

## 論文 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

渡嘉敷 勝<sup>\*1</sup>・石神 暁郎<sup>\*2</sup>・森 充広<sup>\*3</sup>・増川 晋<sup>\*4</sup>

**要旨**：農業水路等のコンクリート材料においてモルタル分が選択的に流出する摩耗現象の解明を目的として開発した水流摩耗試験機を用いて、モルタルおよびペースト供試体の摩耗試験を実施した。その結果、本試験機による摩耗量は、骨材の有無により大きく異なることが判明した。モルタル供試体では、骨材の露出後は試験時間経過とともに摩耗速度が大きく低下したのに対し、ペースト供試体では、摩耗速度の低下は緩やかであった。

**キーワード**：摩耗試験, 高压水流, 摩耗特性, 農業水路, モルタル, ペースト, 骨材

### 1. はじめに

農業水路等の水理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選択的に摩耗流出し、粗骨材が露出した状況が多く見られる(図-1)。このような摩耗現象は、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、水理性能を低下させるとともに、漏水などの要因ともなる。しかしながら、このような選択的摩耗については、進行過程が十分に解明されておらず、水路構造物等の性能照査および寿命予測を実施する上での大きな課題となっている。

コンクリートの摩耗試験には種々の方法があり、模擬する摩耗機構によって試験方法が選定されている。水理構造物の摩耗現象は、流れの作用によるエロージョン摩耗が代表的とされており<sup>1)</sup>、エロージョン摩耗を模擬する試験機としては、掃流摩耗試験機<sup>2)</sup>が使用されている。しかしながら、掃流摩耗試験機は、供試体形状が中空半円形と特殊であることから、摩耗深さを直接的に計測することが困難であること、また、実構造物より採取した供試体による試験が困難であること、などの問題がある。そこで筆者らは、一般的な形状の供試体によるエロージョン



図-1 農業水路の摩耗状況

摩耗を模擬することを目的とした水流摩耗試験機を開発した<sup>3)</sup>。

本研究では、開発した水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペースト供試体の摩耗状況を分析し、本機による基礎的な摩耗特性について検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試体

供試体は、モルタル2種とペースト1種の計3種の配合とした(表-1)。材料は、普通ポルトランドセメントおよびJIS R 5201に準拠した標準砂を使用した。M40のS/Cは、単位容積中の細骨材量がM50と等しくなるように設定した。

\*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 (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 (ショーボンド建設(株)) (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 工博

また、供試体は、内寸法 296mm×142mm×60mm の型枠に打設し、各配合について 2 個を作製した。材齢 1 日で脱型した後に水中養生し、材齢 28 日で試験開始とした。

## 2.2 水流摩耗試験機

水流摩耗試験機の概要と試験状況を図-2 および 3 に、また、試験条件を表-2 に示す。本機は、供試体の摩耗を促進する外力として高圧水流を採用した。本機は、供試体を取り付け回転させる回転装置部および高圧水を供給する高圧水噴射装置部より構成されている。回転装置部は、供試体 6 個を設置可能な回転ドラムをモーターにより一定速度で回転させる。また、高圧水噴射装置部は、高圧ポンプを利用し、制御された圧力で水流を回転ドラム中心部へ供給する。これらの構成により、回転ドラム中心部から鉛直上方へ噴射される高圧水流を供試体 6 個が均等に受けることが可能となる。噴射された水および摩耗された材料は、供試体間の隙間部分より流出し、排除される。

## 2.3 実験手順

### (1) 供試体取付と試験機始動

供試体を摩耗面がドラム内側となるように取り付け、ドラムを回転させた後に、高圧水を噴射させた。

### (2) 試験時間

試験時間は、標準で 28 日 (672 時間) とした。

### (3) 摩耗量の計測

供試体の摩耗量としては、摩耗重量 (気中、水中) および摩耗深さを計測した。計測は、摩耗試験前および 1, 2, 3, 4, 7, 14, 21, 28 日経過後に実施した。各試験時間経過後に供試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 μm) により摩耗深さを計測した。摩耗深さの計測は、図-4 に示すように供試体の長手方向に走査し、短手方向に 5mm 間隔で計 27 本の走査線について実施した。また、走査線上では、1mm 間隔で摩耗深さを計測した。尚、計測対象以外の供試体は、常に水槽中に静置し、

表-1 供試体の配合および圧縮強度

記号	W/C (%)	S/C	圧縮強度 $\sigma_{28}$ (N/mm <sup>2</sup> )
M50	50	3.0	39.1
M40	40	2.6	51.1
C50	50	0	40.7

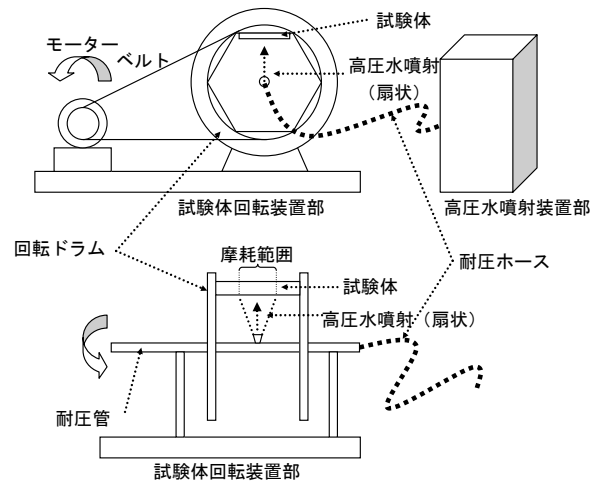


図-2 試験機の概要<sup>3)</sup>

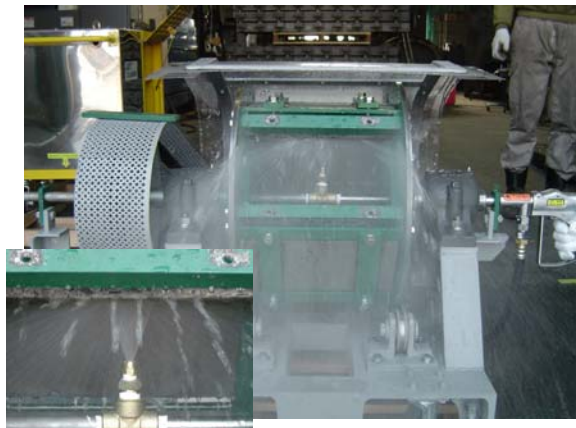
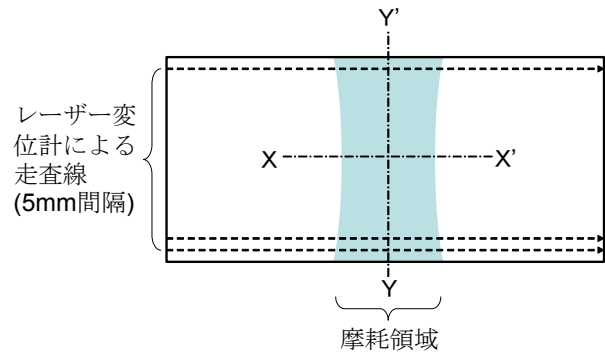


図-3 試験状況

表-2 試験条件

項目	条件
高圧水噴射圧力	4.9 MPa
高圧水噴射水量	24.1 l/min
ドラム回転速度	30 rpm
ノズルの噴射水扇状角度	40°
供試体寸法	296×142×60 mm

乾燥しないように配慮した。これは、供試体内部の乾燥が重量測定結果に及ぼす影響を排除するためである。ところで、**図-4**のX-X'およびY-Y'は、代表的な摩耗断面として、3.3節で検討する箇所を示している。



**図-4** 供試体の摩耗深さ計測

### 3. 結果および考察

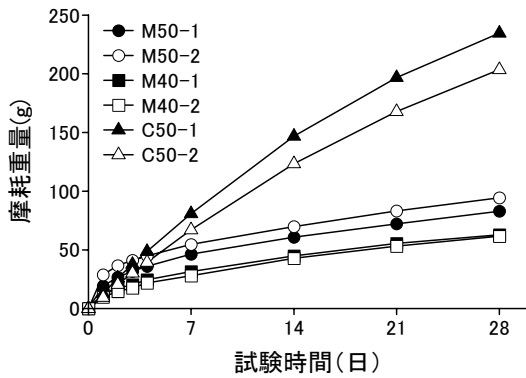
#### 3.1 摩耗量

摩耗試験終了後の供試体の状況を**図-5**に示す。この図より、摩耗領域が供試体中央部を帯のように縦断していること、また、その領域は長方形ではなく、中心部分の幅が細い形状を有していることがわかる。

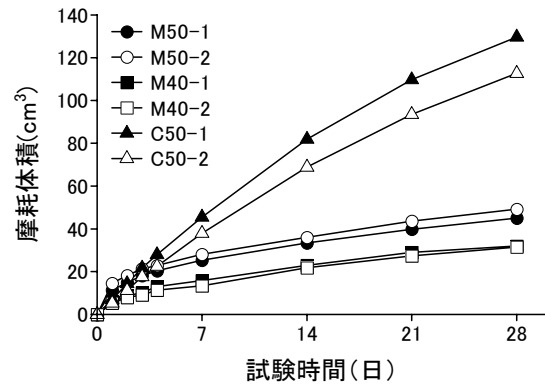


**図-5** 試験終了後の供試体 (M40)

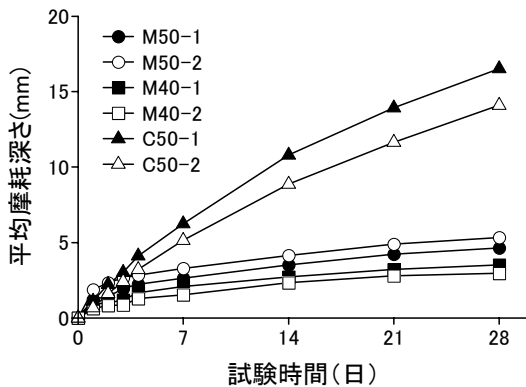
試験時間と摩耗重量との関係を**図-6**に、気中重量と水中重量から求めた摩耗体積との関係を**図-7**に、**図-4**におけるX-X'線とY-Y'線の交点を中心とした50mm四方の平均摩耗深さと最大摩耗深さとの関係を**図-8**および**9**に示す。いずれの結果も、ペースト供試体の摩耗量が



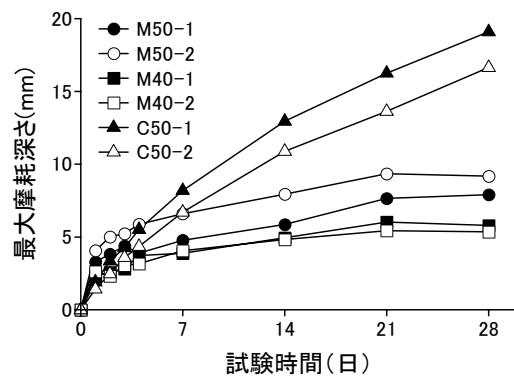
**図-6** 試験時間と摩耗重量の関係



**図-7** 試験時間と摩耗体積の関係



**図-8** 試験時間と平均摩耗深さの関係



**図-9** 試験時間と最大摩耗深さの関係

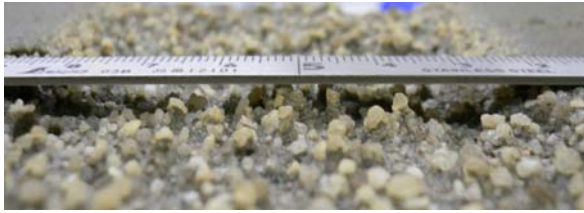


図-10 M50の摩耗状況(28日後)

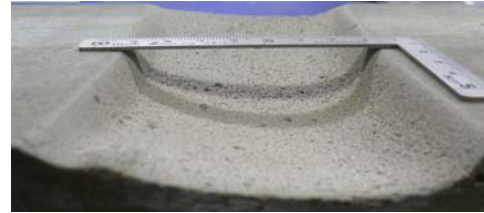


図-11 C50の摩耗状況(28日後)

きいこと、モルタル供試体は、摩耗初期においてペースト供試体の摩耗量を上回ることもあるが、直ぐに低下すること、を示している。これは、骨材の有無が原因と考えられる。つまり、ペースト供試体では、構造がほぼ均一であるために直線的に摩耗量が増加するのに対し、モルタル供試体では、高压水流の衝撃に強い骨材部分とより弱いペースト部分から構成されており、骨材が表面に露出した後は、摩耗を受ける表面に占めるペースト部分の面積が縮小していくために、摩耗量が低下していくと判断された。これは、試験終了後のM50(図-10)およびC50(図-11)の摩耗状況からも示唆された。M50では、表面に多くの骨材が露出し、凹凸の大きな状況となっていた。これは、高压水流によって摩耗に弱いペースト分が先に流出し、摩耗に強い骨材が表面に残った結果であると考えられた。骨材の中には、周囲のペースト分は流出しているものの、その下面のペースト分との付着のみで残っている骨材も多く、頂に骨材を載せた独立峰が乱立する様相を呈していた。これは、3.3節で述べるように高压水流の供試体への入射角の影響が大きいと考えられた。その結果、骨材が高压水流から下面のペースト部分を保護することとなり、摩耗の進行が抑制されたと考えられた。これに対して、C50では、摩耗表面がなだらかなままで摩耗が進行している状況が示されている。

ところで、摩耗量は、摩耗重量、摩耗体積、平均摩耗深さとも同様の傾向を示すが、評価指標としては、平均摩耗深さが優れていると判断された。理由としては、摩耗深さの測定によって、表面形状を定量的に把握することが可能で

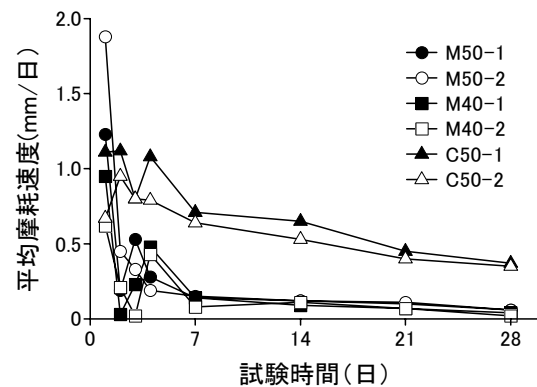


図-12 試験時間と平均摩耗速度の関係

あること、また、摩耗以外の原因による供試体の欠けなどが生じて、摩耗深さの測定値に影響を受けることが少ないこと、などが挙げられる。本試験においては、供試体の取り付け・取り外し、また、計測器への移動などの一連の作業において供試体の一部が欠けるなどの損傷が生じることは十分に予想される。供試体が損傷した場合は、重量測定だけでは、試験結果を適正に評価することは困難となる。それに対して、摩耗深さは、摩耗面に対する損傷でなければ、供試体に多少の損傷が生じて試験結果を適正に評価することが可能である。

### 3.2 摩耗速度

日当たりの平均摩耗深さを平均摩耗速度として示したのが図-12である。初期7日目までは各供試体とも変動が大きいが、7日目以降は変動が少ない結果となった。また、モルタル供試体およびペースト供試体ともに平均摩耗速度が低下していることが示された。

7日目以降の平均摩耗速度の低下については、モルタル供試体とペースト供試体では原因が異なると考えられた。前述したようにモルタル供試体では、骨材とペースト部で摩耗の進行速度

が異なり、骨材が露出すると摩耗の進行が抑制される。そのため、時間経過とともに摩耗表面積に占める骨材表面積の割合が増加し、摩耗速度が低下したと考えられた。それに対して、ペースト供試体の場合は、骨材部分とペースト部分のような不均一性を有するモルタル供試体とは異なり、ほぼ均一な構造であるため、本来であれば、一定の摩耗速度を維持することが予想された。しかしながら、ペースト供試体は、摩耗速度が速いために、摩耗進行に伴って、供試体の摩耗表面が水流噴射ノズルに対して相対的に後退することとなり、その結果、高压水流の到達距離が伸び、摩耗表面における高压水流の衝撃力が低下したため、摩耗速度が低下したように見えると考えられた。

また、単位容積中の細骨材量を同じに設定したモルタル供試体 M50 と M40 においては、水セメント比が異なるにもかかわらず、7 日目以降の平均摩耗速度は同程度であった。これは、今回の試験条件下においては、水セメント比の相違によるペースト分の強度の相違よりも、骨材の量が摩耗進行に影響を及ぼしていたと判断された。

### 3.3 摩耗形状

各供試体における図-4の X-X'および Y-Y'断面における試験終了後の摩耗状況を図-13および14に示す。前述の、モルタル供試体の摩耗表面が骨材の露出により、表面の凹凸が大きく、一方、ペースト供試体では、なだらかな摩耗表面を形成している状況が定量的に示されている。但し、C50-2の Y-Y'断面の-40 mm 辺りの突起部分は、その部分の色が周辺と比較し濃い灰色であったことからセメント分が多く、強度の高い部分であったために摩耗進行が抑制されたと推測された。

X-X'断面のペースト供試体の摩耗形状から、摩耗状況は均一ではなく、摩耗に偏りがあることが判明した。この原因として考えられるのは、本試験機の水噴射ノズルから噴出される水流に偏りがあることである。ノズルからは水流が

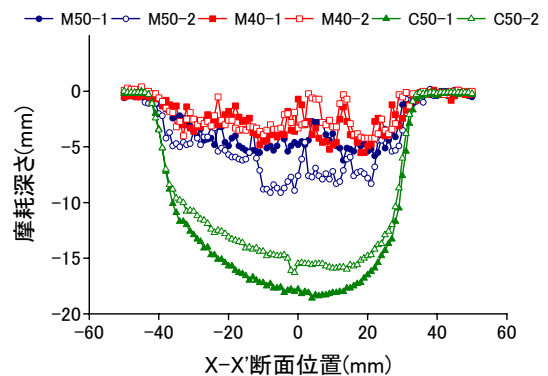


図-13 X-X'断面の摩耗状況 (28 日後)

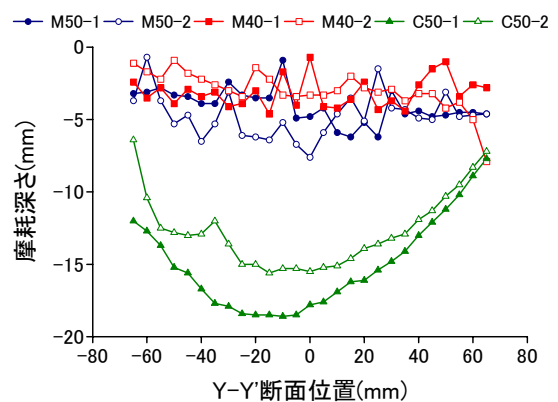


図-14 Y-Y'断面の摩耗状況 (28 日後)

40° の角度で拡がって放出されることになっているが、これにはノズルの加工精度およびノズルの取り付け角度が大きく影響する。供試体表面における水流圧力が計測可能であれば、原因が明確になると考えられるが、現時点では計測手法が見あたらず、今後とも検証を進める予定である。

Y-Y'断面のペースト供試体の摩耗形状から、供試体の端部よりも中央部で摩耗が進行していることが示された。この原因としては、水流噴射ノズルから供試体表面までの距離の相違が挙げられる。ドラムに設置された供試体が、回転しながら高压水流を受ける構造であることから、図-15に示すように供試体表面への水流の入射角および水流の到達距離は供試体表面の位置によって異なっている。供試体中心部では、水流入射角は 90° で水流到達距離は 70 mm、これ

に対して端部では、水流入射角  $63.4^\circ$  で水流到達距離は 87 mm となっている。供試体の中心部から端部までの間は、水流入射角は  $63.4^\circ \sim 90^\circ$  , 水流到達距離は 87 mm $\sim$ 70 mm の間で変化する。水流到達距離が短いほど摩耗表面における水流の圧力は高いと考えられる。したがって、供試体の摩耗形状は図-14 に示されるように中心部付近で摩耗深さが最大となったと判断された。

ところで、水流入射角が  $63.4^\circ \sim 90^\circ$  であることの影響として、前述の頂に骨材を載せた独立峰が乱立する様相を呈するモルタル供試体の摩耗形状が挙げられる。このような形状であれば、供試体表面と平行方向からの強い圧力が作用する場合には、その骨材は容易に流出し、独立峰が乱立するような形状にはならないと考えられる。ところが入射角が直角に近いことから、外力が鉛直方向から主として働くため、その外力は骨材を通じて供試体に伝達されるのみで、骨材流出が遅れる原因となっていると推測される。本試験機の現段階での構造上、このような摩耗特性が得られているが、水路等の水理構造物のエロージョン摩耗をより模擬するためには、今後、水流入射角の検討が必要であると考えられた。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 試験時間と摩耗重量、摩耗体積、平均摩耗深さ、最大摩耗深さとの関係においては、同様の傾向を示し、ペースト供試体の摩耗量が大きいこと、モルタル供試体は骨材露出とともに摩耗量が低下することが判明した。
- (2) 摩耗表面形状を定量的に把握するため、また、計測作業における供試体の欠けなどによる試験結果への影響を排除するためには、摩耗量の評価指標として、摩耗深さを計測する必要がある。
- (3) モルタル供試体が骨材露出とともに摩耗速

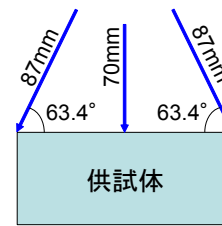


図-15 供試体への水流入射角および到達距離

度が低下する原因としては、摩耗表面積に占める骨材表面積の割合の増加が影響していると考えられた。

- (4) ペースト供試体の摩耗速度低下は、摩耗進行に伴う水流噴出ノズルから摩耗表面までの水流到達距離の増加が原因と考えられた。
- (5) 本試験機の摩耗特性として、供試体への水流入射角が摩耗形状に大きく影響していることが示唆された。

今後は、本試験機による摩耗形状と実構造物における摩耗状況との類似性についても検討する予定である。また、実構造物から採取した供試体を用いた試験を実施することで、実構造物の摩耗時間と本試験機による試験時間との対応関係を明らかにする予定である。

#### 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) 例えば、豊福俊英：アラミド繊維補強コンクリートの掃流および衝撃摩耗特性，セメント・コンクリート論文集，No.49，766-771，1995
- 3) 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