

論文

[1217] 炭素繊維補強コンクリートの衝撃・掃流作用に対する摩耗特性

正会員 豊福俊英 (香川大学農学部)

1. はじめに

水路構造物の侵食(エロージョン)にはキャビテーション、摩耗、バクテリアによる侵食等がある。特に、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のように、表面に外力が繰り返し作用するコンクリート水路構造物では、強度と共に摩耗に対する抵抗性が重要である。しかし、このような摩耗のメカニズムは極めて複雑で、その評価方法について確立されていない現状である。これまでコンクリート水路構造物の摩耗について我が国では、大浜<sup>1)~3)</sup>、村野<sup>4)</sup>、奥田<sup>5)</sup>、石橋<sup>6)</sup>及び杉田ら<sup>7)・8)</sup>の研究が、また衝撃摩耗について小柳ら<sup>9)・10)</sup>の研究が報告されている。これらの研究によれば、衝撃・摩耗について、コンクリートの水セメント比、コンクリート強度、骨材の品質、コンクリートの表面性状、繊維補強及び養生条件(水中・大気中)などが大きく影響することが指摘されている。そのなかで、繊維補強コンクリートの衝撃・摩耗に関してわが国では、杉田ら<sup>7)・8)</sup>は鋼繊維及びポリエチレン繊維補強コンクリートについてまた小柳ら<sup>9)・10)</sup>は鋼繊維補強コンクリートについての研究がある。

本報告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、表面に力がほぼ直角に作用する衝撃摩耗とに分けて実験的に検討したものである。

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。
- ②骨材: 細骨材は海砂(比重2.56、粗粒率2.44、吸水率2.30%)で、粗骨材は多和産の砕石(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℃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社製のピッチ系炭素繊維(密度2.0g/cm<sup>3</sup>、繊維長18mm)を使用した。

2.2. コンクリートの配合

試験練りの結果より、目標強度(材令28日の標準養生後の圧縮強度)300kgf/cm<sup>2</sup>、水セメント比W/C=0.55、スランプ10(±2.5)cm及びそれぞれの繊維混入率に対して求められた最適細骨材率を用いて、表1のように示方配合を決めた。

表1 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 <sup>3</sup> )						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%

### 2.3. 摩耗試験方法

摩耗試験は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

擦り磨き摩耗試験は、大浜<sup>2)</sup>の提案によるM社製の掃流試験機(図-1)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。

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、各繊維混入率に対して6体ずつ作成し、標準養生後材令28日で摩耗試験を行った。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。

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、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。また体積については、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より見掛けの供試体の容積を体積とし、重量の場合と同様に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。

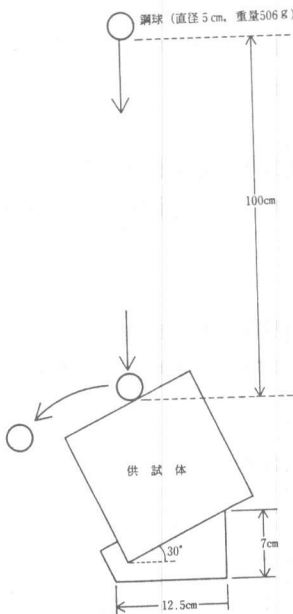


図2 衝撃摩耗試験機

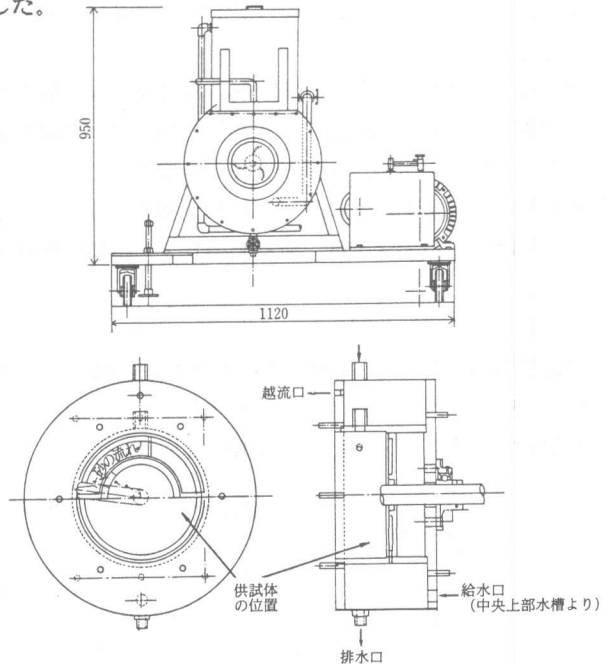


図1 掃流試験機

## (2) 衝撃摩耗試験

図2に示すように、高さ100 cm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摩耗量を200、400、600及び800回の衝撃繰返し後に調べた。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。

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。

衝撃摩耗量は、体積及び重量について求めた。すなわち、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。また体積については、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拭いた後の重量の差より見掛けの供試体の容積を体積とし、重量の場合と同様に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。

## 3. 実験結果及び考察

実験結果を図3～8に示す。

### 3.1 コンクリートの強度試験結果及び考察

コンクリートの圧縮、曲げ及び引張強度試験結果を図3に示す。圧縮強度では、繊維混入率が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量が、繊維混入率が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率の増加につれて、強度もほぼ直線的に大きくなる傾向を示した。すなわち、繊維混入率が0.5及び1.0%の場合、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。

### 3.2 擦り磨き摩耗試験結果及び考察

Aシリーズの擦り磨き摩耗試験の結果を図4及び5に示す。Aシリーズでは、繊維混入率が0.5%では、

擦り磨き時間が1～3時間程度までは、摩耗に対し、その補強効果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、繊維混入率が1.0%の場合1時間後から補強効果が認められた。繊維混入率0.0、0.5及び1.0%に対し、5時間後の擦り磨き摩耗量（体積）ではそれぞれ59.1cm<sup>3</sup>（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）、57.2cm<sup>3</sup>（97%）及び48.8cm<sup>3</sup>（83%）であり、擦り磨き摩耗量（重量）ではそれぞれ135.5g（100%）、126.6g（93%）及び102.8g（76%）であった。しかし、Aシリーズでは擦り磨き時間が最初の1時間迄とその後の擦り磨き摩耗の増加割合が異なっており、最初の1時間の方が大きかった。これはコンクリート表面（この場合半円の内側）のモルタル部分の擦り磨きが当初おこり、その後骨材及び繊維を含んだコンクリート部分の摩耗に移行し

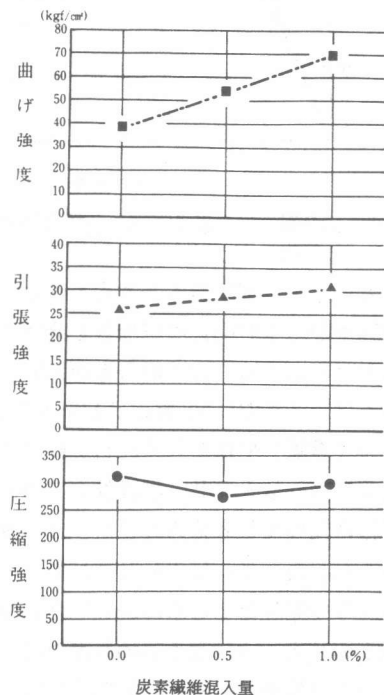


図3 炭素繊維補強コンクリートの各種強度試験結果

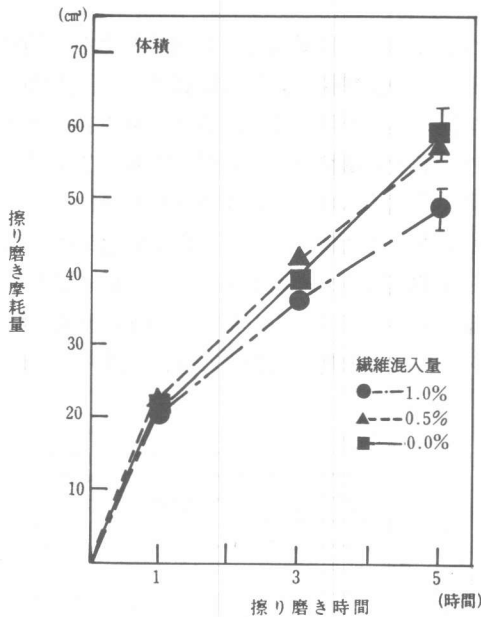


図4 擦り磨き摩耗量(体積)と擦り磨き時間との関係

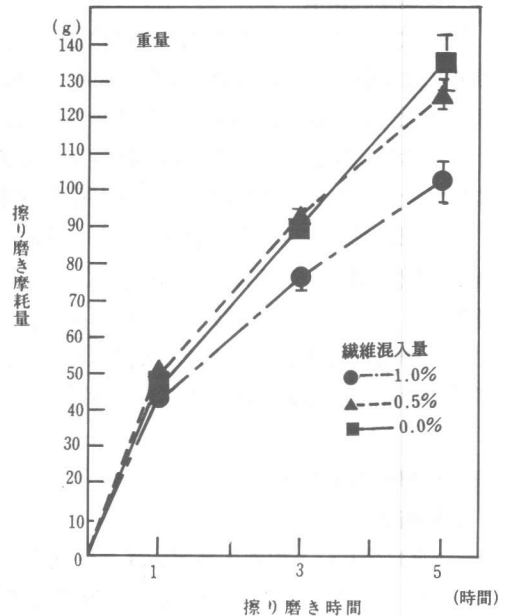


図5 擦り磨き摩耗量(重量)と擦り磨き時間との関係

ていることも一因であると考えられる。したがって、この掃流試験では、最初の1時間までと、1時間後から5時間後の増加量を分けて評価する方が合理的であると考えられる。

Bシリーズでは、繊維混入率が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50.8cm<sup>3</sup>(100%)、49.1cm<sup>3</sup>(97%)及び42.7cm<sup>3</sup>(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、繊維混入率が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。

以上の結果、本試験方法の範囲では、繊維混入率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6及び7に示す。

衝撃摩耗量は、いずれの繊維混入率に対しても、衝撃繰り返し回数にはほぼ比例して増加する傾向を示した。また、200、400、600及び800回のいずれの衝撃繰り返し回数においても、繊維混入率の増加には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)は繊維混入率0.0、0.5及び1.0%に対して、それぞれ24.4cm<sup>3</sup>(100%)、18.9cm<sup>3</sup>(79%)及び7.5cm<sup>3</sup>(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、繊維混入率0.0%のコンクリートと比較して、繊維混入率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。

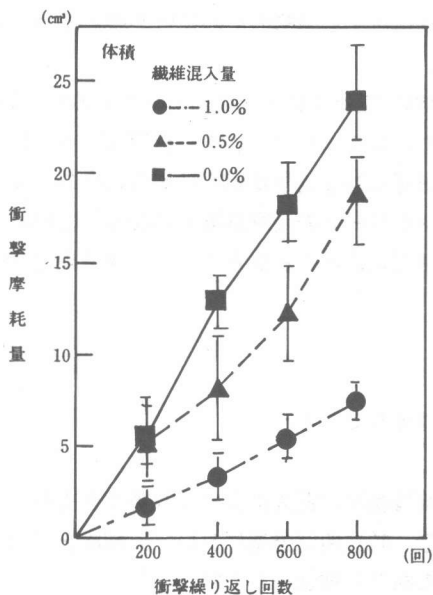


図6 衝撃摩耗量(体積)と衝撃繰り返し回数との関係

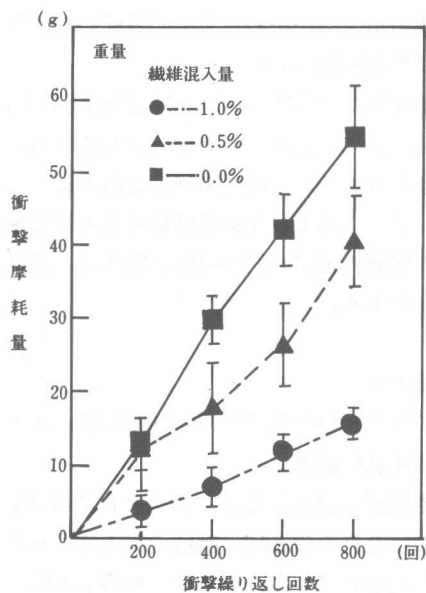


図7 衝撃摩耗量(重量)と衝撃繰り返し回数との関係

### 3.4 全体的な考察

炭素繊維補強コンクリートの衝撃・掃流作用に対する摩耗は総轄すると次のとおりである。

衝撃摩耗に対し繊維補強による効果は繊維混入量の増加につれてほぼ衝撃摩耗を減少することができたのに対し、掃流による摩耗に対してはある程度(本研究では1%)以上の混入により初めてその補強効果が認められる傾向を示した。

掃流試験では、当初表面の擦り磨きにより摩耗量が多い表層部分があり、そこではコンクリート表面のモルタル部分の摩耗(以下、処女摩耗と呼ぶ)のためあまり繊維補強の効果が認められなかった。さらに骨材及び繊維を含んだコンクリート部分の摩耗(以下、定常摩耗と呼ぶ)に移行してから繊維補強効果が認められ、摩耗量はほぼ一定割合で増加する。したがって擦り磨き摩耗の性能評価は処女摩耗量と定常摩耗量とに分けて行うのが合理的であると考えられる。

このように、掃流あるいは擦り磨き試験による摩耗のメカニズムと衝撃摩耗試験による摩耗のメカニズムは幾分異なるものと考えられる。

以下では本研究の結果を、既往の研究のうち今回の実験と同程度すなわちコンクリート強度(300~400kgf/cm<sup>2</sup>程度)において繊維による補強効果について研究したものと比較する。

#### 1) 擦り磨き摩耗について

杉田ら<sup>7),8)</sup>は筆者と同じ掃流試験を行っているが処女摩耗についての記載が見あたらない。しかし小柳ら<sup>10)</sup>のドーリー試験機による鋼繊維補強コンクリートの擦り磨き摩耗について処女摩耗と定常摩耗とが存在することが認められている。このことについては、前記のように処女摩耗量と定常摩耗量とに分けて評価を行うのが合理的であると思われる。また擦り磨き摩耗における繊維混入量の影響について、杉田ら<sup>7),8)</sup>は鋼繊維及びポリエチレン繊維を1.5%の混入によりその補強効果を認めておりさらに鋼繊維よりもポリエチレン繊維を用いた方がその補強効果が大きいことを示した。また、小柳ら<sup>10)</sup>は鋼繊維を1%程度混入すれば補強効果が認められるとしている。本研究では炭素繊維を1%程度以上の混入により補強効果が認められる結果を得ているので、ほ

は繊維の種類にかかわらずこの程度の混入量が擦り磨きに対する補強のためには必要と思われる。

## 2) 衝撃摩耗について

衝撃摩耗について小柳ら<sup>10)</sup>は鋼繊維の混入により衝撃摩耗量を減少することができるが、鋼繊維0.5%と1.0%の混入ではその補強効果にあまり差が認められていない。また、杉田ら<sup>7), 8)</sup>は鋼繊維及びポリエチレン繊維の1.5%の混入によっても衝撃摩耗に補強効果は殆ど認められない結果をえている。このような結果は筆者らの炭素繊維補強コンクリートの実験結果と異なる。この原因として繊維の種類の違い或は試験方法、評価方法等の相違によることも考えられ、今後検討を行う必要がある。

## 4. まとめ

本研究の試験の範囲で得られた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改善できなかったが、曲げ及び引張強度は繊維の混入によって改善できる。特に曲げ強度において、繊維を1.0%混入したものは、混入してい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

炭素繊維混入量が0.5%程度ではその補強効果が殆ど認められず、1.0%程度以上の繊維の混入が必要と思われる。擦り磨き摩耗は、最初に表面のモルタル部分の摩耗のため摩耗量が多いが、その後すりへり時間にほぼ比例して摩耗する傾向が認められた。

### (3) 衝撃摩耗試験結果

衝撃摩耗に対して、炭素繊維混入量にほぼ逆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。いずれの場合も衝撃摩耗は衝撃繰返し回数にほぼ比例して摩耗量は増加する。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、掃流試験機は榑四国総合研究所土木技術部より借用した。また実験には本学卒論生片岡謙治氏（現在榑奥村組土木興業）の協力をえました。御協力いただきました関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 大浜文彦：水路コンクリートの掃流作用に対する耐摩耗性について，三重大学農学部学術報告，第20号，pp. 97-104，1959
- 2) 大浜文彦：コンクリートの掃流試験について，農業土木研究第29巻第2号，pp. 48-49，1961
- 3) 大浜文彦：水路内張用コンクリートについて，三重大学農学部学術報告，第25号，pp. 33-44，1962
- 4) 村野玄一：養生相違によるコンクリートのすりへりについて，セメント技術年報，第17巻，pp. 331-334，1963
- 5) 奥田徹：コンクリート構造物のすりへり摩耗による機能的寿命とその再生，第57回コンクリート講演会テキスト，セメント協会，pp. 66-78，1984
- 6) 石橋毅：ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究，土木学会論文報告集，第334号，pp. 103-112，1983
- 7) 杉田英明，永松武教，大和竹史：小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 885-888，1986
- 8) 杉田英明，永松武教，藤本浩：耐摩耗性コンクリートの評価とその施工，電力土木，No. 223，pp. 63-72，1989
- 9) 小柳治，河合敦，近藤吉信：コンクリートの衝撃摩耗について，セメント技術年報，第41巻，pp. 237-240，1987
- 10) 小柳治，六郷恵哲，河合敦，近藤吉信：コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響，第10回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 463-468，1988