

炭素繊維補強コンクリートの摩耗特性

豊福俊英, 片岡譲治

EXPERIMENTAL RESEARCH ON ABRASION RESISTANCE OF
CARBON FIBER REINFORCED CONCRETE

Toshihide TOYOFUKU and Jyoji KATAOKA

The effects of carbon fiber (0.5 and 1.0% by volume of concrete) on the strength and abrasion resistance of concrete are discussed. All carbon fiber mixture were evaluated based on a comparison with a control mixture containing no fiber reinforcing.

Test results have shown that carbon fibers increase the tensile and flexural strength of concrete when bonding is adequate; abrasion resistance is also greatly increased. But, the compressive strength of concrete containing carbon fiber are not increased.

概 要

炭素繊維補強コンクリートの強度および摩耗について、その補強効果を実験的に検討した。曲げ及び引張強度は繊維の混入により改善が認められたが、圧縮強度においてその効果は認められなかった。また、擦り磨き摩耗試験の結果、繊維混入量を1.0%以上行うことが必要であると思われる。一方衝撃摩耗試験の結果、衝撃摩耗量は繊維混入量にほぼ比例してその効果（摩耗量の減少）が認められた。

1. はじめに

河川増水時の土石流の繰り返しや衝突による摩耗を受ける用水路や航空機の着陸時の衝撃を受ける滑走路などのように、表面に外力が繰り返し作用するコンクリート構造物では、強度と共に摩耗に対する抵抗性が重要である。

その際コンクリートの摩耗に対する抵抗性の改善方法として各種の繊維による補強が考えられ、例えば道路舗装用コンクリートでは鋼繊維による補強が研究されてきた。しかし、鋼繊維補強コンクリートを農業用水路に適用した場合、錆に対する問題が残る。これに対して、炭素繊維補強コンクリートは水分環境において腐食の心配はない。

そこで、本研究では炭素繊維補強コンクリートに作用する摩耗現象を、表面に力が平行に作用する擦り磨き摩耗と、表面に力が直角に作用する衝撃摩耗とに分けて実験的に検討しようとするものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは3社 (F社, C社, 及びU社) の普通ポルトランドセメントを等量混合して使用した。各社のセメント試験成績表を表2-1に示す。

表2-1 セメント試験成績表

| | 比重 | 比表面積 (cm ² /g) | 凝 結 | | | 安定性 | 圧縮強さ (kgf/cm ²) | | | 酸化 マグネ シウム (%) | 三酸化 硫 黄 (%) | 強熱 減量 (%) | 塩素 (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) | R ₂ O (%) | 備 考 |
|------------|------|------------------------------|-----------|-----------|------------|-----|-----------------------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------|-----------------|-----------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| | | | 水量 (%) | 始発 h-m | 終結 h-m | | 3日 | 7日 | 28日 | | | | | | | | |
| 普通セメント | 3.15 | 3220 | 28.5 | 2-35 | 3-40 | 良 | 149 | 262 | 427 | 1.4 | 2.0 | 0.9 | 0.007 | 0.27 | 0.54 | 0.63 | ユニオンセメント |
| 〃 | 3.16 | 3290 | 27.9 | 2-20 | 3-47 | 良 | 146 | 250 | 420 | 1.9 | 2.0 | 1.1 | 0.007 | 0.28 | 0.50 | 0.61 | 不二セメント |
| 〃 | — | 3380 | 26.2 | 2-20 | 3-14 | — | 155 | 250 | 428 | 1.6 | 1.9 | 1.1 | 0.005 | 0.29 | 0.47 | 0.60 | 中央セメント |
| JIS R 5210 | — | 2500 以上 | — | 60m 以後 | 10h. 以内 | 良 | 70 以上 | 150 以上 | 300 以上 | 5.0 以下 | 3.0 以下 | 3.0 以下 | — | — | — | — | |

$$R_2O = Na_2O + 0.658 \cdot K_2O$$

(2) 骨 材

細骨材は海砂 (比重2.56, 粗粒率2.44, 吸水率2.30%) で、粗骨材は多和産の碎石 (比重2.59, 粗粒率6.22, 吸水率1.78%, 最大寸法15mm) である。

(3) 水

水は水道水を、水温20°Cにして使用した。

(4) 混 和 剤

混和剤はK社製アニオン型特殊高分子活性剤をAE減水剤として使用した。

(5) 炭 素 繊 維

炭素繊維は、M社製のチョップドストランドタイプのピッチ系炭素繊維 (密度2.0g/cm³, 繊維長18mm) を使用した。

2.2 コンクリートの配合

(1) 試験練り

① 最適細骨材率の決定

最初に、炭素繊維の混入量 (以下簡単に、繊維混入量という) を0.0, 0.5及び1.0%の3種類に対して、最適細骨材になるように細骨材率を決めた。ここで、最適細骨材率とは水セメント比 (W/C=0.55) 及び単位水量を一定にして、細骨材率を変化させて、スランプが最大となるときの細骨材率として求めた。また、繊維混入量は、コンクリート全体の体積に対する百分率である。

② 単位水量の決定

①で求めた最適細骨材率を用いて、水セメント比を一定にして、単位水量を変化させ、所定のスランプ(10±1.0cm) が得られる単位水量を求めた。

③ 試験練り方法

コンクリートの練り混ぜは恒温恒湿室 (20±2°C, 湿度60%) 内で行った。また各材料は試験日の前日に恒温恒湿室内に置いて温度を一定にしたものを使用した。練り混ぜ方法は、炭素繊維を混入しない配合では粗骨材、細骨材及びセメントの順で強制練りミキサーに投入後混合しながら水を投入し、水を入れ終わってから2分間練り混ぜた。また炭素繊維を混入した配合では粗骨材、細骨材及びセメントの順で強制練りミキサーに投入混合しながら水を投

入し, 水を入れ終ってから1分30秒間練り混ぜた後に炭素繊維を入れさらに30秒間練り混ぜた。

さらに, JIS A 1115 に従って, 練り混ぜたコンクリートをミキサーから採取して試料とし, この試料を用いて, スランプ試験 (JIS A 1101) 及び空気量試験 (JIS A 1128) を行った。

④ 試験練りの配合

試験練りの配合, スランプ及び空気量試験の結果を表 2-2 に, また最適細骨材率を求めるための細骨材率とス

表 2-2 試験練りの配合表および結果

| W/C (%) | S/a (%) | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | | | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 備 考 |
|---------|---------|----------------------------|-----|-----|------|------|------|-----------|---------|------------|
| | | W | C | S | G | CF * | 混和剤 | | | |
| 55.0 | 36.0 | 210 | 382 | 591 | 1067 | — | — | 5.3 | 0.9 | 繊維混入量 0.0% |
| 〃 | 38.0 | 〃 | 〃 | 624 | 1033 | — | — | 6.1 | 1.0 | 〃 |
| 〃 | 40.0 | 〃 | 〃 | 658 | 1000 | — | — | 10.2 | 0.9 | 〃 |
| 〃 | 42.0 | 〃 | 〃 | 691 | 966 | — | — | 10.1 | 1.5 | 〃 |
| 〃 | 44.0 | 〃 | 〃 | 724 | 932 | — | — | 7.8 | 1.2 | 〃 |
| 〃 | 46.0 | 〃 | 〃 | 757 | 899 | — | — | 6.2 | 1.6 | 〃 |
| 55.0 | 40.0 | 165 | 300 | 748 | 1132 | — | 3.00 | 10.0 | 1.0 | 〃 |
| 〃 | 〃 | 185 | 336 | 714 | 1085 | — | 3.36 | 16.5 | 1.2 | 〃 |
| 55.0 | 50.0 | 270 | 491 | 715 | 723 | 10 | 4.91 | 8.8 | 1.6 | 繊維混入量 0.5% |
| 〃 | 55.0 | 〃 | 〃 | 787 | 651 | 〃 | 〃 | 10.1 | 1.5 | 〃 |
| 〃 | 60.0 | 〃 | 〃 | 858 | 571 | 〃 | 〃 | 9.5 | 1.5 | 〃 |
| 〃 | 65.0 | 〃 | 〃 | 929 | 506 | 〃 | 〃 | 9.3 | 1.7 | 〃 |
| 55.0 | 60.0 | 330 | 600 | 705 | 476 | 20 | 6.00 | 8.3 | 1.8 | 繊維混入量 1.0% |
| 〃 | 65.0 | 〃 | 〃 | 764 | 416 | 〃 | 〃 | 9.9 | 1.8 | 〃 |
| 〃 | 70.0 | 〃 | 〃 | 822 | 357 | 〃 | 〃 | 8.8 | 1.7 | 〃 |

(注) 粗骨材の最大寸法15mm, 混和剤は花王マイティ2000をセメント重量の1%使用
*炭素繊維 (CF) は三菱化成 (髒ダイアリード (繊維長 L = 18 mm))

ランプとの関係を図 2-1 に示す。

(2) 示方配合

試験練りの結果より, 水セメント比W/C=0.55, スランプ10 (±1.0) cm及びそれぞれの繊維混入量に対して求められた最適細骨材率を用いて, 表 2-3 のように示方配合を決めた。

2.3 摩耗試験方法

摩耗試験は, 2.2で求めた配合のコンクリートに対して, すべて材令28日で, 擦り磨き摩耗試験及び衝撃摩耗試験の2種類について行った。

(1) 擦り磨き摩耗試験

① 供試体

供試体は, 内径13cm, 外径25cm及び高さ10cmの中空半円形のものであり, 各繊維混入量に対して6体ずつ作成した。また同時に, 圧縮, 曲げ及び引張強度試験用の供試体も各々3体ずつ作成した。

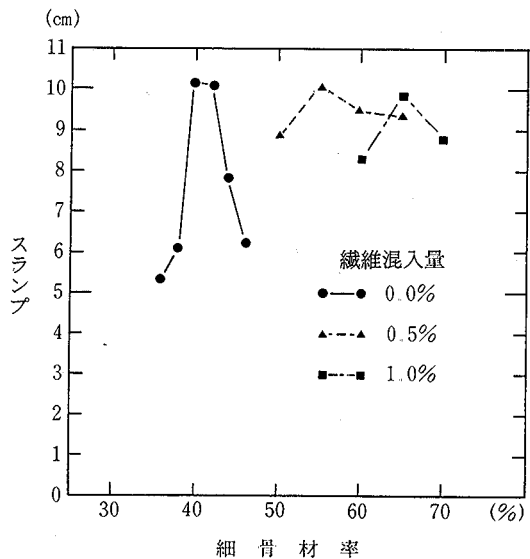


図 2-1 最適細骨材率の決定

表2-3 摩耗試験に使用したコンクリートの配合表

| W/C (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | スランプの範囲 (cm) | 空気量の範囲 (%) | 備考 |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|------|------|--------------|------------|------------|
| | | W | C | S | G | CF * | 混和剤 | | | |
| 55.0 | 40.0 | 165 | 300 | 748 | 1132 | — | 3.00 | 10.0±1.0 | 1.5±0.5 | 繊維混入量 0.0% |
| 55.0 | 55.0 | 270 | 491 | 787 | 651 | 10 | 4.91 | 10.0±1.0 | 1.5±0.5 | 繊維混入量 0.5% |
| 55.0 | 65.0 | 330 | 600 | 764 | 416 | 20 | 6.00 | 10.0±1.0 | 1.5±0.5 | 繊維混入量 1.0% |

(注) 粗骨材の最大寸法15mm, 混和剤は花王マイティ2000をセメント重量の1%使用

* 炭素繊維 (CF) は三菱化成(株)ダイアリード (繊維長L = 18mm)

② 試験装置

擦り磨き摩耗試験は、M社製の掃流試験機を用いて行った。この試験機は、槽内に水 (9.5ℓ) 及び砂 (2kg) を入れ、回転するプロペラを用いて槽内に入っている水及び砂を攪はんさせ、供試体の内面を摩耗させる方法のものである。プロペラの回転速度は、低速度 (2~18回/分)、中速度 (18~180回/分) 及び高速度 (180~1800回/分) の3段階に調節が可能なものであるが、今回の試験では1800回/分の高速度回転で行った。掃流試験機の概要を図

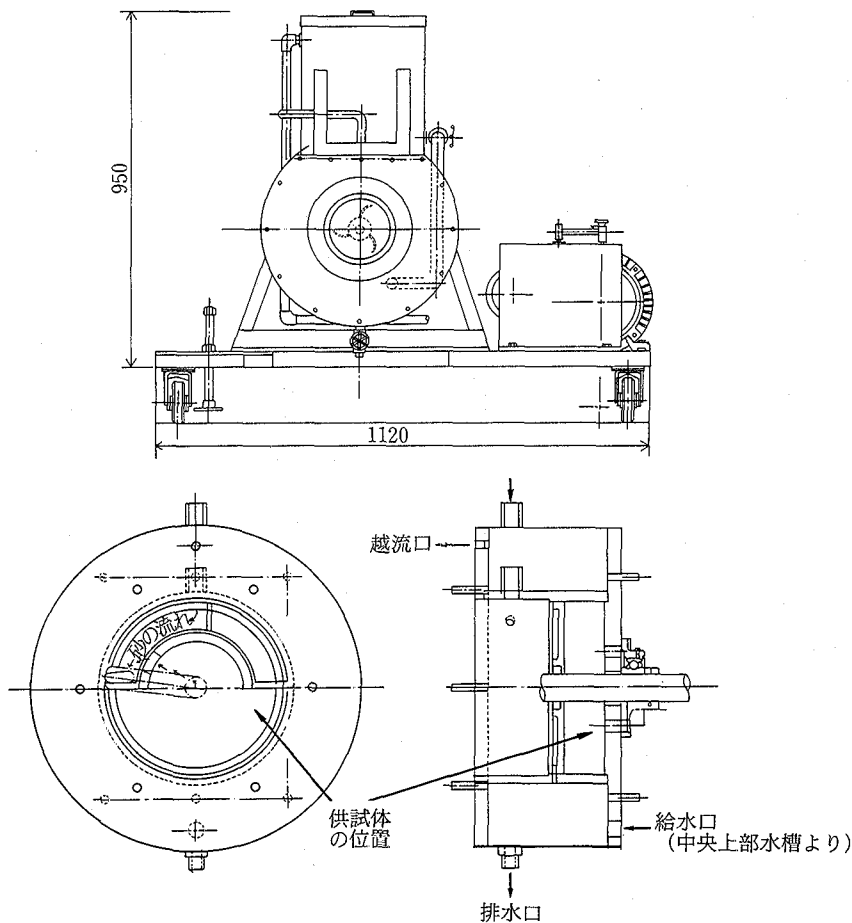


図2-2 掃流試験機

2-2に示す。

③ 試験方法

供試体は、繊維混入量の異なるもの各々6体で、標準養生後材令28日で摩耗試験を行った。摩耗試験はA及びBシリーズの2シリーズについて行った。

Aシリーズ：6体の内4体について、1及び3時間後にそれぞれ掃流試験機から取り出して重量を測定すると共に砂を取り替えて擦り磨き摩耗試験を5時間後まで行った。

Bシリーズ：残りの2体については最初の状態（すなわち途中で砂の交換を行っていない）で5時間後まで擦り磨き摩耗試験を行った。

A及びBシリーズ共に、擦り磨き摩耗量は体積及び重量について求めた。すなわち、体積については、標準養生後恒温水槽から取り出した供試体の水中重量と表面を拭いた後の重量の差を用いて体積とし、所定の擦り磨き時間後の体積の変化量を擦り磨き摩耗量（体積）とした。また重量については、標準養生後恒温水槽から取り出した供試体の表面を拭いて求めた重量と擦り磨き試験後掃流試験機から取り出して表面を拭いた後求めた重量の差を擦り磨き摩耗量（重量）とした。

(2) 衝撃摩耗試験

① 供試体

供試体は、幅15cm、高さ15cmの直方体のものであり、各炭素繊維混入量に対して各々3体ずつ作成した。また同時に圧縮、曲げ及び引張強度試験用の供試体も各々3体ずつ作成した。

② 試験装置

高さ100cmの位置から、鋼球（直径5cm、重量506g）を落下させて、その衝撃による擦り減りを調べる。供試体の固定台には、鋼球を落下させたときに供試体の上面で跳ね返りを防ぐため、30度の角度をつけた。衝撃摩耗試験装置の概要を図2-3に示す。

③ 試験方法

供試体は、標準養生後材令28日のもので、繊維混入量の異なるもの各々3体である。

衝撃摩耗試験は高さ100cmの位置から鋼球を落下させて、200、400、600及び800回の衝撃繰り返し後に摩耗量を調べた。

衝撃摩耗量は、体積及び重量について求めた。すなわち、体積については、標準養生後恒温水槽から取り出した

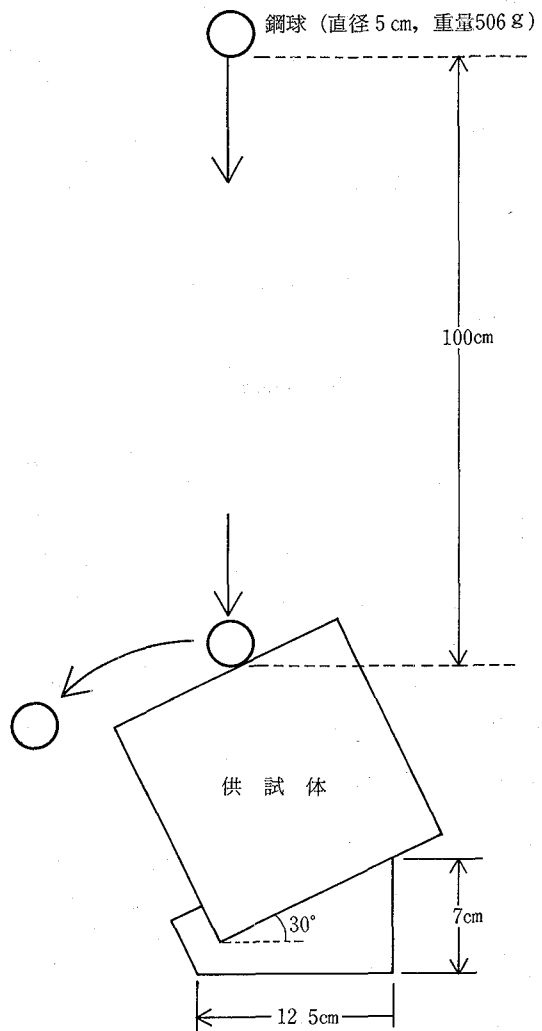


図2-3 衝撃摩耗試験装置

供試体の水中重量と拭いた後の重量の差を用いて体積とし、所定の擦り減り時間後の体積の変化量を衝撃摩耗量(体積)とした。

また重量については、標準養生後恒温水槽から取り出した供試体の表面を拭いて求めた重量と衝撃試験後求めた重量の差を衝撃摩耗量(重量)とした。

3. 実験結果及び考察

実験結果を図3-1~6に示す。

3.1 コンクリートの強度試験結果

コンクリートの圧縮、曲げ及び引張強度試験結果を図3-1及び2に示す。図3-2には炭素繊維を混入していないものを100%とした、各種の強度比を百分率で示した。

圧縮強度では、繊維混入量が0.5及び1.0%の場合、0.0%のものと比較してそれぞれ88及び95%と、炭素繊維の混入により幾分圧縮強度が低下する傾向を示した。これは炭素繊維の混入により、コンクリートの空気が表2-3に示したように、繊維混入量が0.5及び1.0%の場合それぞれ0.5及び0.8%程度大きかったこともその一因と考えられる。

これに対して、引張及び曲げ強度では繊維混入量の増加につれて、強度もほぼ直線的に大きくなる傾向を示した。すなわち、繊維混入量が0.5及び1.0%の場合、繊維混入量0.0%の場合を100%として比較すると、引張強度はそれぞれ109及び118%に、また曲げ強度はそれぞれ142及び185%の値を示した。特に、曲げ強度では炭素繊維の混入量が1.0%で、繊維混入量0.0%に比較して、85%もの強度の

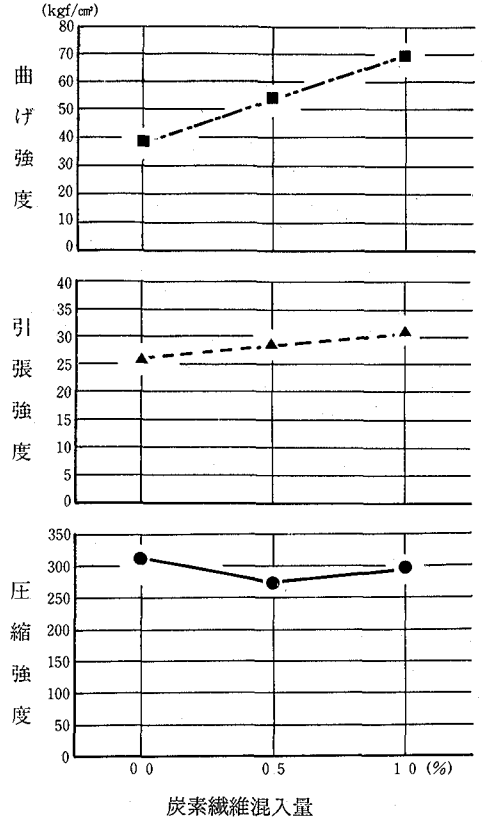


図3-1 炭素繊維補強コンクリートの各種強度試験結果

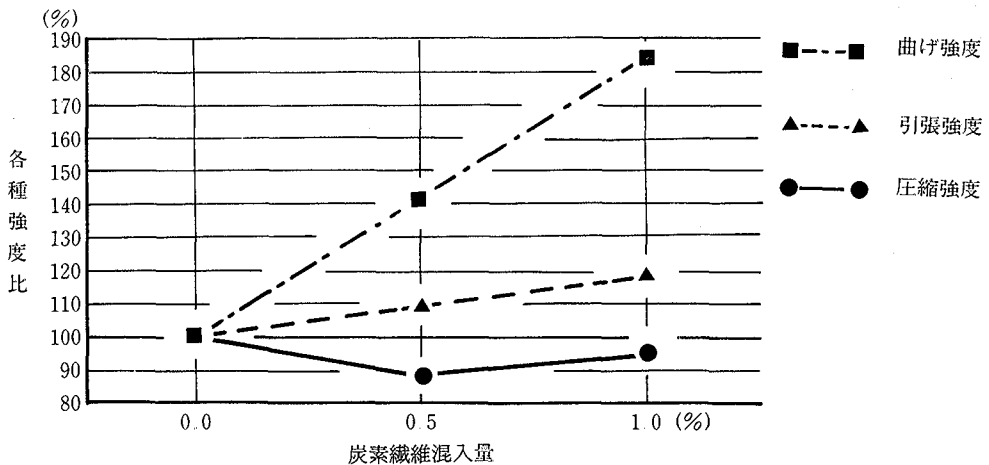


図3-2 炭素繊維補強コンクリートの各種強度試験結果

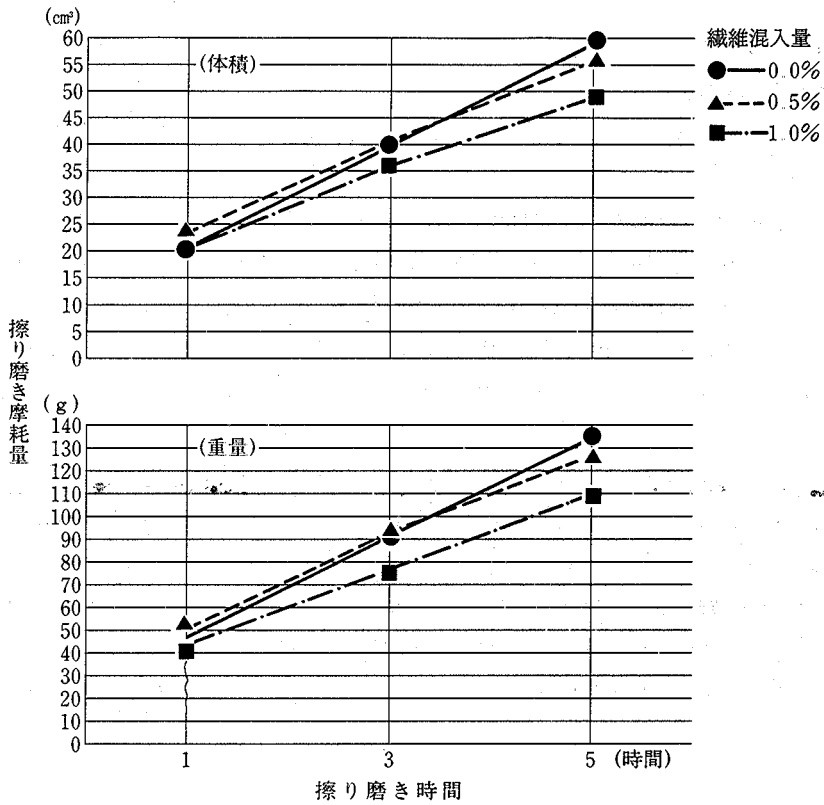


図3-3 炭素繊維補強コンクリートのすり磨き摩耗試験結果

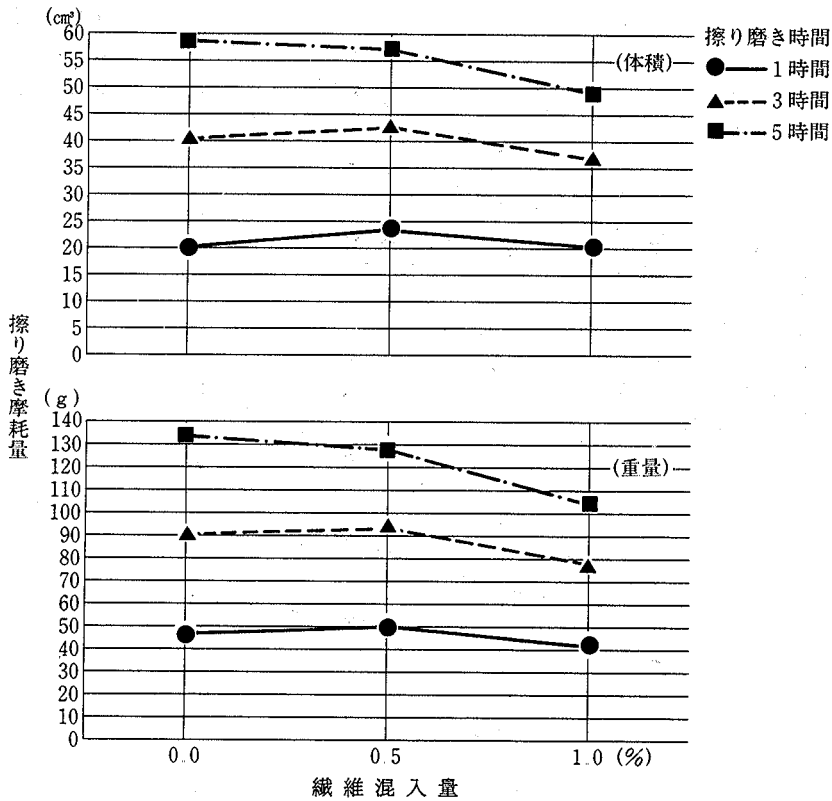


図3-4 炭素繊維補強コンクリートのすり磨き摩耗試験結果

増加が認められた。

3.2 擦り磨き摩耗試験結果

Aシリーズの擦り磨き摩耗試験の結果を図3-3及び4に示す。前者では擦り磨き時間を、後者では繊維混入量を横軸にとって表した。

Aシリーズでは、擦り磨き時間が1～3時間程度までは、繊維混入量が0.5%の場合、繊維混入による補強効果の増加はほとんど認められず、5時間後から幾分その補強効果が認められる結果を示した。これに対して、繊維混入量が1.0%の場合1時間後から補強効果が認められた。繊維混入量0.0、0.5及び1.0%に対し、5時間後の擦り減り摩耗量(体積)ではそれぞれ59.1cm³(100%：以下括弧内に繊維混入率0.0%のものを100%とした比率を示す)、57.2cm³(97%)及び48.8cm³(83%)であり、擦り減り摩耗量(重量)ではそれぞれ135.5g(100%：同上)、126.6g(93%)及び102.8g(76%)であった。

Bシリーズでは、繊維混入量が0.0、0.5及び1.0%に対して、5時間後の擦り減り摩耗量(体積)は、それぞれ50.8cm³(100%)、49.1cm³(97%)及び42.7cm³(85%)であり、擦り減り摩耗量(重量)ではそれぞれ116.6g(100%)、107.5g(93%)及び90.8g(78%)であった。

A及びBシリーズ共、繊維混入量が0.0%に対して、0.5及び1.0%程度の混入による補強効果はほぼ同程度と考えられるが、Aシリーズの場合がBシリーズの場合より摩耗量は約15%多い結果を示した。これはAシリーズではそれぞれの測定時間ごとに新しい水及び砂としたため、砂の角ばりや摩耗による水の濁りなどが影響したものと考えられる。

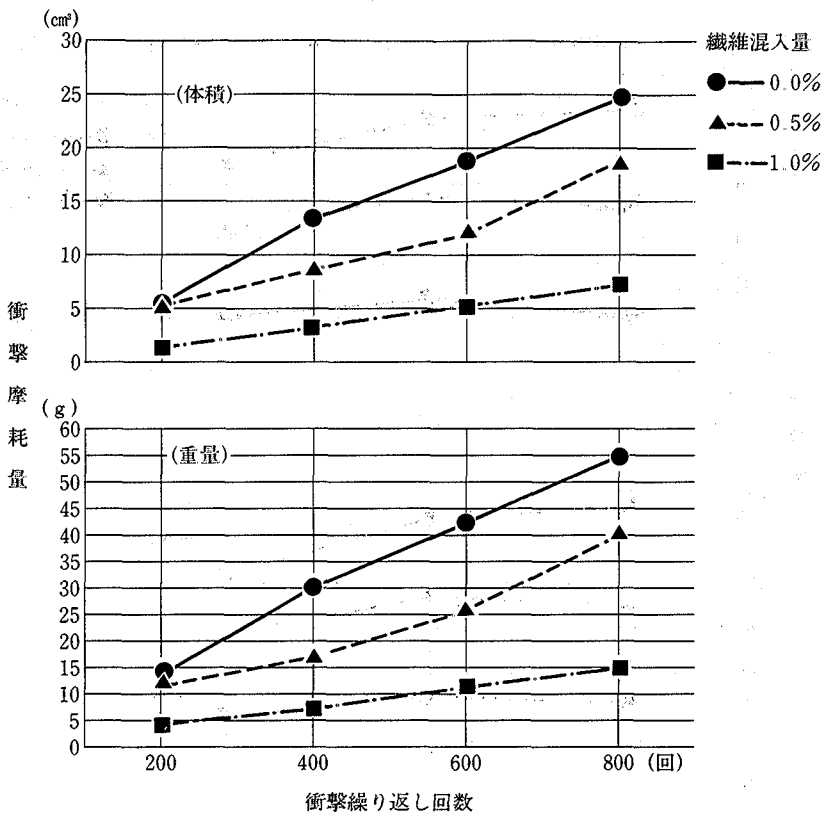


図3-5 炭素繊維補強コンクリートの衝撃摩耗試験結果

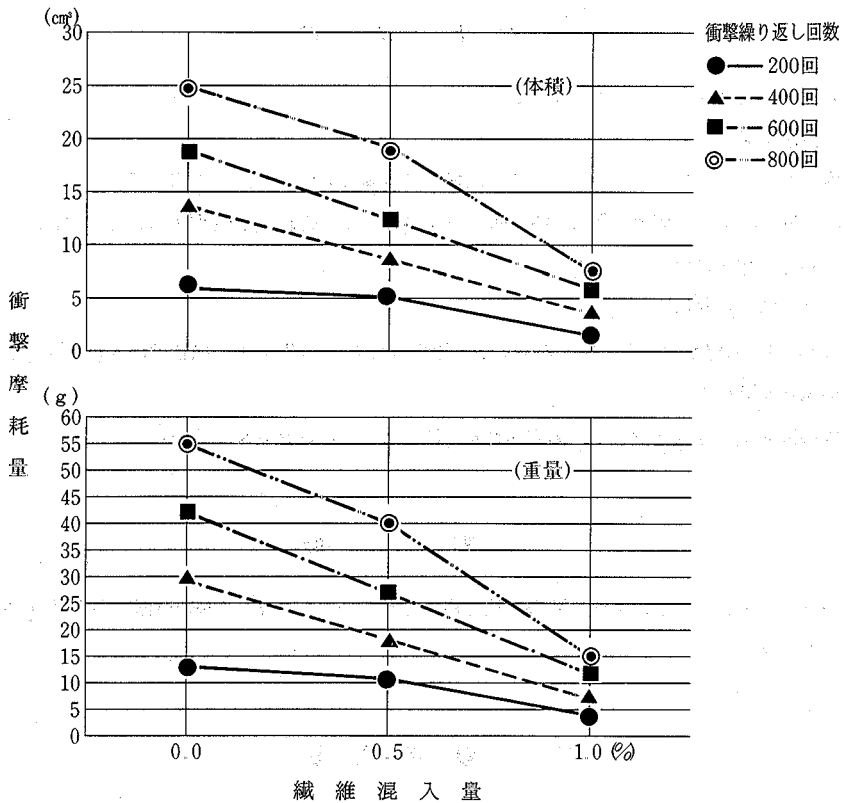


図3-6 炭素繊維補強コンクリートの衝撃摩耗試験結果

以上の結果, 本試験方法の範囲では, 繊維混入量0.5%程度では擦り磨き摩耗に対する補強効果はあまり期待できず, 1.0%程度以上の混入量が望ましいと思われる。

3.3 衝撃摩耗試験結果

衝撃摩耗試験の結果を図3-5及び6に示す。前者では衝撃繰り返し回数を, 後者では繊維混入量を横軸として表した。

衝撃摩耗量は, いずれの繊維混入量に対しても, 衝撃繰り返し回数にほぼ比例して増加する傾向を示した。また, 200, 400, 600及び800回のいずれの繰り返し回数においても, 繊維混入量の増加にほぼ反比例して衝撃摩耗量は減少する傾向を示した。繰り返し回数800回において, 衝撃摩耗量(体積)は繊維混入量0.0, 0.5及び1.0%に対してそれぞれ24.4cm³(100%), 18.9cm³(79%)及び7.5cm³(31%), また衝撃摩耗量(重量)ではそれぞれ55.3g(100%), 40.7g(74%)及び15.7g(28%)であった。

したがって, 繊維混入量0.0%のコンクリートと比較して, 繊維混入量0.5及び1.0%のコンクリートは, それぞれ約80及び30%程度と, 特に繊維を1.0%程度混入すれば衝撃摩耗量を大幅に低減できる結果が得られた。

4. ま と め

本研究の結果をまとめると次の通りである。

(1) 強度試験結果

炭素繊維を混入したコンクリートにおいて、圧縮強度は繊維の混入によって増大できなかったが、曲げ及び引張強度は繊維の混入によって増大できる。特に曲げ強度において、繊維を1.0%混入したものは、混入してないものと比較して、85%の強度の増加を示した。

(2) 擦り磨き摩耗試験結果

繊維混入量が0.5%程度ではその補強効果が殆ど認められず、1.0%以上の繊維の混入が必要と思われる。

(3) 衝撃摩耗試験結果

炭素繊維の混入量にほぼ比例して、衝撃摩耗量は減少し、その補強効果が認められた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、掃流試験機を快く借用させていただきました(株)四国総合研究所土木技術部の関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 小柳 外：コンクリートの衝撃摩耗について，セメント技術年報，41巻，pp. 237-240，(1987)

(1989年5月31日 受理)