

論文

[2187] 炭素繊維メッシュ補強モルタル板の基本的性質に関する研究

佐藤裕一<sup>1</sup> 藤井栄<sup>2</sup> 森田司郎<sup>3</sup>

1. はじめに

炭素繊維はセメント系材料と組み合わせることにより、新しい複合材料を生み出す可能性を持つ。炭素繊維を格子サイズ10mm程度のメッシュに加工し、これをモルタル板の補強材として用いれば、ひび割れの分散効果やモルタル板の各種応力下における耐力・剛性の著しい改善が期待され、建築物の外装材や柱、梁、壁などの薄肉恒久型枠、構造部材としての利用も考えられる。

本研究では格子サイズ10mmまたは5mm、1束線当たり公称耐力1600Nまたは800Nの5種類の炭素繊維メッシュと、シリンダー圧縮強度100MPaのモルタルを用いて、厚さ10mmから20mmの薄板を作成し、その基本的な力学的性質を検討するため、曲げ、付着、引張、せん断の各試験を行った。試験結果から、ひび割れ分散効果の定量化、およびメッシュ枚数、束線数、補強方向による影響の定量化を試み、同時にその力学的挙動の解析的予測を行った。

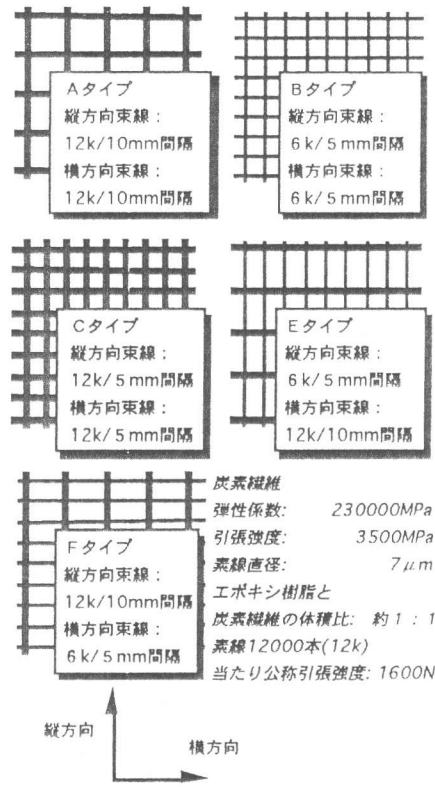


図-1 炭素繊維メッシュ

2. 試験

2.1 炭素繊維メッシュとモルタル

図-1に示すA、B、C、E、Fの5種類の炭素繊維メッシュを用いた。メッシュの縦方向束線は直線状であり、横方向束線は縦方向束線を縫う波状となっている。使用したモルタルは、すべての試験の供試体において同じ調合である(表-1)。

2.2 曲げ試験

図-2に示す方法により、メッシュの枚数と種類を変化させた計6体の供試体について曲げ試験を行った。その概要を表-2に示す。図-3では、B9供試体の载荷点間たわみ、上端と下端の表面歪み、および平面保持を仮定した断面分割法による解析から得られた3つのモーメント-曲率関係を比較している。下端歪みゲージは供試体破壊時まで作動しており、メッシュのひび割れ分散効果によるひび割れ開口幅の抑制によってゲージ破断が免れたと考えられる。観測された平均ひび割れ間隔から算出されたB9供試体終局時の平均ひび割れ開口幅は0.056mmであっ

表-1 モルタル

単位水量	: 286kg/m <sup>3</sup>
単位セメント量	: 1059kg/m <sup>3</sup>
単位細骨材量	: 1059kg/m <sup>3</sup>
W/C	: 27%
細骨材種類	: 豊浦標準砂
混和剤	: 高性能AE減水剤
圧縮強度	: 105MPa
最大荷重時歪	: 0.45%

\*1 (株)大林組、工修(正会員)

\*2 京都大学助手 工学部、工博(正会員)

\*3 京都大学教授 工学部、工博(正会員)

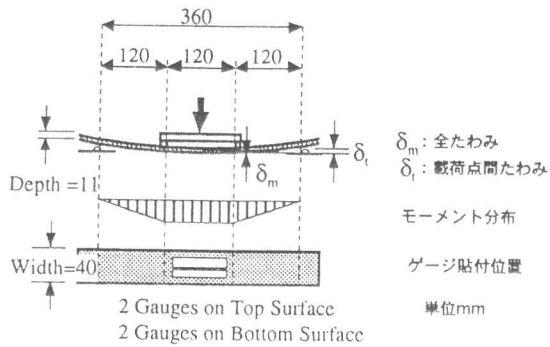


図-2 曲げ試験供試体

表-2 曲げ試験結果

供試体	メッシュ	$N_{CF}$	$M_u$	$\phi_u$	$L_f$	$\delta_t$	破壊モード
A1	A	1	38.6	1.91	644	25.8	CF破断
A6-1	A	6	73.7	2.16	1229	27.6	モルタル圧壊
A6-2	A	6	65.8	1.89	1097	27.2	モルタル圧壊
B9	B	9	54.5	1.36	916	21.6	モルタル圧壊
C8	C	8	78.0	1.01	1307	17.4	モルタル圧壊
P0	-	0	9.9	0.0064	165	1.05	ひび割れ発生

$N_{CF}$ : 炭素繊維メッシュ枚数       $L_f$ : 引張試験における最大荷重 (N)  
 $M_u$ : 最大曲げモーメント (Nm)       $\delta_t$ : 最大荷重時の全たわみ (mm)  
 $\phi_u$ : 最大曲げモーメント時の曲率 (/m)

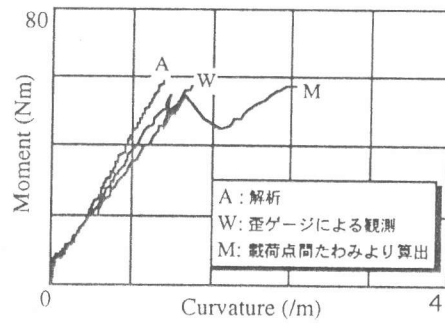


図-3 モーメントー曲率関係

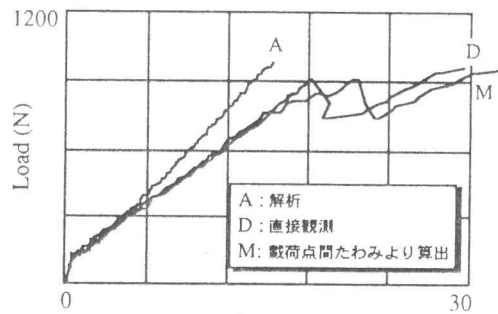


図-4 荷重ーたわみ関係

た。図-4では、B9 供試体の観測、解析、および観測されたモーメントー曲率関係より算出した荷重ーたわみ関係を比較している。観測されたモーメントー曲率関係より得た荷重ーたわみ関係が、直接観測された荷重ーたわみ関係によく一致していることから、定モーメント領域外における付着破壊などの原因により補強繊維の滑り出しが生じ、平面保持の仮定が成立しなくなるような現象はなかったと考えられる。B9 供試体以外の供試体曲げ試験結果についても同様の現象が観察された。解析結果は試験結果をおよそ表現しており、断面分割法により炭素繊維メッシュ補強モルタル板の曲げ性能の予測が可能であることが確認された。一方この曲げ試験は、メッシュ型炭素繊維の付着性能およびひび割れ分散効果の定量化の必要性を示唆している。

### 2.3 付着試験

図-5に示す方法により、メッシュの種類と縦横の束線数を変化させた計12種、36体の供試体（うち3体は載荷前に破損）、および縦方向束線の付着を完全に断った計4種、12体の供試体について付着試験を行った。その概要を表-3に示す。この結果から得られた荷重ー滑り関係に基づき、図-6に示したばねモデルによる解析によって、炭素繊維メッシュの付着性能のモデル化を試みた。図-6において斜めに配置されているばねは、2本1組で、1つの格子節点の伝達引張力、および格子間隔分の長さにおける縦方向束線とモルタルとの間の付着力の総和に相当する付着力ー滑り関係を表現する。このモデル化は、表-3のA2シリーズ（Aタイプメッシュ使用、縦方向、横方向ともに束線数1）とA2' シリー

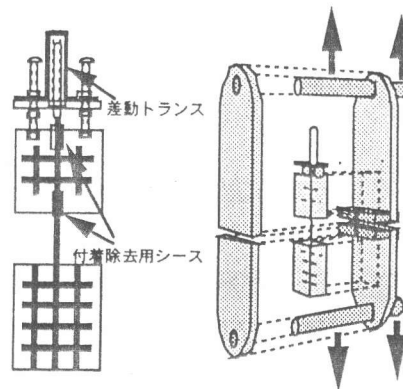


図-5 付着試験

ズ（付着なし）から得た荷重-滑り出し関係を基準として行うため、A2シリーズおよびA2'シリーズの荷重-滑り出し関係を図-7示すような複数の直線によって近似した。

ばねモデルによる解析に先立ち、縦横の束線間隔および本数、束線内の素線数を変数とした修正式(1)式を組み、A2シリーズおよびA2'シリーズ以外の条件への対応をはかった。

$$f_b = \alpha_1 \alpha_2 f_{bA} \{1 + \alpha_3 (N_l - 1)\}$$

ただし

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{N_{sl}}{12000} \times \frac{N_{st}}{12000}}$$

$$\alpha_2 : \begin{cases} N_{sl} = N_{st} \text{ の時 } 1 \\ N_{sl} \neq N_{st} \text{ の時 } 1.7 \end{cases}$$

$$\alpha_3 = 0.5 + 0.2 \times \frac{N_{sl}}{12000} \sqrt{\frac{10 \times 10}{Z_l \times Z_t}}$$

$f_b$  : 1格子間隔あたり付着強度

$f_{bA}$  : Aタイプメッシュの  $f_b$

(1)

(1)式中の記号は表-3の下段を参照されたい。

係数  $\alpha_1$  は縦線と横線の交点における接着面積に比例して増大する。係数  $\alpha_2$  は縦横の束線内素線数が同じである場合よりも異なる場合の方が、交点における接着面積あたりの強度が増大することを考慮したものである。また実験において、縦方向束線数の増大に伴う、縦方向束線数当たりの耐力の低下が観察されたが、これが縦方向束線数を増大させることにより、ある一定の値に漸近するという仮定に基づき、

この漸近値の大きさを表す指標として(1)式中に係数  $\alpha_3$  を与えた。

以上の条件の下で行った解析と、実験結果との比較

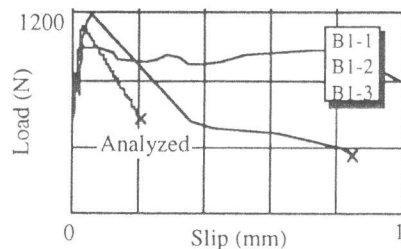


図-8 付着解析例(B1シリーズ)

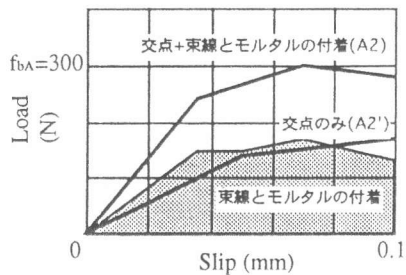


図-7 荷重-滑り出し関係モデル

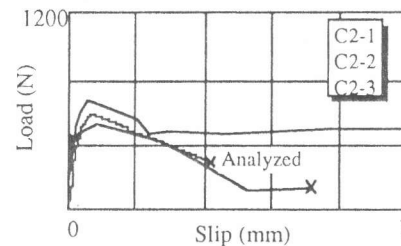


図-9 付着解析例(C2シリーズ)

の一例を、図-8、図-9に示す。束線間隔、束線本数、素線数が異なる場合でも解析結果は実験結果をよく表現し、この研究において用いたモデルの有効性が示されている。

表-3 付着試験概要

Series	$N_{sl}$	$N_{st}$	$Z_l$	$Z_t$	$N_l$	$N_t$	$L_b$	$S_b$	付着
A1	12000	12000	10	10	1	3	644	0.070	有
A2	12000	12000	10	10	1	1	271	0.074	
A3	12000	12000	10	10	2	1	502	0.051	
B1	6000	6000	5	5	2	5	1101	0.045	有
B2	6000	6000	5	5	2	1	289	0.043	
B3	6000	6000	5	5	4	1	368	0.006	
C1	12000	12000	5	5	2	3	1743	0.090	有
C2	12000	12000	5	5	2	1	554	0.049	
E1	6000	12000	5	10	1	5	986	0.073	有
E2	6000	12000	5	10	1	1	362	0.026	
F1	12000	6000	10	5	2	3	1945	0.132	有
F2	12000	6000	10	5	2	1	641	0.122	
A1'	12000	12000	10	10	1	1	138	0.192	無
A2'	12000	12000	10	10	2	1	281	0.343	
A3'	12000	12000	10	10	3	1	393	0.579	
A4'	12000	12000	10	10	4	1	300	0.465	

$N_{sl}$  : 縦方向束線素線数       $N_l$  : 縦方向1束線当たり交点  
 $N_{st}$  : 横方向束線素線数       $N_t$  : 横方向1束線当たり交点  
 $Z_l$  : 縦方向束線間隔 (mm)       $L_b$  : 最大荷重 (シリーズ平均) (N)  
 $Z_t$  : 横方向束線間隔 (mm)       $S_b$  : 最大荷重時滑出量 (シリーズ平均) (mm)

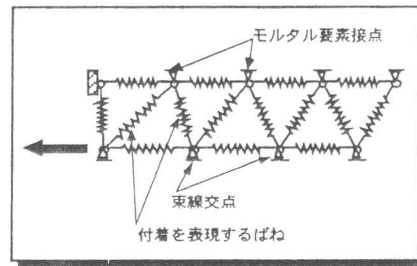


図-6 付着ばねモデル

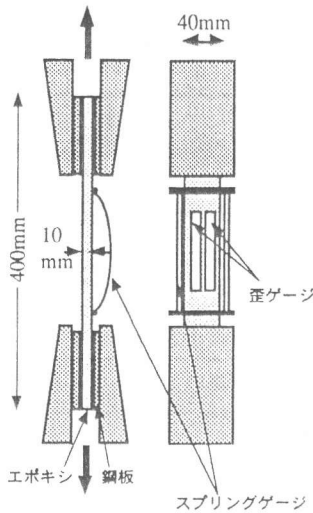


図-10 引張試験

表-4 引張試験概要

供試体	$N_{CF}$	$Z_t$	$L_t$	$\epsilon_t$	$\frac{L_t}{L_{t0}}$	$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{t0}}$	$S_m$	(2)式による $S_m$
AL5	5	10	25.06	1.028	0.781	0.685	12.3	14.0
BL11	11	5	43.54	1.023	0.616	0.682	7.0	4.5
CL8	8	5	54.09	1.059	0.527	0.706	10.4	5.3
EL10	10	10	37.44	-	0.583	-	-	-
FL8	8	5	28.14	0.996	0.548	0.664	8.4	5.3
AL3		10	14.11	1.128	0.733	0.752	13.3	20.0
BL3		5	13.76	1.133	0.715	0.755	12.6	10.0
CL3	3	5	24.58	1.437	0.638	0.958	14.1	10.0
EL3		10	12.17	0.876	0.632	0.584	16.6	20.0
FL3		5	15.57	1.078	0.808	0.719	10.2	10.0
AL1		10	5.78	0.847	0.900	0.564	60.0	60.0
BL1		5	4.13	0.895	0.644	0.597	24.0	25.0
CL1	1	5	8.18	1.183	0.637	0.789	34.3	25.0
EL1		10	4.76	1.184	0.742	0.789	26.7	50.0
FL1		5	5.79	1.375	0.901	0.917	22.9	25.0
Plain	0	-	1.65	0.019	-	-	-	-

$N_{CF}$ : 炭素繊維メッシュ枚数  
 $Z_t$ : 横方向束線間隔 (mm)  
 $L_t$ : 引張供試体最大荷重 (kN)  
 $\epsilon_t$ : 最大荷重時歪 (%)  
 $L_{t0}$ : 供試体内炭素繊維束線の公称最大強度合計 (kN)  
 $\epsilon_{t0}$ : 炭素繊維束線の公称終局歪 (%)  
 $S_m$ : 縦方向束線に直交するひび割れの平均間隔 (mm)

## 2.4 平行および斜交引張試験

図-10に示す方法により、メッシュの種類と枚数を変化させた計16体の供試体について軸方向引張試験を行った。その概要を表-4に示す。供試体の平均ひび割れ間隔  $s_m$  は、メッシュの横方向束線間隔  $Z_t$  が狭く、メッシュ枚数  $N_{CF}$  が多いほど密になる傾向がみられ、この傾向を(2)式によって表現した。

$$s_m = 5Z_t \left( \frac{0.9}{N_{CF}} + 0.1 \right) \quad (2)$$

(2)式による  $s_m$  (表-4 参照) を100%とした場合の、実験値からの偏差の比の絶対値の平均は33%である。

またメッシュ枚数の増大に伴う、メッシュ1枚当たりの耐力の低下が観察され(図-11)、これを(3)式によって表現した(記号は表-4下段を参照)。

$$L_t = 0.8 L_{t0} \left( \frac{1}{5N_{CF}} + 0.8 \right) \quad (3)$$

(3)式による  $L_t/L_{t0}$  の、実験値からの偏差の絶対値の平均は0.088である。

炭素繊維メッシュ補強モルタル板において、補強筋と斜めの角度でひび割れが発生した場合、繊維束線径に対するひび割れ開口幅の比が、一般の鉄筋コンクリートにおけるより相対的に大きくなる。このためひび割

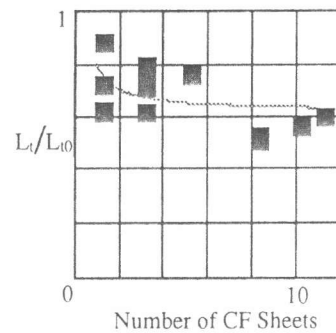


図-11 メッシュ枚数と耐力

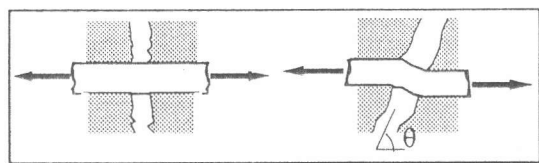


図-12 斜交ひび割れの影響

表-5 45° 方向引張試験概要

メッシュ枚数	束線数	最大強度 (3供試体)	平均強度(A)	公称強度(B)	(A/B)
A	2	270N 299N 305N	291N	724N	0.40
B	2	294N 323N 276N	298N	580N	0.51

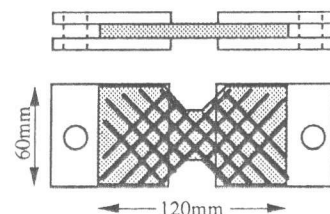


図-13 45° 方向引張試験供試体

れ部での繊維束線の局所的な曲げ変形による耐力の低下が予想される(図-12) [1]。この影響を確認するため図-13に示すような45°方向配筋の供試体の引張試験を行った。その概要を表-5に示す。45°方向配筋の供試体の耐力は繊維の公称終局歪みから算出した耐力の40%から51%に低下している。モルタル板内に埋め込まれたメッシュの軸方向実際耐力は、公称耐力の61%から58%と予想されるので、斜めひび割れによる局所曲げ効果のみの耐力低下率は、34%から14%と推定される。

### 2.5 せん断試験

以上、曲げ試験、付着試験および平行・斜交引張試験の結果を踏まえ、2軸応力下での炭素繊維メッシュ補強モルタル板の性能の検討を行うために、図-14に示す方法により、Aタイプメッシュを用いて、メッシュ枚数を1、2、3枚に変化させ、計6体の供試体についてせん断試験を行った。その概要を表-6に示す。6体の供試体は、すべて繊維の破断によって破壊した。補強筋方向の終局時

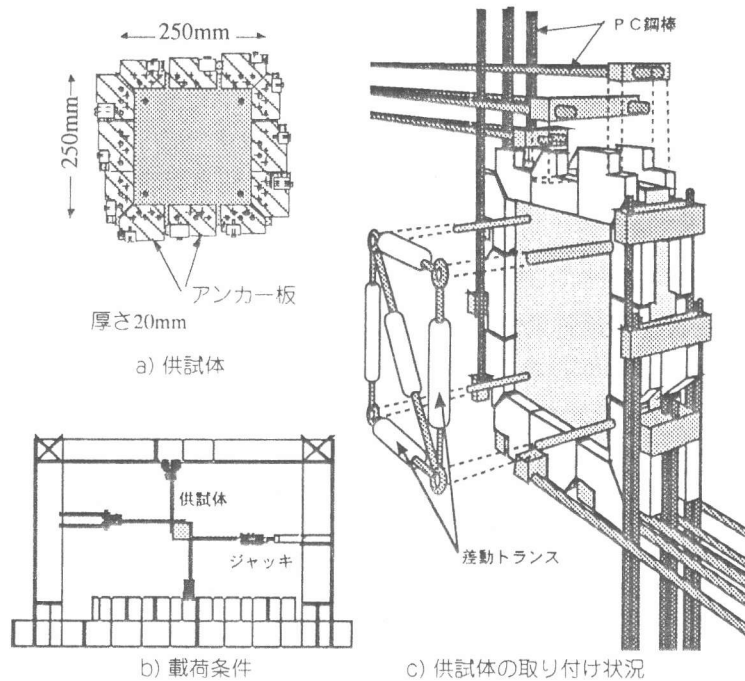


図-14 せん断試験

平均歪は、繊維の公称終局歪を大幅に下回っており、この原因として斜交ひび割れによる局所曲げ、束線数の増加(メッシュ1枚当たり24本)、およびTension Stiffening効果の3つの要素が考えられる。

束線引張応力の一部は付着によってモルタルに伝達され、束線の応力分布は一様ではなくなり、ひび割れ位置で増加し、ひび割れ間の中間部で減少する(Tension Stiffening効果)。ひび割れ間の束線応力分布を求める上で、六車、森田により提案された方法が有効である [2]。ここでは付着力-滑り関係を完全弾塑性モデルにより近似した(図15)。図16は、供試体破壊時歪から得られた平均束線引張力を与えることにより計算されたひび割れ間の束線引張力分布の一例を示す(メッシュ1枚の供試体)。表-7に示すように、ひび割れ部における引張力と平均引張力との差は、明らかにメッシュ1枚の供試体の場合で顕著である。

以上、束線数、メッシュ枚数、局所曲げ、およびTension Stiffening効果を考慮し、メッシ

表-6 せん断試験概要

供試体	$\rho$	$V_{cr}$	$V_u$	$\epsilon_1$	$\epsilon_x/\epsilon_u$	$\epsilon_y/\epsilon_u$	$\epsilon_2/\epsilon_c$	$S_m$
SH101	0.48	1.8	3.2	0.0058	0.15	0.17	0.42	42
SH102	0.48	2.0	3.6	0.0051	0.21	0.05	0.26	59
SH201	0.96	2.6	6.0	0.0160	0.27	0.17	0.58	23
SH202	0.96	2.6	6.4	0.0188	0.32	0.34	0.24	21
SH301	1.14	2.4	9.5	0.0116	0.49	0.30	0.99	18
SH302	1.14	1.8	7.8	0.0183	0.25	0.20	0.45	18

$\rho$ : 補強筋比 (%)	$\epsilon_u$ : 炭素繊維公称破断歪
$V_{cr}$ : ひび割れ発生せん断応力 (MPa)	$\epsilon_x$ : 最大せん断応力時水平方向歪
$V_u$ : 最大せん断応力 (MPa)	$\epsilon_y$ : 最大せん断応力時垂直方向歪
$\epsilon_1$ : 主引張歪	$S_m$ : 補強筋に直交するひび割れの平均間隔 (mm)
$\epsilon_2$ : 主圧縮歪	
$\epsilon_c$ : モルタル最大応力時歪	

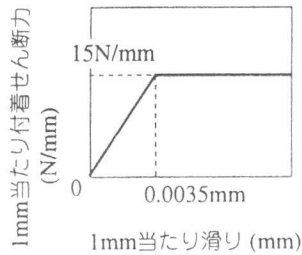


図-15 付着力-滑り関係の完全弾塑性モデル

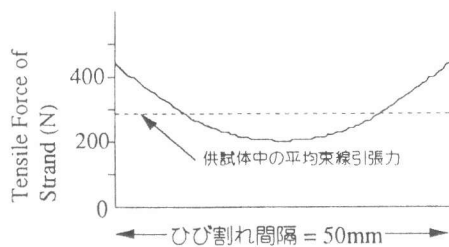


図-16 束線応力分布 (メッシュ1枚)

表-7 終局時束線引張力(N)

メッシュ枚数	平均	ひび割れ部
1CF	283	437
2CF	440	472
3CF	496	512

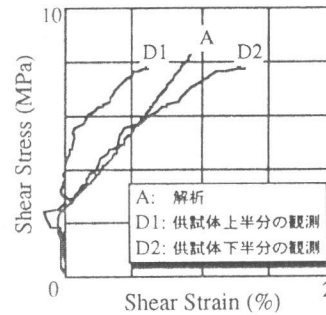


図-17 実験と解析の比較 (SH302)

メッシュ1枚、2枚、3枚の供試体の終局引張歪を、それぞれ0.56%、0.50%、0.48%とした。

図-1に示した炭素繊維の弾性係数を用い、Collinsによる解析手法 [3] によって得たせん断応力-せん断歪関係を実験結果と比較した一例が図-17である。せん断歪の観測結果は計測位置によってばらつきがあるものの、解析結果はおおむね観測結果を表現している。

### 3. まとめ

以上の考察より次の3点が明らかとなった。

(1) モルタル板に埋め込まれた炭素繊維メッシュのひび割れ分散効果は、埋め込まれるメッシュ枚数の増大により、また加えられる力の方向と直交する方向の束線本数を増大させることにより顕著となる。

(2) モルタル板内の炭素繊維メッシュの引張耐力は、メッシュ枚数、束線数、補強方向により影響を受けるが、これらの影響は実験式により定量化できる。局所曲げ効果による耐力低下の評価は特に重要である。斜め方向引張試験におけるモルタル板内での耐力は軸方向引張試験の際の66%程度であった。

(3) 炭素繊維メッシュ補強モルタル板の基本的な力学的性質は、断面分割法による曲げ解析、ばねモデルによる付着解析、Collinsの研究に基づくせん断解析手法によって予測できる。

本研究において使用した炭素繊維メッシュは、東レ(株)から提供を受けた。また本研究は(財)旭硝子財団研究助成金によって行った。清水建設(株)杉田稔氏には有効な助言を受けた。

### 参考文献

- [1] Bentur, A. and Mindess, S.: FIBRE REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES, ELSEVIER APPLIED SCIENCE, pp82-87.
- [2] 六車・森田: "鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究," Jour. of AIJ, No.131, January 1967.
- [3] Vecchiano, F. J. and Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI JOURNAL / March-April 1986.