

路面冠水時における自動車の交通特性

九州大学工学部 学生会員 小田原 傑
 福岡コンサルタント 正会員 劉 明微
 九州大学大学院 工学研究院 正会員 梶田 佳孝
 九州大学大学院 工学研究院 正会員 角 知憲

1. はじめに

近年の局地的豪雨の増加や都市化によって、浸水がもたらす被害は増大し、水害を原因とする死亡者も依然存在し続けている。その対策の一つとして行政は避難計画を策定しており、避難は原則徒歩と定められている。しかし大半の住民が避難の際自動車を利用してというのが現状であり、自動車の利用を前提とした避難計画の検討が今後必要と思われる。

水害時の避難行動のシミュレーションを取り扱う既存研究は多くある。しかし大部分は避難行動として徒歩を対象としており、また自動車による避難を考慮していても路面冠水時の交通特性が把握されていない。

よって本研究では、路面冠水時における自動車の交通特性を定量化し、冠水時の K-V 曲線を完成することを目的とする。

2. 冠水効果の定量化

本研究では交通密度 K が高い領域において、車頭間隔 S_m はブレーキ距離に関係があると仮定した。

$$S_m = l + \int_0^{T_1} v_1 dt + \int_{T_1}^{T_2} v_2 dt \quad \dots (1)$$

ただし右辺第 2 項は空走距離、第 3 項は制動距離であり、 l は停車時車頭間隔(m)、 T_1 は空走時間(s)、 T_2 は制動時間(s)、 v_1 は空走速度(m/s)、 v_2 は制動速度(m/s)である。また S_m と K は以下の関係にある。

$$S_m = \frac{1}{K} \quad \dots (2)$$

以上の式(1)、(2)から K-V 曲線を求めるが、その際必要となってくる路面冠水時の動水圧効果の定量化について検討する。路面冠水時における空走距離と制動距離に関係するものとして、a)路面状況による摩擦係数の減少、b)流水圧の車体の押し上げによる摩擦抵抗の減少、c)動水圧による水平方向の抵抗が考えられる。ただし路面冠水時に高速運転する可能性は低い等の理由により、自動車の走行速度は低速度域(0~60km)を対象とする。

a) 路面状況による摩擦係数の減少

路面が濡れたアスファルトに対するタイヤの摩擦係数 f_0 は 0.45~0.6 である¹⁾。本研究では f_0 をその最大値である 0.6 と設定した。

b) 流水圧の車体の押し上げによる摩擦抵抗の減少

冠水時に走行中の車には、タイヤの下に水が入り込むことで垂直上向きの抵抗力 N が働く(ハイドロプレーニング現象)。ここで N は以下のように表わされる。

$$N(v, h) = K \cdot v^2 \cdot S_h \quad \dots (3)$$

ただし、K は流水圧抵抗係数($\text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)、 S_h は水とタイヤが接する部分の水平投影面積(m^2)である。

よって垂直荷重の減少割合 $y(\%)$ が、車体重量 $m(\text{tf})$ を流水圧が押し上げる割合と等しいと仮定すると、以下の式を示すことができる。

$$y(v, h) = \frac{m/4 - N(v, h)}{m/4} \cdot 100 \quad \dots (4)$$

ここで係数 K を決定するために、式(4)を用いてその値を変化させながら理論曲線を作成し、試験的に判明した水膜厚さ 18(mm)における摩擦係数と速度の関係と図-1 のように比較した。本研究では、係数 K の値として、リブタイヤとラグタイヤの間である $K=0.03(\text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$ をとることとする²⁾。以上より速度と浸水深の変化と摩擦係数との関係は図-2 のように表すことができる。

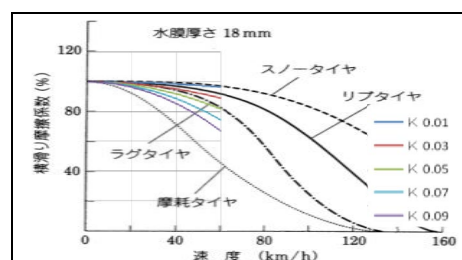


図-1 摩擦係数と速度の理論値と実験値

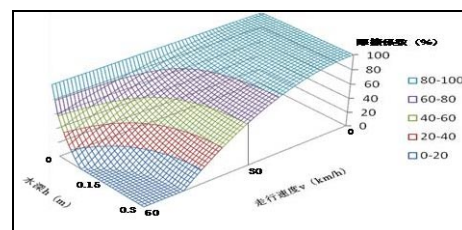


図-2 摩擦係数の変化

c) 動水圧による水平方向の抵抗

自動車のタイヤにかかる水平方向の抵抗力 $R(t_f)$ として、ころがり摩擦 R_r 、空気摩擦 R_a 、動水圧による水平方向の抵抗力 R_f がある。しかし R_f に比べ R_r 、 R_a が無視できるほど小さいため、本研究では $R=R_f$ とした。

R_f は以下の式(5)の通りである。

$$R_f(v, h) = K \cdot v^2 \cdot S_v \cdot 4 \quad \dots (5)$$

ただし S_v は水とタイヤが接する部分の垂直投影面積 (m^2) である。

3. K-V 曲線の作成

まず式(1)中の空走速度 v_1 は以下の式(6)のように設定した。

$$v_1 = v_0 + d_1 t \quad \dots (6)$$

ただし v_0 は空走開始速度 (m/s)、 d_1 は空走中の減速度 (m/s^2) であり、冠水時の影響を考慮して式(7)のように減速度を考えた。

$$d_1 = -\frac{R(v, h) \cdot g}{m} \quad \dots (7)$$

次に制動速度 v_2 は式(2)と形は同じであるが、減速度の値が異なる。その減速度 d_2 は以下の通りである。

$$d_2 = -k \cdot f(v, h) \cdot g - \frac{R(v, h) \cdot g}{m} \quad \dots (9)$$

$$f(v, h) = y(v, h) \cdot f_0 / 100 \quad \dots (10)$$

ここで式(1)は理論的に仮定した最小の車頭間隔であるが、実際には運転は先行車両と衝突しないで安全に停止するために、より広い間隔をとっていると考えられる。その余裕度としてパラメータ α を用い、車頭間隔を以下の式(11)のように表した。

$$S_m = l + \alpha \cdot \left(\int_0^{T_1} v_1 dt + \int_{T_1}^{T_2} v_2 dt \right) \quad \dots (11)$$

この式(11)と式(2)から描ける K-V 曲線と観測データを比較することでパラメータを決定し、理論的な K-V 曲線を完成させる。

4. 路面冠水時の交通特性の測定

路面冠水時の交通特性として自由走行速度 (km/h)、先行車両を追従時の走行速度 (km/h)、交通密度 (台/ km) を考えた。少数のデータは以前測定されていたが、2009 年に福岡で発生した集中豪雨を対象に測定を再び行った。ただし追従時のデータは車頭間隔が密になっているものを対象とした。

また路面冠水時の交通特性の測定を行う上で重要なものに浸水深がある。本研究では簡単にタイヤの半径 (普通自動車で約 30cm) の半分以下を浸水低、それ以上を浸水高として測定を行った。自由走行速度の結果は下

の図-1 に示し、追従時の走行速度と交通密度に関しては図-2 中にプロットした。

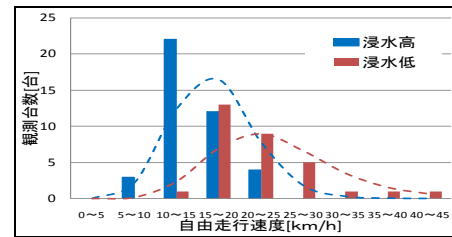


図-1 自由走行速度の測定結果

5. パラメータの推定

式(2)、(11)と観測によって得られた追従時の走行速度、交通密度からパラメータ推定を行った結果、 $\alpha=1.41$ となった。よって以下の図-2 に理論的に描いた K-V 曲線と観測によって得られたデータとの比較を示す。

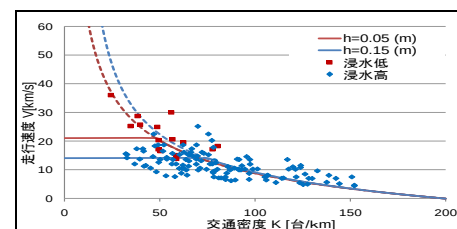


図-2 理論値と観測値の比較

ここで図-2 において点線で描いているものが式(2)、(11)から描いた K-V 曲線である。しかし図-1 の観測データから路面冠水時は路面乾燥時より自由走行速度が低く制限されていることが分かる。冠水時の自由走行速度は浸水低の場合平均 14.46 (km/h)、浸水高の場合平均 21.68 (km/h) であった。また交通密度が低い領域においても同様に、走行速度は低下していると思われる。以上より K-V 曲線を実線のように描いた。

また「観測値に対し理論値は妥当である」という仮説をたて K-S 検定を行った。検定結果として有意水準 20% でその仮説は妥当であった。以上より路面冠水時における K-V 曲線を完成することが出来たと言える。

6. おわりに

本研究では、路面冠水時における自動車の交通特性を定量化し、また冠水時の浸水深に対応した理論的な K-V 曲線を完成することができた。今後はこの路面冠水時の交通特性を交通シミュレーションに組み込み、より精度の高い水害時の避難や交通規制に関する研究に取り組みたい。

参考文献

- 1) 江守一郎：新版自動車事故工学，技術書院，1993
- 2) 社団法人日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，社団法人日本道路協会，1998