

論文 フライアッシュを用いたプレキャスト PC 床版用軽量コンクリート 2 種の基礎的研究

山本 大貴*1・小林 崇*2・横井 克則*3・近藤 拓也*4

要旨：軽量コンクリートの高耐久化を目的に、低含水状態の人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート 2 種に加熱改質フライアッシュを使用したコンクリートの強度特性および凍結融解抵抗性について検討した。その結果、フライアッシュを使用することで材齢初期および材齢 28 日において強度発現性が向上した。さらに、凍結融解抵抗性は保持され、300 サイクル終了時に相対動弾性係数は 95%以上となった。また、フライアッシュを使用することで所要の圧縮強度を得るための W/C が大きくなり、セメント量を抑えることができた。

キーワード：フライアッシュ、軽量コンクリート、高強度、凍結融解抵抗性、プレキャスト PC 床版

1. はじめに

道路橋床版は自動車の繰返し作用による疲労や、積雪寒冷地における凍結防止剤の散布による塩害、凍結融解作用の繰返しによる劣化などが懸念されている。損傷が激しい鋼橋の鉄筋コンクリート床版では維持管理性やライフサイクルコスト面を考慮し、取替えが望ましいとして、耐久性向上や工期短縮に有効なプレキャストプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版と称す）が採用されている。取替えに伴い増加する既設主桁や下部工への応力負担の増加を抑制するために、軽量化が必要となる。そこで粗骨材に軽量骨材を用いる軽量コンクリート 1 種（以下、軽量 1 種と称す）を使用した橋梁の実用が報告されている。しかしながら、都市高速などの下部工の補強が困難な場合には更なる重量軽減が必要となるため、粗骨材に加えて細骨材にも人工軽量骨材を使用する軽量コンクリート 2 種（以下、軽量 2 種と称す）の適用が必要となる。

一方で、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュ（以下、FA と称す）は単位水量の軽減、水和熱の抑制や強度増進に効果的であり、環境負荷の低減だけでなくコンクリートの高耐久化に繋がることはよく知られている。しかしながら、FA に含まれる未燃炭素が空気連行性を阻害するなどのデメリットがあり、FA を使用する場合は空気量を確保する必要がある。近年では、PC 構造物への適用も検討されており^{2),3)}、プレキャスト PC 床版の軽量化を目的とした軽量コンクリートに FA を混和することが有効である。これにより床版性能の向上および FA の有効利用拡大が実現し、低炭素型社会の形成に寄与する。

以上を踏まえ、本研究では軽量 2 種に混和材として FA

に含まれる未燃炭素が除去された加熱改質 FA を使用することで、空気連行性を確保した高強度軽量コンクリートの強度特性、凍結融解抵抗性および気泡組織について検討を行った。一般的に軽量骨材はプレウェットティングした状態で使用するが、本研究では含水率 2.0%以下の人工軽量骨材を使用することで、凍結融解に対する抵抗性を確保した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料および物性等を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材には、石灰砕砂および膨張頁岩系人工軽量細骨材を使用した。粗骨材には、石灰砕石および膨張頁岩系人工軽量粗骨材を使用した。なお、軽量骨材は焼成後に散水などによる急冷を行わず低含水状態とした骨材を使用した。混和材には強熱減量 1.0%以下で、その他の性能が FA II 種相当の加熱改質 FA を使用した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合シリーズ 1 では圧縮強度の目標値は設計基準強度 50N/mm²に、軽量 1 種および軽量 2 種の単位容積質量の目標値を 1.9kg/l 以下および 1.65kg/l 以下に設定し、FA の有無による強度特性および凍結融解抵抗性への影響の確認を目的として、同等の強度となるよう、普通コンクリート（以下、普通コンと称す）、軽量 1 種および軽量 2 種それぞれの配合を設計した。配合シリーズ 1 の軽量 2 種では W/C を 29~35% に設定し、各性能について確認した。それによって得られた結果より、配合シリーズ 2 の配合設計を行い、配合シリーズ 2 では W/C を大きくした軽量 2 種の強度特性

*1 高知工業高等専門学校 建設工学専攻 (学生会員)

*2 IHI インフラ建設 開発部 (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 教授 博(工) (正会員)

*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

種別	材料名:記号	物性など
セメント	早強ポルトランドセメント:C	密度:3.14g/cm ³ , 比表面積:3,830cm ² /g, 強熱減量:2.4%
細骨材	石灰砕砂:S	表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:0.79%, FM:2.81
	膨張頁岩系人工軽量細骨材(低含水品):SL	絶乾密度:1.60g/cm ³ , 含水率:0%, 吸水率:9.7%, FM:2.63
粗骨材	石灰砕石:G	表乾密度:2.69g/cm ³ , 吸水率:0.40%, FM:6.70
	膨張頁岩系人工軽量粗骨材(低含水品):GL	絶乾密度:1.30~1.33g/cm ³ , 含水率:0.9%, 吸水率:6.1%, FM:6.43
混和材	フライアッシュ:FA	密度:2.28g/cm ³ , 比表面積:4,150cm ² /g, 強熱減量:0.7%
混和剤	高性能減水剤:SP	ポリカルボン酸エーテル系
	AE助剤:AE	変性アルキルカルボン酸化合物系

表-2 コンクリートの配合

配合シリーズ	配合名	W/C (%)	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤(C×%)		単位容積質量 設計値(kg/l)	Slump (cm)	Air (%)	C.T. (°C)									
						W	C	FA	S	SL	G	GL	SP					AE								
シリーズ1	N40	40	40.0	0	44.0	145	363	0	819	-	1046	-	0.50	0.002	2.37	8.5	3.5	28.0								
	NF40		36.0	10	42.5			40	771	-			1047	0.60					0.005	2.37	10.5	4.0	29.0			
	L35	35	35.0	0	42.7	150	429	0	759	-	1046	-	0.45	0.006	1.85	16.0	6.7	30.0								
	LF35		31.5	10	40.8			48	702	-			494	0.53					0.014	1.84	10.5	4.8	31.0			
	LL32	32	32.0	0	41.0	150	469	71	384	-	1046	-	0.50	0.100	1.60	9.5	3.9	27.0								
	LL35	35	35.0		38.8			429	0	138			329	540					0.50	0.350	1.61	6.5	3.9	22.0		
	LLF29	29	25.8	10	36.8	150	523	58	30	340	-	500	-	1.15	0.500	1.63	8.0	4.5	31.0							
	LLF32	32	28.8		38.8			469	52	65				351	500					0.73	0.200	1.61	10.5	3.9	30.0	
	LLF35	35	31.8		40.3			425	47	104				353	540					-	0.63	0.150	1.60	10.5	6.5	30.0
					35.9			453	50	91				309												
シリーズ2	LLF33	33	29.8	37.1	150	421	47	128	306	-	540	-	0.50	0.380	1.62	9.5	4.0	24.0								
	LLF36	36	32.1	38.3			386	43	169				302	540					0.49	0.370	1.61	8.0	4.1	24.0		
	LLF39	39	35.0	35.9			421	74	122				291	540					0.80	0.600	1.62	5.5	3.7	28.5		
	LLF36-15	36	30.3	15			35.9	105	86				291	540					-	1.02	1.150	1.62	3.0	3.7	21.5	
	LLF36-20		28.5	20			34.5																			

についての検討および FA の置換率による強度および気泡組織への影響の確認を行った。また配合シリーズ 2 ではベース配合を W/C=36%とし, W/C=33~39%に設定し, 単位容積質量が 1.62kg/l に一定となるように設計した。また, FA は細骨材置換として使用し, その置換率は結合材(B=H+FA)に対しての割合で, ベースとした LLF36 のみ FA/B=10, 15, 20%と変化させ, それ以外の配合は FA/B=10%とした。なお, 配合名について F はフライアッシュの使用, 数字は水セメント比および FA の置換率を示す。前述した配合の種類を表-3 にまとめて示す。目標スランブおよび空気量は材料分離抵抗性等を考慮し, 8.0±2.5cm および 5.0±1.5%に設定し, 混和剤の使用量を調整した。また, 低含水状態で使用する軽量骨材は練混ぜ中に吸水するため, 注水から 30 分後にウェットスクリーニングにより抽出したときの軽量粗骨材の含水率(=4%)を吸水量として一定と仮定し, これに対する補正水を配合設計には含まれないが単位容積質量に含まれる水として, 配合設計外で投入した。

2.3 試験方法

(1) スランブ試験および空気量試験

スランブ試験を JIS A 1101, 空気量試験を JIS A 1128 および JIS A 1116 に準拠して実施した。空気量試験は普

表-3 各配合の種類

コンクリートの種類	FAの有無	W/C (%)						
		シリーズ1			シリーズ2			
		29	32	35	40	33	36	39
普通コン(N)	有				○			
	無				○			
軽量1種(L)	有			○				
	無			○				
軽量2種(LL)	有	○	○	○		○	◎	○
	無		○	○				

○:試験を実施した配合 ◎:FAの置換率を変化した配合

通コンにおいて圧力法を用い, 軽量コンクリートにおいて質量法を用いて実施した。

(2) 圧縮強度試験および単位容積質量の算出

圧縮強度試験を JIS A 1108 に準拠して実施した。また, 圧縮強度試験前の円柱供試体の直径, 高さ, 質量から単位容積質量を算出した。供試体は材齢 7 日までは保水マット等による湿潤養生, 材齢 7 日以降は気中養生(室温 20±2°C, 湿度 60±2%)を行った。

(3) 曲げ強度試験

曲げ強度試験を JIS A 1106 に準拠して実施した。供試体は角柱(100×100×400mm)とし, 材齢 7 日までは保水

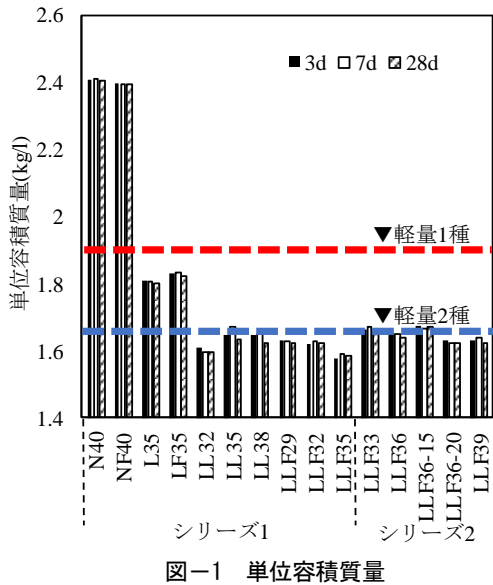


図-1 単位容積質量

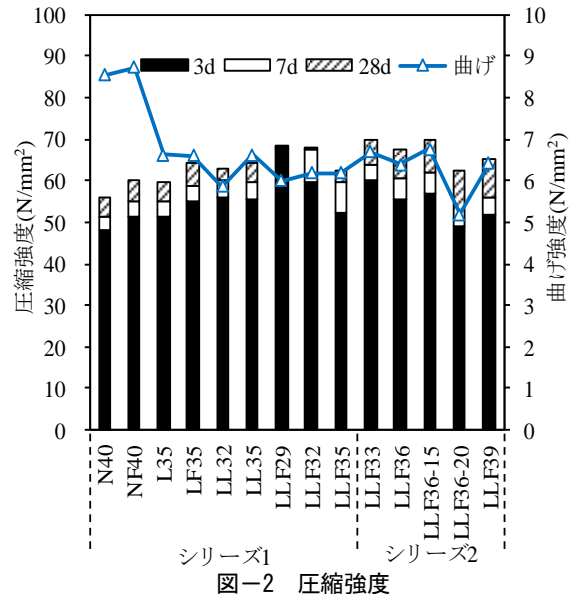


図-2 圧縮強度

マット等による湿潤養生，材齢7日以降は気中養生(室温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $60\pm 2\%$)を行った。

(4) 共鳴振動による動弾性係数試験

共鳴法による動弾性係数試験を JIS A 1127 に準拠して実施した。供試体には，圧縮強度試験を行う前の円柱供試体を用いた。

(5) 静弾性係数試験

静弾性係数試験を JISA 1149 に準拠して，材齢28日における圧縮強度試験時にコンプレッソメータにより測定した。

(6) 凍結融解試験(A法)

凍結融解試験を JIS A 1148 に準拠して実施した。供試体は材齢7日までは保水マット等による湿潤養生，材齢7日以降は気中養生(室温 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $60\pm 2\%$)，その後材齢21日以降は水中養生($20\pm 2^{\circ}\text{C}$)を行い，十分に湿潤させた後，材齢28日から試験に供した。

(7) 気泡組織測定方法

ASTM C457 リニアトラバース法に準拠して，染色されたコンクリート表面を画像処理し，気泡の面積値から計測する面積比法により硬化後の空気量および気泡間隔係数を測定した。供試体は材齢28日以上経過した後の円柱供試体の中心部20mmを切断した供試体($\phi 100\text{mm} \times 20\text{mm}$)において試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 単位容積質量

図-1 に算出した硬化後の単位容積質量を示す。軽量2種では単位容積質量が 1.6kg/l 程度，軽量1種では 1.8kg/l 程度と普通コンと比べて単位容積質量が軽減しており，全ての配合において目標値を満足している。

3.2 強度特性

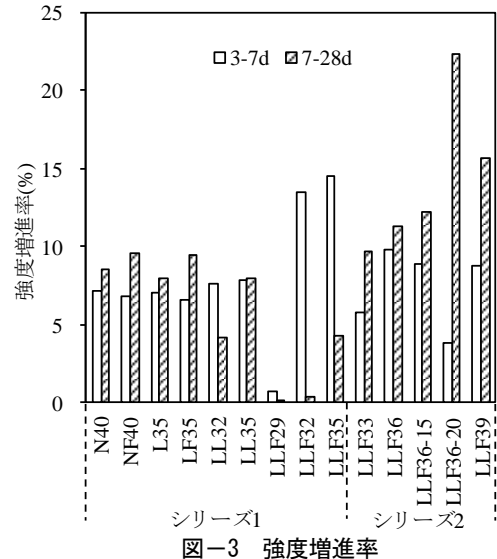


図-3 強度増進率

(1) 圧縮強度

図-2 に圧縮強度および曲げ強度試験の試験結果を示す。シリーズ1では同一W/CにおいてFAを用いることで，圧縮強度はFA無混入に比べて同等以上となっている。この傾向は材齢3日での圧縮強度についても同様の結果が確認でき，FAが初期強度の発現に寄与したことがわかる。これは，微粉末の充填効果や早強セメントの C_3S がFAに含まれるポズランを活性化させたためと考えられる⁴⁾。一方で，シリーズ2においてFAの置換率が10%のLLF36，15%のLLF36-15ではFAの置換率の増加に伴い強度増進しているが，FAの置換率を20%としたLLF36-20はLLF36，LLF36-15に比べ圧縮強度が小さくなっている。これは混和剤の多量添加の影響とも考えられるが，原因究明については今後の課題とする。

図-3 に強度増進率を示す。なお，強度増進率は式(1)により求めた。

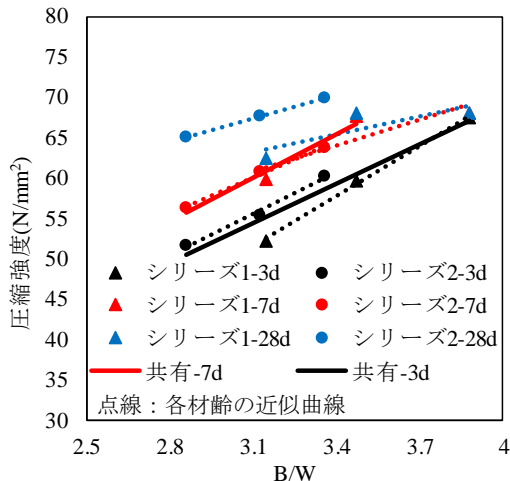


図-4 B/W と圧縮強度の関係

表-4 各材齢の B/W と圧縮強度の関係式

配合 シリーズ	材齢		
	3d	7d	28d
1	$\sigma_3=20.8B/W-12.9$ $R^2=0.998$	$\sigma_7=10.7B/W+27.6$ $R^2=0.723$	$\sigma_{28}=7.49B/W+40.0$ $R^2=0.708$
	$\sigma_3=17.1B/W+2.62$ $R^2=0.986$	$\sigma_7=15.2B/W+13.0$ $R^2=0.993$	$\sigma_{28}=9.89B/W+36.8$ $R^2=0.999$
共有	$\sigma_3=16.3B/W+3.90$ $R^2=0.922$	$\sigma_7=17.9B/W+4.62$ $R^2=0.958$	—

$$\alpha(\%) = \frac{\sigma_n - \sigma_{n-1}}{\sigma_{n-1}} \times 100 \quad (n=2,3) \quad (1)$$

ここに、 α ：強度増進率、 σ_1 ：3日強度、 σ_2 ：7日強度、 σ_3 ：28日強度である。LLF29では材齢3日以降、LLF32では材齢7日以降の強度増進が見られない。LLF29の材齢3日強度、LLF32の7日強度は約68N/mm²であることから、この軽量2種の使用材料および目標とした単位容積質量で確保できる圧縮強度の上限値を示していることが推測される。これは、普通コンではモルタルに比べて骨材の強度が高くモルタルが先に破壊するのに対して、軽量コンクリートはモルタルに比べて骨材の強度が低く骨材自体が破壊するため、強度の頭打ちを生じたと考えられる。さらにW/Cを大きくしたシリーズ2のLLF33、LLF36、LLF39でもシリーズ1の軽量2種の材齢28日強度と同等の強度が得られ、頭打ちとなった。また、シリーズ2ではシリーズ1に比べ強度増進率が大きくなっていることがわかる。

(2) 曲げ強度

曲げ強度はほとんどの場合FAを用いることで、FA無混入に比べてわずかに増加する傾向があるが、FAの使用することによる大きな差は確認できなかった。一方で、LLF36-20は圧縮強度と同様に、LLF36およびLLF36-15に比べ曲げ強度が低下している。これについても圧縮強度低下の原因究明とともに今後の課題とする。なお、一般的な軽量コンクリートの圧縮強度に対する曲げ強度比

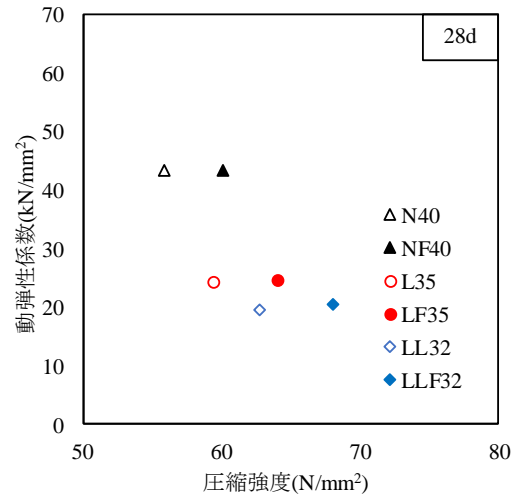


図-5 各コンクリートの動弾性係数

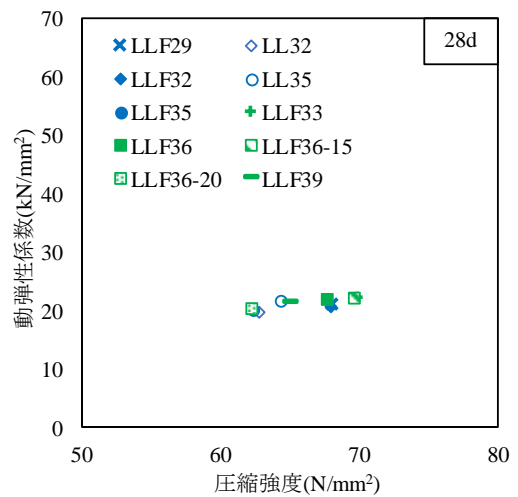


図-6 軽量2種の動弾性係数

は1/6～1/10程度とされているが、本実験における軽量2種の強度比を確認すると、強度比は1/10～1/12程度となった。これは高強度であること、これに加えて骨材強度が低く骨材自体が破壊するため、強度レベルによる影響が普通コンに比べて顕著であるためと考えられる。

(3) B/W と圧縮強度の関係

図-4にシリーズ1およびシリーズ2のFAを使用した軽量2種のB/Wと圧縮強度の関係を、表-4に各材齢の圧縮強度とB/Wの関係により得られた近似式および相関係数を示す。ここで、シリーズ1では材齢7日および28日においてB/W=3.5(W/C=32%)およびB/W=3.9(W/C=29%)が前述の圧縮強度の上限値に達していることがわかる。また、シリーズ2でも、材齢28日においてB/W=3.1(W/C=36%)およびB/W=3.4(W/C=33%)が上限値に達している。したがって、シリーズ1ではシリーズ2に比べて頭打ちの影響により、相関係数が低くなっている。そこで、圧縮強度の上限値68N/mm²以下において、材齢3日および7日のシリーズ1およびシリーズ2を共有した圧縮強度とB/Wの関係を黒の実線(共有-3d)

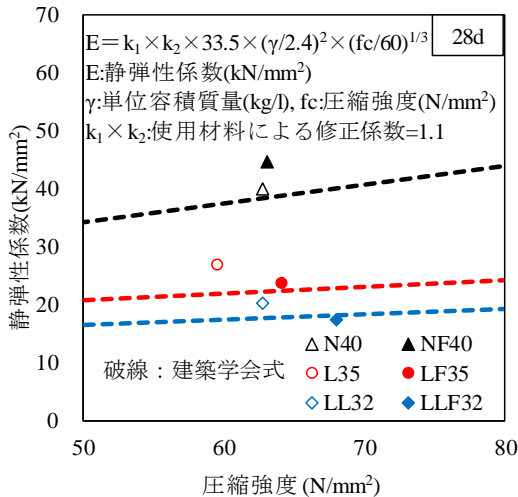


図-7 各コンクリートの静弾性係数

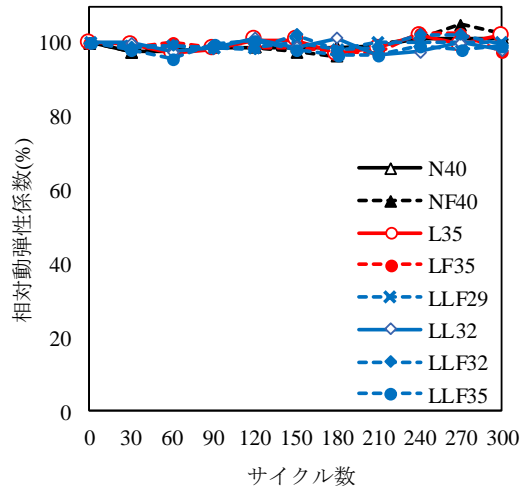


図-9 相対動弾性係数

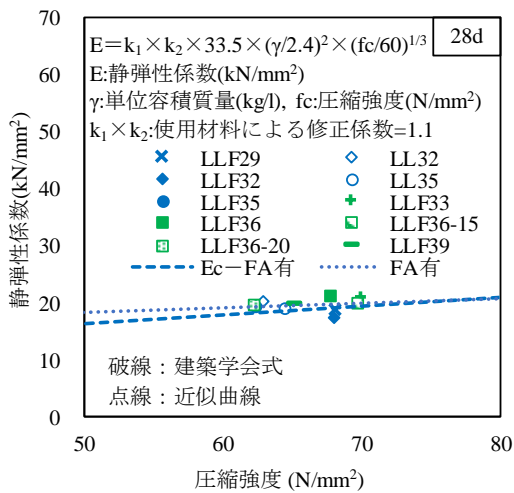


図-8 軽量2種の静弾性係数

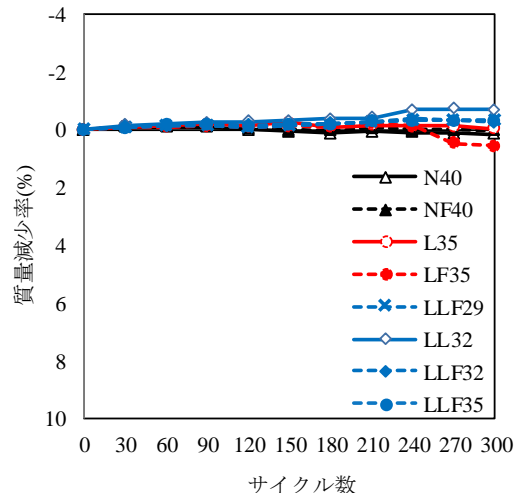


図-10 質量減少率

および赤の実線(共有-7d)で示す。それぞれの近似式の傾きは同程度であり、高い相関係数を有するため、FAを使用した軽量2種において本実験と同様の使用材料、配合条件および養生条件であれば、高強度軽量FAコンクリートの材齢3日および7日強度が予測できる。

3.3 動弾性係数

図-5 および図-6 に動弾性係数と圧縮強度の関係を示す。一般に普通コンに比べて、軽量コンクリートの弾性係数は低くなるとされている⁹⁾。軽量2種および軽量1種の動弾性係数は、それぞれ普通コンの45%および55%となった。これは人工軽量骨材が大量の微細孔を有し、骨材の弾性係数が低いため、コンクリートの弾性係数が小さくなったと考えられる。図-6 より軽量2種の動弾性係数は20~22kN/mm²となった。また、FAを使用することによる動弾性係数への影響は確認できなかった。即ち、コンクリートの動弾性係数は骨材の弾性係数の影響が大きいということがわかる。

3.4 静弾性係数

図-7 および図-8 に静弾性係数と圧縮強度の関係を

示す。図中の破線はFAを使用した場合の建築学会の式⁹⁾、点線はFAを使用した軽量2種の近似曲線を示している。普通コンおよび軽量1種の静弾性係数は建築学会式による算定値よりも高い数値となっている。軽量2種では建築学会式と本実験結果を比較すると、同程度となっている。また、図-7 より普通コンではFAを使用したNF40は、FAを用いていないN40よりも静弾性係数はわずかに増加する傾向が見られたが、軽量1種および軽量2種においてFAの有無による静弾性係数への大きな差は見られなかった。さらに、図-8 よりFAを使用した配合の近似曲線は建築学会式による算定値と同程度となっていることから、軽量2種においてFAを使用することによる静弾性係数への影響は少ないと考えられる。

3.5 凍結融解抵抗性

図-9 に相対動弾性係数の試験結果を示す。軽量1種・2種、普通コンおよびFAを使用した全ての配合において、相対動弾性係数は100±3%の範囲となった。

図-10 に質量減少率の試験結果を示す。軽量1種・2種および普通コンの質量減少率は±1%の範囲となった。

これらの結果より、相対動弾性係数および質量減少率は FA の使用による影響はなく、本研究で使用した軽量 1 種・軽量 2 種および普通コンの凍結融解抵抗性は十分確保できたといえる。これは加熱改質 FA の効果により空気量確保および人工軽量骨材を低含水状態で使用することで凍結作用の膨張圧の影響を緩和したためと考えられる。

3.6 気泡組織

写真-1 に気泡組織測定の様子を示す。表-5 に硬化後の空気量および気泡間隔係数の結果を示す。気泡組織の測定はベース配合とした W/C=35~36%の軽量 2 種およびそれらに FA を使用した配合を用いた。コンクリートの気泡間隔係数は 200~250 μm 以下の場合、凍結融解抵抗性が確保できるとされている⁸⁾。本実験結果において FA の有無による比較を行うと、気泡間隔係数は FA を使用することにより、わずかに増加する傾向があるが、FA の使用に関わらず気泡間隔係数は 100 μm 以下となった。なお、軽量骨材は多孔質であることから、写真-1 のように軽量骨材にも蛍光塗料が充填されており、軽量骨材内の空隙等をコンクリート中の気泡として判読されている可能性があるため、気泡間隔係数が小さい値を示したと考えられる。硬化後の空気量は FA の使用に関わらず 10%程度となり、FA を使用することによる大きな差は見られなかった。

4. まとめ

本研究では、粗骨材と細骨材に人工軽量骨材を使用した軽量コンクリートにフライアッシュを用いて、コンクリートの強度特性および凍結融解抵抗性に関する検討を行った。以下に本研究で得られた結果を示す。

(1) 高強度軽量コンクリートに対してフライアッシュの置換率を結合材に対して 10%とすると、圧縮強度および曲げ強度は同等以上となる。しかし、単位容積質量 1.6kg/l 程度の高強度軽量コンクリート 2 種では本研究の使用材料で確保できる圧縮強度は約 68N/mm² で頭打ちとなる。

(2) W/C=36%において FA の置換率は 15%までが FA による強度増進が確認できた。さらに、本実験の使用材料、配合条件および養生条件が同一の場合、圧縮強度と B/W の関係は有効である。

(3) コンクリートの動弾性係数および静弾性係数はフライアッシュの使用による大きな差は見られない。

(4) 低含水状態の人工軽量骨材の使用および加熱改質フライアッシュの使用により空気量を確保でき、十分な凍結融解抵抗性が確保できる。

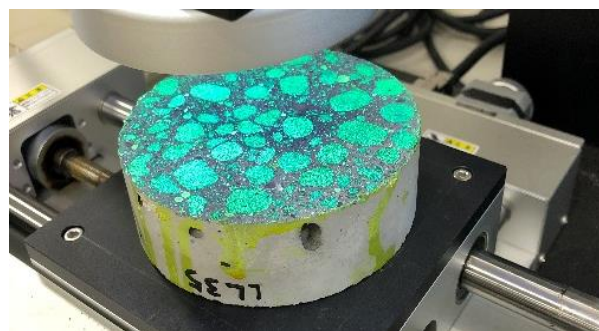


写真-1 気泡組織測定

表-5 気泡組織

配合名	空気量(質量法)(%)	硬化後の空気量(%)	気泡間隔係数(μm)
LL35	3.9	10.8	52.6
LLF36	4.0	11.4	78.4
LLF36-15	3.7	11.8	52.8
LLF36-20	3.7	9.7	71.6

参考文献

- 1) 中村定明, 深山清六, 山崎淳: 高強度軽量コンクリートを用いたプレキャスト PC 床版に関する研究, 第二回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.101-106, 2000.10
- 2) 依道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp197-202, 2011.6
- 3) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp181-186, 2013.6
- 4) 向俊成, 二戸信和, 平尾宙, 坂井悦郎: 高 C₃S セメントの使用がフライアッシュセメントの水和反応に与える影響, セメント・コンクリート論文集, No.70, pp.127-133, 2017.3
- 5) 水越睦視, 梅本忠彦, 下村匠: 軽量骨材コンクリートの高性能化に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.57-67, 2010.5
- 6) 一般社団法人 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事, 一般社団法人日本建築学会, pp.191-194, 2018.7
- 7) 橋大介, 今井實: 高強度軽量コンクリートの耐凍害性改善方法について, 土木学会論文集, V-24, No.496, pp.51-60, 1994.8
- 8) 小林正几: 各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質におよぼす影響について, セメント・コンクリート論文集, No.249, 1967