

## [1055] 固体間摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果

正会員 ○ 泉 達男（花王株和歌山研究所）

正会員 前川 宏一（東京大学工学部）

正会員 小沢 一雅（東京大学工学部）

正会員 國島 正彦（東京大学工学部）

## 1. まえがき

コンクリートのポンプ圧送は省力化と工期の短縮化等の経済的メリットによって広く普及するようになったが、一方で圧送管内での『閉塞』や『材料分離』などの未解決な問題も同時に含んでいる。

一般に直管部では、固体栓が形成され、せん断ひずみ速度が無い領域が存在するといわれている<sup>1)</sup>。ところが、曲がり部や断面変化部（テーパ等）では骨材の相対的位置の変化や潤滑層の層厚変化がもたらされる<sup>2)</sup>（図-1）。その結果、骨材相互や骨材・管壁間に衝突・接触摩擦などの応力伝達が励起され、アーチングや閉塞を引き起こす要因の一つになっている<sup>3)</sup>と考えられる。ペーストの力学的特性は骨材の動きにも影響を及ぼすと考えられるが、その他に骨材間に存在するペースト（モルタル）の性質によって粒子間の応力伝達機構も影響を受けると思われる。

セメントペースト、モルタルの力学的特性の評価方法として、二重円筒型、引き上げ球型、平行板型など種々の方法が報告されている。しかし、これらの方法は、固体間摩擦抵抗の観点から行われている方法ではない。

そこで、本研究では特に骨材間や骨材と管壁間の摩擦抵抗に及ぼすペーストの効果を調べるために、ペーストを介した鋼板による直接せん断試験を行い、ペーストを介在させた状態でのマクロなせん断力を測定した。これを基に、固体間のせん断応力伝達機構に及ぼすペーストの役割について検討したものである。

## 2. 実験概要

## 2. 1. 使用材料

ペーストには、化学的に安定な高炉スラグ（比重 2.9、ブレーン比表面積 3290 cm<sup>2</sup>/g、7860

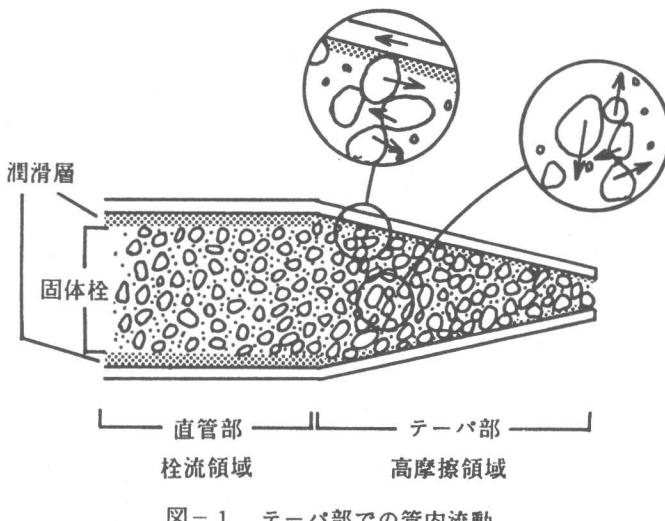


図-1 テーパ部での管内流動

$\text{cm}^2/\text{g}$ ) を主として用いた。また、一部の実験には普通ポルトランドセメント(比重 3.15、ブレーン比表面積 3260  $\text{cm}^2/\text{g}$ )、フライアッシュ(比重 2.19、ブレーン比表面積 3000  $\text{cm}^2/\text{g}$ )を使用した。混和剤としては、増粘剤にはメチルセルロースを主成分にしたものと、高性能減水剤には、ナフタリンスルフォン酸塩系のものを使用した。

## 2. 2. 実験方法

直接せん断試験の形状寸法を図-2に示す。ペーストはモルタルミキサーを用い、自転140 rpm、公転62 rpmで1分間、さらに自転285 rpm、公転125 rpmで2分間混練した後、2枚の鋼板の間にはさみ、一定の鉛直荷重( $60 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^2$ )を掛け、試料の膜厚をほぼ均等にした。一度、鉛直荷重を除荷した後、再び所定の鉛直荷重をかけた。先端にロードセルを装着したサーボモーターで上部鋼板を一定速度で押し、鋼板間のせん断抵抗を経時的に測定した(1/20秒間隔)。

せん断抵抗値の時間平均で固体間摩擦を評価し、抵抗機構の解釈のため、平均まわりの標準偏差をダイナミックアンプによる測定から求めた。また、厳密には試料の粘度特性などによって実験中に試料の膜厚が、多少変化すると予想されるが、今回の実験は膜厚変化の測定は行わなかった。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1. 固体間せん断抵抗の機構

スラグ-水系によるペーストを介在させた状態の固体間平均せん断抵抗応力 $\tau$ と直応力 $\sigma$ の関係を図-3に示す。せん断応力と直応力の関係には、粘土などの粒状体にみられるクーロンの式がほぼ成立することが分かる。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

但し、Cは見かけの粘着応力、 $\phi$ は見かけの内部摩擦角を意味する。しかし、 $\phi$ やCはペーストの配合によって変化し、水/スラグ比率(W/S)が116vol%近傍で摩擦角が大きく低減していることが分かる。これは、せん断

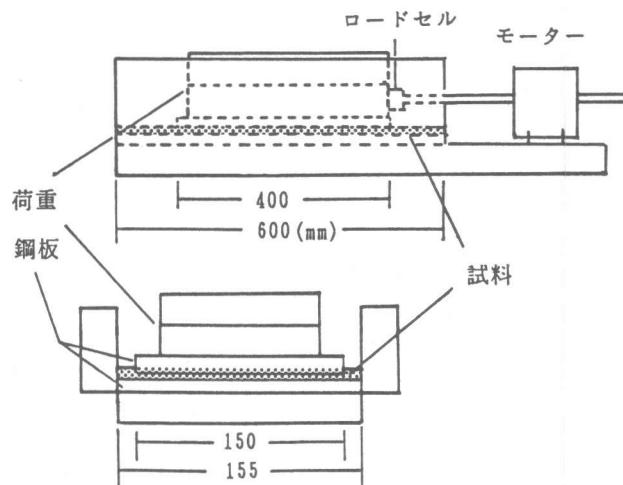


図-2 直接せん断試験装置

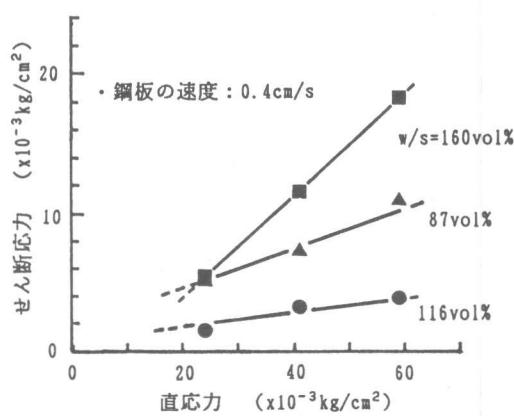


図-3 せん断応力-直応力の関係

伝達機構において、式(1)の右辺第一項の粘着機構が卓越し、第二項の摩擦機構が相対的に小さくなつたことを意味している。

介在ペーストの組成が固体間摩擦機構に及ぼす効果を考察する意味で、W/Sを変化させた時の平均せん断応力 $\tau$ の変化を図-4に示したところ、 $\tau$ を最小にするW/Sが存在することが判明した。さらに、標準偏差にも最小値を与えるW/Sが存在し、ほぼ $\tau$ の最小値を与えるW/Sに一致していることが分かった。但し、W/Sが小さい領域では、大きい領域と比較して標準偏差の変化は顕著にみられない（図-5）。

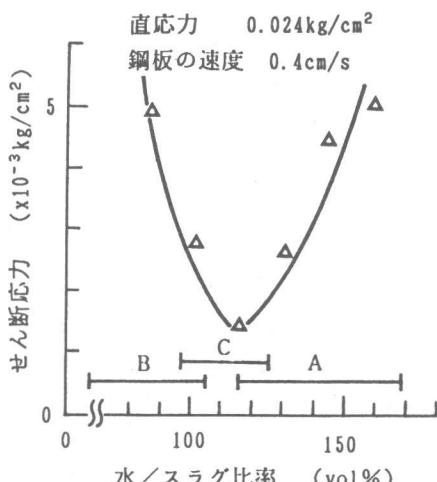


図-4 水／スラグ比によるせん断抵抗力への影響(1)

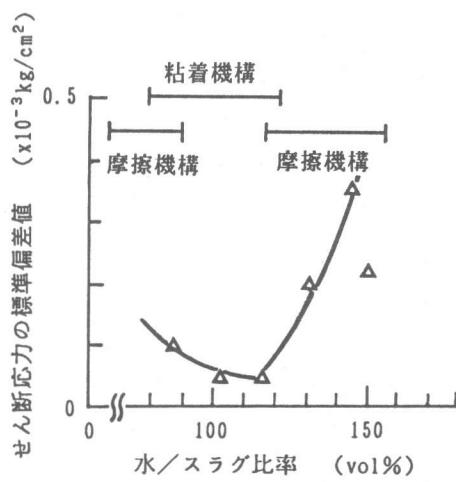


図-5 水／スラグ比によるせん断抵抗力への影響(2)

伝達せん断応力は、1)鋼板同士の接触や粉体粒子の接触・衝突で伝達される摩擦成分( $\sigma \tan \phi$ )と、2)鋼板間のペーストが流体としてせん断変形に抵抗する粘着成分Cの和として表される。ペーストの粘性の小さいA領域（図-4）は、主として鋼板接触による摩擦効果が卓越するため、鋼板接触で顕著に現れる標準偏差の増加が現れるものと解釈される。一方、ペースト粘度の高いB領域では、逆に粘性挙動が卓越し、直接接触による摩擦機構が軽減されて、標準偏差が小さくなつたと考えられる。但し、W/Sの低下は粉体量の増加を意味するので、粉体間の摩擦挙動が粘性付加の効果を上回るため、B領域での $\tau$ と標準偏差がW/Sの減少に伴い、増加するものと想像される。このような摩擦と粘着機構による伝達せん断力を最小にするW/SがC領域に現れるのである。

### 3. 2. せん断抵抗力に及ぼす混和剤の影響

#### 3. 2. 1. 増粘剤による摩擦機構の低減効果

増粘剤の添加は粘着機構を付与し、摩擦機構を低減させる効果を持つと考えられる。W/S = 131vol% (45wt%) のスラグペーストに増粘剤を添加した場合、せん断応力が添加量0.125wt%附近で最小になり、その後著しく増大した（図-6）。また、せん断応力の標準偏差値は添加量と共に急激に減少し、0.125wt%以上ではほとんど一定値に収束した（図-7）。つまり、無添加時はペーストの粘性が低く、鋼板同士の接触による摩擦機構が卓越していたものが、増粘剤添加によって粘着機構が卓越してきたものと思われる。

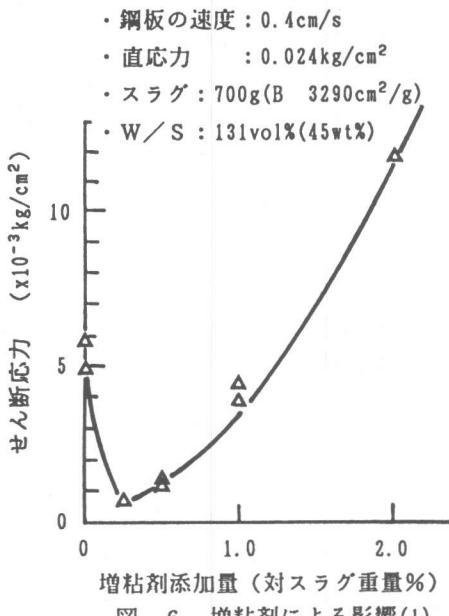


図-6 増粘剤による影響(1)

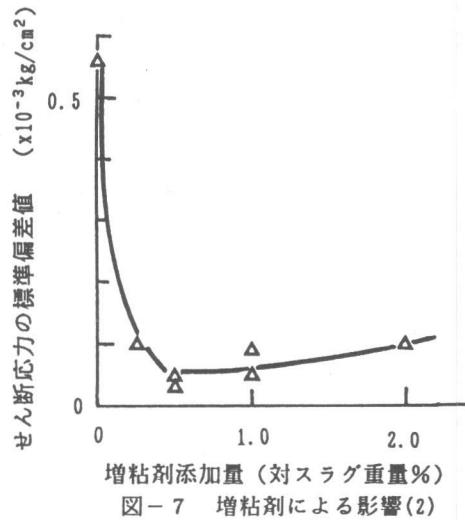


図-7 増粘剤による影響(2)

増粘剤1.0wt%添加と無添加の場合を比較すると、伝達せん断応力 $\tau$ は両者ともほぼ等しい。しかし、 $\tau$ に及ぼす直応力の効果を見ると、明らかに増粘剤を添加したペーストは、摩擦機構を消滅させる効果を持つことが図-8からも分かる。 $\tau$ の増加は、ペーストの粘性増加にのみ起因する。一般に増粘剤を添加するとコンクリートの変形抵抗性は増加するが、一方で固体間摩擦機構を極めて有効に低減させる効果を持つため、骨材粒子が凝集する領域を閉塞から回避する上で有効と思われる。

### 3. 2. 2. 高性能減水剤による摩擦機構の促進効果

高性能減水剤の添加による機構の変化を考察する意味で、せん断抵抗力への影響を考えてみた。W/Sが87vol% (30wt%) のスラグペーストに高性能減水剤を添加した際の平均せん断応力及びせん断応力の標準偏差の変化を図-9、10に示す。W/Sを変化させた場合と同様、添加量の增加に応じて、平均せん断応力は若干下がるもの、添加量と共に標準偏差が上昇し、増粘剤と逆に摩擦機構を促進させる働きをすることが分かる。

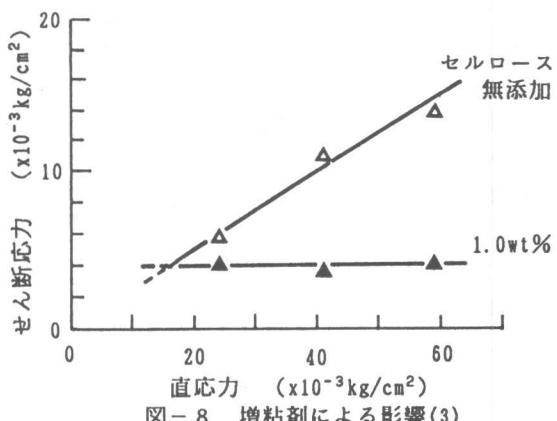


図-8 増粘剤による影響(3)

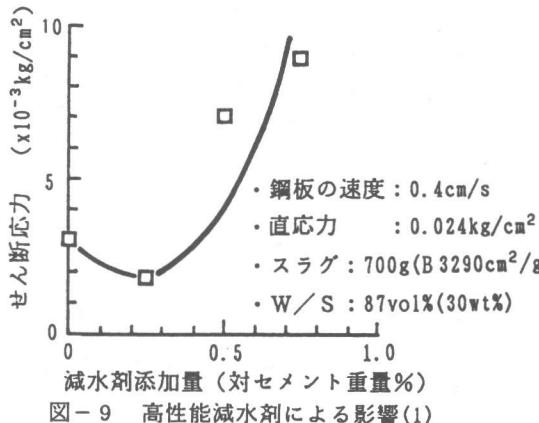


図-9 高性能減水剤による影響(1)

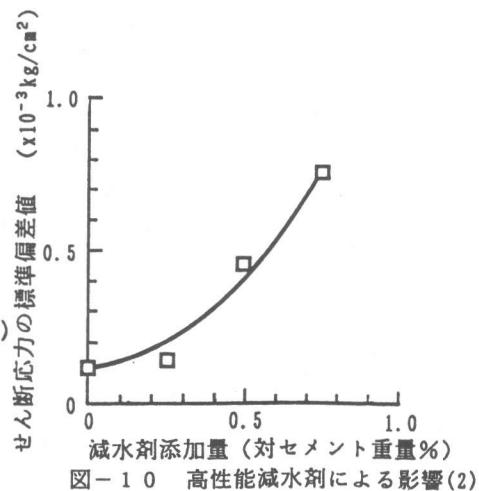


図-10 高性能減水剤による影響(2)

### 3.3.せん断抵抗力に及ぼす粉体特性の影響

#### 3.3.1. 粉体の大きさ

粉末度の違いによる機構の変化を調べた結果を図-11、12に示す。粉体寸法が小さくなると、平均せん断応力-W/S及びせん断応力標準偏差値-W/Sの曲線は、W/Sの高い方向へシフトする。これは粉体の微小化に伴い、単位体積当りの表面積が増え、そのため粉体の周りに付着する水分量が増加したと考えられる。その結果、粘着機構領域が移動したと推察される。

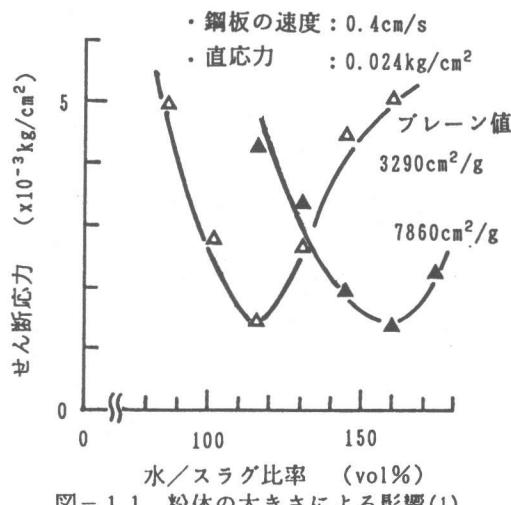


図-11 粉体の大きさによる影響(1)

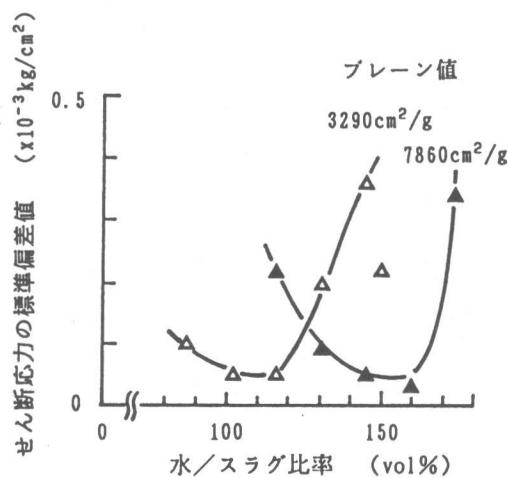


図-12 粉体の大きさによる影響(2)

#### 3.3.2. 粉体の形

粉体の形を変えた場合の機構の変化について検討した結果を図-13、14に示す。その結果、フライアッシュだけが、平均せん断応力-W/S、及びせん断応力標準偏差値-W/Sの曲線がW/Sの低い方向へシフトする。これは、ペーストに粘着性をもたらす、一つの要因である粉体の周りの付着水分の量が、粉体の形によって異なっているためと解釈される。

例えば、一定の水/粉体比のペーストを遠心脱水(400G)した後に粉体中に残存する水量を測定

した結果<sup>4)</sup>では、高炉スラグ 約25wt%、普通ポルトランドセメント 約25wt%、フライアッシュ 約15wt%となる。図-13より、各ペーストにおけるせん断応力の最小値を与えるW/Sの値を比較すると、高炉スラグ 約116vol%、普通ポルトランドセメント 約116vol%、フライアッシュ 約72vol%となり、フライアッシュのW/Sの値は他のペーストの約3/5となる。この結果は前述の遠心脱水実験の結果とほぼ一致する。従って、粉体の付着水分量によってそのペーストのせん断応力の最小値を与えるW/Sが変化すると考えられる。

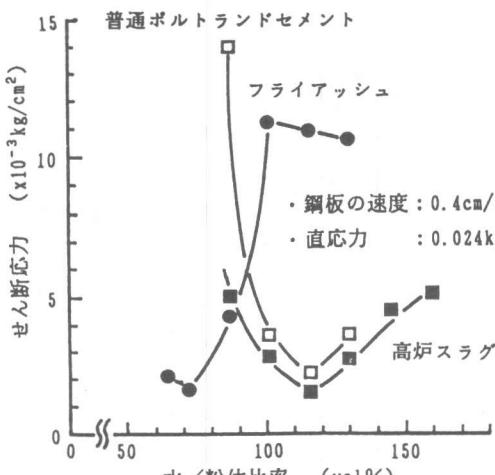


図-13 粉体の形による影響(1)

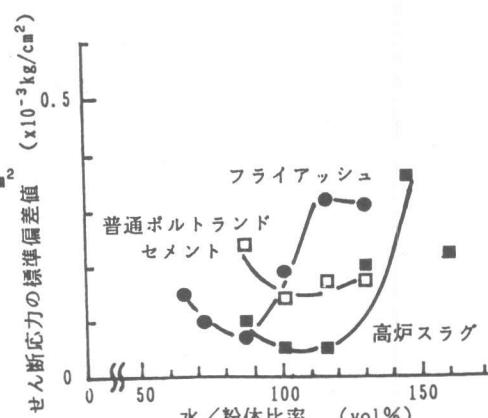


図-14 粉体の形による影響(2)

#### 4. 結論

- ペーストを介在させた状態での固体間せん断伝達機構は、粒子接触に起因する摩擦機構と、流体としてのペースト粘着機構の複合効果として説明される。両機構の比率は、水-粉体比、混和剤の種類と添加量、粉体の形状によって影響され、両機構の複合効果の所産として伝達せん断応力が最小となる配合が存在する。
- 増粘剤の添加は摩擦機構を有効に低減させる効果を持つため、直応力の如何にかかわらず、伝達せん断応力を最小にする添加量が存在する。一方、高性能減水剤の添加は逆に摩擦機構の促進効果を有するため、せん断応力を低減する効果は小さい。

尚、本研究の一部は文部省科学研究費補助金（試験(1)61850090）を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- 田沢 栄一：ポンプ圧送技術の現状と問題点、コンクリート工学、vol. 21、No. 11、1983、pp. 13-22
- 橋本 親典ほか：フレッシュコンクリートの管内流動における閉塞過程の可視化に関する実験手法、コンクリート工学、vol. 26、No. 2、1988、pp. 119-127
- A. Nanayakkaraほか：MATHEMATICAL MODELING OF SEGREGATION IN PIPE FLOW OF CONCRETE、土木学会第42回年次講演概要集、1987、pp. 562-563
- 堀部 慶次：細骨剤の保水性とモルタルの特性、東京大学修士論文、1987