

報告番号	※ 乙 第 7099 号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 衝突時の歩行者脚部傷害評価手法に関する研究

氏 名 高橋 裕公

論 文 内 容 の 要 旨

わが国においては、状態別の交通事故死者では歩行者が最も多く、世界的に見ても歩行者保護の重要性が最も高い国のひとつとなっている。そして、歩行者の重傷事故で最も発生頻度が高い脚部傷害は、欧州先進安全自動車委員会（EEVC）が開発したサブシステムインパクト（EEVC legform）を用いた車両の歩行者保護性能試験法における評価項目のひとつとなっており、歩行者保護世界統一基準（UN GTR No.9 および UN Regulation No.127）にも規定されている。しかし、この試験法が検討された当時は、人体特性データや受傷メカニズムに関する知見などが不足しており、歩行者が車両と衝突した際の脚部傷害発生メカニズムを再現できる車両の安全性能評価ツールと、傷害発生の可能性の定量的評価手法の構築が必要とされてきた。

本研究は、車両との衝突時の歩行者の脚部傷害発生メカニズムを精度よく再現できる評価ツールとして、人体腰部・脚部有限要素（FE）モデルや歩行者ダミー脚部を開発、改良するとともに、歩行者ダミーや脚部インパクトを用いた車両の歩行者脚部保護性能の定量的評価手法を構築することにより、車両の歩行者に対する安全性向上に資することを目的とした。

本論文は5章で構成されている。第1章は緒論であり、本研究の背景として、歩行者の事故実態を概観し、人体モデルや歩行者ダミー、脚部インパクトに関するこれまでの研究とその課題について述べるとともに、本研究の目的と概要について述べている。

第2章では、歩行者衝突解析用の人体脚部FEモデルの開発について述べている。

立位姿勢の脚部の詳細3次元形状は、被験者のMRI画像データに基づいて定め、脚部の骨および膝靭帯の材料特性は文献調査結果より定めた。脚部の長骨単体モデルは、負荷位置を変えた動的3点曲げ実験結果に対し検証した。膝関節靭帯は、靭帯または線維束ごとに、複数の負荷速度に対して単体の引張特性を検証した。この靭帯および線維束モデルと関節包を組合せて膝関節モデルを構成し、膝関節単体の動的4点曲げ実験に対し検証した。また、骨盤モデルについては、既存モデルを改良した詳細FEモデルを作成し、献体試験に対して横方向の圧縮特性を検証するとともに、内転時の股関節まわりのモーメントの適正

化を図った。これらの部位別検証により、車両対歩行者衝突における脚部各部位の代表的な負荷条件に対し、各単体モデルの高い人体忠実度が確認できた。

骨盤および脚部の詳細 FE モデルを、Rigid Body とジョイント要素で構成した上半身モデルと結合し、歩行者全身モデルを作成した。死亡事故で最も発生頻度の高い頭部の挙動を再現するため、頸部の力学特性を被験者実験に対し検証した。この全身モデルを用いて、歩行者事故で最も頻度が高い小型セダンとの衝突実験を再現したところ、上半身各部の車両に対する軌跡を精度よく再現していることがわかった。

これらの検討の結果、歩行者が車両と衝突した際の全身挙動を再現しつつ、腰部、大腿部、膝関節および下腿部の内力状態を精度よく推定できる、歩行者人体 FE モデルが構築できた。

第 3 章では、従来の歩行者ダミー POLAR II の膝関節および下腿部の人体忠実度検証と大腿部の改良構造の開発、および、脚部の傷害値計測手法と傷害閾値の検討について述べている。

POLAR II の膝関節（オリジナル版および改良版）および下腿部を用いて、一連の単体実験を実施した。その結果、改良版膝関節では、靭帯スプリングの剛性向上により外反方向の曲げ特性の人体忠実度が改善していること、下腿部は、横方向内向きの動的 3 点曲げにおける応答特性について、高い人体忠実度を有することが確認できた。次に、車高の高い車両と歩行者との衝突で発生頻度が高い大腿部の改良構造を含む、第 3 世代歩行者ダミー POLAR III の脚部を開発し、その人体忠実度を検証した。大腿骨の樹脂化に加え、膝関節の上下方向の寸法を最大限縮小して大腿骨および脛骨の変形可能部を極力長く取り、大腿骨および脛骨のロードセルを廃止することで、人体忠実度向上を図った結果、大腿部、下腿部、膝関節ともに、横方向の曲げ特性の高い人体忠実度が得られた。

POLAR III の大腿骨、脛骨および膝関節の FE モデルを組み込んだ歩行者ダミー全身 FE モデル、および、人体全身 FE モデルを用いて、車両 FE モデルとの衝突シミュレーションをおこない、得られた曲げモーメントの比率により献体実験からの耐性値をスケールリングすることで、歩行者ダミーに対する傷害閾値を求めた。また、ひずみゲージの計測データから、大腿骨、脛骨に生じる曲げモーメントを弾性はり理論により算出する手法を検討し、この手法で曲げモーメントが正確に算出できる範囲と、それ以外の範囲に対する簡易な補正方法を求めた。膝関節の傷害評価については、POLAR III および人体の膝関節 FE モデルの動的 4 点曲げシミュレーションから、靭帯損傷に対応する歩行者ダミー各靭帯の引張荷重閾値を推定した。そして、献体衝突実験を全身ダミー FE モデルで再現した結果、下腿部骨折が生じない場合には、最初に発生すると推定される靭帯損傷をこの閾値で予測できることがわかった。

これらの検討の結果、従来の歩行者ダミー POLAR II に対し、人体忠実度を向上した POLAR III 脚部構造と、POLAR III 脚部を用いた大腿部、下腿部および膝関節の傷害の定量評価手法が構築できた。

第 4 章では、脚部インパクトの人体忠実度評価、新脚部インパクト FlexPLI に対する傷害確率関数の開発と傷害基準値の妥当性検証、および、FlexPLI の改良すべき課題とその対応に関する検討について述べている。

人体モデル、EEVC legform モデルおよび FlexPLI モデルを用いた衝突シミュレーショ

ンの結果から、FlexPLIでは、脛骨と前十字靭帯（ACL）の傷害評価指標について、EEVC legform に対し人体との相関が大きく向上していることを定量的に明らかにした。また、人体忠実度の差異の要因として、脛骨骨折指標の違いや骨の剛性の違いの影響は、入力位置が変化した場合に大きくなること、入力荷重の急激な増加に対しては骨の剛性の影響が大きいことがわかった。

FlexPLIの傷害評価項目である脛骨骨折と内側側副靭帯（MCL）損傷について、Weibull分布を用いた生存分析手法による人体に対する傷害確率関数を導出し、衝突シミュレーションでのFlexPLIモデルと人体モデルの各傷害指標の相関関係から、FlexPLIに対する傷害確率関数に変換した。そして、EEVC legformの脛骨骨折指標である脛骨加速度に対する傷害確率関数を同様の手法で導出し、両インパクトで採用されている傷害基準値に対応する傷害確率を比較した結果、脛骨骨折確率はほぼ等価であり、MCL損傷確率はFlexPLIの基準値の方がやや小さいことがわかった。

FlexPLIは繰り返し使用を前提に設計されているため、大腿骨や脛骨、膝関節の曲げ特性は、基本的に部材の弾性変形により再現されている。このため、車両の形状や剛性によっては、インパクトが車両との衝突後に跳ね返るリバウンド段階において、脛骨曲げモーメントが振動の増幅により最大値となる場合がある。そこで、FlexPLIモデルを用いた衝突シミュレーションにより、仕様変更の効果を検証した結果、FlexPLIの脛骨と筋-脂肪複合体/表皮の質量配分を人体に近づけることにより、リバウンド段階での過大評価を大きく低減できることがわかった。また、この質量配分の適正化に、上半身の慣性の影響を再現するための大腿骨上端への付加質量の追加を組み合わせることで、FlexPLIで採用されている衝突高さの補正をおこなわなくても、脛骨曲げモーメント時刻歴の人体忠実度が向上するとともに、脛骨およびMCLの傷害値の人体との相関性も向上することがわかった。

これらの検討の結果、FlexPLIの人体忠実度を定量化し、FlexPLIを用いた膝関節および下腿部の傷害発生確率の定量的予測手法を構築するとともに、将来のFlexPLIの改良に対する技術的指針が得られた。

第5章は本研究の結論であり、各章で得られた知見を要約するとともに、世界統一基準策定活動における貢献について述べている。すなわち、本研究で開発した人体FEモデルは、人体忠実度評価や改良構造の開発などでの活用を通じて、歩行者ダミーの開発に大きく貢献するとともに、歩行者ダミーの脚部構造を取り入れた新脚部インパクト FlexPLIの人体忠実度検証や、傷害基準策定のための人体との相関解析でも活用され、その研究成果は、FlexPLIの世界統一基準（UN GTR, UN Regulation）への導入を検討する、国連自動車基準調和世界フォーラム（WP.29）の衝突安全専門家グループ（GRSP）傘下の歩行者保護GTR Phase-2 インフォーマル会議において参照された。また、本研究で開発したFlexPLIに対する傷害確率関数も同様に参照され、各国の基準導入の正当性を検証するための費用対効果分析を可能とするとともに、FlexPLIの傷害基準値の妥当性検証にも活用された。これらを通じて、本研究で得られた知見は、2014年6月のWP.29における、FlexPLIを採用した歩行者保護UN規則01シリーズ改正案の採択に大きく貢献した。