

# 未固結 RCC 材と金属材料との間の摩擦特性

何 挺継<sup>1</sup>・室 達朗<sup>2</sup>・河原莊一郎<sup>3</sup>・胡 永彪<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 西安公路交通大学副教授 (中国. 西安市翠華路3号)

<sup>2</sup>フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

<sup>3</sup>正会員 工博 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

<sup>4</sup>工修 西安公路交通大学講師 (中国. 西安市翠華路3号)

本研究では RCC 舗装機械に使用されている金属材料とまだ固まらない RCC 材の間の摩擦特性について室内実験を行い、その動的相互作用について理論解析を行った。とくに、RCC 材と金属板の間の外部摩擦特性(摩擦力、付着力及び摩擦係数)の滑り速度依存性と時間依存性について考察を行い、RCC 材の流動性と外部摩擦特性を解明した。これから RCC 舗装施工法と RCC 舗装機械の開発に対して、有益な指針を与えると考える。

**Key Words :** RCC, friction, adhesion, dynamic problem, metal, fresh concrete

## 1. まえがき

転圧コンクリート(Roller Compacted Concrete, 略して RCC)は、1970 年代に新しい舗装材として道路舗装に使用され、一種の複合材と言われている。RCC は道路舗装に使用される通常のコンクリートに比べて、施工スピードが早く、施工サイクルが短く、初期に車両荷重を載せる能力を持ち、早期通行を可能とし、また施工のやり易さと施工コスト低減等の長所を持っている。さらに、RCC 材は通常のコンクリート路面が持つ高強度、安定性と耐久性の特長も有しており、世界各国において重視され、道路舗装に普及している。

1980 年代にアメリカ、日本、フランス、カナダ、オーストラリア、スペイン等の国々は、RCC 材の構成と配合設計及び舗装、転圧の施工技術に関するいろいろな分野において実験研究を行っている。ところが、RCC の流動性及び内、外部摩擦特性に関する研究は少ない。

RCC 舗装作業は、よく混合された RCC 材をフィニッシャのスクリュースプレッダ、スクリード等により規定の厚さまで路盤上に敷均す工程である。

本研究は、スプレッダとスクリード等の金属材料と RCC 材の間の動的相互作用について実験及び理論的考察によって解明し、今後の RCC フィニッシャの開発と施工管理向上を目的としている。そのため、RCC 舗装機械に使用されている金属材料と RCC 材の間の摩擦特性について室内実験を行い、

その動的相互作用について理論解析を行い、RCC 材と金属板の間の静・動摩擦特性に関する滑り速度依存性と滞留時間依存性について検討し、考察を行っている。摩擦特性の滑り速度及び滞留時間依存性を調査することは、フィニッシャの最適作業速度及び最適舗設開始時間の選定に有益な指針を与えるものと考える。

## 2. RCC 材の動的摩擦実験

### (1) 実験材料

本実験で使用する試験金属板として機械構造用炭素鋼材 S15C<sup>1)</sup>を採用した。その表面粗さを計測した結果、10 点平均粗さは 48  $\mu\text{m}$  である。試験用 RCC 材は道路舗装に使用される RCC1, RCC2 及び RCC3 の 3 種類を用いた。それらの混合材の構成と配合比及び水セメント比と含水率を表-1 に示す。

また、粗骨材及び細骨材の粒度を表-2 に示す。粗骨材は碎石からなり、比重 2.55、最大寸法 20 mm、粗粒率 7.53 である。細骨材は川砂からなり、比重 2.50、粗粒率 2.64 である。

### (2) 実験装置

図-1 は本実験のために設計製作した摩擦特性試験装置の本体概略図<sup>2)</sup>である。本装置はフレーム、ベース、ポールねじ、ロードセル、モータ、コントローラ等から構成されている。本機の特長として、0.385 kW モータによりフレーム上のベースの移動

表-1 RCC 材の配合比

R C C 種類	RCC1	RCC2	RCC3
セメント ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	211.8	302.5	301.0
細骨材 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	782.2	796.0	856.0
粗骨材 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1290.4	1313.3	1225.0
水 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	124.4	124.7	98.0
減水剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.21	0.91	0.75
A E 剤 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	0.0605	0.0303	—
粉状石炭灰 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	90.75	—	—
水セメント比 (%)	58.7	41.2	32.6
含水率 (%)	5.23	5.17	4.10

表-2 骨材の粒度

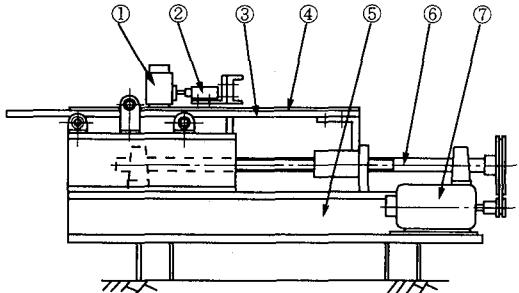
ふるい呼び寸法 (mm)	累積残留率 (%)	
	粗骨材	細骨材
20	0	0
10	60	0
5	93	1
2.5	100	10
1.2	100	30
0.6	100	54
0.3	100	76
0.15	100	93

速度を  $0 \sim 30 \text{ cm/s}$  の間で変化させることができる。これによって従来明らかにされていなかった RCC 材と金属板の滑り状態における摩擦特性の速度依存性と時間依存性を明らかにすることが可能になった。

### (3) 実験方法及び実験条件

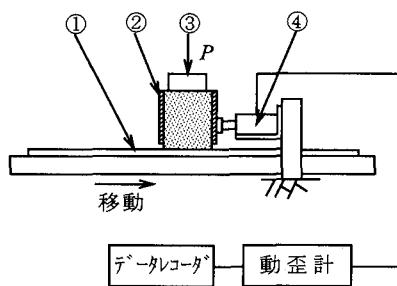
図-2 に RCC 材の摩擦力測定試験機を示す。摩擦力測定部は直径  $200 \text{ mm}$ 、高さ  $200 \text{ mm}$  の塩化ビニールパイプを RCC 材充填箱として使用し、金属板とパイプ部が接触しないように RCC 材を金属板の上にセットするようになっている。RCC 材と金属板の間の摩擦力は RCC 材充填箱を試験金属板上に設置後、ただちにモータによって金属板を移動させ、相互の摩擦力をロードセルで測定する。ロードセルからの信号は動歪計を介して、データレコーダに記録される。

試験金属板と RCC 材の相対速度  $V$  は、RCC 材充填箱を固定し、金属板を  $1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 \text{ cm/s}$  の 7 種類の速度で移動させることによって変化させた。RCC 材の上に垂直荷重  $P = 40, 60, 90, 120, 150, 180 \text{ N}$  (垂直応力  $\sigma = 12.7, 19.1, 28.7, 38.2, 47.8, 57.3 \times 10^{-2} \text{ N/cm}^2$  に相当するもの) の 6 種類の荷重を載荷した。3 種類の RCC 材に対し、それぞれの組合せで計 126 回の摩擦特性の速度依存性を調べることとした。



① RCC 充填箱 ② ロードセル ③ ベース ④ 試験金属板  
⑤ フレーム ⑥ ポールねじ ⑦ モータ

図-1 実験装置の概略図



① 試験金属板 ② RCC 充填箱  
③ 垂直荷重 ④ ロードセル

図-2 RCC 材と金属との間の摩擦力測定試験機

次に、試験金属板と RCC 材の相対速度  $V$  は  $5 \text{ cm/s}$  に設定し、RCC 材はミキシング直後から試験開始までの充填箱内の滞留時間  $t$  を  $10, 30, 50, 70, 90 \text{ min}$  と設定し、その後、垂直荷重  $P$  を RCC 材の上に  $40, 60, 90, 120, 150, 180 \text{ N}$  (速度依存性試験と同じもの) の 6 種類の荷重を載荷した。3 種類の RCC 材に対し、それぞれの組合せで計 90 回の摩擦特性の時間依存性を調べることとした。

いずれの実験でもミキサーにより充分に練り混ぜた直後の RCC 材を充填箱に入れ、所定の時間滞留させた。実験開始直前(約  $30 \text{ s}$ )に充填箱を試験金属板上に設置し、所定の垂直荷重を静的に載荷した直後に実験を開始した。なお、各実験終了後に試験金属板上の RCC 材等の残留物を完全に除去し、試験金属板が充分に乾燥した後、次の実験を行った。

### 3. 実験結果及び考察

図-3(a), (b), (c) に一例として試験材 RCC1 の滞留時間  $t$  が  $10, 30, 90 \text{ min}$  に対する動摩擦力  $f_d$  ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) の滑り速度  $V(\text{cm/s})$  による変化を示す<sup>3)</sup>。

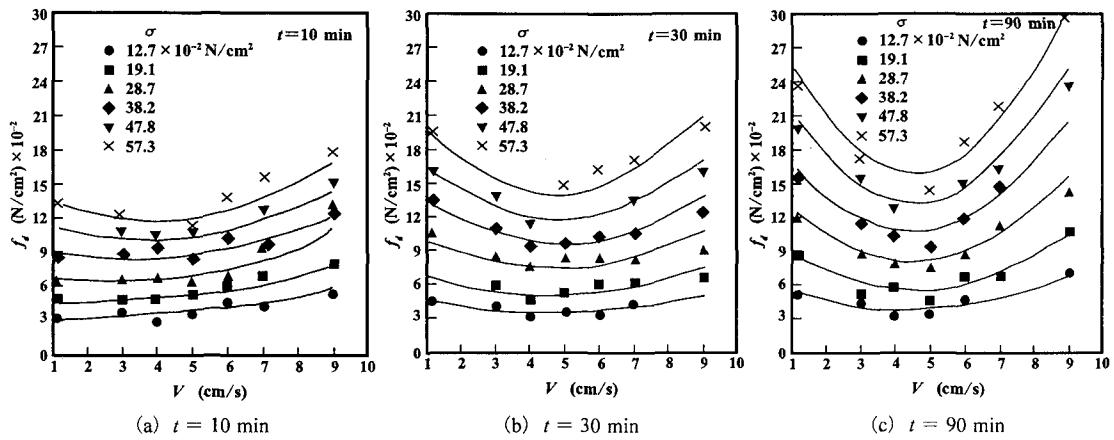


図-3 動摩擦力  $f_d$  と滑り速度  $V$  の関係 (RCC1)

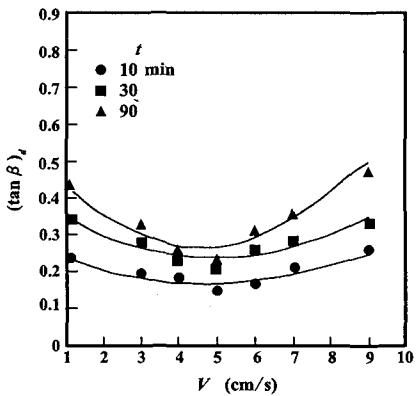


図-4 動摩擦係数  $(\tan \beta)_d$  と滑り速度  $V$  の関係 (RCC1)

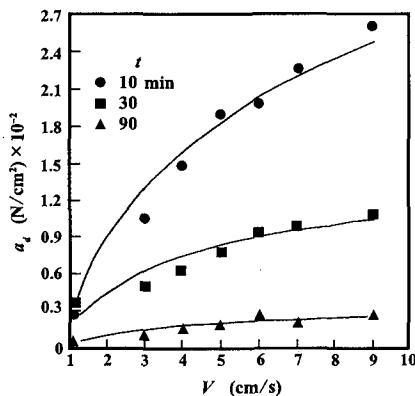


図-5 動付着力  $a_d$  と滑り速度  $V$  の関係 (RCC1)

一般に、動摩擦力  $f_d$  は動付着力  $a_d$ 、垂直応力  $\sigma$ 、動摩擦係数  $(\tan \beta)_d$  の関数として次式で表現される。

$$f_d = a_d + (\tan \beta)_d \cdot \sigma \quad (1)$$

図-4 に動摩擦係数  $(\tan \beta)_d$  の滑り速度  $V$ (cm/s)による変化を示す。図-5 に動付着力  $a_d$ (N/cm<sup>2</sup>)の滑り速度  $V$ (cm/s)による変化を示す。

図-6(a), (b), (c)に試験材 RCC1, RCC2, RCC3に対する静摩擦力  $f_s$ (N/cm<sup>2</sup>)の滞留時間  $t$ (min)による変化を示す。一般に、静摩擦力  $f_s$  は静付着力  $a_s$ 、垂直応力  $\sigma$ 、静摩擦係数  $(\tan \beta)_s$  の関数として次式で表現される。

$$f_s = a_s + (\tan \beta)_s \cdot \sigma \quad (2)$$

図-7 は、それぞれの静摩擦係数  $(\tan \beta)_s$  と静付着力  $a_s$ (N/cm<sup>2</sup>)の滞留時間  $t$ (min)による変化を示したものである。

図-8(a), (b), (c)に  $V = 5$  cm/sに対する試験材 RCC1, RCC2, RCC3での動摩擦力  $f_d$ (N/cm<sup>2</sup>)の滞留時間  $t$ (min)による変化を示す。図-9 にそれぞれの動摩擦係数  $(\tan \beta)_d$  と動付着力  $a_d$ (N/cm<sup>2</sup>)の滞留

時間  $t$ (min)による変化を示す。

図-3 により、RCC 材の動摩擦力  $f_d$  は滑り速度  $V$  に依存して変化することが分かる。3 種類の滞留時間  $t$  において  $f_d$  は滑り速度  $V$  が 1 ~ 4 cm/s まで増加するに従って次第に減少するが、滑り速度  $V$  が 5 cm/s からは速度が増加するに従って  $f_d$  は増加する。また、 $f_d$  は垂直応力  $\sigma$  の増加に従って増加する傾向も見られる。

図-4 により、動摩擦係数  $(\tan \beta)_d$  は 3 種類の滞留時間  $t$  において滑り速度  $V$  に依存して変化し、その挙動はほぼ  $f_d$  の変化と一致する傾向が見られる。

図-5 により、動付着力  $a_d$  は 3 種類の滞留時間  $t$  において滑り速度  $V$  に依存しており、ほぼ指數関数で表現されることが分かる。

図-6 により、3 種類 RCC 材の静摩擦力  $f_s$  は滞留時間  $t$  に依存して変化する傾向が見られる。また、 $f_s$  は垂直応力  $\sigma$  が増加することによって増加する傾向がある。

図-7 により、静摩擦係数  $(\tan \beta)_s$  は滞留時間  $t$  に

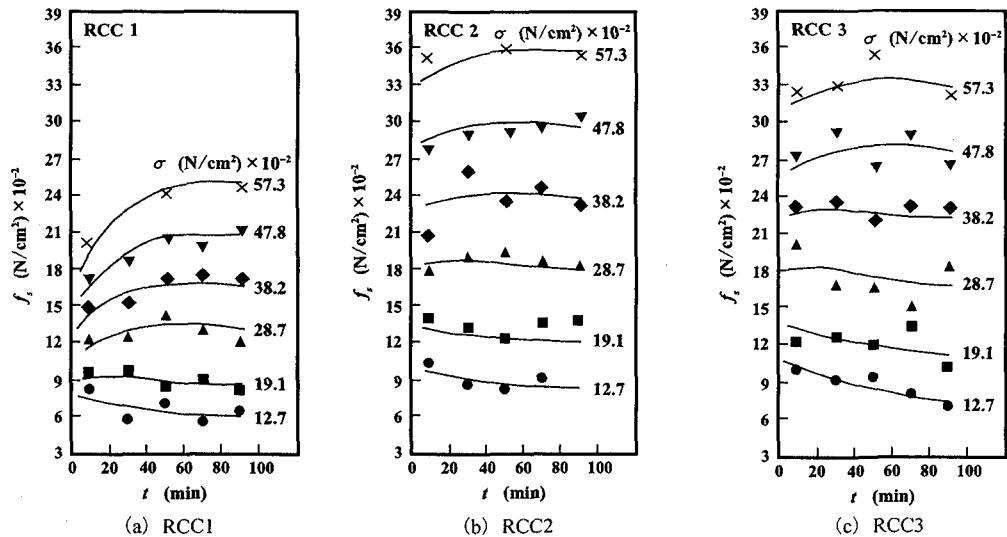


図-6 静摩擦力 $f_s$ と滞留時間 $t$ の関係 (滑り速度 $V = 5 \text{ cm/s}$ )

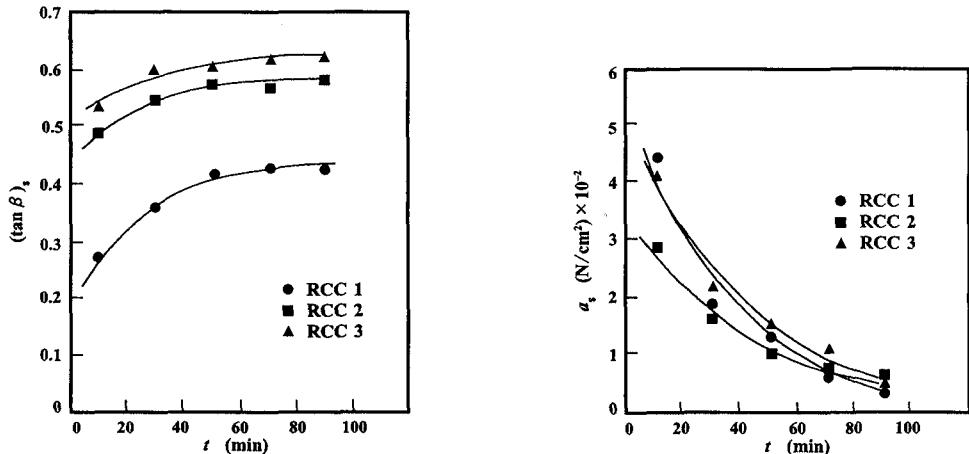


図-7 静摩擦係数 $(\tan \beta)_s$ および静付着力 $a_s$ と滞留時間 $t$ の関係 (滑り速度 $V = 5 \text{ cm/s}$ )

依存して変化し、 $t$ とともにほぼ増加する傾向が見られる。静付着力 $a_s$ は滞留時間 $t$ に依存して変化し、 $t$ とともに減少する傾向が見られる。

図-8により、3種類のRCC材の動摩擦力 $f_d$ は滞留時間 $t$ に依存して変化する。 $f_d$ は一般に $t = 10 \sim 30 \text{ min}$ の間に急激に増加するが、その後、その勾配は漸減する傾向が見られる。また、3種類のRCC材の動摩擦力 $f_d$ は垂直応力 $\sigma$ の増加によって増加する傾向が見られる。

図-9により、3種類のRCC材に対して、動摩擦係数 $(\tan \beta)_d$ と動付着力 $a_d$ は滞留時間 $t$ に依存して変化することが分かる。 $(\tan \beta)_d$ は $t$ によって増加する傾向が見られる。逆に、 $a_d$ は $t$ によって急に減少することが見られる。なお、図-6と図-8により、RCC1の静摩擦力 $f_s$ と動摩擦力 $f_d$ の大きさも一番小

さい値を示しており、これは3種類のRCC材の混合材構成の相異によるものと考えられる。すなわち、RCC1の混合材の中に粉状石炭灰が適量添加されていることによって静摩擦力 $f_s$ と動摩擦力 $f_d$ は減少していることが分かる。

#### 4. RCC材の動的摩擦特性に関する理論的背景

##### (1) RCC材の流動性

RCC材は、基本的にセメント、細骨材及び粗骨材等を水で練り混ぜて各材料の分布が均一になるようにした混合物である。まだ固まらないRCC材は一般コンクリートのような固体、液体、気体の3相からなる粒状集合体である粘性土のような粘・弾・塑性流動体とみられる。固体部分は大きさが数 $\mu\text{m}$

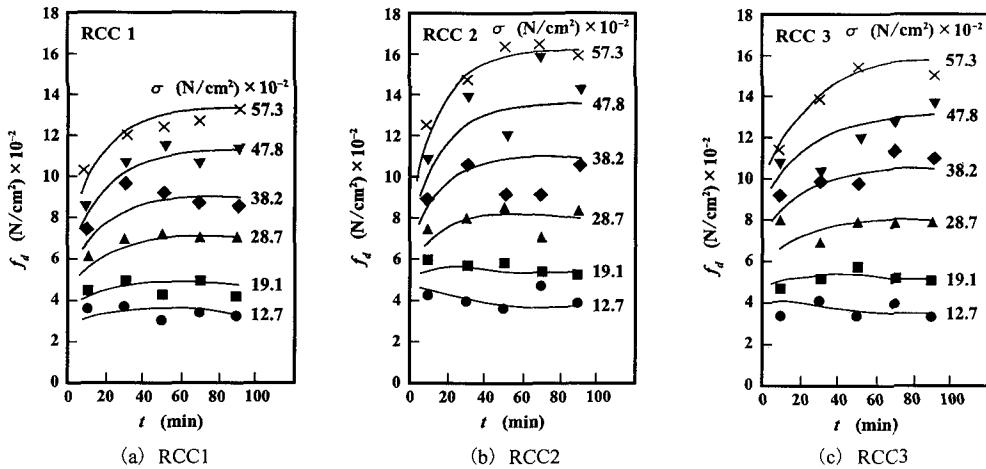


図-8 動摩擦力 $f_d$ と滞留時間 $t$ の関係（滑り速度 $V = 5 \text{ cm/s}$ ）

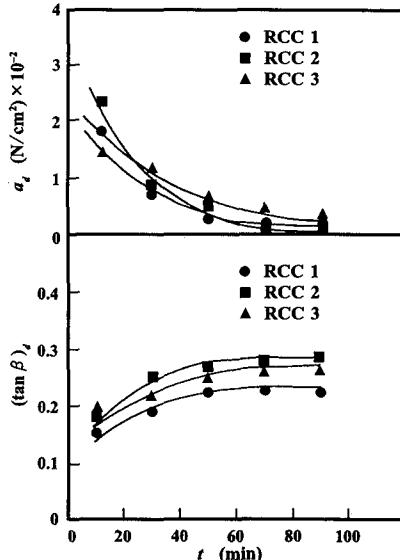


図-9 動摩擦係数 $(\tan \beta)_d$ および動付着力 $a_d$ と滞留時間 $t$ の関係（滑り速度 $V = 5 \text{ cm/s}$ ）

程度の微細な水和物の粒子から数 cm の粗骨材までの極めて広範な粒径分布を持ち、形状、密度とも異なっている粒子群で、あるものは凝集し、あるものは分散している粒子集合体である。液体部分は強塩基性の溶液となる。気体部分は  $10 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$  の気泡で、固体と液体の空隙に存在している<sup>4)</sup>。

RCC 材はミキシング直後から硬化し始め、時間の経過によって液体のものは減少し、固体のものは増加してくるので、初期の粘・弾・塑性流動体から次第に粘・弾性流動体及び弹性体に変わって、外部摩擦特性も経過時間によって変化していくと考えられる。

## (2) RCC 材の外部摩擦特性

金属板表面における RCC 材の摩擦特性を解明するために、実験状態での RCC 材と金属板の間の摩擦状態をモデル化し、理論的に考察する。ミキシングした RCC 材は滞留時間によって流動性が大きく異なるが、RCC 材は固まるまでに金属板との間の摩擦状態を潤滑状態、付着状態及び乾燥状態に分けることができる。図-10 にその 3 種類の状態のモデルを示す。

潤滑状態はミキシング直後に金属板表面と RCC 材の間に水が多く存在すること、付着状態は滞留時間によって水和物の粒子が生成し、金属板表面と RCC 材の間に水と粒子が共存すること、乾燥状態は金属板表面と RCC 材の間における固体同士の摩擦である。

まだ固まらない RCC 材は粘・弾・塑性材料として、外部摩擦力は Mohr-Coulomb 理論により次式で与えられる。

$$f = a + \sigma \cdot \tan \beta \quad (3)$$

ここで、 $f$ ：外部摩擦力、 $a$ ：付着力、

$\sigma$ ：垂直圧力、 $\beta$ ：外部摩擦角

Mohr-Coulomb 理論により、粘・弾性材料の外部摩擦力は二つ部分で構成されている。すなわち、粘性摩擦力( $a$ )と乾燥摩擦力( $\sigma \cdot \tan \beta$ )である。

まだ固まらない RCC 材は初めは潤滑状態と付着状態の傾向にあり、粘性摩擦が主導地位を占める。滞留時間によって乾燥状態の傾向に進み、次第に乾燥摩擦が主に作用するものと考えられる。この理論的考察は実験で求められる RCC 材の滞留時間に依存する摩擦力 $f$ の変化と比較してみると、ほぼ一致している。

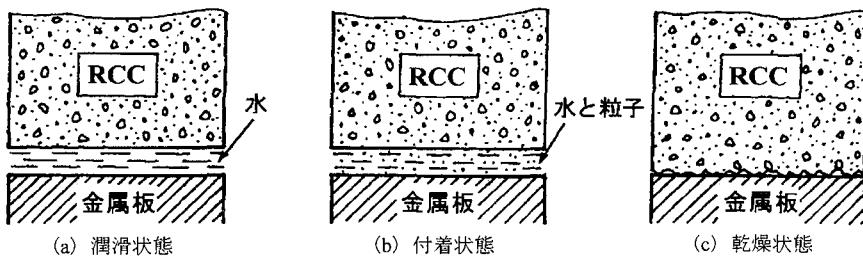


図-10 RCC 材と金属板との間の摩擦状態のモデル

## 5. 結 論

RCC 材と金属板との間の摩擦特性の挙動を実験及び理論より明らかにすることによって、以下の結論が得られた。

- (1) RCC 材はミキシング直後は粘・弾・塑性の流動体であるが、滞留時間の増加により粘・弾性状態及び弹性状態へと変化する。この状態変化を Mohr-Coulomb 理論により整理すると、ミキシング直後は粘性摩擦項が支配的であるが、滞留時間の増加により次第に粘性摩擦項が消滅し乾燥摩擦項が支配的になることで説明できる。
- (2) RCC 材の動摩擦係数には滑り速度依存性がある。動摩擦係数は滑り速度  $V = 4 \text{ cm/s}$  以下では滑り速度の増加に従って次第に減少する傾向があるが、 $V = 5 \text{ cm/s}$  以上では滑り速度の増加に従って増加する傾向がある。動摩擦係数は  $V = 4 \sim 5 \text{ cm/s}$  の間に最小値を有する。
- (3) RCC 材の静・動摩擦係数には時間依存性がある。静・動摩擦係数は滞留時間によって増加するが、滞

留時間  $t = 30 \text{ min}$  以下では急激に増加し、 $t = 30 \text{ min}$  以上では緩やかに増加する傾向である。

- (4) 静・動付着力は滑り速度と滞留時間依存性がある。静付着力は滞留時間の増加によって減少する。動付着力は滑り速度の増加に従って増加し、滞留時間の増加によって減少する。

## 参考文献

- 1) JIS G 4051 (1976).
- 2) 何挺繼, 阿部雅二郎, 伊藤 広, 中谷秀敏, 栗山 弘 : 雪と機械構造物の動的相互作用, 第 5 回寒地技術シンポジウム講演論文集, 寒地開発研究会, pp.171-172, 1989 年 11 月.
- 3) He Tingji and Li Zhiyong : Experimental Study on Friction Characteristics of RCC, Journal of X'ian Highway University, P.R.China, Vol.15, No.3, pp.23-24, 1995 年 9 月.
- 4) 岩崎訓明著 : コンクリートの特性, 共立出版, pp.2-3, 1975 年.

(1996. 8. 27 受付)

## FRictional characteristics between fresh roller compacted concrete and metal material

Tingji HE, Tatsuro MURO, Soichiro KAWAHARA and Yongbiao HU

The frictional characteristics between a metal material used in RCC spreading-pavement machine and a fresh roller compacted concrete were investigated experimentally and also their dynamic interactions were studied theoretically. The influence of the retention time and the sliding velocity on the frictional force, the adhesion and the coefficient of the friction were investigated.

As the results, it is clarified that the coefficient of the dynamic friction takes a minimum value at 4, 5 cm/s sliding velocity and increases with the increment of the retention time, and the dynamic adhesion increases with the sliding velocity but decreases with the retention time.