

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：33901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500759

研究課題名(和文) ロングパイル人工芝に適用可能な緩衝性能試験器と評価法の開発

研究課題名(英文) Development of shock attenuation testing device and evaluation method for a long pile synthetic turf

研究代表者

湯川 治敏 (YUKAWA, Harutoshi)

愛知大学・地域政策学部・准教授

研究者番号：40278221

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的はロングパイル人工芝に対して適用可能な緩衝性能試験器とその評価法の開発である。スポーツサーフェスは様々な運動様式に対する特性が考慮されるべきであるにも関わらず、従来の緩衝性能試験は単一の落下重錘試験による緩衝性のみによって評価している為、十分な緩衝性能の検討が行われているとは言いがたい。そこで筆者らが開発した緩衝性能試験器をロングパイル人工芝に対しても精度良く計測可能な改良を施し、さらに多段階・多面積衝撃試験法によって非線形Voigtモデルを用いたモデル化を行った。これによりロングパイル人工芝に対して様々な落下衝撃に対する緩衝特性をシミュレーションによって検討する事が可能となった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the shock attenuation testing device and the evaluation method for a long pile synthetic turf. Although many kinds of loading patterns should be evaluated for shock attenuation with sports surfaces, the present test method only treats a specific mass-spring combination as an input for evaluation of shock attenuation. To evaluate the wide range of shock attenuation properties, the model and simulation method should be incorporated. Therefore, the shock attenuation testing device, the multi-intensity multi-area impact test method, visco-elastic model for a long pile synthetic turf and evaluation method were modified from the previous studies. Finally, the stable data could be acquired with modified device and the model parameters could be obtained for calculating various conditions. It indicates the applicability of the modeling and simulation method for evaluating the shock attenuation properties of long pile synthetic turf.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 ・ スポーツ科学

キーワード：ロングパイル人工芝 緩衝性能試験 非線形Voigtモデル 多段階多面積衝撃試験

### 1. 研究開始当初の背景

近年、新世代人工芝として従来よりも長い繊維を持ち、かつより多くの充填材を利用するロングパイル人工芝が天然芝に近い使用感が得られることから非常に注目されており、施工数も多くなっている。これまで陸上競技場などのウレタン系舗装材に対しては国際陸上競技連盟等が衝撃試験と摩擦試験により安全性と公平性の基準を設けているが、同様の試験をロングパイル人工芝に対して実施した場合には必ずしも適正な評価が得られないとの報告がある。これは素材表面と内部構造が明らかに異なるためであり、独自の緩衝性評価法と摩擦試験が確立される必要がある。現在、緩衝性に関しては様々なテストが考案されているがどのテストにおいても緩衝性能の評価は鉛直方向のみであり、また、テストごとにばね-質量系、あるいは質量および落下高の条件は固定されており、本来様々な衝撃条件が発生するスポーツ活動全般がカバーされているわけではない。さらにこれらの衝撃試験で得られたスポーツ舗装材の緩衝特性は人間が実際に運動する際の加速度信号や床反力を計測してみると双方の結果が全く異なる場合があることもいくつか報告されている。従って、ロングパイル人工芝に適合した緩衝性能試験及びその評価方法の開発が期待される。

### 2. 研究の目的

従来の緩衝性能試験では舗装材に直接衝撃を与え、その緩衝性を検討していたが、様々な入力衝撃に対する緩衝性を検討する為には非常にコストが掛かる。そこで筆者らは対象とする舗装材を粘弾性モデルとして同定し、同定された舗装材のモデル上に様々な条件のばね-質量系を落下させることで緩衝性能の評価を行ってきた。ロングパイル人工芝の緩衝性能は従来の試験方法では適正な評価が得られず、またこれまでの研究ではモデルの概念が導入されておらず、旧来の単一な衝撃力に対する緩衝性能を評価しているに過ぎない。人間の動作を考慮に入れた評価を行うにはモデル化が必須であり、かつ鉛直方向だけでなく、水平方向の緩衝性または摩擦(グリップ特性)を同時に検討する必要がある。そこでロングパイル人工芝にも適用可能な衝撃試験装置の開発とモデル化およびシミュレーションによる緩衝性能評価の手法を開発する。

### 3. 研究の方法

筆者らが開発した従来の鉛直方向衝撃試験器および2方向衝撃試験器の改良、ウレタン系スポーツサーフェスに対して適用していた非線形Voigtモデルがロングパイル人工芝に対しての適用可能かどうかの確認、2次元衝撃試験における緩衝性能評価法の検討および2次元緩衝性を検討する為の入力となる2次元ランナーモデルの検討が挙げられる。

### 4. 研究成果

#### (1) 多段階衝撃試験法を用いたロングパイル人工芝の緩衝特性の検討

ロングパイル人工芝の鉛直方向緩衝特性を検討する為筆者らが開発した多段階衝撃試験法による非線形Voigtモデルによってロングパイル人工芝のモデル化を行い、当該モデルの適用可能性について検討を行った。従来、国際陸上競技連盟やDIN等で規定されている緩衝性能試験は特定のばね-質量系を落下させた場合の衝撃力の減衰率を評価の指標としているが、この試験ではある特定のばね-質量系に対する緩衝性能でしかなく、さまざまな条件が考えられる実際の運動状況を十分に考慮しているとは言えない。さらに、この試験器によってロングパイル人工芝の測定を行うと、測定された衝撃波形が多峰性となり、サーフェス自体の特性が必ずしも評価されていないのではないかと指摘もある。そこで筆者らがこれまで提案してきた多段階衝撃試験法と指数関数型非線形Voigtモデルを用いてロングパイル人工芝の緩衝性能に関するモデル化を行い、さらに、そのモデルを用いた緩衝性能についての検討を行った。その結果、陸上競技場のトラック等で使用されているウレタン系サーフェスと比較するとモデルの同定精度は低いものの、モデルのパラメータ同定は可能であった。図1は同定されたパラメータを用いたばね-質量系を落下させた場合のシミュレーション結果である。図中、InputForceは入力と

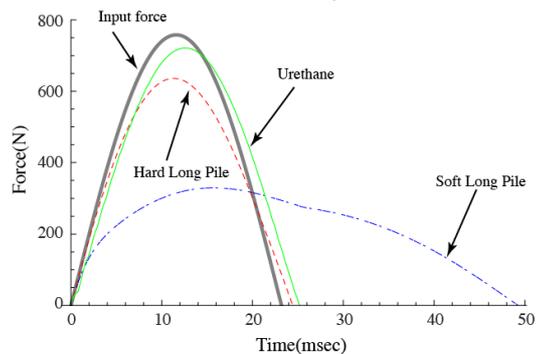


図1 同一のばね-質量モデルを堅いロングパイル人工芝、柔らかいロングパイル人工芝およびウレタン系サーフェスに落下させた場合のシミュレーション結果

なるばね-質量系をコンクリート等の緩衝性の無い床面に落下させた場合の衝撃力、Urethaneは陸上競技場のトラック等で利用されており、国際規格に適合したサーフェスにばね-質量系を落下させた場合の衝撃力のシミュレーション波形、HardおよびSoftLongPileは珪砂とゴムチップの配合を変えることで作製した堅軟2種類のロングパイル人工芝でのシミュレーション波形である。図から明らかなようにウレタン系サーフェスに比べ堅いロングパイル人工芝の方が緩衝性が高く、柔らかい人工芝では更に高い緩衝性を示している。これらはいずれも予想された結果であり、モデルの適用可能性を示している。しかし、ウレタン系サーフェスと比較するとロングパイル人工芝での同定精

度は高くないため同定精度の向上が課題である。

(2)鉛直方向衝撃試験器の改良と多段階・多面積衝撃試験によるロングパイル人工芝のモデル化とその同定精度の向上について

上記(1)の結果、鉛直方向のみの衝撃試験をロングパイル人工芝に対して実施し、ウレタン系サーフェスと同様の同定精度が得られるかどうかを確認したところ、これまで用いていたテストフットでは同定精度が低くなる事が判明した。これはウレタン系スポーツサーフェスの場合はサーフェス表面が一定形状かつ変形を生じにくく、テストフットに対して衝撃を与える前後でもテストフットの挙動は安定しているのに対し、ロングパイル人工芝では充填剤である珪砂およびゴムチップは一定形状ではなく、荷重に伴ってサーフェス全体としては塑性変形を生じること、荷重点がテストフット中央からずれることにより不均一な沈降が生じてしまうことが理由として挙げられる。そこで図2に示すように、ロングパイル人工芝のような不均衡な表面に置いて安定した挙動が得られるようロッド付きテストフットを開発し、テストフットが安定した状態で上下動可能となるよう改良した。

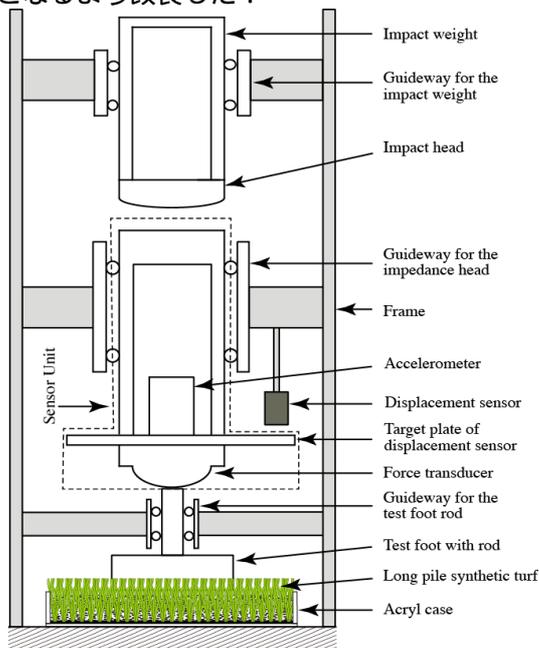


図2 ロッド付きテストフットを利用した改良型衝撃試験器

また、ウレタン系スポーツサーフェスで用いたテストフットよりも大きなテストフットを新たに製作し、さらに異なるテストフットによって得られた複数の多段階衝撃試験を一括して処理することによりテストフットの衝撃面積もモデルパラメータとして扱える新たなモデルを提案し、これによって鉛直方向については同定精度の向上が見られた。図3は多段階強度・面積衝撃試験によるパラメータ同定の結果を用いて、3種類のばね質量系を様々な衝撃面積および衝突速度に

の条件下におけるロングパイル人工芝の緩衝性能の指標となるFR(Force Reduction)値を示している。この結果から、本研究におけるパラメータ同定及びシミュレーションによって様々な運動様式を模擬した入力波形に対する緩衝性能を検討可能である事が示唆された。

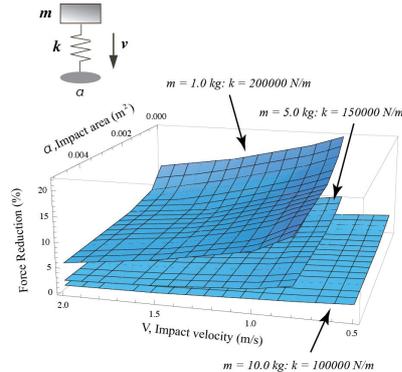


図3 3種類のばね質量系を異なる衝撃面積、衝突速度でロングパイル人工芝モデルに落下させた場合のFR(Force Reduction)値の変化

(3)2 方向衝撃試験器の改良と緩衝性能評価法の開発

現在、スポーツサーフェスの緩衝性を規定する様々なテストが考案され、各競技団体が使用するプレーイング・サーフェスにおいて特定の試験における基準値の範囲内に収めるよう定められている。例えばI.A.A.F.(国際陸上競技連盟)では、鉛直方向に関してはある特定の測定器による緩衝性能試験および最大変位試験が規定され、水平方向の摩擦係数のテストとしてはPortable Skid Resistance TestやSkidding Resistance Test等が規定されている。これらの試験は再現性が高く、また測定された数値による評価も行い易いことが利点である。しかし、実際のスポーツ活動において鉛直方向のみの衝撃は非常に稀であり、水平方向の衝撃に対してもサーフェスの変形による緩衝や滑りによる緩衝も考えられるにもかかわらず、現存の試験では水平方向に関してはある特定条件の動摩擦係数を測定するのみでありサーフェス自体の緩衝性や滑りによる緩衝性を総合的に判断されていない。つまり、現状のPortable Skid Resistance Testではサーフェス表面に対してある一定の速度で接触するが荷重はほとんど無く、逆にSkidding Resistance Testでは一般的な動摩擦係数であるため荷重はかかっているにもかかわらず速度が生じていない状況での試験となる。筆者らの研究では後者の様な一般的な動摩擦係数の結果と、ある程度速度があり、かつ荷重もかかるような衝撃的な試験での摩擦係数を比較した場合、滑り始めの角度に大きな違いがあることが判明した。また、滑りによる緩衝性は再現性が低くなりがちであり、定量的に捉えにくい。そこで本研究ではスポーツサーフェス等の緩衝材における2次元緩衝性能を検討するために、既に開発されている2方向衝撃試験器を利用し、センサ部下部とサ

ーフェスの間を緩衝性のない両面テープにて固定することにより、滑りの影響を無くした上で2方向衝撃の緩衝性の検討を行った。また、従来の衝撃試験器における落下重錘の質量を大きくすることにより、より広い範囲の初期衝撃角度、衝撃力に対する緩衝性能について検討した。図4は既存の2方向衝撃試験器の耐荷重性を増し、更に、重錘落下高および平行四辺形リンクの初期角度が正確に測定可能となるセンサを装着した。この装置の改良により重錘落下高および初期角度を正確に測定することが可能となり、サーフェスの有無による様々な条件下での鉛直・水平衝撃力を測定可能となった。さらに測定されたデータを用いて鉛直・水平方向の緩衝性能を、同一落下高、初期角度における緩衝材の有無による最大衝撃力の減少率（Force Reduction Value・FR値）によって示し、緩衝材の鉛直・水平方向における緩衝性能評価の指標を開発した。なお、この研究ではサーフェスとしてはウレタン系サーフェスを用いているがロングパイル人工芝においても同様の緩衝特性の評価が可能であると考えられる。

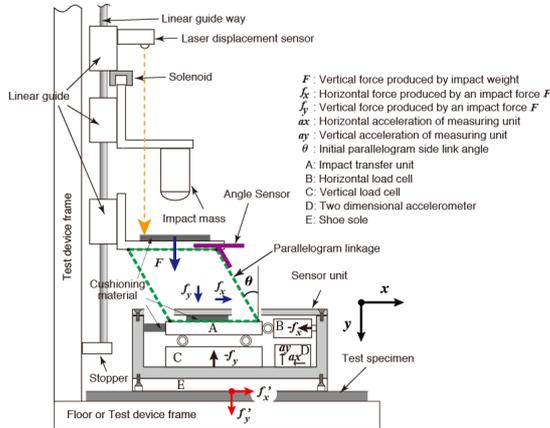


図4 センサ部分を強化し、落下高、初期角度測定装置を付加した改良型2方向衝撃試験器

#### (4)2次元ランナーモデルによる着地衝撃波形の生成

現在のスポーツサーフェスの規格のうち、緩衝性は鉛直方向のみが検討されている。しかしながら、様々なスポーツ・運動中で鉛直方向のみの運動は非常に稀であり、そのほとんどは水平方向の運動も含まれた2次元の運動である。そこで、筆者らは鉛直・水平2方向衝撃試験器を製作し2次元における衝撃力の測定と緩衝性の検討を行った。しかし、2方向衝撃試験によってサーフェスに加えられた衝撃は人の動作とは異なる特質であるため、将来的には水平方向も含めたサーフェス、ランナーのモデル化が必要であろう。本研究は2方向緩衝性能の検討をさらに進めるための基礎的研究として、ランニングにおける2次元（進行方向および鉛直方向）着地衝撃を生成できるモデルを提案した。図5に提案した2次元ランナーモデルを示す。典型的な踵接地の定常走行中における鉛直方向着

地衝撃の特徴は二峰性の波形であり、二峰性の着地衝撃を生成するためには少なくとも2つの質量が時間差を持って地面に衝突する必要がある。また、進行方向着地衝撃は着地期前半における進行方向逆向きへ力を発揮する減速期と後半の進行方向への推進力となる加速期に特徴がある。筆者らの提案した1次元ランナーモデルでは3自由度の粘弾性モデルを用いて鉛直方向着地衝撃のパラメータ同定を行い、高い同定精度を得ている。加えて、2次元着地衝撃を再現するためには鉛直方向と同時にランニング進行方向への力の発揮が必要である。この為、本研究では筆者らの3自由度粘弾性モデルを斜め衝突させることにより着地衝撃の進行方向成分を同時に生成可能なモデルを検討した。このモデルを用いて実際のランニングにおける2次元着地衝撃を再現可能なモデルパラメータを非線形計画法によって探索を行った。その結果、走速度 5.16 m/s の定常走行における実験から得られた着地衝撃波形とパラメー

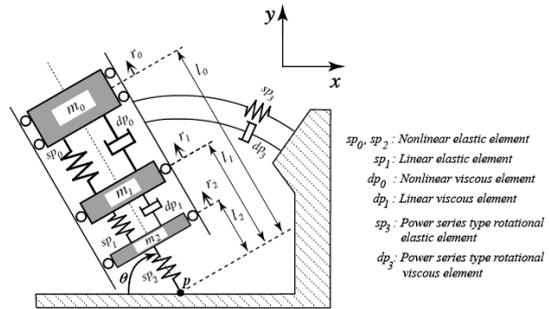


図5 2次元ランナーモデル

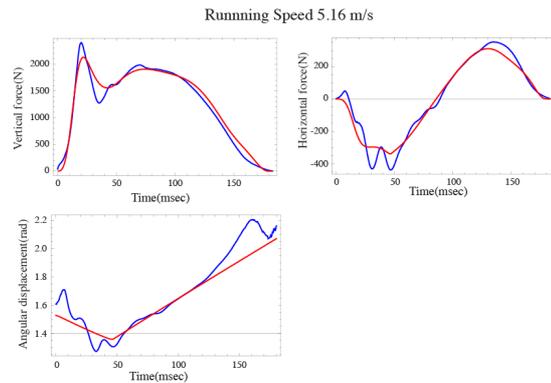


図6 2次元ランナーモデルによって推定された鉛直方向衝撃力(左上)、水平方向衝撃力(右上)およびモデルの角度(左下)。いずれも青線は実験データ、赤線は推定値を示す。

タ同定後のシミュレーションによって得られた推定の衝撃波形および着地点周りのモデルの角度変化を図6に示す。図から鉛直方向の二峰性波形が再現されていること、水平方向の細かな振動は再現できていないが全体的な波形の特徴は再現されていること、モデルの角度についても実験値とほぼ等しくなることから提案したモデルによって着地衝撃を再現可能であることが示唆された。但し、モデルの特性上、モデル着地時に実際のランニングとは逆方向に速度を与える必要があるが、2方向モデルへの入力としては利

用可能であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### [雑誌論文](計 10 件)

Harutoshi Yukawa, Yuta Fujimoto, Shozo Kawamura, Kazutoshi Kobayashi, Shock Attenuation Properties of Long Pile Synthetic Turf by Using Multi-intensity Multi-area Impact Test, 査読有, Procedia Engineering Volume60, 2013, 281-287.

Harutoshi Yukawa, Kazutoshi Kobayashi, Shozo Kawamura, Identification of Viscoelastic Model for Long Pile Synthetic Turf by using Multi-intensity Impact Test, 査読有, Procedia Engineering Volume 34, 2012, 849-854.

Harutoshi Yukawa, Ryo Aduma, Shozo Kawamura, Kazutoshi Kobayashi, Shock attenuation properties of sports surfaces with two dimensional impact test, 査読有, Procedia Engineering Volume 34, 2012, 855-860.

Harutoshi Yukawa, Akinori Tokizawa, Shozo Kawamura, Generating two dimensional ground reaction forces with a viscoelastic runner model, 査読有, Procedia Engineering Volume13, 2011, 161-167.

Harutoshi Yukawa, Tatsuya Murai, Hiroto Nishimura, Shozo Kawamura, Kazutoshi Kobayashi, Parameter identification of nonlinear viscoelastic model with impact area parameter for sport surface by using multi-intensity multi-area impact test, 査読有, Procedia Engineering Volume13, 2011, 395-401.

### [学会発表](計 10 件)

湯川 治敏, 植田 剛志, 河村 庄造, 多段階強度 2 方向衝撃試験によるスポーツサーフェスの緩衝特性, 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2013, 2013 年 11 月 3 日, 工学院大学.

湯川 治敏, 藤本 雄太, 河村 庄造, 衝撃試験法によるロングパイル人工芝充填部の緩衝特性, 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2013, 2013 年 11 月 1 日, 工学院大学.

湯川 治敏, 藤本 雄太, 河村 庄造, 小林 一敏, 多段階強度・面積衝撃試験を用いたロングパイル人工芝の非線形粘弾性モデルのパラメータ同定, 日本機械

学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2012, 2012 年 11 月 15 日, 愛知大学.

湯川 治敏, 安妻 亮, 河村 庄造, 感本 広文, 小林 一敏, スポーツサーフェスにおける鉛直方向, 水平方向緩衝性の比較, 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2012, 2012 年 11 月 15 日, 愛知大学.

湯川 治敏, 小林 一敏, 河村 庄造, 多段階衝撃試験によるロングパイル人工芝の緩衝特性, 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス 2011, 2011 年 10 月 31 日, 京都大学.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

湯川 治敏 (YUKAWA, Harutoshi)

愛知大学・地域政策学部・准教授

研究者番号: 40278221