

## 論文 コンクリートの引張軟化特性の試験法の標準化

名和真一\*<sup>1</sup>・安藤貴宏\*<sup>2</sup>・内田裕市\*<sup>3</sup>・六郷恵哲\*<sup>4</sup>

要旨：曲げ載荷試験から引張軟化曲線を推定するための標準試験法を確立することを目的として、RILEMの試験方法で提案されている破壊エネルギー試験用の供試体と曲げ強度試験用の標準曲げ供試体の2種類の供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、比較検討した。供試体の変形として載荷点変位と切欠き口開口変位を用いた場合の違いについても比較検討した。その結果どちらの供試体を用いても、同様な引張軟化曲線を推定することができた。また載荷点変位に比べ開口変位は、簡単に精度の良い実験データを得ることができ、引張軟化曲線を推定するのに適していることが明らかとなった。

キーワード：試験方法、引張軟化曲線、載荷点変位、切欠き口開口変位

### 1. はじめに

引張軟化曲線を一軸引張試験から求めることは一般的には難しい。そこで曲げ載荷試験から間接的に引張軟化曲線を推定する方法が提案されている。その一つとして多直線近似解析手法による推定法がある。しかし、引張軟化曲線を推定するための標準的な試験方法としては、まだ確立されていないのが現状である。そこで本研究では、曲げ試験から間接的に引張軟化曲線を推定するための標準試験法を確立することを目的として、特に使用する供試体の形状・寸法、計測方法等の載荷試験方法について検討した。なお、試験法の標準化にあたっては、載荷試験方法そのものについての検討の他に、試験データから引張軟化曲線を推定するための解析処理方法についても検討する必要があるが、これについては多直線近似解析手法を用いることとした。

### 2. 試験方法

供試体としては、RILEMの試験方法[1]として提案されている破壊エネルギー試験に用いられる $10 \times 10 \times 84$ (ス $\circ$ 80)cmの供試体と、通常の曲げ強度試験に用いられる $10 \times 10 \times 40$ (ス $\circ$ 30)cmの供試体の2種類を用いた。なお、 $10 \times 10 \times 40$ (ス $\circ$ 30)cmの供試体を選定した理由には、この供試体は曲げ強度試験用として普及しており、通常の試験機関であれば供試体作製にあたって特別に型枠を用意する必要がないこと、およびRILEMの供試体に比べ供試体長がほぼ1/2であり、取り扱いが容易であることが挙げられる。

いずれの供試体も供試体中央に、はり高さの1/2(5cm)の切欠きをコンクリートカッターにより載荷試験前日に設けた。コンクリートには最大骨材寸法15mmのレディーミクストコンクリート(スランプ：17.3cm、空気量：4.6%)を使用した。載荷方法は図-1に示すような3点曲げ載荷と

\*1 岐阜大学 工学部土木工学科 (正会員)

\*2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

\*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

し、供試体は載荷試験直前まで恒温室内（温度20℃、湿度60%）で湿布養生を行い、載荷試験は材齢28～29日の間に行った。以下、供試体寸法10×10×40（スパン30）cmの供試体をN30、供試体寸法10×10×84（スパン80）cmの供試体をN80とする。

載荷は図-1に示すように容量100tonfの耐圧試験機に容量10tonfの油圧ジャッキを取り付け手動油圧ポンプにより行った。計測項目は、荷重、載荷点変位ならびに供試体下面の切欠き口の開口変位の3項目とした。荷重の検出には、油圧ジャッキに取り付けた容量1tonfのロードセル

を用いた。載荷点変位の検出には、ストローク10mmの高感度変位計（感度1/1000mm）を用い、支点沈下の影響を考慮するため図-1に示すように供試体中央下面と支点上面の合計4本設置した。供試体下面の切欠き口の開口変位（以下CMOD）の検出には、クリップゲージ（測定範囲：2～4mm、感度：1/400mm）を用い、供試体下面の切欠き中央部に挿んだ。計測は、パソコンに接続された静ひずみ計を介して30回/分のサンプリング間隔で行った。パソコン画面上の荷重-CMOD曲線の計測データを見ながら手動油圧ポンプにより載荷を行い、急激な破壊が生じないように最大荷重以降、必要に応じて除荷、再載荷を繰り返した。

表-1に試験時材齢における強度試験結果を示す。圧縮強度、引張強度および曲げ強度については、φ10×20cmの圧縮供試体、φ15×15cmの割裂供試体および10×10×40cmの標準曲げ供試体からそれぞれ求め、弾性係数については、圧縮供試体に電気抵抗ひずみゲージ（検長30mm）を直接張り付けて圧縮試験から求めた。

### 3. 多直線近似解析手法による引張軟化曲線の推定法

曲げ載荷試験から引張軟化曲線を推定する橋高らの提案した多直線近似解析手法[2]に基づき、供試体中央に仮想ひびわれモデルを組み込んだFEM解析を用いた引張軟化曲線の自動推定プログラム[3]を作成した。この推定法は、ひびわれ発生後、ひびわれが1節点ずつ進展するごとに逐次引

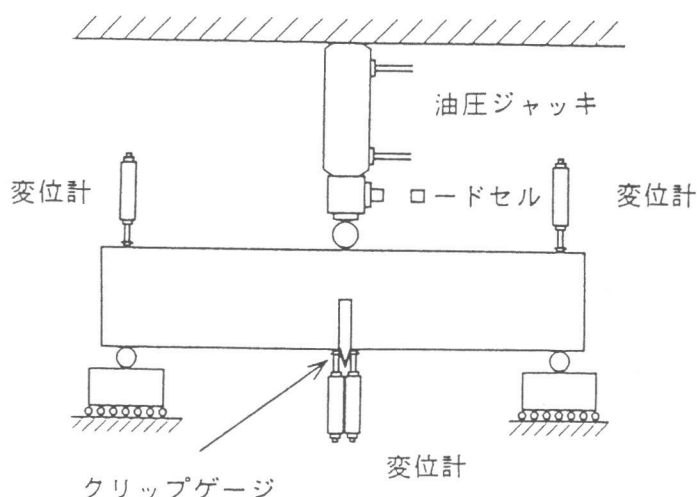


図-1 3点曲げ載荷試験

表-1 試験時材齢における強度試験結果

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
330	29.7	37.7	2.6×10 <sup>5</sup>

張軟化曲線を仮定し、解析値と実験値とが一致するように引張軟化曲線を仮定し直す操作を繰り返して推定していくものである。FEM解析では、はり供試体の左半分のみを対象とし、コンクリートは線形弾性体とし、弾性係数には圧縮試験から求めた実測値を用いポアソン比は0.2とした。実験データには、3点曲げ荷重試験時に計測した荷重、荷重点変位およびCMODを用い、荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線にそれぞれ一致するように引張軟化曲線を推定した。

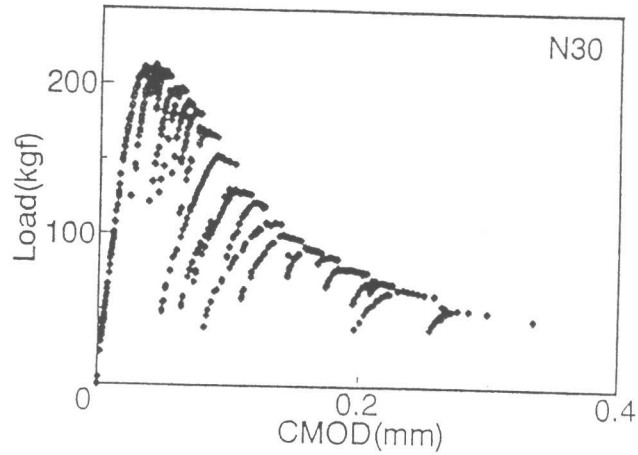


図-2 生データ(N30)の例

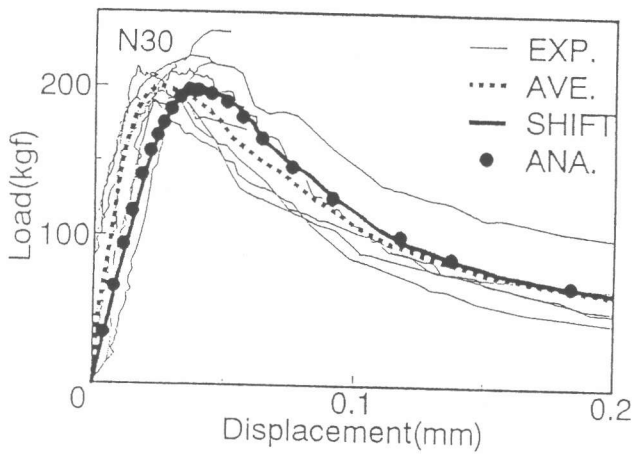


図-3 荷重-変位曲線(N30)

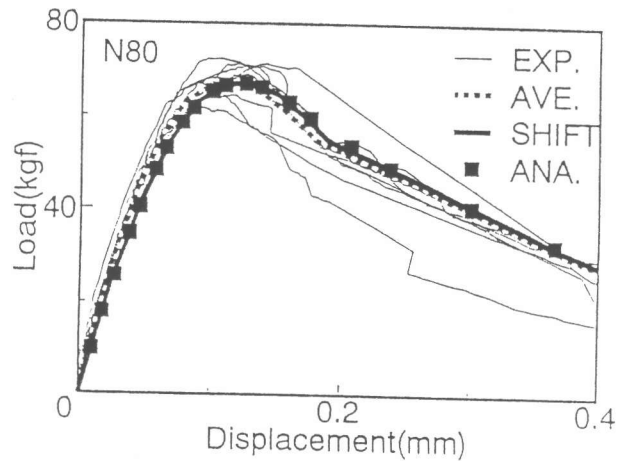


図-5 荷重-変位曲線(N80)

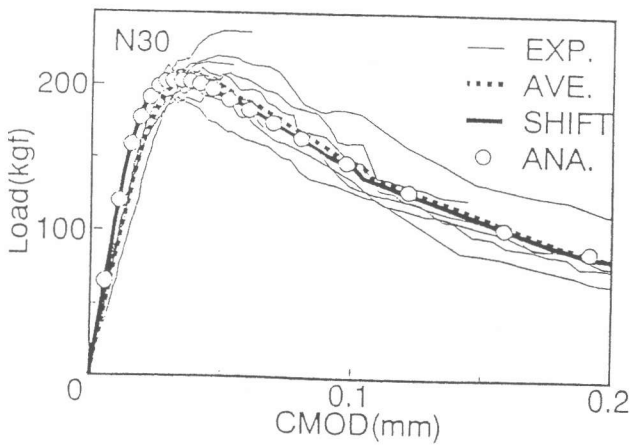


図-4 荷重-CMOD曲線(N30)

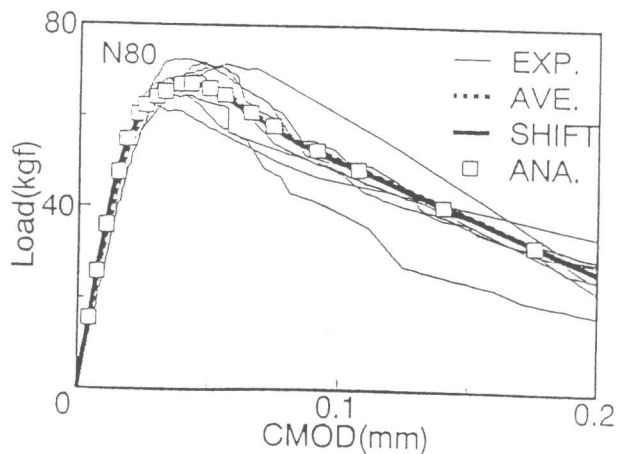


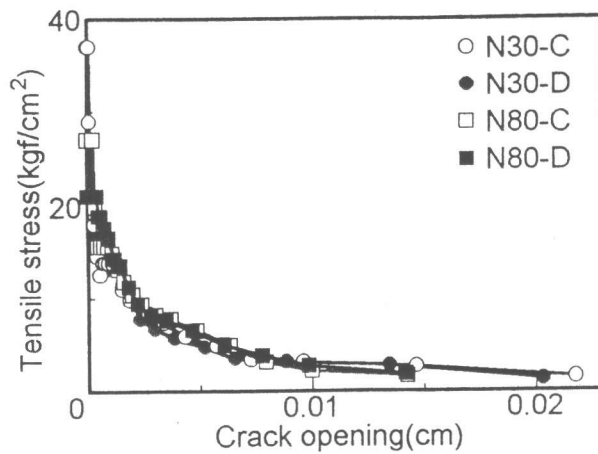
図-6 荷重-CMOD曲線(N80)

曲げ載荷試験から得られる荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線の初期の傾きは、圧縮試験から求めた弾性係数を用いて計算される傾きと必ずしも一致しない。このような初期部分の傾きの差は、実験ならびに解析の精度によるものであり、そのため曲げ載荷試験時の最大荷重の1/3の点（ほぼ弾性域と考えられる）の傾きが計算から得られる傾きと一致するように実験値をシフトさせた。

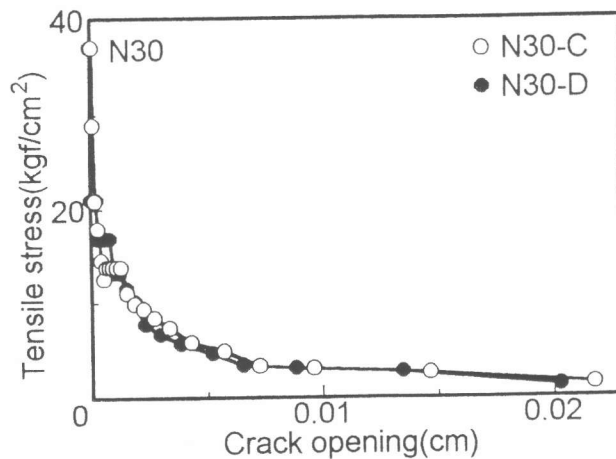
#### 4. 実験および解析結果

図-2に計測されたN30の荷重-CMOD曲線の一例を、図-3~6にN30とN80の荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線の包絡線を示す。図-3~6において細線は実測値(EXP.)であり、破線および実線はシフト前の実測値の平均値(AVE.)およびシフト後の実測値の平均値(SHIFT)である。また、図中の記号●、○、■、□は推定された引張軟化曲線からそれぞれ求めた解析値(ANA.)である。

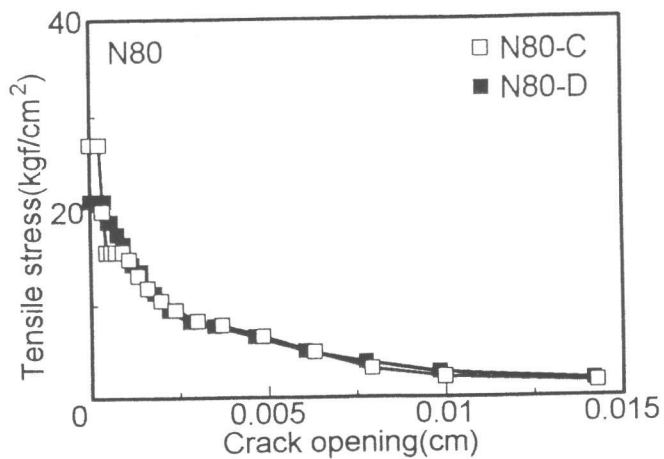
図-2に示すように急激に破壊が進行しないよう、除荷、再載荷を繰り返すことにより、載荷スパンが30cmの供試体においても安定した軟化域の曲線を計測することができた。図-3からわかるように載荷スパンの短いN30の荷重-変位曲線の実測値は載荷の初期の段階からばらつきが大きく、傾きも計算値との差が大きかった。これは変位の計測方法に原因があり、変位計を直



(I) 全体図



(II) N30



(III) N80

図-7 引張軟化曲線

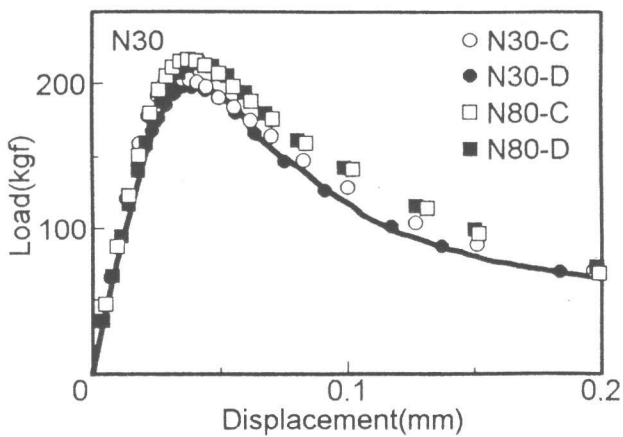


図-8 荷重-変位曲線の解析結果(N30)

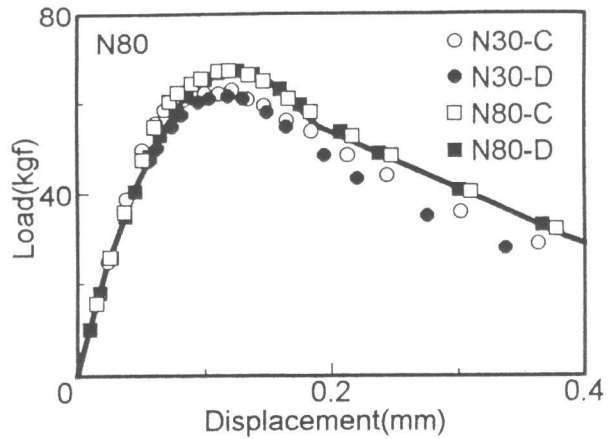


図-10 荷重-変位曲線の解析結果(N80)

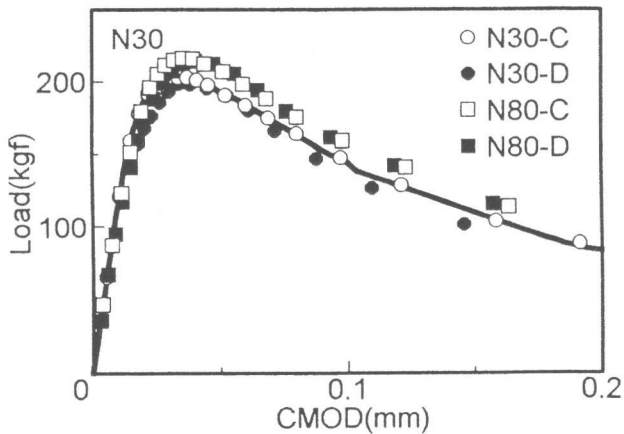


図-9 荷重-CMOD曲線の解析結果(N30)

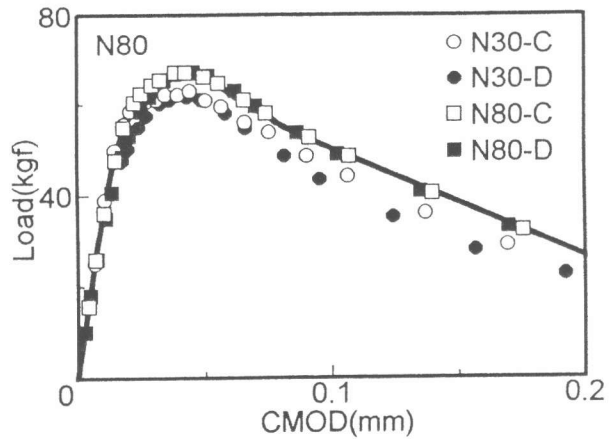


図-11 荷重-CMOD曲線の解析結果(N80)

接供試体に取り付けるなどの工夫が必要であると考えられる。一方、図-5に示すN80の荷重-変位曲線の初期の部分是比较的ばらつきが小さくなっており、このN80の供試体の場合においては、図-1に示すような計測方法によっても十分に荷重-変位曲線を計測できるものと考えられる。図-4, 6に示す荷重-CMOD曲線の場合、N30、N80のどちらの供試体を用いてもばらつきが小さく、傾きも計算で求められた傾きとほとんど差が見られなかった。

図-7にN30とN80からそれぞれ推定された引張軟化曲線を示す。図中の記号-Dと-Cはそれぞれ荷重-変位曲線と荷重-CMOD曲線から推定されたものを示す。推定された引張軟化曲線の全体の概形はほぼ一致しているが、軟化開始点付近は、N30、N80ともに荷重-変位曲線を用いた場合の方が荷重-CMOD曲線を用いた場合より応力が低くなっている。なお、軟化開始点付近の曲線に差が生じる原因は、計測精度ならびに多直線近似解析法が有する軟化開始点の不確定性によるものである。

推定された曲線の一致性をみるために各引張軟化曲線を用いて、N30とN80の供試体の荷重-変位曲線および荷重-CMOD曲線を解析した。その結果を図-8~11に示す。図中の記号は解析で使用した引張軟化曲線(図-7参照)を示す。図-7および図-8~11によれば、同一の供試体で荷重-変位曲線を用いて求めた引張軟化曲線と荷重-CMOD曲線を用いて求めた引張軟化曲線とはほとんど一致している。また、N80から推定された引張軟化曲線を用いた解析値はN30の解析値よりも最大荷重時で約10%程度大きくなったが、曲線の形状はほぼ一致しており解析結果の差は実験値のばらつきの範囲内と考えられる。

以上のことから、RILEMの試験方法で提案されている破壊エネルギー試験用のN80のような大きな供試体の代わりに、曲げ強度試験用のN30の標準曲げ供試体を用いても、同様な引張軟化曲線を推定することができることがわかった。さらに、荷重-CMOD曲線は計測が簡単であり、しかも曲線の初期部分が荷重-変位曲線に比べ、ばらつきが少なく計測できるため、引張軟化曲線を推定するのに適していることがわかった。

## 5. まとめ

本研究の多直線近似解析手法により引張軟化曲線を推定するための試験方法について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 手動油圧ポンプを用いて除荷、再載荷を繰り返すことにより載荷スパンが30cmの供試体においても軟化域を安定に計測できた。
- (2) 供試体の載荷点変位を計測する場合、本実験の測定方法ではN30のような載荷スパンの小さい供試体に対して良好なデータを計測することが困難であった。
- (3) クリップゲージを用いて切欠き口開口変位の計測を行えば、載荷初期の段階においてもばらつきの少ないデータを得ることができ、引張軟化曲線を推定するのに適していることがわかった。
- (4) 荷重-変位曲線と荷重-CMOD曲線のいずれを用いてもほぼ同一の引張軟化曲線が推定されることがわかった。また、載荷スパンの異なるN30とN80から推定される引張軟化曲線もほぼ一致することがわかった。

## [謝辞]

本研究は、日本スパンコンクリート協会研究助成金により行われたことを付記して謝意を表す。

## [参考文献]

- [1] 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, Vol. 18, No. 106, pp. 285-290, 1985.
- [2] 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、pp. 15-25、1993. 11.
- [3] 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, 119-129、1996. 2.