

歩行者脚部保護試験法に関する研究

- 脚部インパクトを用いた車両形状と下肢傷害値の関係 -

自動車安全研究領域

米澤 英樹

松井 靖浩

細川 成之

高木 俊介

1. はじめに

下肢傷害は歩行者事故において最も頻度の高い傷害である。下肢傷害には脛・腓骨骨折や後遺障害につながる可能性が高い膝部靭帯(図1参照)の損傷が含まれているため、下肢の保護は交通弱者である歩行者保護の観点から重要な課題とされている。傷害を軽減させるためには車両の安全性を高める必要がある。International Organization for Standardization (TC22/SC10/WG2) Global Technical Regulation (GTR)では、歩行者脚部に対する車両の安全性に着目しており、その加害部位はバンパである。これに関する既存の試験法としては European Enhanced Vehicle-safety Committee の歩行者保護試験法検討ワーキンググループ (EEVC/WG17) によるバンパ評価試験⁽¹⁾がある。この試験法では、英国 Transportation Research Laboratory (TRL)が開発した脚部インパクトを用い、主にセダン型乗用車バンパによる歩行者脚部(特に膝靭帯と脛骨)の傷害程度を評価でき、既に欧州における EC 指令および新型自動車安全性評価試験 (Euro-NCAP)において採用されている。一方、我が国では、GTR を含む国際会議の結果を踏まえ、歩行者脚部試験の導入を検討している。

本研究では、歩行者脚部試験の基礎資料を得ることを目的とし EC 指令で採用されている TRL 脚部インパクトを対象としたコンピュータシミュレーション解析および実車試験を行った。シミュレーション解析では、車両タイプが脚部インパクトの傷害値に及ぼす影響を調査した。実車試験では、セダン1車種を対象として、EC 指令に則した衝撃試験を実施した。

2. コンピュータシミュレーション解析

車種の違いによってバンパ地上高やボンネット先端高さが異なる。ここでは、車種の違いが下肢傷害値におよぼす影響を調査するため、代表的なセダン、ミ

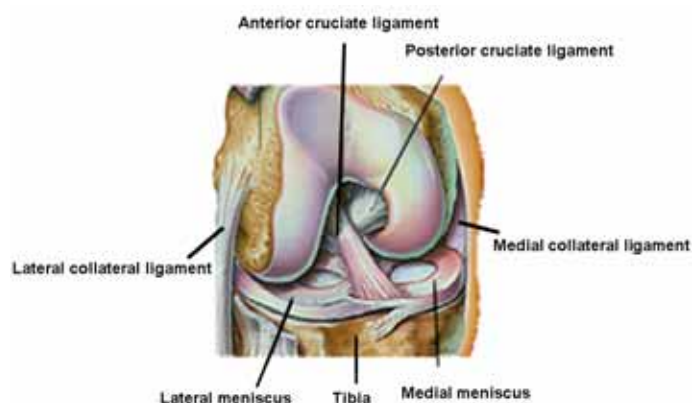


Fig. 1 Knee structure

ニバン, Sport Utility Vehicle (SUV)の車両前部形状を簡易的に模擬した有限要素解析モデルに対し、TRL 脚部インパクトを模擬した有限要素解析モデルを衝撃させて解析を行った。

2.1. 解析条件

ここでは、非線形動的有限要素解析プログラム LS-DYNA ver. 970 (Livermore software technology corporation)を使用した。

2.1.1. 脚部インパクトモデル

脚部インパクトモデルは、ARUP (株)が開発し TRL 脚部インパクトを模擬した有限要素モデル (FE Model, 図2参照)を使用した。大腿部と下腿部は剛体、大腿部と下腿部を連結する2枚のスチール製の膝部材は弾塑性体でモデル化されている。その周りを取り囲むフォーム部 (Confor foam 45[®]) は低密度発泡材でモデル化されている。節点数 27,035, 要素数 24,930 (ビーム要素 9, 離散ばね要素 3, シェル要素 10,720, ソリッド要素 14,198), 25 パートで構成されている。

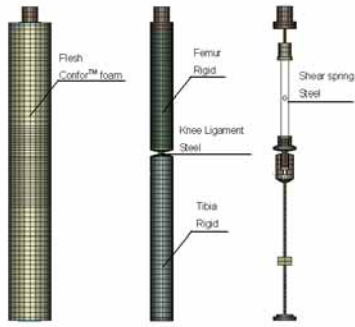


Fig. 2 FE Model of Legform impactor

2.1.1. 車両モデル

車両前部構造を模擬した有限要素モデルを図3に示す。車対歩行者衝突において主に衝突反力を発生するボンネット先端、バンパ、バンパ下側の三箇所の衝撃吸収材を模擬した前部構造とした。それぞれの構造部材は板厚 0.65 mm のスチールであり、実際の車の構造・剛性に基づく座屈変形によりエネルギー吸収を行う。荷重変形特性は、各部材単体に剛体円柱 ($\phi=120$ mm, $m=13.4$ kg) を 40 km/h で衝突させ求めた特性値を使用した。バンパビームは、バンパ衝撃吸収材に比べ剛性が高いため、剛体とした。また、3つの衝撃吸収材は互いに剛体結合し、車両質量として 1000 kg の集中質量をバンパ衝撃吸収材後方のリジッド部の中心に付加した。脚部インパクトモデルと各車両モデルとの衝突位置を図4に示す。

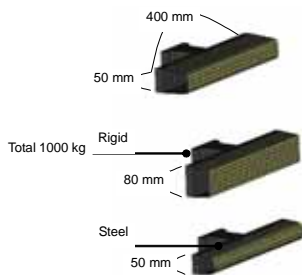


Fig. 3 FE Model of frontal car structure

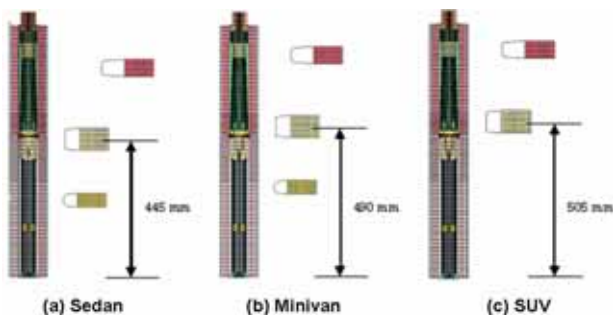


Fig. 4 FE Legform impactor model contact locations at different vehicle type

2.2. 解析結果

衝突後 15 ms の脚部インパクトモデルの挙動を図5に示す。セダンでは、脚部インパクトは 14 ms までボンネット先端に接触しないため、大腿部は車両後方に回転した。一方、ミニバンでは、脚部インパクトの大腿部はバンパ衝撃吸収材およびボンネット先端により支持されるため、セダンと比較すると脚部インパクトの車両後方への回転が小さい。SUV では、脚部インパクト下腿部がバンパ下に回り込んだ。また、SUV では、主としてバンパ衝撃吸収材が衝突しエネルギー吸収を行うため、約 10 ms で底付きが発生した。

傷害値となる下腿部加速度、膝曲げ角度、膝せん断変位の時間履歴を図6に示す。セダンとミニバンでは傷害値に大きな違いは見られないが、SUV ではバンパ衝撃吸収材に底付きが発生したため、傷害値が大きくなった。

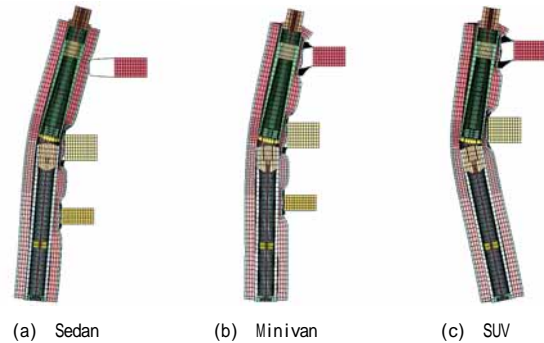
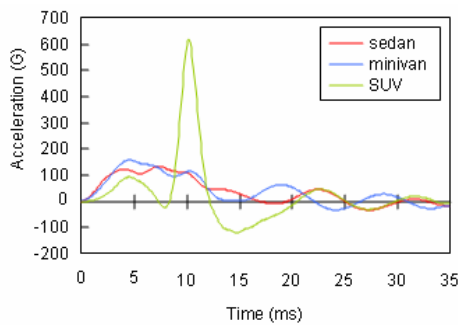


Fig. 5 Dynamic sequence of FE legform impactor model at 15 ms

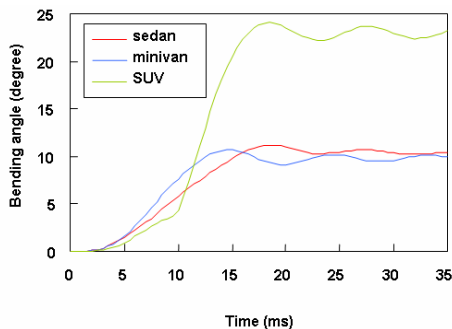
ミニバンとの衝突による下腿部加速度は、セダンとの衝突による下腿部加速度と比べ高い値が計測された。セダンとの衝突では下腿部にバンパ衝撃吸収材とバンパ下側衝撃吸収材が衝突する。一方、ミニバンとの衝突では、大腿部にバンパ衝撃吸収材、下腿部に下側衝撃吸収材がそれぞれ衝突するため下側衝撃吸収材の変形が大きくなり、下腿部加速度が大きくなっている。SUV モデルではバンパ衝撃吸収材の底付きにより約 10 ms で 618G と急激に増加した。

膝曲げ角度については、セダンとミニバンではバンパ下側衝撃吸収材が脚部インパクトの膝の曲げ変形を抑えるため小さくなった。一方、SUV では、下腿部がバンパ下に回り込み、膝曲げ角度が大きくなった。さらに、膝曲げ角度が大きくなった要因として、10 ms 以降のバンパ衝撃吸収材の底付きが考えられる。

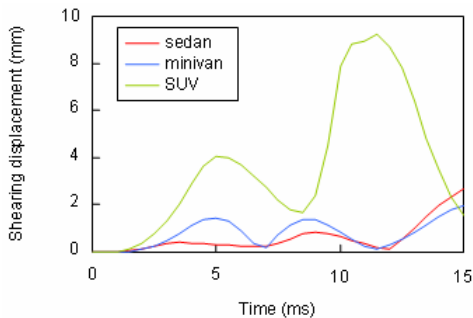
膝せん断変位については、衝突初期にセダンの値がミニバンや SUV と比較すると小さくなっている。これは、セダンではバンパ衝撃吸収材が大腿部と下腿部の両方に衝突したため、大腿部と下腿部の相対変位が発生せず、膝せん断変位の値は小さくなったと考えられる。ミニバンや SUV ではバンパ衝撃吸収材が膝関節の上の大腿部に衝突し、大腿部と下腿部に相対変位が発生したため、膝せん断変位の値がセダンと比べて大きくなった。さらに、SUV ではバンパ衝撃吸収材の底付きにより、膝せん断変位が大きな値となった。したがって、車種毎に脚部インパクトの挙動が異なる傾向を示し、その結果傷害値も異なる値を示すことが明らかとなった。ただし、ここでは車両を簡易モデルで模擬しており、今後より詳細な車両モデルを作成して脚部インパクトの挙動や傷害値を調査する必要がある。



(a) Lower leg acceleration



(b) Bending angle



(c) Shear displacement

Fig. 6 Time history response of injury criteria

3. 実車試験

EC 指令に則し TRL 脚部インパクトを用いてセダン 1 車種に対する衝撃試験を実施した。

3.1. 実験方法

3.1.1. 打撃方法

脚部インパクトをフリーフライトによりバンパへ打撃させる試験状況を図7に示す。脚部インパクトの車両への衝突速度は 40 ± 0.7 km/h である。打ち出し方式については、衝突時の脚部インパクトの上下方向の速度成分をゼロとするため、脚部インパクトを斜め上方に打ち出す弾道打ち出し方式とした。計測項目は、下腿部の加速度、膝の曲げ角度および剪断変位量、そして高速度ビデオカメラにより撮影される脚部インパクトの挙動とした。

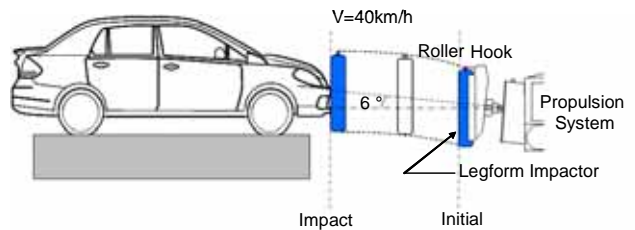


Fig.7 Dynamic sequence of legform with ballistic launching

3.1.2. 供試車両および打撃位置

供試車両は、樹脂製バンパを備えたセダン 1 車種とした。打撃位置はバンパ中央部（センター）およびサイドメンバ部（サイド）とした。サイドメンバ部は、バンパを取り付けるために車体前部に据え付けられたマウント部の中心に相当する。本研究では、各位置に対しそれぞれ 1 回の衝撃試験を実施した。



Fig. 8 Impact locations on bumper

3.1.3. 脚部インパクト

脚部インパクトは、TRL の 2000 年モデル⁽¹⁾を使用した。全長 926 mm、質量 13.5 kg である。大腿部および下腿部、それらを連結して膝の曲がり再現する膝部材（左右に 2 個）、フォーム部（Confor foam 45[®]）と表皮部から構成される（図9参照）。

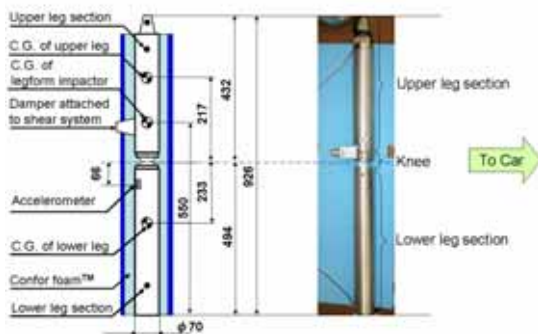


Fig. 9 TRL legform impactor (unit: mm)

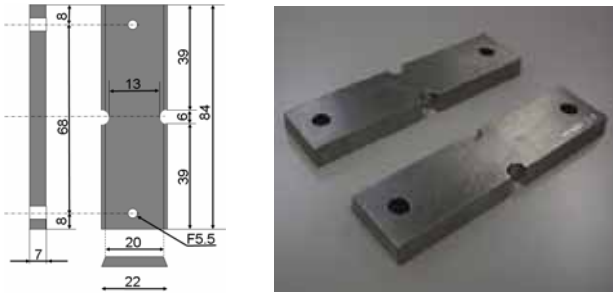


Fig. 10 Steel knee bar (unit: mm)

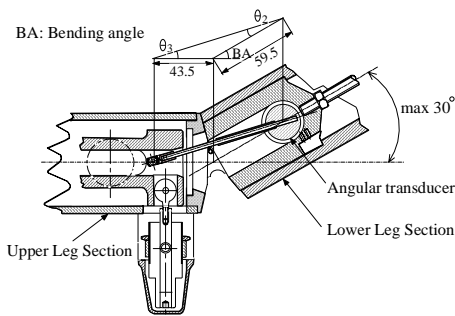


Fig. 11 Knee of legform impactor at maximum bending angle (dimensions in mm)

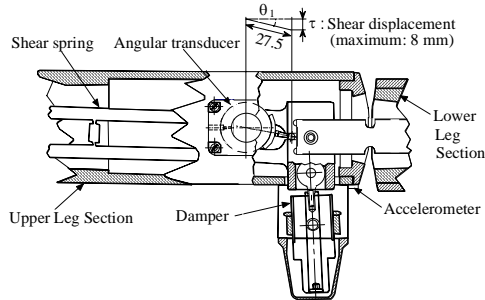


Fig. 12 Shear spring at maximum shear displacement (dimension in mm)

下腿部の加速度は、下腿部側に装着（膝中心より下方 66 mm）された加速度計より計測される。膝曲げ角度は、大腿部と下腿部とのなす角（図 11 参照）であり、下腿部側の角度計測値を用いて算出される。膝せん断変位は、大腿部に内蔵されたシェアースプリング

下端の変位（図 12 参照）であり、大腿部側の角度計測値を用いて算出される。

3.1.4. 打撃条件

供試車両の運転席と助手席にはそれぞれ 75 kg のダミーウェイトを搭載し（成人男性 2 名が乗車した状態を模擬）、タイヤ空気圧は 2.0 kgf/cm² とした。供試車両は駐車ブレーキを作動させて静止状態に置いた。脚部インパクトのフォーム部の温度による特性変化を抑制するため、室内温度は 20 ± 2 とした。

3.2. 実験結果

バンパ中央に対する衝突時の脚部インパクト挙動を図 13 に示す。バンパとの衝突瞬間を 0 ms とした。衝突後、約 25 ms で膝の曲げ角度は最大となり、その後、ボンネット後方へ回転する。

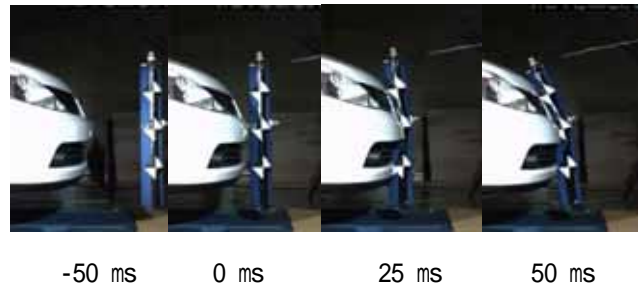


Fig. 13 Dynamic sequence of legform impactor

脚部インパクトは、静止状態から所定の速度（40 km/h）まで射出機より加速される。加速中、脚部インパクトには加速度が発生し、大腿部に内蔵されているシェアースプリング（図 12）も慣性力により変位する。その為、下腿部加速度およびせん断変位が発生する。加速後、脚部インパクトは、射出機から離れて車両へ衝突するまでの間、慣性力でフリーフライトを行うため、下腿部加速度およびせん断変位はゼロレベルへ戻る。1 例として、脚部インパクトより計測される下腿部加速度、膝せん断変位、膝曲げ角度の時間履歴曲線を図 14 に示す。同図では、240 ms 程度からバンパと衝突し、傷害値が発生した。

バンパ中央に対する衝撃時の下腿部加速度、膝せん断変位、膝曲げ角度の時間履歴曲線を図 15 に示す。ここでは、脚部インパクトが車両と接した時間を 0 ms とする。バンパとの接触後、12 ms 後に下腿部加速度は最大値 199G に到達した。18 ms 後には、膝せん断変

位が最大値 3.4 mm に到達し、23 ms 後には、膝曲げ角度が最大値 17° に到達した。

バンパ中央およびサイドメンバ部に衝突した際の下腿部加速度、膝せん断変位、膝曲げ角度の最大値を表 1 に示す。下腿部加速度は、バンパ中央に対する衝撃時では 199G、マウント部では 190G であった。膝曲げ角度は、バンパ中央への衝撃では 17° であった。サイドメンバ部への衝撃では、断線により曲げ角度が計測できなかった。膝せん断変位は、バンパ中央への衝撃では 3.4mm、サイドメンバ部では 2.8mm であった。

TRL 脚部インパクトを用いて、バンパが歩行者に衝突する際の脛骨骨折および膝靭帯損傷の危険度を評価するために傷害基準値(車両の合格基準値)が必要となる。傷害基準値は、1998 年に EEVC/WG17 が提案し、その後 EU 指令が施行された EU 指令フェーズ 1(2005 年 10 月より施行)の後、EU 指令フェーズ 2(2010 年より施行)へと段階を経て移行する。EU 指令フェーズ 2 は現在、議論中であるため、ここでは EEVC/WG17 および EU 指令フェーズ 1 の傷害基準値(表 2)に着目する。脛骨骨折の傷害基準として下腿部加速度が用いられ、基準値はそれぞれ 150G、200G と規定されている。本試験で使用した車両バンパ(190G ~ 199G)は、EEVC/WG17 の基準値は満足しないが、EU 指令フェーズ 1 の基準値は満足する結果となった。膝側副靭帯の傷害基準として膝曲げ角度が用いられ、基準値はそれぞれ 15°、21° と規定されている。本試験で使用した車両バンパ(17°)は、EEVC/WG17 の基準値は満足しないが EU 指令フェーズ 1 の基準値は満足する結果となった。膝十字靭帯の傷害基準として膝のせん断変位が用いられ、基準値は共に 6 mm と規定されている。本試験で使用した車両バンパ(2.8mm ~ 3.4mm)は両基準値を満足する結果となった。尚、表 2 には EU 指令フェーズ 2 の傷害基準値も記載した。

Table.1 Summary of test results

Impact location on bumper	Velocity (km/h)	Injury Criteria		
		Lower leg acceleration (G)	Knee bending angle (degree)	Knee shear displacement (mm)
Center	40.4	199	17	3.4
Side	39.5	190	NA	2.8

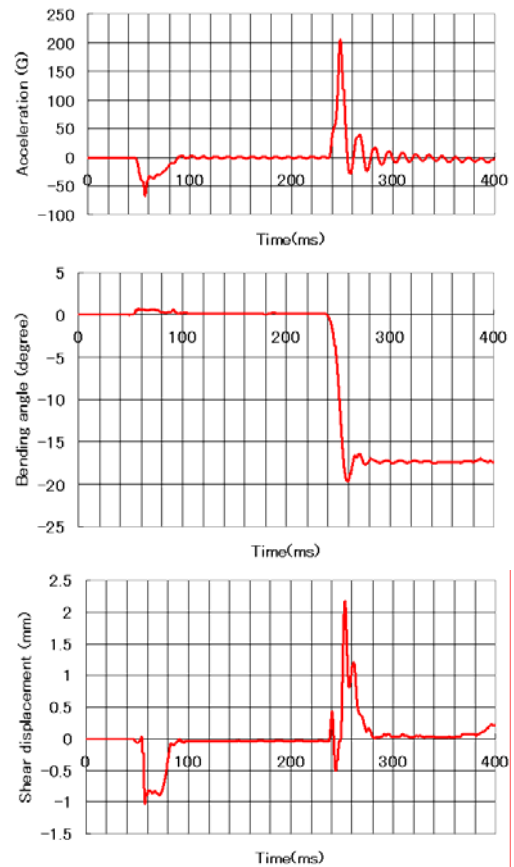


Fig. 14 Time history responses of injury criteria including free flight time period

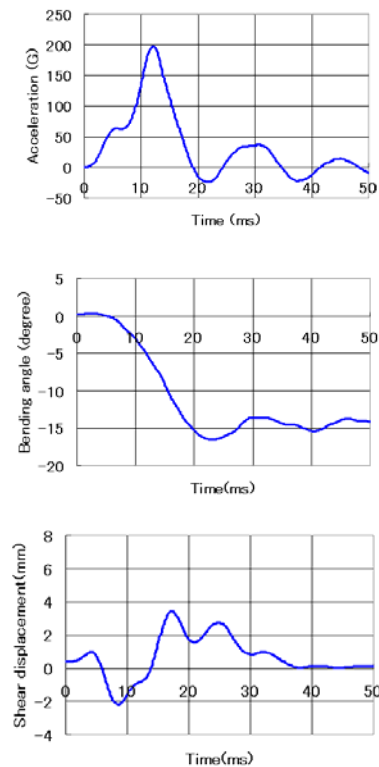


Fig. 15 Time history responses of injury criteria at center impact

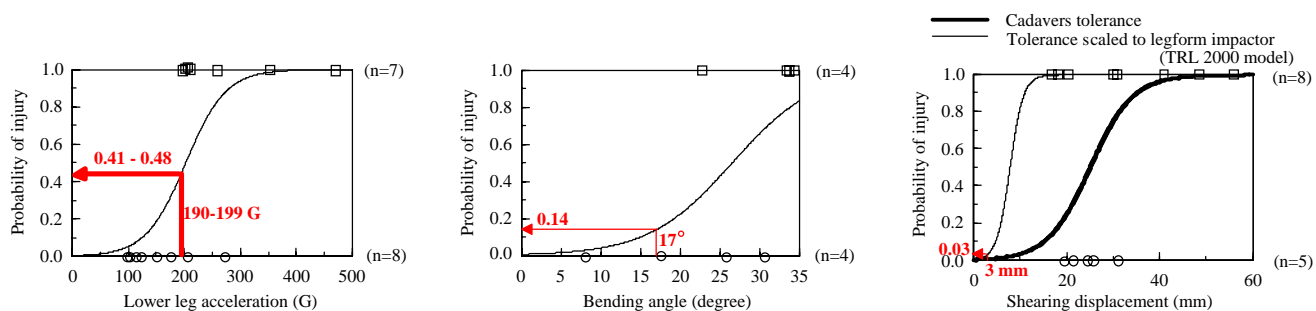
Table.2 Proposed injury reference values

Legislation	Injury Criteria		
	Lower leg acceleration (G)	Knee bending angle (degree)	Knee shear displacement (mm)
EEVC WG17	150	15	6
EU Phase1 from Oct. 2005	200	21	6
EU Phase2 from 2010	170	19	6

次に、脚部インパクトより計測された値の傷害発生率を推定する。文献⁽²⁾⁽³⁾では、バンパが歩行者に衝突する際の脛骨および膝側副靭帯そして膝十字靭帯の損傷する傷害リスク曲線が提案されている(図16)。この傷害リスク曲線は、TRL脚部インパクトを用いて、実際の歩行者交通事故を実験室で再現し、人間との剛性差異を考慮して作成されている。同図より、本試験で計測された下腿部加速度(190G~199G)は、41%~48%の確率で脛骨が骨折する可能性のあることが推定できる。膝曲げ角度(17°)は、14%の確率で側副靭帯が損傷(断裂や伸び)する可能性のあることが推定できる。膝せん断変位は(2.8mm~3.4mm: 3mm)は、3%の確率で十字靭帯が損傷する可能性のあることが推定できる。従って、本試験で使用した車両バンパが歩行者と衝突すると、脛骨は41%~48%の確率で骨折し、側副靭帯および十字靭帯を含む膝靭帯は3%~14%の確率で損傷する可能性がある。

4. おわりに

本研究では、歩行者脚部試験の基礎資料を得ることを目的とし、EC指令で採用されている脚部インパクトを対象としたシミュレーション解析および実車試験を行った結果、以下の知見を得た。



(Tibia fracture acceleration risk curve)⁽²⁾ (Collateral ligament injury risk)⁽²⁾ (Cruciate ligament injury)⁽³⁾

Fig. 16 Injury risk curves for TRL legform impactor

1. シミュレーション解析では、車両タイプが脚部インパクトの傷害値に及ぼす影響を調査した。その結果、車種により脚部インパクトの挙動が異なる傾向を示し、その結果、傷害値も異なる値を示すことが明らかとなった。

2. 実車試験では、セダン1車種を対象として、バンパ中央およびサイドメンバに対応する位置にそれぞれ打撃試験を行った。計測された試験結果を現行EU指令に基づく傷害値リスクカーブに適用すると、膝靭帯が損傷する確率は3%~14%となるが、脛骨は41%~48%の確率で骨折することが推定された。

本研究結果を踏まえ、以下に課題を記す。

1. 本研究のシミュレーション解析では、車両を簡易モデルで模擬したため、今後より詳細な車両モデルを作成し、脚部インパクトの挙動および傷害値を調査していく必要がある。

2. 実車試験では、今後、異なる車種を対象とし、SUV、セダン、ミニバンの車種タイプが傷害値に及ぼす影響を調査する必要がある。

参考文献

1. European Enhanced Vehicle-safety Committee, Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars, EEVC Working Group 17 Report, December 1998.
2. Matsui Y., New Injury Reference Values Determined by TRL Legform Impactor from Accident Reconstruction Test, *International Journal of Crashworthiness*, 2003 Vol. 8 No.2, pp. 179-188.
3. Matsui Y., Biofidelity of TRL Legform Impactor and Injury Tolerance of Human Leg in Lateral Impact, *Stapp Car Crash Journal*, 2001 Vol. 45, pp. 495-510.