

論文 コンクリートの直接引張試験における実際的方法

秋田宏*¹・小出英夫*²・外門正直*¹

要旨：まちまちな試験条件が採用されており，試験方法が確立されていないコンクリートの直接引張試験に関し，試験条件選択の根拠を示すために考察と実験を行なった。供試体に切欠きを設けることで，複数ひび割れの発生，重複ひび割れの発生，2次曲げへの対処，供試体形状の選択などの問題点が解決し，実際的な試験方法をほぼ確立できた。

キーワード：コンクリート，引張軟化，直接引張試験，試験方法，試験条件

1. まえがき

コンクリートの引張軟化曲線は，破壊力学パラメータとしてひび割れや破壊の解析に用いられ，さらには材料の性能評価の指標となる重要な力学特性を表わすものである。引張軟化曲線を得るための試験法として，直接引張試験は引張強度も同時に得られることが，他の方法には無い優れた点である。しかしながら，実行には困難な点も多く，試験方法は未だに確立されていない。たとえば，最近5年間に発表された例についてみても，試験条件はまちまちであり，中には正反対の条件すら採用されている。主な項目を列挙すれば以下のようなものである。

- ①切欠きをつけた例¹⁾と，つけない例²⁾がある。
- ②2次曲げを打消した例³⁾と，放置した例⁴⁾，さらには意図的に2次曲げを作り出した例⁴⁾もある。
- ③できるだけ乾燥を避けた例²⁾と，逆に長期間乾燥させた例⁵⁾とがある。
- ④ひずみあるいは変形制御による例³⁾と，変位制御⁵⁾あるいは補剛して荷重制御する例がある。
- ⑤供試体の形状には，図-1のa)～e)などがある。

本研究は，これらのまちまちな試験条件のうち，どれを採用するのが適当であるかの根拠を示し，実際的な試験方法を確立するために，考察と実験を行なったものである。

2. 試験条件に関する考察

2. 1 切欠きに対する見直し

切欠きは，安定な破壊を得やすくするため，また破断位置を特定し測定や制御を容易にするため，これまで多くの研究者が採用してきた。しかしながら，切欠きは大きな応力集中を起こすため，観測された引張強度には大きな誤差が伴うと考えられ，実際著者らも過去4年間一貫して切欠きのない供試体を用いてきた⁶⁾。ところが，仮想ひび割れモデルを用いた解析を通じて切欠きによる応力集中が引張強度の観測値に及ぼす影響が，驚くほど小さいことが判明した。

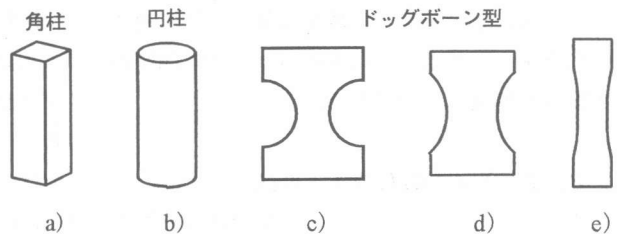


図-1 供試体の形状

* 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)

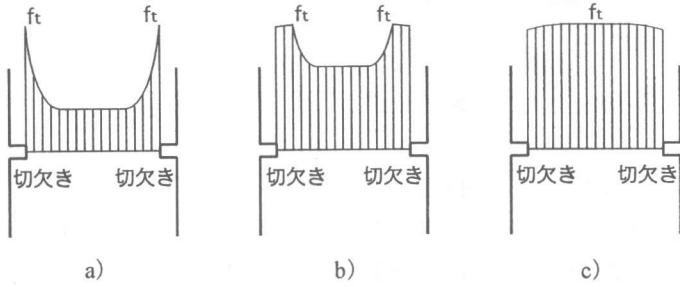


図-2 切欠き部断面の応力分布

図-2は、切欠き部断面の応力分布を表わしたもので、前述の内容を模式的に示している。状態 a)は、引張荷重がまだ小さい段階で、断面中央部では引張応力も小さいが、切欠き部では応力集中のため、すでに引張強度に達したことを示している。状態 b)は、荷重がさらに増え中央部の引張応力が大きくなるとともに、切欠き部から破壊進行領域が進展し、仮想ひび割れで表現した場合の結合応力が働いていることを示している。ここで重要なことは、この仮想ひび割れの開口変位が小さいため、結合応力の引張強度からの低下の割合も小さいことである。状態 c)は、中央部の引張応力が引張強度に達し、荷重が最大になった場合を示しており、このときも破壊進行領域内の結合応力は、引張強度からさほど低下していないのである。すなわち、切欠きによる応力集中はかなり大きいにもかかわらず、観測される最大荷重は、リガメント部が一樣に引張強度に達したと仮定した場合と、2%程度しか変わらないのである。したがって、切欠きを排除する理由は無くなり、逆に切欠きをつけることで以下に示すように問題の大部分が解決するのである。

2.2 2次曲げに対する結論

切欠きの有無にかかわらず、2次曲げを打ち消さなければ最大荷重が小さく観測され、その誤差は小さくないので、荷重を断面積で割って応力を算出することが無意味となる。しかるに、2次曲げをうち消して全断面一樣な引張ひずみ

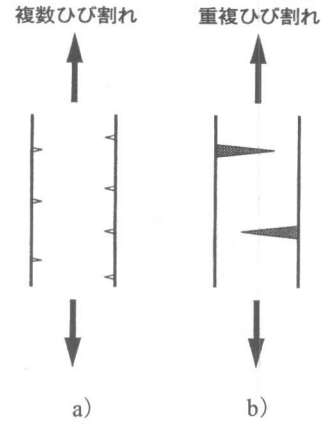


図-3 複数ひび割れ、重複ひび割れ

状態に近づけると、切欠きの無い供試体では、図-3 a)に示すような複数ひび割れが発生する可能性があり、さらに b)のような重複ひび割れに発展する可能性が高い。これらの場合、いずれも破壊エネルギーが大きく観測されるため、試験方法として適当とは思われない。

切欠きをつけることで、複数ひび割れや重複ひび割れが生じる可能性は一段と小さくなるため、当然2次曲げは打ち消した方が良いとの結論になる。

2.3 その他の条件

切欠きをつけることで、図-1に示した供試体形状でも、ドッグボーン型 c), d)を用いる必要がなくなり、角柱またはドッグボーン型 e)が妥当となる。円柱供試体は、特殊な打設をしないかぎり打設方向に引張ることになり、妥当な形状とは思われない。

制御方法については、すでに変形あるいはひずみ制御が妥当であることを示した⁷⁾。すなわち、変位制御や荷重制御では供試体長に制限を受けるため、高強度コンクリートや寸法の大きな供試体には適用できないからである。

乾燥については、2つの考え方ができる。1つは、乾燥の不均一に起因する収縮の不均一により生じる、表面の引張応力が問題だとする考え方で、そうであれば長期間乾燥させて不均一

表-1 使用コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (%)
20	50	37	165	330	660	1245	0.019

を小さくすれば解決できる。もう1つは、肉眼では見えないが、乾燥1日程度で現れる表面ひび割れが問題だとする考え方で、そうであれば長期間乾燥させても解決にはならず、できるだけ乾燥を防ぐのが妥当となる。

本稿の範囲では、実験期間が十分でなくこの問題への結論は出せなかったが、著者らは”できるだけ乾燥を防ぐのが良い”との立場で、試験前の種々の作業による乾燥時間を4時間以内におさえている。

3. 実験概要

3.1 供試体

実験に用いたコンクリートは、配合が同一(表-1)で、バッチと材令の異なる3種A, B, Cである。スランプと空気量は、3種についてそれぞれ1~3cm, 3.5~4.4%の範囲にあった。これらのコンクリートの圧縮強度、弾性係数、割裂引張強度は表-2のようである。直接引張試験では、前後の処理も含め1供試体に4時間程度かかり、実験期間が2週間程度になるため、割裂引張試験をその期間内に行なった。

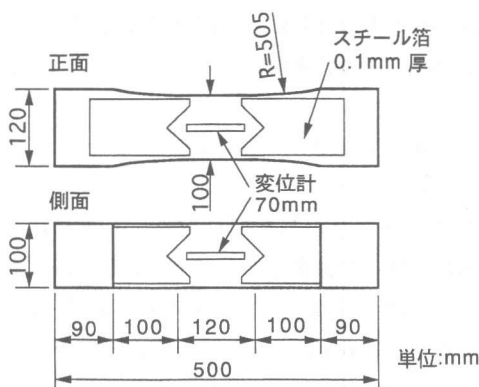


図-4 ドッグボーン型供試体

表-2 圧縮強度、引張強度等

コンクリート種別	A	B	C
28日圧縮強度(MPa)	-	29.8	30.7
ヤング率(GPa)	-	30.6	29.1
ポアソン比	-	0.19	0.21
割裂引張強度(MPa)	2.82	2.57	2.55
引張試験時材令(日)	139	76	50

供試体の形状は、10 × 10 × 40cm の角柱および図-4 に示したドッグボーン型供試体である。ハンチ部は、応力集中を避けるため半径の大きな円弧としたが、それでも2次曲げを打ち消すように調整する際、ハンチ部で破断する傾向があるため、図のように0.1mm厚のスチール箔を接着して補強した場合もある。

3.2 試験方法

切欠きは、実験直前にコンクリートカッターにより設けたので、切欠き幅が約3mmである。切欠き断面で、期待どおりに破断させるために必要な切欠き深さを調べるために、5mm, 7.5mm, 10mmの3種類を対象とした。また、打設方向の強度差を平均化する目的で、打設時側面のみに切欠きを設けた。

2次曲げを打ち消すために、独自に考案した図-5の装置を用いた。ここで、ユニバーサルジョイントは、両接着板(アルミニウム板)

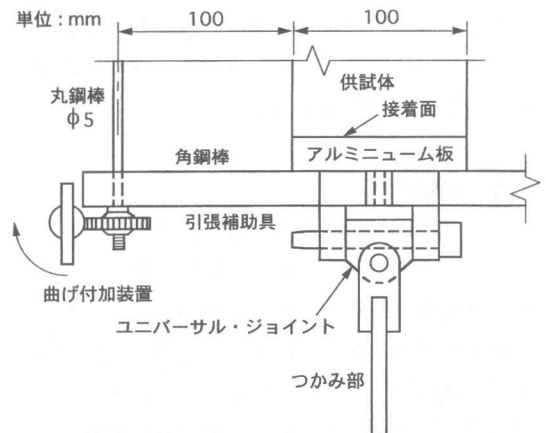


図-5 曲げ付加装置等

表-3 制御速度

段階	種類	区間	速度
1	荷重制御	~15kN	50N/s
2	ひずみ制御	+200 $\mu\epsilon$	0.1 $\mu\epsilon/s$
3	ひずみ制御	+400 $\mu\epsilon$	0.2 $\mu\epsilon/s$
4	ひずみ制御	最後まで	0.3 $\mu\epsilon/s$

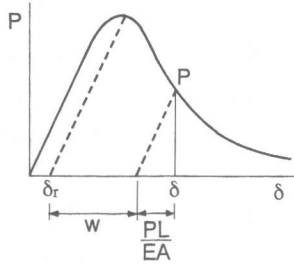


図-7 変形-ひび割れ開口変位の関係

の相対的な傾きに起因する曲げを打ち消すものである。曲げ付加装置は、手でねじを回すことにより丸鋼棒に引張力を与え、その偏心力で供試体に曲げを付加するもので、ユニバーサルジョイントのピンと供試体の中心線のずれに起因する曲げと、2次曲げをともに打ち消すことができる。

クローズドループ型荷重装置を用い、計測および制御には、ゲージ長 70mm の変位計を用いて変形(伸び)制御とした。制御に用いた変形は打設面と底面の平均であり、切欠きを設けた側面の変形は2次曲げを打ち消すためのみに用いた。制御に用いた変形速度は表-3に示すように4段階に変えており、供試体1本の実験所要時間は2~3時間である。

4. 実験結果

図-6に、切欠き深さ 10mm、材令 78 日、スチール筋で補強した角柱供試体で得られた荷重-変形曲線を示す。ピーク荷重以後、急激に荷重が低下する部分が何度かあるが、一般に荷重が急激に低下した際、向かい合った面どうしの伸びには差が生じ、曲げ付加装置を操作して差を縮めて行くと、荷重が回復するのが認めら

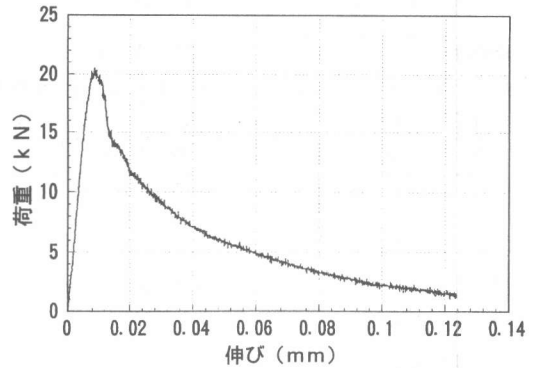


図-6 荷重-変形曲線

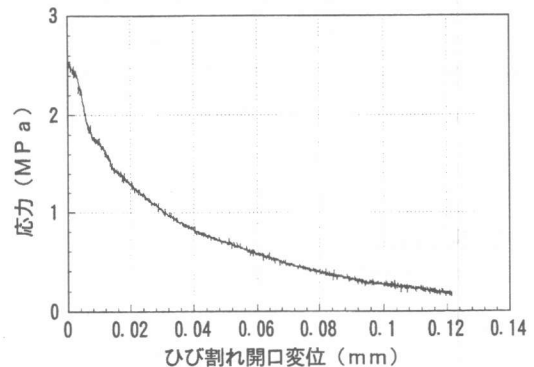


図-8 引張軟化曲線

れる。伸び 0.12mm を過ぎたところで曲線が終わっているのは、破断したためである。実験が成功した供試体は、いずれも荷重 2 kN 前後で破断しており、荷重がゼロになるまで測定を継続できた供試体は無かった。

引張軟化曲線の算出には、仮想ひび割れ部以外は弾性を保つと仮定し、図-7に模式的に示したように次の計算式によった。

$$w = \delta - P \cdot L / (A \cdot E) - \delta_r \quad (1)$$

ここで、 w : ひび割れ開口変位、 δ : 伸びの観測値、 P : 引張荷重、 L : ゲージ長、 A : リガメント部断面積、 E : ヤング率、 δ_r : 塑性変形である。 δ_r は、ピーク荷重から除荷して荷重がゼロになったときの変形を意味する。

図-8は、そのようにして求めた引張軟

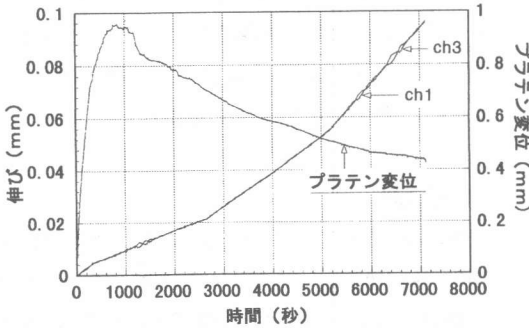


図-9 変形、変位-時間曲線

化曲線である。破断点以降を、破断点での接線により外挿して算出した、破壊エネルギー、限界ひび割れ開口変位は、それぞれ 93N/m、0.15mm であり、この供試体ではいずれも他より小さめの値が得られた。

図-9は、供試体の伸びで打設面 ch 3と底面 ch 1の時間的な変化および試験機のプラテン(載荷板)変位の時間的な変化を対比させて示したものである。曲げ付加装置により、ch 1とch 3の伸びが等しくなるように調節しているため、おおむね両者が一致しており、ところどころにわずかなずれが見られる程度である。また、表-3に示した制御用変形速度に応じて、変形増加のこう配が変化しているのがわかる。供試体の伸びは単調に増加しているが、試験機のプラテン変位はピーク荷重以後減少している。このことは、この程度の長さの供試体を用いた場合、変位制御では安定破壊が得られないことを示している。また、ピーク荷重から伸びが0.02mmに達するまでに、1400秒程度かかっており、十分に制御されていることも知られる。

図-10に、曲げ付加装置で最大の引張力を記録した、ch 1の時間的な変化を試験機荷重の時間的な変化と対比させて示した。2次曲げを打消すために引張力が増減を繰り返していることがわかる。重要なのは、曲げ付加装置が受け持つ引張力は、実験期間を通して試験機荷重の2.5%程度にすぎないことである。この装置では、引張っている綱棒の反対側を常にゆるめ

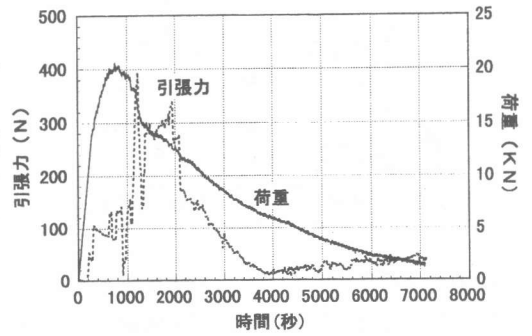


図-10 引張力、荷重-時間曲線

る必要があるが、隣どうしの綱棒を同時に引張ることは珍しくない。したがって、試験機荷重を綱棒の引張力をすべて差し引くことで補正した。

本実験では、計 18本の供試体を用いた。そのうち、曲げ付加装置に不慣れなため調節に失敗し、2次曲げを防げなかった供試体が2本あった。また、切欠きを切る際の速さが大きかったために、切欠き部ではなく切欠きの近傍にひび割れが生じた例が1本あり、その後切る速さを小さくした結果同様な失敗は無くなった。上記3本を除いた15本について、切欠き部で破断し成功裏に軟化曲線が得られたか、切欠き部以外で破断し軟化曲線が得られなかったかを、一覧したものが表-4である。ここで、×はスチール箔で補強したにもかかわらず切欠き部以外で破断したもの、△は補強なしで切欠き部以外で破断したもの、○は補強して成功したものを、◎は補強なしでも成功したものを示す。コンクリートCの補強しないドッグボーン型供試体

表-4 実験結果の一覧

切欠き深さ	供試体形状	A	B	C
5mm	ドッグボーン	○○		
	角柱		△×	△
7.5mm	ドッグボーン	×		
	角柱			△
10mm	ドッグボーン	○		△×
	角柱		△△○	◎◎

表-5 直接引張強度

コンクリート種別		A	B	C
引張強度 (MPa)	供試体1	3.53	2.55	2.58
	供試体2	3.23		2.53
	供試体3	3.17		
	平均	3.31	2.55	2.56

は、切欠き深さ 10mm でもハンチ部で破断した。そこで、ハンチ部をスチール箔で補強したが、瞬間接着剤で接着した後ほどなく実験したところ、それでもハンチ部で破断した。

引張軟化曲線を精度良く求めるためには、切欠きは浅い方が良いと思われるが、切欠き部で破断させるためには深い方が确实である。したがって、精度を重視しスチール箔で補強して浅い切欠きを採用するか、精度を多少犠牲にしても単純な手順にする立場から、補強無しで深い切欠きを採用するかを選択が可能であり、それぞれ適度な切欠き深さを知る必要がある。本実験の範囲から判断すると、補強した場合でも 10mm の切欠き深さが必要であり、補強しない場合にはさらに深い切欠きが必要のように思われる。

表-5 は、引張軟化曲線が得られた 6 供試体について、引張強度を示したものである。表-2 と比較してみると、コンクリート A は割裂引張強度よりも大きな値を示しているが、B と C はいずれもほぼ等しくなっている。本実験では供試体が少ないが、このような傾向は既往の実験結果⁸⁾にも見られる。

5. まとめ

コンクリートの直接引張試験において、供試体に切欠きを設けることで、いくつかの問題点が解決できた。本実験で、成功裏に引張軟化曲線が得られた例は、供試体 18 本中 6 本にすぎないが、それは適度な切欠き深さを調べようとしたからでもある。単に、引張軟化曲線を得ることだけが目的ならば、スチール箔による補強を省略しないか、切欠きを本実験の範囲よりも

深くすれば良いことは明らかと思われる。したがって、適度な切欠き深さの選定はまだ确实とはいえないが、実際的な直接引張試験の方法は、ほとんど確立されたと考えられる。

参考文献

- 1) Mechtcherine, V. and Muller, H. S. : Effect of the Test Set-Up on Fracture Mechanical Parameters of Concrete, Proc. 3rd Int. Conf. Fracture Mechanics Concrete Structures, Vol.1, pp.377-386, Oct. 1998
- 2) 秋田宏・小出英夫・外門正直：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, pp.39-44, 1997.6
- 3) Carpinteri, A. and Ferro, G. : Size Effects on Tensile Fracture Properties: a Unified Explanation Based on Disorder and Fractality of Concrete Microstructure, Materials and Structures, Vol. 27, pp.563-571, 1994
- 4) van Vliet, M. R. A. and van Mier, G. J. M. : Experimental Investigation of Size Effect in Concrete under Uniaxial Tension, Proc. 3rd Int. Conf. Fracture Mechanics Concrete Structures, Vol.3, pp.1923-1936, Oct. 1998
- 5) Trunk, B. and Wittmann, F. H. : Experimental Investigation into the Size Dependence of Fracture Mechanics Parameters, Proc. 3rd Int. Conf. Fracture Mechanics Concrete Structures, Vol.3, pp.1937-1948, Oct. 1998
- 6) Koide, H., Akita, H. and Tomon, M. : Direct Tension Tests Using Apparatus that Counteracts Concrete Bending, Proc. 2nd Int. Conf. Concrete under Sever Conditions, pp.1509-1518, June 1997
- 7) 秋田宏・小出英夫・外門正直：コンクリートの直接引張試験法に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.52, pp.624-629, 1998.12
- 8) 吉本彰・長谷川博・川上正史：コンクリートおよびモルタルの純引張，圧裂および曲げ強度の比較，セメント・コンクリート，No.435, pp.42-48, 1983.5