

論文 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

秋田宏*¹・小出英夫*²・外門正直*¹

要旨：コンクリートの引張軟化曲線を、もつとも直接的な方法で得ることと、また標準的な試験方法を確立することを研究目的とした。そのために、切欠きの無いドッグボーン型供試体を用い、引張軟化域が一方の側面から発生するために生じる折れ曲がりを、独自に考案した横力加力装置を用いて打ち消す等、段階的に改良を加えながら3シリーズの試験を行なった。最終的に2供試体について引張軟化曲線を得ることができ、この形状で純引張の試験が可能であることが確認された。

キーワード：引張試験、コンクリート、引張軟化、試験法、破壊力学

1. まえがき

コンクリートの破壊過程を検討するためには、引張軟化特性を考慮する必要があり、引張軟化曲線採取方法を確立することが重要である。これまで、引張軟化曲線を曲げ試験やコンパクション試験の結果から間接的に求めることが多かったが [1, 2]、直接引張試験から求めるのが望ましいのは明らかである。しかし、直接引張試験の難しさから実施例は多くはなく、当初は安定な破壊を得るために切欠きのある供試体を用いられた [3]。また、Carpinteriらはくびれのある供試体を用い、引張軟化の過程で生じる折れ曲がりを打ち消し、初めて純引張状態での引張軟化曲線を採取した [4]。

しかしながら、これらの切欠きやくびれのある供試体では、応力集中が起こること、破壊面を最初から限定してしまうこと等のために、算定された引張強度の誤差が大きいことが欠点である。そこで、筆者らは一様断面の区間を有する、いわゆるドッグボーン型供試体を用いて、直接引張試験法の開発を行ってきた [5]。現時点ではまだ改良すべき点もあるが、これまでに2供試体について引張軟化曲線が得られており、関連する有益な知見も得られているので報告する。

2. 供試体

使用したコンクリートの配合は、表-1に示す一般的なもので、圧縮試験の平均は 32N/mm^2 であった。供試体の形状は図-1であり、中央部に $80 \times 80\text{mm}$ の一様断面を 100mm 確保してある。試験機への供試体取付部の剛性低下を防ぐために、埋め込んだ鉄筋に溶接された鋼板を直接引張るものとした。また、鉄筋によるコンクリート断面の欠損を補うために拡幅し、拡幅区間は応力集中を防ぐために半径の大きい 1004mm の円弧とした。ストレインゲージを接着することによる補強効果を相殺する目的で、厚さ 0.04mm のスチール箔をゲージと同数接着した。

供試体打設時に、鉄筋の埋込み位置がわずかにずれた場合、荷重の偏心によりどの程度の曲げが生じるかを以下のように予想してみた。図-1に示した埋め込み部の長さ 175mm の鉄筋が、供試体端部では中心に一致し、先端が 1mm ずれた場合を考える。簡単のために、試験機のつかみ金

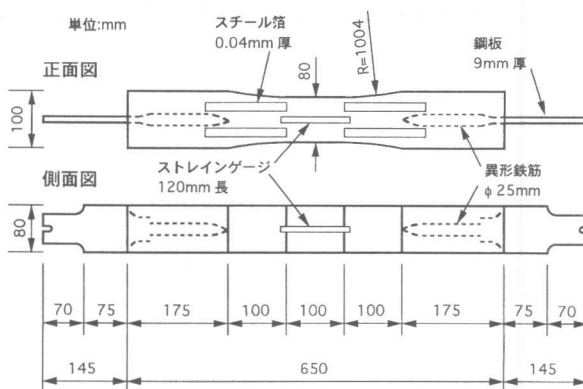
* 1 東北工業大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

* 2 東北工業大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

表－1 使用コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
20	8 ± 1	4.0 ± 0.5	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



図－1 供試体の形状と寸法

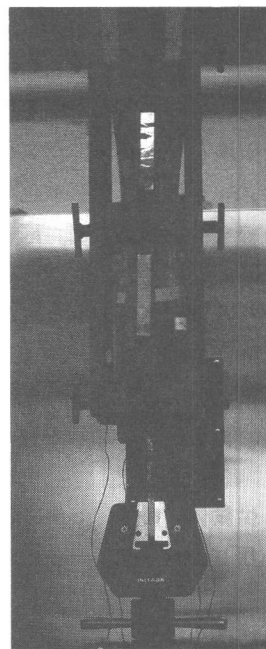
具の中心が供試体の端部から175mm の位置にあると仮定すると、偏心量 1 mm で引張ることになる。偏心量 1 mm のために生じる曲げの縁応力は、この寸法では平均引張応力の 7.5% なので、問題にするほどではないと判断された。

3. シリーズ A, B の試験

図－2 がシリーズ A の供試体 No. 6 で採取された荷重－ひずみ曲線の例であり、供試体の 4 面に貼ったひずみゲージの測定値を同時に示している。ピーク荷重までは 4 チャンネルが大体揃っているが、ひずみの最小は最大の半分程度であり、荷重の偏心に由来すると思われる曲げが、前節の予想より大きいことが知られる。ピーク以降 ch 3 のひずみは順調に増加しているが、対面の ch 1 では減少し、ついには圧縮に転じているのがわかる。すなわち、ch 3 側に生じた破壊進行領域さらにはひび割れによって、局所的な伸びが大きくなるため、供試体は全体として折れ曲がるように変形したものである。個々の試験時間が長いため、荷重がゼロに近くなる以前に試験を打ち切った場合もあるが、A シリーズでは 8 供試体中 6 体について、荷重の下降域をとらえることができた。

ピーク時の荷重は、断面全体が同時に軟化開始ひずみに達した時に最大となることは明らかである。したがって、図－2 は正確なピーク荷重よりも小さい結果を与えているはずで、正確な引張軟化曲線を得るためには、この折れ曲がり打ち消す必要がある。そこで、ネジを締めることで供試体の中点に横力を加える装置を考案して、シリーズ B の試験を行なった。写真－1 に、シリーズ B 以後の実験状況を示しており、横力加力装置、供試体、試験機のつかみ金具などが見られる。この装置により折れ曲がり打ち消すことには成功したが、新たに次の問題が生じた。

引張軟化曲線採取するには、クローズドループ型試験機を用いひずみ制御を行なうが、常にひずみが最大のチャンネルの値で制御しなければならない。当初、簡単な切換えボックスを作り、人力によりチャンネルの切り換えを行なった。ところが、たとえば ch 1 が最大で、ch 3 との差を



写真－1 実験状況

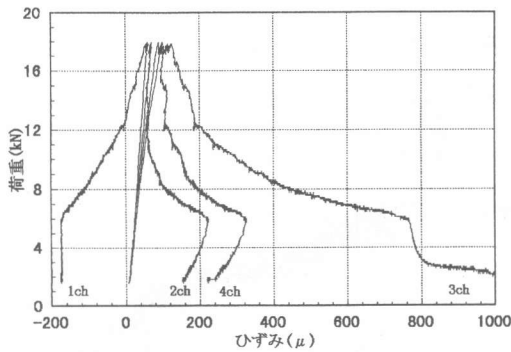


図-2 荷重-ひずみ曲線 (A, No. 6)

表-2 ひずみゲージ部での破断割合

試験種別	割合	ゆるめた時間
予備試験	1/3	18時間後
	3/3	5時間後
シリーズA	2/4	9時間後
	4/4	5時間後
シリーズB	2/4	5時間後
	1/4	4時間後
シリーズC	2/4	4時間後
	0/3	4時間後

小さくするように、横力加力装置で調節しながら試験を継続していると、突如ch3のひずみがch1を追い越し、迅速にch3に切り換えないと供試体が破断してしまうのである。これはRotsらも指摘しているように[6]、ピーク荷重以降では断面内の応力が様な状態は不安定な平衡であり、ある瞬間に最大の軟化領域が断面内を横切り、ch1からch3側へ移行するのである。長時間の試験であるため、2秒程度に過ぎないチャンネル切り換えの機を逃さないように緊張を持続するのは困難であり、自動的な切換装置が必要であると判断された。

予備試験およびシリーズA, Bの範囲で、最終的な破断面がひずみゲージの範囲内にあり制御が可能だった場合と、範囲外である拡幅区間で破断したため制御できずに、ピーク以後の荷重下降域を捉えられない場合とがあった。また、くびれのある供試体では、コンクリートの硬化収縮がくびれ部に拘束されると、供試体に初期欠陥を作ってしまう懸念があったため、打設後のある時間に型枠のネジをゆるめた。表-2は、最終的な破断面がひずみゲージ内に収まり、制御が可能であった供試体の割合とネジをゆるめた時間との関係を示している。予備試験とシリーズAの結果に表れているように、ネジをゆるめる時期が遅いと、明らかにひずみゲージ部で破断する確率が低く、すなわち収縮が拘束される拡幅区間で破断する確率が高くなっている。本試験の範囲だけでは供試体数が少ないことと、載荷速度が同一ではないので断定はできないものの、この結果から、打設後4~5時間程度で型枠のネジをゆるめないと、供試体に初期欠陥を作る可能性が高いと考えられる。

4. シリーズCの試験

荷重制御に用いる最大ひずみのチャンネルを、電気回路的な処理により自動的に選び出す装置を作成して、シリーズCの試験を行なった。図-3, 4は、供試体No. 1の荷重-ひずみ曲線であり、それぞれch1とch3を示す。この例では、ch1がほぼ一貫してひずみ制御用チャンネルであった。前節で述べたように、この場合ピーク荷重以後ではch3のひずみが小さい方が安定なので、放っておくとch1とch3の差が開く一方である。実際には、両者の差が 2×10^{-6} 程度になると調節を開始して、 0.5×10^{-6} 程度まで近づけることを繰り返した。両者の差を縮めるように調節すると、試験機は荷重を増加させるように反応する。

なぜならば、ひずみが最大のチャンネルに対して、ひずみ速度が一定となるように制御しているので、最大ひずみを小さくする方向に調節すると、試験機が遅れを取り戻そうとして荷重を増やすのである。したがって、急激な調節をすると荷重も急激に増え、供試体が破断してしまうの

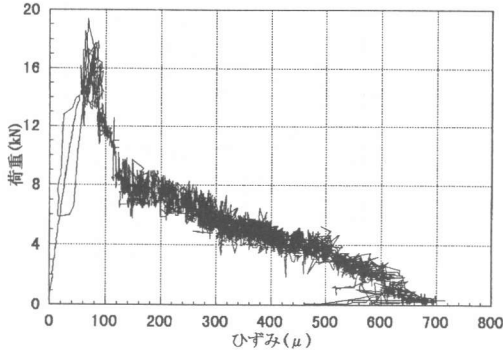


図-3 荷重-ひずみ曲線 (C, No. 1, ch1)

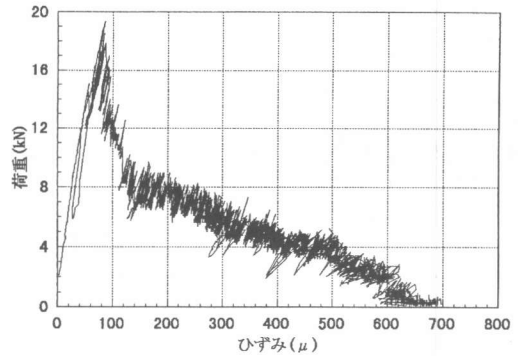


図-4 荷重-ひずみ曲線 (C, No. 1, ch3)

で、ゆっくりと慎重に調節する必要がある。

以上の結果、図-3, 4に見られるように、試験機は荷重の増減を繰り返しながら制御していることがわかる。ここで、ch1はほとんど制御に用いられたため、荷重-ひずみ曲線は垂直に近い振動を示しているが、ひずみが小さくなるたびにch1に追いつくように調節されたch3は斜めの振動が大部分である。

図-5に同一供試体のch4の結果を示す。途中からひずみが減少に転じているが、図-6に示すように、最終的な破断面がわずかにゲージ4をはずれたためである。ひずみゲージやスチール箔の位置が図-1と異なっているのは、横力加力装置のネジが中心線上にくるため、シリーズB以降この配置に変えたからである。

荷重-ひずみ曲線のピーク荷重以降は、スケールを読み変えればそのまま引張軟化曲線になる。また、同曲線下の面積として定義される破壊エネルギー G_F はこの場合ch1とch3を対象にして求めると 48.6N/mとなる。

図-7, 8は供試体No.3の例であり、ch1とch2を示したが、ほとんど同様の変動である。途中で終わっているのは破断したためであり、横力による調節に失敗し、調節が速すぎたためであると考えられる。表-3に載荷速度や試験時間をまとめて示したように、供試体No.3のひずみ制御速度がNo.1の2倍であるため、いっそう慎重な調節が要求されたはずである。このように、手

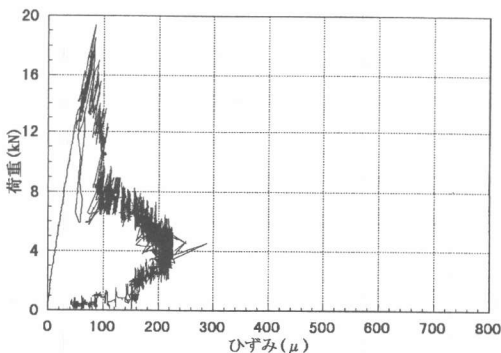


図-5 荷重-ひずみ曲線 (C, No. 1, ch4)

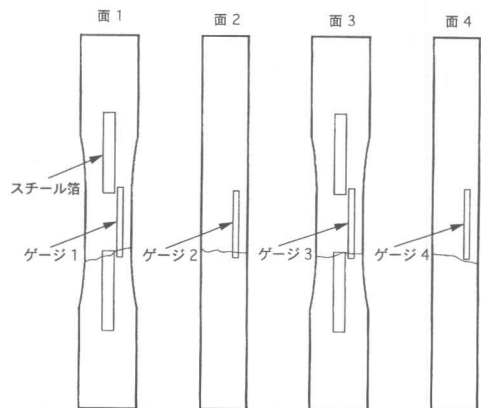


図-6 ひび割れ状況 (C, No. 1)

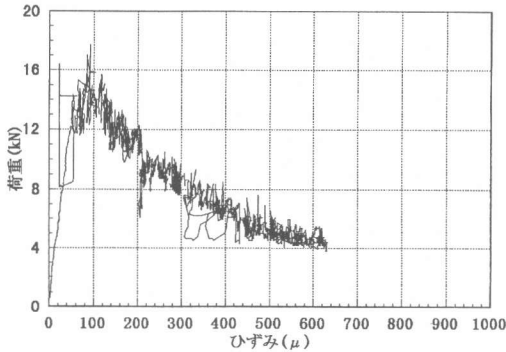


図-7 荷重-ひずみ曲線 (C, No. 3, ch1)

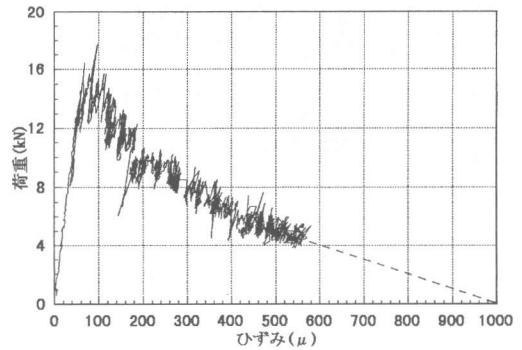


図-8 荷重-ひずみ曲線 (C, No. 3, ch2)

動で調節する横力加力装置には、慎重に操作しないと供試体が破断する欠点がある。ここで、試験時間がかかり長いのは、安定な破壊を実現するには載荷速度を小さくした方が良いと考えられたためである。また、図-7の荷重上昇時の異常な動きは、調節の方向を間違え、ch1のネジを締めるべき時にch3を締めたものと思われ、たまに起こりうる間違いである。もし、これらの調節を自動化すれば、調節の間違いや調節の失敗による破断も無くなり、さらに荷重の振動も小さくなると思われる。Carpinteriらの試験も、その一例と言えるがクローズドループ型試験機を3台用いているため、きわめて高価な試験装置となっている。筆者らの考案した横力加力装置は、きわめて安価であり、操作に注意を要するものの、折れ曲がり打ち消すのに十分役立つことが示された。

破断以後を、図-8に示したように補って求めた G_F は 96.3N/m であり、供試体No.1の2倍となっている。供試体No.1とNo.3の差は、 G_F の大きさだけでなく、ピーク荷重の大きさ、荷重下降域の勾配と形状にも現れている。このように甚だしい差が生じたのが、ばらつきの範囲であるのかどうか、2本だけの結果からは判断できないが、No.3の方が1日室内に放置したため、乾燥収縮ひび割れが発生したことも1つの原因と考えられる。

本シリーズでは、引張軟化曲線の採取に一応成功したと言えるが、供試体No.1は4面のひずみが揃っておらず、No.3は途中で破断しており、いずれも完全ではない。完全な曲線が得られなかったのは、供試体7本のうち、ゲージ位置で破断したものがわずかに2本だった結果でもある。しかも、型枠のネジをゆるめたのが、4時間後であったにもかかわらずである。さらに、表-2から知られるように、シリーズB, Cは同様の傾向を示しており、ゲージ位置で破断する確率が小さくなるのは、横力加力装置の使用によって現れた現象と思われ、次のような理由が考えられる。

図-9に示すように、荷重の偏心による曲げモーメントが生じている供試体で、横力加力装置により中央部の曲げを打ち消すと、両端部には曲げが残るため縁応力は大きいままである。すなわち、中央部の曲げを打ち消すことが、中央部で破断する可能性を減らすことになるので、それを防ぐにはさらに荷重の偏心を小さくする等の改良が必要である。

表-3 載荷速度と所要時間

種別	番号	荷重制御	ひずみ制御	試験時間
A	6	~18kN 100N/s	0.02μ/s	12.5時間
C	1	~14kN 25N/s	0.02μ/s	8.6時間
C	3	~14kN 25N/s	0.04μ/s	4.0時間

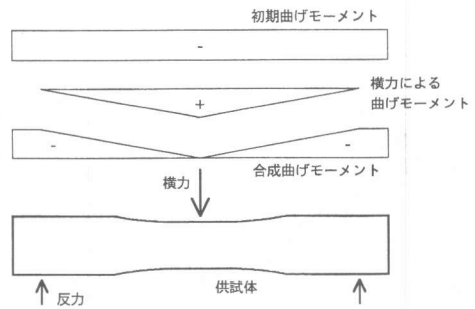


図-9 偏心引張に対する曲げの打消し

5. まとめ

切欠きの無いドッグボーン型供試体を用いた、コンクリートの直接引張試験において、折れ曲がり独自に考案した横力加力装置を用いて打ち消し、引張軟化曲線を得ることに一応の成功を見た。1寸法、1配合に限られた結果であるが、一連の試験を通じ次のことが知られた。

1. クローズドループ型試験機を用いることにより、切欠きの無い供試体の引張試験も、十分制御が可能である。
2. 手動の安価な横力加力装置で、折れ曲がりをも十分に打ち消すことができる。
3. くびれのある供試体では、打設後4~5時間で型枠のネジをゆるめないと、初期欠陥を作ってしまうと推定される。

ただし、現状ではひずみゲージ部での破断確率が25%と低いことから、荷重の偏心をさらに小さくするように試験方法を改良する必要がある。

参考文献

- [1] 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文誌, No.426, pp.203-212, 1991
- [2] Wittmann, F. H., Rokugo, K., Bruhwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P. : Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens, Materials and Structures, Vol.21, pp.21-32, 1988
- [3] Gopalaratnam, V. S. and Shah, S. P. : Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, ACI J., Vol.82, pp.310-323, 1985
- [4] 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, 1994
- [5] Koide, H., Akita, H. and Tomon, M. : Interaction of plural cracks in concrete during flexural failure, Proc. 2nd Int. Conf. Fracture Mech. Concrete Structures, pp.305-313, 1995
- [6] Rots, J. G. and Borst, R. : Analysis of Concrete Fracture in Direct Tension, Int. J. Solids Structures, Vol.25, No.12, pp.1381-1394, 1989