

論文 軽量ポリエステルモルタルの調合設計法の提案

李 侖洙^{*1} ・大濱嘉彦^{*2} ・出村克宣^{*3}

要旨：著者らは、これまで、不飽和ポリエステル樹脂及び軽量骨材を用いた軽量ポリエステルモルタルのスランプ、可使時間、見掛け比重及び強さに及ぼす調合要因を検討して、そのスランプ、可使時間及び強さ算定式を得ている。本研究では、それらの研究成果及び新たに得られた軽量ポリエステルモルタルの積算温度と強さの関係式を用いることによつて、軽量ポリエステルモルタルの合理的な調合設計法を提案している。

キーワード：軽量ポリエステルモルタル、軽量骨材、調合設計法、調合要因、算定式

1. はじめに

液状レジンはその比重がセメントの比重の約1/3であり、しかも、接着強さがセメント水和物よりも相当に高いため、これを結合材とし、良質の軽量骨材を併用すれば、軽量セメントコンクリートよりも比強度の大きい軽量ポリマーコンクリートの製造が可能であると考えられる。著者らは、これまで、液状レジンとして比較的安価な不飽和ポリエステル樹脂を用いた軽量ポリエステルコンクリートの開発を目的に、そのモデルとしての軽量ポリエステルモルタルのスランプ、可使時間、見掛け比重及び強さに及ぼす調合要因について検討し、そのスランプ、可使時間及び圧縮強さの算定式を得ている[1],[2],[3]。

本研究では、これまでの研究成果並びに積算温度を考慮した圧縮強さ算定式について検討した上で、軽量ポリエステルモルタルの調合設計法を提案する。

2. 使用材料

2.1 結合材用材料

結合材としては、液状レジンである不飽和ポリエステル樹脂(UP)に、希釈剤としてスチレモノマー(St)、触媒としてメチルエチルケトンパーオキシサイド(MEKPO)、促進剤としてオクテン酸コバルトの8% mineral turpentine溶液(CoOc)を添加したものをを使用した。なお、液状レジンの性質を表-1に示す。

表-1 液状レジンの性質

Specific Gravity (20℃)	Viscosity (20℃, mPa · s)	Styrene Content (%)	Acid Value
1.13	325	38.0	16.9

2.2 充填材及び軽量骨材

充填材としては、重質炭酸カルシウム(CaCO₃)、中空ガラス微粉末(HG)及び中空フライアッシュ(HF)を、軽量骨材としては、膨張シェール(ES)、発泡ガラス(FG)、中空溶融アルミナ(HFA)及び中空ムライト(HM)を使用した。充填材及び軽量骨材の性質を表-2に示す。なお、充填材及び軽量骨材については、乾燥させ、それらの含水率0.1%以下として使用した。

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻, 工修 (正会員)

*2 日本大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

*3 日本大学助教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

3. 試験方法

3.1 供試モルタルの調製

供試モルタルの調合に先立って、充填材の軽量化及び骨材の最密充填化を目的として、充填材及び骨材の組成を容積比によって、次のように定めた。

- 充填材組成 (1) CaCO_3 :HG=1:2 (HG)
 (2) CaCO_3 :HF=1:2 (HF)
 (3) CaCO_3 (CC)

- 骨材組成 (1) ES-1:ES-2=1:2 (ES)
 (2) FG-1:FG-2:FG-3:HM=2:1:1:1 (FG)
 (3) HFA:HM=4:1 (HFA)

これらの充填材及び骨材組成を用いて、各試験ごとに、供試モルタルを、10,20及び30℃の温度条件下で、JIS A 1181に準じて、調製した。

(1)スランブ試験及び強さ試験

充填材組成：(1)～(3)

骨材組成：(1)～(3)

モルタルの調合：表-3に示すNo.1～No.9の調合

結合材の配合：UP:St:CoOc:MEKPO=100:12:0.50:0.50 (重量比)

但し、スランブ試験においては、CoOc及びMEKPOを添加しなかった。

(2)可使時間試験

充填材組成：(3)

骨材組成：(1)～(3)

モルタルの調合：表-3に示すNo.9の調合

結合材の配合：表-4に示すすべての配合

3.2 スランブ試験

JIS A 1173に準じて、20℃の温度条件下で調製した供試モルタルのスランブ試験を行った。なお、スランブ試験に際して、スランブコーン引き上げ60秒後のスランブを測定した。

3.3 可使時間試験

JIS A 1186の触感法に準じて、10、20及び30℃の温度条件下で調製した供試モルタルの可使時間を測定した。

3.4 強さ試験用供試体の作製

供試モルタルの圧縮強さと見掛け比重の関係を検討するために、20℃の温度条件下で調製した

表-2 充填材及び軽量骨材の性質

Type of Filler and Aggregate		Size (mm)	Specific Gravity (20°C)	Water Content (%)	Organic Impurities	
Filler	Ground Calcium Carbonate (CaCO ₃)	<2.5×10 ⁻³	2.70	<0.1	Nil	
	Hollow Glass (HG)	10-120×10 ⁻³	0.45	<0.1	Nil	
	Hollow Fly Ash (HF)	10-350×10 ⁻³	0.40	<0.1	Nil	
Fine Aggregate	Expanded Shale (ES)	ES-1	2.5-5.0	1.35	<0.1	Nil
		ES-2	<2.5	1.62	<0.1	Nil
	Foamed Glass (FG)	FG-1	2.5-5.0	0.36	<0.1	Nil
		FG-2	1.2-2.5	0.42	<0.1	Nil
		FG-3	0.3-1.2	0.45	<0.1	Nil
	Hollow Fused Alumina (HFA)	0.1-5.0	0.70	<0.1	Nil	
Hollow Mullite (HM)	150-300×10 ⁻³	0.40	<0.1	Nil		

表-3 軽量ポリエステルモルタルの調合

Mix No.	Mix Proportions by Volume			Filler-Binder Ratio, V _f /V _b (by Volume)
	Binder (V _b)	Filler (V _f)	Aggregate	
1	23.6	8.7	67.7	0.37
2		10.9	65.5	0.46
3		14.6	61.8	0.62
4	24.4	9.0	66.6	0.37
5		11.2	64.4	0.46
6		15.1	60.5	0.62
7	25.2	9.3	65.5	0.37
8		11.6	63.2	0.46
9		15.6	59.2	0.62

表-4 結合材の配合

Formulations by Mass			
UP	St	CoOc(phr*)	MEKPO(phr*)
100	12	0.25	0.25
			0.50
			0.75
		0.50	0.25
			0.50
			0.75
		0.75	0.25
			0.50
			0.75

Note, *:Parts per hundred parts of resin.

供試モルタルを寸法40×40×160mmに成形し、1日乾燥[20℃, 50%(RH)]養生後、15時間加熱(80℃)養生を行い、供試体を作製した。又、積算温度と圧縮強さの関係を検討するために、10,20及び30℃の温度条件下で調製した供試モルタルを同様の方法で成形し、調製時と同じ温度条件下で、6,12,24,72,120及び168時間乾燥[50%(RH)]養生し、供試体を作製した。なお、加熱養生後の供試体の質量をその容積(寸法40x40x160mmとして算出、256cm³)で除して、見掛け比重を求めた。又、ここでは、圧縮強さに及ぼす見掛け比重の影響を明確するため、結合材の重合反応の促進を目的に加熱養生を適用している。

3. 5 曲げ及び圧縮強さ試験

JIS A 1184及びJIS A 1183に準じて、供試体の曲げ及び圧縮強さ試験を行った。

4. 試験結果及び考察

4. 1 スランプ

図-1には、結合材-充填材別に、軽量ポリエステルモルタルのスランプと結合材量の関係を示す[3]。軽量ポリエステルモルタルのスランプは、結合材量の増加に伴ってほぼ直線的に増大する傾向にある。しかしながら、その傾向は、軽量骨材の種類によって大きく異なり、ESを用いた軽量ポリエステルモルタル

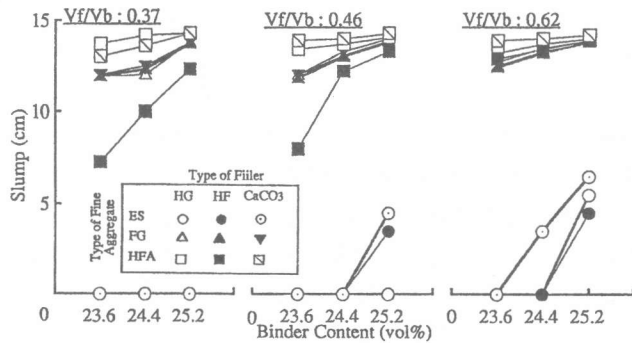


図-1 軽量ポリエステルモルタルのスランプと結合材量の関係

のスランプは小さく、FG及びHFAを用いた軽量ポリエステルモルタルのスランプは大きい傾向にある。なお、結合材量の変化に伴うスランプの変化が小さいものもあるが、それらの関係は直線式で表すことができる。軽量ポリエステルモルタルのスランプは、充填材-結合材比の影響も含んで、使用する骨材別に得られる実験定数(α, β)を用いることによって、次のような実験式で表すことができる[1]。

$$SI = \alpha \cdot Vb + \beta \quad (1)$$

ここに、SI: 軽量ポリエステルモルタルのスランプ (cm)

Vb: 結合材量 (vol%)

α, β : 軽量充填材及び骨材別に得られる実験定数

4. 2 可使時間

軽量ポリエステルモルタルの可使時間は、触媒及び促進剤添加率の増加並びに温度の上昇に伴って短くなる傾向にあり、促進剤添加率よりもむしろ触媒添加率に依存する傾向にあり、その関係は次の実験式で表すことができる[2]。

$$WLM = A - BX \quad (2)$$

$$X = MEKPO + \sqrt{CoOc}$$

ここに、WLM: 軽量ポリエステルモルタルの可使時間(min)

MEKPO : 触媒添加率(phr)

CoOc : 促進剤添加率(phr)

A, B : 実験定数

従って、使用環境温度及び軽量ポリエステルモルタルの可使時間から、結合材の触媒及び促進剤添加率を求めるための算定図を図-2のように提案できる。なお、軽量ポリエステルモルタルの可使時間は、充填材の種類の影響をほとんど受けないので[2]、本研究では、充填材としてCaCO₃のみを使用した。

4.3 圧縮強さ

軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さは、結合材量の増加に伴って増大するが、使用する軽量骨材の強度にも支配される。一般に、見掛け比重の小さい軽量骨材を使用したものほど低い圧縮強さを与える。これらのことから、加熱養生した軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと見掛け比重の関係は、図-3に示すようであり、次の実験式で表すことが可能である[3]。

$$\sigma_c = 71.9SG^2 - 104SG + 66.4 \quad (3)$$

ここに、 σ_c : 軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さ(MPa)

SG : 軽量ポリエステルモルタルの見掛け比重

この実験式は、加熱養生した軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと見掛け比重の関係を表しているが、養生条件

が異なっても、その見掛け比重はほとんど変化しないものとする。従って、異なる養生条件で製造した軽量ポリエステルモルタルにおいても、見掛け比重の変化に伴う圧縮強さの変化についてもこの実験式で表すことができるものと推察される。

一方、養生温度と養生時間の積である積算温度(マチュリティ)理論を適用することによって、セメントコンクリートの圧縮強度予測が可能である。軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さ発現は、結合材である不飽和ポリエステル樹脂の重合反応に依存するものである。不飽和ポリエステ

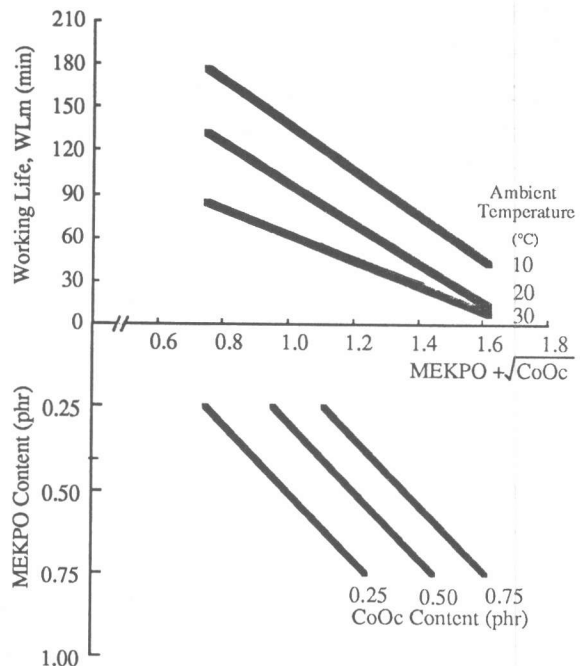


図-2 軽量ポリエステルモルタルの可使時間の算定式

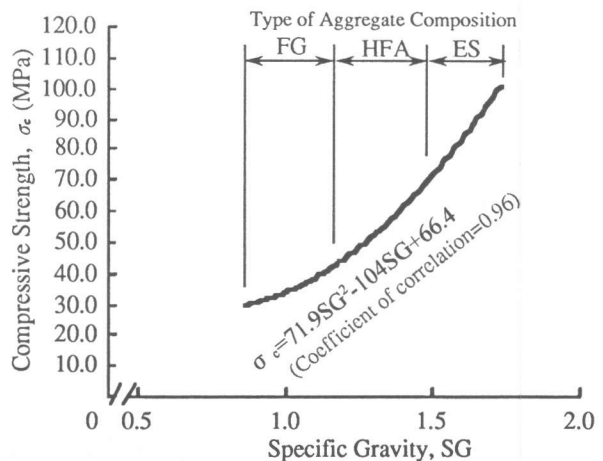


図-3 軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと比重の関係

ル樹脂の重合反応は、逐次反応であることから、それを結合材とする軽量ポリエステルモルタルの強さ発現は、養生温度と養生時間の影響を受けるものと推察される。そこで、軽量ポリエステルモルタルにおいても、セメントコンクリートと同様に、積算温度理論による圧縮強さ算定を試みた。その結果、軽量骨材ESを用い、触媒及び促進剤添加率をそれぞれ0.50phrとして製造した軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと積算温度の関係は、図-4に示す通りで、次の実験式で表すことができる。

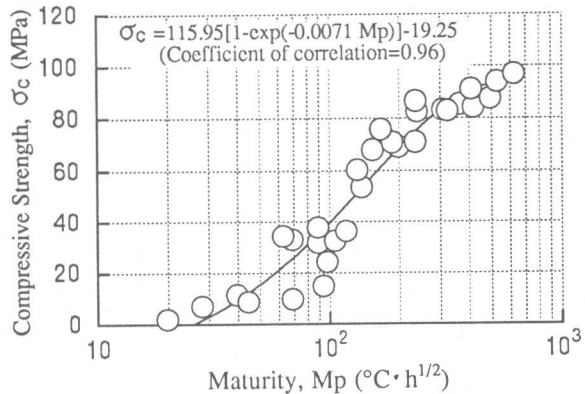


図-4 軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと積算温度の関係(MEKPO 0.50phr, CoOc 0.50phrの場合)

この実験式における基準温度については、文献[4]を参考にして、ここに示す調合の軽量ポリエステルモルタルの強さ発現が得られない温度として求めた。

$$\sigma_c = 115.95[1 - \exp(-0.0071Mp)] - 19.25 \quad (4)$$

$$Mp = \sum (T - T_0) \cdot \sqrt{\Delta t}$$

ここに、 σ_c ：軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さ(MPa)

Mp ：積算温度(Maturity), ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{1/2}$) T ：養生温度($^{\circ}\text{C}$)

T_0 ：積算温度の基準温度(-8.1°C) Δt ：養生時間(h)

なお、本研究においては、触媒及び促進剤添加率をそれぞれ0.50phrとし、軽量骨材ESを用いて製造した軽量ポリエステルモルタルについてのみ圧縮強さと積算温度の関係式を得ている。軽量ポリエステルモルタルの可使用時間を制御するためには、触媒及び促進剤添加率を変化させる必要があるが、そのような場合であっても、不飽和ポリエステル樹脂の重合反応の形態は変わらない。又、異なる軽量骨材を用いた場合でも、その強さ発現は、結合材の重合反応に依存する。従って、軽量骨材の種類、触媒及び促進剤添加率が異なっても、軽量ポリエステルモルタルの圧縮強さと積算温度の関係は、式(4)と同様の形を持つ実験式で表すことができるものとする。

5. 軽量ポリエステルモルタルの調合設計法

軽量ポリエステルモルタルのスランプ、可使用時間及び圧縮強さの算定式を用いた調合設計のフローチャートを図-5に示す。なお、本研究においては、触媒及び促進剤添加率がそれぞれ0.50phrとした軽量ポリエステルモルタルについてのみ圧縮強さと積算温度の関係式が得られているが、触媒及び促進剤添加率が変化した場合にも同様の関係式が得られると仮定して、軽量ポリエステルモルタルの調合設計の手順を次のように提案する。

(1) 軽量ポリエステルモルタルの調合設計に当っては、その用途に応じて、フレッシュな時の性質から所要のワーカビリティの指標としての所要のスランプ及び可使用時間と、硬化した時の性質から所要の最終圧縮強さ又は見掛け比重を定める。なお、最終圧縮強さとは、結合材である不飽和ポリエステル樹脂の重合反応の終了時に到達する最高の圧縮強さを意味しており、通常、加熱

養生などの促進養生を行った後に測定して求められる。

(2) 所要の圧縮強さ又は見掛け比重を考慮して、図-3から使用する軽量骨材の組成を選択する。

(3) (2)で決定した骨材組成を考慮して、図-1を用いて、所要のスランブに対応する充填材の種類、結合材量及び結合材-充填材比を決定する。

(4) 使用環境温度を考慮して、図-2を用いて、所要の可使時間が得られる触媒及び促進剤添加率の適当な組合せを決定する。

(5) (1) で用いた図-3 図-5 軽量ポリエステルモルタルの調合設計のフローチャートは、1日乾燥[20℃, 50%(RH)]養生後、15時間加熱(80℃)養生した軽量ポリエステルモルタルに関するものである。この場合の式(4)における積算温度は $478.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{1/2}$ である。

従って、積算温度算定式を用いて、この積算温度と使用環境温度から、所要の最終圧縮強さが得られる養生期間を決定する。用途上から養生期間が定められている場合には、決定した養生期間と比較する。その結果養生期間が異なる場合には、温度を考慮した養生条件を再検討する。

(6) 以上の手順で、軽量ポリエステルモルタルの試練り用の調合を決定して、試練りを行い、所要のワーカビリティ（スランブ及び可使時間）、圧縮強さ及び見掛け比重が得られることを確認する。

6. 結論

軽量ポリエステルモルタルのスランブ算定式、可使時間算定式及び圧縮強さ算定式を用いることによって、図-5に示したように、10~30℃の温度範囲で打込まれる軽量ポリエステルモルタルの合理的な調合設計法を提案することができる。

参考文献

- [1] 大濱嘉彦, 出村克宣, 李 侖洙, 井出一直: 軽量ポリエステルモルタルのスランブ算定式の提案, 日本建築学会東北支部研究報告集, No.59, pp.333-336, 1996.6
- [2] 李 侖洙, 大濱嘉彦, 出村克宣: 軽量ポリエステルモルタルの可使時間の算定, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.145-150, 1997.1
- [3] 李 侖洙, 大濱嘉彦, 出村克宣, 井出一直: 軽量ポリエステルモルタルの調合要因の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.490, pp.1-6, 1996.12
- [4] 千歩 修, 韓 千求, 浜 幸雄, 鎌田英治: 耐寒剤を使用したコンクリートの積算温度関数式の検討, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp.57-60, 1993.5

