

論文 直接引張試験によるコンクリートの引張軟化特性に関する検討

松尾豊史¹⁾・金津 努²⁾

要旨：本研究は、直接引張試験によってコンクリートの引張軟化曲線を求めることを目的としている。直接引張試験によって、引張軟化曲線を求めるために必要な条件を解析的に検討した上で、コンクリート供試体とPC鋼棒を同時に加力する試験装置を試作して直接引張試験を行った。今回提示した手法により、切欠きのある場合、ない場合について、直接引張試験から、コンクリートの破壊エネルギー及び引張軟化曲線を計測可能であることが確認できた。

キーワード：引張軟化特性、直接引張試験、破壊エネルギー、破壊力学

1. はじめに

コンクリートの破壊力学特性を規定する重要なパラメーターとして、破壊エネルギー及び引張軟化特性が用いられるようになってきた。破壊エネルギーについては、切欠きはりの3点曲げ試験によるRIELMの試験法が標準的なものとされている¹⁾。引張軟化曲線を求める手法としては、逆解析などの種々の方法が提案されているが、標準的な試験法は確立されていないのが現状である²⁾。破壊エネルギー及び引張軟化特性は、本来、直接引張試験の結果として得られるものであるが、試験には特別な試験装置と工夫が必要で、かつ、軟化部までを安定的に計測するのは試験そのものが難しいため、曲げ試験やCT試験などの比較的安定な破壊をする試験から間接的に求められている。

直接引張試験によってコンクリートの軟化部を計測を試みた例は多くはない。Wang(1990)³⁾らは切欠きのある繊維補強コンクリートの直線引張試験法を提案し、E. Wollrab(1996)⁴⁾は、安定な破壊を得るために切欠きのあるコンクリート供試体を用いた直接引張試験を実施している。Carpintari(1994)⁵⁾らは、くびれのある供試体を用い、秋田(1997)⁶⁾らはドックボーン型

の供試体を用いた直線引張試験を実施している。

本論文では、まず、直接引張試験から破壊エネルギー及び引張軟化曲線を求める上で必要な条件を、パラメータスタディにより解析的に検討した。次に、解析的な検討で得た知見を下に、コンクリート供試体とPC鋼棒を同時に加力するために必要な装置を試作し、実際に直接引張試験を行った。

2. 解析的検討

2.1 解析概要

直線引張試験から破壊エネルギー及び引張軟化曲線を求めるための必要条件を明らかにするために予備的検討を行った。

解析ではコンクリートの破壊力学に基づいた「仮想ひびわれモデル」による2次元有限要素解析プログラムを用いた。解析は載荷点に強制変位を与えていく変位制御型の増分解析である。図-1に示すように、ひびわれ面間にロッド要素⁷⁾を配置し、引張軟化曲線から求まる引張応力を等価節点力として作用させた。引張軟化曲線のモデルは一般によく用いられる1/4モデル及び-3乗モデルを用いた。(図-2)

* 1 電力中央研究所 構造部 研究員 工修 (正会員)

* 2 電力中央研究所 構造部 上席研究員 工修 (正会員)

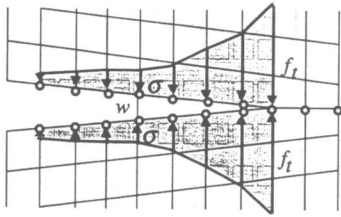


図-1 仮想ひびわれモデル

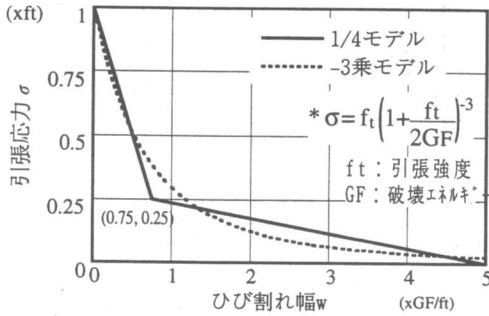


図-2 1/4モデル及び-3乗モデル

解析に用いたコンクリートの物性値は、引張強度3.0(MPa)、弾性係数30.0(GPa)、破壊エネルギー200(N/m)である。鋼(鉄筋)の弾性係数は、200(GPa)を用いた。

2.2 解析的検討

(1) 解析ケース 1

図-3に示すような一軸引張状態の無筋コンクリートの解析モデルを用いて、横(Xcm)と縦(Ycm)をパラメーターとして解析を行った。図-4に解析結果を示す。

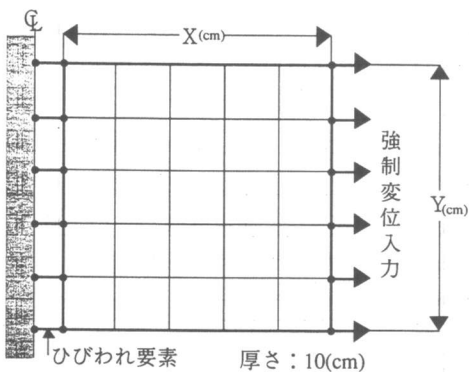


図-3 解析モデル 1

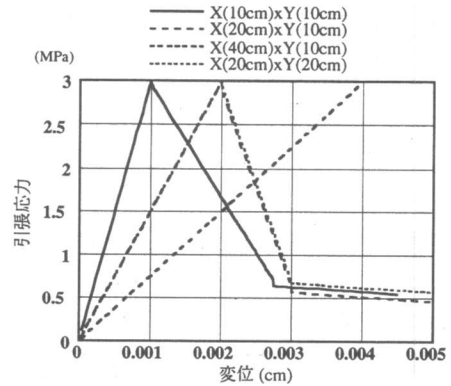


図-4 解析モデル 1 の結果

図-4より、縦(Y)方向の影響はほとんどないが、横(X)方向が長くなるほど、引張強度までの傾きが小さくなる傾向にあることが分かる。これは、供試体が長いほど引張強度に達するまでに蓄えられるエネルギーが増加し、引張強度以降の落ち方が急激になるためである。これより、直線引張試験から引張軟化曲線を得る上で、供試体長さは短い方が有利である。

(2) 解析ケース 2

直接引張試験に用いる治具類の影響を明らかにするために、コンクリートと鋼板及び鋼棒の合成体(図-5)に対する解析的な検討を行った。図-6に解析結果を示す。

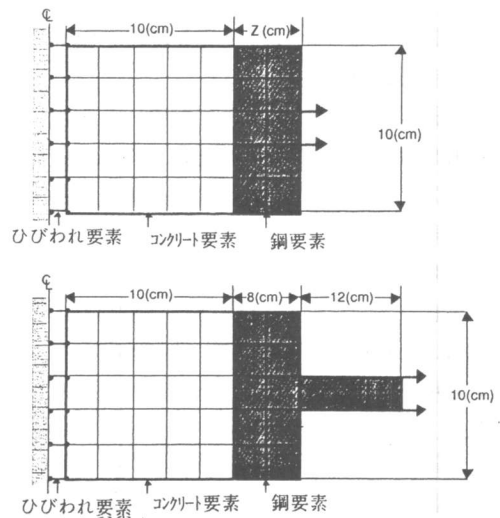


図-5 解析モデル 2

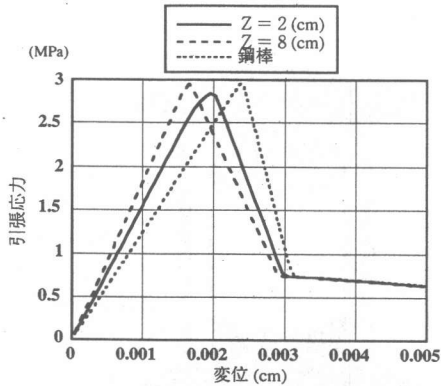


図-6 解析モデル2の結果

図-6より、鋼板の厚さが薄いと、破断面が完全な一軸状態とならずに、見かけ上の引張強度は低下する。一軸状態に近い状態とするためには、ある程度の鋼板の厚さが必要であると考えられる。また、直接引張試験をする時に用いる鋼棒などの載荷治具は弾性変形を含み、引張強度到達以降に、その弾性エネルギーが解放されるので、引張軟化曲線を求める上で不利である。

(3) 解析ケース3

引張軟化部を安定的に計測することを目的として、コンクリートと鉄筋(PC鋼棒)を同時に引っ張るといった構造系を考えた。(図-7)

図-8に解析結果を示す。

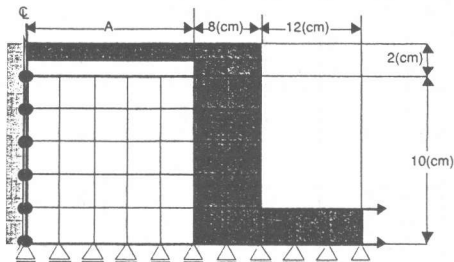


図-7 解析モデル3

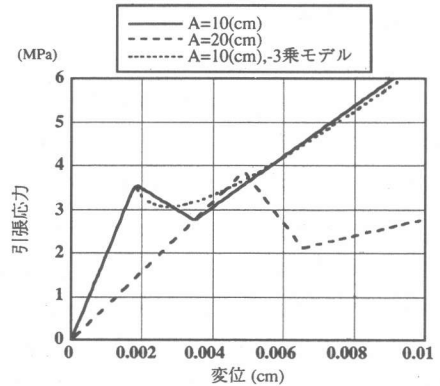


図-8 解析モデル3の結果

図-8より、コンクリートの引張強度到達以降の、弾性エネルギーの解放分を鉄筋(PC鋼棒)が吸収してくれるため、コンクリートの引張強度到達以降の下り勾配が緩やかになり、引張軟化曲線を計測しやすくなると考えられる。

2.3 考察

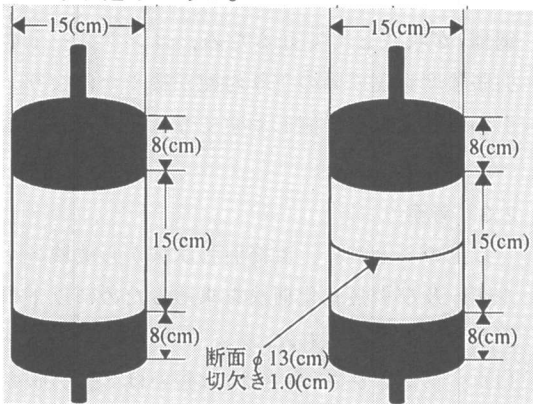
以上のことから、直接引張試験から破壊エネルギー及び引張軟化曲線を求めるために以下のような知見が得られた。

- (1) 供試体長さ(高さは)は短いほど、引張軟化曲線を得る上で有利である。
- (2) 直接引張試験をする上で必要な治具や試験装置の弾性変形は、少ないほどよい。できるだけ剛性の高い治具と試験装置を使用することが望ましい。
- (3) 引張軟化曲線を得る上で、引張軟化部を安定的に計測する上で、コンクリートと鉄筋(PC鋼棒)を同時に引っ張る手法は有効であると考えられる。

3. 直接引張試験

3.1 実験概要

図-9のようにφ15cmのコンクリート円柱供試体をエポキシ系接着剤で鋼板と接着し、切欠き無しのもと切欠きの有りの供試体を作成した実験装置を写真1及び図-10に示す。P C鋼棒はセッティングの時に、200μ程度で締めて、コンクリートひずみが均一になるように微調整した。載荷速度は、0.001(mm/sec)、サンプリングタイムは、0.01(sec)である。なお、試験に用いたコンクリートの配合及び試験時の物性は、表-1、2に示す通りである。



(a) 切欠き無タイプ (b) 切欠き有タイプ
図-9 実験供試体

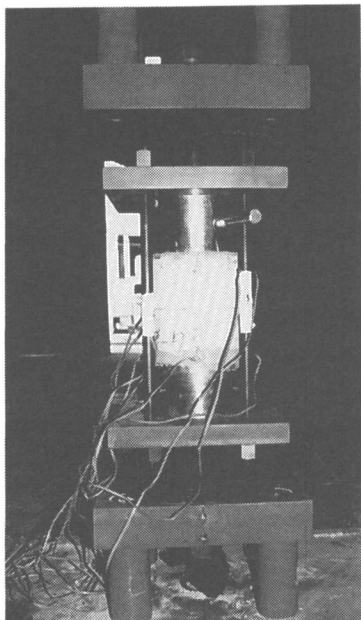
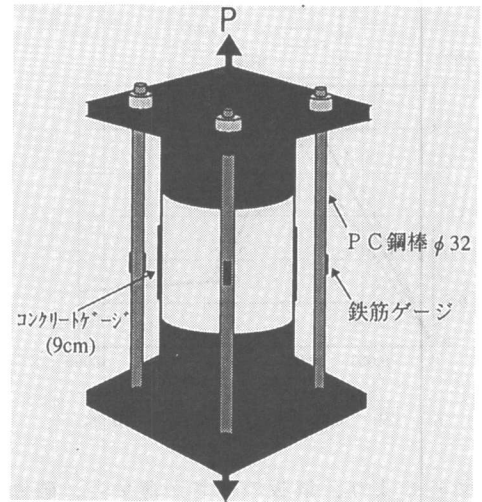
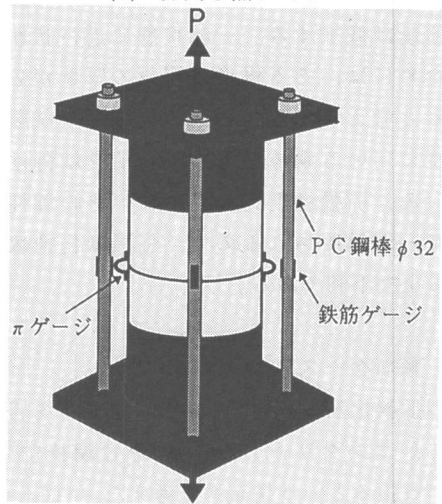


写真1 実験装置



(a) 切欠き無タイプ



(b) 切欠き有タイプ

図-10 実験方法概念図

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	粗骨材 s/a
20	8±1	4±1	50	37

単位量 (kg/m ³)				
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
165	330	660	1245	59.4

表-2 コンクリート強度(試験時)

圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
37.1	32.4	3.58

3.2 実験結果

切欠きのない場合の実験結果から、引張軟化曲線を求めるためのステップを図-11に示す。(a)が実験結果の荷重-鉄筋ひずみ関係である。鉄筋ひずみにPC鋼棒の長さを掛けると鋼板間の変位になる。(b)は、(a)の曲線からPC鋼棒の寄与分を除去し、コンクリートの寄与分だけを求めたものである。(c)は(b)の曲線から、弾性変形分を除去し、コンクリートの引張軟化曲線を求めたものである。

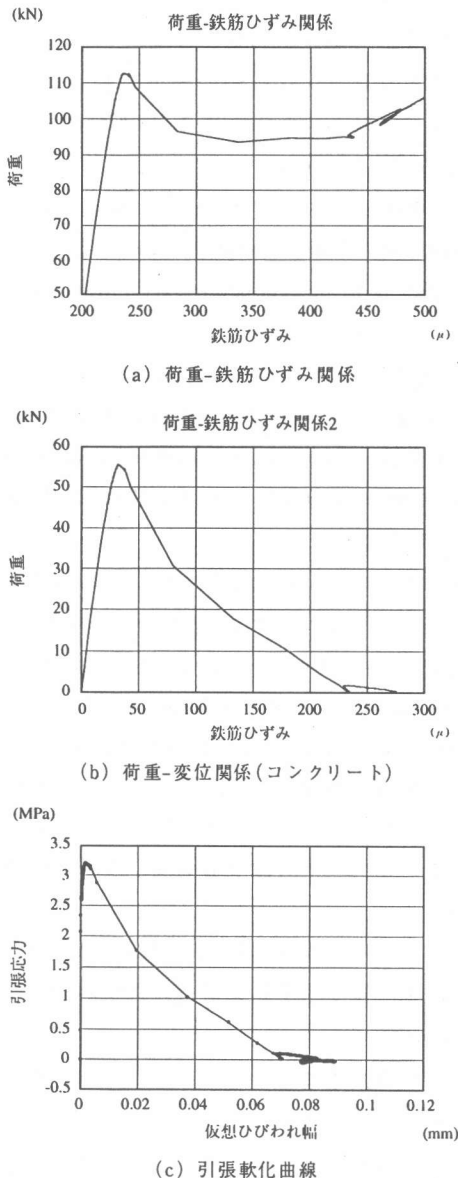


図-11 切欠きのない場合の実験結果

図-12は切欠きがある場合のコンクリート供試体について、図-11でのステップと同じ手順をふんで、荷重-PAIゲージ関係から引張軟化曲線を求めたものである。

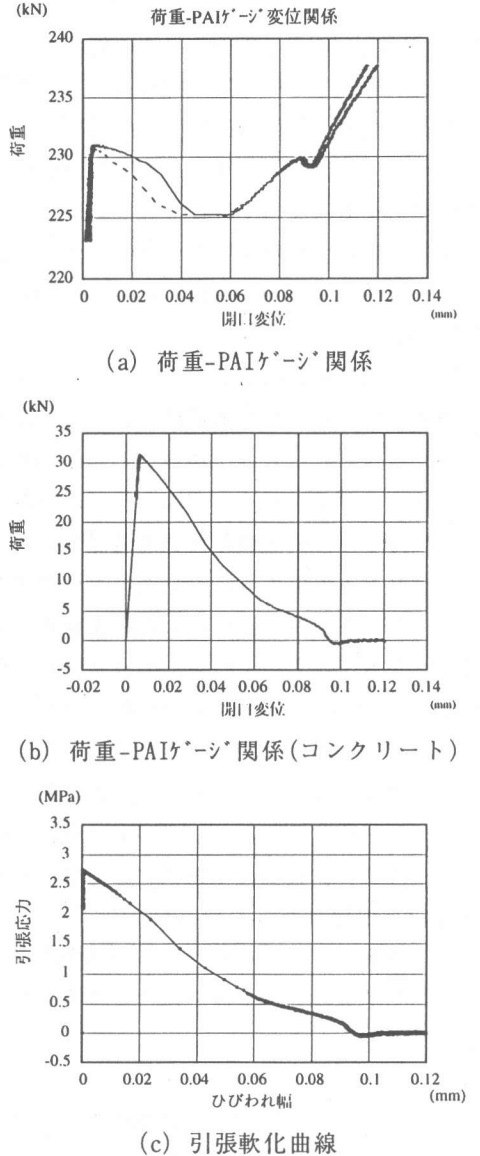


図-12 切欠きのある場合の実験結果

3.3 考察

実験結果から以下のことが分かった。

(1) PC鋼棒とコンクリートの同時加力は、供試体の偏心を防ぐ上で有効⁸⁾であり、また、引張軟化曲線の軟化部を安定的に計測し、引張強度到達以降の偏心を緩和することにも有効である。

(2) コンクリートの軟化以降の偏心は、コンクリートそのものの性質に起因していると考えられる。完全に偏心のない様な引張力を加え得たとしても、コンクリート断面が完全に様に軟化するものではないと考えられる。ある程度不均質にひびわれていくことのトータルとして、引張軟化曲線を想定できると考えられる。(図-11a)

(3) 今回の実験結果からは、従来言われている引張軟化曲線よりも直線に近い形の引張軟化曲線が得られた。なお、本試験では0.01(sec)の高速サンプリングをおこなったが、引張強度到達以降から、引張軟化曲線の尾部分までの変化は急激なものであり、安定的なものではない。

(4) 切欠きのない場合の引張軟化曲線のプレピークが若干ねているのは、引張強度到達前にも粗骨材とペーストとの界面剥離やマイクロクラックが発生していることの影響を受けているものと考えられる。(図-11c)。切欠きのある場合の引張軟化曲線は、従来の引張軟化曲線と同じように、引張強度到達前には、ほとんど変位しない曲線となっている(図-12c)。これは、切欠きのある場合はひびわれる領域が限定されるため影響がほとんどないためと考えられる。

4. おわりに

コンクリート供試体とPC鋼棒を同時に加力するという手法により、切欠きのある場合、ない場合について、直接引張試験から、破壊エネルギー及び引張軟化曲線を計測することが可能であることが明らかになった。本手法には、まだ改良すべき点も残されていると思われるので、今後詳細な部分を詰めていきたい。

本論文では、手法の検証だけに終わったが、今回の直接引張試験から求めた破壊エネルギー及び引張軟化曲線と既往のRILEMの試験法によって評価した破壊エネルギーや現在提案されている引張軟化曲線式との対応などは、改めて検討する予定である。

参考文献

- 1) コンクリートの破壊力学研究委員会：破壊力学の応用研究委員会報告書；JCI, pp.72~73, 1993.10.
- 2) 橋高, 栗原, 三橋, 中村：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；コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 3) Wang, Y., Li, V.C. and Backer, S : Experimental determination of tensile behavior of fiber reinforced concrete, ACI Materials J., Vol.87, No.5, 1990, pp.461-468
- 4) E.Wollrab, C.Ouyang, S.P.Shah, J.Hamm and G.Konig : The effect of specimen thickness on fracture behaviour of concrete, Magazine of Concrete Research, 1996, 48, No.175, June, 117-129
- 5) Carpinteri, A. and Ferro, G. : Size effect on tensile fracture properties, a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure, Materials and Structures, Vol.27, pp.563-571, 1985
- 6) 秋田, 小出, 外門：切欠きの無い供試体を用いたコンクリートの直接引張試験；コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 7) 二羽：非線形ロッド要素を用いたコンクリートの曲げ強度寸法効果解析；JCI年次論文報告集, 1993.6.
- 8) 渡辺, 橋場：コンクリートの引張強度に関する研究；セメント技術年報 38, pp.294~297, 1984