

## V—20 鋼繊維補強コンクリートの摩耗性状 (その3)

北海道工業大学 正員 犬塚 雅生  
 北海道工業大学 正員 堀口 敬  
 北海道工業大学 学生員 ○ 工藤 範道  
 北海道工業大学 学生員 小島 秀規

## 1. はじめに

一般的に物体に作用する摩耗の形態は、Rabinowiczによれば、すべて4種に分類されるとしているが、コンクリート表面に作用する摩耗現象も同様に対象とする構造物によって、その機構に大きな差異を示す。例えば、現在問題とされている構造物としては、寒冷地におけるタイヤチェーン及びスパイクタイヤ等による摩耗を受ける舗装コンクリート、或いは、砂、レキ混じりの流れ等により摩耗を受ける水路コンクリート等であるが、前者は、骨材の耐摩耗性の大小が大きくコンクリートの耐摩耗性に影響するのに対し、後者は骨材の種類にはほとんど依存しないと言われている<sup>2)</sup>。このような摩耗現象に対し、種々のコンクリートの摩耗機構を解明する為には、各々の摩耗現象に対応する試験を行い、コンクリートの耐摩耗性を検討すべきである。本報告は、大きく分けて3形態、4種類の摩耗試験を行い、主として鋼繊維補強コンクリート(以下FRCと略す)に主眼を置いて、その有意性を検討したものである。上記の3形態の摩耗試験と実際の摩耗形態との対応は以下のように考えた。その他のコンクリートの因子はすでに報告済の結果を参照した<sup>3)</sup>。

摩耗試験(A): 大きな衝撃作用等を含まない単純なすり磨き作用による摩耗形態

摩耗試験(C): 一般舗装コンクリートを対象としたタイヤチェーンによる摩耗形態

摩耗試験(B)(D): 衝撃作用とすりへり作用が同時に伴う摩耗形態(衝撃値としては(B)の方が大)

## 2. 実験概要

今回の実験においては、表-1に示すように、3因子、2水準をとり、L16直交表により表-2のように割り付けを行った。

表-1について、鋼繊維は市販のカットワイヤー製品で、 $\phi 0.6\text{mm} \times 32\text{mm}$ の寸法のものを用いた。

環境条件として、水中標準養生( $+20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )、冷凍庫養生(14日間気乾養生の後、 $-20^{\circ}\text{C}$ で12時間、 $\pm 0^{\circ}\text{C}$ で12時間のサイクル養生で、気乾養生は $20^{\circ}\text{C}$ の恒温室中)を設定した。

製作した供試体は全て、細骨材率を60%とし、市販のAE剤(セメント重量の0.04%)を用いた。試験による誤差の影響をなるべく少なくする目的から、試験の順序は乱数表を用いて順番を定め実験を行った。

実験結果は、得られたデータを分散分析を行い各因子に関して摩耗損失量に対する有意性を検討した。

今回の報告において使用した摩耗試験は以下に説明する4種である。

(表-2) L16直交表

| 因子         | 水準                            |                               |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|
|            | 1                             | 2                             |
| F<br>鋼繊維量  | F1 = 0 %                      | F2 = 1.0 %                    |
| E<br>環境条件  | E1<br>水中養生                    | E2<br>冷凍庫養生                   |
| C<br>セメント量 | C1 = 350<br>kg/m <sup>3</sup> | C2 = 400<br>kg/m <sup>3</sup> |

(表-1) 因子及び水準表

|    | F | E | C |
|----|---|---|---|
| 1  | 1 | 1 | 1 |
| 2  | 1 | 1 | 1 |
| 3  | 1 | 1 | 2 |
| 4  | 1 | 1 | 2 |
| 5  | 1 | 2 | 1 |
| 6  | 1 | 2 | 1 |
| 7  | 1 | 2 | 2 |
| 8  | 1 | 2 | 2 |
| 9  | 2 | 1 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 |
| 12 | 2 | 1 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 2 | 2 | 2 |
| 16 | 2 | 2 | 2 |

## 2-1 摩耗試験-(A)

摩耗形態としてはいわゆるひきき摩耗に属する構造の試験機で、鋼製ブラシによりコンクリートを摩耗せしめるもので、供試体が5分間に9往復する構造である。なお試験機は写真-1に示す。

試験に用いる供試体は、 $75\text{mm} \times 75\text{mm} \times 400\text{mm}$ の寸法である。

試験時間は、3時間一定とし、試験前と試験後の供試体の重量差を測定し、その重量減と試験前の供試体重量との比を摩耗損失率として表した。

## 2-2 摩耗試験-(B)

試験法は、JIS A 1121の規格に準じ試験を行うが粗骨材のかわりに立方体のコンクリート供試体を投入して行うすりへり試験である。試験に用いる供試体は、 $75\text{mm} \times 75\text{mm} \times 400\text{mm}$ の寸法のを $75\text{mm} \times 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ の寸法で3個、コンクリートカッターで切る。その3個の供試体を直径 $46.5\text{mm}$ の鋼球6個と共に試験機内に入れ、500回一定とし回転させ、試験前と試験後の供試体の重量差を測定し、その重量減と試験前の供試体重量との比を摩耗損失率として表した。

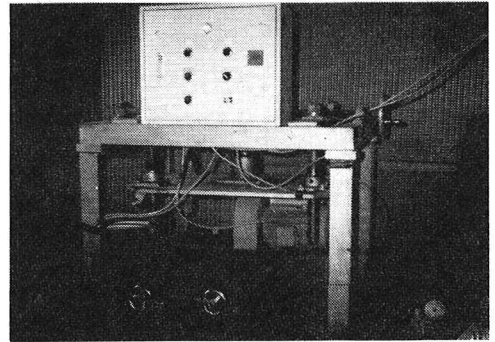


写真-1 摩耗試験機-(A)

## 2-3 摩耗試験-(C)

試験機は写真-2に示すものである。試験に用いる供試体は、内径 $280\text{mm}$ 、外径 $580\text{mm}$ 、厚さ $50\text{mm}$ の寸法で図-1に示すものである。施工時の供試体の厚さによる摩耗量の影響を避ける為に打設後試験面の裏側からツェットセメントにより厚さが均等になるように補正した。タイヤチェーンは $\phi 4\text{mm}$ のを2本づつ6ヶ所に取り付け、タイヤの接地荷重を $20\text{kg}$ として3時間一定とし、試験前と試験後の4個の供試体の重量差を測定し、その重量減と試験前の供試体重量との比を摩耗損失率として表した。

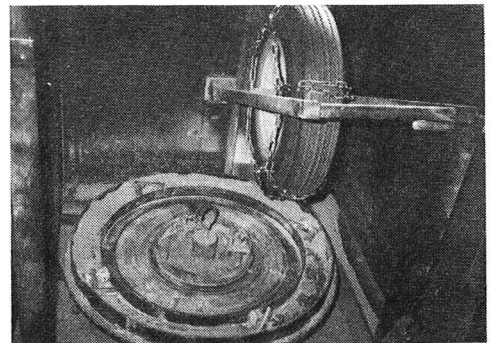


写真-2 摩耗試験機-(C)

## 2-4 摩耗試験-(D)

この試験は、摩耗試験-(B)と類似しているが鋼球による衝撃を弱める目的で市販の重力式ミキサーを用いて行った試験である。供試体は2-2で説明した供試体3個と鋼球6個を試験機内に入れ15分間一定とし回転させ、試験前と試験後の供試体の重量差を測定し、その重量減と試験前の供試体重量との比を摩耗損失率として表した。

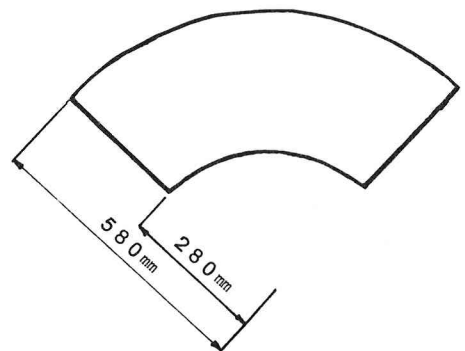


図-1 摩耗試験-(C)の供試体

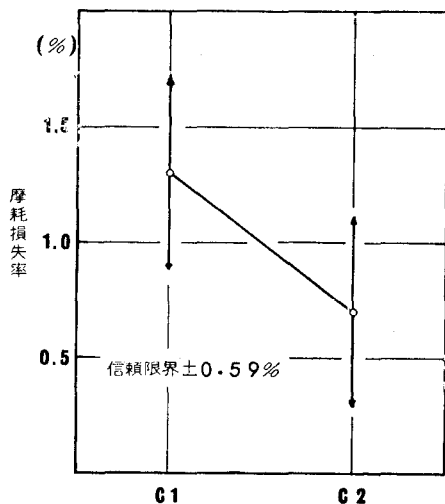
### 3. 試験結果

以上述べた試験結果を示すと表-3の如くなる。表-3の結果をもとに分散分析を行うと以下の様になる。また、表-3の摩耗試験(C)は4個の供試体の平均値を記してある。

#### 3-1 摩耗試験-(A)の結果

摩耗試験-(A)の分散分析の結果は表-4に示すものである。

分散分析の結果、セメント量の因子が5%危険率有意水準を満足し因子寄与率は25.9%となった。



単位セメント量と摩耗損失率の関係を図-2に示す。図-2より単位セメント量の増加に対し、摩耗損失率の減少がみられる。単位セメント量 $C_1 = 350\%$ の時の摩耗損失率は1.294%で $C_2 = 400\%$ の時の摩耗損失率は0.701%である。信頼限界\*)は±0.593%である。 $C_1$ から $C_2$ へ単位セメント量が増加した時、摩耗損失率は約46%の減少となった。

(表-3) 摩耗損失率

| 供試体番号 | 摩耗試験 A | 摩耗試験 B | 摩耗試験 C | 摩耗試験 D |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 0.75   | 30.00  | 0.75   | 8.02   |
| 2     | 0.93   | 31.52  | 0.93   | 9.14   |
| 3     | 1.00   | 29.76  | 0.55   | 7.94   |
| 4     | 0.53   | 25.98  | 0.39   | 6.44   |
| 5     | 1.80   | 50.41  | 0.72   | 16.23  |
| 6     | 1.02   | 37.36  | 0.82   | 12.66  |
| 7     | 0.52   | 34.50  | 0.74   | 10.90  |
| 8     | 1.00   | 41.31  | 1.73   | 11.60  |
| 9     | 1.32   | 27.53  | 0.51   | 8.71   |
| 10    | 1.27   | 28.76  | 1.07   | 9.86   |
| 11    | 0.70   | 22.72  | 0.93   | 6.62   |
| 12    | 0.51   | 19.61  | 0.91   | 8.46   |
| 13    | 2.57   | 50.66  | 2.85   | 15.78  |
| 14    | 0.69   | 44.59  | 1.55   | 13.42  |
| 15    | 0.62   | 26.10  | 0.86   | 8.60   |
| 16    | 0.73   | 26.05  | 1.16   | 5.85   |

(表-4) Aの分散分析

| 因子  | 平方和 ( $S^2$ ) | 自由度 $\nu$ | $v = \frac{(S^2)}{\sigma^2}$ | $F = \frac{v}{v_e}$ | 因子寄与率 |
|-----|---------------|-----------|------------------------------|---------------------|-------|
| F   | 0.046         | 1         | 0.046                        | 0.176               |       |
| E   | 0.236         | 1         | 0.236                        | 0.904               |       |
| C   | 1.407         | 1         | 1.407                        | 5.39                | 25.9  |
| FxE | 0.006         | 1         | 0.006                        | 0.023               |       |
| FxC | 0.209         | 1         | 0.209                        | 0.801               |       |
| ExC | 0.174         | 1         | 0.174                        | 0.667               |       |
| ER  | 2.349         | 9         | 0.261                        |                     | 74.1  |
| T   | 4.427         | 15        |                              |                     |       |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| $(1, 9 = 0.01) = 10.60$ | ※※ |
| $(1, 9 = 0.05) = 5.12$  | ※  |

(注) ER は誤差項

\*) 信頼限界 $\delta$ は

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{F \times v_e}{n_e}}$$

で求めた。

F : F値

$v_e$  : 誤差の平均平方和

$n_e$  : 有効反復数

### 3-2 摩耗試験-(B)の結果

摩耗試験-(B)の分散分析の結果は表-5に示すものである。

分散分析の結果、環境条件の因子とセメント量の因子がそれぞれ1%危険率有意水準を満足し寄与率はそれぞれ、40.8%、24.7%となった。交互作用においては鋼繊維量とセメント量について5%危険率有意水準を満足し寄与率は5.8%となった。

環境条件と摩耗損失率の関係を図-3に示す。図-3においてE<sub>1</sub>(水中標準養生)の時の摩耗損失率は26.99%で、E<sub>2</sub>(冷凍庫養生)の時の摩耗損失率は、38.87%である。信頼限界は±5.0%である。E<sub>1</sub>とE<sub>2</sub>との摩耗損失率の差は約12%である。また、E<sub>1</sub>からE<sub>2</sub>に養生条件が変わった時の摩耗損失率は約44%の増加となった。

単位セメント量と摩耗損失率の関係を図-4に示す。図-4において単位セメント量C<sub>1</sub>=350%の時の摩耗損失率は、37.60%でC<sub>2</sub>=400%の時の摩耗損失率は、28.26%である。信頼限界は±5.0%である。C<sub>1</sub>とC<sub>2</sub>の摩耗損失率の差は約9%である。またC<sub>1</sub>からC<sub>2</sub>へ単位セメント量が増加した時の摩耗損失率は約25%の減少となった。

鋼繊維混入量と単位セメント量の交互作用の関係を、図-5に示す。図-5において単位セメント量C<sub>1</sub>=350%の時は鋼繊維の有無による摩耗損失率の影響はほとんどないが、単位セメント量C<sub>2</sub>=400%の時では、鋼繊維の混入により摩耗損失率は9.3%程度減少する。

(表-5) Bの分散分析

| 因子    | 平方和 (S <sup>2</sup> ) | 自由度 | $v = \frac{(S^2)}{\sigma^2}$ | $F = \frac{V}{V_0}$ | 因子寄与率 |
|-------|-----------------------|-----|------------------------------|---------------------|-------|
| F     | 75.72                 | 1   | 75.72                        | 4.01                | 4.2   |
| E     | 565.20                | 1   | 565.20                       | 29.96※※             | 40.8  |
| C     | 349.62                | 1   | 349.62                       | 18.53※※             | 24.7  |
| F × E | 0.41                  | 1   | 0.41                         | 0.02                |       |
| F × C | 96.64                 | 1   | 96.64                        | 5.12※               | 5.8   |
| E × C | 81.67                 | 1   | 81.67                        | 4.33                | 4.7   |
| E R   | 169.80                | 9   | 18.87                        |                     | 19.8  |
| T     | 1339.1                | 15  |                              |                     |       |

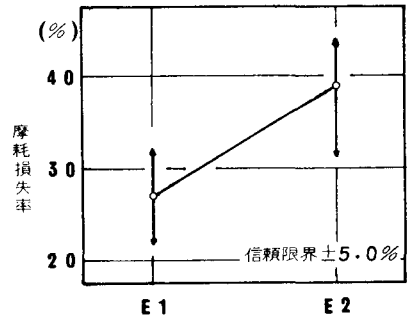


図-3 環境条件と摩耗損失率の効果グラフ

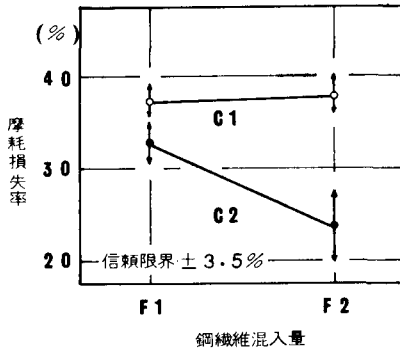


図-5 鋼繊維混入量と単位セメント量の交互作用の交差グラフ

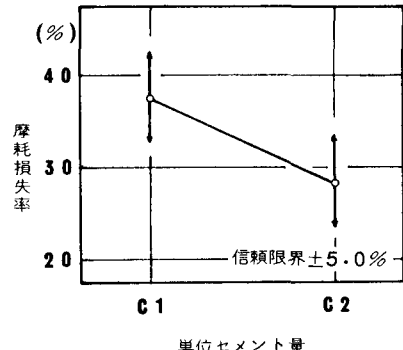


図-4 単位セメント量と摩耗損失率の効果グラフ

### 3-3 摩耗試験-(C)の結果

摩耗試験-(C)の分散分析の結果を示すと、表-6のようになる。

分散分析の結果、今回の因子及び水準の範囲ではすべての因子に関し、摩耗損失率に対する有意性は得られなかった。ただし、因子寄与率について言えば養生条件による因子が16.3%の寄与率となり水中養生した供試体は冷凍庫養生のそれよりも4.5%程度小さい値を示す。

(表-6) Cの分散分析

| 因子    | 平方和 (S) | 自由度 | $v = \frac{(S^*)}{\sigma^2}$ | $F = \frac{V}{V_e}$ | 因子寄与率 |
|-------|---------|-----|------------------------------|---------------------|-------|
| F     | 0.640   | 1   | 0.640                        | 2.254               | 6.6   |
| E     | 1.160   | 1   | 1.160                        | 4.085               | 16.3  |
| G     | 0.240   | 1   | 0.240                        | 0.845               |       |
| F x E | 0.212   | 1   | 0.212                        | 0.746               |       |
| F x G | 0.460   | 1   | 0.460                        | 1.620               | 3.3   |
| E x G | 0.096   | 1   | 0.096                        | 0.338               |       |
| ER    | 2.560   | 9   | 0.284                        |                     | 73.8  |
| T     | 5.368   | 15  |                              |                     |       |

(表-7) Dの分散分析

| 因子    | 平方和 (S) | 自由度 | $v = \frac{(S^*)}{\sigma^2}$ | $F = \frac{V}{V_e}$ | 因子寄与率 |
|-------|---------|-----|------------------------------|---------------------|-------|
| F     | 1.99    | 1   | 1.99                         | 0.86                |       |
| E     | 55.68   | 1   | 55.68                        | 23.94***            | 35.4  |
| G     | 46.92   | 1   | 46.92                        | 20.17***            | 29.6  |
| F x E | 6.05    | 1   | 6.05                         | 2.60                | 1.9   |
| F x G | 5.17    | 1   | 5.17                         | 2.22                | 2.5   |
| E x G | 13.85   | 1   | 13.85                        | 5.95*               | 7.7   |
| ER    | 20.94   | 9   | 2.33                         |                     | 22.9  |
| T     | 150.59  | 15  |                              |                     |       |

### 3-4 摩耗試験-(D)の結果

摩耗試験-(D)の分散分析の結果は表-7に示すものである。

分散分析の結果、養生条件の因子とセメント量の因子が1%危険率有意水準を満足し因子寄与率はそれぞれ35.4%、29.6%となった。また、交互作用においては、環境条件とセメント量について5%危険率有意水準を満足し因子寄与率は、7.7%となった。

環境条件と摩耗損失率の関係を図-6に示す。図-6においてE<sub>1</sub>(水中標準養生)の時の摩耗損失率は、8.15%でE<sub>2</sub>(冷凍庫養生)の時の摩耗損失率は、11.88%である。養生条件E<sub>1</sub>とE<sub>2</sub>との摩耗損失率の差は、約4%である。また、養生条件がE<sub>1</sub>からE<sub>2</sub>へ変った時の摩耗損失率は約46%の増加となった。

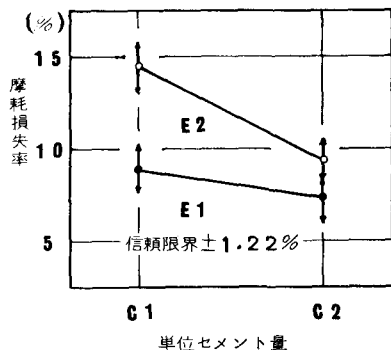


図-8 単位セメント量と環境条件の交互作用の効果グラフ

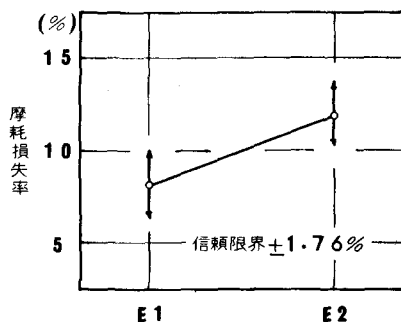


図-6 環境条件と摩耗損失率の効果グラフ

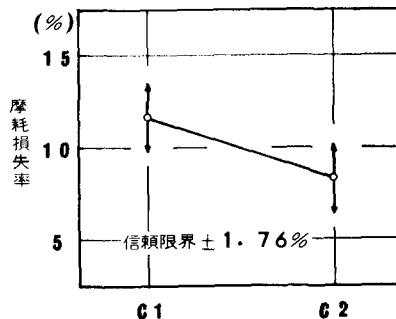


図-7 単位セメント量と摩耗損失率の効果グラフ

単位セメント量と摩耗損失率の関係を図-7に示す。図-7において単位セメント量  $C_1 = 350\%$  の時の摩耗損失率は、11.73%で、 $C_2 = 400\%$  の時の摩耗損失率は、8.30%である。単位セメント量  $C_1$  と  $C_2$  との摩耗損失率の差は、3.43%である。また、 $C_1$  から  $C_2$  へ単位セメント量が増加した時の摩耗損失率は、約30%の減少となった。

環境条件と単位セメント量の交互作用の関係を図-8に示す。図-8より、環境条件の違いにより単位セメント量の増加に伴う摩耗損失率の減少の度合が大きく異なる。水中標準養生の場合で摩耗損失率は21%減少し、冷凍養生の場合では同じく39%減少した。

#### 4. 考察とまとめ

今回の実験の範囲に関して得られた結果をまとめてみると以下の事が言える。

- 1) 鋼繊維の混入による耐摩耗性の効果は、今回の実験の如く7%程度では大きな有意性を得られる結果が出なかったが、摩耗試験-(B)の如く衝撃を含むすりへり摩耗形態については単位セメント量との適切な組合せにより大きな効果が得られた。(図-5)
- 2) 単位セメント量の因子による摩耗損失率の有意性は、摩耗試験-(A),(B)及び(D)に関して非常に高い。(図-2 図-4, 図-7)
- 3) 養生条件に関しては、摩耗試験-(B)及び(D)の様な形態の摩耗には大きな影響を示すが(図-3, 図-6)摩耗試験-(A)のような、いわゆる供試体の表面硬度に左右される摩耗形態に対しては大きな影響を示さない。

#### 参考文献

- 1) E.Rabinowicz:「Friction and wear of materials」 PP 113 (1965)
- 2) 近藤, 坂ら:「コンクリート工学ハンドブック」 852 PP. (昭 51.8) 朝倉書店
- 3) 例えば 犬塚, 堀口ら:「~~鋼繊維~~補強コンクリートの摩耗試験(その1)」第36回土木学会北海道支部論報 (1980)  
犬塚, 堀口:「~~鋼繊維~~補強コンクリートの摩耗性状について」第7回コンクリート工学年次講演会 論文集, (1979)
- 4) 小林一輔:「~~繊維~~補強コンクリート」(月刊「土木施工」Vol.19 No.4 ~ Vol.19 No.11 1978 抜刷)
- 5) 社団法人 日本トンネル技術協会:「スーパールファイバーコンクリートに関する調査研究報告書」(1980.3)
- 6) R.N.Swamy and P.S.Mangat:「Properties of Fiber Reinforced Concrete」(1974)