

東南アジアにおけるフライアッシュコンクリートの 強度予測に関する研究

伊藤, 雅文
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

小山, 智幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 准教授

関, 雅明
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

閑田, 徹志
鹿島建設(株)技術研究所

他

<https://doi.org/10.15017/2232336>

出版情報 : 都市・建築学研究. 35, pp.59-66, 2019-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

東南アジアにおけるフライアッシュコンクリートの強度予測に関する研究

Strength Estimation of Fly Ash Concrete in Southeast Asia

伊藤雅文*¹, 小山智幸*², 関 雅明*¹, 閑田徹志*³, 笠井 浩*³
Masafumi ITO, Tomoyuki KOYAMA, Masaaki SEKI,
Tetsushi KANDA and Hiroshi KASAI

The amount of fly ash generated in Asia is larger than in other areas. Among them, economic growth in Southeast Asia is remarkable. Considering that the amount of generated fly ash can further increase, it is necessary to consider using a large amount of fly ash as an admixture to concrete from the economic and environmental aspects.

In this study, we aim to conduct appropriate quality control of fly ash concrete, and compare the strength characteristics of compressive strength obtained from experiments using cement and FA in the three countries of India, Indonesia and Thailand. And, we examined the strength estimation formula of the fly ash concrete.

Keywords : Southeast Asia, Fly ash, Strength estimation
東南アジア,フライアッシュ,コンクリート,強度予測

1. はじめに

石炭灰の発生量は、全世界で2011年に約4億8千万トンで¹⁾、そのうちアジア諸国における石炭灰の発生量は他の地域と比較すると約40%と大きい²⁾。その中でも発展途上国の多い東南アジアは経済成長が著しく、さらなる石炭灰の発生量の増加が起りうることを考えると、経済面からも環境面からもコンクリートに対する混和材としてフライアッシュ(以下FA)を大量に有効利用していくことを検討する必要がある。

コンクリートにFAを内割混合する場合の問題として、初期強度発現性が低いことが挙げられるが、多くのアジア諸国では気温が高いためこれらの影響が顕在化しにくいことが想定される。またもう一つの問題として、FAに含まれる未燃カーボンがAE剤を吸着して適切な連行空気量が確保できず、コンクリートの耐凍害性が低下するという点が挙げられるが、多くのアジア諸国では気温の高さから凍害は生じにくいいため、これも問題にならないと推測できる。

今後我国の建設関連企業が東南アジアに進出していく場合を想定すると、使用できる材料の品質の変動等の、諸条件が我国とは異なる国々において、コンクリートの適切な品質を実現していくことが求められる。

これらを踏まえた上で本研究では、現地でFAを用いたコンクリートの適切な品質管理を行うことを目的とし、インド、インドネシア、タイの3カ国のセメントとFAを用いた実験から得られた圧縮強度の強度発現特性を整理し、FA内割混合コンクリートの強度予測式について検討した。

2. 実験計画

2.1 使用材料および調査条件

初めに、今回用いたセメントの密度、ブレン比表面積、鉱物組成の測定結果を表1に示す。いずれも、それぞれの国において一般的に用いられているものを入手した。表中には、比較のため、国産セメントの例を、アジア諸国を対象としてコンクリート工学会が実施した調査研究の委員会報告³⁾より引用して示している。セメントの密度は3.03~3.15g/cm³と、全体として国産セメントよりも小さい値を示した。調査対象国は完全には同一ではないが、文献3)では、インドネシ

*1 空間システム専攻修士課程

*2 都市・建築学部門

*3 鹿島建設(株)技術研究所

表1 セメントの諸元

国	インドネシア			タイ		国産(例)			
	インド	NP	NS	TC	TS	普通	早強	中庸熱	
記号	II	NP	NS	TC	TS	普通	早強	中庸熱	
密度(g/cm ³)	3.15	3.11	3.08	3.13	3.03	3.14	3.14	3.21	
比表面積(cm ² /g)	3090	3330	3390	3350	4030	3283	4680	3220	
鉱物組成 (%)	C ₃ S	42.0	57.4	59.4	68.0	66.5	56.1	66.0	42.0
	C ₂ S	29.0	14.3	9.7	6.2	7.6	19.5	11.0	36.0
	C ₃ A	4.5	8.5	10.1	6.4	5.7	9.5	8.0	5.0
	C ₄ AF	15.1	8.4	9.1	11.5	11.5	8.1	8.0	12.0
	Gyp	0.7	ND	1.4	ND	2.4	0.2		
	Hemi	2.9	2.9	1.6	3.7	2.6	ND		
	Anhy	ND	0.2	ND	ND	ND	ND		
	Calcite	5.3	2.7	8.2	2.7	2.5	3.2		
	K ₂ SO ₄	0.5	0.8	0.4	0.9	0.5	0.5		
	NaK ₃ (SO ₄)	ND	0.8	ND	0.5	0.6	ND		
	MgO	ND	2.2	ND	ND	ND	0.3		
	CH	ND	1.8	0.1	0.1	0.1	0.9		

※国産セメントの「普通」は文献3)、「早強」「中庸熱」は1)より引用

Gyp:無水せっこう, Hemi:半水せっこう, Anhy:硬せっこう, ND: 不検出

ア産のセメントの密度は 3.12 g/cm³ で、表中の NP と同程度の値であった。同様にタイ産のセメントの密度は 3.11 g/cm³ で表中の TC と同程度の値であったが、TS はかなり小さい値となっている。比表面積に関しては、インド産 II は 3090 cm²/g と今回測定した中で最も小さく、タイ産 TS は 4030 cm²/g と他のものに比べ大きい値であった。

次に鉱物組成を比較すると、インドネシア産 NS は他のセメントに比べ Calcite が多く含まれている。また、全体としてセメントの密度、比表面積、および C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF の割合を日本のセメントと比較すると、インド産セメントは比表面積、C₃S、C₃A、C₄AF の含有率が日本の中庸熱ポルトランドセメントと近い値を示し、C₂S の含有率は各国の中で最も大きな値となっている。一方で、比表面積は日本の中庸熱ポルトランドセメントよりも小さく、少量混合成分として混合されていると思われる Calcite の含有率も比較的大きいため、インド産セメントを用いたコンクリートでは初期強度の発現性が低くなり、長期強度の増進性が大きいことが予想される。インドネシア産セメントは C₃S、C₃A、C₄AF の含有率ならびに比表面積が国内の普

通ポルトランドセメントに類似した値となっている。タイ産セメントは C₃S の値が日本の早強ポルトランドセメントに概ね相当し、初期強度の発現性は大きく、長期材齢における強度増進性は低いことが予想される。これらの予測と実測値との比較は本論 3.2 に記す。

次に、表 2 に FA の密度、ブレン比表面積、および鉱物組成の測定結果を示す。表中には、比較のため国産 FA の例を文献 3)より引用して示している。FA の密度は大凡約 2.2~2.4g/cm³ 前後であり国内産のものと同程度であるが、インドネシア産 FA(NS)は 2.7g/cm³ と、非常に大きい値となっている。これは文献 3)や 4)にも見られるが、亜瀝青炭を燃焼炭とした FA の特徴であり、歴青炭を燃焼炭とした多く

の FA が灰色をしているのに対し、茶褐色の灰となっている。比表面積に関しては、NS が 4420 cm²/g と大きな値であったが、全体として国内で見られる FA と大差なかった。強熱減量は同じ国の FA であっても、FA によって大きく異なることがわかる。文献 3)で用いられている FA を見ても、同様であった。

鉱物組成に関しては、インド産 IU および IH は表中の Glass、すなわち化学的に不安定で反応性の高い非晶質の含有率が他と比較して小さく、非晶質を除いた組成の大部分を、化学的に安定な Quarts, Mullite, Magnetite が占めている。また、文献 3)と同様、インドネシア産 NS は Periclase(MgO)を、タイ産 TL は Anhydrite(CaSO₄)を含むなどの特徴がある。また、タイ産 TL およびインドネシア産 NS においてはセメント鉱物である C₃S や C₂S 等の化合物が見られた。タイ産の FA に関しては、文献 3)でも同様の含有が認められ、Glass が多いことも含め同国の FA の特徴かと思われる。インドネシア産 NS は Magnetite を多く含有し、このことが同灰の密度が大きいことや茶色の原因とも考えられる。以上のように、密度、ブレン比表面積、鉱物組成には産地によって特徴があり、また、

表2 フライアッシュの諸元

国	インド		インドネシア		タイ		国産(例)	
記号	IU	IH	NP	NS	TL	TR	J1	
密度(g/cm ³)	2.27	2.15	2.35	2.65	2.43	2.16	2.31	
比表面積(cm ² /g)	3210	3480	3620	4420	3530	3310	4110	
強熱減量(%)	0.92	0.67	1.62	1.00	0.07	2.37	2.27	
鉱物組成(%)	Glass	53.5	49.4	61.6	66.5	81.8	74.1	69.9
	Quartz	24.2	19.8	12.6	7.7	0.5	12.0	9.4
	Mullite	18.3	27.9	19.4	10.8	2.3	9.5	19.9
	Magnetite	2.6	2.2	3.2	9.1	4.6	1.9	0.57
	Lime	0.5	ND	1.6	ND	2.0	0.1	0.19
	Anhydrite	ND	ND	ND	ND	3.2	ND	
	Wollastonite	ND	ND	ND	1.0	ND	ND	
	Cement	ND	ND	ND	2.1	5.7	ND	
	Calcite	ND	ND	ND	0.3	ND	ND	
	Periclase	ND	ND	ND	1.6	ND	ND	

※国産フライアッシュは文献3)より引用

ND: 不検出

表3 FA内割混合コンクリートの調査

国	セメント	FA	W/P (%)	FA置換率(%)	単位水量(kg/m ³)	粗骨材量(kg/m ³)	細骨材量(kg/m ³)
インド	II	IU	60,50,45	0,20,30	170 (NP単味)	1069	s/aに 応じる
		IH					
インドネシア	NP	NP					
		NS					
タイ	TC	TL					
		TS					

同じ国でも異なることもあるということが確認された。

表3にコンクリートの調査を示す。セメントとFAは実態に合わせて同国同士で組み合わせるものとし、例えばII-IUのように表記する。練混ぜ水は水道水を使用した。混和剤は、現地で用いられているものを用いることとし、コンクリートのスランプ値が目標値である12.5±2.5cmを満たさないときに適量使用した。調査に関して、インドネシアとタイに関してはセメントが2種類、FAが2種類あるが、今回は材料の量の関係で、各セメントに対して1種類のFAの調査で実験を行った。各調査でW/Pは60%、50%、45%の3パターンを設定したため、組合せはインドが15調査、インドネシア、タイは18調査あり、計51調査とした。

2.2 実験概要

現地の気温を想定して、練混ぜは室温30℃に設定した恒温室内で実施し、スランプ、練上がり温度を測定した。スランプはJIS A 1101に従い、試験は各バッチにつき1回行った。目標値としては、スランプは12.5±2.5cm、練上がり温度は30±2℃とした。また、JIS A 1132に準じて直径100mm、高さ200mmの円柱試験体を作成し、封緘して翌日まで上記環境下に静置した後に脱型し、試験材齢まで30±2℃に設定した水槽内で水中養生を行った。なお、後述するが、一部室温20℃に設定した室内で練混ぜを行い、20℃±2℃に設定した水槽内で水中養生を行ったものもある。圧縮試験はJIS R 5201に従い、材齢3日、7日、14日、28日、91日で行った。試験体は各3体とした。材齢28日に強度試験を行う試験体ではヤング係数も測定した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

1) 混和剤量

各調査でスランプの目標値(12.5±2.5cm)を満足するために使用したAE減水剤の量を図1に示す。なお、先に述べたように今回用いた混和剤は国毎に1種類ずつ現地で実際に用いられているものを使用している。まずFA無混合の場合に着目すると、AE減水剤が異なるので国毎の単純な比較は適切ではないが、大まかな傾向としてインドは混和剤量が極端に少なかったのに対しインドネシア、タイは使用量が比較的多かった。また、インドネシアではFA無混合の場合にセメントの違いによって必要量が大きく異なっており、その結果FAを混合した場合もNP-NPはNS-NSに比べ、使用量が多くなっている。一方、タイに関しては、FA無混合の場合、セメントの違いによる混和剤の必要量

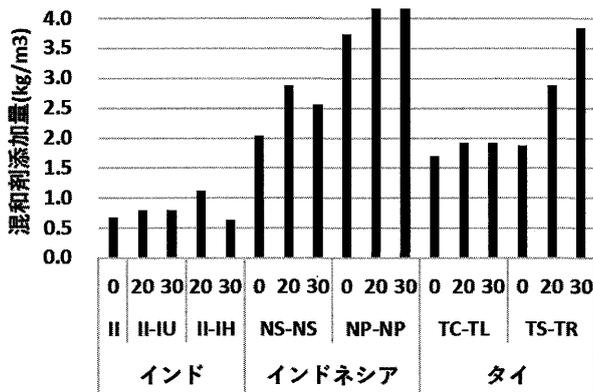


図1 各調合の混和剤添加量(W/P50%)

にあまり差はなかったが、TC-TLでは使用量の差が小さかったのに対し、TS-TRでは、FA置換率が増える毎に必要な量が大きく増加していることが特徴的である。これは、FA(TR)の強熱減量が比較的大きいことも要因として考えられる。

3.2 強度発現性状

1) 各国のFA無混合コンクリートの強度発現

図2に各国のセメントを用いたFA無混合コンクリートの圧縮強度の発現性状を、図3に同じく水粉体比と3日、28日強度との関係を示す。まず国ごとの初期強度に着目すると、インドのセメント(II)を用いたコンクリートの圧縮強度が小さいことがわかる。タイは3カ国の中で最も初期強度が大きく、これらの結果は先に述べた使用材料の物性からの強度予測と概ね一致し

た。次に、長期強度に着目すると、どの国も初期強度ほどの差はなくなっており、初期強度が小さかった試験体ほど、大きな強度増進を示す傾向が見られた。これに対して、文献3)では、モルタルを用いたの強度試験結果ではあるが、タイのセメントについては、初期強度は本実験と同様に他国と比較しても大きな値を示していた。一方、インドネシアのセメントの初期強度はタイのセメントと同程度の値を示しており、本実験よりも大きな値となっている。また、本実験からは全体として強度推移は国によってばらつきが大きいという結果が得られた。また、2章で鉱物組成から各国のコンクリートの強度推移の予測をしたが、圧縮強度の推移がインド産セメントは日本の中庸熱セメント、インドネシア産セメントは普通セメント、タイ産セメントは早強セメントに概ね相当することが確認された。

2) 各国のFA内割混合コンクリートの強度発現

図4に各国FA内割混合コンクリートの材齢経過に伴う圧縮強度の発現性状を示す。FA無混合の場合と比較して、FA置換率が大きくなるほど初期強度が小さくなるが、その後、FAのポズラン反応による強度増進のため、材齢の経過とともにFA無混合の場合との差が縮まっていることがわかる。それぞれの国に着目すると、インドの場合、FA(IU)とFA(IH)との組合せを比較してみると、FA(IU)の場合、置換率20%、30%共にFA無混合の場合と比較して初期強度の低下が見ら

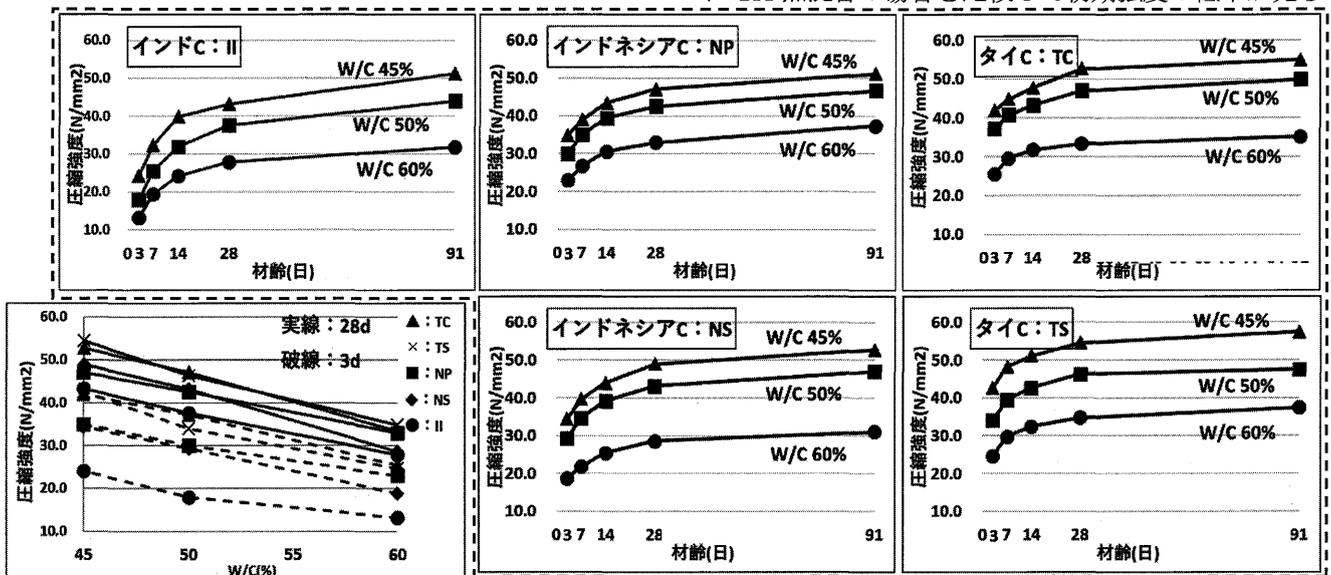


図3 各国FA無混合の水粉体比と3日、28日強度との関係

図2 各国のセメントを用いたFA無混合コンクリートの圧縮強度の発現性状

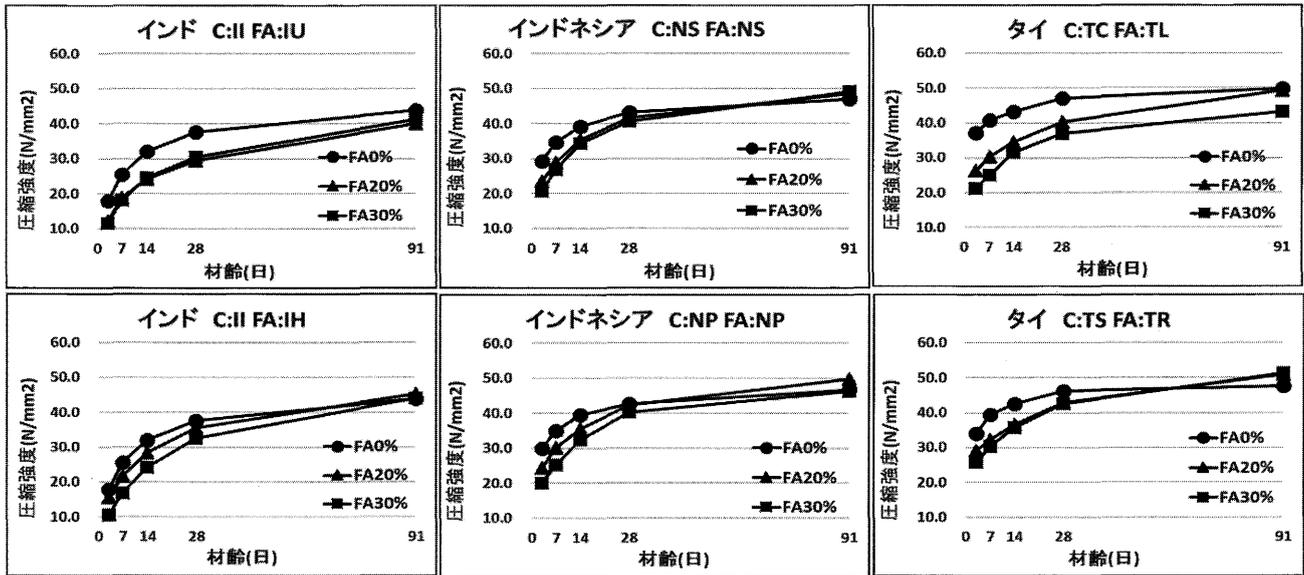


図 4 FA 内割混合時における圧縮強度の発現性状

れたが、FA(IH)では、置換率 20% の場合の強度低下は小さかった。同様にインドネシアの両組合せを比較すると、FA の密度や比表面積が大きく異なるが、材齢 91 日における強度はどちらも FA 無混合の場合と同等かそれ以上の強度を発揮している。また、タイは FA 無混合の場合のそれぞれの強度にあまり差がなかったが、FA を混合した場合の強度低下が FA(TL)の方が大きくなっており、長期強度も FA 無混合の場合より低い値となった。文献 3)でも、FA(TL)と同様に、タイ産 FA を混合したものは、FA 無混合の場合に比べ初期強度の低下が他国よりも大きくなっている。タイの双方の組合せに比較的目立った違いが見られた理由の一つとして、FA(TL)に含まれていたセメント鉱物(C₃S,C₂S)

が強度発現に影響を与えている可能性が挙げられるが、これに関しては、現在解析にあたっているところである。なお、ここでは水粉体比 50% のもので比較検討を行っているが、水粉体比 60%、45%についても概ね同様の結果が得られた。

3) 水粉体比による圧縮強度の変化

図 5 に、各国における FA 置換率による 3 日強度から 28 日強度への変化を、水粉体比毎にそれぞれ示す。3 日強度と 28 日強度を比較すると、3 日強度では FA 置換率が大きくなるにつれて圧縮強度は低くなっているが、材齢 28 日では、ほとんどの FA 内割混合コンクリートにおいて、FA 置換率が大きくなっても、FA 無混合の場合との強度の差が見られず、FA 無混合の場

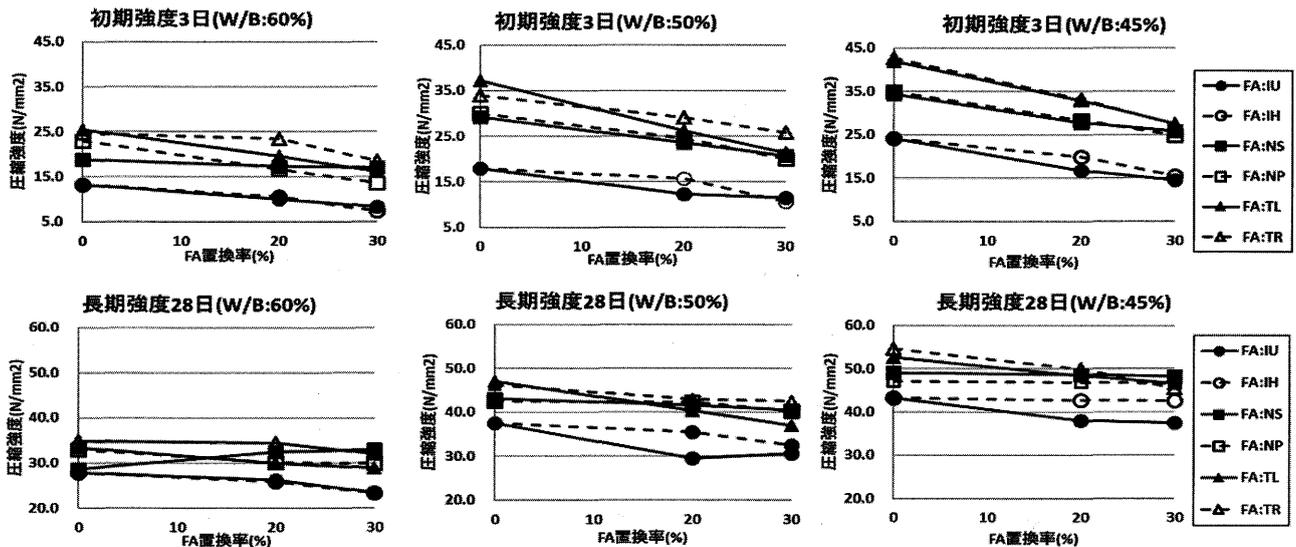


図 5 3 日強度と 28 日強度の FA 置換率による変化

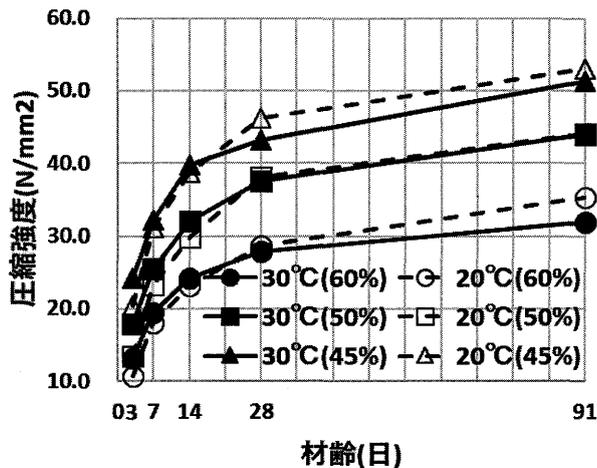


図6 養生温度の違いによる強度発現性

合と同程度まで長期強度が増進していることがわかる。

4) 養生温度による強度発現性の比較

養生温度による強度発現性の違いを検証するために、インド産 II-IH を使用して、練混ぜ温度と養生温度を $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に設定した。その強度試験の結果を、まず FA 無混合の場合に着目し図 6 に示す。初期強度はいずれの水粉体比の場合も 30°C 養生の方が 20°C 養生のものよりも大きい、材齢 28 日以降は 20°C 養生の強度が 30°C 養生の場合と比較して同程度以上となっている。これは国内の暑中環境下における傾向と同様である。

一方、FA を混合した場合の圧縮強度の推移として 3 日、7 日、28 日強度にそれぞれまとめたものを図 7 に示す。材齢 3 日では 30°C 養生と 20°C 養生の場合を比較すると、FA 置換率の増加による強度低下の度合いは同程度であったが、 30°C 養生の場合の方が強度が大きくなった。さらに、材齢が経過するに伴い、 30°C では 20°C 養生で見られた材齢 3 日における FA 置換率増加に伴う強度低下が軽減され、材齢 28 日の 20°C 養生

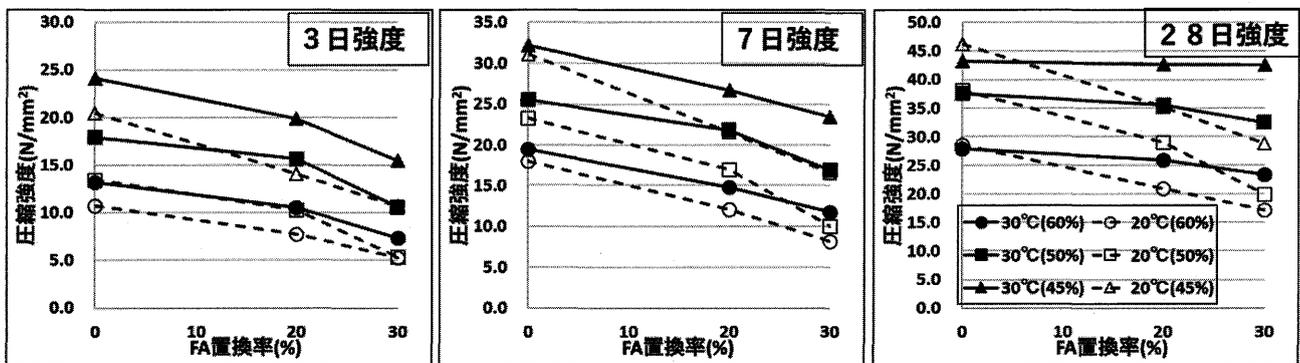


図7 養生温度と材齢3日から28日におけるFA置換率毎の強度発現性の関係

では FA 置換率が増えると共に強度が低くなっているのに対し、 30°C 養生では FA を混合した試験体全てが FA 無混合の場合より強度が高くなった。文献 3) でも同様の結果が得られており、これは高温による FA のポズラン反応がより活発になったためと考えられ、養生温度が高いことは、初期強度発現性の改善ならびに長期強度増進に有益に働くことが確認された。

4. 鉱物組成推定結果と圧縮強度の関係

各国のセメント中の C_3S 含有率と、FA 無混合のコンクリートの圧縮強度の関係について図 8 に示す。材齢 3 日、28 日共に圧縮強度は C_3S 含有率が多いほど大きくなる。また、 C_3S 含有率に対する 3 日強度と 28 日強度の線形近似直線の傾きが 3 日強度の方が大きいことから、 C_3S の効果は 3 日までの強度発現により大きく影響していることがわかる。

また、 C_2S 含有率と圧縮強度の関係についても図 9 に示すように、 C_2S の含有率が多いほど 3 日強度に対

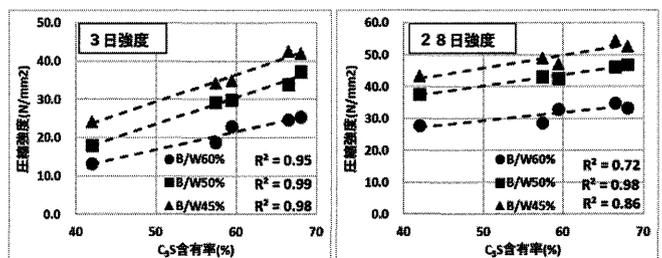


図8 3日、28日強度と C_3S 含有率との比較

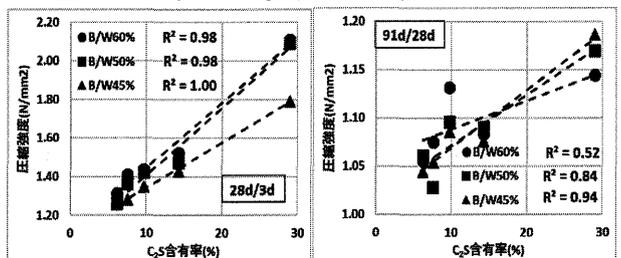


図9 28d/3d, 91d/28d と C_2S 含有率との関係

する 28 日強度(図中の 28d/3d), 28 日強度に対する 91 日強度(同, 91d/28d)の伸びも大きくなることがわかる。

5. FA 内割混合コンクリートの強度予測式

5.1 強度予測式の検討

東南アジアにおけるセメントや FA の品質変動は国内よりも大きいものと懸念され、情報の蓄積も十分ではないが、そのような状況下においてもコンクリートの適切な品質管理が求められる。本研究では、現地の建築現場における強度管理を想定し、極力簡易で高精度の推定式を策定することを試みた。推定精度は±5%を目標とした。

図 10 はインド産 II-IU および II-IH を用いたコンクリートの強度を示したものである。置換率毎に、3 日強度と 28 日強度の間に高い相関が認められる。他国においても同様の傾向が見られた。図 11, 12, 13 は、各国について置換率毎に 3 日強度と 28 日強度の相関をとったものである。先に示したように、国によってセメントの特徴が異なるため傾きや切片は異なるが、同国同士の組合せに限定すれば、どの置換率においても高い相関係数での線形近似が可能であることがわかる。そこで本研究では、国毎に 3 日強度から 28 日強度を予測する式を作成することとした。

ここではインド産 II-IU を例にとって考える。図

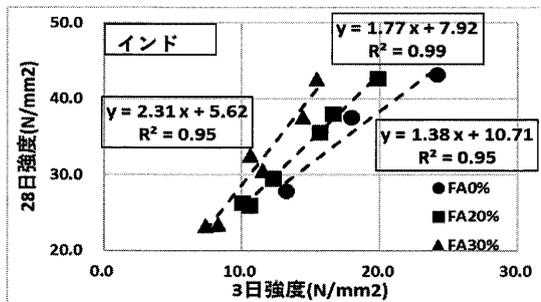


図 10 FA 置換率毎の 3 日, 28 日強度の関係 (インド)

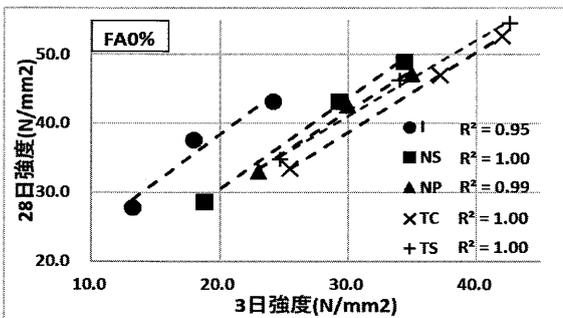


図 11 国毎の 3 日, 28 日強度の関係 (FA0%)

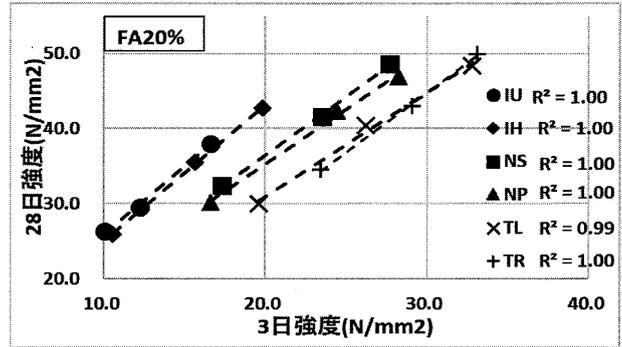


図 12 国毎の 3 日, 28 日強度の関係 (FA20%)

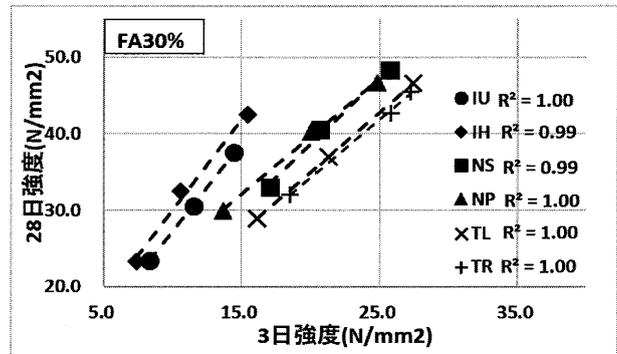


図 13 国毎の 3 日, 28 日強度の関係 (FA30%)

10 より、置換率毎に線形近似より求めた回帰式について、3 日強度にかかる係数を a、切片を b とする。表 4、図 14 より、a と置換率 r の相関は凡そ線形近似でき、回帰式より係数 A を次のように求めた。

$$A = 2.92r + 1.33 \quad (1)$$

また、表 4、図 15 より、回帰式から係数 B を次のように求めた。

$$B = -16.5r + 10.8 \quad (2)$$

これらより、インドのセメントおよび FA を使用したときの 28 日強度予測式は以下のように表せる。

$$f'_{28} = (2.94r + 1.33)f_3 + (-16.5r + 10.8) \quad (3)$$

f'_{28} : 28 日強度予測値

f_3 : 実験で得られた 3 日強度

r : FA 置換率 ($0 \leq r \leq 0.3$)

同様にしてインドネシア、タイについての予測式は以下ようになった。

$$\text{インドネシア} : f'_{28} = (1.07r + 1.26)f_3 + (8.84r + 4.87) \quad (4)$$

$$\text{タイ} : f'_{28} = (1.35r + 1.14)f_3 + (-8.95r + 5.49) \quad (5)$$

表 4 予測式の係数と置換率

置換率 r	傾き a	切片 b
0	1.38	10.7
0.2	1.77	7.94
0.3	2.31	5.62

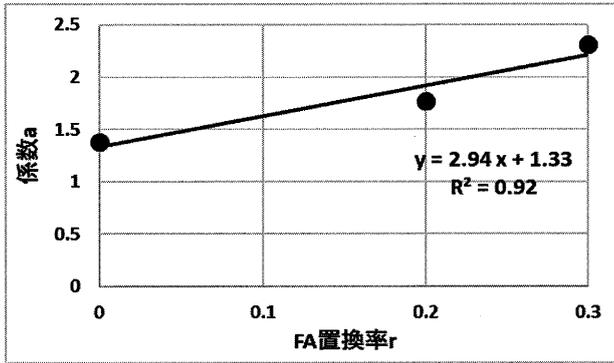


図 14 係数 a と置換率 r の関係

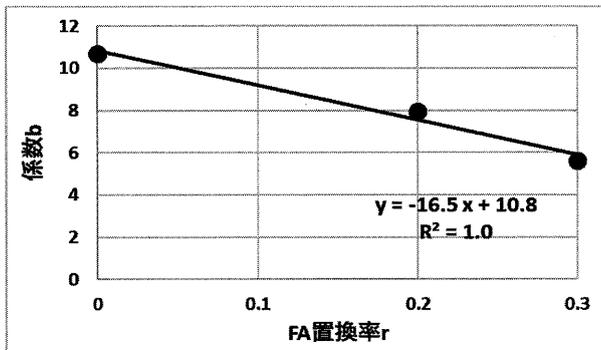


図 15 係数 b と置換率 r の関係

5.2 予測式の検証

図 16 に 28 日強度の予測値と実測値の関係を示す。いずれの国においても、ほとんどの値が±10%の範囲に収まっている。また、実測値の 3 日強度と予測値の 28 日強度の相関を取ると、相関係数 $R=0.91$ と非常に高い値となっており、同様にインドネシア、タイについても $R=0.84$, $R=0.93$ と高い値となった。これにより、国ごとに材料の特徴等の違いは大きいですが、概ねコンクリートの 28 日強度を予測することができたとと言える。これらの結果から、同じ国のセメント、FA であれば、組合せを変えても、概ね高い精度で 28 日強度を推定できると考えられる。

6. まとめ

本論文では、東南アジア産の材料を用いたコンクリートの強度発現特性から強度予測式を作成し、その精度を検討した。得られた知見を以下に示す。

1) 密度、ブレン比表面積、鉱物組成には今回検討した範囲での結果ではあるが、産地による特徴が確認され、インド産セメントは日本の中庸熱セメント、インドネシア産セメントは普通セメント、タイ産セメントは早強セメントに類似した値となっていた。また、これらを用いたコンクリートの圧縮強度では上記を反

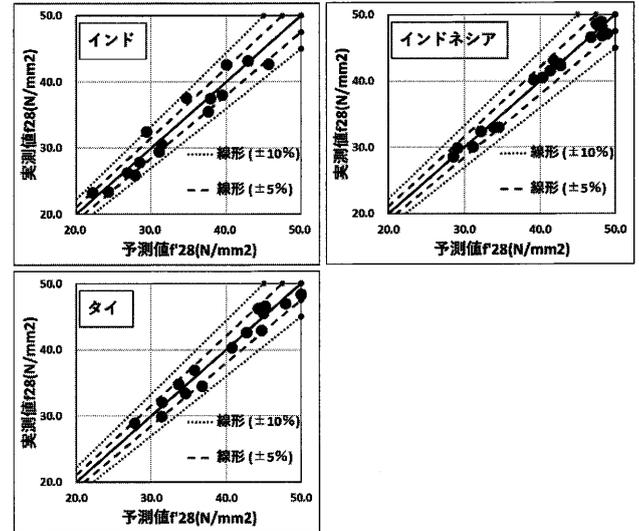


図 16 実測値 f_{28} と予測値 f'_{28} との関係

映した傾向がみられた。

2) 国によって使用材料の特徴は異なっても、強度発現の傾向は概ね類似していることから、FA 置換率を基に国毎に簡易的な強度予測式を作成した。その結果、実測値と予測値の差をいずれの国においても、±10%の範囲にほぼ収める事ができた。

<参考文献>

- 1) 「循環資源貿易における規制と課題 日韓の石炭貿易を事例にー」経済学研究 63-2, 北海道大学, 小島道一, 鄭城尤, 2014.1
- 2) (財)石炭利用総合センター資料(2001)
- 3) 日本コンクリート工学会「混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会」報告書, 2015
- 4) 「亜瀝青炭起源石炭灰を用いたコンクリートの基礎性状に関する研究」九州大学卒業論文 中村香月, 2015

<謝辞>

研究の遂行にあたり、日本シーカ(株)、小山研究室を卒業された神田雄大氏、ならびにその他関係者の皆様に、多岐にわたって多大なるご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

(受理：平成30年10月29日)