

論文 軽量気泡コンクリートに関する研究

後藤建太郎^{*1}・橘高義典^{*2}・小野山貫造^{*3}・塚本剛史^{*4}

要旨：本研究では、高強度セメントペースト硬化体に気泡を導入し、骨材をなるべく空気泡で代替することで、省資源、省エネルギーを図る軽量化セメント系材料について実験した。高強度のセメントペースト硬化体および各種細骨材を用いたモルタルについて、起泡剤の添加量を変化させた試験体の強度試験を行い、強度特性と空気量との関係を明らかにした。

キーワード：軽量気泡コンクリート、省資源・省エネルギー、起泡剤、強度則

1. はじめに

近年のコンクリート構造物の高層化に伴い、コンクリートは高強度化とともに、構造上および施工上の合理化が求められており、その一つの手段にコンクリートの軽量化があげられる。コンクリートの軽量化の方法には、高温高压養生（オートクレーブ養生）や人工軽量骨材を用いる方法がある。一方で、これらの手法・材料の使用では、その製造過程で大量のエネルギー消費を伴うため、省資源・省エネルギーの観点からは必ずしも効率的な手法とはいえない。

そこで本研究では、高強度セメントペースト硬化体に気泡を導入し骨材をなるべく空気泡で代替することで、省資源、軽量化を図る軽量コンクリートの開発を行う（図-1）。まず、高強度のセメントペースト硬化体について内包する空気量と強度の関係を検討し、さらに各種細骨材を用いた場合での影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験1

高強度セメントペーストを用い、起泡剤の添加量と強度特性の関係について検討した。実験1での使用材料を表-1に、基本調合を表-3に

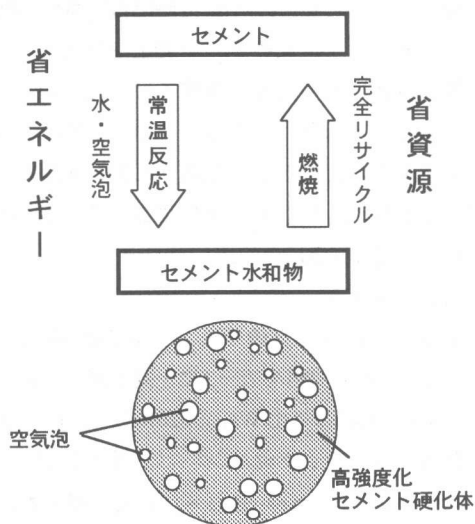


図-1 軽量気泡コンクリートの概念

表-1 使用材料 実験1

セメント	普通ポルトランドセメント	比重3.15
	早強ポルトランドセメント	比重3.14
混和材	シリカフューム	比重2.2
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系	
起泡剤	A:樹脂酸塩系AE剤 B:樹脂酸塩系高性能AE剤	

*1 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生（正会員）

*2 東京都立大学大学院助教授 工学研究科建築学専攻 工博（正会員）

*3 東京都立大学大学院助手 工学研究科建築学専攻 工修（正会員）

*4 東京都立大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

示す。水結合材比(W/B)は20%とし、セメントには普通ポルトランドセメント(記号 OC 1, OC2) および早強ポルトランドセメント(記号 HC) を使用し、両条件ともシリカフューム(記号 SF) をセメント重量の10%添加した。空気泡の導入は OC 1, HC においては高性能起泡剤(記号 B), OC2 においては起泡剤(記号 A) を用い添加量は結合材の0%~1.0%の範囲で変化させた。練り混ぜには自転公転式ミキサーを用いた。練り混ぜ方法はセメント、シリカフュームを30秒間空練り後、ペーストを120秒練り、起泡剤添加後60秒混練した。試験体寸法は4cm×4cm×16cmとし、打設後24時間密封養生したのち脱型し、1週間標準水中養生をほどこし、圧縮強度及び曲げ強度の測定を行った。脱型後の試験体の重量と寸法を量り比重を計算し、空気を含まないと仮定した比重から型枠脱型後の空気量を推定した。同一条件について3本の試験体を作製し測定に供した。

2.2 実験2

実験1と同様の実験をモルタル試験体について行った。使用材料を表-2に、基本調合を表-4に示す。水結合材比(W/B)は20%とし、結合材は普通ポルトランドセメント(記号 C) にシリカフューム(記号 SF) をセメント量の10%添加した。細骨材(記号 S) は、相模川産陸砂80%と君津産陸砂20%の混合砂および人工軽量骨材の2種とした。比較のためにセメントペーストの試験体も作製した。起泡剤添加量は、結合材の0%~1.0%の範囲とした。

練り混ぜには実験1と同様に自転公転式ミキサーを用いた。モルタルの練混ぜ方法は、セメント、シリカフュームを30秒間空練り後、ペーストを120秒練り、骨材投入後120秒練り、起泡剤添加後60秒混練した。打設後24時間後に脱型し実験1と同様に試験体の強度特性を把握した。

3. 実験結果・考察

3.1 実験1

実験結果を表-5に示す。全体として起泡剤の

表-2 使用材料 実験2

セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.15
混和材	シリカフューム 比重2.2
細骨材	砂：相模川産陸砂+君津産陸砂 表乾比重2.61
	人工軽量骨材：真比重0.69 粒度範囲200~350 平均粒径250
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸エーテル系
起泡剤	樹脂酸塩系AE剤

表-3 調合 実験1

調合	記号	W/B	調合			
			W	C	SF	sp
普通ポルト1	OC1	20	377	1694	188	60.2
普通ポルト2	OC2	20	377	1694	188	60.2
早強ポルト	HC	20	310	1691	188	66

表-4 調合 実験2

調合	記号	W/B	調合				
			W	C	SF	S	sp
ペースト	P	20	377	1694	188	-	60.2
普通砂モルタル	M	20	202	911	101	1214	30.4
軽量モルタル	L	20	160	718	79	399	27.9

表-5 実験結果 実験1

	起泡剤 添加量 (%)	空気量 (%)	比重	圧縮 強度 (Mpa)	曲げ 強度 (Mpa)
O	0	0.0	2.28	92.8	25.8
	0.2	10.0	2.16	65.2	20.6
	0.4	17.8	2.08	59.8	18.8
	0.6	27.3	1.99	44.2	17.3
	0.8	34.3	1.92	35.5	15.7
C	1.0	38.4	1.88	29.3	14.9
	0	-	-	-	-
	0.2	9.9	2.16	61.3	17.5
	0.4	22.5	2.03	41.5	16.7
	0.6	24.8	2.01	47.6	16.5
2	0.8	29.6	1.96	40.7	14.7
	1.0	29.0	1.97	37.3	14.3
	0	0.3	2.25	104.5	23.8
H	0.2	13.8	2.12	61.5	21.2
	0.4	50.4	1.75	27.0	10.7
	0.6	27.7	1.98	38.3	18.0
	0.8	36.4	1.89	35.0	16.6
	1.0	56.9	1.69	23.7	11.1

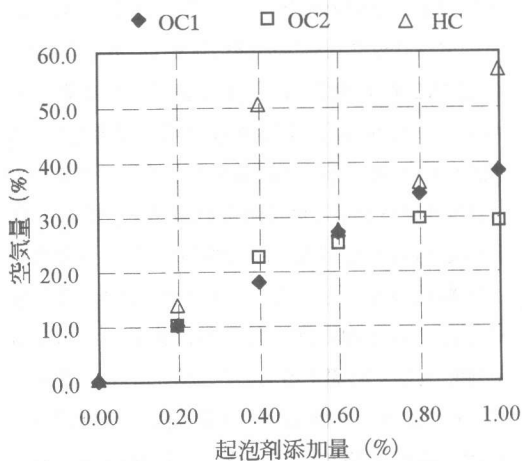


図-2 起泡剤添加量と空気量の関係 (実験1)

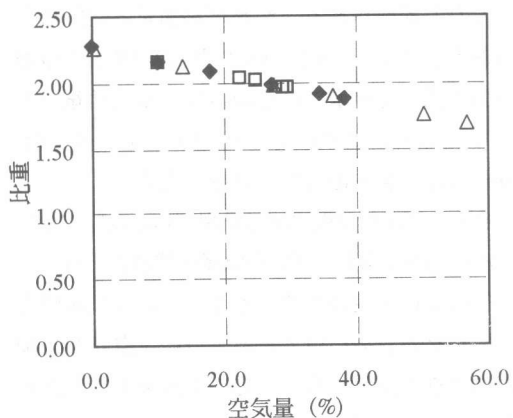


図-3 比重と空気量の関係 (実験1)

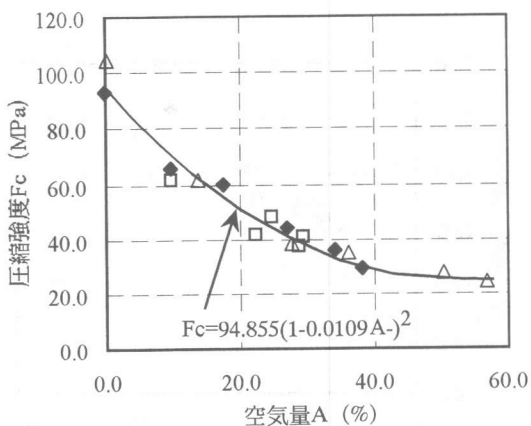


図-4 空気量と圧縮強度の関係 (実験1)

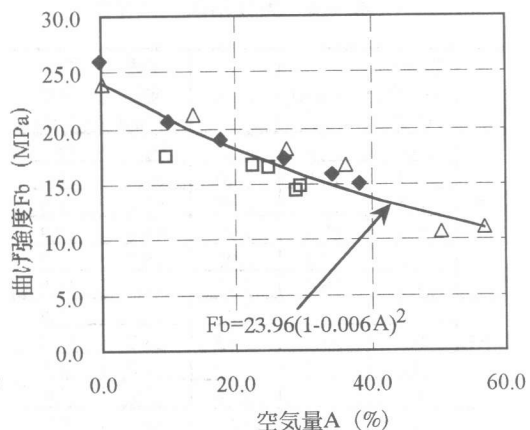


図-5 空気量と曲げ強度の関係 (実験1)

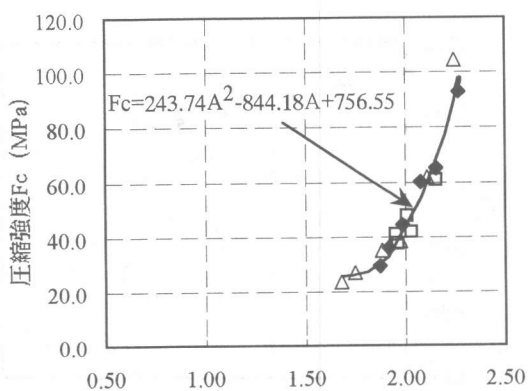


図-6 比重と圧縮強度の関係 (実験1)

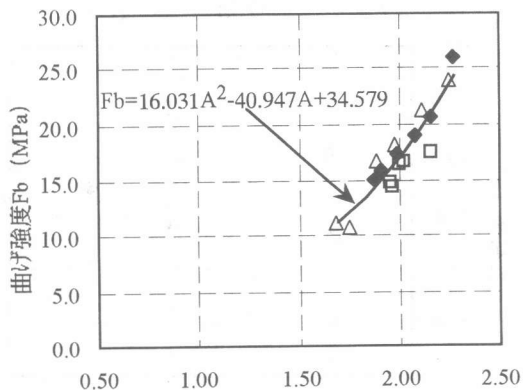


図-7 比重と曲げ強度の関係 (実験1)

添加量を増加させると空気量は増加し比重は小さくなる傾向がある。起泡剤添加量と空気量との関係を図-2 に示す。OC1 および OC2 では空気量は添加量が増すほど増加し、1.0%前後で頭打ちとなる傾向がある。また、HC は起泡剤の添加量に対し空気量にばらつきが生じた。

空気量と圧縮強度の関係を図-4 に示す。セメントの種類に関わらず、空気量の増加とともに、圧縮強度は一定の割合で低下していく傾向がある。従来からいわれているように、空気量の増加により欠陥部が増し、応力を伝達する有効面積が減り、強度が低下するものと考えられる。空気量 A と圧縮強度 F_c の関係は、 $F_c = a(1 - bA)^2$ の

式で表すことができた。ここで、a は空気量が 0 でのマトリックス自体の強度を表し、b は空気泡の増加に伴う強度の低下度を表すものと考えられる。a は W/B および構成材料に影響され、b は空気泡の質に影響されるものと推察される。

図-5 に空気量と曲げ強度の関係を示す。圧縮強度と同様の低下傾向を示すが、低下の度合いが圧縮強度よりも少ない。したがって、空気量の増加による強度低下は、曲げ強度よりも圧縮強度に大きく影響するものと考えられる。なお、図-6 に比重と圧縮強度の関係、図-7 に比重と曲げ強度の関係を示す。また、圧縮強度と曲げ強度の関係を図-8 に示す。曲げ強度と圧縮強度の間には比例関係が見られる。

表-6 実験結果 実験2

	起泡剤 添加量 (%)	空気量 (%)	比重	圧縮 強度 (Mpa)	曲げ 強度 (Mpa)
P	0	0.0	2.28	92.8	25.8
	0.2	10.0	2.16	65.2	20.6
	0.4	17.8	2.08	59.8	18.8
	0.6	27.3	1.99	44.2	17.3
	0.8	34.3	1.92	35.5	15.7
	1.0	38.4	1.88	29.3	14.9
M	0	9.0	2.21	50.3	16.8
	0.2	25.1	1.82	25.7	10.7
	0.6	30.3	1.69	14.3	8.1
	1.0	32.6	1.64	9.5	7.0
L	0	12.1	1.19	22.2	8.0
	0.2	41.8	0.79	4.9	4.9
	0.6	47.5	0.71	2.6	5.0
	1.0	57.8	0.57	0.5	3.8

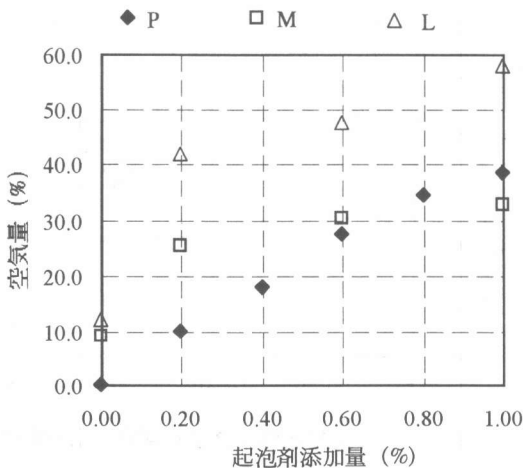


図-9 起泡剤添加量と空気量の関係 (実験2)

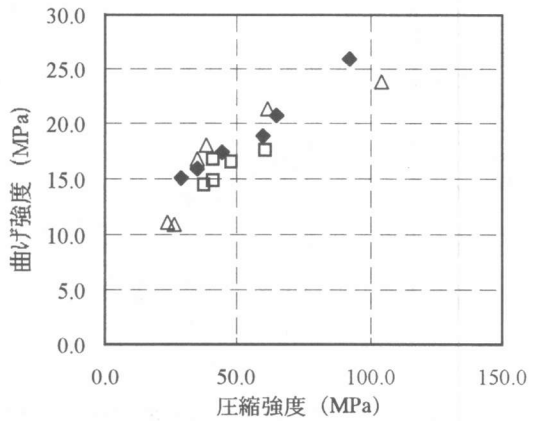


図-8 圧縮強度と曲げ強度の関係 (実験2)

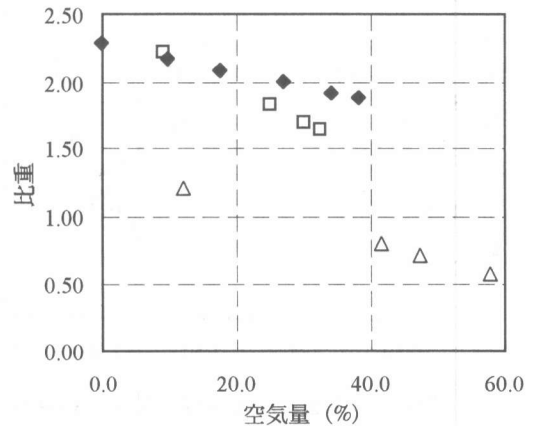


図-10 比重と空気量の関係 (実験2)

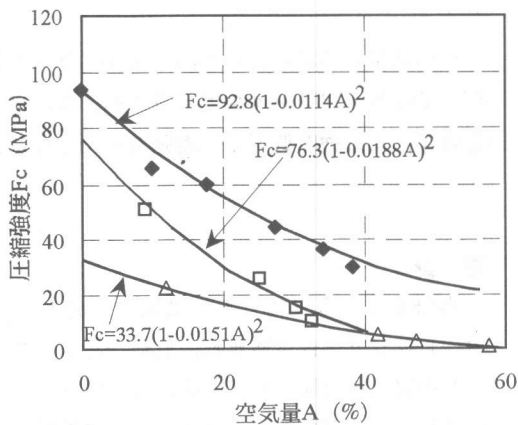


図-11 空気量と圧縮強度の関係 (実験2)

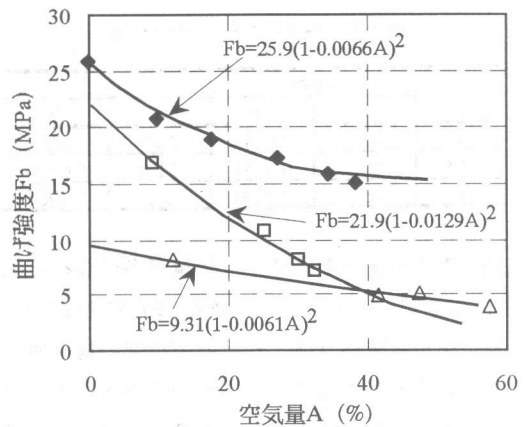


図-12 空気量と曲げ強度の関係 (実験2)

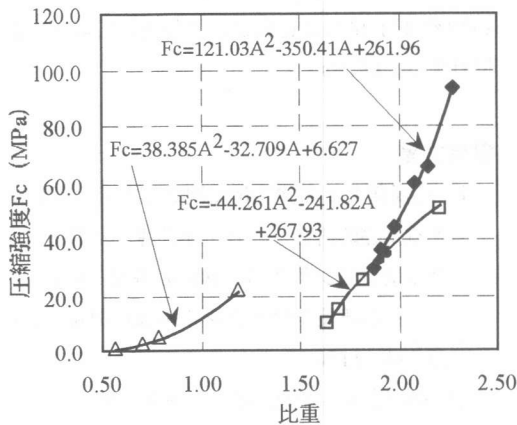


図-13 比重と圧縮強度の関係 (実験2)

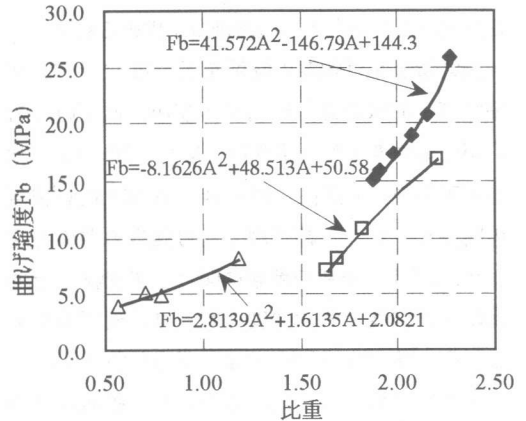


図-14 比重と曲げ強度の関係 (実験2)

3.2 実験2

実験結果を表-6に示す。実験1と同様に起泡剤の添加量を増加させると空気量は増加し比重は小さくなる傾向がある。また、同一添加量の場合、ペースト試験体(P)に比較して、普通砂モルタル(M)および軽量モルタル(L)の方が強度は低下する傾向がある。起泡剤添加量と空気量との関係を図-9に示す。空気量は添加量が増すほど増加するが、連行量は砂の種類によって異なる。1.0%までの添加量では、ペーストよりも砂の方が連行空気量は多い傾向がある。特に軽量骨材は多くの空気を連行する。MとLとでは、少ない添加量(0.20%)で多くの空気を連行し、その後の増加の割合は緩慢である。

空気量と圧縮強度の関係を図-11に示す。実

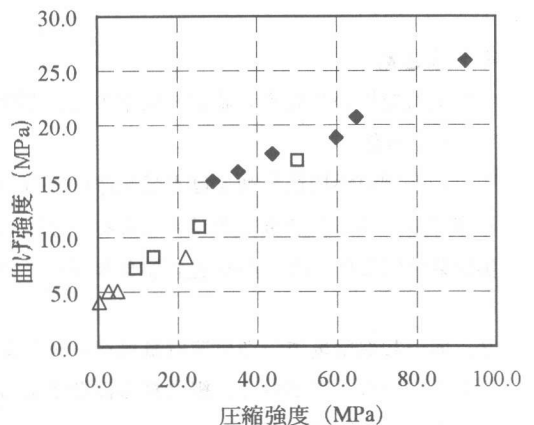


図-15 圧縮強度と曲げ強度の関係 (実験2)

表-7 各パラメーター一覧

	圧縮		曲げ	
	a	b	a	b
P	92.8	0.0114	25.9	0.0066
M	76.3	0.0188	21.9	0.0129
L	33.7	0.0151	9.3	0.0061

験1のペーストと同様、空気量が多くなると強度は低下する。ペースト試験体(P)に比較してモルタル試験体(M, L)の方が空気量増加による強度低下は大きい。同一条件のペーストを用いていても、砂の混入により欠陥部が増し強度は低下する。各試験体の空気量と強度の関係を図中に示した。図-11 および図-9により、任意強度を得るための起泡剤量が求められる。

空気量と曲げ強度の関係を図-12に示す。圧縮強度と同様の低下傾向を示すが、低下の度合いが圧縮強度よりも少ない。また、図-13に比重と圧縮強度の関係、図-14に比重と曲げ強度の関係を示す。圧縮強度と曲げ強度の関係を図-15に示す。材料の種類に関わらず実験1と同様に曲げ強度と圧縮強度の間には比例関係が見られる。表-7に回帰分析より求めた各パラメーターをまとめて示した。本表より、各試験体の空気量と強度特性との関係を定量的に評価することができる。

4. まとめ

本実験で用いた材料の範囲で以下のことが明らかになった。

- 1) 起泡剤の添加量が増すほど試験体の空気量は増加し、ある添加量で頭打ちとなる。今回の実験条件により、約50%の連行空気量が得られた。
- 2) 同一起泡剤量での空気連行量はペーストよりもモルタルの方が多く、細骨材の種類によっても連行の程度は異なる。
- 3) 空気量の増加とともに圧縮強度は一定の割合で低下していく傾向があり、両者の関係は空気量0での基準強度および空気量増加に伴う強度低下度をパラメータにした2次関数により表

せる。

4) 空気量の増加によって曲げ強度は低下するが、その低下率は圧縮強度よりも小さく、空気泡含有による強度低下は圧縮強度に大きく影響する。

謝辞

本研究を行うに当たり、ご助言いただいた(株)フジタ・青木治雄氏、試料を提供して頂いた山宗化学(株)及び(株)サンライト、実験に協力いただいた本学卒論生・佐野幹弘氏に感謝の意を表します。

著者の1人、小野山貫造氏におかれましては1999年2月28日に逝去されました。ご冥福をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 橘高義典：高強度化気泡コンクリートに関する基礎的研究 -省エネルギー・リサイクル型セメント系建築材料の研究(その1)-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1998, pp.1149-1150
- 2) 橘高義典, 青野義道, 鶴田永一郎, 中村文彦：高強度化軽量気泡コンクリートに関する研究, セメントコンクリート論文集, 1998, pp.1030-1035