

屋外で作製・養生するフライアッシュコンクリートの強度特性[†]

張 文 博* 吉 武 勇** 尾 上 枝 里*
三 村 陽 一*** 齊 藤 直****

Strength Properties of Fly-Ash Concrete Placed and Cured in the Field

by

Wenbo ZHANG*, Isamu YOSHITAKE**, Eri OGAMI*, Yoichi MIMURA*** and Tadashi SAITOH****

This paper presents compressive and tensile strengths of fly-ash concrete, which is classified as type II in the JIS. Fly-ash concretes were made in different seasons, including summer, autumn and winter. The concretes were made in a ready-mixed concrete plant and were cured in the field to simulate actual construction conditions. To investigate fundamental mechanical properties of the fly-ash concretes, strength tests were conducted at several ages. The paper gives the results of compressive strength, splitting tensile strength and uniaxial tensile strength tests. The study uses the Goral curve for the regression of compressive strength developed with an equivalent age based on the maturity. In the regression result, the coefficient of the Goral curve develops with lower temperatures. The results imply that evaluations using the equivalent age are not always appropriate for predicting the compressive strength of fly-ash concrete. According to comparative results of tensile strengths, the splitting tensile strength of fly-ash concrete can be predicted by using the JSCE design formula. In addition, the results indicate the uniaxial tensile strength of fly-ash concrete is higher than the splitting tensile strength at all test ages. A relationship between splitting strength and uniaxial strength, proposed by Yoshimoto, gives a conservative estimate for the evaluation of fly-ash concrete cracking strength.

Key words : Fly ash, Uniaxial tensile strength, Splitting tensile strength, Compressive strength, Goral curve, Field test

1 緒 言

フライアッシュ（以下、FA）を用いたコンクリート（以下、FA コンクリート）は、所定のワーカビリティを得るのに単位水量を低減でき、セメントの一部代替置換とすることで、水和による温度上昇の抑制も可能であり、さらにポゾラン反応により長期強度が増進するといった長所がある。¹⁾一方、若材齢期の強度発現が一般的なコンクリートに比べて緩慢であり、脱枠材齢や養生方法に特に留意しなくてはならない。¹⁾多くの場合、このようなFAコンクリートにおいても、その養生方法や脱枠時期などは、一定の温度・湿度で管理された室内試験によって定められおり、実環境下または異なる温度環境下におけるFAコンクリートの諸特性について検討された例は少ない。^{2)~4)}温度が変動する実環境下において、初期材齢から長期材齢にかけて、さらに一軸引張強度を含むFAコンクリートの強度特性を調べることは、FAコンクリートの設計・施工に有用と考えられる。

そこで本研究では、生コンプラントで練り混ぜたFAコンクリートを用いて供試体を作製し、施工現場と同様の養生を行うことで、コンクリートの強度特性を調査した。特に、ひび割れ抵抗性の指標とすべく、FAコンクリートの一軸引張強度を調べるとともに、割裂引張強度

試験、圧縮強度試験の結果と比較検討を行った。なお、打設・養生環境の影響を調べるため、夏期・秋期および冬期においてそれぞれ同じ配合（普通ポルトランドセメントに対して20%質量置換）のFAコンクリートについて実験を行った。

2 供試体および実験方法

2・1 使用材料および配合

FAコンクリートの配合をTable 1に示す。普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）とFAを粉体材料として使用し、汎用の生コンクリートの配合（呼び強度24）をベースにセメントの20%質量置換でFAを混合した。FAはJIS A 6201のII種規格を満足するものであり、その諸物性はTable 2に示すものである。使用した骨材は、北九州市小倉産の石灰石砕砂（密度：2.69g/cm³、FM：2.46）、北九州市門司産の硬質砂岩砕砂（密度：2.58g/cm³、FM：2.56）および山口県美祿市伊佐産の石

Table 1 Mixture proportion of FA concrete.

s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						
	W	C	FA	S	G	Ad*	AE**
48	160	218	54	904	976	1.36~2.72	0.27~0.41

* : Polycarboxylate type water reducer; ** : AE admixture

† 原稿受理 平成 23 年 5 月 16 日 Received May 16, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 山口大学大学院 〒755-8611 宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

** 正 会 員 山口大学大学院 〒755-8611 宇部市常盤台, Grad. School of Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

*** 呉工業高等専門学校 〒737-8506 呉市阿賀南, Kure National College of Tech., Agaminami, Kure, 737-8506

**** (株)エネルギア・エコ・マテリア 〒730-0042 広島市中区泰寺町, Energia Eco Materia CO., INC, Naka-ku, Hiroshima, 730-0042

Table 2 Physical and chemical properties of FA.

Moisture content	0.1%	SiO ₂	62.4%
Density	2.16g/cm ³	Al ₂ O ₃	23.3%
Blaine fineness	3310cm ² /g	Fe ₂ O ₃	3.19%
28-day strength factor	85%	CaO	0.98%
91-day strength factor	97%	MgO	0.55%
Percentage of flow	102%	SO ₃	0.24%
MB absorption	0.50mg/g	Na ₂ O	0.19%
Loss on ignition	4.0%	K ₂ O	1.38%

灰石砕砂（密度：2.60g/cm³，FM：2.87）の3種類を質量比3：3：4で混合した細骨材，および北九州市門司産の2010 碎石（密度：2.73g/cm³，FM：6.98）と同1505 碎石（密度：2.73g/cm³，FM：6.35）を質量比3：2で混合した粗骨材である。また，ポリカルボン酸系のAE減水剤と空気量調整剤を水道水に混合してFAコンクリートの作製を行った。なお，一軸引張実験に用いた鉄筋はD13（SD345）の市販異形鉄筋である。

2・2 供試体の作製と養生

一軸引張実験で用いた供試体をFig. 1に示す。この供試体は100×100×1560mmの棒部材であり，その長さ方向に異形鉄筋を断面中心位置に埋設している。供試体の両端部から張出した鉄筋の両端部85mmには，それぞれねじ切り加工が施されており，これに荷重治具を取り付けることができる。また，供試体の中央からそれぞれ鉄筋径の50倍（50D，650mm）と充分な定着長とした。なお，コンクリート中の鉄筋両端130mmずつの領域をテープで被覆することで非定着部とし，両端部におけるコンクリートのコーン状抜け出し破壊を防止した。

本実験では，鉄筋軸方向のひずみ分布を調べるとともに，コンクリートに作用する引張応力を求めるため，夏期に製作した一軸引張実験用供試体の鉄筋リブに，検長3mmのひずみゲージをFig. 1のように貼り付けた。その後実施した秋期・冬期の実験では，供試体の0Dと50Dの位置に同ひずみゲージを貼付した（3・3節にて詳述）。さらに，偏心ひずみの有無やコンクリートと鉄筋の付着を確認するため，コンクリート供試体の両側面の中心位置に，それぞれ検長60mmのひずみゲージを貼付した。

実験を行う7材齢（1，2，3，5，7，28，91日を基準）について，一軸引張実験用の供試体を各2体（合計14体）作製するとともに，圧縮強度と割裂引張強度試験用の円柱供試体（寸法：φ100×h200mm）を各材齢につき3本ずつ，計42本を作製した。さらに標準養生下の圧縮強度を確認するため，材齢7，28，91日の3材齢の試験用に，各3本の同円柱供試体（計9本）を作製した。

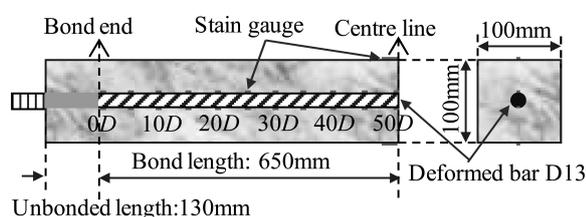


Fig. 1 Cross sectional views of specimen.

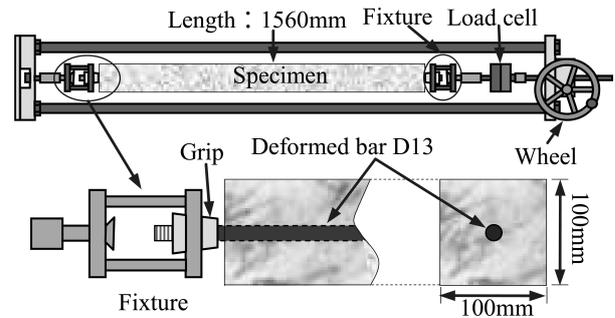


Fig. 2 Experimental apparatus and specimen of uniaxial tensile strength test.

土木学会コンクリート標準示方書（施工編）⁵⁾に準じて脱枠材齢を決定した。夏期・秋期では材齢3日で脱枠し，冬期では材齢7日で脱枠を行った。ただし，脱枠材齢（3日）以前の試験では，試験直前に供試体の脱枠を行った。また，実施工を模擬するため，すべての供試体は，材齢7日まで養生布を用いて散水養生を施し，それ以降は，外気に曝した気中養生とした。標準養生を行った円柱供試体は，打設季節によらずすべて材齢1日で脱枠し，各圧縮強度試験を行うまで20±2℃で水中養生を行った。なお，コンクリートの積算温度に基づく有効材齢を求めるため，外気温とコンクリート試験片（100×100×200mm）の中心温度を1時間毎に計測した。

2・3 荷重装置および実験方法

コンクリートの引張強度性状に関する研究では，主にJIS A 1113の割裂引張強度試験により推定する方法が用いられる。一方，既往の直接引張試験法に関する研究では，供試体の両端部における引張力を伝達する方法や供試体の断面形状に注目した方法が多い。^{6)~8)}この中にはコンクリートの引張強度性状を適切に評価できる方法もあるが，未だ標準的な試験方法は確立されていない。本研究では，Fig. 2に示すような一軸引張荷重装置^{9), 10)}を用いてコンクリートの引張実験を行った。この実験法では，Fig. 2に示すように，埋設した鉄筋とコンクリート間の付着を介してコンクリートへ引張力を導入することができる。この方法では，断面中心から張出した鉄筋に直接引張力を導入し，さらに鉄筋両端の取付治具には球座を設けているため，コンクリートの二次曲げ等による偏心荷重は生じにくいと思われる。なお，供試体下面の摩擦抵抗を低減するため，70mm間隔で設置したローラー上で荷重を行った。本実験では，100N/sec程度を目安に，手でハンドルを操作することにより荷重を行った。荷重中において，データロガーのモニタ上でロードセルの読値が低下した時，コンクリート中にひび割れが発生したものと判定した。そして，ひび割れ発生時のコンクリートの引張応力を一軸引張強度（ f_{ud} ）として評価を行った。なお，圧縮強度と割裂引張強度試験はJIS規定に準じて行った。

3 実験結果と考察

3・1 フレッシュ性状

各FAコンクリートの打設日は，夏期：2010年8月19日，秋期：2010年10月25日，および冬期：2011年1

月17日である。本研究では、生コンプラントで練り上げた直後に、スランプおよび空気量を計測した後、アジデータトラックで打設現場に運搬した。練り上がり直後(0分)および運搬後(45分)のFAコンクリートのフレッシュ性状をTable 3に示す。

練り上がり直後および運搬後のフレッシュ性状によると、外気温が高い夏期施工において、スランプロスが4.5cm、空気量ロスが2.2%と大幅な減少となったが、秋期・冬期施工では、フレッシュ性状はほとんど変わらなかった。このことより、FAを20%置換したコンクリートにおいても、標準気温(20℃程度)や低い外気温(5℃程度)で打設する場合、少なくとも45分以内では、適切なワーカビリティを維持できるが、外気温の高い夏期環境下になると、スランプの低下が顕著であり、留意する必要がある。

3・2 養生期間の降水量および温度変化

気中養生期間(材齢7日以降)において、供試体の曝露場所の降水を記録した。その結果、いずれの打設時期においても、材齢7日から21日の間に降水がほとんどなかったことから、その間に供試体は乾燥環境下にあったものと考えられる。また、材齢21日から91日の間に、夏期・秋期・冬期において、0.5mm以上の有効降水が観察された日数はそれぞれ18日、24日および16日であった。

材齢56日までの期間において、異なる季節に打設したFAコンクリートの内部温度(T_c)および外気温(T_a)をFig. 3に示す。この図に示すように、およそ材齢28日以内の期間では、夏期施工のFAコンクリート(S)は30℃前後になり、最高気温が40℃を超えた計測記録もみられる。また冬期施工のFAコンクリート(W)においては、ほとんどの期間で0℃以上を有しており、最低温度でも-3℃程度であったことから、凍害等のおそれはほとんどないものと考えられる。

3・3 ひずみの計測結果および応力算出方法

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Fig. 4に示す。いずれの材齢においても、供試体の中心からおよそ30Dの範囲内では、鉄筋ひずみはほぼ一様に分布した。この範囲を超えて載荷端に近づくとき鉄筋の負担する引張応力が徐々に大きくなり、定着端面の位置では、鉄筋のみで引張応力を負担していた。すなわち、供試体中央からおよそ30Dの範囲内では、コンクリートが負担する引張応力が大きく、引張力に伴うコンクリートのひび割れは、この範囲内に生じることとなる。この結果を踏まえ、各一軸引張実験において、供試体中心から±30Dの範囲内にひび割れが生じた試験のみを評価対象とし、欠陥等で30Dの範囲外で最初のひび割れが発生した試験については、評価対象外とした。これにより、秋期・冬期で行った一軸引張実験では、鉄筋とコンクリートのひずみが一樣になる供試体の中央位置と鉄筋単身のひずみを示す、鉄筋中央(0D)および定着端部(50D)においてひずみゲージ(検長:3mm)を貼付した。

Table 4は各供試体に最初のひび割れが発生した位置をまとめたものである。一部を除いて、供試体中央より

Table 3 Properties of fresh concrete.

Casting condition	0 min.		45 min.			
	Sl. (cm)	Air (%)	Sl. (cm)	Air (%)	T_a (°C)	T_c (°C)
Summer	8.5	6.6	4.0	4.4	32.6	33.9
Autumn	9.0	5.0	11.5	4.5	20.0	21.1
Winter	10.5	5.3	13.6	5.3	5.1	7.1

T_a : Ambient temperature, T_c : Concrete temperature.

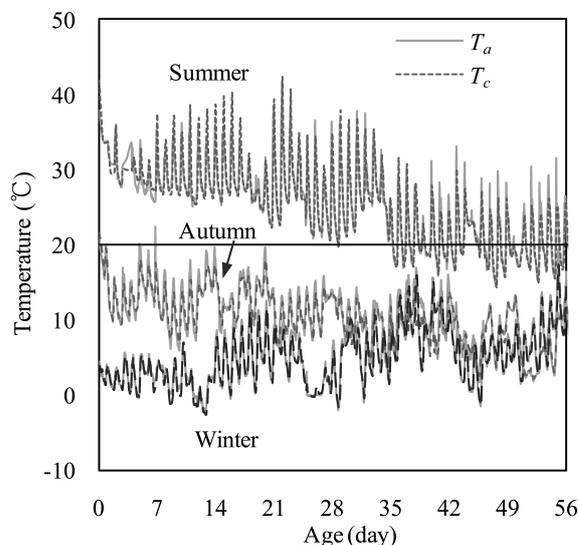


Fig. 3 Ambient and concrete temperatures.

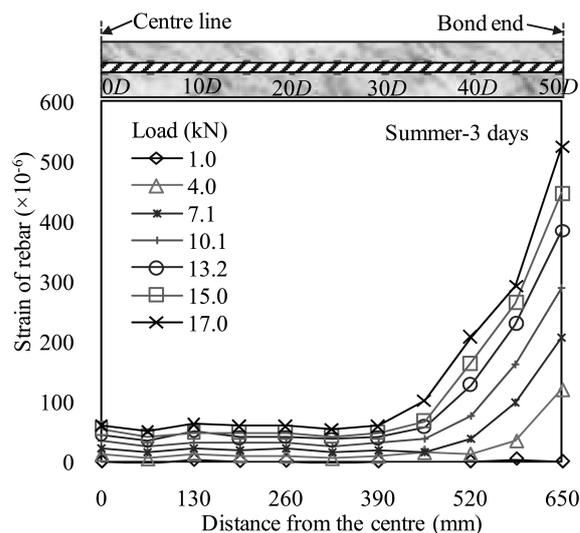


Fig. 4 Strain distributions of rebar.

30D (390mm) の範囲内に最初のひび割れが発生した。なお、秋期・冬期打設のFAコンクリートでは、ごく若材齢時に十分に硬化しておらず、また埋設した鉄筋にほとんど付着していなかったことから、一軸引張実験ができなかった。なお、それらの代替試験として、材齢14日および56日に同実験を実施した。

ここで、供試体中央における鉄筋ひずみの平均値とコンクリート表面のひずみの一例をFig. 5に示す。この図に示すように、コンクリートにひび割れが生じない小さいひずみ範囲内では、コンクリートのひずみはほとんど

Table 4 Crack positions* in uniaxial tensile tests.

Age (day)	Summer (mm)		Autumn (mm)		Winter (mm)	
	s ₁	s ₂	s ₁	s ₂	s ₁	s ₂
1	50	10	N/A	N/A	N/A	N/A
2	250	215	8	35	N/A	N/A
3	220	200	160	15	N/A	N/A
5	280	420	125	240	180	5
7	320	280	200	170	100	70
14	---	---	---	---	515	70
28	120	340	20	215	160	70
56	---	---	---	---	390	500
91	130	310	200	180	330	15

* : Distance from the centre of specimen

s : Specimen, N/A : Insufficient hardened concrete for test

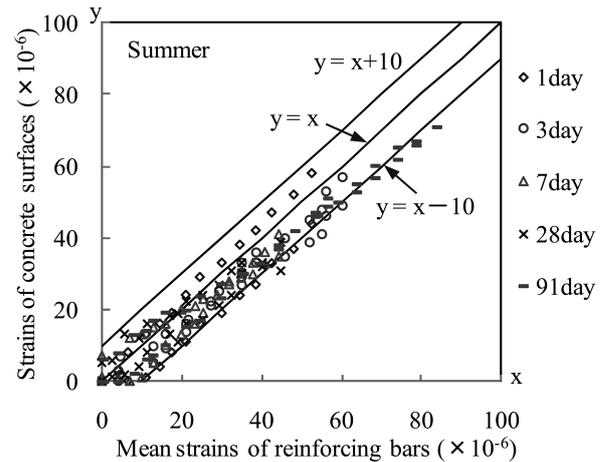


Fig. 5 Mean strain of concrete and rebar at the centre.

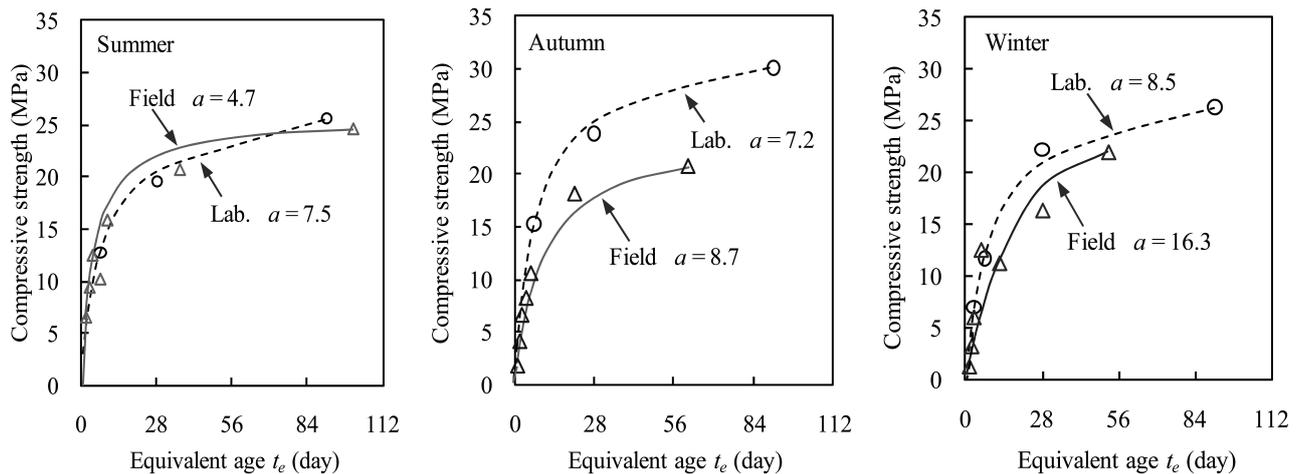


Fig. 6 Compressive strength of FA concrete cured in different ambient conditions.

鉄筋の平均ひずみの $\pm 10 \times 10^{-6}$ 範囲内になっており、概ね一致している。これより、鉄筋のひずみ分布が一樣となった範囲内 ($\pm 30D$) では、鉄筋とコンクリートの間にほとんどすべりが生じず、鉄筋は完全定着しているものと考えられる。一方、一軸引張実験においては、治具の取付や供試体の不均一性により偏心荷重の影響を排除することは困難とされているが^{6)~8)} Fig. 5 に示すように、本研究の実験法では、ひび割れが生じるような高いひずみ領域まで、コンクリートに偏心ひずみはほとんど生じていないと判断される。

なお一軸引張実験において、コンクリートに作用する応力は、ロードセル (Max: 100kN) で計測した荷重および鉄筋のひずみの計測値を用いた式 (1) によって求めることができる。

$$\sigma_c = (P - A_r \cdot E_{rt} \cdot \varepsilon_{rt}) / A_c \quad (1)$$

ここに、 σ_c : コンクリートに作用する応力 (MPa)、 P : ロードセルで測定した荷重 (N)、 A_c : コンクリートの断面積 (mm^2)、 A_r : D13 鉄筋の断面積 (126.7mm^2)、 E_{rt} : 鉄筋のヤング係数 (206GPa)、 ε_{rt} : 鉄筋のひずみを表す。

3・4 圧縮強度

計測したコンクリートの温度による積算温度を基に、各材齢における有効材齢 (t_e) を式 (2)¹⁾ によって求め、異

なる時期に作製・養生した FA コンクリートの力学性状の比較を行った。

$$t_e = \frac{\int_0^t (T - T_0) dt}{T_s - T_0} \quad (2)$$

ここで、 T : コンクリート温度、 T_s : 基準温度 (20°C)、 T_0 : 強度増進がないと考える温度 (-10°C)、 t : 温度 T の期間を表す。

さらに、各 FA コンクリートの圧縮強度発現性を評価するため、式 (3) に示す Goral 曲線¹¹⁾ を用いて強度比 (対 91 日圧縮強度) と材齢の関係について回帰を行った。

$$\frac{f'_c(t_e)}{f'_c(91)} = \frac{t_e}{a + b \cdot t_e} \quad (3)$$

ここに、 $f'_c(t_e)$ は有効材齢 t_e 日における圧縮強度、 a 、 b は回帰係数である。この式に示すように、係数 a と強度比は逆相関の関係にあり、圧縮強度発現の早さを示す一指標になるものと考えられる。なお、長期材齢において強度比が 1.0 に漸近するため、係数 b は 1.0 近傍の値となる。FA を用いたコンクリートの係数 b は明示されていないが、ここでは土木学会コンクリート標準示方書 (設計編) (以下、示方書と略記)¹²⁾ に示される普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの係数 0.95 を引用した。

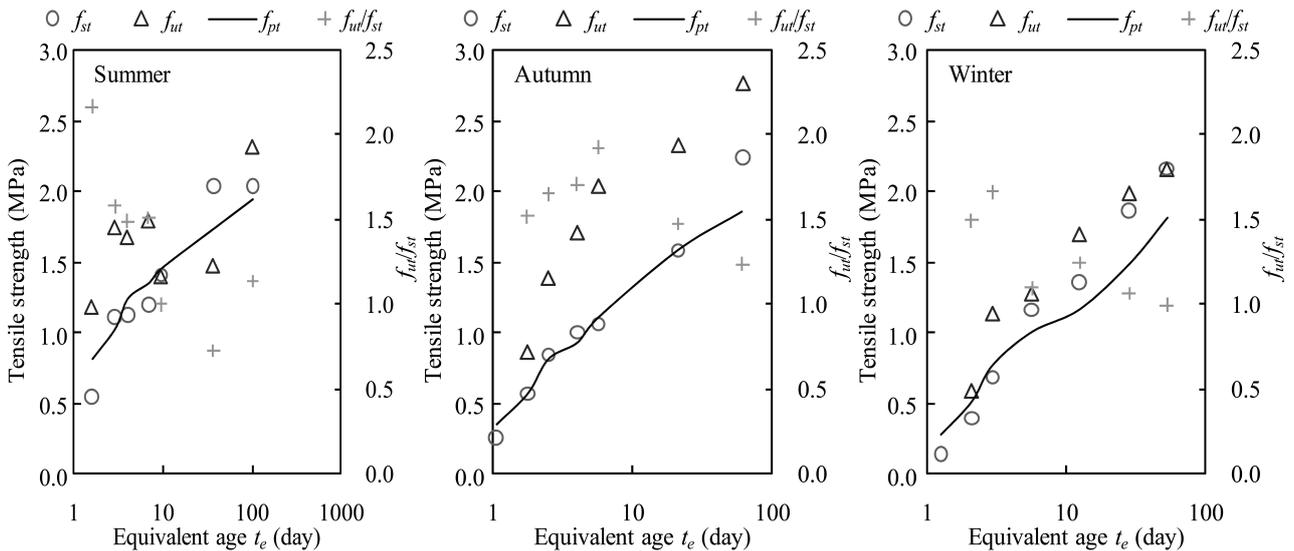


Fig. 7 Tensile strength of FA concrete cured in different conditions.

Fig. 6には、有効材齢で整理した圧縮強度および各回帰曲線を時期ごとに示す。これらの結果に示すように、標準養生 (Lab.) を行ったFAコンクリートにおける係数 a は、打設時期によって若干の相違はみられるが7.2～8.5程度であり、示方書¹²⁾に示される中庸熱ポルトランドセメントの同係数6.2よりも大きい。このことは、FAコンクリートの強度発現性が、普通ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べ遅くなる傾向を示唆したものである。さらに、ここに示す結果は、有効材齢を用いて回帰したものであるが、打設時期 (夏期・秋期・冬期) の違い、すなわち打設温度の低下によって係数 a は大きくなっており、強度発現性が低下していることがわかる。このことは、必ずしも積算温度に基づく有効材齢だけでは、特に初期材齢におけるFAコンクリートの強度発現性を一律に評価・推定できないことを示している。

なお、夏期コンクリートは気中 (Field)・標準養生下の異なる強度発現にかかわらず、材齢91日において呼び強度24 (24MPa) 相当となった。一方、秋期・冬期に作製したコンクリートは、標準養生下の強度発現に比べ、いずれも低いレベルで強度発現していた。この結果は、材齢7日まで湿布養生、以降を気中養生した結果と20℃環境下で水中養生した結果の差異を表したものであり、FAコンクリートにおいては、材齢7日以降の湿潤養生も強度発現に大きく影響することを示している。

3・5 引張強度

引張強度の比較基準のために、示方書¹²⁾に記される引張強度設計式および圧縮強度の実験結果 (f_c) を用いて、引張強度 (式 (4)) を求めた。

$$f_{pt} = 0.23 f_c'^{2/3} \quad (4)$$

ここに、 f_{pt} は引張強度 (MPa) の推定値を表す。

一軸引張強度 (f_{ut})、割裂引張強度 (f_{st}) および式 (4) により推定した引張強度 (以下、推定値) を Fig. 7 に示す。これらの結果により、打設時期によらず、いずれに

おいても一軸引張強度はほとんど割裂引張強度により高いことがわかる。割裂引張強度は二軸応力状態下の強度であり、一軸応力下における強度より若干小さくなることが知られているが^{10), 13)} Fig. 7 に示す一軸引張強度と割裂引張強度の比 (f_{ut}/f_{st}) に着目すると、特に湿布養生期間内において、 f_{ut}/f_{st} の一部が1.5を超過するなど、この傾向は顕著であった。既往の研究^{10), 13)}によると、引張強度が3.5MPaより小さい場合、(2.0～5.0MPa内ではその差異が小さいものの) 一軸引張強度が割裂引張強度より大きくなることが示されている。一方、ここで対象とした若材齢期にあるFAコンクリートでは、2.0MPa以下にあり、両者の差異が著しくなったものと推察される。ここで、夏期に作製・養生したFAコンクリートにおいて、初期強度は比較的高いものの、材齢28～91日にかけては、秋・冬期のFAコンクリートに比べて、ほとんど強度増進がみられなかった。一軸引張実験では、気中養生したコンクリートの収縮を、埋設した鉄筋が一部拘束することで、潜在的な初期引張力が作用することが予想される。夏期に作製・養生したコンクリートは、その初期応力の影響が著しく、結果的に長期材齢における一軸引張強度が低下したものと考えられる。¹⁴⁾ これに対して、鉄筋の拘束による初期応力がない割裂引張強度では、夏期・秋期・冬期コンクリートの長期強度 (材齢91日) に有意な差異はみられなかった。設計上の安全係数を含む推定値に比べ、ほぼ同等あるいは若干高い程度の割裂引張強度は、気中養生を行うFAコンクリートにおいて、示方書の設計式による推定の妥当性が窺える。

既往の文献¹³⁾において、一般的なコンクリートの割裂引張強度と一軸引張強度は式 (5) に示す関係にあることが報告されている。

$$f_{ut} = 1.277 f_{st}^{0.814} \quad (5)$$

Fig. 8 に示すように、初期応力によって小さくなった一部の軸引張強度データを除いて、夏期 (FA (S))・秋期 (FA (A))・冬期 (FA (W)) の一軸引張強度は、式 (5)

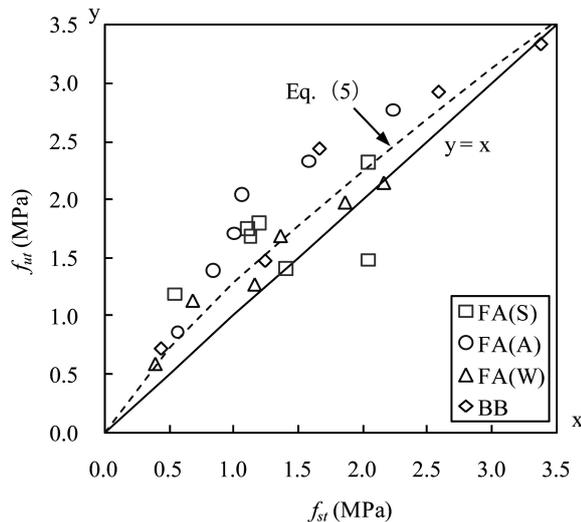


Fig. 8 Comparison of f_{ut} and f_{st} .

による予測値近傍あるいはそれ以上に分布していた。これは、呼び強度 24 (24MPa) の高炉セメント B 種 (BB) によるコンクリートを用いた三村ら¹⁰⁾の研究も、概ね同様の傾向にある。実験値と予測値の差異は、ここで対象とした FA コンクリートの割裂引張強度の多くが、2.0MPa 以下に分布したことに起因するものと思われる。ただし、ここに示した結果より、割裂引張強度と式 (5) を用いて簡便に求められる一軸引張強度を基に、ひび割れ抵抗性として評価すれば、現場で作製・養生した FA コンクリートのひび割れに対して安全側の指標となるものと考えられる。

4 結 言

本研究では、夏期・秋期・冬期環境下において作製および気中養生した FA コンクリートの強度特性について実験を行い、考察を加えた。主な結論を以下に列挙する。

(1) 圧縮強度-有効材齢関係の回帰に用いた Goral 式の係数 a が大きくなり、打設・養生温度の低下に伴い強度発現性は低下したことから、必ずしも積算温度に基づく有効材齢だけでは、特に初期材齢における FA コンクリートの強度発現性を一律に評価できないことを指摘した。さらに、秋期・冬期の FA コンクリートにおいて湿潤・気中養生による圧縮強度の差異が大きくなったことから、材齢 7 日以降の湿潤養生が、FA コンクリートの強度発現に与える影響が大きいことを示唆した。

(2) FA コンクリートの一軸引張強度は、特に湿布養生を行った若材齢期において、割裂引張強度や圧縮強度から推定した引張強度に比べ大きい。また、夏期・秋期・冬期の各 FA コンクリートの材齢 91 日における割裂引張強度には、有意な差異はなく、設計上の安全係数を含む推定値と同等であったことから、気中養生を行う FA コンクリートにおいても、示方書の設計式による推定の妥当性を示した。

(3) 夏期・秋期に作製・気中養生した FA コンクリートの一軸引張強度は、吉本の提案する割裂引張強度との

関係式を用いることで、ひび割れ強度に対して安全側の評価が可能となる。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "New utilization technologies of fly ash concrete suitable for recycle oriented society-recommendations for design and construction of fly ash concrete" (2009).
- 2) K. Kokubu, A. Ueno and M. Hirano, "Quantitative evaluation of strength development due to curing temperature and age in fly-ash concrete", Proceedings of JCI, Vol.22, No.2, pp.79-84 (2000).
- 3) K. J. Folliard, L. X. Du and D. Trejo, "Effects of curing conditions on strength development of controlled low-strength material", ACI Materials Journal, Vol.100, pp.79-86 (2003).
- 4) M. K. Gopalan and M. N. Haque, "Effect of curing regime on the properties of fly-ash concrete", ACI Materials Journal, Vol.84, pp.14-19 (1987).
- 5) Japan Society of Civil Engineers, "Standard specifications for concrete structures (Materials and Construction)" (2007).
- 6) H. Akita, H. Koide and M. Tomon, "A practical method for direct tensile test of concrete", Proceedings of JCI, Vol.21, No.2, pp.643-648 (1999).
- 7) W. Zheng, A. K. H. Kwan and P. K. K. Lee, "Direct tension test of concrete", ACI Materials Journal, Vol.98, pp.63-71 (2001).
- 8) Y. Aoki and T. Shimomura, "Development of a method of uniaxial tensile test of concrete using continuous fiber sheet", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.739, pp.273-278 (2003).
- 9) Y. Mimura, I. Yoshitake, K. Morimoto and S. Hamada, "Experimental study on local bond characteristic of deformed bar embedded in early-age concrete", Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.63, No.3, pp.410-423 (2007).
- 10) Y. Mimura, I. Yoshitake, T. Uno and I. Horiguchi, "Deformation and strength of concrete at early age based on uniaxial tension test using a rebar", Proceedings of JCI, Vol.32, No.1, pp.341-346 (2010).
- 11) M. L. Goral, "Empirical time-strength relations of concrete", Journal of ACI, Vol.53, pp.215-224 (1956).
- 12) Japan Society of Civil Engineers, "Standard specifications for concrete structures (Design)" (2007).
- 13) A. Yoshimoto, "Deformation and fracture of concrete" (1990) Gakkensha.
- 14) S. Watanabe and N. Sugata, "Effect of curing temperature on strength and shrinkage of high-strength concrete with fly ash", Proceedings of JCI, Vol.29, No.1, pp.285-290 (2007).