

論文 セメント系複合材料の引張軟化曲線の標準試験方法についての一考察

橘高義典¹, 栗原哲彦², 三橋博三³, 中村成春⁴

要 旨：既往の引張軟化曲線の試験方法および解析方法について概括し問題点を抽出した。特に、試験方法に関しては、荷重・荷重点変位の計測方法、安定した軟化域の試験方法、解析用データへの変換法等を考察し、解析方法に関しては、多直線近似法の特徴、利点および問題点を指摘した。これらをまとめて標準試験方法に必要な条件を明らかにした。

キーワード：引張軟化曲線, 試験方法, 荷重変位曲線, 逆解析, 多直線近似法, 破壊力学

1. はじめに

コンクリート構造物の破壊現象には、コンクリートのひび割れ進展に伴う軟化挙動が大きく関わる。したがって、コンクリート構造物の破壊挙動の解析・推定には引張軟化特性（離散ひびわれモデルでの構成則）の情報が重要となる。また、高強度・高靱性化が進む近年のセメント系複合材料の靱性評価にも引張軟化曲線の情報が有効である。これまでに引張軟化曲線を求める方法は提案されているが標準的な試験方法は定まっていない。本研究では、既往の引張軟化曲線の試験方法および解析方法について問題点を抽出し、標準試験方法として必要な条件を明確化することを目的とする。特に、安定した荷重－変位曲線の求め方、逆解析の手法等について考察する。

2. 既往の引張軟化特性の評価法

引張軟化特性の評価方法は、その目的、試験精度、数値解析技術等によって異なったレベルが考えられる。表－1は評価方法の例[1]である。レベル1および2は、既に標準試験方法が定められている物性値等から引張軟化特性を経験的に推定するものであり、構造解析での構成則への適用等には十分と考えられる。レベル2ではRILEM提案の破壊エネルギー G_F [2]を応用している[3]。しかしながら、両レベルとも引張軟化曲線の形状が未知のものに関する適用性は低い。レベル3は、解析過程が含まれる評価方法であるが推定精度が高い。これにはバイリニア型モデル逆解析法[4]、多直線近似による逆解析法[5～7]等がある。特に後者は任意形状の引張軟化曲線の推定が可能であり推定精度が良い。しかしながら、標準試験方法とするためには、1) 安定した荷重変位曲線の計測方法、2) 解析方法の一般化、等に問題がある。1) はレベル2でも同様の問題となる。事項以降ではこれらについて詳しく論じる。なお、この他にも破壊に要したエネルギーを実験結果から推定し、開口変位計測値との関係から引張軟化曲線を求める方法[8]もあるが、エネルギーの評価法、測定精度等に課題がある。

表－1 コンクリートの引張軟化特性評価方法の分類[1]

レベル1	圧縮強度 f_c と粗骨材最大寸法 d_{max} から経験則で評価
レベル2	破壊エネルギー G_F と引張強度 f_t を試験し経験則で評価
レベル3	荷重－荷重変位曲線から逆解析により評価

*1 東京都立大学助教授 工学部建築学科, 工博（正会員）

*2 岐阜大学助手 工学部土木工学科, 工修（正会員）

*3 東北大学教授 工学部建築学科, 工博（正会員）

*4 宇都宮大学助手 工学部建設学科, 工博（正会員）

3. 切欠き梁試験体の曲げ試験による荷重－荷重変位曲線計測方法

コンクリートの引張軟化曲線を逆解析するためには荷重－変位曲線のデータがあればよい。試験方法には、曲げ試験、コンパクトテンション（CT）試験、楔挿入式試験、直接引張試験等が挙げられる。RILEMの破壊エネルギー試験法[2]（以下、RILEM法）に準じ、破壊部を限定する意味でも、切欠きを有する梁形試験体の三点曲げにより荷重－荷重点変位曲線を計測するのが好ましい。本章では特に切欠き梁試験体の曲げ試験について、過去に行われた試験方法等を参考に問題点を考察する。表－2には、国内の代表的な研究機関で実施された切欠き梁試験体の曲げ試験[9～13]の概要をRILEM法での条件とともに比較資料として示す。

3.1 試験体条件

試験体条件として、切欠き深さ、高さ、スパン高さ比 s/h 、切欠き幅、試験体数等が重要である。切欠き深さは多くの実験で高さの1/2である。高さに関しては、RILEM法ではバラツキを考慮し骨材最大径によって変えている（リガメントが概ね最大径の3倍以上）。高さは10～15cmが多い。スパン高さ比 s/h は、RILEM法では8を標準としているが、従来の曲げ試験に準じた3～4としている実験例が多い。スパンが大きいと荷重点変位が大きく計測精度が高くなる利点を有するが、弾性歪みエネルギーの蓄積が大きくなるため、不安定破壊、スナップバック等が生じやすい。スパンが小さい場合には、取扱いも簡単で安定したデータが得られやすいが、高精度の変位計が必要である。切欠き幅は、安定したひび割れ進展を生じさせるためには薄いほど良い。特に脆性的な（ノッチセンシティブ）な材料ほど重要となる。しかしながら通常のコンクリートは比較的延性な（ノッチダクタイル）な材料であり、多少切欠き幅が大でも安定した破壊性状を示すので、通常のダイヤモンドカッターの幅で十分と考えられる。試験体数はバラツキを考慮すると3～6体以上が必要と思われる。

3.2 試験体支承部

三点曲げ試験の支持点にあたる支承部と加力部は、加力によるエネルギーをリガメント部のモードⅠの破壊のみに有効に伝えるために、水平方向の拘束力と摩擦の影響を除去する必要がある。RILEM法では、一方が鋼球によるねじれ防止のローラー支承と他方が丸鋼棒によるローラー支承を規定している。他には、両側を直接丸鋼棒によりローラー支承するもの、ピン支承台座を介し底部をローラーとするものなどがある。加力部については、多くが球座を使用している。また、支承部の試験体めり込みを防ぐために試験体接触部の間に鋼板を挟んでいる。

表－2 国内の代表的な研究機関で実施された切欠き梁の曲げ試験の概要（代表的な試験条件）

研究機関	試験体概要 (mm)，試験体幅は全て100mm						変位計測	計測システム				
	骨材 寸法	高さ	長さ	スパン	切欠 深さ	切欠幅 (カッター厚)	荷重点変位 の検出法	載荷 形式	載荷速度 (最大荷重時間)	安定性 チェック	データ 記録機器	データ サンブル
宇都宮大	20	100	450	400	50	5.0 (3.0)	吊り下げ式	手動	(2分程度)	XYレコーダ	7ナライザー	600回/分
岐阜大	15	100	840	800	50	5.0	支承補正	手動	(30-60秒)	パソコン	ロガー	30回/分
熊本大	15-20	100	400	300	30	(1.0)	着脱式	手動	300N/分	XYレコーダ	動ひずみ計	不明
東工大	20	100	400	300	50	(1.2)	吊り下げ式	変位	0.005mm/分	不明	不明	不明
東北大	16-20	100	840	800	50	2.0(1.4)	着脱式	変位	0.070mm/分	XYレコーダ	ロガー	アナログ
RILEM	1-16	100	840	800	50	10.0以下	試験体変 位の規定	変位	(30-60秒)	目視	規定無し	規定無し
推奨	16.1-32	200	1190	1130	100							

3.3 荷重点変位及び開口変位の計測

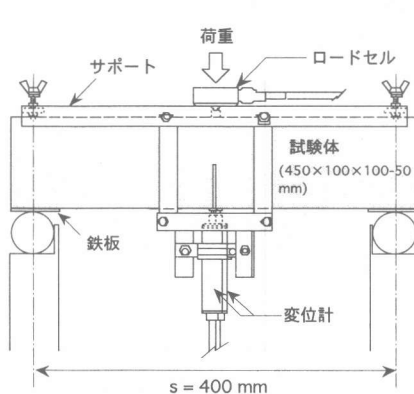
荷重点変位の計測には試験体自体の変形量の検出が重要となる。治具の弾性変形，試験体の支承部へのめりこみによる変形等が含まれると不正確となる。そのために，専用のホルダー（図－1）により荷重点変位のみを計測する方法，あるいは，支承部に接する試験体の垂直変形を計測し補正する方法などがある。前者に関しては，試験体への脱着の容易さが課題となる。また，荷重点変位の計測位置は真の荷重点が望ましいが，困難を伴うため試験体中央底部を計測する例が多い。一方，開口変位は，ひび割れ幅の情報となることから同時計測が望ましい。開口変位には，切欠き肩口部(CMOD)や切欠き先端部（CTOD）などがあるが，ナイフエッジ等を介しクリップゲージにより計測するのが望ましい。

3.4 試験システム

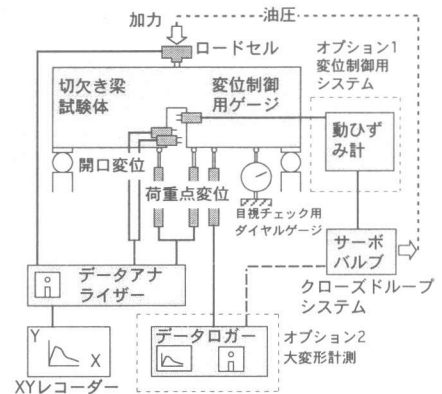
安定した荷重－変位曲線を計測するためには，最大荷重以降の軟化域を精度よく検出する必要がある。低速度の変位制御荷荷を行えば安定破壊が得られるが，フィードバック回路を有する高性能試験機等が必要となる。手動荷荷でも安定破壊は可能である。そのためには，試験機剛性，荷荷速度，試験中の変位モニター，変位操作等が重要となる。試験機剛性は高いほど余分な弾性歪みエネルギーの蓄積がなく，脆性的な破壊を低減できる。荷荷速度は遅いほど安定破壊となる。変位をモニターしながら変位の急激な増加が生じる前に除荷・再荷荷を行い安定破壊を進める。モニターする変位は，余分な弾性変形を含まないひび割れ開口変位が望ましい。図－2に手動荷荷に基づく計測システム例を示す。図中のオプション1は開口変位により変位制御を行う場合であり，オプション2は，FRC等の変形量の大きな試験体の計測を検長の長い変位計により別途計測する例である。

3.5 計測データ処理

計測精度を上げるためには，データサンプリング時間を小さく設定すればよいが，データ数が多くなり平均化操作等が必要である。サンプリング時間を長くすると，データの取扱いは簡便になるが，軟化領域のデータ不足，破断点の特定が困難等の欠点がある。平均化の手法には，同一変位の荷重を平均化する方法，荷重変位の中心傾向を求める重心法[14]等がある。後者は，同一条件の試験体から得られた複数の荷重－変位曲線の平均化を行う場合，一時的な不安定破壊の補正を行う場合等にも有用である。



図－1 切欠き梁試験体の3点曲げ試験例 [7]



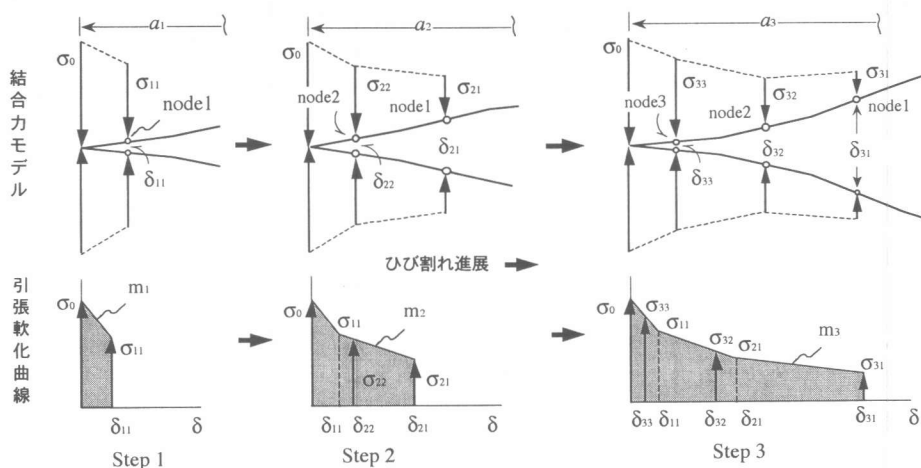
図－2 試験システム例

4. 多直線近似による逆解析法

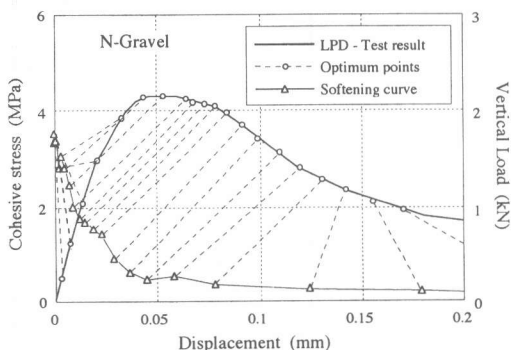
本章では、数多く提案されている引張軟化曲線推定法の中から、多直線により逐次推定する逆解析法について述べる。この方法は、ひび割れが進展するごとに引張軟化曲線の勾配を荷重－変位関係の計測結果と解析結果の一致性から決定し、順次この操作を繰り返して引張軟化曲線の全体形状を決定していく方法のことである（例えば図－3 参照）。この方法の特徴は、ひび割れはノッチ開口変位（CTOD）に向かって常に単調増加であることから、CTOD部と結合応力の関係を逐次解析する際に、すでに求めた引張軟化曲線を構成則として組込むことができ、開口変位－結合応力関係が一意的に決定できる点にある[5]。

4.1 橋高・上村・中村らの方法[5]および栗原・内田・六郷らの方法[6]

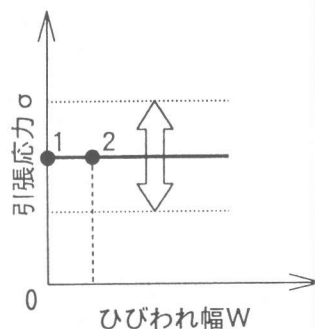
栗原らの方法は、橋高らにより提案された方法を有限要素法（FEM）に組み込んだものである。両方法とも、従来の仮想ひび割れモデルを用いたひびわれ進展解析法を利用している。また、ひび割れ進展量を一定とし、あらかじめ算定した影響係数を組込むことで演算を効率化している。引張軟化曲線の勾配の決定にはひび割れ方程式の繰返し演算を行っている。図－4 に荷重－荷重点変位の実測値と多直線近似軟化曲線の解析結果との関係を示す。



図－3 ひび割れ進展と多直線近似軟化曲線との関係 [5]



図－4 荷重－荷重点変位の実測値と多直線近似軟化曲線の解析結果との関係 [5]



図－5 完全塑性型の引張軟化曲線 [6]

両方法の相違点は、橘高らは、ひび割れ方程式（仮想ひび割れの釣合・適合条件式）を組立てるのに線形破壊力学の関数解を用いているのに対し、栗原らはFEMを使用している点と軟化開始点応力（引張軟化曲線の縦軸上の点）の推定法の相違の2点である。軟化開始点応力の推定については、橘高らは、ひび割れを数節点進展させ、その間の引張軟化曲線の勾配を一時的に一定と仮定し、その間の荷重推定値の最大値と荷重変位計測結果との一致性から軟化開始点応力を求めている。これに対して栗原らは、図-5に示すような完全塑性型の引張軟化曲線を仮定し、引張伝達応力を変化させてひび割れ進展解析を行い、荷重-変位関係の解析結果が計測結果と、ある一定の許容誤差内で一致するものの中で、ひび割れ進展長さが最も長くなる場合の引張伝達応力を軟化開始点応力としている。

4.2 Nanakorn・堀井の方法[7]

Nanakornらは、不連続面を有する要素を組み込んだFEMを用い解析している。切欠き先端の要素のひび割れ開口変位増分 ΔW と引張伝達応力増分 ΔT との関係（ $\Delta T / \Delta W$ ）を、荷重-変位関係の計測結果の荷重増分 ΔP と変位増分 $\Delta \delta$ との関係（ $\Delta P / \Delta \delta$ ）から一意的に求めている。ここでは、次の要素が破壊条件を満足するか、あるいは、既にひび割れの入った全ての要素で、引張軟化曲線の勾配が変化するまで ΔP の絶対値が最も小さいケースを探して ΔP を決定し、この ΔP に対して、 $\Delta T / \Delta W$ と $\Delta P / \Delta \delta$ との関係式を解析結果から求めている。この方法では、3.1で行う繰り返し計算を必要としない。軟化開始点応力は引張強度としている。図-6, 7に荷重-変位曲線の計測結果と推定された引張軟化曲線を示す。

4.3 逆解析法の利点と問題点

本節で紹介した逆解析法の大きな利点は、軟化開始点とひび割れ方程式さえ求められれば、解析上は供試体形状、載荷方法の制約はなく、ほぼ厳密な引張軟化曲線が解析できるということである。なお、ひび割れ方程式を組み立てる上での影響係数算定には、FEMあるいはBEMを用いた方が汎用性があると思われる。これに対して、問題点は、軟化開始点応力の決定、つまり初期条件の決定である。これは逆解析だけではなく引張軟化曲線推定の本質的な問題であり、初期条件を如何に決定するかということに相当する。3.1の逆解析法では荷重変位曲線の初期データを基に軟化開始点応力の推定を試みている。また、栗原らは軟化開始点応力が多少異なっても推定される引張軟化曲線の概形はほぼ同一となることを報告している[6]。これは、軟化開始点応力を一意的に決定できない、言い換えれば軟化開始点応力を厳密に推定しなくても良いということを示している。しかし、解析方法を一般化するためには、また、厳密な引張軟化曲線を得ようとするのであれば当然ながら軟化開始点応力の決定は重要となる。

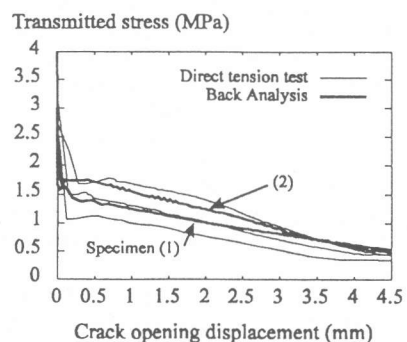
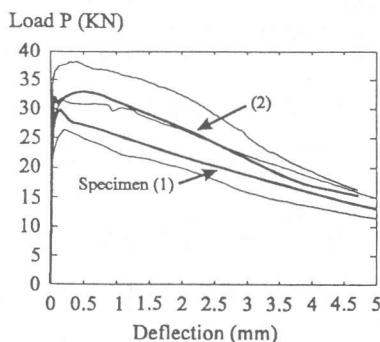


図-6 4点曲げ試験の荷重-変位曲線の実測値 [7] 図-7 4点曲げ試験結果から得た引張軟化曲線 [7]

5. まとめ

本研究での検討を基に、標準化に必要な事項をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 引張軟化曲線の使用目的を明確にする。現状では、構成則への応用、材料の靱性評価、の2点が主であるが、目的により試験評価方法の精度は異なると考えられる。
- 2) すでに一般化された試験値を応用するレベル1, 2の簡易評価に関しては標準化が可能であるが、経験則による評価式が基本なので、多くの実験データの蓄積ならびに評価式に対するコンセンサス、使いやすさに関する議論等が必要である。
- 3) 厳密な引張軟化曲線を推定するためには逆解析法が望ましい。
- 4) 逆解析による方法は解析プログラムを使用する評価方法となり、その一般化は難しい。克服すべき問題点としては、大きく、軟化域を含んだ荷重-変位曲線の計測法の確立、共通プログラムの作成、の2点がある。
- 5) 軟化域を含んだ荷重-変位曲線の計測法の確立に関しては、モードIの変形を生じさせ安定破壊を得るための加力方法、試験体形状(切欠き寸法、リガメント寸法、曲げ試験では、スパン、高さ等)、安定破壊を生じさせるための変位制御方法、変形量の誤差、試験データのばらつき等の低減方法、繊維補強材料等の変形量の大きな材料への対応、等がある。
- 6) 共通プログラムの作成に関しては、必要とされる解析精度および適用範囲の明確化、プログラムの簡便化、影響係数の算定方法(引張強度基準、K値基準)、初期値の決定方法(ヤング率、軟化開始点応力)、解析結果の普遍性の検討、等が課題として挙げられる。

参考文献

- [1] 三橋博三：破壊力学と鉄筋コンクリート構造，コンクリート工学，Vol.34，No.5，pp.5-15，1996.5
- [2] RILEM Draft Recommendation (50-FMC)：Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, 18, No.106, pp.285-290, 1985
- [3] 例えば，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方法，コンクリート工学論文集，Vol. 7, No.2, pp.119-126, 1996
- [4] Wittmann, F. H., Roelfstra, P. E., Mihashi, H., Huang, Y.-Y., Zhang, X.-H., and Nomura, N. : Influence of Age of Loading, Water-Cement Ratio and Rate of Loading on Fracture Energy of Concrete, Materials and Structures, Vol. 20, pp.103-110, 1987
- [5] 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，第453号，pp.15-25，1993.11.
- [6] 栗原哲彦，安藤貴宏，国枝 稔，内田裕市，六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.119-129，1996.2.
- [7] P. NANAKORN and H. HORII : Back Analysis of Tension-Softening Relationship of Concrete, 土木学会論文集，No.544/V-32，pp.265-275，1996.8.
- [8] Li, V. C., Chan, C. M. and Leung, C. K. Y., : Experimental Determination of the Tension Softening Relations for Cementitious Composites, Cement and Concrete Research, Vol.17, No.3, pp.441-452, 1987.
- [9] 例えば，橋高義典，中村成春：高強度コンクリートの破壊パラメータに及ぼす粗骨材の影響，日本建築学会構造系論文集，No. 490，pp.7-16，1996.12.
- [10] 例えば，内田裕市，六郷恵哲，小柳 治：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，第426号/V-14，pp.203-212，1991.2
- [11] 例えば，村上 聖，岸谷孝一，平居孝之：コンクリートの破壊靱性評価に関する研究-J積分と破壊エネルギーとの関連-，日本建築学会構造系論文報告集，第402号，pp.21-25，1989.8
- [12] 例えば，篠原保二，安部武雄，古村福次郎：ノッチ深さ，載荷速度，骨材寸法，水セメント比，載荷法，養生および材令がコンクリート曲げ試験体の引張軟化特性に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文報告集，第442号，pp.13-22，1992.12
- [13] 例えば，野村希晶，三橋博三，鈴木 篤，和泉正哲：非線形破壊力学手法に基づく高強度コンクリートの脆性化機構の考察，日本建築学会構造系論文報告集，第416号，pp.9-16，1990.10
- [14] 中村成春，橋高義典，上村克郎：コンクリートの混合モード破壊に関する破壊力学的検討，日本建築学会構造系論文集，No.480，pp.1-9，1996.2