

論文 鉄筋の付着を介した一軸引張実験に基づく若材齢コンクリートの変形および強度の特性

三村 陽一^{*1}・吉武 勇^{*2}・海野 達夫^{*3}・堀口 至^{*4}

要旨: 本研究は、コンクリートに過度な応力集中が生じることなく一様な引張応力を作用させるため、鉄筋の付着を介した一軸引張実験を行い、これに基づき若材齢コンクリートの変形特性ならびに強度特性を検討したものである。実験結果より、材齢 2 日までの引張ヤング係数は圧縮ヤング係数の 1.1 倍程度となったが、材齢 3 日以降において同程度となった。材齢 1 日～7 日の一軸引張強度は割裂引張強度に比べ大きくなる傾向を示したが、両者の関係は既往の評価式で表わすことができた。また引張限界ひずみは、水和の進行にともなう一軸引張強度の増加と同様に増加したが、一軸引張強度が約 2.5N/mm^2 を超えるとほぼ一定となった。

キーワード: 引張ヤング係数, 一軸引張強度, 引張限界ひずみ, 引張応力-ひずみ関係

1. はじめに

水和熱に起因した温度ひび割れなど、若材齢期における体積変化に起因した初期ひび割れは、コンクリート構造物の長期耐久性を損ねる一因となる。初期ひび割れの発生の可能性を適切に予測するためには、若材齢コンクリートの変形・強度特性を正確に推定する必要がある。

ヤング係数は、圧縮試験などによって容易に求めることができる圧縮ヤング係数を用いるのが一般的である。一方、引張ヤング係数は実験的に求めることが困難であるため、通常は圧縮ヤング係数が代用される。ここで、セメント水和化合物や細骨材・粗骨材などから構成されるコンクリートの場合、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数が必ずしも同等とは限らない。既往の研究では、引張クリープ特性を求める実験の一環として引張ヤング係数が求められた事例¹⁾が多く、特に若材齢期における引張ヤング係数の時系列特性に着目した研究は少ない²⁾。

一軸引張実験はコンクリートの引張破壊特性を求める方法のひとつであるが、一軸引張力の載荷方法は様々である。たとえば、供試体端部の断面積を拡大し、その拡大部をグリップして一軸引張力を載荷する方法がある。しかしながら、平行部から拡大部に断面が変化する部位に応力が集中しやすく、同位置で破断するケースが多いため、正確な一軸引張強度を求めることは困難である。その他にも、端部にボルトを埋め込む方法や接着剤を用いる方法があるものの、いずれもボルト先端近傍あるいは接着部近傍で破壊することが多い。

そこで本研究では、コンクリートの断面中央に 1 本の鉄筋を埋設し、埋設した鉄筋に引張力を載荷する一軸引張実験を行った。鉄筋に加えた引張力は、コンクリート-鉄筋間の付着を介してコンクリートに伝達される。本

論文は、鉄筋の付着を介した一軸引張実験から得られた若材齢コンクリートの引張変形特性および引張強度特性を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究の一軸引張実験で用いた供試体を図-1 に示す。コンクリートの断面は $100 \times 100\text{mm}$ の矩形状とし、供試体の断面中央には、横ふし型異型鉄筋 D13 (一般市販品, SD295A) を、両端から 100mm ずつ張り出して埋設した。コンクリートの長さは 1560mm であり、付着を介して引張応力が鉄筋からコンクリートへ十分に伝達できるように、定着長を供試体中央から片側 650mm ずつ (計 1300mm) とした。

また、コンクリート中に埋設した鉄筋のひずみ (以下、鉄筋ひずみ) を計測するため、供試体中央より片側部に、 65mm の等間隔で検長 3mm のひずみゲージを貼り付けた (図-1 参照)。なお、各計測位置における鉄筋の縦リブ両面にひずみゲージを貼り付けており、荷重の偏心による曲げの作用が生じていないことを確認している。

本研究で用いた供試体の材料、およびコンクリートの配合を表-1 に示す。なお、この実験研究は若材齢期のコンクリートと鉄筋の付着特性を求めることも目的のひとつとしており、その付着特性は既報³⁾において発表している。

一軸引張実験を行った材齢は、若材齢期を中心に、1, 2, 3, 7, 28 日である。本研究では、各材齢につき供試体 1 体を一軸引張実験に供した。また、一軸引張実験の供試体と同バッチで作製した円柱供試体 (直径 100mm × 高さ 200mm) を用いて圧縮強度試験を行い、圧縮強度な

*1 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博(工) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 (株)エイト日本技術開発 環境・防災・保全事業部副事業部長 (正会員)

*4 呉工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

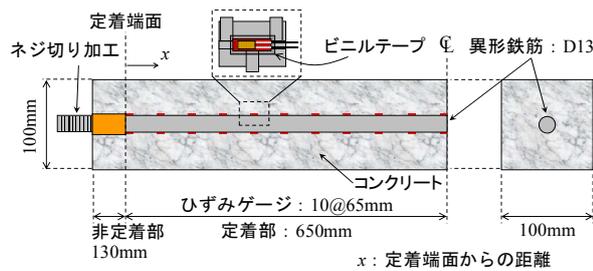


図-1 供試体および鉄筋ひずみ計測位置

表-1 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリート		水セメント比 W/C		57%	
単位量 (kg/m ³)	水 W	165	水道水		
	セメント C	290	高炉セメント B 種		
	細骨材 S	812	海砂		
	粗骨材 G	1030	砕石		
	混和剤 Ad	2.9	AE 減水剤		
鉄筋	呼び名	D13			
	規格	SD295A			
	ヤング係数 E_S (実測値)	191 kN/mm ²			

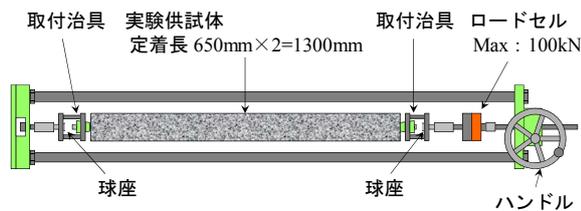


図-2 荷装置

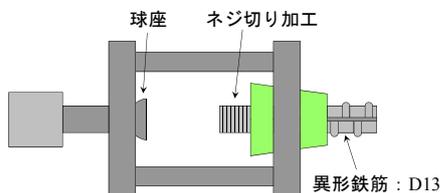


図-3 取付治具

らびに圧縮ヤング係数を求めた。なお、本研究で求めた圧縮ヤング係数は、最大荷重の 1/3 の点と、ひずみが 50×10^{-6} となる点を結んだ割線の勾配である。加えて、一軸引張強度と比較するため、圧縮試験用円柱供試体と同様に作製した円柱供試体を用いて割裂引張試験も行った。圧縮強度、圧縮ヤング係数および割裂引張強度は、各 3 体の実験結果の平均値から求めた。

2.2 実験方法

本研究では、図-2 に示す荷装置を用いて一軸引張実験を行った。両端をネジ切り加工した鉄筋をコンクリート断面中央に埋設し、図-3 に示す取付治具を用いて供試体を一軸引張荷装置に取り付けた。取付治具には球座を設けており、荷重の偏心による曲げ応力の作用をできるだけ小さくした。

本実験では、ロードセルにより計測される値(データロガーにリアルタイムで表示される値)を目安に、荷重

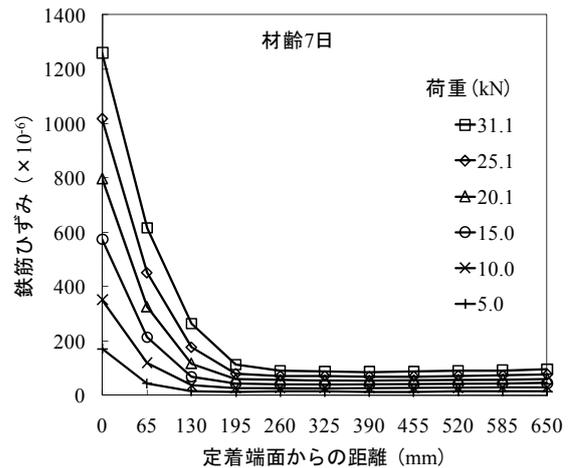


図-4 鉄筋ひずみの軸方向分布の一例

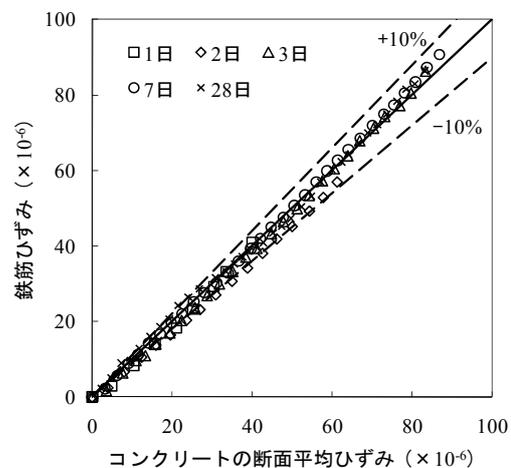


図-5 コンクリートの断面平均ひずみと鉄筋ひずみ

速度 0.1kN/sec 程度となるように手動で荷重を行い、荷重が約 1kN 増加するごとに、鉄筋ひずみを計測した。なお、コンクリートにひび割れが生じた荷重の最大値は 35.1kN (張り出した鉄筋に生じた応力 277N/mm^2) であり、いずれの実験も鉄筋の降伏前に実験を終了した。

3. 結果と考察

3.1 ひずみ分布

一軸引張実験より得られた鉄筋ひずみの軸方向分布の一例を図-4 に示す。図-4 に示すように、定着端面では、鉄筋に荷重した引張力をすべて鉄筋が負担しているため、鉄筋単体に引張力を荷重した場合と同程度のひずみが生じた。しかしながら、定着端からの距離が大きくなると、付着を介して鉄筋からコンクリートへ引張力が伝達されるため、徐々に鉄筋ひずみが小さくなった。供試体中央付近では鉄筋ひずみの分布勾配がほとんど生じておらず、390mm より供試体中央側の位置では、いずれの材齢においても鉄筋ひずみの軸方向分布に勾配がほとんど生じなかった。ここで、定着端面から 390mm より供試体中央側で計測された鉄筋ひずみの平均値と、式(1)から求まるコンクリートの断面平均ひずみの関係

を図-5に示す。

$$\bar{\varepsilon}_{c_t} = \frac{P_t - \varepsilon_s E_s A_s}{E_{c_c} A_c} \quad (1)$$

ここに $\bar{\varepsilon}$ ：断面平均ひずみ、 P ：荷重、 ε ：ひずみ、 E ：ヤング係数、 A ：断面積を表し、添え字の C, S はそれぞれコンクリートおよび鉄筋を表し、 t, c はそれぞれ引張および圧縮を表す。

図-5に示すように、分布勾配がほとんど生じていない範囲の鉄筋ひずみは、式(1)から算定されるコンクリートの断面平均ひずみの±10%程度の範囲内にあった。

このことより、鉄筋ひずみの分布勾配がほとんど生じていない範囲(完全付着領域)では、鉄筋とコンクリートが

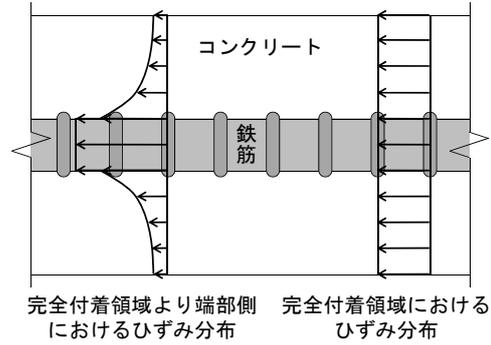


図-6 断面内のひずみ分布

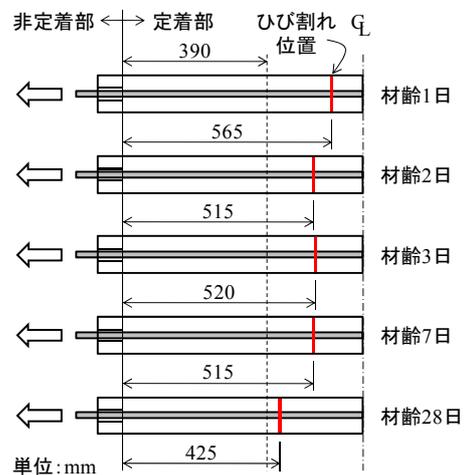
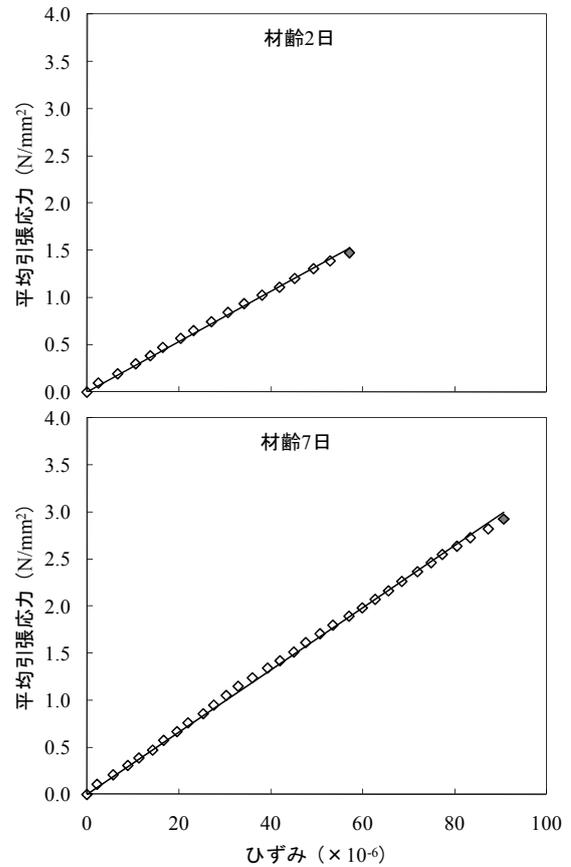
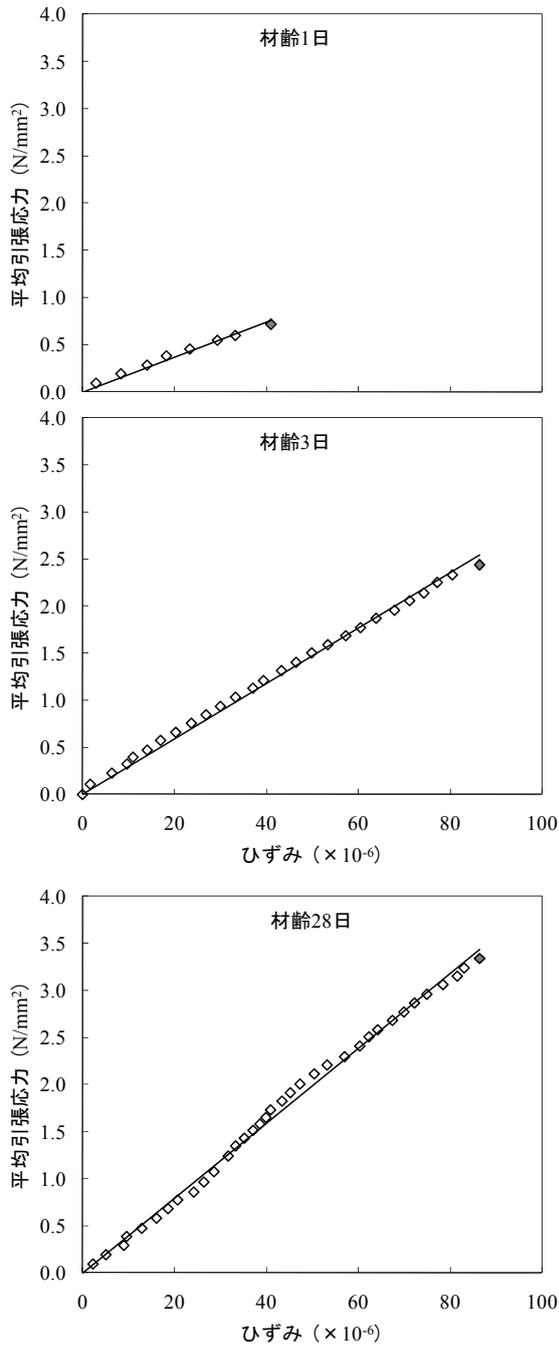


図-7 コンクリートの平均引張応力-ひずみ関係およびコンクリートのひび割れ位置(材齢：1, 2, 3, 7, 28日)

充分に一体化していると考えられる。すなわち、完全付着領域より端部側では、図-6に示すように断面内のひずみに差が生じるのに対し、完全付着領域では断面内のひずみ分布が一樣になっていると考えられる。このことは、ひずみ分布が一樣になっていると仮定して得られるひずみ($\varepsilon = P_t / (E_{st}A_s + E_{cc}A_c)$)と、式(1)で得られるコンクリートの断面平均ひずみが概ね一致したことからも推察される。以上のことから、完全付着領域におけるコンクリートの断面には、概ね一樣な引張応力が作用していると判断される。以上のことから、本研究では完全付着領域における鉄筋ひずみの計測値の平均値を用いて、コンクリートの引張ヤング係数および引張限界ひずみを求めた。なお、本研究のような一軸引張実験におけるコンクリートの断面平均ひずみを算定するためには、本来ならばコンクリートの引張ヤング係数を用いるべきである。図-5における鉄筋ひずみとコンクリートの断面平均ひずみの差異は、式(1)に示すようにコンクリートの圧縮ヤング係数を用いたことにも起因していると考えられる。

3.2 平均引張応力-ひずみ関係

完全付着領域におけるコンクリートの平均引張応力とひずみの関係を図-7に示す。図-7に示す平均引張応力は、式(2)を用いてコンクリートに作用する応力を算定したものである。

$$\overline{\sigma_c} = \frac{P_t - A_s E_{st} \overline{\varepsilon_{st}}}{A_c} \quad (2)$$

ここに $\overline{\sigma_c}$: コンクリートの平均引張応力, $\overline{\varepsilon_{st}}$: 完全付着領域における鉄筋ひずみの平均値を表す。

図-7に示すように、各材齢の平均引張応力-ひずみ関係は、概ね比例関係にあった。ここで、高強度コンクリートを対象とした萩原らの報告では、ひずみが 10×10^{-6} に達した点と一軸引張強度(原文では直接引張強度)の $1/3$ の応力に達した点を結んだ直線の傾きとして引張ヤング係数を算定している¹⁾。土木用の一般的な配合の若材齢コンクリートを対象とする本研究において、同様の方法で引張ヤング係数を評価すると、一軸引張強度が比較的小さいため、算定に用いる2点が同程度の応力レベルとなり、適切な引張ヤング係数の算定が困難であると考えられる。そこで本研究では、図-7に示す平均引張応力-ひずみ関係を線形回帰することで引張ヤング係数を算定した。ただし、コンクリートにひび割れが発生する直前に、鉄筋ひずみが僅かに増加する傾向(マーカー着色部)にあったことから、ひび割れ発生直前の計測値は除外して引張ヤング係数を算定した。なお、参考までにコンクリートに最初に生じたひび割れの位置を

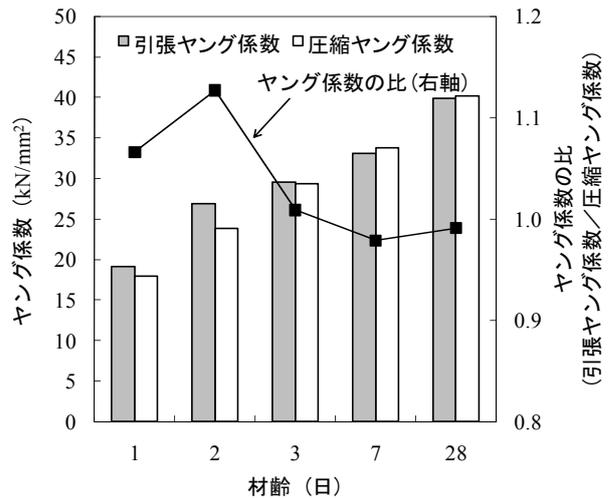


図-8 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数

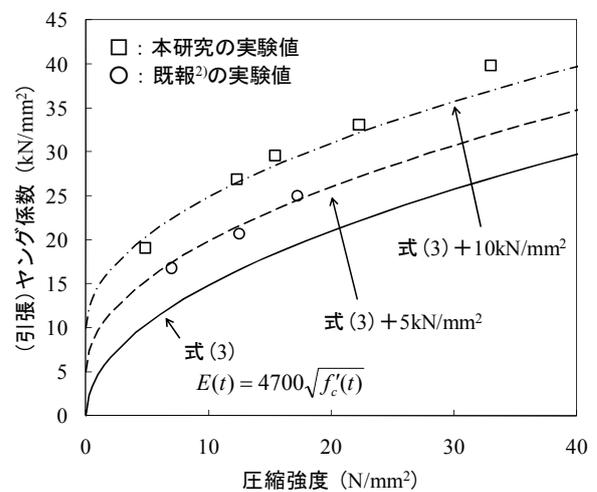


図-9 圧縮強度と(引張)ヤング係数の関係

図-7に併せて示す。

3.3 引張ヤング係数

平均引張応力-ひずみ関係を直線回帰して求めた引張ヤング係数および円柱供試体より求めた圧縮ヤング係数の材齢変化を図-8に示す。図-8には、圧縮ヤング係数に対する引張ヤング係数の比も併せて示す。図-8に示すように、材齢の進行にともない引張ヤング係数が大きくなった。材齢1日および材齢2日では、ヤング係数の比がそれぞれ1.07, 1.13となり、圧縮ヤング係数に比べ引張ヤング係数のほうが大きくなった。一方、材齢3日以降のヤング係数の比は0.98~1.01であり、引張ヤング係数は圧縮ヤング係数と同程度であった。このような結果は、著者らがドッグボーン形の供試体(ドッグボーン供試体)を用いて行った一軸引張実験の結果と概ね一致するものである²⁾。

ここで、圧縮強度と引張ヤング係数の関係を図-9に示す。なお図-9には、先述した既報の実験結果²⁾も併せて示す。また、図-9に示す曲線は、コンクリート標準示方書(設計編)⁴⁾に示される(引張)ヤング係数の推定

式より求めた計算値である。(引張)ヤング係数の推定式を式(3)に示す。ただし式(3)には、クリープ等を考慮するための低減係数を除いて示している。

$$E(t) = 4700\sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

ここに $E(t)$:材齢 t 日における(引張)ヤング係数(N/mm²), $f'_c(t)$:材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²)を表す。

図-9に示すように、既報の実験値および本研究の実験値ともに圧縮強度の増加にともない、引張ヤング係数は大きくなる傾向にあった。また、既報で示した引張ヤング係数に比べ、本研究で得られた引張ヤング係数は異なる傾向を示した。式(3)で求めた計算値と比較しても、既報の引張ヤング係数は計算値に対し+5kN/mm²程度であったのに対し、本研究で得られた引張ヤング係数は+10kN/mm²程度となった。このことは、式(3)によるヤング係数推定値をもとに推定された引張応力は、実際に生じる引張応力に比して過小評価される可能性があり、ひび割れ予測においては危険側の評価を与える可能性も考えられる。

3.4 一軸引張強度

写真-1に本実験終了後におけるひび割れ発生状況を示す。なお、写真-1には複数のひび割れが生じているが、これはひび割れ発生後も継続して荷重を増加させたためである。写真-1に示すように、ひび割れは供試体の断面を貫通して生じた。また、最初にひび割れが発生した位置は、図-7に示すようにいずれも完全付着領域の範囲内であった。

ここで、ドッグボーン供試体を用いた一軸引張実験における、供試体の破壊状況を写真-2に示す。写真-2に示すように、グリップする断面変化部(応力集中部)で供試体が破壊していることがわかる。本研究で用いた供試体には、ドッグボーン供試体のような断面変化部がないため過度な応力集中が生じることなく、より容易に一軸引張強度を求めることができると考えられる。

ひび割れ発生荷重および式(2)を用いて算定した一軸引張強度ならびに円柱供試体より得られた割裂引張強度を図-10に示す。図-10には、割裂引張強度に対する一軸引張強度の比(引張強度の比)も併せて示す。図-10に示すように、材齢の進行にともない一軸引張強度および割裂引張強度が大きくなった。材齢1日~7日では、割裂引張強度に比べ一軸引張強度のほうが大きく、材齢によってばらつきはあるが引張強度の比は1.13~1.61であった。一方、材齢28日では引張強度の比が0.99と同程度となった。

ここで、割裂引張強度と一軸引張強度の関係を図-11

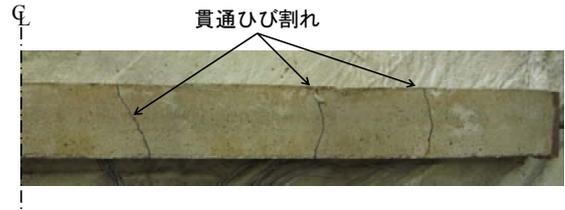


写真-1 ひび割れ発生状況

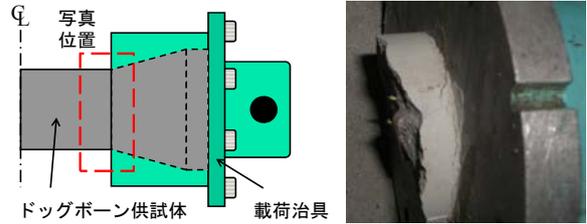


写真-2 ドッグボーン供試体の破壊状況

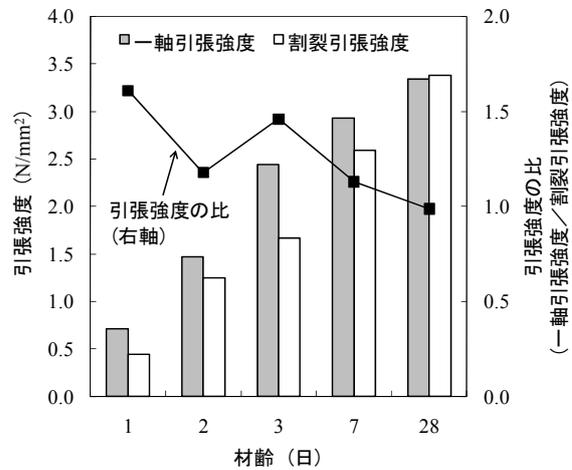


図-10 一軸引張強度と割裂引張強度の比較

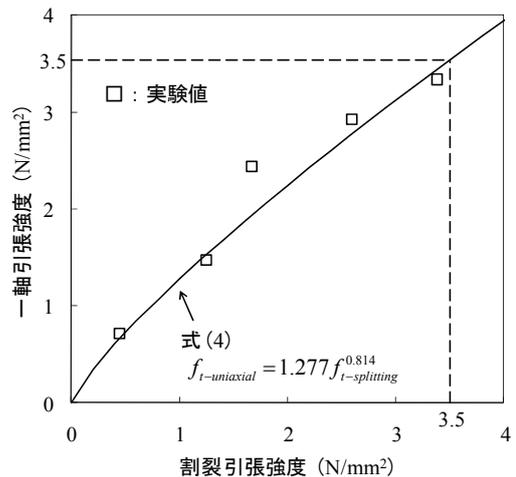


図-11 割裂引張強度と一軸引張強度の関係

に示す。なお、図-11に示す曲線は、式(4)に示す割裂引張強度と一軸引張強度の関係式⁵⁾を用いて求めたものである。

$$f_{t-uniaxial} = 1.277 f_{t-splitting}^{0.814} \quad (4)$$

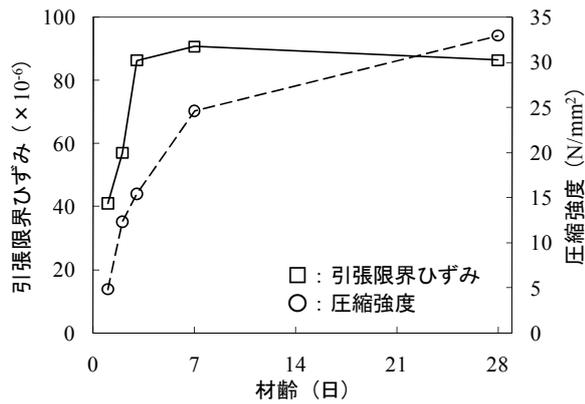


図-12 引張限界ひずみと圧縮強度の材齢変化

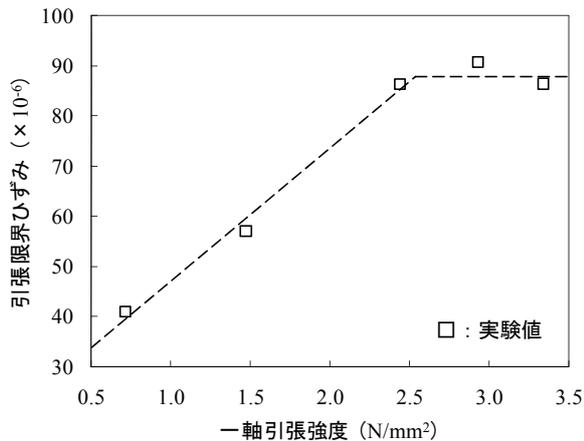


図-13 一軸圧縮強度と引張限界ひずみの関係

ここに f_{t-uni} : 一軸引張強度 (N/mm^2), $f_{t-splitting}$: 割裂引張強度 (N/mm^2) を表す。

図-11 に示すように、本研究の実験値は、ほぼ式(4)の曲線上にあり、実験値と式(4)による計算値が概ね一致した。また、図-10 および図-11 に示すように、本研究の実験値は材齢 28 日において割裂引張強度および一軸引張強度がそれぞれ $3.38, 3.34\text{N/mm}^2$ と同程度であった。このような結果は、約 3.5N/mm^2 において一軸引張強度と割裂引張強度が一致する式(4)と同様である。

3.5 引張限界ひずみ

圧縮強度および引張限界ひずみの材齢変化を図-12 に示す。なお、図-12 に示す引張限界ひずみは、ひび割れ発生直前に計測された完全付着領域における鉄筋ひずみの平均値である。図-12 に示すように、材齢 1 日の引張限界ひずみは 41×10^{-6} であったが、材齢 3 日では 86×10^{-6} となり、材齢の進行にともない伸び能力が向上した。一方、材齢 3, 7, 28 日の引張限界ひずみは同程度であり、同等の伸び能力となった。このような結果は、材齢 3 日以降においても、材齢の進行に応じて増加した圧縮強度の成長曲線とは異なる傾向である。

ここで、3.4 で示した一軸引張強度と引張限界ひずみの関係を図-13 に示す。図-13 に示すように、一軸引

張強度 2.5N/mm^2 程度までは、水和の進行とともに増加する一軸引張強度と同様に引張限界ひずみが増加した。また、一軸引張強度が約 2.5N/mm^2 を超えると、引張限界ひずみは約 90×10^{-6} で同程度となった。

以上のことから、材齢 3 日程度までは材齢(水和)の進行にともない発現するコンクリートの強度特性と同様に伸び能力も向上するが、材齢 3 日以降におけるコンクリートの伸び能力は同程度であると考えられる。なお、本研究で示した引張限界ひずみは、荷重制御にて行った一軸引張実験において、ひび割れ発生直前に計測されたひずみである。したがって、ひずみ制御による実験や拘束実験などから得られる引張限界ひずみとは若干異なるものであることを付記しておく。

4. まとめ

本研究は、鉄筋の付着を介した一軸引張実験を通じて、若材齢コンクリートの変形および強度の特性を求めたものである。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 鉄筋の付着を介した一軸引張実験とすることで過度な応力集中が生じることなく、コンクリートの断面に様な引張応力を作用させることができた。
- (2) 材齢 1, 2 日の引張ヤング係数は圧縮ヤング係数の 1.1 倍程度であったが、材齢 3 日以降において同程度となった。
- (3) 材齢 1 日～7 日の一軸引張強度は割裂引張強度に比べ大きくなる傾向を示したが、両者の関係は既往の評価式で表わすことができた。
- (4) 水和進行にともなう一軸引張強度の増加と同様に引張限界ひずみも増加し、一軸引張強度が約 2.5N/mm^2 を超えると引張限界ひずみはほぼ一定に収束した。

参考文献

- 1) 萩原伸治, 中村成春, 榊田佳寛, 河野政典: 高強度コンクリートの若材齢における力学特性と圧縮および引張クリープ挙動に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.39-50, 2000.1
- 2) 吉武 勇, 石川慶典, 河野博幸, 三村陽一: 若材齢コンクリートの引張ヤング係数について, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.667-688, 2007.12
- 3) 三村陽一, 吉武 勇, 森本公典, 浜田純夫: 若材齢コンクリートと異型鉄筋の局部付着特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.3, pp.410-423, 2007.7
- 4) (社)土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2007
- 5) 吉本 彰: コンクリートの変形と破壊, 学献社, 1990