

(22) 急速一軸圧縮载荷を受けるコンクリートの動的軟化挙動と

破壊エネルギーに関する研究

FRACTURE ENERGY AND DYNAMIC STRAIN SOFTENING BEHAVIORS OF CONCRETE
UNDER COMPRESSIVE RAPID LOADING

篠崎敬一*, 山根茂樹*, 藤掛一典**, 水野淳***, 鈴木篤****, 大野友則*****

Yoshikazu SHINOZAKI, Shigeki YAMANE, Kazunori FUJIKAKE, Jun MIZUNO,
Atusi SUZUKI and Tomonori OHNO

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

**工修 防衛大学校 助手 土木工学教室 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

***工修 鹿島建設 原子力設計部 技術長 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-5-30)

****工修 鹿島建設 原子力設計部 (〒107-0052 東京都港区赤坂6-5-30)

*****工博 防衛大学校 教授 土木工学教室 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

キーワード: 急速一軸圧縮载荷, コンクリートの応力-ひずみ関係, 軟化

(uniaxial compressive rapid loading, stress-strain relation of concrete, strain softening)

1. はじめに

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の挙動や破壊メカニズムを解明するためには, その主構成材料であるコンクリートの急速载荷下における動的特性を定性的・定量的に把握することが重要である。また, 衝撃破壊シュミレーションを行うために, コンクリートの軟化挙動をも含めた動的な応力-ひずみ関係の定式化, すなわち, 動的構成則の確立が望まれている。

これまでに, 急速圧縮载荷を受けるコンクリートの動的特性に関する研究は, 数多く行われてきている。しかしながら, 既往のほとんどの研究ではプレピーク領域における応力-ひずみ関係に代表される動的特性の把握に重点が置かれ, 軟化領域におけるコンクリートの動的挙動については未だ解明されていない。これは, コンクリートが脆性材料であるために, ポストピーク領域では破壊が急速に進行し, 供試体に作用する荷重および供試体の全体変形を計測することが極めて困難であることに起因している

と考えられる。

そこで本研究では, 供試体に作用する荷重および破壊に至るまでの供試体の全体変形を計測する方法について検討するとともに, 供試体の長さ寸法, 供試体材端の拘束条件および载荷速度をパラメータとする急速一軸圧縮試験を行い, これらのパラメータが軟化領域を含むコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響について調べている。

2. 実験概要

2.1 供試体の全体変形および平均ひずみの計測

静的一軸圧縮载荷における Van Mier¹⁾の研究によれば, 供試体の表面に貼付したひずみゲージと変位計による供試体の全体変形から評価されるそれぞれのひずみは最大圧縮強度以降の軟化領域では大きく異なることが指摘されている。

これは, 最大強度以降コンクリート供試体中には微視的ひび割れの連結により, 巨視的なひび割れが形成され, その形成パターン, すなわち破壊モー

ドに応じて供試体中の各部のひずみ応答は複雑に異なるためと考えられる。このことから、急速载荷試験においても、コンクリート円柱供試体の表面に貼付したひずみゲージによって軟化領域における供試体の全体平均ひずみを計測することは困難であるといえる。一方、コンクリート供試体の全体変形を計測するために変位計を用いる方法も考えられるが、急速载荷では载荷中に大きな加速度が生じるとともに振動等の影響も大きくなることから、変位計の取り付けを相当に強固に設置する必要がある等の問題がある。

そこで、本研究では図-1に示すようにノッチ加工したアクリル棒にゲージ長 2mm のひずみゲージを 5~8 枚貼付したもの（以後 SMR : strain measurement rod）をコンクリート円柱供試体の中心部に埋め込み、SMR に貼付されたひずみゲージによる計測値を SMR 全体にわたって積分することで全体変形を計測する方法を採用している。アクリル棒の弾性係数は、コンクリートの弾性係数の 1/10 程度と小さいことから、コンクリートの変形を拘束することはないと考えられる。

また、アクリル棒をノッチ加工することでコンクリートとの付着が改善されていることからコンクリート円柱供試体中の局所ひずみの計測も可能となっている。なお、SMR に貼付しているひずみゲージの間隔は、予備実験を行い決定している。平井ら²⁾は、静的一軸圧縮载荷を受けるコンクリート供試体の局所ひずみおよび全体変形の計測に本研究と同様の方法を用いて実験を行い、アクリル棒から評価される全体変形と変位計から計測される全体変形の両者はほぼ一致することを確かめている。

2.2 実験パラメータ

供試体の長さ寸法、载荷速度および材端の拘束条件の各パラメータとともに表-1に実験ケースの一覧を示す。供試体は、直径を一定（100mm）とし、長さ 200mm（H200）、400mm（H400）の 2 種類を準備した。材端の拘束条件については、供試体を直接鋼製の载荷棒に接触させて行う場合（NP）と供試体と鋼製の载荷棒の間に端面摩擦を極力小さくする目的から 2 枚のテフロンシート（厚さ 0.05mm）の間にシリコングリースを塗布したテフロンパッドを挿入して行う場合（TP）の 2 種類である。ただし、テフロンパッドの有無による材端の影響については、供試体長さ 200mm のもののみ行

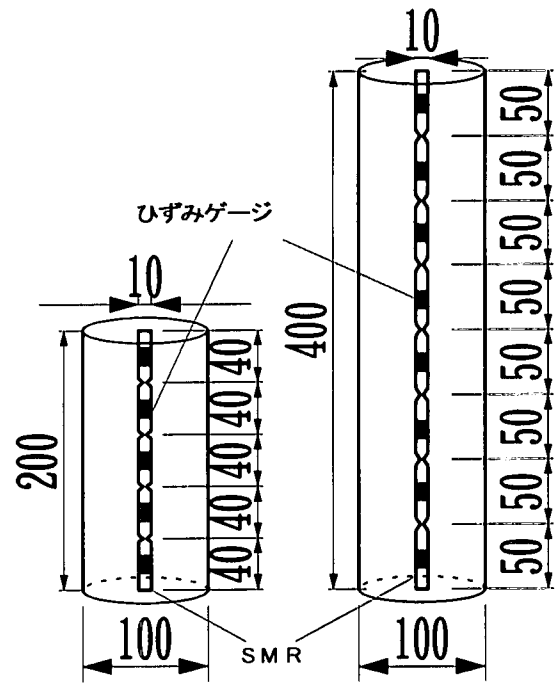


図-1 供試体概略図

表-1 実験ケース

供試体名	供試体長さ	テフロンパッド	ひずみの計測
H200NP	200mm	無	SMR
H200TP		有	SMR
H200		無	表面ひずみゲージ
H400NP	400mm	無	SMR

った。载荷速度については、静的（0.2MPa/sec）、低速（185MPa/sec）、中速（ 7.5×10^3 MPa/sec）、高速（ 3.5×10^4 MPa/sec）の 4 種類である。（ ）内の値は応力速度表示による载荷速度の概略の目安である。また、本研究では全体変形の計測のために SMR を供試体内に埋め込むことから、SMR を埋め込んだことによる最大圧縮強度等への影響を把握するために、SMR を設置しない供試体に対する実験も行っている。なお、実験は同一载荷速度に対して 3 回行っている。

2.3 供試体の製作

供試体は、表-2に示す配合のスランプフロー 67.5cm、空気量 4.0%の高流動コンクリートを用いた。これは、SMR に貼付してあるひずみゲージのリード線が多数配置されていることおよび SMR を確実に供試体の中心に設置するために、突き棒等でコンクリートを締め固めることが困難であることから、自己充填型の高流動コンクリートを使用した。供試体の試験期間中の圧縮強度の平均値は

表-2 配合表

水セメント 比 W/C (%)	水粉体比 W/P (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 kg/m ³						
			水 W	セメント C	石灰石粉 LS	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (P×%)	増粘剤 (W×%)
60	40	50	180	300	150	822	847	1.8	0.25

45.6MPaであった。

2.4 実験方法

静的試験は、サーボ制御式載荷試験装置（最大荷重 980kN）、低速以上の急速載荷試験には、急速載荷装置（最大荷重容量 490kN、最大載荷速度 4m/sec）を使用した。図-2に急速一軸圧縮載荷試験における供試体の載荷状況および計測装置の配置状況を示す。急速載荷試験で供試体に作用している荷重を計測する場合、極力供試体に近い位置で、慣性力の影響を排除して計測することが望まれる。そこで、本研究では、供試体直下の固定端側のロードセルを極力供試体に近い位置に設置するとともに、供試体の上側にもロードセルを設置して、荷重を計測することにした。また、慣性力による影響を調べるために載荷ビームに加速度計を設置している。

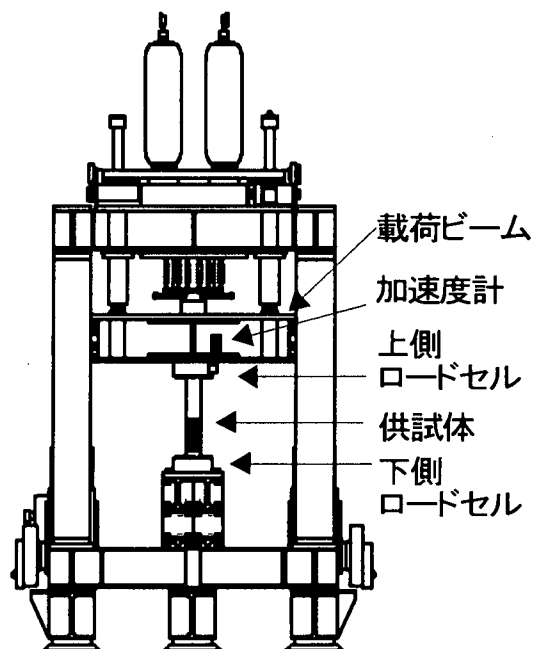


図-2 急速一軸圧縮載荷試験における供試体設置状況

3. 実験結果

3.1 コンクリートの動的軟化挙動の計測

急速載荷試験において、供試体の上下に設置したロードセルによる荷重の計測値および載荷ビームに設置した加速度計による加速度の計測値から、上下のロードセルで計測された荷重差が上側ロードセルに取り付けられている載荷棒に作用する慣性力とほぼ等しいことが確認された。そこで、本研究では、供試体直下の固定端側に設置したロードセルで計測された荷重を実際に供試体に作用している荷重として評価することにした。また、供試体に作用する圧縮応力は、作用荷重を供試体の全断面積で割った公称応力として計算している。SMR を埋め込んだ供試体については SMR による断面欠損があるが SMR の断面積が、供試体の断面積と比べて 1/100 程度と小さいため無視している。H200NP の供試体を高速載荷した場合に、SMR から評価される供試体全体の平均ひずみと表面に貼付したひずみゲージのそれぞれから得られた応力-ひずみ関係を図-3に示す。両者は最大強度まではほぼ同じ挙動を示しているが、最大強度以降はそれぞれの挙動が大き

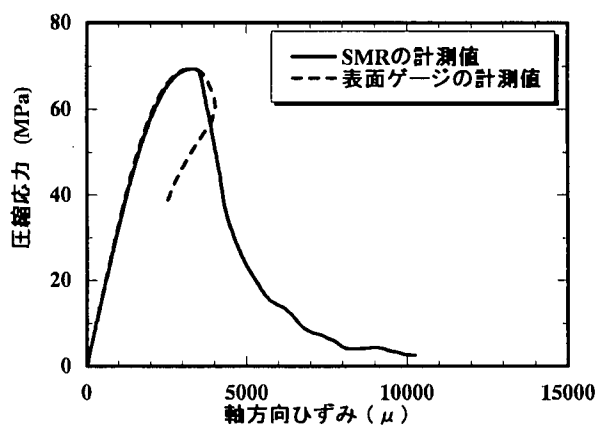


図-3 ひずみの計測方法の違い

く異なることがわかる。これは、最大強度以降、コンクリート供試体各部のひずみ応答は破壊モードに応じて異なるため、軟化域の供試体全体の平均ひずみを計測することを目的とした場合、SMR による計測方法は有効であるといえる。

3.2 荷速度が応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響

図-4に、H200NPの各荷速度における応力と平均ひずみの関係を示す。この図から、荷速度が大きくなると、最大圧縮強度が増加するとともにプレピーク部分の応力の上昇域における応力-平均ひずみ関係の勾配（弾性係数）も大きくなることがわかる。また、荷速度が大きくなり最大圧縮強度が増加するとポストピークの軟化勾配は大きくなり脆性化する傾向にあることがわかる。このことは、通常の静的一軸圧縮試験でコンクリートの圧縮強度が増加するとポストピークの軟化勾配が大きくなり脆性化する傾向にあることと類似している。

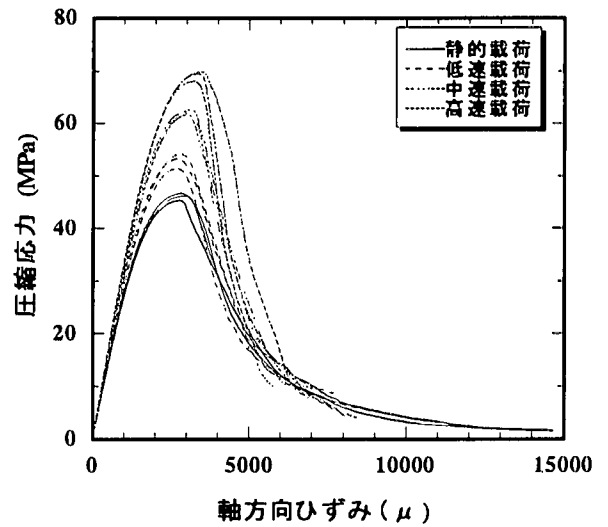


図-4 各荷速度における圧縮応力-平均ひずみ関係(H200NP)

3.3 供試体長さが応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響

供試体長さが応力-平均ひずみに及ぼす影響を比較するため、高速荷のときのH200NPとH400NPの応力-ひずみ曲線を図-5に示す。静的な場合、一般的に供試体の高さ寸法が増加すると軟化挙動は急激になることが知られている。高速荷の場合も静的荷の場合と同様に高さ寸法が大きいH400NPのほうが軟化勾配がより急激に下降していることがわかる。これは、3.5 ひずみの局所化で述べるように、コンクリート供試体にはひずみが増加するある特定の領域とそれ以外のひずみが減少する領域が存在し、供試体が長くなるほどひずみが減少する領域が大きくなるためと考えられる。

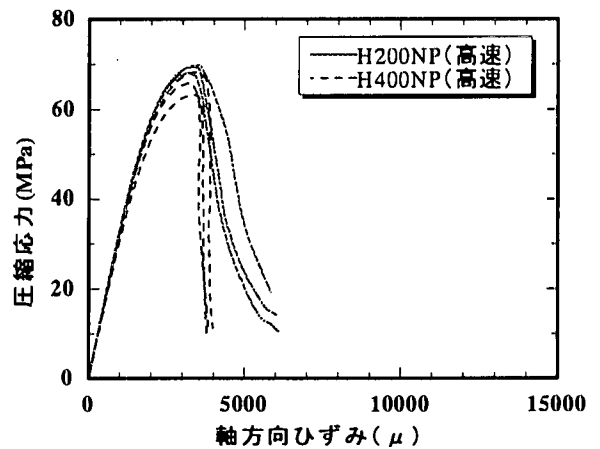


図-5 供試体長さ寸法の影響 (H200NP, H400NP)

3.4 材端の拘束条件が応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響

供試体材端の拘束条件が応力-平均ひずみ関係に及ぼす影響を比較するために、図-6に高速荷におけるH200NPとH200TPのそれぞれの応力-ひずみ関係を示す。この図から、同一荷速度においては、テフロンパッドを挿入して材端の摩擦の影響を極力小さくしたH200TPシリーズの方がH200NPシリーズに比べ、ポストピーク領域の軟化勾配がやや大きくなり脆性化する傾向にあることが認められる。一般的に静的荷においては、供試体の材端における拘束が小さくなるほど軟化勾配が大きくなることが知られている。本研究から急速荷においても同一の荷条件に対しては静的荷と同様に供試体の端面での拘束が小さくなるほど軟化勾配は大きくなる傾向にあることが明らかになった。

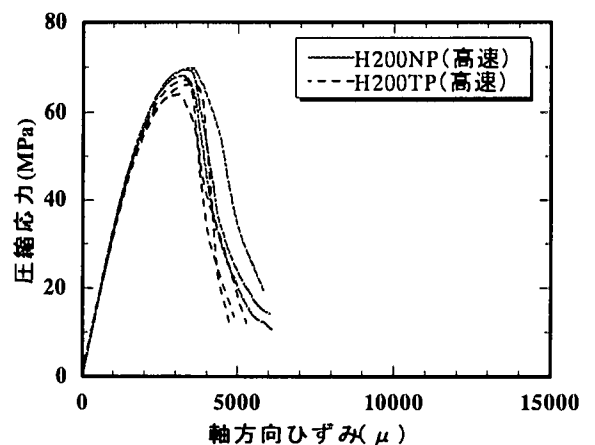


図-6 材端の拘束条件の影響 (H200NP, H200TP)

3.5 ひずみの局所化

図-7に、H200NP、H200TP と H400NP の各シリーズの高速載荷で得られた最大強度以降の軟化領域における SMR の各ひずみゲージの計測値にもとづく代表的な軸方向のひずみ分布とそれに対応する供試体の破壊状況を示す。これらの図中で、ひずみ分布の状況は、最大強度時 (σ_{max}) および軟化域における最大強度時の応力の 10% 間隔ごとの応力レベル ($0.9\sigma_{max}, 0.8\sigma_{max}, \dots$) について描いている。

図-7に示すように、最大圧縮強度までの応力の上昇域では、いずれの場合においても、一様な増加傾向を示している。最大圧縮強度以降の軟化領域においては、同一供試体中にひずみが増加する領域と減少する領域が存在することが認められる。このような現象は、コンクリートや岩石等に特有なひずみの局所化現象と呼ばれており、最大圧縮強度付近の軟化領域で認められている。静的載荷における Torrenti et al.³⁾の研究結果と同様に、急速載荷においてもひずみの局所化は載荷速度・供試体長さ寸法・材端の拘束条件によらずに、最大圧縮強度で起こると考えられる。

図-7(a), (b)それぞれに示す H200NP と H200TP のひずみ分布の相違から材端の拘束条件が軟化領域におけるひずみ分布に及ぼす影響が大きいことが認められる。端面摩擦を除去していない H200NP では、中央付近の軸方向ひずみの増加が顕著で両端付近の軸方向ひずみは減少する傾向にある。すなわち、軸方向ひずみは、供試体の中央付近のある特定の領域に局所化するといえる。これに対して、端面摩擦を除去した H200TP は、どちらか一方の材端における軸方向ひずみの増加が顕著となり、もう一方の材端付近のひずみは減少する(除荷)傾向を示す。端面摩擦を極力除去した場合においても、軸方向のひずみ分布は一樣にならずどちらか一方の材端に局所化するといえる。このように一方の材端にひずみが局所化する現象は、テフロンパッドによる端面摩擦の除去の程度差や、コンクリート自体の不均一性によるものと考えられる。

次に、材端の拘束条件が H200NP と同じで、供試体長さが 400mm の H400NP では、供試体の上半もしくは下半どちらか一方の領域の中央付近でひずみの増加が顕著となり、もう一方の領域のひずみは減少する傾向を呈する。ただし、ひずみが局所化する部分のひずみの分布の形は H200NP の場合に

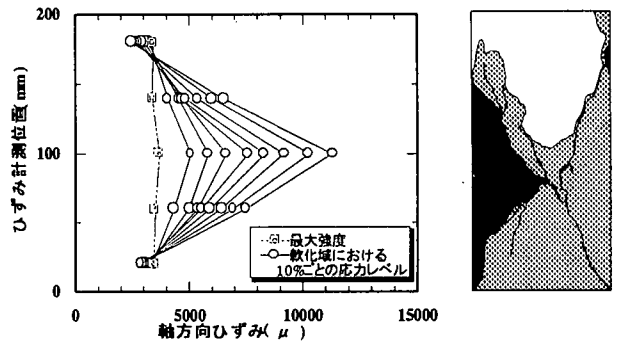


図-7(a) 軟化域における軸方向ひずみ分布(H200NP)と破壊状況

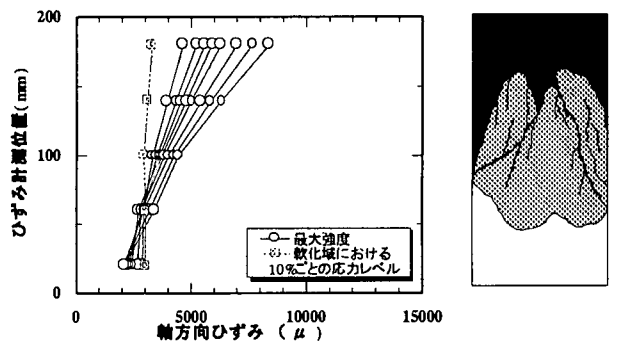


図-7(b) 軟化域における軸方向ひずみ分布(H200TP)と破壊状況

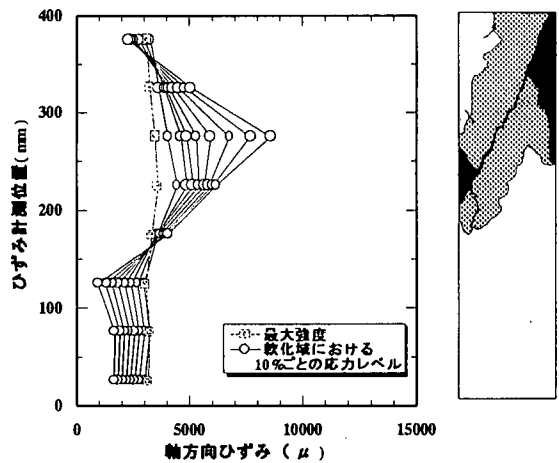


図-7(c) 軟化域における軸方向ひずみ分布(H400NP)と破壊状況

類似している。

ひずみが局所化する部分の長さは載荷速度の違いによらず、H200NP シリーズで約 15cm、H200TP シリーズで約 13cm、H400NP シリーズで約 20cm 程度であった。本実験の結果によれば載荷速度の違い

いによるひずみの局所化する領域の長さには顕著な違いは認められずほぼ同程度であった。また、ひずみが局所化する領域は供試体の破壊状況とほぼ一致している。

4. 破壊エネルギーによる動的軟化挙動の評価

図-8に示すように、応力-全体変形関係において、最大圧縮応力以降の軟化領域で最大圧縮応力の30%に低下した時点を終局とし、それまでに消費された塑性変形エネルギーを破壊エネルギーと定義する。図-9に、全シリーズの供試体の破壊エネルギーとひずみ速度の関係を示す。図から、同一の荷重速度の場合は材端の拘束条件が同じであれば供試体の長さによらず、破壊エネルギーはほぼ同一となることがわかる。また、破壊エネルギーは荷重速度が大きくなるにつれて増大する傾向にある。しかしながら、破壊エネルギーの大きさは、圧縮破壊に対する抵抗性能を示す指標となるが、最大圧縮応力以後の脆性化挙動を評価することはできない。

5. 結論

本研究は、供試体寸法、荷重速度、材端の拘束条件をパラメータとする急速一軸圧縮試験を行い、各パラメータがコンクリート材料の動的軟化挙動に及ぼす影響について調べたものである。本研究で得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) 急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリート供試体の全体変形及び局所ひずみを計測する場合、SMRを用いた方法は非常に有効である。

(2) 最大応力以降の軟化領域における応力-ひずみ曲線の軟化勾配は、荷重速度が大きくなるほど、供試体高さ寸法が大きくなるほど、また端面での摩擦が小さくなるほど急になる挙動を示す。

(3) 急速一軸圧縮荷重を受ける供試体には、ある特定の領域のひずみが増加するひずみの局所化現象が荷重速度、供試体の長さ寸法及び材端の拘束条件に関わらず最大応力点で生じる。しかしながら、供試体材端の拘束条件が局所ひずみの分布に及ぼす影響は大きい。

参考文献

1) Van Mier, J.G.M., Fracture Processes of Concrete,

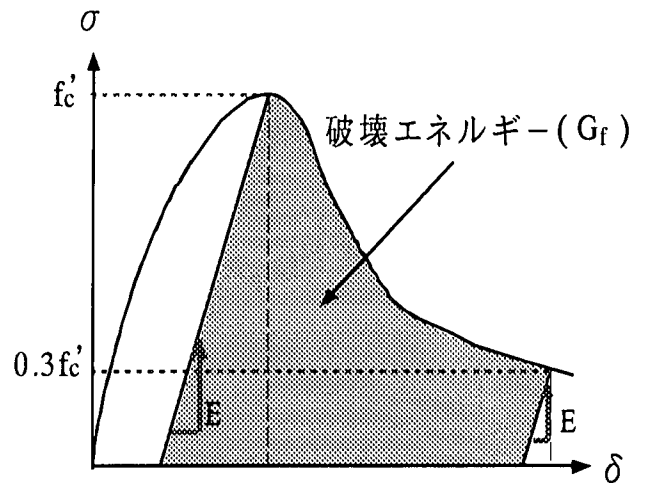


図-8 破壊エネルギーの定義

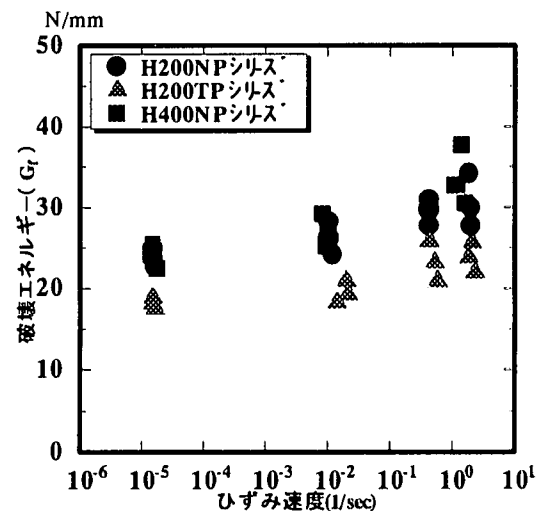


図-9 破壊エネルギーとひずみ速度の関係

CRC Press, pp.178 - 189, 1997

- 2) 平井 圭, 中村 光, 檜貝 勇: コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No2, 1995, pp.339-344
- 3) Torrenti J.M., Benaija E.H. and Boulay C.: "Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression test", Journal of Engineering Mechanics, Vol.119, No.12, Dec., 1993, pp.2369-2384