

## 第4章 コンクリートの動的引張軟化挙動の

### 計測とその定量的評価

鉄筋コンクリート構造物の主構成材料であるコンクリートが大きなひずみ速度の負荷を受ける場合の引張軟化挙動を定量的に把握することは、衝撃力のような載荷速度の大きい動的荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の終局状態に至る破壊メカニズムおよびその挙動を解析的に明らかにするために重要である。しかしながら、高速の引張荷重を受けるコンクリートの軟化領域における挙動は、未だ十分には把握されていない。これは、コンクリートが脆性材料であるために引張軟化領域では破壊が極めて急速に進行し、かつコンクリートの引張変形量が微小であることから引張軟化挙動を計測することが極めて困難であるという実験技術（載荷方法、計測法など）上の問題に起因していると考えられる。

そこで本章では、コンクリートの動的軟化挙動を計測するための試験方法について検討するとともに、ひずみ速度をパラメータとする急速一軸引張試験を行い、ひずみ速度がコンクリートの引張軟化挙動に及ぼす影響について定性的・定量的な検討を行う。さらに、試験結果に基づいてひずみ速度を考慮したコンクリートの引張軟化則の定式化を行っている。

#### 4.1 はじめに

コンクリート供試体に一軸引張荷重を行うと、最大引張荷重点以降で破壊進行領域と呼ばれる微細なひび割れが局所的に集中した非線形領域が形成され破断に至ると言われている<sup>1)</sup>。破壊進行領域では、引張ひずみは増大するが伝達される引張応力が減少するいわゆる引張軟化現象が生じる。一つの供試体中に局所的な破壊進行領域と非破壊領域が同時に形成されるために、計測長さや計測場所によって供試体のひずみの評価は、大きく異なることが明らかである<sup>1)</sup>。

Hillerborg ら<sup>2)</sup>は、最大引張応力以降の供試体全体の引張変形は非破壊領域の変形と破壊領域の非回復性の変形との和で表されるとし、この非回復性の変形を1本の仮想ひび割れ幅( $w$ )の広がりでも表した仮想ひび割れモデルを図-4.1のように提案している。この仮想ひび割れモデルにおける引張応力(伝達応力)－仮想ひび割れ幅関係は引張軟化曲線と呼ばれ、材料固有の構成関係であると考えられている。また、引張軟化曲線によって囲まれる面積は、破壊エネルギー  $G_F$  と呼ばれ単位面積当たりの破断面を形成するために消費されるエネルギーと解釈されている。

コンクリートのひび割れ挙動にともなって生じる軟化現象は、鉄筋コンクリート構造物の非線形現象に深くかかわっていることが指摘されており<sup>3)</sup>、鉄筋コンクリート

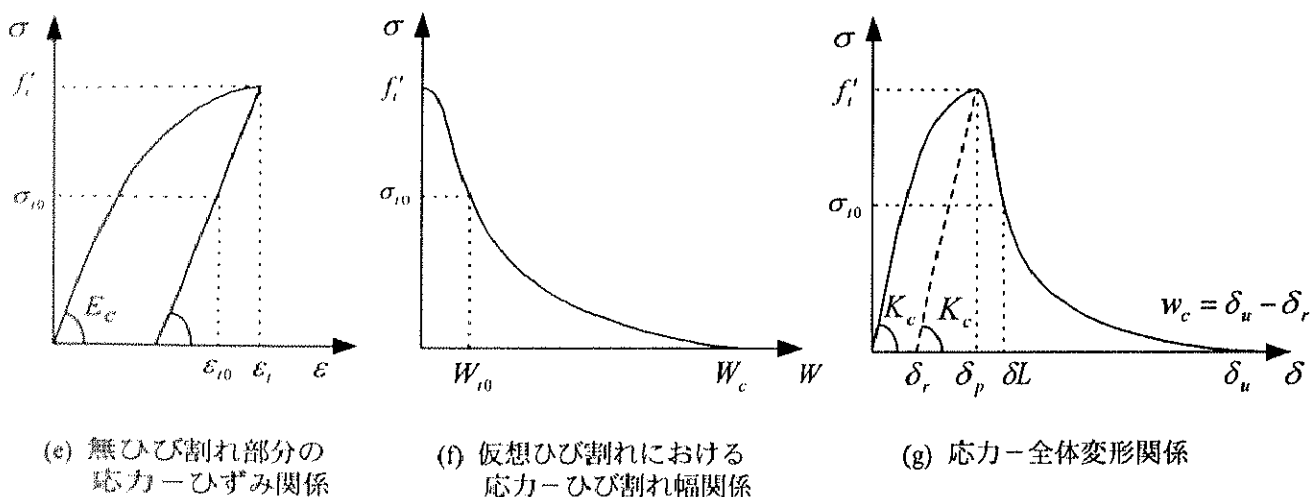
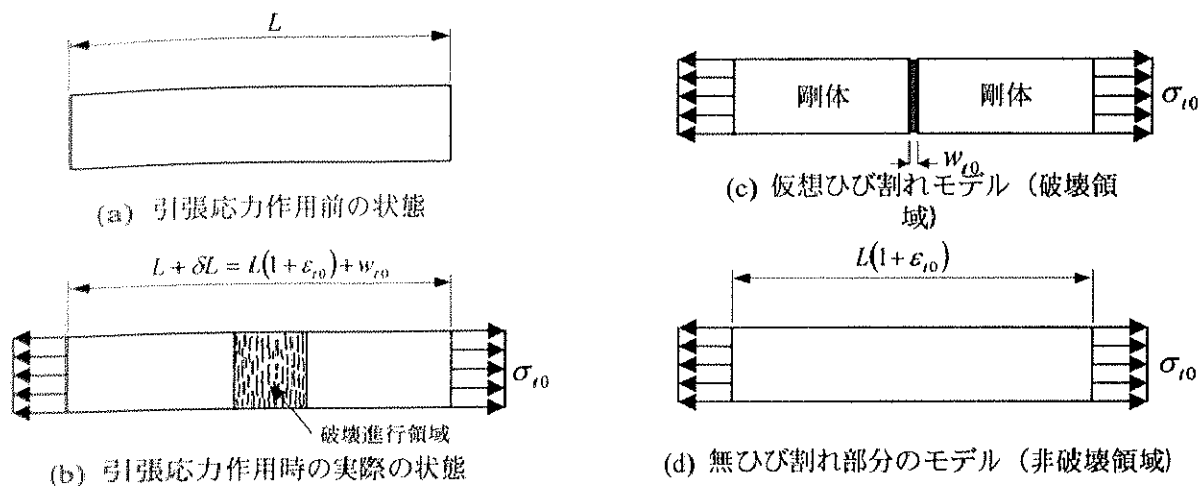


図-4.1 仮想ひび割れモデル

構造物の非線形挙動を解析によって評価するためには破壊進行領域における引張軟化曲線を適切にモデル化することが重要となる。Leibengood<sup>4)</sup>は、コンクリート梁のFEM解析にコンクリートの破壊エネルギー、引張強度、引張軟化曲線の形状等をパラメータとする種々の引張軟化則を適用したところ、引張軟化則の設定の違いによって解析結果が大きく異なることを示している。このような背景から、静的载荷を受けるコンクリートの引張軟化曲線を適切に求めるための方法が盛んに研究され、いくつかのモデルが提案されている<sup>5),6)</sup>。また最近では、引張軟化特性を評価するための標準試験方法を確立しようとする研究も行われている<sup>7)</sup>。

本章では、まず引張軟化挙動を計測するための試験方法について検討を行う。次に、ひずみ速度をパラメータとする急速一軸引張試験を行い、ひずみ速度がコンクリートの引張軟化挙動に及ぼす影響について定性的・定量的な検討を行っている。試験結果に基づいて、ひずみ速度を考慮したコンクリートの引張軟化則を定式化する。

#### 4. 2 引張軟化挙動を計測するための試験方法

これまでに、急速一軸引張荷を受けるコンクリート供試体の軟化領域における変形挙動について調べた研究は見当たらない。これは、高速荷重装置そのものが一般に普及するには至っていないこと、かつ現象が極めて短時間で終了すること、およびコンクリートの引張変形が微小であるために供試体の変形を完全に計測することが極めて困難であるためと考えられる。

前章に示したコンクリートの急速一軸引張荷試験では、コンクリート供試体表面に貼付したひずみゲージを用いて最大引張応力までのひ

ずみを計測した。しかしながら、最大引張応力以降において、ひずみがある特定の領域に局所化し巨視的なひび割れが形成される軟化領域にあつては供試体全体の変形を供試体表面のひずみゲージを用いて計測することは不可能であると考えられる。

一方、高ひずみ速度( $10^0(1/\text{sec})$ 程度)で変形する供試体の全体変形を変位計を用いて計測する場合、引張ひずみが微小であることや現象が極めて短時間で終了することから、変位計自体には高い応答周波数と高精度の分解能を有していることが要求される。また、急速荷重試験では、装置に大きな振動が生じるため、変位計あるいはそのターゲットの取り付けを強固にする必要がある。

本研究では、急速荷重装置を用いた一軸引張荷試験によって荷重速度がコンクリートの引張軟化曲線に及ぼす影響を把握することを目的としている。この目的を達成するためには、以下の2つの問題を解決する必要がある。

- ① 静的一軸引張荷において、供試体が最大引張耐力に達した後も安定して実験が行えること。
- ② 急速一軸引張荷において、最大引張応力以降の軟化領域における試験体の全体変形が計測できること。

これらの問題点を解決するための一つのアイデアとして、図-4.2に示すような両端の境界で変形が等しくなるように結合されたコンクリートと鋼材からなる合成構造体を考える。この合成構造体の長さを  $L$  とし、コンクリートの断面積を  $A_c$ 、鋼材の断面積を  $A_s$  とする。鋼材は、線形弾性体とし弾性係数を  $E_s$  とする。鋼材の場合、降伏応力は荷重速度の影響を受けるが弾性係数はほとんど影響を受けないことが知られている<sup>11),12)</sup>。いま、この合成構造体に既知の引張荷重  $P$  が作用し、鋼材に既知のひずみ  $\varepsilon_s$  が発生しているとする。このとき、コンクリートの変形量  $\delta_c$ 、引張応力  $\sigma_c$  は次式

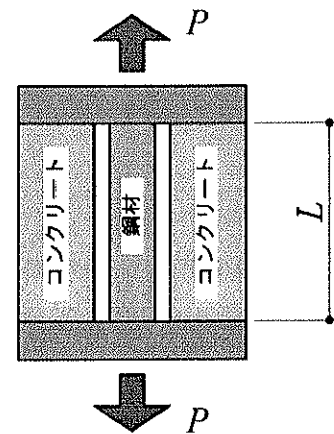


図-4.2 コンクリートと鋼材の合成構造体

で計算できる。

$$\delta_c = \text{鋼材の変形量} = \varepsilon_s L \quad (4-1)$$

$$\sigma_{cl} = \frac{P - A_s E_s \varepsilon_s}{A_c} \quad (4-2)$$

両端の境界で変形が等しくなるように結合された合成構造体では、全体荷重ならびに鋼材のひずみが既知でその値が弾性範囲内であれば、式(4-1)、(4-2)の関係から簡単にコンクリートの応力-変形量関係を求めることができる。

また、コンクリートと鋼材から成る合成構造体の場合、コンクリートの断面積に対し適当な断面積の鋼材を付加することで、合成構造体全体の荷重-変形関係を右上がりの単調増加型に調整することができ、コンクリートが最大引張応力に達した後も安定して実験を行うことが可能となる。この方法は、コンクリートの一軸圧縮試験でポストピークの挙動を得るためにコンクリート供試体と平行に鋼管を圧縮試験機にセットすることにより、ポストピークの不安定性を回避し応力-ひずみ関係を得た Wang ら<sup>13)</sup>の方法に類似するものである。

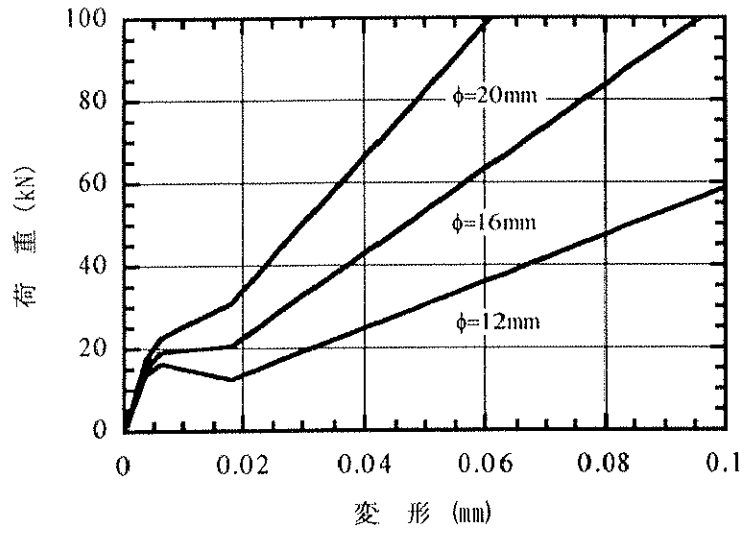
静的な一軸引張荷重において、コンクリートが最大引張強度に達した後も安定した実験を行うために必要な合成構造体の長さおよび鋼材の断面積の設定について、次の試験条件のもとで簡単な力学計算による検討を行う。

#### 【試験条件】

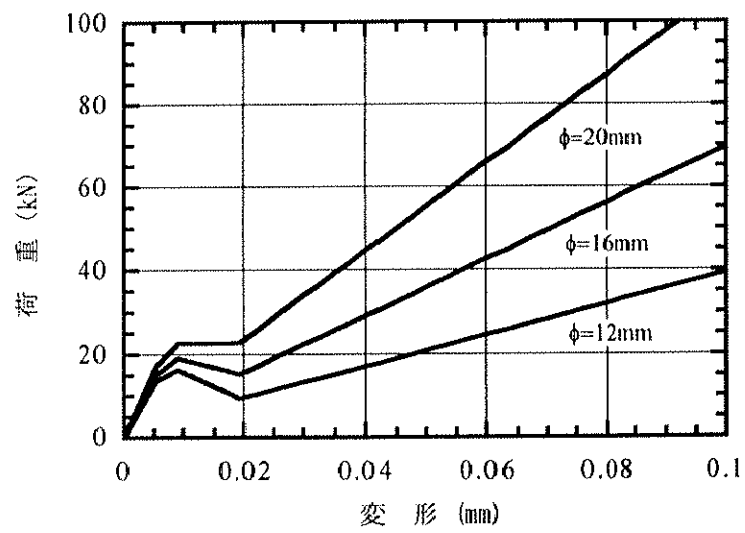
- ① コンクリートの圧縮強度： $f_c = 35 \text{ N/mm}^2$
- ② 最大粗骨材寸法： $d_{\max} = 10 \text{ mm}$
- ③ コンクリートの断面寸法： $70 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  の長方形断面
- ④ 使用する鋼材：S45C 弾性係数  $E_s = 206.0 \text{ (kN/mm}^2)$

なお、コンクリートの引張構成則には、CEB-FIP モデルコード<sup>14)</sup>(Appendix-A 参照)に規定されるモデルを適用している。

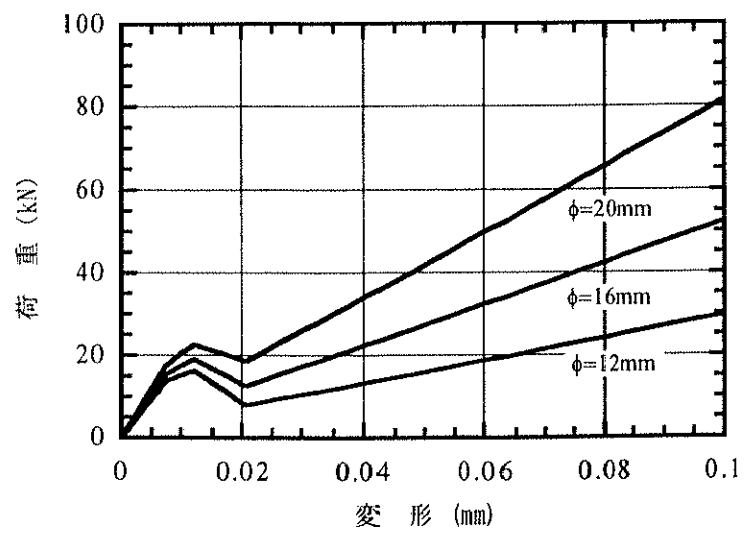
図-4.3 に、鋼材の直径が 12, 16, 20mm、試験体の長さを 40, 60, 80mm とした場合の計算結果を示す。これらの図から  $\phi 16 \text{ mm}$  の鋼材を用い、合成構造体の長さを 40mm とすれば、荷重-変形関係を右上がりの単調増加型にすることができ特殊な試験機を用いなくても一般的な試験機で安定してコンクリートの引張軟化領域の試験が行えると考えられる。Bazant ら<sup>15)</sup>の実験結果によれば、ひずみが局所化する領域の長さは最大粗骨材寸法の約 3 倍程度であることを報告している。このことを踏まえても、合成構造体の長さは 40mm とすれば十分であると考えられる。



(a)  $L=40\text{mm}$



(b)  $L=60\text{mm}$



(c)  $L=80\text{mm}$

図-4.3 荷重-変形関係

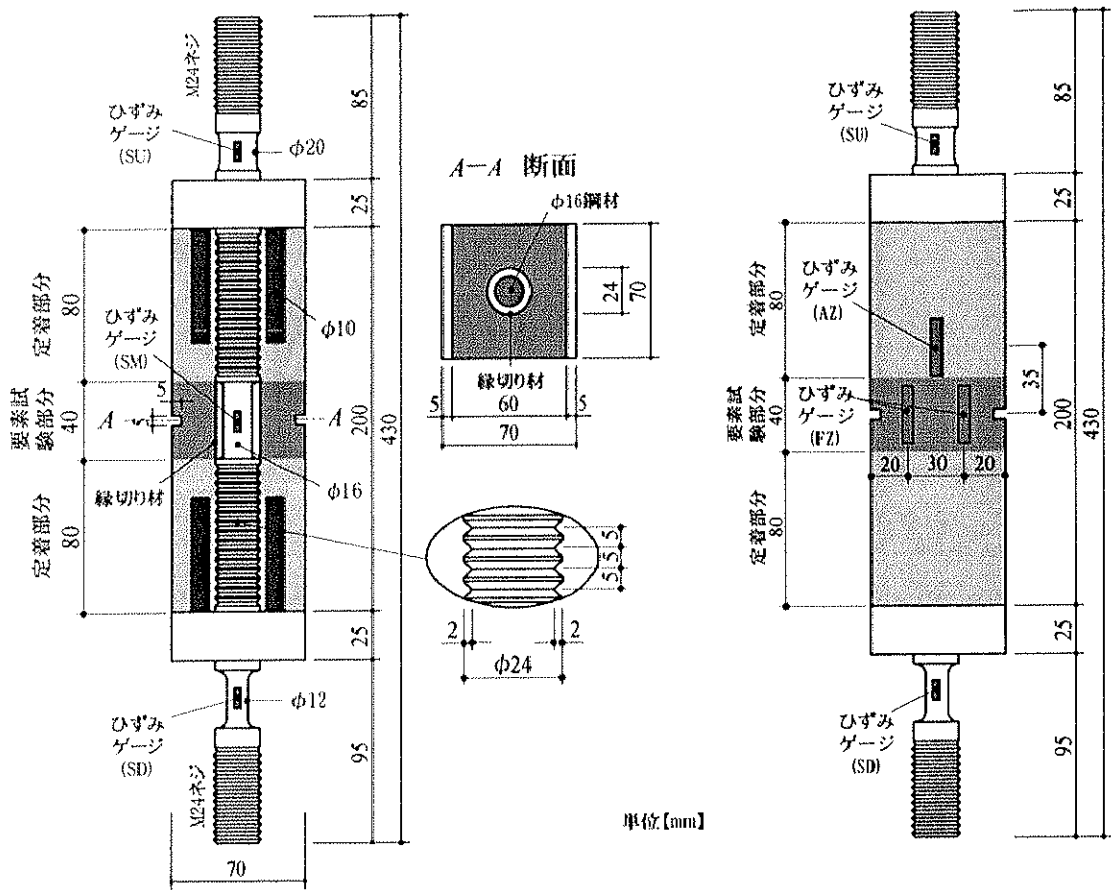


図-4.4 試験体の概要

### 4. 3 実験概要

#### 4. 3. 1 試験体の製作

前節での検討結果より試験体の形状を最終的に図-4.4のように決定した。コンクリートの最大引張応力以降の引張軟化曲線を得るために、試験体には鋼材が試験体中央に埋め込まれている。また、試験体には、要素試験部分(長さ $L=40\text{mm}$ )と定着部分(両側にそれぞれ $80\text{mm}$ )がある。本試験では、この要素試験部分のコンクリートに対する引張軟化曲線を求めるものである。

要素試験部分には、その範囲にある鋼材にビニールパイプ(外径 $\phi 24\text{mm}$ )を巻くことでコンクリートと完全に縁切りしている。よって、要素試験部分で鋼材とコンクリートとの付着が問題になることはない。また、要素試験部分のコンクリートに確実にひび割れを導入する目的で、この中央部分の両側面に $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ の切欠きを入れた。

定着部分は、試験要素部分の境界でコンクリートと鋼材の変形が等しくなるように

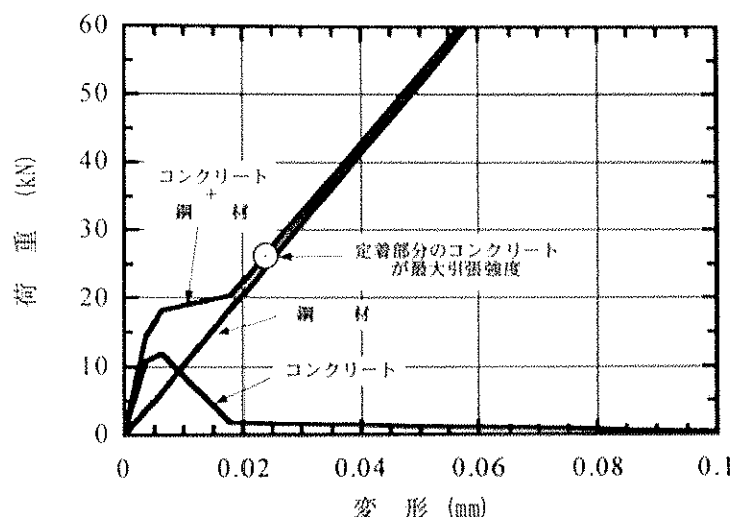


図-4.5 荷重-変形関係

表-4.1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						空気量 (%)	スランブ (cm)
		W	C	S	G	AE減水剤	消泡剤 C×%		
65	55	195	300	975	823	300cc/C =100kg	0.1	1.0	18.0

最大粗骨材寸法：10mm

コンクリートと鋼材の付着を十分にすることがある。そこで、鋼材に 5mm ピッチで深さ 2mm の切り込みを入れている。試験装置への試験体の納まり具合の関係で定着部分の長さは 80mm となった。このため、試験体の両端に厚さ 25mm の鋼板を取り付け、鋼板にφ10mm のねじ棒をそれぞれ 4 本配置して要素試験部分のコンクリート断面に対して十分均等に引張荷重が伝達できるようにした。

最終的に決定した試験体に対して、前節と同様に荷重-変形関係を計算すると図-4.5 のようになる。荷重-変形関係は、右上がりの単調増加型になっていることから静的載荷においては安定して実験を行うことができると考えられる。また、図中の○印は、定着部分のコンクリートが最大引張応力に達する点である。これ以降では、定着部分の鋼材とコンクリートとの付着が問題となってくる。したがって、本研究で仮定している要素試験部分の境界では鋼材とコンクリートの変位は等しいとする仮定が成り立たなくなると考えられる。このように定着部分におけるコンクリートと鋼材の付着が問題となる時点では、要素試験部分のコンクリートの荷重-変形量関係は第 2 軟化勾配の部分にある。このことから本実験方法によって少なくとも CEB-FIP モデルの第一軟化勾配部分に相当するコンクリートの引張軟化曲線は得られると判断する。

本試験で使用したコンクリートの配合を、表-4.1 に示す。試験体は、打設後材齢 1

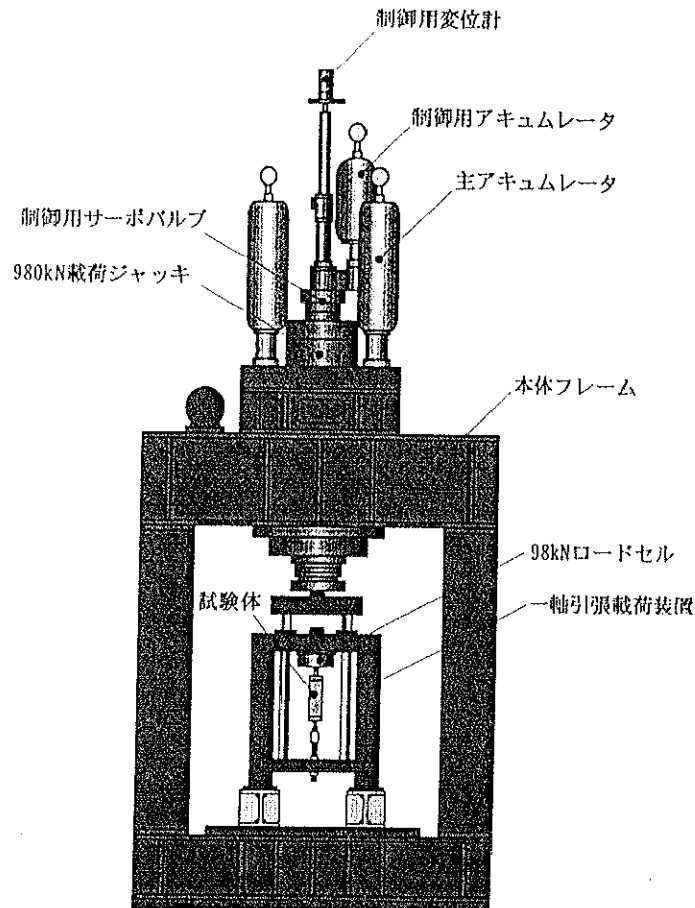


図-4.6 実験装置の概要

日で脱型したのち、常時水分が供給できるようにした塗れた布で試験体を覆って 14 日間湿潤養生を行った。試験は、材齢 40 日から 4 日間で行った。試験に用いたコンクリートの圧縮強度は、 $34.1(\text{N}/\text{mm}^2)$ である。

本研究では、試験体に作用する荷重を計測するために許容荷重 98kN のロードセルを用いている。そのために、試験体の最大耐力がこの値を以下となるように試験体下部の鋼材の断面を  $\phi 12\text{mm}$  とし、この部分で 80kN 程度の荷重で破断させるようにした。また、試験体の両端には M24 のネジが切っており一軸引張載荷装置に直接取り付けられるようにしてある。

#### 4. 3. 2 実験方法

本研究では、図-4.6 に示すサーボ制御式急速載荷試験装置(最大荷重容量 980kN)に一軸引張載荷装置を組み込んで試験を行っている。

試験体に作用する荷重は、一軸引張載荷装置の固定端側に取り付けられた許容荷重 98kN のロードセルで計測している。試験体の鋼材には、図-4.4 に示すように、上部



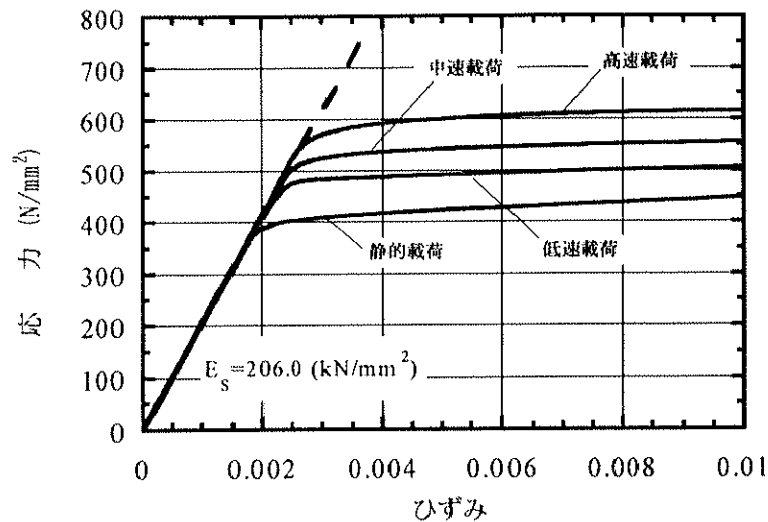


図-4.7 鋼材の応力-ひずみ関係

(SU)、中央部(SM)の要素試験部分ならびに下部(SD)の部分にそれぞれひずみゲージ(ゲージ長 2mm)を 2 枚ずつ貼付している。要素試験部分のコンクリートの変形量ならびにコンクリートに作用する荷重は、この部分の鋼材に貼付したひずみゲージ(SM)の計測値に基づき式(4-1)、式(4-2)によって評価される。コンクリート試験体の両表面には、要素試験部分に 2 枚 (FZ)、定着部分に 1 枚 (AZ)ひずみゲージ(ゲージ長 30mm)を貼付している。鋼材の上部に貼付したひずみゲージ(SU)は、ロードセルで計測される荷重との比較を検討するためのものである。試験結果から、ロードセルによる計測値と鋼材上部のひずみ(SU)から評価される荷重の値は、計測位置の違いによらずほぼ等しいことを確認した。

試験においては、荷重速度をパラメータとしている。荷重速度は、静的・低速・中速・高速の 4 種類である。これらの速度は、ひずみ速度表示で、静的が  $2 \times 10^{-6}$ (1/sec)、低速が  $3.2 \times 10^{-3}$ (1/sec)、中速が  $4.6 \times 10^{-2}$ (1/sec)、高速が  $2.2 \times 10^{-1}$ (1/sec)に相当する。なお、各荷重速度に対して 3 体ずつの試験を行っている。

#### 4. 4 試験方法の妥当性に関する検討

##### 4. 4. 1 試験結果に対する評価基準

要素試験部分のコンクリートに作用する応力の評価にあたっては、切欠き部分の最小断面に対して中央部の縁切り材による断面欠損( $\phi 24$ mm)を考慮して計算している。パラメータである荷重速度は、ひずみ速度(ひずみ速度は、第 3 章で提示した定義に基づく)を指標として用いている。

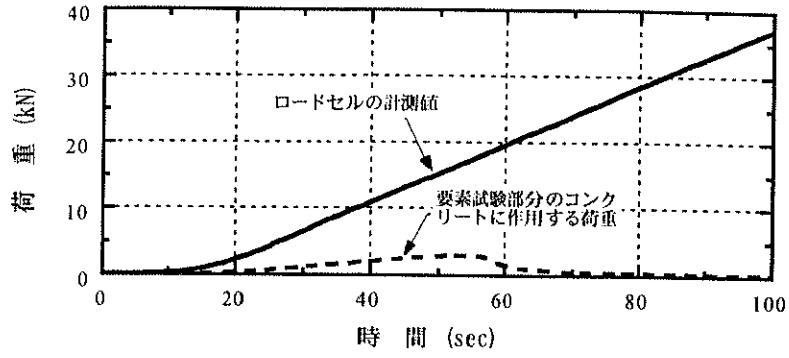
図-4.7 に、鋼材の下部に貼付したひずみゲージから得られた鋼材の応力-ひずみ関

係を示す。ひずみ速度が大きくなると降伏応力は上昇するが、弾性係数の値は一定であるとみなせる。本試験で用いた供試体中の鋼材の弾性係数は、ひずみ速度によらず  $206.0 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$  とする。

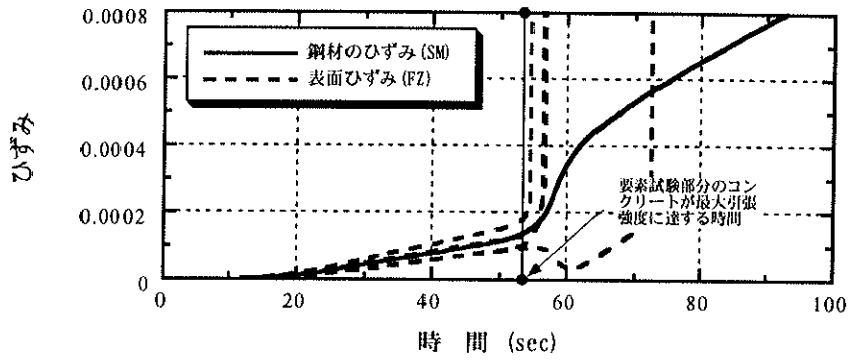
#### 4. 4. 2 試験方法に対する検討

コンクリート中に鋼材を埋め込んだ試験体を用いて行った今回の試験では、荷重制御方式の静的載荷においても要素試験部分のコンクリートの軟化挙動を安定して計測することが可能であった。ここで、静的および高速載荷において試験体に作用する荷重ならびに各ひずみの時刻歴の一例をそれぞれ図-4.8と図-4.10に示す。また、そのとき試験後に観察されたひび割れの状況を図-4.9および図-4.11に示す。すべての試験体で、要素試験部分に切欠きの角の部分の部分を起点としたと思われるひび割れが生じているのが確認できた。図-4.8 (b), 図-4.10 (b)から、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達するまでは試験要素部分のコンクリート表面のひずみ(FZ)と鋼材のひずみ(SM)はほぼ等しいとみなすことができる。その後、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達すると、この部分のコンクリート表面のひずみ(FZ)が急増する。この時点で、表面には可視できるひび割れが出現しているものと推定される。また、図-4.8 (c)および図-4.10 (c)中には、定着部のコンクリートと鋼材の付着が完全であるという仮定に基づいて計算したひずみの値を示している。定着部分のひずみは、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達した後で若干減少する傾向を示すが、ほぼ計算値に対応している。このことから、定着部分についてもコンクリートのひずみと鋼材のひずみはほぼ等しくなっており、要素試験部分の境界ではコンクリートと鋼材の変形は等しいという仮定は成り立っていると考えてよい。よって、要素試験部分における鋼材で計測された変形量をコンクリートの変形量とみなしても実用上問題ないと考える。

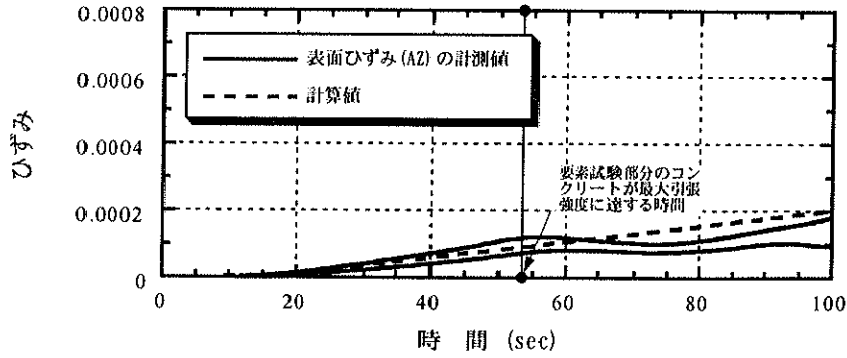
静的載荷で得られた要素試験部分(L=40mm)のコンクリートの応力-変形関係とCEB-FIPモデルから評価される関係を、比較のために図-4.12に示す。CEB-FIPモデルの計算には、コンクリートの圧縮強度を $f'_c=34.1(\text{N/mm}^2)$ 、引張強度ならびに弾性係数は静的載荷で得られたそれぞれの平均値 $f_t=2.70(\text{N/mm}^2)$ 、 $E_c=2.66 \times 10^4(\text{N/mm}^2)$ を用いている。本試験値とCEB-FIPモデルによって評価される応力-変形関係は、変形量が0.02(mm)程度までは良い一致を示している。したがって、CEB-FIPモデルの第一軟化勾配に相当する部分の挙動を調べる目的においては、本試験方法によって十分計測することが可能であると言える。



(a) 荷重



(b) 要素試験部分の鋼材ひずみと表面ひずみ



(c) 定着部分の表面ひずみ

図-4.8 静的載荷における荷重およびひずみの時刻歴

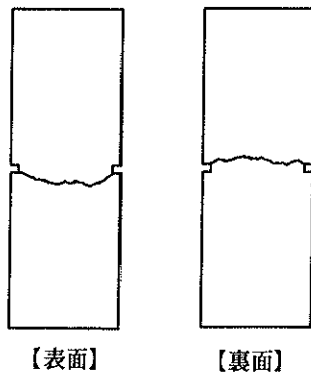
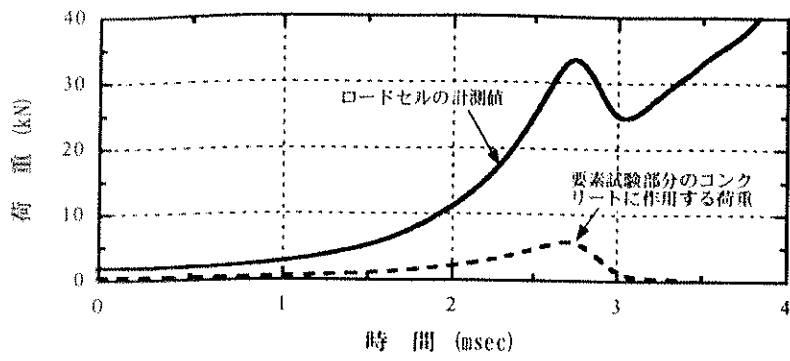
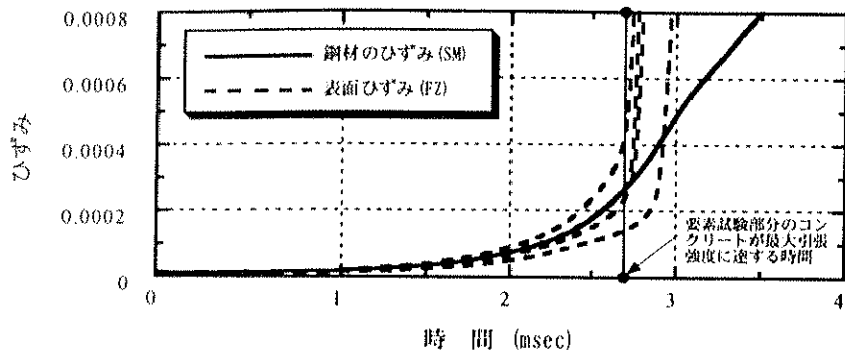


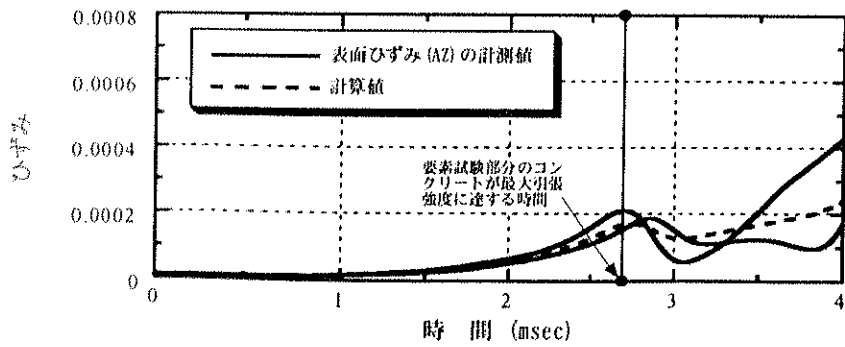
図-4.9 静的載荷におけるひび割れ状況



(a) 荷重



(b) 要素試験部分の鋼材ひずみと表面ひずみ



(c) 定着部分の表面ひずみ

図-4.10 高速載荷における荷重およびひずみの時刻歴

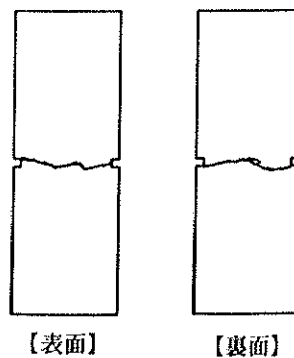


図-4.11 高速載荷におけるひび割れ状況

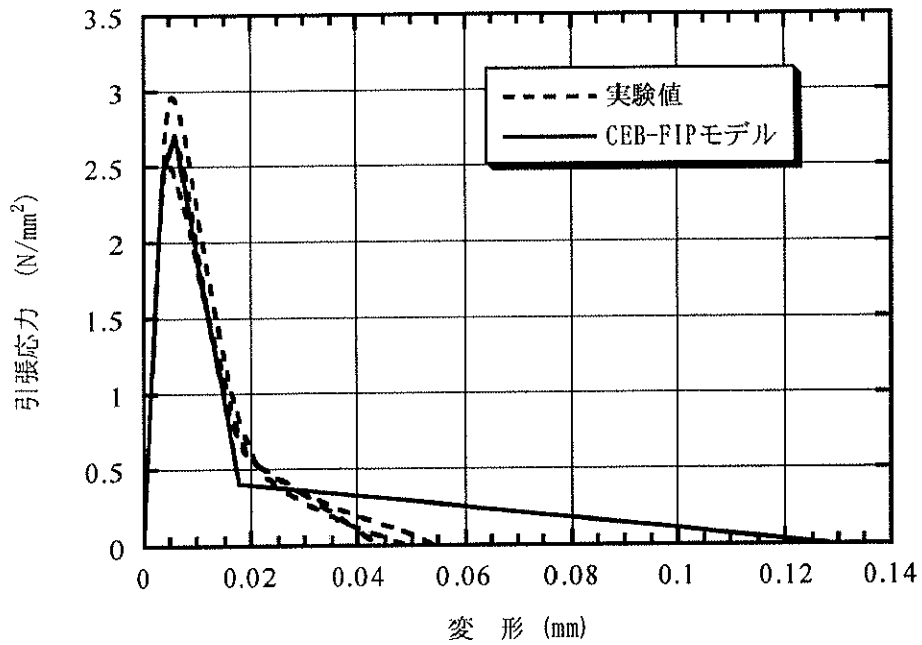


図-4.12 静的荷重における引張応力-変形関係

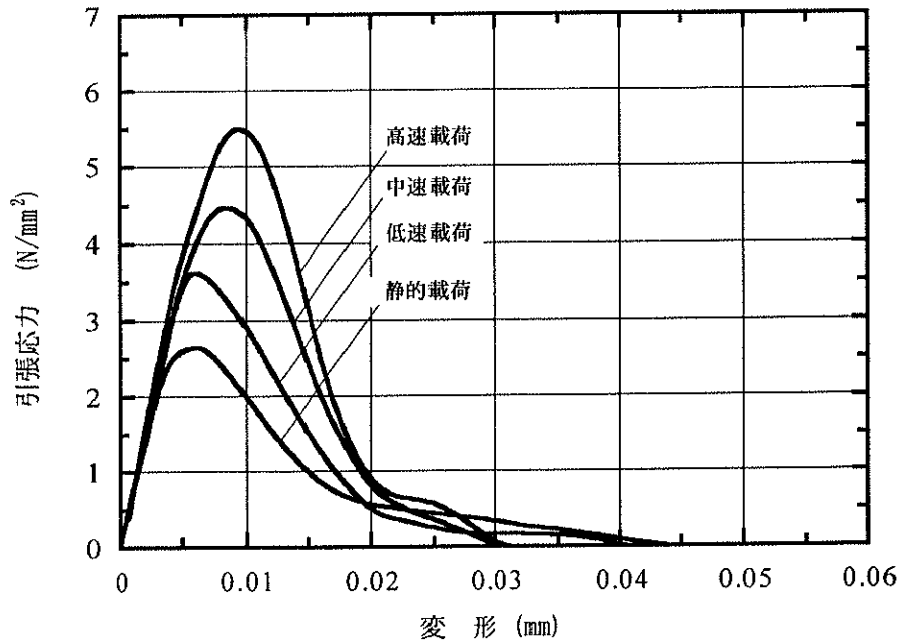


図-4.13 各荷重速度における引張応力-変形関係

#### 4. 5 ひずみ速度がコンクリートの引張応力-変形関係に及ぼす影響

各荷重速度に対して得られた代表的な要素試験部分(L=40mm)のコンクリートの引張応力-変形関係を、図-4.13 に示す。この図から、ひずみ速度が大きくなると、最大引張強度が大きくなるとともに応力-変形関係の初期の勾配も大きくなっていることがわかる。一方、ひずみ速度が大きくなり最大引張強度が増加するとポストピーク

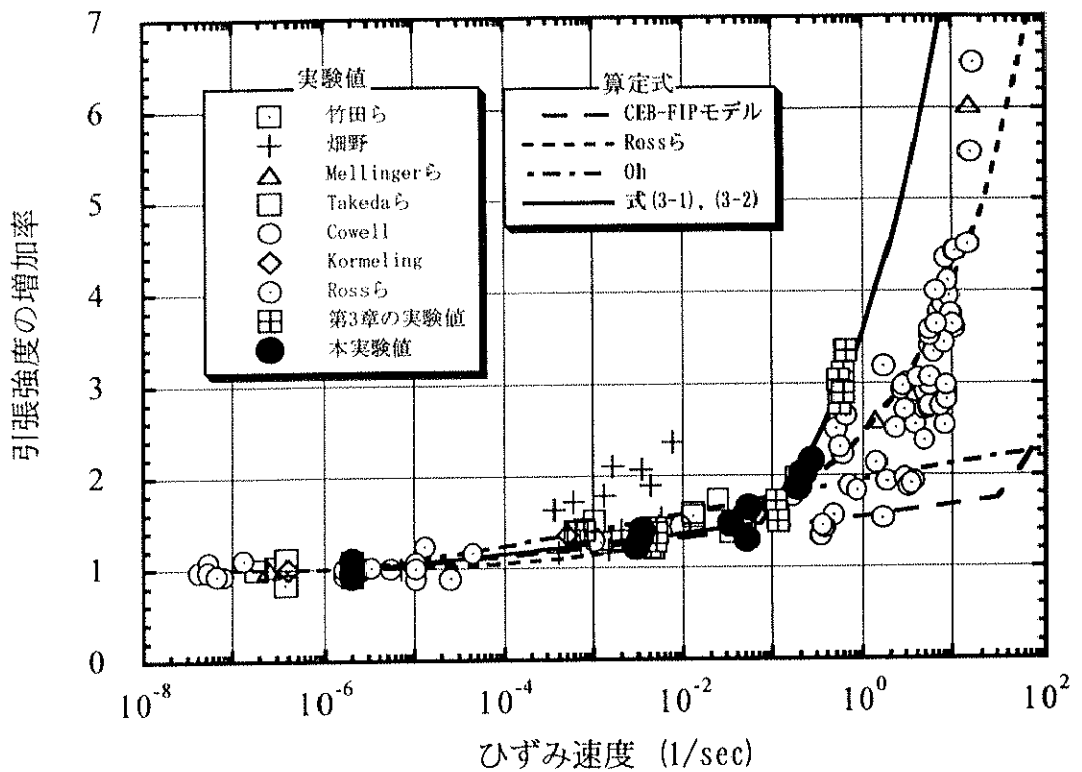


図-4.14 引張強度の増加率とひずみ速度の関係

の軟化勾配は急になる傾向にあることが認められる。すなわち、ひずみ速度が大きくなると引張強度は増加するが脆性化する傾向にあると考えられる。

#### 4. 6 プレピーク領域における引張特性とひずみ速度の関係の再検討

前章では、断面が同一で高さが異なる供試体に対する急速一軸引張試験を行い、載荷速度や供試体の高さ寸法が引張強度、引張強度時のひずみおよび弾性係数等の引張特性に及ぼす影響を検討した。その結果、静的載荷に対する高速載荷時の各引張特性値の比（引張強度の増加率，引張強度時のひずみの増加率，弾性係数の増加率）は、いずれもひずみ速度のみに依存することを示し、各引張特性値の比とひずみ速度の関係を定式化した。

本試験で得られた引張強度の増加率、引張強度時のひずみの増加率ならびに弾性係数の増加率とひずみ速度の関係を、直接一軸引張試験で得られた3章の結果（図-3.16，図-3.17，図-3.18）と合わせて、それぞれ図-4.14，図-4.15および図-4.16に示す。これらの図から、本試験値はそれぞれ前章の実験結果とほぼ一致しており前章に示した算定式で十分評価できると言える。

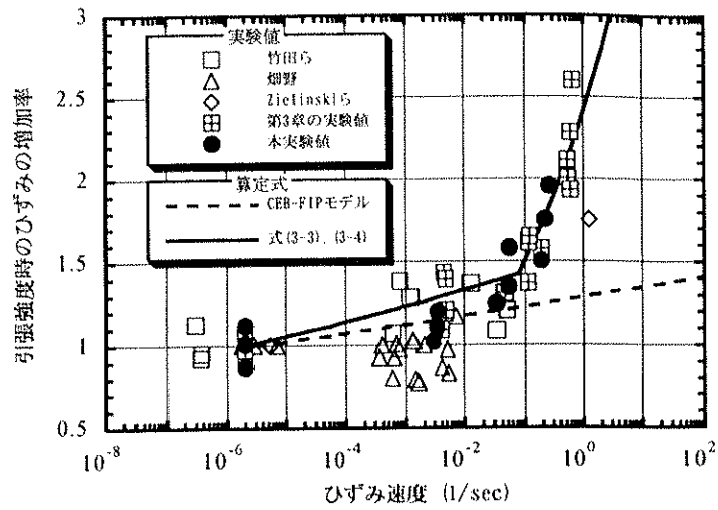


図-4.15 引張強度時のひずみの増加率とひずみ速度の関係

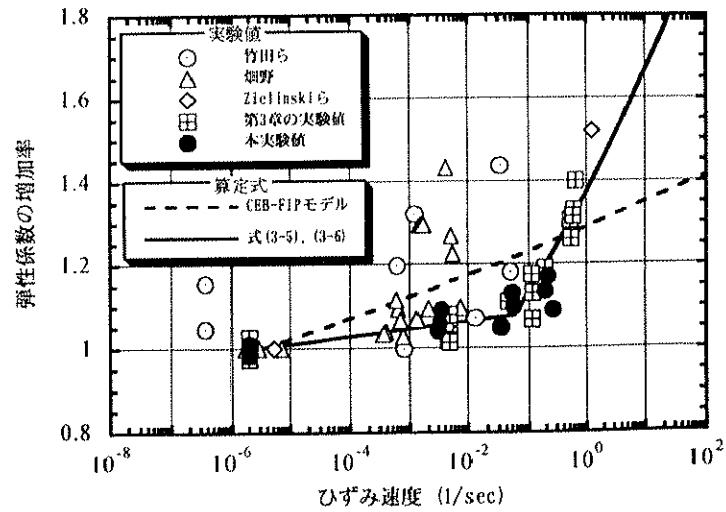


図-4.16 弾性係数の増加率とひずみ速度の関係

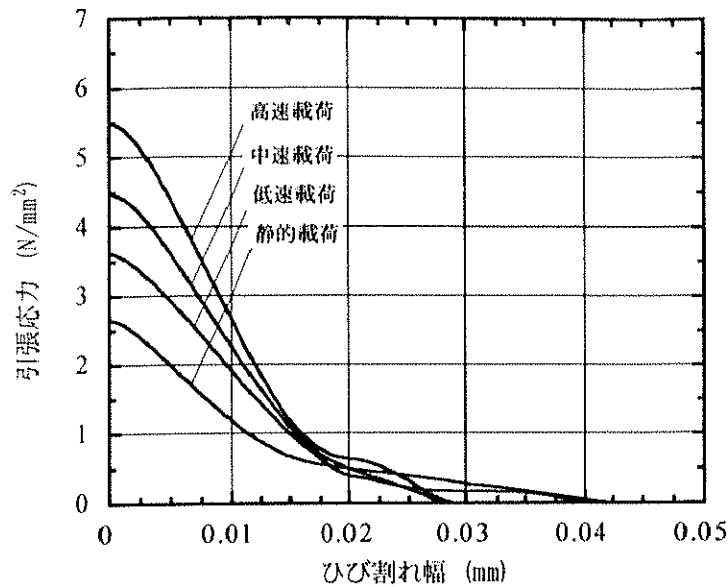


図-4.17 引張応力-ひび割れ幅関係

#### 4. 7 コンクリートの動的な引張軟化挙動の定量的な評価

##### 4. 7. 1 動的軟化挙動の定量的評価のための破壊エネルギー

コンクリートの引張軟化挙動を数値的に記述するために、Hilerborg ら<sup>2)</sup>は仮想ひび割れモデルを提案した。以来、このモデルに基づいて、破壊進行領域の単位面積当たりで消費される破壊エネルギーを用いてコンクリートの引張軟化挙動を定量的に評価する試みが盛んに行われている。

破壊エネルギーは、図-4.1 に示した最大引張応力以降の応力-ひび割れ幅関係で表される引張軟化曲線が囲む面積値として定義されている。ここで、ひび割れ幅は要素試験部分(L=40mm)の全体変形の計測値から最大引張応力以降の塑性変形量として与えられる。図-4.17 に、各载荷速度に対して得られた代表的な引張応力-ひび割れ幅関係を示す。引張応力-ひび割れ幅関係の下降勾配は、ひずみ速度が大きくなるほど急勾配になることがわかる。

次に、本試験で得られた破壊エネルギーとひずみ速度の関係を図-4.18 に示す。この図から、破壊エネルギーはひずみ速度が大きくなるにしたがい増加することが認められる。破壊エネルギーは、単位面積当たりのひび割れ面を形成するために消費されるエネルギーを意味することから、ひずみ速度が大きくなるほどひび割れ面を形成するために大きなエネルギーが消費されるといえる。



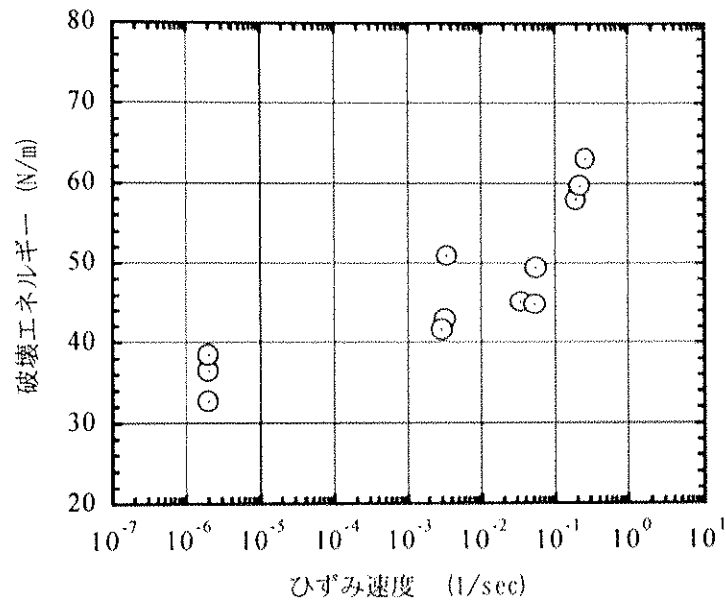


図-4.18 破壊エネルギーとひずみ速度の関係

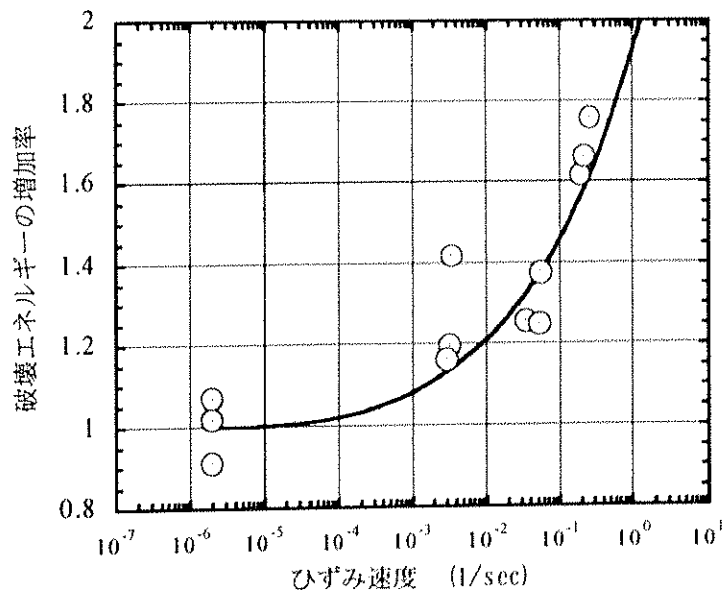


図-4.19 破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係

#### 4. 7. 2 破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係

静的載荷における破壊エネルギー値に対する急速載荷時の破壊エネルギー値の比を、破壊エネルギーの増加率と定義する。図-4.19 に、破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係を示す。この図から、ひずみ速度が  $2.2 \times 10^{-1} (1/sec)$  に相当する高速載荷に対しては、静的載荷に比べて破壊エネルギーは約 60% 程度増加していることがわかる。

図-4.19 に示す本試験で得られた破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係について回帰式を求めると次の式が得られる。

$$\frac{G_{F,d}}{G_{F,s}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{\alpha \left[ \text{Log} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^\beta} \quad (4-3)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度[ $2.0 \times 10^{-6}$  (1/sec)],  $\dot{\epsilon}$ は急速載荷時のひずみ速度(1/sec),  $G_{F,s}$ は静的載荷時の破壊エネルギー(N/m),  $G_{F,d}$ はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷した場合の破壊エネルギー(N/m),  $\alpha$ および $\beta$ は定数[ $\alpha = 0.002, \beta = 1.85$ ]である。式(4-3)を用いると、図-4.19に太い実線で示す関係が得られる。

#### 4. 7. 3 脆性化指標による定量的評価

本節4. 7. 1で、最大引張応力以後の引張応力-ひび割れ幅関係で表されるコンクリートの引張軟化曲線の下降勾配は、ひずみ速度が大きくなるほど急になりコンクリートは脆性化する傾向にあることを示した。また、引張軟化曲線下の面積で定義される破壊エネルギーは、ひずみ速度が大きくなるにしたがい増加することを示した。破壊エネルギーの値自体は、その値が大きくなるほど引張破壊に対して大きな抵抗性能を有することを意味するものである。しかしながら、最大引張応力以後の挙動が脆性的か否か、あるいは引張破壊がどれだけ急激に進むのかを表すものではない<sup>16)</sup>。

最大引張応力以後の挙動あるいは引張破壊の進展度合を表す指標として、Van Mier<sup>17)</sup>は、弾性エネルギーと破壊エネルギーの比を用いて表すことが妥当であると論じている。そこで、脆性化指標を(Brittleness Index)を次式で定義する。

$$\text{脆性化指標} = \frac{2 \times \text{弾性エネルギー}}{\text{破壊エネルギー}} = \frac{f'_{td}{}^2 L}{E_{cd} G_{F,d}} \quad (4-4)$$

ここに、 $f'_{td}$ 、 $E_{cd}$ 、 $G_{F,d}$ は、それぞれひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で載荷したときの引張強度、弾性係数、破壊エネルギー、 $L$ は試験体の長さである。式(4-4)によって評価される脆性化指標は、その値が大きいものほど脆性的となることを意味している。

本試験値に対して評価された脆性化指標とひずみ速度の関係を、図-4.20に示す。この図から、脆性化指標はひずみ速度の増大とともに増加する傾向が認められる。つまり、ひずみ速度の増大にともなってその破壊は脆性的となることを示している。

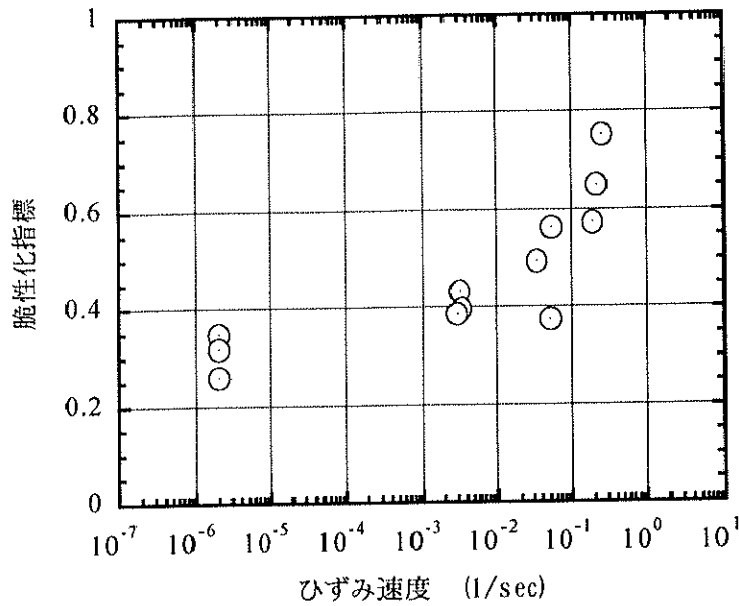


図-4.20 脆性化指標とひずみ速度の関係

#### 4. 8 応力-変形関係の定式化

ここでは、Hillerborg による仮想ひび割れモデルの考え方に従い、ひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張における構成式の定式化を行う。すなわち、無ひび割れ領域における応力-ひずみ関係、ひび割れ領域における引張応力-ひび割れ幅関係をそれぞれ定式化する。

無ひび割れ領域では、CEB-FIP モデルと同様に図-4.21 (a)に示すようにバイリニア型の応力-ひずみ関係を与えるものとする。任意のひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$  で荷重した場合の最大引張応力、最大引張応力時のひずみおよび弾性係数をそれぞれ  $f'_{td}$ 、 $\varepsilon_{td}$ 、 $E_{cd}$  とすると、応力( $\sigma$ )-ひずみ( $\varepsilon$ )関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &\sigma \leq 0.9f'_{td} \text{ のとき} \\ &\sigma = E_{cd}\varepsilon \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} &0.9f'_{td} \leq \sigma \leq f'_{td} \text{ のとき} \\ &\sigma = f'_{td} - \frac{0.1f'_{td}}{\varepsilon_{td} - (0.9f'_{td}/E_{cd})}(\varepsilon_{td} - \varepsilon) \end{aligned} \quad (4-6)$$

ここで、任意のひずみ速度  $\dot{\varepsilon}$  に対する  $f'_{td}$ 、 $\varepsilon_{td}$ 、 $E_{cd}$  はそれぞれ前章の式(3-1)と式(3-2)、式(3-3)と式(3-4)、式(3-5)と式(3-6)で与えることができる。

最大引張応力以降の破壊領域における応力-ひび割れ幅関係を定式化するにあつ

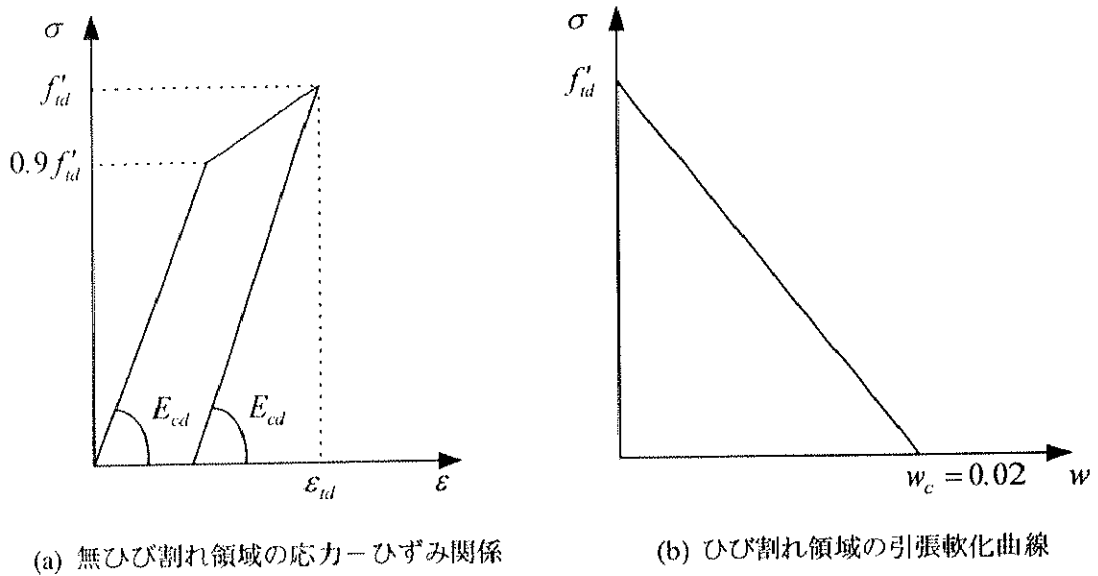


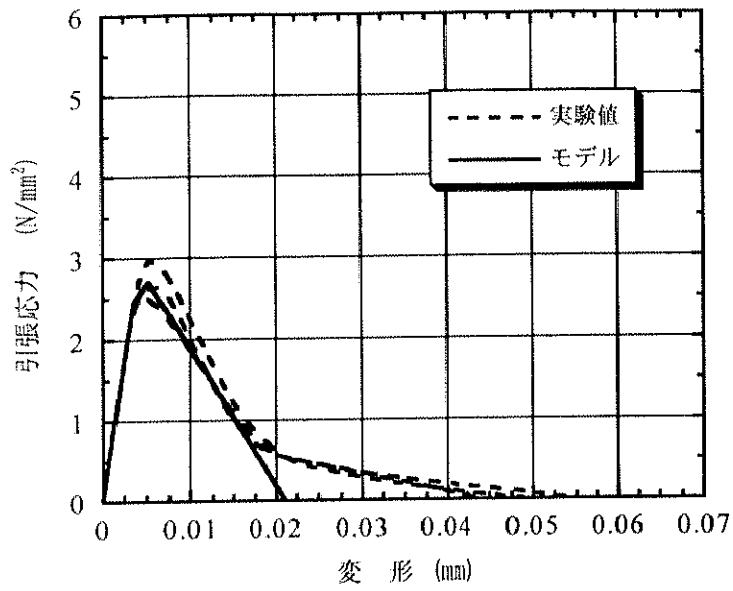
図-4.21 コンクリートの応力-ひずみ関係と引張軟化曲線

では、本試験結果が1種類のコンクリートに基づいていること、完全な応力-ひび割れ幅関係を計測することは難しいことなどから、現段階で複雑な形での定式化を行うことは適切でない。そこで、応力-ひび割れ幅関係を単純な1次式で与えることにした。試験で得られたすべての応力-ひび割れ関係のデータに対して変形量が0.02mmまでの試験データを用い、最大引張応力点を通るように直線回帰を行った。その結果、変形量が0.02mmで伝達引張応力がゼロとなった。よって、ここではひずみ速度の違いによらず0.02mmを最大ひび割れ幅( $w_c$ )とし、引張強度点からこの点までを直線でモデル化する。図-4.21 (b)に示す応力( $\sigma$ )-ひび割れ幅( $w$ )関係は、次式で与えられる。

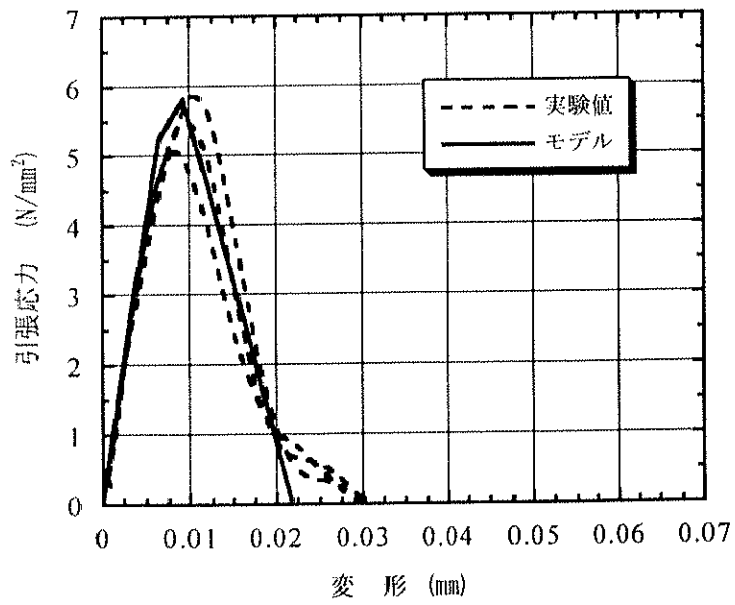
$$\sigma = f'_{td} \left( 1 - \frac{w}{w_c} \right) \quad (4-7)$$

ここで、任意のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対する $f'_{td}$ は前章の式(3-1)、(3-2)で与えることができる。

任意のひずみ速度に対するコンクリートの引張応力-変形関係は、無ひび割れ領域では式(4-5)、式(4-6)を、ひびわれ領域に式(4-7)を適用して求めることができる。図-4.22 に試験値および式(4-5)~式(4-7)を用いて計算された引張応力-変形関係を示す。計算値は変形が0.02mmまでは試験値と良好な一致を示していることが確認できる。



(a) 静的載荷



(b) 高速載荷

図-4.22 コンクリートの引張応力-変形関係  
(実験値と計算値の比較)

#### 4. 9 まとめ

本章では、まずコンクリートの引張強度以降までの挙動を調べるために引張用試験体を考案し、その適用性について検討を行い有用性を確認した。次に、この試験体を用いてひずみ速度をパラメータとする急速一軸引張試験を行い、ひずみ速度がコンクリートの引張軟化挙動に及ぼす影響を定性的・定量的に調べた。本章において得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 考案した試験体を用いることで、急速一軸引張荷重を受けるコンクリートの引張軟化挙動の計測が可能である。
- (2) ひずみ速度はコンクリートの引張軟化曲線に影響を及ぼし、ひずみ速度が大きくなるほど引張軟化曲線の軟化勾配は大きくなり脆性化する傾向にある。
- (3) 破壊エネルギーは、ひずみ速度が大きくなるほど増加する。
- (4) 引張軟化挙動は、脆性化指標を用いることによってひずみ速度の増大に伴う脆性的傾向を定量的に評価することができる。
- (5) ひずみ速度効果を考慮したコンクリートの引張における構成関係を定式化した。

【第4章の参考文献】

- 1) Van Mier, J. G. M. : Fracture Processes of Concrete, CRC Press, 1997, pp.88-114.
- 2) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E. : Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 3) 三橋博三:破壊力学と鉄筋コンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.5, 1996.5, pp.5-15.
- 4) Leibengood, L. D., Darwin, D. and Dodds, R. H. : Parameters affecting FE analysis of concrete structures, Journal of Structural Engineering, Vol.112, No.2, February, 1985, pp.326-341.
- 5) 野村希晶・三橋博三:破壊エネルギー試験結果を用いたコンクリートの引張軟化則簡易決定法, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.2, 1996.7, pp.119-126.
- 6) 橘高義典・上村克郎・中村成春:コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, 1993.11, pp.15-25.
- 7) 中村成春・橘高義典・三橋博三・内田裕市:コンクリートの引張軟化特性の標準試験方法に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, 1999.1, pp.151-164.
- 8) Yon, J. H., Hawkins, N. M. and Kobayashi, A. S. : Strain-rate sensitivity of concrete mechanical properties, ACI Material Journal, V.89, No.2, March-April, 1992, pp.146-153.
- 9) 栗原哲彦・名和真一・六郷恵哲:載荷速度がコンクリートの引張軟化曲線の形状に及ぼす影響, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第5部, 平成9年9月, pp.370-371.
- 10) 藤掛一典・篠崎敬一・大野友則・木野 淳・鈴木 篤:急速一軸圧縮荷を受け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, 土木学会論文集投稿中.
- 11) Linberger, E., Brandes, K. and Herter, J. : Influence of mechanical properties steel on the ductility of reinforced concrete beams with respect to high strain rate., Proceeding of Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, RILEM-CEB-IABSE-IASS Interassociation Symposium, Berlin, June, 1982, pp.134-145.
- 12) 高橋芳彦:高速載荷試験による鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 平成2年10月.
- 13) Wang P. T., Shah S. P. and Naaman A. E. : Stress-strain curves of normal and lightweight concrete in compression, ACI Journal, November, 1978, pp.603-611.
- 14) CEB-FIP MODEL CODE 1990, First Draft, CEB Bulletin d'Information No.195, 1990.
- 15) Bazant, Z. P. and Gilles, P. C. : Measurement of characteristic length of nonlocal continuum, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, No.4, April, 1989, pp.755-767.
- 16) 三橋博三:コンクリートの強度特性が破壊力学パラメータに及ぼす影響, コンクリート工学論文集, 第6巻, 第1号, 1995.1, pp.81-88.
- 17) 前掲文献1)に同じ: pp.384-387.

## Appendix-A CEB-FIP モデルコードにおけるコンクリートの引張構成則

CEB-FIP モデルコードでは、Hillerborg の仮想ひび割れモデルに従い、無ひび割れ領域の引張応力-ひずみ関係ならびにひび割れ界面における引張応力-ひび割れ幅関係を規定することによりコンクリートの引張構成則を与えている。

単位面積当りの引張ひび割れの進展に必要な破壊エネルギー  $G_F$  (Nm/m<sup>2</sup>) は、圧縮強度ならびに最大粗骨材寸法に基づき次式で与えられる。

$$G_F = \alpha_F \cdot f_c^{0.7} \quad (\text{A-1})$$

ここで、 $f_c$  : コンクリートの圧縮強度(MPa),  $\alpha_F$  : 最大粗骨材寸法  $d_{max}$  に基づく係数(表-A.1 参照)

(1) 無ひび割れ領域における応力-ひずみ関係

$$\begin{aligned} \sigma_{ct} \leq 0.9f_{ctm} \text{ のとき} \\ \sigma_{ct} = E_c \varepsilon_{ct} \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

$$\begin{aligned} 0.9f_{ctm} < \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \text{ のとき} \\ \sigma_{ct} = f_{ctm} - \frac{0.1f_{ctm}}{0.00015 - (0.9f_{ctm}/E_c)} (0.00015 - \varepsilon_{ct}) \end{aligned} \quad (\text{A-3})$$

ここで、

$E_c$  : 弾性係数(MPa)  
 $f_{ctm}$  : 引張強度(MPa)  
 $\sigma_{ct}$  : 引張応力(MPa)  
 $\varepsilon_{ct}$  : 引張ひずみ

(2) ひび割れ界面における引張応力-ひび割れ幅関係

$$\begin{aligned} 0.15f_{ctm} \leq \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \text{ のとき} \\ \sigma_{ct} = f_{ctm} \left( 1 - 0.85 \frac{W}{W_1} \right) \end{aligned} \quad (\text{A-4})$$

$$\begin{aligned} 0 \leq \sigma_{ct} \leq 0.15f_{ctm} \text{ のとき} \\ \sigma_{ct} = \frac{0.15f_{ctm}}{W_c - W_1} (W_c - W) \end{aligned} \quad (\text{A-5})$$

ここで、

$$W_1 = \frac{G_F - 22W_c (G_F/\alpha_F)^{0.95}}{150(G_F/\alpha_F)^{0.95}} \quad (\text{A-6})$$

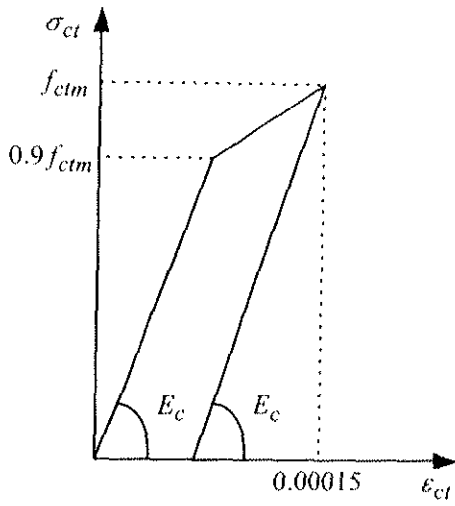
$W_1$  : ひび割れ幅(mm) 図-A.1(b)参照



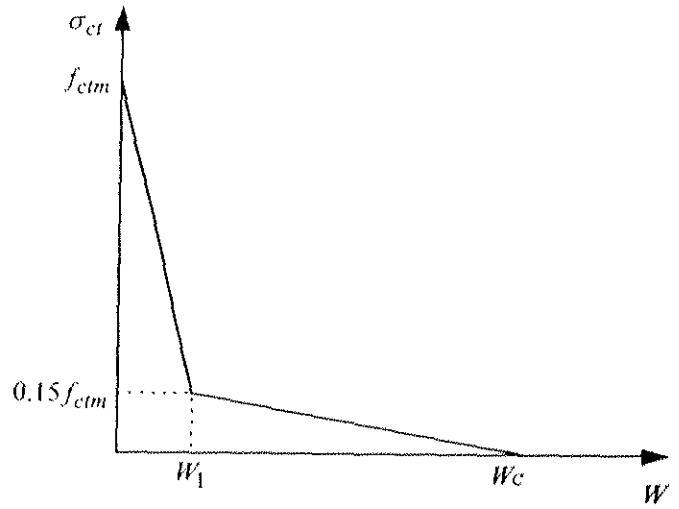
$W_c$  :  $\sigma_{ct} = 0$  のときのひび割れ幅(mm) 表-A. 2 参照

$G_F$  : 破壊エネルギー(Nm/m<sup>2</sup>)

$\alpha_F$  : 最大粗骨材寸法  $d_{max}$  に基づく係数 表-A. 1 参照



(a) 無ひび割れコンクリートの引張応力-ひずみ関係



(b) 引張応力-ひび割れ幅関係

図-A. 1 コンクリートの応力-ひずみ曲線と引張軟化曲線

表-A. 1  $d_{max}$ と $\alpha_F$ の関係

$d_{max}$ (mm)	$\alpha_F$
8	4
16	6
32	10

表-A. 2  $d_{max}$ と $w_c$ の関係

$d_{max}$ (mm)	$w_c$ (mm)
8	0.12
16	0.15
32	0.25