

円柱形コンクリート供試体を用いた直接引張試験から導いた引張軟化曲線

東北工業大学 フェロー ○小出 英夫
東北工業大学 正会員 秋田 宏

1. はじめに

コンクリートは、セメントマトリックスや骨材等によって構成されている複合材料のため、強度等の各種特性の定義、測定、設計計算上での取り扱いは単純ではない。引張強度を含む引張特性のより正確な把握は、引張強度が小さいこともあり、コンクリート構造物の安全性の照査においては「コンクリートは引張力を受け持たない」との前提で安全側考慮されることも多く、一般に大きな問題にはならない。このことは、引張強度を割裂引張強度で代用していることから明らかである。その一方で、構造物の長寿命・高耐久に関わる耐久性の照査における各種ひび割れの発生・進展は、多くの場合、この引張特性の大きな影響を受けていると考えられ、それら数値解析には正確な引張軟化曲線が必要となる。

著者らは、これまでも引張軟化曲線を直接引張試験から導くことを検討してきた(例えば1)~3)。本研究では、より正確な結果を得ることを目的に、新たに $\phi 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の円柱形供試体を用いて直接引張試験を行い、得た引張軟化曲線について2002年以降のコンクリート標準示方書に示されている2直線1/4モデル⁴⁾⁵⁾との比較を行った。また、試験装置の更新等により、従来よりも詳細な载荷中の各種データの取得が可能となったため、それらのデータについても示す。

2. 直接引張試験方法の概要

試験時の供試体周辺の状況を写真-1に示す。供試体中央部には、ひび割れを誘引する目的で深さ10mm幅3mmの切り欠きを円周上に施し(リガメント部は $\phi 80\text{mm}$ の円断面)、それを跨ぐように、標点距離90mmの π 型変位計を互いに 90° の位置4カ所に軸方向に設置した。供試体両端には、それぞれ4本のバーが十字形に軸直角方向に取り付けられた金属板引張治具をコン

クリート用接着剤で接着し、ユニバーサルジョイントを介して、インストロン社製万能载荷試験装置に取り付けた。载荷は4個の π 型変位計の平均値を用いて、クローズドループ型の変位制御で行った。载荷中、一般には4個の変位計の値は二次曲げ等の影響により大きな差が生じ、このような状態で得られた引張特性の試験結果はコンクリートを均一材料として仮定して各種解析を行う際の使用に耐えうる情報を提供できるとは言い難い。

そこで、本試験では、供試体両端から突出する各4本のバー(バーと変位計は同一放射線上に設定)に対し、上端と下端のバーをそれぞれ丸鋼でつなぎ(写真-1)ネジで締めた。そして、载荷中、4個の変位計の値が常時ほぼ同一になるようにこの各ネジの締めと緩め(上下のバー間距離の調整)を、载荷制御とは別制御されたモーターにて行った。図-1に制御システム全体の概略を示す。なお、供試体自体に作用する引張力は、载荷装置で計測される引張力の値から、4本の丸鋼に作用する各引張力(鉄筋計で計測：写真-1)を差し引くことで導かれる。

3. 直接引張試験の実施

実験に用いた普通コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(宇部三菱セメント社製：密度 3.16g/cm^3)、細骨材は鶴巣大平産山砂(表乾密度 2.61g/cm^3)、粗骨材は丸森産碎石(表乾密度 2.83g/cm^3)、AE剤は山宗化学社製ヴィンソル(I種)を用い、製造直後のスランプと空気量は 12.0cm 、 4.6% であった。

$\phi 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の供試体型枠は一般の円柱供試体型枠を2個接着することで作成し、打設方向は軸方向と

キーワード：直接引張試験、引張軟化曲線、破壊エネルギー、コンクリート

連絡先：〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町35-1 東北工業大学工学部都市マネジメント学科 TEL:022-305-3506



写真-1 直接引張試験時の様子

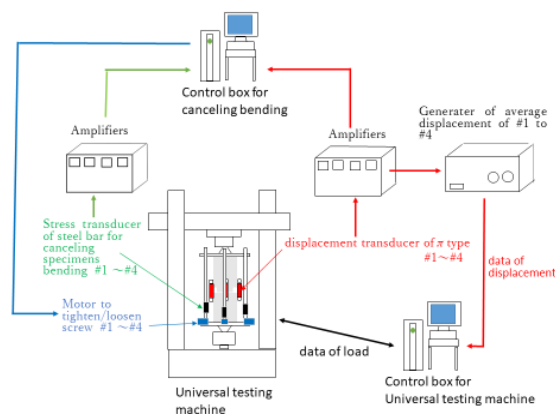


図-1 直接引張試験の制御システムの概略

した。よって硬化時に形成される骨材下面の空隙等の脆弱部が最終破断面とほぼ平行に位置するため、試験より導かれる引張特性は実務上で安全側の結果になると考えられる。約28日間の20℃水中養生後、切欠き部を含む供試体中央部の湿潤状態を保った状態で直接引張試験を実施した。載荷速度は、静的作用に対する引張軟化曲線を得ることを念頭に、最大荷重前後では、変位計の変位が $0.018\mu\text{m/s}$ （標点距離90mmに対する平均ひずみで $0.2\mu\epsilon/s$ に相当）の変位制御で実施した。6本の供試体中5本で最大引張荷重以降のデータも得ることができ、内3本で引張軟化曲線を取得できた。なお、同条件での通常の $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 円柱供試体による圧縮・割裂引張強度試験の結果は、それぞれ 27.9N/mm^2 、 2.68N/mm^2 であった。

4. 直接引張試験の結果

結果の一例として、図-2に載荷装置の引張荷重、4本の丸鋼の合計引張力と供試体変形量(4個の変位計の平均値)の関係、図-3には各丸鋼の引張力と供試体変形量の関係、図-4・5には各変位計の値と試験経過時間との関係を示す。図より、4本の丸鋼に作用する引張力を制御したことで、4個の変位計の値が常時ほぼ同一となる直接引張試験が実行されたことがわかる。なお、制御命令上は、相対する変位計の値の差が $0.4\mu\text{m}$ 以内になるよう丸鋼の引張力を調整する設定であるが、実際には図-5に示すように約10倍の 0.004mm 程度の差が発生した。

図-6に本実験で得られた3本の引張軟化曲線を示す。図中の引張応力は、供試体自重等を考慮して導いた供試体中央リガメント部に作用する引張荷重をリガメント部断面積($\phi 80\text{mm}$)で除した値である。なお、限界ひび割れ幅 w_{cr} は実験後の荷重データの挙動からほぼ 0.4mm と判断した。また、引張強度 f_t の平均値は 3.24N/mm^2 、破壊エネルギー G_F は約 130N/m であった。図中には、示方書のモデル⁵⁾も2ケースについてそれぞれ破線で示した。

5. まとめ

一般に、 G_F だけではコンクリート構造物の挙動を正しく解析することはできず、「引張軟化曲線の形」は非常に重要である⁹⁾。本研究では、粗骨材最大寸法に比して十分な断面積と長さを有する「供試体の一部分」を、載荷面(供試体端面)から十分に離れた部分に設定し、当該部分をほぼ一様な変位で引張ったことで得られた引張軟化曲線を示すことができた(図-6)。その結果、 w_{cr} の値に示方書のモデルと差異があることがわかった。

謝辞：本研究の実施にあたり、株式会社安部日鋼工業より御支援を頂きました。また、宇部三菱セメント株式会社、ショーボンド建設株式会社、山宗化学株式会社より各種材料に関してのご提供・ご便宜を頂きました。ここに記して、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献：1) H. Koide, H. Akita, et al. : Direct tension tests using apparatus that counteracts concrete bending, Proc. Consec'98, 1998.10、2) H. Koide, H. Akita, et al. : A comparison in tension softening curves obtained by a uniaxial tension test and a 3-point bending test with an inverse analysis, Proc. FRAMCOS-4, 2001.5、3) 秋田宏、小出英夫、三橋博三：コンクリートの直接引張試験における4つの誤解、コンクリート工学論文集、第16巻第1号、2005.1、4) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕、5) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、6) 三橋博三 他：コンクリートのひび割れと破壊の力学、技報堂出版、2010.7

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法	スランブ範囲	空気量	水セメント比	細骨材率	単位量 (kg/m^3)				
(mm)	(cm)	(%)	W/C(%)	s/a(%)	W	C	S	G	AE 剤 (%)
20	10.0 ± 2.0	5.0	50	42	170	340	737	1,104	$C \times 0.028$

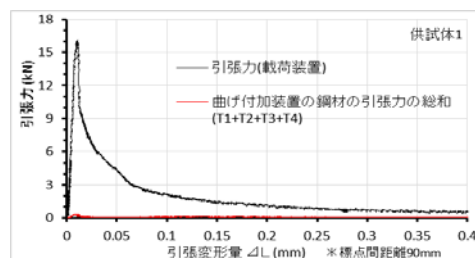


図-2 載荷装置、丸鋼の引張力と供試体変形量

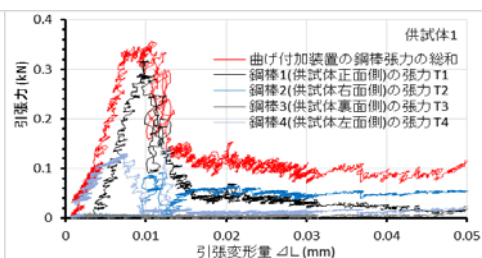


図-3 最大荷重付近での各丸鋼の引張力と供試体変形量

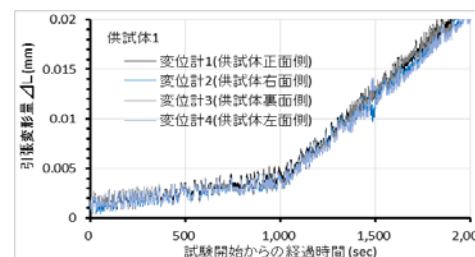


図-4 試験経過時間と4個の変位計の値

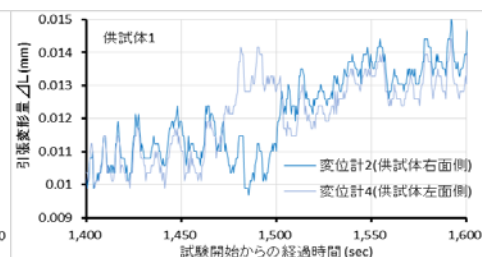


図-5 最大荷重付近での変位計の値の差異

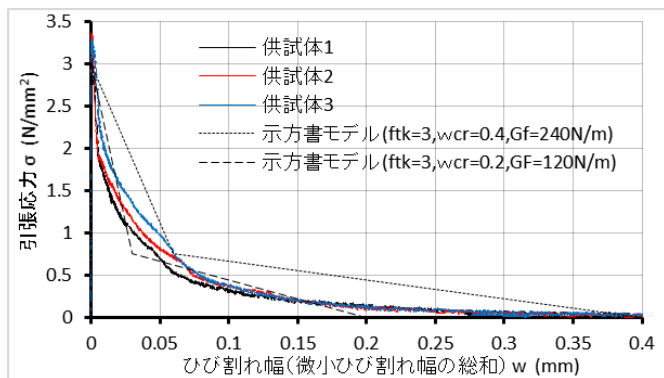


図-6 実験で得られた引張軟化曲線と示方書モデルの比較