機械・構造物の信頼性設計

3. 材料強度の統計的性質—非金属材料*

藤 井 太 一** 前 川 善 一 郎**

1 はじめに

機械・構造物に用いられる非金属材料は多種多様であるが、大別して単相材料および多相材料に分けられる。単相材料としてはプラスチックが代表的なものであり、多相材料としては、単相材料の機械的特性を改善する目的で異種の非金属材料を複合させた複合材料が現在注目されている。

近年の工業材料の主流は金属材料であるが、これは金属材料が強度、耐熱性、延性、成型加工性それぞれに勝れたバランスのとれた材料であるからであると考えられるが、要求される各機械的特性値のレベルが高くなり、それぞれの特性値では金属材料よりも勝れた非金属材料が金属材料を補うかたちで多くの用途をもつに至っている。その結果、1980年度の日本における年間生産量はセメント 8 814 万トン、プラスチック 748 万トン、陶磁器類 204 万トン^{1,2)}、繊維強化プラスチック 22 万トンにも達している。

一般に、非金属材料は一部を除いてその歴史は浅く、金属材料に比べると工業材料としてのデータの蓄積はいまだ少ない。この事と後述するようなそれぞれの非金属材料固有の機械的挙動とが結びついて、非金属材料の信頼性の評価は金属材料に比べて低いのが現状である。

本講においては、最初に、代表的な単相型の非金属材料としてプラスチックの強度の信頼性、さらにセメントモルタルと鉄筋コンクリートのマトリックス相材料として用いられるセメントおよびセラミックについて述べる。つぎに、多相材料は繊維強化型複合材料と粒子分散型複合材料とに分けられるが、実用に供されている繊維強化プラスチック (FRP) と繊維強化セメント (GRC) などを中心として、複合材料の強度の統計的性質について記述するものとする。

2 単相材料の強度の統計的性質

ここでは、代表的な単相型の非金属材料として、プラスチック、セメント、セラミック材料を取り上げ、それらの強度の統計的特性について述べるものとする。

2・1 プラスチック材料

プラスチックとは非常に大きな分子量をもつ有機高分子化合物で可塑性を有し、成型工程でのいずれかの段階で流動性を現し、任意の成型³⁾ができ、成型品は固体であると定義されている。さらに、プラスチックは加熱によって軟化し、可塑性をもち、冷却すると再びもとの固体となり、この性質が反復できる熱可塑性プラスチックと、ひとたび固体化すると、再び熱しても軟化しない熱硬化性プラスチックに分けられる。熱可塑性プラスチックはさらに結晶相を全く含まない非晶性のものと、結晶を含むものとに分けられ、プラスチックの品種は非常に多様である。

プラスチックの成型は熱と圧力と時間の組合せのもとで行われるため、成型加工条件の選び方によって製品の特性が著しく左右されるが、熱硬化性プラスチックの機械的性質に特に影響が大きいのは硬化時間であって、硬化時間が長ければ樹脂の網状化が進んで堅固なものとなり硬さ、機械的強さは増加するが過剰になるともろくなる傾向にある。また、熱可塑性プラスチックにおいても結晶性のものでは金型内の冷却速度によって結晶化度が異なり、結晶化度が高くなるほど剛性を増して引張強さは増加するが、伸び、衝撃強度は低下する⁴⁾。以上のことから、プラスチックの組成および成型条件の管理を完全にしないと、本材料の強度の変動に大きな影響を与えることになる。

つぎに、プラスチックの成型過程において、成型材料を加熱して流動させるが、この際に材料の物性が流動方向とそれと直角な方向とでは一般に異った値を示す配向性を本材料は有している。これは樹脂の分子、結晶や充てん材が一定方向に並ぶことにより生ずるものである。この配向性は本材料の強度のばらつきに大きな影響を与えることになるが、ここでは、種々の汎用プラスチック板の強度のばらつきを系統的に研究している植村、近藤グループの実験結果を紹介するものとする^{5)~7)}。硬質塩化ビニル樹脂 (PVC)、メタクリル樹脂 (PMMA)、ABS 樹脂、低密度ポリエチレン樹脂 (LD-PE) の熱可塑性プラスチック板の押出し方向から試験片をそれぞれ、370~390 本採取し、引張試験

* 原稿受理 昭和56年11月30日

** 正 会 員 大阪市立大学工学部 大阪市住吉区杉本

表 I 硬質塩化ビニル樹脂 (PVC), メタクリル樹脂 (PMMA), ABS 樹脂, 低密度ポリエチレン樹脂 (LD-PE) の破壊強度と降伏強度

	PVC		PMMA		ABS		LD-PE	
	降伏強度	破壊強度	降伏強度	破壊強度	降伏強度	破壊強度	降伏強度	破壊強度
標 本 数	370	370	135	370	390	389	294	297
平 均 値 (kgf/mm ²)	6.17	5.71	7.31	7.19	3.40	2.74	1.18	1.81
変 動 係 数 (%)	0.82	8.34	0.74	2.52	0.86	1.86	1.92	5.98

(引張速度は PVC, ABS: 10 mm/min, PMMA: 5 mm/min, LD-PE: 100 mm/min) を行い, 材料の降伏強度, 破壊強度を求めている. ここで, 降伏強度とは応力-ひずみ曲線における応力が極大値または応力-ひずみ曲線が平坦部になるときの応力を指している. 引張試験結果を表 I に示す. 本表から, 4 種類の降伏強度の変動係数は非常に小さくばらつきが小さいことを示している. この中で PMMA の降伏強度の標本数が小さいのは, PMMA はぜい性破壊をするため, 降伏点が現れずに破壊に至る場合が多いことを示している. 図 1 に PVC の破壊強度および降伏強度のヒストグラムを示す. (a) 図のヒストグラムからも判明するように, この実験におけるプラスチックの降伏強度は正規分布に従うことが報告されている. つぎに, 破壊強度のばらつきは降伏強度に比べて一般に大きい, PVC の場合の両方の差が特に大きい. 図 1 (b) に示す PVC の破壊強度のヒストグラムから (a) 図の降伏強度の場合と異なり, 破壊強度のヒストグラムは左右対称でない分布を表しており, とくに PVC の場合はその傾向が大きい. これは PVC の応力-ひずみ関係の降伏

図 1 硬質塩化ビニル樹脂の引張試験における降伏強度(a)と破壊強度(b)のヒストグラム

図 2 シャルピ衝撃試験片採取位置図

点から破壊の間で 2 種類の破壊挙動を PVC が示すためにこのような破壊強度分布になったものと考えられる. 熱可塑性プラスチック材料において流動方向に限定すると強度のばらつきはそれほど大きくないが, 破壊挙動が必ずしも一定せず, ばらつきの程度に差異が見られる.

一方, 試験片の採取方向が異なると, プラスチックの配向性の性質から強度が違ってくる. 硬質塩化ビニル樹脂, ABS 樹脂, ポリプロピレン樹脂 (PP), メタクリル樹脂板の熱可塑性プラスチック板から, 押出し方向 (L) とそれに直角な方向 (T) から試験片を切り出し, シャルピ⁸⁾⁹⁾衝撃値の分布を調べた植村らの一連の研究から, ここでは ABS 樹脂板の実験結果を記述する. 図 2 に示すように, 1m×2m の定尺板を四つ

図 3 ABS 樹脂のシャルピ衝撃値と試験片採取位置との関係

図 4 ABS 樹脂のシャルピ衝撃値のヒストグラム

の区画 (I~IV) に分け, I 区画から L 方向, IV 区画から T 方向に V ノッチ付試験片 267 本を切り出し, エッジワイズ方向に打撃を加えて測定している. 図 3 に ABS 樹脂板のシャルピ衝撃値と試験片採取位置との関係を示し, 図 4 に ABS 樹脂板のシャルピ衝撃値のヒストグラムを示す. 本材料においては L 方向のシャルピ衝撃値の総平均値は $27.15 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$, T 方向では $17.61 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$ となり, その比 T/L は 0.65 となり, プラスチックの配向性の影響が明確に出ている. また, それぞれの方向別の衝撃値のばらつきは L 方向の変動係数が 2.68 %, T 方向 4.28 % でそれほど大きくはない.

図5 エポキシ樹脂の引張強度のヒストグラム

熱硬化性プラスチックにおいても, これまでに述べたものと同じ傾向の強度特性を示すが, ビスフェノール A 型エポキシと脂環式エポキシを 9 : 1 に混合したエポキシ樹脂の引張強度の分布では, 図 5 に示すような引張強度のヒストグラムが報告されている. この引張強度分布は二つの分布に分けられ, 小さい方の強度分布 (標本数 87 本) は平均値 $7.96 \text{ kgf}/\text{mm}^2$, 変動係数 19.3 % であり, 大きい方の強度分布 (標本数 109 本) は平均値 $10.09 \text{ kgf}/\text{mm}^2$, 変動係数 1.5 % であり, 両方の分布をまとめると平均値 $9.17 \text{ kgf}/\text{mm}^2$, 変動係数 14.2 % となり, 引張強度のばらつきは非常に大きい. 硬質 PVC と同じく本材料の引張応力-ひずみ線図および破面の観察から二つのタイプに区別され, これらが混合することによりそのばらつきが大きくなって現れることになる.

2・2 セメント, セラミック材料

セメント材料はコンクリート材のマトリックスとして現在広く用いられており, セラミック材料は金属材料に比べて高温度まで耐えるため, 耐火材料や断熱材料に用いられ, さらに高温での電気絶縁材料にも導電材料にもなり, 強誘電性, 圧電性, 半導性, 磁性, 光学性などにすぐれた特性を有しているため電子材料, 光学材料などの付価価値の高い材料として今日注目をあびている. セメント材料の原料は石灰石, 粘土, 酸化鉄材料と少量の石膏から成り, これらの原料を焼成しセメント化合物を作り, これに水をまぜることで水

和物を生成し硬化する. 一方, セラミック材料も, SiC, Si_3N_4 , Al_2O_3 , MgO などから焼結法などの高温化学処理によって作られるが, 両材料とも非常に安価な材料から製作され, 空げき率が大きいぜい性多孔体であり, 引張強度が圧縮強度よりも小さいなどの共通点を有する.

ぜい性材料は物体内のごく僅かな欠陥によって強度が決定される組織敏感性を有しており, 最弱リンク説に基づく強度理論が適用されると考えられている. クラックの強度が F より小さい確率分布関数として, ワイブル分布を仮定し, 次式を得る.

$$P(F) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{F}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (1)$$

ここで, α と β はワイブル分布の形状母数と尺度母数である. 形状母数はぜい性材料の強度理論では均一性係数とよばれることもある. n 個のクラックを含む試験片の強度の確率分布関数は次式となる.

$$P_n(F) = 1 - \exp \left\{ - n \left(\frac{F}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (2)$$

試験片の強度の平均値 μ_F は次式となる.

$$\mu_F = n^{-\frac{1}{\alpha}} \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (3)$$

ここで Γ はガンマ関数である. 試験片が巨視的に均質であると, クラック数と試験片の体積が比例すると仮定できるため, 試験片の強度 F と試験片体積 V との間の関係式として (3) 式から寸法効果に関する式が得られる.

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (4)$$

ここで F_0 , V_0 は基準となる試験片の強度と体積である. 以上の理論は一軸引張理論であるが, この理論を多軸応力場に拡張することによって得られる多軸応力場の破壊の確率論も提案されている.

表Ⅱ セメント角柱試験体の仕様

試験片番号	W/C (%)	A/C (%)	試験片の大きさ (cm)
K-0		0	2×2×8 (S-2)
K-1	30	0.1	4×4×16 (S-4)
K-4		0.4	10×10×40 (S-10)

W/C : 水-セメント重量比

A/C : 混和剤-セメント重量比

谷川らは, 表Ⅱに示すような 9 種類の角柱試験体のセメントペースト (サイズで 3 種類, 混和剤とセメントの重量比 A/C で 3 種類) の圧縮強度分布と曲げ強度分布を求めているが, これを図 6 (a), (b) に示す. ここで F は強度 (kgf/cm^2), P は破壊確率であり, 分布関数が (2) 式を満足する場合, 図 6 のような座標軸をとると直線で表されることになる. 図 7 に (4) 式に示す

図6 セメント材料の圧縮強度分布(a)と曲げ強度分布(b)

図7 セメント材料の寸法効果

F_0 , V_0 として S-2 試料の値をとり, F/F_{S-2} と V/V_{S-2} との関係を示すが, この図からほぼ直線で表されるため, (4)式に示す寸法効果の関係が大体成立するものと考えられる. また, セメントモルタルの一軸圧縮試験における均一性係数としてワイブル分布(1)式の α が11.7~20.7になるという報告もある¹⁶⁾.

つぎに, Giovan⁸⁾らは, アルミナセラミックの4点曲げ試験から, 曲げ強度を求めているが, 表Ⅲに示す実験結果を得ている. これより高温下においては強度のばらつきが増大することが判明する.

表Ⅲ アルミナセラミックの4点曲げ試験結果

標本数	試験温度(℃)	強度の平均値(MPa)	変動係数(%)	均一性係数
10	982	163	14.0	8.5
10	20	283	7.0	17.6

3 多相材料

非金属材料の機械的特性を改善するために, 異種の非金属材料を分散相材料とマトリックス材料として組合せ合成することにより, それぞれの材料単体ではもち合わなかった特性を付加し, Tailored material として近年注目されている多相材料が複合材料である. 複合材料は分散相の形態から, 繊維強化型複合材料と粒子分散型複合材料とに分けられるが, 実用化が進んでいる繊維強化型複合材料を中心に述べるものとする.

今日, 繊維強化型複合材料として実用に供されているものは, 分散相材料として, ガラス繊維, 炭素繊維, ボロン繊維, アラミッド繊維, 各種のウィスカなどが

あり, その形態も連続繊維, 不連続繊維, クロス布, チョップド・ストランドマットなどが代表的であり, マトリックスとしては各種のレジン・セメント, セラミックなど, 多種多様にわたっている. そして, 複合材料では, 各構成素材のもつばらつきに加え, 複合成型することによる特性の変動が材料特性に大きい影響を及ぼすことになる²⁰⁾.

最初に, 最も一般的なガラス繊維強化プラスチック(GRP)を取り上げるものとする. 本材料の成型法は種々のものがあるが, 最も広く実用されているものとしてハンドレイアップ(HL)法がある. 牧らはHL法によるGRPの機械的諸特性に及ぼす成形業者の技能の影響を調べ, 表Ⅳの結果を得ている. HL法は

表Ⅳ GRPの機械的的特性に及ぼす成形業者の技能の影響

成型者		A_1 熟練者			A_2 未経験者		
成型温度		15℃	23℃	30℃	15℃	23℃	30℃
引張強度	平均値	16.6	16.0	17.3	13.3	18.1	16.5
	標準偏差	1.24	0.90	1.15	1.82	1.89	1.69
	変動係数	0.072	0.056	0.066	0.137	0.104	0.080
曲げ強度	平均値	23.8	23.1	26.3	19.7	26.8	23.9
	標準偏差	2.30	1.86	2.19	1.75	2.01	2.95
	変動係数	0.097	0.081	0.083	0.089	0.075	0.123

手作業による積層と室温硬化を基本としているため, 製品の品質管理はむずかしいのであるが, 熟練者(A_1)と未経験者(A_2)の成型したガラス繊維マット強化不飽和ポリエステル積層板の引張りおよび曲げ特性で比較している. A_1 の方が A_2 よりも全般的に強度のばらつきが小さいが, その値は他の材料に比べると必ずしも小さいとはいえない. また, HL法によるガラスクロス強化積層板の引張強度²²⁾の変動係数は5.1~5.6%とのばらつきの報告があり, HL法のばらつきの限界と考えられる.

つぎに, GRPの用途拡大と共に, 量産体制が可能な成型法が開発されており, SMC (Sheet Molding

Compound) 法は今日主要な地位を占める成型法の一つとされている。²³⁾ SMC 法においては、強化材、樹脂、充てん材をコンパウンドした材料を金型内で加熱加圧成型するため、成型時に分散相の移動が起り、各構成要素の配分が必ずしも均一化せず、SMC 法による積層板の機械的特性のばらつきが大きくなる傾向にある。²⁴⁾ そこで SMC 積層板の強度特性に及ぼす成型条件の影響を調べた藤井、前川の研究について述べる。²⁵⁾ 原材料面積と成型板面積との比（チャージ率）を3種類に変化させた SMC シートから一辺 200 mm、板厚 3 mm の正方形板を作成し、Fig. 8 に示すような成型板の28

図8 SMC 正方形板の試験片採取位置図

箇所の採取位置から試験片を取る。試験片は大きく分けて3とおりあり、0°方向試験片(試験片番号1~12)、90°方向試験片(13~20)、45°方向試験片(21~28)がある。ここで0°方向とはSMC 原材料シートの長手方向を表す。常温で静的引張試験を行い、引張強度を求めた。試験片本数は各試験番号につき各10本である。図9(a)に30%、60%、90% チャージ率における SMC 積層板の引張試験結果を示す。横軸のサイド比とは試験片採取位置の中心と正方形板の中心との距離を正方形板の一辺の半分(45°方向試験片の場合対角線の半分)の長さで除した値であり、サイド比が0および1である位置はそれぞれ正方形板の中心および正方形板の端面を表している。さて、30%チャージ率の場合、引張強度はサイド比によって変化するが、60%、90%チャージ率の順にサイド比の影響が小さくなり、逆に0°方向、90°方向、45°方向の試験片グループの差が大きくなる傾向をもつ。表Vに3種類の SMC 積層板の引張強度の平均値と変動係数を示すが、強度のばらつきが非常に大きいことを示している。この原因を調べるために、繊維含有量分布と繊維配向角分布

図9 3種類の SMC 正方形板の引張強度(a)および繊維配向角の平均値(b)とサイド比との関係

表V SMC 成型法によるガラス繊維強化プラスチックの引張試験結果

	試験片群	標本数	30%チャージ率		60%チャージ率		90%チャージ率	
			平均値 (kg/mm ²)	変動係数 (%)	平均値 (kg/mm ²)	変動係数 (%)	平均値 (kg/mm ²)	変動係数 (%)
引張強度	0°	120	7.07	18.8	6.94	15.9	6.38	14.7
	90°	80	8.61	18.7	8.72	14.2	9.24	18.6
	45°	80	6.44	15.9	7.55	14.0	7.74	15.9
	all	280	7.33	21.7	7.63	17.7	7.59	23.1

図10 チャージ率と引張強度の平均値と変動係数との関係における理論結果と実験値との比較

表Ⅵ ガラス繊維強化セメントの静的引張強度のデータ

纖維含有率 (wt %)	3	5				7	9
試 驗 溫 度 (℃)	25	−30	25	100	200	25	25
標 本 數	10	15	40	15	15	10	10
平 均 值 (kgf/mm²)	0.63	1.34	1.03	0.89	0.48	1.10	1.36
標 準 偏 差 (kgf/mm²)	0.074	0.113	0.137	0.121	0.099	0.103	0.130
形 狀 母 數	7.73	11.34	7.23	7.34	4.77	8.63	9.41
尺 度 母 數 (kgf/mm²)	0.66	1.40	1.11	0.95	0.52	1.16	1.42

を測定しており、その内、ガラス繊維含有量は実験結果から正方形板内に一様に分布していると考えてよいと思われる。図9 (b)の繊維配向角分布において、縦軸に繊維配向角の平均値をとっているが、この場合の繊維配向角は試料採取位置における引張試験片の荷重方向を0°として荷重軸からの角度の絶対値をとっている。この繊維配向角分布から、成型時の分散相の流動が大きくなると、元のSMC原材料シートのもつランダムでない繊維配向角分布がランダムに近づく分散効果と金型の側壁の反撓により繊維が側壁に平行になる反撓効果、および正方形板の角部での干渉効果とが重畳して、SMC積層板の繊維の配向角分布が決定されるものと考えられ、積層板の強度のばらつきは、この繊維配向角の分布状態に大きく依存していることがわかる。そして、積層板の強度のばらつきと各構成素材とを関係づける理論の一つとして次のものがある。繊維強化型複合材料の強度の推定法の基本的なものの一つに強度の複合則があり、次式で表される。

$$S_c = \zeta S_f V_f + S_m V_m \quad (5)$$

ここで、 S_c 、 S_f は複合材料および分散相の破壊応力であり、 S_m は破断ひずみにおけるマトリックスの応力であるが、FRPの場合一般に樹脂の破壊応力が用いられる。 V_f 、 V_m は繊維、樹脂の体積含有率であり、 ζ は繊維の配向形態、長さおよび界面状態などによってきまる係数であり、次のように表される。

$$\zeta = \zeta_1 \cdot \zeta_2 \quad (6)$$

ここで ζ_1 は繊維の配向形態に依存する係数であり、次式で与えられる。

$$\zeta_1 = 2 \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \cdot f(\theta) d\theta \quad (7)$$

ここで θ は荷重方向と繊維方向とのなす角度であり、 $f(\theta)$ は繊維配向角 θ における確率密度関数である。 ζ_2 は繊維長さ、界面状態に依存する係数である。(5)式で確率変数として S_f 、 S_m 、 V_f 、 V_m 、 ζ が考えられるが、各変数の平均値、変動係数をそれぞれ μ 、 c で表し、各変数を添字で示すものとする。いま(5)式を各確率変数のもとでテーラー展開し、各変数を独立と仮定すると、SMC積層板の引張強度の平均値 μ_{sc} と変動係数 c_{sc} は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \mu_{sc} &= \mu_S \mu_{S_f} \mu_{V_f} + \mu_{S_m} \mu_{V_m} \quad (8) \\ c_{sc}^2 &= \frac{1}{\mu_{sc}^2} \left[(\mu_S \mu_{S_f} \mu_{V_f})^2 \{ \zeta^2 + c_{S_f}^2 + c_{V_f}^2 + c_{\zeta}^2 c_{S_f}^2 \} \right. \end{aligned}$$

図11 ガラス繊維強化セメントの静的引張強度分布

$$+c_{\zeta}^2 c_{V_f}^2 + c_{S_f}^2 c_{V_f}^2 + c_{\zeta}^2 c_{S_f}^2 c_{V_f}^2 \} \\ + (\mu_{S_m} \mu_{V_m})^2 (c_{S_m}^2 + c_{V_m}^2 + c_{S_m}^2 c_{V_m}^2) \} \quad (9)$$

各変数の平均値と変動係数は実験から求め、とくに ζ_1 は前述の配向角分布のデータを用い、 ζ_2 を 0.7 とおいて、 0° 方向、 90° 方向、全方向の試験片群の強度の平均値と変動係数を求めると、図10(a), (b) のようになり、実験値と理論結果とのかなりの一致を見ている。

つぎに、主要な非金属材料の一つであるコンクリート、セメントの特性として、圧縮強度は大きい、引張り、曲げ、破壊じん性、ひび割れ抵抗などは劣るという特性をもっており、従来引張り、曲げに対しては鉄筋で補強することが行われてきたが、ひび割れ抵抗性、耐衝撃性を改善するために、短い耐アルカリガラス繊維をランダムに配向したガラス繊維強化セメント(GRC)が開発されているが、²⁶⁾ダイレクトスプレー法で製作された GRC の静的引張試験の結果を表VIに示す。この実験はガラス繊維含有率を4種類、試験温度を4種類に変えて行っているが、高温になると、強度の低下が生じ、ばらつきが大きくなる。一般に、繊維強化型複合材料の強度分布関数として、正規分布と2母数ワイブル分布が当てはまるといわれているが、本実験データを正規分布、ワイブル分布に当てはめた静的強度分布曲線と実験値をまとめて図11に示す。そして Pearson の適合度検定より有意水準5%で GRC の静的強度分布が正規および2母数ワイブル分布に適合している。

4 おわりに

非金属材料の用途は年々増加の一途をたどり、本材料の工業材料に占める割合は今後ますます増大するものと考えられるが、非金属材料が機械、構造物の強度部材として用いられるためには、信頼性設計を行う上で必要な本材料のデータの蓄積がいまだに不足しているものと考えられる。

本講においては、非金属材料の静的強度の統計的特性についての記述を行ったが、紙面の都合上、疲労特性について述べるができなかった。また、本講で取り上げた非金属材料もほんの一部分であり、他のすぐれた材料を取り上げることができなかったのはまことに残念である。しかしながら、非金属材料の疲労特性に関する研究は少く、静的強度特性以上にこの方面のデータの蓄積がないのが現状である。非金属材料の静的および疲労強度の統計的性質に関する研究は現在

端緒についたばかりと考えられ、今後の進展が望まれる。

参考文献

- 奥田 博, 日本機械学会誌, **84**, 764 (1981).
- 強化プラスチック編集委員会, 強化プラスチック, **27**, 162 (1981).
- 黒田敏彦, 日本機械学会誌, **80**, 291 (1977).
- 小太刀功成, 日本機械学会誌, **80**, 326 (1977).
- 近藤春樹, 小牧和夫, 第20回材料研究連合講演会前刷, 63 (1976).
- 近藤春樹, 日本材料学会 第26期学術講演会 前刷, 41 (1977).
- 植村幸生, 山城貞男, 材料, **16**, 101 (1967).
- 植村幸生, 小林政治郎, 新鍋秀文, 第23回材料研究連合講演会前刷, 135 (1979).
- 植村幸生, 小林政治郎, 新鍋秀文, 日本材料学会第29期学術講演会前刷, 255 (1980).
- 北条英光, 橋爪修司, 熊谷正志, 田村昌靖, 市川以知郎, 第30回熱硬化性樹脂講演討論会講演予稿集, 29 (1980).
- 北条英光, 材料科学, **17**, 40 (1980).
- たとえば, 岩崎訓明, コンクリートの特性, 47 (1975) 共立出版社
- 奥田 博, 日本機械学会491回講習会資料, 97 (1979).
- たとえば, 山口梅太郎, 西松裕一, 岩石力学入門, 101 (1967) 東京大学出版会
- 淡路英夫, 佐藤千之助, 材料, **27**, 552 (1978).
- 文献 14) の p.102
- 谷川恭雄, 山田和夫, 小阪義夫, 材料, **26**, 1097(1977).
- Giovan, M. N., and G. Sines, J. American Ceramic Society, **62**, 510 (1979).
- Giovan, M. N., and G. Sines, J. American Ceramic Society, **64**, 68 (1981).
- 藤井太一, 材料, **25**, 927 (1976).
- 牧 廣, 安井義和, 高分子化学, **28**, 888 (1971).
- Fujii, T., and Z. Maekawa, Proc. 23rd Japan Congress on Materials Research, 28 (1978).
- たとえば, 強化プラスチック技術協会編, FRP 入門, 91 (1976).
- Smith, R. J., and R. B. Jutte, Proc. 32nd Annual Tech. Conf. S. P. I., 7-E (1977).
- 藤井太一, 前川善一郎, 材料, **28**, 1211 (1979).
- Lankard, D. R., Fiber Reinforced Cement & Concrete, 3 (1975) The Construction Press
- 藤井太一, 前川善一郎, 土谷敬一, 材料, **29**, 30(1980).
- Jones, B. H., Composite Materials, **8**, 33 (1975).