

論文 表面改質軽量骨材による超軽量断熱コンクリートの力学特性の改善に関する実験的研究

橋戸 翔^{*1}・崔 希燮^{*2}・西脇 智哉^{*3}・SUKMIN KWON^{*4}

要旨：著者らが検討してきた、火災時にも安全な無機軽量骨材を用いた断熱材量「超軽量断熱コンクリート」の実用化に向け、既に強度の向上効果が報告されている骨材の表面改質技術および繊維補強技術を用いて、低密度のまま力学性能を向上させる手法の検討を行った。軽量骨材に予め少量の水を吸収させておくことで表面改質が可能であり、これを用いた試験体では、密度等の物理的性質を変化させずに、強度を従来の1.5倍程度に向上させることが可能であった。また、繊維補強によりさらなる強度の向上が可能であるとともに、弾性係数の向上により、試験体の変形の抑制にも効果的であることが確認された。

キーワード：軽量骨材, ポーラス構造, 表面改質, 繊維補強, 圧縮強度, 引張強度, 弾性係数

1. はじめに

1.1 研究背景と目的

2020年度までのCO₂排出量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となっており、住宅部門においては建築物の環境負荷の低減、すなわち省エネルギー化が求められている。そのような中で、建築物の持続的な高断熱化が注目されている。現在では発泡ウレタン等の有機系材料を用いた高性能断熱材が建築物の省エネルギー化に大きく貢献しているが、一方では着火点・軟化点が低く、火災時に比較的低温で多量の燃焼熱・有毒ガスを発生させるため、人命被害に繋がる危険を併せ持つ¹⁾。また、有機系材料の危険性を考慮して開発された無機系断熱材にロックウール等があるが、これらは390℃の条件下でアセトン・フェノール等を発生することが確認されており、火災時の安全性には依然として問題が残っている。したがって、無機系断熱材の中でも、火災時にも有毒ガス発生等の恐れのない材料を用いた断熱材の開発・利用が求められる。

図-1に示すように、一般に物質の熱伝導率と密度は比例関係にあるため、材料の軽量化が断熱性能の向上に繋がる。これらを背景に、KWONらにより高い断熱性能を有するセメント系材料についての研究が進められた²⁾。この研究では、低密度の無機軽量骨材を使用し、骨材間に空隙を持つポーラス構造を導入することで、大幅な軽量化を行った「超軽量断熱コンクリート(以下ULIC:Ultra Lightweight Insulation Concrete)」が開発された。通常の軽量コンクリートと併せて、図-1にULICの密度と熱伝導率の関係、図-2にULICの密度

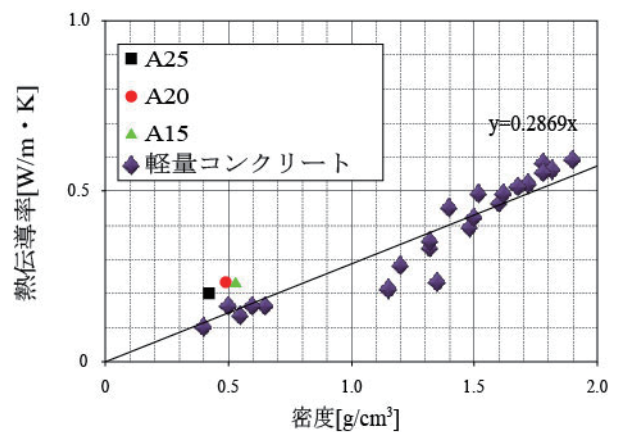


図-1 軽量コンクリートの密度と熱伝導率の関係²⁾

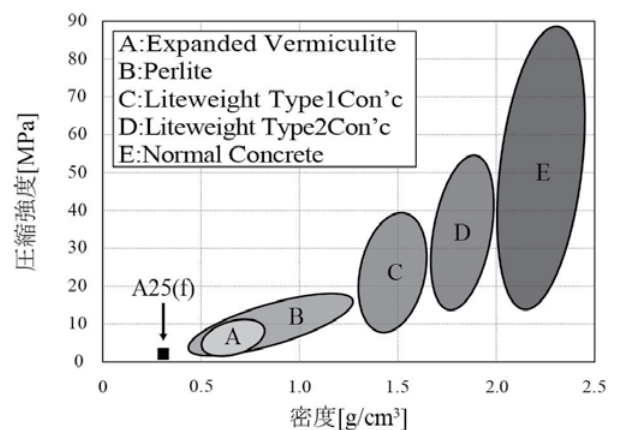


図-2 軽量コンクリートの密度と圧縮強度の関係²⁾

と圧縮強度の関係を示す。ここで、A15, A20, A25とはULICのポーラス構造の空隙率を理論値で全体の15%, 20%, 25%としたもの、A25(f)とは耐久性・強度の向上

*1 東北大学工学部 建築社会環境工学科 (現 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻) (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (現 北見工業大学 社会環境工学科) 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 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 修士(工学) (正会員)

のため、先の A25 に PVA 繊維による繊維補強を行ったものである。これらの熱伝導率は一般の建築用断熱材料の $0.02 \sim 0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ と比較すると大きい、躯体を厚くする事で十分な断熱性能の確保が可能である。さらに、無機質であり、高温条件下でも成分の分解により有毒物質等も発生しないため、火災時にも安全である。しかし、図-2 に示すように、ULIC は低密度である分強度が極端に低く、特に変形による破壊等により、長期間に亘る断熱性能の持続性が低下することが懸念される。現在の市場では、 $0.03 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 以下の熱伝導率を持ちながらも 0.80 MPa 以上の安定した圧縮強度を保持する断熱材も存在する³⁾。これに対して、A25(f) でも、 $0.59 \sim 1.14 \text{ MPa}$ 程度とばらつきがあり不安定であった⁴⁾。持続的な高い断熱性能を実現するためには、現在の低密度を維持したまま ULIC の強度を向上させることが必要である。

以上のことから、本研究では ULIC について、密度を維持しつつ圧縮強度及び引張強度を向上させることを目的とする。同時に、弾性係数の比較による検討も行った。目的達成の手法として、コンクリートの力学特性の向上が確認された骨材の表面改質技術⁵⁾を用いることで、ULIC の強度を改善し、また繊維補強技術との併用によりさらに強度を向上させる手法の検討を行う。

1.2 表面改質軽量骨材

本研究では強度改善の手法のひとつとして軽量骨材の表面改質を行った。表面改質技術は、C. T. Kennedy⁶⁾ による余剰ペースト理論を基に、崔ら⁵⁾ によって開発された技術である。予め低水セメント比のセメントペースト（改質ペースト）を骨材表面に可能な限り薄く附着させ、3日程度の気中養生期間（温度 20°C 、湿度 60% ）を設けて表面改質骨材とする。これを用いたコンクリートでは、コンクリートの弱点である遷移帯の性状が改善され、さらに表面形状の変化による摩擦力の発生と相俟って骨材・セメント間の附着強度を向上させることが確認されている。また、セメントは改質ペーストに使用した質量と本来の調合に用いる質量の差分をコンクリートの練混ぜに使用するため、密度等の物理的性能の変化も発生しない。本研究では表面改質を軽量骨材に施すための手法を検討し、改質による ULIC の力学特性の改善を行う。図-3 に軽量骨材の表面改質の概念図を、図-4 に一般および表面改質軽量骨材コンクリートの構成材料比率を示す。

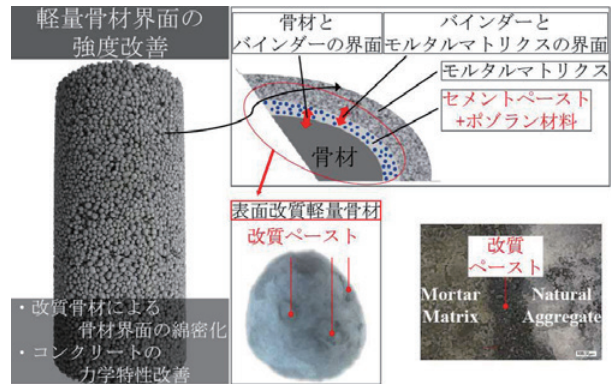


図-3 改質処理による軽量骨材界面の強度改善の概念図

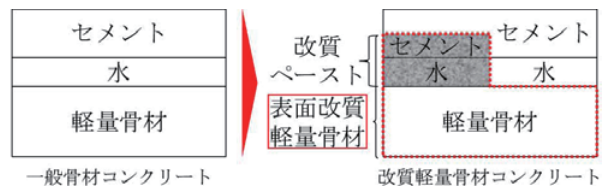


図-4 コンクリートの構成材料の比率

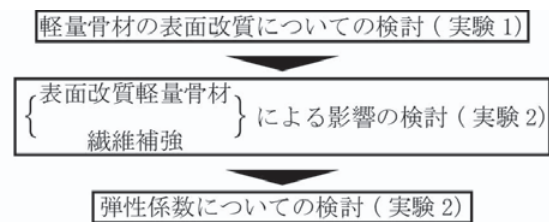


図-5 研究フロー

2. 実験概要

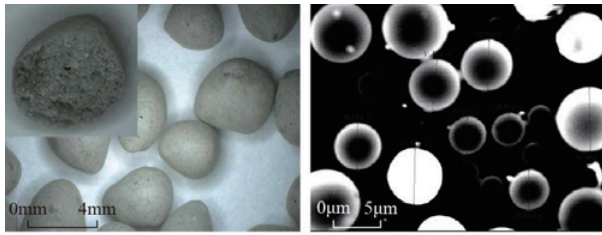
本試験では、実験 1 において軽量骨材の表面改質手法の検討を行った。実験 2 では実験 1 で作製した表面改質軽量骨材（以下改質骨材）を用いた M25 と、既往の研究において用いられた繊維補強を行わない ULIC (A25) を作製し、強度の比較を行った。さらに、それぞれに繊維補強を行った試験体 M25 (f) および A25 (f) を作製し、それらの強度の比較を行うとともに、表面改質を行った際に繊維補強が ULIC の弾性係数に及ぼす影響についての検討を行った。図-5 に本研究のフローを示す。

2.1 使用材料

本試験では、早強ポルトランドセメント（以下セメント）を使用した。また、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 1.05 g/cm^3 ）を使用した。軽量骨材には球状で粒径が $2 \sim 4 \text{ mm}$ の L3 軽量骨材を用いた。L3 軽量骨材は発泡ガラスを造粒して焼成したも

表-1 軽量骨材の物性値

骨材名	真密度 g/cm^3	かさ密度 g/cm^3	粒径 mm	充填率 %	吸水率 %	会社名
GB	0.125	0.068	0.065	54	-	住友スリーエム
L3	0.31	0.22	2~4	63.6	14.6	Liapor 社 (ドイツ)



L3 軽量骨材 Glass Bubbles
図-6 軽量骨材写真

のであり、内部に無数の微小独立気泡を有するため軽量化に有効である。さらに、球状の人工軽量骨材 Glass Bubbles (GB) を一部のセメントの代替として使用した。GB は独立した気泡による閉鎖型中空構造であり、セメントペーストの軽量化に有効であると同時に、骨材の吸水作用を抑制し流動性の向上に繋がる。軽量骨材の物性を表-1 に、骨材および Glass Bubbles の写真を図-6 に示す。また、繊維補強には PVA 繊維 6mm を使用した。

2.2 実験 1: 表面改質軽量骨材の作製

2.2.1 改質ペースト量の算定及び吸収水について

本実験では L3 軽量骨材の表面改質の手法についての検討を行った。改質ペーストは、コンクリートへの影響を防ぐため、骨材表面にできる限り薄く均一に付着させる必要がある⁴⁾。そこで、軽量骨材の直径 (2 ~ 4mm) を平均有効粒径で 3mm と仮定した場合に、骨材表面に 0.14mm 程度の薄膜として付着するように改質ペースト (W/C=20%) の量を算定した。しかし、L3 軽量骨材の吸水率は碎石骨材の 5% と比較して 14% と高く、練混ぜ時に高い吸水作用によるワーカビリティの低下が確認された。そのため、高性能減水剤を用いても改質ペーストが骨材表面に均一に行き渡らず、表面改質が不十分であっ

表-2 表面改質軽量骨材調合表

	C	W ₁ /C	LWA/C	SP/C	W ₂ /LWA
	wt.%	wt.%	wt.%	wt.%	wt.%
Q0	100	20	385	4	0
Q02	100	20	385	4	2
Q04	100	20	385	4	4
Q06	100	20	385	4	6
Q08	100	20	385	4	8
Q10	100	20	385	4	10

凡例 : C: 早強ポルトランドセメント, W₁: 練混ぜ水,
LWA: 軽量骨材, SP: 減水剤, W₂: 吸収水

表-3 ULIC 調合表

	C	GB	W/(C+GB)	SP/(C+GB)	LWA/(C+GB)	MLWA/(C+GB)	V/(C+GB)	Fiber/(C+GB)	空隙率
	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[wt.%]	[%]
A25	95	5	50	2	161	-	1	-	25
M25	91.4	8.6	50	1	-	276.8	-	-	25
A25(f)	95	5	50	2	161	-	1	0.5	25
M25(f)	91.4	8.6	50	1	-	276.8	-	0.5	25

凡例 : C: 早強ポルトランドセメント, GB: Glass Bubbles, W: 水, SP: 減水剤, LWA: 軽量骨材, MLWA: 表面改質軽量骨材, V: 増粘剤, Fiber: 繊維

た。そこで、予め軽量骨材に少量の水 (以下吸収水) を吸収させて骨材の吸水作用を抑えた上で、改質ペーストを加えて練混ぜを行った。ただし、水を多量に投入した場合には ULIC の強度が低下する可能性があり、L3 軽量骨材の吸水率が 14% 程度である事から、吸収水の量は骨材質量に対し 0% ~ 10% の間で 2% ずつ変化させて改質骨材 Q0 ~ Q10 を作製した。改質骨材の調合を表-2 に示す。

2.2.2 試験体作製

改質ペーストは 2L モルタルミキサーを使用してセメント・水・減水剤を 5 分間練り混ぜて作製した。同時に 10L オムニミキサーを用いて L3 軽量骨材に吸収水を少量ずつ投入しながら 5 分間練混ぜを行った後、改質ペーストを投入して 10 分間練り混ぜた。なお、少量の改質ペーストを全ての骨材表面に均一に分散させるように練混ぜ時間を定めた。練混ぜ終了後、必要に応じて最大 15 分程度の追加練混ぜを行った。養生は気中養生とし、3 日以上養生期間を設けた後、ULIC の作製に使用した。

2.3 実験 2: 表面改質軽量骨材を用いた ULIC の作製

実験 2 では、改質骨材と繊維補強技術を用いた力学特性の高い ULIC の開発を目的として実験を行った。既往の研究において用いられ、空隙率 25% の A25 を Control として使用し、実験 1 において作製した改質骨材を用いた M25 シリーズ、A25 に繊維補強を行った A25 (f)、改質骨材を使用した上で繊維補強を施した M25 (f) シリーズ作製して強度試験による比較検討を行った。なお、練混ぜに使用したセメントは、既往の研究において用いられた調査に使用するセメントの量と軽量骨材の表面改質に用いたセメントの量の差分としたため、打設後の ULIC の密度等の物理的性能に対する影響はないと考えられる。本実験に用いた調査を表-3 に示す。

初めに、2L モルタルミキサーを用いてセメントと GB を 1 分間練り混ぜた後、水と混和剤を混入して 5 分間練り混ぜて改質ペーストを作製した。また、A25 (f) 及び M25 (f) については繊維を 3 回に分けて投入し、3 分間の練混ぜを行った。最後に、10L オムニミキサーを用いて、予めミキサーに入れておいた改質骨材に改質ペーストを少量ずつ投入しながら 5 分間練り混ぜ、型枠に打設して作製した。試験体は、強度試験に使用するため、φ 100mm × 200mm の円柱型試験体を作製した。養生は 20°C

の湿空養生とした。ここでは、著者らの既往の検討に合わせ、早強ポルトランドセメントを用いた上で試験材齢を7日とした。

2.4 圧縮強度試験

圧縮試験は万能試験機器を使用し、載荷速度は0.01mm/secの速度で行った。この時、弾性係数の導出のために変位および荷重を測定したが、試験体が軽量骨材を使用したポーラス構造であり、コンプレッソメータやひずみゲージによる変位の測定は不可能であったため、載荷点変位を測定した。実験値には比例範囲が存在したため、この部分から弾性係数を導出した。試験体は2体ずつ作製し、その平均値を使用した。

2.5 引張強度試験

引張強度試験は万能試験機器を使用し、割裂引張試験により行った。載荷速度は0.01mm/secで行い、その他の試験方法はJIS A 1113に準拠した。

3. 実験結果及び考察

3.1 軽量骨材の表面改質の可能性について（実験1）

改質骨材(Q02, Q04, Q06)の写真を図-7に示す。Q02では吸収水として骨材質量の2%の水を事前に軽量骨材と練り混ぜたが、ワーカビリティの十分な改善には至らなかった。図-7(a)および(b)に示すように、十分に表面改質された軽量骨材が見られた一方で(b)緑点線内)、表面が改質されないまま残る骨材も多く見られ(b)赤点線内)、改質ペーストの均一な分散が不可能であった。また、吸収水を用いずに改質を行ったQ0についても同様であった。このことから、吸収水量が2%以下の場合には表面改質が不十分と言える。

Q04については、図-7(c)および(d)に示すようにある程度均一な表面改質が可能であったが、図-6(e)に示すように大きな軽量骨材塊が生じ、改質ペーストの分散性には少々問題があると言える。

一方、Q06～Q10については、図-7(f)及び(g)に見られるように改質ペーストの分散にムラが生じず、養生後は全体が均一に弱く結合していた。このことから、吸収水量が骨材質量の6%以上の場合には、改質ペーストの均一な分散が可能と言える。

以上の結果から、骨材作製時に投入する吸収水量が多いほど、練混ぜ時のワーカビリティが向上すると言え、特に吸収水量が軽量骨材の質量に対し少なくとも4%以上の場合に表面改質が可能である。これらは、吸収水量が多いほど、軽量骨材内部の空隙が水で満たされ、練り混ぜ時の軽量骨材の吸水作用が抑えられるためと考えられる。これにより改質ペースト中の水分が損なわれないためワーカビリティが向上し、改質ペーストが全ての骨材表面に均一に分散させることができた。

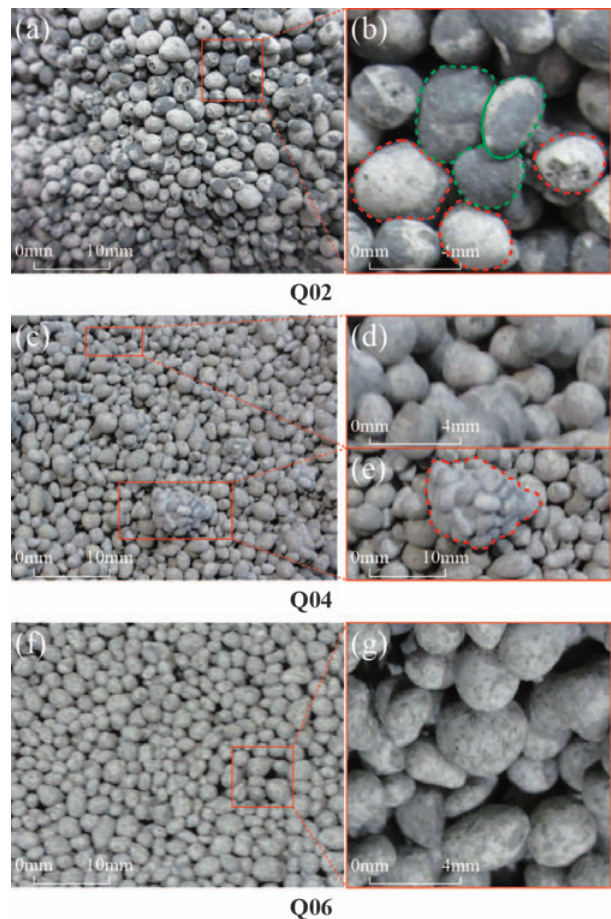


図-7 表面改質軽量骨材写真

表-4 実験2試験結果

シリーズ名	圧縮強度 [Mpa]	弾性係数 [MPa]	引張強度 [Mpa]	密度 [g/cm ³]
A25	0.63	24.34	0.18	0.34
M25-04	1.21	53.78	0.31	0.38
M25-06	0.93	37.97	0.24	0.34
M25-08	0.84	34.56	0.22	0.33
M25-10	0.80	49.67	0.17	0.33
A25(f)	1.16	60.47	-	0.36
M25(f)-04	1.17	47.27	0.32	0.35
M25(f)-06	1.40	66.12	0.33	0.38

3.2 表面改質軽量骨材を用いたULICの比較（実験2）

強度試験により得られた結果と各試験体の密度の測定結果を表-4に示す。また、密度と圧縮強度の関係を図-8に、密度と引張強度の関係を図-9に、表面改質時の吸収水量と圧縮強度の関係を図-10に、吸収水量と引張強度の関係を図-11に示す(Group AおよびA25)。図-8、図-9に示す通り、表面改質を行ったもののうち、吸収水量4%～10%の条件下で作製した改質骨材を用いた試験体(Group A)は、表面改質を行わない軽量骨材を用いた試験体(A25)と比較して強度が向上することが確認された。特に、Q04を用いたULICではA25に対し密度が0.04g/cm³程度大きかったものの、1.5倍程度の強度の

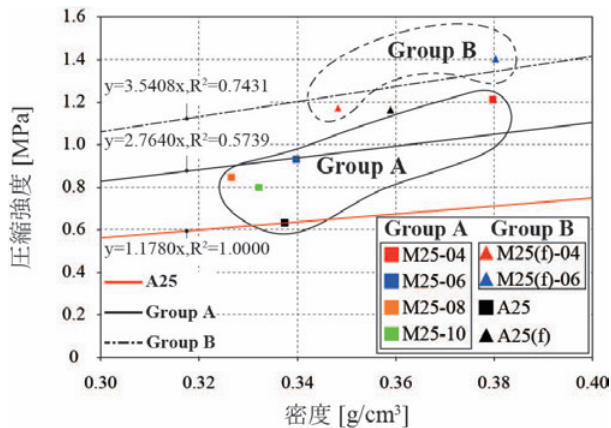


図-8 密度と圧縮強度の関係

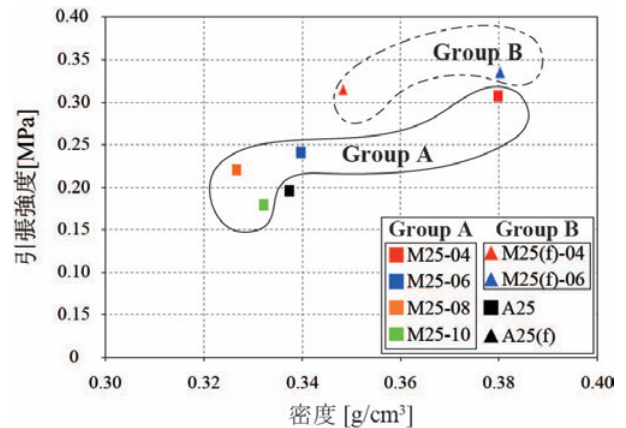


図-9 密度と引張強度の関係

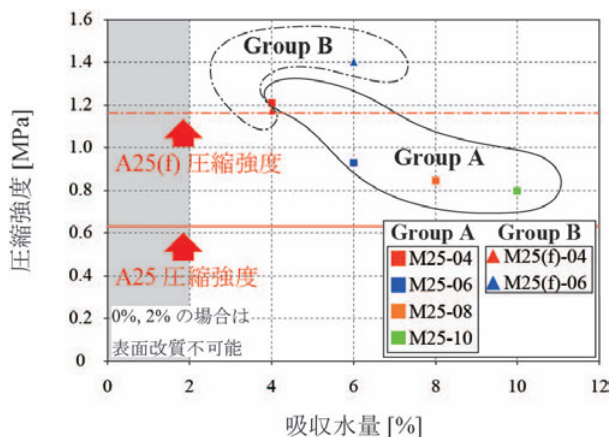


図-10 吸収水量と圧縮強度の関係

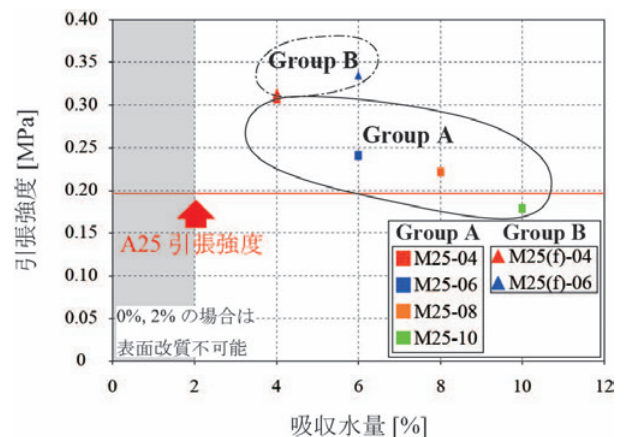


図-11 吸収水量と引張強度の関係

改善が確認された。一方で、Q06 及び Q08 を用いた試験体では、A25 よりも小さい密度でありながら、高い強度の実現が可能であった。

また、図-10、図-11 に示す通り、軽量骨材の表面改質時に用いる吸収水量の違いにより、圧縮強度および引張強度に差が出る事が確認された。本実験の条件下では、吸収水量が小さいほど強度の改善効果大きい。以上のことから、表面改質軽量骨材を使用することで ULIC の強度が向上し、表面改質の際には吸収水量が少ない方が強度の向上率が高いことを確認した。

3.3 表面改質及び繊維補強の併用による影響（実験 2）

繊維補強を行った各試験体の強度試験の結果と密度の測定結果を表-4 に示す。また、3.2 と同様に各関係のグラフを図-8 から図-11 に示す (Group B および A25(f))。繊維の混入量が過剰な場合、コンクリートのフレッシュ性状が損なわれることが分かっているが⁶⁾、本試験に用いた調査では良好なフレッシュ性状が確保されていた。図-8 (A25(f)) に示す結果のように、繊維補強は ULIC の強度の改善に効果的である。また、表面改質および繊維補強を用いた M25(f) シリーズ (図-8、図-9) についても、表面改質軽量骨材のみを使用した M25 シリーズ (Group A) と比較して強度が向上することを確認した。特に、Q04 を用いた ULIC に着目すると、M25 よ

りも $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ 程度低い密度ながら同程度の強度を発現し、Q06 を用いた ULIC に着目すると、 0.5MPa 程度の強度の向上効果を確認した。

吸収水量と強度の関係については、図-10 および図-11 からは、Group A のような負の相関は見られなかったが、これは試験体の密度に差があるためである。

以上のことから、繊維補強が ULIC の強度の向上に有効であり、表面改質軽量骨材と併用することでさらなる性能向上が可能である。

3.4 ULIC の弾性係数について（実験 2）

ここでは、実験 2 の結果を用いて弾性係数についての検討を行った。実験 2 において、コンプレッソメータ等による正確なひずみの測定が困難であったため、変位と荷重により ULIC の変形性能の考察を行った。Q04・Q06 それぞれを使用した場合の M25 シリーズと M25(f) シリーズの変位-荷重グラフを図-12 及び図-13 に示す。また、変位・荷重及び試験体の寸法から求めた各シリーズの弾性係数を図-14 に示す。

A25 を基準に比較すると、表面改質と繊維補強は弾性係数の改善に効果的なことが分かる。特に、図-12 および図-13 に示すように、M25 シリーズよりも A25(f) の方が変形しにくく、ULIC の変形を抑制するには繊維補強が最も効果的であると考えられる。

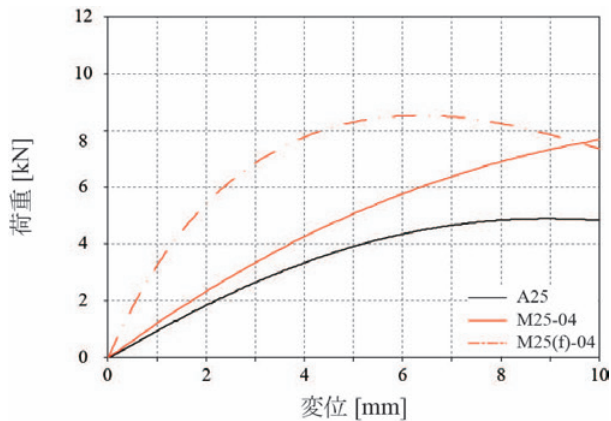


図-12 M25-04 及び M25 (f)-04 の変位と荷重の関係

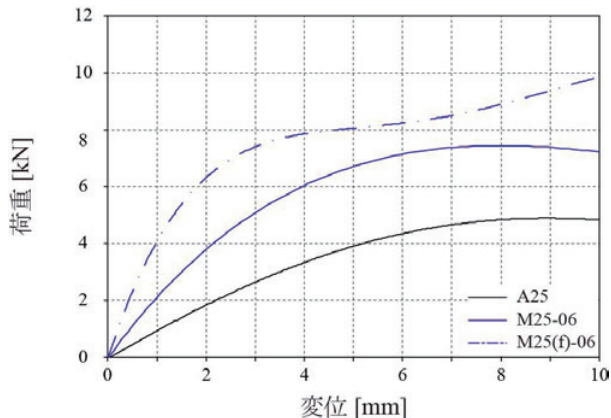


図-13 M25-06 及び M25 (f)-06 の変位と荷重の関係

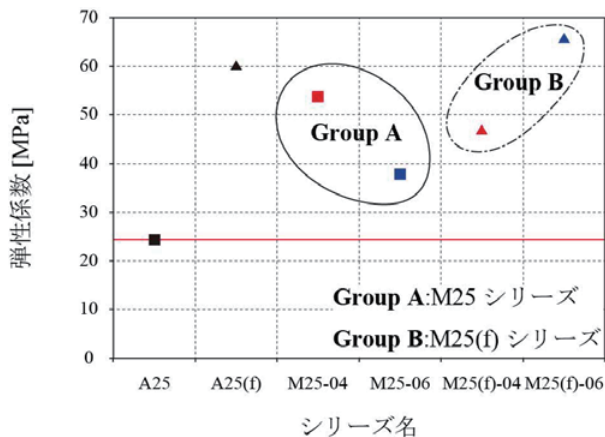


図-14 各シリーズの弾性係数比較

3.5 実用化に向けた考察と今後の展開

実験 1 より、軽量骨材の表面改質は吸収水量が 4% 以上の場合に可能であったが、実験 2 より ULIC の強度の向上率を確保するためには、吸収水量をなるべく少量に抑える必要がある。よって、吸収水量の最適値は 4% ~ 6% であると考えられる。一般に、コンクリートの養生時に骨材周辺に水が集中し、遷移帯が形成されて弱点となる。表面改質により ULIC の力学特性が向上したのは、軽量骨材を使用した場合も、養生中の骨材周辺の水を減少させることで、遷移帯が改善されるためと考えられる。

また、繊維補強により、同程度の密度でもさらに

ULIC の強度および弾性係数を向上させることが可能であった。繊維補強は、コンクリートにひずみ硬化特性を付加するために有効である⁷⁾。しかし、圧縮負荷を受ける場合においても、骨材間を架橋している繊維が骨材同士の分離・変形を抑制することで、強度と弾性係数が向上すると考えられる。なお、繊維の混入量が多いほど力学特性は向上するが⁷⁾、同時にセメントペーストのフレッシュ性状が損なわれる。しかしながら、本研究の条件下ではフレッシュ性状に問題はなかったため、今後は繊維の混入量を変化させた上での検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、ULIC の力学特性の向上を目的として、軽量骨材の表面改質技術および繊維補強技術を用いた改善手法を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

1. W/C=20% の改質ペーストを用いた軽量骨材の表面改質は、事前に軽量骨材に水を吸収させることで可能であり、特に骨材質量に対し 4% 以上の場合に十分な表面改質が可能であった。
2. 表面改質軽量骨材を用いることで ULIC の強度が上昇した。またその際の強度の向上率は、改質骨材の作製に用いた吸収水量と負の相関があることを確認した。
3. 繊維補強により、ULIC の強度と弾性係数が向上することを確認した。セメントのフレッシュ性状は良好で、今後は繊維の混入率を変化させた検討が必要である。

参考文献

- 1) Lianga H.H., Hob M.C., "Toxity characteristics of commercially manufactured insulation materials for building applications in Taiwan", Construction and Building Materials, Vol.21, pp.1254-1261, 2007
- 2) 韌性が高く、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、住宅・建築関連先端技術開発助成事業補助金成果報告書、2012 年 3 月
- 3) 広陽商工株式会社ホームページ (<http://www.koyoshoko.co.jp/sub0118.html>, 2014 年 1 月 2 日確認)
- 4) 富田浩平：超軽量断熱コンクリートブロックの実用化に関する実験的検討、東北大学卒業論文、2013
- 5) 崔 希燮：砕石の表面改質によるコンクリートの性能改善および再資源化効率の向上に関する研究、東京大学博士学位論文、2013
- 6) C.T.Kennedy : The Design of Concrete Mixtures, Proceedings of the ACI, Vol.36, pp.373-400, 1940
- 7) 高橋和文：ビニロン繊維補強再生コンクリート梁部材の構造特性 / その 1 5 週経過時の付着性状、日本大学生産工学部第 45 回学術講演会講演概要、pp89-90, 2012