

論文 構造躯体用モルタルの強度特性および乾燥収縮

寺西 浩司*1・谷川 恭雄*2・清水 厚年*3

要旨: 本研究では、筆者らがこれまでに開発を進めてきた、建築物などの構造躯体への適用を目的としたモルタル（構造躯体用モルタル）の強度特性および乾燥収縮について検討した。その結果、構造躯体用モルタルに関して、1)圧縮強度とその長期の伸びは、コンクリートとほぼ同等と見なしてよい、2)ヤング係数は、コンクリートの場合と同様に、JASS 5式により圧縮強度から推定可能である、3)乾燥収縮ひずみは、コンクリートと同程度に制御可能である、などの知見を得た。

キーワード: 圧縮強度, ヤング係数, 乾燥収縮ひずみ, 骨材量, 複合理論

1. はじめに

コンクリートは多相材料であり、打込み時に材料分離する危険性を常に秘めた材料である。そのため、現在のコンクリート工事には、スランプの上限値制限、自由落下高さの制限、横流しの禁止などの様々な分離抑制対策が潜在的に組み込まれている。しかし、これらの配慮をもってしても分離の完全な防止は困難であり、時として欠損部、ジャンカ・巣などの不具合が発生してしまう。

これらのことから、筆者らは、分離抵抗性が高いというモルタルの特質に着目し、構造躯体への適用を目的としたモルタル（以下、構造躯体用モルタルという）の開発を進めてきた。このモルタルの特徴を以下に示し、そのイメージを表-1に示す。

(1) コンクリートよりも骨材寸法が小さいため、分離抵抗性が高い。したがって、これをコンクリートの代替材料として構造躯体に適用することにより、分離の生じない確実な打込みが少ない労力で可能になる。

(2) 通常モルタルは、図-1⁹⁾に示すように、骨材量が少ないため、乾燥収縮ひずみが大きく、構造躯体には適用できない。それに対して、構造躯体用モルタルでは、骨材量をコンクリート中の骨材（細骨材+粗骨材）量と同程度に高めてあるため、乾燥収縮ひずみがコンクリートと同程度に小さい。

(3) JISに規定されるような一般的な粒度分布の細骨材は、コンクリート中の細粗混合骨材よりも実積率がかなり小さい。そのため、これを用いた通常モルタルの場合、上記(2)の実現は不可能である。この点を解消するため、構造躯体用モルタルには、最適に調整された特殊な粒度分布の細骨材が用いられている。

(4) 収縮低減剤のような高価な材料を用いないので、材料費は、将来的には、コンクリートと大きく変わらないことが期待できる。

構造躯体用モルタルに関しては、これまでに、使用する細骨材の粒度分布を設定し、そのプロトタイプを作製した³⁾。また、実大スケールのモデル壁型枠への打込み実験を行い、充填性や分離抵抗性（間隙通過性および骨材連行能力）がコンクリートよりも高いことを確認した³⁾。さらに、調合設計法および施工方法に関する検討を行った^{4),5)}。本報では、これらに引き続き、構造躯体用モルタルの強度特性および乾燥収縮を把握するための検

表-1 構造躯体用モルタルのイメージ

種類	コンクリート	モルタル	構造躯体用モルタル
イメージ	細骨材+粗骨材 【実積率：大】	JISに規定される細骨材 【実積率：小】	粒度分布を最適に調整した細骨材 【実積率：大】
分離抵抗性	低い	高い	高い
骨材量	多い	少ない	多い
乾燥収縮	小さい	大きい	小さい

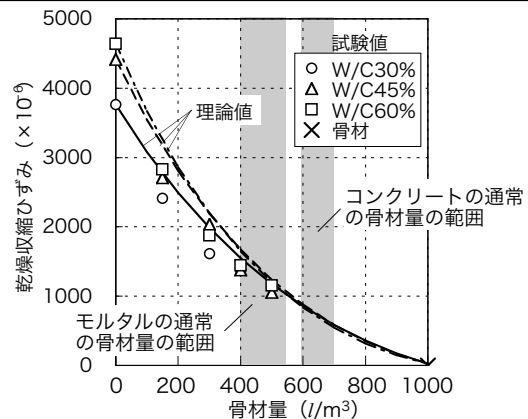


図-1 乾燥収縮ひずみと骨材量の関係の一例

*1 名城大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科教授 工博(正会員)

*3 名城大学 理工学研究科建築学専攻大学院生(正会員)

討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

本研究では2つのシリーズの実験を行った。構造躯体用モルタルは、前述のように、骨材量を高めたことを特徴としたモルタルである。そこで、実験-1では、骨材量の増加が構造躯体用モルタルの強度特性および乾燥収縮に及ぼす影響を調べるための実験を行った。また、実験-2では、構造躯体用モルタルとコンクリートおよび通常のモルタル（以下、普通モルタルという）との強度特性の相違の有無を調べるための実験を行った。

2.1 骨材体積比の影響を調べるための実験（実験-1）

(1) 実験要因とその水準

表-2に、実験要因とその水準を示す。実験-1では、モルタルの水セメント比および骨材体積比 V_a （モルタルやコンクリート中に占める骨材の体積比率）を要因とした。ここで、筆者らの既往の研究³⁾によると、スランブ18cm程度の構造躯体用モルタルの骨材体積比の上限値は62.5%程度であった。このことから、本実験では、構造躯体用モルタルの骨材体積比の水準を62.5%（すなわち、骨材量625l/m³）とし、その他の骨材体積比の水準の場合と比較した（なお、本報では、状況に応じて、これら全てを構造躯体用モルタルと呼ぶ）。

(2) 使用材料

表-3に使用材料を示す。細骨材の粒度分布は、図-2に示すような、2.5mm以上の粒度が全体の60%程度を占めるようなものとした。これは、筆者らの既往の研究³⁾において、構造躯体用モルタルのために、流動性一定のモルタル中の骨材体積比が最大化するように調整されたものである。本実験では、この粒度分布の細骨材を、予

めぼ単粒度（各ふるい目に留まる単一の粒度）に分級された各種寸法の豊田産珪砂を組み合わせで作製した。

(3) 調合

表-4に調合を示す。実験-1では、空気量の影響をなるべく排除するために、消泡剤を $C \times 0.1\%$ と多量に添加し、空気量を0%（許容差1.5%）に調整した。また、スランブは調整せず、高性能AE減水剤の添加率は、原則と

表-2 実験要因とその水準（実験-1）

実験要因	水準
水セメント比 (%)	30, 40, 50
骨材体積比 (%)	0 (セメントペースト), 20, 40, 57.5, 60, 62.5

表-3 使用材料（実験-1）

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm ³ ）
細骨材	豊田産珪砂（表乾密度：2.57g/cm ³ ，吸水率：0.70%，粗粒率：3.98，実積率：69.0%）
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

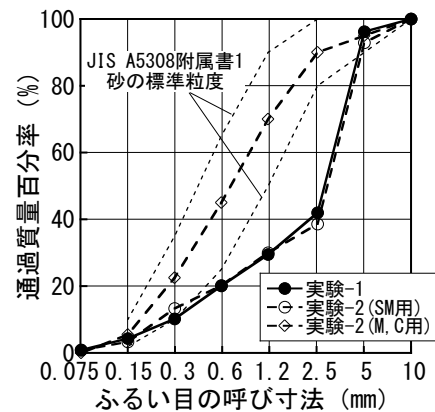


図-2 細骨材の粒度分布

表-4 調合（実験-1）

調合記号	調 合							フレッシュ試験結果		
	水セメント比 (%)	骨材体積比 (%)	空気量 (%)	砂セメント比	絶対容積 (l/m ³)			高性能AE減水剤 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
					水	セメント	細骨材			
30-000	30	0	0+1.5	—	487	513	0	0.60	14	1.3
30-200		20		0.49	389	411	200		27	0.9
30-400		40		1.30	292	308	400		27	0.6
30-575		57.5		2.64	207	218	575	24.5	1.2	
30-600		60		2.93	195	205	600	19	1.3	
30-625		62.5		3.24	182	193	625	6	1.2	
40-000	40	0	0+1.5	—	558	442	0	0.15	24	0.6
40-200		20		0.57	447	353	200		27	0.3
40-400		40		1.51	335	265	400		20.5	0.7
40-575		57.5		3.06	237	188	575	3.5	1.2	
40-600		60		3.39	223	177	600	3	0.7	
40-625		62.5		3.77	209	166	625	1.5	1.0	
50-000	50	0	0+1.5	—	612	388	0	0	—	0.6
50-200		20		0.65	490	310	200		29	0.5
50-400		40		1.72	367	233	400		27.5	0.5
50-575		57.5		3.48	260	165	575		20	0.8
50-600		60		3.87	245	155	600		17.5	1.2
50-625		62.5		4.31	230	145	625		9.5	1.3

して水セメント比ごとに一定とする方針とした（水セメント比50%の場合は無添加とした）。ただし、モルタルが分離しそうな場合は添加率を段階的に減じた。表-4中に、スランプおよび空気量の試験結果を示す。

(4) 練混ぜ方法

練混ぜには強制二軸練りミキサ（容量55l）を使用し、30秒間の空練りの後に水および混和剤を投入して2分間さらに練り混ぜた。

(5) 試験項目および方法

表-5に、試験項目および試験方法を示す。圧縮試験では、標準水中養生した供試体に対して圧縮強度およびヤング係数を測定した。また、乾燥収縮試験では、材齢7日まで供試体を標準水中養生した後に、恒温恒湿室（温度20℃、相対湿度60%）で乾燥を開始し、乾燥収縮ひずみを測定した。

2.2 コンクリート・モルタルとの比較実験（実験-2）

(1) 実験ケース

表-6に実験ケースを示す。実験-2では、構造躯体用モルタル（SM）の他に普通モルタル（M）およびコンクリート（C）を試料とした。また、構造躯体用モルタルおよびコンクリートでは骨材体積比を実験要因とした。

(2) 使用材料

表-7に使用材料を示す。また、図-2中に細骨材の粒度分布を示す。構造躯体用モルタルには、実験-1とほぼ同様の粒度分布の細骨材を使用した。一方、普通モルタルおよびコンクリートの場合は、構造躯体用モルタルの場合と同様に単粒度の豊田産珪砂を組み合わせて、JIS標準粒度分布曲線の範囲の中間を通るような粒度分布の細骨材を作製して使用した。

(3) 調合

表-8に調合を示す。実験-2では、試料の種別にかかわらず、水セメント比を40%一定とし、AE助剤または消泡剤により空気量を4.5±1.0%に調整した。また、構造躯体用モルタルおよびコンクリートの場合は、高性能AE減水剤によりスランプをできるだけ18±2.5cmに調整し（SM400は調整できなかった）、普通モルタルの場合はフロー値を180±20に調整した。なお、普通モルタルの

場合は、一般的なモルタルを想定して砂セメント比を3.0とした。また、コンクリートの場合は細骨材率を一定とした。

(4) 練混ぜ方法

練混ぜは、全てのケースで実験-1の場合とほぼ同様に行った。ただし、本練りは4分間とした。

(5) 試験項目および方法

標準水中養生した供試体（φ10×20cm）に対して材齢28日で圧縮試験を行い、圧縮強度およびヤング係数を測定した。

3. 圧縮強度

3.1 コンクリート・普通モルタルとの比較

図-3に、構造躯体用モルタル（SM）、普通モルタル（M）およびコンクリート（C）の28日圧縮強度と骨材体積比の関係を示す（実験-2）。一般に、圧縮強度は、骨材最大寸法が小さいほど高くなることが知られている。同図によると、本実験の場合も、普通モルタルとコンクリートでは、骨材体積比が同一であれば、骨材寸法

表-5 試験項目（実験-1）

評価項目	試験方法	供試体寸法 (cm)	測定日 (日)
圧縮強度	JIS A 1108	φ5×10	材齢 7,28,91,182,546
ヤング係数	JIS A 1149		
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	4×4×16	乾燥期間 0,7,28,56,91,182

表-6 実験ケース（実験-2）

種別	骨材体積比 (%)
構造躯体用モルタル (SM)	40, 50, 62.5
普通モルタル (M)	54.4
コンクリート (C)	50, 62.5

表-7 使用材料（実験-2）

材 料		仕 様	
細骨材	SM用	豊田産珪砂 (表乾密度：2.63g/cm ³ , 吸水率：0.65%)	粗粒率：3.87, 実積率：69.7%
	M,C用		粗粒率：2.53, 実積率：67.9%
粗骨材		春日井産碎石2005 (表乾密度：2.67g/cm ³ , 吸水率：0.27%, 実積率：62.2%)	
消泡剤		ポリアルキレングリコール誘導体	

* セメント、高性能AE減水剤、消泡剤は実験-1と同じ。

表-8 調合（実験-2）

調合 番号	調 合										フレッシュ試験結果		
	水セメント比 (%)	骨材体積比 (%)	スランプ* (cm)	空気量 (%)	砂セメント比	細骨材率 (%)	絶対容積 (l/m ³)				高性能AE減水剤 (C×%)	スランプ* (cm)	空気量 (%)
							水	セメント	細骨材	粗骨材			
SM400	40	40.0	18 ±2.5	4.5 ±1.0	1.63	-	310	245	400	-	-	22	3.8
SM500		50.0			2.49		254	201	500		-	17	4.3
SM625		62.5			4.29		184	146	625		1.30	19.5	3.6
M		54.4	(180 ±20)		3.00	229	182	544	1.20	(197)	3.5		
C500		50.0	18 ±2.5		-	41.0	254	201	205	296	-	19	5.1
C625	62.5	184		146			256	369	0.90	18	4.3		

* () 内の値はフロー値。

の小さい普通モルタルの方が圧縮強度が高くなっている。それに対し、構造躯体用モルタルの圧縮強度は、ややばらつきがあるものの、この両者の中間にあり、コンクリートよりはやや高くなっている。

3.2 圧縮強度と骨材体積比の関係

図-4に、構造躯体用モルタルの圧縮強度の経時変化を示す(実験-1)。また、図-5に、圧縮強度と骨材体積比の関係を示す。図-5によると、いずれの水セメント比の場合も、材齢28日までは、骨材体積比が大きいほど圧縮強度がやや高くなっている。しかし、それ以降の長期材齢になると、その傾向は逆転し、骨材体積比が大きいほど圧縮強度が低くなっている。また、以上のような傾向は、水セメント比が低いほど顕著となっている。

なお、上記は、構造躯体用モルタルで想定している骨材体積比の高い領域では、初期の強度発現が大きく、長期強度の伸びが小さいことを意味している。ただし、日本建築学会・収縮ひび割れ指針(案)に掲載されている下記の圧縮強度推定式(CEB-FIP式)により、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの材齢546日と28日の圧縮強度比 $f_c(546)/f_{c28}$ を求めると、その値は1.27となる。

$$f_c(t) = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\} f_{c28} \quad (1)$$

ここに、 $f_c(t)$: 圧縮強度 (N/mm²)、 t : 材齢 (日)、

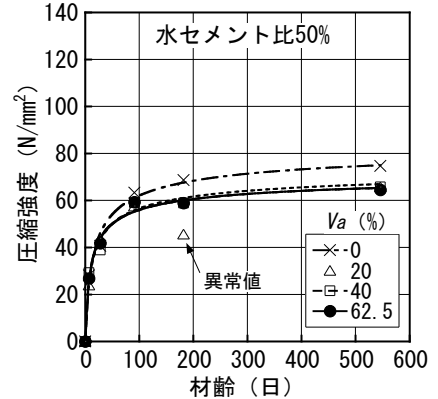
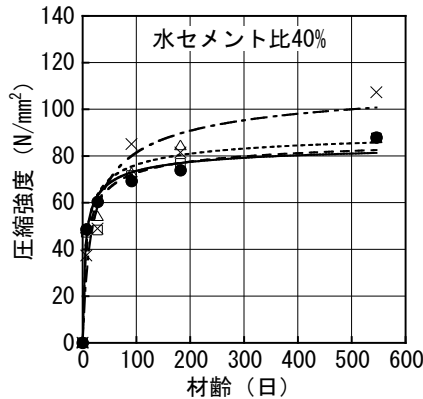
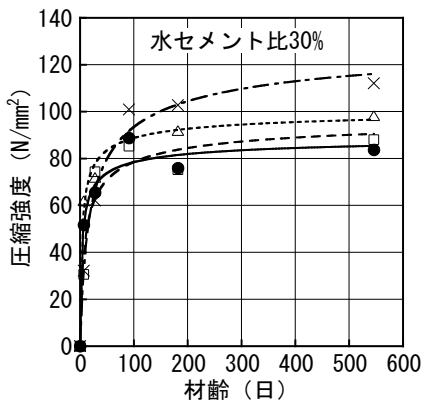


図-4 圧縮強度の経時変化

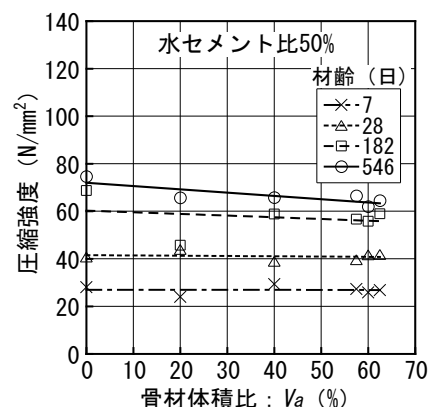
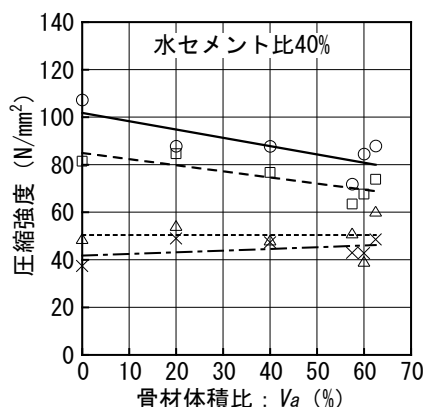
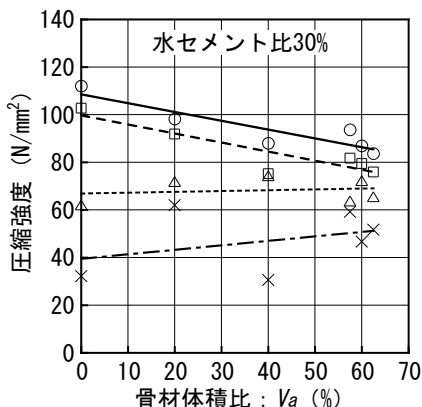


図-5 圧縮強度と骨材体積比の関係

f_{c28} : 28日圧縮強度 (N/mm²)、 s : セメント種類に関する定数(普通ポルトランドセメントの場合は0.31)。

一方、図-5中の回帰直線から、骨材体積比62.5%の構造躯体用モルタルに対して同様の計算を行うと、 $f_c(546)/f_{c28}$ の値は、水セメント比30、40、50%に対して、順に1.24、1.59、1.55となる。したがって、構造躯体用モルタルの長期強度の伸びは、コンクリートの場合と同等かもしくは大きい程度といえる。

4. ヤング係数

4.1 ヤング係数と骨材体積比の関係

図-6に、構造躯体用モルタルのヤング係数(材齢28日)と骨材体積比の関係を示す(実験-1)。一般に、コンクリートやモルタルのヤング係数は骨材体積比が大き

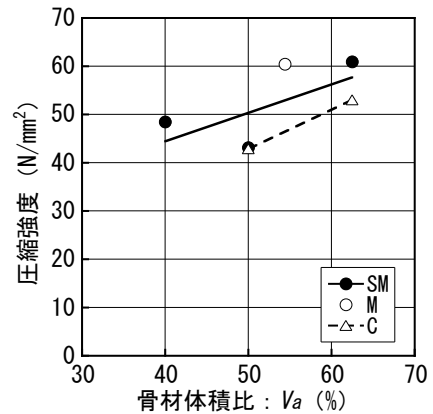


図-3 圧縮強度と骨材体積比の関係(材齢28日)

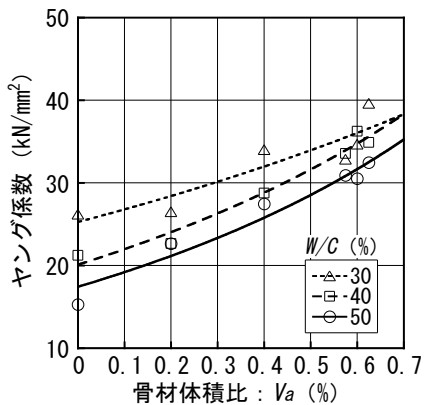


図-6 ヤング係数と骨材体積比の関係 (材齢28日)

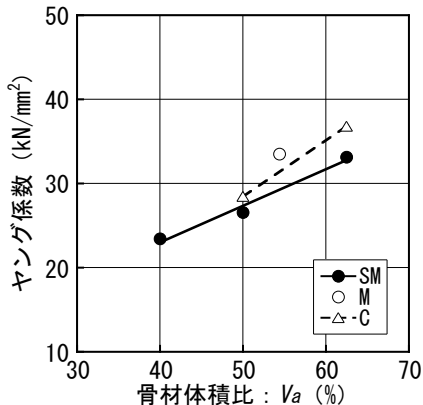


図-7 ヤング係数と骨材体積比の関係 (材齢28日)

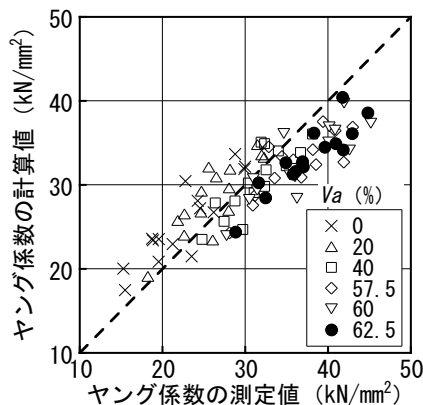


図-8 JASS 5式によるヤング係数の計算値

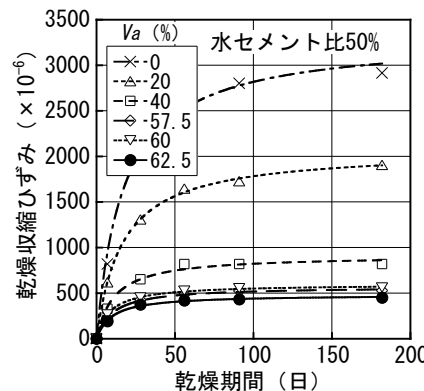
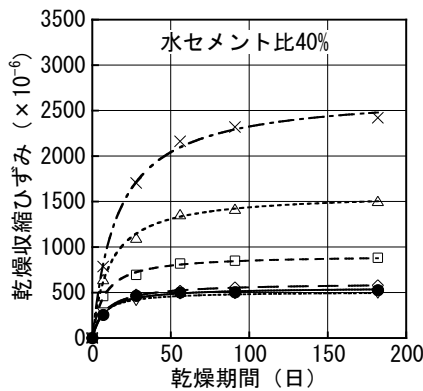
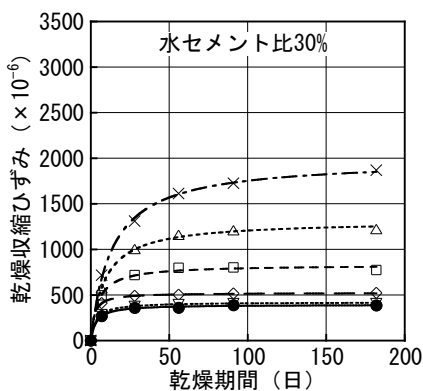


図-9 乾燥収縮ひずみの経時変化

いほど大きくなり、その値は、Hashin-Hansen式⁸⁾などの複合モデルにより表すことができるとされている。同図によると、これらのことは、構造躯体用モルタルにも適合し、骨材量を高めたことを特徴とした構造躯体用モルタルは、ヤング係数の点で有利であることがわかる。

4.2 コンクリート・普通モルタルとの比較

図-7に、構造躯体用モルタル (SM)、普通モルタル (M) およびコンクリート (C) のヤング係数 (材齢28日) と骨材体積比の関係を示す (実験-2)。同図によると、骨材体積比が同一の場合、構造躯体用モルタルのヤング係数は、コンクリートや普通モルタルに比べてやや小さくなっている。ただし、下記のJASS 5式⁹⁾により構造躯体用モルタル (実験-1) のヤング係数を計算すると、計算値は、図-8に示すように、骨材体積比が大きいほどやや小さめになる傾向があるものの、全体として、骨材体積比や材齢にかかわらず測定値と概ね一致する。

$$E_c = 33.5 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right) \times \left(\frac{f_c}{60} \right)^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 E_c : ヤング係数 (kN/mm²)、 γ : 単位容積質量 (t/m³)、 f_c : 圧縮強度 (N/mm²)。

したがって、構造躯体用モルタルのヤング係数は、コンクリートの場合と同様に、JASS 5式により圧縮強度からほぼ推定可能と判断される。なお、同図において、骨材体積比にかかわらず、ヤング係数が比較的良好な精度

で推定されているのは、上式において、骨材体積比の影響が単位容積質量の変化という形で間接的に考慮されているためである。

5. 乾燥収縮

図-9に、構造躯体用モルタルの乾燥収縮ひずみの経時変化を示す (実験-1)。また、図-10に、乾燥収縮ひずみと骨材体積比の関係を示す (乾燥期間182日)。一般に、コンクリートやモルタルの乾燥収縮ひずみは、骨材およびマトリックスセメントペーストの性質が同一の場合、骨材体積比に依存し、その値が大きいほど小さくなる¹⁰⁾。また、その関係は、馬場式¹⁰⁾などの複合モデルにより表すことができるとされている。

図-10によると、以上のことは構造躯体用モルタルにも適合し、乾燥収縮ひずみは、いずれの水セメント比の場合も、骨材体積比が大きいほど小さくなっている。また、構造躯体用モルタルを想定した骨材体積比62.5%のケースでは、乾燥収縮ひずみは380~530×10⁻⁶程度の範囲にあり、これらの値は、日本建築学会・収縮ひび割れ指針 (案)⁷⁾に示されたコンクリートに対する設計値「800×10⁻⁶以下」と比べても、十分に小さいといえる。

なお、乾燥収縮ひずみは、骨材の岩種によって大きく変動することが知られている¹¹⁾。したがって、この試験結果のみをもって、どのような場合でも、構造躯体用モ

ルタルの乾燥収縮ひずみがコンクリートの場合と同程度であるとまでは判断できない。しかし、本実験の結果は、少なくとも、このようなことが現実的に十分に可能であることは実証したものであると考えられる。

6. まとめ

本研究では、構造躯体用モルタルの構造躯体への適用を目的として、その強度特性（圧縮強度、ヤング係数）および乾燥収縮ひずみについて検討した。その結果から得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 構造躯体用モルタルの圧縮強度は、コンクリートとほぼ同等と見なしてよい。また、構造躯体用モルタルのように骨材量を高めたモルタルでは、骨材量が少ない場合に比べて、初期の強度発現が大きく、長期強度の伸びが小さくなるものの、長期強度の伸びもコンクリートの場合と同等かもしくは大きい程度である。
- (2) 構造躯体用モルタルのヤング係数は、骨材量を高めることで大きくなっており、その値は、コンクリートの場合と同様に、JASS 5式により圧縮強度から推定可能である。
- (3) 構造躯体用モルタルの乾燥収縮ひずみは、骨材量を高めることで小さくなっており、コンクリートと同程度に制御可能である。

謝辞

本研究費の一部は、平成18年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)によった。ここに付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 寺西浩司, 谷川恭雄, 森博嗣, 寺田謙一: フレッシュコンクリートの振動下における粗骨材沈下挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.563-568, 1995.6
- 2) 江口清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-21, 2002.7
- 3) 寺西浩司, 谷川恭雄: コンクリートの代替材料としてのモルタルの構造躯体利用に関する研究, 日本建

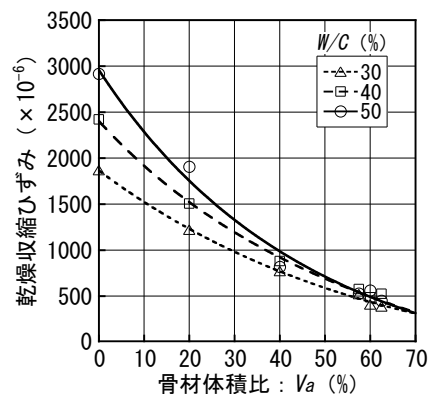


図-10 乾燥収縮ひずみと骨材体積比の関係 (乾燥期間182日)

築学会構造系論文集, No.623, pp.35-41, 2008.1

- 4) 寺西浩司, 花井紀文, 谷川恭雄: 建築物の構造躯体への適用を目的としたモルタルの開発 (その4. 振動締固めがフレッシュ性状に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.5-6, 2006.9
- 5) 花井紀文, 寺西浩司, 谷川恭雄: 建築物の構造躯体への適用を目的としたモルタルの開発 (その5. 空気量がフレッシュ性状に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.7-8, 2006.9
- 6) Cordon, W. A. and Gillespie, H. A.: Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete, Journal of the ACI, pp. 1029-1052, Aug.1963
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説, pp. 39-46, pp.67-69, 2006.2
- 8) Hansen, T. C.: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of the ACI, pp.193-216, Feb.1965
- 9) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, pp.165-170, 2003.2
- 10) 岸谷孝一, 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構, セメント・コンクリート, No.346, pp.30-40, 1975.12
- 11) 寺西浩司: コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因 -骨材や単位水量の影響をどのように考えるか-, コンクリート工学, Vol.46, No.12, pp. 11-19, 2008.12