

[40] 繊維補強レジンモルタルの曲げ強さと角欠け強さに関する一考察

高橋 久 衛 (ショーボンド建設 中央技術研究所)
 正会員 ○ 佐藤 直 昭 (" ")
 小杉 峻 (" ")
 栗原 正 (" ")

1. まえがき

レジンマトリックスにしたモルタルはセメント系に比べて圧縮強度に対する曲げ強度の比率が増加する。レジンの弾性係数はセメントよりも低いし、荷重に対する挙動も異なることからレジンマトリックス材料がセメント・コンクリートと同様な強度の検討をしてよいかどうか。レジン・モルタルの基本的な物性として圧縮強度、引張強度、せん断強度を求めた。そして、各種の補強材料を組合せて、曲げ強度を求め、検討を加えてみた。又、レジン・モルタルが歩道板や橋梁の端部材に用いられることから、角欠けに関する試験も行ってみた。本文では、これらの結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 供試体

a. 示方配合：供試体の配合は重量百分率で表-1に示す。樹脂と細骨材は1:5と1:4の重量比率で、細骨材は4号珪砂と7号珪砂を1:1の割合で乾燥重量を用いている。エポキシ樹脂の粘度11.000~15.000CP(25℃)である。

b. 供試体の補強材料：補強材料にはガラスロービング、アラミド繊維、カーボン繊維の3種類を考える。物性及び繊維断面積を表-2に示す。

2.2 供試体の製作と試験方法

a. 圧縮試験(JIS A 1108に準拠)：供試体は、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ を用い、示方配合により小型ミキサ中で10分間混練りする。鉄製の供試体型枠に流し込み、3層に分けて突き固め、各30回で成形する。締固めの終わった供試体は温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 $65 \pm 5 \%$ の恒温室内に入れ、翌日脱型して試験時まで静置する。試験材令は7日とする。

供試体数は3本とし、高さ10cmの位置に十字にひずみゲージを2カ所取り付け。試験時には載荷荷重と縦方向のひずみと横方向のひずみとを測定し、圧縮強さの外に圧縮弾性係数及びポアソン比を求める。

b. 引張試験(JIS A 1113に準拠)：供試体は圧縮試験と同様に製作し、養生する。供試体の端部に十字にひずみゲージを取り付け、引張強さ、割裂試験による引張ひずみと応力度の比で弾性係数を求める。供試体は3本とする。

c. せん断試験：供試体は $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ を用い、レジン・モルタルを3層に分け、突き固め各30回で成形する。養生方法等は圧縮試験と同様とする。試験装置は図-1に示すように、せん断板により供試体の上部から

表-1. レジン・モルタル示方配合

材 料	レジン：砂		
	1：5	1：4	
エポキシ樹脂	7.0	8.4	
変性ポリアミド樹脂	0.1	0.2	
変性ポリアミン	1.4	1.7	
可とう性付与剤	6.8	8.1	
希 釈 剤	0.7	0.8	
促 進 剤	0.7	0.8	
細骨材	0.15mm 未満	12.9	12.4
	0.15~0.3mm	22.1	21.2
	~0.6mm	12.5	12.0
	~1.2mm	35.8	34.4
計(重量百分率)	100	100	

表-2. 各種補強材料の物性及び繊維断面積

	ガラス繊維 (ロービング)	アラミド繊維	カーボン繊維	
比 重	2.55	1.44	1.74	
引張強度(kgf/cm ²)	15,000	28,000	30,000	
引張弾性係数(μ)	700,000	1,200,000	2,300,000	
破断伸度(%)	3	2.5	1.3	
線膨張係数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)			-0.7	
比 熱(cal/g°C)	0.2		0.17	
モノフィラメント径(μ)	9	12	7	
耐アルカリ性(常温)	不 良	良	良	
耐衝撃性	良	良	良	
耐 疲 勞	不 良	良	良	
繊維断面積 Af(cm ²)	(4 0.4532 層)	(3 0.1741 層)	2層	CF 0.1384
				GF 0.2344
			4層	CF 0.2768
				GF 0.4688
			6層	CF 0.4152
		GF 0.7032		
有機・無機別	無 機	有 機	無 機	

一面せん断により試験を行う。供試体は各3本とする。

d. 曲げ試験 (J I S A 1 1 0 6 に準拠) : 供試体の大きさは $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ を用い, レジン・モルタル 1 : 5 配合を 2 層に分けて打設する。厚さ約 9 cm に仕上げた上に補強材料を挿入し, その上 1 cm にはレジン・モルタル 1 : 4 配合を打設する。各層とも平型バイブレータで 20 sec 締固めを行い, 最上部はバイブレータをかけたあとにて仕上げをする。

載荷方法は図-2のように3等分点法とし, 補強部を下にして行う。ひずみゲージは図-3のように取付ける。又, 中央部にダイヤルゲージにより, 最終たわみを測定する。供試体はそれぞれ3本とし, 養生は圧縮試験と同じ。

e. 角欠け試験 : 供試体は $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ を用い, 製作方法は曲げ試験体と同様とする。供試体の長さを約 60 mm に切断する。載荷方法は図-4に示すように, 供試体を2本, 3 cm 間隔に平行に置き, 加圧板を上部に載せて, 荷重をかける。そして, 破壊荷重とその状況を知る。

3. 実験結果

3.1 圧縮試験・引張試験

結果を示すと表-3となる。ポアソン比は平均値で, 1 : 5 配合では 0.27 , 1 : 4 配合では 0.28 となった。圧縮弾性係数はゲージ長 60 mm の高さ方向のひずみと圧縮応力度を最大荷重の $1/4$ の 10 t と 5 t で求め, それぞれ ϵ_{10} , σ_{10} , ϵ_5 , σ_5 として $E_c = \frac{\sigma_{10} - \sigma_5}{\epsilon_{10} - \epsilon_5}$ で求めた。引張弾性係数はゲージ長 60 mm の横方向のひずみと引張応力度とを荷重 10 t と 6 t で ϵ_{10} , σ_{10} , ϵ_6 , σ_6 として $E_t = \frac{\sigma_{10} - \sigma_6}{\epsilon_{10} - \epsilon_6}$ で求めた。又, この割裂試験結果から圧縮弾性係数を求めて括弧内に示した。

3.2 せん断試験・曲げ試験

せん断試験結果は表-3に示す。曲げ試験結果は表-4となった。破壊状況は摘要欄に示した。又, 無補強の場合の強度を 1.00 としたときの他の場合の強度比を示した。

3.3 角欠け試験

結果は最大荷重を破断面で割ってせん断強度を求めた。表-5となる。

4. 考察

4.1 圧縮試験

表-3. 圧縮・引張・せん断試験結果

レジン配合	供試番号	圧縮強さ (kgf/cm^2)	圧縮弾性係数 (kgf/cm^2)	引張強さ (kgf/cm^2)	引張弾性係数 (kgf/cm^2)	せん断荷重 (kgf)	せん断強度 (kgf/cm^2)
1 : 4	1	556	66,850 (59,500)	78.7	43,050	4,590	234
	2	550	71,400 (66,500)	80.7	49,000	4,520	230
	3	555	65,100 (66,150)	77.4	47,950	4,310	220
	平均	557	67,800 (64,050)	78.9	46,700		228
1 : 5	1	659	98,350 (98,400)	98.1	79,100	4,860	248
	2	661	95,550 (99,750)	95.9	78,050	4,780	244
	3	669	93,100 (86,800)	97.1	84,350	4,800	245
	平均	663	95,700 (95,300)	97.0	80,500		246

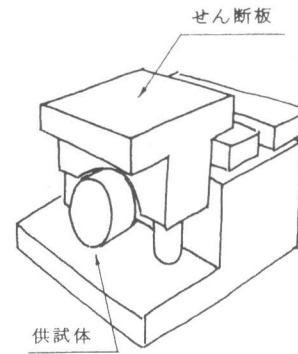


図-1. せん断試験状況

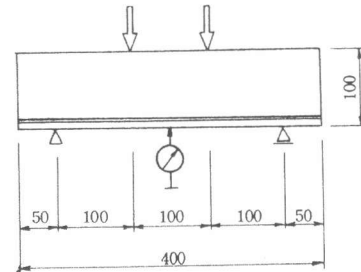


図-2. 曲げ試験状況

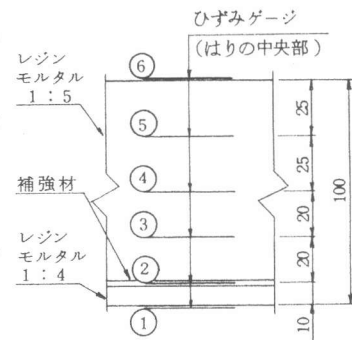


図-3. ひずみゲージ取付位置

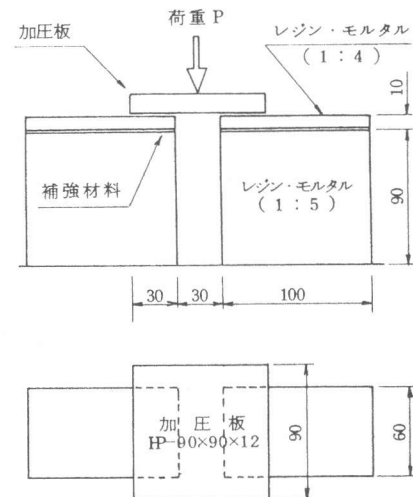


図-4. 角欠け試験状況

圧縮試験結果を応力とひずみの関係で示すと図-5となる。表-4. 曲げ試験結果

圧縮強度の限界は1:5配合では500~630 Kg/cm²程度である。そのときのひずみは5000μ~8000μである。

1:4配合では圧縮強度500 Kg/cm², ひずみは7500μ。

4.2 引張試験

結果を応力とひずみの関係で示すと図-5となる。引張強度の限界は1:5配合では90 Kg/cm², ひずみは1400μ,

1:4配合では95 Kg/cm², ひずみで3000μである。

4.3 曲げ試験

試験結果を荷重とひずみの関係で示すと図-6となる。無補強では荷重9.5tまで断面に生じたひずみは直線的に変化している。ガラス繊維, アラミド繊維, カーボン繊維(2層)では

大ききの差はあるとしても似た変化をしている。無補強とも似ている。アラミド繊維の広がり若干大きく, カーボン繊維(2層)が若干小さい。これらでは補強材料を入れた効果が強度差に現われていない。カーボン繊維(6層)では圧縮側のひずみが交差している。これは、はりの断面の応力が弾塑性状態

となったことを示している。又、補強材料の効果がでている。

補強材料の断面比pと引張強度σ_fを掛け合せてみると、ガラス繊維では3172 Kg/cm², アラミド繊維は2089 Kg/cm²,

カーボン繊維(2層)は4824 Kg/cm², (4層)では9648 Kg/cm², (6層)では14472 Kg/cm²となる。補強材料の効果は面積当りの強さpσ_fによって説明できる。

破壊荷重を弾性論で検討してみる。まず、無補強のデータを用いて曲げ引張強度を算定する。その値を用いて、各補強材のある場合の破壊荷重との対比をする。

a. 無補強の場合: 外力によるモーメントは式(1), 抵抗モーメントM_rは式(2)となる。

$$M_{max} = \frac{P \cdot \ell}{6} \dots (1), \quad M_r = \frac{b t^2}{6} \cdot \sigma \dots (2)$$

したがって、荷重Pと曲げ応力との関係は式(3)となる。

$$\sigma = P \cdot \frac{\ell}{b t^2} \dots (3)$$

式(3)に無補強時の平均破壊荷重P=10,150 Kgを代入すると、σ=304.5 Kg/cm²を得る。

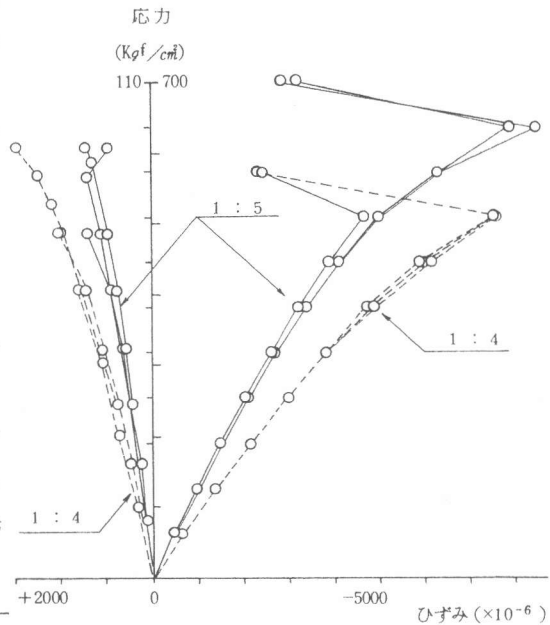
b. 補強材のある場合: 部材断面の圧縮側及び引張側のレジコンクリートはそれぞれ三角形分布で応力を負担するものとすれば、中立軸αを求める式、断面二次モーメントI, 抵抗モーメントM_rを求める式はそれぞれ(4), (5), (6)となる。

$$\alpha = \sqrt{\left[\frac{m b t + n A f}{b(1-m)} \right]^2 + \frac{m b t^2 + 2 n d A f}{b(1-m)} + \frac{m b t + n A f}{b(1-m)}} \dots (4)$$

供試番号	破壊荷重 (Kg)	曲げ強度 (Kg/cm ²)	最大たわみ (mm)	摘要
無補強	1	10,450	313	1.37
	2	10,000	300	1.10
	3	10,000	300	1.00
	平均	10,150	304	1.16
ガラス繊維 (ロビグ) 4層	1	10,150	309	1.30
	2	10,280	329	1.15
	3	10,950	341	1.05
	平均	10,460	326	1.16
アラミド繊維 3層	1	10,250	308	1.30
	2	10,080	302	1.15
	3	10,100	303	1.13
	平均	10,143	304	1.19
カーボン繊維 2層	1	12,250	368	1.20
	2	11,310	339	1.25
	3	11,450	344	1.25
	平均	11,670	350	1.23
カーボン繊維 4層	1	18,030	541	1.74
	2	15,770	473	
	3	18,970	569	
	平均	17,590	528	斜め引張破壊
カーボン繊維 6層	1	19,370	581	1.99
	2	20,700	621	
	3	20,470	614	
	平均	20,180	605	せん断圧縮破壊

表-5. 角欠け試験結果

供試番号	破壊荷重 (Kg)	せん断面積 (cm ²)	せん断面積 (Kg/cm ²)	摘要
無補強	1	18,700	31.2	300.0
	2	16,500	21.1	391.0
	3	17,300	24.9	347.3
	平均			346.1
ガラス繊維 (ロビグ) 4層	1	20,100	26.9	373.6
	2	17,200	22.6	380.5
	3	18,500	25.3	365.6
	平均			373.2
カーボン繊維 2層	1	17,300	18.4	470.1
	2	15,400	16.6	463.9
	3	15,800	18.4	429.3
	平均			454.4



〔引張供試体〕 〔圧縮供試体〕

図-5. 圧縮・引張供試体S-S曲線

$$I = \frac{b}{3} x^3 + \frac{m b}{3} (t-x)^3 + n A_f (d-x)^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$M_r = \frac{\sigma_{bt} \cdot I}{m(t-x)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 E_t : レジン・モルタルの引張弾性係数、 E_c : レジンモルタルの圧縮弾性係数、 E_s : 補強材料の引張弾性係数、 $m = \frac{E_t}{E_c}$ 、 $n = \frac{E_s}{E_c}$ 、 b : はりの幅、 t : はりの高さ、 A_f : 補強材料の断面積、 d : 有効高さ、 σ_{bt} : レジンの曲げ引張強度。式(6)から得られた値を式(1)の M_{max} に代入し、破壊荷重 P_u を求める。すなわち、次式となる。

$$P_u = \frac{6}{l} \cdot M_r \dots\dots\dots (7)$$

各補強材に対して表-2の条件を入れて破壊荷重を算定すると表-6となる。弾性論で割り切って、応力分布も三角形と仮定しても+12%~24%の差異で収まっている。補強材料の断面積の多い場合には破壊荷重は低くでていることが分る。

表-6. 弾性論による曲げ破壊荷重の算定結果と実験との対比

	x (cm)	I (cm^4)	抵抗モーメント		算定破壊荷重	実験破壊荷重	$\frac{P_u}{P}$
			M_r ($Kgf \cdot cm$)	P_u (Kgf)	P (Kgf)		
ガラス繊維	4.9	819	57,000	11,400	10,900	1.05	
アラミド繊維	4.9	809	56,500	11,300	10,100	1.12	
カーボン繊維	2層	5.0	848	60,600	12,100	11,700	1.03
	4層	5.2	925	68,800	13,800	17,600	0.78
	6層	5.4	993	76,800	15,400	20,200	0.76

4.4 角欠け試験

角欠け試験の試みとして図-4のような方法をとってみた。発生した破壊面を測定して、そのせん断面積で割って強度を算定した。補強すると破壊面が上昇することが分った。得られた値は通常のせん断強度よりも大きくなった。摘要に無補強に比した強度比を記入した。

5. まとめ

- (1) レジンをマトリックスとしたモルタルや補強材を配したモルタルは鉄筋コンクリートと同様な理論が使える。
- (2) レジン・モルタルの曲げ破壊を弾性論で取り扱う場合には曲げ引張強度を 300 Kg/cm^2 とすれば、大まかな推定ができる。
- (3) 繊維断面比と繊維引張強度を掛け合せた値 $p \times \sigma_f$ をパラメータとして、 $p \sigma_f = 4.800 \text{ Kg/cm}^2$ 以下では曲げ破壊し、その無補強との曲げ強度比は $1.0 \sim 1.15$ である。 $p \sigma_f = 9.600 \text{ Kg/cm}^2$ では斜め引張破壊を生じ、補強効果は曲げ強度比で 1.7 となる。 $p \sigma_f = 14.500 \text{ Kg/cm}^2$ では曲げ強度比は約 2 となり、斜め引張破壊か圧縮部の破壊となる。
- (4) レジン・モルタルの圧縮強度の限界は $1:5$ 配合で 640 Kg/cm^2 、そのときの圧縮ひずみの限界は 8.500μ 、 $1:4$ 配合では 510 Kg/cm^2 、そのときの圧縮ひずみは 7.500μ 、引張強度は $1:5$ 配合で 90 Kg/cm^2 、そのときの引張ひずみは 1.400μ 、 $1:4$ 配合では 95 Kg/cm^2 、そのときの引張ひずみは 3.000μ である。
- (5) レジン・モルタルのポアソン比は $1:5$ 配合で 0.27 、 $1:4$ 配合では 0.28 となった。

6. あとがき

本文では曲げ強度を中心に検討を進めてみた。角欠けとせん断破壊については十分な検討ができなかった。今後、試料数を補って行きたい。特に曲げ強度に関し、諸氏の御教示を請う。

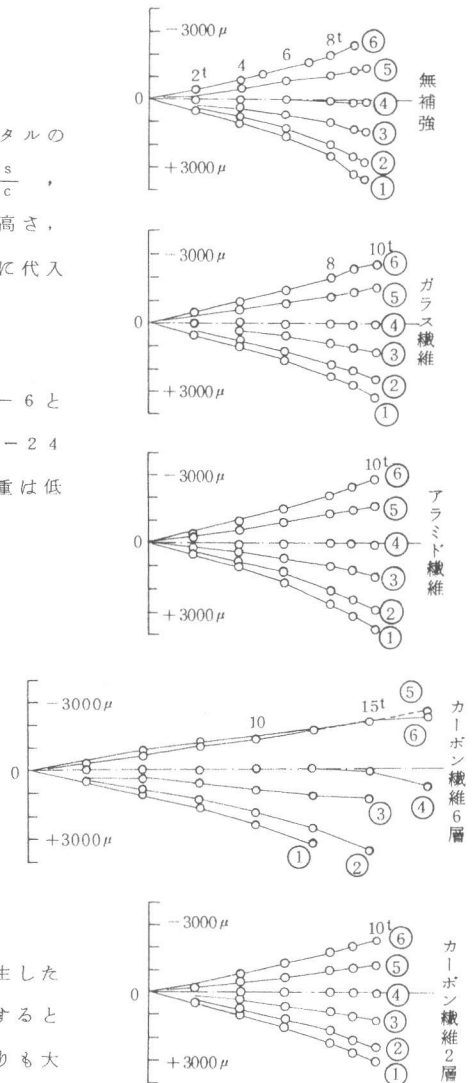


図-6. はり中央部ひずみの変化