

論文 水流摩耗試験における吐出圧力および回転速度が摩耗性状に及ぼす影響

渡嘉敷 勝^{*1}・森 充広^{*2}・中矢 哲郎^{*3}・森 丈久^{*4}

要旨: 水流摩耗試験機を用いた水セメント比 50%および 40%のセメントペースト試験体の摩耗試験において、水噴流の吐出圧力を 3.0~20.0MPa の範囲で 6 水準に、また、試験体の回転速度を 30rpm と 60rpm の 2 水準で変化させ、試験条件が試験体の摩耗性状に及ぼす影響を検討した。その結果、吐出圧力の増加により、摩耗速度は加速度的に増大し、その関係は累乗関数で近似できることが明らかとなった。しかし、回転速度については、吐出圧力 4.5MPa と 20.0MPa の傾向が相反しており、摩耗性状に及ぼす影響は明確とならなかった。
キーワード: 摩耗, エロージョン, 水噴流, セメント, コンクリート

1. はじめに

農業用水路等の水利構造物におけるコンクリートでは、流水によってモルタル分が先行して摩耗流出し、粗骨材が露出した状況が多く見られる。このようなエロージョン摩耗は、構造物の通水表面の平滑性を著しく損ね、粗度係数を大きくし、水利性能を低下させる原因となる。また、摩耗した水路の補修においては、施工後の補修材の耐摩耗性評価が重要となる。しかしながら、このような流水によるエロージョン摩耗の進行過程については十分に解明されていない。また、試験方法も確立されておらず^{1),2)}、水利構造物の性能照査および寿命予測を実施する上でこれらの問題解決が大きな課題となっている。そのため、水利構造物のコンクリートのエロージョン摩耗の促進試験として、水噴流を用いた試験も研究されてきている^{3),4),5)}。筆者らも、試験体に水噴流を衝突させることにより流水によるエロージョン摩耗を促進して模擬する水流摩耗試験を提案し、セメント系材料の摩耗試験を実施してきた^{6),7)}。

本水流摩耗試験は、高速の水噴流を試験体に衝突させる試験であるため、水噴流と試験体との衝突状況の変化により、試験体の摩耗性状も相違する。これまでの研究から、この衝突状況の変化は、主に吐出装置、吐出圧力および回転速度の相違が作用すると推測された。そのため、本研究では提案した水流摩耗試験の適切な試験条件を設定するための基礎的な性能確認を目的として、吐出圧力および試験体の回転速度の変化がセメントペースト試験体の摩耗性状に及ぼす影響について検討した。

2. 試験装置および試験方法

2.1 水流摩耗試験機

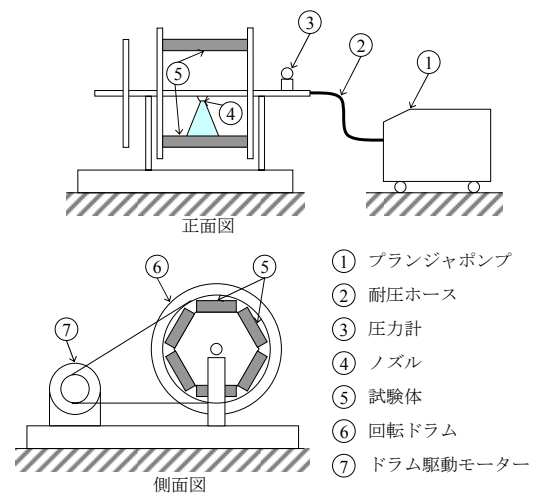


図-1 水流摩耗試験機の概要

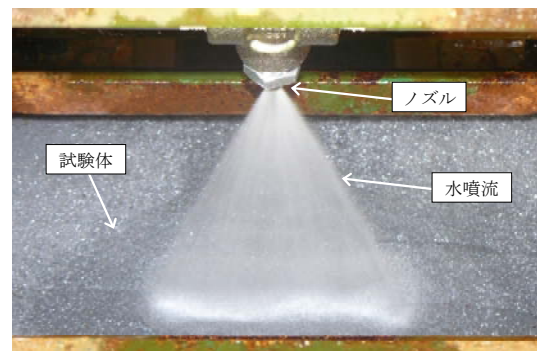


図-2 水噴流の状況

水流摩耗試験機の概要を図-1に示す。本試験機は、試験体を取り付ける本体と水噴流を発生させる吐出装置により構成される。本体は、試験体6個を設置可能な回転ドラムとドラムを回転させる駆動モーターで構成

*1 農村工学研究所 施設資源部水利施設機能研究室 主任研究員 園修 (正会員)
 *2 農村工学研究所 施設資源部水利施設機能研究室 主任研究員 農博 (正会員)
 *3 農村工学研究所 施設資源部水利施設機能研究室 主任研究員 農博
 *4 農村工学研究所 施設資源部水利施設機能研究室 室長

表-1 吐出装置の仕様

| 吐出装置 | 最大吐出圧力 (MPa) | 実験吐出圧力 (MPa) | 実験吐出流量 (L/min) | 実験吐出速度 (m/s) | ノズル孔面積 (m ²) | ノズル噴角 (°) | ノズル孔等価直径 d (mm) | ノズル-試験体間距離 x (mm) | スタンドオフ距離 x/d (mm/mm) |
|------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------------------|-----------|-----------------|-------------------|----------------------|
| A | 4.9 | 3.0 - 4.5 | 19.1 - 23.4 | 82.7 - 102 | 3.8×10 ⁻⁶ | 40 | 2.2 | 70 | 32 |
| B | 20 | 4.5 - 20.0 | 11.9 - 25.2 | 79.4 - 168 | 2.5×10 ⁻⁶ | 40 | 1.8 | 80 | 44 |

される。駆動モーターの回転を制御することにより、ドラムを一定速度で回転させることが可能である。吐出装置は、プランジャポンプ、耐圧ホース、ノズルより構成される。吐出装置の使用液体は水道水で、プランジャポンプにより加圧された後、耐圧ホースを経て本体の回転ドラム中心部に設置されたノズルより試験体に噴射される。水噴流は、図-2に示すように扇形に広がり、試験体表面に衝突する。本研究においては、最大吐出圧力の異なる2種類の吐出装置を用いた。吐出装置の仕様を表-1に示す。吐出圧力は、プランジャポンプとノズルとの間に取り付けられた圧力計により測定した。また、吐出流量は、プランジャポンプの貯水槽に水道水を供給するホースに取り付けた流量計 (KEYENCE FD-P50) により測定した。吐出速度は、吐出流量をノズル孔面積で除して求めた。ノズル孔形状は楕円形に近いので、孔面積は画像計測により算出した。また、求めた孔面積と同じ面積の円の直径を等価直径として示した。使用した2種のノズルは外形寸法が異なるため、ノズルから試験体表面までの距離には10mmの差が生じた。スタンドオフ距離⁸⁾は、ノズル-試験体間距離をノズル孔等価直径で除した値とした。

2.2 試験体

試験体は、早強ポルトランドセメントを使用したセメントペースト硬化体とし、水セメント比は、JIS R 5201の曲げ試験・圧縮試験用のモルタル供試体の水セメント比である W/C=50%、そして、より圧縮強度の高い試験体の摩耗傾向を把握するために W/C=40%の2種の配合とした。試験体は、内寸法 296mm×142mm×60mm の型枠に打設し、材齢1日で脱型した後に20℃で水中養生し、材齢14日で試験開始とした。配合と各材齢における圧縮強度を表-2に示す。

2.3 試験ケース

試験は表-3に示す9ケースを実施した。吐出装置Aを用いて3.0~4.5MPa、また、吐出装置Bを用いて4.5~20.0MPaの吐出圧力の範囲を試験した。吐出装置Aの試験においてはW/C=50%および40%の試験体を各2個、吐出装置Bの試験においては各3個を使用した。また、標準の回転速度は30rpmとし、A04560およびB20060のケースについては60rpmとした。なお、B20060については、試験機の都合により、試験時間1~5時間までを

表-2 試験体の配合および圧縮強度

| 記号 | W/C (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | | | |
|------|---------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | σ ₇ | σ ₁₄ | σ ₂₁ | σ ₂₈ |
| WC50 | 50 | 37.0 | 43.9 | 45.9 | 47.1 |
| WC40 | 40 | 58.5 | 62.8 | 66.9 | 66.7 |

表-3 試験ケース

| 記号 | 吐出装置 | 吐出圧力 (MPa) | 回転速度 (rpm) | 総試験時間 (hour) | 計測時間間隔 (hour) |
|--------|------|------------|------------|------------------|------------------|
| A03030 | A | 3.0 | 30 | 260 | 20 |
| A04030 | A | 4.0 | 30 | 140 | 20 |
| A04530 | A | 4.5 | 30 | 140 | 20 ^{*1} |
| A04560 | A | 4.5 | 60 | 140 | 20 |
| B04530 | B | 4.5 | 30 | 140 | 20 |
| B10030 | B | 10.0 | 30 | 10 | 1 |
| B15030 | B | 15.0 | 30 | 10 | 1 |
| B20030 | B | 20.0 | 30 | 10 | 1 |
| B20060 | B | 20.0 | 60 | 10 ^{*2} | 1 |

*1 試験開始後3回の計測間隔は、24、24、12hとした。
*2 試験時間6h以降は、材齢24日に実施した。

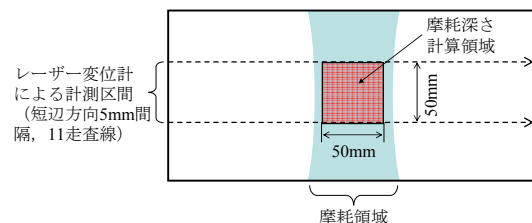


図-3 試験体の摩耗深さ計測

材齢14日で実施し、6~10時間までを材齢24日で実施した。

2.4 試験の手順

試験体をドラムに設置後に回転させ、水噴流を吐出させて試験開始とした。所定の試験時間経過後に水噴流およびドラム回転を停止させ、試験体を取り外し、摩耗量を計測した。そして、この操作を総試験時間まで繰り返した。

2.5 摩耗量計測

試験体の摩耗量として、摩耗重量 (気中重量, 水中重量) および摩耗深さを計測した。計測は、摩耗試験前および表-3に示した計測時間間隔で実施した。各摩耗時間経過後に試験体を試験機から外し、水中重量および気

中重量を測定した後、レーザー変位計（KEYENCE LK-500、分解能 $10\mu\text{m}$ ）により摩耗深さを計測した。図-3に示すように試験体の長辺方向にレーザー変位計を移動させながら 1mm 間隔で摩耗深さのデータを収集した。これを短辺方向に 5mm 間隔で計 11本の走査線について計測した。また、計測されたデータの中で、試験体中心部の 50mm 四方に含まれる深さデータ ($51 \times 11=561$ 点)の平均値を摩耗深さとした。

3. 試験結果と考察

3.1 吐出圧力と吐出流量および吐出速度

吐出圧力と吐出流量との関係を図-4に示す。吐出装置 A、Bともに吐出圧力の増加により、吐出流量も増加している。吐出圧力 4.5MPa では、吐出装置 A は吐出装置 B の約 1.9 倍の吐出流量となっている。

吐出圧力と吐出速度との関係を図-5に示す。図には、吐出圧力 p が損失無しにすべて速度エネルギーに変換された場合の吐出速度 v を Bernoulli の定理より、

$$v = \sqrt{2p/\rho} \quad (1)$$

ここに、 p ：圧力、 ρ ：水の密度

として算定した曲線も示した。しかし、実際の吐出速度 v_l は渦、剥離、粘性などの影響で、式(1)の v より小さくなり、

$$v_l = c_v \sqrt{2p/\rho} \quad (2)$$

ここに、 c_v ：速度係数

となる⁹⁾。図-5には、吐出速度を式(2)で回帰した曲線も示した。最小二乗法により求めた速度係数 c_v は、吐出装置 A については 1.06、吐出装置 B については 0.836 となった。吐出装置 A の吐出速度は、 c_v が 1 を超えているために、式(1)の v を上回っている。これは、吐出圧力、吐出流量、ノズル孔面積の計測における精度上の問題が原因と考えられ、今後の検証が必要である。吐出装置 B については、 $v_l < v$ であることから妥当であると考えられるが、吐出装置 A とほぼ同様の機器および手法を用いていることから、同様に検証が必要と考えられる。

3.2 摩耗断面形状

摩耗試験終了後の摩耗断面形状の例を図-6に示す。図中の各断面は、図-3の摩耗計算領域の中心を通り、長辺方向に平行な断面を示している。吐出装置 A を用いた A04530 においては、試験体の横断位置中心 0mm 付近を対称としてほぼ均等に摩耗が進行していると考えられる。一方、吐出装置 B を用いた B04530 および B20030 においては、横断位置 15mm 付近で摩耗の進行が速く、摩耗進行に偏りがあることが示されている。これら以外の B シリーズの試験体も同様の摩耗状況にあった。これは、吐出装置 B において水噴流の分布に偏りがあること

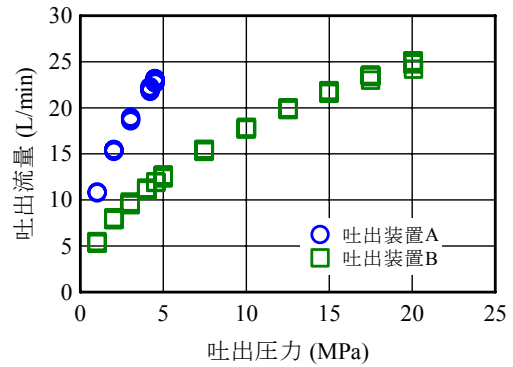


図-4 吐出圧力と吐出流量との関係

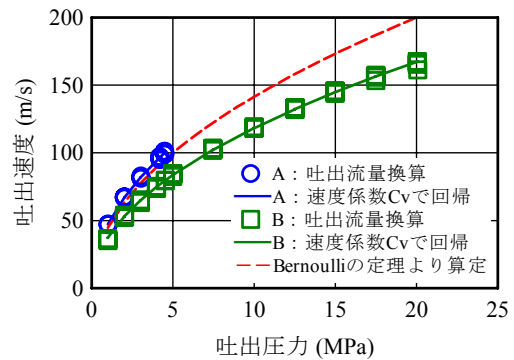


図-5 吐出圧力と吐出速度との関係

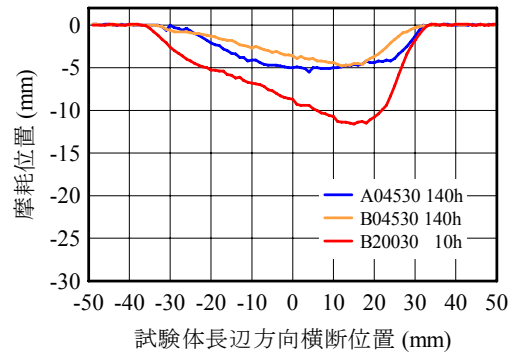


図-6 摩耗断面形状の例

が原因と考えられた。しかし、先述した摩耗深さの計算では、横断位置 $-25 \sim +25\text{mm}$ 間の摩耗位置データを用いており、同範囲は摩耗範囲 (概ね $-35 \sim +33\text{mm}$) の約 74% を占めること、そして、最深部を同範囲内に含むことから、摩耗進行の偏りが摩耗深さの評価へ及ぼす影響は小さいと判断し、以下の分析を行った。

3.3 吐出圧力と摩耗深さおよび摩耗速度

吐出装置 A における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係を図-7に示す。摩耗深さの図より、①いずれの吐出圧力においても摩耗深さは時間経過に伴い線形的に増加すること、②吐出圧力が高くなるほど、摩耗の進行が速くなること、③ 3.0MPa においては摩耗の進行に水セメント比の違いによる差が認められないこと、④ 4.0MPa 以上においては $W/C=50\%$ は 40% に比較して摩耗の進行が速いこと、が示された。これらは、摩耗進行が吐出圧力の影響を受けること、また、耐摩耗性は試験体

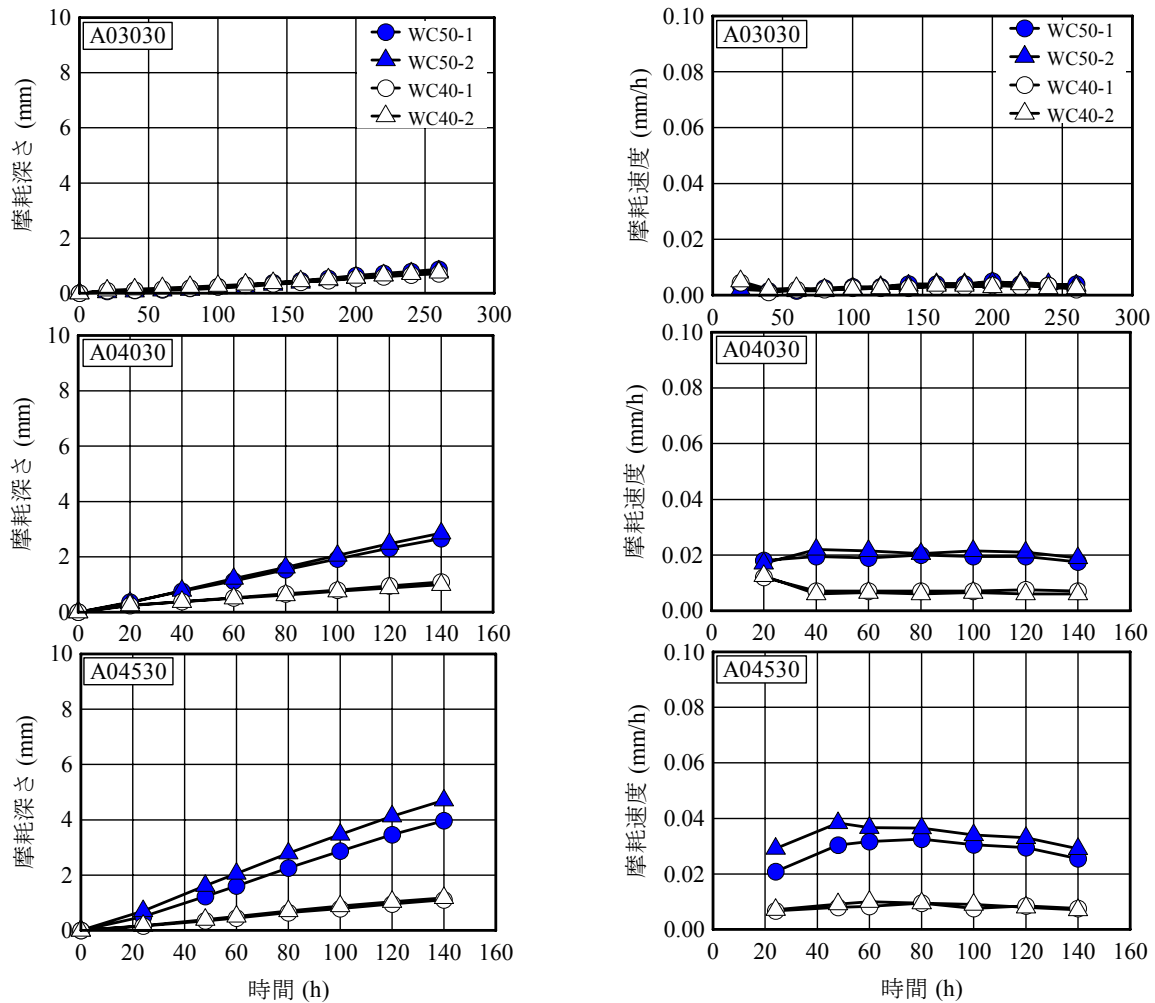


図-7 吐出装置 A における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係

の水セメント比に依存していることを示唆している。

摩耗速度の図より、初期の 20 時間において速度のばらつきはあるが、それ以後はばらつきが小さく、ほぼ一定の値となることが示された。ただし、W/C=50%の 4.5MPa における摩耗速度は、100 時間以降は減少傾向にあるように見え、これは、摩耗進行に伴ってノズルから試験体までの距離が増加したことによる試験体表面への液滴の衝撃圧の低下が原因と考えられる。

吐出装置 B における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係を図-8 に示す。吐出装置 B においても A と同様の傾向となり、①時間経過に伴い摩耗深さが線形的に増加すること、②吐出圧力が高くなるほど、摩耗の進行が速くなること、③W/C=50%は 40%に比較して摩耗の進行が速いこと、が示された。また、摩耗速度においては、4.5MPa では初期 20 時間、10MPa 以上では初期 1~2 時間にばらつきはあるもののそれ以降はほぼ一定の値を示した。

吐出装置 A と B の吐出圧力 4.5MPa における同水セメント比の全試験時間を通した摩耗速度の平均値を比較すると、吐出装置 A が B を上回っており、吐出装置 B

に対する比率で W/C=50%が約 148%、W/C=40%が約 114%であった。この原因としては、吐出装置 A が B に比較して吐出流量が約 1.9 倍と多いこと、また、ノズルから試験体までの距離が 10mm 小さいことが考えられる。

吐出圧力および吐出速度と摩耗速度との関係を図-9 に示す。ここでは、各試験ケースにおける全試験時間の平均摩耗速度をプロットした。また、吐出装置および水セメント比別の累乗関数による回帰直線も併せてプロットした。累乗関数は、

$$E_r = aX^b \quad (3)$$

ここに、 E_r : 摩耗速度、 X : 吐出圧力または吐出速度、 a, b : パラメータ

で表し、パラメータおよび決定係数を表-4 に示した。同じ吐出装置および同じ水セメント比の条件においては、累乗関数で近似できることが示された。これは、吐出圧力および吐出速度の増加により、摩耗速度が加速度的に増大することを示している。また、このことは同じ吐出装置を用いた試験であれば、試験体において最低 2 点の吐出圧力における摩耗速度が既知であれば、2 点以外の吐出圧力における摩耗速度が推測可能であること

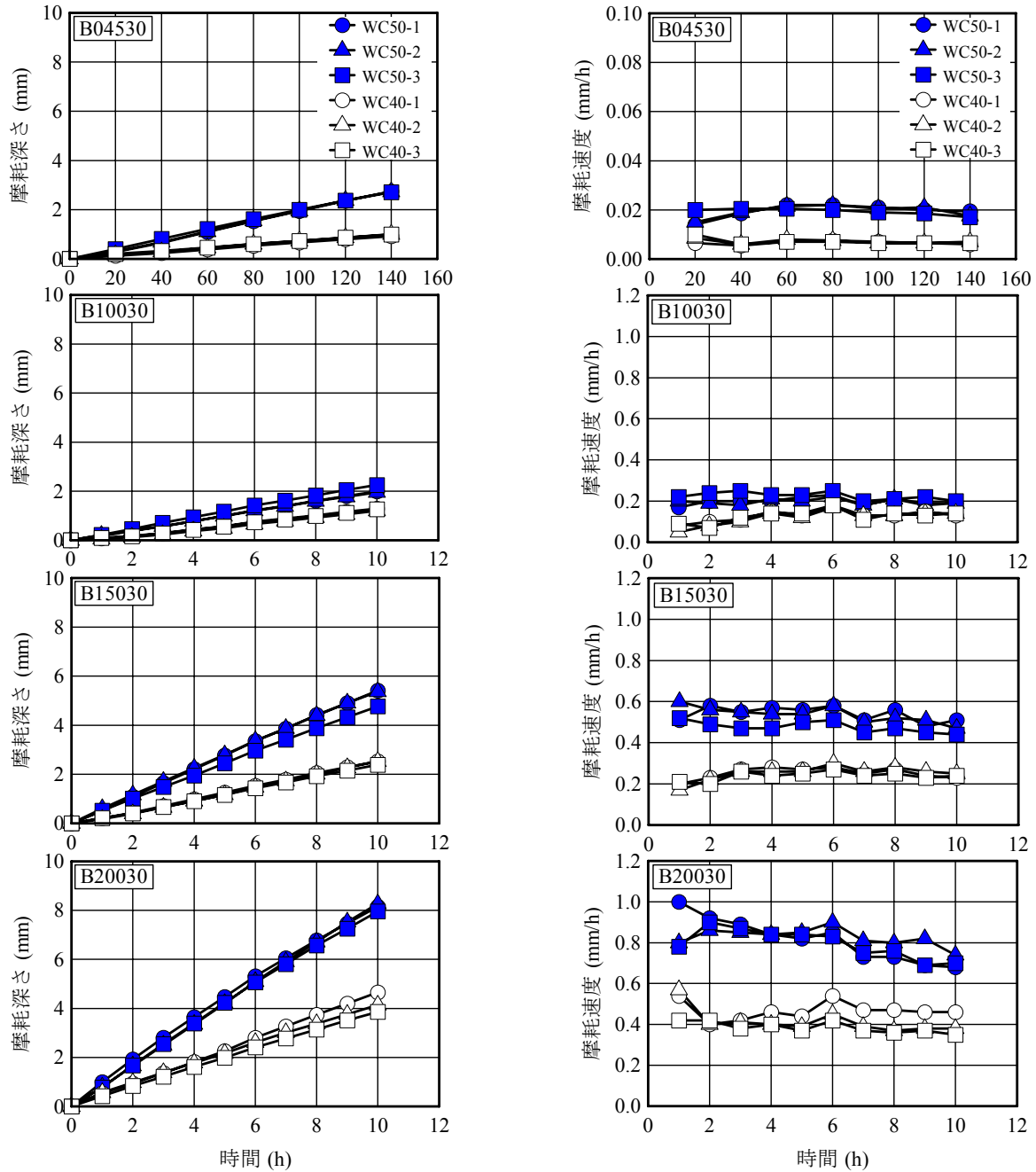


図-8 吐出装置 B における試験時間と摩耗深さおよび摩耗速度との関係

を示している。つまり、異なる吐出圧力で試験された試験体の摩耗速度に関する相対評価が可能となることを示唆している。なお、吐出圧力と摩耗速度との関係における W/C=40%の吐出装置 A と吐出装置 B の回帰式はほぼ一致したが、それ以外の同水セメント比の試験体における回帰式は一致しなかった。このことは、吐出装置 A および B における摩耗性状が異なることを示唆している。その原因としては、スタンドオフ距離、吐出流量、液滴径などの水噴流の形態、などの相違が考えられ、今後の検証が必要である。

3.4 回転速度と摩耗速度

回転速度 30rpm と 60rpm における試験時間と摩耗速度

との関係を図-10に示す。W/C=40%の試験体の摩耗速度は、4.5MPa、20.0MPaとも回転速度の変化による明確な差は見られない。一方、W/C=50%の試験体の摩耗速度は、4.5MPaで30rpmが60rpmを上回り、20.0MPaでは反対に60rpmが30rpmを上回る結果となり、相反する傾向が示された。この結果が正しいと仮定すれば、吐出圧力の大小によって、摩耗のメカニズムが異なることが推測される。逆にこの結果が正しくないとすれば、試験体の何らかの材料特性や、吐出圧力の制御などの試験条件に相違があったことが考えられる。現時点においては、回転速度が摩耗速度に及ぼす影響については、明確ではない。

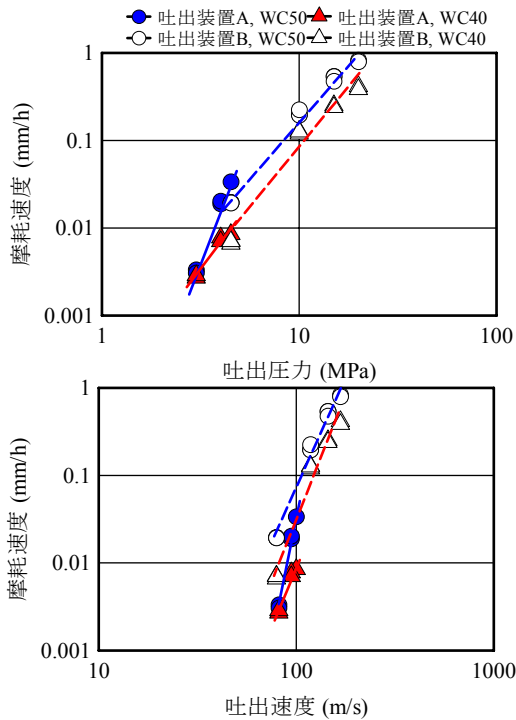


図-9 吐出圧力および吐出速度と摩耗速度との関係

4. まとめ

本研究では、水流摩耗試験機の吐出圧力および回転速度を変化させたセメントペースト試験体の摩耗試験を実施し、その影響を評価した。

以下に、本研究で得られた主な結果を示す。

- (1) 試験時間経過とともに摩耗深さは線形的に増加する。
- (2) 吐出圧力の増加により、摩耗速度は加速度的に増大し、その関係は、累乗関数で近似できる。
- (3) 吐出装置が異なると摩耗性状も相違し、原因としては、スタンドオフ距離、吐出流量、液滴径などの水噴流の形態、などの相違が考えられる。
- (4) 回転速度の変化が摩耗速度に及ぼす影響は、吐出圧力4.5MPaと20.0MPaでは相反する傾向が示されたため明確とはならなかった。

参考文献

- 1) 堀口敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.31，No.10，pp.17-27，1993.10
- 2) 石田知子：水理構造物のコンクリートの摩耗評価に関する試験方法の現状，コンクリート工学，Vol.45，No.3，pp.50-54，2007.3
- 3) Momber, A. and Kovacevic, R.:Fundamental investigations on concrete wear by high velocity water flow, Wear, Vol.177, pp.55-62, Sep.1994
- 4) Hu, X.G et al.:Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete, Wear, Vol.253, pp.848-854, Oct.2002

表-4 累乗関数による回帰

| 独立変数 | 吐出装置 | W/C (%) | パラメータ | | 決定係数 |
|------|------|---------|-------|-------|-------|
| | | | a | b | |
| 吐出圧力 | A | 50 | 6E-06 | 5.74 | 0.988 |
| | B | 50 | 5E-04 | 2.55 | 0.987 |
| | A | 40 | 1E-04 | 2.81 | 0.957 |
| | B | 40 | 1E-04 | 2.78 | 0.967 |
| 吐出速度 | A | 50 | 4E-25 | 11.48 | 0.988 |
| | B | 50 | 5E-12 | 5.10 | 0.987 |
| | A | 40 | 5E-14 | 5.62 | 0.957 |
| | B | 40 | 2E-13 | 5.56 | 0.967 |

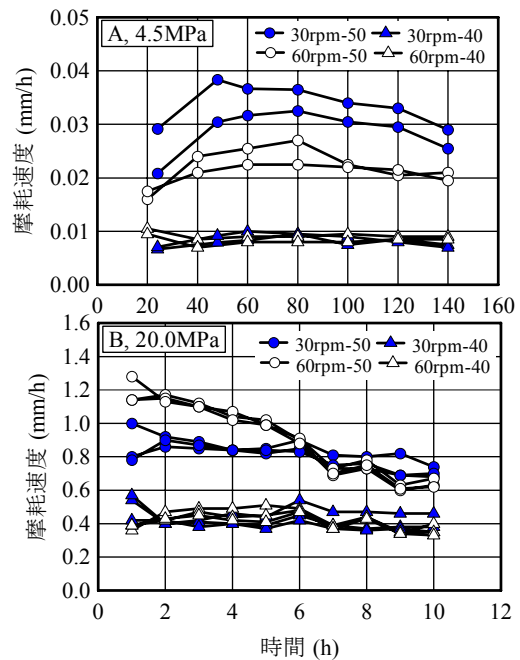


図-10 回転速度30rpmおよび60rpmにおける試験時間と摩耗速度との関係

- 5) Liu, Y.W. et al.:Abrasion erosion of concrete by water-borne sand, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.1814-1820, Oct.2006
- 6) 石神暁郎，森充広，渡嘉敷勝，増川晋：農業用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.805-810，2005.6
- 7) 渡嘉敷勝，石神暁郎，森充広，増川晋：水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.695-700，2006.7
- 8) 例えば，小林陵二，新井隆景，山田泰司：ウォータージェット加工技術における噴流の構造と金属材料の懐食過程，日本機械学会論文集（B編），Vol.53，489，pp.1539-1542，1987.5
- 9) 八尋暉夫編：最新ウォータージェット工法，p.16，鹿島出版会，1996