

新素材せんいとその利用

New Fibrous Materials and Their Use

平居 孝之

HIRAI, Takayuki / 大分大学工学部教授

安藤 達夫

ANDO, Tatsuo / 三菱化成工業(株)総合研究所研究員



平居：1947年大阪府生まれ／東京工業大学工学部建築学科卒業／東京大学大学院博士課程修了／建築材料工学／工学博士

安藤：1949年東京都生まれ／早稲田大学理工学部建築学科卒業／東京大学大学院修士課程修了／建築材料工学／工学修士

1. 今なぜ新素材せんいか

工業材料の分野ではハイテクブームたけなわであるが、建築にもその波がおしよせてきている。

建築材料は使用量が膨大でコストを重視するため、他の分野で実用化された新素材を少しずつ使って実績をあげていくパターンが多かった。しかし、これまでにないすぐれた性能をもつ種々の新素材せんいの製造が可能になった今、その利用方法を建築自らも考えなければならない。東京大学の岸谷孝一先生のおことばを借りるなら、建築には新素材技術を「支える」という側面と「育てる」という2つの側面があってしかるべきで、両者は互いに手をとり合っていく段階にきている。建設省も新素材懇談会を発足させて、新素材の建設分野への積極的利用を奨励する姿勢を示している。

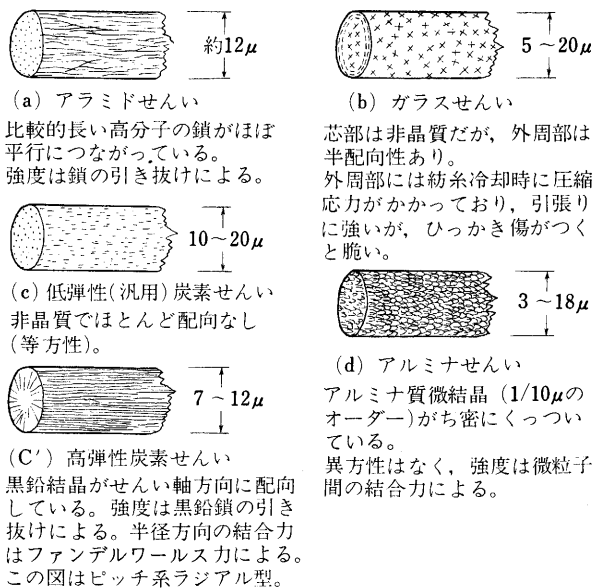
新素材開発の成功例であるALCのように、新素材せんいを使った建築材料が建築技術の向上に資する時が待たれる。

2. せんいとは

せんいとは、本来太さが数十ミクロン（百分の1mmの数倍）以下で、長さ／太さ（アスペクト比と呼ばれる）が非常に大きい形状のものをいい、その材質にはよらない。人間の髪の毛の太さが約80ミクロンであるからこれより細いものである。しかし最近では、太く短い形状のものでもせんいと呼ばれることが多い。

せんいは引張強度が大きいという特徴がある。ガラスのように板状では脆い物質もせんいにすれば、構造用鋼材をこえる引張強度をもつ。これは、断面がきわめて小さいので、潜在する欠陥の存在確率が僅少になることに加え、せんいの軸方向に分子が配向する傾向が強いからである。ウイスキーと呼ばれる長軸方向に単結晶が伸びてできたせんいは、この性質がきわだっており、欠陥が全くない場合の理想破壊強度（弾性係数の10%前後）に近い強度が実測されている。

個々のせんいで見ると、その強度発現機構はそれぞれ異なっている。図-1は、本文でとり上げるせんいのいくつかの微視的構造モデルのスケッチである。これらはプラスチック、ガラス、炭素（黒鉛）、アルミナをせんいにしたものである。分子の結びつき方に特徴のあることがお分かりいただけよう。これらのせんいの強度特性をさまざまな視点から比較してみたのが図-2～図-5である。



(a) アラミドせんい
比較的長い高分子の鎖がほぼ平行につながっている。強度は鎖の引き抜けによる。

(b) ガラスせんい
芯部は非晶質だが、外周部は半配向性あり。外周部には紡糸冷却時に圧縮応力がかかっており、引張りに強いが、ひっかき傷がつくと脆い。

(c) 低弾性(汎用)炭素せんい
非晶質でほとんど配向なし(等方性)。

(d) アルミナせんい
アルミナ質微結晶(1/10μmのオーダー)がち密にくっついている。異方性はなく、強度は微粒子間の結合力による。

(C') 高弾性炭素せんい
黒鉛結晶がせんい軸方向に配向している。強度は黒鉛鎖の引き抜けによる。半径方向の結合力はファンデルワールス力による。この図はピッチ系ラジアル型。

図-1 各種せんいの微視的構造モデル ((a)(b)については Milewski による)

高性能のせんいをつくることは容易でなく、単に塊を削り出して細くしただけでは、もとの塊よりも低い強度を持つせんいになる。それぞれの材質に適した紡糸法を見つけるのに、先人たちは大変な苦勞を重ねてきた。ごく最近になって、図-1に示すようなせんいを工業的に作るできるようになったのである。

3. 合成せんい

ナイロン、ポリエチレンなどの合成せんいをコンクリートやセメントモルタルの補強材として用いようとする研究は20年以上も前から国内外で報告されている。合成せんいで補強するメリットとしては、安価で、耐薬品性があり、引張強度も比較的高い点があげられる。その結果、セメントコンクリートの耐衝撃性は確かに向上したが、静的強度の改善効果はそれほどではなかった。

これらの経験から、今日セメントモルタル補強用せんいとして実用化または検討段階にあるのは、ポリエチレンせんい、ポリプロピレンせんい、アラミドせんいなどである。

ポリエチレンせんいには国内で実用化された太さ約0.9mmのものがある。せんいの長手方向に一定間隔ごとに突起がついた短せんいであり、セメントマトリックスとの付

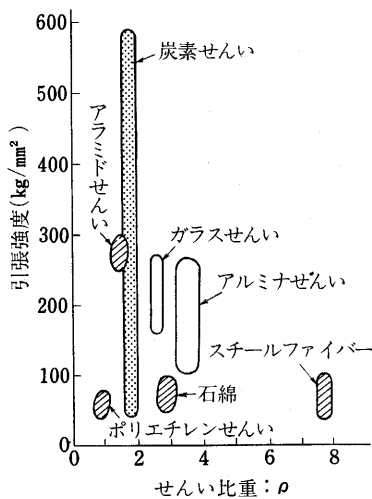


図-2 比重—引張強度

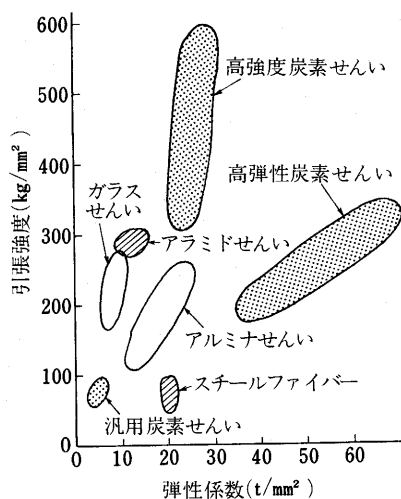


図-3 弾性係数—引張強度

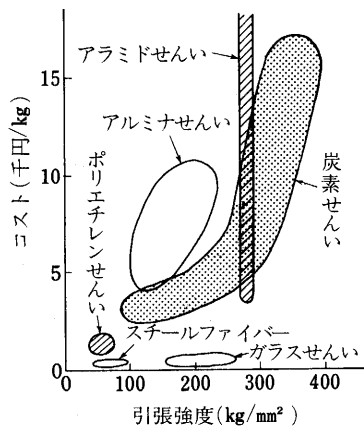


図-4 引張強度—コスト

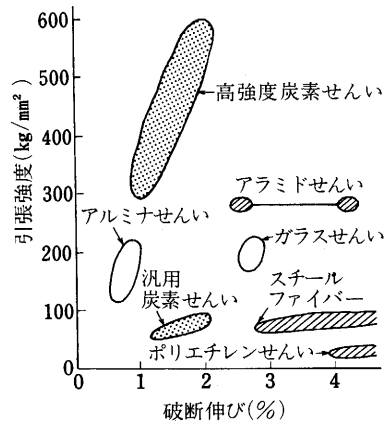


図-5 伸び—引張強度

着がよい。振動詰めは無筋コンクリート管に用いられている。

ポリプロピレンせんいでは、網目(フィブリル)化された太さ15~150ミクロンのものが英国で開発されている。本来、石綿代替を主眼に開発されたので、当面はセメントモルタルを補強して屋根材用の波形シートに利用することが考えられているが、将来はコンクリート捨型枠などへの利用が有望視されている。

一方、アラミドせんいは合成せんいの中では新顔で、1972年に米国で初めて開発され、通常は「ケブラー」という商標名で呼ばれている。アミド結合(-CO・NH-)を有する点は羊毛、絹のような天然せんいや従来のナイロンせんいと同じであるが、ベンゼン環(亀の甲)をアミド結合で直線的に結んでいる点がナイロンと異なる。ナイロンが脂肪族ポリアミドと呼ばれるのに対し、アラミドはベンゼン環があることから芳香族ポリアミドと呼ばれる。

アラミドせんいの特徴は、他の合成せんいに比べ引張強度、弾性率および耐熱性が大きいことにある。セメントコンクリートへの補強効果については、従来の合成せんいよりも大きいことが実験的に確かめられている。軽量で耐薬

品性にもすぐれているが、合成せんいの中では値段が非常に高いのが難点である。

アラミドせんいは建築分野では、まだなじみがうすい。海洋航空宇宙関係ではロープやFRPとして長年の実績を有する。またタイヤの補強材や防弾チョッキなどにも利用されている。最近では、ロープ、ケーブルとして、プレストレストコンクリート用緊張材への応用が検討されている。

4. スチールファイバー

鋼繊維またはスチールファイバーと呼ばれているものは、構造用鋼材を太さ十分の数ミリメートル、長さ数センチメートルに加工したものである。他の材質のせんいよりずっと太く、また強度や弾性はもとの鋼材とほぼ同じ性能である。

コンクリートの製造の時に他のコンクリート材料と共に混練して、コンクリートの強靱性を向上する目的で使われる。セメントモルタルとスチールファイバーを同時に吹き付けて成形する方法もある。スチールファイバーを使ったコンクリートは鋼繊維補強コンクリートまたはスチールファイバーコンクリート(SFRCとも表される、Steel Fiber Reinforced Concreteの略)などと呼ばれる。

米国において道路舗装に早くから実用化され、わが国でも土木の分野で広く使われている。建築ではその利用方法の開発に力が注がれている段階である。

建築物の構造は破壊するときの強度とともに、破壊に至るまでに吸収できるエネルギーが大きいほどすぐれている。構造部材で考えると、構造部材を構成する材料またはその結合方法により、これらの性能を付与している。鉄筋コンクリート部材のエネルギー吸収要素としては、補強筋の伸びる能力、コンクリートの縮むまたは伸びる能力、両者の付着面の滑る能力があり、スチールファイバーコンクリートを使うと、このうちコンクリートの能力が飛躍的に向上し、きわめて耐震性にすぐれた構造になる。

フェロセメントのように、連続せんいでセメント系の材料を補強するには、高強度と高弾性のうえに急激に破断することなく高い応力を負担しながら伸びるせんいが望ましく、この点でスチールファイバーのように素材が鋼であることは最適といえる。ただし、せんいの伸びる能力は根本的な条件ではなく、せんい自身を複合化することにより、炭素せんいやアルミナせんいであっても高い応力を負担したままで伸びることのできるせんいを作ることができる。

建築材料としては、安全で耐久性のある構造材料として

利用することができれば、使用量が膨大であるゆえに画期的な新用途開発である。試算ではスチールファイバーコンクリートの場合、建築コストが従来のコンクリートよりかなり高くなるといわれているが、量産体制にはいれば、原材料が安いという強みがある。コンクリートの表層に配向しているスチールファイバーが錆びやすいことは、鋼材の腐食防止の技術やアモルファスの製造技術が生かされて、いずれ解決されるであろう。

5. ガラスせんい

ガラスせんいの新素材的用途としては、耐アルカリガラスせんいとセメントモルタルとの組合せによるGRC (Glass Fiber Reinforced Cement の略、ガラスせんい補強セメント)、極細のガラスせんい織物とテフロン樹脂との組合せによる空気膜構造、一方向に配向したGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics の略、ガラスせんい補強プラスチック)としてのロックボルトやプレストレストコンクリート用緊張材などがあげられる。

図2～図5でも分かるようにガラスせんい自身の引張強度はスチールファイバーより大きい。したがってこの強度を利用してプラスチックのみならず、セメントモルタルを補強する試みは従来から行われてきた。

その際の一歩の問題は、セメントのアルカリ分分でガラスせんいの表面が劣化し、ついには補強効果を失う点であった。この問題を解決するために試みられたのは、ガラスせんいの表面を合成樹脂でコーティングする方法、またはモルタルに混和剤を添加してアルカリ侵食性を低減させる方法であったが、根本的な解決策にはならなかった。

実用的な解決策となったのは、ガラスの組成を変えることによって耐アルカリ性をもたせた新しいガラスせんいの開発である。英国で開発された耐アルカリガラスせんいを使ったGRCのスプレイ法による製造技術は各国にライセンスされ、日本では約10年前からGRCが製造されている。成形性がよく軽量で高強度の製品が作れる。東京駅西口の丸ビルの外壁改装工事にGRCパネルが用いられているのは記憶に新しい。

空気膜構造用の膜材については、最近新聞等で屋根つき球場の建設が報道されており、ご存知の方も多いと思う。しかしその基材にガラスせんいが用いられていることは意外に知られていない。

従来のガラスせんいより細い直径数ミクロンの極細ガラスせんいを織物状にし、テフロン樹脂を含浸させて厚さ0.8mmの膜とし、強度、耐久性、光拡散性、防火性などにすぐれた軽量の空気膜構造をつくる。このような技術が可能になった背景には、ガラスせんいの成形加工方法の進歩がある。空気膜構造のほか、テント構造や仮設構造などに応用の範囲は広い。

ガラスせんいを一方向にそろえてプラスチックと複合し、その引張強度を利用した一例が地山やトンネルの切羽安定用のロックボルトである。従来の鋼製アンカーに比べて軽量かつ高強度で、バーナーを用いずに切断ができ、作

業の安全性も高まった。これを一歩すすめたのが、プレストレストコンクリート用の緊張材である。東京大学の小林一輔先生のご研究では、端部定着体の開発がポイントだったとのことである。

6. アルミナせんい

アルミナせんいは白色真綿状のセラミックス繊維の一種で、アルミナ分の多いもの(通常は72%以上)をいう。概してアルミナ分が多いほど耐熱性が高くなる。アルミニウムと酸素が結びついたアルミナのせんいであるから、融点が2000°C以上あり非常に耐熱性がよい。また、石綿のように人体に対する有害性がないのも長所である。

セラミックせんいはこれまで防火や耐火の目的で、岩綿やグラスウールより以上の耐熱性が要求される建築部位に用いられてきた。またブランケット状にして、その耐熱性、耐薬品性を生かし、1000°C以上の高温炉の断熱材や目地材として用いられてきた。欧米ではスラブや壁貫通孔のシール、地下ケーブルの延焼防止用防煙たれ幕などとしての利用がある。

最近では、アルミナ分の多い高強度アルミナせんいにアルミニウムを溶湯含浸したFRM (Fiber Reinforced Metal の略、せんい強化金属)としての利用法が注目されている。アルミナせんいで補強したアルミニウムは、補強していないものに比べ強度、剛性のみならず、寸法安定性、耐摩耗性、耐熱性などが向上する。すでに自動車のピストン等に用いられている。後述する炭素せんいと並んでFRM補強用せんいの有力候補である。

例えばアルミナせんい補強アルミニウムの送電塔ができれば、軽量でさびにくく、豪雪地帯などでは大いにメリットを発揮するだろう。また耐熱性があるから、粘土やセメントモルタル、骨材などと組み合わせて高温で焼成結合し、非常に高強度で半永久的な材料をつくることも可能である。

7. 炭素せんい

炭素せんいは今熱い注目を集めている新素材の1つである。合成せんいの軽量、耐食性、金属せんいの電気・熱伝導性、無機せんいの耐熱性を有し、かつ引張強度や弾性率が高いなど数々の特徴をもっている。

炭素というと「炭」を連想し、燃えやすいというイメージがあるが、これは誤りである。トーマス・エジソンの白熱電球のフィラメントは、耐熱性のある電導性のせんいを探して、竹のせんい束を炭化した炭素の帯に行きついたのである。スペースシャトルの耐熱タイル下地には、炭素せんいを基材とする複合材料が使われている。

炭素せんいが燃えるのは、400～500°C以上で酸素が連続的にかつ長時間供給される場合である。セメントモルタル中では、予想以上の耐熱性がある。東京の赤坂・六本木再開発計画では、ビルの外装に炭素せんいで補強したプレキャストのコンクリートパネルを使った耐火構造の外壁が建設されている。

炭素原子は、すすのようないわゆる無定形炭素、規則的な結晶構造をもつ黒鉛、またはダイヤモンドのいずれかの構造をとりうる。高強度の炭素せんいは簡単にいうと、このうち耐熱性のある黒鉛（グラファイト）の六角うるこ状結晶を、不完全ではあるがせんい方向に配列させたものである。寸法安定性（熱膨張率はほとんどゼロかあるいは逆に収縮側）がよく、耐薬品性も抜群で酸やアルカリにも侵されないのが強みである。

アクリルせんいをむし焼きにしてつくった炭素せんいは、PAN（ポリアクリロニトリル）系炭素せんいと呼ばれ高価格である。石油や石炭系のピッチを原料とする炭素せんいは、PAN系炭素せんいに比べると製造コストが低い。ピッチ系炭素せんいは安価なだけでなく、汎用品から高強度・高弾性品まで、その性能のレベルを幅広く製造可能な点も注目される。

炭素せんいは、宇宙・航空機器、スポーツ用品といった製品に使用され高価格であるというイメージがあるが、最近ピッチ系炭素せんいの出現でその値段を一桁下げられる見通しがある。建築向けの用途開発も有望である。現在建築材料の分野では、その製造と利用の技術を模索している段階である。例えば、プレストレストコンクリートの緊張材として、現行のPC鋼材並みの引張強度をもつ炭素せんい補強プラスチック（CFRP）のロッドが検討されているし、また短い炭素せんいをセメント、ポリマー、骨材とブレミックスしたコンクリート用補修材が市販されている。

アルミニウム、鋼、プラスチック、合板、気泡コンクリートなどと積層強化し、薄肉軽量でかつ剛性の大きい部材を作ることも考えられる。もう1つ見逃せないのが炭素せんいの電気特性である。ビルのTVゴースト対策として、外壁カーテンウォールに使いよう。通電できるなら、壁や屋根に埋め殺して、面発熱体としたり融雪屋根として利用できる。このように建設における炭素せんいの利用には、大きな可能性がある。

わが国のというより世界のピッチ系炭素せんい研究の草分け的存在である群馬大学の太谷杉郎先生は、建設の分野で炭素せんいを利用することが炭素せんいの将来の産業規模を左右するとおっしゃっており、建築土木での利用への期待の大きさがうかがえる。

<参考文献>

- 1) 岸谷孝一：先端技術と建築；建築士，Vol. 33, No. 381, 1984年6月
- 2) Milewski, J. V. : Short-fiber reinforcements : Problems, solutions, directions — Short-fiber types and problems — ; Plastic Compounding, 1982年5/6月
- 3) 小林一輔・趙力采・神吉正弥：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の研究開発；第6回コンクリート工学年次講演会論文集，1984年5月
- 4) 日本建築学会：スチールファイバーコンクリート技術の現状，1984年3月
- 5) 太谷杉郎：炭素繊維をめぐる三つの願望；表面，Vol. 22, No. 11, 1984年11月

建築会館 ホール

定員350名

落ち着いた雰囲気がお慢

国際会議・講習会・研修会・展示会・コンサート

日本建築学会

〒108 東京都港区芝5-26-20
電話 (03) 456-2051

