

# 論文 永久型枠用材料としての高強度モルタルの諸性状

岩井 稔\*<sup>1</sup>・万木 正弘\*<sup>2</sup>・玉木 俊之\*<sup>3</sup>・石田 秀朗\*<sup>4</sup>

**要旨：**高耐久性が要求されるプレキャスト型枠材料として、普通セメントにエトリンガイト系混和材を混和した高強度モルタルについて配合・養生方法を検討し、さらに耐久性試験を行った。その結果、水結合材比24%、単位結合材量800kg/m<sup>3</sup>、ステンレスファイバー混入率2%の条件で、モルタルの曲げ強度は20MPa以上を確保できた。このモルタルは一般のコンクリートと比較して、塩化物イオンの浸透や摩耗等に対する抵抗性が非常に大きく、これを用いたプレキャスト型枠はコンクリート構造物の耐久性向上に寄与するものと判断された。

**キーワード：**プレキャスト型枠、高強度モルタル、耐久性、混和材料、蒸気養生

## 1. はじめに

近年、コンクリート工事では急速施工への対応や熟練技術者の不足から多大な労力を要する型枠工事の省力化が要求され、また、構造物の耐久性・美観向上が求められつつある。これらの課題に対して、二次製品工場で製造したコンクリート版を永久型枠として使用するプレキャスト型枠の開発が進められ、実工事でも適用されるようになってきた[1]。プレキャスト型枠は施工性向上の観点から版厚を薄くして軽量化することが望ましく、型枠材料としてのコンクリートにはより高い強度と耐久性が必要となる。

本研究では、一般の二次製品工場の設備で製造可能なプレキャスト型枠を開発することを目的に、普通セメントにエトリンガイト系混和材を混和した高強度モルタルの配合・養生方法の検討を行うとともに、強度特性及び耐久性の把握を行い、プレキャスト型枠用の材料としての適用性を検討した。

## 2. プレキャスト型枠用材料の目標品質

厚さが30~40mm程度のプレキャスト型枠を対象に、施工時の側圧や運搬時の衝撃等に耐えられるように、表-1に示すモルタルの要求品質を設定した。ここで、目標強度の設定は特殊な材料・製造方法をとらずに実現可能な強度とした。各試験おけるモルタルの養生方法は、プレキャスト型枠製造時の二次製品工場でのサイクルを考慮して、常圧蒸気養生による促進養生を行うものとした。

表-1 モルタルの目標品質

項目	目標値	備考
スランプ	20±2.5cm	施工性を考慮
空気量	3±1%	強度への影響を考慮
圧縮強度	100MPa以上	材齢28日(φ10×20cm)
曲げ強度	20MPa以上	材齢28日(4×4×16cm)
乾燥収縮率	400×10 <sup>-6</sup> 以下	
遮塩性	-	普通コンクリートと比較して良好であること
耐摩耗性	-	

\*1 鹿島技術研究所 第二研究部研究員，工修（正会員）

\*2 鹿島技術研究所 第二研究部主管研究員，工修（正会員）

\*3 電気化学工業（株） セメント・特殊混和材研究部主任研究員，（正会員）

\*4 電気化学工業（株） セメント・特殊混和材研究部研究員，工修

### 3. 実験の概要

#### 3.1 プレキャスト型枠の概要

検討したモルタルは、普通セメントにエトリンガイト系混和材[2]を混和することによって高強度・高耐久性が期待できるモルタル（以下、エトリンガイト系と略記）である。このモルタルには曲げ強度及び衝撃に対する抵抗性を向上させるために、耐食性の高いステンレスファイバーを混入した。また、供用後の寸法安定性を確保するために収縮低減剤を用いた。

このような材料を用いたモルタルについて、まず、目標曲げ強度を満足するための配合検討を行うとともに、適切な養生方法の検討を行った。次に、選定された配合について強度特性の把握及び耐久性試験を実施し、プレキャスト型枠用の材料としての適用性を検討した。使用材料を表-2に、試験項目を表-3に示す。

#### 3.2 試験方法

練混ぜには強制練りミキサ（パン型、容量100ℓ）を用い、図-1に示す方法で練り混ぜた。供試体の作製は土木学会規準（JSCE-F552-1983）に準拠し、外部振動機を用いて締固めを行った。養生は、図-2に示すパターンで蒸気養生を行い、蒸気養生後は試験開始材齢まで20℃の水中養生とした。

表-3に示した耐久性試験項目のうち、塩化物浸透性試験は、20℃の人工海水に8時間浸漬後、50℃の熱風で16時間の乾燥を1サイクルとした促進養生を60サイクル行い、塩化物イオンの浸透量をJCI規準（電位差滴定法）に準拠して測定した。耐摩耗性試験は電力中央研究所のO式スリヘリ試験機[3]を使用し、摩耗に対する抵抗性を評価した。

### 4. 試験結果及び考察

#### 4.1 配合の選定試験

##### (1) ステンレスファイバー混入率の検討

モルタルの配合を一定（水結合材比28%）とした時のファイバー混入率と曲げ強度との関係を図-3に示す。ファイバー混入率の増加に伴い曲げ強度が増加した。しかし、混入率が2.0~2.5 vol%で曲げ強度は頭打ちとなり、その場合の曲げ強度は無混入のモルタルに対して約1.5倍であった。また、ファイバー混入率が2.5vol%の場合には、ファイバーが偏在して施工性が低下する

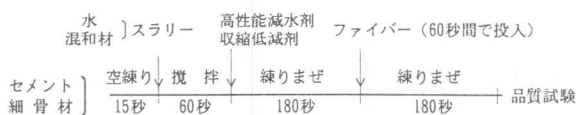


図-1 モルタルの練混ぜ方法

表-2 使用材料

使用材料	摘要
セメント	普通ポルトランドセメント (比重 3.16, 比表面積 3250cm <sup>2</sup> /g)
混和材	エトリンガイト系混和材 (比重 2.73, 比表面積 7500cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	川砂 (新潟県産, 比重 2.62)
粗骨材	川砂利 (新潟県産, 比重 2.62)
混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系) A E 減水剤 (リグニンスルホン酸系)
収縮低減剤	エチレンオキサイドとプロピレンオキサイドの 共重合体
ファイバー	ステンレスファイバー (SUS430, ドックボーンタイプ) 繊維長22mm, 繊維径0.5mm, 引張強さ900N/mm <sup>2</sup> 以上

※粗骨材は、比較試験用の普通コンクリートに使用した。

表-3 試験項目

試験項目	供試体寸法	試験方法	
強度特性	曲げ強度	4×4×16cm 10×10×40cm	JIS R 5201 に準拠 JIS A 1106 に準拠
	圧縮強度	φ10×20cm	JIS A 1108 に準拠
耐久性	乾燥収縮	10×10×40cm	JIS A 1129 に準拠
	凍結融解抵抗性	10×10×40cm	JSCE-G501-1986 に準拠
	中性化速度	10×10×40cm	促進養生 (30℃, 50%RH, CO <sub>2</sub> 濃度5%)
	塩化物浸透性	10×10×40cm	乾湿繰り返しによる促進養生
	化学抵抗性	10×10×40cm	2% HCl 溶液 10% MgSO <sub>4</sub> 溶液 ] に浸漬
耐摩耗性	142×295×60mm	O式スリヘリ試験装置[3]	

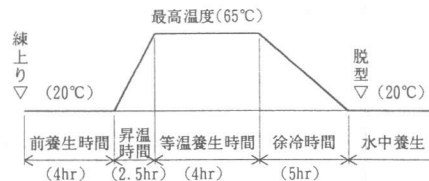


図-2 蒸気養生パターン

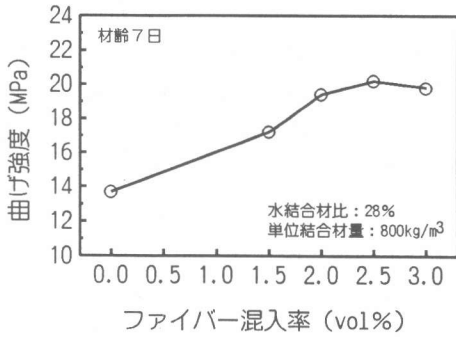


図-3 ファイバー混入率の影響

傾向が認められたため、ファイバー混入率は2.0vol%を選定した。

(2)水結合材比の検討

水結合材比と曲げ強度の関係を図-4に示す。単位結合材量が800kg/m<sup>3</sup>以上の配合では、水結合材比が小さいほど曲げ強度が増加する傾向が認められ、水結合材比24%では材齢7日で目標曲げ強度20MPa以上が得られた。これに対して、単位結合材量700kg/m<sup>3</sup>の場合、所定のワーカビリティを得るために高性能減水剤を多量添加する必要があり、この影響のためか水結合材比を24%としても曲げ強度は目標値に達しなかった。この結果より、目標曲げ強度を確保するためには単位結合材量はある程度大きくする必要があると考えられたが、乾燥収縮への影響を考慮して単位結合材量800kg/m<sup>3</sup>、水結合材比24%を選定した。

(3)収縮低減剤の使用検討

収縮低減剤の乾燥収縮への影響を図-5に示す。蒸気養生直後から14日間の短期間での評価であるが、収縮低減剤の使用により乾燥収縮率を1/2以下に低減できることが確認された。乾燥収縮が大きい場合、養生終了後のプレキャスト型枠の寸法精度やひび割れ発生等に悪影響を及ぼすと考えられることから、収縮低減剤の使用はプレキャスト型枠の性能向上に有効と判断された。

(4)養生方法の検討

図-2に示した温度及び時間での蒸気養生を基本とし、最高温度及び等温養生時間が曲げ強度に及ぼす影響を積算温度(基準温度-10℃)により整理した結果を図-6に示す。前養生時間(4hr)、昇温

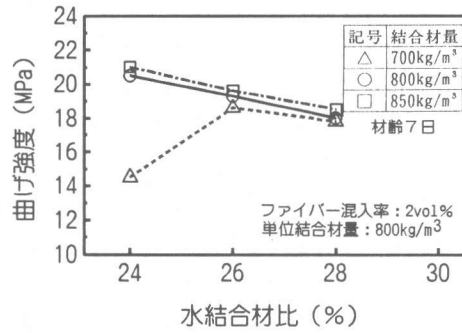


図-4 水結合材比の影響

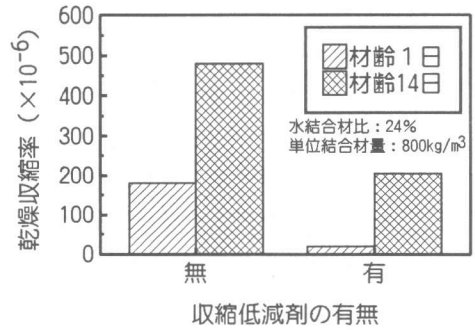


図-5 収縮低減剤の使用効果

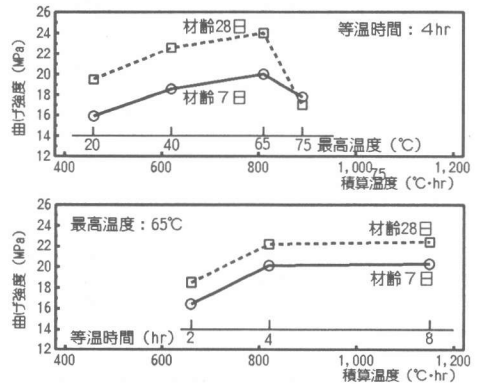


図-6 蒸気養生条件の影響

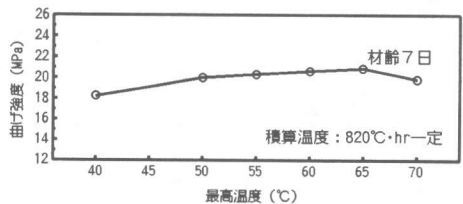


図-7 最高温度の影響

時間(2.5hr)及び徐冷時間(5.0hr)を一定とし、前養生開始から徐冷終了までの積算温度を横軸とした。最高温度65℃以下の条件で積算温度が820℃・hr以下の範囲では、積算温度が大きいほど曲げ強度が増加した。最高温度が65℃を超え強度低下を生じた供試体では、表面に高温養生に起因すると考えられる微細なひび割れが認められ、これが強度低下の原因と推測された。そこで、次に、最高温度が曲げ強度に及ぼす影響を詳細に検討するために、積算温度が820℃・hrの一定となるように等温時間を調整し、最高温度と曲げ強度との関係を調べた。結果を図-7に示す。最高温度が65℃を超える条件では、微細なひび割れが供試体表面に認められて曲げ強度が低下したが、最高温度50~65℃の範囲では曲げ強度がほぼ一定となった。すなわち、蒸気養生における最高温度は50~65℃の範囲で極力低くし、等温養生時間を長くすることが曲げひび割れ強度の増加に有利と考えられた。二次製品工場での製造工程の観点からは蒸気養生時間が短いことが望まれるが、曲げ強度に影響する微細なひび割れの発生を抑制する目的で、蒸気養生の最高温度を50℃、等温時間を6時間とした。

#### 4.2 強度特性及び耐久性

試験を行ったモルタル配合を、比較用の普通コンクリートの配合とともに表-4に示す。

##### (1) 強度特性

圧縮強度及び曲げ強度の材齢進行に伴う発現を図-8に示す。蒸気養生を行ったエトリングイト系モルタルでは材齢1日から圧縮及び曲げ強度が大きく、以降も強度増加が認められた。10×10×40cm供試体における材齢28日の曲げ強度は約17MPaであり、4×4×16cm供試体よりも小さかった。これは、4×4×16cm供試体と10×10×40cm供試体とで載荷方法(1点載荷と2点載荷)、ファイバーの配向状態の相違などが原因と考えられた。

##### (2) 塩化物浸透性

促進養生60サイクルにおける供試体表面からの深さと塩化物イオンの浸透量の関係を図-9に

表-4 モルタル及びコンクリートの配合

配合の種類	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (Cx%)	収 縮 低減剤 (Cx%)	ステンレス ファイバー (vol%)
				水	結 合 材		細骨材	粗骨材			
					セメント	混和材					
エトリングイト系 モルタル	24.0	100.0	3±1	192	696	104	1342	0	2.0	2.0	2.0
普通コンクリート	55.0	46.7	4±1	164	300	-	859	979	1.0	-	-

※混和剤：エトリングイト系・・・高性能減水剤  
普通コンクリート・・・AE減水剤  
※ステンレスファイバーはコンクリート体積に対する百分率

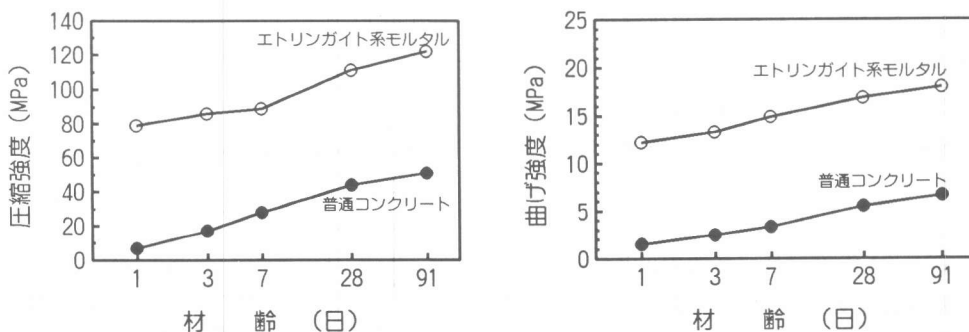


図-8 圧縮強度及び曲げ強度の発現

示す。塩化物イオンの浸透深さは、普通コンクリートで50mm以上に対してエトリンガイト系では20mm以下であった。表面から深さ10mmまでの塩化物イオン量の平均は、普通コンクリートの0.45wt%に対してエトリンガイト系で0.02wt%と非常に少なく、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性の高いことが示された。選定したモルタルで遮塩性が高い理由は、低水セメント比であることに加えてエトリンガイト生成物によりセメント硬化体の組織が密実となったことが考えられる。

### (3) 中性化速度

30°C, 50%RH, CO<sub>2</sub>濃度5%の試験条件で行った促進中性化試験の結果を図-10に示す。普通コンクリートでは促進養生時間の経過とともに中性化深さが進行したのに対して、エトリンガイト系モルタルでは中性化が認められなかった。

### (4) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験の結果を図-11に示す。エトリンガイト系モルタルでは、強度への影響を考慮して空気量を3%としたが、600サイクルまでは動弾性係数の低下がほとんど認められなかった。また、試験終了時の供試体表面にはスケーリング等劣化の徴候は認められなかった。

### (5) 乾燥収縮率

乾燥収縮試験の結果を図-12に示す。エトリンガイト系モルタルの乾燥材齢6カ月の乾燥収縮率は $300 \times 10^{-6}$ 程度で、普通コンクリートに比べて約1/2となり、目標値 $400 \times 10^{-6}$ 以下を満足する結果となった。比較のために、同一配合で収縮低減剤を使用しないモルタル供試体の試験結果を併せて示したが、収縮低減剤の使用により乾燥収縮を大きく低減できることが示され、乾燥収縮に起因するプレキャスト型枠の形状寸法及び強度特性等の長期的な変化の抑制に有効と思われた。

### (6) 耐薬品性

データは省略するが、2%塩酸溶液に6カ月間浸漬した場合の重量減少率は、普通コンクリートで10%以上であったのに対して、エトリンガイト系モルタルではその1/2以下の4%程度であり、酸に対する抵抗性が高いことが認められた。また、10%硫酸

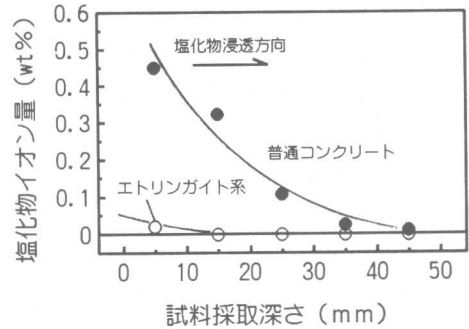


図-9 塩化物浸透性試験結果

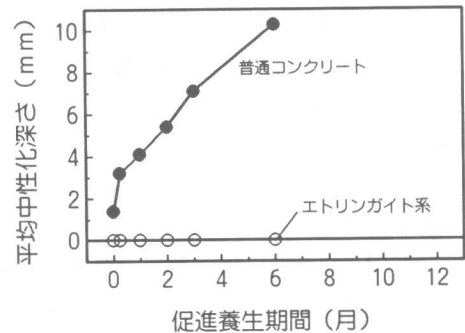


図-10 促進中性化試験結果

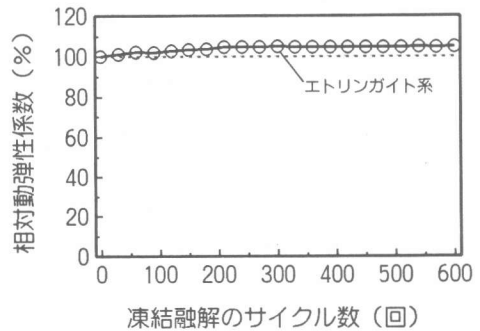


図-11 凍結融解抵抗性試験結果

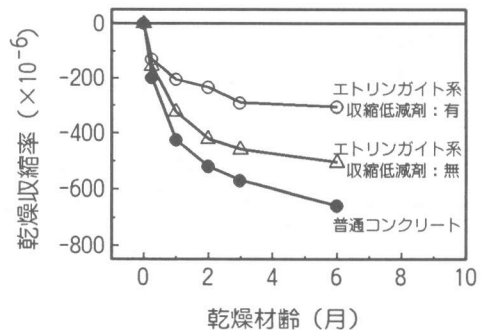


図-12 乾燥収縮試験結果

マグネシウム溶液に浸漬した試験では、浸漬6カ月で、エトリングイト系及び普通コンクリートとも重量変化や長さ変化はほとんど認められなかった。

#### (7)耐摩耗性

耐摩耗性試験の結果を既往のデータ[3]と比較したものを図-13に示す。試験時のエトリングイト系モルタルの圧縮強度は110MPa、スリヘリ係数は $130\text{ mm}^3/\text{cm}^2$ であった。スリヘリ係数はその値が小さいほど摩耗に対する抵抗性が大きいことを示す[3]が、エトリングイト系モルタルでは、粗骨材を含む同じ強度レベルのコンクリートとほぼ同程度あるいは若干良好なスリヘリ抵抗性を有することが認められた。図-13から、一般の構造物に用いられる圧縮強度30~50MPa程度の普通コンクリートのスリヘリ係数が $600\text{ mm}^3/\text{cm}^2$ 以上であるのに対して、今回検討したモルタルでは1/4以下であり、プレキャスト型枠の耐摩耗性の向上に有効であると判断された。

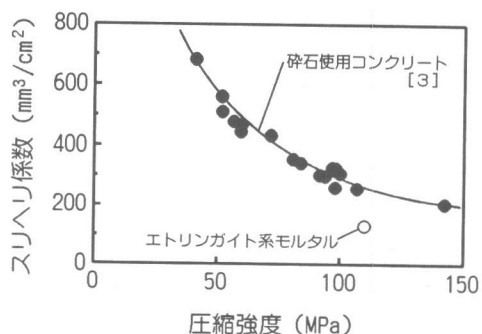


図-13 耐摩耗性試験結果

## 5. まとめ

一般の二次製品工場の設備で製造可能なプレキャスト型枠を開発することを目的に、普通セメントにエトリングイト系混和材を併用した高強度モルタルの配合検討及び各種耐久性試験を実施した。その結果を以下にまとめる。

- (1)水結合材比24%、単位結合材量 $800\text{ kg}/\text{m}^3$ 、ステンレスファイバーを2 vol%混入したモルタルの曲げ強度は、 $4 \times 4 \times 16\text{ cm}$ 供試体で20MPa以上、 $10 \times 10 \times 40\text{ cm}$ 供試体で17MPa程度が期待できる。
- (2)耐久性試験の結果、今回検討を行った高強度モルタルは塩化物浸透性、中性化、凍結融解作用、酸による浸食及び摩耗に対して優れた抵抗性を有することが確かめられた。このような性質を有するモルタルを用いて製造したプレキャスト型枠は、これを用いたコンクリート構造物の耐久性を著しく向上させることが期待できる。

以上により、高強度・高耐久性を有するプレキャスト型枠を作製するための材料的な目安が得られた。プレキャスト型枠の実工事への適用においては、実大部材としての力学的性状、型枠継目処理、本体コンクリートとの一体化、セパレータの間隔や施工時の変形などの課題があげられる。これらについても検討を行っており、その結果については別の機会に報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 例えば、中平 淳：主塔基礎気中コンクリートの施工，基礎工 pp. 89~96, 1993. 5
- 2) 松永嘉久，渡邊芳春，中川晃次，坂井悦郎：エトリングイト系混和材料の作用と多孔制御，石膏と石灰，No. 240, pp324~330, 1992. 11
- 3) 増田隆，松永嘉久，渡邊芳春：超高強度コンクリートによる橋脚の補強，コンクリート工学，Vol. 31, No. 9, pp. 53~61, 1993. 9