突に対する強度をどう規定すべきかを決めかねた。二次構造でもあり、破壊様式からしても致命的な事故にはなりそうにないため、結局はメンテナンスコストとのトレードで決まると思われるが、民間機の滑走中の異物飛散の程度、確率などのデータ取得という点からまず解決せねばならない。

複合材構造の採否のキーポイントは信頼性とコストであるが、コストは各社ごとにその算定基準が異なり、かつ対外的要素が強い。したがって内訳の推定値が提出されることが少なく、そのままでは各種構造、成形方式の横通しの比較、コスト分析がむずかしいため、59年度からは Northrop による方式⁵⁾を統一法として用いることにしている。

材料の改良による信頼性の向上、構造効率の向上に伴い、今後ますます製品コスト低減の研究が指向されるが、複合材の場合、素材費が大きなウェイトを占める。この点では素材メーカーのいっそうの努力を期待したい。

8. 運用技術の研究

メーカーサイドから見た運用技術の研究項目は運航時の非破壊検査技術と修理であろう。残念ながらこれらはすべて今後の課題として残されている。工場における非破壊検査は既製の超音波Cスキャン、軟X線などを利用しているがいずれも大変な工数・費用がかかり、操作・判読に至るまでの自動化が望まれる。これらの方式を時間

に限りのあるエアラインの整備にそのまま適用することはできない。修理にしても方法、設備、修理法、コスト等、結果いかにによっては設計基準・材料選定にはねかえるものであり、早急な検討を要するものである。

9. おわりに

YXX は先進複合材とアルミニウム・リチウム合金という二大新素材をいかに活用するかという構造設計上の難問を抱えているといっても過言ではなく、材料選定が構造様式、製造方式のすべてを変えてしまう立場にあり、構造開発研究はいままでにない慎重さと掘り下げが必要である。この観点からすでに JADC は航技研の方方との技術連絡会を持って有益な助言・助力をいただいているが、今後さらに広く他分野の研究者諸氏のご協力をお願いしたいと思う。

参考文献

- 1) J.T. Quinlivan & D.T. Lovell : ICAS-82-2. 2.1 (1982).
- 2) J.H. Stahnes, Jr., N.F. Knight, Jr. & M. Rouse : AIAA 82-0777 (1982).
- 3) B.L. Agarwal : AIAA 82-0746 (1982).
- 4) H.L. Bohon : NASA CP 2251, "Advanced Materials Technology," compiled by C.P. Blankenship & L.A. Teichman (1982).
- 5) Northrop Corporation : AFFDL-TR-76-87(1976).

解 説

鋼繊維補強コンクリート利用の現状

魚 本 健 人*

1. は し が き

現在、繊維を利用したセメントコンクリート系複合材料には種々のものがあり、利用の仕方もさまざまである。また、使用されている繊維としては、鋼繊維、ガラス繊維、カーボン繊維、ポリエチレン繊維などがある。なかでも、今日建設分野において、構造用材料として最も一般的に使用されているのは鋼繊維であり、セメント

コンクリート中に短鋼繊維を分散させた鋼繊維補強コンクリート (steel fiber reinforced concrete : SFRC) としての利用が多い。

SFRC に対する関心が高まったのは、1963年に発表された Romualdi らの研究¹⁾が発端となっている。その理由は、従来、コンクリートの最大の欠点であるとされていた脆性的な破壊を、鋼繊維で補強することにより防止することができる²⁾と説明されていたからである。その後、SFRCに関する研究および開発は、1969年頃からのアメリカにおける鋼繊維の量産技術の開発によって世界

* Taketo UOMOTO : 東京大学生産技術研究所 (106 東京都港区六本木 7-22-1)

的に行なわれるようになった。しかし、諸外国におけるその後の研究は基礎的な研究が中心となり、実用化に関する研究はわが国が先行するようになった。

わが国では、1970 年頃から各研究機関で SFRC に関する研究開発が行なわれ、基礎的な研究のみならず実用化を目的とした多くの研究が実施された²⁾。すなわち、新しい鋼繊維や製造方法の開発、実構造物へ適用する場合に不可欠な SFRC の配合方法や試験方法に関する研究、各種構造物に対する適用方法等の開発、研究が行なわれ、多くの構造物に適用された。今日では、わが国は世界でも最も多量の SFRC を利用している国の一つになっている。

本文では、今日このように多量に用いられるようになった SFRC の利用の現状について、おもにわが国を中心として概説する。

2. SFRC の特性と適用対象構造物

SFRC を使用する目的としては種々のものがあるが、今日、実際の構造物に使用されている SFRC は、おもに鋼繊維とコンクリートとの力学複合を目的としたもので、普通コンクリートに比べて優れている次のような利点を活用している場合が多い。

- (1) 高い曲げ強度、引張り強度、剪断強度等の利用
- (2) 高いひび割れ発生に対する抵抗性の利用
- (3) 高い靱性や耐衝撃性等の利用

この他にも遠心形成されたヒューム管のように、鋼繊維の配向および分散を制御して鉄筋と同じような補強効果を目的として使用する場合や、鉄筋と併用して一つの構造物として使用する場合もある。以下に、現在比較的多く使用されている適用対象構造物と SFRC の特性との関係について説明する。

SFRC が普通コンクリートに比べ、曲げ強度、引張り強度や剪断強度が高いことは、すでに多くの研究者によって明らかにされている。図 1 は、岡村³⁾が行なった実験結果を示したものである。この図より、SFRC の繊維混入率が 0.5% 程度ではあまり変化がないが、2% 程度まで繊維混入率を高めれば普通コンクリートの約 2 倍の強度となることがわかる。このため、繊維混入率の高い SFRC を使用すれば、普通コンクリートに比べ、構造物の断面積を減少することが可能となる。これは、とくに軽量化を図ることが重要な構造物や、断面減少によるメリットの大きな構造物などでは重要視される特性である。

軽量化を図ることが重要な構造物としては橋梁の上部

図 1 SFRC の曲げ強度と繊維混入率との関係³⁾

(鋼繊維：0.5×0.5×30 mm，粗骨材の最大寸法：15 mm，供試体：10×10×40 cm)

工などがある。この上部工の軽量化が行なえれば、スパンの増大や上部工を支持している下部工をより小さなものにすることができ、構造物全体としてより経済的なものにすることができる。

一方、断面減少によるメリットの大きな構造物の一つとしてトンネルのライニングが上げられる。図 2 に示したようにトンネルのライニング材として SFRC を用いると、普通コンクリートにくらべライニング厚さを減らすことが可能で、トンネルの掘削断面積等を減らすことになる。結果的に、トンネルの掘削量、搬出土砂量、打設コンクリート量等多くの施工量が減少することになり、経済的にもメリットが多い。

図 3 は、小林⁴⁾が行なった SFRC のひび割れ拘束性と繊維混入率との関係を示したものである。この図が

図 2 トンネル断面の一例

図3 ひび割れ拘束性能と繊維混入率との関係⁴⁾

ら明らかのように、SFRCは、ひび割れ発生に対する抵抗性もひび割れ拘束性も、ある限界の繊維混入率(0.5%程度)が存在し、その後は、繊維混入率とともにほぼ直線的に増大する。この傾向は上記の曲げ強度の場合と同じである。もし、SFRCのひび割れ発生に対する抵抗性を利用する場合には、ある限界繊維混入率以上の繊維混入率を有するSFRCとすることが必要である。

SFRCのひび割れに対する抵抗性が大いことは、構造物の耐久性を高めることになるため、ダム、河川構造物等の水密性などを要求される構造物や厳しい環境に設けられる構造物に利用されている。とくに、近年のようにコンクリート構造物の耐久性が問題とされるようになると、より多くの構造物に適用される可能性がある。

図4は、土木学会の試験方法によって行なった曲げ靱性係数と繊維混入率との関係を示したものである⁵⁾。曲げ靱性係数は、図5に示したように曲げ載荷時における応力撓み曲線から求めるもので、所定の撓み量に達するまでの吸収エネルギーに比例する。この図から明らかな

図4 SFRCの曲げ靱性係数と繊維混入率との関係⁵⁾ 図5 曲げ靱性係数の求め方⁷⁾
 $\delta_0 = l/150$, l : スパン

うに、SFRCの繊維混入率が增大すると飛躍的に吸収エネルギーが増加している。

SFRCの耐衝撃性や靱性が優れていることを考慮して、空港舗装のような大きな集中荷重が作用する構造物や、二次製品などの割れや欠けを防止することを目的とし、掘削のり面保護工などの破壊に対する安全性や耐久性の向上を目的としても利用されている。二次製品などは、使用時においても簡単にひび割れや欠けが生じにくい性能を有していることが望ましく、場合によっては欠け等の生じやすい角部だけにSFRCを使用する場合もある。また、掘削のり面保護工では、普通コンクリートに比べSFRCは高い変形能力を有していることから、のり面のずれ等に対しても優れた効果を発揮する。

3. わが国におけるSFRCの利用

3.1 SFRCの使用量

わが国ではすでにかかなり多くの構造物にSFRCが使用されており、現在、わが国で使用されているSFRCの量は、年間4万m³以上であると推定される。しか

し、このように使用量が多くなったのは 1980 年代に入ってからである。

SFRC に限らず新材料を建設材料、それも構造材料として一般的に利用するためには、材料そのものの性能が一般的に認められることばかりでなく、実構造物に適用した場合の問題点の摘出と説明が必要となる。このため、1970 年代には実構造物への適用方法などの検討を含めた試験的な利用が主であった。

1980 年代に入るとわが国では多くの指針、規準類が公表され、それに伴い SFRC の利用量も増大した。すなわち、昭和 55 年には日本トンネル技術協会⁶⁾、昭和 58 年には土木学会⁷⁾、昭和 59 年には日本コンクリート工学会⁸⁾ および日本建築学会⁹⁾ から各種の報告ならびに指針類が次々と発表され、実用のための規準類が整備された。

図 6 は、昭和 54 年度を基準として(社)鋼材倶楽部が調べた鋼繊維の推定利用量比率を年度別に示したものである。参考のために同図に建設白書(昭和 59 年版)¹⁰⁾による建設投資額比率の推移もあわせて図示してある。この図から明らかなように、鋼繊維の利用量は昭和 55 年以降、急に増大しているが、これは上記の指針や規準類が整備されたことが一つのきっかけになっているものと思われる。しかし、建設投資額が昭和 57 年以降減少するにつれ、やや遅れた形で鋼繊維の利用量も減少へと転じ、昭和 57 年度以降は昭和 54 年度のほぼ 2 倍程度にとどまっている。なお、鋼繊維の使用量増加率が建設投資額増加率のほぼ 10 倍になっていることは、今後建設投資額が増大すれば、大きく増加する可能性があることを示唆しているものといえよう。

3.2 SFRC の適用構造物と繊維混入率

図 7 は、図 6 の場合と同様に(社)鋼材倶楽部の資料に基づき、わが国における昭和 54 年から昭和 59 年までの鋼繊維の適用構造物別割合を示したものである。この図で特徴的なことは、次のとおりである。

図 6 鋼繊維の利用量と建設投資額の推移

図 7 鋼繊維の利用分野別割合と年度別変化

- (1) トンネルへの適用が多くほぼ 30% 以上を占めている。
- (2) のり面吹き付けへの適用が年とともに増加しており、昭和 58 年度では 18% 以上となっている。
- (3) 二次製品への適用は、昭和 55 年度まで多いにもかかわらずその後減少している。
- (4) 建築構造物への適用は年とともに減少する傾向が認められる。
- (5) 舗装、ダム等への適用はあまり変化していない。

これらの特徴からも明らかなように、SFRC はどちらかといえば、従来無筋コンクリート構造とされていたものや鉄筋量の少ないコンクリート構造物への適用が主となっている。また、建築構造物への適用が減少しているのは SFRC とするとコストが高くなることや、表面に現われた鋼繊維が腐食し外観を損なうことなどが原因であると思われる。なお、のり面やトンネルへの適用は、大半が吹き付けコンクリートとしての利用である。

SFRC の通常の繊維混入率は、体積で 0.5 から 2.0% の範囲である。構造物別にどの程度の繊維混入率が用いられているかを示したものが図 8 である⁷⁾。この図より、繊維混入率の高い構造物は道路および橋面舗装であり、トンネル、ダム、のり面等は少ない。舗装の場合には、SFRC が高い曲げ強度を有することを生かし、舗装厚の低減等を考慮したためであると考えられる。トンネルやのり面の場合には、SFRC を吹き付け施工することが多いため、施工上、高い繊維混入率としにくいこと等

図8 構造物別の鋼繊維混入率⁷⁾

が影響しているものと思われる。なお、建築構造物に關してはその使用が多岐にわたっているために一概にはいえないが、繊維混入率は1%程度であると推定される。

4. 諸外国における SFRC の利用

諸外国の SFRC に関する統計資料は、入手できていないので明瞭なことはいえないが、文献等に記述されていることを以下に紹介する。

すでに述べたように、欧米諸国では 1970 年代から研究活動が進められているものの、SFRC の実構造物への利用に関する報告は少ない。SFRC の設計や施工に関する指針や規準としては、米国の A.C.I. (American Concrete Institute) から 1984 年に発表されたもの¹¹⁾が唯一であるといえよう。

欧米諸国における、SFRC の利用に関する報告はわが国ほど多くないためはっきりしないが、特徴的なことは、国によって SFRC の適用対象構造物が異なっていることである。

たとえば、米国では道路用のみならず空港の舗装、とくにオーバーレイへの適用例が多く、それも舗装厚さを減らすためでなく、強度を高め耐久年数を増加させるために用いるという報告が出されている。一方、欧州では舗装やトンネルのライニング等に多く用いられており、どちらかといえばわが国に近い使用がなされているといえよう。これは、欧州諸国の自然条件がわが国に近いためであると考えられる。また、オーストラリアなどでは、米国型の舗装ならびにオーバーレイへの適用が多い

と報告されている。

5. SFRC の課題と今後の利用方法

わが国ならびに諸外国において、SFRC がどのように用いられているかを説明した。しかし、SFRC の使用量が他の建設材料に比べそれほど多くはないことは、わが国で年間に使用されるコンクリート量が 2 億 m³ 以上であることから明らかである。

この最大の原因は、SFRC のコストと得られるメリットとの関係がなかなか一致しない点であるといえよう。SFRC は材料費だけで普通コンクリートの 2 倍から 3 倍となり、施工費等を含めるとかなり高いものとなるが、それに見合った利用方法が確立されていないことである。

そこで、今後の SFRC の利用方法としては、コストに見合った利用であって、たとえばいままであまり活用されていない鉄筋を併用した構造物への利用や、力学複合以外の複合材料としての活用方法などが考えられる。以下に 2, 3 の例を示す。

5.1 鉄筋を併用した構造としての利用

図 9 は、普通鉄筋コンクリート梁と鋼繊維補強鉄筋コンクリート梁の疲労試験結果を示したもので¹³⁾、いずれもスターラップ (0.33%) を配してある。図からも明らかなように、SFRC 梁は普通鉄筋コンクリート梁に比べ高い疲労強度を有している。これは普通鉄筋コンクリート梁が剪断破壊となったのに対し、SFRC の梁ではいずれも曲げ破壊となったために生じた現象である。

図 10 は、スターラップ (腹鉄筋) のない鉄筋コンクリート梁の曲げ耐力が剪断スパン比 (a/d) によってどう変化するかを示したものである¹⁴⁾。この図で特徴的なことは、普通コンクリートの場合には a/d が小さくなると剪断破壊を生じやすくなり、最大曲げ耐力は大幅に

図9 疲労試験結果の比較¹³⁾

図10 スターラップのない単鉄筋梁の最大曲げ耐力比較¹⁴⁾

図11 ハッチ部分を SFRC によって置き換えた接合部¹²⁾

減少しているが、SFRC を鉄筋と併用した場合にはほとんど耐力の低下が認められないことである。

これらのことからわかるように、SFRC は剪断強度が高いだけでなくひび割れ発生後も応力の伝達が行なわれるため、鉄筋を併用すると構造的にもより高い安全率を有している。このような利用方法は今後、より重要となろう。また、図11に示すように、鉄筋コンクリート構造部材の接合部への適用方法などが報告されており¹²⁾、わが国の建築関係者に注目されている。

5.2 防食材料および補修材料としての利用

海洋環境下に設けられた構造物は、鋼構造物はもちろんのことコンクリート構造物であっても内部の鉄筋は海からの塩分の浸透によって腐食する。これを防止する一つの方法として、SFRC を表面に被覆する方法が考えられる。

SFRC は、その構成材料であるセメントの働きによって高いアルカリ性を有しているだけでなく、ひび割れに対する抵抗性が強いいため、これを被覆材として用いれば防食材として使用することが可能である。鋼材倶楽部が海洋環境下に設けた鋼管の被覆材として SFRC を使用した実験⁷⁾では、10 年経過後も内部の鋼管表面に発錆が

認められなかったと報告している。なお、この場合表面近傍の鋼繊維そのものに若干の腐食は認められているが、繊維の寸法が小さく、連続していないため、形成される腐食電池も小さく、腐食量も小さかったものと考えられる。

補修材料としての利用は、吹付けコンクリートとして活用すれば、防食効果等も期待することができるので今後有望であると考えられる。

6. あとがき

多くの新しい材料が開発されても、コストの問題や取扱いの問題があると、なかなか実際の製品等には使用されない。建設材料の場合も、従来のコンクリートや鋼材にとってかわるものがなかなか出現してこないが、材料の特性を考慮して、うまく材料を生かすように構造設計や材料設計を実施すれば、新しい材料を有効に使用することができる。

わが国の経済成長率が小さくなった今日、社会資本の充実ならびにその維持管理が重要視されるようになると、耐久性や安全性を必要とする構造物などは SFRC のような高い靱性および耐久性を有する材料を活用することが大切になってくる。今後、SFRC もコストに見合った適用方法が開発されるものと予想され、本文がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) J.P. Romualdi & G.B. Batson : *Proc. ASCE*, **89**, No. EM 3 (1963), 147-168.
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用一，オーム社，東京（1981）。
- 3) 岡村雄樹：日本大学学位論文（1980）。
- 4) 小林一輔，趙 力采：土木学会論文報告集，No. 300（1980），109-119.
- 5) 魚本健人，西村次男：セメント技術年報，No. 36（1982），408-411.
- 6) 日本トンネル技術協会：スチールファイバーコンクリートに関する調査研究報告書（1980）。
- 7) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），コンクリートライブラリー，第 50 号（1983）。
- 8) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準（1984）。
- 9) 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）。
- 10) 建設省編：昭和 59 年版建設白書，大蔵省印刷局（1984）。
- 11) ACI Committee 544 : *ACI J.*, **81**, 2(1984),

- 140-148.
 12) C.H. Henegar : *ACI SP-53* (1977), pp.371-381.
 13) R.K. ウイーララタナ, 魚本健人, 西村次男 : 第39回土木学会年次学術講演会講演概要集 (1984), pp.75-76.
 14) T. Uomoto & R.K. Weeraratne : *Struct. Eng. Constr.*, 1 (1986), 521-531.

日本複合材料学会誌（邦文誌）への論文投稿のすすめ

日本複合材料学会誌（邦文誌）は年6回の刊行で、各号に3～4編の邦文論文（研究論文、研究ノート、技術資料）の掲載を予定しております。会員各位の積極的なご投稿をおすすめいたします。

■**投稿資格** 本会会員に限りませんが、会員外の共同研究者を含むことはさしつかえありません。

■**原稿の種類および制限頁数**

研究論文：刷上り6ページ以内

研究ノート：刷上り2ページ以内

技術資料：刷上り6ページ以内

■**投稿の申込み** 任意の用紙に著者名、論文題目、論文種目、論文要旨（400字以内）および連絡先等を記入のうえ下記宛郵送ください。

〒113 東京都文京区湯島 2-30-9

学会誌刊行センター内

「日本複合材料学会誌」編集委員会

(TEL. 03-817-5825)

折返し、学会所定の原稿用紙（有料）をお送りいたします。論文作成の要領は原稿用紙の表紙裏面に印刷してありますのでご参照ください。

■**掲載料** 無料

■**別刷料金**

	50	100	150	200部
1～2頁	12,000	16,000	20,000	24,000円
3～4	18,000	22,000	26,000	30,000
5～6	24,000	28,000	32,000	36,000
7	40,000	45,000	50,000	55,000
8	50,000	55,000	60,000	65,000

(全表紙付、購入義務最少50部)