

論文 高強度ポリマーセメントモルタルの強度発現性に及ぼす材料および養生条件の影響

林 志翔^{*1}・長塩 靖祐^{*2}・鷗澤 正美^{*3}

要旨：本研究は，ポリマーセメントモルタルにおいて，自己充填性と高曲げ強さが得られる材料の選定と配合および蒸気養生条件の最適化を目的に，フレッシュ性状でフロー，塑性粘度および降伏値，硬化性状で曲げおよび圧縮強さを検討したものである。その結果，自己充填性と高曲げ強さが得られるにはポリ(メタ)アクリル酸エステル系ポリマーディスパージョン，早強セメントおよび高性能減水剤を用いた低 W/C であること，短期に高曲げ強さを発現する蒸気養生条件は普通コンクリートの場合とほぼ同様であること，および強度発現の予測にはマチュリティが適用できることなどが明らかとなった。

キーワード：高強度，ポリマーセメントモルタル，蒸気養生，コンクリート製品

1. はじめに

近年，コンクリート製品の設計や施工の合理化を目的として部材厚の薄肉化による軽量化が行われており，その一つの手段としてコンクリートの高強度化が進められてきている。コンクリートの高強度化，特に曲げ引張強度の向上は，部材厚の薄いコンクリート製品が設計可能になることから，有効な手法であると考えられる。筆者らは，結合材にポリマーディスパージョン（以下，ポリマーと略称）を用いることにより，自己充填性を有し，かつ，高曲げ強度を有したポリマーセメントモルタル（polymer-modified mortar，以下，PMM と略称）の材料や配合を提案している¹⁾。しかしながら，これまでコンクリート製品への適用を目的とした，蒸気養生に適した低水セメント比の PMM の研究報告はほとんどない。

そこで，本研究では，PMM のフレッシュ性状

および強度発現性に及ぼすポリマー種類，セメント種類や配合要因の影響を検討するとともに，蒸気養生の場合の強度発現とマチュリティの関係を明らかにし，コンクリート製品に適用するための PMM の最適な製造条件を提案したものである。

2. 使用材料

表 - 1 および表 - 2 に示す材料を使用した。

3. 試験方法

3.1 供試モルタルの調製

表 - 3 に示す配合のモルタルを JIS A 1171（ポリマーセメントモルタルの試験方法）に準拠して，ホバートミキサを用いて90秒間練り混ぜ，供試モルタルとした。なお，目標フローになるよう，高性能減水剤の添加量をメーカー推奨添加量の上限まで用いて調整した。

表 - 1 使用材料（ポリマーディスパージョンを除く）とその性質

種類	材料名	記号	主成分・仕様
セメント	早強ポルトランドセメント	HPC	密度3.14g/cm ³ 、比表面積4500cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	OPC	密度3.16g/cm ³ 、比表面積3330cm ² /g
砂	静岡県小笠産陸砂	S	表乾密度2.60g/cm ³ 、吸水率1.5%、F.M.2.75
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル，推奨添加量0.5～3.5%
	消泡剤	AN	特殊非イオン界面活性剤

*1 太平洋セメント(株)中央研究所研究開発部コンクリート技術チーム主任研究員 工修(正会員)

*2 太平洋セメント(株)中央研究所研究開発部コンクリート技術チーム (正会員)

*3 太平洋セメント(株)中央研究所研究開発部コンクリート技術チームリーダー 工修(正会員)

表 - 2 ポリマーディスパージョンとその性質

種類	比重 (20)	pH (20)	粘度 (mPa·s,20)	固形分 (%)	主成分
SBR	1.01	9.0	50	44.4	スチレン・ブタジエンゴム
EVA	1.03	5.3	1020	44.6	エチレン・酢酸ビニル
PAE	1.05	8.0	60	50.0	ポリ(メタ)アクリル酸エステル

表 - 3 PMMの配合

配合 No.	目標 f ₀	ポリマー 種類	セメント 種類	W/C (%)	P/C (%)	S/C	AN/PD (%)					
1	230 ~ 270	SBR	HPC	20.5	11	1.5	-					
2		EVA										
3		PAE										
4		PAE	HPC					19.0	11	1.5	3.0	
5								5				
6								8				
7								20.5	11	1.0		
8												1.5
9												2.0
10								22.0	11	1.5		
11												14
12												11
		OPC	20.5									

注1) P/C:ポリマー(固形分)セメント比

注2) PD:ポリマーディスパージョン

3.2 供試体の作製

供試体は練り上がりの供試モルタルを寸法 40 × 40 × 160mm に成形し、表 - 4 に示す一次養生を行い、脱型した後、表 - 4 に示す二次養生を所定材齢まで行った。なお、PTN2の蒸気養生については、昇温速度を 10, 20, 40 および 90 /h, 最高温度保持時間を 0, 3, 5 および 9h に変更した養生も実施した。

3.3 マチュリティの算出

蒸気養生材齢 1 日までのマチュリティは、供試体中心部に埋め込んだ熱電対による実測温度から算出した。その他のマチュリティは、養生時の管理温度から算出した。

3.4 フローおよび空気量試験

フローおよび空気量試験を JIS A 1171 および JIS A 1128(フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法)に準拠して行った。ただし、フロー試験は 0 打とした。

3.5 レオロジー定数試験

DPV-1 型回転粘度計(外筒回転式, 外筒寸法: 70 × 90mm, 内筒寸法: 30 × 48mm)を使用し、せん断速度を 0 から主に 30rpm まで 60 秒間で上昇および下降させて、そのときのトルクを 1 秒

表 - 4 養生条件

記号	一次養生(~ 24h)	二次養生
PTN1	5 × 2h 20 /h	5 ,80%(RH)
	65 × 3h 5 /h	
PTN2	20 × 2h 20 /h	20 ,80%(RH)
	65 × 3h 5 /h	
PTN3	30 × 2h 20 /h	30 ,80%(RH)
	65 × 3h 5 /h	
PTN4	20 × 2h 20 /h	20 ,80%(RH)
	75 × 3h 5 /h	
PTN5	20°C,80%(RH)	20 水中

間隔で測定し、ビンガムモデルを仮定し、降伏値と塑性粘度を算出した²⁾。

3.6 ボックス充填高さ試験

ボックス充填高さ試験を JSCE-F 511(高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過試験方法(案))に準拠して行った。なお、充填装置としてボックス型容器を、流動障害として障害 R1 を使用した。

3.7 曲げおよび圧縮強さ試験

曲げおよび圧縮強さ試験を JIS A 1171 に準拠して行った。

4. 試験結果および考察

4.1 PMMの強度発現性に及ぼす材料および配合要因の影響

(1) ポリマー種類の影響

表 - 5 および図 - 1 には、各ポリマーを用いた PMM のフレッシュ性状および強さを示す。フレッシュ性状では、SBR の場合、高性能減水剤を 3.5% まで添加しても、降伏値が高く、フローが 192 と小さく、流動性が悪く、自己充填性が得られなかった。EVA の場合、高性能減水剤を 3.5% まで増やしてもやや流動性が改善した程度で、塑性粘度が非常に高く、フローが 222 あるのかかわらず、外力なしでは型枠充填ができなかった。これに対して、PAE の場合は、高性能減水剤 2.0% でもフローが 267 と大きく、降伏値と塑性粘度が小

表 - 5 材料および配合が異なったPMMのフレッシュ性状

配合No.	検討要因		SP/C (%)	フロー	空気量 (%)	レオロジー定数		ボックス充填高さ (mm)	作業性の総合評価	
						降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)		評価	コメント
1	ポリマー種類	SBR	3.5	192	4.9	68.8	99.5	-	×	流動性悪く、自己充填性なし
2		EVA	3.5	222	7.8	24.5	1354.7	-	×	粘性高く、充填不可能
3		PAE	2.0	267	4.2	0.3	58.7	329		自己充填性あり
4	W/C (%)	19.0	3.0	232	-	21.6	262.1	-	×	粘性高く、自己充填性なし
8		20.5	2.2	263	3.4	2.4	66.9	-		自己充填性あり
11		22.0	1.3	263	-	9.2	50.3	-		同上
7	S/C	1.0	1.6	252	-	22.4	70.0	-		同上
8		1.5	2.2	263	3.4	2.4	66.9	-		同上
9		2.0	2.8	230	-	17.6	213.6	-	×	粘性高く、自己充填性なし
5	P/C (%)	5	3.0	263	-	26.0	242.9	-	×	同上
6		8	2.4	259	-	6.1	75.3	-		自己充填性あり
8		11	2.2	263	3.4	2.4	66.9	-		同上
10		14	2.0	270	-	17.3	140.7	-		粘性高いが、自己充填性あり
8	セメント種類	HPC	2.2	263	3.4	2.4	66.9	-		自己充填性あり
12		OPC	2.2	270	3.2	19.0	50.1	-		同上

さく、材料分離も生じず、ボックス充填高さでも329mmと、自己充填性の判断値300mmより高くなっており、優れた自己充填性を示した。

他方、PMMの曲げ強さは、ポリマーの種類にかかわらず、材齢14日で10.3～13.7MPaの高い値を得ている。曲げ強さは、検討したポリマーの中でPAEが最も高く、材齢1日（脱型直後）で13.3MPaに達している。すなわち、このPAEを用いたPMMは、本研究が求めている自己充填性、早強性および高曲げ強さを持ち合わせていることを確認した。

(2) 配合要因の影響

上項で選定したPAEを用いて、PMMの配合要因と強さの関係を検討した。その結果を図-2に示す。PMMは、W/Cを19～22%と小さくしたにもかかわらず、フローが232～263であり、蒸気養生直後（材齢1日）で曲げ強さが13.2～14.4MPa、圧縮強さが74.6～75.7MPaに達した。W/Cが減少すると、曲げ強さは増大するが、W/Cが19%まで小さくすると、流動性を確保する上でさらに減水剤の添加率が必要となるが、塑性粘度が表-5に示すように大きくなり、充填が困難になるので、W/Cとしては20.5%が本研究の使用材料の限界と考えられる。

S/Cについては、1～2の範囲で大きくなると、PMMの曲げ強さが低下した。これは、砂量の増大につれ、砂とペーストの界面に生じる欠陥の発

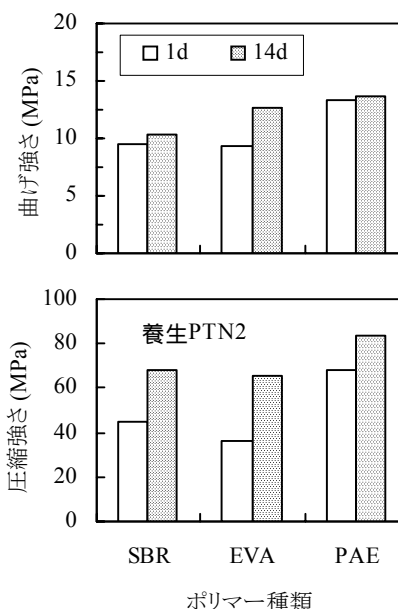


図 - 1 PMMの強さとポリマー種類の関係

生確率が高くなったためと考えられる。しかしながら、S/Cが1.0まで小さくなると、曲げ強さは増加するが、モルタル中のペースト分が多くなり、乾燥収縮や自己収縮が懸念されるので、S/Cは1.5程度とすることが適当と考えられる。

P/Cについては、P/Cが小さくなると、ポリマー使用量の減少により減った減水効果を減水剤で補う必要があるため、同一フローを得るのに必要な高性能減水剤の添加量が増加した。曲げ強さは11%まではP/Cの増加とともに増加したが、11%以上では低下した。圧縮強さはP/Cの増加とともに低下した。これは、PMMの曲げ強さがセメントペーストの水和反応とポリマーの硬化体におけ

る空隙充填効果に大きく依存するが、圧縮強さでは弾性係数の小さいポリマーが増加することにより逆に圧縮応力を受ける有効面積の減少が生じるためと考えられる。

(3) セメント種類の影響

コンクリート製品の場合、生産効率

を上げるためにコンクリート強度の早期発現が求められる。そのため、本研究では早強セメントを主体に使用し、その優位性を確認するため、普通セメントと比較した。フレッシュ性状では、表 - 5 に示すように、普通セメントと早強セメントの差異はない。強度発現性の比較を図 - 3 に示す。PMM の場合、普通セメントよりも早強セメントの方が材齢1日と14日とも強度発現性が良好であり、PMM ではセメントとして早強セメントを利用の方が効果的であることが分かる。

4.2 PMMの強度発現性に及ぼす養生条件の影響

(1) 養生条件の影響

図 - 4 には、各養生における PMM の強度発現性を示す。蒸気養生の場合材齢7日で曲げ強さが 14.3 ~ 14.5 MPa、圧縮強さが 71.9 ~ 79.5 MPa に達しており、その後も徐々に増大し、材齢91日で曲げ強さが 20.1 ~ 20.4 MPa、圧縮強さが 98.7 ~ 101.7 MPa となった。材齢1日では蒸気養生の最高温度が 65 よりも 75 の方が早期強さが低いが、それ以降は差異が僅少となる。これは、短期材齢ではセメントの水和と硬化体組織・構造形成が養生温度に依存して進行し、強度発現に寄与するが、長期的には短期に形成された組織をポリマーが充填し長期強さに貢献するため養生温度の影響が小さくなるものと考えられる。また、20 で水中養生した PMM の曲げ強さは、材齢1日で

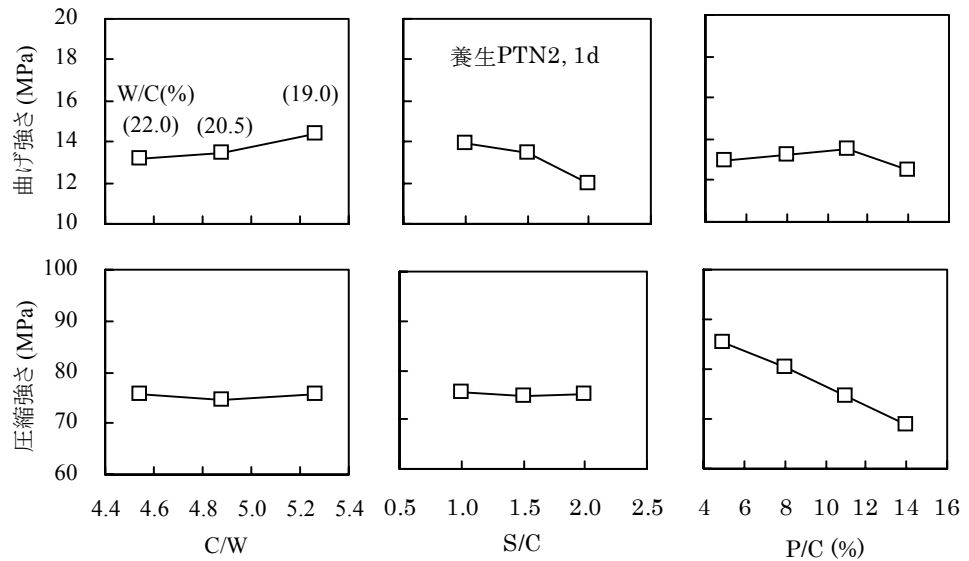


図 - 2 PMMの強さと配合要因の関係

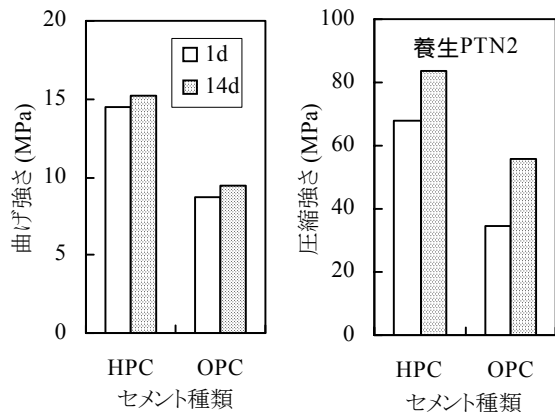


図 - 3 PMMの強さとセメント種類の関係

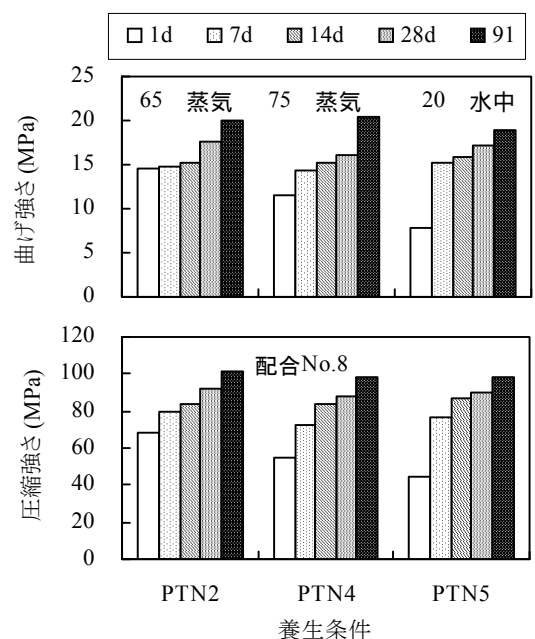


図 - 4 各養生における PMM の強度発現性

7.9 MPaと蒸気養生の場合に比し相当低いが、7日以降では蒸気養生した場合とほとんど差異がない。したがって、早期強さを求めるコンクリート製品の場合、PMMも普通コンクリートの場合と同じく蒸気養生が必要である。

(2) 蒸気養生時の昇温速度および最高温度保持時間の影響

図 - 5 には、PMMの強さと蒸気養生時の昇温速度および最高温度保持時間の関係を示す。昇温速度が遅いほど、最高温度保持時間が長いほど強度発現性がよくなる。このような蒸気養生条件が強度発現性に及ぼす影響は、本質的には普通コンクリートの場合と同様である。このことは、PMMの強度発現が混合使用される早強セメントの水和特性に依存するものであり、併用されるポリマー自身が直接的に反応して強度発現に影響するのではなく、副次的にセメントの水和の進行により水分が減少することにより硬化体の空隙を充填し、固化するためと考えられる。

図 - 6 には、PMMの強さと蒸気養生時のマチュリティの関係を示す。蒸気養生時のPMMの強度発現は、マチュリティ 1150 ・h程度まではほぼ直線的に増加し、その後、強度増加率が徐々に緩やかになる。一方、早強セメントを用いた普通コンクリートの場合、マチュリティが800 ・h前後から強度増加率は低下する³⁾。この差異はPMMの場合、PMMに混合しているポリマーと高性能減水剤がセメント水和を遅延させることに起因しているためと考えられる。また、このことからPMMを蒸気養生する場合、マチュリティ 1150 ・hまでを効率的に蒸気養生する必要があることが分かった。

(3) 環境温度の影響

季節によるPMMの性状を解明するために、各環境温度におけるPMMの強度発現性を確認した。図 - 7 にその結果を示す。PMMの曲げ強さは、材齢1日(脱型時)においては、同様な蒸気養生を受けても成形時の環境温度が20 のPMMの曲げ強さが14.5 MPaと最も高く、材齢14日においては、20 と30 の場合共に15.2 MPaとなった。成

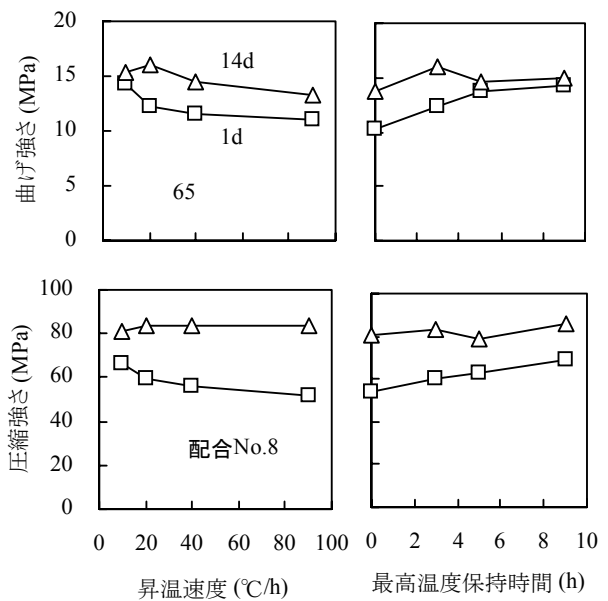


図 - 5 PMMの強さと蒸気養生の昇温速度および最高温度保持時間の関係

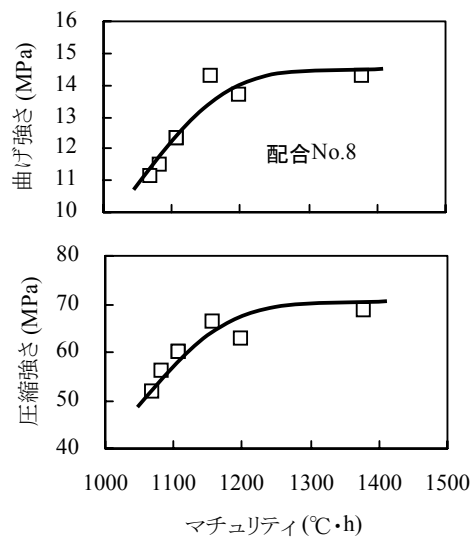


図 - 6 PMMの強さと蒸気養生マチュリティの関係

形時の環境温度5 の場合、脱型時の曲げ強さは、30 と同じであったが、脱型後の低温(5)養生で曲げ強さの発現は20 および30 と比べると小さかった。これは低温環境においてセメントの水和反応が遅くなったためと考えられる。しかしながら、長期にわたっては強さの増進が認められ、材齢90日では5 の環境でも曲げ強さが17.9 MPaに達している。また、圧縮強さは脱型直後のものを除けば、各養生材齢において環境温度が高いほど高い傾向にある。以上のことから、冬季でPMM製品を製造する際に、所定の強さを得るために、蒸気養生後の二次養生期間を長く設定する

配慮が必要である。

(4) PMMの強さとマチュリティの関係

長期強さを予測するために、図 - 4 および図 - 7 のデータをもとに算出したマチュリティと PMM の強さとの関係を図 - 8 に示す。20℃ 水中養生における PMM の曲げおよび圧縮強さともマチュリティ（対数）とはほぼ直線関係にあり、高い相関性が認められるため、PMM の圧縮強さの発現傾向が普通コンクリートのそれ⁴⁾と同様であることが分かった。蒸気養生の場合、養生直後のものを除けば、ほぼ直線にのるため、材齢 7 日以降の中、長期材齢の PMM の曲げ、圧縮強さは図中に示すマチュリティと強さの関係式から推定できるものと考えられる。

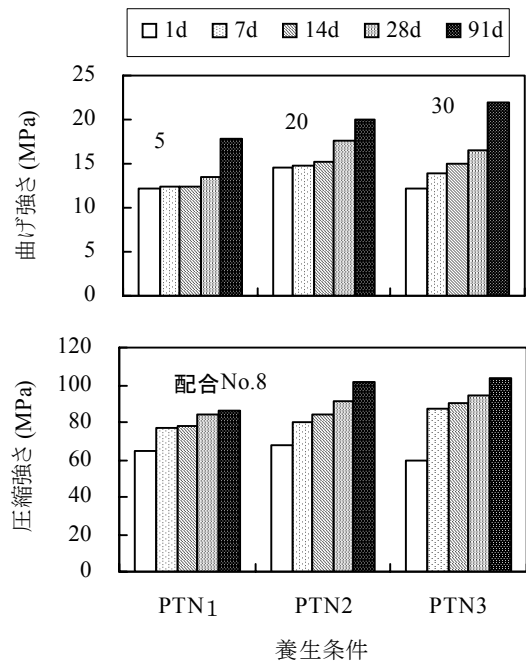


図 - 7 各環境温度における PMM の強度発現性

5. まとめ

本研究の結果をまとめると次の通りである。

- 1) 自己充填性があり、かつ、高曲げ強さを有する PMM の配合として、ポリマーとして PAE と早強セメントと高性能減水剤を併用し、W / C を 20.5%、P/C を 11% および S/C を 1.5 とした配合が推奨される。
- 2) 最高温度 65℃、保持 3 時間で蒸気養生した PMM の曲げおよび圧縮強さは、材齢 1 日で 14.5 および 67.9 MPa、材齢 14 日で 15.2 および 83.6 MPa であった。
- 3) PMM の蒸気養生は、マチュリティ 1150℃・h を効率的に行う必要がある。
- 4) 材齢 7 日以降の蒸気養生 PMM の曲げおよび圧縮強さは、マチュリティから推定することができるものと考えられる。

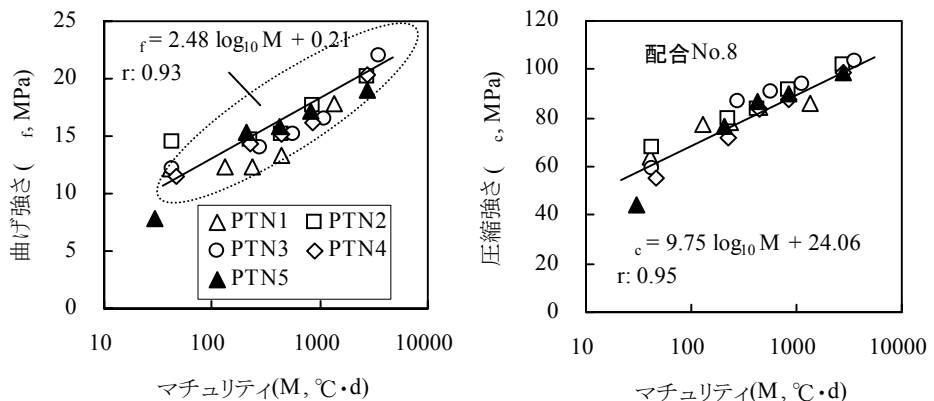


図 - 8 PMM の強さとマチュリティの関係

参考文献

- 1) 林志翔ほか：高強度ポリマーセメントモルタルの開発，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，V，pp.311-312，2004.9
- 2) 村田二郎：まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎研究，コンクリート工学，Vol.15，No.1，pp.25-34，1977.1
- 3) 河野清，新舎博，荒木謙一：蒸気養生の際のマチュリティと圧縮強度との関係について，セメ技年報，No.28，pp.274-277，1974
- 4) A.M.Neville：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，p.386，2004