

論文 若材齢におけるフライアッシュコンクリートの引張ヤング係数に関する実験的検討

沖本 翔平*1・張 文博*2・三村 陽一*3・吉武 勇*4

要旨：フライアッシュコンクリートに生じる初期応力の予測に活用するため、本研究では、埋設鉄筋を介して引張力を与える一軸引張実験を行い、若材齢から長期材齢に至るまでの引張ヤング係数を求めた。実験を行ったいずれの材齢においても、引張ヤング係数は圧縮ヤング係数より 20%以上大きかったことから、圧縮ヤング係数で引張ヤング係数を代用して引張応力を推定する方法は、必ずしも適切ではないことを指摘した。また、示力書に記載されている有効ヤング係数推定式より実験値は 11kN/mm^2 程度大きくなったことから、引張応力を過小評価する可能性を示唆した。

キーワード：若材齢、フライアッシュ、引張ヤング係数、圧縮ヤング係数

1. はじめに

有害なひび割れを抑制するためには、施工の事前にひび割れ発生の可能性を温度応力解析等で予測することが有用である。結合材としてフライアッシュ（以下、FA）をセメントの一部に代替置換すると、水和発熱量を低減できるため、若材齢期における温度の上昇・降下にもなうコンクリートの体積変化に起因した（初期）ひび割れを抑制できることが知られている。このような FA を混和したコンクリート（以下、FA コンクリート）においても、FA によるひび割れ抑制効果を正確に評価するためには、その事前評価が必要である。そのためには、解析等の入力値となる、若材齢期における FA コンクリートの力学特性が不可欠である。

ここで、セメント中の水酸化カルシウムとポゾラン反応することで、FA はコンクリートの長期強度に寄与する。一方で、若材齢期においてはポゾラン反応が十分に活性化しないため、FA コンクリートの力学特性は、FA を混和しないコンクリートに比べ低い傾向にある。

コンクリートのひび割れは、引張応力の作用により生じるものである。そのため、引張応力を正確に推定するためには、引張ヤング係数を求める必要がある。しかしながら、コンクリートの引張ヤング係数は、材料試験によって比較的容易に得られるコンクリートの圧縮ヤング係数で代用されているのが現状である。セメント水和化合物や骨材などから形成される複合材料のコンクリートにおいて、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は必ずしも同等でなく、材齢 7 日未満や圧縮強度が 15N/mm^2 未満では、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ることが報告されている^{1) 2)}。先述したよう

に、本研究で主対象とする FA コンクリートは、FA を添加していない一般的なコンクリートに比べ、若材齢期における強度などの力学特性が低くなる傾向にある。そのため、若材齢 FA コンクリートの引張ヤング係数は、一般的なコンクリートよりも、その計測が困難であり、初期応力予測に資するための工学的意義は大きいと考えられる。

そこで本研究では、既報^{2) 3)}で示した鉄筋の付着を介した一軸引張実験を種々の材齢で行い、FA コンクリートの引張ヤング係数を調べた。なお、本研究で実施した一軸引張実験には、標準水中養生した供試体を使用した。ここで得られた結果と、既報⁴⁾の暑中環境下で養生した供試体による一軸引張実験の結果についても比較検討する。

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。既報^{2) 3)}に準じて、コンクリートの長さを 1560mm とし、断面を 100×100mm の矩形状とした。図-1に示すように、コンクリート断面の中央には横ふし型異形鉄筋 D13(SD345、以下、鉄筋と略記)を埋設し、供試体の中央から片側 650mm ずつ（計 1300mm）の定着長を設けた。埋設した鉄筋は、コンクリートから 100mm ずつ張り出しており、張り出し部の鉄筋には載荷装置への取り付けのためネジ切り加工を行った。また、供試体両端におけるコンクリートのコーン状の抜け出しを防止するため、両端面から 130mm までの範囲は、グリスを塗布したテープで鉄筋に被覆し非定着部とした。定着部にお

*1 呉工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻（学生会員）

*2 山口大学大学院 理工学研究科 修（工）（正会員）

*3 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博（工）（正会員）

*4 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博（工）（正会員）

ける鉄筋のひずみ(以下、鉄筋ひずみ)を計測するため、
 検長 3mm のひずみゲージを鉄筋の縦リブ両面に貼り付
 けた。また、コンクリートのひずみを測定するため供試
 体の表面中央にもひずみゲージ(検長 60mm)を貼り付
 けた。なお、後述するように両側面のゲージで計測したひ
 ずみに差がほとんど生じなかったことから、荷重の偏心
 による曲げの作用は無視できるものと考えられる。

本研究における使用材料およびコンクリートの配合
 を、それぞれ表－1、表－2に示す。土木 RC 構造物で
 一般的に使用される配合のコンクリート(以下、FA0-N)
 および FA0-N のセメント量の 20%を FA で内割置換した
 コンクリート(以下、FA20-N)を作製した。なお、比較の
 ため引用する既報⁴⁾の暑中環境下における FA コンクリ
 ート(以下、FA20-S)と、本研究の FA20-N の配合は混和
 剤量を除いて同じである。

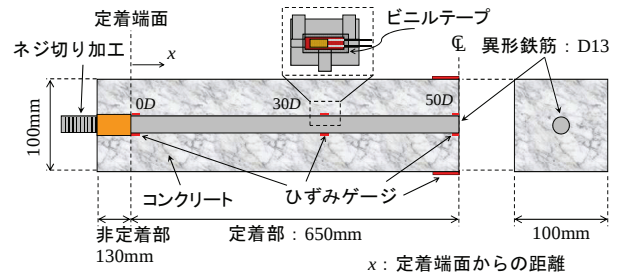
本研究では、普通ポルトランドセメントおよび JIS II
 種相当品の FA を使用した。細骨材 S1 は福岡県北九州市
 小倉産石灰石砕砂、細骨材 S2 は福岡県北九州市門司産
 硬質砂岩砕砂、細骨材 S3 は山口県美祢市伊佐産石灰石
 砕砂であり、粗骨材 G1 は福岡県北九州市門司産砕石
 (2010)、粗骨材 G2 は福岡県北九州市門司産砕石(1505)
 である。なお本研究では、実機プラントで作製した生コ
 ンクリートを購入・使用したため、本研究で作製した供
 試体のコンクリートはすべて同バッチである。コンクリ
 ート打設～脱型の期間は、屋内にて水分を充分に含ませ
 た養生布で供試体を覆い、できるだけ供試体の湿潤状態
 を維持した。材齢 1 日で全ての脱型を行い、その後は水
 中養生とした。

本研究では、若材齢を中心に 1, 2, 3, 5, 7, 28, 91
 日において一軸引張実験を行った。各材齢の一軸引張実
 験には 2 体の供試体を用いた。また、一軸引張実験に用
 いた供試体と同バッチのコンクリートでシリンダー(直
 径 100mm×高さ 200mm)を作製し、圧縮強度試験を行っ
 た。これらの試験で得られた圧縮強度および圧縮ヤング
 係数を一軸引張実験の結果との比較・検討に用いた。こ
 こで、圧縮ヤング係数とは、コンクリート強度の 1/3 の
 点とひずみが 50×10^{-6} となる点を結んだ割線弾性係数で
 ある。なお、圧縮強度、圧縮ヤング係数は各 3 体の実験
 結果の平均値とした。

2.2 実験方法

本研究で用いた載荷装置を図－2に示す。供試体から
 張り出した鉄筋の両端を、同図に示す取付治具を用いて
 供試体を載荷装置に設置した。なお、取付治具には球座
 を設けており、荷重の偏心にとまなう曲げ応力の発生を
 できるだけ小さくした。

本研究では、データロガーにリアルタイムで表示され
 る荷重をモニタリングしながら、載荷速度 0.1kN/sec 程



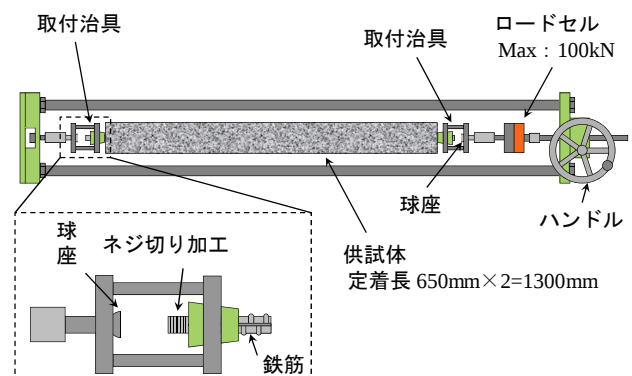
図－1 供試体

表－1 使用材料

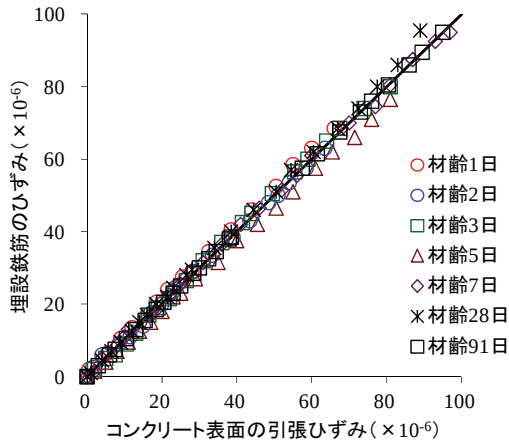
水 W	工業水・上澄水	
セメント C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)	
混和材 FA	フライアッシュ(密度:2.16g/cm ³)	
細骨材 S1	石灰石砕砂(表乾密度:2.69g/cm ³)	
細骨材 S2	硬質砂岩砕砂(表乾密度:2.58g/cm ³)	
細骨材 S3	石灰石砕砂(表乾密度:2.60g/cm ³)	
粗骨材 G1	砕石 2010(表乾密度:2.73g/cm ³)	
粗骨材 G2	砕石 1505(表乾密度:2.73g/cm ³)	
混和剤 Ad	AE 減水剤	
鉄筋	呼び名	D13
	規格	SD345
	ヤング係数	206kN/mm ²

表－2 コンクリートの配合

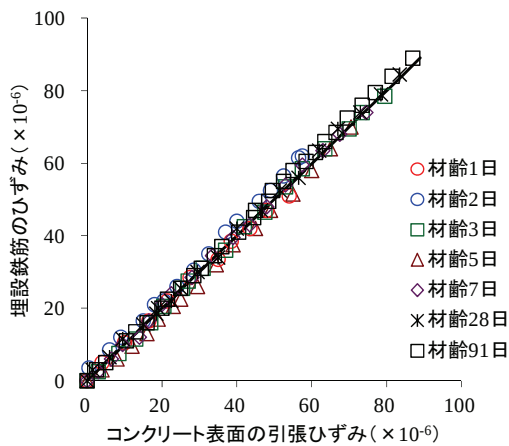
I.D.		FA0-N	FA20-N	
水粉体比 W/P		59%	59%	
単位量 (kg/m³)	水 W		160	160
	セメント C		272	218
	フライアッシュ FA		---	54
	細骨材	S1	274	271
		S2	274	271
		S3	365	362
	粗骨材	G1	590	586
		G2	394	390
混和剤 Ad		2.72	2.72	



図－2 載荷装置



図－3 埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面の引張ひずみの関係 (FA0-N)



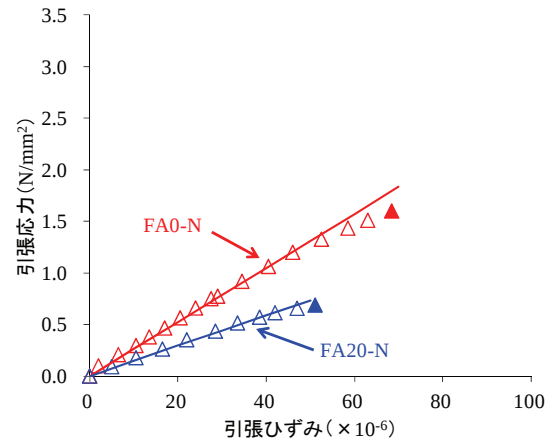
図－4 埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面の引張ひずみの関係 (FA20-N)

度となるよう、载荷装置のハンドルを手動で操作した。荷重 1kN 増を目安にひずみと荷重を計測した。コンクリートにひび割れが生じた時点で载荷を中断し、供試体のひび割れの発生状況を確認した。なお本研究では、コンクリートにひび割れが数本生じた後に除荷しており、鉄筋の降伏荷重まで载荷は行っていない。

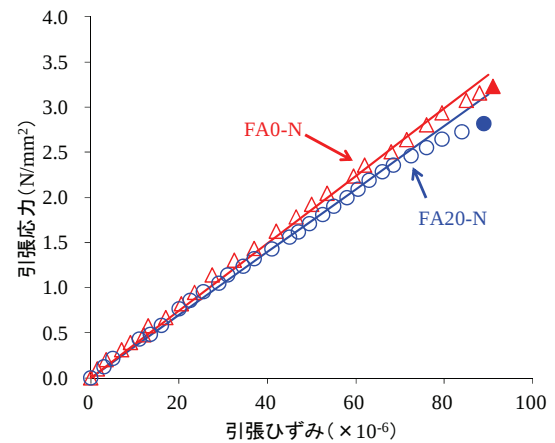
3. 結果と考察

3.1 埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面の引張ひずみの関係

FA0-N および FA20-N における埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面の引張ひずみを、それぞれ図－3および図－4に示す。縦軸の埋設鉄筋のひずみは、コンクリートに埋設した鉄筋の中央(図－1における50Dの位置)に貼り付けたひずみゲージを用いて計測したものである。横軸は、コンクリート表面の中央に貼り付けたひずみゲージで計測したコンクリートのひずみを表している。こ



(a) 材齢 1 日



(b) 材齢 91 日

図－5 引張応力-引張ひずみ関係

こで、本研究と同様の鉄筋を介した一軸引張実験を行った既報^{2), 3)}において、埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面のひずみが概ね一致したことが報告されている。また、両者が一致している範囲内においては、断面内のひずみ分布が様であり、引張応力もコンクリートの断面に対して様に作用しているとともに、鉄筋とコンクリートが充分に一体化していることを報告している。

図－3に示すように、FA0-Nにおける埋設鉄筋のひずみとコンクリートの引張ひずみは、いずれの材齢においても同程度であった。また、図－4に示すFAを混和したFA20-Nにおいても、既報やFA0-Nの結果と同様に埋設鉄筋のひずみとコンクリートの引張ひずみが、いずれの材齢においてもほぼ一致した。このことから、本研究においても供試体中央ではコンクリートと鉄筋が充分に一体化しており、埋設鉄筋のひずみ計測値を用いてコンクリート断面中心のひずみ、および断面に作用する引張応力を推定できると考えられる。したがって本研究では、以降に記述する引張応力の算定に供試体中央におけ

る鉄筋ひずみの計測値の平均を用いた。

3.2 引張応力－引張ひずみ関係

一軸引張実験により得られた材齢 1 日と 91 日における FA0-N および FA20-N の引張応力と引張ひずみの関係を図－5 に示す。縦軸の引張応力は、式(1)により求めたものであり、横軸の引張ひずみは、3.1 で示した埋設鉄筋の中央ひずみとコンクリート表面中央の引張ひずみの平均値である。

$$\sigma_c = \frac{P_t - A_s E_s \varepsilon_{st}}{A_c} \quad (1)$$

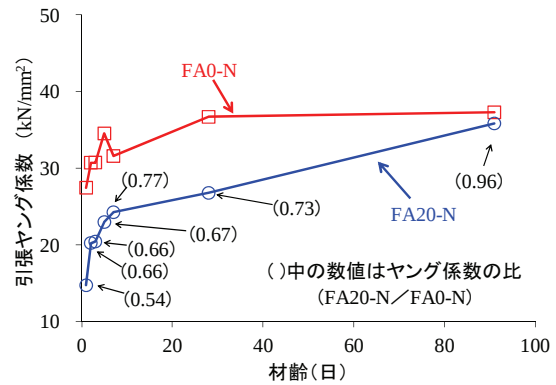
ここに、 σ_c ：引張応力、 P_t ：荷重、 A_s ：鉄筋の断面積、 E_s ：鉄筋のヤング係数、 ε_{st} ：供試体中央における鉄筋ひずみの平均値、 A_c ：コンクリートの断面積を表す。

図－5 (a) に示すように、材齢 1 日における FA0-N および FA20-N の引張応力と引張ひずみは、概ね線形関係を示した。図－5 (b) に示す材齢 91 日においても、材齢 1 日の場合と同様に、FA の有無にかかわらず引張応力と引張ひずみは、ほぼ線形関係を呈した。また、材齢 1 日や 91 日以外の材齢においても同様の結果であった。したがって、本研究では、それぞれの引張応力と引張ひずみの関係を直線回帰し、その傾きを引張ヤング係数とした。ただし高応力域では、若干ながらコンクリートの引張応力に対して、引張ひずみが増加する傾向がみられたため、本研究では、図－5 に示したマーカーの着色箇所該当する計測値を除外して引張ヤング係数を求めた。

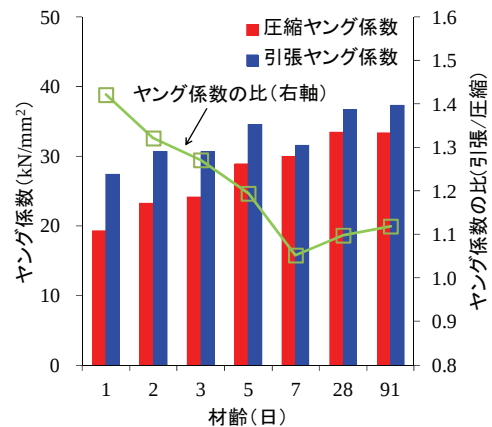
3.3 引張ヤング係数

図－6 に各材齢における FA0-N および FA20-N の引張ヤング係数を示す。図－6 の()中に示す数値は、ヤング係数の比 (FA20-N/FA0-N) である。図－6 に示すように、両者の引張ヤング係数は、材齢の進行にともない増加する傾向にあった。ここで、材齢 1 日～28 日における FA20-N の引張ヤング係数は、FA0-N のそれに対して 0.54～0.77 倍と低くなった。しかしながら、材齢 91 日では、FA0-N の引張ヤング係数が 37.3kN/mm² と材齢 28 日からほとんど増加しないのに対し、FA20-N の引張ヤング係数は 35.8kN/mm² と材齢 28 日以降も増加したため、両者の比は 0.96 となり、ほぼ同等となった。このような引張ヤング係数の発現性状の差異は、FA のポズラン反応による構造組織の硬化に起因するものと推察される。

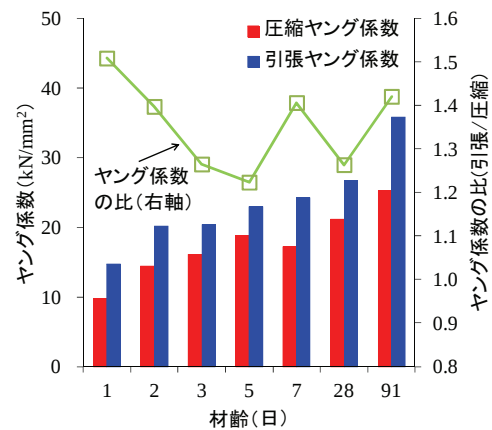
ここで、図－6 に示した引張ヤング係数および強度試験により得られた圧縮ヤング係数を図－7 に示す。図－7 (a) は FA0-N、図－7 (b) は FA20-N の結果を表している。また、これらのグラフには、それぞれの引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の比 (ヤング係数の比) も併記している。図－7 (a) に示すように、材齢 1 日～5 日における FA0-N のヤング係数の比は、1.19～1.42 であり、圧縮ヤ



図－6 各材齢における引張ヤング係数



(a) FA0-N



(b) FA20-N

図－7 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数

ング係数に比べて引張ヤング係数が大きくなった。材齢 7 日ではヤング係数の比が 1.05 となり、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数が同等となった。材齢 28 日、91 日においても 1.1 程度とヤング係数の比は材齢 7 日より大きくなったが、材齢 5 日以前のそれよりは低い結果となった。このような引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の大小関係は既報¹⁾の結果と同様の傾向である。

一方、図－7 (b) に示すように、FA20-N における材齢

7日までのヤング係数の比は、最小でも1.22(材齢5日)であり、材齢91日においてもヤング係数の比は1.42と、いずれの材齢においても圧縮ヤング係数より、引張ヤング係数のほうが大きくなった。

ここで、一般には引張ヤング係数・圧縮ヤング係数は区別して扱われることは少なく、多くは圧縮試験による圧縮ヤング係数が用いられている。しかしながら、本研究や既報の結果では、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る傾向にある。特に、FA20-Nにおいては、引張ヤング係数と圧縮ヤング係数の比がFA0-Nに比べ大きく、長期材齢においてもヤング係数の比にあまり変化がみられなかった。このことから、引張ヤング係数を圧縮ヤング係数で代用することは、必ずしも適切でないと考えられる。特にそのような傾向はFAコンクリートの方が顕著である。

ここで、尾上ら⁴⁾は、夏期の実施工を模擬した打設・養生におけるコンクリート(FA20-S)の引張ヤング係数について報告している。このFA20-Sおよび本実験から得られたFA20-Nのヤング係数の比を図-8に示す。この結果に示すように、FA20-Sのヤング係数の比は1.17~1.61であった。一方、FA20-Nのヤング係数の比は1.23~1.56と同程度であり、暑中環境下で打設・養生を行ったFA20-Sの引張ヤング係数は、いずれの材齢においても圧縮ヤング係数より大きくなった。

3.4 ヤング係数と圧縮強度

コンクリート標準示方書(設計編)⁵⁾に示される、圧縮強度をパラメータとした有効ヤング係数の推定式を式(2)に示す。ただし、クリープ等を考慮する低減係数を除いて式(2)に示している。

$$E(t) = 4700 \sqrt{f'_c(t)} \quad (2)$$

ここで、 $E(t)$:材齢 t 日における有効ヤング係数(N/mm²)、 $f'_c(t)$:材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²)を示している。

圧縮強度と圧縮ヤング係数の関係を図-9に示す。また図-9には、式(2)から推定される圧縮強度と有効ヤング係数の関係も併せて示す。この結果に示すように、シリンダーの圧縮試験から得られた圧縮ヤング係数は、式(2)から推定される有効ヤング係数より6kN/mm²程度大きくなった。また、同程度の圧縮強度であれば、FA0-NとFA20-Nの圧縮ヤング係数は同等であった。

図-10に示す圧縮強度と引張ヤング係数の関係によると、FA0-NおよびFA20-Nの引張ヤング係数は、式(2)の推定式で算出される有効ヤング係数に11kN/mm²加えた曲線付近に分布した。このことは、FAコンクリートの引張ヤング係数を推定する際に、一般的なコンクリートにおける圧縮強度と引張ヤング係数の関係を準用することが可能であることを示している。また、FAコンクリ

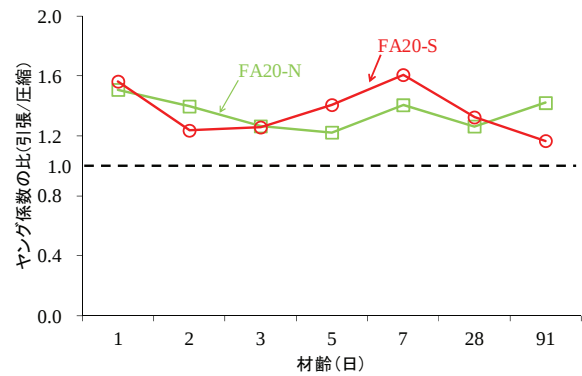


図-8 FA20-NとFA20-Sのヤング係数の比

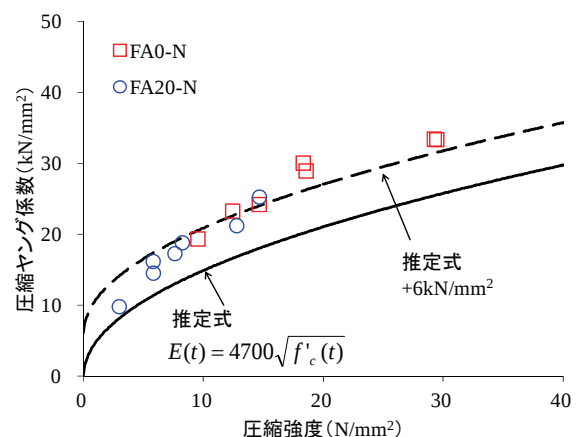


図-9 圧縮強度と圧縮ヤング係数の関係

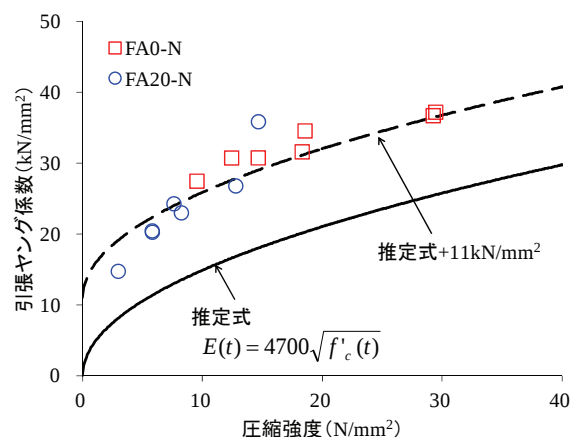


図-10 圧縮強度と引張ヤング係数の関係

ートの引張ヤング係数が圧縮ヤング係数より大きくなる傾向(図-7(b)参照)は、材齢91日においても、FAコンクリートの強度・力学特性が十分に発現していないためであると推察される。また、本研究で得られたFAコンクリートの引張ヤング係数は、いずれも式(2)で推定される有効ヤング係数よりも大きくなった。これは、初期ひび割れ予測に用いる引張ヤング係数を式(2)で推定

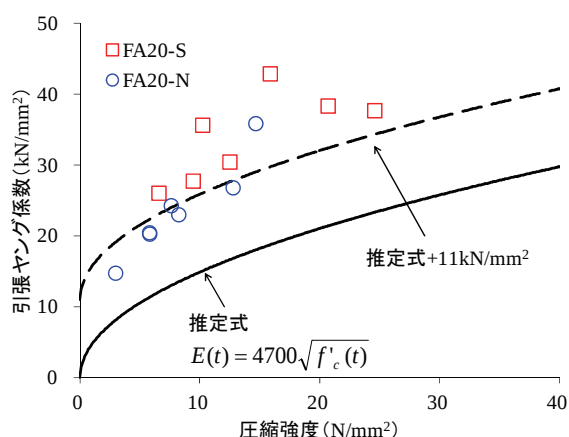


図-11 圧縮強度と引張ヤング係数の関係 (FA20-S)

すると過小評価すると考えられる。換言すれば、作用する引張応力を過小評価するため、ひび割れ予測においては危険側の評価を与える可能性がある。なお、式(2)で推定される有効ヤング係数は、クリープの影響を含むものであるため、これらの影響を含まないヤング係数より小さくなる。したがって、クリープが顕著な場合、式(2)で推定される有効ヤング係数が、必ずしも過小評価や危険側の評価とはならないことを付記しておく。

ここで、図-8に示した暑中環境下で打設・養生したFA20-Sの圧縮強度と引張ヤング係数の関係を図-11に示す。なお、図-11にはFA20-Nの圧縮強度と引張ヤング係数の関係も併記している。この結果に示すように、FA20-Sの引張ヤング係数の一部は、式(2)に11kN/mm²を加えた曲線よりもさらに大きくなっている。これは、暑中環境下における引張ヤング係数(引張応力)を著しく過小評価する可能性を示唆するものである。暑中環境下においては、若材齢期における温度上昇量が高くなっており、標準的な環境下の場合に比べ、初期ひび割れ発生の可能性が高くなることを表している。

4. まとめ

本研究では、若材齢期におけるFAコンクリートの力学特性のひとつである引張ヤング係数を実験的に求め、その特性について考察を行った。本研究の主要点や結論を以下にまとめて示す。

- (1) 供試体中央における埋設鉄筋のひずみとコンクリート表面のひずみが、いずれの材齢においてもほぼ一致した。このことから、引張応力が断面内で一様に作用しているとともに、FAコンクリートと埋設鉄筋が充分に一体化していると判断される。

- (2) FAコンクリートの引張応力-引張ひずみ関係は、いずれの材齢においても線形性を示したことから、引張応力-引張ひずみ関係を線形回帰することで、引張ヤング係数を求めることが可能である。
- (3) 材齢1~28日において、セメントの20%をFAに内割置換したコンクリート(FA20-N)の引張ヤング係数は、FAを混和していないコンクリート(FA0-N)の引張ヤング係数の0.54~0.77倍となった。材齢91日では、0.96倍となりFA20-Nの引張ヤング係数は、FA0-Nのそれとほぼ同等であった。
- (4) 本研究で作製したFAコンクリートの引張ヤング係数は、材齢91日においても引張ヤング係数が圧縮ヤング係数の1.42倍となるなど、実験を行ったいずれの材齢においても圧縮ヤング係数より引張ヤング係数が大きくなった。
- (5) FAの有無にかかわらず、本研究の一軸引張実験により得られた引張ヤング係数は、既往の有効ヤング係数推定式に比べ11kN/mm²程度大きくなった。このことから、既往の推定式では、引張ヤング係数(引張応力)を過小評価することとなり、初期ひび割れ予測において危険側の評価を与える可能性がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(株)エネルギー・エコ・マテリア 齊藤 直氏、高橋和之氏、および山口大学大学院の尾上枝里氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.667-668, 2007.12.
- 2) Y. Mimura, I. Yoshitake and W. Zhang.: Uniaxial Tension Test of Slender Reinforced Early Age Concrete Member, *Materials*, Vol.4, No.8, pp.1345-1359, 2011.
- 3) 三村陽一, 吉武 勇, 海野達夫, 堀口 至: 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变形および強度の特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.341-346, 2010.
- 4) 尾上枝里, 吉武 勇, 張 文博, 三村陽一, 齊藤直: 暑中・寒中で打設したフライアッシュコンクリートの引張ヤング係数, 第63回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, V-10, 2011.5.
- 5) (社)土木学会: 2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2008.