自動車用 SMC パネルの引張強度特性に及ぼす SMC シートのチャージ位置と組成の影響[†]

五 辻 精 一* 福 田 武 人**

Influences of Charging Position and Composition of SMC Sheet on Tensile Strength Properties of an SMC Panel for Automotive Structural Component

by

Seiichi ITSUTSUJI* and Takehito FUKUDA**

Tensile strength tests of SMC panels used for an automotive structural component were conducted by changing the charging positions of SMC sheet and its compositions such as low profile additives and fillers. Three kinds of SMC sheets with different types of low profile additives and different amounts of fillers were prepared. Three of charging positions of such SMC sheet were the central part (M), the flat part (F) and the side of ribs and bosses (R) of a metal mold. Test specimens were cut out from these nine kinds of SMC panels. The cutting directions of tensile specimens were perpendicular (90 deg. directional specimens) and parallel (0 deg. directional specimens) to the rolling up direction of SMC sheet. Statistical analysis of data obtained from tensile tests was carried out based on the concept of two-parameter Weibull distribution. Analysis results are summarized as follows;

(1) For SMC panels molded at charging positions F and R, strength of 0 deg. directional specimen is from 2 to 3 times as high as that of 90 deg. directional specimen. On the other hand, for SMC panels molded at M, there is little difference between them.

(2) In case of low profile additive of poly-vinyl acetate system, the flow pattern of fibers is inclined not to be uniform and the fracture strain is less than that in the case of styrene butadiene system.

(3) The tensile strengths of SMC panels tend to become lower as the amount of filler of CaCO_3 increased.

Key words : Tensile strength, SMC panel for automobile, Charging position, Low profile additive, Filler, Weibull distribution

1 緒 言

繊維強化複合材料が多方面に用いられるようになって昨今、能率よく良質な製品を安価に成形することが必要となった。SMC (Sheet Molding Compound) は、これらの要求を満たす量産可能な成形材料の一つである。

SMC はランダムに配向された不連続繊維と樹脂、充てん剤などをあらかじめ複合してシート状にした材料で、これを金型内で加熱加圧して成形する。この場合、成形時に分散層の繊維が樹脂とともに流動するため、成形された製品中で強化材が一様に分布されず、強化材が場所によってばらつく傾向が生ずる。また、流動によって強化材の配向も流動方向に並びがちで、強度に方向性が生ずる場合があることが知られて

いる。^{1),2)}

そこで、SMC で成形された製品の強度特性について種々の面から検討しデータを蓄積することが、信頼度の高い製品を得る上で重要である。しかしながら、SMC の強度特性と SMC シートのチャージ位置、低収縮剤などの組成との関係についてはいまだ明らかにされていない。

本研究においては、このような観点から自動車用に開発された SMC シートを用いて、実際の製品用の金型を使用し、一方にリブやボスをもつ箱型の試験用のパネルを製作して、引張特性を検討する。この場合樹脂と充てん剤など組成の異なる 3 種類の SMC シートを使って、そのおのおののシートを金型の、中央部、平面側およびリブ・ボス側からチャージして 9

† 原稿受理 平成 3 年 2 月 13 日 Received Feb. 13, 1991

* 正 会 員 神戸市立工業高等専門学校機械工学科 〒673 神戸市西区学園東町, Dept. of Mech. Eng., Kobe Mun. Tech. College, Nishi-ku, Kobe, 673

** 正 会 員 大阪市立大学工学部機械工学科 〒558 大阪市住吉区杉本, Dept. of Mech. Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558

種類の SMC パネルを作り, これらのパネルを用いてチャージ位置や組成の差異および同一材料についても試験片の採取位置および採取方向による引張強度の違いについて試験を行った. また, 製品の信頼性を向上させる上で強度のばらつきについての資料を得ることも重要であるので, 信頼性工学の立場からワイブル分布に基づき引張強度のばらつきに関して検討を加えた.

2 試験片および実験方法

2・1 供試材料

本研究に使用した SMC パネルは Table I に示す 3 種類でガラス繊維はいずれも長さ 25.4 mm のロービングである. また, SMC パネルの形状および寸法を Fig. 1 に示す. この SMC パネルは, 寸法 300 mm × 500 mm のシートをその巻き取り方向を 0° 方向に合せ, 5 枚重ねて金型内に入れ, 圧力 100 kgf/mm², 金型温度 140~150°C, 保持時間 180 秒でプレスして製作された. チャージしたシートの面積と金型の面積の比をチャージ率と言い, この場合約 30% である. また, チャージした位置は 3 箇所, Fig. 1(c) に示すように中央部 (M), 平面側 (F), およびリブ・ボス側 (R) である. すなわち, 試験用パネルは, チャージ位置と組成の違いによる合計 9 種類である.

2・2 試験片

2・1 節に述べた 9 種類の SMC パネルから, それぞれについて, Fig. 1 に同時に示した. 0° 方向と 90° 方向の二方向から短冊型に試料を採取し, 記号および番号を付した後, Fig. 2 のような形状および寸法の試験片に仕上げた.

ただし, SMC2 については SMC パネル数が足りなかったため, チャージ位置 M の 0° 方向の試験片の採取ができなかった.

2・3 試験方法

試験にはインストロン 1125 万能試験機を用い, 常温でクロスヘッド速度 5 mm/min で静的引張試験を行った. 試験片のチャック間距離は 115 mm とし, 伸

(a) 0° directional specimen.

(b) 90° directional specimen.

(c) Charged position.

Fig. 1. Geometry of SMC panel and specimen location.

Fig. 2. Geometry of the test specimen.

び計のゲージ間長さは 50 mm とした.

3 実験結果と考察

3・1 引張強度におよぼすチャージ位置の影響

0° 方向試験片の場合の A 列, B 列, C 列の強度の

Table I. Composition of SMC sheet.

		Kind of SMC		
		SMC1	SMC2	SMC3
Matrix	Resin	U. P.	U. P.	U. P.
	Low profile additive	PVAc	SBS	SBS
Filler (W%/100 resin)		CaCO ₃ 140	CaCO ₃ 150	CaCO ₃ 180
Reinforcement (W%)		Glass fiber 30	Glass fiber 30	Glass fiber 28

U. P.: Unsaturated polyester.

PVAc: Poly-vinyl acetate.

SBS: Styrene butadiene.

平均値をチャージ位置 M, F, R 別に示したのが Fig. 3 である。つぎに, 90° 方向試験片の場合, 採取位置 1~5, 6~10, 11~15, 16~20, 21~25 に対するおのおの強度の平均値を示したのが Fig. 4 である。また, Fig. 1(a) の 0° 方向試験片の A 列の強度の平均値とほぼこれに対応した位置にある Fig. 1(b) の 90° 方向試験片の採取位置 1~4, 5~8 の強度の平均値との比, 同じように B 列と採取位置 9~12, 13~16 との強度比および C 列と採取位置 17~20, 21~24 との強度比をチャージ位置ごとに示したのが Fig. 5 である。Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 で (a) が SMC1 について (b) が SMC2 と SMC3 についての試験結果を示している。

これらの結果より一般的に 0° 方向試験片の強度の方が, 90° 方向試験片のそれより高いといえる。また, チャージ位置 M の場合, この両者の差が最も少なく, チャージ位置 F と R の場合, 試験片採取位置によって強度の差がかなり大きいことが分かる。

SMC1 について, Fig. 3(a) で, チャージ位置 F と R のいずれの場合も, チャージ側で強度が高いこと

を示している。すなわち, F は A 列 (平面側) で引張強度が 127.5 MPa, R は C 列 (リブ・ボス側) で 97.6 MPa である。なお, 本実験では, リブ・ボスの部分を取り除いて実験を行っているので, この部分の強度が分からないが, F は 86.1 MPa より更に低い値を, R は高い値をとると思われる。R の A 列での引張強度は, 60.6 MPa である。これは, ガラスの比重が樹脂の比重に比べて大である (約 2 倍) ため, 繊維が流れにくく, 多くの繊維がチャージ側に残存し, 反対側にいくに従って繊維が減少し, それに伴って強度が減少するものと考えられる。

さらに, Fig. 4(a) で 90° 方向試験片の場合, チャージ位置 F と R の場合は, 引張強度が試験片採取位置にかかわらずほとんど同一である。F の場合全試験片の引張強度の平均値が 38.4 MPa, R の場合のそれが 36.8 MPa であまり変わらず低い値である。これは, F と R の場合はパネルの端の方からチャージするため, 樹脂と繊維がチャージ位置から逆の方に流れる間にガラス繊維が一定の方向 (0° 方向) に並び, 90° 方

Fig. 3. Relationship between the tensile strength and the specimen location of 0° directional specimen.

Fig. 4. Relationship between the tensile strength and the specimen location of 90° directional specimen.

(a) SMC1.

(b) SMC2 and SMC3.

Fig. 5. Relationship between the strength ratio of 0° directional specimen to 90° directional specimen and the specimen location.

向から負荷した場合、ガラス繊維の補強効果がほとんど得られず、樹脂の強度に近い一定の値を取るものと思われる。

また、Fig. 5(a)において、Mの場合、0°方向試験片と90°方向試験片の強度比が1.2~1.8倍で、Fの場合、2.39~3.31倍、Rの場合、1.48~2.70倍である。このように、Mの強度比がFとRのそれに比べて小さい値となっており、Fig. 3(a)、Fig. 4(a)で分かるように試験片採取位置による強度の差もほとんど見られない。これは、流動距離がFとRに比して短く、また、中央部から四方へ繊維が樹脂と共に均一に流れ、SMCシートがロールで巻き取られる時にすでに繊維に方向性があることを考慮すると、繊維の流動方向も同一方向に並ぶことが少なく、90°方向に引張った場合でも、繊維による補強効果が現れるものと考えられる。

以上は、SMC1の強度特性について検討したものであるが、これらの傾向はFig. 3(b)、Fig. 4(b)およびFig. 5(b)に示すように、SMC2とSMC3においてもほぼ同様な傾向がみられる。

3・2 引張強度のばらつき

一般に繊維強化複合材料の強度のばらつきはワイブル分布に従うと言われている³⁾。そこで、本研究で行った試験結果について、2母数ワイブル分布を適用し、線形推定法によりワイブル・パラメータを決定した。各試験片に対して線形推定法より得られたワイブル分布の形状母数(α)、尺度母数(β)と引張強度の平均値、標準偏差および変動係数をTable IIに示す。SMC1における0°方向試験片と、90°方向試験片の各チャージ位置ごとに、引張強度と破壊確率の関係をワイブル確率紙上にプロットしたものがFig. 6である。図中の各直線は、Table IIに示した形状母数と尺度母数を用いて計算した。ワイブル分布関数を示している。図中では、直線とデータ点がよく合致していることが分かる。この場合、Fig. 6(a)のチャージ位置Mの場合は、0°方向試験片の図中の傾きが90°方向試験片の傾きより大であり、強度のばらつきが少ない。それに対して、Fig. 6(b), (c)のチャージ位置がFとRの場合は、逆に0°方向試験片の強度のばらつきが大きいことが分かる。

Fig. 7はSMC1, SMC2およびSMC3の0°方向試験片のおおのについて、チャージ位置M, F, Rごとに採取位置A, B, Cに対する変動係数を計算した

Table II. The Weibull parameters and the properties of SMC.

			Shape parameter	Scale parameter (MPa)	Tensile strength (MPa)	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
SMC1	M	0°	7.44	86.0	80.9	12.3	15.2
		90°	4.65	66.0	60.4	14.3	23.6
	F	0°	4.17	110.4	103.0	26.5	25.7
		90°	6.00	40.6	37.6	7.2	19.1
	R	0°	3.30	89.8	80.5	25.3	31.4
		90°	5.20	39.2	36.1	8.1	22.3
SMC2	M	0°	—	—	—	—	—
		90°	7.61	65.6	61.6	9.2	14.9
	F	0°	5.75	108.0	100.1	18.8	18.8
		90°	6.00	34.4	31.9	6.0	18.9
	R	0°	5.75	96.0	89.0	17.0	19.0
		90°	5.36	35.8	33.0	7.1	21.6
SMC3	M	0°	8.68	68.7	65.0	8.9	13.7
		90°	7.73	67.9	63.9	9.4	14.7
	F	0°	5.33	100.3	93.2	17.3	18.6
		90°	7.15	35.2	32.9	5.3	16.2
	R	0°	4.79	87.0	79.8	18.4	23.0
		90°	6.87	35.5	33.2	5.5	16.5

Fig. 6. Relationship between the failure probability and the tensile strength of 0° directional specimen in each charging position of SMC1.

結果を示したものである。これによると、チャージ位置 M の変動係数は、SMC1 が 10.7%~15.2%，SMC3 が 11.1%~13.1% でばらつきが少なく、試験片採取位置によってもその値があまり変らない。しかし、チャージ位置 F と R では、SMC2 の R 以外はチャージ側で変動係数が小さく、反対側で大きくなる傾向がある。特に、SMC1 では、F のチャージ側 A で変動係数が 13.9%，R のチャージ側 C で 18.0% であり、F の反対側 C で 26.1%，R の反対側 A で 36.6% であり、チャージ側と、その反対側の強度のばらつきの差が極めて顕著である。それに対して、SMC2 と SMC3 の場合は、いずれの採取位置においても、変動係数が 10.6%~20.1% で、強度のばらつきにあまり大きな差がなかった。

SMC2 のチャージ位置 M の実験はできなかったが、Table II, Fig. 6 および Fig. 7 より、SMC1, SMC2

Fig. 7. Relationship between the coefficient of variation of tensile strength and the specimen location of 0° directional specimen.

および SMC3 の強度のばらつきの傾向は比較的良好に似ている。チャージ位置 M の場合、前述のように SMC1 では 0° 方向試験片の強度がやや高くばらつきが小さいが、SMC3 では、Fig. 5 (b) から分かるように、強度はほぼ同一か、0° 方向試験片がやや低めであり、強度のばらつきは SMC1 より更に小さい。つぎに、チャージ位置 F と R については、SMC1 ではチャージ側ではばらつきが小さく反対側で大きい。SMC2 と SMC3 では、強度の変動係数が 10~20% 前後で、SMC2 のチャージ位置 R で逆の傾向があることを考慮すると、試験片採取位置にはあまり関係なく強度にほぼ 20% 前後の変動があると考えてよいものと思われる。

以上のことから、一般的にチャージ位置 M の場合、樹脂や繊維の流れる距離も短く、ガラス繊維が末端まで比較的均一に流れるため、強度の方向性もばらつきも少ないと言える。しかし、SMC1 ではプレス中に繊維の流動が他のシートより悪く、チャージ位置 M の場合でも、SMC3 に比べて方向性を生じやすい。また、チャージ位置 F と R の場合は、さらにそれが著しく、SMC1 は変動係数がチャージ側で小さく、反対側にいくほど大きくなる。このことから、SMC1 ではチャージ側から反対側にいくに従って、繊維の分散が一様でなく、強度のばらつきが大きくなるものと考えられる。ところが、SMC2 と SMC3 では、チャージ位置 F と R の場合でも、試験片採取場所による強度の変動係数はほぼ一定であり、繊維の分散の状態

も SMC1 よりも、一様であると思われる。このように、SMC1 と SMC2 および SMC3 の間には、強度特性に異なった点が見られる。

3・3 引張強度と破壊ひずみに及ぼす組成の影響

本研究で用いた SMC1, SMC2 と SMC3 の 3 種類の SMC パネルの間には、3・1 節で検討したように、Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 から、強度にはあまり差がなかった。しかし、強度のばらつきの傾向は、3・2 節で検討したように Fig. 7 から、SMC1 と SMC2 および SMC3 の間には、異なった傾向があることが分かった。すなわち、チャージ位置 F と R の場合、SMC1 はチャージ側で、その変動係数が SMC2, SMC3 の変動係数とほぼ同じような値であったが、チャージ側と反対側では SMC1 の変動係数が大きい値を取ることが分かった。

ここで、3 種類の SMC パネルの組成をみると、充てん剤の炭酸カルシウムの量は SMC1 と SMC3 の間には差があるが、SMC1 と SMC2 の間にはあまり差がない。また、この 3 種類の SMC の繊維含有率も強度特性に影響を与えるほどの違いがない。この場合、低収縮剤が SMC1 は酢酸ビニール系で、SMC2 と SMC3 はゴム系である。以上の点を考慮すると、この特性値の違いは、低収縮剤の影響によると考えられる。

つぎに、3・1 節の Fig. 3, Fig. 4 と Fig. 5, および 3・2 節の Fig. 6(a) から検討した結果、採取位置 F と R の場合、3 種類の SMC の試験片は共に強度の方向性が大きいため、3 種類の SMC の強度の比較をするためにはチャージ位置 M の場合について検討することが適切であると考えた。そこで、Fig. 8 に SMC1, SMC2, SMC3 について、各チャージ位置ごとに 0° 方向試験片、90° 方向試験片について、それぞれの全試験片の強度の平均値を示した。ここで、チャージ位置 M の場合、Fig. 8 から SMC1 の 0° 方向試験片の強

Fig. 8. The mean value of tensile strength on each charging position of 0° and 90° directional specimens.

Fig. 9. The mean value of fracture strain on each charging position of 0° and 90° directional specimens.

度の平均値が 80.9 MPa, 90° 方向試験片のそれが 60.4 MPa で、3・2 節でも述べたが強度に方向性があることが分かる。一方、SMC3 は 0° 方向試験片で 65.3 MPa, 90° 方向試験片で 63.9 Pa でその差がほとんどない。また、90° 方向試験片で SMC1 と SMC3 の強度を比べると、その差が小さい。以上のことから、SMC1 が SMC3 に比べて強度が高いと言える。また、SMC2 はチャージ位置 M の 0° 方向試験片の実験ができなかったが、チャージ位置 M と R の場合、SMC1 と SMC2 の強度を比べると、SMC2 の強度がやや高いか、ほぼ等しい。この場合、前述のように、繊維含有率に差がないことから、この強度差は充てん剤の炭酸カルシウムの量が、SMC1 と SMC2 に比べて SMC3 が多いために生じたと考えられる。

つぎに、引張強度特性と組成の関係を明らかにするために破壊ひずみについても検討を加えた。Fig. 9 は 3 種類の SMC について、各チャージ位置ごとに 0° 方向試験片、90° 方向試験片について、それぞれの全試験片の破壊ひずみの平均値を示したものである。この図で 3 種類の SMC の破壊ひずみを比較すると、SMC1 の破壊ひずみが、最も少ないことがわかる。このように、SMC1 が SMC2 および SMC3 との特性値に差が生ずるのは、すでに検討した結果からも、低収縮剤の違いによるものと考えられる。すなわち、酢酸ビニール系の低収縮剤を用いるよりも、ゴム系の低収縮剤を用いる方が破壊ひずみが大きくなる。

4 結 言

自動車用に開発された SMC を用いて、実際の製品用金型を使用して製作されたパネルより採取した種々の試験片について引張試験を実施し、チャージ位置と組成の違いによる引張特性の差異に関して、ワイブル分布に基づく信頼性解析を行い、次のような結論が得られた。

- (1) 3 種類の SMC において、チャージ位置が F

と R の場合は、パネルの引張強度に方向性が、顕著に見られ、0° 方向試験片の引張強度が 90° 方向試験片の強度に比べて、2～3 倍になる。

(2) 3 種類の SMC において、チャージ位置が M の場合は、パネルの引張強度に方向性が少ない。

(3) 低収縮剤が酢酸ビニール系の場合、繊維の流動が不均一になりやすく、特に、チャージ位置が F や R のように金型の端の方からチャージした場合、チャージ側の反対側の変動係数が大きくなり、製品の信頼性上よくない結果となった。また、この場合、破壊ひずみが、ゴム系の低収縮剤を用いた場合よりも小さかった。

(4) 充てん剤の炭酸カルシウムの量を増加させると、引張強度が低下する傾向がみられた。

今後の課題として、繊維の流動挙動を詳しく観察し繊維含有率との関係を調べることににより、それらの強

度特性へ及ぼす影響について明らかにする必要がある。また、組成を種々変えた試験片を製作し、強度特性を試験することにより組成の強度特性に及ぼす影響がさらに明らかになるものと思われる。

おわりに、SMC パネルの提供や実験について種々ご尽力をいただいた、武田薬品工業(株)の早川雄三氏に感謝する。

(平成 2 年 12 月 8 日 第 10 回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 前川善一郎, 藤井太一, 材料, **31**, 1169 (1982).
- 2) 平井恒夫, 浜田泰以, 横山敦士, 材料, **31**, 1183 (1183).
- 3) 前川善一郎, 藤井太一, 材料, **27**, 754 (1978).

書 評

“超電導を知る事典”

北田正弘・樽谷良信 (著)

(1991 年, アグネ承風社発行, B 6 判, 283 ページ, 2400 円)

超電導という言葉は昨今の超電導フィーバによって日常語となっているが、もともと超電導の発現機構やこれらの挙動に関する理論は難解なものである。

本書は超電導現象の発現機構から応用までを辞書のように手短かにまとめている。

まず超電導の始まりで、カメリン・オンネスの極低温に関する研究が紹介されている。彼は気体の液化に伴って得られる絶対零度に近い環境での金属の電気抵抗の挙動を追いつけたのである。

基礎編では、超電導の発現機構に関連した電子の量子化、磁束の量子化、磁場中での挙動と関連した現象について述べられている。すなわち、永久電流、マイスナー効果、磁束の量子化、BCS 理論、電子の状態密度と転移温度、二次の相転移、第一種超電導体と中間状態、第二種超電導体と混合状態、臨界電流密度、強・弱結合超電導体、非平衡超電導状態、ジョセフソン接合超電導状態、などについて詳述されている。

材料編では、元素の超電導性、超電導元素 Nb, A15 型化合物超電導体、実用材料である金属系、金属間化合物系、セラミックス系超電導材料と超電導特性の結晶構造との相関性、超電導線材のつくり方、超電導薄膜のつくり方、超電導の異方性などが詳しく述べられている。

応用編では、主としてエレクトロニクス分野への応用がまとめられている。すなわち、ジョセフソン効果を主とするもの、超電導スイッチング回路、論理素子、記憶素子、超電導トランジスタ、超電導配線などである。

このほかに、エネルギー貯蔵、超電導船、磁気浮上列車、診断装置、超電導発電機など実用技術が述べられている。

本書では上述の基礎、材料、応用に関する主記述の間に、「超電導のいろいろ」と題して随所に、解説的な表題の説明があることと、超電導研究の発展の上で画期的と考えられる原著論文の冒頭部分の紹介が載せられていることが特長的で、これらが本書の理解を深める上で意義あるものと言える。この分野に強い関心をもつ学生諸氏、若い技術者に参考となる良書である。

(奈良工業高等専門学校 有間 淳一)