

鋼繊維補強モルタルの耐久性

Study on Durability of Steel Fiber Reinforced Mortar

福井勝則*・大久保誠介**・宮崎晋行***・中島武典****

Katsunori FUKUI, Seisuke OKUBO, Kuniyuki MIYAZAKI and Takenori NAKAJIMA

Three sites have been chosen to investigate the durability of SFRM. The first site is a tunnel with SFRM lining sprayed 20 years ago. Though the steel fiber on/near the surface are rusted, those buried in SFRM remain sound. The tensile strength is found to be comparable to those tested 20 years ago. The second site is a slope sprayed nine and a half years ago. Mean crack width on sprayed SFRM is considerably smaller than that on plain mortar, and the number of cracks on the sprayed SFRM is only 1/3 of that on the plain mortar. The third site is a seashore on which exposure tests started seven and a half years ago. Though some cracks are developed on surface of SFRM specimens, the rusted steel fibers are only observed in limited areas near the crack.

Key Words: SFRM, Durability, Steel Fiber, Sprayed SFRM, Carbonation

1. はじめに

トンネルの支保工や法面の保護工などに、鋼繊維補強モルタル（以下、SFRM と呼ぶ）は広く用いられている。このような土木工事では長期にわたる耐久性が必要で、SFRM にも数十年以上の耐久性が要求される。

鉄筋コンクリートでは、高アルカリ性環境のため、鉄筋の表面に不動態皮膜が形成され、鉄筋が錆びにくい環境にある。しかしながら、時間の経過とともに二酸化炭素の侵入によってコンクリートの中性化が進行したり、海岸付近では塩化物イオンがコンクリート中を拡散したりし、鉄筋の皮膜が破壊され腐食が進行していくことが報告されており、環境によっては、鉄筋の錆による体積膨張で短い期間でも鉄筋コンクリートが破損することが知られている^{1,2)}。SFRM は組成的に鉄筋コンクリートと同様であるため、経年的に腐食が進行することが考えられる。そのため、海岸での暴露試験や室内試験などで腐食環境を促進させた試験など耐久性に関していくつかの報告^{3,4)}がなされているが、SFRM の歴史は浅く、まだデータ不足の感がある。

本研究では、著者らが実施した以下に示す、3 つの SFRM の耐久性調査結果について述べる。

- 1) 1977 年 4 月に坑道に吹き付けた SFRM のボーリング調査（北海道上磯郡）
- 2) 1994 年 4 月に法面に吹き付けた SFRM の観察（静岡県蒲原郡）
- 3) 1996 年 3 月からの海岸飛沫帯における長期暴露試験（千葉県勝浦市）

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学系研究科地球システム工学専攻

** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科地球システム工学専攻

*** 東京大学大学院博士課程 工学系研究科地球システム工学専攻

**** (社)日本鉄鋼連盟スチールファイバー委員会委員長

2. 坑道での吹付 SFRM の耐久性

1977 年 4 月に日本セメント（株）上磯工場峯朗鉱山機械搬入坑道（北海道上磯郡）において日本初の吹付 SFRM の施工が行われた。施工場所は坑口から 454m～475m の間で施工長は 21m, 吹付厚は平均で 10cm, 吹き付けた SFRM は約 60m³ であった。坑道は石灰石鉱床の一部であり, 若干軟弱化した箇所では SFRM の吹付施工が行われた。

セメントとして超早強セメント, 細骨材として川砂を用いた。使用した鋼繊維は四角ねじれ形で, 断面は 0.25mm × 0.25mm で長さ 25mm のものである。SFRM はプラントで製造し, 生コン車によって現場まで搬送した後, 連続圧送式の吹付機により吹き付けを行った。並行して力学試験⁵⁾が行われ, 材令 28 日の曲げ強度 (JIS A 1106) は 5～6MPa, 圧縮強度 (JIS A 1114) は 40～60MPa, せん断強度は 7～10MPa であった。材令 1 年での中性化試験の結果は 1～2mm であった。

坑道からの SFRM の切り出しは, 図-1 に示すようにボーリングによって, 吹付施工後約 20 年経過した 1995 年 7 月 31 日に行った。坑道壁面から水は湧き出しておらず, 若干湿っている程度である。付近の湧き水がある箇所から水を採取し分析したところ, 平均的な河川水に比べて, Cl^- , SO_4^{2-} が少なく, HCO_3^- が多くなっており, 石灰石中を通った水と空気中の二酸化炭素によって, CaCO_3 を溶解させたものと考えられる。

試験体採取時に, 坑内の温度および湿度を測定した結果, 温度は 11～14℃, 湿度は 80～95% であり, 坑口から 500m ほど離れていることから推定して, 温度に関しては年変化および日変化はさほどなくほぼ一定であると考えられる。坑内の二酸化炭素の測定も行ったが, 0.03% と通常の値とほぼ同じ程度であり, 通気が行われていることもあわせ考えると, 外気とほぼ同じ組成であると考えられる。

坑道壁面を目視観察した結果, 表面に露出している鋼繊維はすべて錆が発生していた。この壁面に露出している鋼繊維のいくつかをモルタルから引き抜いたところ, モルタル中にあった部分は錆びていなかった。また, ボーリングで採取したコアの側面を観察した結果, 錆びているのは表面だけで内部に存在する鋼繊維は全く錆が発生していないことが判明した。このことを確認するために, 採取した円柱形供試体 (直径 10cm) を吹き付け面に平行に 3cm ごとに切断し, それを微粉砕し, その中から鋼繊維を採取した。採取した鋼繊維を観察した結果, 坑道壁面の鋼繊維以外は錆びていないことがわかった。

フェノールフタレイン法によりモルタルの中性化深さを調べた。採取した円柱形供試体 (直径 10cm) を圧裂引張試験で破壊させ, 破断面をはけで十分清掃した後, フェノールフタレイン 1% エタノール溶液を直接噴射し, 中性化深さを求めた。6 力所から採取した SFRM の中性化深さを測定した結果, 平均で 5mm であった。普通コンクリートの中性化深さの推定式⁶⁾を用いて計算すると 20 年で中性化深さは 9mm となり, 推定値に比べて若干中性化深さが小さい。次に JIS 8802 に基づいてモルタルの pH の測定を行ったが pH は約 12 であり, このことからほとんど中性化していないことがわかった。

鋼繊維が混入していないプレーンモルタルと鋼繊維約 1% の SFRM に対して一軸引張試験を実施し, 吹付後 20 年経過した両者の力学特性を比較した。吹付 SFRM の場合, 鋼繊維の配向により力学

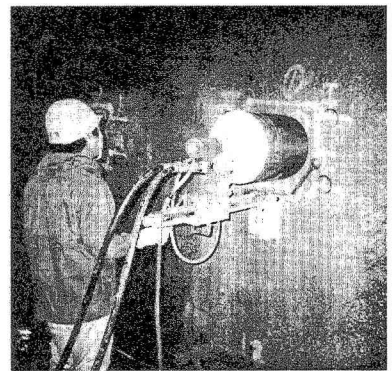


図-1 峯朗鉱山の SFRM 坑道

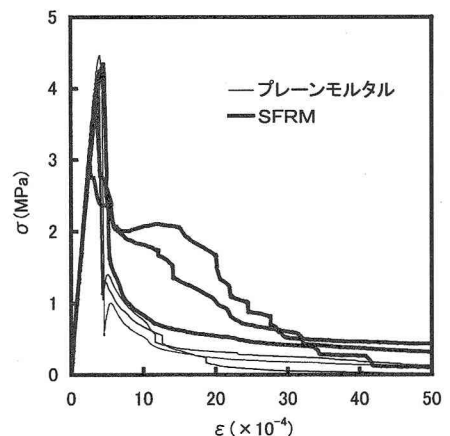


図-2 一軸引張試験結果

的特性に異方性が生じる。そこで吹き付け方向（a 方向）と、それに鉛直な方向（b 方向）の 2 方向からボーリングし試験体を作製した。供試体の寸法は直径 3cm、高さ 6cm の円柱形とし、同一条件で 3 本ずつの試験を行った。a 方向の一軸引張試験の応力-歪曲線を図-2 に示す。a 方向の場合、鋼繊維の有無によらず強度は 4.5MPa である。強度破壊点以降、プレーンモルタルは急激に応力が減少しているのに対して、SFRM では徐々に応力が低下しており、鋼繊維の混入により延性化している。これは強度破壊点でモルタル部が破断した後、モルタルからの鋼繊維の引き抜き抵抗が現れているためである。b 方向の場合、強度は 2MPa 程度と a 方向の半分以下であった。これは吹付モルタルが吹付面と平行な層をなし、層間は比較的分離しやすいためである⁷⁾。ばらつきはかなり大きい。b 方向の場合、鋼繊維の混入により強度は変化しているとはいえなかった。強度破壊点以降では SFRM の方が、若干延性的な傾向がうかがえるものの、a 方向ほどは改善されていない。この理由として、鋼繊維は b 方向では破断面と平行に配向しており、鋼繊維の引き抜き抵抗がほとんど作用しないためである。これらの事項は、著者ら⁷⁾が、吹付後 1 年程度経過した SFRM を実験した結果と定性的に一致しており、20 年の経過後もその特性を保存していることがわかる。材令 28 日で a 方向に破壊するように曲げ試験⁹⁾が行われており、5~6MPa の曲げ強度が得られている。試験方法が異なるので、両者の定量的な評価は難しいが、曲げ強度が一軸引張強度より大きくなることを勘案すれば、さほど劣化しているとは判断できない。SFRM の一軸引張強度はプレーンモルタルとほぼ一致しており、間接的ではあるが、経年的にさほど劣化していないと考えられる。

3. 法面での吹付 SFRM のひび割れ調査

1994 年 4 月に静岡県蒲原郡中川根町の県道の補修工事で、図-3 に示すように長さ 100m、高さ 20m、傾斜 65° の法面にプレーンモルタルと SFRM をそれぞれ 1000m² 吹き付けた地点を調査した。モルタルの配合は両者とも同じで、SFRM の鋼繊維混入率（体積）は 1% である。プレーンモルタルは補強用に金網とボルトを設置した後、エア式により吹付厚 8cm で施工した。SFRM は補強用ボルトを設置した後、ポンプ式により吹付厚 7cm で施工した。吹付が終了した後、プレーンモルタルでひび割れが多く見られたので、2 週間後に修復工事を行った。

図-4 に SFRM とプレーンモルタルの境界付近を写真で示すが、向かって右側が SFRM で、左側がプレーンモルタルである。左側で白く見えているのが、修復工事の跡である。SFRM 法面とプレーンモルタル法面の境界からそれぞれ左右に 30m の区間、路面からの高さ 0.5m~1.5m の 1m 区間において、1997 年 11 月 11 日（吹き付け後 約 3.5 年経過）に法面のひび割れ状況を調査した結果を図-5 に示す。プレーンモルタルで修復工事がなされたひび割れは図-5 には含まれていない。図ではプレーンモルタルで多数のひび割れが観測されているのに対して、SFRM では比較的ひび割れは少なく、広い範囲内でひび割れがない箇所が見られる。単位面積あたりのひび割れ長さの和を求めると、プレーンモルタルで

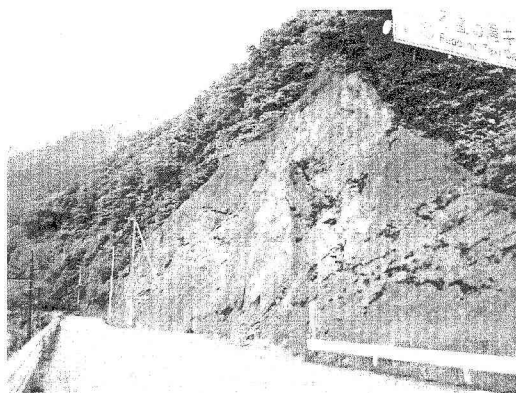


図-3 静岡県蒲原郡の法面

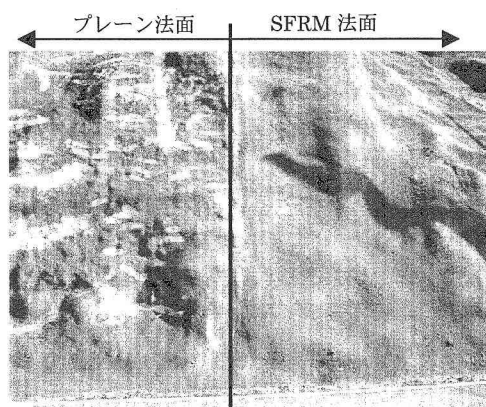


図-4 ひび割れ調査地点

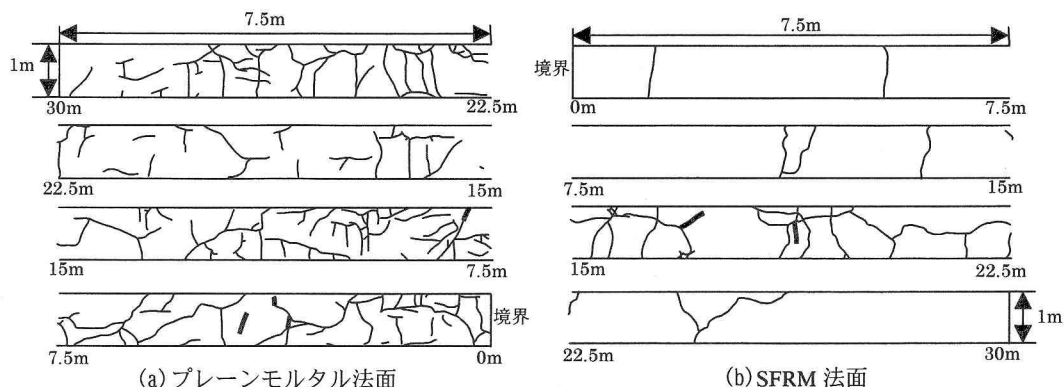


図-5 ひび割れ調査結果。細線は1997年の調査結果。太線は2000年調査での新規ひび割れ

290cm/m², SFRM で89cm/m²と3倍程度、プレーンモルタルのひび割れが多い。路面から1mの高さでひび割れ間隔を測定すると、プレーンでは平均値53.4cm(標準偏差37.7cm), SFRMでは平均値139.3cm(標準偏差150.1cm)であった。観測箇所20点ずつ選んで、ひび割れ幅をクラックゲージで測定した結果、プレーンモルタルで0.28mm, SFRMで0.21mmとややSFRMのひび割れの方が小さい傾向が見られた。

図-5に示すようにプレーンモルタルではひび割れが交わると、T字型のものが多く見られたのに対して、SFRMではひび割れが交差している場合が見られた。プレーンモルタルではひび割れによって2つに分離しその間には力の伝達がなくなり、新たに発生したひび割れが既存のひび割れにぶつかると停止しているのに対して、SFRMではひび割れ中の鋼繊維により既存のひび割れをまたいで応力が作用するため、複雑に交差したひび割れが発生しているものと考えられる。このことから、ひび割れが発生しても、ひび割れと垂直方向の引張応力が0とならずにいることがわかり、法面の保護工として望ましいものであると考えられる。

2000年10月24日(吹付後約6.5年経過)に法面のひび割れ状況を調べ、1997年から2000年の間に新たに発生したひび割れを図-5に太線で示す。両者とも3本程度の増加であり、さほどひび割れは増えていないが、プレーンモルタルで8m, 14m, 17m付近のひび割れ幅が0.6mm程度に拡大して、水分が染み出していた。

4. 海岸飛沫帯でのSFRMの耐久性

繊維は、鋼製(厚板切削法で製作された三日月形両端フック型)とステンレス製(溶解抽出法で製作されたドックボーン型)の2種類を用い、繊維混入率は1%とした。比較のため、プレーンモルタルも用いることとし、計3種類を型枠(15×15×53cm)に打ち込む方法で、水セメント比は60%、細骨材率は100%とし、1996年3月7日に製作した。打設後2週間水中養生を行った後、脱枠したブロックから直径3cm、高さ6cmの円柱形試験体を作製し、これを暴露した後に一軸圧縮試験を行うことにした。試験体の端面が傷まぬように、両端面にプラスチック製のキップを取り付け保護した。なお、打設で製作すると水平方向に鋼繊維は配向する。一軸圧縮試験では、载荷方向と垂直な方向に繊維が配向している方が繊維の補強効果が大きい⁸⁾ため、ブロックを垂直方向からボーリングした。



図-6 暴露試験場

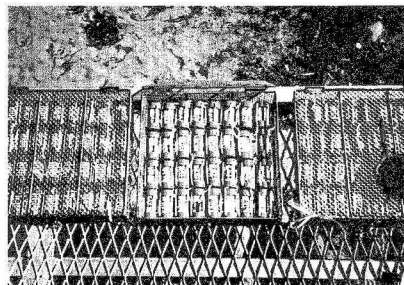


図-7 試験体の設置状況

千葉県勝浦市鵜原町の太平洋に面した海岸線（外房）において、図-6 に示すように護岸に試験体を放置するためのステージを設けた。ステージは、満潮時でも海面より 1m 程度上方にあるので、常時は海水に浸かる位置でないが、大波が押し寄せた場合には海水に浸ることとなる。このような海岸飛沫帯では十分な酸素の供給があるため、海水中より腐食しやすい。図-7 に示すようにステージ上に置いたステンレス製のかごの中に試験体を入れて、1996 年 5 月から暴露を開始した。また、海岸での暴露試験体と比較するため、温度、湿度管理されている実験室内でも、同じブロックから作製した試験体を放置した。

1996 年秋、千葉県に大型台風が直撃し、後の調査で波が護岸を越えていた。試験体をいれたかごが大きく変形し、波によってかごの中で試験体が激しく動いていたことが推定され、海岸での暴露は力学的にも過酷な条件下にある。また、吹付の際に跳ね返り、海岸に落ちた鋼繊維は、1 年後には内部まで腐食が進行して、手で簡単に折れた。これらより考えて、かなり腐食が進行しやすい状況であることがわかった。

実験室内に放置した試験体は、ほとんど錆の発生はなく、7.5 年経過した現在も見目の変化はなかった。他方、暴露 4.5 ヶ月後の試験体の側面は、微細に侵食され、やや荒れた状態であった。試験体表面に露出している鋼繊維はすべて錆が発生していた。1 年間暴露された試験体を切断して、フェノールフタレイン溶液で中性化を調べた結果、表面はすべて中性化されているが、中性化深さは平均で 1mm 以下であった。また、切断面に現れた鋼繊維は錆びているのは表面だけであり、内部は健全であった。その後も調べたが中性化深さはわずかに徐々に増加傾向を示し、現在では 2~3mm 程度であった。4 年経過した時点では、試験体側面の侵食は激しくなっており、試験体表面の鋼繊維は腐食が進行しかなり膨張していた。ステンレス繊維の方も、わずかであるが白っぽく変色しており、腐食が見られた。ただし、ボーリングによって試験体を作製したため、側面に現れているステンレスはボーリング時に切断されており、そのため腐食が生じやすかった可能性がある。5 年を経過した段階で、鋼繊維の試験体の一部でひび割れが見られるようになった。7.5 年経過した現在の鋼繊維試験体の一例を図-8 に示すが、鋼繊維試験体の表面に錆びによるひび割れが目立つ。図-8 にはその試験体の CT スキャンによる断面撮影結果を示す。白く見えているのが鋼繊維であり、試験体中に黒く線状に見えているのが内部に発生しているひび割れであり、内部までひび割れが進行しているのがわかる。ただし、切断し内部を観察すると、ひび割れ付近では鋼繊維の錆は見られるものの、ひび割れがない場合には鋼繊維は健全であった。

暴露後 4.5, 12, 24, 36, 60, 84 ヶ月経過した試験体を実験室に持ち帰り、室内に放置した試験体と合わせ、一軸圧縮試験を行った。海岸で暴露した場合、日照や降雨の影響で、室内に放置した試験体と含水量が変化しやすい。そこでこの影響を減らすため、3 週間程度、実験室で放置してから一軸圧縮試験を実施した。図-9 に一軸圧縮強度の経年変化を示す。暴露後 4.5 ヶ月の時点では室内に比べ、海岸で暴露した試験体の一軸圧縮強度が若干大きい。土木学会⁹⁾でも同様の

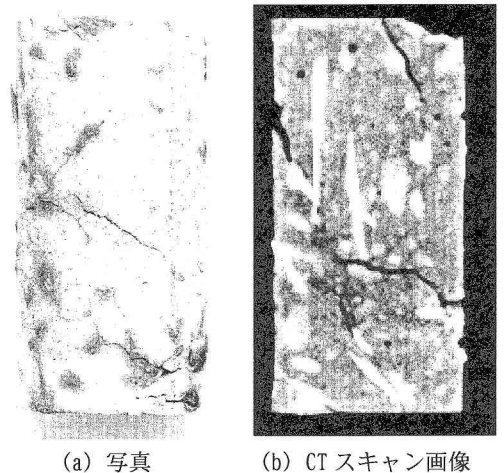


図-8 鋼繊維試験体(暴露 7.5 年経過)

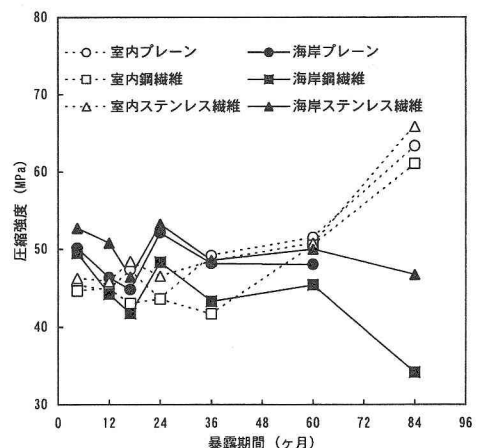


図-9 一軸圧縮強度の経時変化

報告がなされており、海岸で暴露したことでセメントの水和反応が促進され、強度の増加が見られたのではないかと考えられる。室内で放置した試験体では、暴露後 60 ヶ月までさほど一軸圧縮強度の変化は見られないが、84 ヶ月で一軸圧縮強度は大きく増加している。試験体は見た目ではほとんど変化がないことから、今後の実験結果を待ちたい。他方、海岸で暴露した試験体では、60 ヶ月までは多少の上下は見られるものの、強度の変化はさほど見られていない。84 ヶ月ではステンレス試験体はほぼ同じであるが、鋼繊維試験体が急激に低下している。これは図-8 に示したように試験体のひび割れが増加した影響であると考えられる。なお、2002 年秋の台風でプレーンモルタルの試験体がすべて流されてしまい、試験を行うことができなかった。

土木学会コンクリート委員会¹⁾は、塩害に関するデータをまとめており、本研究の暴露設置位置（強風時は海水飛沫を受け、風が弱い時には直接海水飛沫は受けないが、塩化物イオンを含んだ潮風にさらされた環境）で 7 年経過した場合、コンクリート表面から 30mm, 50mm, 80mm の位置で拡散による塩化物イオン含有率は最大でそれぞれ 6%, 3%, 1%であるとしている。鉄筋コンクリートでは錆の発生が顕著となる、塩化物イオンは 0.15%であるとされており¹⁾、今回の条件に適用すると、試験体内部の鋼繊維に錆が発生している可能性があるが、実際にはひび割れ近傍にない鋼繊維は錆びていないことから、鋼繊維は鉄筋に比べ、特に錆びやすいという特徴はないことがわかる。土木学会⁹⁾で掲載されている鋼繊維補強コンクリートの 5 件の暴露試験でも、暴露期間が 4 年では強度はさほど変化しておらず、本研究と同様の結果である。これらの研究で暴露期間の最長は 5 年 8 ヶ月であり、本試験は 7 年目にしようやく強度が低下する程度に腐食が進行した。

5. まとめ

本研究では SFRM の耐久性のデータを取得するために、3 地点で耐久性調査を行った。北海道上磯郡で 20 年前トンネル坑道に吹き付けた SFRM のボーリング調査を行い、坑道表面の鋼繊維は錆びていたが、内部は健全で、力学試験でも吹き付けた直後と定性的に同じような特性を示した。静岡県蒲原郡で 9.5 年前法面に吹き付けた SFRM のひび割れ観察を行った結果、プレーンモルタル法面に比べ SFRM 法面では、ひび割れ数が少なく、ひび割れ幅も小さいことがわかった。また、SFRM ではひび割れが交差する現象が見られ、鋼繊維による応力の伝達が存在していることもわかった。千葉県勝浦市で 7.5 年前から海岸飛沫帯において暴露を行い、鋼繊維試験体はひび割れが生じ、強度の低下が見られたが、内部の鋼繊維は錆が生じておらず、ステンレス試験体は健全であった。

このような長期試験は手間ひまのかかる試験であるが、耐久性調査は重要であると考えられ、今後も継続していくつもりである。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案，丸善，p.21-51，2002
- 2) 長滝重義：コンクリートの長期耐久性，技報堂，p.5-38，1996
- 3) 小林一輔他：土木学会論文集，第 414 号，V-12，p.195-203，1990
- 4) 下澤和幸・田村博・永山勝：コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，p.801-806，2002
- 5) 高木隼二(1979)：セメント・コンクリート，No.389，6 月号，p.8-15，1979
- 6) 井上寛美他：土木学会論文集，第 391 号，VI-8，p.46-55，1988
- 7) 福井勝則他：資源・素材学会誌，Vol.112，No.2，p.69-74，1996
- 8) 楊勤他：資源・素材学会誌，Vol.113，No.9，p.655-661，1997
- 9) 土木学会編：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