

論文 高強度軽量モルタルの開発と繊維混入率が力学的特性に及ぼす影響に関する研究

Sukmin KWON^{*1}・菊田 貴恒^{*2}・西脇 智哉^{*3}・三橋 博三^{*4}

要旨：ここでは、構造利用に耐えうる軽量モルタルの開発に関する基礎的研究として、軽量モルタルの高強度化に関する検討を行う。更に、これに適切な繊維を混入させ、圧縮強度及び曲げ強度などの力学的特性に優れた高強度繊維補強軽量モルタルの開発を行った。ここでは、セノライト(CL)とアルミナバブル(AB)の2種類の軽量骨材を使用して実験を行った結果、W/B 25%でCLを用いた際に密度1.08、圧縮強度30MPa程度の高強度軽量モルタルを得られた。また、繊維の混入率を0.75%に変化させて実験を行った結果、繊維混入率の増加に伴い圧縮強度と曲げ強度及び曲げ靱性の増大が確認できた。

キーワード：軽量モルタル、軽量骨材、高強度、繊維補強

1. はじめに

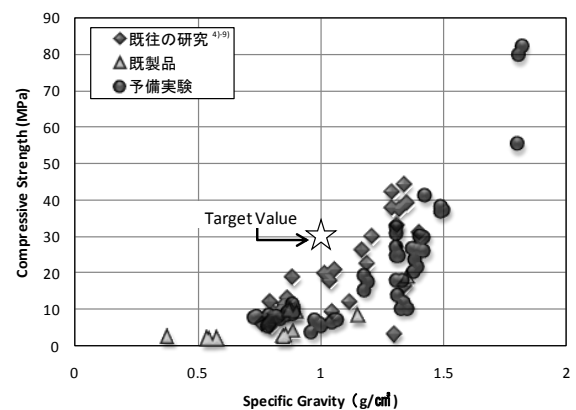
近年、建築と土木分野は飛躍的な発展をしてきた。その発展の背景には高性能コンクリートの開発とその実用化があり、建築分野の超高層化をはじめ、土木分野のダムやトンネル、橋のような大規模な構造物の建設が可能となった。しかし、このような構造物の高層化、大規模化によって構造物の自重は増加し、それと同時にコンクリート利用量が膨大なものとなり、人件費・運送費などの経済的な問題をもたらした。このような問題を解決するためにも軽量コンクリートの開発が望まれている。させた軽量コンクリートによるコンクリート自重を低減は、構造物の自重の軽減や、また、建設現場で使用する重機の最大容量の低減などによって経済的な問題を解決する助けとなり得る¹⁾。さらに、軽量コンクリートは型枠に生じる側圧を軽減できるため、型枠の簡素化や打設の効率化にも寄与が期待できる。

一般的に、軽量コンクリートとは普通コンクリートに比べ単位容積質量の小さなコンクリートの総称である²⁾。軽量骨材を使用したモルタルもまた軽量コンクリートと呼ばれる¹⁾ことから、ここでは軽量モルタルを対象として検討を行う。

軽量コンクリートは、密度の小さな骨材を利用した軽量骨材コンクリートと、通常の骨材を用いたうえで気泡剤等を用いて多量の気泡をモルタルに混入した気泡コンクリートとに大別されるが、どちらも通常よりも空気量が多いため、強度を発現することが難しい。また、既往の研究³⁾から軽量骨材と気泡剤の多量の使用は強度の

低下を招くことが示されており、このことが軽量コンクリートの用途を限定させている現状にある。

既往の研究⁴⁾⁹⁾と現在一般に流通している既製品、また予備実験から得た軽量コンクリートの密度と圧縮強度の関係を図—1に示す。ここでは軽量コンクリートの利用範囲の拡大を目的として、図—1中の目標値に示すように、建築工事標準仕様書-JASS5鉄筋コンクリート工事の中で軽量コンクリート1種の耐久設計基準強度として決められている圧縮強度30MPaを満足しながら、密度を1.0程度まで低減させることを目標とする。この際には通常のセメントモルタルを常圧蒸気養生によって施工できるものとする。更にこの基準を満たす軽量コンクリートの圧縮・曲げ強度、及び靱性の改善を目的に繊維を混入させ、適切な繊維混入率を決定しその力学的特性を明らかにする。



図—1 目標密度と強度

*1 東北大学大学院 都市・建築学専攻 修士課程 (正会員)

*2 東北大学大学院 都市・建築学専攻 助教・博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 都市・建築学専攻 准教授・博士(工学) (正会員)

*4 東北工業大学大学院 建築学科 教授・博士(工学) (正会員)

2. 軽量コンクリートの強度特性と密度の関係

軽量コンクリートは一般的なコンクリートに比べ、密度と強度の間により強い相関関係が存在する。図—2 に軽量骨材を用いた軽量コンクリートの密度と強度の関係を示す。¹⁰⁾

軽量骨材は真密度で比較すると普通骨材と大差ないが、かさ密度で比較すると大きく異なる。これは骨材中に多数の空隙を内包しているためであり、軽量コンクリートの密度を小さくするためには、この骨材中の空隙量を大きくする必要がある。

しかし、軽量骨材の密度が小さすぎる場合には、一般的に骨材の強度も弱く、コンクリートの強度、剛性、耐久性を低下させる。更に、材料分離やブリーディングを招きやすいためコンクリートの均質性を失う要因になる。

以上のことを考慮した上で、軽量コンクリートの強度と低密度を実現しうる軽量骨材の選択が重要である。

3. 実験概要

本実験では密度が小さくて高強度を持つ高強度軽量モルタルの開発のために実験 A、実験 B の二つの実験を実施した。

まず、実験 A では高強度軽量モルタルの開発のために 2 種類の骨材と W/B をパラメータとして強度変化を実験により調べた。

実験 B では実験 A で定めた高強度軽量モルタルの調査に繊維を混入し、繊維混入率が高強度軽量モルタルに及ぼす影響を調べた。力学的特性を調べるために、圧縮強度実験と曲げ強度実験を行った。

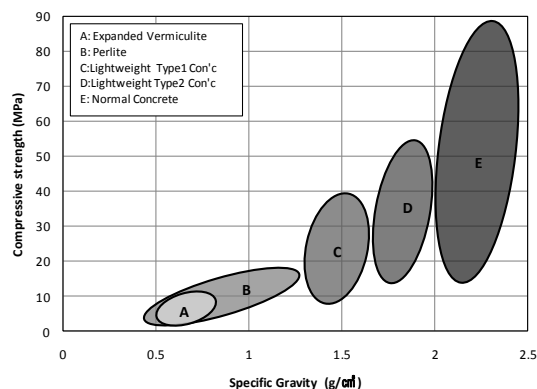
4. 高強度軽量モルタル開発：実験 A

予備実験により選定したセノライト(CL)とアルミナバブル(AB)の 2 種類の軽量骨材を用いて実験を行った。これらの骨材の選定ならびに、減水剤の使用量と骨材体積は予備実験を通して決定し、そこから W/B の変化による密度と強度の変化を調べた。

4.1 使用材料

(1) セメント、骨材

本実験では、低熱セメントとシリカフェームをプレミックスしたセメント SFCS を使用した。骨材は表—1 に示す物性を持つ軽量骨材を、絶乾状態で使用した。骨材 CL は、球状でありその平均粒径が $144.5\mu\text{m}$ と非常に小さく従来の軽量骨材に比べて強度が高い。また、独立した気泡による閉鎖型中空構造であるため、骨材の吸水を抑制し流動性の向上を図ることができる。骨材 AB はその粒径が 1-3mm の球状である。低 Na_2O の高純度アルミナであり、破球が少なく断熱性に優れる特徴がある。



図—2 軽量コンクリートの強度と密度の関係¹⁰⁾

表—1 骨材の物性値

Type	Bulk density (g/cm ³)	Main chemical composition (%)	
		SiO ₂	Al ₂ O ₃
CL	0.37	52.5	39.06
AB	0.65	0.13	99.7

表—2 高性能減水剤の物性

Type	Characteristic	Main component	Specific gravity (g/cm ³)
Superplasticizer	Dark brown (liquid)	Polycarbon	1.05

表—3 調合表

Series	W/B (Wt.%)	SP/B (Wt.%)	LWA/B (Wt.%)	Vol (%)
CL25	25	2	50	70
CL30	30	2	50	70
AB25	25	2	90	70
AB30	30	2	90	70

凡例：W:水、B:結合材、SP:減水剤、LWA:軽量骨材、Vol:骨材の体積

(2) 混和剤

本実験では混和剤としてポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。その特性を表—2 に示す。

4.2 試験体製作

材料の調合を表—3 に示す。練混ぜには 10L オムニミキサーを使用し、セメントと骨材を 1 分間混ぜた後、水と混和剤を入れ 3 分間練混ぜ、型枠に打設して製作した。圧縮強度試験で使用するために $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の大きさの円柱型試験体を製作した。

4.3 試験体の養生方法

試験体は打設後 2 日間湿潤養生した後、蒸気養生を実施した。温度上昇速度は 1 時間当り 15°C とし、 90°C まで上昇させ、最高温度到達後 24 時間養生する。その後養生室の温度を除々に外気の温度まで下げ、養生室に静置して湿潤養生を行った。載荷試験は材齢 7 日で行った。

4.4 空気量測定方法

空気量の測定は JIS A 1116 に準拠して測定した。その計算過程を以下に示す。

まず、コンクリートの単位容積質量 M (g/cm^3) を(1)式により計算する。

$$M = \frac{W}{V} \quad (1)$$

ここに、 W ：容器中の試料の質量(g)

V ：容器の容積 (cm^3)

コンクリート中の空気量 $A\%$ は M を用いて(2)式により求められる。

$$A = \frac{T-M}{T} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 T は空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 (g/cm^3) である。この T は(3)式によって求めることができる。

$$T = \frac{M_1}{V_1} \quad (3)$$

ここに、

M_1 : 1cm^3 当たりのコンクリートの各材料の質量の和 (g)

V_1 : 1cm^3 当たりのコンクリートの絶対容積の和 (cm^3)

4.5 圧縮強度試験

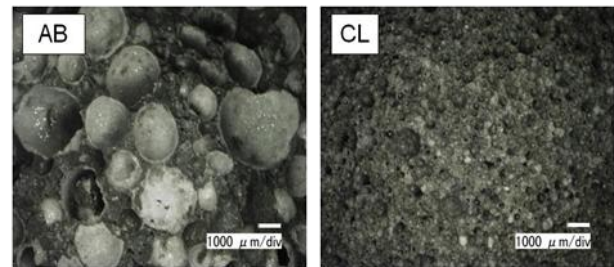
本試験の試験方法及び関連装備は ASTM C 39 及び JIS A 1108 に準拠した。用いた試験体は $\phi 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ の円柱型である。圧縮試験は万能試験機器(UTM)を使用し、 $0.1\text{MPa}/\text{sec}$ の速度で行った。このとき、コンプレッソメータを用いてひずみを測定し、ヤング係数を算出した。

4.6 実験結果及び考察

圧縮強度試験結果を表—4 に示す。この表からは、2 種類共に W/B の減少に伴って強度と密度が増加する傾向が確認でき、CL の方がより高い強度を示した。これは、マトリクスの強度に比べて骨材強度は非常に小さく、骨材の強度よりも粒径の影響の方が大きいためと考えられる。また、AB の粒径が $1\text{mm} \sim 3\text{mm}$ の範囲にある一方で、CL の粒径分布は $50 \sim 300\mu\text{m}$ の狭い範囲に 80%以上が集まった均一なものであるため、CL シリーズの方が骨材部分に生じる応力集中の度合いが小さくなるものと考えられることから、高強度を得られたものと考えられる。図—3 に示す破断面の顕微鏡写真から確認できるように、上記の AB25 と CL25 の粒径には明らかな違いが見られる。密度の面では、 W/B が 30%の場合にいずれのシリーズも密度

表—4 圧縮試験結果

Series	W/B (Wt.%)	Specific gravity (g/cm^3)	Compressive strength (MPa)
CL25	25	1.08	29.3
CL30	30	0.96	14.8
AB25	25	1.40	26.8
AB30	30	1.31	8.8



図—3 破壊断面

表—5 繊維の材料特性

Fiber	Symbol	Density (g/cm^3)	Length (mm)	Diameter (μm)	Tensile strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
Vynlon (PVA)	R15	1.3	6	40	1600	40

が小さくなったが、 W/B を 25%とした場合と比較して大きな強度の低下がみられた。これはセメントペーストの強度低下の影響が直接現れたものと考えられる。2 種類の骨材が同様の体積を持つ試験体で密度の差が大きい理由は、2 種類のかさ密度が大きく異なるためであると考えられる。すなわち、かさ密度が小さい CL を用いた試験体が小さな密度を持つと考えられる。

以上の結果、CL 骨材の使用と W/B が 25%という条件で、目標値に近い密度と強度を持つ高強度軽量モルタルを得ることができた。

5. 繊維混入率が各種力学特性に及ぼす影響：実験 B

実験 A によって定めた高強度軽量モルタル調合に繊維を混入し、繊維混入率が各種力学特性に及ぼす影響を調べる。ここでは繊維混入率をパラメータとして試験体を製作した。

5.1 使用材料の特性

セメントと減水剤は実験 A で用いたものと同じ材料である。骨材は実験 A で決定した CL を使用した。それぞれの物性値は表—1, 2 に示した通りである。繊維には高い強度と弾性率を持ち、練混時分散性及び接着性に優れ、ひび割れの抑制と曲げ強度、靱性の向上が期待できる PVA を採用した。使用繊維の材料特性を表—5 に示す。

5.2 試験体製作

材料の調合を表—6 に示す。練混ぜの手順は実験 A と

同様である。圧縮強度試験のために $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の大きさの円柱型試験体を製作し、曲げ強度試験のために $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ の角柱型試験体を製作した。また、養生方法及び空気量の測定方法は実験 A と同様である。

5.3 圧縮強度試験及び曲げ強度試験

圧縮強度試験は実験 A と同じ方法である。これに加え、曲げ強度試験により、繊維混入率による最大曲げ強度を測定した。

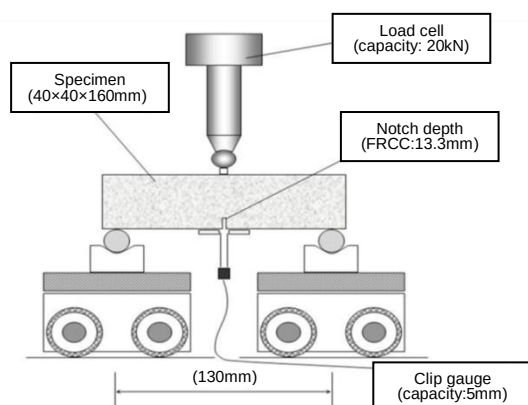
曲げ強度試験の試験方法及び関連装備は ASTM C 78-02 及び JCI-S-002-2003 に準拠した。図—4 に示すように $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$ 角柱型試験体の中心部を 13.3mm 切欠き、クリップゲージを設置し、 0.2mm/min の速度で載荷し 3 点曲げ試験を行った。このとき、荷重—CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)の関係を測定するとともに、最大荷重を記録した。

5.4 実験結果及び考察

(1) 圧縮強度

圧縮試験の結果を表—7 に、繊維混入率の変化に対する圧縮強度の変化グラフを図—5 に示す。F0 シリーズの場合は 29.3MPa 、F25 シリーズでは 34.5MPa 、F50 シリーズでは 37.7MPa 、F75 シリーズでは 49.0MPa であり、繊維混入率の増加に伴って圧縮強度が増加することが分かる。同様にヤング係数も強度の増加に伴って増大する傾向が確認できた。

破壊後の試験体を見ると、繊維が混入しない試験体は図—6 の F0 で見られるように約 45° で破壊されている。白く見える軽量骨材の部分が集中荷重を受けて先に破壊されたものと考えられる。図—6 の F75 は繊維を混入した試験体である、ひび割れの方法は約 45° で F0 と同じであるが、繊維の架橋により試験体表面部分は剥離しなかった。F25 及び F50 の試験体も同様の傾向を見せた。以上の実験結果より、CL を骨材として使用し、W/B は 25%、繊維混入率は 0.75% をすることで目標に定めた低密度 (1.0 程度)、高強度 (30MPa 程度) に近い軽量モルタルを得ることができた。目標値と実験結果を図—7 に示す。



図—4 切り欠き角柱 3 点曲げ試験の概略図

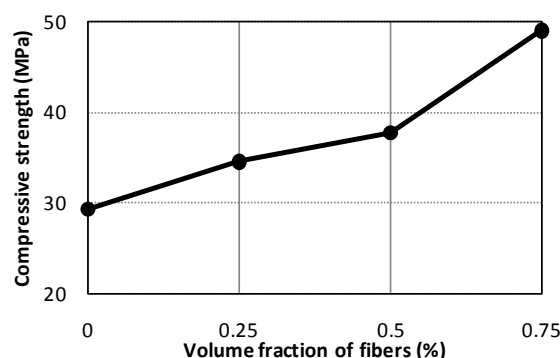
表—6 調合表

Series	W/B (Wt.%)	CL/B (Wt.%)	SP/B (Wt.%)	PVA (Vol.%)
F0	25	50	2	0
F25	25	50	2	0.25
F50	25	50	2	0.5
F75	25	50	2	0.75

凡例：W:水、B:結合材、CL:軽量骨材、SP:減水剤、PVA:繊維

表—7 圧縮試験の結果

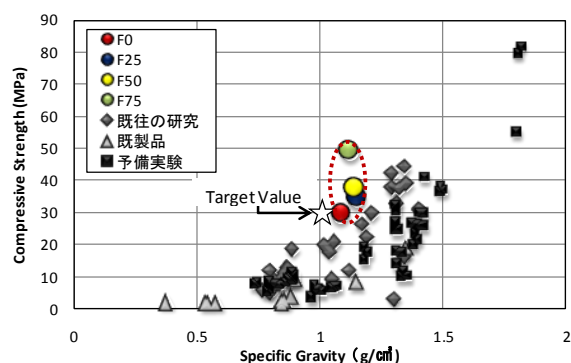
Series	Air content (%)	Specific gravity (g/cm^3)	Compressive strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
F0	27	1.08	29.3	9.64
F25	27	1.15	34.5	10.29
F50	26.8	1.14	37.7	10.80
F75	24	1.12	49.0	12.34



図—5 圧縮強度と繊維混入率の関係



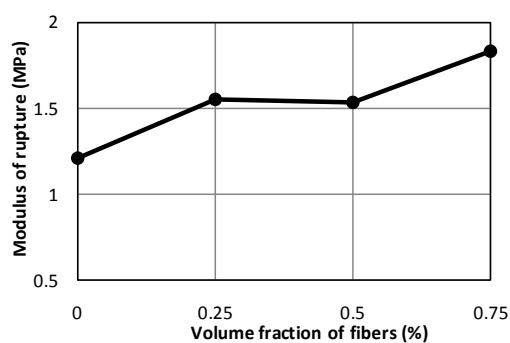
図—6 破壊した円柱試験体



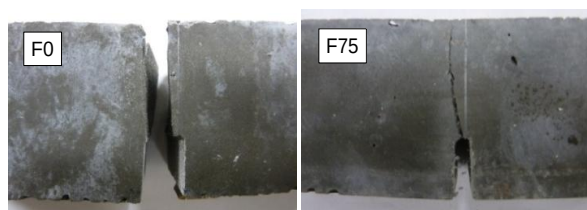
図—7 目標値と達成値

表—8 曲げ試験の結果

Series	Peak load (kN)	Modulus of rupture
F0	0.59	1.21
F25	0.76	1.55
F50	0.75	1.53
F75	0.9	1.83



図—8 曲げ強度と繊維混入率の関係



図—9 破壊した角柱試験体

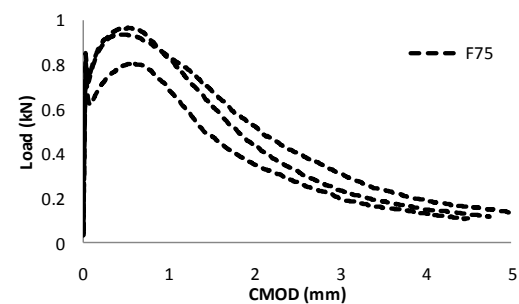
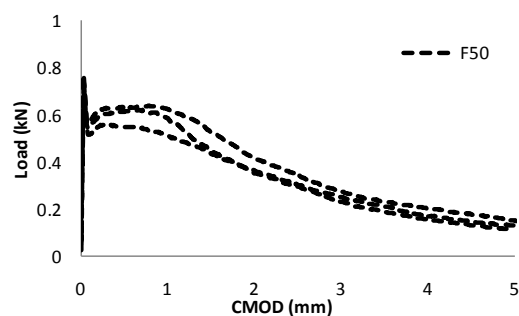
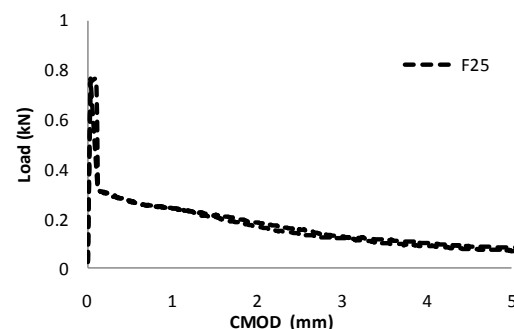
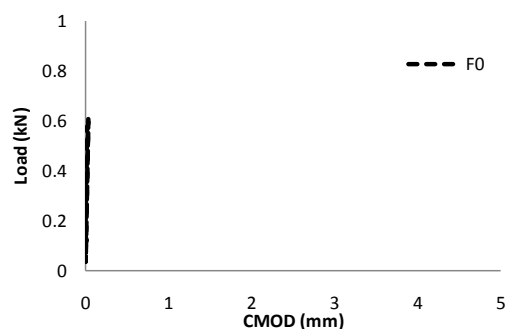
(2) 曲げ強度

曲げ強度試験で得た最大荷重と最大曲げ強度を表—8に示す。図—8に繊維混入率による曲げ強度の変化を示す。グラフから分かるように、繊維混入率の増加は曲げ強度の増加につながることが確認できる。曲げ強度試験により破壊された試験体の様子を図—9に示す。大部分の試験体は切欠き部分から破壊された。さらに、繊維混入率が0%である試験体は最大荷重に到達と同時に切欠き部分から二つに破断した。一方 0.25%, 0.50%, 0.75%の繊維混入率の試験体は、繊維がひび割れ部に架橋し、破壊後も破断には至らなかった。

(3) 荷重—CMOD 曲線

荷重—CMOD 曲線を図—10に示す。F0の試験体は最大荷重に到達すると同時に試験体が脆性破壊を起こす。しかし、F50、F75の試験体は最大荷重の後に一度強度低下を現わすが、その後繊維の架橋効果によって少しの硬化現象を現わす。この傾向は繊維混入率の増大につれて大きくなり、特にF75の場合その差が顕著に見られた。

顕微鏡でひび割れ部分を見た画像を図—11に示す。これを見ると繊維が架橋してひび割れの進展を抑制していることがわかる。



図—10 荷重—CMOD 曲線



図—11 繊維の架橋によるひび割れの抑制

6. まとめ

本研究では高強度軽量モルタルを開発に関する検討を行った。実験 A において 2 種類の軽量骨材を用いて骨材の種類、W/B を定めた。そこで得られた高強度軽量モルタルの調合を利用し、実験 B では繊維混入について、繊維混入率が試験体の力学的特性に与える影響を実験により検討した。実験 A の範囲からは以下の 1, 2 が、実験 B の範囲からは 3~6 の結論が得られた。

1. 骨材の粒径が小さくて均質でなければ、集中荷重を受けやすいため、高強度を得にくく、軽量骨材のかさ密度が軽量モルタル試験体の密度に直接的な影響を与える。
2. W/B を減少させることで効果的に強度を向上させられるが、密度も増加する。
3. 繊維混入率が 0.75%までの範囲では、繊維混入率の増加が圧縮強度の向上につながる。
4. 繊維の混入率が曲げ強度に及ぼす影響は 0%と 0.75%で比較すると曲げ強度の向上が確認できるが、それ以下の混入率では影響が低い。
5. 荷重-CMOD 曲線から見れば繊維混入率が増加するほど高強度繊維補強モルタル試験体の靱性が確実に向上する。
6. 顕微鏡写真を見ると繊維がひび割れに架橋し、抵抗が確認できる。

今後の方針として、高強度軽量モルタルの性能のより良い向上と特性把握のために繊維の種類、養生方法、耐久性試験などの力学的特性の検討や、熱伝導率など機能材料としての性能評価を行う必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) Thomas A. Holm and Theodore W. Bremner : State-of-the-Art Report on High-Strength, High - Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, US Army Corps of Engineers – Engineer Research and Development Center, ERDC/SL TR-00-3, 2000
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書-JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.423, 2009
- 3) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史：軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 4) 後藤健太郎, 橘高義典, 塚本剛史：高強度化軽量気泡モルタルの強度特性に及ぼす空気量の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999
- 5) 橘高義典：軽量繊維補強コンクリートパネルの曲げ試験におけるひび割れ分散効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000
- 6) 吉岡昌洋, 橘高義典, 田村雅紀：超軽量繊維補強コンクリートの付着性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000
- 7) 飯星明, 橘高義典, 田村雅紀ほか：軽量気泡コンクリートの収縮特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000
- 8) 吉岡昌洋, 橘高義典, 田村雅紀：両引き試験による超軽量繊維補強コンクリートの破壊特性の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2001
- 9) 吉岡昌洋, 橘高義典, 高橋仁智：高強度化繊維補強コンクリートの破壊特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1999
- 10) C.H.Seo：軽量コンクリート, Korea Concrete Institute, 2007
- 11) Hirozo Mihashi, Atsushi Kawamata, Yoshino Kaneko and Kazuki Kirikoshi : Influence of fracture toughness of matrix on the ductility of fiber reinforced cementitious composites, RILEM symposium, pp.597-606, 2000