

ひずみ速度の影響を考慮した コンクリートの引張軟化特性の定式化

藤掛一典¹・上林勝敏²・大野友則³・江守克彦⁴

¹正会員 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)

²学生会員 防衛大学校理工学研究科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 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)

⁴正会員 Ph.D 前橋工科大学教授 工学部建築学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

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試験技術上の問題に起因していると考えられる。本研究では、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、載荷速度をパラメータとする急速一軸引張荷重試験を行い、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検討を行っている。さらに、試験結果に基づいてひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張特性の定式化を行っている。

Key Words : plain concrete, uniaxial rapid tensile loading, strain-rate, testing method, fracture energy, dynamic tensile softening characteristic, fictitious crack model

1. はじめに

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐力力や変形挙動を解析によって適切に評価するためには、大きなひずみ速度の負荷下におけるコンクリートの圧縮特性ならびに引張特性、とくに引張軟化挙動を定性的・定量的に把握することは極めて重要であると考えられる。

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¹⁾。また破壊進行領域では、負荷の継続にともなって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、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。このため、計測長さや計測場所によって供試体に生じるひずみの評価は、大きく異なることが知られている²⁾。Hillerborg ら³⁾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)の広がりによって表した仮想ひび割れモデルを提案している。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を説明する上で重要な特性であると考えられる⁴⁾ため、鉄筋コンクリート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 ら⁵⁾は、コンクリート梁のFEM解析を行うにあたって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明らかにしている。このような背景から、静的荷重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^{6,7)}。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⁸⁾。

一方、急速一軸引張荷重を受けるコンクリートの動的引張軟化挙動については、未だ十分に把握されていない。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すること、かつコンクリートが破断に至るまで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

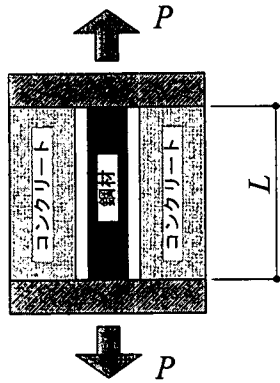


図-1 コンクリートと鋼材の合成構造体

いう試験技術（荷重方法、計測法など）上の問題に起因していると考えられる。ここで、急速引張荷重とは試験体を引張荷重器具に固定した状態で、引張荷重を瞬間的に高速度で作用させる荷重方法を言う。

本研究では、まずコンクリートの引張軟化特性を調べるための高速度急速荷重試験において、最大引張応力以降までも応力と変形が計測可能な試験方法について検討を行った。次に、荷重速度をパラメータとする急速一軸引張荷重試験を行い、得られた試験結果に対して破壊エネルギーや脆性化指標を用いることで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検討を行っている。さらに、仮想ひび割れモデルの概念に基づきひずみ速度の影響を考慮したコンクリートの引張特性の定式化を行っている。

2. 試験概要

(1) 引張軟化挙動を計測するための試験方法

これまで、急速一軸引張荷重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、高速度で荷重を作用させる急速荷重装置が特殊な機構となるため、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試験体の変形を精度良く計測することが極めて困難であるためと考えられる。

一般に、コンクリートの引張変形を計測するにあたってはひずみゲージや変位計が用いられる。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試験体の全体変形を供試体表面のひずみゲージを用いて評価することは適切でないとする。一方、高ひずみ速度(10⁰(1/sec)程度)で変形する試験体の変形を変位計

で計測する場合、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。

つまり、急速一軸引張荷重を受けるコンクリートの軟化領域における試験体の変形を計測するためには、コンクリート供試体の表面に貼付したひずみゲージや変位計以外の方法を用いる必要がある。既に著者らは、異形加工されたアクリル棒にひずみゲージを貼付した治具を供試体中央に埋め込む手法を用いて急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートの圧縮軟化挙動を計測する方法を提案し、その有用性を確認している⁹⁾。

本研究では、急速一軸引張荷重試験における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-1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。ここで、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^{9),10)}。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 ε_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 δ_c 、引張応力 σ_a は次式で計算できる。

$$\delta_c = \varepsilon_s L \quad (1)$$

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

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(1)、(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、その長さやそれぞれの断面積を調整することで、合成構造体全体の荷重-変形関係を単調増加型にすることができ、例えば静的一軸引張荷重において特殊な試験装置を用いなくとも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できるという利点もある。

(2) 試験体の製作

本研究では、前節で示した合成構造体のアイデアに基づき、試験体の試験装置への納まり具合や各種の検討を行い、試験体の形状および寸法を最終的に図-2のように決定した。試験体にはコンクリートの最大引張応力以降

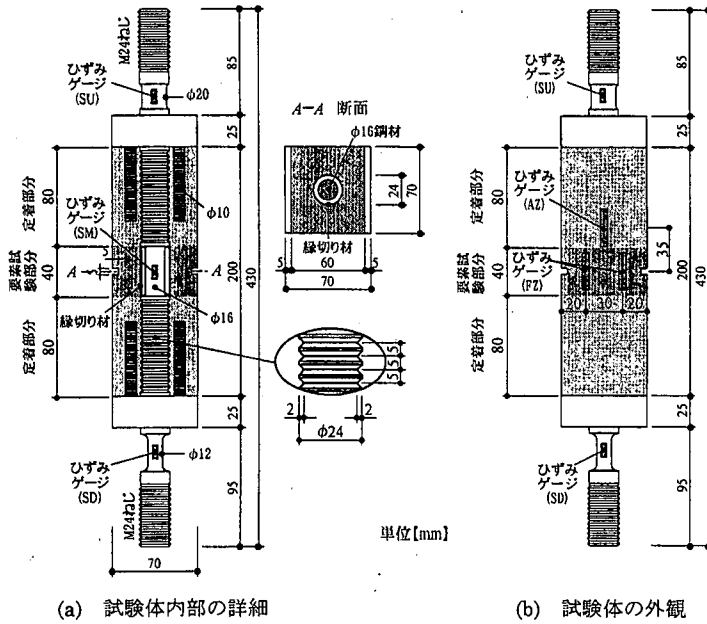


図-2 試験体の概要

の引張軟化曲線を得るために、鋼材（材質：S45C、弾性係数 $E_s = 206.0 \text{ kN/mm}^2$ ）が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 80mm ）がある。本実験では、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。

Bazant らの試験結果によれば、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¹¹⁾。このことを踏まえ、試験体に用いるコンクリートの最大粗骨材寸法を 10mm とすれば、要素試験部分の長さは 40mm 取れば十分であると判断した。

要素試験部分の鋼材の直径は 16mm とし、要素試験部分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、要素試験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コンクリートと鋼材の付着を十分に必要がある。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、鋼板に長さ 60mm 、 $\phi 10\text{mm}$ 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。

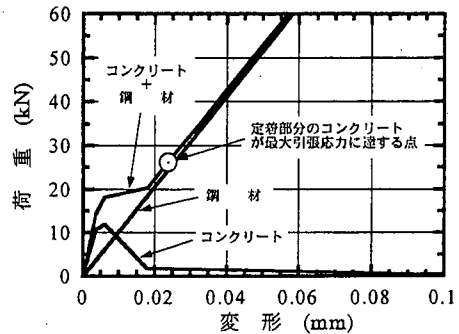


図-3 荷重-変形関係

要素試験部分のコンクリートと鋼材から成る合成構造物に対して、コンクリートの引張構成則に CEB-FIP モデルコードに規定されるモデル¹²⁾を適用して荷重-変形関係を計算すると図-3 のようになる。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。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-変形量関係は第二軟化勾配の部分にある。したがって、本試験方法を用いることにより少なくとも CEB-FIP モデルの第一軟化勾配部分に対応するコンクリートの引張軟化曲線は得られるものとする。

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						空気量 (%)	スランプ (cm)
			W	C	S	G	AE減水剤	消泡剤 C×%		
10	65	55	195	300	975	823	300cc/C =100kg	0.1	1.0	18.0

本研究で使用したコンクリートの配合を、表-1に示す。試験体は、打設後材齢1日で脱型した後、水分が常時供給できるようにした状態で14日間湿潤養生を行った。その後は実験室内にて気中養生を行った。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(N/mm²)である。

本試験では、試験体に作用する荷重は許容荷重98kNのロードセルを用いて計測を行っている。そのために、試験体の最大耐力がロードセルの許容荷重以下となるように試験体下部の鋼材の断面をφ12mmとし、この部分の鋼材が80kN程度の荷重で破断するようにした。また、試験体の両端にはM24のねじ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。

(3) 試験方法

本研究では、図-4に示すサーボ制御式急速載荷装置(最大載荷力980kN、最大載荷速度4m/sec)に一軸引張載荷装置(軸方向剛性650kN/mm)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(固有振動数11kHz)で計測している。試験体の鋼材には、図-2に示すように、上部(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枚づつ貼付している。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生じる引張応力は、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(1)、式(2)によって評価する。また、後述する3.(1)において本試験方法の妥当性を検討するため、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)のひずみゲージ(ゲージ長30mm)を貼付している。各センサーからの信号は動ひずみ測定器(最大応答周波数200kHz)で増幅した後、A/D変換器により最速2×10⁶sec(500kHz)の時間間隔でサンプリングした。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行うためのものである。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、ほぼ等しいことを確認した。

本試験では、載荷速度をパラメータとしている。載荷

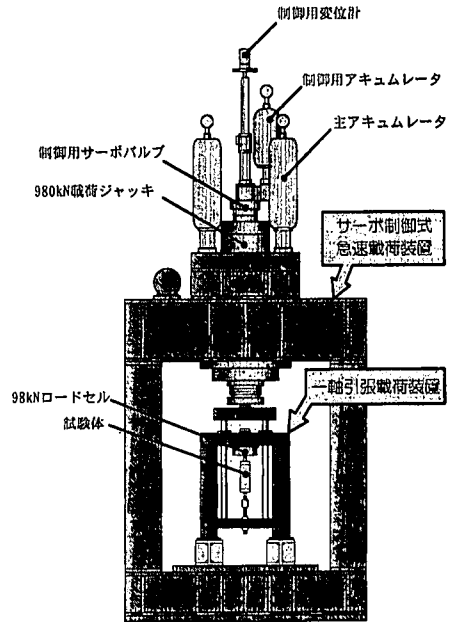


図-4 試験装置の概要

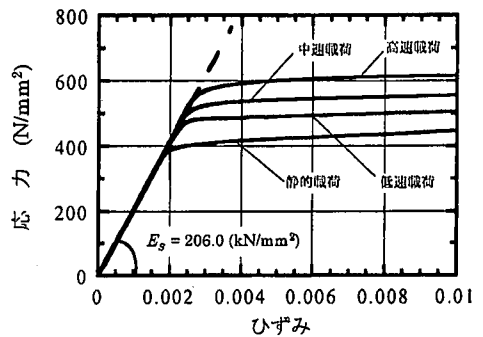
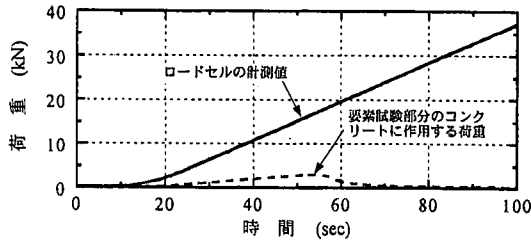
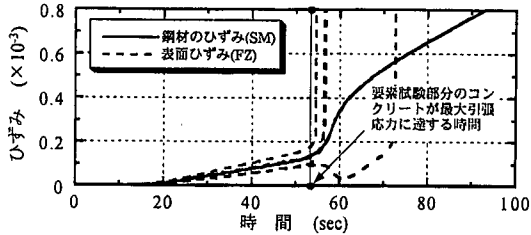


図-5 鋼材の応力-ひずみ関係

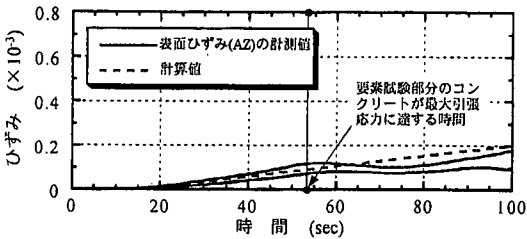
速度は、静的・低速・中速・高速の4種類である。これらの速度は、ひずみ速度表示で、静的が2×10⁶(1/sec)、低速が3.2×10⁶(1/sec)、中速が4.6×10⁶(1/sec)、高速が2.2×10⁷(1/sec)に相当する。なお、各載荷速度に対して3体づつの試験を行っている。



(a) 荷重

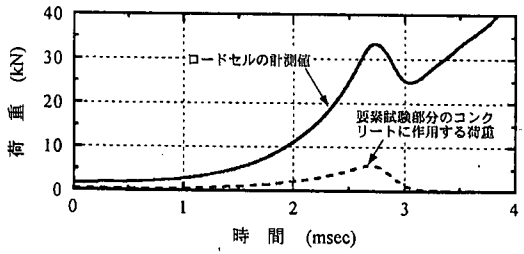


(b) 要素試験部分の鋼材ひずみと表面ひずみ

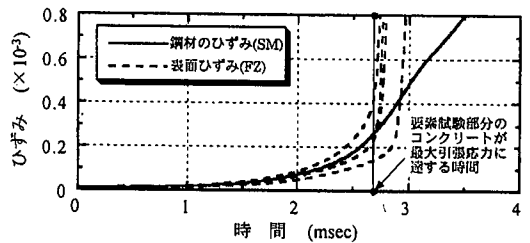


(c) 定着部分の表面ひずみ

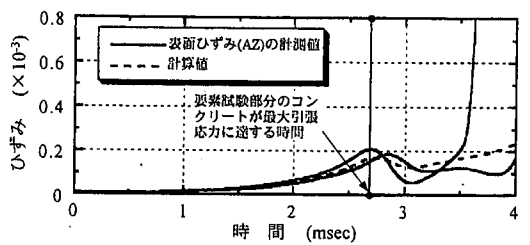
図-6 静的荷重における荷重およびひずみの時刻歴



(a) 荷重

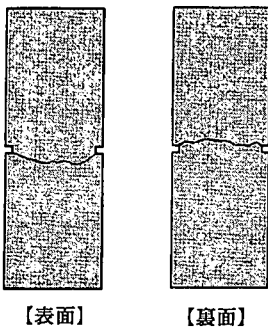


(b) 要素試験部分の鋼材ひずみと表面ひずみ



(c) 定着部分の表面ひずみ

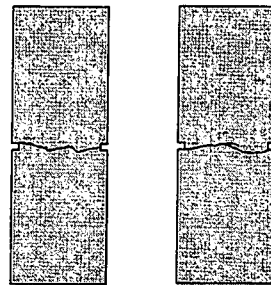
図-7 高速荷重における荷重およびひずみの時刻歴



【表面】

【裏面】

図-8 静的荷重に対するひび割れ状況



【表面】

【裏面】

図-9 高速荷重に対するひび割れ状況

3. 試験結果および考察

(1) 試験方法の妥当性に関する検討

試験データを整理する上で、要素試験部分のコンクリートに生じる応力は、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(φ24mm)を考慮して計算している。また、荷重速度を表すひずみ速度は、著者らの既往の研究と同様に引張強度の1/3点から引張強度点までの平均ひずみ速度で与えている¹³⁾。

図-5に、鋼材の下部に貼付したひずみゲージ(SD)から

得られた鋼材の応力-ひずみ関係を示す。荷重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。試験結果から、試験体中の鋼材の弾性係数(E_s)は、206.0(kN/mm²)である。

ここで、静的および高速荷重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-6と図-7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-8および図-9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-6(b)、図-7

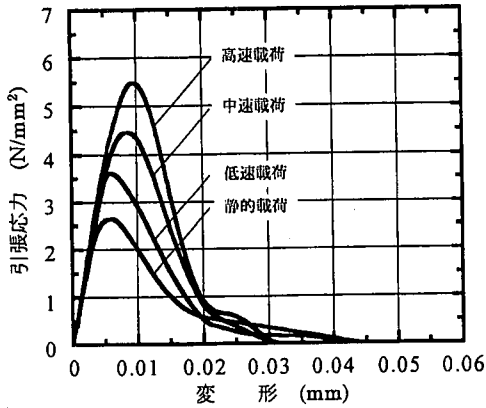
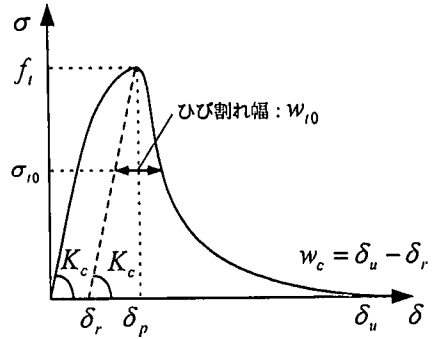


図-10 各載荷速度における引張応力-ひび割れ幅関係

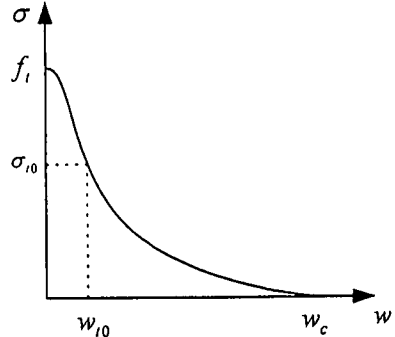
(b)から、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達するまでは試験要素部分のコンクリート表面のひずみ(FZ)と鋼材のひずみ(SM)はほぼ等しいとみなすことができる。その後、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達すると、この部分のコンクリート表面のひずみ(FZ)が急増する。この時点で、表面には可視ひび割れが出現しているものと推定される。また、図-6(c)および図-7(c)中には、定着部のコンクリートと鋼材の付着が完全であるという仮定に基づいて計算したひずみの値を破線で示している。定着部分のひずみの実測値は、要素試験部分のコンクリートが最大引張応力に達した後で減少する傾向を示すが、最大応力に達した後で静的載荷の場合 65sec 付近、高速載荷の場合 3.3msec 付近までは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られる。

(2) 載荷速度がコンクリートの引張応力-変形関係に及ぼす影響

静的から高速までの各載荷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-10 に示す。この図から、載荷速度が大きくなると、最大引張応力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、載荷速度の増大とともに最大引張応力が増加すると、ポストピーク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、載荷速度が大きくなると最大引張応力以降は脆性的な挙動を示す傾向があると考えられる。



(a) 計測された引張応力-全体変形関係



(b) 引張応力-ひび割れ幅関係

図-11 引張軟化曲線の算定

(3) コンクリートの動的引張軟化挙動の定量的評価

a) 破壊エネルギーによる動的軟化挙動の定量的評価

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、Hilberborg ら²⁾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、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、ひび割れ幅は図-11 に示すように要素試験部分(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-12 に、各載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、載荷速度が大きくなるほど急勾配を示すことがわかる。

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-13 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、載荷速度が大きくなるほどひび割れ面を形成す

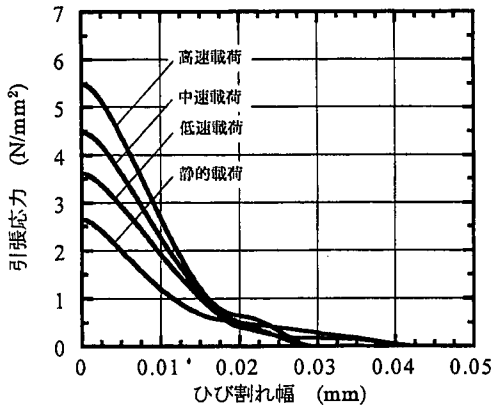


図-12 引張応力-ひび割れ幅関係

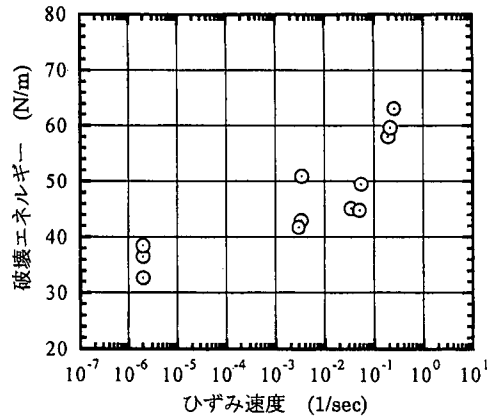


図-13 破壊エネルギーとひずみ速度の関係

るために大きなエネルギーが必要になると言える。

載荷速度が大きくなると、コンクリート中の間隙に含まれる水分の粘性効果¹⁴⁾や微細ひび割れ先端における慣性効果¹⁵⁾等の影響により最大引張応力は増加する。このことが、載荷速度が大きくなるにしたがい破壊エネルギーが増加する一因となっている。一方、図-12 から最大引張応力以降の変形能は載荷速度が大きくなるにしたがい若干小さくなる傾向が見られる。このため、載荷速度が大きくなるほど脆性的な挙動を示すようになる。既に著者らは、コンクリート円柱供試体を用いた急速一軸引張試験を行い、コンクリート供試体に形成されるひび割れは、載荷速度が大きくなるにしたがい粗骨材とモルタルとの付着界面に沿って進展するよりも粗骨材を貫通して進展する傾向が強くなることを報告している¹³⁾。このことから、載荷速度の増加に伴うひび割れ進展挙動の変化も破壊エネルギーの増加や最大引張応力以降の挙動が脆性化することに影響を及ぼしていると考えられる。

b) 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-14 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 2×10^{-1} (1/sec) 付近では、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-14 に示し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。

$$\frac{G_{F,d}}{G_{F,s}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\alpha \left[\text{Log}_{10} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^\beta \quad (3)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度 [2.0×10^{-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

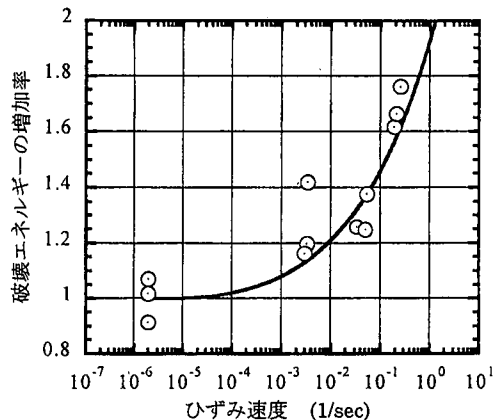


図-14 破壊エネルギーの増加率とひずみ速度の関係

た場合の破壊エネルギー (N/m), α および β は定数 [$\alpha=0.002, \beta=1.85$] である。式(3)による結果を示すと、図-14 に太い実線で示す関係が得られる。

c) 脆性化指標による定量的評価

前節で、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、載荷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、載荷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表すと考えられる。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¹⁶⁾。

最大耐力以降の挙動が脆性的か否かは、最大耐力時に蓄えられた弾性エネルギーと最大耐力以降のエネルギー吸収能力との対比によって決まることから¹⁷⁾、著者らは、急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートの脆性化傾向を弾性エネルギーと圧縮破壊エネルギーの比で定義される

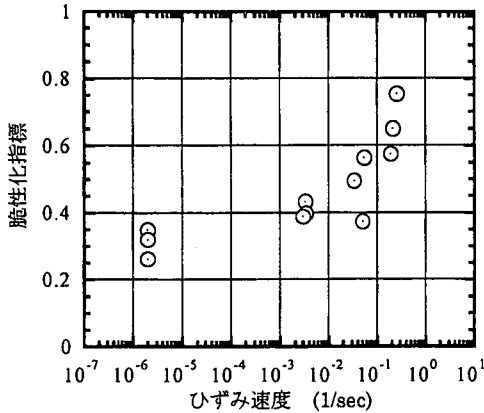


図-15 脆性化指標とひずみ速度の関係

脆性化指標によって定量的に評価した⁸⁾。ここでは、同様に荷重速度が引張軟化領域における脆性化傾向に及ぼす影響を脆性化指標によって定量的に評価を試みる。そこで引張荷重に対して、脆性化指標を次式で与える。

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

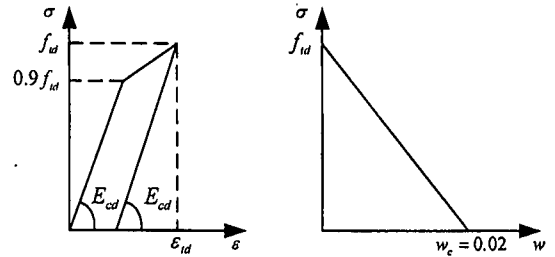
ここに、 f_{id} 、 E_{cd} 、 $G_{F,d}$ は、それぞれ任意のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で荷重したときの引張強度、弾性係数、破壊エネルギー、 L は試験体の長さである。式(4)によって評価される脆性化指標は、その値が大きいのほど脆性的となることを意味している。

本試験値に対して求めた脆性化指標とひずみ速度の関係を、図-15に示す。この図から、脆性化指標は荷重速度の増大とともに増加する傾向が認められる。つまり、荷重速度の増大ともなつてその破壊は脆性的になるということが推定できる。

(4) 応力-変形関係の定式化

ここでは、Hillerborgによって提案された仮想ひび割れモデルの考え方を参考として、コンクリートの引張における荷重速度の影響を考慮した構成モデルの定式化を行う。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-16(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 $\dot{\epsilon}$ 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_{id} 、 ϵ_{id} 、 E_{cd} とすると、応力(σ)-ひずみ(ϵ)関係は次式で与えられる。



(a) 無ひび割れ領域の応力-ひずみ関係 (b) ひび割れ領域の引張軟化曲線

図-16 コンクリートの構成モデル

$\sigma \leq 0.9 f_{id}$ のとき

$$\sigma = E_{cd} \epsilon \quad (5)$$

$0.9 f_{id} < \sigma \leq f_{id}$ のとき

$$\sigma = f_{id} - \frac{0.1 f_{id}}{\epsilon_{id} - (0.9 f_{id} / E_{cd})} (\epsilon_{id} - \epsilon) \quad (6)$$

ここで、任意のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対する f_{id} 、 ϵ_{id} 、 E_{cd} は著者らが提案した以下の式で与える¹⁹⁾。

f_{id} に対して、

$\dot{\epsilon} \leq 7.22 \times 10^{-2}$ (1/sec) の場合

$$f_{id} = f_i \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0371} \quad (7)$$

$\dot{\epsilon} > 7.22 \times 10^{-2}$ (1/sec) の場合

$$f_{id} = 0.0433 f_i \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.3363} \quad (8)$$

ϵ_{id} に対して、

$\dot{\epsilon} \leq 7.56 \times 10^{-2}$ (1/sec) の場合

$$\epsilon_{id} = \epsilon_i \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0338} \quad (9)$$

$\dot{\epsilon} > 7.56 \times 10^{-2}$ (1/sec) の場合

$$\epsilon_{id} = 0.1661 \epsilon_i \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.2041} \quad (10)$$

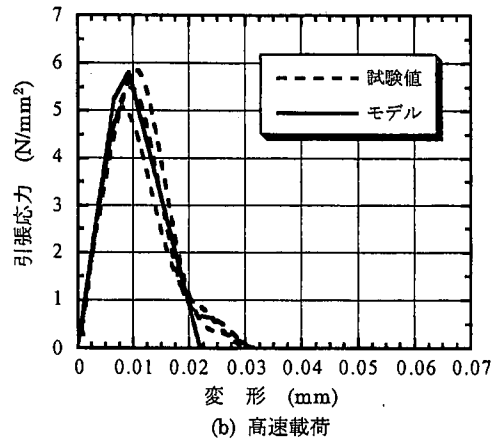
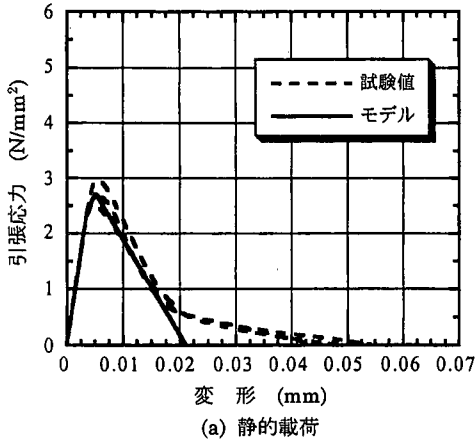


図-17 コンクリートの引張応力-変形関係
(試験結果とモデルの比較)

E_{cd} に対して、

$\dot{\epsilon} \leq 5.43 \times 10^{-2}$ の場合

$$E_{cd} = E_c \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0074} \quad (11)$$

$\dot{\epsilon} > 5.43 \times 10^{-2}$ の場合

$$E_{cd} = 0.4598 E_c \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.0835} \quad (12)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的載荷のひずみ速度 [2.0×10^{-6} (1/sec)], f_t , ϵ_t , E_c はそれぞれ静的載荷における引張強度、引張強度点でのひずみ、弾性係数である。なお、本試験では $f_t = 2.70$ (N/mm²), $\epsilon_t = 130 \times 10^{-6}$, $E_c = 2.66 \times 10^4$ (N/mm²) であった。

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たっては、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、2.(2)で述べたように試験体の定着部分における付着が問題となるような領域では完全な応力-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する。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、ここでは載荷速度の違いによらず0.02mmを最大ひび割れ幅(w_c)とし、最大引張応力点からこの点までを直線でモデル化する。図-16(b)に示す応力(σ)-ひび割れ幅(w)関係は、次式で与えられる。

$$\sigma = f_{td} \left(1 - \frac{w}{w_c} \right) \quad (13)$$

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(5)、式(6)を、ひび割れ領域に式(13)を適用して求めることができる。図-17に試験値および式(5)、式(6)ならびに式(13)を用いて計算した引張応力-変形関係を実線で示す。計算値は変形量が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。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの動的引張軟化挙動を調べるために新たに一軸引張試験用試験体を考案し、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載荷速度をパラメータとする急速一軸引張載荷試験を行い、載荷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。本研究において得られた結果を、まとめて以下に示す。

- (1) コンクリートと鋼材を組み合わせた合成構造形式の試験体を用いることで、急速一軸引張載荷を受けるコンクリートの引張軟化挙動を計測することができた。
- (2) 載荷速度はコンクリートの引張軟化曲線に影響を及ぼし、載荷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、載荷速度が大きくなるほど増加する。

- (4) 引張軟化挙動は、破壊エネルギーを用いた脆性化指標によって載荷速度の増大に伴う脆性的傾向を定量的に推定することができる。
- (5) 仮想ひび割れモデルの概念に基づいて、コンクリートの引張におけるひずみ速度効果を考慮した軟化特性を定式化した。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、筑波大学機能工学系教授西岡 隆先生、ならびに山本泰彦先生から貴重なご意見を頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) Van Mier, J. G. M. : Fracture Processes of Concrete, CRC Press, pp.88-114, 1997.
- 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，pp.5-15，1996.5.
- 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, pp.326-341, February, 1985.
- 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，pp.119-126，1996.7.
- 6) 橋高義典，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集，第453号，pp.15-25，1993.11.
- 7) 中村成春，橋高義典，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，pp.151-164，1999.1.
- 8) 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，pp.37-54，1999.8.
- 9) Linberger, E., Brandes, K. and Herter, J. : Influence of mechanical properties of reinforcing 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, pp.134-145, June, 1982.
- 10) 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，1990.10.
- 11) Bazant, Z. P. and Gilles, P. C. : Measurement of characteristic length of nonlocal continuum, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, No.4, pp.755-767, April, 1989.
- 12) CEB-FIP MODEL CODE 1990, First Draft, CEB Bulletin d'Information No.195, 1990.
- 13) 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.
- 14) Kaplan, S. A. : Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.32, No.111, pp.79-88, June, 1980.
- 15) Kipp, M. E., Grady, D. E. and Chen, E. P.: Strain-rate dependent fracture initiation, International Journal of Fracture, Vol.16, No.5, pp.471-478, October, 1980.
- 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，pp.81-88，1995.1.
- 17) 前掲文献1)に同じ：pp.384-387.

(2000.1.18 受付)

STUDY ON DYNAMIC TENSILE SOFTENING CHARACTERISTIC OF CONCRETE MATERIAL UNDER HIGH STRAIN-RATES

Kazunori FUJIKAKE, Katsutoshi UEBAYASHI, Tomonori OHNO and Katsuhiko EMORI

The strain softening behaviors of concrete material under uniaxial tensile rapid loading has been left unsolved experimentally. It may be the reason that it is difficult to measure the post-peak behaviors of plain concrete since the fracture of the test specimen will happen suddenly and instantaneously under rapid loading. Thus, the new testing method for measuring dynamic tensile softening behaviors of concrete is proposed in this study. Also, this study is to investigate the strain softening behaviors of concrete material in tension under rapid loading. The loading-rate is chosen as test parameter. From tests results, the effect of the loading-rate on the tensile softening behaviors of concrete materials is examined. Furthermore, based on the fictitious crack model, the constitutive model for the uniaxial tensile rapid loading is presented.