

省資源型軽量骨材の実用化に関する研究

松尾栄治

九州産業大学

概要：粘土を焼成して作製した軽量骨材は資源的な観点から環境負荷低減型骨材として期待でき、特にインドネシアでは良質な骨材が生産されている。本研究では、この軽量骨材に着目して簡易的にモルタルで物性評価することを目的に、種々の実験的検討を行った。その結果、本骨材は軽量性が大きいわりには耐久性に優れており、実用性への期待が高かった。

1. はじめに

筆者はインドネシアの良質な地質を活用して作製された粘土系軽量骨材（Clay Lightweight, 以下 CLW と称す。）に着目し、これを細骨材として使用した軽量モルタルについて、強度性状や耐久性に関する基礎物性を明らかにすることを目的とした。

CLW 骨材の製造元は在インドネシアの中国系メーカーで、膨張粘土骨材の一種である。一般に膨張粘土骨材を用いた軽量コンクリートは他の軽量骨材で作られたものよりも強度が高いといわれている¹⁾。筆者らは本骨材が「軽量骨材の欠点である乾燥収縮の増大」を抑制できる点に着目している。本骨材は次のような過程で製造される。すなわち、最初に原料である粘土を 5~20mm の小さい径まで乾燥させて粉砕する。その後、1150~1250℃のロータリーキルンで 5~10 分間急速に燃焼させた後に常温まで冷却させる。この粘土は高温で熱することにより体積が数倍に膨張する性質を有する。この骨材は粘土由来であるために、環境配慮型材料としても期待ができる²⁾。日本でも多くの人工軽量骨材が構造用骨材として製造されていた経緯があるが、材質的に最も近いものとしては非造粒系の膨張頁岩を主原料とした軽量骨材が該当する^{3)~4)}。

CLW 骨材を用いたコンクリートについては、水セメント比を変化させた円柱供試体の圧縮強度と透水係数を予備実験的に求めている。その結果を表 1 に示す。3 配合とも密度は 1.77g/cm³ 程度である。強度的に問題はないものの、透水係数が大きく耐久性に課題が残っており、対策を講じる必要があった⁵⁾。

本研究では、CLW 粗骨材内部に存在する強度的弱点を除去することを目的に、CLW 粗骨材を破砕して細骨材を製造した。破砕により軟弱部が除去され、比強度の高い細骨材が作製されたと考えている。この CLW 細骨材を研究対象に、

これを使用した軽量モルタルの諸物性を実験的に求めた。すなわち、密度や各種強度性状といった基本的な力学性状、懸念される耐久性としての乾燥収縮特性、凍結融解抵抗性、暴露における抵抗性などを明らかにした。

2. 実験方法

(1) 使用材料

細骨材として用いた軽量骨材は、CLW 骨材を

表 1 CLWコンクリートの結果

W/C (%)	単体量(kg/m ³)				圧縮強度 (N/mm ²)	透水係数 (m/s)
	W	C	S	G		
47	176	375	580	722	23.0	2.13×10 ⁻⁸
50	188	375	563	702	20.8	5.53×10 ⁻⁸
52	197	375	563	702	17.5	7.82×10 ⁻⁸

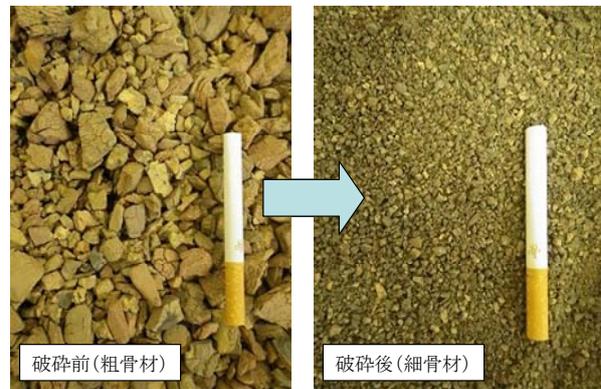


図 1 CLW骨材の外観

表 2 配合表

配合 No.	CLW 置換率 (%)	W/C (%)	混和剤 ※	単体量(kg/m ³)					理論密度 (kg/L)
				W	C	JIS砂	CLW	混和剤	
1	0	50	—	256	512	1543	-	-	2.31
2	30	50	—	256	512	1080	279	-	2.13
3	60	50	—	256	512	617	558	-	1.94
4	100	50	—	256	512	-	929	-	1.70
5	100	50	1	256	512	-	929	10	1.71
6	100	50	2	256	512	-	929	20	1.72

※混和剤は収縮低減剤で、「1」が標準使用量、「2」は標準使用量の2倍を意味する。

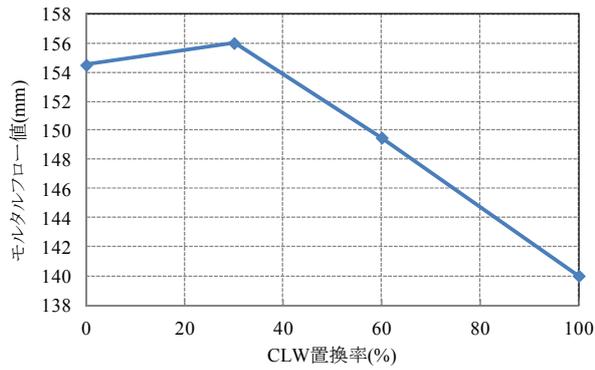


図2 CLW置換率とモルタルフロー値の関係

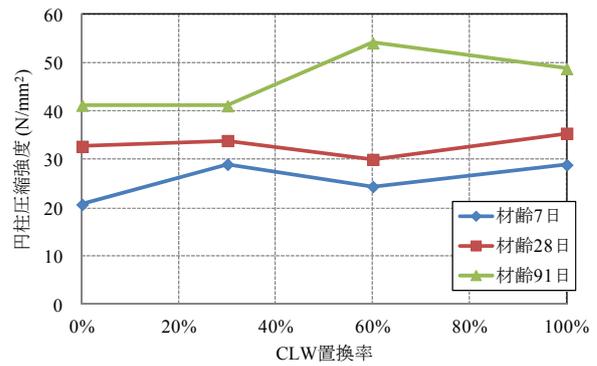


図3 CLW置換率と円柱圧縮強度の関係

表3 強度試験結果一覧

CLW置換率(%)	材齢(日)	角柱供試体		強度(N/mm²)						
		密度(g/cm³)	吸水率(%)	曲げ	角柱圧縮	2面せん断	円柱圧縮	割裂引張	ヤング係数	
0	7	2.24	1.75	7.71	35.2	7.24	20.7	3.28	27322	
	28	2.28	1.98	8.79	49.3	10.13	32.7	3.85	32098	
	91	2.26	2.37	8.18	39.1	11.68	41.2	4.92	32559	
30	7	2.13	2.33	7.22	42.1	6.36	29.0	3.44	23214	
	28	2.08	3.01	8.44	50.0	9.52	33.9	4.01	24178	
	91	2.15	3.49	8.57	49.6	13.91	41.1	4.37	27133	
60	7	1.9	3.41	6.97	40.8	7.63	24.4	3.84	16775	
	28	1.92	3.99	8.13	50.1	8.69	30.0	3.87	21231	
	91	1.98	4.82	8.78	42.1	13.6	54.1	5.11	22398	
100	7	1.63	4.65	6.40	34.8	6.85	28.9	3.01	12679	
	28	1.66	5.89	8.03	45.3	7.86	35.4	4.25	15284	
	91	1.67	7.21	6.51	46.9	8.89	48.8	4.73	15406	

最大粒径が 5mm 以下になるまでアムスラー式圧縮試験機を用いて繰り返し破砕し、粒度調整することにより作製した。その外観を図1に示す。母材となる CLW 粗骨材の化学分析の結果では、SiO₂ が 66~70%、Al₂O₃ が 16~18%、Fe₂O₃ が 4.6~5.6%であり、強熱減量は 0.2~0.3%である。物理的性質は、表乾密度 1.40g/cm³、絶乾密度 1.19g/cm³、吸水率 18.3%、粗粒率 6.18、最大寸法は 20mm であり、吸水率が極めて大きいという欠点を有することが特徴である。これを破砕して作製した CLW 細骨材の物性は、表乾密度 1.60g/cm³、絶乾密度 1.33g/cm³、吸水率 20.5%、粗粒率 3.03、単位容積質量 0.79kg/l、実積率 59.6%となった。吸水率は母材と同様に極めて大きく、破砕することによりさらに吸水率が微増した。

表2に配合を示す。CLW 細骨材の比較用としては JIS 標準砂を用いた。すなわち、セメントの強さ試験の配合を基準(配合 No.1)とし、JIS 標準砂を CLW 細骨材に体積置換(置換率 30, 60, 100%)した。

セメントは普通ポルトランドセメント、練混ぜ水は上水道水を用いた。混和剤はグリコールエーテル誘導体を主成分とする乾燥収縮低減剤であり、長さ変化試験においてのみ使用した。

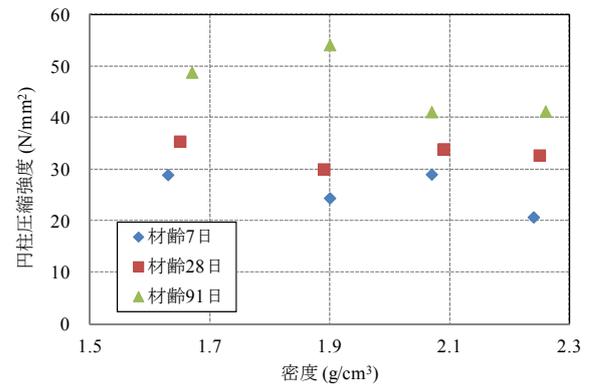


図4 密度と円柱圧縮強度の関係

すなわち、収縮低減剤を標準量および標準量の2倍(以下、図表においてはそれぞれ Agent1, Agent2 と表記。)を使用した。効果としては収縮量の低減のほかに組織の緻密化が期待できる。

CLW 細骨材は前述のように吸水性が大きく、表乾状態の判定においてばらつきや個人差が生じやすい。計量作業におけるその影響を除去するために、練混ぜ時には絶乾状態として使用し、計算される吸水量を単位水量とは別に外割りで追加して単位量の調整を行った。また、骨材の吸水にはある程度の時間がかかるため、フレッシュ状態が一定となるまで十分に練混ぜ時間を確保する必要がある。そこで、練混ぜは1軸強制ミキサーを用い、水以外の材料を十分に空練りし、水および混和剤を混入してから数分以上の十分な練混ぜ時間を確保し、目視によりコンシステンシーに変化がなくなったことを確認してから排出した。

(2) 実験項目

基本的な力学性状として、CLW モルタルの曲げ強度、角柱圧縮強度、2面せん断強度、円柱圧縮強度およびヤング係数、割裂引張強度を測定した。配合は表1の No.1~4 を対象とした。

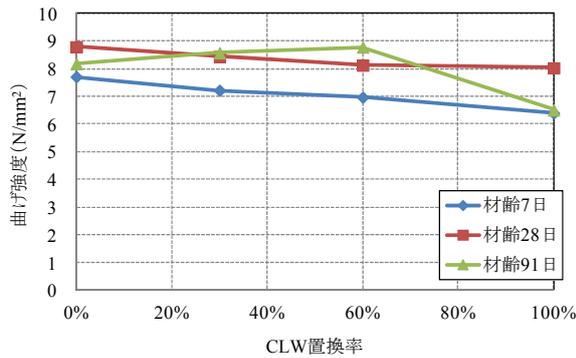


図5 CLW置換率と曲げ強度の関係

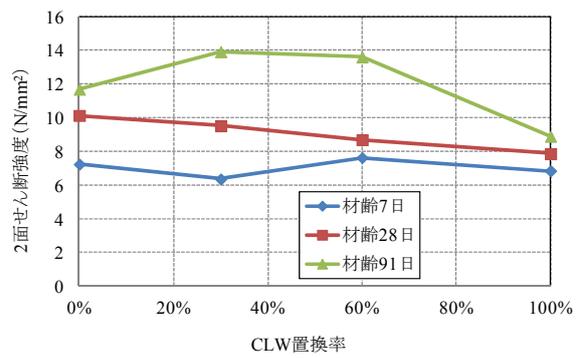


図7 CLW置換率と2面せん断強度の関係

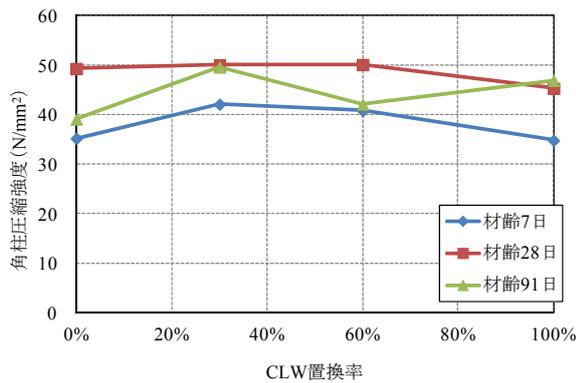


図6 CLW置換率と角柱圧縮強度の関係

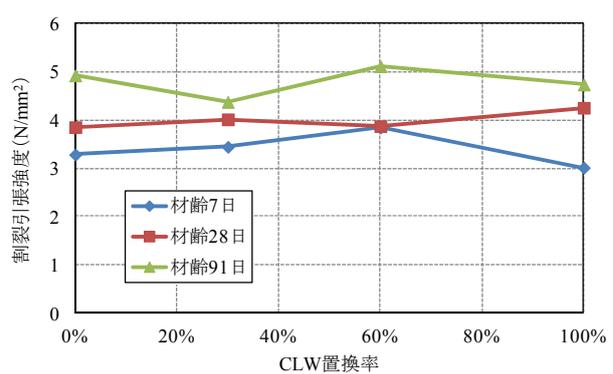


図8 CLW置換率と割裂引張強度の関係

耐久性試験として、乾燥収縮を主とする長さ変化試験、凍結融解抵抗性試験、暴露試験の3種類を行った。

長さ変化試験はJIS A 1129-2 (2010) に準じて実施した。配合はNo.1~6を対象とした。凍結融解抵抗性試験は配合No.1~4を対象として実施した。本研究では簡易的に評価を行う目的で独自の方法を採用した。すなわち、市販の冷凍庫を用いて円柱供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数を測定し、算出した相対動弾性係数にて評価した。実験では、φ7.5×15cmの円柱供試体を水道水で満たした弾力性の高い容器内に浸漬した。容器ごと「①-30℃以下の冷凍庫内へ搬入後に15時間以上静置」と「②20±5℃の室内に取り出した後に約6時間の静置」を1サイクルとして、10サイクルごとに一次共鳴振動数を測定した。JIS A 1148 (2010) との相違点としては、供試体の寸法・形状、温度管理位置 (JISでは供試体中心温度)、測定サイクルなどが挙げられる。JISよりも厳しい条件となるように、10サイクルごとの測定時には供試体表面の劣化小片を除去し、冷凍庫内の温度分布のムラの影響を除去するために、容器内の供試体位置および上下方向をローテーションさせた。また、内部

温度での管理が難しい点を補うために十分な静置時間を確保した。そのためJIS法の4倍近い実験日数が必要となる。

暴露試験は福岡市内の屋外にて実施し、リバウンドハンマーによる表面硬度により評価した。供試体寸法はφ10×20cmの円柱とし、上下面での測定を行った。暴露場所は日当たりの良い場所を選定し、供試体は地面から数cm浮かせた状態で設置した。供試体の上下方向は打設時と同じ方向とした。

3. 強度性状

図2にCLW置換率とモルタルフロー値の関係を示す。置換率に伴いフロー値が小さくなっているが、これは材料が軽量化したことにより自重が低減した影響と考えられる。目視観察からはワーカビティの低下は生じないことが確認できた。

表3に強度試験結果の一覧を示す。供試体の密度変化から求めた吸水率は予想通りに大きく、最大で7.2%まで達した。図3にCLW置換率と円柱圧縮強度の関係を示す。置換率が大きくなっても、すなわち軽量化がすすんでも圧縮強度が低下することはなく、逆に増加傾向も確認で

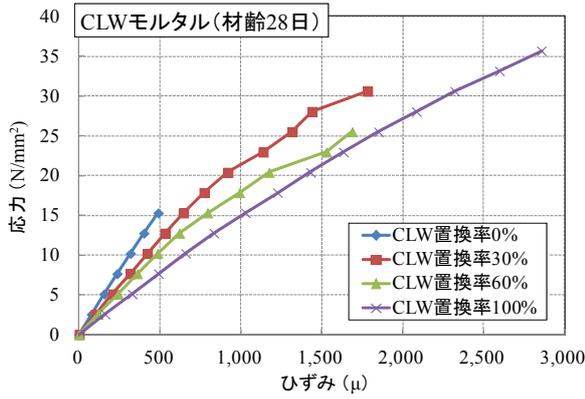


図9 CLWモルタルの応力-ひずみ曲線

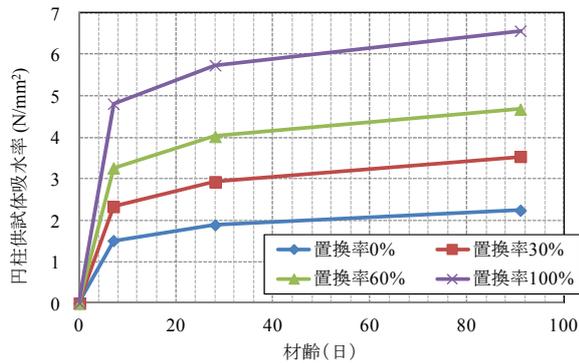


図10 CLWモルタル円柱供試体の吸水率の変化

きる。このことは供試体密度と円柱圧縮強度の関係を示した図4からも確認できる。これらの原因としては骨材の硬度や形状などの影響が推察される。これらのことより、本骨材は構造用軽量骨材として強度的に有利なことが確認できる。

一方、図5にCLW置換率と曲げ強度の関係を示すが、置換率にともなって曲げ強度がやや低下傾向にある。ただし、その低下量は小さく抑制されている。また、材齢による強度増進が少ないことが確認できる。図6にCLW置換率と角柱圧縮強度の関係を示す。強度は置換率による変化は小さいことが確認できる。図7にCLW置換率と2面せん断強度の関係を示す。置換率によるせん断強度への影響には明確な傾向はなく、軽量化により強度低下を招くこともないことがわかる。なお、材齢による強度の増進は確認できる。図8にCLW置換率と割裂引張強度の関係を示す。曲げ強度の場合と同様に、軽量化により強度低下を招くことがないことなどが確認できる。

図9に材齢28日における応力-ひずみ曲線を示す。これは円柱圧縮強度試験において求め

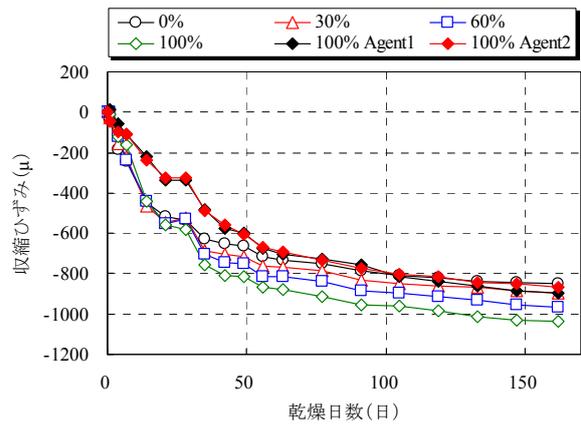


図11 収縮ひずみの経時変化

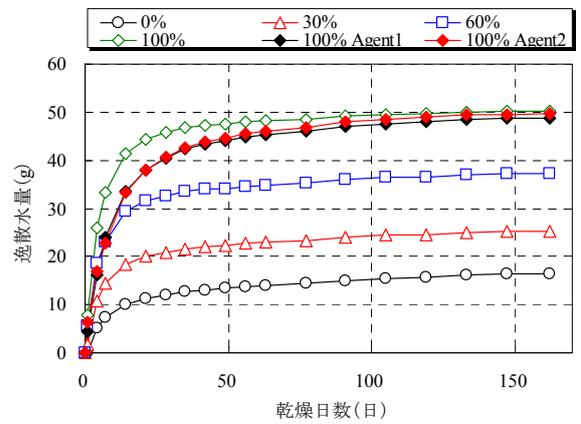


図12 逸散水量の経時変化

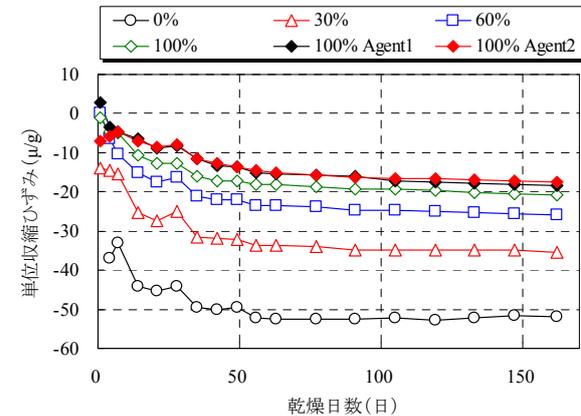


図13 単位収縮ひずみの経時変化

たものである。CLW置換率が大きくなるにしたがって、ヤング係数が小さくなることが確認できる。

図10に円柱供試体の吸水率の変化を示す。脱型直後を基準として養生中の質量増加量を吸水率とした。置換率が大きくなるにつれて吸水率は大きくなり、置換率100%の場合、材齢60日

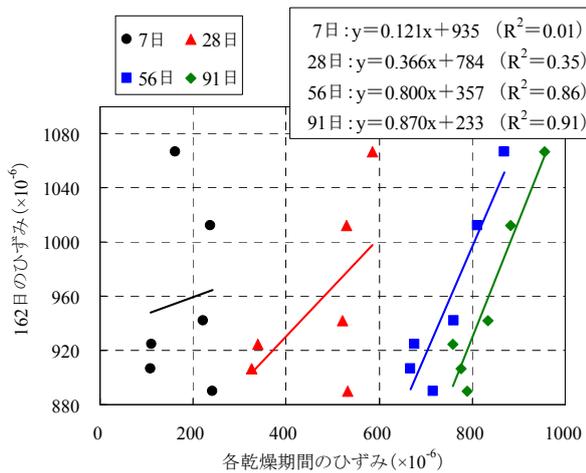


図14 収縮ひずみの乾燥期間の回帰

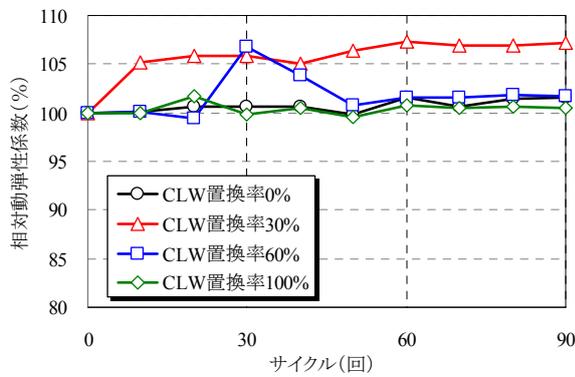


図15 相対動弾性係数の変化

程度で6%を超え、長期的には収束傾向を示すことがわかる。これらのデータをもとに供用する環境条件に応じて密度の割増しをする必要がある。

4. 耐久性試験結果

(1) 収縮ひずみ性状

図11にCLWモルタルの収縮ひずみの経時変化を示す。CLW置換率0%が最もひずみが小さく、置換率の増加にともなって収縮ひずみも増加する傾向が確認できる。置換率0%を基準にすると置換率100%の場合で約20%のひずみ増加となる。その場合、乾燥日数162日においてもひずみは約1000 μ であり、モルタルとしては収縮ひずみが小さいレベルと判断できる。

収縮低減剤による効果に着目すると、置換率100%でも置換率0%とほぼ同程度のひずみ量まで抑制できている。なお、収縮低減剤の添加量を多くしても抑制効果は頭打ちとなる。

図12に逸散水量の経時変化を示す。逸散水量とは、乾燥開始時からの供試体質量変化である。



10サイクル終了後



90サイクル終了後

図16 凍結融解抵抗性試験による供試体外観の変化

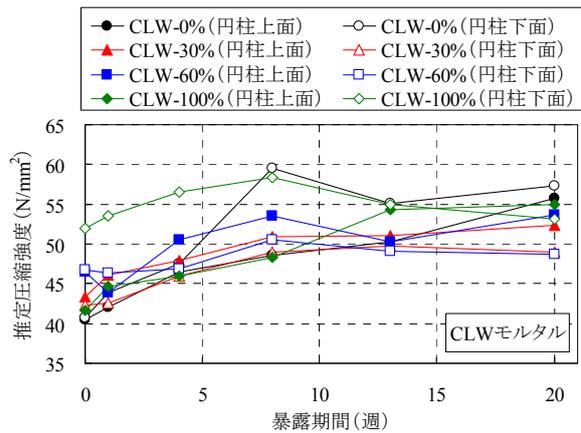


図17 推定圧縮強度の変化

置換率が大きくなるにつれて逸散水量が大きくなっているが、これは吸水率が大きい骨材の使用量が多くなることにより、骨材からの水分供給が継続したものである。これには収縮低減剤の影響は小さく、乾燥日数が小さい時期にのみ逸散水量を抑制している。

図13に単位収縮ひずみの経時変化を示す。単位収縮ひずみとは、収縮ひずみを逸散水量で除した値であり、「乾燥しやすさ」の影響を無次元化して「収縮しやすさ」を比較するものである。置換率0%が最も単位収縮ひずみが大きく、CLW細骨材への置換率が大きくなるにしたがって単位収縮ひずみが小さくなっており、CLW細骨材

が収縮に対して抵抗性が高いことを示唆している。収縮低減剤の効果に関しては、単位収縮ひずみが大きく改善されることは確認できなかった。

図 14 に各乾燥期間の収縮ひずみと長期の収縮ひずみの関係を示す。材料によっては、短期材齢のひずみから最終的なひずみを高精度で推定することが可能な場合もある⁶⁾。しかしながら、CLW モルタルの場合は短期材齢との相関性が低いことから、少なくとも約 2 ヶ月程度の実験調査に基づいて終局ひずみを推測する必要がある。

(2)凍結融解抵抗性

相対動弾性係数の変化を図 15 に示す。凍結融解 90 サイクル終了時点では、まだサイクル数が小さい初期段階であるため、相対動弾性係数の低下傾向は確認できない。逆に動弾性係数が増進する傾向が見られるケースが多く、これは水和反応による強度増進が含まれるものと推察される。

凍結融解試験中の供試体の外観を、10 サイクル後と 90 サイクル後を比較して図 16 に示す。いずれも左から CLW 置換率 0, 30, 60, 100% である。前述のように相対動弾性係数には変化がないものの、CLW 置換率 100%の供試体の表面にはスケーリングが生じ始めていることから、動弾性係数の低下も今後は生じることが予測される。すなわち、CLW 骨材は従来の軽量骨材の特徴と同様に、凍結融解抵抗性が小さいと思われる⁷⁾、寒冷地で使用する際は適切な対策を講じる必要がある。

(3)暴露による劣化

暴露試験における推定圧縮強度の変化を図 17 に示す。推定圧縮強度は軽量コンクリート用のリバウンドハンマーにて測定した。供試体の上面と下面で別途に測定した。現状ではいずれの配合でも劣化の兆候は確認されておらず、逆に強度の増加傾向が顕著である。これは雨水による養生効果のためと推察される。供試体の上面（打設面）よりも下面の強度が高い傾向が確認できるが、これは打設時に必然的に生じるブリーディングの影響と考えられる。

5. 結論

本研究では膨張粘土軽量骨材を用いた軽量モルタルの基礎性状と耐久性について様々な実験的検討を行った。得られた主な結論は下記の通りである。

(1) CLW モルタルは軽量化しても強度低下を伴

わないため、構造材として有利な材料である。

(2) CLW モルタルの乾燥収縮性状は普通モルタルと比較して 20%程度大きくなるものの、単位乾燥収縮ひずみは小さくなる。また、収縮低減剤の使用により、CLW 置換率 0%のモルタルと同程度にまで収縮ひずみを抑制することができる。

(3) CLW モルタルの材齢 91 日における吸水率は最大で 6~7%であり、連続して水中で供用する場合は密度の割増が必要となる。

(4) CLW 置換率が大きくなると、凍結融解抵抗性が小さくなる可能性がある。また、市販の冷凍庫による簡易的な試験でも相対比較による評価は可能と思われる。

(5) 暴露試験において、現段階での劣化は確認できない。

以上のことより、CLW モルタルの耐久性は総合的には良好な範疇にあると判断しており、これは CLW 骨材を破砕して脆弱部を除去したことの効果と考えている。なお、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、暴露試験の耐久性試験については測定を継続中であり、さらなる長期耐久性についても検証する予定である。

参考文献

- 1) 例えば、A.M. Neville (三浦尚訳)：ネビルのコンクリートバイブル、技報堂出版、pp.852~874, 2004.
- 2) Ratna Widyawati : Absorption, Penetration and Permeability of Lightweight Concrete, Proceeding Sains and Teknologi V, pp.29-30, 2011.
- 3) 笠井芳夫編：軽量コンクリート、技術書院、2002.11.
- 4) 日本コンクリート工学協会：高性能軽量コンクリート研究委員会報告書、2000.8.
- 5) Neville, A.M. and Brook, J.J., Concrete Technology, 2nd Edition, ESBM, 1990.
- 6) 浦山智臣, 川崎秀明, 松尾栄治, 高海克彦：乾燥収縮に及ぼす骨材および混和材料の影響, 土木学会第 66 回年次学術講演会 V-438, pp.875-876, 2011.
- 7) 毛継沢, 鮎田耕一, 猪狩平三郎, 松井敏二：軽量コンクリートの吸水性状と耐凍害性の関係について, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.727-732, 2005.