

超高曲げ強度モルタルの製造技術に関する基礎的研究

小川 晴果 三谷 一房
林 好正 川地 武

Fundamental Studies on Manufacturing Techniques of Ultrahigh Flexural-Strength Mortars

Haruka Ogawa Hitofusa Mitani
Yoshimasa Hayashi Takeshi Kawachi

Abstract

High flexural strength results in a reduction of wall thicknesses of precast concrete products such as curtain walls and permanent formworks which assist crane-age requirements and allow for the placement of large panels. In this paper, fundamental studies on manufacturing techniques of ultrahigh flexural-strength mortars were conducted. The effects of sand types, curing conditions, polymer modification, and discontinuous short-fiber reinforcement on the flexural strength of mortars were assessed experimentally. The test data generated in this study indicated that flexural strength of 24 MPa can be attained in water-cured mortars by reducing the W/C and using a high-strength alumina sand. It was found that the use of fibers or polymers, not only reduces the brittle nature of ultrahigh-strength mortars, but also increases the maximum flexural strength. The best flexural strength obtained for the mortars was 53 MPa. This was achieved by incorporating steel fibers at a rate of 3% by volume, with no need to use specialized manufacturing techniques.

概 要

モルタル・コンクリートの曲げ強度を向上し、カーテンウォールや永久型枠のようなプレキャストコンクリート部材の断面を薄くすることによって、部材の軽量化や大型化が図れ、運搬・建込み作業の省力化が図れる。本報は、超高曲げ強度モルタルの製造技術に関する基礎的研究である。実験要因として骨材の種類、養生条件、ポリマー改質および繊維補強を取りあげ、モルタルの曲げ強度に及ぼす効果について実験的に検討した。その結果、水結合材比を低減し、アルミナのような高強度骨材を用いたモルタルを水中養生することにより、最大 24 MPa の高曲げ強度モルタルが製造できることを確認した。さらに、ポリマーや短繊維の混入によって超高強度モルタルの脆性が改善されるばかりでなく、曲げ強度も増大することが判った。特殊な製造法を用いることなくスチール繊維を容積比で3%混入することによって最大 53 MPa の高曲げ強度が得られた。

1. はじめに

カーテンウォールや、打込み型枠などのプレキャストコンクリート (PC) 部材においてモルタル・コンクリートの曲げ強度の向上を図り部材断面を薄くすることは、部材重量の軽量化につながり、運搬・建込み作業の省力化や構造部材 (鉄骨等) の節減といった建築生産の合理化に寄与する。

本研究は、特殊製法によらず、PC 工場でも汎用的に用いられている流し込み成型によって製造可能な薄肉 PC 部材に供する、高曲げ強度モルタルの製造技術に関するものである。

既往の研究によれば、コンクリートの曲げ強度は、モルタルだけの時に最大となり、粗骨材が存在すると低下することが知られている¹⁾。また、L. I. Knab らは、セメ

ントー骨材間の付着強度に影響する骨材の種類、形状および表面粗さが曲げ強度向上に及ぼす影響が大きいことを指摘している²⁾。

本文では、実験因子として細骨材の種類、養生条件、ポリマー改質および短繊維補強を取り上げ、超高強度モルタルの曲げ強度を中心とする性質に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 細骨材の種類の影響

2.1 使用材料および調査

結合材としては、普通ポルトランドセメントの一部をシリカフェームで置換したものをを用いた。また、細骨材としては表-1 に示す13種類の骨材を用いた。なお、混和剤としてアミノスルホン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。シリカフェームの置換率は、セメントの内割り重

量で10%とし、いずれの細骨材を用いた場合も水結合材比は25%、骨材結合材比を1.7(容積比)とした。混和剤は結合材重量の4%とし混練水の一部とした。

2.2 試験方法

モルタルの混練は JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に準じて行い、振動台による締固めを60秒間行った。その後、24時間湿空養生を行い脱型し、材令4週まで気中(20±3°C, 65±5% R.H.) または、水中(20±3°C) で養生を行った。JIS R 5201 に準じ、フロー値、曲げ強度および圧縮強度を求めた。

2.3 試験結果および考察

2.3.1 フロー値 各種骨材を用いたモルタルのフロー値を図-1に示す。細骨材の粗粒率が大きくなるにつれてフロー値は増大するが、その傾向は、細骨材の種類によって異なった。

2.3.2 曲げおよび圧縮強度 各種細骨材を用いたモルタルの曲げおよび圧縮強度を図-2および図-3に示す。また、実験因子の要因効果を明確にするために、曲げおよび圧縮強度を目的変数とする多変量解析(林式数量化I類)を行った。図-4、図-5に示すように、曲げおよび圧縮強度と実験因子との関係式の精度を示す決定係数(R²)は、それぞれ0.7995、0.7296でいずれも高い相関が認められた。

曲げ強度においては、細骨材として、アルミナを用いた場合が、珪砂あるいは、山砂を使用した場合よりも著しく高強度化に寄与する結果を示した。アルミナの形状が角ばっておりペーストとの付着性に優れること、および他の細骨材よりも強度が高いことがその原因と推察される。また、養生条件が曲げ強度に及ぼす影響も大きく、水中養生は、曲げ強度の向上に有効であった。一方、圧縮強度においては、曲げ強度の場合と異なり、細骨材の種類よりも粒度による影響が大きかった。また、養生条件が、圧縮強度に及ぼす効果は、曲げ強度の場合と比較して小さかった。

表-1 細骨材の性質

記号	種類	比重	吸水率 (%)	単位容積重量 (kg/ℓ)	実績率 (%)	粗粒率 (F. M)
S4	珪砂	2.62	0.38	1.662	63.7	2.72
S5				1.678	64.5	2.36
S6				1.636	62.9	1.60
S7				1.461	56.0	0.66
T1	タイル破砕片	2.18	0.65	1.344	62.1	4.56
T2				1.282	59.2	3.63
T3				1.391	64.2	1.87
I1	碓子	2.32	1.11	1.560	67.9	3.06
I2		2.38	0.31	1.600	67.3	2.69
A1	アルミナ	3.86	0.64	2.179	56.8	2.45
A2				2.111	55.0	1.30
A3				2.098	54.7	0.65
P	山砂	2.61	1.78	1.760	68.6	2.36

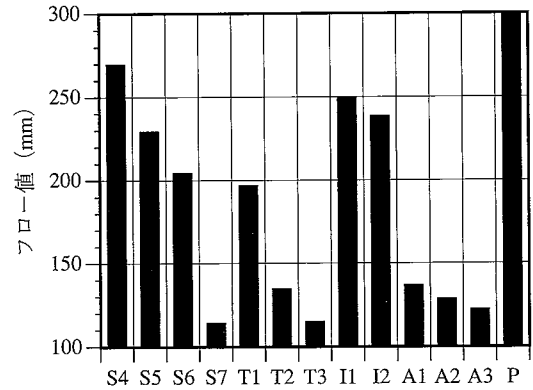


図-1 各種細骨材を用いたモルタルのフロー値

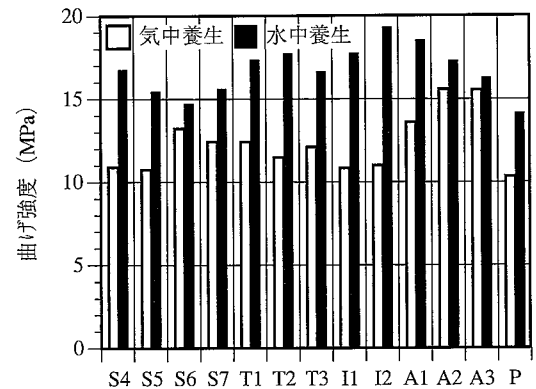


図-2 各種細骨材を用いたモルタルの曲げ強度

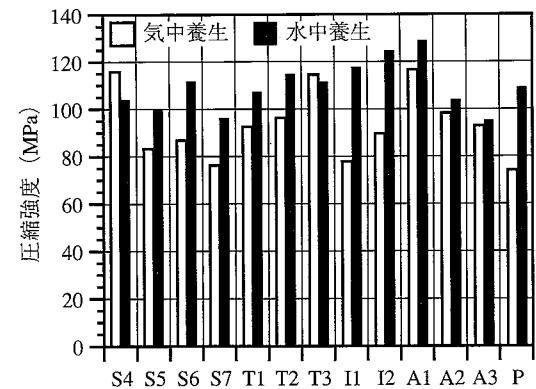


図-3 各種細骨材を用いたモルタルの圧縮強度

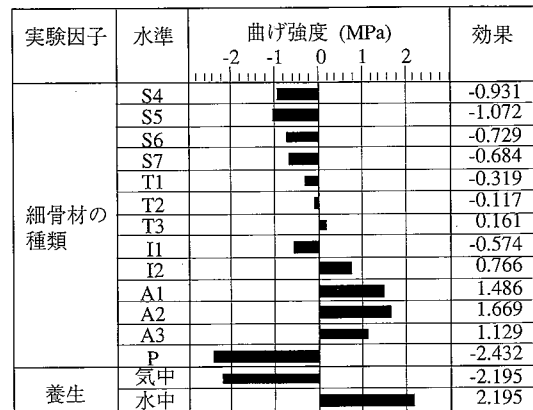


図-4 曲げ強度に対する要因効果 (n=90, R²=0.7995)

3. 養生条件の影響

3.1 使用材料および調合

2.1に準じたが、細骨材としては、全てアルミナ(80#)を使用し、骨材結合材比を1.2(体積比)で一定とした。

3.2 試験方法

モルタルの混練は JIS R 5201 に準じて行い、振動台による締固めを60秒間行った。その後、24時間湿空養生を行い脱型し、所定の材令まで気中または、水中で養生を行った。気中養生(20±3℃,65±5% R. H.)の供試体では、脱型後24時間、72時間のみ水中(20±3℃)養生を行った供試体も併せて作成した。水中養生の供試体については、養生温度の影響を確認するため養生水温を5,20,30,および50±3℃の4水準とした。JIS R 5201 に準じ、フロー値、曲げ強度および圧縮強度を求めた。

3.3 試験結果および考察

フロー値は230mmであった。曲げおよび圧縮強度試験結果を図-6および図-7に示す。

曲げ強度に対しては、初期材令における(脱型後24時間、72時間)水中養生は標準水中養生に比べほとんど効果がなく気中養生と差が認められなかった。曲げ強度の向上には、できるだけ長期にわたり、水分が定常的に供給されるような対策を講じることが重要と考える。曲げ強度に対する養生温度の効果は大きく、特に温水(50℃)養生を行った供試体において著しい初期強度の増大が認められた。ただし、1週曲げ強度に比べ4週曲げ強度が減少しており、長期強度においてはむしろマイナスとなる可能性がある。今回の実験では、30℃程度の水中養生温度が最も効果的であった。また、低温(5℃)水中養生は、1週曲げ強度に対しては不利であるが4週曲げ強度では標準水中養生とほとんど差がないことが確認された。

圧縮強度に対しては、曲げ強度の場合と異なり、初期材令における短期間の水中養生が強度の増大に有効であり、標準水中養生と同等の強度が得られた。また、養生温度の影響が大きく、養生温度の上昇に伴いモルタルの圧縮強度は著しく増大した。温水養生の供試体では、1週から4週にかけての強度増大はほとんど認められなかったが、曲げ強度の場合と異なり、材令に伴う強度低下は認められなかった。ただし、低温水中養生の供試体では、圧縮強度は小さく気中養生の供試体の強度と同程度であった。

4. ポリマー混入の効果

4.1 使用材料および調合

結合材としては、普通ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントの一部をシリカフュームで置換したものを用いた。細骨材はアルミナ(80#)を用いた。また、使用したポリマーの種類と性質を表-2に示す。混和剤は、調合に応じてアミノスルホン酸系もしくはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、混練水の一部とした。表-3に各調合を示す。

実験因子	水準	圧縮強度 (MPa)			効果
		-10	0	10	
細骨材の種類	S4				5.972
	S5				-11.894
	S6				-5.628
	S7				-18.228
	T1				8.289
	T2				1.122
	T3				-3.003
	I1				6.539
	I2				11.572
	A1				18.197
	A2				-3.994
	A3				-10.744
	P				-13.394
	養生	気中			
水中					6.722

図-5 圧縮強度に対する要因効果 (n=90, R²=0.7296)

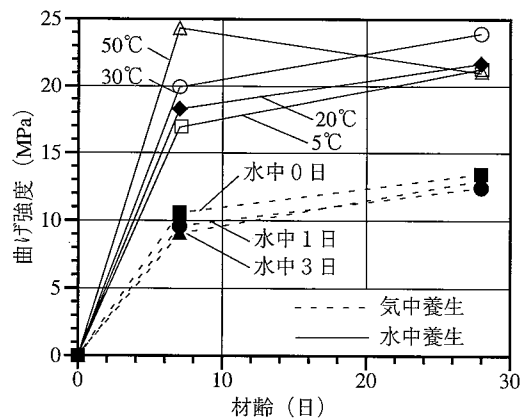


図-6 曲げ強度に対する養生条件の効果

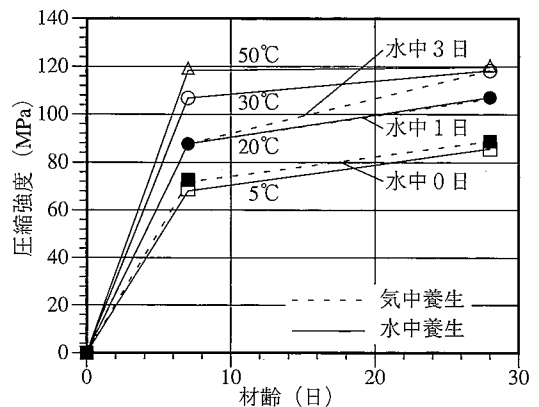


図-7 圧縮強度に対する養生条件の効果

表-2 ポリマーの種類と性質

種類	固形分 (%)	pH	粘度 (cP)
SBR系	45	9.3	24
アクリル系	45	2	50
エポキシ系*	100	5-8	500-1,000

*ポリアミンアダクト硬化剤を併用

4.2 試験方法

モルタルの混練は、JIS R 5201 に準じて行い、振動台による締固めを60秒間行った。成形後、24時間湿空養生を行い脱型し、所定の材齢まで気中養生(20±3°C, 65±5% R. H.) または湿潤養生(20±3°C, 濡れタオルによる被覆)を行った。JIS R 5201 に準じ、フロー値、曲げ強度および圧縮強度を求めた。また、曲げ試験時に引張応力側にひずみゲージを貼り、伸びを測定した。

4.3 試験結果および考察

4.3.1 フロー値 図-8に水結合材比とフロー値の関係を示す。同一水結合材比に対し、フロー値の大小関係は、混入するポリマーの種類によって異なった。

4.3.2 曲げおよび圧縮強度 図-9および図-10に4週曲げ強度および圧縮強度を示す。気中養生を行った供試体の曲げ強度は、アクリル系およびエポキシ系ポリマーの混入によって、無混入の場合よりかなり増大した。ただし、SBR系ポリマー混入では曲げ強度は低下した。ポリマーの混入は気中養生での曲げ強度向上に有効であることが確認できた。これに対し、湿潤養生ではポリマーの混入は曲げ強度増大には寄与しなかった。一方、圧縮強度は、ポリマーの混入によってかなり低下した。また、今回の実験では、曲げ強度および圧縮強度の両方において、水結合材比の水準間に明確な有意差は認められなかった。図-11に材齢28日まで気中養生を行った供試体(水結合材比25%)の曲げ応力-ひずみ関係を示す。ポリマー混入によって、弾性係数は低下したが伸びは著しく増大した。超高強度領域においてもアクリル系およびエポキシ系ポリマーの混入によって、モルタルの脆性は改善され変形性能が著しく向上することがわかった。

5. 短繊維補強の影響

5.1 使用材料および割合

結合材には、普通ポルトランドセメントおよびシリカフェームを用いた。細骨材として、アルミナ(80#)および標準砂を用いた。混和剤としてアミノスルホン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。補強繊維として、表-4に示す3種類の短繊維を用いた。モルタルの割合を表-5に示す。繊維混入率は、モルタルの容積比で1, 2, 3%とした。

表-3 ポリマーセメントモルタルの割合

割合	ポリマーの種類	骨材結合材比 (by Vol.)	シリカフェーム* 置換率(%)	ポリマー 結合材比(%)	減水剤** 添加率(%)	水結合材比(%)
P	—	—	10	0	—	25
S1	SBR系***	1.2	0	10	4	25
S2						23
S3						21
A1	アクリル系***	1.2	0	10	4	25
A2						23
A3						21
E	エポキシ系	—	10	—	—	25

* シリカフェーム置換率はセメントの内割り重量
 ** 減水剤添加率は結合材重量に対する割合
 割合 P, S, A ではアミノスルホン酸系, 割合 E ではポリカルボン酸系を使用
 *** 結合材重量に対し消泡剤を0.1%添加

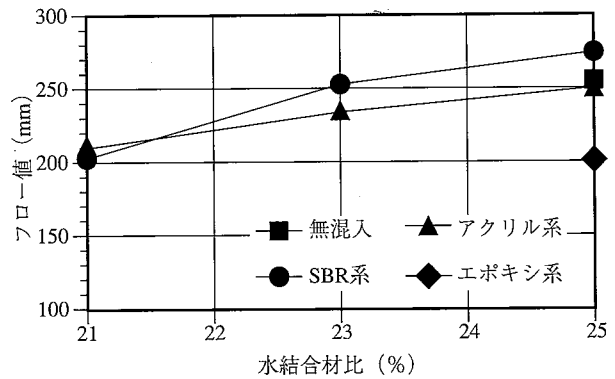


図-8 水結合材比とフロー値の関係

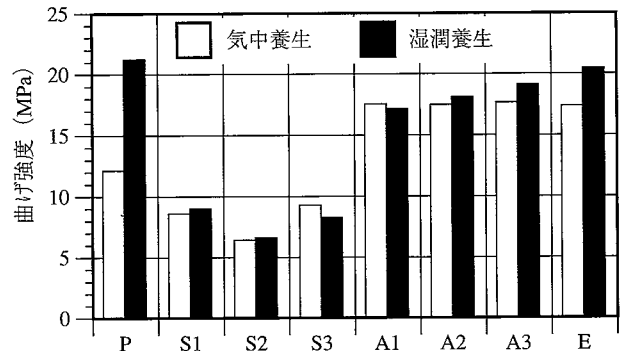


図-9 各種ポリマーを用いたモルタルの曲げ強度

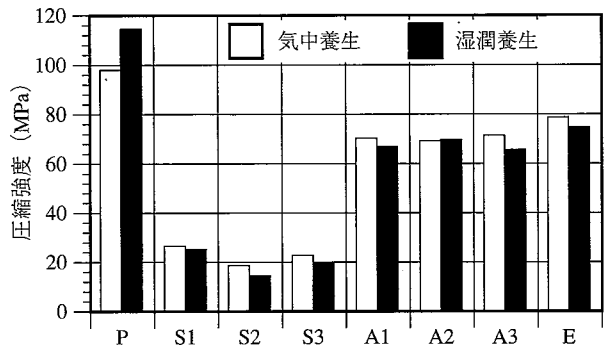


図-10 各種ポリマーを用いたモルタルの圧縮強度

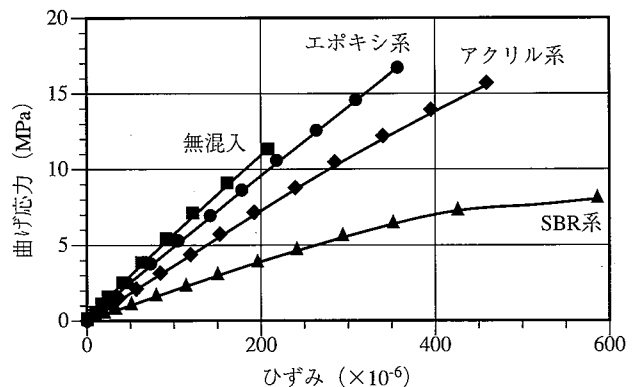


図-11 ポリマーセメントモルタルの曲げ応力-ひずみ関係

5.2 試験方法

混練は JIS R 5201 に準じて行い、振動台による締め固めを60秒間行った。その後24時間湿空養生を行い、材令4週まで気中(20±3℃, 65±5% R.H.)または水中(20±3℃)で養生を行った。繊維の付着強度を JCI-SF 8 (繊維の付着試験方法) に準じて測定した。JIS R 5201 に準じてフロー値、曲げおよび圧縮強度を求めた。曲げ試験時に、引張り応力側にひずみゲージを張り伸びを測定した。

5.3 試験結果および考察

5.3.1 繊維の付着強度 付着強度試験結果を表-6 に示す。付着強度は、繊維の種類に関わらず超高強度モルタルの方が普通強度のモルタルよりも大きかった。ビニロン繊維(VF)は、モルタルとの付着性が良いが、引張り強度が小さいため、いずれのモルタルでも繊維の破断を呈した。アラミド繊維(AF)は、付着強度が小さく、いずれのモルタルでも引抜けを生じた。スチール繊維(SF)は、普通強度のモルタルでは引抜けを生じたが超高強度モルタルでは付着強度が著しく増大し、繊維の破断を生じた。

5.3.2 フロー値 繊維混入率とフロー値の関係を図-12に示す。単繊維であるVFおよびSFは、繊維混入率増大に伴うフロー値の減少はわずかであった。AFは混練中に集束が部分的に解繊し、フロー値が著しく低下した。

5.3.3 曲げ強度 繊維混入率と曲げ強度の関係を図-13および図-14に示す。普通強度および超高強度モルタルともに、繊維混入率の増大に伴い曲げ強度が増大した。特に、超高強度モルタルではAFおよびSFを用いた場合に、著しい曲げ強度の増大が認められ、水中養生の場合、繊維混入率3%でAFでは43 MPa、SFでは53 MPaの高曲げ強度が得られたが、VFでは顕著な補強効果が認められなかった。AF、SFに比べVFの引張り強度が小さいことが原因と考えられる。一方、AFが付着強度が小さい割に補強効果が大きいのは、混練中に集束繊維が部分的に単繊維状に解繊し、繊維表面積が増大したことによると推察される。既往の研究より、繊維補強セメントの曲げ強度は、繊維の体積、アスペクト比、繊維の摩擦付着強度に比例して、増大することが知られている³⁾。今回の実験結果から、単繊維であるVFとSFについて、曲げ強度とこれら変数の関係を求めると(1)式の通りとなり、強い相関が認められた。繊維の摩擦付着強度

表-4 繊維の性質

種類*	直径(mm)	長さ(mm)	比重	引張強度(MPa)	弾性低数(GPa)	伸び(%)
VF	0.4	30	1.30	882	29.4	6.0
AF	0.6	30	1.39	3,430	72.5	4.6
SF	0.6	30	7.85	1,225	205.8	1.2

* VF: ビニロン繊維
AF: アラミド繊維(チョップドストランド, ×1,000本, 直径0.6mm)
SF: スチール繊維

表-5 マトリックスモルタルの調査

モルタルの種類	砂の種類	水結合材比(%)	砂結合材比(%)	シリカフェーム置換率(%)	減水剤*添加率(%)
普通**	標準砂	50	170	0	0
超高強度***	アルミナ	25	150	10	4

* 結合材に対する重量%, 混練水の一部とした。
** 28日圧縮強度: 28.8 MPa (気中), 52.8 MPa (水中)
*** 28日圧縮強度: 106.4 MPa (気中), 130.7 MPa (水中)

表-6 繊維の付着強度試験結果

モルタルの種類	養生方法	繊維の種類	繊維の引抜状況(%)		付着強度(MPa)
			破断	引抜	
普通	気中	VF	50	50	1.1 ≤
		AF		100	0.3
		SF		100	2.5
	水中	VF	75	25	2.4
		AF		100	0.4
		SF		100	3.7
超高強度	気中	VF	100		3.1 ≤
		AF		100	0.9
		SF	100		11.0 ≤
	水中	VF	100		2.6 ≤
		AF		100	0.9
		SF	100		10.4 ≤

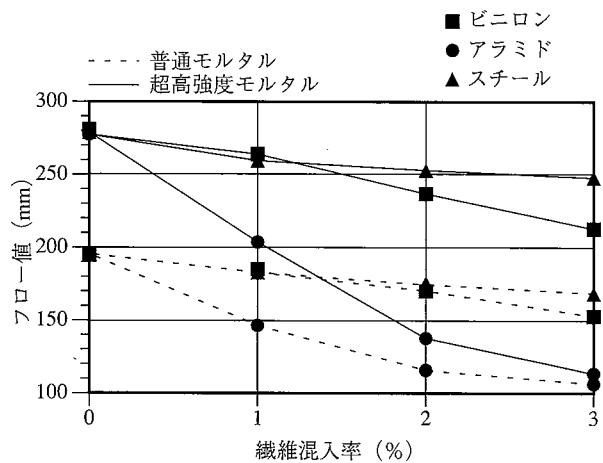


図-12 繊維混入率とフロー値の関係

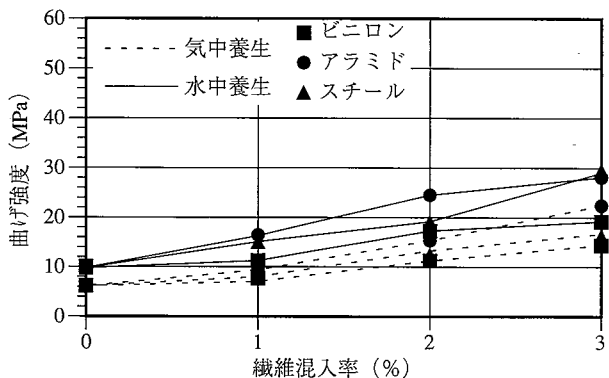


図-13 繊維混入率と曲げ強度の関係 (普通強度モルタル)

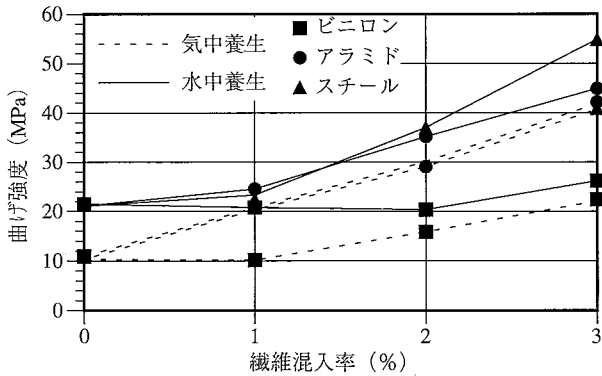


図-14 繊維混入率と曲げ強度の関係 (超高強度モルタル)

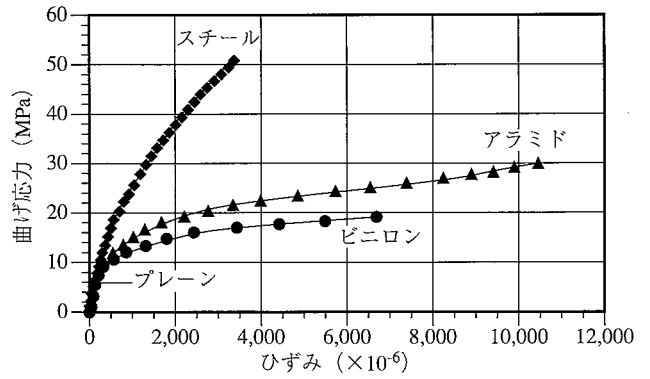


図-15 曲げ応力-ひずみ関係 (超高強度モルタル)

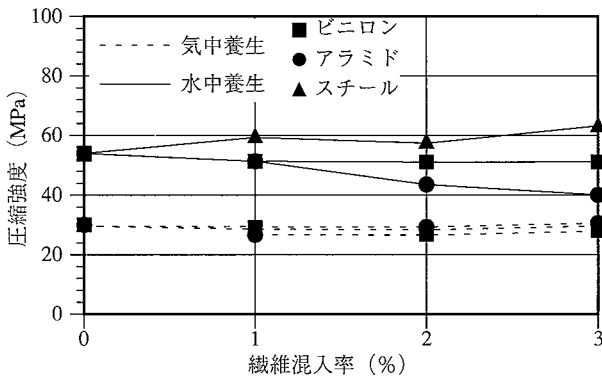


図-16 繊維混入率と圧縮強度の関係 (普通強度モルタル)

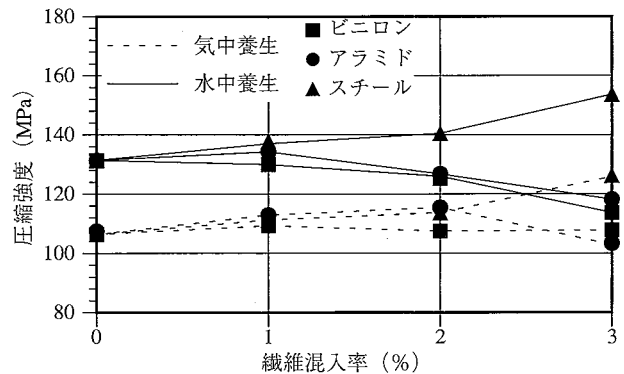


図-17 繊維混入率と圧縮強度の関係 (超高強度モルタル)

を求めることにより、繊維補強モルタルの曲げ強度を精度良く推定できることが確認された。

$$\sigma_{MR} = 2.40V_f \cdot \tau \cdot (\ell/d) + 78.17 \quad \dots\dots\dots(1)$$

(R²=0.8644, n=72)

ここに、 σ_{MR} : 繊維補強モルタルの曲げ強度
 V_f : 繊維の体積
 τ : 摩擦付着強度
 ℓ/d : アスペクト比

図-15に繊維混入率3% (気中養生) の超高強度モルタル供試体の曲げ応力-ひずみ関係を示す。繊維補強によって脆性が改善され伸び能力が著しく増大した。

5.3.4 圧縮強度 繊維混入率と圧縮強度の関係を図-16および図-17に示す。圧縮強度は、マトリクスモルタルの種類および養生条件の影響を強く受け、繊維補強の効果は、ほとんど認められなかった。ただし、SFを混入した場合には、圧縮強度が増大する傾向が認められた。

6. まとめ

骨材の種類、養生条件、ポリマー混入および短繊維補強が、超高強度モルタルの曲げ強度に及ぼす影響について実験検討した結果、以下のことが明らかとなった。

① 水結合材比を低減し、アルミナのような高強度骨材を用いたモルタルを水中養生することにより、最大24MPaの高曲げ強度モルタルが製造できる。

② 曲げ強度は圧縮強度に比べ養生条件の影響を受けやすい。曲げ強度の向上には水中養生が効果的である。

③ 水中養生に比べ気中養生では、超高強度モルタルの曲げ強度が低下するが、ポリマーの混入によって、このような強度低下が抑制できる。

④ 超高強度モルタルは繊維の付着強度が大きいため、高強度繊維を混入することにより、曲げ強度は著しく増大する。スチール繊維を3%混入することで最大53MPaの高曲げ強度が得られる。

⑤ ポリマーや短繊維の混入によって、超高強度モルタルの脆性が改善され曲げ変形に対する伸び能力が著しく増大する。

参考文献

- 1) M. F. Kaplan: Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates, J. Amer. Conc. Inst, Vol. 30, No. 11, p. 1193~1208, (1959)
- 2) L. I. Knab, et al.: Effects of Maximum Void Size and Aggregate Characteristics on the Strength of Mortar, Cement and Concrete Research, Vol.13, p. 383~390, (1983)
- 3) D. J. Hannant 著, 楨谷栄次訳, 繊維コンクリート, 森北出版, (1980)