 17.8 | 16.3 |
|         | 6     | 93        | 93   | 93    | 14.2                       | 12.5 | 15.3 |
| 4       | 7     | 104       | 105  | 106   | 28.1                       | 13.2 | 6.5  |
|         | 8     | —         | 105  | 106   | —                          | 14.8 | 15.7 |
| 5       | 9     | 104       | 105  | 106   | 23.5                       | 6.8  | 6.4  |
|         | 10    | 104       | 105  | 106   | 17.3                       | 21.1 | 29.9 |
| 平 均     |       | 97.9      | 99.3 | 100.1 | 22.0                       | 14.1 | 17.8 |
| 標 準 偏 差 |       | 4.5       | 5.0  | 5.2   | 9.3                        | 4.6  | 7.4  |
| 変 動 係 数 |       | —         | —    | —     | 0.42                       | 0.33 | 0.41 |

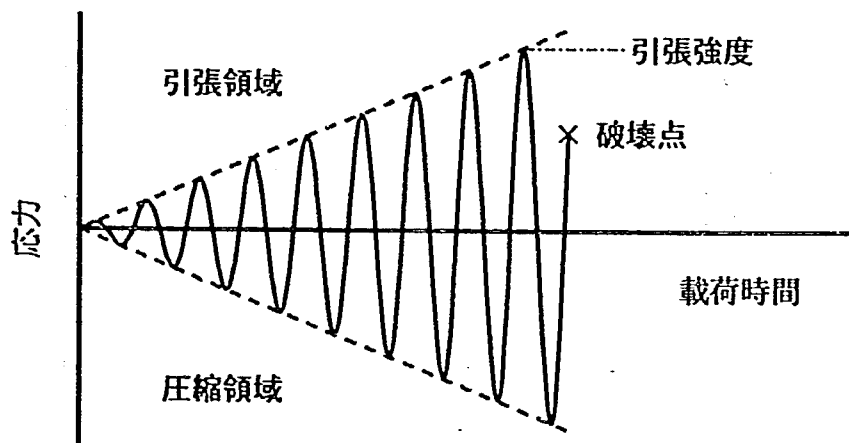


図-3.21 交番载荷試験における引張強度の定義

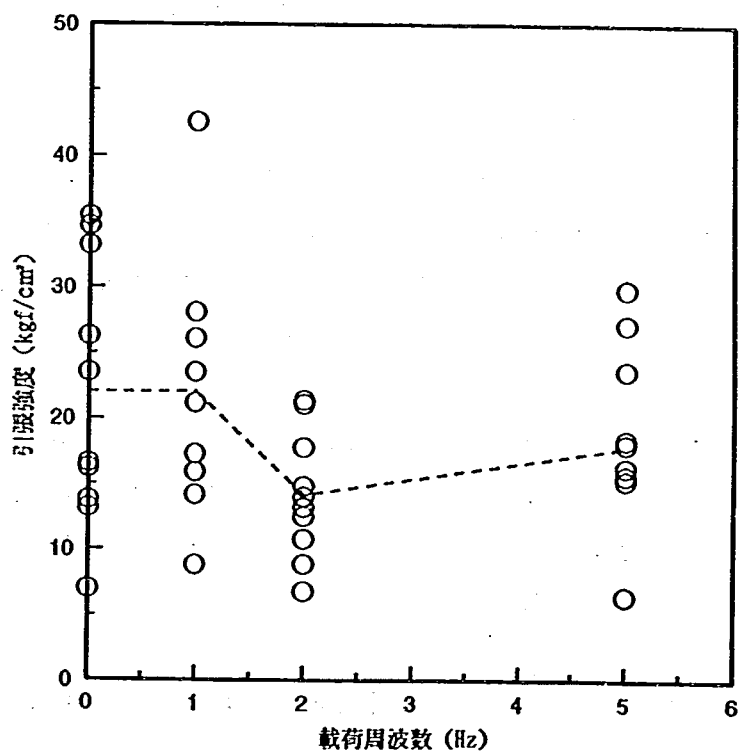


図-3.22 载荷周波数と引張強度の関係  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

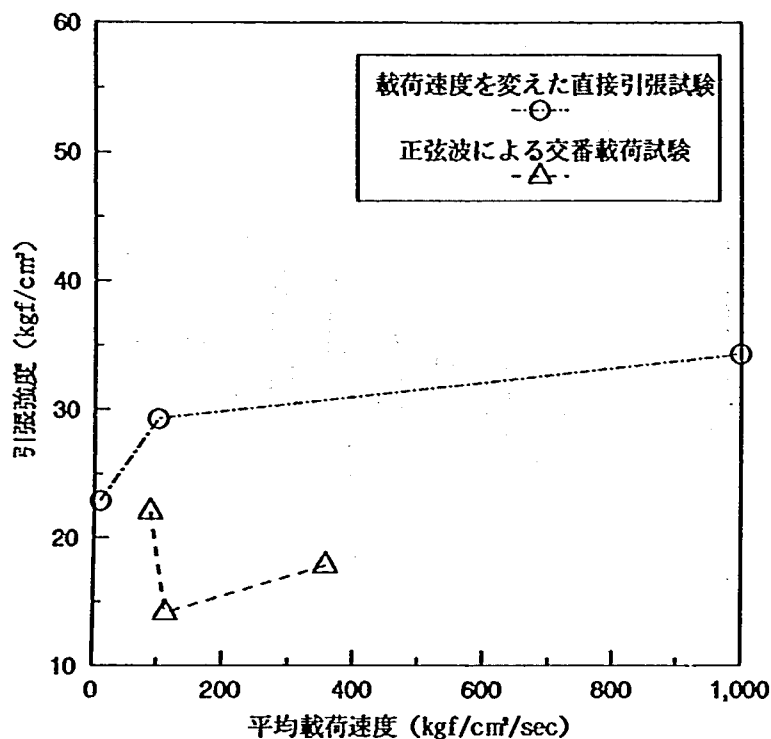


図-3.23 平均荷重速度と引張強度の関係  
(正弦波荷重による交番荷重試験)

### 3.3.2 ひずみ振幅と弾性係数の関係

荷重速度を変えた直接引張試験での応力・ひずみ関係と同様に、交番荷重試験でも応力とひずみの直線関係が応力レベルが低い段階で失われることが多い。この現象は、交番荷重試験においては、ひずみの時刻歴図 ( $t-\epsilon$  図) でひずみ振幅の増加割合が変化していく現象となって現れるが、交番荷重試験の場合には、この現象に加えて、ひずみ振幅の中心が  $\epsilon = 0$  から圧縮または引張側へずれていく現象が認められる (図-3.24参照)。

以下、この点について4つのひずみゲージで計測されたひずみの平均値について詳しく検討する。なお、ここで、 $t-\epsilon$  図におけるある時刻  $t$  のひずみ振幅とひずみ振幅の中心を図-3.24に示すように定義する。図-3.25、図-3.26、図-3.27、図-3.28は応力振幅とひずみ振幅の関係、応力振幅とひずみ振幅中心の関係について代表的な例を示したものである。

図-3.25 : ひずみ振幅の中心は破壊に至るまでほとんど  $\epsilon = 0$  にあり、ひずみ振幅と応力振幅がほぼ線形な関係にある例。

図-3.26 : ある応力からひずみ振幅の中心が急激に引張側へずれ始め、応力振幅とひずみ振幅は初めは線形な関係にあるが、ひずみ振幅の中心がずれ始める応力から線形な関係が崩れる例。

図-3.27 : ある応力からひずみ振幅の中心が引張側へずれ始めるが、応力振幅とひずみ振幅はほぼ線形な関係を保つ例。

図-3.28 : ある応力からひずみ振幅の中心が圧縮側へずれ始める例。

今回の実験結果ではひずみ振幅の中心が引張側に移行するものと圧縮側に移行するものがあり、このうち引張側にひずみ振幅の中心が移行するものが全体の約70%を占めている。また、振幅の中心の  $\epsilon = 0$  からのずれの大きさはさまざまである。表-3.8にひずみ振幅の中心がずれ始める応力（ひずみ中心浮動開始応力と定義する）とひずみ振幅と応力振幅の線形関係が崩れ始める応力（ひずみ振幅線形限界応力と定義する）を示した。また、図-3.29は引張強度とひずみ中心浮動開始応力の関係を示したものである。これによると、ひずみ振幅の中心がずれ始める現象は引張強度の30%以下では発生していない。次に、図-3.30は、引張強度とひずみ振幅線形限界応力の関係を示したものである。ひずみ振幅線形限界応力は引張強度の50%以下ではほとんど発生していない。また、図-3.31は、ひずみ中心浮動開始応力とひずみ振幅線形限界応力を比較したものであるが、ひずみ振幅線形限界応力はひずみの中心浮動開始応力よりも高い応力レベルにあることがわかる。

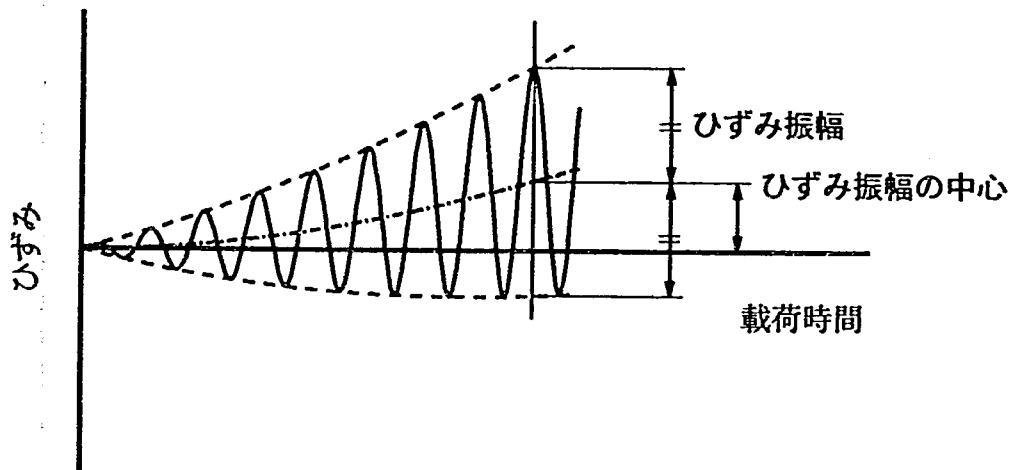


図-3.24 ひずみ振幅とひずみ振幅の中心の定義  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

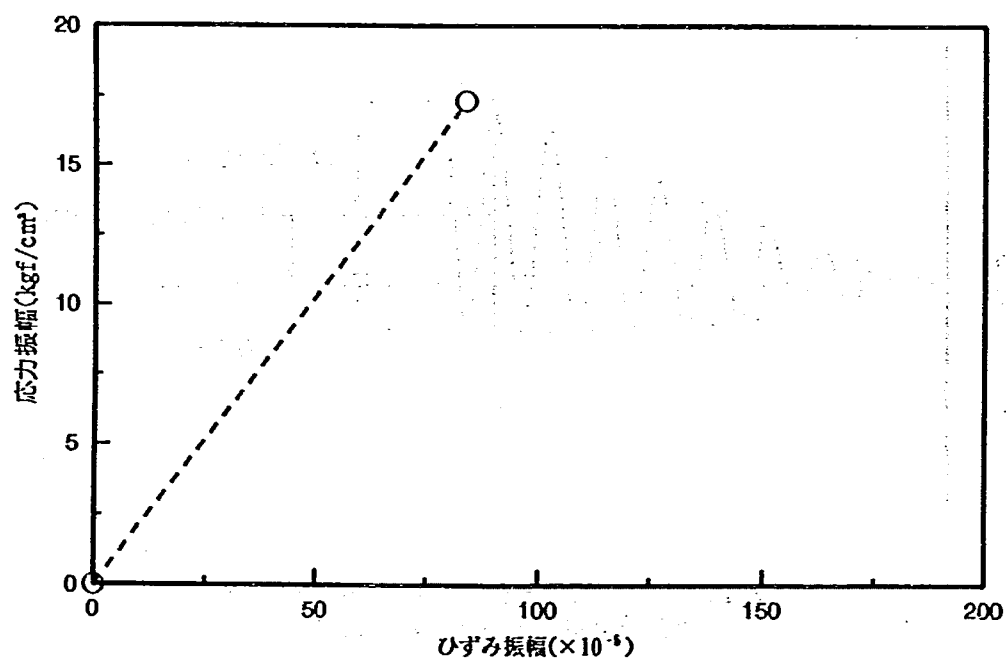
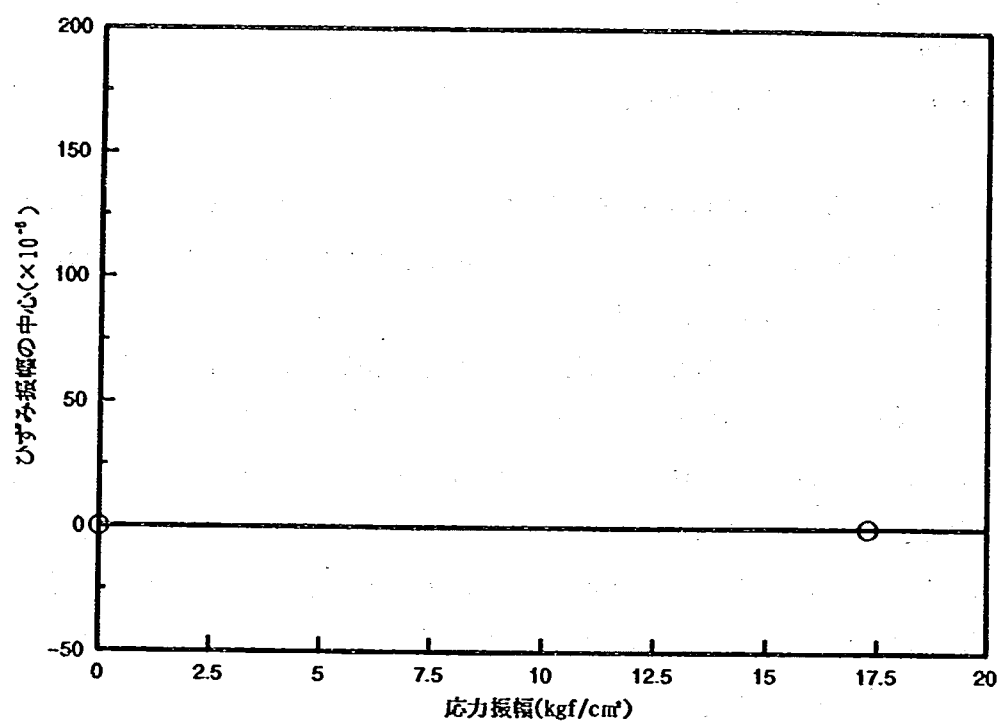


図-3.25 ひずみの挙動 (その1)  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

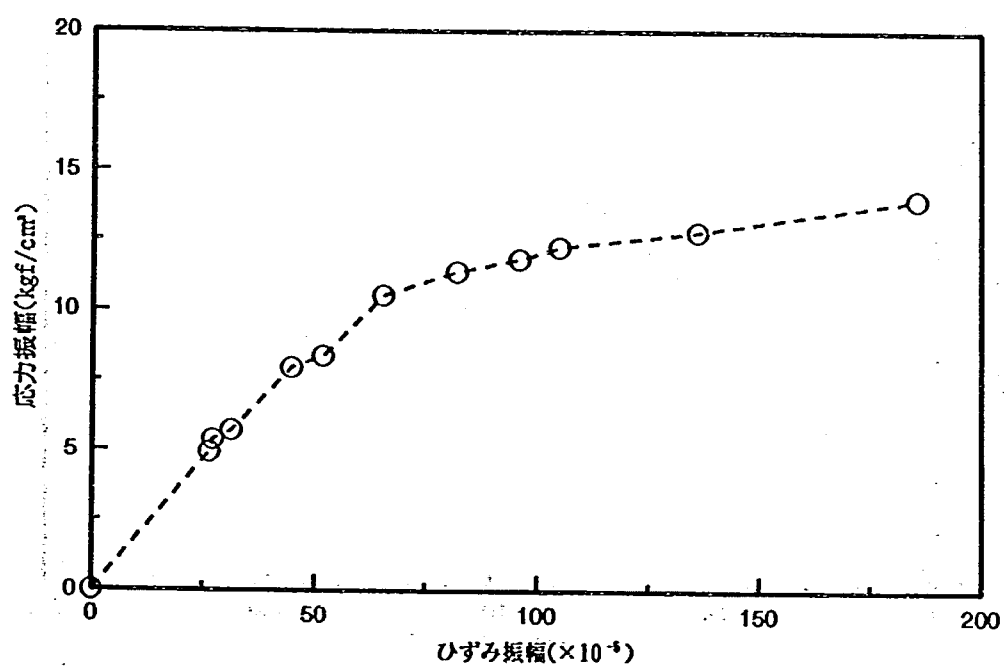
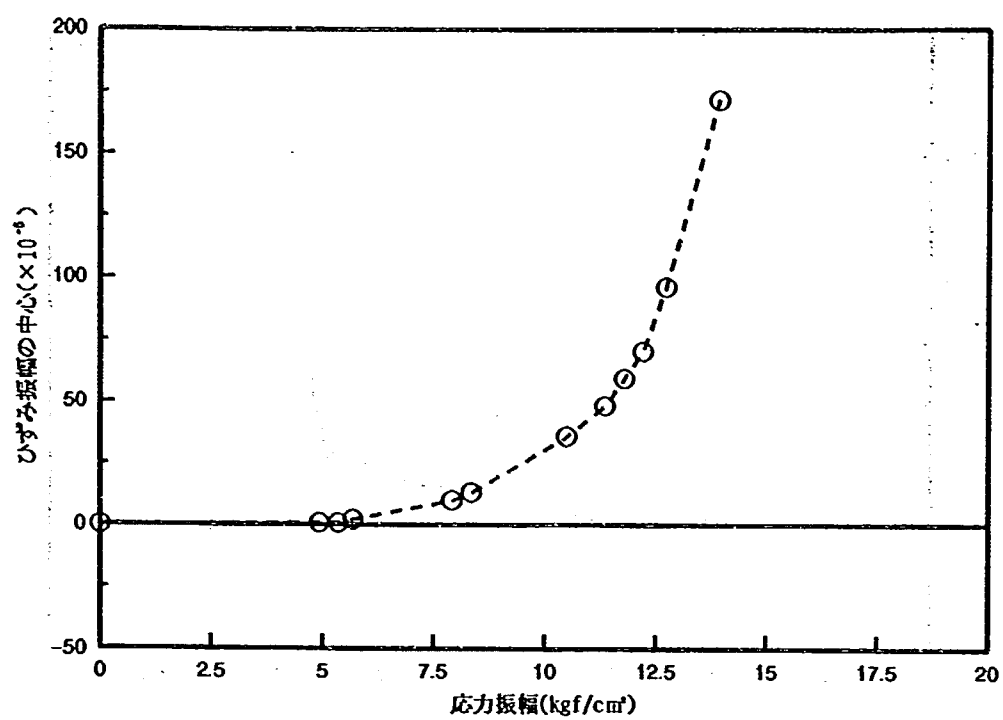


図-3.26 ひずみの挙動 (その2)  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

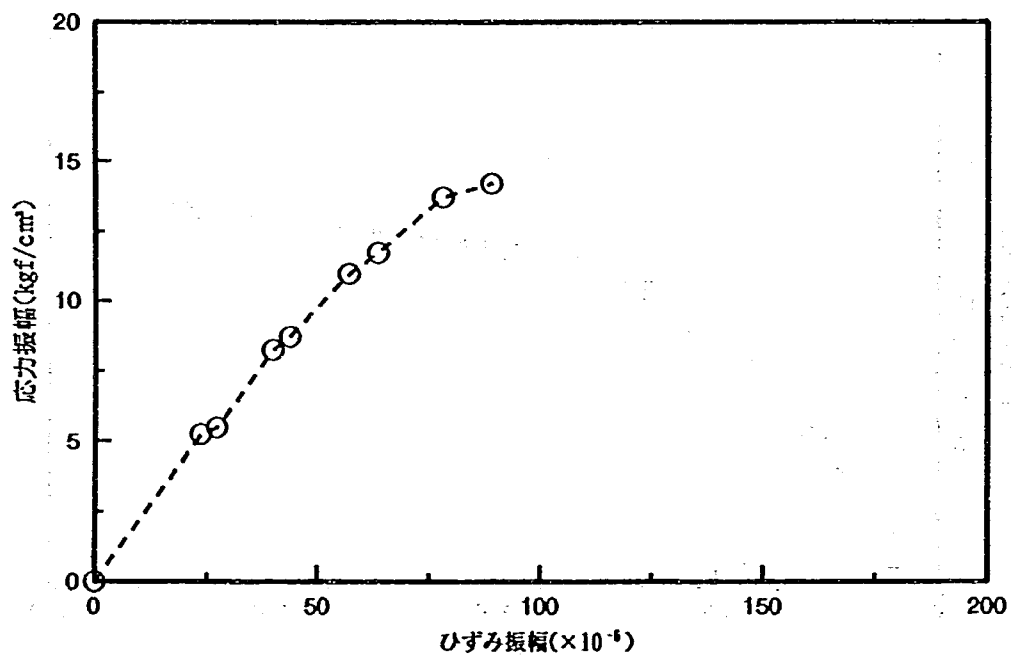
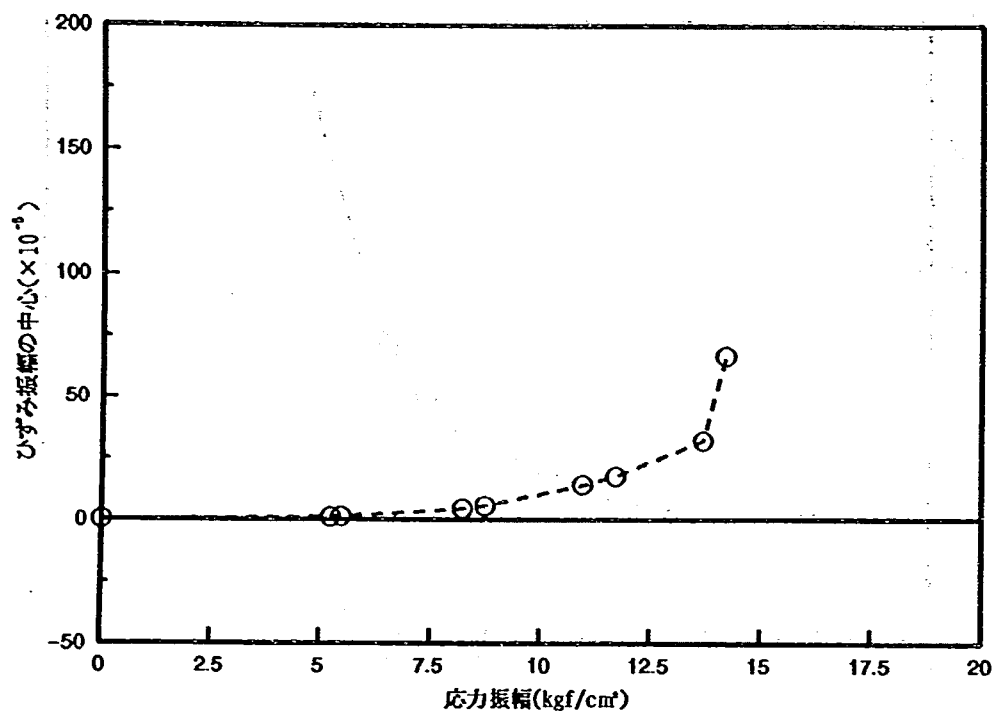


図-3.27 ひずみの挙動 (その3)  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

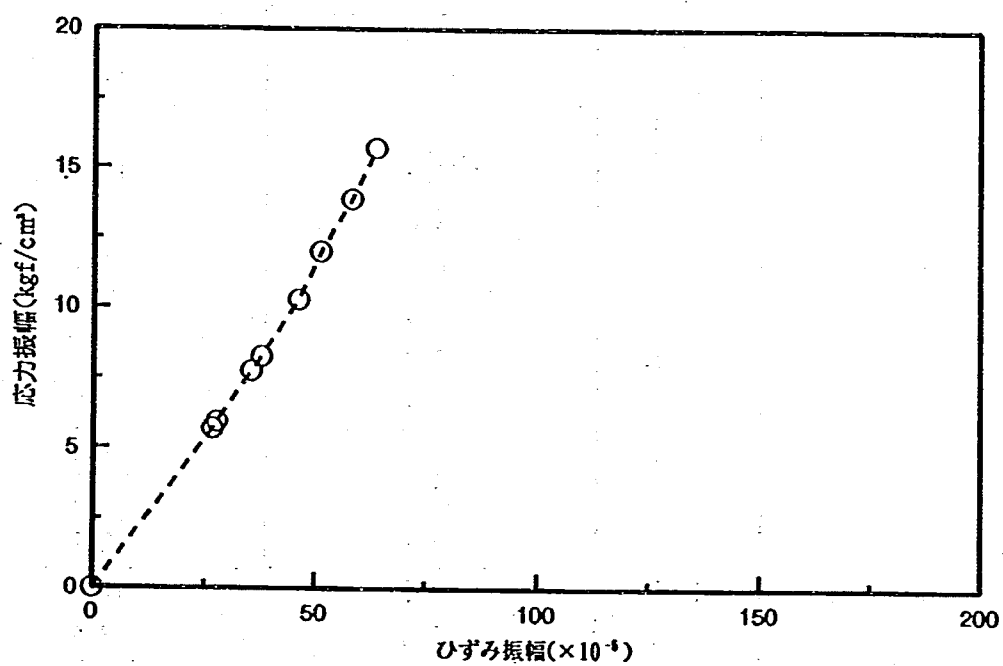
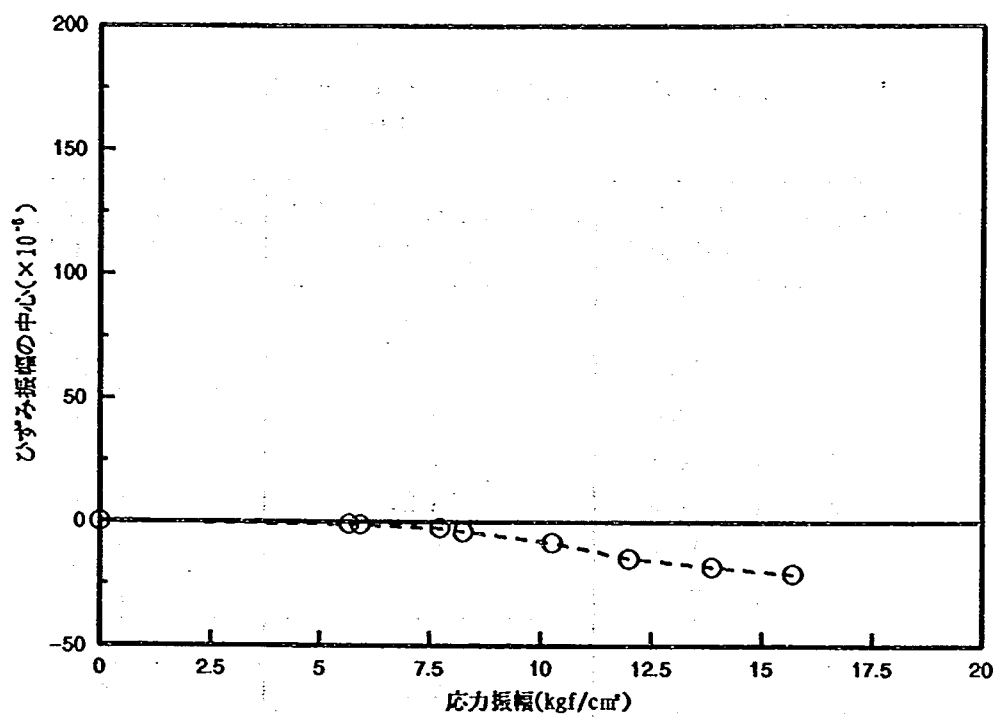


図-3.28 ひずみの挙動 (その4)  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

表-3.8 ひずみ中心浮動開始応力とひずみ振幅線形限界応力  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

| 载荷周波数<br>(Hz) | 供試体番号 | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ひずみ中心浮動開始応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ひずみ振幅線形限界応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------|-------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1             | 1     | 21.2                           | 14.0                                  | 20.2                                  |
|               | 2     | 15.9                           | 5.8                                   | 7.9                                   |
|               | 3     | 8.8                            | 3.2                                   | 5.0                                   |
|               | 4     | 26.1                           | 17.6                                  | 26.1                                  |
|               | 5     | 42.6                           | 23.3                                  | 32.7                                  |
|               | 6     | 14.2                           | 5.2                                   | 11.0                                  |
|               | 7     | 28.1                           | 15.2                                  | 25.1                                  |
|               | 8     | —                              | —                                     | —                                     |
|               | 9     | 23.5                           | 19.8                                  | 22.9                                  |
|               | 10    | 17.3                           | 17.3                                  | 17.3                                  |
| 2             | 1     | 8.9                            | 6.6                                   | 7.6                                   |
|               | 2     | 10.8                           | 5.9                                   | 7.1                                   |
|               | 3     | 21.4                           | 12.8                                  | 20.2                                  |
|               | 4     | 14.0                           | 12.8                                  | 14.0                                  |
|               | 5     | 17.8                           | 11.9                                  | 16.4                                  |
|               | 6     | 12.5                           | —                                     | —                                     |
|               | 7     | 13.2                           | 11.2                                  | 12.7                                  |
|               | 8     | 14.8                           | 9.8                                   | 14.5                                  |
|               | 9     | 6.8                            | 6.8                                   | 6.8                                   |
|               | 10    | 21.1                           | 19.4                                  | 21.1                                  |
| 3             | 1     | 18.1                           | 13.9                                  | 17.1                                  |
|               | 2     | 18.4                           | 11.2                                  | 11.2                                  |
|               | 3     | 23.7                           | 22.7                                  | 21.8                                  |
|               | 4     | 27.2                           | 22.6                                  | 22.6                                  |
|               | 5     | 16.3                           | 9.4                                   | 12.1                                  |
|               | 6     | 15.3                           | 8.3                                   | 10.5                                  |
|               | 7     | 6.5                            | 6.5                                   | 6.5                                   |
|               | 8     | 15.7                           | 5.7                                   | 15.7                                  |
|               | 9     | 6.4                            | 3.5                                   | 4.5                                   |
|               | 10    | 29.9                           | 19.5                                  | 25.3                                  |

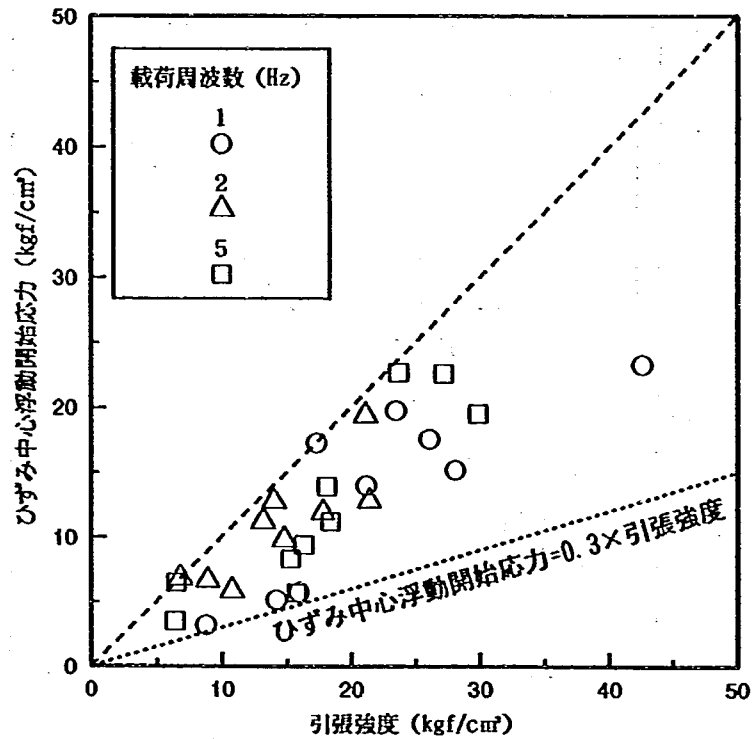


図-3.29 引張強度とひずみ中心浮動開始応力の関係  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

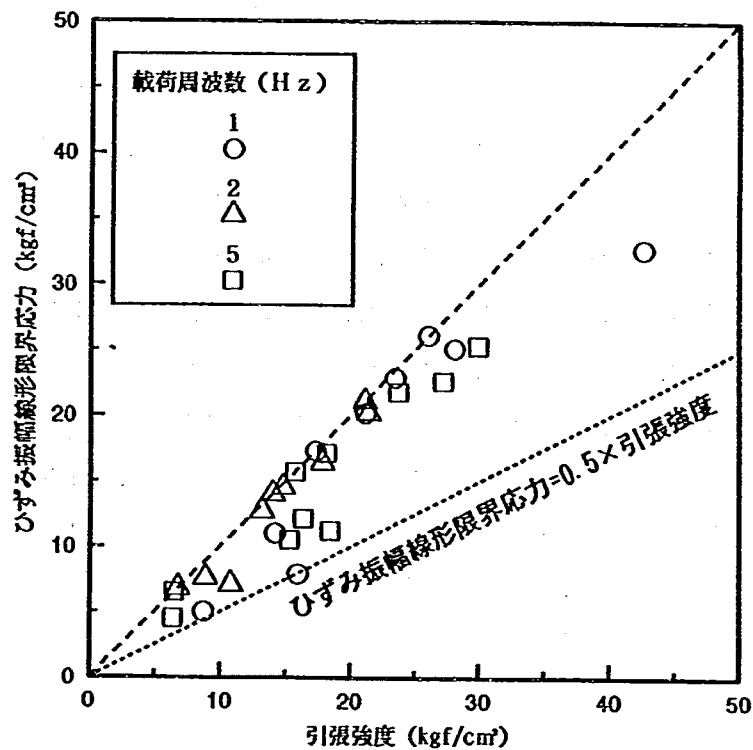


図-3.30 引張強度とひずみ振幅線形限界応力の関係  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

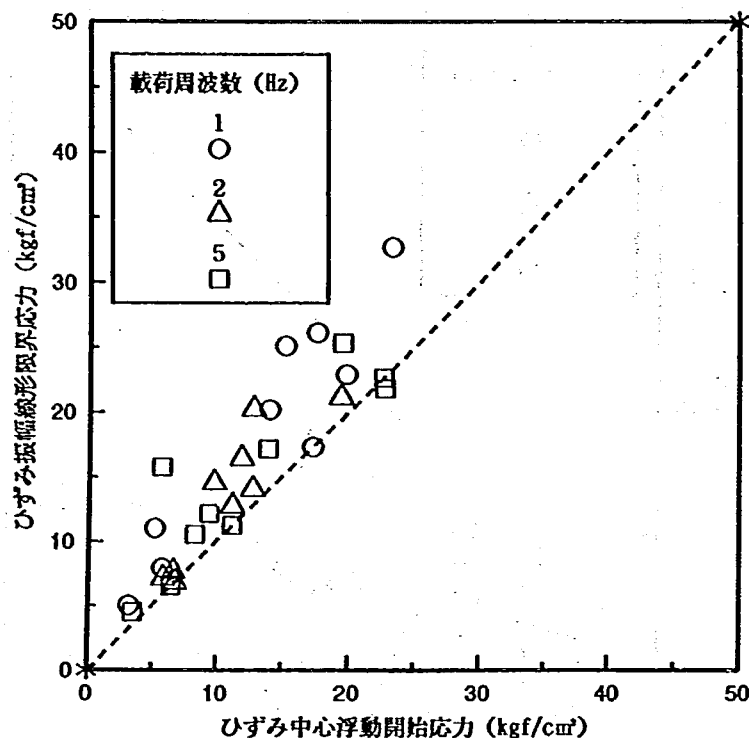


図-3.31 ひずみ中心浮動開始応力とひずみ振幅線形限界応力の関係  
(正弦波荷重による交番載荷試験)

次に、交番載荷試験における弾性係数について考察する。通常、正弦波荷重のような交番荷重を載荷したときの弾性係数は、図-3.32に示すようなある1サイクルの応力-ひずみ関係から、図中に示すような方法で求めている。しかし、本試験は、載荷応力が時間とともに変化している試験であり、応力-ひずみ曲線のループが閉じていない。また、ひずみ振幅の中心も時間とともにずれていってしまい、応力-ひずみ曲線が一定したループを示さない。そこで、ここでは平均ひずみによるひずみ振幅と応力振幅の線形性が保たれる範囲における応力振幅とひずみ振幅の比を弾性係数と定義するものとした。このようにして求めた正弦波荷重による交番載荷試験時の弾性係数の算定結果を表-3.9に示す。表によると正弦波荷重による交番載荷試験での弾性係数は $4.11 \sim 4.19 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ であった。また、図-3.33に載荷周波数と弾性係数の関係を示す。これによると、正弦波荷重による交番載荷試験におけるコンクリートの弾性係数は、載荷周波数によってほとんど変化しないことがわかる。

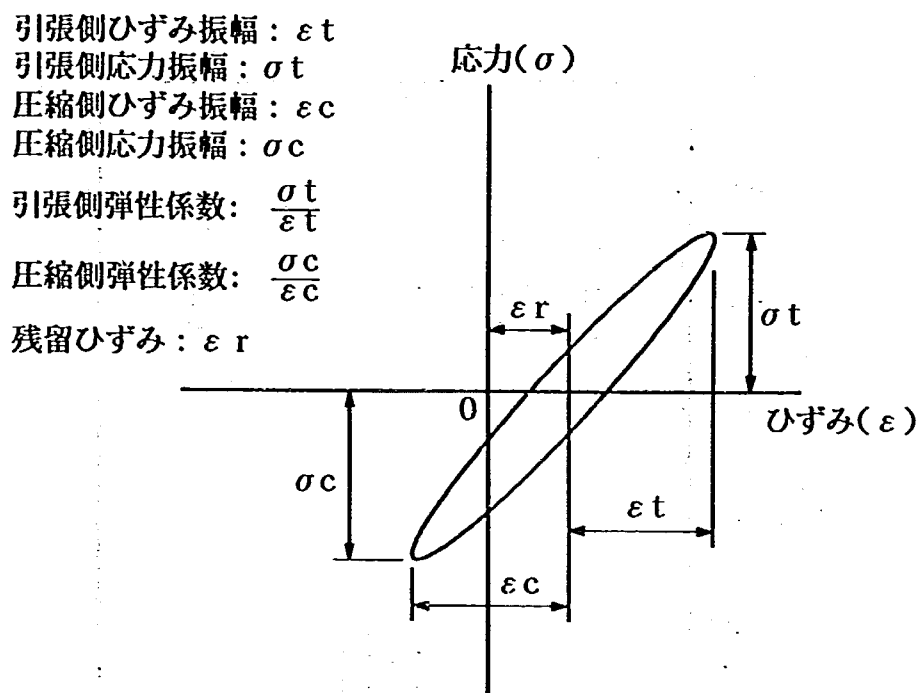


図-3.32 交番載荷における応力-ひずみ関係

表-3.9 載荷周波数毎の弾性係数 (正弦波荷重による交番載荷試験)

| 打設バッチ | 供試体番号 | 荷重周波数(Hz)                  |         |         |
|-------|-------|----------------------------|---------|---------|
|       |       | 1                          | 2       | 5       |
|       |       | 弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) |         |         |
| 1     | 1     | 404,000                    | 384,000 | 402,000 |
|       | 2     | 374,000                    | 352,000 | 411,000 |
| 2     | 3     | 523,000                    | 436,000 | 428,000 |
|       | 4     | 392,000                    | 416,000 | 404,000 |
| 3     | 5     | 421,000                    | 414,000 | 412,000 |
|       | 6     | 443,000                    | —       | 402,000 |
| 4     | 7     | 414,000                    | 449,000 | 382,000 |
|       | 8     | —                          | 455,000 | 429,000 |
| 5     | 9     | 381,000                    | 386,000 | 466,000 |
|       | 10    | 414,000                    | 405,000 | 426,000 |
| 平 均   |       | 419,000                    | 411,000 | 416,000 |
| 標準偏差  |       | 42,000                     | 31,000  | 21,000  |
| 変動係数  |       | 0.10                       | 0.08    | 0.05    |

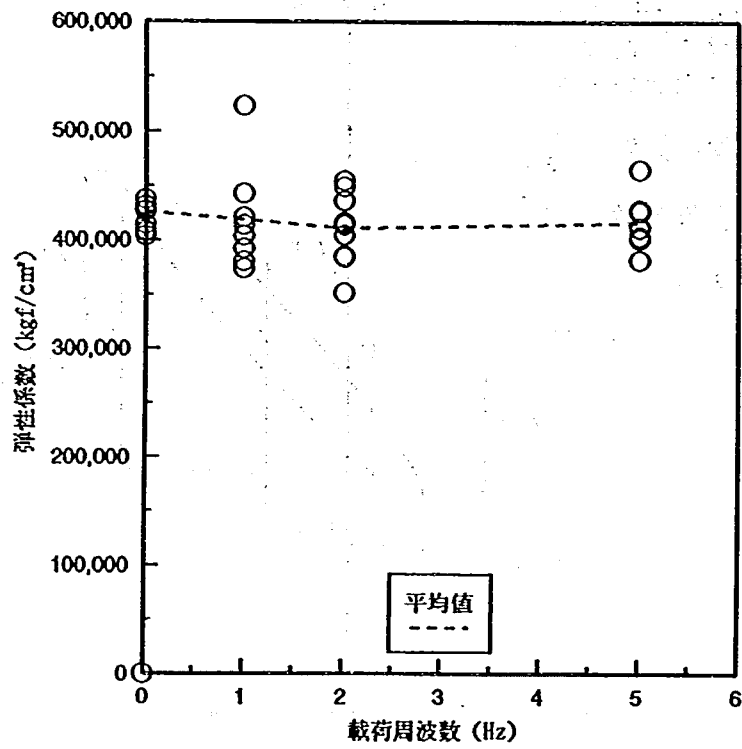


図-3.33 载荷周波数と弾性係数の関係  
(正弦波荷重による交番载荷試験)

### 3.4 正弦波荷重による減衰特性試験

#### 3.4.1 弾性係数および減衰定数

次に、正弦波荷重による減衰特性試験によって得られた応力-ひずみ曲線の一例を図-3.34に示す。図によれば、正弦波荷重による減衰特性試験での繰り返し载荷におけるコンクリートの応力ひずみ関係は、わずかではあるがヒステリシスループを描くことがわかる。このような場合、その応力-ひずみ曲線の履歴からコンクリートの減衰定数を決定することができる。いま、図-3.35に示した応力-ひずみ曲線の模式図を用いると、履歴減衰定数  $h$  は、1 サイクル中に生じる最大圧縮ひずみおよび最大引張ひずみを静的に生じさせるために必要なエネルギー（圧縮時と引張時の和） $W$  と 1 サイクル中に失われたエネルギー  $\Delta W$ （ループの面積）より次式で与えられる。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

ここに、

$$W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_t \cdot \sigma_t + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_c \cdot \sigma_c$$

$\epsilon_t$  : 引張側ひずみ振幅

$\sigma_t$  : 引張側応力振幅

$\epsilon_c$  : 圧縮側ひずみ振幅

$\sigma_c$  : 圧縮側応力振幅

一方、本試験における引張側弾性係数  $E_t$ 、圧縮側弾性係数  $E_c$  は次式によって求めるものとした。

$$E_t = \frac{\sigma_t}{\epsilon_t}$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c}$$

なお、弾性係数と減衰定数は第2波から第10波までの9波の平均値として求めるものとした。また、载荷に伴って図-3.35に示した残留ひずみ  $\epsilon_r$  が徐々に蓄積し、減衰定数を求めるためのヒステリシスループが定まらない場合がいくつかあったが、このような場合には、弾性係数、減衰定数の検討対象から除外するものとした。

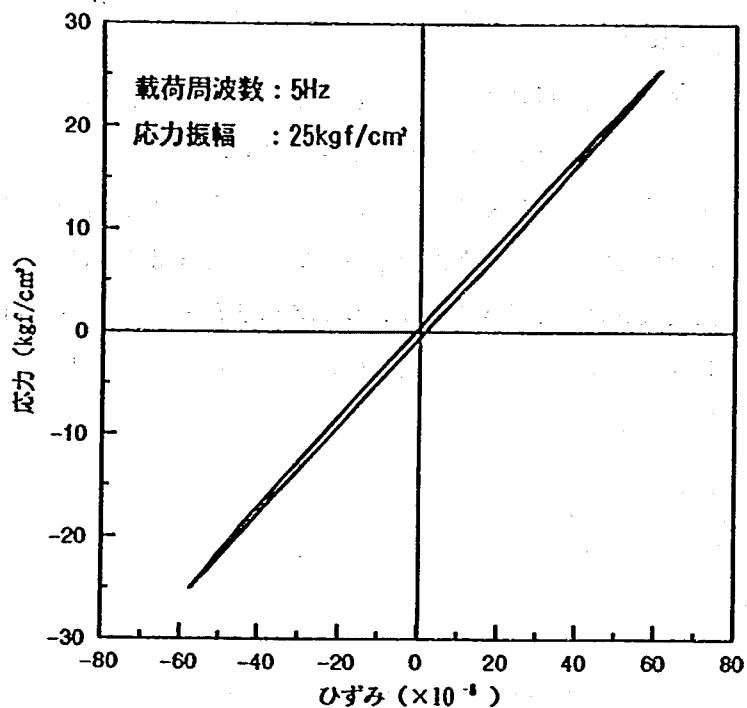


図-3.34 応力-ひずみ曲線の一例  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

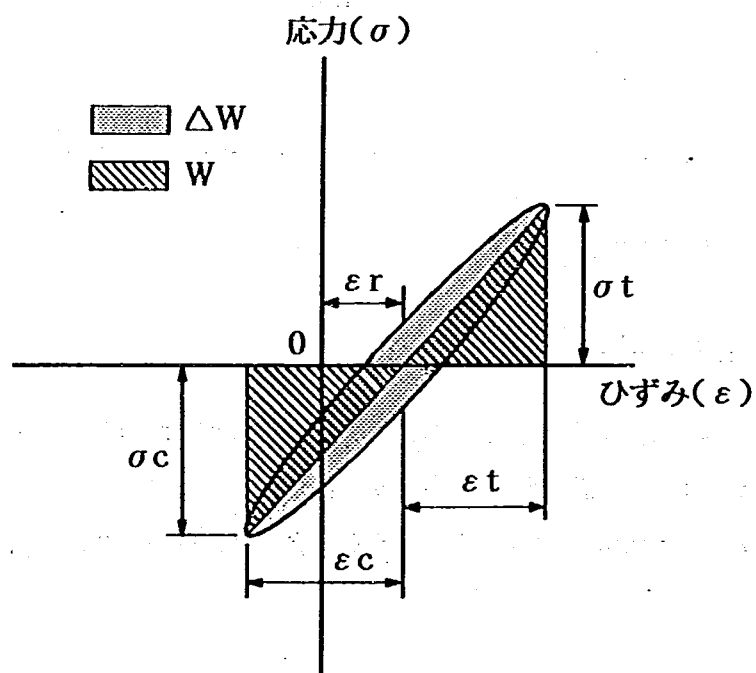


図-3.35 応力-ひずみ曲線の模式図  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

### 3.4.2 弾性係数および減衰定数の算定結果

試験より得られた圧縮側の弾性係数と引張側の弾性係数を表-3.10に示す。また、減衰定数と10波目の残留ひずみを表-3.11に示す。表によると、正弦波荷重による減衰特性試験での弾性係数は $4.25 \sim 4.47 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ である。

ここで、弾性係数と応力振幅の関係を図-3.36に示す。図によると、応力振幅の変化は弾性係数に大きく影響していないこと、また、載荷周波数が2 Hzと5 Hzの場合で弾性係数にほとんど差はないことがわかる。なお、参考までに載荷応力増加時（あるいは載荷応力減少時）の載荷速度の平均値  $4 f_s \sigma_A$  と弾性係数の関係を示すと図-3.37のようになる。

次に、減衰定数と応力振幅の関係を図-3.38に示す。図によれば、応力振幅が増えたと減衰定数がやや大きくなるようにも思えるが、測定値のばらつきを考えるとこれを断定することはできない。また、載荷周波数2 Hzの場合よりも5 Hzの場合の方が減衰定数がやや大きくなっているように見えるが、測定値のばらつきを考えるとこれを断定することも難しい。また、この関係を上記の弾性係数の場合と同様に平均載荷速度と減衰定数の関係を示したものが図-3.39である。図によれば、コンクリートの減衰定数は、載荷速度が増加すると減衰定数が大きくなる傾向が見られないこともないが、いずれの場合も減衰定数の値は1%程度で極めて小さな値である。なお、このようにコンクリートの減衰定数が応力振幅の大小、載荷周波数の大小に関わらずほぼ一定の小さな値を有しているのは、図-3.36、図-3.37に示したように、コンクリートの弾性係数の値が応力振幅の大小、載荷周波数の大小に関わらずほぼ一定の値を有し、コンクリートが極めて線形弾性体に近い挙動を示しているためといえる。

表-3.10 圧縮側および引張側の弾性係数（正弦波荷重による減衰特性試験）

(1) 載荷周波数 2Hz

| 打設<br>バッチ | 供試体<br>番 号 | 材 令<br>(日) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> )                    |       |       |       |       | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> )                    |       |       |       |       |
|-----------|------------|------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           |            |            |                                | 10                                            | 15    | 20    | 25    | 30    | 10                                            | 15    | 20    | 25    | 30    |
|           |            |            |                                | 圧縮 E <sub>c</sub> (×1000kgf/cm <sup>2</sup> ) |       |       |       |       | 引張 E <sub>t</sub> (×1000kgf/cm <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |
| 1         | 1          | 102        | 15.1                           | (278)                                         | —     | —     | —     | —     | (269)                                         | —     | —     | —     | —     |
|           | 2          | 102        | 24.9                           | 454                                           | 451   | (462) | —     | —     | 456                                           | 457   | (467) | —     | —     |
| 2         | 3          | 103        | 25.2                           | (419)                                         | (382) | (337) | —     | —     | (411)                                         | (369) | (319) | —     | —     |
|           | 4          | 103        | 34.8                           | 454                                           | 434   | 439   | 429   | (424) | 433                                           | 438   | 425   | 418   | (413) |
| 3         | 5          | 97         | 25.4                           | 432                                           | 416   | (435) | —     | —     | 419                                           | 413   | (429) | —     | —     |
|           | 6          | 97         | 35.3                           | 448                                           | 442   | 445   | 438   | 432   | 436                                           | 441   | 434   | 427   | 414   |
| 4         | 7          | 111        | 35.3                           | 454                                           | 443   | 441   | 439   | 439   | 443                                           | 437   | 439   | 431   | 436   |
|           | 8          | 111        | —                              | —                                             | —     | —     | —     | —     | —                                             | —     | —     | —     | —     |
| 5         | 9          | 112        | 20.1                           | 433                                           | (420) | —     | —     | —     | 429                                           | (411) | —     | —     | —     |
|           | 10         | 112        | 25.2                           | 442                                           | (420) | (414) | —     | —     | 431                                           | (418) | (405) | —     | —     |
| 平 均       |            | 105.0      | 26.8                           | 445                                           | 437   | 442   | 435   | 436   | 435                                           | 437   | 433   | 425   | 425   |
| 標準偏差      |            | 5.7        | 6.7                            | 9.1                                           | 11.9  | 2.5   | 4.5   | 3.5   | 10.8                                          | 14.1  | 5.8   | 5.4   | 11.0  |
| 変動係数      |            | —          | 0.25                           | 0.020                                         | 0.027 | 0.006 | 0.010 | 0.008 | 0.025                                         | 0.032 | 0.013 | 0.013 | 0.026 |

(2) 載荷周波数 5Hz

| 打設<br>バッチ | 供試体<br>番 号 | 材 令<br>(日) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> )                    |       |       |       |       | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> )                    |       |       |       |       |
|-----------|------------|------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           |            |            |                                | 10                                            | 15    | 20    | 25    | 30    | 10                                            | 15    | 20    | 25    | 30    |
|           |            |            |                                | 圧縮 E <sub>c</sub> (×1000kgf/cm <sup>2</sup> ) |       |       |       |       | 引張 E <sub>t</sub> (×1000kgf/cm <sup>2</sup> ) |       |       |       |       |
| 1         | 1          | 102        | 15.1                           | (253)                                         | —     | —     | —     | —     | (251)                                         | —     | —     | —     | —     |
|           | 2          | 102        | 24.9                           | 459                                           | 463   | (466) | —     | —     | 450                                           | 457   | (480) | —     | —     |
| 2         | 3          | 103        | 25.2                           | (420)                                         | (371) | (319) | —     | —     | (407)                                         | (375) | (314) | —     | —     |
|           | 4          | 103        | 34.8                           | 447                                           | 436   | 436   | 431   | (409) | 429                                           | 435   | 433   | 422   | (377) |
| 3         | 5          | 97         | 25.4                           | 432                                           | 419   | (452) | —     | —     | 423                                           | 417   | (442) | —     | —     |
|           | 6          | 97         | 35.3                           | 459                                           | 446   | 445   | 435   | 432   | 439                                           | 445   | 436   | 431   | 411   |
| 4         | 7          | 111        | 35.3                           | 456                                           | 445   | 444   | 438   | 444   | 449                                           | 448   | 434   | 436   | 438   |
|           | 8          | 111        | —                              | —                                             | —     | —     | —     | —     | —                                             | —     | —     | —     | —     |
| 5         | 9          | 112        | 20.1                           | 434                                           | (422) | —     | —     | —     | 434                                           | (418) | —     | —     | —     |
|           | 10         | 112        | 25.2                           | 441                                           | (421) | (419) | —     | —     | 429                                           | (419) | (409) | —     | —     |
| 平 均       |            | 105.0      | 26.8                           | 447                                           | 442   | 442   | 435   | 438   | 436                                           | 440   | 434   | 430   | 425   |
| 標準偏差      |            | 5.7        | 6.7                            | 10.7                                          | 14.4  | 4.0   | 2.9   | 6.0   | 9.6                                           | 13.7  | 1.3   | 5.8   | 13.5  |
| 変動係数      |            | —          | 0.25                           | 0.024                                         | 0.033 | 0.009 | 0.007 | 0.014 | 0.022                                         | 0.031 | 0.003 | 0.013 | 0.032 |

( ) : 検討対象除外ケース

表-3.11 減衰定数と残留ひずみ（正弦波荷重による減衰特性試験）

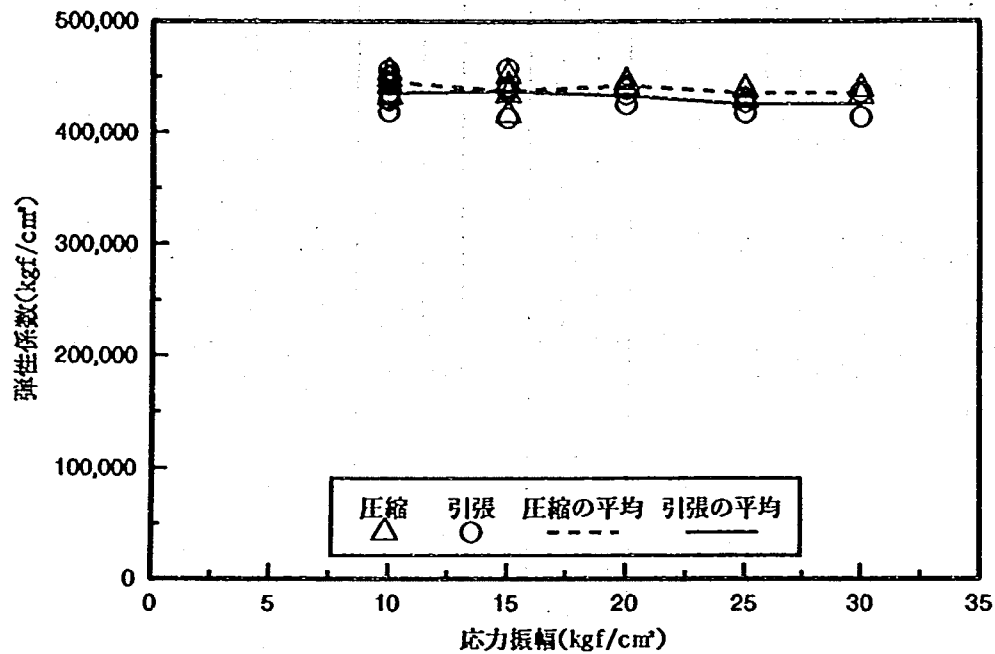
(1) 載荷周波数 2Hz

| 打設<br>バッチ | 供試体<br>番号 | 材 令<br>(日) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> ) |        |        |      |        | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |     |      |
|-----------|-----------|------------|--------------------------------|----------------------------|--------|--------|------|--------|----------------------------|------|-------|-----|------|
|           |           |            |                                | 10                         | 15     | 20     | 25   | 30     | 10                         | 15   | 20    | 25  | 30   |
|           |           |            |                                | 減衰定数(%)                    |        |        |      |        | 残留ひずみ(×10 <sup>-6</sup> )  |      |       |     |      |
| 1         | 1         | 102        | 15.1                           | (5.15)                     | —      | —      | —    | —      | 46.3                       | —    | —     | —   | —    |
|           | 2         | 102        | 24.9                           | 0.56                       | 0.52   | (0.39) | —    | —      | -0.7                       | -0.7 | -2.7  | —   | —    |
| 2         | 3         | 103        | 25.2                           | (1.71)                     | (2.21) | (2.68) | —    | —      | 4.6                        | 9.7  | 16.9  | —   | —    |
|           | 4         | 103        | 34.8                           | 0.75                       | 0.88   | 0.93   | 0.96 | (1.02) | -0.3                       | 0.5  | 1.2   | 1.4 | 2.4  |
| 3         | 5         | 97         | 25.4                           | 1.01                       | 1.14   | (0.53) | —    | —      | 0.6                        | 1.0  | -12.1 | —   | —    |
|           | 6         | 97         | 35.3                           | 0.77                       | 0.74   | 0.83   | 0.90 | 1.02   | -0.4                       | 0.3  | 1.1   | 0.9 | 0.9  |
| 4         | 7         | 111        | 35.3                           | 0.69                       | 0.74   | 0.79   | 0.82 | 0.73   | 0.6                        | 0.3  | 0.4   | 1.0 | -0.9 |
|           | 8         | 111        | —                              | —                          | —      | —      | —    | —      | —                          | —    | —     | —   | —    |
| 5         | 9         | 112        | 20.1                           | 1.00                       | (1.16) | —      | —    | —      | 1.8                        | 2.1  | —     | —   | —    |
|           | 10        | 112        | 25.2                           | 0.99                       | (1.22) | (1.15) | —    | —      | 0.1                        | 2.5  | 0.2   | —   | —    |
| 平 均       |           | 105.0      | 26.8                           | 0.82                       | 0.80   | 0.85   | 0.89 | 0.88   | 5.8                        | 2.0  | 0.7   | 1.1 | 0.8  |
| 標準偏差      |           | 5.7        | 6.7                            | 0.17                       | 0.20   | 0.06   | 0.06 | 0.15   | 14.4                       | 3.1  | 7.9   | 0.2 | 1.4  |
| 変動係数      |           | —          | 0.25                           | 0.20                       | 0.25   | 0.07   | 0.06 | 0.17   | 2.5                        | 1.6  | 11.1  | 0.2 | 1.7  |

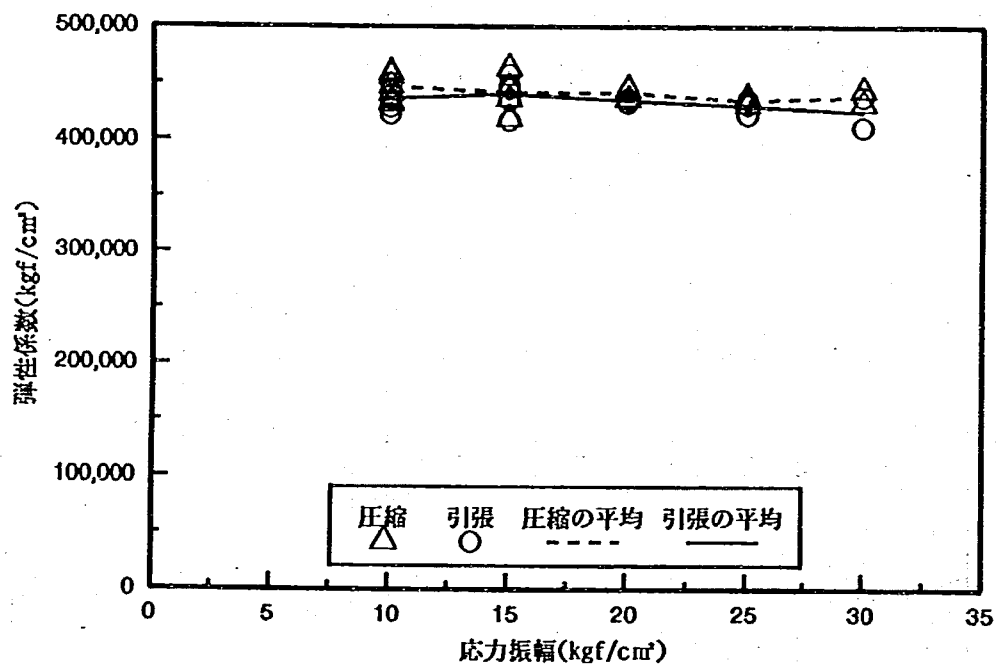
(2) 載荷周波数 5Hz

| 打設<br>バッチ | 供試体<br>番号 | 材 令<br>(日) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> ) |        |        |      |        | 応力振幅(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |      |     |      |
|-----------|-----------|------------|--------------------------------|----------------------------|--------|--------|------|--------|----------------------------|------|------|-----|------|
|           |           |            |                                | 10                         | 15     | 20     | 25   | 30     | 10                         | 15   | 20   | 25  | 30   |
|           |           |            |                                | 減衰定数(%)                    |        |        |      |        | 残留ひずみ(×10 <sup>-6</sup> )  |      |      |     |      |
| 1         | 1         | 102        | 15.1                           | (3.60)                     | —      | —      | —    | —      | 13.0                       | —    | —    | —   | —    |
|           | 2         | 102        | 24.9                           | 0.66                       | 0.64   | (0.49) | —    | —      | -0.2                       | -0.3 | -0.7 | —   | —    |
| 2         | 3         | 103        | 25.2                           | (1.56)                     | (1.95) | (2.40) | —    | —      | 1.3                        | 3.3  | 6.7  | —   | —    |
|           | 4         | 103        | 34.8                           | 0.85                       | 0.90   | 0.98   | 1.03 | (1.64) | -0.2                       | 0.4  | 0.8  | 0.5 | 9.0  |
| 3         | 5         | 97         | 25.4                           | 1.06                       | 1.16   | (0.65) | —    | —      | 0.1                        | 0.8  | -2.3 | —   | —    |
|           | 6         | 97         | 35.3                           | 0.75                       | 0.84   | 0.90   | 0.97 | 1.10   | 0.2                        | 0.3  | 0.1  | 1.0 | 1.5  |
| 4         | 7         | 111        | 35.3                           | 0.81                       | 0.83   | 0.89   | 0.93 | 0.78   | 0.1                        | 0.1  | -0.1 | 0.4 | -0.1 |
|           | 8         | 111        | —                              | —                          | —      | —      | —    | —      | —                          | —    | —    | —   | —    |
| 5         | 9         | 112        | 20.1                           | 0.95                       | (1.10) | —      | —    | —      | 0.0                        | 0.4  | —    | —   | —    |
|           | 10        | 112        | 25.2                           | 1.03                       | (1.22) | (1.21) | —    | —      | 0.1                        | 0.5  | 0.7  | —   | —    |
| 平 均       |           | 105.0      | 26.8                           | 0.87                       | 0.87   | 0.93   | 0.97 | 0.94   | 1.6                        | 0.7  | 0.7  | 0.6 | 3.5  |
| 標準偏差      |           | 5.7        | 6.7                            | 0.14                       | 0.17   | 0.04   | 0.04 | 0.16   | 4.1                        | 1.0  | 2.6  | 0.3 | 4.0  |
| 変動係数      |           | —          | 0.25                           | 0.16                       | 0.19   | 0.05   | 0.04 | 0.17   | 2.5                        | 1.5  | 3.5  | 0.4 | 1.1  |

( ) : 検討対象除外ケース



(a) 载荷周波数 2 Hz



(b) 载荷周波数 5 Hz

図-3.36 応力振幅と弾性係数の関係  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

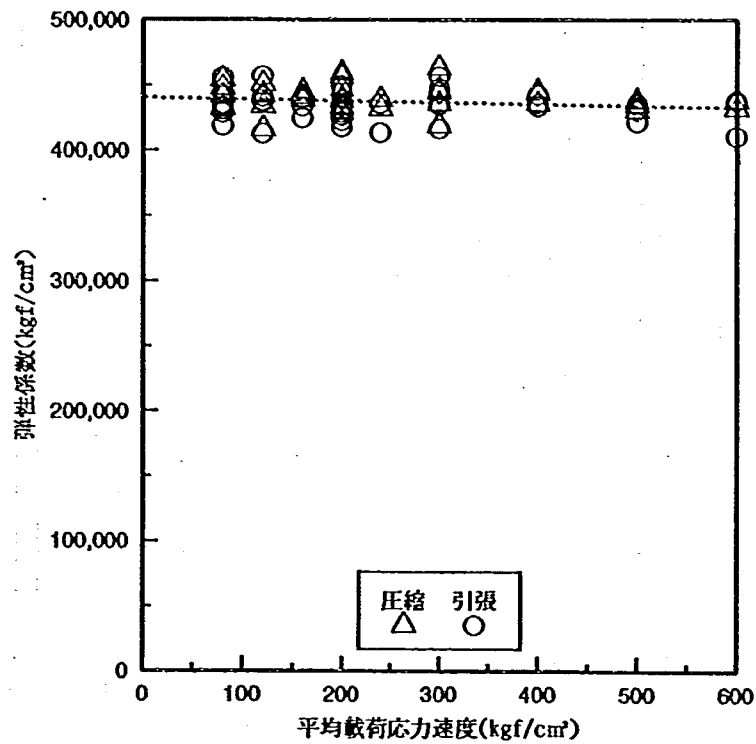


図-3.37 平均载荷応力と弾性係数の関係  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

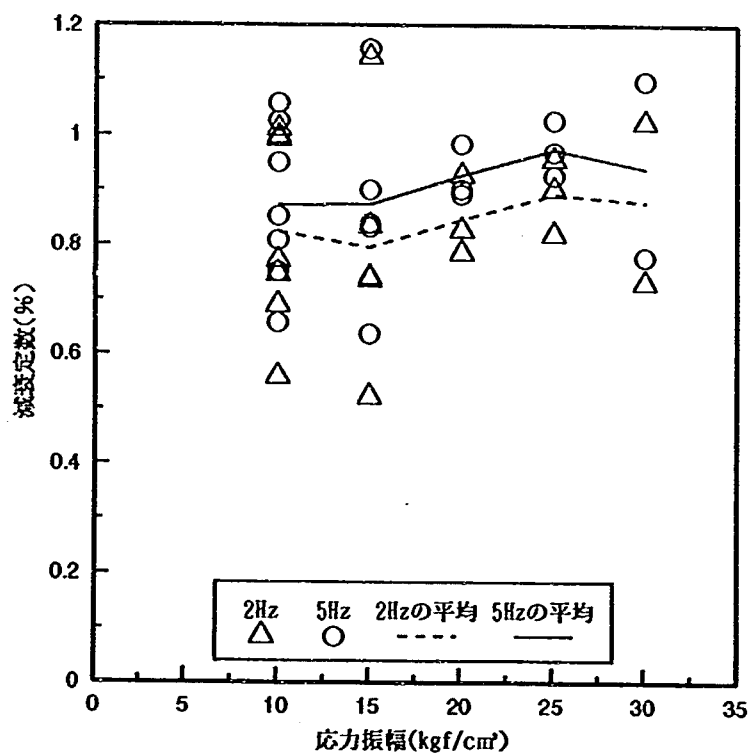


図-3.38 応力振幅と減衰定数の関係  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

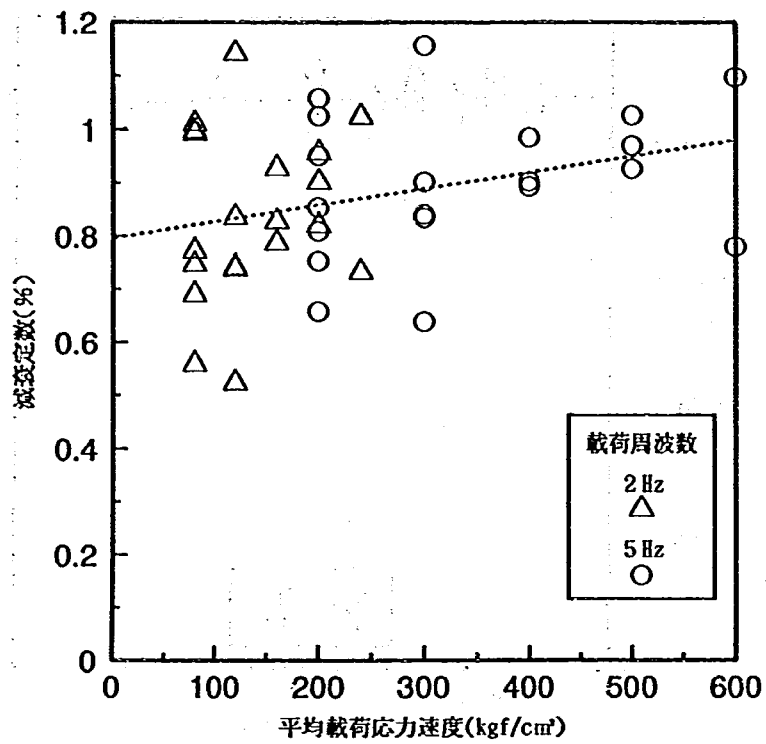


図-3.39 平均荷重応力と減衰定数の関係  
(正弦波荷重による減衰特性試験)

## 4 まとめと今後の課題

### 4.1 ま と め

本試験結果から、コンクリートの動的な力学特性に関して以下のような知見が得られた。

- ① コンクリートの直接引張強度はコンクリートの圧縮強度に比較して大きなばらつきを有する。
- ② 本試験で用いたアーチ式コンクリートダムの標準的な配合のコンクリートの直接引張強度は、その平均値で評価すると圧縮強度の  $1/20$  程度である。また、その上限値で評価すると圧縮強度の  $1/12.5$  程度である。
- ③ コンクリートの直接引張試験と一軸圧縮試験で求められた弾性係数は、その弾性係数を求める応力レベルを同一にとればほとんど同じ値となる。
- ④ 直接引張強度は載荷速度の増加とともに大きくなる。また、弾性係数は載荷速度の増加とともにわずかに大きくなる。弾性係数の増加率は引張強度の増加率に比べてかなり小さい。
- ⑤ 正弦波荷重による交番載荷においては、載荷周波数によらず引張強度は概に同程度である。
- ⑥ 正弦波荷重による減衰特性試験における応力振幅、載荷周波数の範囲においては、コンクリートの減衰定数は約  $1\%$  で一定である。

## 4.2 今後の課題

載荷速度を変えた試験と正弦波荷重を載荷する試験を行った結果、コンクリートの動的な力学特性についてさまざまな知見が得られた。しかし、コンクリートの動的な力学特性のメカニズムを十分満足のいく状態まで把握するには至らなかった。これを明かにして行くには、引張強度試験におけるひずみ計測の方法を改善する必要がある、コンクリート供試体の平均的なひずみを引張破壊に至るまで精度良く計測する必要がある。また、静的、動的を問わず、コンクリートの引張強度は大きなばらつきを示しており、引張強度の上限と下限には大きな差がある。このような引張強度のばらつきの特性は、供試体の寸法効果や形状効果に依存する可能性も考えられる。これを明確にすることは、ダムの設計に用いるコンクリートの引張強度を厳密に評価する上で重要な事項である。

以上のような観点から、コンクリートの直接引張試験を今後行う際には、以下について考慮することが望ましいと考えられる。

- ① ひずみゲージを用いて引張試験におけるひずみを計測する場合、供試体の局部的挙動によって供試体の平均的なひずみの挙動を計測することが困難となっている。これを改善するためには、より多くのひずみゲージ（現行80mmを4本→120mmを8本など）を用いてひずみの計測を行う必要がある。
- ② 引張強度の寸法および形状効果を調べるため、寸法および形状を種々に変えた引張強度試験を実施する必要がある。この場合、あまり大きな供試体による試験は実験装置の都合上困難が予想されるので、コンクリートに配合する骨材の寸法（粒径）を操作することにより、供試体の寸法効果を相似則的に再現することが可能ではないかと考える。
- ③ 正弦波荷重による引張試験により荷重周波数と引張強度との関係を明かにするためには、載荷周波数の設定ケースを多くする必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 永山功, 渡辺和夫, 尾畑伸之: ダムコンクリートの直接引張強度についての実験的検討, 土木研究所資料, 第2914号, 1990年12月
- 2) 永山功, 渡辺和夫, 首藤美誠, 尾畑伸之: ダムコンクリートの直接引張強度についての実験的検討 (その2), 土木研究所資料, 第3193号, 1993年5月
- 3) 岡田清, 六車熙: 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店

ダムコンクリートの直接引張強度に  
ついての実験的検討（その3）

ISSN 0386-5878

土木研究所資料  
第3223号1993年12月

ダム構造研究室 室 長 永山 功  
主任研究員 渡辺 和夫  
研究員 佐々木 隆誠  
研究員 首藤 美誠  
元研究員 庄司 俊介  
元部外研究員 向江 幸介

**要旨** 本報告は、コンクリートダムの耐震性評価の際に必要なダム用コンクリートの引張強度、引張変形特性について検討した結果をとりまとめたものである。試験は、円柱状試体に直接的に引張応力、引張圧縮交番応力を載荷して行った。この試験結果から、載荷速度が引張強度、変形特性に与える影響、繰り返し荷重が引張強度、変形特性に与える影響を明らかにすることができた。また、コンクリートの減衰特性についても明らかにすることができた。

キーワード：コンクリート、圧縮強度、引張強度、減衰定数、弾性係数

○

郵便はがき

50円切手  
をはって  
下さい。

3 0 5 - □ □

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム構造研究室 御中

No. \_\_\_\_\_

No. \_\_\_\_\_

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料 第3223号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印