FRP ハニカムサンドイッチ構造の環境クリープ特性†

宮 入 裕 夫* 須 田 興 世**

Creep Properties of FRP Sandwich Construction
in Simulated Soil Environment

by

Hiroo MIYAIRI* and Okiyo SUDA**

Fiber reinforced plastic (FRP) materials composed of glass/unsaturated polyester (GF/UP) are used in many fields because of their good properties. In this paper, the fiber reinforced plastic honeycomb sandwich construction made of GF/UP composites was investigated to examine its applicability as structural parts for underground use by utilizing its high flexural rigidity and high corrosion resistance. The creep tests were carried out by dipping the samples in alkali buffer solution simulating the condition of under-ground water. The creep properties of FRP honeycomb sandwich construction were examined in flexural mode. The fracture appeared in the flexural or shear mode pattern depending on the loading conditions. The experimental results clarified the creep properties of the material and provided an important information about creep design for the application of FRP honeycomb sandwich structure in underground water.

Key words : FRP honeycomb sandwich, Flexural creep test, Endurance limit, Fracture pattern, Alkali buffer solution

1 緒 言

ガラス繊維 (GF) と不飽和ポリエステル (UP) で構成される GF/UP 複合材は繊維強化プラスチック (FRP) の成形性の優れた特徴を活用してさまざまな積層構成の構造体に応用されている^{1)~3)}。その最も一般的なものは FRP 積層板であるが、構造的なメリットを活かしたものとサンドイッチ構造やスチフナー構造と称せられるものも多く、特にハニカムコアを FRP で成形した FRP 製ハニカムサンドイッチ構造などは FRP の特徴を活かした典型的なサンドイッチ構造である^{4)~8)}。このような構造体は軽量でかつ剛性の高いことから軽量ブロックとして広く用いられており、そのような中でも耐食性を活かした地下埋設用の素材として FRP は土木、建築の分野でも広く応用されつつある。しかしこのような FRP ハニカムサンドイッチ板に関する土中環境下でのクリープ特性について検討した報告はほとんど見当らない。したがって、ここではこのような FRP 製ハニカムサンドイッチ板の地下埋設時の劣化挙動を調べるため、地下水中に浸漬された負荷状況を想定したクリープ試験を行ない、材料のクリープ特性についての検討を行なった。実験では土中での地下水液中の特殊環境を想定して pH 9~9.4 のアルカリ緩衝液を用い、溶液中で 10³ 時間程度までの

クリープ試験を行ない、サンドイッチ板に加わる応力を曲げ応力とせん断応力に分けて検討した。またこのような結果を用い、負荷時間 10⁶ 時間 (114 年相当) に相当するクリープ寿命の推定について検討したもので、その結果をここに報告する。

2 ハニカムサンドイッチ材の構成と
材料特性

FRP 製ハニカムサンドイッチ板はガラスチョップドストランドマット (旭ファイバーグラス社製、品名 CM385, 3.8 N/m²) と不飽和ポリエステル (日本触媒化学社製、エポラック G-2700PF) で成形された新日本コア社製ハニカムコア (品番 FR-14-120) を用い、これを表面材の FRP 板の成形と同時にステンレス製の金型内で接着し、サンドイッチ構造としたものである。表面材は、ガラスチョップドストランドマット (3.8N/m²) 2 層と不飽和ポリエステル樹脂で構成し、芯材のハニカムコアはセル径が 14 mm、高さが 22.0 mm で、密度は 1200 N/m³ となっている。なお表面材、芯材とも FRP 部分のガラス繊維含有率はほぼ 30 wt% となっている。

Fig. 1 は表面材、芯材を FRP で構成したハニカムサンドイッチ板の構造と断面寸法を示したものである。芯材の FRP ハニカムコアはせん断応力に、表面材の

† 原稿受理 平成 3 年 1 月 10 日 Received Jan. 10, 1991

* 正 会 員 東京医科歯科大学医用器材研究所 東京都千代田区神田駿河台, Institute of Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo

** トビー工業(株)技術本部 豊橋市明海町, Topy Industries, Akemi-cho, Toyohashi

Fig. 1. Structure and dimension of cross section of FRP honeycomb sandwich.

FRP 板は曲げ応力に抵抗する部材として設計されている。

通常ハニカムサンドイッチ材の破壊は負荷状態によって曲げ破壊とせん断破壊とが共存した形で生じる⁶⁾。したがってこのような破壊状況を想定して、曲げおよびせん断破壊となる負荷状況を設定した。Fig. 2 は 3 点曲げ試験によって得られた FRP 製ハニカムサンドイッチ板の破壊様相を示したもので、曲げ破壊では表面材の引張破壊とハニカムコアと表面材とはく離が、またせん断破壊ではハニカムコアのせん断破壊と最終段階での表面材の引張破壊とが生じる。またこのとき得られたサンドイッチ材の曲げ破壊強さ σ_b は

$$\sigma_b = 201.9 \text{ MPa}$$

となり、またせん断破壊強さ τ_b は

$$\tau_b = 2.69 \text{ MPa}$$

と求められた。なおこれらの結果は繰返し 5 本ずつの試験で得られた平均値を示したものである。したがって両破壊応力の比は

$$\sigma_b / \tau_b = 75.0$$

となっている。

3 浸漬液の選択と組成

FRP 製ハニカムサンドイッチが地中に埋設されることを想定して浸漬液を選定した。Table I は日本の土壌についての pH 値の例を示したものである。一般には土壌は酸性のところが多いとされているが、中に

(a) Flexural fracture

(b) Shear fracture

Fig. 2. Flexural and shear mode fracture tested by static test method.

は表に示されるようなアルカリの土壌も存在する。

しかし一般に FRP のマトリックスである不飽和ポリエステル (UP) は酸には安定であるがアルカリ性溶液中では加水分解し、劣化することが知られている¹⁰⁾。そこでこのような状況を考慮し、より過酷な浸漬溶液として Table II に示す組成で、pH 値 9.0~9.4 のアルカリ緩衝液を作成し、緩衝液中でクリープ試験を行った。Fig. 3 は所定のアルカリ緩衝溶液中にあらじめ試験片を浸漬して曲げ強さとせん断強さの経時変化を調べたものである。その結果、試験片の浸漬時間

Table I. Example of soil pH values in Japan.

	Drainage qualities	Resistivity (Ω -cm)	pH	Water-soluble anions (mg/kg)			
				Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Sinnanyou	Poor	7980	6.2	40	54	173	134
Amagasaki	Average	37680	6.4	37	49	131	5098
Edogawa	Poor	11252	9.4	18	450	152	25
Setagaya	Average	17961	6.8	104	644	30	2936
Kumagaya	Average	3000	7.1	121	381	82	740
Kashiwazaki	Good	—	6.0	11	10	158	5
Edogawa (B)	Poor	5966	7.8	463	1368	275	4
Setagaya (B)	Average	11304	6.5	35	35	74	4650

(notes) 1) pH and water-soluble anions value are result of analysis at dig up the specimen.

2) From 「Instances of corrosion and countermeasure」 compiled by corrosion and corrosion protection association.

Table II Constituents of alkali buffer solution.

Water-solution	Ratio (vol %)
0.1 mol/l H_3BO_3	25
0.1 mol/l KCl	25
0.1 mol/l NaOH	26.4
City water	23.6

(a) Relation between flexural strength and dipping time in water.

(b) Relation between shear strength and dipping time in water.

Fig. 3. Relation between strength of FRP honeycomb sandwich and dipping time in water.

が15日を越えると試験片の曲げおよびせん断強さは一定値を示すようになり、特性値のバラツキも少なくなる。そこでクリープ試験に供する試験片はすべて15日間以上の予備浸漬を行なった後、クリープ試験を実施した。

4 クリープ試験方法

4・1 負荷応力

試験片に一定曲げ応力が加わる装置として4点曲げ方式を採用した。しかしサンドイッチ板は負荷方式によってせん断応力で破壊することから、サンドイッチ板の機械的特性を基礎に曲げ破壊とせん断破壊とによってクリープ破壊する場合を区別するために、4点曲げ試験方法による荷重点と支持点との位置を決定した。

Fig. 4 はクリープ試験を行なう4点曲げ方法を示したものであるが、この時4点曲げによってサンドイッチ板に生じる曲げ応力 σ は

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{P}{2} \cdot \frac{a}{Z} \quad (1)$$

ここで、 M : 曲げモーメント、

Fig. 4. Flexural and shear testing apparatus.

$$Z: \text{断面係数} = \frac{Wf(h+c)}{2}$$

となり、またせん断応力 τ は

$$\tau = \frac{P}{W(h+c)} \quad (2)$$

と与えられる。このようなことを基礎に Fig. 1 に示した試験片寸法を用い、試験板が曲げ破壊となる条件を求めると式 (1)、式 (2) に $\sigma > 201.9 \text{ MPa}$ および $\tau < 2.69 \text{ MPa}$ の条件を代入して、外側スパン a の条件を求めると

$$Pa/wf(h+c) > 201.9$$

$$P/w(h+c) < 2.69$$

となり、これより P を消去すると曲げ破壊となる条件は

$$a > \sigma_b \cdot f / \tau_b = 75.0 \cdot f \text{ mm}$$

と与えられる。そこでこのようなことを配慮して、Fig. 5 に示すような外側スパン a を定め、曲げクリープ試験とせん断クリープ試験を行なった。なおこのとき各試験によって生じる垂直応力 σ とせん断応力 τ との関係は曲げ試験では $\sigma/\tau=154$ 、せん断試験では $\sigma/\tau=54$ となっており、それぞれの試験方法では所定の負荷応力状態になることが確認される。したがっ

Test method	a(mm)	b(mm)	L(mm)	L'(mm)
Flexural test	123.35	43.3	290	300
Shear test	43.30	43.4	130	150

Fig. 5. Loading system of 4 point flexural test, and inner and outer spans of flexural and shear creep test.

Fig. 6. Creep testing apparatus with vessel of dipping water.

てこれらの負荷装置を所定の浸漬液の容器中に埋入し、浸漬液中でのクリープ試験を行なった。

4・2 負荷装置

Fig. 6 はクリープ試験用の曲げ負荷装置と浸漬装置を示す。クリープ試験は所定の溶液で行なうために、溶液中に浸漬して曲げおよびせん断応力が加えられるようになっている。また所定の負荷応力はテコの原理を応用して、試験片に一定の荷重が加えられるようになっている。ここで荷重の調整は小さな負荷応力の変化にも対応できるようにテコの比 x/y を $x/y=1/10$ と設定した。また負荷時間の経過に伴って変化する試験片のたわみ量は荷重点の垂直変位の生じる位置に直接自動記録用の変位計を取り付け、破壊に至るまでの試験片のたわみをリアルタイムで計測した。

4・3 試験方法

クリープ試験の負荷応力は静的曲げおよびせん断強さ試験の結果を基礎に、曲げ応力については曲げ強さの 70~80% の範囲で 3 水準の負荷応力を設定し、せん断応力についてはせん断強さの 65~75% 範囲内で 3 水準の負荷応力を設定した。

なお 15 日間以上無負荷状態でアルカリ緩衝液に浸漬したサンドイッチ板の破壊強さは各 5 本ずつの静的強さの平均値を求めたもので、曲げ強さは 204.0 MPa、せん断強さは 2.51 MPa となって、おのおのの破壊強さは浸漬をしない試験片とほぼ同等の試験結果を得た。

5 クリープ試験結果

クリープ試験は所定の溶液中で曲げおよびせん断試験を行ない、各試験について 3 水準の負荷応力を設定してクリープ破壊時間を求め、これらのデータをもとに 10^6 時間 (約 114 年に相当) に対するクリープ寿命の推定を行なった。

5・1 クリープ変形-時間線図

Fig. 7 は曲げおよびせん断クリープ試験によって得られたクリープ変形-時間線図を示したものである。負荷応力に対するクリープ変形は曲げクリープでは

(a) Relation between loading time and creep displacement in flexural creep test.

(b) Relation between loading time and creep displacement in shear creep test.

Fig. 7. Relation between loading time and creep displacement in creep test.

(Fig. 7(a)) 表面材の破壊となることから負荷過程ではクリープ変形は少なく、破壊時間近傍で急激な変形とともに突然破壊する。しかしせん断クリープでは (Fig. 7(b)) ハニカムコア材の破壊となることからクリープ変形は負荷時間の増加とともに徐々に増大し急激な破壊に至る。このことは表面材は常にアルカリ緩衝液にさらされていることによる FRP 材の劣化とハニカムコア材のせん断変形がコア材の形状的な要因も含めて徐々に変化するため、両応力形態によって、クリープ変形の挙動が異なるものと考えられる。

5・2 クリープ特性

Fig. 8 は浸漬無負荷の試験体の曲げ強さをもとにそれぞれ 70%, 75%, 80% の応力を負荷して得られた、クリープ破壊強さ-時間線図を示したものである。試験片は同じ応力水準について繰返し 3 本ずつの試験を行ない、それぞれの結果をもとに最小 2 乗法に従い直線式を決定した。その結果、曲げクリープ破壊強さ-時間線図は

$$\sigma_b = 166 - 3.01 \ln T \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

と表示される。また Fig. 8 には標準偏差 σ をベースに $\pm 3\sigma$ の直線式を併記した。

またせん断応力についても浸漬無負荷の試験体のせん断強さをもとにそれぞれ 65%, 70%, 75% の応力

Fig. 8. Relation between creep flexural strength and fracture time.

Fig. 9. Relation between creep shear strength and fracture time.

を負荷して、クリープ破壊強さ-時間線図を作成した。Fig. 9 はせん断応力についてのクリープ破壊強さ-時間曲線を示したもので、曲げクリープの場合と同様に同じ応力水準について繰返し3本ずつの試験を行ないそれぞれの結果をもとに最小2乗法に従い直線式を決定した。

その結果せん断クリープ破壊強さ-時間線図は

$$\tau_b = 2.20 - 0.06 \ln T \text{ (MPa)} \quad (4)$$

と表示される。また Fig. 9 には標準偏差 σ をベースに $\pm 3\sigma$ の直線式を併記した。

5・3 クリープ寿命

クリープ試験では曲げ応力とせん断応力との負荷状態を設定して、負荷応力をパラメータにクリープ破壊時間を測定した。その結果曲げ応力状態では最小の負荷応力は静的破壊応力の70%でクリープ破壊時間の平均値が586.9時間(24.5日)であった。しかし負荷応力の増大に伴ってクリープ破壊時間は片対数表示で直線的に減少することから両者の関係に直線則を適用した。そこでこのような結果をさらに拡張してクリープ負荷時間 T , $T=10^6$ 時間のクリープ破壊強さを求めると $(\sigma_b)_{T=10^6}$ は

$$(\sigma_b)_{T=10^6} = 121 \text{ MPa}$$

となる。一方、せん断強さについても本実験で測定したクリープ破壊時間はせん断強さの65%で平均クリ

ープ破壊時間が1168時間(48.7日)であったが、これについても3水準の応力レベルで行なったクリープ破壊強さ-時間線図が片対数表示で直線式で表されることから $T=10^6$ 時間のクリープ破壊強さを求めると $(\tau_b)_{T=10^6}$ は

$$(\tau_b)_{T=10^6} = 1.20 \text{ MPa}$$

と求まる。

またクリープ破壊時間の増加に伴うクリープ破壊強さの低下の割合は実験式(3)と式(4)の勾配で示され、それぞれの値は曲げ強さの3.01に比べ、せん断強さは0.06と小さいことが示される。

しかしこのことはせん断応力による劣化に比べ曲げ応力による劣化のほうが大きいように見えるが、サンドイッチ板の曲げ強さはせん断強さに比べて75倍程度大きい。そこで両応力に対するクリープ破壊時間の増加に伴うクリープ破壊強さの低下の比を調べると両式の勾配の比は50倍となっており、両応力に対する破壊強さを基礎に考えると曲げ応力の劣化に比べ、せん断応力の劣化の割合のほうが大きいことが示される。したがって浸漬液中のクリープ試験による劣化はむしろ曲げ応力に比べ、せん断応力による劣化のほうが相対的に大きいことが示される。

6 FRP ハニカムサンドイッチ材のクリープ破壊

Fig. 10 はFRP ハニカムサンドイッチ材のクリー

(a) Flexural fracture

(b) Shear fracture

Fig. 10. Creep fracture pattern of FRP honeycomb sandwich construction.

ブ破壊の様相を示したもので、曲げクリープは $\sigma = 0.75\sigma_b$ 、せん断クリープは $\tau = 0.70\tau_b$ の負荷応力で破壊した試験片である。曲げクリープ破壊は表面材が引張破壊し、破壊と同時に心材が接着面と横せん断とによって破壊する。しかし曲げによる残留変形はクリープ変形による破壊にもかかわらず少ない。また静的曲げ破壊と異なり、表面材と心材との接着面での破壊は二次的な破壊として生ずるため損傷の領域も狭い範囲になっている。せん断クリープ破壊は心材が横せん断により破壊し、表面材の引張破壊と表面材と心材との界面破壊が二次的な破壊となって現われる。したがって静的なせん断破壊と異なりせん断クリープ破壊では領域が広い範囲に拡大しているのが特徴である。

7 結 言

FRP 製ハニカムサンドイッチ板は軽量で、かつ高い剛性を有することから軽量ブロックとして地中に埋設して使用されている。ここではこのようなサンドイッチ板のクリープ特性を明らかにするため、我が国における土中での pH 値の資料をもとにアルカリ緩衝液を調整し、所定の溶液を設定し溶液中でのクリープ試験を行なった結果、次のような結果を得た。

(1) FRP 製ハニカムサンドイッチ板に横荷重の加わることを想定し、板に加わる応力を曲げ応力とせん断応力として分けて、クリープ試験を行ない、両負荷応力についてのクリープ破壊強さ-時間 (σ_b - T) 線図を実験により求めた。曲げクリープ破壊強さ σ_b は片対数表示で次のような直線式が表示された。

$$\sigma_b = 166 - 3.00 \ln T \text{ (MPa)}$$

一方、せん断クリープ破壊強さ τ_b は

$$\tau_b = 2.20 - 0.06 \ln T \text{ (MPa)}$$

と表示されることが明らかとなった。

(2) また上記の実験式をもとに $T=10^6$ 時間でのクリープ寿命を推定した。その結果曲げ破壊クリープ強さでは $(\sigma_b)_{T=10^6} = 108 \text{ Pa}$ となり、せん断クリープ強さは $(\tau_b)_{T=10^6} = 1.20 \text{ MPa}$ となり、これらのクリープ強さは静的強さに比べ、曲げ強さについては 52.9%、せん断強さについては 47.8% となることが明らかになった。またせん断クリープ破壊は曲げクリープ破壊

に比べ、クリープ応力による劣化速度は 1/50 程度と小さいことが確認された。

(3) 曲げクリープによる破壊では一般に表面材の溶液中での劣化の影響を受けやすいが、負荷過程でのクリープ変形は比較的少ない。しかし破壊時近傍では急激な変形とともにぜい性的な破壊となる。またせん断応力によるクリープ破壊は曲げクリープに比べ、変形量の増大も緩慢でその量も小さい。したがって、クリープせん断破壊は負荷時間の経過とともに徐々に進行し破壊近傍での変形量もクリープ曲げ破壊のような急激な破壊は現われない。

(4) また曲げクリープ破壊とせん断クリープ破壊とはその破壊の様相も異なり、両破壊は破壊の状況においても明らかに区別できるものであることを確認した。

なお本研究に関し使用した FRP 製ハニカムコアサンドイッチ板は新日本コア(株)からご提供いただいたものでここに厚くお礼申し上げる。

(平成 2 年 10 月 19 日 日本複合材料学会第 15 回複合材料シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) “先端複合材料”，日本機械学会編，p. 9 (1990)。
- 2) “強化プラスチックハンドブック”，強化プラスチック技術協会編，p. 389 (1975) 日刊工業新聞社刊
- 3) “複合材料ハンドブック”，日本複合材料学会編，p. 235 (1989) 日刊工業新聞社刊
- 4) A. F. Johnson, G. D. Sims and F. Ajibade, *Composites*, **21**, 319 (1990)。
- 5) M. Akay and R. Hanna, *Composites*, **21**, 325 (1990)。
- 6) 島村昭治，宮入裕夫，“サンドイッチ構造”，p. 22 (1974) 日刊工業新聞社刊
- 7) A. F. Johnson and G. D. Sims, *Composites*, **17**, 321 (1986)。
- 8) R. Jones, W. Broughton, R. F. Mousley and R. T. Potter, *Composite Struct*, **3**, p. 167 (1985)。
- 9) “腐食と対策事例集”，p. 47 (1985) 腐食防食協会編
- 10) “FRP 設計便覧”，p. 150 (1979) 強化プラスチック技術協会編