自動車と歩行者の衝突事故時のアクティブ・ロア・アブソーバによる 歩行者脚部損傷低減

Design of Active Lower Absorber for Leg Damage Reduction of Pedestrian Hit by Automobile Frontal Collision

○正 山崎 光悦 (金沢大) 今越 達朗 (PFU)

Koetsu YAMAZAKI, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa
Tatsuro IMAKOSHI, PFU Corporation

Serious injured parts of pedestrian include head, chest and legs, when hit by an automobile frontal collision. Lower absorber equipped under the front bumper is one of the effective devices for the suppression of serious leg damage. In this paper, it is proposed more effective device called active lower absorber, which moves just before or shortly after the impact to suppress knee injury without the increase of other criteria values by adjusting the design parameters of timing of activation and the absorber motion. The response surfaces of four injury criteria of multi-objective design problem are constructed based on the crash analysis by LS-Dyna and design of experiment. The Pareto-optimum solutions are found by the ϵ -constraint method, and categorized by the self organized mapping method(SOM).

Key Words: Active Lower Absorber, Pedestrian Leg Injury, Knee Bending Angle, Optimum Design

1. 緒言

自動車の歩行者に対する安全性に関しては、2005年に欧州と日本でそれぞれ歩行者保護規制が施行されるなど、近年、より重要視されている。自動車との衝突時における歩行者の主な損傷部位として、頭部、胸部、そして脚部が挙げられる。この中で、脚部の傷害は発生頻度が高く、後遺障害に繋がる場合も少なくない。このことから、自動車の、特に車両前部の歩行者脚部保護性能の向上は重要な課題となっている。ここで、歩行者脚部保護性能の向上とは、車両前部の歩行者脚部に対する加害部位に工夫を施すことで脚部に傷害が発生する確率を低くし、また傷害が発生したとしてもその程度を抑えることを指す。現在の日本の歩行者事故では、近年、フード（ボンネット）のショートノーズ化が進展し、車体前面形状が大きく変化したことにより、歩行者脚部の脛骨や腓骨の傷害発生割合が大きく、膝部の傷害発生割合が小さいということが報告されている⁽²⁾。しかしながら、SUV(Sport Utility Vehicle)やミニバンといった、フロント・バンパーが地上から高い位置にある車両が歩行者脚部に衝突した場合、フロント・バンパーが歩行者脚部の大腿部や膝部周辺に衝突するため、これらの車両との衝突では歩行者の膝靱帯に特に傷害が発生する可能性が高い。そのため、このような車両には歩行者膝部の傷害リスクを低減するための工夫がより必要であると考えられる。歩行者脚部保護性能向上方法の一つとして、フロント・バンパーの下部に新たに緩衝装置（ロア・アブソーバ）を設置することが提案されている⁽¹⁾。このロア・アブソーバの設置により、脛骨や膝靱帯の傷害リスクを低減することができる。しかし、現在までに提案されたロア・アブソーバは、衝突に対して受動的に作用する緩衝装置に過ぎない。

そこで本報では、車両前部と脚部の衝突直後または直前にロア・アブソーバを前方移動させることで、膝靱帯の一つである内側側副靱帯の傷害リスクをより低減することを検討することを目的とした。前方移動するロア・アブソーバを本報ではアクティブ・ロア・アブソーバ（A・ロア・アブソーバ）と呼称する。

A・ロア・アブソーバを歩行者脚部損傷低減に有効な装置とする条件を具体的に検討するため、動的有限要素法により歩行者と車両前部の衝突解析を行い、解析結果を基に、A・ロア・アブソーバの設置位置や挙動に関する条件を設計因子とし、脚部の傷害との相関が高い4つの物理量（傷害基準）についてそれぞれ直交多項式を作成した。その直交多項式を用いた応答曲面を用いて、多目的最適化によってパレート解を導出した。さらに、導出したパレート解の中から内側側副靱帯の傷害リスクを低減し、かつ他の部位の傷害リスクを著しく大きくしないという条件を満たす設計解を求めることを試みた結果を示す。

2. 脚部インパクトと傷害基準

2.1 脚部インパクトと傷害基準 欧州ではEuro-NCAP（自動車アセスメント）で車両前部の歩行者脚部保護性能評価試験が行われている。この試験では、歩行者脚部を模擬した衝撃子（脚部インパクト）をフロント・バンパー部に射出し、衝突させる。そして、衝突時に脚部インパクトによって計測される物理量により、車両前部の歩行者脚部保護性能が評価される。図1に脚部インパクトの外観および断面図を示す。脚部インパクトは脛骨、大腿骨、膝靱帯、筋肉部、皮膚部などで構成される弾性体モデルである。全長 $926 \pm 5\text{mm}$ 、総重量 $13.4 \pm 0.2\text{kg}$ 、地表から膝靱帯中央までの高さが 494mm となっている（2002年モデル）。なお、脚部インパクト各部の寸法や質量は、欧州における身長 175cm 、体重 80kg の成人男性脚部の50%tile値を基に与えられている。この脚部インパクトにより、脛骨加速度 a_T 、膝曲げ角 B_A 、膝せん断変位 τ の3つの物理量のピーク値を計測する。それらはそれぞれ脛骨・骨幹部、内側側副靱帯、前十字靱帯の傷害と相関が高い。図2に膝部の前額断面を示す。脛骨加速度は脚部インパクトのフロント・バンパーと衝突する側と反対の面の、膝部中心から下方 66mm における加速度を指す。膝曲げ角は脛部と大腿部の位相差を指す。また、膝せん断変位は脛部と大腿部の変位差を指す。ここで、Euro-NCAPにおけるこれらの値

の許容値を式(1)から(3)に示す。

$$\alpha_T < 150 \text{ [G]} \quad (1)$$

$$BA < 15 \text{ [deg.]} \quad (2)$$

$$\tau < 6 \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$(1 \text{ [G]} = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{)})$$

各物理量のピーク値がこれらの許容値を同時に満足することが求められる。ここで、足関節の傷害と相関が高いと考えられる足関節における加速度を足首加速度 α_A とし、前述した3つを含めた4つの物理量を、本報では傷害基準として考えた。図3に本報で取り上げた傷害基準の概略図をそれぞれ示す。

2.2 ロア・アブソーバとA・ロア・アブソーバ ロア・アブソーバの主な役割として、次の二点が挙げられる。一つは、衝突荷重を分散させる役割である。車両が歩行者脚部と衝突した際、脚部のフロント・バンパーとの接触部に衝突荷重が集中する。ロア・アブソーバを設置することで脚部のロア・アブソーバとの接触部でも衝突荷重を受け持つことになり、結果としてフロント・バンパーとの接触部における衝突荷重は小さくなる。そのため、脛骨の傷害リスクを低減することに繋がる。ロア・アブソーバのもう一つの役割は、脚部を積極的に払うことにある。ロア・アブソーバが歩行者脚部と衝突することによって脚部が払われるため、足部が接地している時間が短くなる。そのため、結果として脛部と大腿部の位相差が抑えられ、内側側副靱帯の傷害リスクを低減することに繋がることが期待できる。ロア・アブソーバをフロント・バンパーより前方に突き出すように設置することにより、ロア・アブソーバは上述した役割において、より有益な装置になりうる可能性がある。しかし、その一方でロア・アブソーバが衝突後の早い段階で脚部を払うことになるため、フロント・バンパーが時間をかけて衝撃を吸収するという役割を十分に果たすことができなくなる。そのため脚部がフロント・バンパーと衝突した際、瞬間的に脚部に大きな衝突荷重が加わることになり、結果として脛骨骨幹部の傷害リスクが著しく増大する。これらのことから、現在までに提案されたロア・アブソーバは、膝靱帯の傷害リスクの更なる低減を目的としてその設置位置を変えることが容易にはできない。

ここで、歩行者の脚部を積極的に払うというロア・アブソーバの役割に再び注目すると、ロア・アブソーバによって脚部を払い、脛部と大腿部の位相差、すなわち膝曲げ角を低減することを前述したが、現在までに提案されたロア・アブソーバはフロント・バンパーと同じく、衝突に対して受動的に作用する緩衝装置に過ぎない。歩行者の脛部がロア・アブソーバと衝突し、離れるまでが、ロア・アブソーバが衝突に対して作用する時間となる。ロア・アブソーバが歩行者脚部との衝突直後または直前に車両から離れるように車両の進行方向に移動する（以後、前方移動すると表現）こと、すなわちA・ロア・アブソーバについて考える。図4に(a)従来の車両一体型のロア・アブソーバと、(b)A・ロア・アブソーバを設置した車両がそれぞれ歩行者脚部と衝突した時の様子を想定した概略図を示す。A・ロア・アブソーバが歩行者脚部と衝突する前後に前方移動することにより、衝突し始めてから脛部がロア・アブソーバから離れるまでの時間が長くなる。脚部とA・ロア・アブソーバが接触している間、A・ロア・アブソーバは脛部を押し続けるため、従来提案されているものに比べて膝曲げ角のピーク値を低減する効果が大きいことが期待できる。また、ロア・アブソーバをフロント・バンパーから大きく前方に突き出すように設置することを必要としないため、フロント・バンパーの時間をかけて衝撃を吸収する役割を損ねることはない。すなわち、脛骨骨幹部の傷

害リスクを著しく増大させることなく、内側側副靱帯の傷害リスクを低減することができる可能性がある。前方移動するA・ロア・アブソーバにはこれらの長所がある一方、前方移動するタイミングが悪いと逆に短所となりうる恐れもある。脛部を押し出すことにより、足首付近における加速度が増大する。それによって、足関節の傷害リスクが増大する恐れがある。それを避けるため、ある特定部分の傷害リスクのみに着目して前方移動するA・ロア・アブソーバの作動開始条件および挙動条件を決めることはできない。そこで本報では、A・ロア・アブソーバの作動開始条件および挙動条件を設計因子とし、傷害基準のピーク値を目的関数とする多目的最適化設計を行うことにより、脚部の特定部分の傷害リスクを著しく増大させることなく、内側側副靱帯の傷害リスクを低減することを試みた。

3. 車両前部と歩行者の衝突解析

3.1 解析モデル 本報では、A・ロア・アブソーバを歩行者脚部損傷低減に有効な装置とする条件を検討するために、動的有限要素法による歩行者と車両前部の衝突解析を実施した。図5に解析で用いた車両前部モデル、図6に歩行者モデルをそれぞれ示す。車両前部モデルはフード・グリル、フロント・バンパー、A・ロア・アブソーバで構成される。フード・グリル、フロント・バンパーの相対位置およびそれぞれの地上からの高さ（地上高さ）は国産のミニバン型の車両を模擬した。フロント・バンパーおよびロア・アブソーバはどちらもカバー、緩衝材、補強材で構成される。カバーは

Fig.1 Photo and cut away of legform impactor

Fig.2 Frontal section of knee (right leg) ⁽³⁾

Fig.3 Injury criterion

(a) The case mounted existing Lower absorber
(b) The case mounted active lower absorber
Fig.4 Behavior of pedestrian leg on clashing with frontal part of car (mounted Lower absorber)

ポリプロピレンを想定し、質量密度 1.04 g/cm^3 、ヤング率 1500 MPa 、ポアソン比 0.35 を与えた。緩衝材は発泡ポリプロピレンを想定し、質量密度 0.053 g/cm^3 、ヤング率 2.04 MPa 、降伏応力 40 MPa とした。また、フード・グリルおよび補強材は剛体とし、フード・グリル、フロント・バンパー、ロア・アブソーバの地上高さは一定として、衝突によって変化しないものとした。ロア・アブソーバの地上高さについては、車両の最低地上高さを満足する範囲で、脛骨加速度のピーク値が小さくなるように定めた。また、ロア・アブソーバの前面形状については、脚部における傷害基準のピーク値を特に小さくする前面形状について予備的な検討結果を参考に、図7のような傾斜角をつけた。フード・グリルガードおよびカバーはシェル要素、緩衝材と補強材はソリッド要素でモデル化した。カバーの初期板厚はフロント・バンパー、ロア・アブソーバともに 3 mm とした。車両本体の質量として、フロント・バンパーの補強材の裏面に 1500 kg を分布して付加した。

歩行者モデルは検討の結果、第2章で述べた脚部インパクトを車両と衝突する側の脚部とし、それに上半身と車両と衝突しない側（非衝突側）の脚部を考慮したものを用いた。上半身の質量および寸法については、脚部インパクトと同じく身長 175 cm 、体重 80 kgw の成人男性を想定し、与えた。表1に上半身各部の質量を示す。非衝突側の脚部は脚部同士の接触を考慮するために弾塑性体でモデル化した。なお、非衝突側の脚部の材料物性値には脚部インパクトの筋肉部の値を用いた。上半身と脚部の接触は考慮せず、脚部同士の接触を考慮した。

3.2 解析条件 車両前部モデルを静止状態にある歩行者モデルに 40 km/h で衝突させた。解析開始前には歩行者脚部とフロント・バンパーが X 軸方向に約 78 mm 離れている。解析開始直後から、車両前部モデルを 40 km/h で脚部の方向に運動させた。これによってフロント・バンパーは解析開始から約 7.0 ms で歩行者脚部と接触する。アクティブ・ロア・アブソーバの速度は強制速度で与えた。すなわち、脚部との衝突によってロア・アブソーバの前方移動速度が小さくなら

Fig.5 Car (anterior division) model

Fig.6 Pedestrian model with impactor

Fig. 7 Cross-sectional shape of lower absorber

Table 1 Mass of the parts of pedestrian model

	Mass [kg]
Head	5.52
Upper body	24.48
Under body	15.28
Upper arm	2.16
Forearm	1.28
Hand	0.48
Leg	13.40
Leg (No impacted side)	13.40

ず、次節で示す設計因子の値およびあらかじめ設定した条件によってのみ速度が変化するとした。解析の場合全体には、重力としてZ軸負の方向に 9.81 m/s^2 の加速度を与えた。車両前部モデルと歩行者モデルの接触については、歩行者の脚部、左前腕、左手のみ車両との接触を考慮した。フロント・バンパーおよびアクティブ・ロア・アブソーバのカバーの後端一列については、上下ともに脚部との衝突によって後退しないよう拘束した。また歩行者脚部と地面の間の摩擦は考慮しないこととした。

3. 3 設計因子 本報では、A・ロア・アブソーバの位置または挙動に関する4つの条件を設計因子、4つの傷害基準のピーク値を解析結果（特性値）とし、直交表 $L_{27}(3^3)$ を用いて設計変数を割当て衝突解析を行った。以下では、取り上げた設計因子について記述する。

A・ロア・アブソーバの設置条件に関わる設計因子として、前方移動前のロア・アブソーバのフロント・バンパーからのX軸方向の突出量（初期突出量： X_p ）を取り上げた。ロア・アブソーバがフロント・バンパーよりX軸方向に突出している場合を正、反対に後退している場合を負とし、突出・後退がない場合を0とした。一方、A・ロア・アブソーバの挙動条件に関わる設計因子としては、次の三点を取り上げた。一点目は、ロア・アブソーバの前方移動時の最大速度（最大前方移動速度： V_{max} ）である。なお、最大前方移動速度はロア・アブソーバと車両の相対速度で表す。二点目は、最大前方移動速度時のロア・アブソーバの移動量（前方移動量： X_m ）である。前方移動量はロア・アブソーバの初期位置からの移動量で表す。三点目は、ロア・アブソーバの前方移動開始時における脚部とフロント・バンパーカバーのX軸方向の距離（作動開始距離： X_d ）である。ここでは、フロント・バンパーと脚部が接触した直後にロア・アブソーバが前方移動を開始した場合を作動開始距離0とし、接触前を負、接触後を正とした。また、接触後の作動開始距離については、フロント・バンパーが脚部と衝突せずにそのまま運動したと仮定して計算した。上述の四種類の設計因子の水準の上下限を表2に示す。

ここで、解析開始からロア・アブソーバが前方移動を開始するまでの時間を $t_1 \text{ ms}$ 、ロア・アブソーバが最大前方移動速

度で前方移動する時間間隔を $t_2 \text{ ms}$ とすると、 t_1 および t_2 はそれぞれ式(4)、(5)のように表せる。なお、ロア・アブソーバが前方移動を開始してから最大前方移動速度に達するまでの時間と、最大前方移動速度に達してから前方移動速度が0 km/hとなるまでの時間は定数(10ms)とした。

$$t_1 = \left\{ (78 + X_d) \cdot \frac{1}{40} \cdot \frac{3600}{(10^3)^2} \right\} \cdot 10^3 \quad (4)$$

$$t_2 = \left\{ X_m \cdot \frac{1}{(V_{max} + 40)} \cdot \frac{3600}{(10^3)^2} \right\} \cdot 10^3 \quad (5)$$

Table 2 Level of design variables

V_{max} [km/h]	$0 \leq V_{max} \leq 20.0$
X_m [mm]	$0 \leq X_m \leq 200$
X_d [mm]	$-20 \leq X_d \leq 40$
X_f [mm]	$-20 \leq X_f \leq 20$

3. 4 解析結果と直交多項式 解析結果の一例として、 $V_{max} = 12.5 \text{ km/h}$ 、 $X_m = 200 \text{ mm}$ 、 $X_d = 0 \text{ mm}$ 、 $X_f = 40 \text{ mm}$ のときの各傷害基準値の時間履歴を図8(a)から(d)にそれぞれ示す。なお、時間履歴では解析開始を0 msとした。時間履歴から、各傷害基準値としてピーク値を採用した。膝曲げ角および膝せん断変位については、時間履歴中の最大値をそのままピーク値とした。また、脛骨加速度についてはフロント・バンパーの衝突荷重による最大の加速度、足首加速度については地面と足部が接触している間における最大の加速度をそれぞれピーク値として採用した。一例として示した解析では、 $\alpha_T = 174 \text{ G}$ 、 $BA = 28.9 \text{ deg}$ 、 $\alpha_A = 149 \text{ G}$ 、 $\tau = 9.35 \text{ mm}$ であった。この結果については、どの傷害基準のピーク値についても著しく大きい、または小さいということはない。また、膝曲げ角のピーク値が比較的抑制されているといえる。 $X_f = 0 \text{ mm}$ かつ $X_d = 40 \text{ mm}$ であることから、ロア・アブソーバはフロント・バンパーと同時に脚部と衝突し、また衝突してから約3.6 ms後に前方移動を開始するため、脛骨加速度や足首加速度のピーク値を著しく大きくすることはない。また、 $V_{max} = 12.5 \text{ km/h}$ かつ $X_m = 200 \text{ mm}$ であることから、ロア・アブソーバは前方移動を開始してから比較的大きな速度で、かつ長い距離を移動する。そのため膝曲げ角のピークが出る時刻までにある程度、脛骨を押し出すことになり、結果として膝曲げ角のピーク値が大きくなり過ぎず、抑えられたと考えられる。この例のように、他の傷害基準のピーク値を著しく大きくすることなく、膝曲げ角のピーク値をできるだけ低減するA・ロア・アブソーバの条件（設計因子の値）を検討するために、解析結果に基づき、各傷害基準のピーク値に関する直交多項式を導出した。それらを式(6)から(9)に示す。

$$\begin{aligned} \alpha_T = & 1.83 \times 10^2 \\ & + 3.31 \times 10^{-1} V_{max} - 1.98 \times 10^{-3} V_{max}^2 \\ & + 4.67 \times 10^{-2} X_m - 1.78 \times 10^{-4} X_m^2 \\ & - 2.51 \times 10^{-1} X_d + 2.47 \times 10^{-3} X_d^2 \\ & - 6.52 \times 10^{-1} X_f + 1.51 \times 10^{-2} X_f^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \alpha_A = & 1.62 \times 10^2 \\ & + 1.74 \times 10^0 V_{\max} + 2.27 \times 10^{-2} V_{\max}^2 \\ & + 1.72 \times 10^{-1} X_m - 8.39 \times 10^{-4} X_m^2 \\ & - 1.07 \times 10^0 X_d + 6.23 \times 10^{-3} X_d^2 \\ & - 2.58 \times 10^{-1} X_f - 1.53 \times 10^{-3} X_f^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} BA = & 4.03 \times 10^1 \\ & - 5.42 \times 10^{-1} V_{\max} - 1.88 \times 10^{-3} V_{\max}^2 \\ & - 4.01 \times 10^{-2} X_m + 1.11 \times 10^{-4} X_m^2 \\ & + 3.70 \times 10^{-3} X_d + 3.09 \times 10^{-4} X_d^2 \\ & - 1.10 \times 10^{-1} X_f + 1.06 \times 10^{-3} X_f^2 \end{aligned} \quad (8)$$

(a) Tibia acceleration

(b) Ankle acceleration

(c) Knee bending angle

(d) Knee shear displacement

Fig.8 Time history of Injury criterion

$$\begin{aligned} \tau = & 9.00 \times 10^0 \\ & + 3.20 \times 10^{-2} V_{\max} - 9.28 \times 10^{-4} V_{\max}^2 \\ & - 6.50 \times 10^{-4} X_m + 1.94 \times 10^{-6} X_m^2 \\ & + 1.00 \times 10^{-3} X_d - 2.47 \times 10^{-6} X_d^2 \\ & + 1.49 \times 10^{-2} X_f - 2.01 \times 10^{-4} X_f^2 \end{aligned} \quad (9)$$

3. 5 最適化の結果

3.4節に示した4つの式を目的関数とし、多目的最適化を行った。多目的最適化手法にはε制約法を用いた。具体的には、脛骨加速度に関する式(6)は目的関数としてそのまま扱い、他の3つの式を制約条件とし、制約量を与えることで単目的最適問題に変換した、そして、その問題を制約付き準ニュートン法で解くことにより、約200個のパレート解からなるパレート解集合を求めた。

次に求めたパレート解集合を目的関数空間上へ写像し、各解の目的関数の値（パレート最適値）の優劣関係を把握することを検討した。しかし、4つの目的関数を軸に取り、パレート最適値を直接、可視化することはできない。そこで本報では、自己組織化マップ（SOM）を用いてパレート最適値を可視化することを試みた。SOMは競合学習型ニューラルネットワークの一種であり、与えられた入力情報の類似度をマップ上の距離で表現する。本報では、Simple BL-SOMと呼ばれるBatch-Learning型のSOMツールを用いた⁽⁴⁾。入力として、求めたパレート解集合のパレート最適値を与えた。すなわち、1つのパレート解ごとに4つの傷害基準の値からなるパレート最適値を与えた。入力により、縦4×横30の計120個のセルからなるマップにおける傷害基準ごとの分布を得た。図9(a)から(d)に傷害基準ごとのSOM上の分布を示す。SOMでは、特徴の似たデータほど隣接したセルに、似ていないデータほど遠くのセルに格納される。また、データが格納されるセルの場所は、異なる傷害基準の分布で表示しても変わらない。図9のセル上に書かれた数字は格納されているデータの数を表す。また、セルの色は格納されているデータの値と入力データの平均および標準偏差の関係により決められる。赤は平均より大きいこと、青は平均より小さいことを示しており、また色が濃いほどその程度が大きいことを示す。

4つの分布を参照して目的に沿ったセルを探し、その中に格納されたデータ（パレート最適値）を取り出した。ここでは、縦16、横2に位置するセルを選択し、その中に格納されたデータを1つ取り出した。表3にそのパレート解とパレート最適値を示す。また、取り出した解の有効性を示すために、パレート解による解析で得られた値と車両一体型のロア・アブソーバを25mm突出させた場合の解析の結果を比較した。その結果を表4に示す。表3と表4より、取り出した解のパレート最適値（近似目的関数値）と解析で直接得られたシミュレーション値にはほとんど差異がないことが分かる。また、取り出したパレート解による解析、すなわちA・ロア・アブソーバを設置した場合と車両一体型のロア・アブソーバを設置した場合で解析結果を比較すると、膝曲げ角以外の傷害基準のピーク値についてはあまり差がないといえる。膝曲げ角の値については、A・ロア・アブソーバを設置した場合のほうが約7deg.小さい。これは、内側側副靱帯の傷害発生リスクに換算すると、約25%に相当する⁽⁵⁾。これらのことより、取り出したパレート解はA・ロア・アブソーバを歩行者脚部損傷低減に有効な装置とする設計解であるといえる。

Fig. 9 Distribution of Pareto optimum value on SOM

Table 3 Selected Pareto solution and Pareto optimum value

	Pareto solution				Pareto optimum value			
	V_{max} [km/h]	X_m [mm]	X_d [mm]	X_f [mm]	α_T [G]	α_A [G]	BA [deg]	τ [mm]
Selected solution	16.1	200	35.3	-1.0	178	162	26.2	9.37

Table 4 Comparison of analysis results

	Design variable				Numerical result			
	V_{max} [km/h]	X_m [mm]	X_d [mm]	X_f [mm]	α_T [G]	α_A [G]	BA [deg]	τ [mm]
A. lower absorber	16.1	200	35.3	-1.0	175	154	25.8	9.36
Non-A. lower absorber	—	—	—	25.0	179	140	32.4	9.43

4. 結 言

本報では、歩行者と自動車前部衝突時に歩行者脚部の膝靱

帯が損傷するリスクを低減することを目的とした、車両前部構造について検討した。そして、車両前部と歩行者の衝突直前、または直後に前方移動するロア・アブソーバ（A・ロア・アブソーバ）を提案した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 直交表 L_{27} を用いた実験計画法に基づき、全身を考慮した歩行者モデルと A・ロア・アブソーバを設置した車両前部モデルの衝突解析を行った。また、解析結果を基に、衝突事故時に歩行者脚部に発生する主な傷害との相関が高い 4 つの物理量（傷害基準）と A・ロア・アブソーバの設置位置・挙動条件との関係を表す直交多項式を導出した。
- (2) 導出した 4 つの直交多項式を用い、多目的最適化を試みた。多目的最適化の手法として ϵ 制約法を用い、制約付き単目的最適化問題へと帰着させ、その問題を準ニュートン法で解くことによりパレート解を求めた。求めたパレート解の中で、内側側副靱帯の傷害と相関が高い物理量である膝曲げ角の値を小さくし、他の 3 つの傷害基準の値を著しく損なわない設計解を本報の目的に則したものであるとし、そのような解を選択することを試みた。そのために、自己組織化マップを用いて四次元の情報であるパレート最適値を二次元マップ上に可視化し、前述したような解を選択した。選択された解は、前方移動を開始する前のロア・アブソーバはフロント・バンパーに対してほとんど突出・後退しておらず、またフロント・バンパーと脚部が衝突し、暫くしてからロア・アブソーバが前方移動を開始する条件が内側側副靱帯の傷害をより低減できることを見出した。

参考文献

- (1) Hosokawa, T. et al., Analysis of Loading on the Lower Extremity of Pedestrians in Car-to-Pedestrian Collisions, Denso Technical Review, Vol.12, No.1 (2007), pp.170-178
- (2) Ishikawa, H., Behavior of Pedestrian and Protection in Pedestrian-Car Collision (in Japanese), *The Journal of Society of Biomechanisms Japan*, Vol.27, No.3 (2003), pp.128-133
- (3) Nakamura, R., Primary Kinematics (in Japanese), (1990), p.211, Ishiyaku Publishers, Inc.
- (4) http://prime.psc.riken.jp/?action=blsom_index
- (5) Yonezawa, H. et al., A Study on Method of Test on Pedestrian Leg Protection (in Japanese), *National Traffic Safety and Environment Laboratory Forum2006* (2006), pp.4