

# 論文 初期ひび割れ予測に用いるヤング係数に関する実験的検討

三村 陽一\*1・吉武 勇\*2・堀口 至\*3

**要旨:** 初期ひび割れを予測し、適切に制御・抑制するためには、ヤング係数などの力学特性の把握が必要である。本研究の引張実験から求めた引張ヤング係数は、一般的に用いられる圧縮ヤング係数(割線弾性係数)の1.1~1.3倍となったのに対し、引張実験と同様の方法で求めた圧縮ヤング係数は、引張ヤング係数と同等以上であった。また、一般的な圧縮実験で得られる応力-ひずみ関係を3次式で回帰した結果、その回帰曲線の初期接線弾性係数は、引張ヤング係数やこれと同様の方法で求めた圧縮ヤング係数の概ね±5%の範囲内にあり、特殊な供試体や載荷装置を用いなくとも引張ヤング係数を求めることが可能であることを示した。

**キーワード:** 引張ヤング係数, 割線弾性係数, 初期接線弾性係数, 若材齢, フライアッシュ

## 1. はじめに

コンクリート打設から間もない期間では、水和熱の発生や逸散にともなう温度の上昇・降下によって、体積変化が生じる。この体積変化が内的・外的に拘束されることで生じる初期ひび割れは、構造物の長期耐久性を損なうおそれがあり、適切に制御・抑制されなければならない。水和熱に起因した初期ひび割れを制御・抑制する手法としては、発熱量を低減する低発熱型セメントの使用や強制的に温度上昇を抑制するパイプクーリング工法の適用などが挙げられる。しかしながら、近年の我が国の経済状況を鑑みると、限られた予算の中でこれらの対策を適切に実施するためには、ひび割れ発生の危険性やひび割れ幅を正確に予測するとともに、種々の対策の効果を事前に評価しなければならない。

初期ひび割れ予測では、コンクリートの発熱特性や力学特性などの様々な入力値が必要となる。これらの物性のなかで、コンクリートのヤング係数は、計測や解析から求まるひずみを応力に変換するために不可欠なものであり、直接的にひび割れ予測の結果に影響する特性値である。特に、引張応力の作用によって生じるひび割れを予測する場合、一般的に用いられる圧縮ヤング係数ではなく、引張ヤング係数を適切に評価する必要があると考えられる。

そこで著者らは、これまで初期ひび割れ予測に用いる引張ヤング係数について検討してきた<sup>1)~4)</sup>。これらの検討では、実験的に求めた引張ヤング係数と圧縮ヤング係数を比較し、若材齢期においては圧縮ヤング係数に比べ引張ヤング係数の方が大きくなる傾向にあることや、多様な配合条件に対応するため、複合則理論を適用した予測法などについて示してきた。

本研究では、これまで行ってきた検討を踏まえ、引張

ヤング係数と圧縮ヤング係数に差が生じる要因について検討することを目的とする。特に、両ヤング係数を求めるために用いる応力・ひずみレベルの違いや算定方法の違いに着目する。また、引張実験では特殊な載荷装置や供試体が必要であるため、一般的に適用することが困難である。そこで、汎用的に使用される円柱供試体や載荷装置を用いた圧縮実験によって、初期ひび割れ予測に用いるヤング係数を評価する方法についても検討する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本研究では、引張ヤング係数を求めるための引張実験および圧縮ヤング係数を求めるための圧縮実験を行った。本研究の引張実験で用いたドッグボーン供試体を図-1に示す。圧縮実験で用いた供試体は、一般的な圧縮強度試験に用いる直径100mm×高さ200mmの円柱形である。なお、断面寸法がドッグボーン供試体と円柱供試体とで異なるが、その影響については本研究では無視できるものとしてヤング係数を求めた。各供試体に生じるひずみを計測するため、検長60mmのひずみゲージを供試体の中央両側面に貼り付けた。なお、ひずみゲージ貼り付け

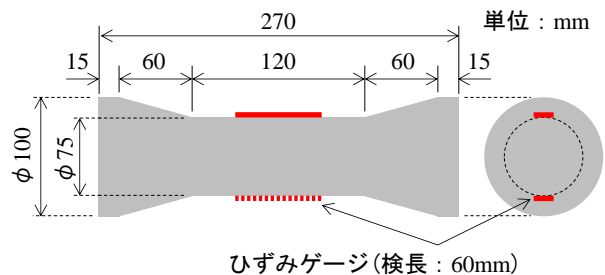


図-1 ドッグボーン供試体

\*1 呉工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 山口大学 大学院理工学研究科准教授 (工学) (正会員)

\*3 呉工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

種類	材料	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
水 W	上水道水	1.00	
セメント C	普通ポルトランドセメント	3.16	
混和材 FA	フライアッシュ JIS II 種相当品	2.16	
細骨材 S	砕砂	2.62	
粗骨材	G1	砕石 2015	2.67
	G2	砕石 1505	2.67
混和剤 Ad	AE 減水剤	1.07	

表-2 コンクリートの配合と記号

		普通コンクリート	FA コンクリート
記号		N-X**	FA-X**
水結合材比 W/B*		59%	59%
FA 置換率		0%	20%
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	W	160	160
	C	272	218
	FA	0	54
	S	914	904
	G1	575	569
	G2	385	381
	Ad	2.72	2.18
スランプ (cm)		4.5	6.5(2, 3, 7日) 4.5(上記以外)
空気量 (%)		1.8	1.4(2, 3, 7日) 1.8(上記以外)

\*B=C+FA, \*\*X は実験を行った材齢を表す。

のため、表面部を自然乾燥させた。

本研究で作製したコンクリートの使用材料と配合を、表-1 および表-2 にそれぞれ示す。なお、本研究で使用した記号も表-2 にあわせて示す。本研究では、土木用として一般的に用いられる配合としており、混和材を用いていない配合のコンクリート(以下、普通コンクリート)を作製した。また、セメントの内割 20%を、初期ひび割れ対策として用いられる FA で置換したコンクリート(以下、FA コンクリート)も作製した。

## 2.2 実験方法

本研究の引張実験で用いた荷重装置を図-2 に示す。図-2 に示すように、取付治具(打設時の型枠も兼ねる)を用いてドッグボーン供試体を荷重装置に設置した。鋼製アームの先端付近に荷重した荷重の約 65 倍の荷重が供試体に作用する構造となっている。本研究では、鋼製アームへは人力で荷重し、供試体が破壊するまで荷重した。

本研究の引張実験では、既往の研究<sup>1)</sup>と同様に、データロガーに表示されるひずみが  $10 \times 10^{-6}$  増加するごとにひずみと荷重を記録し、除荷を行うとともに、除荷時のひずみも記録した。このような荷重・除荷のサイクルを各ひずみレベルで 2 回ずつ行った。このような荷重方法

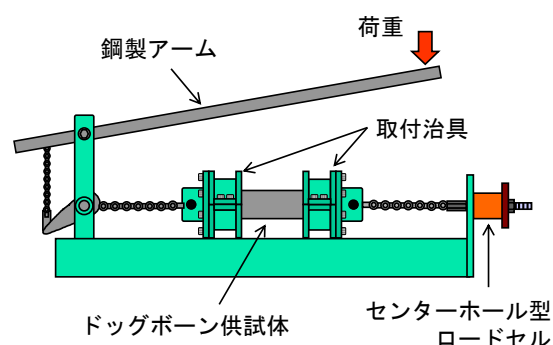


図-2 荷重装置(引張実験用)

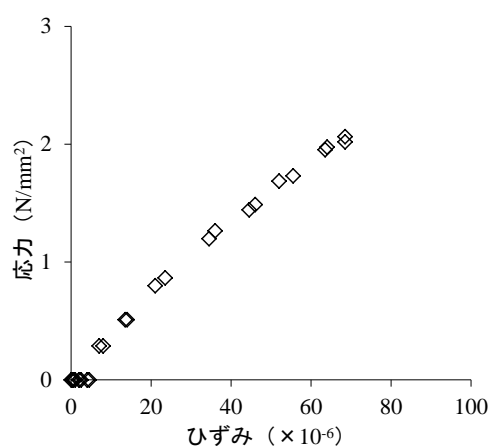


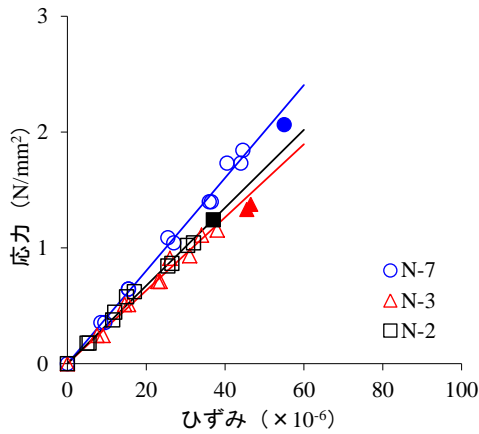
図-3 応力-ひずみ関係(FA-7, 引張実験)  
(除荷時のひずみを含む)

としたのは、ヤング係数算定時において、非弾性ひずみの影響を極力除去するためである。

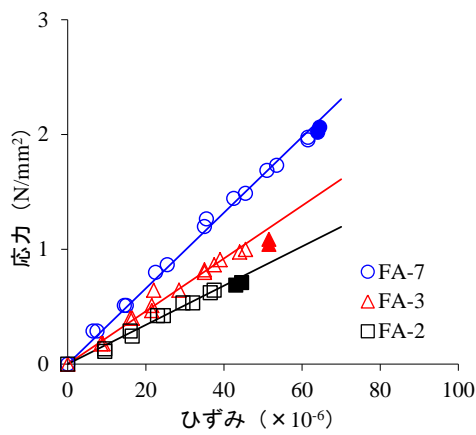
また、JIS A 1149 に規定される「コンクリートの静弾性係数試験」に準じて圧縮実験を行った。荷重には油圧式万能試験機を用いて荷重 10kN 増を目安に荷重とひずみを記録し、供試体が破壊するまで荷重した。この方法で得られた結果から、ひずみ  $50 \times 10^{-6}$  における応力と最大荷重の 1/3 に相当する応力に対するひずみを求め、圧縮ヤング係数(以下、割線係数)を算定した。

このような一般的な圧縮実験に加え、前述の引張実験と同様の荷重・除荷を繰り返す方法による圧縮実験も行った。なお、この圧縮実験では、ひずみ  $150 \times 10^{-6}$  における荷重・除荷時の記録をした後に終了した。その後、同一の供試体を用いて、上述の JIS に準じた圧縮実験を行った。

本研究では、引張実験を材齢 2, 3, 7 日で行い、圧縮実験を材齢 1, 2, 3, 5, 7, 14, 28, 91 日で行った。コンクリート打設後ただちに養生室に搬入し、材齢 1 日で脱型を行った。なお、コンクリートの打設方向は、ドッグボーン供試体、円柱供試体ともに荷重方向と同じである。脱型から実験を行う材齢までは養生室内にて水中養生を行った。引張実験では各材齢につき 1 体、圧縮実験

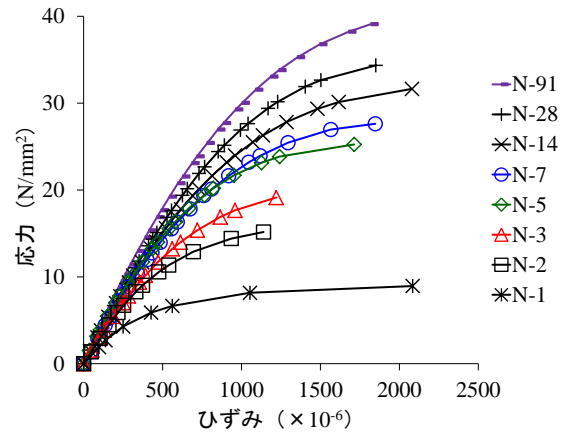


(a) 普通コンクリート

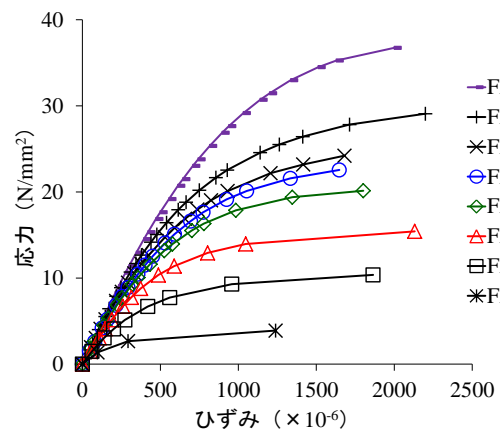


(b) FAコンクリート

図-4 応力-ひずみ関係(引張実験)



(a) 普通コンクリート



(b) FAコンクリート

図-5 応力-ひずみ関係(圧縮実験)

では各材齢に3体の供試体を用いた。

### 3. 実験結果と考察

本研究の引張実験で得られた応力-ひずみ関係の一例を図-3に示す。ここで示す応力とはロードセルで計測した荷重を断面積(直径=75mm)で除したものであり、ひずみは両側面で計測したひずみの平均値である。図-3に示すように、除荷時のひずみが最大で $5 \times 10^{-6}$ 程度生じた。また、ひずみの増加にともない、応力-ひずみ関係の勾配が徐々に緩やかになった。載荷時のひずみから除荷時のひずみを取り除いた応力-ひずみ関係を図-4に示す。図-4に示すように、普通コンクリートおよびFAコンクリートともに、応力-ひずみ関係は概ね線形関係であることがわかる。そこで既報<sup>1)</sup>と同様に、応力-ひずみ関係を線形回帰し、回帰直線の勾配を引張ヤング係数とした。なお、応力-ひずみ関係のうち供試体破壊の直前に計測されたデータ(塗りつぶされたデータ)については、他のデータに比べ回帰直線よりひずみが大きくなる傾向にあった。したがって、供試体破壊の直前のデータを除外して回帰直線を求めた。

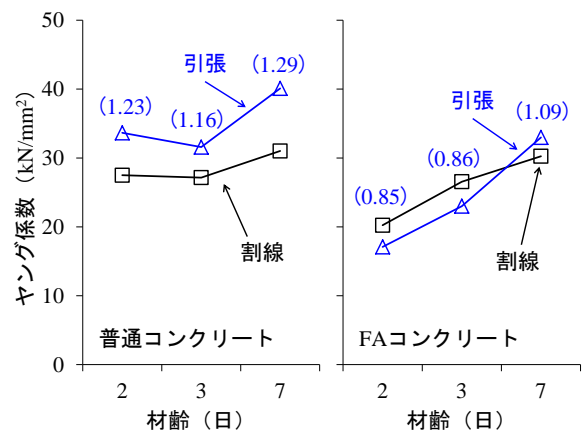
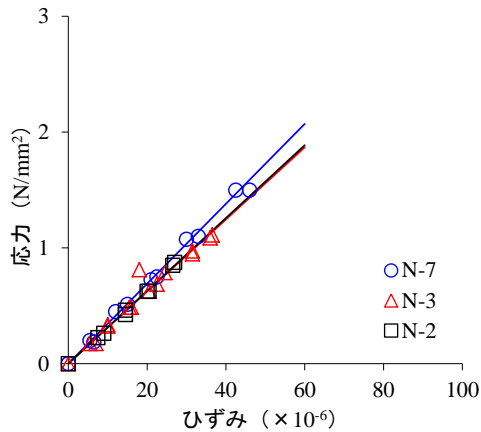
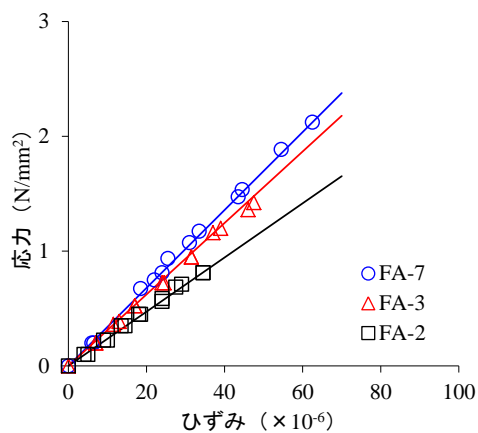


図-6 引張ヤング係数と割線係数

JISに準じた圧縮実験で得られた応力-ひずみ関係を図-5に示す。なお、各材齢につき3体の供試体を使用して圧縮実験を行ったが、図-5には代表的な結果を示している。図-5に示すように、材齢の進行にともない応力-ひずみ関係の勾配(ヤング係数)が大きくなった。また、ひずみや応力のレベルが大きくなるにつれて、勾配が小さくなった。



(a) 普通コンクリート

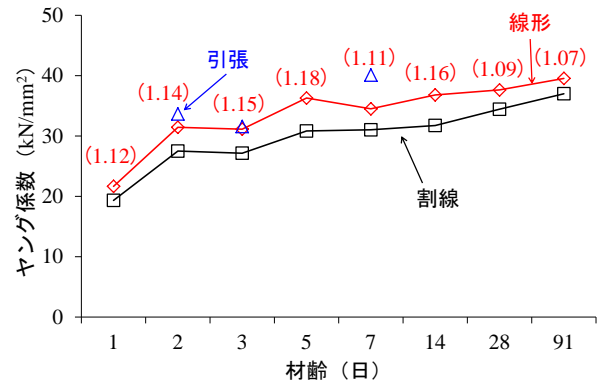


(b) FA コンクリート

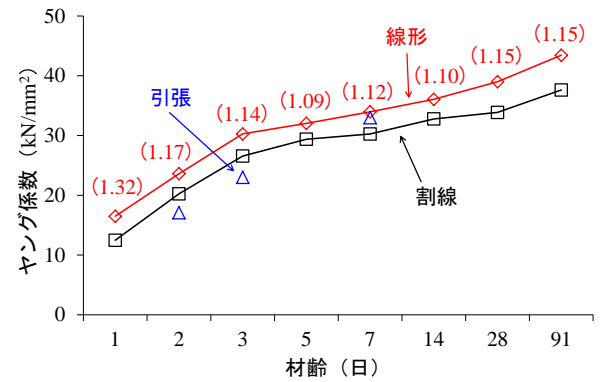
図-7 応力-ひずみ関係(圧縮実験)

図-4 および図-5 に示す応力-ひずみ関係から算定した引張ヤング係数および圧縮ヤング係数(割線係数)を図-6に示す。なお、図-6の( )中に示す数値は、割線係数に対する引張ヤング係数の比を表している。図-6に示すように、普通コンクリートでは割線係数に比べ引張ヤング係数の方が大きくなる傾向にあり、その比は1.16~1.29であった。一般的にコンクリートのヤング係数は割線係数を用いられるが、図-6に示す結果は、引張応力を求める際に割線係数を用いた場合、実際に作用する引張応力を過小評価するおそれがあることを示している。また、FA コンクリートでは、材齢7日において普通コンクリートと同様に割線係数より引張ヤング係数の方が大きくなった。

引張実験と同様の载荷方法で行った圧縮実験で得られた応力-ひずみ関係を図-7に示す。なお、図-7に示すひずみは、除荷時のひずみを除去したものである。図-7に示すように、引張実験の場合と同様、いずれの応力-ひずみ関係も概ね比例関係にあった。したがって、これらを線形回帰し、その勾配を圧縮ヤング係数(以下、線形係数)として求めた。



(a) 普通コンクリート



(b) FA コンクリート  
図-8 各材齢のヤング係数

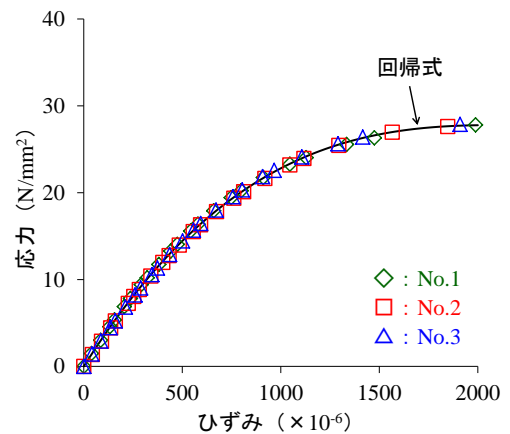


図-9 応力-ひずみ関係と回帰式(圧縮実験, N-7)

各材齢におけるヤング係数を図-8に示す。なお、図-8の( )中に示す数値は、各材齢の割線係数に対する線形係数の比を表している。線形係数はいずれの材齢においても割線係数より大きくなり、割線係数に対する線形係数の比は普通コンクリートで1.07~1.18、FA コンクリートで1.09~1.32であった。普通コンクリートでは、割線係数に比べ引張ヤング係数が16~29%程度大きかったが、ヤング係数算定時の応力・ひずみレベルを同等にした線形係数と引張ヤング係数の差異は、割線係数の場合に比べて小さくなった。一方、FA コンクリートでは、材齢2,3日の割線係数が引張ヤング係数より大きかった

表-4 回帰結果一覧

記号	$a (\times 10^9)$		$b (\times 10^5)$		$c$	
		平均		平均		平均
N-1	11.9	9.09	-2.73	-2.32	0.0238	0.0224
	4.10		-1.61		0.0201	
	11.2		-2.63		0.0232	
N-2	---	10.5	---	-2.90	---	0.0330
	6.09		-2.32		0.0318	
N-3	5.05	3.80	-2.10	-1.85	0.0329	0.0321
	3.49		-1.75		0.0315	
	2.86		-1.70		0.0321	
N-5	4.47	3.85	-2.02	-1.98	0.0356	0.0370
	3.47		-1.98		0.0384	
	3.62		-1.95		0.0369	
N-7	2.75	2.15	-1.71	-1.54	0.0372	0.0360
	1.89		-1.45		0.0353	
	1.80		-1.45		0.0356	
N-14	1.71	1.78	-1.39	-1.42	0.0367	0.0369
	1.84		-1.44		0.0371	
	---		---		---	
N-28	-0.15	0.54	-1.09	-1.19	0.0398	0.0386
	1.38		-1.37		0.0383	
	0.38		-1.11		0.0376	
N-91	1.30	0.85	-1.40	-1.32	0.0426	0.0424
	0.45		-1.23		0.0417	
	0.80		-1.34		0.0430	
FA-1	14.9	15.6	-2.60	-2.84	0.0152	0.0165
	16.7		-3.18		0.0170	
	15.2		-2.72		0.0172	
FA-2	8.12	8.95	-2.32	-2.47	0.0237	0.0248
	5.42		-1.97		0.0235	
	13.3		-3.11		0.0271	
FA-3	9.15	7.79	-2.77	-2.61	0.0311	0.0313
	5.48		-2.29		0.0312	
	8.75		-2.76		0.0317	
FA-5	4.97	6.20	-2.25	-2.43	0.0355	0.0347
	6.24		-2.49		0.0354	
	7.39		-2.54		0.0333	
FA-7	3.98	3.74	-2.04	-1.97	0.0365	0.0358
	4.12		-2.04		0.0360	
	3.11		-1.82		0.0347	
FA-14	2.75	4.23	-1.79	-2.13	0.0374	0.0381
	5.04		-2.28		0.0385	
	4.91		-2.33		0.0384	
FA-28	3.94	3.57	-2.12	-2.00	0.0402	0.0401
	2.83		-1.77		0.0396	
	3.93		-2.11		0.0406	
FA-91	2.52	1.71	-1.76	-1.62	0.0429	0.0433
	1.71		-1.58		0.0427	
	0.89		-1.53		0.0442	

ため、線形係数では引張ヤング係数との差がさらに大きくなったが、材齢7日の線形係数は引張ヤング係数と同等であった。

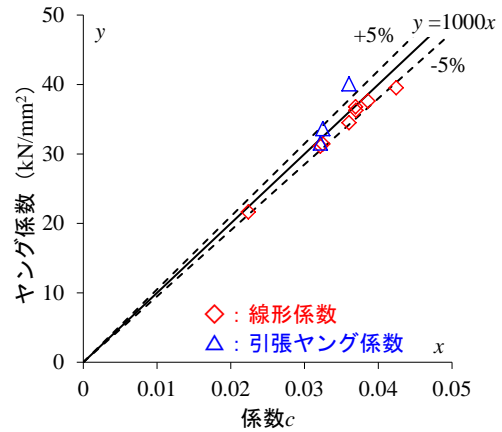
4. 初期ひび割れ予測に用いるヤング係数の評価方法

本章では、実験から求めることが比較的困難な引張ヤング係数ではなく、圧縮実験によって初期ひび割れ予測に用いるヤング係数を評価する方法について検討する。

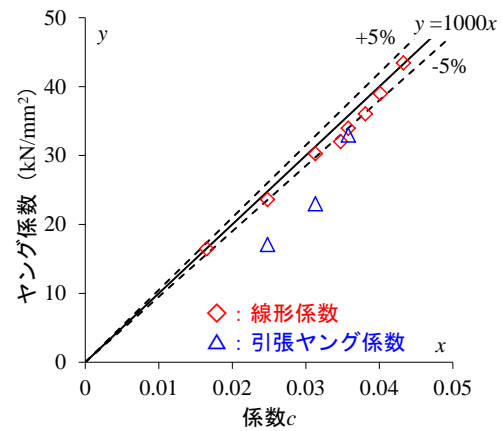
そこでまず、JIS に準じて行った圧縮実験で得られた応力-ひずみ関係を、式(1)に示す3次式を用いて最小二乗法で回帰し、各係数を算定した。

$$\sigma = a \cdot \varepsilon^3 + b \cdot \varepsilon^2 + c \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、 $\sigma$ : 応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$ : ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ : 定数を表す。



(a) 普通コンクリート



(b) FA コンクリート

図-10 係数 c とヤング係数の関係

回帰結果の一例として、N-7 の結果を図-9 に示す。図-9 に示すように、式(1)の3次式で、実験結果を非常に精度よく回帰できており、いずれの回帰結果も R<sup>2</sup> は 0.99 以上であった。回帰結果の一覧を表-4 に示す。ここで係数 c は、応力-ひずみ関係を回帰した式(1)の初期接線係数に相当するものである。係数 c と線形係数および引張ヤング係数の関係を図-10 に示す。図-10 に示すように、一部傾向の異なる結果があるものの、普通コンクリートの引張ヤング係数および線形係数は、概ね係数 c の 1000 倍の±5%の範囲内にあった。このような結果は、FA コンクリートにおいても同様であった。以上のことから、初期ひび割れ予測に用いるヤング係数は、一般的に用いられる割線係数ではなく、応力-ひずみ関係における初期接線係数を用いることが妥当であると推察される。ただし、FA コンクリートについては、傾向の異なる実験結果がみられたため、更なるデータの蓄積と検証が必要である。なお、初期ひび割れを予測するためには、ヤング係数の時系列な評価が必要である。圧縮強度と係数 c の関係を図-11 に示す。図-11 に示すように、係数 c は概ね以下に示す式(2)の曲線上にあることがわかる。

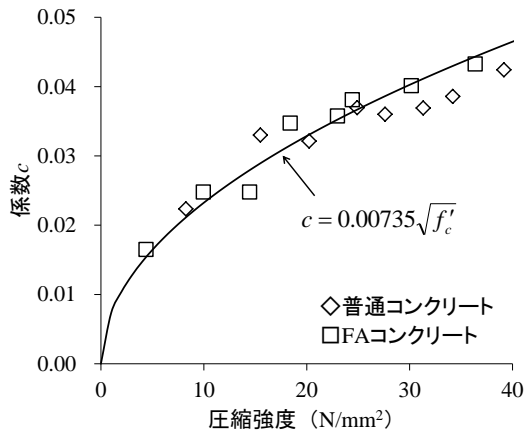


図-11 圧縮強度と係数  $c$  の関係

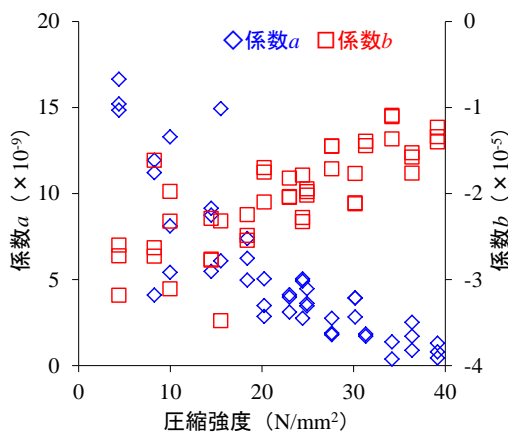


図-12 圧縮強度と係数  $a$ , 係数  $b$  の関係

$$c = 0.00735\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

ここに、 $f'_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) を表す。

特に、普通コンクリート・FA コンクリートともに式(2)の曲線上にあることから、FA の添加によって強度やヤング係数の発現が緩慢になっても、普通コンクリートと同様に評価できると考えられる。

また、圧縮強度と係数  $a$  および係数  $b$  の関係を図-12 に示す。図-12 に示すように係数  $a$  は材齢の進行にともなう強度発現に応じて減少する傾向にあった。一方、係数  $b$  は、係数  $a$  と異なり強度増加とともに減少する傾向にあった。既報の結果では、若材齢ほど引張ヤング係数と圧縮ヤング係数(割線係数)の差が顕著であり、材齢の進行とともにその差は小さくなる傾向にあった<sup>1), 2)</sup>。また、本研究の実験結果でも普通コンクリートでは、長期材齢の方が割線係数と接線係数の差が小さい。ここで、 $2b$  は応力-ひずみ関係における初期接線係数の変化率を表しており、図-12 に示す係数  $b$  の結果は、ひずみの増加にともなう応力-ひずみ関係の勾配変化が、材齢の

進行(強度の発現)とともに緩やかになる、すなわち、線形係数と割線係数の差が小さくなることを表すものである。

## 5. まとめ

本研究では、初期ひび割れ予測に用いるヤング係数を求めるため、引張実験および圧縮実験を行い、ここで得られた結果をもとに、ヤング係数の差異や算定方法について検討した。本研究で得られた主な結論を以下に要約する。

- (1) 普通コンクリートでは、引張ヤング係数は割線弾性係数より 16~29%大きい、引張実験と同レベルの応力・ひずみで求めた圧縮ヤング係数ではその差が小さくなり、引張ヤング係数と同等以上となる。
- (2) 普通コンクリートでは、初期ひび割れ予測に用いるヤング係数は、一般的な圧縮実験で得られた応力-ひずみ関係を回帰した 3 次式の初期接線勾配を用いることが妥当であると考えられる。
- (3) FA コンクリートでは、普通コンクリートと同様の傾向を示す結果があるものの、更なるデータ蓄積と検証を必要とする。
- (4) 普通コンクリート、FA コンクリートともに圧縮強度から初期接線勾配を評価できると考えられる。

謝辞：本研究は、公益財団法人 中国電力技術研究財団の研究助成を受けたものである。また、実験等を遂行するうえで呉工業高等専門学校環境都市工学科の増木貴之氏および数実 学氏をはじめとする研究室各位には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

## 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.677-688, 2007.12
- 2) 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変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, 2010.7
- 3) Y., Mimura, I. Yoshitake and W. Zhang: Uniaxial Tension Test of Slender Reinforced Early Age Concrete Members, *Materials*, MDPI, 4(8), pp.1345-1359, 2011.8
- 4) I. Yoshitake, W. Zhang, Y., Mimura and T. Saito: Uniaxial Tensile Strength and Tensile Young's Modulus of Fly-ash Concrete at Early Age, *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp.514-521, 2013.3