

# 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(1) ペースト—骨材間の付着挙動に関する数値的考察

Properties of Shotcrete (1)

Numerical Study on Adhesion between Cement Paste and Aggregate

牧 剛 史・魚 本 健 人  
Takeshi MAKI and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

吹付けコンクリートは型枠が不要で、任意の形状で鉛直面や天井に直接打設することが出来るという利点を有している<sup>(1)(2)</sup>ため、トンネルのライニング、法面の保護等に広く利用されている。特に近年ではトンネルのライニング材として重要な地位を占めるようになり、従来のように普通コンクリートによる二次覆工を用いずにシングルライニングで済ませるケースが増大している。今後都市部においては道路等の用地取得が困難となるため、大深度トンネルの需要が増大するとともに、吹付けコンクリートの需要も増大するものと予想されている。

しかし、吹付けコンクリートは一般に品質のばらつきが大きく、未だにその品質に対して十分な信頼を得られていないのが現状である。その主たる理由は、吹付けコンクリートの品質はコンクリートの材料のみならず施工の良否によって著しく影響を受け、同じ材料を用いても全く異なったコンクリートが得られるためである。また、吹付け施工時に発生するリバウンドは、吹付け前後の品質の変化や作業環境の悪化、安全性、経済性等の問題を含んでいる。<sup>(1)(2)</sup>リバウンドの発生要因として、材料面では配合、骨材粒径、急結材添加率など、施工面では吹付け量や圧力、岩盤との距離や岩盤角度などが挙げられる<sup>(3)</sup>が、その多くは実験的事実に基づいた経験則であり、吹付け時のメカニズムについては未解明であるのが現状である。

本研究は、吹付けコンクリートの特性を明らかにするとともに、リバウンドの発生を含めた吹付けコンクリート施工を、理論的アプローチに基づいてシミュレーションするための基礎的研究として実施しているもので、本報告はこのうち、ペーストに骨材が衝突する現象を理論的に解析し、ペーストの付着力や骨材径が現象に及ぼす影響を数値的に

把握することを目的としている。

## 2. 解析条件

実施工におけるリバウンド発生の主な影響要因を図1に示すが、今回は、骨材径1mm~15mm(細骨材および粗骨材を考慮)、ペーストの特性として抵抗係数と付着係数、反発係数の計4種類をパラメータとした。図2に示すように、様々な粒径の骨材が、十分な厚さを持つ鉛直ペースト面へ水平に衝突する状況を想定し、骨材速度と付着挙動との関係を数値的に考察した。

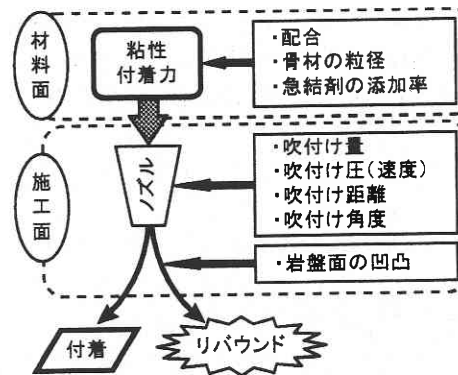


図1 リバウンド発生の影響要因

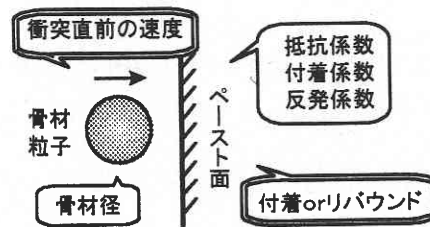


図2 解析条件

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

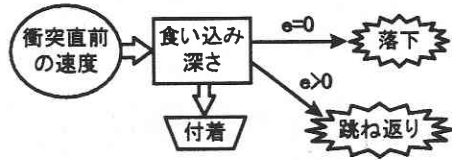


図3 リバウンドの分類

リバウンドについては、図3のようにペースト面への食い込み深さの不足による落下現象と、ペースト面で受ける反発力に起因する跳ね返りの2種類に分けて考えている。

3. 解析理論及び結果

3.1 ペースト面への食い込み深さ

始めに、図4のように、骨材の持つ運動エネルギーと、ペーストから受ける仕事量との釣り合いを考えると、骨材の衝突直前速度とペースト面への食い込み深さとの関係について考察した。

衝突直前の骨材の持つ運動エネルギーは以下の式で表される。

$$E_0 = \frac{1}{2} m \cdot V_0^2 \quad \dots(1)$$

$m$ : 骨材粒子の質量

$V_0$ : 衝突直前の速度

また、骨材がペースト面から受ける抵抗力は骨材の食い込み部分の断面積に比例すると仮定し、比例定数を抵抗係数と定義すると、その仕事量は以下の式で表される。

$$W = \int_0^{d_{max}} N dx \quad \dots(2)$$

$$= \int_0^{d_{max}} Q_{res} \cdot A_{cross}(x) dx$$

$$A_{cross} = \pi \cdot \left[ \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D}{2} - x \right)^2 \right]$$

$N$ : 骨材が受ける抵抗力

$d_{max}$ : 最大食い込み深さ

$Q_{res}$ : 抵抗係数

$A_{cross}(x)$ : 食い込み部分の断面積

十分な食い込み深さは骨材自身の半径に等しいと考え、以下の式を仮定した。

$$d_{max} = \frac{D}{2} \quad \dots(3)$$

式(1)~(3)により、必要とされる速度下限値 (以下、「最低衝突速度」と称する) を算した結果を図5に示す。充分

な食い込み深さを得るために要する最低衝突速度は、ペースト面の抵抗係数の増加と共に上昇する。この下限値より低速である場合、骨材は食い込み深さが不十分となり、重力によって落下する可能性があることを意味する。なお、最低衝突速度は粒径に依存せず一定値となった。これは、式(3)の仮定では充分な食い込み深さが粒径に比例するためと考えられる。

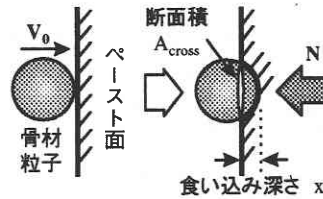


図4 骨材のペースト面への食い込み

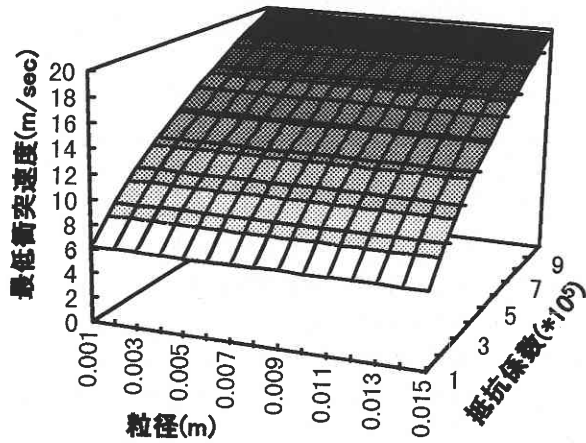


図5 十分な食い込み量を得るための速度下限値

3.2 骨材の落下

ペースト面で完全非弾性衝突 ( $e=0$ ) が起こる場合、食い込み深さが充分であれば骨材は付着すると考えられるが、不十分な場合はペースト面に付着せずに落下する可能性があると考えられる。そこで、図6のように、重力による

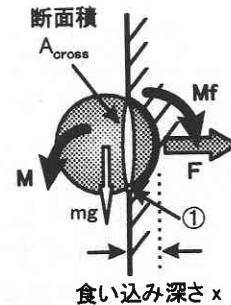


図6 モーメントの釣り合い

モーメントと付着力によるモーメントの釣り合いを考慮することによって、食い込み不足の骨材が落下するかどうかの判定を行った。

モーメントの中心を図6中の①点で考えると、骨材の持つモーメント量は以下の式で表される。

$$M = mg \cdot \left( \frac{D}{2} - d_{max} \right) \quad \dots(4)$$

付着力は前節と同様、食い込み部分の断面積に比例すると仮定し、その比例定数を付着係数と定義すると次式で表される。

$$M_f = F \cdot y = Q_{stk} \cdot A_{cross} (d_{max}) \cdot y \quad \dots(5)$$

$$y = \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D}{2} - d_{max} \right)^2}$$

F: ペーストの付着力

Q<sub>stk</sub>: 付着係数

式(4)~(5)を用い、D=0.01(m)について双方のモーメント量を算出した結果を図7に示す。付着力によるモーメントが重力によるそれを上回った場合、その骨材はペースト面に付着すると考えられる。3.1の結果と併せ考えると、付着係数が低下するに伴い、骨材が付着するために要する食い込み深さは増大し、より大きな衝突速度が必要となると考えられる。以上より、衝突速度が小さいほど、また、ペースト付着力が弱いほど、重力によって落下する可能性が増加することが数値的に示された。

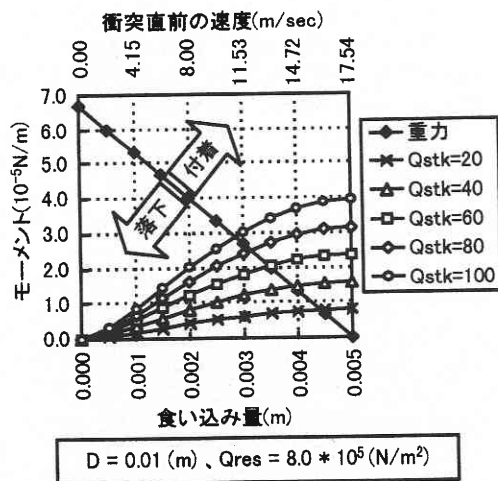


図7 重力と付着力によるモーメント量の関係

### 3.3 反発力による跳ね返り

ペースト面で非弾性衝突 ( $0 < e < 1$ ) が生じる場合、骨材粒子は反発力を受けてペースト面から離れる方向の速度を持ち、跳ね返りが生じると考えられる。そこで、図8に示すように、反発後の骨材の運動量と付着力が骨材に与える力積との釣り合いを考慮することによって、正数の反発係数を持つペースト面に衝突した骨材の付着挙動について考察した。

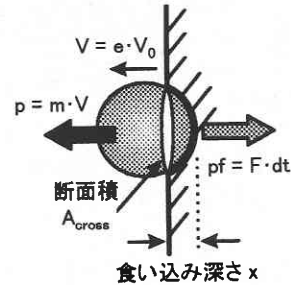


図8 骨材の運動量とペーストの力積

衝突直後の骨材の運動量は以下の式により計算される。

$$p = m \cdot e V_0 \quad \dots(6)$$

e: ペースト面の反発係数

V<sub>0</sub>: 衝突直前の骨材速度

また、付着力による力積は微小衝突時間 dt を考慮して、以下のように表される。

$$p_f = F \cdot dt = Q_{stk} \cdot A_{cross} (d_{max}) \cdot dt \quad \dots(7)$$

式(6)~(7)により、付着力による力積が骨材の運動量を相殺しうる衝突速度の上限値(下、「最大衝突速度」と称す)を、反発係数を一定として算出した結果を図9に示す。

ペーストの付着係数が上昇すると、最大衝突速度も上昇し、より高速度であってもペースト面に付着可能であることが分かる。付着係数を一定として反発係数を変化させたときの、骨材径と最大衝突速度の関係を図10に示す。径が小さいほど、また、反発係数が小さいほど最大値は増加している。以上のことから、骨材径が小さいほど、ペースト面の反発力が弱いほど、より速い速度で付着することを数値的に示すことが出来た。

### 4. 各係数と材料特性との関係

今回は骨材径、抵抗係数、付着係数、反発係数の4種類

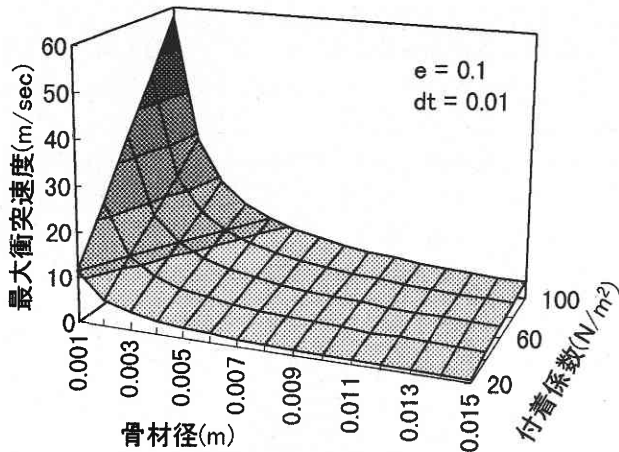


図9 付着するための初速度上限の変化 (反発係数一定)

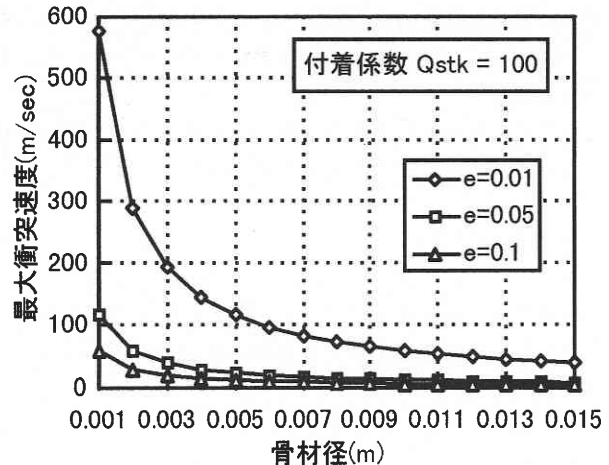


図10 付着するための初速度上限の変化 (付着係数一定)

のパラメータを想定して数値的考察を行ったが、現実にはこれらのパラメータは実際の材料特性によって決定されると考えられる。骨材径については、第2節で述べているように、実際に吹付けコンクリート施工時に使用される細骨材および粗骨材を想定して、1mm～5mm～15mmの間で変化させた。抵抗係数と付着係数は、主にペーストの粘性に依存すると考えられ、ペースト部の配合、つまりW/Cや急結材添加率によって変化すると思われる。反発係数についても同様であるが、 $e=0$ の場合、ペーストが完全粘塑性体的な挙動を示すことを意味する。 $e>0$ の場合は弾性成分を含んでおり、急結材を添加した場合は後者に当てはまると予想される。これらの点については今後さらに検討を行う必要があると思われる。

5. ま と め

今回の考察より得られた結果をまとめると、以下の通りである。

(1) 骨材がある程度の初速度を持っていないければ、ペースト面への食い込み深さが不十分となる。その下限値はペーストの抵抗力の増加に伴い大きくなる。

- (2) 食い込み深さが不十分な骨材は、ペーストの付着力が小さいほど、重力によって落下する可能性が高くなる。
- (3) ペーストの付着力が大きいほど、また、骨材径が小さいほど、より高い速度であっても付着することが出来る。
- (4) 一般に概念的に考えられている以上3点について、数値的に確認することが出来た。
- (5) ペーストと骨材の付着挙動を理論的に追跡することで、材料や施工条件の相違によるリバウンド量の差をシミュレーションできる可能性がある。
- (6) 今後はペースト-骨材間の衝突のみならず、骨材同士の衝突も考慮して解析を行う必要があると思われる。

(1996年11月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 中村敏夫, 横沢和夫: トンネルの吹付けコンクリート, コンクリート工学, Vol. 31, No. 3, 1993.3.
- 2) 田沢雄二郎: 吹付けコンクリートの技術現状と今後の課題, コンクリート工学, Vol. 30, No. 6, 1992.6.
- 3) トンネルの吹付けコンクリート, 日本トンネル技術協会, 1996.2.