

「セメントコンクリート補強の短繊維」 について

大分大学教授
平居 孝之

1 繊維とウイスキー

同じ材質で大きさの違う材料は、断面積の小さい方がその中に存在する欠陥の数が少ないために強度が大きくなる。いわゆる寸法効果という現象である。

図1は塊状より連続繊維の方が、さらに針状の結晶であるウイスキーの方が強度が大きいという例である。繊維では1GPa、ウイスキーでは10GPaを超える引張強さが得られる。欠陥の無い固体材料が持つことのできる理論上の最高の強度は、ヤング率の約10%であることが分かっており、ウイスキーはその最高に近い強度を実際に有しているわ

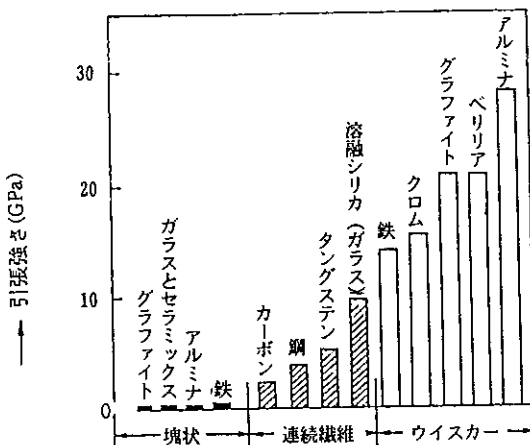


図1 塊状、連続繊維、ウイスキーの引張強さ
(林毅編, 複合材料工学, 日科技連出版社1971)

けである。

構造物に使われる一般構造用圧延鋼材のSS400の引張強さが0.40~0.51GPaであることと比較して、これらの高強度は大変魅力がある。

1960年にGeneral Electric社がアルミナのウイスキーの試作に成功し、その強度が従来の固体材料で測定された強度より異常に大きく、世界の注目を集めた。この時から、超高強度の新材料の利用方法に関する研究が始まり、複合材料の技術が開発された。

2 繊維補強複合材料

複合材料とは、材質の異なる材料がそれぞれ元の組成のまま結合し、できた材料が元の一つの材料だけでは持たないようなより優れた性質を持つ材料のことである。

ウイスキーも含めて細く長い形状の材料を繊維と総称することが多い。短い繊維を短繊維、連続した繊維と見なせるものを長繊維または連続繊維と呼ぶ。

非常に短いウイスキーを利用するために、プラスチックや金属の中にウイスキーを入れて成形する方法が試みられた。ウイスキーからウイスキーへの応力の伝達をプラスチックや金属に行わせて、必要な大きさで高強度をもつ材料を得ようとしたわけである。このようにしてできたものを繊維補

強複合材料という名前で呼ぶようになった。

その後、繊維を入れた材料が種々開発されるようになり、固有の名称が付けられたものもあるが、基本的には短繊維を分散して入れて補強したものを繊維補強複合材料という。

鋼線を短く切ってコンクリートに入れると、コンクリートにクラックが入っても、そのクラックを横切るような位置にある鋼線が、クラックで分離されたコンクリートを繋ぎ留めて応力伝達を可能にする。巨視的に見ると、割れ易く脆いコンクリートが、割れ難い靱性のある材料になる。これは、スチールファイバーコンクリートまたは鋼繊維補強コンクリートと呼ばれており、繊維補強複合材料の一つである。

コンクリートを補強するのに適した繊維材料が、高分子、ガラス、炭素などから製造できるようになった。これらの短繊維を入れて補強したコンクリートは、繊維補強複合材料の一つであり、実用化されて広く使われている。

肺ガンの原因になるため、他の材料で代替することが望まれているアスベストは、補強という観点で非常にすぐれた性能をもつ天然の短繊維である。抄造という成形方法によりセメントの中に多量に分散して入れて補強し、アスベストセメントとして使われてきた。これも繊維補強複合材料の一つである。

3 分散強化

複合材料を表すのに補強 reinforce と強化 strengthen という言葉が使われる。両者は混同して使われているが、基本的に意味は異なる。

複合材料の母体となる材料をマトリックスと呼び、マトリックスの中に入れる材料を分散相と呼ぶ。分散相があるためにマトリックスの力学的性質そのものが向上するような場合を強化という。

マトリックスの力学的性質はそのまま、短繊維などの分散相が応力を負担するために、複合材料の強度や弾性が向上する場合を補強という。

金属は立体格子の節点の位置にプラス電荷の原子核が納まり、その間をマイナス電荷の電子が埋め、両者がプラスとマイナスで引っ張り合って安定した組織になっている。引っ張り合っている力を超える力をかけると、原子核が隣の節点の位置に移動することを繰り返して変形し、変形した後は安定した組織で強度も元のままと同等になる。このため金属は伸びが大きく、プレスにより成形することができる。原子核が移動する現象を転位という。

立体格子のすべての節点の位置に金属原子核が納まっているような組織の金属を地球上で作るのは無理であり、所々は金属原子核が存在しないで空いていたり、種類の違う原子や分子が入り込んでいたりする。種類の違う原子や分子がある所では、それらが障害となって金属原子核の移動が起こり難くなる。このため純度の高い金属ほど強度は低い展延性に富み、また炭素鋼のように異なる材料を分散して入れることにより強度と伸びを変えることができる。

このように、マトリックスである金属そのものの性質を種類の違う材料を分散して入れて制御する場合は、分散強化という。

繊維補強コンクリートは、クラックが発生した後もコンクリートは連続体としての機能を有し、割れて分散することなく荷重を負担しながら変形するので、コンクリートそのものの性質が変えられたという見方もできる。また理論の妥当性に疑問をもつ研究者も多いが、分散された短繊維相互の間隔が小さくなると、コンクリートそのもののクラック成長強度が大きくなるとする学説がある。このような観点からは、繊維補強コンクリートは織

維補強であると同時に分散強化の性質も併せもつといえる。

4 セメントコンクリート補強の短繊維

セメントコンクリートを補強するための短繊維に関する研究は多く報告されており、試験的に使われたものを含めてそれらに出て来る短繊維の材質を挙げると表1になる。セメントコンクリート補強に使う短繊維に要求される性質は、強アルカリ性環境における耐久性であり、補強効果がより顕著に出るためにセメント水和物との付着性が良いこと、強度が高いこと、ヤング率が高いことである。これらの性質のほかに、成形方法に応じて必要になる性質や、建材としての難燃性に関連した性質が要求される。

これらの要求を満たす性能をもつ短繊維は、鋼繊維、耐アルカリ性ガラス繊維、炭素繊維、ビニロン、アクリル繊維、石綿、セルロース繊維などであり、単独であるいは組み合わせて使われてい

表1 セメントコンクリートの補強で文献に言及された繊維材料の材質

有機系	セルロース、ポリエチレン、ポリビニルアルコール、ポリアクリロニトリル、アクリル酸、ポリ塩化ビニル、アラミド、ポリイミド、ポリアミド、ポリエステル、ビスコース、ポリテトラフッ化エチレン、ポリベンゾイミダゾール、ポリオレフィン、ポリアリレート、フェノール
無機系	ガラス、耐アルカリ性ガラス、ピッチ系炭素、PAN系炭素、スラグ、シリカ、炭化珪素、珪酸カルシウム、シリコンカーバイド、シリコン窒化物、アルミナ、アルミナシリカ、ジルコニア、チタン酸カリウム、ボロン窒化物、塩基性硫酸マグネシウム、合成カルシウムナトリウムメタリン酸塩、水酸化マグネシウム、石膏、リン酸塩ポリマー、エリオナイト、アタパルジャイト、クリソフォスフェート、ゾノトライト、カルシウムシリケート、セピオライト、ワラストナイト、ゲーサイト、ゼオライト
金属系	スチール、ステンレス

る。またポリプロピレン、アラミド、ポリエチレン、アルミナ、チタン、ボロンなどの繊維の試験的な利用や、研究が行われている。

1) 鋼繊維

鋼繊維は繊維と呼ばれているが、他の繊維材料と大きく異なる点は、1本の繊維の断面寸法が大きいことである。短い線状または帯状の鋼であり、材質は塊状の鋼とほとんど同じである。

コンクリートとの付着を良くするために、表面の凹凸、よじり、端のフック、ドッグボーン型、周長の長い断面形状、表面処理などを施したものが製造されている。

太さ	0.1~1.0mm
長さ	10~80mm
密度	7.8g/cm ³
引張強度	0.45~1.40 GPa
ヤング率	210 GPa
破断伸び	10~30%

コンクリートの表層における発錆を押えるために、ステンレス鋼の繊維も製造されている。

なお径が13 μ m程度の鋼繊維も作られており、これは細い繊維にしたことの寸法効果により、引張強度が4GPaを超えるなど高性能をもつ。

2) 耐アルカリ性ガラス繊維

従来の材質のガラスは、アルカリ性環境において耐久性が低い。ジルコニア (ZrO₂) を成分に入れると、その量に応じて耐アルカリ性が向上する。しかしジルコニアの量が多くなるほど、繊維として製造するのが困難になる。

イギリスでジルコニアを17%程入れたガラス繊維の製造ができるようになり、セメントモルタルの補強に多く使われてきたが、耐アルカリ性の性能がいま一つ不満足であった。その後日本でジルコ

ニアを20%程入れたガラス繊維の製造技術が開発され、耐アルカリ性の性能が大きく向上した繊維を製造できるようになった。

短繊維としては、フィラメントを集束したストランドを切断したチョップドストランドで使われる。

フィラメントの径	8~13 μ m
ストランド中のフィラメント数	50~800
長さ	3~50mm
密度	2.2~2.7g/cm ³
引張強度	1.5~3.5GPa
ヤング率	70~76GPa
破断伸び	2~3%
熱膨張係数	0.9 $\times 10^{-5}$ / $^{\circ}$ C
軟化点	830 $^{\circ}$ C
アルカリ性環境の使用温度	80 $^{\circ}$ C以下

3) 炭素繊維

炭素繊維は、図2のように6個の炭素原子が環状に結合したベンゼン核が平面的に連鎖してつながった平面構造の結晶が、層状に多数重なったものである。この平面構造をもつものをグラファイトすなわち黒鉛ともいう。

原料により主にPAN系とピッチ系の2種類が使われている。他の材質の繊維に比べて、強度と弾性をかなり大きな範囲の値から選んで製造すること

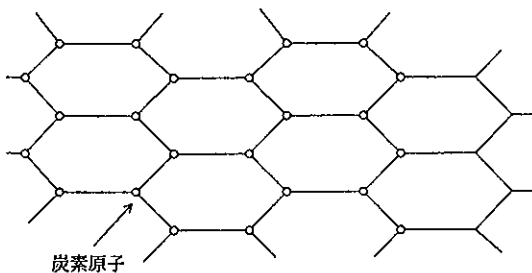


図2 炭素繊維の結晶構造

とができるのが特徴である。

耐アルカリ性に優れ、またプレキャストコンクリート製品に使ったときにオートクレーブ養生も可能である。

径	5~20 μ m
長さ	3~25mm
密度	1.5~2.2g/cm ³
引張強度	0.5~10.0GPa
ヤング率	200~800GPa
破断伸び	0.4~2.5%
使用温度	350 $^{\circ}$ C以下

4) ビニロン

ビニロンは、ポリビニルアルコールの繊維の呼び名であり、図3のような結晶構造をしている。セメントコンクリートの補強には、通常品に比べヤング率と引張強度を大きくした繊維が使われている。

OH基をもつので水になじみやすく、セメントコンクリートとの付着性が良い。また耐アルカリ性が良好で、強度劣化がない。ただしモルタルやコンクリートに埋め込んだ形態の耐アルカリ性は優れているが、自由に伸び縮みができる状態でアルカリ性溶液に漬けた場合は強度の低下が見られる。

径	4~660 μ m
長さ	4~35mm
密度	1.25~1.30g/cm ³

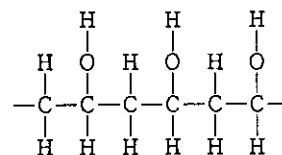


図3 ビニロン繊維の結晶構造

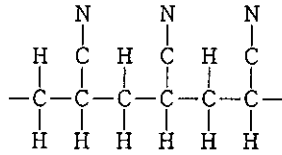


図4 アクリル繊維の結晶構造

引張強度	0.7~1.6GPa
ヤング率	11~37GPa
破断伸び	7~8%
アルカリ性環境の使用温度	80℃以下

5) アクリル繊維

アクリル繊維はポリアクリロニトリルの繊維であり、図4のような結晶構造をしている。セメント補強のために、通常品より高強度で高弾性率の繊維が作られている。耐アルカリ性が良好である。

径	11~18μm
長さ	5~12mm
密度	1.18g/cm ³
引張強度	1.2~1.5GPa
ヤング率	19~24GPa
破断伸び	11~12%
アルカリ性環境の使用温度	80℃以下

6) アスベスト

アスベストすなわち石綿は、ケイ酸塩の繊維状鉱物である。クリソタイル(白石綿, 温石綿), アモサイト(茶石綿), クロシドライト(青石綿), アンソフィライト(角閃石), トレモライト(透角閃石), アクチノライト(陽起石)の6種類がある。6種類の中ではクリソタイルの人体への有害性が一番低い。径が0.001~0.1μmの細い管状のフィラメントがより集まった形状をしており、非常に短い

ものから100mm近い長さのものまでである。性能値の一例を次に示す。

比重	2.55
引張強度	3.1GPa
ヤング率	165GPa

5 人体への有害性

繊維の中には、人体に悪性腫瘍を発生させるものがある。そのような繊維は、細くかつ長い形状で、人体内で溶解しないような化学組成のものと考えられている。このような人体に有害である可能性のある細くて長い繊維を、研究発表者の名にちなんで Stanton ファイバーという。

人が呼吸で容易に吸い込む繊維の太さは、鼻呼吸で3.5μm以下、口呼吸で5μm以下である。また体内の食細胞が効率よく除去できない繊維の長さは5μm以上である。従ってこれらの寸法に当てはまる繊維は、人体に有害であるか否かを調べる必要がある。

発ガン性については、表面形状や化学組成など繊維の種類による影響もあると言われている。最も発ガン性が顕著であるのはアスベストである。動物実験による研究結果では、アスベストの他に鉱物繊維や有機高分子繊維の中に有害性を示唆されたものがある。また人が呼吸で吸入しない太さの繊維でも、裂けて細くなる性質をもつ繊維は注意が必要である。

セメントコンクリートの補強に使われているものの中で鋼繊維、耐アルカリ性ガラス繊維、炭素繊維、ビニロン、アクリル繊維は先に径を示したように、人が呼吸で吸入する太さではなく、また裂けて細くならないので、人体への有害性は無いといえる。