

シートベルトの力学的挙動

中 島 達 夫

1 緒 言

自動車の衝突事故における乗員の衝撃緩和装置として、シートベルトの有効性についてはすでに多くの実証がなされている¹⁻⁵⁾。シートベルトとしてはポリエステル系またはポリアミド系の合成繊維を主材とするウエビングが広く用いられているが、その拘束性能を向上させるため、ベルトの張力とその伸びの広い範囲にわたってなるべく一様に保たれるような特性を付与したエネルギー吸収ウエビングと称するものが着目され、その材質的、組織的な開発がいろいろと進められている。これは従来のベルトが弾性的であるのに対し、そ性的特性をもつものとして特徴的に区別されるが、この両タイプのベルトの動的挙動を理解するのを目的として、簡単な数学モデルによる数値的比較を行なってみた。

2 モデル化

(1) ベルトの作動様式と固着端の移動

ベルトは2点式とし、重量 W の人体を水平に U 字型にひっかけ、両端を車体に固着する。ベルトの自然長を L_0 とする。(図1)

衝突は車速 V_0 で固定バリアに対し行なうものとし、衝突の瞬間を時刻 $t=0$ とする。車体のベルト固着点は衝突後減速しつつ、若干距離前進するが、その変位 S は次式で与えられるものとする。

(図2)

$$S = T_0 V_0 (1 - e^{-t/T_0})$$

ここで T_0 は移動の時定数で、上式は

$$(dS/dt)_{t=0} = V_0$$

を満足するように作られている。

衝突後の人体の前方変位量を X とし、これによりベルトは伸びて全長が L になるものとする。

ベルトの伸び率を ϵ とすると、

$$L = L_0 + 2(X - S)$$

$$\epsilon = (L - L_0)/L_0 = 2(X - S)/L_0$$

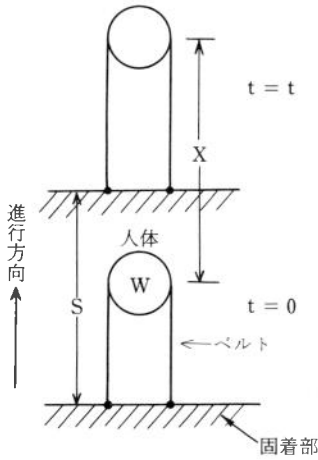


図1 ベルトの作動状態

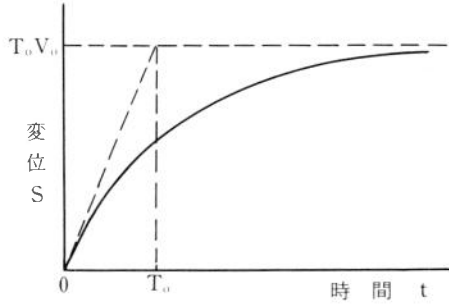


図2 ベルト固定点の変位

(2) ベルトの張力-伸び曲線

弾性的ウェビングをE型、エネルギー吸収型の非弾性的ウェビングをP型と記号化する。

両タイプの張力-伸び曲線を次のようにモデル化する。(図3)

F : ベルト張力

K : E型ベルトの弾性係数

F_0 : P型ベルトの飽和張力

ϵ_0 : P型ベルトの伸びの立ち上り定数

E型 $F = K\epsilon$

P型 $F = F_0 (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_0})$

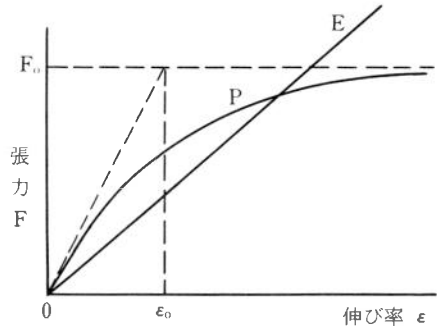


図3 E、P両型のベルトの張力-伸び曲線

(3) 運動方程式

ベルトの抑止力 F_r のみが人体 W に作用するとして、次の運動方程式が得られる。

$$W/g \cdot \ddot{X} = -F_r$$

$$t = 0 \text{ において } X = 0, \dot{X} = V_0$$

ただし

$$F_r = 2F$$

$$= 2K\epsilon$$

E型

$$= 2F_0 (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_0})$$

P型

$$\epsilon = 2(X - S)/L_0$$

$$S = T_0 V_0 (1 - e^{-t/T_0})$$

この運動方程式を解くことにより人体、ベルトの挙動を知ることができる。

(4) ride down 効果

衝突時に慣性体である人体のもつ運動エネルギーは $W/(2g) \cdot V_0^2$ であり、このエネルギーが衝突後の時刻 t においてはベルトの抑止力の作用により $W/(2g) \cdot \dot{X}^2$ ($\dot{X} < V_0$) に減少するが、そのエネルギー減少量はベルトに全部吸収されるのではなく、ある部分はベルトの固着点を通じて車体に吸収され、残部がベルト自体に歪エネルギーとして蓄積吸収されるものと考えられる。

この車体のエネルギー吸収効果は ride down 効果といわれる。この効果の大きいほどベルトの負担は軽く、したがってより有効な抑止装置であるといえることができる。

この ride down 効果 Q はベルトの抑止力を F_r 、ベルト固着点の変位を S とすると、次のように定義される⁶⁾。

$$Q = \int_0^{(1)} F_r dS / \left(\frac{1}{2} \frac{W}{g} V_0^2 \right)$$

3 パラメータの値と計算法

前記の数学モデルを解くにあたり、パラメータの値を次のように3段階に設定する。

表1 パラメータの値

レベル	人体重量 W(kg)	衝突速度 V ₀ (m/s)	車体変位 時定数 T ₀ (ms)	ベルト 初長 L ₀ (m)	ベルト		
					E型ベルト 弾性係数 K(kg)	P型ベルト 飽和張力 F ₀ (kg)	歪定数 ε ₀ (%)
1	60	10	20	0.8	2,000	500	5
2(標準)	60	15	40	1.2	3,000	750	10
3	60	20	80	1.6	4,000	1,000	20

計算はコンピュータを用い、前記運動方程式を差分的に解いて必要な物理量を求めた。差分の時間きざみは1msにとった。

求める物理量は、人体の変位 ($X : m$)、その速度 ($V : m/s$) および減速度 ($A : g$)、ベルト固着部の変位 ($S : m$)、ベルトの伸び ($\epsilon : \%$)、その張力 ($F : kg$) および ride down 効果 ($Q : \%$) の諸量である。

計算は次の2種類について実施した。

(A) : 全パラメータをレベル2の標準値に設定し、それにより諸物理量の時間的推移を求めた。

(B) : 各パラメータの単独の影響を調べるために1つのパラメータのみレベル1~3に変え、その他のパラメータは標準のレベル2に固定して計算した。ただしこの場合、ベルトの伸びが最大になる時点(これを T とする)における諸物理量の値のみをとりあげる。

なおE型の場合にはその運動方程式の解析解を得ることができる(付記参照)が、比較に便利なようP型同様数値解法で計算を行なった。

4 数値解とその考察

A 標準状態における E, P 両型の挙動比較

各パラメータを標準状態のレベル 2 に設定したときの E, P 両型のベルトの衝突時の挙動は図 4 および図 5 に示される。添字 e, p は E 型, P 型を示す。車体変位 S は両型共通である。

E, P 両型の張力-伸び曲線が異なるので、この両型についてその結果の絶対値をそのまま比較することはあまり意味がないが、ここではある程度比較できるように人体の相対変位 $X-S$ の最大値が両型で大体同じになるように諸元の値をとった。

図にみられるように、人体の絶対変位 X は P 型では E 型より時間的に遅れて現われ、人体の相対変位 $X-S$ の最大値の現われる時刻 T も E 型が 62ms であるのに対し P 型は遅れて 72ms となっている。

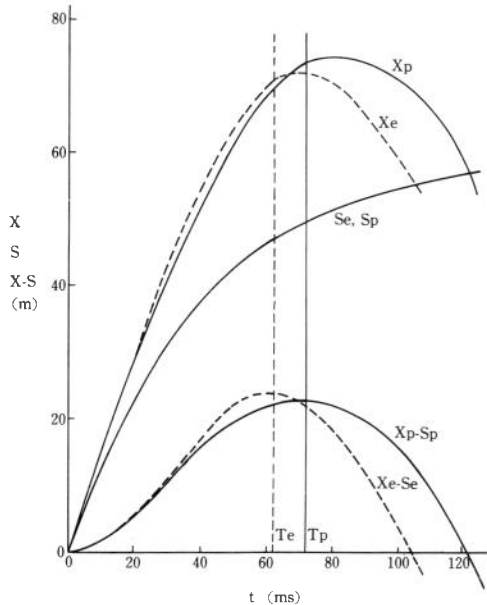


図 4 標準状態における挙動推移(1)
(実線, 添字 P : P 型, 破線, 添字 e : E 型)

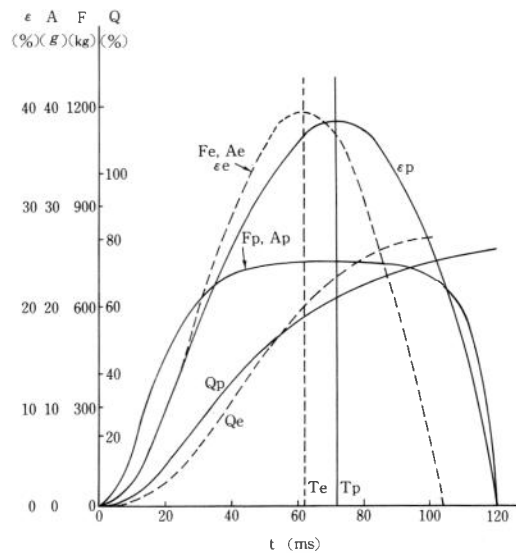


図 5 標準状態における挙動推移(2)

ベルトの伸び ϵ および ride down 効果 Q もそれに応じて大体時間的にずれて似た値になっている。

もっとも大きい差はベルト張力 F (したがって人体抑止力) および人体減速度 A でみられる。P 型は E 型に比べて曲線がフラットになり、そのピーク値は P 型は E 型の 60% 程度に止まり、同程度の抑止性能が P 型では人体に対し小さな影響で実現できることが分り、P 型ベルトは E 型ベルトより有効であるということができよう。

なお ride down 効果 Q は $t = T$ において E, P 両型であまり差はなく、ほぼ 60% 程度 (E 型

60%, P型64%)である。

B 各パラメータの影響

E, P両型につき, 各パラメータ単独の影響は計算Bで調べられ, その結果が図6~11に示される。

(i) 衝突速度 V_0 の影響 (図6)

V_0 が大きいほど人体の絶対変位 X , 相対変位 $X-S$ ともに増大し, 人体の減速度 A , ベルト張力 F も当然大きくなる。ただP型では人体減速度 A , ベルト張力 F が V_0 の増大によりあまり増大していないのが注目される。この点よりP型ベルトは衝突速度が大きいときにその効果が著しいものと考えられる。ただし X および $X-S$ の V_0 に対する増大傾向はPの方が若干大きい。

(ii) 車体変位の影響 (図7)

衝突後ベルトの固着点は車体の変形により若干前方へ移動するが, この計算ではその飽和値は

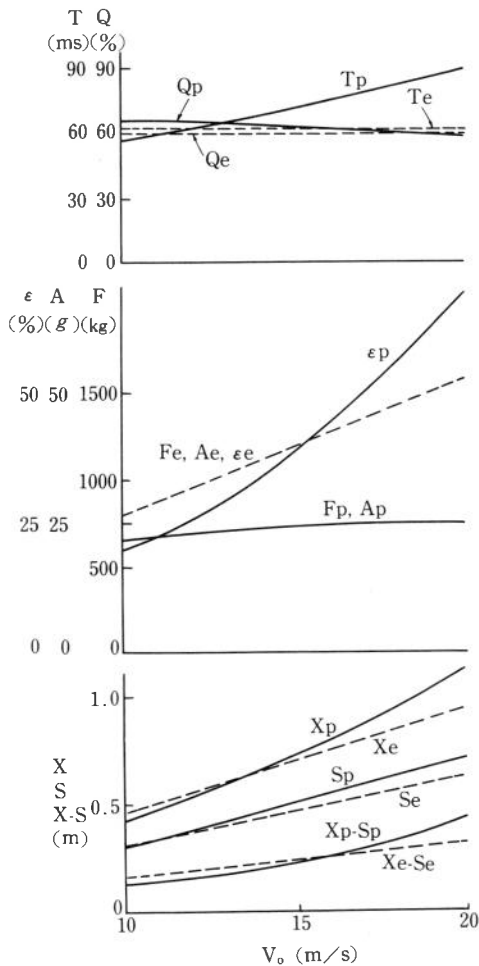


図6 衝突速度 V_0 の影響

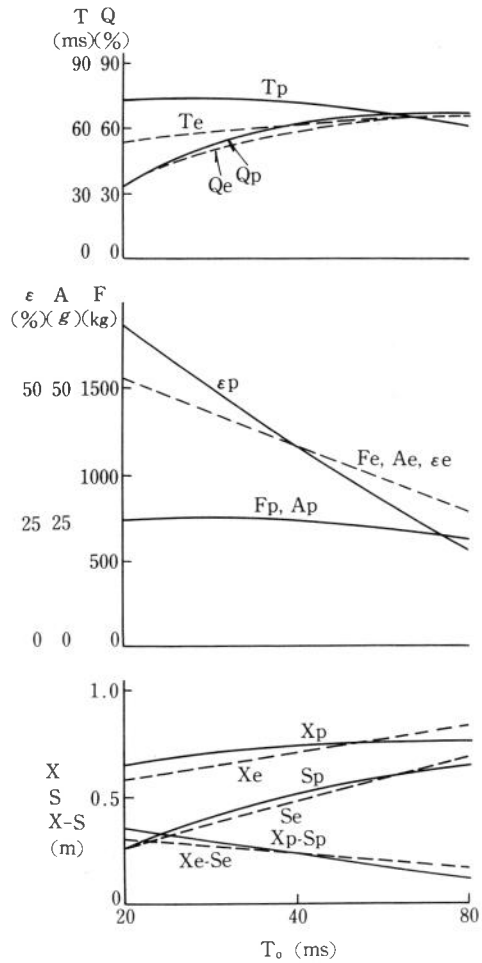


図7 車体変形時定数 T_0 の影響

$T_0 V_0$ となる。したがって V_0 が一定なら移動量は T_0 に比例する。

T_0 が小さい(移動量が小さい)ことは衝突のときの車体のクッションとしての働きが小さいことであり、したがって人体への衝撃は大きくなる。図にあらわれるところによれば、 T_0 が小さいと人体変位 X は小さいが相対変位 $X-S$ は大きく、したがってベルト張力 F 、人体減速度 A は大きくなる。しかし P 型では E 型にくらべてこの F 、 A の増加は小さい。すなわち車体クッションの小さい苛酷な条件下で P 型はより有効であるといえよう。

なお T_0 が小さいと E 、 P 両型とも ride down 効果が著しく小さくなることが図に現われている。車体が固く、したがってエネルギーを車体が吸収することが少ないからである。

(iii) ベルト長さ L_0 の影響(図8)

ベルトが長いほど人体変位 X 、 $X-S$ がともに増大し、ベルトの最大張力 F 、人体減速度 A はやゝ減少する。ただし P 型では F 、 A の変化はほとんどみられない。何れにしるベルトの長さの

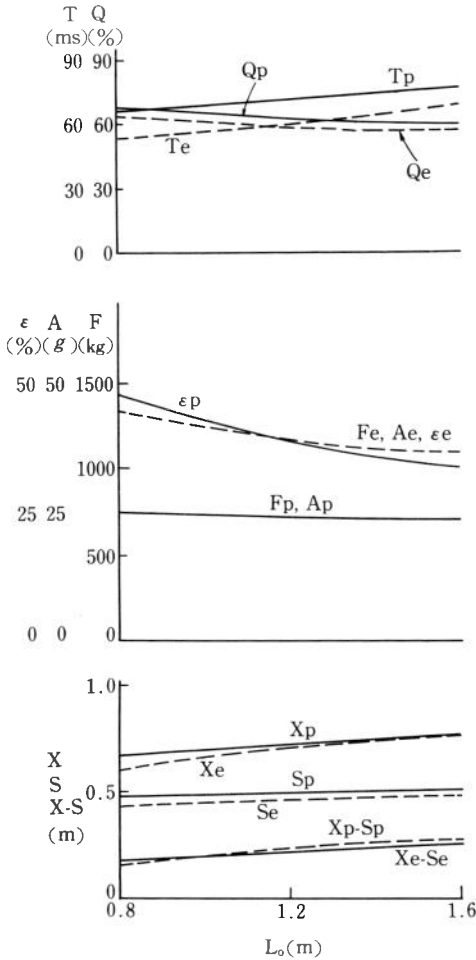


図8 ベルト長 L_0 の影響

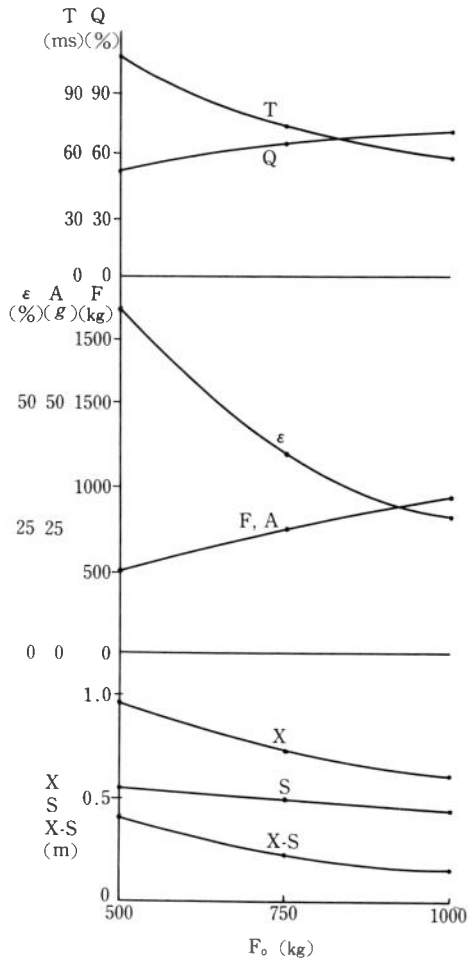


図9 ベルト飽和張力 F_0 の影響 (P型)

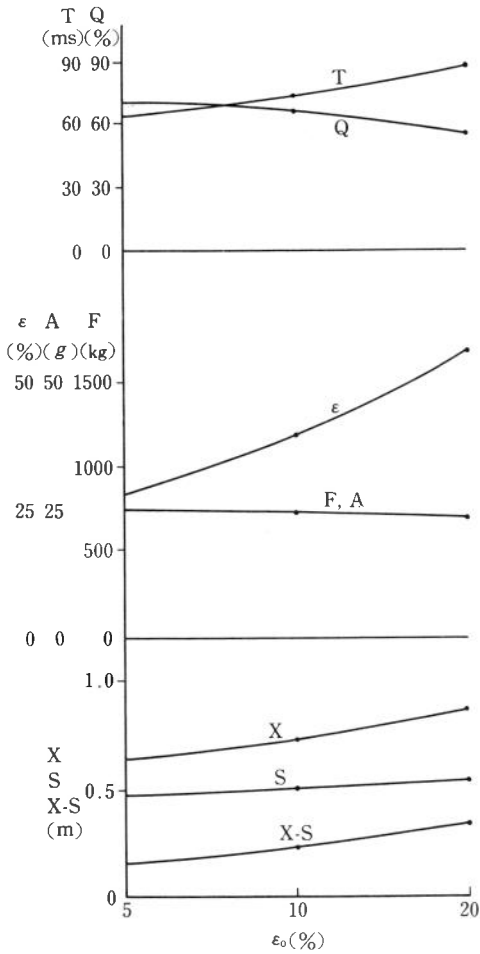


図10 ベルト伸び定数 ϵ_0 の影響 (P型)

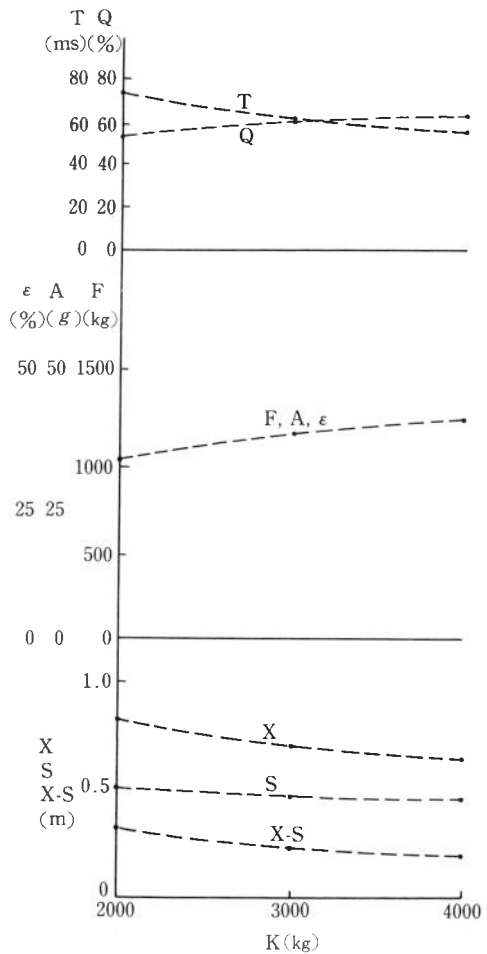


図11 ベルト弾性係数 K の影響 (E型)

影響は他のファクタの影響に比べると小さいようである。

(iv) ベルトの張力-伸び特性の影響 (図9, 図10, 図11)

P型ベルトの飽和張力 F_0 , E型ベルトの弾性係数 K を大きくすると人体変位 X , $X-S$ は減少し, ベルト張力 F , 人体減速度 A は逆に増大する。それとともに ride down 効果 Q は増大し, 人体相対変位が最大になる時間 T は減少する。ただE型では K が大きくなると伸び ϵ が大きくなるが, P型では F_0 が大きくなると伸び ϵ は小さくなる。

P型ベルトの伸び定数 ϵ_0 はすべての点で飽和張力 F_0 と逆の影響を与える。すなわち ϵ_0 が小さいと F_0 が大きくなったのと同じ効果をもたらす。これはP型ベルトの吸収エネルギーが F_0 が大きくなるほど, また ϵ_0 が小さくなるほど大きくなることより理解されよう。

5 結 言

簡単な数学モデルにより弾性型、そ性型の両タイプのシートベルトの衝突時の力学的挙動の比較を行ない、そ性型シートベルトが弾性型のものより有効な乗員保護効果をもつことが示された。

付 E型の運動方程式の理論解

運動方程式

$$\begin{aligned}\frac{W}{g} \ddot{X} &= -F_r = -2K\epsilon = -4K(X-S)/L_o \\ &= -\frac{4K}{L_o}X + \frac{4KT_oV_o}{L_o}(1 - e^{-t/T_o}) \\ t=0 : X &= 0, \dot{X} = V_o\end{aligned}$$

$a = \frac{4gK}{WL_o}$ とすると

$$\ddot{X} + aX - aT_oV_o(1 - e^{-t/T_o}) = 0$$

理論解

$$X = \frac{V_o}{1 + aT_o^2} [1/\sqrt{a} \sin \sqrt{a}t + T_o(1 - \cos \sqrt{a}t) + aT_o^3(1 - e^{-t/T_o})]$$

参 考 文 献

- (1) 古庄, 横家, 藤木: 三点式ベルトのベルト荷重についての二, 三の考察, 自動車技術, Vol. 27, No. 9, 1973
- (2) 杉浦文夫: 衝突時における乗員保護, 自動車技術, Vol. 27, No. 9, 1973
- (3) 番匠谷淳一: シートベルトの動向, 自動車技術, Vol. 28, No. 9, 1974
- (4) 藤居, 加美山, 松丸: 乗員拘束装置について, 自動車技術, Vol. 30, No. 11, 1976
- (5) 山中, 西名: シートベルトの現状と動向, 自動車技術, Vol. 32, No. 8, 1978
- (6) 自動車工学便覧, 自動車技術会編, 昭49