

11. 脚部インパクトを用いた車両の歩行者保護試験の試験条件について

－試験条件が脚部インパクトの計測値に及ぼす影響－

自動車安全研究領域 ※松井 靖浩 高木 俊介 細川 成之 米澤 英樹

1. はじめに

車両対歩行者の交通事故において、下肢傷害は歩行者の中で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側の対策が有効である。2005年10月、欧州ではEC指令フェーズ1⁽¹⁾として車両バンパに対する歩行者保護基準が導入された。2007年10月には、EC指令フェーズ2(案)⁽²⁾が欧州閣僚理事会に申請され、2013年より欧州の最終法規基準が導入される予定である。同基準では、英国 Transportation Research Laboratory(TRL)が開発した脚部インパクトを用い、歩行者脚部(特に膝靭帯と脛骨)の傷害程度を確認する。また、世界統一基準となるGlobal Technical Regulation(GTR)歩行者試験法(案)では、TRL脚部インパクトの使用を基本とした試験法の策定が進められている。我が国では、GTR歩行者試験法に則し、バンパに対する歩行者保護基準を導入する可能性もあり、予め試験実施時の課題を解決する必要がある。GTR歩行者試験法(案)では、試験時の湿度の重要性を強調しており、規定項目の一つに湿度条件を含めている。ただし、乗用車衝撃試験では、湿度が計測値に及ぼす影響は明らかにされていない。

TRL脚部インパクト(以下、脚部インパクトと呼称)を用い性能確認の為に動的校正試験(図1)を実施する際、計測項目の一つとなる加速度は特にバラツキが大きいこと(図2)が問題視されてきた。従来の衝突評価試験では温度のみが規定されてきたが、規定以外の環境条件が結果に影響を及ぼすことも考えられるため、文献⁽³⁾では脚部インパクト緩衝材の圧縮時の反力を左右することから湿度が最も影響を及ぼす因子であることを解明している。

一方、脚部インパクトを用いた乗用車に対する衝撃試験(以下、乗用車衝撃試験と呼称)では、湿度の影響は不明であることが欧州を含め各国で問題とされてきたが、現在までに解決されていない。そこで、本研究では、乗用車衝撃試験時の湿度が計測値に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、2つの湿度条件下(約30%RHおよび約60%RH)にて乗用車衝撃試験および同試験を模擬したシミュレーションを実施した。

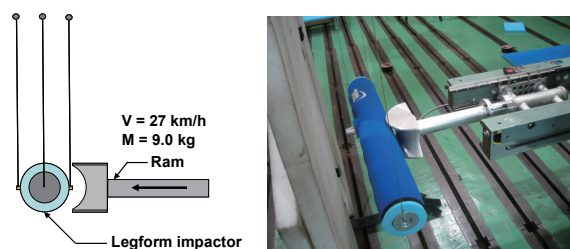


Fig.1 Set up of dynamic certification test

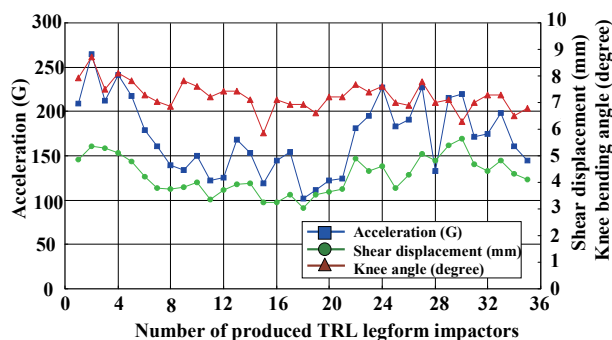


Fig.2 TRL legform dynamic certification test results⁽³⁾

2. 試験

2.1 試験方法

本研究では、湿度を約30%RHおよび約60%RHに変化させた際の乗用車衝撃試験を行った(表1)。

Table 1 Humidity conditions in test

	Low humidity (%RH)	High humidity (%RH)
Test	29	60

2.1.1 脚部インパクトの構造

脚部インパクトは、TRLの2000年モデル(図3)を使用した。全長926mm、質量13.5kg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:図4)、緩衝材(Confor foam 45:以後、CF45と呼称)と表皮部から構成される。CF45の厚さは25mmである。計測項目は、下腿部の加速度および膝せん断変位そして膝曲げ角度である。脚部インパクトの加速度は、膝部材の中心から66mm下の下腿部の反衝撃面に設置された単軸加速度計より計測される値である。膝せん断変位および膝曲げ角度は、膝位置におけるせん断変位量および曲げ角度であり、大腿部および下腿部にそれぞれ装着された角度計からの計測値を基に算出される。

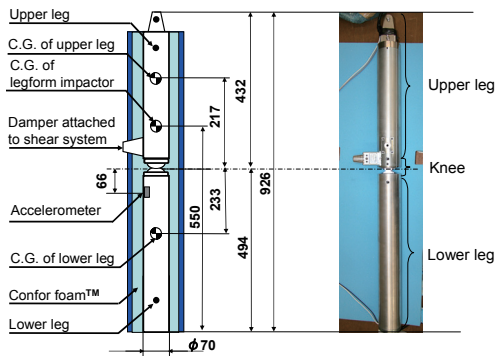


Fig.3 TRL legform impactor (dimensions in mm)

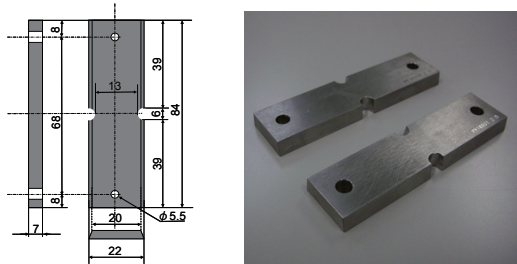


Fig.4 Steel knee ligament (dimensions in mm)

2.1.2 乗用車衝撃試験

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5に示す。脚部インパクトの車両への衝突速度は $40 \pm 0.7 \text{ km/h}$ とし、室温は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ とした。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。脚部インパクトは、打ち出し前にはブーリー付きのフックにより射出機側の治具に固定される。

供試車両は、樹脂製バンパを備えた小型4ドアセダン1車種とした。車両諸元を表2に示す。タイヤの空気圧は推奨圧力とし、運転席と助手席にはそれぞれ75kgのダミーウェイトを搭載した(成人男性2名が乗車した状態を模擬)。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。打撃位置はバンパ中央部とした(図6)。

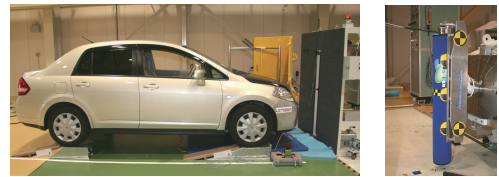
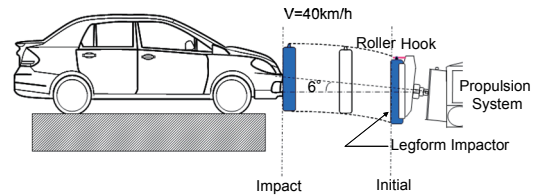


Fig.5 Subsystem test setup using TRL legform impactor



Fig.6 Tested vehicle and impact location

Table 2 Specifications of tested vehicle

Item	Unit	Specification
Length × width × height	mm	4395 × 1695 × 1535
Minimum height	mm	145
Net weight	kg	1120
Gross weight	kg	1395
Engine displacement	cc	1498
Bumper material	-	resin

2.2 乗用車衝撃試験結果

衝撃速度は、40.1 km/h(29%RH)、40.2 km/h(60%RH)であった。脚部インパクトより計測された最大傷害値を表3に示す。脚部インパクトより計測される加速度は2つの湿度条件では一致(198 G @29%RH, 198 G @60%RH)し、膝せん断変位はほぼ一致(1.7 mm @29%RH, 1.9 mm @60%RH)し、膝曲げ角度はほぼ一致(12.6度 @29%RH, 12.9度 @60%RH)した。脚部インパクトを用いた乗用車に対する衝撃試験では、湿度は傷害値に影響

Table 3 Results of legform impactor to bumper impact test

		Low humidity	High humidity
Humidity	(%RH)	29	60
Velocity	(km/h)	40.1	40.2
Acceleration	(G)	198 (11.6 ms)	198 (11.6 ms)
Shear displacement	(mm)	1.7 (17.4 ms)	1.9 (17.2 ms)
Bending angle	(degree)	12.6 (24.3 ms)	12.9 (23.9 ms)

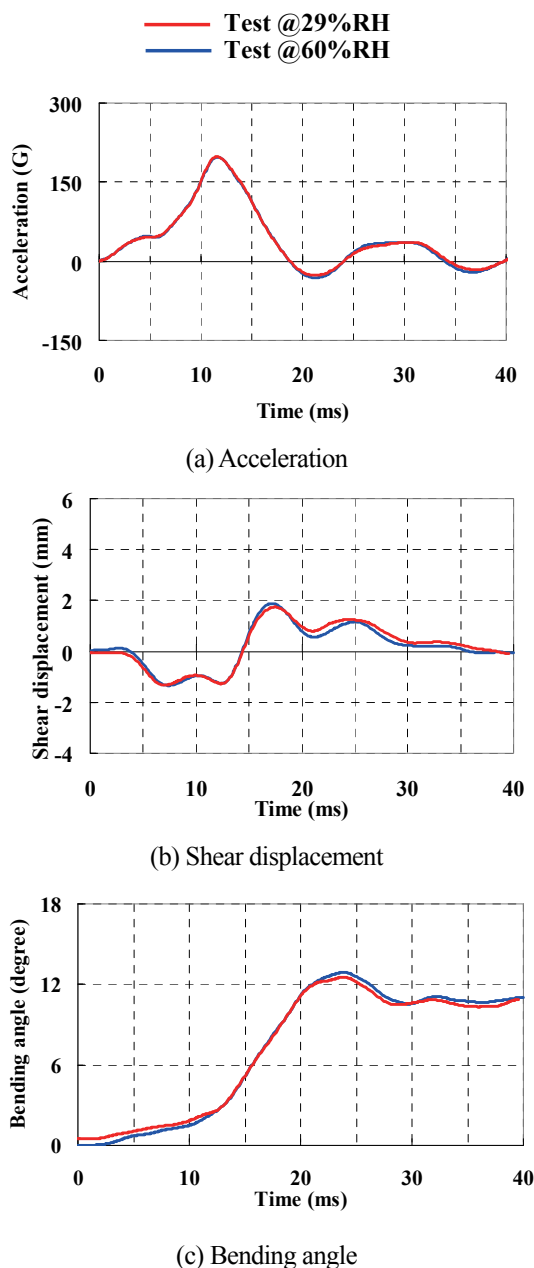


Fig. 7 Time histories of legform to bumper impact test

響を及ぼさないことが実験的に判明した。傷害値の時間履歴データを図7に示す。2つの湿度条件において、加速度は時間履歴においてもほぼ一致した。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション方法

ここでは、乗用車衝撃試験のシミュレーションモデルを開発する。脚部インパクトモデルについては、異なる湿度条件下（28%RH および 60%RH：表 4）の CF45 を対象とし速度 40 km/h での高速圧縮実験を行い、その結果をモデルに適用した。シミュレーションの湿度条件は、CF45 を対象とした高速圧縮実験実施時の湿度である。本節では、湿度条件のみを変化（約 30%RH および 60%RH）させた際の傷害値の変動をシミュレーションを実施することにより確認する。

Table 4 Humidity conditions in test and simulation

	Low humidity	High humidity
	(%RH)	(%RH)
Test	29	60
Simulation	28	60

3.1.1 脚部インパクトモデル

脚部インパクトモデルは、ARUP (株) が開発した脚部インパクトを模擬した有限要素モデル(図 8)を引用した。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 CF45 は低密度発泡材でモデル化されている。節点数は 27,035、要素数は 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 部品で構成されている。

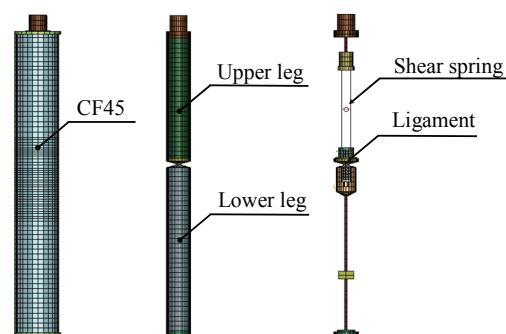


Fig.8 TRL legform impactor model

ここでは、ARUP (株) 製の脚部インパクトモデルに対し、CF45 の応力-ひずみ線図を変更した。CF45 の応力-ひずみ線図については、2つの湿度条件下（28%RH、

60%RH) において厚さ 50 mm, 直径 150 mm の CF45 試験片に対し速度 40.1 km/h (28%RH), 40.8 km/h (60%RH) で圧縮させた高速圧縮実験 (図 9) の結果を基に作成した。モデルに入力した応力-ひずみ線図を図 10 に示す。歪み 0.95 までは実験結果を採用した。歪み 0.95 以上では、歪み 0.99 のときの応力が 4 MPa となるように外挿した。

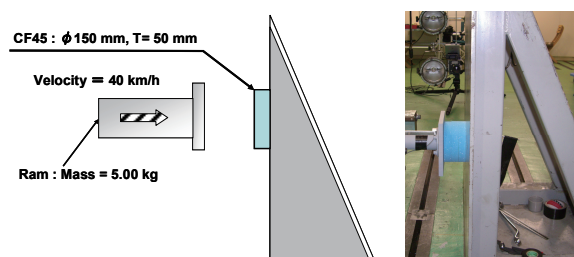


Fig.9 Setup of CF45 dynamic compression test

3.1.2 乗用車衝撃試験モデル

乗用車衝撃試験に使用した車両と同一型式の車両を対象とした簡易車両モデルを作成した (図 11)。ボンネットモデル, バンパーカバーモデル, アブソーバーモデル, ロアーバンパーモデル, フロントメンバーモデルの 5 つの部品で構成した。それら部品の外形形状を三次元測定器 (分解能 0.1 mm) により計測した。各部材の代表厚さを実測し, 厚さを一様としモデルを作成した (アブソーバーを除く)。各点を結合させ, 形状を三角形要素, 若しくは四角形要素としてメッシュ化を行った。アブソーバーモデルに関しては, 今回は中央部近傍に対する衝撃試験状況を計算するため, 中央から左右に 220 mm (全体で 440 mm) のモデルとした。アブソーバーモデルの応力-ひずみ特性は, 高速圧縮条件下における特性を引用した。ボンネットモデル, バンパーカバーモデル, ロアーバンパーモデルの応力-ひずみ特性は, 車両各部材から切り出した試験片の静的引張試験の特性を引用した。車両モデルの合計節点数は 6,322, 要素数は 6,056 (シェル要素 4,388, ソリッド要素 1,668) で構成されている。

乗用車衝撃試験では, バンパへ打撃した際の脚部イ

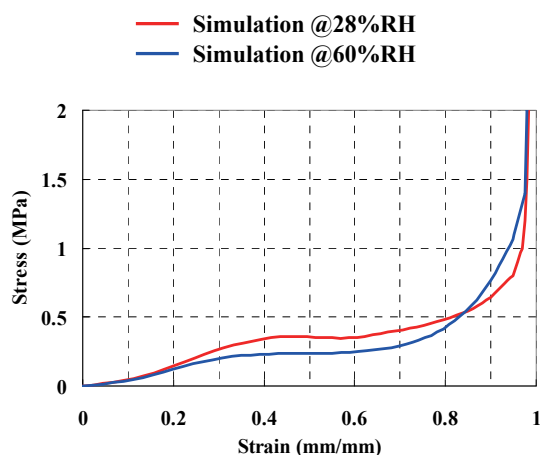


Fig.10 Strain – stress curve of CF45 in low and high humidity conditions

ンパクトの初期接触位置は, 目標位置に対し上方 8 mm であった。そこで, シミュレーションでも, 上方 8 mm に設定した。衝突速度は, 前項で実施した乗用車衝撃試験条件に近似させるため, いずれの湿度条件においても 40.1 km/h とした。解析ソフトは LS-DYNA (ver. 970) を用いた。参考までに, 側面から見た脚部インパクトと車両の接触状況を図 12 に示す。

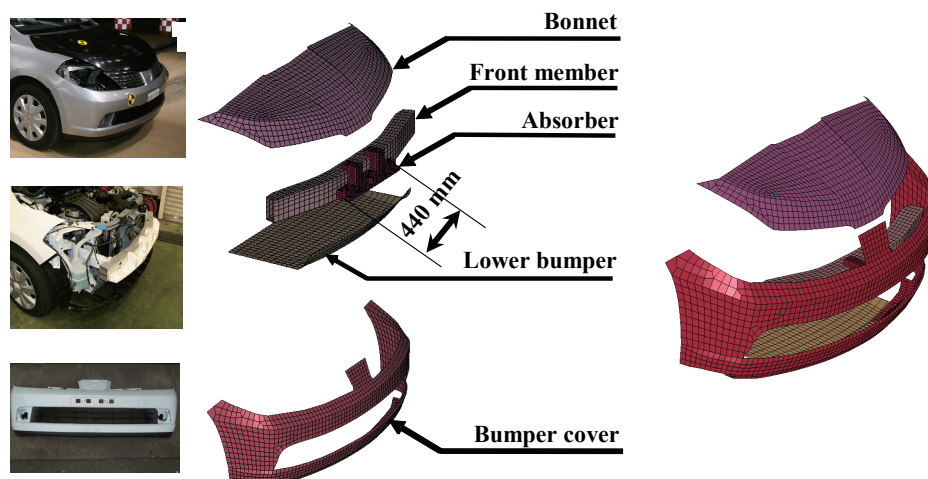


Fig. 11 Parts of car model

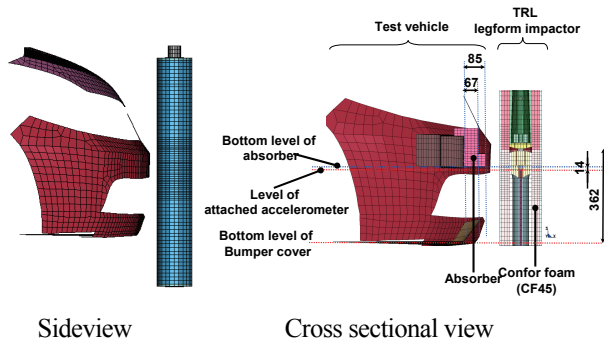


Fig. 12 Contact of car and legform impactor

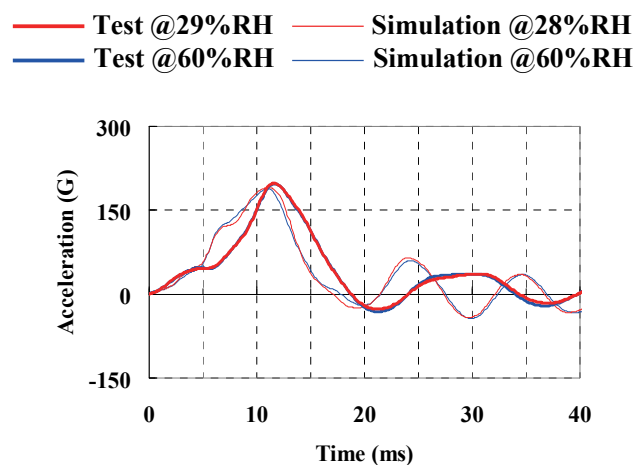
3.2 シミュレーション結果

低湿度(28%RH)および高湿度(60%RH)条件下での乗用車衝撃シミュレーションより得られた最大傷害値を表5に、傷害値の時間履歴データを図13に示す。脚部インパクトより計測される加速度は2つの湿度条件下で一致(190 G @28%RH, 189 G@60%RH)し、膝せん断変位もほぼ一致(3.1 mm@28%RH, 3.2 mm@60%RH)し、膝曲げ角度も一致(15.5 度 @28%RH, 15.5 度 @60%RH)した。脚部インパクトを用いた乗用車衝撃試験では、湿度は各計測項目に影響を及ぼさないことがシミュレーションを実施することにより確認できた。

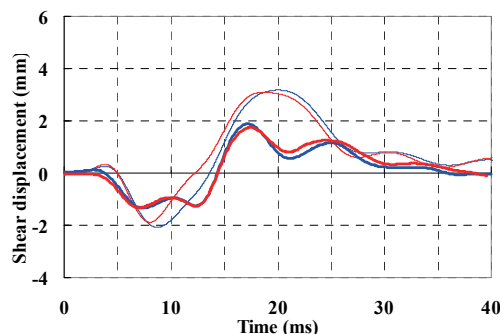
Table 5 Simulation results of legform impactor to bumper impact test

		Low humidity	High humidity
Test	Humidity (%RH)	29	60
	Velocity (km/h)	40.1	40.2
	Acceleration (G)	198 (11.6 ms)	198 (11.6 ms)
	Shear displacement (mm)	1.7 (17.4 ms)	1.9 (17.2 ms)
	Bending angle (degree)	12.6 (24.3 ms)	12.9 (23.9 ms)
Simulation	Humidity (%RH)	28	60
	Velocity (km/h)	40.1	40.1
	Acceleration (G)	190 (11.1 ms)	189 (11.0 ms)
	Shear displacement (mm)	3.1 (18.5 ms)	3.2 (20.1 ms)
	Bending angle (degree)	15.5 (20.1 ms)	15.5 (20.3 ms)

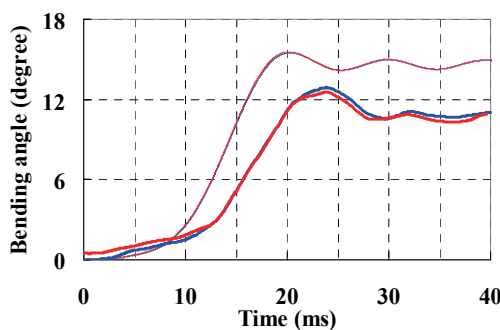
試験とシミュレーションより得られる結果を比較すると、最大加速度はほぼ一致した。膝せん断変位は、シミュレーション結果が試験結果に対し約 1.4 mm 高かった。膝曲げ角度は、シミュレーション結果が試験結果に対し 2.6~2.9 度高かった。参考までに、20 ms



(a) Acceleration

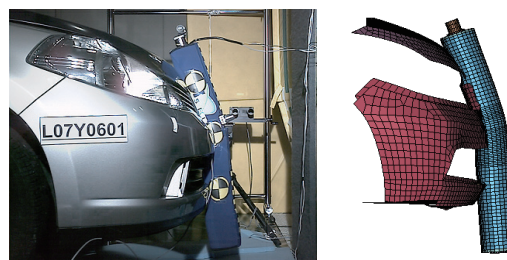


(b) Shear displacement



(c) Bending angle

Fig. 13 Time histories of injury criteria



@20 ms (maximum knee bending angle in test)

Fig. 14 Behavior of TRL legform impactor against vehicle

時の試験およびシミュレーションにおける脚部インパクトの挙動を図14に示す。

Table 6 Calculated K_C , K_V and K_{C+V} in low and high humidity

Humidity	Max. Accel.	Time	CF45			Vehicle			CF45 + Vehicle	
			E_C	x_C	k_C	E_V	x_V	k_V	k_{C+V}	
			(J)	(mm)	(N/mm)	(J)	(mm)	(N/mm)	(N/mm)	
Low	28	190	11.1	112	23	418	335	71	134	101
High	60	189	11.0	104	24	364	325	70	134	98

4. 考察

乗用車衝撃試験および乗用車衝撃シミュレーションより、湿度は傷害値に影響を及ぼさない結果を得た。ここでは、CF45と車両を線形バネ（図15）として簡易式で表すことで、その理由を考察する。CF45のバネ定数を k_C 、車両のバネ定数を k_V 、また、これらを直列に組み合わせた合成バネ定数を k_{C+V} とする。

$$\frac{1}{k_C} + \frac{1}{k_V} = \frac{1}{k_{C+V}} \dots (1)$$

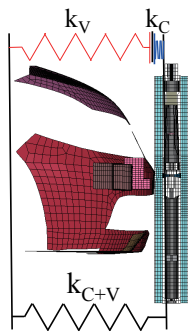


Figure 15 Simplified spring model

CF45の内部エネルギー (E_C) と車両の内部エネルギー (E_V) は次式で表すことができる。

$$E_C = \frac{1}{2} k_C x_C^2 \dots (2)$$

$$E_V = \frac{1}{2} k_V x_V^2 \dots (3)$$

ここで、CF45の変位量は x_C 、車両の変位量は x_V とした。脚部インパクトの加速度が最大となる時、CF45および車両の内部エネルギー、変位量より求められるバネ定数の一覧を表6に示す。車両の変形量は、加速度が最大となる際（11.1 ms @28%RH, 11.0 ms @60%RH）のバンパーカバー先端の移動量とした。CF45の変形量は、加速度が最大となる際にCF45が圧縮された変形量とした。ここでは、低湿度、高湿度の2つの条件によるバネ定数を求めている。

CF45のばね定数 k_C は湿度により異なる（418 N/mm @28%RH, 364 N/mm @60%RH）が、CF45と車両の合成ばね定数 k_{C+V} はほぼ一致した（101 N/mm @28%RH, 98 N/mm @60%RH）。CF45のばね定数 k_C （364～418 N/mm）は、車両のばね定数 k_V （134 N/mm）と比べ非常に高いことが要因として考えられる。このように合成ばね定数はほぼ一致するため、脚部インパクトより計測される加速度は、湿度に依存せずほぼ一定となったものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、乗用車衝撃試験の際の湿度が傷害値に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、実験およびシミュレーションにより2つの湿度条件下（約30%RHおよび約60%RH）にて乗用車衝撃試験を実施した。その結果、湿度は乗用車衝撃試験の際に計測の結果には影響を及ぼさない事が試験およびシミュレーションを実施することにより判明した。GTR歩行者試験法（案）では、湿度を試験時の規定項目に含めているが、今後、試験法（案）を策定する過程において本成果を反映していく必要がある。

参考文献

1. Commission of the European Communities : Pedestrian Protection: Technical Prescriptions Concerning Test Provisions for Pedestrian Protection, DG Enterprise Working Document 2003.
2. Commission of the European Communities : Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the Protection of Pedestrians and Other Vulnerable Road Users Protection, 2007.
3. Y Matsui and M Takabayashi, 'Factor causing scatter in dynamic certification test results for compliance with EEVC WG17 legform impactor standard', *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 9 No.1, pp. 5-14 2004.