

論文 最密充填理論を用いた断熱軽量モルタルの材料設計手法に関する基礎的研究

SUKMIN KWON*¹・菊田 貴恒*²・西脇 智哉*³・三橋 博三*⁴

要旨：無機系骨材を利用し、断熱材としても利用可能な軽量モルタルの開発を目的とし、骨材の充填率と最密充填理論を用いた設計方法を検討した。本研究では、中空バルーン形状の人工軽量骨材、発泡ガラスを用いた人工軽量骨材の2種類の無機系軽量骨材を使用し、軽量骨材の使用による強度低下を防ぐため、高強度マトリックスを導入して実験を行った。軽量モルタルの圧縮・曲げ強度、及び熱伝導率等の力学的特性を明らかにした結果、構造部材としての強度と断熱材としての熱伝導率を両立する軽量モルタルの開発ができることが確認された。

キーワード：軽量モルタル、充填率、最密充填、断熱性、熱伝導率、圧縮強度

1. はじめに

2020年度までのCO₂排出量25%削減に向けた取り組みの中で、民生部門におけるCO₂排出量の削減が急務になっている。住宅部門においても環境負荷を大きく削減するために住宅全体での省エネ化が求められている。そのための課題として、住宅の生産（流通を含む）や構法、工法を含めた省エネ化と並んで、性能や機能としての省エネ化の向上、例えば高断熱、高气密或多機能化などを連携しながら行うことが挙げられる。現在一般の建物に使用されている断熱材には密度が小さい発泡ポリスチレンや発泡ポリウレタンなどの有機系材料が採用されている。これらの材料の断熱効果は優秀であるが、軟化点や着火点は低く、火災時には比較的低い温度で多量の燃焼熱を発生させながら、様々な有毒ガスを発生させて人命被害を与える事例が多い。ここでは、住宅建築における軽量化と高断熱化、さらには生産の効率化を目的として、セメント系材料の軽量化と断熱化について検討を行った。

まず、図-1に示すようにセメント系材料の密度と強度の間に強い相関関係が存在する¹⁾。一般的に軽量骨材は真密度で比較すると普通骨材と大差ないが、単位容積質量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ればよいことがわかる。また、断熱性能を考える上で重要な熱伝導率は、図-2²⁾に示すようにモルタルにおいては密度の減少に伴って熱伝導率が低下することが確認されている。すなわち、セメント系材料の軽量化により、断

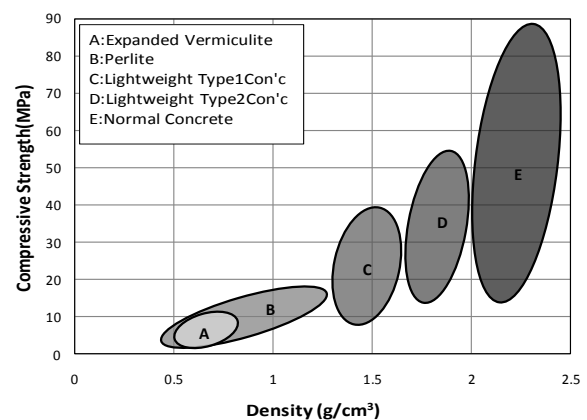


図-1 軽量コンクリートの強度と密度の関係¹⁾

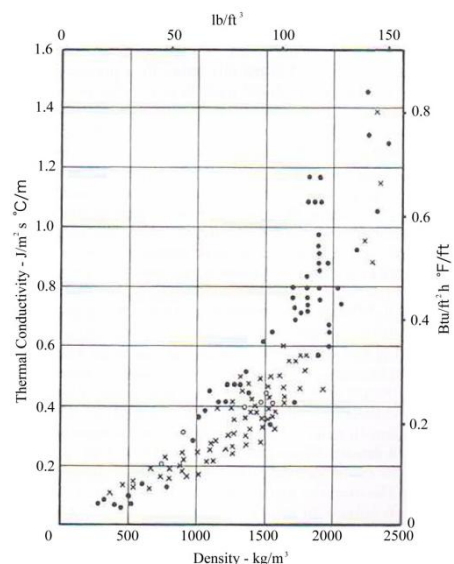


図-2 軽量モルタルの密度と熱伝導率の関係²⁾

*1 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北大学 名誉教授 工博 (正会員)

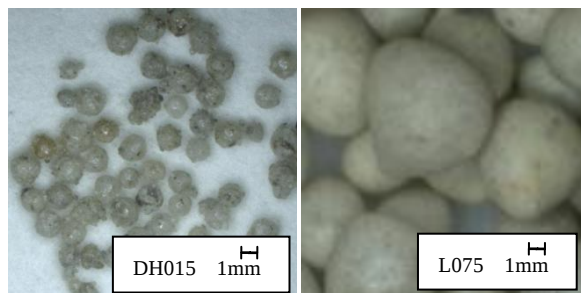
表－1 骨材の物性値

	DH 015	L 02	L 0375	L 075	L 15	L 3
真密度* (g/cm ³)	0.98	0.8	0.54	0.45	0.35	0.31
単位容積質量 (g/cm ³)	0.45	0.49	0.30	0.25	0.22	0.19
平均粒径(mm)*	0.15	0.2	0.38	0.75	1.5	3
主成 分(%)	SiO ₂	52.5	71	71	71	71
	Al ₂ O ₃	39.1	2	2	2	2

*試験成績表の値

表－2 骨材の充填率

シリーズ	DH 015	L 02	L 0375	L 075	L 15	L 3
充填率(%)	44.48	56.8	55.0	59.6	67.7	63.6



図－2 骨材の写真

熱性を確保することができる。

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。

そこで本研究では、密度の低下による軽量モルタルの強度低下を防ぐため、低熱セメントとシリカフュームをプレミックスしたセメントと高性能減水剤を用いた高強度マトリックスの適用を提案した。これと表－1に示すシリカとアルミナを主成分とした中空パールである人工骨材(DH シリーズ：真密度 0.98g/cm³)、発泡ガラスを用いた人工軽量骨材(L シリーズ：真密度 0.31g/cm³～0.8g/cm³)を組み合わせて強度を確保したまま軽量化を目指した。ただし、軽量骨材の真密度と平均粒径は試験成績表の値を用いた。この表からわかるように、ここでは、真密度も非常に小さい軽量骨材を用いている。また、本研究では更なる軽量化することを目的として、異なる粒径の骨材の充填率を利用した最密充填理論 (Packing Density Model(PD)³⁾⁴⁾を適用して骨材を緻密に充填する 2 成分系骨材充填設計⁴⁾も取り入れた。

このようにして作製した軽量モルタルの圧縮・曲げ強

度、及び熱伝導率等の力学的特性を明らかにし、無機系骨材を利用した断熱材としても利用可能な軽量モルタルの開発を目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本試験では、低熱セメントとシリカフュームをプレミックスしたセメント SFC を使用した。混和剤として褐色液体のポリカルボン酸系高性能減水剤(密度 1.05g/cm³)を使用した。骨材は表－1 に示す物性を持つ軽量骨材を使用した。また骨材の写真は図－2 に示す。この人工軽量骨材 DH015 は、球状でありその平均粒径が 150 μm と非常に小さい。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。人工軽量骨材である L シリーズは発泡ガラスを造粒し焼成したもので、内部に無数の微小独立気泡を有する球形に近い骨材である。そのため、軽量性や高断熱性が期待できる。骨材の充填率と単位容積質量は JIS A 1104(骨材の単位容積重量及び実績率試験方法)に従い実験により求めた。その結果を表－2 に示す。

2.2 2 成分系による充填特性の計算

2 成分の粉体充填モデルは McGeary⁴⁾が実験的研究を行い、2 成分における最大充填率は図－3、図－4 に示すように大きい粒子の直径(D_L)と小さい粒子直径(D_S)の比で表されることを示した。各々の同一粒径の充填率をはじめに求め、以下に示す式(1)にそれらの充填率を代入することで、2 成分の粒子が混合された場合、最大の充填率となる大きな粒子の体積比X_{Lmax}が計算される。

$$X_{Lmax} = \frac{\phi_L}{\phi_L + \phi_S - \phi_L \phi_S} \quad (1)$$

ここに、X_{Lmax}：大きい粒子の体積比[%]

φ_L：大きい単一粒子の充填率[%]

φ_S：小さい単一粒子の充填率[%]

図－4 より求められた 2 成分の最大充填率φ_{max}と、式(1)より求められた大きい方の粒子の体積比X_{Lmax}を以下に示す式(2)、(3)に代入し、得られたφ_{SL}、φ_{LS}を式(4)、(5)に代入することで、粒径の異なる 2 成分の充填特性が図－5 のように求められる。

$$\phi_{SL} = \phi_S + \frac{\phi_{max} - \phi_S}{X_{Lmax}} \quad (2)$$

$$\phi_{LS} = \phi_L + \frac{\phi_{max} - \phi_L}{1 - X_{Lmax}} \quad (3)$$

$$(\phi_P)_S = \phi_S \cdot X_S + \phi_{SL} \cdot X_L \quad (4)$$

$$(\phi_P)_L = \phi_{LS} \cdot X_S + \phi_L \cdot X_L \quad (5)$$

$$X_S + X_L = 1.0$$

$\phi_{SL} \cdot \phi_{LS}$: 大小二つの単一粒子を混合した場合の係数

ϕ_{max} : 直径比による 2 成分の最大充填率[%]

$(\phi_p)_s$: ϕ_s と ϕ_{SL} を結ぶ直線

$(\phi_p)_L$: ϕ_{LS} と ϕ_L を結ぶ直線

X_S : 小さい単一粒子の体積比

X_L : 大きい単一粒子の体積比

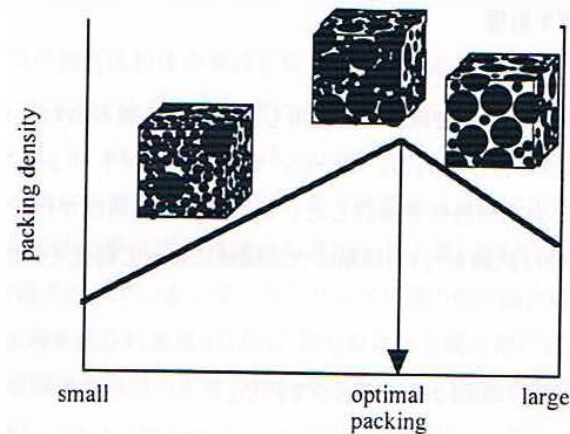


図-3 内部構造を緻密にする最適な粉体構成比⁴⁾

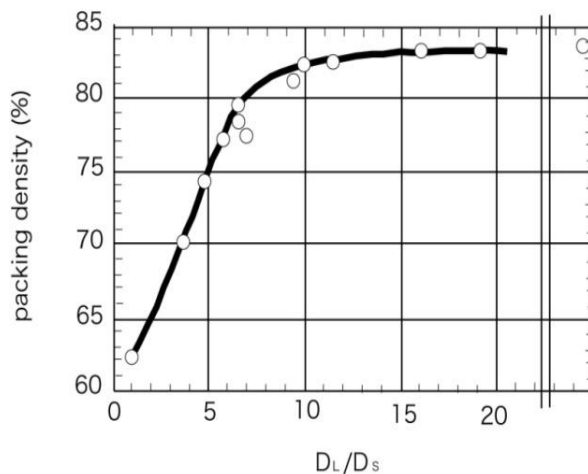


図-4 粒径比と充填率との関係⁴⁾

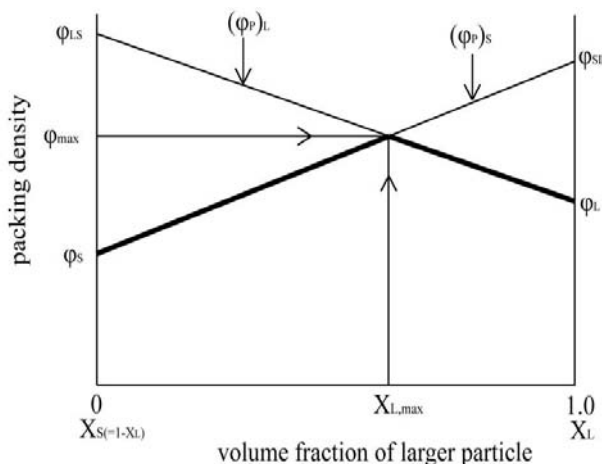


図-5 2成分系における充填マップ⁴⁾

表-3 2成分の骨材の充填理論適用結果

シリーズ名	骨材 (大)	骨材 (小)	充填率 (%)
PD(1)	L15	DH015	82
PD(2)	L15	L02	81
PD(3)	L3	L0375	81.5

表-4 調合表

シリーズ名	W/B (wt.%)	SP/B (wt.%)	LWA/B (wt.%)	Vol (%)	DC (g/cm ³)
DH015	25	0.9	27.9	47	1.26
L02	25	0.9	34.9	62	1.18
L0375	25	0.9	24.8	58	1.09
L075	25	0.9	27.6	65	0.99
L15	25	0.9	26.1	69	0.88
L3	25	0.9	24.2	70	0.88
PD(1)	25	2	14.3 37.0	82	0.727
PD(2)	25	2	14.1 27.2	81	0.83
PD(3)	25	2	8.8 24.6	81.5	0.795

記号 : W:水, B:結合材, SP:減水剤, LWA:軽量骨材, Vol:骨材の充填率,

DC:密度計算値

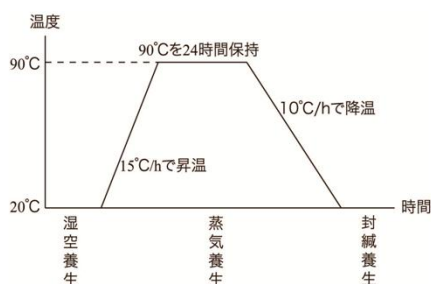
ただし、図-5 中の太線のように $(\phi_p)_s$ と $(\phi_p)_L$ のうち小さい方が、実際の充填特性に相当する。

以上のような一連の流れに沿って、実際の粉体の構成割合を定めた。図-4 からわかるように、おおよそ 10 倍程度の直径比の粉体を用いることにより、十分に高い充填率を実現できるものと考えられる。本研究における使用材料に関しては、約 10 倍の直径比を確保している。

本研究では直径の異なる 2 種類の骨材 (骨材 (大), 骨材 (小)) の組み合わせを 3 パターン (PD(1), PD(2), PD(3)) 用意し、充填モデルに適用した。その 3 シリーズの骨材の組み合わせと充填率を表-3 のように示す。ここで表中の充填率は上記の理論式で求めた値である。

2.3 試験体製作

実験に用いたシリーズの調合を表-4 に示す。本実験では各骨材の充填率を基礎として調合設計を行った。全シリーズの水結合材比を 25% にし、減水剤は単独の骨材のシリーズの場合には 0.9%, 最密充填理論を適用したシリーズには 2% を投入した。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 分間混ぜ、型枠に打ち込んで製作した。圧縮強度試験で使用するために $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱型試験体、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、熱伝導率試験で使用するために $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、厚さは 60mm の直方体試験体を製作した。



図－6 養生温度履歴

2.4 試験体の養生方法

試験体は打込み後 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 時間当たり 15°C とし 90°C まで上昇させ、最高温度到達後 24 時間養生した。その後養生室の温度を除々に外気の温度まで下げ、その後養生室で湿潤養生を行い、打込み後 7 日目に载荷試験を行った。養生温度履歴は図－6 に示す。

2.5 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 規格に準拠し、圧縮試験は万能試験機器を使用して、0.1MPa/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。

2.6 曲げ強度試験

曲げ強度試験の試験方法及び関連装備は ASTM C 78－02 規格及び JCI－S－002－2003 に準拠し、3 点曲げ試験を行った。

2.7 熱伝導率試験

測定は ISO 8301 と JIS A 1412－2 に準拠した測定装置を用いて 9 種類の試験体で測定を行った。測定条件は中心温度 30°C、温度差は 10°C とし、熱流方向は上向きとした。

3. 実験結果及び考察

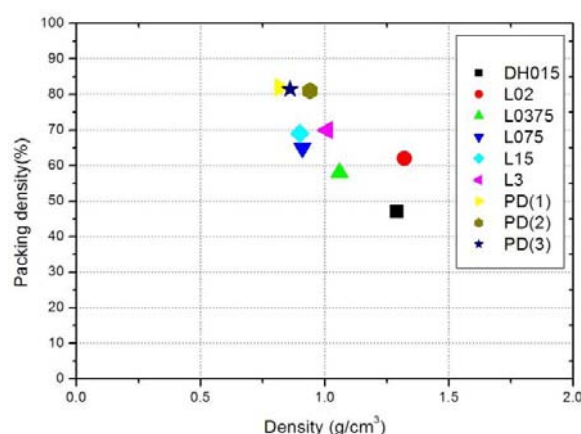
3.1 充填率及び密度が強度に与える影響

実験から求められた各シリーズの力学的な特性を表－5 に示す。また、充填率と密度の関係を図－7 に示す。この図から、単独の骨材を使用した DH015 と L2 シリーズでは充填率がそれぞれ 47%, 62%, 密度がそれぞれ 1.29g/cm³, 1.32g/cm³ であるのと比較して、DH015 と L2 で最密充填理論を適用した PD(1)シリーズでは、密度を 0.82g/cm³ まで低下させることができた。シリーズ L02 と L15, また L0375 と L3 を最密充填理論に適用した PD(2), PD(3)にも同様の傾向が確認された。すなわち、最密充填理論の適用により単体の骨材を使うよりも充填率を上げ、密度を低下させることが可能であった。これは骨材が試験体に占める体積が大きくなることによって密度が高いセメントの量が減って、その分密度が低下するためであ

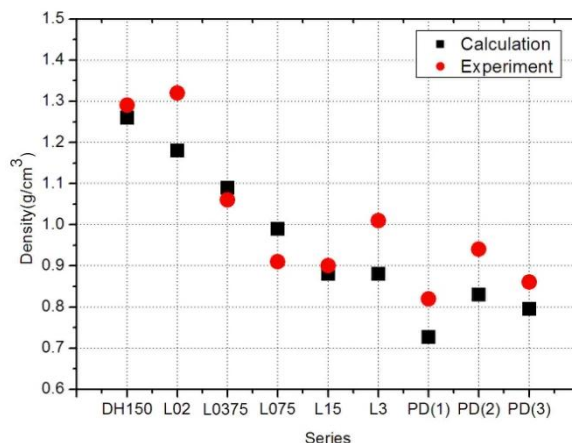
表－5 実験の結果

シリーズ名	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (W/m・K)
DH015	26.77	9.67	3.4	1.29	0.51
L02	26.05	7.85	3.7	1.32	0.49
L0375	15.67	※	2.7	1.06	0.38
L075	11.04	3.35	1.6	0.91	0.34
L15	13.07	5.13	1.6	0.9	0.30
L3	11.29	5.29	1.5	1.01	0.49
PD(1)	8.92	2.00	1.0	0.82	0.25
PD(2)	12.4	8.12	1.3	0.94	0.34
PD(3)	10.44	※	1.1	0.86	0.27

※はデータ無し



図－7 密度と充填率の関係



図－8 密度の計算値と実験値の比較

る。また、本実験で使用した全てのシリーズの密度の計算値と実験値を図－8 に示す。この図からわかるように、本研究で使用した材料設計方法で算出した計算値と実験値との誤差が 15%以下であり、計算に近い試験体の作製が可能であった。従って、低密度つまり軽量化を考慮した軽量骨材を用いた材料設計をする際、最密充填理論を適用することで十分に高い充填率を得ることができると

考えられる。

圧縮・曲げ強度試験結果を図－9、図－10 に示す。圧縮強度試験の結果からは密度の減少に伴って圧縮強度の低下が確認できる。まず、DH015 と L02 シリーズ以外の単独の骨材を用いたシリーズの場合は密度 0.9g/cm³～1g/cm³ 程度、圧縮強度 11MPa～16MPa の値を示した。最密充填理論を適用した PD(1)、PD(2)、PD(3)シリーズの場合、密度がそれぞれ 0.82g/cm³、0.94g/cm³、0.86g/cm³、また、強度が 8.92MPa、12.4MPa、10.44MPa で単体の骨材を用いた試験体より更に密度を低下することが出来た。これは充填率の増加によって、強度に与える影響が最も高いセメント量の削減されたためだと考えられる。曲げ強度も圧縮強度と同様に充填率が上がることによって密度が下がり、強度も低下するのが確認できた。

単独の骨材を用いた DH015 と L02 シリーズの場合、密度は二つとも 1.3g/cm³ 程度、圧縮強度 26MPa 程度を示した。図－11 に密度と強度の既往の研究⁴⁾との比較を示す。強度の目安として、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標準圧縮強度 24MPa を満足しながら普通コンクリートの密度 2.3g/cm³ 前後より 43.5%の軽量化ができた。

3.2 密度が熱伝導率に与える影響

熱伝導率測定結果を表－5、図－12、図－13 に示す。熱伝導率の算出は JIS A 1412-2 の HFM(Heat flow meter apparatus)法に準拠し、次の式により求めた。

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_2) \cdot R} = \frac{d}{R} \quad (6)$$

λ : 熱伝導率[W/m・K]

Q: 単位面積あたりの熱流量[W/m²]

d: 試験体厚さ[mm]

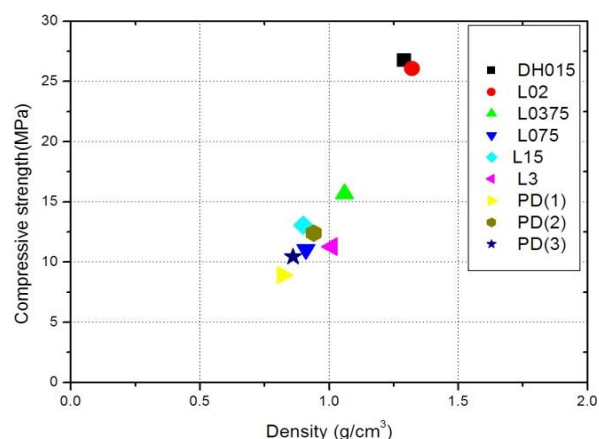
θ_1 : 試験体高温側表面温度[°C]

θ_2 : 試験体低温側表面温度[°C]

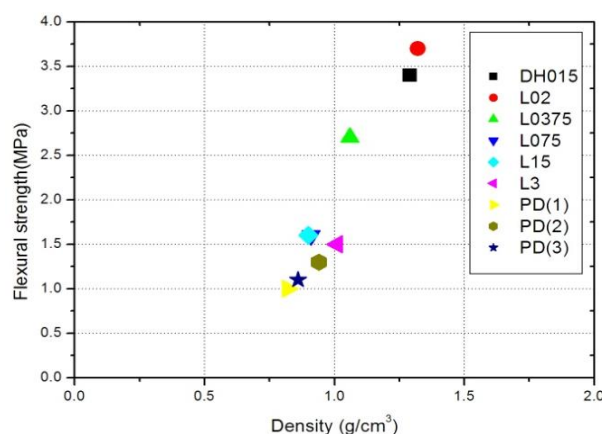
R: 試験体熱抵抗[m²・K/W]

図－12 に、各シリーズにおいて熱伝導率の測定結果は密度の低下によって比例して減少していくのが確認できた。

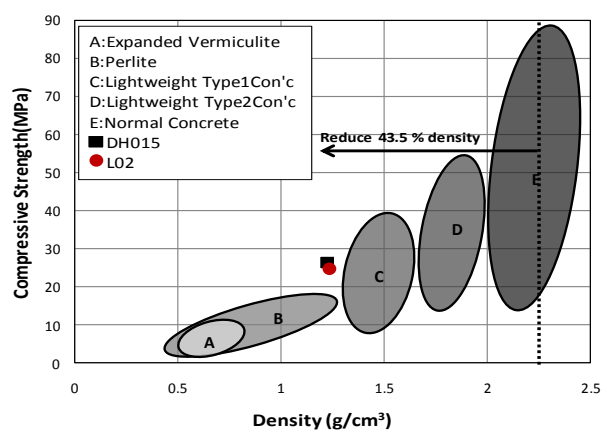
ここで、軽量モルタルを建築物に適用する場合の考察を行う。表－6 は国土交通省・経済産業省告示の「新省エネルギー基準」において、IV地域に必要な熱抵抗を示したものである。普通コンクリート（熱伝導率 W/m・K）と断熱材を併用した通常の仕様の場合、コンクリートの厚さを 250mm、断熱材の厚さ 45mm にすると表－6 に示した全部位における断熱性について新省エネ基準値を満足す



図－9 密度と圧縮強度の関係



図－10 密度と曲げ強度の関係



図－11 既往の研究との比較⁴⁾

ことができる。構造部材に適用可能な程度の強度を持つ DH015 と L2 シリーズの場合では、表－7 に示したように部位ごとにモルタルの厚さを 300～600 mm にすることによって断熱材の省略が可能となる。また、最密充填理論を適用した PD(1)の場合は部位ごとにモルタルの厚さを 150～300 mm にすることによって断熱材の省略ができる。この一方で、これらのシリーズは通常の構造部材に使用できる強度に達していない。そのため、二つの材料を組み合わせでサンドイッチパネル構造とし、必要な圧縮強

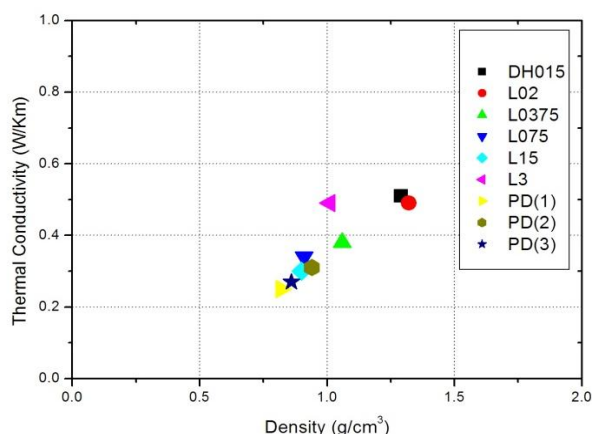


図-12 密度と熱伝導率の関係

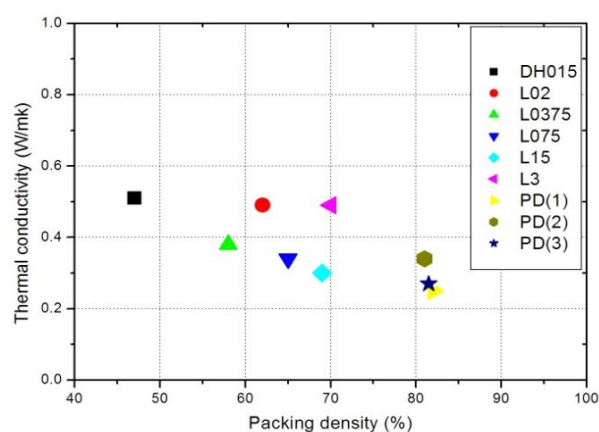


図-13 充填率と熱伝導率の関係

表-6 新省エネ基準値 (IV地域)

部位		必要な 熱抵抗値 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)	断熱材*の 厚さ(mm)
屋根又は天井		1.2	45
壁		0.8	30
床	外気に接する部分	1.0	35
	その他の部分	0.5	20

*断熱材の熱伝導率は 0.04 W/mK

度を持ちながら断熱性を確保することで、実用化できる可能性がある。それを壁に適用する場合は DH015 または L2 シリーズの厚さを 120mm, PD(1)シリーズの厚さを 140mm, 全体厚さを 260mm にすることで断熱材の省略が可能なモルタルパネルとすることが可能になると考えられる。

4. まとめ

本研究では、無機系骨材を利用し、断熱材としても利用可能な軽量モルタルの開発を目的とし、骨材の充填率と最密充填理論を適用し、材料設計を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 骨材の充填率を考慮した DH015, L02 シリーズの場合、二つとも圧縮強度 26MPa 程度、密度 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であった。最も密度の低い、最密充填理論を用いた PD(1)シリーズでは密度 $0.82\text{g}/\text{cm}^3$ 、圧縮強度 8.92MPa を示した。
2. 熱伝導率の測定を行った結果、密度が断熱性に与える影響が高いことを確認した。また、単体の骨材のみを使用したモルタルよりも、異なる粒径を持つ骨材を組み合わせる最密充填理論を適用したモルタルの方が高い断熱効果が得られた。
3. 本研究で材料設計に使用した最密充填理論を材料設計に適用する事によってセメント系材料の断熱

表-7 新省エネ基準を満たす軽量モルタルの必要厚さ

部位		必要な 熱抵抗値 ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)	DH015, L2 必要厚さ (mm)	PD(1) 必要厚さ (mm)
屋根又は天井		1.2	600	300
壁		0.8	400	200
床	外気に接する部分	1.0	500	250
	その他の部分	0.5	300	150

効果を得るための材料設計方法を提案した。また、開発した軽量モルタルを構造物に適用することで新省エネルギー基準を満たす断熱性能を、断熱仕上げ工事を行わなくても達成できる可能性を示した。

謝辞

本研究は住宅・建築関連先端技術開発助成事業(国土交通省)「靱性が高く、軽量で施工がしやすい断熱コンクリートの開発による基礎又は躯体断熱工法の検証と確立」の一部として実施された。熱伝導率の測定には北海道立北方建築総合研究所にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) C.H.Seo: LWA Concrete, Korea Concrete Institute, 2007
- 2) N.D.Concrete mixes for various building purposes, Proc of a Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, pp.28 - 41(Cement and Concrete Assoc, London, 1954)
- 3) D.J.Cumberland and R.J.Crawford: The Packing of Particles, Elsevier, pp.41-62, 1987
- 4) R.K.McGeary: Mechanical Packing of Spherical Particles, J.ACS, 44, pp. 513-522, 1961
- 5) A.Short and W.Kinniburgh, Lightweight Concrete 3d,ed., Applied Science Publishers, Ltd, London, 1978