

アンチロック状態などを考慮した制動停止距離

安藤和彦* 倉持智明** 寺田 剛***

1. 制動停止距離とすべり摩擦係数

道路前方の車線上に停止車両や障害物などがあった場合、運転者はその事象を発見次第、制動操作やハンドル操作により衝突しないよう回避行動をとる必要がある。このうち、曲線部などで危険事象を急に発見した場合などに、急制動によって車両を安全に制動停止させるのに必要となる距離を制動停止距離という。

制動停止距離は路面のすべりやすさの程度（以下すべり状態という。）によって大きく変わるので、路面のすべり状態を把握することは重要である。路面のすべり状態を把握する方法としては、実際に車両に急制動をかけて制動停止距離を測る（以下実車制動方法という。）のが最も確実な方法であるが、運転者の技量や車両の特性などによって測定値が大きくばらつき、また実際の道路で急制動をかけることには危険を伴うので通常は用いられていない。路面のすべり状態を示す尺度であるすべり摩擦係数を測り、これによって制動停止距離を算出する方法が一般的に用いられている。

すべり摩擦係数を測定する代表的な方法としては、小型の試験機（DFテスター、英国式ポータブルテスター等）を使った簡易な方法があるが、実車制動方法による制動停止距離との直接的な関係は明らかになっていない。実車制動方法に近い方法として、測定車に搭載されたすべり測定用の実物タイヤに制動をかけてすべり摩擦係数を求める方法（以下試験輪制動方法という。）があり、制動停止距離の算出にはこの方法で得られたすべり摩擦係数が用いられている。

制動停止距離を算出する式としては、道路構造令の解説と運用¹⁾（以下構造令解説という。）等に示され広く使われている（1）式がある。

$$L = v_0^2 / (2 \times g \times f) \quad (1)$$

ここで、Lは制動停止距離(m)、 v_0 は制動開始時の速度(m/s)、gは重力の加速度(m/s²)、fはすべり摩擦係数である。

すべり摩擦係数は、タイヤの回転が完全に止まっている完全ロック状態の摩擦係数が用いられる。またこのときの摩擦係数の値は、制動開始時の速度に応じ、車両が停止するまで一定の値が持続するものと仮定されている。しかし、実車に急制動をかけた場合、タイヤはすぐに回転が止まるわけではなく徐々に回転数が減少していくアンチロック状態が出現する。また制動後の速度減少に伴ってすべり摩擦係数は変動する。図-1にタイヤ回転についての（1）式の仮定と、実際の車両制動時のタイヤの回転状態を示す。

そこで以下では、図-1におけるタイヤの回転状態や速度低下に伴うすべり摩擦係数の変動が、制動停止距離にどの程度の差異を生じさせるかについて検討する。

2. すべり摩擦係数の変動を考慮した制動停止距離算出式

2.1 実車測定時のすべり摩擦係数の変動

すべり摩擦係数は、路面が乾燥している状態ではかなり大きな値が得られるが、路面が濡れると速度の増加とともに減少する。そのため、制動停止距離

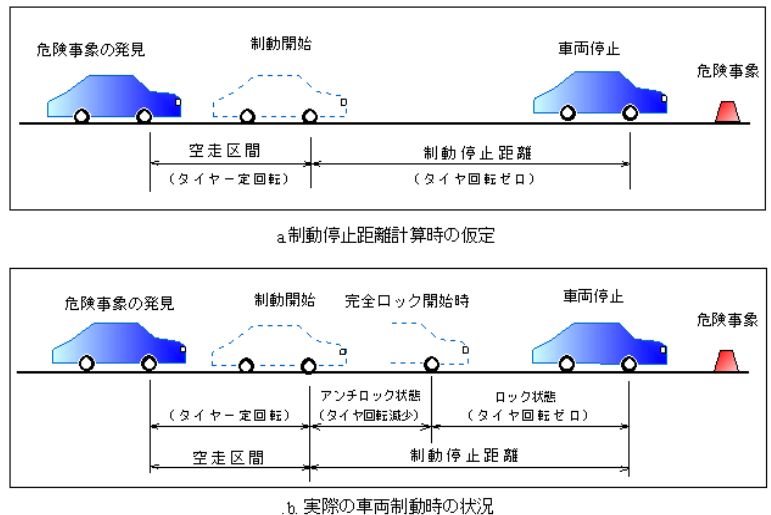


図-1 タイヤの回転状態の比較

A calculation of stopping distance that considered slip ratio of tyres

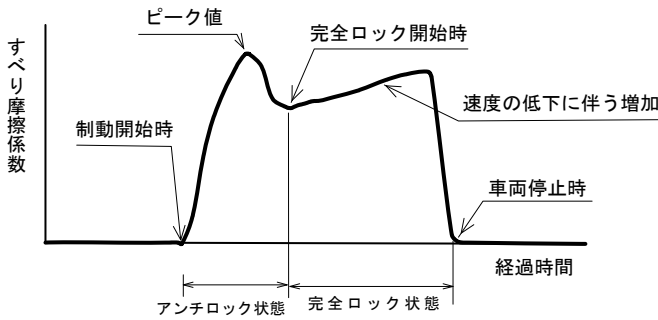


図-2 実車制動時のすべり摩擦係数の変動

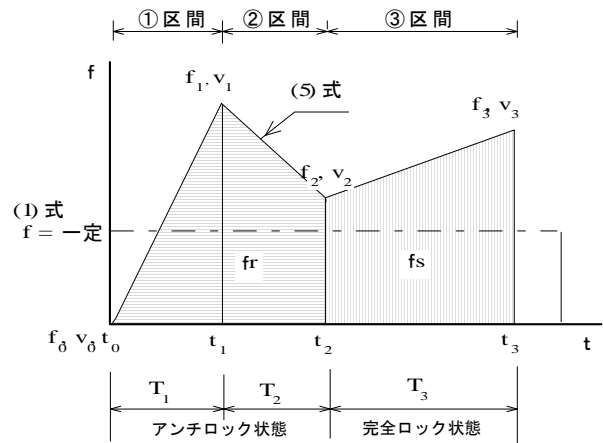


図-3 すべり摩擦係数のパターン化

離の算出は通常湿潤路面状態が前提となる。湿潤路面で実車に急制動をかけた場合のすべり摩擦係数の変動は、図-2のようになる²⁾。

制動開始後、まず図-1のb.実際の車両制動時の状況に示されたタイヤ回転減少区間にあたるアンチロック状態が出現する。このときタイヤの回転速度と車速との関係は、以下の式で計算される。

$$S = (v - \omega \cdot r) / v \quad (2)$$

ここで、Sはすべり率、vは車速(m/s)、 ω はタイヤの角速度(rad/s)、rはタイヤの有効半径(m)である。車輪完全ロック時にS=1となる。

アンチロック状態でのすべり摩擦係数(以下frという。)の特徴として、回転数の減少とともにfrは大きくなっていき、ある回転数(S=0.15~0.2)でピークに達する⁴⁾。それ以降はすべり率の増加とともにfrが減少していき、完全ロック状態に移行する。

アンチロック状態が現れるのは、運転者が制動装置を踏み始めて一定の踏力に達し、さらに制動装置の制動力が効き始めてから一定の制動力になり車輪の回転が完全にロックするまで、効き遅れの時間が発生するためである⁵⁾。この効き遅れの時間は、運転者の踏力や、制動装置の機械特性などに左右される。

次に出現する完全ロック状態のすべり摩擦係数(以下fsという。)は、湿潤路面では速度が低くなるほど大きくなる特徴を有しており、完全ロック後は、車速の低下に伴ってfsは増加していき、車両が停止する直前に最も大きくなる。

2.2 すべり摩擦係数のパターン化

図-2に示されたすべり摩擦係数の変動を、アンチロック状態、完全ロック状態に分け図-3のようにパターン化する。

図内のそれぞれの記号は、制動開始時(t_0)、アンチロック状態でのピーク時(t_1)、完全ロック開始

時(t_2)、停止時(t_3)の各時点について、 $f_0(=0)$ 、 f_1 、 f_2 、 f_3 は各時点でのすべり摩擦係数、 v_0 、 v_1 、 v_2 、 v_3 は各時点での移動速度(m/s)である。(1)式ではfsは、制動開始時の速度に応じ、 t_0 時点から車両停止時まで一定値として与えられる。

①、②、③区間の経過時間をそれぞれ T_1 、 T_2 、 T_3 とすると、①~③区間の速度は以下の式で示すことができる。

$$\begin{aligned} v_1 &= v_0 - (f_0 + f_1) / 2 \times g \times T_1 \\ v_2 &= v_1 - (f_1 + f_2) / 2 \times g \times T_2 \\ v_3 &= v_2 - (f_2 + f_3) / 2 \times g \times T_3 \end{aligned} \quad (3)$$

また各区間の制動距離 L_1 、 L_2 、 L_3 は次の式で求まる。

$$\begin{aligned} L_1 &= v_0 \times T_1 - 1/2 \times (f_0 + f_1) / 2 \times g \times T_1^2 \\ L_2 &= v_1 \times T_2 - 1/2 \times (f_1 + f_2) / 2 \times g \times T_2^2 \\ L_3 &= v_2 \times T_3 - 1/2 \times (f_2 + f_3) / 2 \times g \times T_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

L_1 、 L_2 、 L_3 の総和が以下に示す制動停止距離 L_T である。

$$L_T = \sum \{v_{i-1} \times T_i - 1/2 \times (f_{i-1} + f_i) / 2 \times g \times T_i^2\} \quad (5)$$

3. 制動停止距離の比較

以下では、(1)式と(5)式について制動停止距離の計算値にどの程度の差が生じるかを比較するため、計算に用いる入力値を仮定し、制動停止距離を算出する。

3.1 すべり摩擦係数

3.1.1 アンチロック区間のすべり摩擦係数

制動停止距離の計算には(1)式が用いられてきたために、これまでfrについては十分調査検討されていない。

幸い、実物のタイヤに制動をかけてすべり摩擦係数を測定する試験輪制動方法のデータにも制動開

土研センター

始時にアンチロック状態の区間が含まれる。そこで、アスファルト舗装路面について、財団法人土木研究センターが所有するすべり測定車により計測したすべり摩擦係数のデータをもとに、 f_r のピーク値および f_s を求めた結果を表-1に示す。

表-1 すべり摩擦係数の実測例

速度		縦すべり摩擦係数	
(km/h)	(m/s)	f_r (ピーク値)	f_s
20	5.56	-	0.85
40	11.11	0.95	0.75
60	16.67	1.00	0.66
80	22.22	0.99	0.44

f_s は速度の増加とともに減少する一般的なすべり摩擦係数の特徴を示しているが、 f_r のピーク値は速度40km/h以上では速度に係わらずいずれも非常に大きく、 f_r のピーク値が大きくなることを示した文献²⁾とも一致する。これらのことから f_r のピーク値は、速度に係わらず常に大きな値になることが予想される。一方、20km/hでピーク値がみられないのは、最も大きな値が出現する $S=0.15\sim 0.20$ のすべり率に達する以前にほぼ車両が停止してしまうためと考えられる。

上記の結果から、(5)式に用いる f_r のピーク値は、速度40km/h以上では全て0.95と仮定し、速度20km/hでは以下に示す f_s と同じ0.44とする。

3.1.2 完全ロック区間のすべり摩擦係数

f_s は、構造令解説に示されている値を採用する。 f_s は舗装種や路面の状況により大きく変化するが、通常、速度の減少とともに増加していく(図-3③区間)。構造令解説に示された数値でもその傾向が見られる。そこで、構造令解説に示された速度とすべり摩擦係数との関係から、速度30km/h~102km/hの f_s で二次回帰式を求めると図-4の結果が得られた。高い相関性のある式が得られたので、30km/hを越

える場合の f_2 は(3)式で計算により求められた v_2 の値を図-4の回帰式に入力して求めるものとする。ただし、30km/h以下では $f_s=0.44$ とする。

3.2 経過時間

図-3の①~③区間の経過時間のうち T_1 、 T_2 は、2.1で述べたとおり各運転者や車両の特性に依存するものの、一般的な時間として0.5s程度としている文献⁴⁾があるので計算では $T_1+T_2=0.5s$ とし、実車制動時のすべり摩擦係数の波形特性²⁾から、 $T_1=0.3s$ 、 $T_2=0.2s$ とする。また、 T_3 は次式で求められる。

$$T_3 = v_2 / \{(f_2 + f_3) / 2 \times g\} \tag{6}$$

3.3 制動停止距離の比較

上記で示された入力値を整理したものが表-2である。これらの値を用い制動停止距離を算出すると、表-3及び図-5のとおりとなる。

表-3をみると、速度が高くなるに従って(1)式、(5)式の計算値の差が大きくなり、速度100km/hでは約40m程度(1)式の制動停止距離が長くなっている。これは、制動開始時から車輪がロックされ摩擦係数が一定と仮定している(1)式より、アンチロック状態など実際の摩擦係数の変動を考慮した(5)式の摩擦係数が大きくなるためである。

表-2 制動停止距離計算に用いた数値

速度 km/h	102	85	68	54	45	36	30	20
f_s	0.29	0.30	0.31	0.33	0.35	0.38	0.44	0.44
f_1		f_2	f_3	T_1	T_2			
	0.95	図-4式	0.44	0.3s	0.2s			

表-3 制動停止距離の計算結果

V	v_0	L_1	L_2	L_3	L_T	L	L/L_T
(km/h)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	
100	27.78	8.1	5.2	91.2	104.5	143.4	1.4
80	22.22	6.5	4.0	54.3	64.8	90.8	1.4
60	16.67	4.8	2.9	26.3	34.0	45.7	1.3
40	11.11	3.1	1.8	8.6	13.5	16.8	1.2
20	5.556	1.6	0.9	1.9	4.4	3.6	0.8

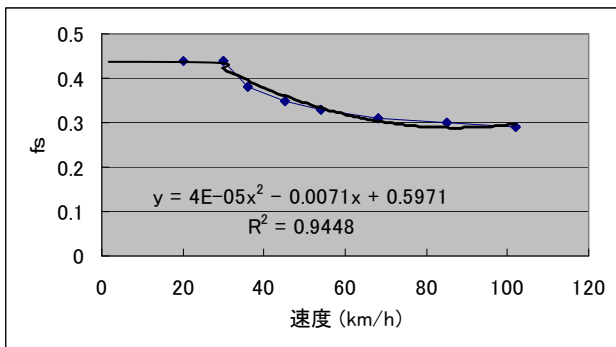


図-4 走行速度と f_s との関係

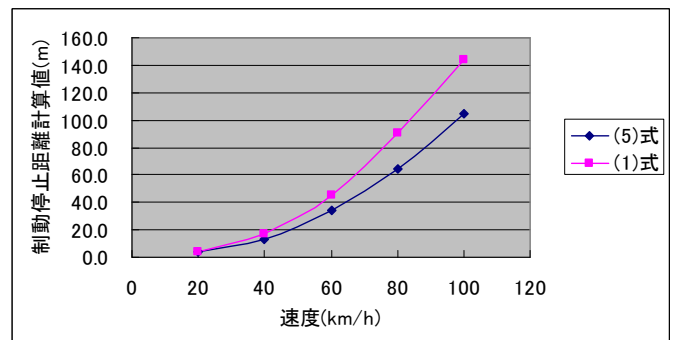


図-5 制動停止距離計算値の比較

従って道路設計を行うための制動停止距離としては、構造令解説に示されている(1)式は、実際の制動停止距離より比較的長めに算出されるものと考えられる。

次に、図-3の各区間における制動距離に着目すると、低速ではアンチロック区間(L₁、L₂)が全体に占める割合が大きい。低速ではタイヤがロックされる前に車両が停止することも予想され、表-1の速度20km/hでピーク値が現れない結果から、ピーク値が出現する以前に車両が停止しているものと推定される。

3.4 完全ロック区間の実測値と計算値の比較

これまで、図-1の制動開始時から車両停止までの実測距離と今回検討を行った計算式とを比較できる資料は得られていない。これは、制動開始時点特定することが難しい点が挙げられる。過去に行われた調査としては、fsを試験輪制動方法により測定するとともに、同一路面で実車制動方法によりスリップ痕等をもとにL₃を実測した事例⁶⁾があるのでこの結果を用い、(5)式による計算値との比較を行った。結果を表-4に示す。

表-4 完全ロック時の制動距離L₃の実測値と計算値比較

速度 (km/h)	速度 (m/s)	実測値 (m)	計算値 (m)
60	16.67	8.2 ~ 17.3	17.4
40	11.11	3.5 ~ 7.8	5.4
20	5.556	0.6 ~ 1.8	0.8

表の実測値の範囲は、数名の運転者が行った実験結果の最大最小を示しており、非常にバラツキが大きい。計算値は、低速では実測値の最小値と、速度が高くなると実測値の最大値と同程度になっている。低速では測定誤差が大きく正確な比較はしにくい。速度60km/hで計算値が大きくなっているのは、すべり測定車で計測に用いた測定専用タイヤ

と実車測定に用いた車両タイヤの種類が異なり、両者のすべり摩擦係数に若干の差が生じていることが影響を与えているものと考えられる。

いずれにしても、(5)式の計算値でも、速度が高くなると実際の制動停止距離より長めに算出される傾向にあることが伺える。

4. まとめ

これまで、制動停止距離算出にあたり(1)式が用いられ、すべり摩擦係数は一定値と仮定されてきた。これについて、車両が実際に制動する際に生じるすべり摩擦係数は仮定値より大きくなり、(5)式の計算結果と比較すると、低速では同程度の計算結果であるものの、速度が高くなると(5)式の計算値は(1)式のものより7割程度に短くなった。(1)式を用いて算出した制動停止距離を使えば、余裕をもった道路設計が行えるが、より精度の高い制動距離算出を行うためには、実車の制動状況を反映した(5)式を用いていくことも考えられる。ただし今回の検討では実測値と計算値との比較までは行っていない。アンチロック時のすべり摩擦特性を解明するとともに、今回提案した計算式の妥当性を検証することが課題として残されている。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路構造令の解説と運用、p.382、平成16年2月
- 市原・小野田：路面のすべりとその対策、技術書院、平成9年3月
- (社)交通工学研究会：交通工学ハンドブック2008、平成20年7月
- (社)自動車技術会：新編自動車工学ハンドブック、6-1-6-2、図書出版社、昭和45年6月
- 笠原篤：雑誌アスファルト、第220号、p.6、有限責任中間法人日本アスファルト協会、平成18年10月
- 小野田・安藤：実車による制動停止距離の測定実験、土木技術資料、Vol.21、No.12、(財)土木研究センター、昭和54年12月

安藤和彦*



財団法人土木研究センター
道路研究部長
Kazuhiko ANDO

倉持智明**



財団法人土木研究センター
道路研究部 主任研究員
Tomoaki KURAMOCHI

寺田 剛***



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術研究グループ舗装チーム 主任研究員
Masaru TERADA