

論文

[2008] 引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの破壊
パラメータの評価橋高義典¹・上村克郎²・中村成春³

1. はじめに

近年、コンクリートの非線形破壊現象の定量的評価に、破壊力学パラメータを適用する研究が増えている。しかしながら、主にガラス・金属等を対象にした線形・非線形破壊力学パラメータのコンクリートの評価への直接適用にはいくつかの問題点がある。その一つに、コンクリートの破壊過程では、多くのひびわれが発生・累積し広範囲の破壊プロセスゾーンが形成されるため、ひびわれの進展長さを特定しにくい点がある。RILEM[1]の推奨する破壊エネルギー G_F は、破壊仕事の平均量を評価パラメータにしている点、ひびわれを特定する必要がないが試験体寸法、破壊の進展状況等で値が異なる。一方で、等価ひびわれ長さに基づく評価法として、2パラメータ法[2]、寸法効果則法[3]等も提案されており、従来の破壊力学の概念を踏襲する点で応用範囲は広い。ただし、その計測には多数の試験体・繰返し载荷等が必要であり、実験的な煩雑さ、測定値のばらつき等の問題がある。また、コンクリートの破壊パラメータの計測は、通常、安定破壊試験によるが、実際のコンクリートの動的脆性破壊、あるいは近年、実用化が進められている超高強度コンクリートの脆性破壊等への適用が明確ではない。コンクリート等の半脆性材料においては、脆性破壊といえどもプロセスゾーンの形成が想定されるため、線形破壊力学パラメータを単純に適用することも妥当とは言えない。

本研究では、結合力モデルを基礎とした非線形弾塑性破壊力学パラメータの評価方法を検討する。コンクリートの破壊特性である引張軟化曲線に着目し、その逆解析手法に基づくひびわれ進展解析から、等価概念による破壊パラメータの評価方法を、安定破壊・不安定脆性破壊の両破壊モードについて検討した。

2. 引張軟化曲線の多直線近似逆解析法

図-1に結合力モデルを示す。切欠き長さ a_0 、仮想ひびわれ長さ a を有する単一ひびわれに、開口変位 $\delta(a, x)$ に応じた結合応力 $\sigma(a, x)$ を作用させることで、プロセスゾーンを有する非線形材料のモードⅠ型破壊をモデル化する。解析上の構成則となる開口変位と結合応力との関係、すなわち引張軟化曲線を、破壊靱性試験等から精度良く定式化できれば、等価ひびわれ長さに基づく種々の破壊力学パラメータが解析可能となる。

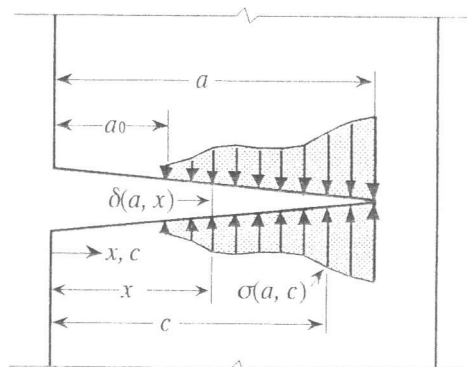


図-1 結合力モデル

* 1 宇都宮大学助教授 工学部建設学科, 工博(正会員)

* 2 宇都宮大学教授 工学部建設学科, 工博(正会員)

* 3 宇都宮大学大学院 工学研究科生産・情報工学専攻, 工修(正会員)

引張軟化曲線の逆解析方法は多直線近似法[4]による。引張軟化曲線を図-2に示すように多直線で近似する。各近似直線の連続性から、軟化曲線は、初期結合応力 σ_0 および直線の勾配を関数化した $m(\delta)$ で表わせる($n(\delta)$ は σ_0 と $m(\delta)$ の関数)。逆解析はこれらのパラメータを求める問題となる。

解析手順を図-3に示す。仮想ひびわれを順次進めながら、非線形ひびわれ方程式(式-1, 2)を繰返し解き、荷重-荷重点変位曲線(以下、LPD曲線)を計算し、実測値との一致性から、 $m(\delta)$ を最適化する。 σ_0 およびヤング係数等の初期値は、LPD曲線の初期の勾配から最適化する。ひびわれ方程式を解く際に、すでに求めた軟化曲線を新たに構成則に組入れることにより、精度の高い逆解析が可能となる。また、LPD曲線のみでデータで推定が可能である。

$$\int_0^a \sigma(a, c) \cdot H(a, x, c) dc - \delta(a, x) = 0 \quad (1)$$

$$\sigma(a, x) = m(\delta(a, x)) \cdot \delta(a, x) + n(\delta(a, x)) \quad (2)$$

ここに、 $\sigma(a, x)$: ひびわれ長 a で点 x での結合応力、 $\delta(a, x)$: 開口変位、 $H(a, x, c)$: 形状関数、 $m(\delta(a, x), x)$ 、 $n(\delta(a, x), x)$: 多直線軟化曲線の傾きおよびY切片、その他、図-1, 2参照。

3. 破壊力学パラメータの算定

3. 1 安定破壊での破壊力学パラメータ

1) R曲線 結合力モデルにおいて、ひびわれが da 進む間に結合力が成す仕事 dU_f は、(3)式となる(図-4)。本式は結合力モデルのJ積分計算値に試験体厚さ t を掛けたものと等価である。ひびわれ進展面積 $dA = da \cdot t$ 当たりの dU_f を求める。とひびわれ進展抵抗値 R (N/m)を得る(式(4))。

$$dU_f = t \cdot \int_{a_0}^{a+da} \int_{\delta_x}^{\delta_x+d\delta_x} \sigma(\delta) d\delta \cdot dx \quad (3)$$

$$R = \frac{dU_f}{dA} \quad (4)$$

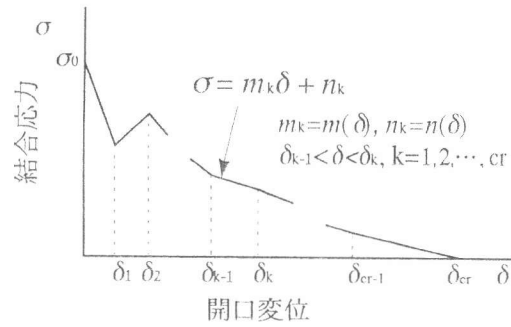


図-2 多直線近似軟化曲線

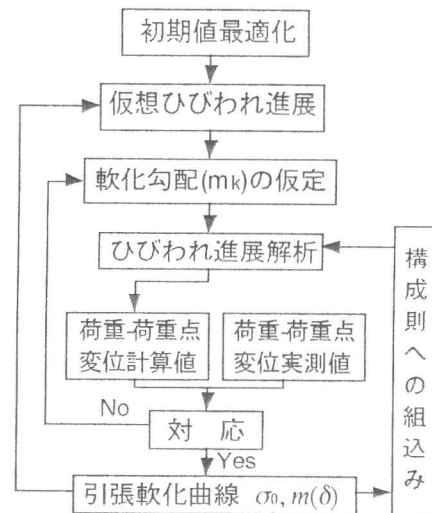


図-3 多直線近似解析法のフロー

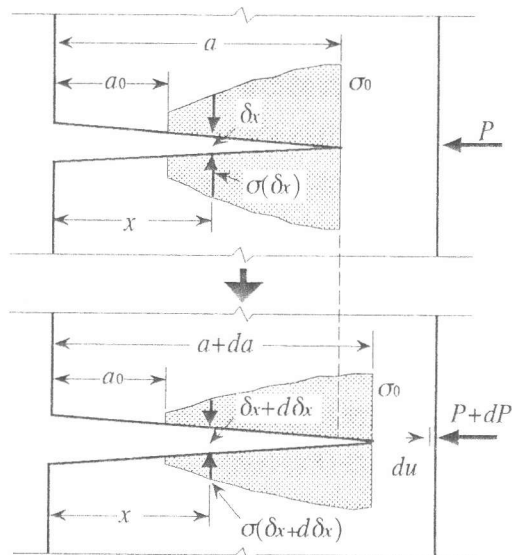


図-4 結合力モデルでのひびわれ進展

仮想ひびわれ長さ a と R とをプロットすると結合
力モデルでの R 曲線が得られる。これは、ひびわ
れ進展毎に消費されるエネルギーを表わす材料特
性値となる。 R をリガメント高さ方向に積分しリ
ガメント面積 A_{lig} で除すと、平均的なエネルギー
消費量である破壊エネルギー G_F^R （ワークオブ
フラクチャー）が得られる（式-5）。

$$G_F^R = \frac{\int_0^{A_{lig}} R da}{A_{lig}} \quad (5)$$

2) コンプライアンスおよび除荷曲線

図-5に安定破壊試験で得られた荷重-荷重点
変位曲線（LPD曲線）での、エネルギー概念およ
び線形近似した除荷経路を示した。

$$U_w = OACO = \int_0^u P du \quad (6)$$

$$U_f = OABO = t \cdot \int_0^a R da \quad (7)$$

$$U_e = \Delta ABC = \frac{1}{2} C \cdot P^2 = U_w - U_f \quad (8)$$

ここに、 U_w ：外部から成された仕事量、 U_f ：破壊に消費されたエネルギー、 U_e ：試験体に蓄
えられた弾性ひずみエネルギーである。式(8)より、 U_e ならびに直線近似した除荷線のコンプラ
イアンス C が求められる。また、 U_f のうち等価線形弾性体の消費エネルギー寄与分 U_f^e は、直線
ABを u_0 だけ左にシフトした A' を順次結び得られるLPD曲線での $OA'O$ の面積から求められる。

3) Jenq, Shahらの2パラメータ

Jenq, Shahら[2]は、破壊靱性試験での最大荷重時で除荷を行い、除荷線の傾きから、等価弾性
試験体での最大荷重時（クリティカル状態）での等価ひびわれ長 a_c から、開口変位 $CTOD_c$ 、等
価応力拡大係数 K_{Ic} の2つの線形破壊力学パラメータを算出する方法を提案している。本研究で
は、引張軟化曲線の逆解析の過程で、最大荷重時での除荷線が求められ、実験結果に誤差を与
える除荷試験を行わなくてもこれらのパラメータが求められる。

3. 2 不安定破壊での破壊力学パラメータ

1) 不安定破壊の条件

試験体および試験装置に蓄えられたひずみエネルギーのひびわれ進展に伴う変化が、ひびわれ
形成エネルギーの変化より大きくなると、ひびわれは一気に進み不安定破壊となる。図-6に
不安定破壊でのLPD曲線とエネルギーの概念を示す。図中 u_t 、 C_m 、 U_m は、試験装置の載荷点変
位、線形近似した試験装置の弾性コンプライアンス、試験装置等に蓄えられた弾性ひずみエネ
ルギーを示す。図-6に示すように、不安定破壊は試験装置による拘束状態を表す直線 $u_t = C_m P + u_c$
と試験体のLPD曲線の接点で起きる[5]。

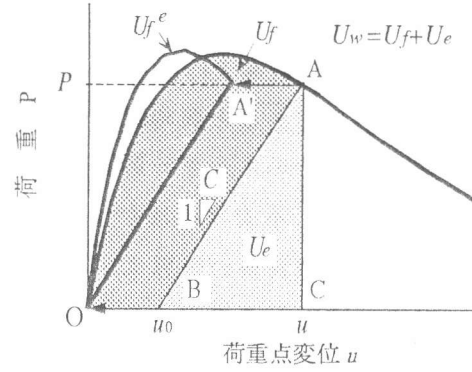


図-5 安定破壊でのエネルギー

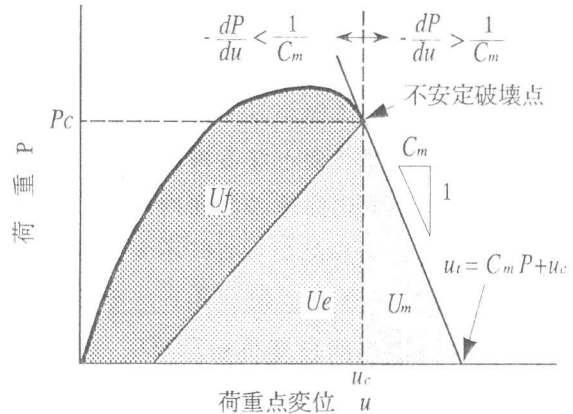


図-6 不安定破壊でのエネルギー

2) 不安定破壊での限界エネルギー解放率 R_c

ひびわれ進展抵抗値 R は、ひびわれ進展に必要なエネルギー量であると同時に、ひびわれ進展に伴って解放されるエネルギー解放率とも解釈できる。したがって、不安定破壊が生じる時点での R は、非線形弾塑性材料の限界エネルギー開放率 R_c とみなせる。また、そのときの開口変位は、限界ひびわれ開口変位 $CTOD_c$ となる。

これらの物理量は以下により求める。不安定破壊を生じているLPD曲線から、多直線近似解析により不安定破壊点までの引張軟化曲線を求める（図-7）。ひびわれ進展過程で、仮想ひびわれ幅はノッチ肩部に向かって常に単調増加なので、ひびわれ解析で必要となる構成則は、破壊時までに最適化した軟化曲線の範囲内にある（図-7のウズミ中）。したがって、不安定破壊時までの R 曲線を算定できる（図-8）。そのときの最大開口変位は限界開口変位 $CTOD_c$ 、仮想ひびわれの進展長さは限界ひびわれ長さ a_c となる。等価応力拡大係数 K_c も逆解析の過程で求められる。 R 曲線上で a_c に対応する R は、限界エネルギー解放率 R_c となる。

なお、不安定破壊直前に蓄えられていたエネルギーは、試験体と試験機の弾性ひずみエネルギー U_e と U_m の和であり、これらは不安定破壊時に、脆性破壊エネルギー、運動エネルギー等で消費されることが考えることができる。

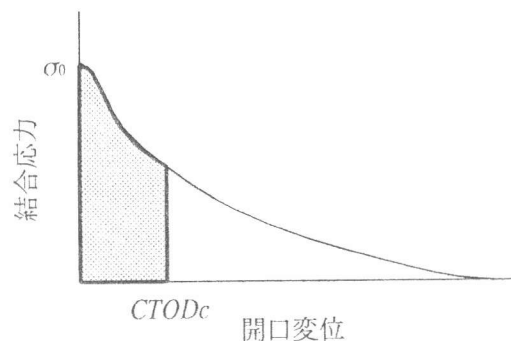


図-7 不安定破壊での引張軟化曲線

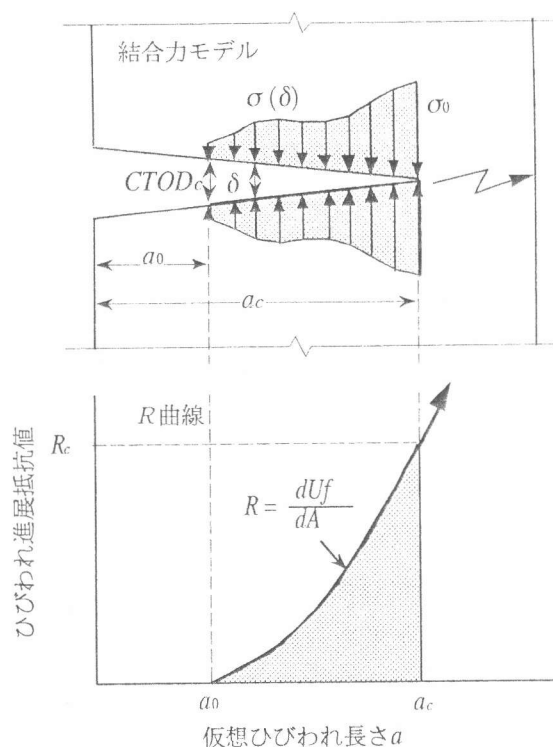


図-8 不安定破壊での結合力モデルと R 曲線

4. コンクリートの破壊パラメータの測定

4. 1 試験概要

以上に述べた破壊パラメータを実際のコンクリート試験体について求めた。安定破壊の例として普通強度コンクリート（NSC）（ $w/c=65\%$ ， $F_c=25\text{ MPa}$ ），不安定破壊の例には、超高強度コンクリート（HSC）（ $w/b=15\%$ （ $SF/b=10\%$ ）， $F_c=140\text{ MPa}$ ）を用いた。粗骨材には川砂利，細骨材には川砂を用いた。試験体は、 $100\times100\times450\text{ mm}$ のはり型とし、中央にはりせいの半分の切欠きを入れた。破壊靱性試験は切欠きはりの3点曲げ試験とし、支点間スパンは 400 mm とした（スパンはりせい比 $=4$ ）。

コンクリートは打設後2日で脱型，以後水中養生とした。材齢10週で曲げ試験を行ない，荷重ならびに荷重点変位を計測した。荷重は 5 N 感度のロードセルにて，荷重点変位は感度 0.001 mm の変位計で測定した。

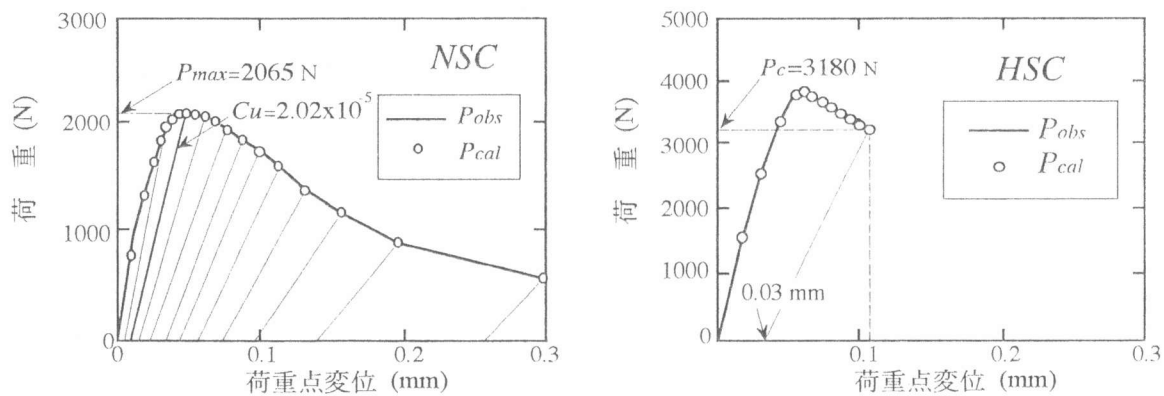


図-9 荷重-荷重点変位 (LPD) 曲線

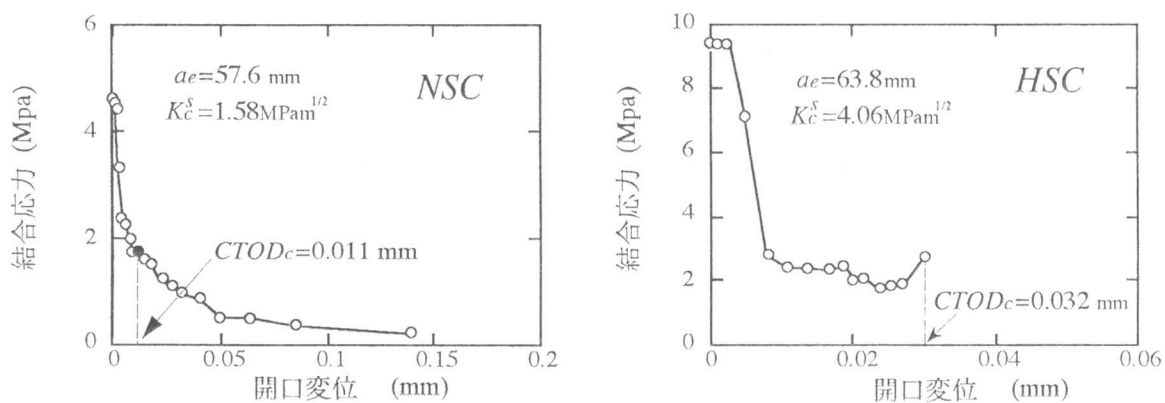


図-10 多直線近似解析による引張軟化曲線

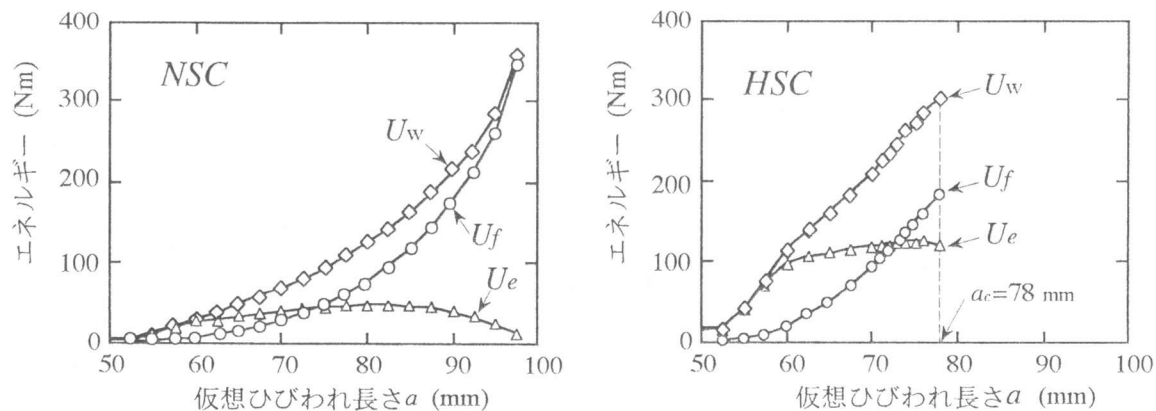


図-11 仮想ひびわれ長さと各種エネルギーとの関係

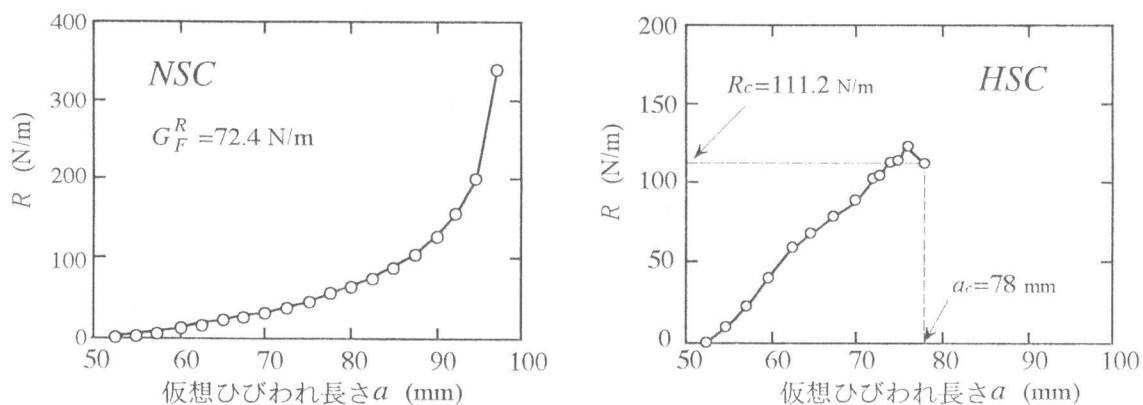


図-12 仮想ひびわれ長さとひびわれ進展抵抗値 (R曲線)

4. 2 試験結果および考察

図-9に各試験体の荷重-荷重点変位曲線(LPD曲線)の測定結果を示す。普通強度コンクリート(NSC)では、安定した曲線が得られた。超高強度コンクリート(HSC)は途中で破断し不安定脆性破壊を示したが、破断点は最大荷重以降であり軟化現象を示した。

図-10に、各LPD曲線を用いて多直線近似解析法で求めた引張軟化曲線を示す。なお、逆解析で設定したひびわれ増分は、NSCでは2.5mm、HSCの分析では破断点近傍を詳細に分析するために、初期の20mmまでは2.5mm、それ以降は1mmとした。本解析方法では、すでに線形破壊力学で得られている連続関数化された形状関数($H(a, x, c)$)を用いるため、接点の分割が自由という利点がある。図-9のLPD曲線上には、多直線近似解析で最適化された荷重計算値も示した。各点は計測されたLPD上にあり、解析方法は有効といえる。また、解析中に求められた各種破壊パラメータ、 a_c 、 $CTOD_c$ 、 K_c^s を図-10中に示した。NSCではJenq, Shahら[2]の最大荷重時での等価パラメータを、また、HSCでは、不安定破壊点での等価パラメータを示した。

図-11には、仮想ひびわれ進展長さ a と各エネルギーの解析結果との関係を示した。両試験体とも、破壊に消費されたエネルギー U_f は、ひびわれ進展とともに増加する傾向がある。また、 U_c から求めた除荷線の解析値は図-9中に示した。

U_f をひびわれ面積で微分し、ひびわれ進展抵抗値 R を求め図-12に示した。仮想ひびわれ長さが増加するほど R は増加する。すなわち、ひびわれが進むほど、局所的な破壊エネルギーが増加する。NSCには、式-5で計算された平均的な破壊エネルギー G_F^R も示した。ただし、ひびわれがはり上端に近づくほど R が増加しており、 G_F^R は解析点の選び方で大きく変動する。HSCでの R は、なめらかに上昇し、不安定破壊時に限界エネルギー解放率 R_c に達する。その値は111.2 N/m となった。

5. まとめ

引張軟化曲線の多直線近似解析から、コンクリートの破壊パラメータを求める方法を提案した。荷重-荷重点変位点の計測結果から、安定破壊および不安定破壊での、 R 曲線、限界エネルギー解放率 R_c および $CTOD_c$ 等を求めた。

参考文献

- 1) RILEM, Draft Recommendation : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- 2) Jenq, Y. S., and Shah, S. P. : Two parameter fracture model for concrete, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 111, No.10, pp.1227-1241, 1985
- 3) RILEM, Draft Recommendations : Size-effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete, Materials and Structures, Vol.23, No.138, pp.461-465, 1990
- 4) 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報告集, No. 453, pp.15-25, Nov., 1993
- 5) 坂 真澄, 井戸真嗣, 村岡幹夫, 阿部博之 : 構造減衰による延性不安定破壊の遅延に関する一提案, 日本機械学会論文集 (A), 55巻516号, pp.1841-1847, 1989.8