

論文 マスコンクリートの温度ひび割れ制御におけるフライアッシュコンクリートの力学特性

石川 嘉崇*1・小林 晋吾*2・野嶋 潤一郎*3・溝渕 利明*4

要旨:「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」では、フライアッシュコンクリートについて、新たな共通試験結果が反映されているが、普通ポルトランドセメントをベースとしてフライアッシュが 18%混和したものに限定されている。本論では、置換率とベースセメントを変えて追加試験を行い、フライアッシュコンクリートの力学特性を比較検討した。その結果、圧縮強度と割裂引張試験の関係および圧縮強度と静弾性係数の関係はマスコンひび割れ制御指針に示される評価式に概ね一致し、圧縮強度と有効材齢の関係についてマスコンひび割れ制御指針に示される評価式に対して適切なパラメータを提案できた。

キーワード: 温度ひび割れ, マスコンクリート, フライアッシュ, 早強ポルトランドセメント, 力学特性

1. はじめに

マスコンクリート構造物の温度ひび割れの制御において温度応力解析を精度よく行うためには、解析における入力値であるコンクリートの物性値を正確に把握することが重要である。コンクリートの断熱温度上昇特性や強度発現性状については、既に多くの試験データの蓄積がなされており、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016 (以下、マスコンひび割れ制御指針)¹⁾に評価式が提示されている。しかしながら、フライアッシュセメントを用いたコンクリートについては、ベースセメントを普通ポルトランドセメントとして置換率が 18%のものに限定されている。

そこで、マスコンひび割れ制御指針の改定の際に実施したフライアッシュを用いたコンクリートの初期物性に関する共通試験²⁾に準拠し、フライアッシュ置換率を増加させた場合および筆者らが研究しているフライアッシュコンクリートの初期強度改善を目的としたベースセメントを早強ポルトランドセメントに変更したフライアッシュコンクリート^{3),4)}とした場合について追加試験を

実施して、試験データを取得することとした。

本報では、コンクリートの養生条件を 20℃の一定温度条件下およびマスコンクリートを想定した高温条件下において実施した各種試験結果のうち、フライアッシュコンクリートの力学特性に関しての試験結果を検討するとともに有効材齢と圧縮強度の関係に関しては、マスコンひび割れ制御指針の評価式に対して適切なパラメータを提案した。

2. 試験概要

2.1 試験水準

試験水準を表-1 に示す。ベースとなるセメントは、普通ポルトランドセメント(OPC), 早強ポルトランドセメント(HPC)および高炉セメント(BB)を用い、混和材としてフライアッシュ(FA)を用いた。ベースセメントとフライアッシュ置換率の組み合わせで、計 8 配合のセメントにより 20℃一定温度条件下(20℃)および簡易断熱条件下(高温①)で各種試験を実施した。

フライアッシュの置換率は 20%を標準とし、普通ポル

表-1 試験水準

W/(C+FA) (%)	温度 条件	セメント種類, FA 置換率							
		OPC			HPC				BB
		FA0%	FA20%	FA30%	FA0%	FA20%	FA20%	FA20%	FA0%
55	20℃	○	○	○	○	○			○
	高温①	○	○	○	○	○			○
45	20℃						○		
	高温①						○		
30	20℃							○	
	高温①							○	

*1 電源開発(株) 技術開発部 茅ヶ崎研究所 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部 修士(工学) (正会員)

*3 (株)開発設計コンサルタント 茅ヶ崎技術事業本部 設備保全技術部 博士(工学) (正会員)

*4 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-2 セメントの諸元および試験成績

銘柄	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	水量 (%)	凝結		安定性	圧縮強さ(N/mm ²)				化学成分(%)				
				始発	終結		1d	3d	7d	28d	MgO	SO ₃	強熱減量	全アルカリ	塩化物イオン
OPC(A)	3.16	3,330	27.4	2-07	3-19	良	—	30.9	46.1	62.9	1.47	2.18	1.97	0.56	0.019
OPC(B)	3.16	3,180	28.2	2-38	3-39	良	—	31.0	48.8	64.2	0.87	1.95	2.34	0.40	0.023
HPC(A)	3.14	4,510	30.3	1-46	2-53	良	26.1	47.8	58.4	68.8	1.78	2.96	0.95	0.49	0.006
HPC(B)	3.14	4,480	31.2	2-05	3-25	良	25.6	49.2	59.7	66.6	1.07	2.93	1.17	0.40	0.003
HPC(C)	3.13	4,960	29.7	1-35	2-10	良	32.2	48.9	58.5	68.5	1.05	3.03	1.31	0.43	0.017
BB	3.01	3,940	30.3	2-15	3-50	良	—	22.2	35.7	60.5	3.38	1.95	1.77	—	0.010

表-3 フライアッシュの諸元および試験成績

銘柄	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	45μm 残 (%)	品質(%)			フロー値比 (%)	活性度指数(%)		MB 吸着量 (mg/g)
				SiO ₂	湿分	Ig.loss		28d	91d	
FA	2.31	4,000	3.5	59.9	0.1	1.8	108	84	101	0.58

表-4 フライアッシュの成分表

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
成分量 (%)	59.9	24.3	1.8	5.3	0.8	0.3	0.4	1.7

トランドセメントにおいては置換率30%についても試験を実施した。なお、水結合材比については、55%を標準としたが、早強ポルトランドセメントにおいては、水結合材比45%、30%のケースについても試験を実施した。

2.2 使用材料

(1) セメントおよび混和材

普通ポルトランドセメントについては、2銘柄(密度:3.16g/cm³)、早強ポルトランドセメントについては、3銘柄(密度:3.14g/cm³, 3.13g/cm³)を等量混合して使用した。また、高炉セメントB種(密度:3.04g/cm³)を使用した。混和材としてJIS A 6201 II種品(密度:2.31g/cm³, 比表面積:4,000cm²/g)のフライアッシュを使用した。

セメントの諸元および試験成績表は、表-2に示す。なお、高炉セメントB種の高炉スラグ分量は約40%である。フライアッシュの試験成績表及び成分分析結果は、表-3および表-4に示す。

(2) 骨材

細骨材は鬼怒川産の川砂を、粗骨材は栃木産の硬質砂岩砕石5号、6号を1:1(重量比)の割合で混合し使用した。使用骨材の産地、密度を表-5に示す。

(3) 混和剤

混和剤は、AE減水剤、高性能AE減水剤、AE助剤を使用した。水結合材比55%および45%の配合に対しては、AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)を使用した。加えてAE助剤としてセメント種類によりOPC、HPC、BBに対してアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤を使用し、FAに対しては高アルキルカルボ

表-5 使用骨材

試料	種類	産地	密度
細骨材	川砂	日光市塩野室町	2.63g/cm ³
粗骨材	砕石5号、6号	栃木	2.65g/cm ³

ン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤複合体を使用した。また、水結合材比30%の配合に対しては、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)を使用した。

2.3 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

コンクリートの配合を表-6に示す。表-6の配合にて試験練りを行い、所要の初期性状を確認した後、各種試験用の供試体を作製した。目標スランプおよび目標空気量は、水結合材比55%および45%の場合には、それぞれ10±2.5cm、4.5±1%とし、水結合材比30%の場合には、目標スランプフロー50±7.5cm、目標空気量2.0±1%とし、スランプフローの調整は高性能減水剤の添加率により調整した。フレッシュ性状を表-7に示す。スランプ(スランプフロー)および空気量とも概ね目標性能を満足するものであった。

2.4 試験方法

(1) 凝結試験

凝結試験は、JIS A 1147:コンクリートの凝結時間試験方法に準拠し、20°Cの一定温度条件下において実施した。

(2) 強度試験および静弾性係数試験

φ100×200mm 供試体を用い、20°C水中養生および高温履歴条件(高温①)の2種類の養生条件について圧縮強

表-6 コンクリートの配合

配合名	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	目標 空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤	高性能 AE 減水剤	AE 助剤
					W	C	F	S	G1	G2			
OPC+FA0	55	0	4.5	46	170	309	0	822	492	492	0.773	—	0.014
OPC+FA20		20	4.5	46	170	247	62	810	484	484	0.773	—	0.050
OPC+FA30		30	4.5	46	170	216	93	804	481	481	0.773	—	0.094
HPC+FA0	55	0	4.5	46	170	309	0	821	491	491	0.773	—	0.031
HPC+FA20	55	20	4.5	46	170	247	62	809	484	484	0.773	—	0.080
	45	20	4.5	44	170	302	76	746	484	484	0.944	—	0.113
	30	20	2.0	41	160	427	107	675	495	495	—	11.20	—
BB+FA0	55	0	4.5	46	170	309	0	817	489	489	0.773	—	0.025

表-7 フレッシュ性状および凝結試験結果

配合名	W/(C+F) (%)	スランプ, スランプフロー (cm)	空気量 (%)	練上り温度 (°C)	凝結試験結果	
					始発 (hr:min)	終結 (hr:min)
OPC+FA0	55	7.5	4.3	20.9	3:51	5:51
OPC+FA20		9.0	3.6	20.7	4:56	6:33
OPC+FA30		12.0	4.6	20.7	4:59	6:42
HPC+FA0	55	7.5	5.5	20.9	3:37	5:22
HPC+FA20	55	8.0	3.5	20.9	3:57	5:51
	45	7.0	3.5	21.1	3:50	5:25
	30	47.0	1.6	20.7	5:15	7:00
BB+FA0	55	7.5	5.2	20.1	5:19	8:48

度試験 (JIS A 1108: コンクリートの圧縮強度試験方法に準拠), 割裂引張強度試験 (JIS A 1113: コンクリートの割裂引張強度試験方法に準拠) および静弾性係数試験 (JIS A 1149: コンクリートの静弾性係数試験方法に準拠) を実施した。

高温①では, 簡易断熱型枠に供試体を設置し, 供試体の隙間に発泡スチロールビーズ (発砲率 60%, 厚さ 200mm) を挿入した。試験材齢は, 20°C一定温度条件下 (20°C)の場合 3日, 7日, 28日および91日の4材齢, 簡易断熱条件下(高温①)の場合, 1日, 2日, 5日, 14日および最終日の5材齢である。供試体の個数は, 高温履歴条件下(高温①)では各材齢につき2供試体, 20°C水中養生では各材齢につき3供試体とした。

3. 試験結果

3.1 凝結試験結果

表-7 および図-1 にコンクリートの凝結試験結果を示す。普通セメントベースの場合, フライアッシュ無置換に対して, フライアッシュ置換 (20%) することで, 始発, 終結ともに約1時間程度遅延した。ただし, フライアッシュ置換率を20%から30%に増加させた場合の凝結の始発および終結時間の遅延はわずかである。

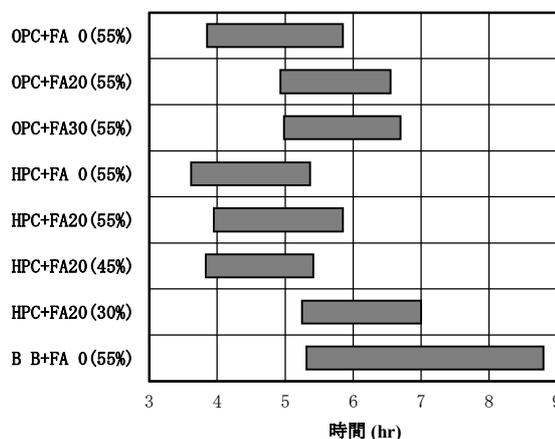


図-1 凝結試験結果

早強セメントベースの場合, フライアッシュ無置換に対して, フライアッシュ置換 (20%) することで, 始発, 終結ともに約30分程度遅延した。また, 水結合材比45%では, 始発および終結とも普通セメントのフライアッシュ無置換とほぼ同等の凝結時間となり, 水結合材比30%では, 高性能 AE 減水剤使用の影響により凝結時間は1時間程度遅延した。

3.2 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-2 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。図に

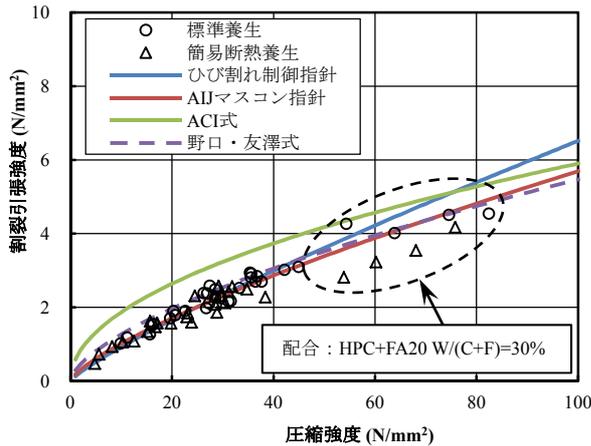


図-2 圧縮強度と割裂引張強度の関係

は、マスコンひび割れ制御指針に示されている割裂引張強度式(式(1))²⁾も併記した。また、比較として日本建築学会 マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説(以下、AIJマスコン指針)に示される引張強度式(式(2))⁵⁾、高強度コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係式として提案されているACI式(式(3))⁶⁾および野口・友澤式(式(4))⁷⁾も併せて示す。

試験から得られた圧縮強度と割裂引張強度の関係は、圧縮強度が60N/mm²程度まではマスコンひび割れ制御指針の式(1)と概ね一致した。一方で、圧縮強度60N/mm²以上において式(1)は引張強度を過大評価する傾向を示した。この傾向は、参考文献²⁾でも同様となっている。なお、図-2に示すとおり、該当箇所はHPC+FA20で水結合材比30%の配合である。

これより、OPC+FA30やHPC+FA20などのマスコンひび割れ制御指針で対象とされていない配合においても、圧縮強度が60N/mm²以上の領域でなければ、式(1)が適用可能と考えられる。また、参考文献²⁾においては高強度領域に対しては式(1)の係数を見直すことで適用可能であることが示されており、本試験結果についても同様と考えられる。

$$f_i(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \quad (1)$$

ここに、

$f_i(t_e)$: 有効材齢 t_e における引張強度(N/mm²)

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における圧縮強度(N/mm²)

C_1, C_2 : 係数($C_1=0.13, C_2=0.85$)

$$f_i(t_e) = 0.18 \cdot f'_c(t_e)^{0.75} \quad (2)$$

ここに、

t_e : 有効材齢(日)

$$f_i = 0.59 \cdot f'_c^{0.5} \quad (3)$$

ここに、

f_i : 引張強度(N/mm²)

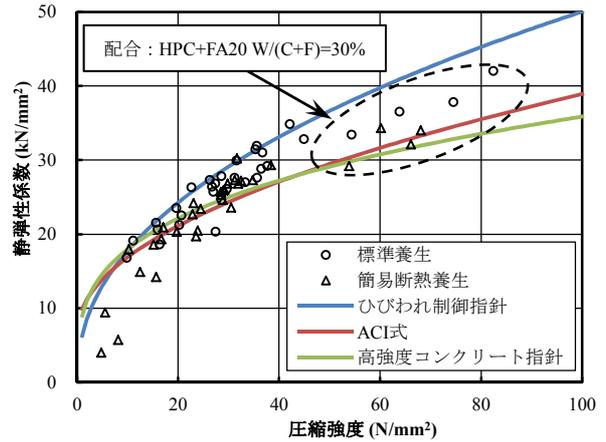


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

f_c : 圧縮強度(N/mm²)

$$f_i = 0.291 \cdot f_c^{0.637} \quad (4)$$

3.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-3に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。マスコンひび割れ制御指針に示されている静弾性係数式(式(5))²⁾も併記する。また、比較として高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式であるACI式(式(6))⁶⁾および日本建築学会 高強度コンクリート施工指針・同解説の関係式(式(7))⁸⁾を併せて示す。なお、式(6)および式(7)におけるコンクリートの単位体積重量は2.3t/m³とし、式(7)における k_1, k_2 は1.0とした。

試験から得られた圧縮強度と静弾性係数の関係は、圧縮強度が40N/mm²程度までは式(5)と概ね一致している。一方で、圧縮強度40N/mm²以上において式(5)は静弾性係数を過大評価する傾向を示した。この傾向は、参考文献²⁾でも同様となっている。なお、図-3に示すとおり、該当箇所はHPC+FA20で水結合材比30%の配合である。

また、圧縮強度が20N/mm²程度以下の領域において、本試験結果では簡易断熱養生の圧縮強度が近似式を下回っており、若材齢時のフライアッシュコンクリートにおいては静弾性係数を過大評価する可能性もある。

これより、OPC+FA30やHPC+FA20などのマスコンひび割れ制御指針で対象とされていない配合においても、圧縮強度が40N/mm²以上の領域でなければ、式(5)が適用可能と考えられる。また、参考文献²⁾においては高強度領域に対しては、式(5)の係数を見直すことで適用可能であることが示されており、本試験結果についても同様と考えられる。

$$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4} \quad (5)$$

ここに、

$E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるヤング係数(kN/mm²)

凡例 ○：標準養生 △：簡易断熱養生 —：マスコンひび割れ制御指針式 —：今回提案

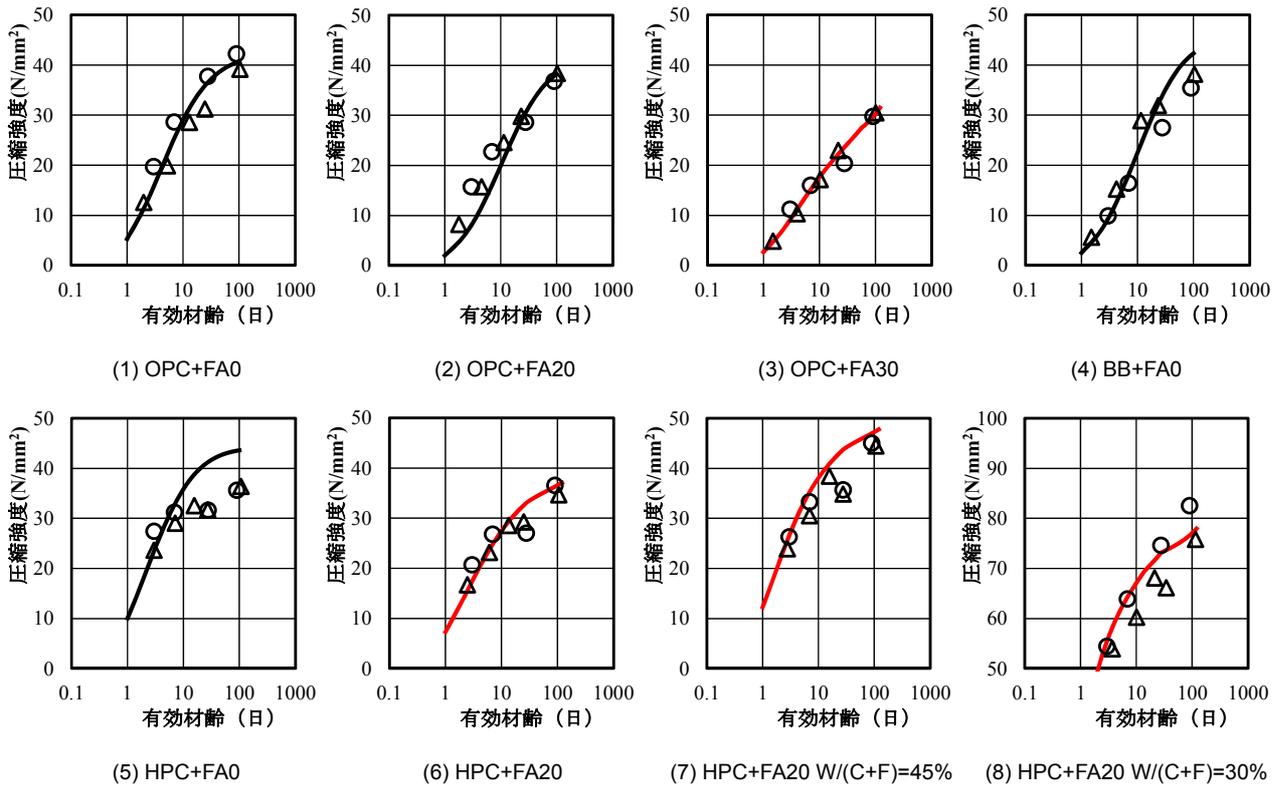


図-4 圧縮強度と有効材齢の関係

C_3, C_4 : 係数($C_3=6300, C_4=0.45$)

$$E = (3320 \cdot f_c^{0.5} + 6900) \times \left(\frac{\gamma}{2.346} \right)^{1.5} \quad (6)$$

ここに、

E : ヤング係数(N/mm²)
 f_c : 圧縮強度(N/mm²)
 γ : コンクリートの単位容積質量(t/m³)

$$E = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \quad (7)$$

ここに、

σ_B : 圧縮強度(N/mm²)
 k_1, k_2 : 骨材, 混和材の種類により定まる定数

3.4 有効材齢と圧縮強度の関係

図-4 にセメント種類ごとの有効材齢と圧縮強度の関係を示す。OPC+FA0, OPC+FA20, BB+FA0, HPC+FA0, については、マスコンひび割れ制御指針に示されている圧縮強度式(式(8))を黒線にて併記する。

図-4 より、OPC+FA0, BB+FA0 および OPC+FA20 では、試験値はマスコンひび割れ制御指針に示される圧縮強度式と概ね一致した。ただし、HPC+FA0 においては、式(8)は有効材齢が大きい場合、圧縮強度が過大評価されているが、これは参考文献²⁾と同様の傾向を示している。本試験結果は、有効材齢 10 日から 100 日の間の圧縮強度

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad (8)$$

ここに、

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発見を表す係数
 ($a = \alpha_1 + \beta_1(C/W), b = \alpha_2 + \beta_2(C/W)$)
 S_f : セメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢(日)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n における圧縮強度(N/mm²)
 ($f'_c(t_n) = p_1 + p_2(C/W)$)

の増加が少なかったため、この傾向はより大きくなっている。

マスコンひび割れ制御指針に記載がない配合について、式(8)の係数 a, b をフィッティングにより設定した。フィッティングの結果を図-4 に赤線(本報で設定した係数による式(8)の計算結果)で示し、設定した係数を表-8 にまとめて示す。以下に、試験結果および設定された係数に関する考察を述べる。

フライアッシュ置換率を増加させた OPC+FA30 の場合は、セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発見を表す係数のうち、 α_1, β_1 に関しては低熱ポルトランドセメントの値に近いものとなった。また、 α_2, β_2

表-8 圧縮強度発現式の各係数

配合名	管理材齢 t_n (日)	$a = \alpha_1 + \beta_1(C/W)$		$b = \alpha_2 + \beta_2(C/W)$		S_f	$f'_c(t_n) = p_1 + p_2(C/W)$	
		α_1	β_1	α_2	β_2		p_1	p_2
OPC+FA30	28	20.5	-3.16	0.561	0.1093	0.47	-27.2	31.8
	56	31.8	-3.68	0.692	0.0845		-24.2	32.9
	91	51.0	-5.70	0.792	0.0472		-22.4	34.0
HPC+FA20	7	3.27	-0.816	0.512	0.122	0.30	-22.6	26.1
	14	3.96	-1.04	0.711	0.0759		-18.2	26.3
	28	4.39	-1.19	0.841	0.0428		-14.9	26.4
	91	4.79	-1.32	0.966	0.0096		-11.5	26.5
参考：マスコン ひび割れ制御指針 ²⁾ フライアッシュセメントB種	28	13.4	-3.20	0.514	0.1160	0.47	-27.2	31.8
	56	16.2	-4.12	0.708	0.0739		-24.2	32.9
	91	18.4	-4.80	0.850	0.0456		-22.4	34.0

に関しては中庸熱ポルトランドセメントの値に近いものとなった。 p_1, p_2 値に関しては、フライアッシュセメントB種と同値と仮定した。

HPC+FA20については、基本的な強度上昇カーブが早強ポルトランドセメントと同様の結果であった。早強ポルトランドセメントの係数 p_2 を変更することにより、良好なフィッティングが可能となった。

水結合材比を変えた HPC+FA20 シリーズの各係数は、水結合材比 55%の試験値でフィッティングさせて求めたものを基本として、その他の水結合材比の試験値に対しても、マスコンひび割れ制御指針の式(式(8))の結合材水比の影響評価と同様の適合性を示すことを確認した。

4. まとめ

本研究では、各種セメントをフライアッシュで置換したマスコンクリート構造物を対象とした温度応力解析の精度向上に資する資料を得ることを目的として、フライアッシュ混和率とセメント種類を変化させてフライアッシュコンクリートの力学特性を検討した。

本研究により得られた知見を以下に示す。

- ① 圧縮強度と割裂引張試験の関係は、圧縮強度 60N/mm^2 以上の領域ではマスコンひび割れ制御指針の評価式は引張強度を過大評価する傾向を示したが、これ以下の圧縮強度領域では試験値はマスコンひび割れ制御指針の評価式と概ね一致した。
- ② 圧縮強度と静弾性係数の関係において、圧縮強度 40N/mm^2 以上の領域ではマスコンひび割れ制御指針の評価式は静弾性係数を過大評価する傾向を示したが、これ以下の圧縮強度領域では試験値はマスコンひび割れ制御指針の評価式と概ね一致した。
- ③ 圧縮強度と有効材齢の関係においては、マスコンひ

び割れ制御指針の評価式において係数が示されていない配合条件の圧縮強度発現性状について、係数を変化させてフィッティングを行った結果、概ね良好な適合性を示すことが確認され、マスコンひび割れ制御指針の評価式に対して適切なパラメータを提案できた。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016.11
- 2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針改訂調査委員会報告書, 2014.6
- 3) 石川嘉崇, 今岡知武, 鷲尾朝昭, 中村英佑：初期強度改善を目的とした早強ポルトランドセメントベースのフライアッシュコンクリートにおける養生と強度発現性, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-199, pp.397-398, 2014
- 4) 今岡知武, 石川嘉崇, 鷲尾朝昭, 中村英佑：早強セメントをベースセメントとした養生条件が異なるフライアッシュコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.151-156, 2015
- 5) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, p12, 2008.2
- 6) ACI Committee 363 : State of the Art Report on High Strength Concrete, ACI Journal, July-August, 1984
- 7) 野口貴文, 友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係, 日本建築学会論文報告集, 第 472 号, pp.11-16, 1995
- 8) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針・同解説, pp.47-48, 2013.11