

令和元年6月18日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06577

研究課題名(和文)改質フライアッシュのポゾラン反応がコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of pozzolanic reaction on resistance of shrinkage cracking of mortar containing thermally processed fly ash

研究代表者

佐藤 嘉昭 (SATO, YOSHIAKI)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：30038111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：フライアッシュ原粉を加熱処理して強熱減量を1%以下に低減した改質フライアッシュ(CfFA)のポゾラン反応を示差熱分析と細孔径分布(水銀圧入法)を用いて確認した。そのCfFAを混和したモルタル供試体について鉄筋埋設型の乾燥収縮ひび割れ試験を行い、CfFA混和によって収縮ひび割れ抵抗性がCfFA無混和の基準モルタルよりも向上することを明らかにした。このことを解析的に明らかにするため、部材内に生じる収縮応力をFEMを用いて算定し、収縮応力の分布が緩やかであることがひび割れの発生を遅延させていることが分かったが、ポゾラン反応が収縮ひび割れに及ぼす影響については十分な検討までには至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) CfFAの特徴であるポゾラン反応についてSEM画像解析の結果から組織が緻密化していることは確認されているが、収縮ひび割れ抵抗性に関して、ポゾラン反応の観点から具体的に評価した例は見当たらない。
 (2) 構造物の設計や施工に携わる技術者にとって収縮ひび割れ問題は早急に解決しなければならない課題であり、コンクリート工学分野における重要な研究テーマとして位置づけられている。CfFAコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を明らかにすることは、今後一般的となるであろう長寿命のコンクリート構造物を建設していく上で必要不可欠である。

研究成果の概要(英文)：The pozzolanic reaction of thermally processed fly ash (Carbon-free Fly Ash, CfFA) with LOI less than 1% was investigated by using the differential thermal analysis and the pore size distribution obtained by the mercury injection method, and the drying shrinkage cracking tests with the embedded reinforcing bar were performed. It was found that mortar specimen containing this CfFA showed the improvement of shrinkage cracking resistance compared to the reference mortar without CfFA. And then, in order to clarify this effect, FEM analysis was adopted to estimate the restrained shrinkage stress generated in mortar specimen. It seems that the occurrence of cracking is delayed because the distribution of stress in CfFA mortar is more gentle than that in reference mortar, but the effects of pozzolanic reaction of CfFA on the shrinkage cracking were not discussed in detail.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：加熱改質フライアッシュ ポゾラン反応 示差熱重量分析 モルタル 乾燥収縮ひび割れ試験 ひび割れ発生時期 拘束応力 FEM解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フライアッシュ(以下、FA)は、ポゾラン反応による長期強度発現性や組織の緻密化による水密性の向上、アルカリシリカ反応の抑制効果などコンクリートの耐久性向上に寄与する大変に魅力的な混和材料の一つとして知られている。構造物としての長期耐久性を確保するためにはひび割れが生じないこと、特に、比較的初期に生じる収縮ひび割れが生じないことが理想であるが、FAコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性能に関して、十分な知見が得られているとは言えない。さらに、ポゾラン反応が収縮ひび割れやひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討されていない。

2. 研究の目的

(1)ポゾラン反応率の評価

フライアッシュ原粉を加熱処理して強熱減量を1%以下に低減した改質フライアッシュ(CfFA)のポゾラン反応に関して、現状、JIS種、種、種相当のCfFAが製造できることから、これらのCfFAを用いてセメントペースト供試体を作製し、比表面積の違いや置換率、養生温度の違いがポゾラン反応による組織の緻密化に及ぼす影響を示差熱分析試験(DTA)と細孔径分布試験を用いて明らかにすることとした。また、これまでに提案されているフライアッシュのポゾラン反応率に関する構成式について検討を行うこととした。

(2)乾燥収縮ひび割れ実験

小型モルタル供試体を用いた鉄筋埋設型の収縮ひび割れ試験方法を確立するために、先ず、鉄筋埋設による断面欠損や定着長さの影響を把握し、実験方法の妥当性を確認した上で、CfFAモルタルの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼすポゾラン反応の影響を明らかにすることとした。モルタルはコンクリート調査から粗骨材部分を取り除いた調査としている。

(3)FEMによる乾燥収縮応力解析

CfFAを混和したモルタルの拘束ひび割れ試験では、CfFAモルタルは基準モルタルに比べ乾燥収縮ひび割れが小さくなるとともに、モルタルに発生する拘束応力の増加速度も小さくなるため、ひび割れ発生の遅延および抑制効果が確認された。そのCfFA混和による収縮ひび割れ抑制効果を有限要素法(FEM)を用いて解析的に検討することとした。

表1 調査および養生温度

No.	W/B (%)	FA種類	FA置換率 (%)	計量値 (g)			合計 (g)	C+FA (g)	養生温度			
				W	C	FA			5	20	40	60
1	45	-	0	500	1111	0	1611	1111	-	○	-	-
2	45		10	500	1000	111	1611	1111	-	○	-	-
3	45		20	500	889	222	1611	1111	-	○	-	-
4	55	-	0	500	909	0	1409	909	○	○	○	○
5	55		10	500	818	91	1409	909	○	○	○	○
6	55		10	500	818	91	1409	909	○	○	○	○
7	55		20	500	727	182	1409	909	○	○	○	-
8	55		10	500	818	91	1409	909	○	○	○	-
9	55	原粉	10	500	818	91	1409	909	-	○	-	-
10	55	CfFA	10	500	818	91	1409	909	-	○	-	-
11	65	-	0	500	769	0	1269	769	-	○	-	-
12	65		10	500	692	77	1269	769	-	○	-	-
13	65		20	500	615	154	1269	769	-	○	-	-

表2 フライアッシュの物性

試料名	二酸化ケイ素 (%)	強熱減量 (%)	湿分 (%)	密度 (g/cm ³)	粉末度		フロー値比 (%)	活性度指数 (%)		平均粒径 (μm)
					45μm 以下の残分 (%)	比表面積 (cm ² /g)		28日	91日	
RX 原粉	59.90	8.50	0.45	2.24	19.02	3587	96	87	100	15.91
RX CfFA	67.73	0.83	0.08	2.25	20.73	3390	99	88	98	17.90
RX CfFA 種	68.07	0.70	0.14	2.44	0.00	5789	108	97	100	5.87
RX CfFA 種	65.67	0.62	0.11	2.22	26.18	3043	97	85	95	22.41
RX CfFA 種	61.88	0.58	0.13	2.22	39.44	2499	90	84	87	33.78

表3 実験計画概要

シリーズ	モルタルの調査条件		乾燥時の環境条件		備考
	W/C (%)	CfFA置換率 (%)	温度 ()	湿度 (%)	
	45、55、65	0、10、20	20	60	
	55	0、10、20	20	40、50、60	練り混ぜは60%R.H下 試験は各環境温度毎
			10、20、35	60	

3. 研究の方法

(1) ポゾラン反応

表1にペーストの調合および養生温度を、表2に使用したFAの物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）を使用した。FA置換率は0、10、20%の3水準、またFA種類は加熱改質処理して得られるCfFA、それを分級した種、種、種、および原粉を使用した。W/Bは45、55、65%の3水準であり計13調査とした。

示差熱重量分析試験(TG-DTA)

示差熱重量分析装置(TG-DTA)による示差熱重量分析(昇温速度 15 /min 、温度 $950\text{ }^\circ\text{C}$ まで)を行った。測定結果の一例を図1に示すが、図2に示す示差熱重量分析の解説図より、測定開始時点からの(a)105、(b)脱水反応開始点、(c)脱水反応終了点、(d)脱炭酸点、(e)950、各点の質量減少を求め、その結果を用いて、結合水量、水酸化カルシウム量並びに炭酸カルシウム量を算出した。

細孔径分布測定(水銀圧入法)

供試体をアセトンに浸漬させ硬化体の反応を停止させた後 $105\text{ }^\circ\text{C}$ で乾燥を行い、水銀圧入式ポロシメータを用いて直径約 $6.4\text{nm} \sim 950\text{ }\mu\text{m}$ の細孔径分布を測定した。

ポゾラン反応率の測定

JIS R 5202 セメントの化学分析方法(6.塩酸-炭酸ナトリウム方法による不溶残分の定量方法)によってセメント中の不溶残分を定量し、ポゾラン反応率を求めた[1]。

(2) 乾燥収縮ひび割れ実験

材齢28日強度が基準モルタルと同程度となるように調合したCfFAモルタルを用いて(強度寄与率0.3としてW/Bを決定)、養生および乾燥時の温度および湿度を変化させた条件下で、拘束ひび割れ試験を行った。その実験は、シリーズ、の三つから成っている。表3に実験計画の概要を示す。シリーズは、水セメント比を45、55、65%の3水準、CfFA置換率を0、10、20%の3水準の計9水準で実験を行い、調合によるひび割れ抑制効果を検討した。シリーズは、乾燥時の環境湿度(40、50、60RH%)を変化させ、乾燥速度がCfFAモルタルのひび割れ抑制効果に及ぼす影響を検討した。シリーズでは、養生および乾燥時の環境温度(10、20、 $35\text{ }^\circ\text{C}$)を変化させた場合のCfFAモルタルのひび割れ抑制効果を検討した。

(3) FEMによる乾燥収縮ひび割れ解析[2]

図3に乾燥収縮ひび割れの予測のフローを示す。乾燥収縮の際に部材が受ける収縮応力の発生要因として、内部の鉄筋や断面寸法が異なる部材などによって拘束され外部拘束と、部材内部の乾燥を受ける条件が異なることにより収縮ひずみ量に差が生じることで収縮応力が発生する内部拘束がある。まず、レベル1(内部拘束+外部拘束)については、筆者らが開発した既往の2次元FEMの乾燥収縮ひび割れ解析プログラムを用いて、内部拘束による収縮応力を解析し、次に拘束率を用いて、外部拘束による収縮応力の解析を実施した。

図4に有限要素解析のフローチャートを示す。対象とした調査は水セメント比55%の基準モルタル(PL)とCfFA20である。供試体の大きさと要素分割は図に示すとおりである。内部拘束による収縮応力はコンクリート内部に含まれる水分と密接に関係しており、水分が移動することによりコンクリートの挙動が変わる。

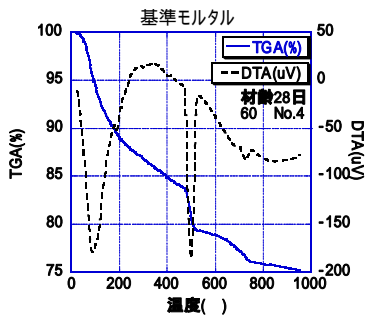


図1 測定結果の一例(温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、材齢28日)

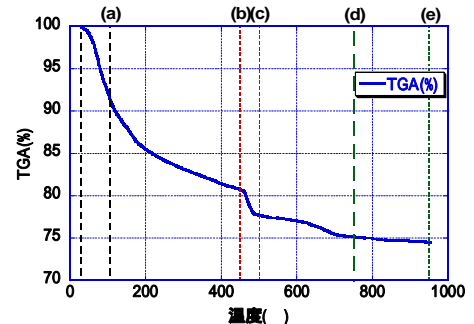
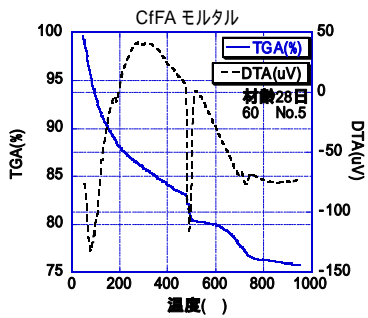


図2 示差熱重量分析の解説図

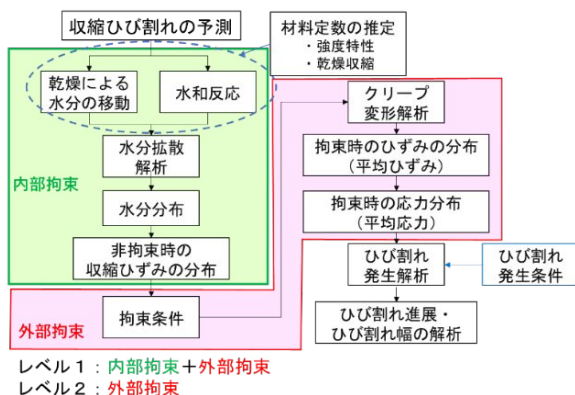


図3 収縮ひび割れ予測のフロー

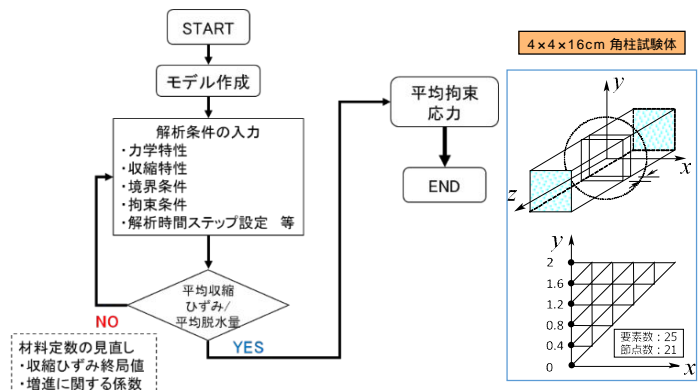


図4 有限要素解析のフローチャート

内部応力を正確に把握するためには、部材内部の含有水分量の分布を正確に予測することが求められることから、解析結果の妥当性を確認するため、まず、平均脱水量および平均乾燥収縮ひずみ実験値と整合するように、それぞれの終局値や進行に関わる係数など解析に必要な材料定数を変化させ、その後、実験結果をもとに双曲線近似させたモルタルの圧縮強度やヤング係数、クリープ関数などの物性値を用いて収縮応力を算定した。

4. 研究成果

(1) ポズラン反応

水和反応およびポズラン反応は、W/B、FA 種類の影響はあまり受けないが、養生温度が高いほど早く開始し、FA 置換率が高いほど小さくなるのが分かった。

Ca(OH)₂ 量は、基準ペーストでは材齢が経過するほど増加し、一方、CfFA ペーストでは Ca(OH)₂ 量の増加後に減少していることからポズラン反応が進行している。比表面積が大きく、CfFA 置換率が高く、W/B が高いほど Ca(OH)₂ が少なくなる。また、養生温度、W/B または CfFA 置換率が高く、比表面積が大きいほど Ca(OH)₂ 消費量が大きくなる傾向が見られた。

ポズラン反応率は、材齢 91 日、養生温度 20 では比表面積が大きく、CfFA 置換率が高いほど高くなる傾向が認められた。養生温度 60 では材齢の経過とともにポズラン反応率が高くなった(図 5)。

細孔径分布には材齢が経過するにつれて全細孔量が減少しており、組織が緻密化していることが考えられる。W/B、養生温度が高い程、全細孔量は小さくなっており、Ca(OH)₂ 消費量または、ポズラン反応率が高いほど、全細孔量が減少している傾向にありポズラン反応によって組織が緻密化したことがわかった。比表面積と全細孔量の関係は材齢によって異なり、比表面積は全細孔量に若干影響を与えていることがわかった。また、W/B によって各材齢における置換率の影響が異なる結果となり、全細孔量と FA 置換率との明確な関係性は確認されなかった(図 6)。

ポズラン反応率を求めるには CfFA のガラス化率を測定しなければならず、ガラス化率は CfFA の化学成分に依存している。ガラス化率の測定は比較的に難しいこともあって、活性度指数などで間接的に評価できないかと考え、既往の文献を調査したが、現時点では明確な関係は得られていない。研究終了後も引き続き文献検索を行うことにしている。

(2) 乾燥収縮ひび割れ実験

乾燥収縮ひずみは、調合間の差は小さく、ほぼ同程度であった。試験温度 20 と 35 では測定開始直後は同程度であるが、10 日以降は 35 の供試体の収縮が大きくなった。試験温度 10 の場合はそれ以外の試験温度より小さかった。

Basic クリープひずみは試験温度における明確な傾向は見られなかったが、す

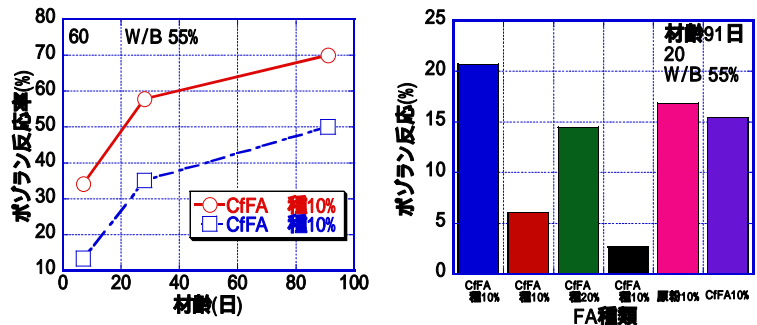


図 5 ポズラン反応率の結果

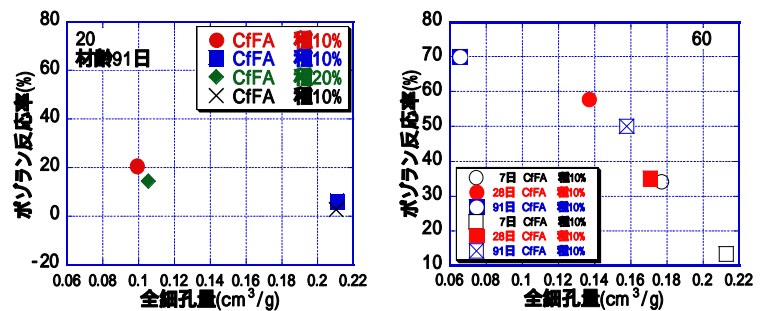


図 6 ポズラン反応率と全細孔量の関係

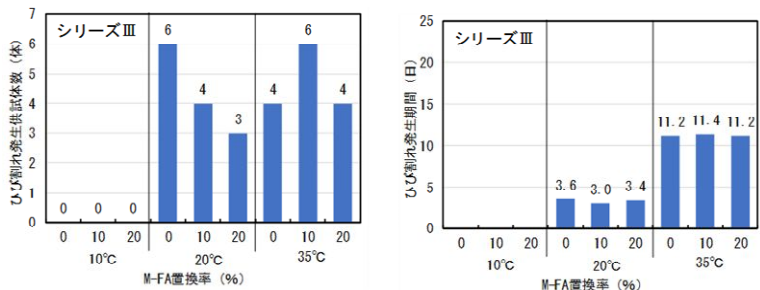


図 7 ひび割れ発生供試体数とひび割れ発生期間の結果(シリーズ)

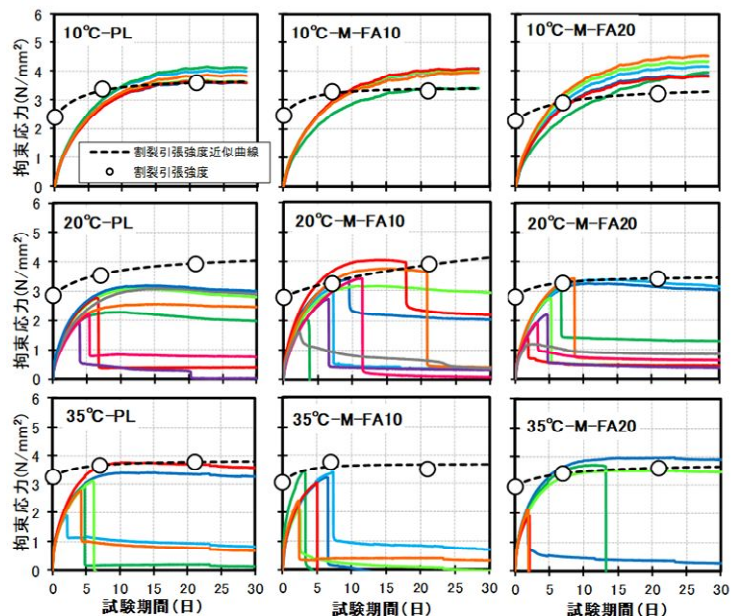


図 8 拘束応力の経時変化(シリーズ)

すべての試験温度で、CfFA20 が他の調合よりも Basic クリープひずみが大きくなる傾向を示した。Total クリープひずみは試験温度 10 では CfFA20 が他の調合よりも小さかった。試験温度 20 では、調合による差は小さく、同等のクリープ特性であった。試験温度 35 では PL が他の調合よりも小さかった。

測定期間中におけるひび割れの発生は、試験温度 20 では PL にひび割れが発生した供試体が少なく、CfFA を混入した調合の方がひび割れが発生した供試体が多かった。試験温度 35 ではひび割れが発生した供試体数は調合によらず同等であった(図 7)。

ひび割れの発生した供試体における拘束応力の最大値は、FA10 が大きくなった。また、応力強度比増加速度は乾燥初期が最も大きく、試験温度が高くなるほど初期の応力強度比増加速度が大きかった。試験温度 35 の供試体では、ひび割れ発生が早いほど応力強度比増加速度が大きい傾向が見られた(図 8)。

(3) FEM による乾燥収縮応力解析

解析による平均脱水量および平均収縮ひずみは、乾燥開始直後は測定値の方が大きく、実験データと若干の差は見られるが、両者は概ね一致していることが分かった(図 9)。

PL の乾燥収縮応力は、乾燥期間 7 日まで測定結果と概ね一致しているが、それ以降は解析値の方が大きくなった。これは、実験値での拘束鋼材のすべりが影響しているものと考えられる。

また、CfFA20 の収縮応力増進の傾向が PL と異なったが、これは、水和の進行程度や乾燥の程度などに影響される材料定数のすべてを的確に把握できていないこと、また、クリープの影響は加味できていないが、塑性変形やひび割れ発生・進展の影響を考慮できていないこと、などによるものと考えられる(図 10)。

PL と CfFA20 との比較では、CfFA20 の方が収縮応力が小さく、また、部材内部の収縮応力の差も、CfFA20 の方が小さかった、これは、PL に比べて CfFA20 の脱水量の分布の方が部材内部での差が小さく、これにより、内部のひずみの差も小さくなったため、収縮応力の分布も小さくなったものと考えられる。

解析結果と実験データとの関係を精査したところ、CfFA モルタルは内部拘束による収縮低減効果が大きいことが分かり、CfFA を混和することで、収縮応力が小さくなり収縮ひび割れを抑制する可能性があることが分かった。

<引用文献>

- [1]小早川真、黄光律、羽原俊祐、友澤史紀、水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、第 21 巻、第 2 号、pp.121~126、1999.7
- [2]上田賢司、佐藤嘉昭、清原千鶴、永松静也、コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析、コンクリート工学年次論文集、第 20 巻、第 2 号、pp.637-642、1998.7

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

秋吉善忠、吉川悟史、大谷俊浩、佐藤嘉昭、フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす環境温度の影響に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、査読有、Vol.40、No.1、pp.489-494、2018.7

吉川悟史、佐藤嘉昭、大谷俊浩、上田賢司、異なる乾燥条件下におけるフライアッシュモルタルの乾燥収縮ひび割れ特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、査読有、Vol.71、2018.3、pp.386-393

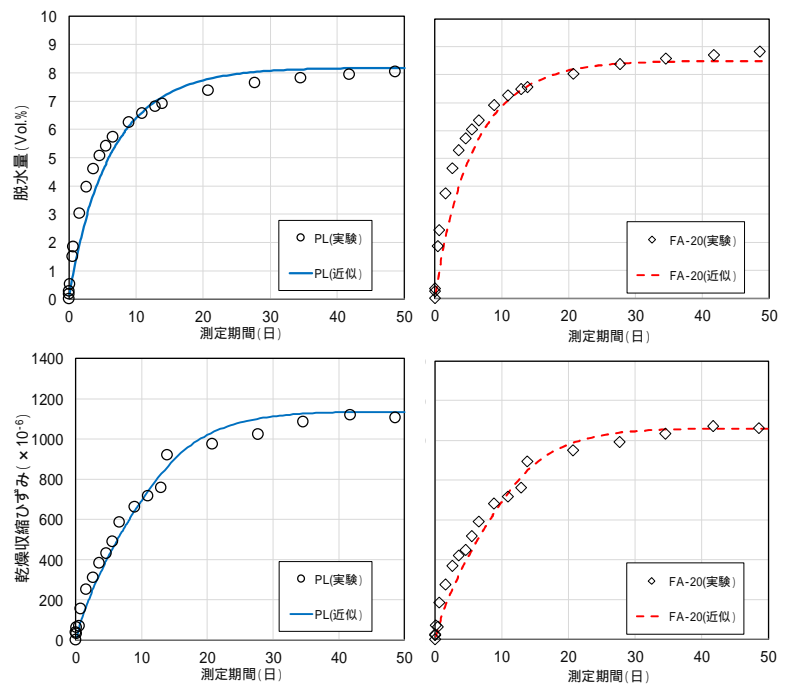


図 9 平均脱水量および平均収縮ひずみの解析結果と測定結果

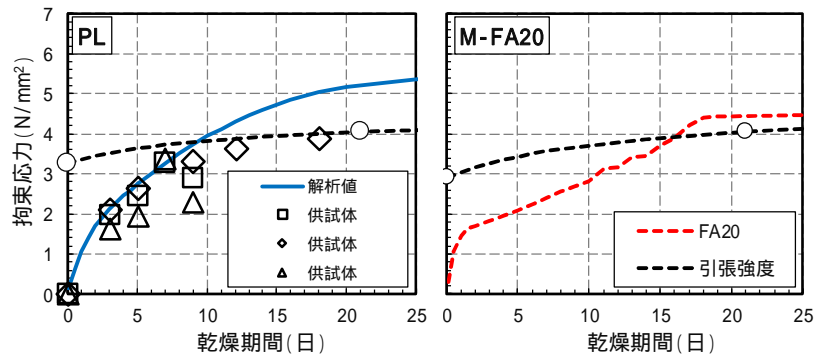


図 10 各調合の平均収縮応力の解析結果および実測値

〔学会発表〕(計 9件)

佐藤嘉昭、石田征男、大谷俊浩、秋吉善忠、加熱改質フライアッシュ(MFA)の強度寄与率に及ぼす影響要因の検討および推定式の構築 その1 強度寄与率を用いた配(調)合設計の考え方、日本建築学会 2019年度大会学術講演会、2019年9月(予定)

石田征男、佐藤嘉昭、大谷俊浩、秋吉善忠、加熱改質フライアッシュ(MFA)の強度寄与率に及ぼす影響要因の検討および推定式の構築 その2 強度寄与率の推定式、日本建築学会 2019年度大会学術講演会、2019年9月(予定)

佐藤嘉昭、石田征男、大谷俊浩、秋吉善忠、上田賢司、加熱改質フライアッシュ(MFA)の強度寄与率を用いた配(調)合設計に関する研究(その1.強度寄与率と配(調)合設計)、日本建築学会九州支部研究報告 第58号、pp.13-16、2019年3月

秋吉善忠、石田征男、佐藤嘉昭、大谷俊浩、上田賢司、加熱改質フライアッシュ(MFA)の強度寄与率を用いた配(調)合設計に関する研究(その2.強度寄与率に及ぼす材料特性および配(調)合条件の影響)、日本建築学会九州支部研究報告 第58号、pp.17-20、2019年3月

石田征男、佐藤嘉昭、大谷俊浩、秋吉善忠、上田賢司、加熱改質フライアッシュ(MFA)の強度寄与率を用いた配(調)合設計に関する研究(その3.強度寄与率推定式の構築)、日本建築学会九州支部研究報告 第58号、pp.21-24、2019年3月

秋吉善忠、濱永康仁、吉川悟史、大谷俊浩、上田賢司、佐藤嘉昭、フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす環境温度の影響に関する実験的研究(その1.実験概要およびモルタルの物性)、日本建築学会研究報告九州支部、2018年3月

濱永康仁、秋吉善忠、吉川悟史、大谷俊浩、上田賢司、佐藤嘉昭、フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす環境温度の影響に関する実験的研究(その2.圧縮クリープおよび拘束ひび割れ試験)、日本建築学会研究報告九州支部、2018年3月

濱永康仁、吉川悟史、佐藤嘉昭、大谷俊浩、上田賢司、秋吉善忠、改質フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす乾燥湿度の影響に関する研究(その1.実験概要およびモルタルの性状)、日本建築学会 2017年度大会学術講演会、2017年8月

吉川悟史、濱永康仁、佐藤嘉昭、大谷俊浩、上田賢司、秋吉善忠、改質フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす乾燥湿度の影響に関する研究(その2.拘束ひび割れ試験)、日本建築学会 2017年度大会学術講演会、2017年8月

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：大谷 俊浩

ローマ字氏名：(OTANI TOSHIHIRO)

所属研究機関名：大分大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号(8桁)：00315318

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。