

Hybrid-IIIダミー下肢の シミュレーションモデルの開発

Development of Computer Simulation Model for Hybrid-III Lower Extremity

高橋 裕 公* 岡 本 豊* 菊 池 裕 二*
Yukou TAKAHASHI Yutaka OKAMOTO Yuji KIKUCHI

エドウィン・シビカ** ジェフ・クランドル** ジョセフ・ペレットイエ** ウォルター・ピルキー**
E.M.Sieveka J.R.Crandall J.A.Pellettiere W.D.Pilkey

要 旨

Hybrid-IIIダミーにおける下肢各部の特性測定結果に基づき、ATB(Articulated Total Body)プログラムによるシミュレーションモデルを開発した。

下肢部単体の衝撃テストおよび台車テストの結果から、シミュレーションモデルの精度検証をおこなったところ、脛部の軸力およびモーメントに関して高い精度が確認できた。

また、足裏への入力として摩擦力が支配的になる場合は、摩擦モデルの改良が必要であることがわかった。

ABSTRACT

A new computer simulation model with measurements of the properties for each segment of Hybrid-III lower extremity was developed using ATB (Articulated Total Body) program.

The simulation results were compared to those of component impact tests and sled tests for model validation. High accuracy for tibia axial load and moment was confirmed.

It was found that improvement of friction model is needed while a large friction force is applied on a sole.

1. まえがき

近年、シートベルト、エアバッグ等の乗員保護装置が普及かつ高性能化してきており、致死率の高い頭部や胸部の傷害は減少傾向にある。しかしながら、これら乗員保護装置が作動した場合でも、下肢の傷害は発生頻度が依然高いため、頭部や胸部傷害の減少に伴い、相対的にクローズアップされてきている。また、下肢の傷害は、直接生死に関わることは少ないが、日常生活への支障が大きく、治療も長引きやすいなど、社会的コストが大きい。こうした背景から、米国および欧州の安全情報提供活動では、下肢の傷害値評価が既におこなわれており、自動車開発における下肢傷害低減のニーズも高まっている。

乗員の傷害低減に向けた解析手法の一つとして、衝突時の乗員挙動のシミュレーションが、いわゆるLamped-Massモデルを中心に盛んにおこなわれており、ダミーの胸部、首部、腰部などの特性の精度向上や、エアバッグ、シートベルトなどの拘束装置のモデル化手法の改良が進められてきている。しかしながら、傷害評価は従来から頭部および胸部が主体であったため、下肢部の精度についてはあまり検討されてこなかった。

そこで、傷害評価に使われているHybrid-IIIダミーの下肢部に注目し、下肢各部の特性測定をおこない、傷害値予測精度の高いシミュレーションモデルを開発した。なお、本開発は米国のバージニア大学と共同でおこなわれ、ダミー特性測定の一部と、モデルの精度検証のためのスレッドテストはバージニア大学によっておこなわれたものである¹⁾²⁾。

* 栃木研究所

** University of Virginia, Automobile Safety Laboratory

2. Hybrid-IIIダミーの下肢部特性測定

シミュレーションモデルへの入力データとして、ダミー下肢の各セグメントの質量および慣性モーメント、各ジョイントの特性、足部のたわみ特性を測定した。Hybrid-IIIダミーの足および足首部に関しては、最近各種の改良が加えられているが、今回の測定には背屈方向の可動角度範囲が 30° の足および足首を用いた。

2. 1. 質量および慣性モーメントの測定

Hybrid-IIIダミーの下肢部をFig.1のようにセグメント分割し、各セグメントの質量と慣性モーメント、重心位置およびジョイント位置を測定した。膝ジョイント部のスライド機構も、独立したセグメントとして測定した。慣性モーメントの測定には、ねじり振り子装置を用いた。Table 1に、質量および慣性モーメントの測定結果を示す。

2. 2. 各ジョイントの特性測定

Hybrid-IIIダミーの下肢部には、可動部位として腰ジョイント、膝ジョイント、足首ジョイントの三つのジョイント部がある。

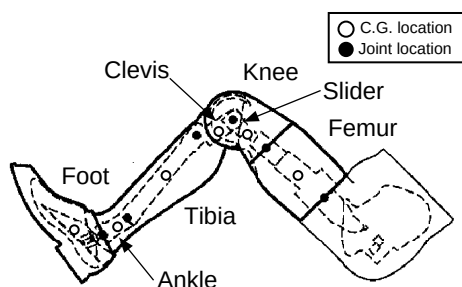


Fig.1 Segments of the Hybrid-III leg

Table 1 Mass and moment of inertia for each segment

Segment	Mass (kg)	Ixx ($\times 10^2 \text{ kgm}^2$)	Iyy ($\times 10^2 \text{ kgm}^2$)	Izz ($\times 10^2 \text{ kgm}^2$)
Femur	3.79	1.807	1.525	0.435
Knee	2.05	0.827	0.923	0.366
Slider	0.14	0.002	0.045	0.045
Clevis	1.12	0.258	0.199	0.103
Tibia	2.35	3.285	3.073	0.220
Ankle	0.76	0.052	0.052	0.067
Foot	1.83	0.093	0.335	0.316

(1) 腰ジョイント

腰ジョイントの特性測定として、静的トルク特性と粘性減衰係数の測定を行った。

Fig.2に腰ジョイントの静的トルク特性の測定結果を示す。粘性減衰係数に関しては、Fig.3に示すように、大腿部を一定角度持ち上げた状態から開放した時の振動の収束状態から係数を決定した。

(2) 膝ジョイント

膝ジョイントは、フリクションのみで一定角度まで回転するピンジョイントと、脛部の大腿部に対する相対変位を許容するスライド機構との組み合わせとなっている。スライド機構の荷重—変位特性の測定は、米国法規のPart572.35に従った振り子衝撃テスト法で行った。測定結果をFig.4に示す。

(3) 足首ジョイント

足首ジョイントはFig.5に示すようなボールジョイントであるが、曲げの方向によって可動角が異なるため、これらの特性を測定した。Fig.6に測定結果を示す。横軸が曲げの方向で、 0° が背屈方向、 180° が底屈方向、 90° が内かえしあるいは外かえし方向を示す。縦軸はその可動角である。

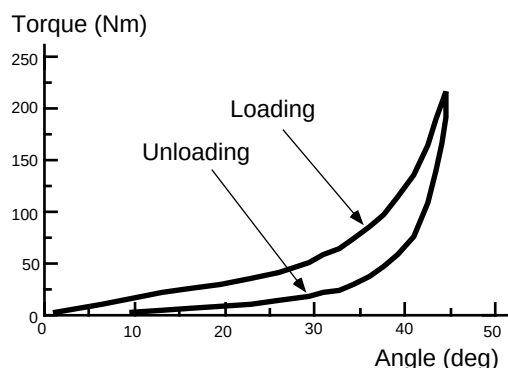


Fig.2 Static torque property for hip joint

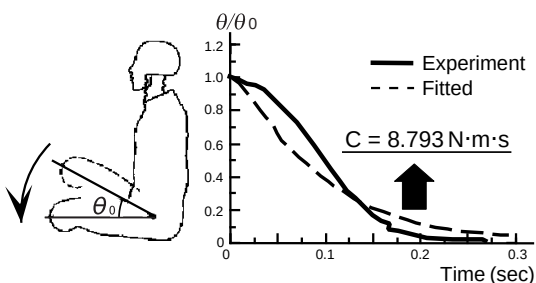


Fig.3 Damping property for hip joint

また、足首の曲げおよびねじりに関し、傷害値に影響の大きいジョイントの底付き後のトルク特性も測定し、Fig.7に示す。

2.3. 足部のたわみ特性測定

衝突時のダミー脚部への荷重入力は、主として足裏を通じて伝わるため、足のたわみ特性を正確に表現することが重要である。衝突テストでは、ダミーの足に特定の靴を履かせることが定められているため、足の特性は、靴を履かせた状態で測定した。

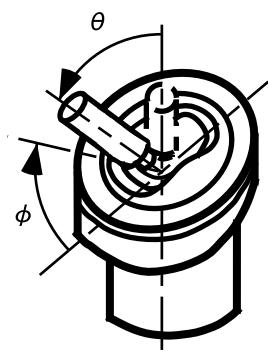


Fig.5 Structure of ankle joint

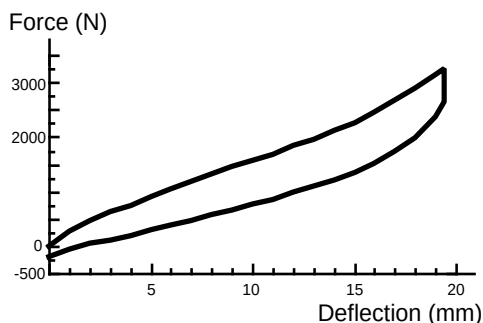


Fig.4 Force-deflection property for knee slider

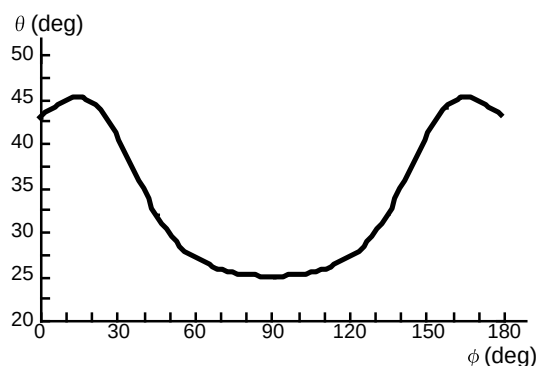


Fig.6 Range of motion for ankle joint

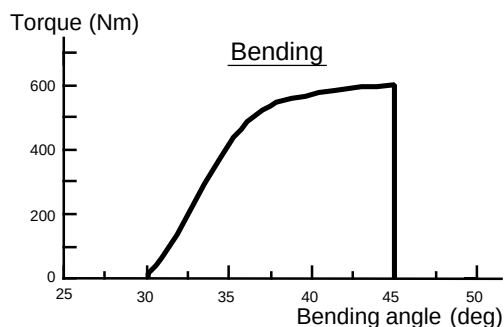


Fig.7 Static bending and torsion torque property for ankle joint

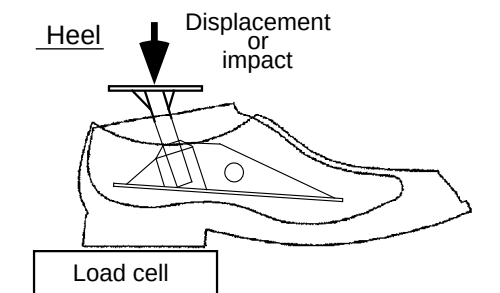


Fig.8 Setup of foot compliance tests for heel and forefoot

足裏への入力点としては、踵部と足前部が考えられるため、Fig.8に示すように、踵部あるいは足前部のみがロードセル上に乗るようにセットし、ジグ上に静的および動的に荷重を加えた。動的テストは、6.8kgのインパクトを速度7m/secでジグ上に衝突させて行った。

Fig.9に、踵部と足前部の静的および動的荷重—変位特性の測定結果を示す。静的に対し動的測定結果では、荷重の立ち上がりおよびヒステリシスが大きく異なる。モデル化に当たっては、動的特性を基準に足のたわみ特性を決定した。

また、つま先部の曲げ変形については、Fig.10のように、つま先部に荷重を入力し、荷重—変位の特性を測定した。つま先部の回転中心は、テスト時のビデオ映像から求め、荷重—変位の特性を変形角度—トルクの特性に変換しFig.11に示す。

3. モデル構成

ダミーの挙動解析シミュレーションでは、楕円形状の剛体セグメントをジョイントで結合してモデル化する、いわゆるLumped-Massモデルが一般に用いられる。このモデルは、有限要素モデルに比べ計算時間が非常に短いため、研究段階あるいは開発初期段階におけるパラメータスタディに適した計算手法である。ここでは、Lumped-Massモデルの解析コードの一つであるATB (Articulated Total Body) プログラム用の計算モデルを開発した。

Fig.12に、今回開発したHybrid-IIIダミーの下肢モデルの構成を示す。

上腿はFemurとKneeの2セグメントで、その間が剛なジョイントで結合されている。Lumped-Massモデルでは、荷重およびモーメントの出力はジョイント部にしか設定できない。そこで、大腿部ロードセルの位置に剛なジョイントを設定することで、ロードセルに対応した出

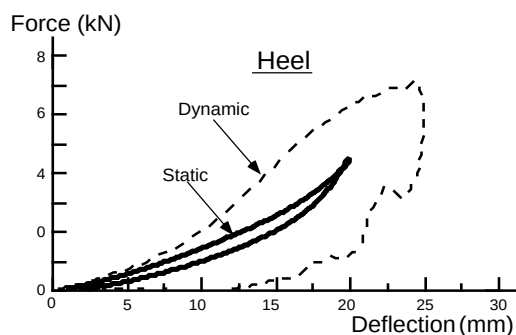


Fig.9 Force-deflection property for heel and forefoot

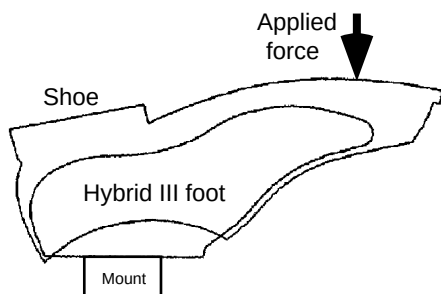


Fig.10 Setup for toe flexion test

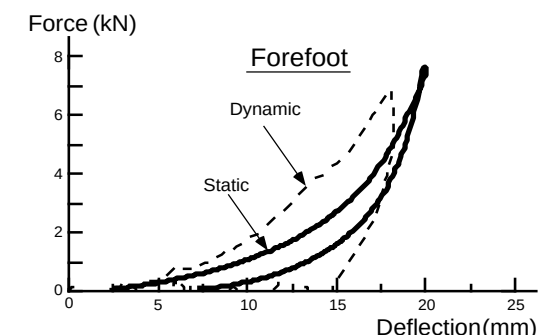


Fig.11 Flexion property of toe

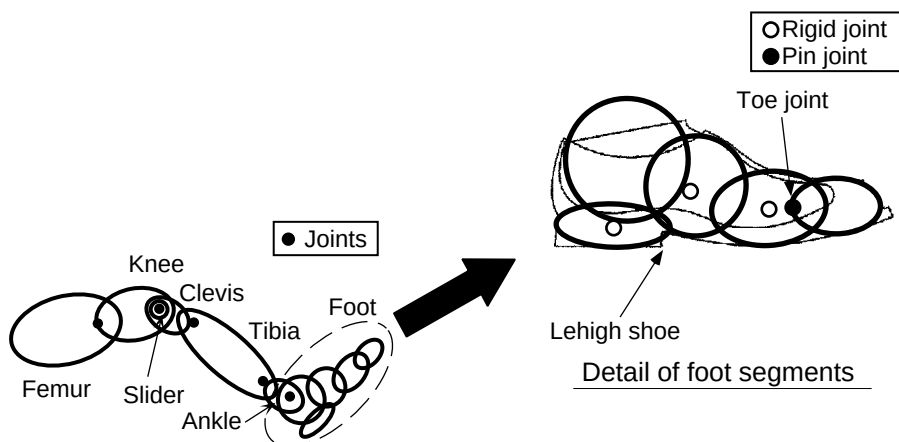


Fig.12 New Hybrid-III lower extremity model

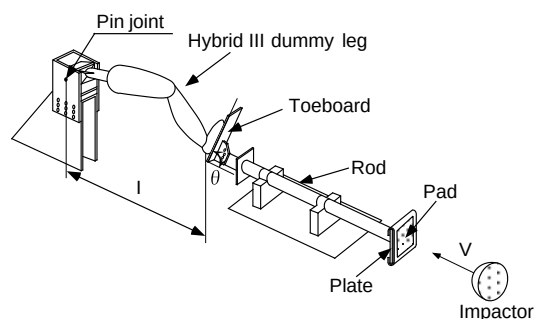


Fig.13 Setup for impact tests

Table 2 Conditions for impact tests

Case	Impactor velocity (m/sec) V	Heel location (mm) L	Toeboard angle (deg) θ
1	3.9	680	50
2	5.9	680	50
3	6.5	680	50
4	7.3	680	50
5	6.5	660	50
6	6.5	700	50
7	6.5	720	50
8	6.5	680	30
9	6.5	680	40
10	6.5	680	60
11	6.5	680	70

力を可能にした。脛骨上部および下部のロードセル位置に対しても、同様の工夫を行った。

膝ジョイントには、回転とスライドの2自由度を表すため、Sliderセグメントを追加した。KneeセグメントとSliderセグメントはピンジョイントで結合し、SliderセグメントとClevisセグメントの間はスリッジョイントで結合している。

足は5セグメントでモデル化し、踵部および足前部への着力点を正確に反映できるよう、足形状の改善を図った。足のセグメント間のジョイントは、つま先部については、曲げの自由度を与えるためピンジョイントとし、その他については剛なジョイントとした。

4. 下肢単体衝撃テスト

今回開発した下肢部計算モデルの精度検証のため、下肢単体の衝撃テストを行い、計算結果と比較した。

4. 1. テスト方法

Fig.13に下肢単体の衝撃テスト装置を示す。ダミーの腰ジョイントは、ジグで1自由度のピンジョイントに置き換えた。ピンジョイントの位置は、大腿部シャフトの延長上で、前後距離がダミーと同じになるように設定した。ダミーの足を乗せるトーボードは、並進自由度のみを持つロッドに固定した。インパクトの質量は6.8kgとし、下肢の出力応答を安定させるため、ロッド先端のプレートにはパッドを取り付けた。

このような設定の下で、以下のパラメータを変化させて衝撃テストを行い、脛下部の軸力 F_z を測定した。

- (1) インパクト速度 V
- (2) 腰部ピンジョイントと踵部との前後距離 L
- (3) トーボードの水平面となす角度 θ

テスト条件をTable 2に示す。

4. 2. 計算精度の検証

計算では、腰ジョイントをピンジョイントとし、ダミー下肢部、トーボード面、パッド面、インパクトをモデル化した。トーボード面とパッド面は剛に結合し、パッドの荷重-変位特性を測定して入力した。

検証結果の一例として、Case-3 ($V=6.5\text{ m/sec}$, $L=680\text{ mm}$, $\theta=50\text{ deg}$)の場合について、脛下部の軸力 F_z の波形を比較したものをFig.14に示す。ピーク値に関しては計算の方がやや高く出ているが、波形は定性的に良く一致している。

Fig.15に、(1)~(3)のパラメータを変化させた場合の脛下部の軸力 F_z の比較結果を示す。インパクト速度および踵位置を変化させた場合については、テストと計算で傾向が良く一致している。またトーボード角度については、 50° 以上のケースでは傾向は良く一致する。

しかし、トーボード角度 40° 以下では計算の方がかなり大きい値を示している。そこで、これらのケースについて、足の挙動をテストと計算で比較したところ、テストではトーボードからの衝撃を受けて、足がほぼ真後ろに後退するのに対し、計算では、足がトーボードに沿って滑り上がるモードであった。

トーボード角度が小さい場合、足裏への入力として摩擦力の割合が増加することになる。テストではこのような場合でも、静止摩擦により大きな摩擦力が作用し、トーボード面に垂直な入力成分が減少して、軸力が低下したものと考えられるが、計算では動摩擦しか扱えないために摩擦力が小さくなり、このため高い軸力が生じたものと思われる。

したがって、足裏への摩擦力が支配的となる状況での精度を向上するには、静止摩擦と等価なモデルを足裏とトーボードの間に設定する必要がある。

5. イントルージョン台車テスト

次に、開発した下肢部モデルを上体モデルと組合わせて、全身ダミーの状態で計算精度を検証するため、バージニア大学の台車テスト装置を用いてテストを行った。

5. 1. テスト方法

Fig.16に、バージニア大学のイントルージョン台車装置を示す。台車の前半部分は油圧式減速装置となっており、ここからの油圧によって、トーボードが台車に対して並進モードで後退そうになっている。ダミーは3点式シートベルトで拘束され、台車にはエネルギー吸収

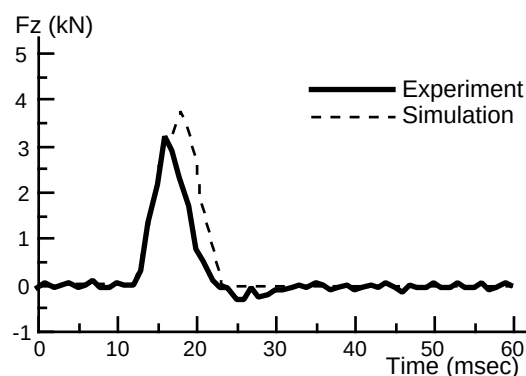


Fig.14 Comparison of pulse shape for distal tibia axial load

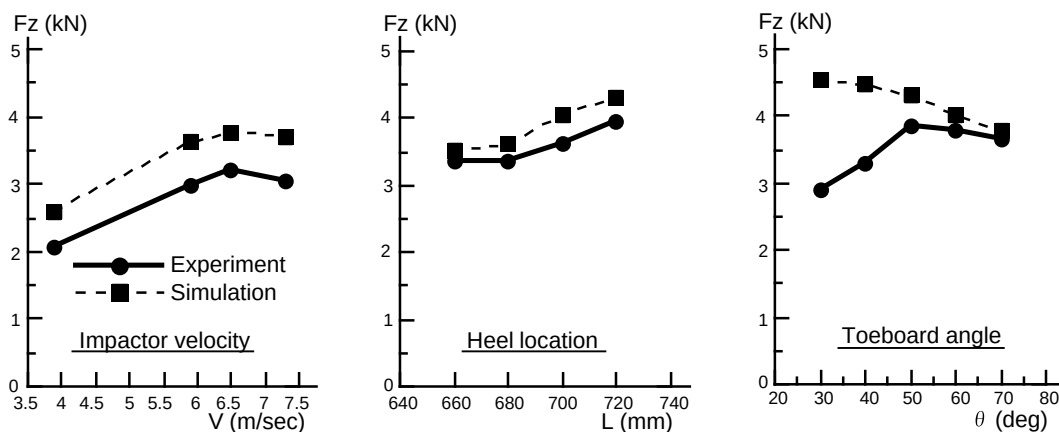


Fig.15 Comparison of peak values for distal tibia axial load

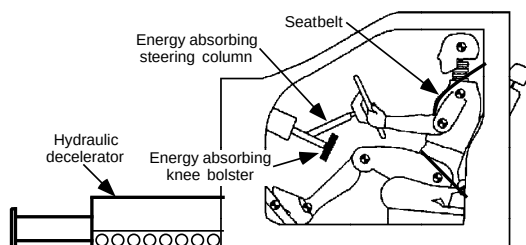


Fig.16 Sled test device with mechanism for toeboard intrusion

Table 3 Conditions for sled test

Case	Delta V (km/h)	Toeboard intrusion (mm)	Time of intrusion (msec)
1	56.8	0	0
2	56.8	70	70
3	56.8	220	40

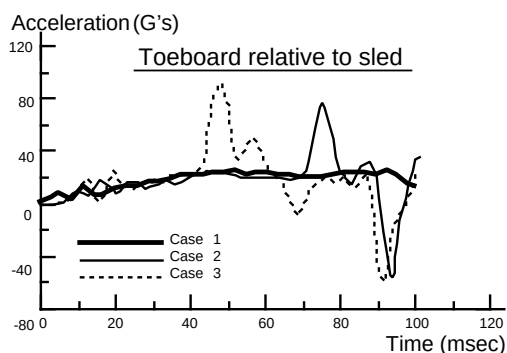
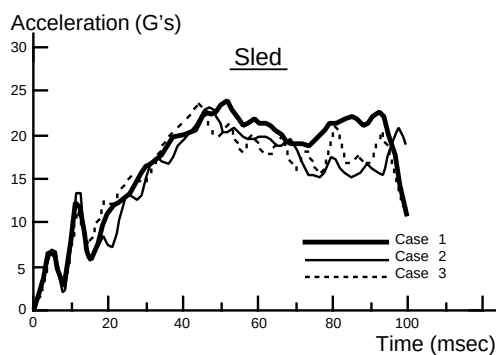


Fig.17 Pulse shape for sled and toeboard acceleration

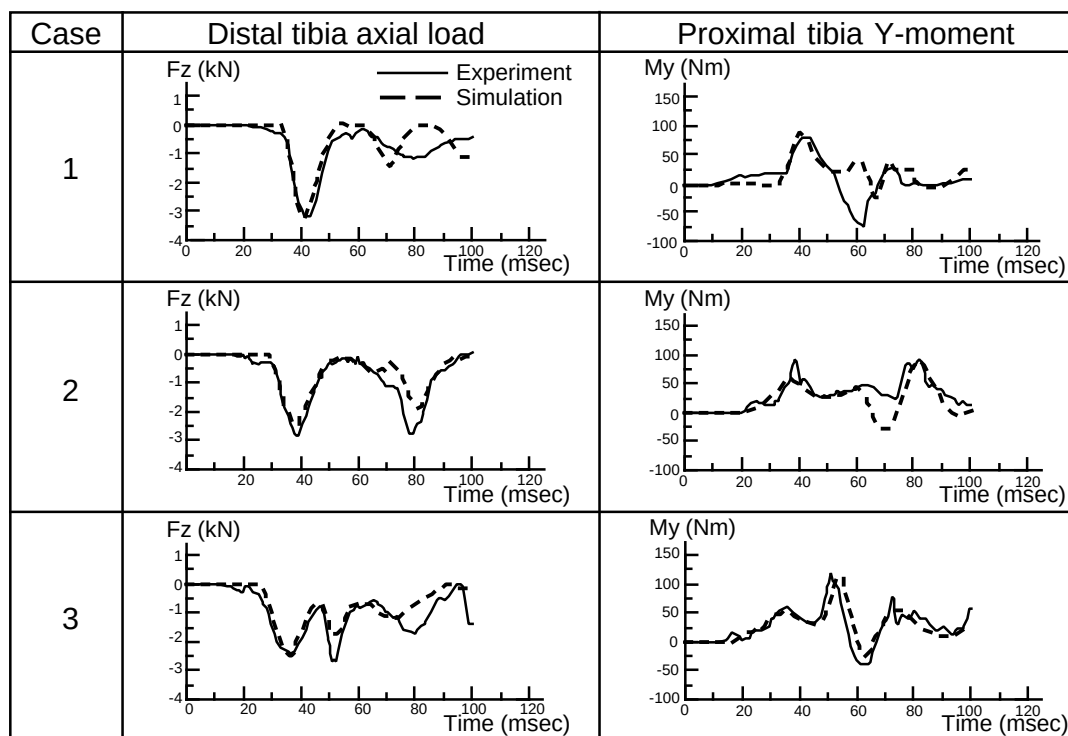


Fig.18 Validation results for tibia axial load and moment

式のステアリングコラムおよびニーボルスタが取り付けられている。

Table 3に、3 ケースのテスト条件を示す。衝突速度は一定で、トーボードの侵入量および侵入開始タイミングを変化させた。Fig.17に、各ケースでの台車加速度波形およびトーボードの台車に対する相対加速度波形を示す。

5. 2. 計算精度の検証

計算では、ステアリングコラムおよびニーボルスタは台車に固定とした。また、Fig.17の波形を、台車およびトーボードの動きとして用いた。

各ケースについて、脛下部の軸力と脛上部のモーメントの波形を、テストと計算で比較した結果をFig.18に示す。衝突時の乗員の慣性力によって生じる一つ目のピーク波形については、軸力、モーメントともよくテストと一致した。トーボードの侵入によって生じる二つ目のピーク波形については、軸力およびモーメントのレベルはやや異なるものの、波形の位相についてはよく一致している。

6. まとめ

- (1) Hybrid-IIIダミー下肢の各セグメントの質量、慣性モーメント、重心位置の測定、各ジョイントの特性測定、足のたわみ特性の測定を行った。測定結果を用いて、ATBプログラムでの新しいシミュレーションモデルを開発した。
- (2) 大腿部および脛部ロードセル位置に剛なジョイントを設けることで、内力の計算を可能とした。また、膝部のスライド機構のモデル化、足形状の再現性向上、つま先の曲げ自由度の導入などにより計算精度の向上を図った。
- (3) 下肢単体衝撃テストおよびイントルージョン台車テストを行いシミュレーションモデルの精度を検証した結果、脛部の軸力とモーメントについて良い精度が得られていることがわかった。
- (4) 足裏への摩擦力が大きくなる場合には、静止摩擦の扱えるシミュレーションモデルの開発が必要である。

参考文献

- 1) J.A.Pellettiere et al., "Experimental Testing of the Hybrid-III Lower Extremity for Computational Model Development", SAE Paper 980363, 1998.
- 2) E.M.Sieveka et al., "A New CVS/ATB Hybrid-III Model for Lower Extremity Studies: Development and Validation", SAE Paper 980357, 1998.

■ 著 者 ■



高橋 裕 公



岡 本 豊



菊 池 裕 二



エドウィン・シビカ



ジェフ・クランドル



ジョセフ・ペレットイエ



ウォルター・ビルキー