

# 歩道舗装材の弾性測定法に関する研究 —生体振動解析法について—

## THE STUDY OF TESTING AND MEASUREMENT METHOD FOR ELASTICITY ON PAVEMENT MATERIALS —A METHOD OF ANALYSIS TO IMPACT WAVES ON HUMAN BODY—

牧 恒雄\*

By Tsuneo MAKI

The analytical method of elasticity about paving materials on the pavements has many features. ① Analytical data are used the impact waves on human body. ② The impact force on legs is valued the total impact acceleration velocities of knee and ankle. ③ The frequency of impact wave has the correlation to results of function test about elasticity on a pavement. ④ The deformation of materials is shown the integral value.

*Keywords* : slasticity method, paving materials, impact wave of human body

### 1. 緒 言

最近、駅前の広場・商店街など人が多く集まる場所や、歩道、ジョギング道・公園の園地などの舗装は、アスコン舗装にかわって色彩豊かな舗装材が使用される事例が多くなってきた。歩道の色彩・材質やデザインは、街や広場などの景観に大きな影響を及ぼすことから、舗装材の選定時にさまざまな工夫が行われているが、独創的なデザインや特長ある素材を求めあまり、歩行者の安全性や歩行時の快適性などの面で、好ましくないとと思われる舗装もある。快適と感じる舗装は、すべりや透水性などの表面性状、弾性、平坦度などが十分配慮された舗装といえるが、一般の歩道は不特定多数の人が利用するので、通行する人や使用している靴の種類などから、万人に快適な舗装材を選択することは困難である。しかし、一方では余暇の増大や運動用の施設が不足していることから、歩道で運動する人が多くなり、運動のしすぎや舗装材が硬すぎるのが原因で膝や腰を痛める人が多いとの報告<sup>1)</sup>をみると、舗装と人体が受ける衝撃の関係を調べ、適切な弾性をもつ歩道舗装材の研究開発を行う必要性を強く感じる。

また、老人化社会となる日本の将来を考えると、老人の健康を維持する方法として、老人の健脚化をはかることが第一に挙げられる。そのとき、歩道舗装材は、単に見栄えが良く、歩きやすく安全であるだけでなく、メンタルな面あるいはセンシユアルな面からも十分研究された材料であることが必要で、今後、新しい歩道舗装材の開発は、ますます重要性をおびてくると考える。したがって、新しい歩道舗装材の開発と、これらに対応した試験方法の確立が重要となってくる。

舗装材の弾性と人体が受ける衝撃についての研究は、従来からスポーツの分野や建築の分野で行われ、運動時に受ける身体の衝撃の研究<sup>1),2)</sup>や安全性からみた体育館床のかたさの研究<sup>3)</sup>などが行われてきた。また最近ではスポーツ施設以外に都市公園の舗装材の研究<sup>4)</sup>も行われている。これらの研究では、舗装材の動的変形量や反発弾性などの物理的性質や、人体が受けた衝撃量を衝撃加速度で定量化するなど感覚的な尺度との整合が試みられてはいるが、測定値と感覚との間に差があることが多く、新しい測定法の確立が望まれている。本報告は、従来の物理的測定法にかわり、人体が舗装から受ける衝撃を人体から得られる振動データを用いて解析し、この結果から、舗装材の弾性について判定する手法を研究・開発したので報告する。

\* 正会員 東京農業大学講師 農学部農業工学科  
(〒156 世田谷区桜丘1-1-1)

## 2. 現在行われている試験方法

人体が歩行・走行時に感じる舗装材の弾性は、表層や基盤材料の材質、表層材の厚さ、歩行する人の年齢、履いている靴の種類、あるいは歩き方など数多くの因子が影響する。しかし、現在行われている舗装材の弾性を調べる方法の中に、これらの因子を試験条件に考慮した方法はない。現在行われている試験方法として、次の方法が挙げられる。①ボールを一定の高さから落下させ、その跳ね返る高さから舗装材の弾性を測定する方法。よく行われるのはゴルフボールとスチールボールを用い、その跳ね返り高さから衝撃吸収性と反発弾性を求めようとするGB-SB試験<sup>5)~7)</sup>や、外国では合成樹脂系の舗装にクリケットボール<sup>8)</sup>やバスケットボール<sup>9)</sup>を用いた弾性判定試験が行われている。同様に木質床の衝撃特性判定にも各種ボールを用いて測定した報告<sup>10)</sup>がある。②機械を用いた測定方法。重錘とゴムばねからなるかたさ測定装置を用いて、舗装材のたわみ性から判定する方法<sup>11)</sup>や、重錘に加速度計を設置し落下時の衝撃加速度から判定する方法<sup>7),12)</sup>、ばねと重錘を組み合わせた試験機「人工選手シュトゥツガルト」を用いて舗装材の弾性を測定する方法<sup>13)</sup>などがある。③人体が受ける衝撃を直接測定する方法。足のかかとや足首・膝、あるいは使用する靴に加速度計をつけ、走行時の衝撃加速度値から判定する方法<sup>1)</sup>がある。④官能検査法。多くの被験者を実際に歩行・走行させ、アンケート調査結果で判定しようとする方法<sup>14)</sup>などがある。①や②の物理的試験方法は、人間が受ける衝撃や人間が感じる弾性を測定するのではなく、あくまで材料を物理的に検討する方法で、測定したデータと人間が受けた感覚との間に大きな差が生じる。また、③や④の人体が受ける衝撃を直接測定する方法や官能検査法では、個体差やデータ数が結果に影響し、結論を得るまでに多くの時間と経費を必要とするなどの問題点がある。

## 3. 研究の目的

舗装材の弾性を測定する場合、単に舗装材の物理的な衝撃特性だけを用いて判定すると、実際に人が受けた衝撃とは異なった評価が行われる可能性があることから、人が受けた衝撃を忠実に測定するには、人体から測定した衝撃データを解析することが一番好ましい。人体が受ける衝撃は、測定する人体の身体的条件や運動経験などが衝撃の感覚に影響することから、これらをすべて考慮すると測定条件が複雑になりとうてい試験方法の開発は難しくなる。しかも、人が受ける衝撃から舗装材の弾性を判定する場合、舗装材や靴の緩衝機能以外に人体自体に緩衝作用があり、ますます試験条件は複雑になる。し

かし、クレイ舗装がアスコン舗装よりも硬いという人はいないはずで、受けた衝撃量の大小は異なるにしてもその判定は誰が行っても変わらないはずである。また、舗装材の弾性を検討する場合、試験条件の中で測定値に大きな影響を与える要因として、靴の種類と人体がもつ緩衝作用を無視することはできない。そこで、これらの因子を含んだ試験方法として、人体が受ける衝撃を人体の緩衝が少ない場所で直接測定し、これを解析し判定する方法が一番人体が受けた衝撃に対して忠実であると考えた。そこで、舗装のもつ弾性を測定する方法として、舗装から人体が受ける衝撃をなるべく人体の緩衝が少ないところで測定し、これを靴を通して人体が受ける衝撃波形として解析を行い、舗装から受ける衝撃量、舗装に足が当たったときの硬さ、舗装と靴の弾性変形の程度を求め、これら3つの解析結果から舗装の弾性を判定するという、従来にない新しい解析法の開発を試みた。本報告は、これらの新しい手法におけるデータ測定法や解析法の確立と、この手法を用いた各種舗装材の弾性比較を行うことを目的としている。

## 4. 研究の方法

一般に衝撃を受ける物体の振動は次のような状況で示される。鉄のブロックを鉄のハンマーでたたくと、ハンマーは高い周波数で振動し減衰時間の短い波形を示す。しかし、このブロックをプラスチックのハンマーでたたくと、鉄のハンマーに比べ低い周波数の振動で減衰時間の長い波形が観測される。したがって、人が硬い舗装の上に靴底の硬い靴で飛び降りると、足は高い周波数で減衰時間の短い衝撃を受けるが、舗装が硬くても靴底が衝撃を吸収しやすい材料であると、衝撃は靴底に一部吸収され、足は周波数が低く時間が長い振動を受ける。また、舗装も靴底も衝撃を吸収しやすい材質のとき、衝撃は舗装材にも靴底にも吸収されるが、このとき、舗装材も靴底も圧縮変形した後に跳ね返ることになるので、結果として衝撃吸収の効果が多少減少する。このように、靴を通して舗装の弾性を知るには、人体が受ける生体衝撃波形を直接解析することで求められると考えた。生体衝撃波形を求める場合、なるべく人体の緩衝作用を受けずに衝撃データが得られる場所を選択する必要がある。そこで、本研究では衝撃の測定場所として、足のなかでも皮膚の厚い場所や、筋肉の上などのように緩衝作用が大きい場所での測定を避け、加速度計の取り付け方法やデータの再現性を考慮して、下肢で比較的緩衝作用の少ないくるぶし（腓骨下端の外果で以降足首とよぶ）からデータを得ることにした。しかし、人体が受けた衝撃は足首だけでなく膝・腰などでも緩衝することから、衝撃量を求める場合、足首のくるぶしで測定した加速度の最大値

を舗装から受けた最大衝撃加速度値とするには無理がある。そこで、足首以外に膝関節（大腿骨下端の外側顆で以降膝とよぶ）でも衝撃加速度値を求めることにした。

衝撃波形は次のような考え方で解析した。①舗装から受ける衝撃は、身長・体重差や落下時の足首・膝の使い方などが原因でデータに個人差が出ると考えられる。したがって人体が受けた衝撃量を表わす場合、衝撃加速度の測定場所が関係することから、今回は、足首と膝で測定した衝撃加速度の和を下肢が受けた衝撃量とした。②人体が舗装から受ける衝撃の感覚は、足が舗装に着地したときの感覚と関係があると思われる。そこで、足が舗装に当たったときの振動特性を知るために、振動波形を周波数分析しメジアン周波数値を求めた。③弾性が大きい舗装材は衝撃を受けると大きく変形し、足が舗装に接触している時間は長くなるが、硬い舗装に比べると衝撃の振幅は小さい。そこで、人体落下時の舗装の変形応答特性を知るために、衝撃波形の振幅積分値を求めた。

これらの衝撃波形の解析システムは図-1のフローチャートに示す。

### 5. 測定方法

被験者の年齢、性別、運動経験や身長、体重等の個体差、加速度計の取り付け方法などが測定データに影響してくると考えられるので、これらを検討するために、表-1に示す年齢、性別、運動経験の異なる男女5人を被験者として選び、表-2に示す3種類の靴と裸足で舗装から人体が受ける衝撃の測定を行った。人体に衝撃を与える方法として、台の上からの飛び降りる方法で予備試験を行ったが、飛び降り方に個人差が大きかったことから、本試験では歩行・走行時の状態とは異なるが衝撃量の定量化を考え、ぶら下がり健康機具を用い垂直に落下する方法で測定した。飛び降り高さは、小林らの研究<sup>2)</sup>は跳躍時の落下する垂直方向の速度は約3m/sといわれているので、本実験では歩行も考慮して接地速度が2m/s程度になるように、地面から靴のかかとまでの高さ

表-1 被験者の条件

性別	年齢	身長	体重	運動経験
男子	23	165	65	中学でテニス
男子	22	175	65	サッカー他
男子	37	174	72	最近 無し
女子	26	172	57	バドミントン
女子	25	165	50	テニス

表-2 実験に使用した靴の種類

男子	ジョギングシューズ	運動靴	革靴
女子	ジョギングシューズ	運動靴	スニーカー

を20cmに設定して実施した。

測定に使用した加速度計は、圧電方式の1軸小型加速度計（径9.5mm、厚さ5.3mm、応答周波数0~1000Hz、測定加速度0~5000G）を用いた。なお、加速度計の取り付け方向は、直立姿勢時の人体に対し垂直方向に固定したが、加速度計がくるぶしに強く当たるため、脱脂綿等をはさんだ場合の影響について予備試験を行い検討した。その結果、わずかな脱脂綿が入っても衝撃波形は緩衝され、周波数がどの舗装でも似たような値を示すことがわかった。したがって加速度計の取り付けは、くるぶしに直接固定できるようにテーピングテープで固定する方法を用いた。測定を行った舗装は、本学内の陸上競技場のフィールド、アスコンベースで11mmの施工厚さをもつひじき状ゴムチップウレタン舗装、一般のアスコン舗装である。測定は各10回の飛び降りを行い、データはビデオテープにいったん記録し、再生時に5kHzでA/D変換後、デジタル化して解析を行った。

衝撃波形は過渡現象であるので、人体は1回の落下に対し何回も小さな衝撃を受けながら徐々に減衰していくが、この波形を全部解析すると、個体差の影響が大きくなることから、振動波形の中から最初の着地波形を取り出し、これを解析することとした。

生体波形は、図-2に示す衝撃振動時間を測定対象波形として、Hanning window<sup>15)</sup>で前処理を行った。まず、

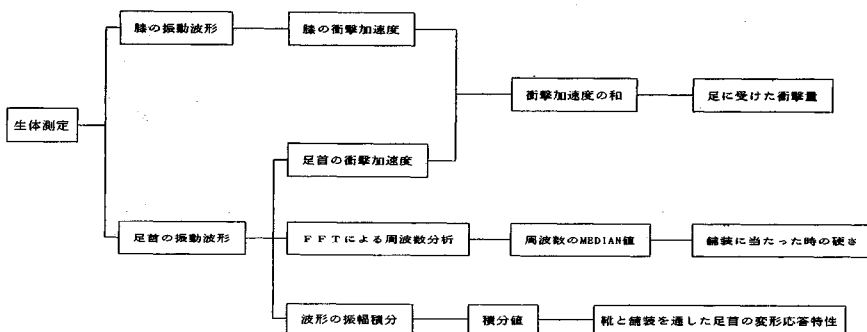


図-1 解析システムのフローチャート

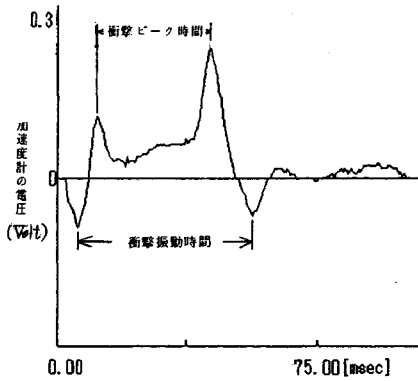


図-2 振動の測定条件

最初に衝撃波形の最大値を読み取り、衝撃加速度値を計算した。

次に、この区間に対してサンプリング間隔  $\Delta t$  を省略した、離散フーリエ変換 (DFT) を行った。このとき、演算上の入力データが  $N=2^N$  ではないときは、データに0をつけた。ここに用いた DFT アルゴリズムは基数2の時間間引き高速フーリエ変換 (FFT) である<sup>16)</sup>。これを用いて、パワースペクトルを求める<sup>17)</sup>。

$$P_k = \frac{2}{N \cdot \Delta t} |(\Delta t \cdot R_k)^2 + (\Delta t \cdot I_k)^2| \quad (k=0, 1, \dots, N/2-1) \dots\dots\dots (1)$$

- $\Delta t$  : サンプリング間隔
- $R_k$  :  $X(n)$  実数部
- $I_k$  :  $X(n)$  虚数部

さらに、パワースペクトルの周波数は、

$$f_k = \frac{k}{N \cdot \Delta t} \quad (k=0, 1, \dots, N/2-1) \dots\dots\dots (2)$$

- $N$  : データ数
- $\Delta t$  : サンプリング間隔

このとき、パワースペクトルから求めた周波数の分布は、平均値を求めると、分布の裾が伸びている方向にひきずられる傾向にあることから、メジアン周波数をその周波数の代表値として求めた<sup>18)</sup>。

$$\int_0^{f_{med}} P_{xx}(f) df = \int_{f_{med}}^{\infty} P_{xx}(f) df \dots\dots\dots (3)$$

$f_{med}$  : メジアン周波数

$P_{xx}(f)$  : パワースペクトル

次に、波形の振幅積分値は<sup>19)</sup>

$$I = \int_0^{N-1} |X(i)| di \dots\dots\dots (4)$$

で求めた。測定結果の一例を図-3 に示す。

なお、被験者には、測定時に官能判定試験を行ってもらったが、官能判定試験は、従来から行われている5段階評価法では舗装から受ける弾性を評価しにくいことから、今回は「硬い1、やや硬い2、普通3、やや軟らかい4、軟らかい5」を目安とし、これらの中間的な感覚は小数で表わす方法で、飛び降りたときに受けた舗装の弾性を評価した。

### 6. 結果および考察

一般に生体データを解析する場合、被験者の年齢、身長、体重、運動経験等あるいは足の着地方法などが影響し、測定データに個人差が出ると予想したが、予想した

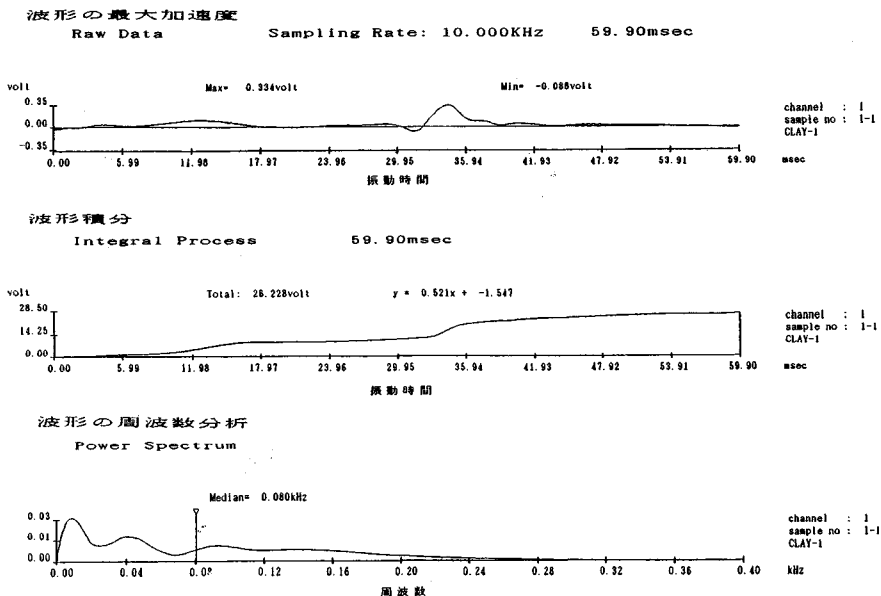


図-3 クレイ舗装上で裸足の振動解析結果

とおりに測定値に個人差が生じた。しかし、測定結果を解析してみると、靴の種類による衝撃量の差や舗装材の弾性の差が明確に認められ、図—7に示すように被験者が異なってもそれぞれの解析結果が同一の傾向を示したことから、各種舗装材を比較する場合、同一人物による比較試験で舗装材の弾性の傾向は判定できると考えた。

(1) 生体衝撃波形

生体の衝撃波形を得るために、飛び降りを各舗装に対し10回ずつ行ったが、図—4にみられるように、波形は落下回数ごとにわずかながら変化している。この波形の違いをより明らかにするために、衝撃ピーク時間に対する靴の種類と飛び降り回数の対比例を表—3に示す。なお図—2に示すように、衝撃ピーク時間はつま先の着地からかかとに着地までの時間である。

測定結果をみると、表—3に示すように靴の種類によりその傾向が異なった。裸足では1回目に比べると5回目、10回目の衝撃ピーク時間が長くなる。これは、飛ぶ回数が増えるにつれて衝撃に慣れた飛び方をしてしているためと思われる。一方、ジョギングシューズでは回数を重ねるごとに衝撃ピーク時間が短くなっていった。これは、ジョギングシューズの衝撃吸収性が大きく、飛ぶ回数が増えるにつれて衝撃に慣れて、靴の衝撃吸収性を利用した飛び降り方に変化してきたのではないかと考えられる。

次に、これらの測定結果を考慮し、各舗装材について5回目前後の衝撃波形について、衝撃振動時間と衝撃ピーク時間の検討を行った。その結果、表—4、5に示すように、クレイ舗装では靴の種類によって衝撃振動時間が異なるが、ゴムチップ舗装では、舗装材自体の弾性変形量が大きいことから、靴による衝撃振動時間の差はほ

とんど認められず、アスコン舗装では、運動靴やジョギングシューズなどの靴底が軟らかい靴が長い衝撃振動時間を示した。また、衝撃ピーク時間をみると、だいたいどの靴を用いても、アスコン舗装が短い衝撃ピーク時間を示し、アスコン舗装が弾性の小さい舗装材であることを示している。また靴の種類で比較してみると、靴底が硬い革靴は振動ピーク時間が一番短く、受ける衝撃が大きい。また、アスコン舗装から受ける衝撃波形は振幅が大きく変化していたが、ゴムチップ舗装やクレイ舗装では、振幅の変化が小さい波形であった。また裸足で飛び降りた場合、どの舗装材でもつま先と、かかと着地の衝

表—3 アスコン舗装の飛び降り回数別の衝撃ピーク時間の変化 (msec)

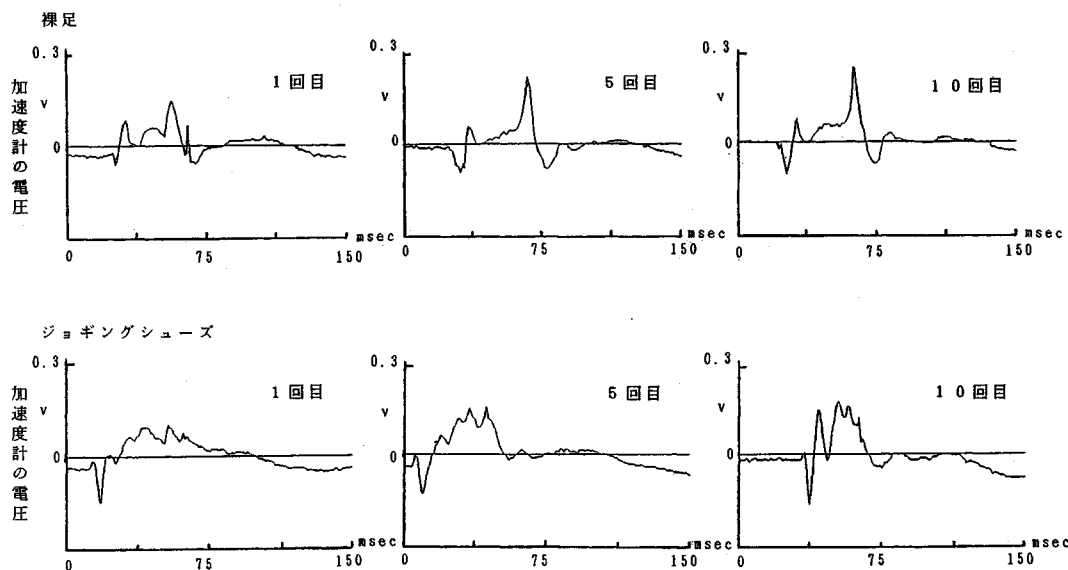
靴の種類	1回目	5回目	10回目
裸足	24.3	30.3	29.9
革靴	17.0	25.2	28.2
運動靴	23.3	19.2	30.1
ジョギング	30.0	24.0	20.4

表—4 衝撃振動時間 (msec)

舗装名	裸足	革靴	運動靴	ジョギング
クレイ	57.7	50.2	53.8	61.2
ゴムチップ	50.6	50.4	50.1	51.0
アスコン	41.0	37.0	42.8	42.7

表—5 衝撃ピーク時間 (msec)

舗装名	裸足	革靴	運動靴	ジョギング
クレイ	39.9	32.8	35.0	42.0
ゴムチップ	33.2	22.2	31.5	30.0
アスコン	27.2	21.0	24.5	25.1



図—4 アスコン舗装における測定回数別の振動波形

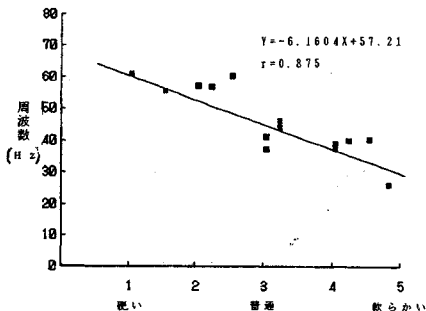
撃ピークが明確に認められたが、ジョギングシューズは、靴のもつ衝撃吸収性が大きく靴底が1枚の厚い弾性板になっており、衝撃ピークが明確に出にくい波形であった。以上のことから、本測定法で用いた衝撃波形測定位置は、人体が受けた衝撃をうまく拾える場所であることがわかる。

(2) 衝撃加速度値について

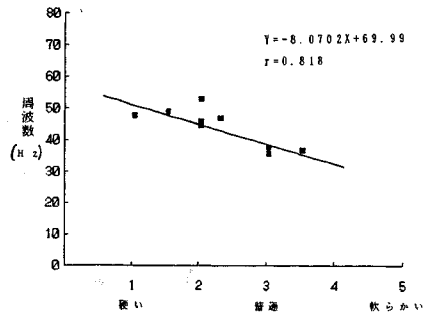
足に受ける衝撃を衝撃加速度値で比較する場合、衝撃加速度値は、飛び降りる人が事前にもつ舗装の硬さのイメージや、舗装への飛び降り方法、あるいは飛び降り回数などが影響する可能性が強く、特に、足首の衝撃加速度値だけでは、膝の受ける衝撃や緩衝の程度が測れず、足全体に受ける衝撃を判断できないと考え、足首に加えて膝の衝撃波形も併せて検討した。その結果、図一7に示すように膝の衝撃加速度値に個人差が生じ、舗装の種類や靴によって異なったことから、足全体に受けた衝撃を判断する場合、足首の衝撃加速度値だけで比較するより、足首と膝の衝撃加速度値を加え併せた値を用いて検討する方が、より実際の感覚に近いと考えられる。

(3) メジアン周波数値と官能検査結果について

人体が舗装の硬さを判定する場合、足が舗装に着地したときの感覚を人体が受けた衝撃として評価する可能性が高いので、着地時の足首の振動特性と関係があると考え、衝撃波形の周波数の中央値であるメジアン周波数値を求めこれを官能試験結果と比較検討した。その結果、裸足で飛び降りた場合、足裏の筋肉などで緩衝する度に個人差が生じるのか、官能検査結果とメジアン周波数値は  $r=0.350$  と低い相関係数を示した。しかし、靴を履いた場合では図一5, 6に示すように、男子で  $r=0.875^{**}$  (\*\*印は有意水準1%以上を示す)、靴の種類が男子と異なる女子も  $r=0.818^{**}$  と高い相関係数を示し、靴を履いて飛び降りたときの感覚と衝撃波形のメジアン周波数値との間に、強い関係があることが判明した。また、個人データを比較すると、 $r=0.947^{**}$  から  $r=0.832^{**}$  と相関係数に個人差が生じたが、官能試験法の理解度が多少異なっていたこともその原因の1つと



図一5 男子の官能検査結果と周波数値の相関

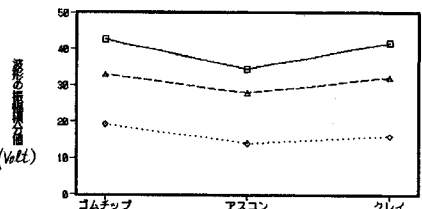
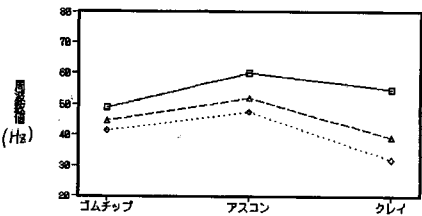
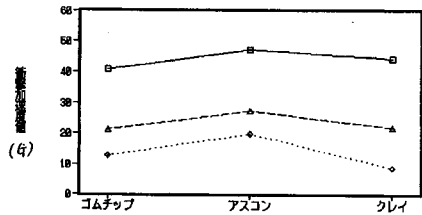


図一6 女子の官能試験結果と周波数値の相関

考えられる。また、図一7に示すように測定結果はアスコン舗装が硬いという予想通りの結果を得た。

(4) 衝撃波形の波形積分値について

靴を通した舗装の弾性変形を調べる目的で、舗装の変形応答特性を知るために衝撃波形の振幅積分を行った。その結果、図一7に示すように波形の積分値は弾性が小さいアスコン舗装では小さな値となり、弾性が大きいクレイ舗装では大きな値を示した。また、基盤がアスコン舗装であるゴムチップ舗装は、表層材の弾性は大きい、厚さが薄いことからアスコン基盤の影響を受け、舗装全



図一7 男子3人の被験者による裸足の測定結果

体ではクレイ舗装より衝撃吸収性が小さい結果を得た。したがって、波形の振幅積分値は衝撃量が極端に大きいと影響を受けるが、本試験のように舗装間の衝撃波形に極端な差がなく、解析区分を衝撃振動時間に限定して解析を行う限りは、波形の減衰時間の影響もないので、舗装の変形応答特性を知る方法としては効果的な方法といえる。

### 7. 各種舗装材の弾性比較

#### (1) 概要

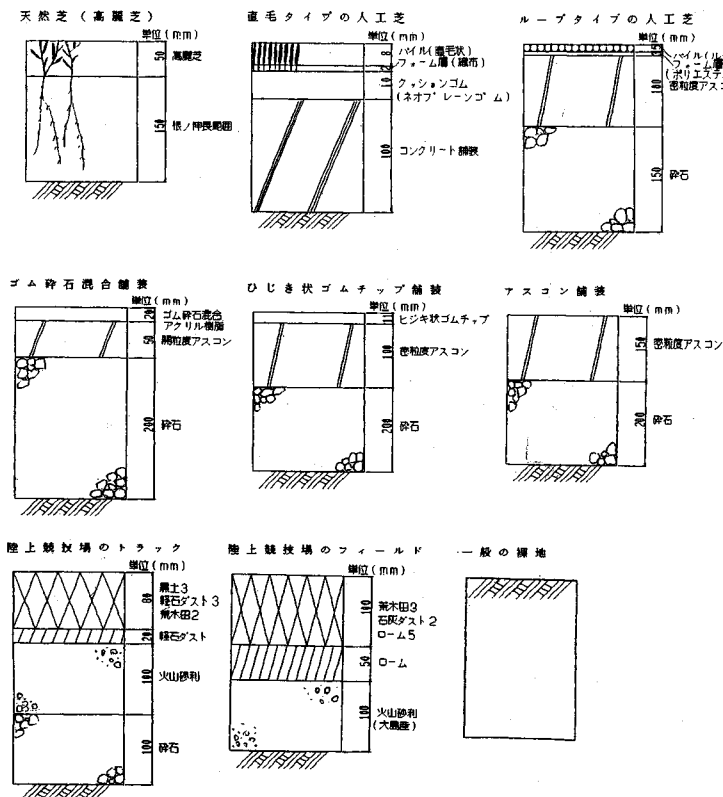
人のための舗装材はさまざまな分類が行われているが<sup>20)</sup>、これら舗装材の弾性を比較するために、①土系舗装、②芝系舗装、③樹脂系舗装、④一般のアスコン舗装の4分野について、生体振動解析法を用いて測定を行った。あわせて、重錘落下試験を行い、生体振動解析法とのデータ比較を行った。試験に使用した重錘は茄形(3640g)で、舗装に接する部分は直径35mm、厚さ2mmのゴムが張りつけてあり、その接地面積は9.62cm<sup>2</sup>である。なお、重錘は生体解析に用いたものと同じタイプの加速度計を内蔵しており、人体と同様に2m/sの接地速度で舗装面に落下させ、シグナルプロセッサで衝撃加速度と反発係数を求めた<sup>7)</sup>。

測定に用いた舗装は、図—8に示す舗装断面をもち、本学内で歩経路あるいは運動のできる広さをもつ舗装面として実際に施工されているものである。その概要は次のとおりである。

① 土系舗装： 弾性・衝撃吸収性があり疲れにくい舗装として土系の舗装が挙げられるが、土系の舗装でも、一般の裸地と表土を改良して転圧したクレイ舗装では弾性が異なる。そこで、土系の舗装としては、a) 裸地、b) 陸上競技場のフィールド、c) 陸上競技場のトラックの3種類を選択した。裸地は関東ロームで比較的堅く締め固まっており、フィールド、トラックは大島産の火山砂利や川越産の荒木田粘土、石灰ダスト、ローム黒土等を混合し締め固めた舗装である。

② 芝系舗装： 天然芝は使用感が良く、広場や運動場の舗装に使用されるが、維持管理が難しい舗装である。今回は高麗芝の広場を試験区として用いた。また、最近では各種競技場やテニスコート等に人工芝が使用される事例が多いので、アスコンやコンクリートを基盤とした人工芝の中から、葉の形状が直毛タイプとループタイプの2種類の舗装を選択した。

③ 樹脂系舗装： 樹脂系の舗装は従来高級な舗装として陸上競技場を中心に施工されていたが、最近小学校



図—8 測定舗装断面図

等の校庭の舗装や、ジョギング道の舗装などに多く用いられるようになった。そこで樹脂系の中では比較的安価な舗装として、ひじき状ゴムチップをウレタン樹脂で固めた舗装と、粒状ゴムチップと碎石、砂などをアクリル系樹脂で固めたゴム碎石混合舗装について実施した。

④ アスコン舗装： 従来から一般歩道の舗装に用いられている密粒度アスコン舗装で、一般歩道舗装の仕様にに基づき碎石路盤と密粒度アスコン（13）からなる。

(2) 測定結果および考察

測定結果を図-9に示す。芝系の舗装をみると、衝撃加速度は、裸足ではアスコン基礎の上に直接施工されたループ人工芝が大きな値を示したが、靴を履いた場合いずれの人工芝系でも緩衝効果が認められた。これは人工芝上では靴全体が一枚の板となり靴底が緩衝して、表層も天然芝と同様の緩衝作用をしていることが原因と考えられる。また、周波数値は、衝撃の大きい舗装では高い周波数値となり、人工芝では多少芝の葉の形状やアンダーパットが影響していると考えられる。次に積分値は、人工芝では舗装の変形応答特性が小さく、人工芝による差はほとんど認められなかった。

土系の舗装をみると、いずれの舗装もほぼ同様の衝撃加速度値で、舗装に当たったときの感覚も土系の舗装ではほとんど同じと思われる。しかし、一般の裸地に比べてトラックやフィールドは多少受けた衝撃量が大きくな

り、特に表面に粘土分の土が多いトラックは砂分の多いフィールドに比べて軟らかく、同じグランド舗装にも差がある。

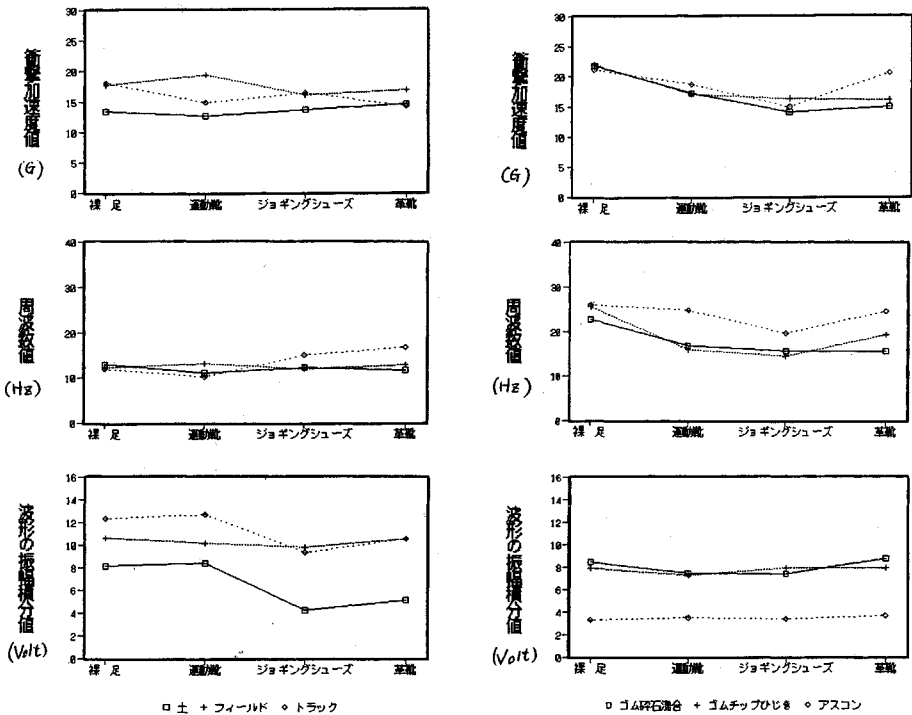


図-9 各種舗装の測定結果



表—6 重錘落下試験の結果

舗装の種類	衝撃加速度	反発係数
天然芝	33 (G)	0.359
直毛人工芝	98	0.564
ゴム砕石混合	75	0.460
ひじき状ゴムチップ	91	0.575
アスコン	288	0.279
トラック	63	0.319
フィールド	71	0.282
裸地	29	0.225

樹脂系舗装・アスコン舗装をみると、衝撃加速度値に差が認められなかったが、アスコン舗装は周波数値が高く積分値も低いことから、舗装の弾性が小さく当たったときの感覚も他の舗装に比べるとかなり硬い舗装であった。また表面は弾性が大きくても基礎に硬い素材を用いた舗装やアスコン舗装では、靴により緩衝の程度が異なり中でも靴底の厚いジョギングシューズはその効果が著しい。また、ゴム砕石混合舗装は、表面をみると硬く感じる舗装であるが、人体が受ける衝撃の程度は予想したよりも小さく、舗装の厚さが厚いこともあり舗装全体で緩衝効果があるものと思われる。

重錘落下試験の測定結果は、表—6に示す。衝撃加速度をみると、アスコン舗装は、裸地の約10倍の衝撃を受けることになるが、舗装の反発係数をみるとあまり差がなく、フィールド等の土系の舗装と同程度の値を示しており、実際に受けた衝撃とかなり異なる。また、フィールドやトラックは、天然芝の2倍以上の衝撃加速度値を示したが、裸地は天然芝と同程度の値で、土系の舗装でデータに大きな差を生じた。また、クッションゴム入りの人工芝やゴムチップ舗装は、クレイ系の舗装より大きな衝撃加速度値となり、ほぼ予想されたとおりの傾向を示した。以上のことから、重錘落下試験は、重錘の接地部の面積や舗装表面の形状にかなり影響される可能性があり、その結果から人体が受けた衝撃や、舗装から受ける感覚を直接測定することはできないが、材質によっては舗装の弾性を比較することができると考える。

## 8. ま と め

舗装材の弾性を測定する方法として、従来から重錘落下などによる物理的試験方法や、人体が受ける衝撃を衝撃加速度値で判定する試験方法が行われてきたが、これらの方法は人体が受ける感覚との間に大きな差があったり、官能検査結果との間に相関が小さいなどの問題があった。そこで、人体が受けた感覚を測定する試験方法として、人体から得られる生体データを用いて解析することが好ましいと考え、靴を通して人体が舗装から受ける衝撃波形を用いて舗装の弾性を解析する生体振動解析法の開発を行った。その結果、

(1) 加速度計を用いた測定法は、加速度計の取り付け位置や固定方法がデータに影響する可能性は高いが、足首のくるぶしのように、皮膚や筋肉などによる緩衝作用が比較的少ない場所に取り付けることで、人体の緩衝作用をあまり受けず、人体が受けた衝撃を振動波形として求めることができた。

(2) 人体が受ける衝撃量を定量化するために、比較的個人差の出にくい方法として、ぶら下がり健康器より各10回ずつの飛び降り測定を行ったが、垂直落下法でも、飛び降り方に多少差が生じた。また、人体が衝撃に慣れ、最初の衝撃波形と終わりの衝撃波形では波形の形状が異なったことから、10回程度の落下試験では、これらのデータを平均した数値を用いて解析する方が良い。

(3) 振動波形は、裸足と靴を履いた場合では波形の形状が異なり、裸足ではつま先と、かかとの衝撃ピークが明確に現われたが、靴を履くと靴底が1枚の板となって衝撃を受けるのか、衝撃ピークが現われにくい波形を得た。また、靴底が厚く衝撃を吸収しやすい材料でできている靴は、予想どおり硬い舗装において大きな衝撃吸収効果を示した。

(4) 衝撃加速度値は、膝の緩衝作用が舗装材により異なることから、足首と膝の衝撃加速度値を加えた値を、足全体が受けた衝撃加速度値として検討したが、この解析法は、膝の緩衝を考慮に入れており、着地時の個人差も含まれた値であることから、比較的受けた衝撃の感覚に近い測定方法であった。

(5) 足首の衝撃波形のメジアン周波数値は、官能検査結果と高い相関を示し、舗装から受ける官能検査の感覚と足が舗装に当たったときの感覚は、類似していることがわかった。

(6) 靴を通した舗装の弾性変形は、振動波形を振幅積分して求めた舗装の変形応答特性で比較検討できる。

(7) 生体振動解析法と、従来から行われてきた重錘落下試験による衝撃加速度と反発係数を求める試験方法を比較した。その結果、生体振動法は、人体が受けた感覚に類似した舗装の弾性傾向を示したが、重錘落下試験は、衝撃加速度値や反発係数が、人体が受ける感覚と大きく異なる結果を示し、人体の受ける衝撃や弾性を判定する試験方法としては、好ましくないと考える。しかし、試験方法が簡易なことから、舗装の品質管理などには適した試験方法と考える。

本試験方法は、従来の舗装弾性判定法と全く異なり、人体が受けた生体データを多方面から解析し、舗装の弾性を解析しようとする新しい方法である。現在は、まだ測定事例が少ないが、今後各種舗装材の弾性測定を行い比較検討してデータを集めていくと、これらが、今後の

舗装材開発や人のための快適な舗装を作り出すうえで、重要なデータになる得ると考える。次報は人工芝の弾性について報告する予定である。

終わりにあたり、本実験にご指導・ご協力を賜りました天野景敏教授ならびに農業工学科農業造構学研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) (財)日本体育協会：大衆ランナーの整形外科的研究，昭和54年度日本体育協会スポーツ科学研究報告，1979.
- 2) 小林一敏：スポーツにおける身体の衝撃，日本機械学会誌，Vol. 90, No. 828, pp. 65~70, 1987.11.
- 3) 小野英哲・三上貴正・渡辺博司：安全性からみた学校体育館床のかたさに関する研究，日本建築学会論文報告集，Vol. 321, pp. 9~16, 1982.11.
- 4) 前田 博：都市公園における施設の安全性に関する検討—ジョギングのための舗装材に関する研究—，新都市，Vol. 43, pp. 45~52, 1989.10.
- 5) 佐鳥悦久・鈴木 敏：弾性歩道舗装についての提言，第15回日本道路会議論文集，pp. 405~406, 1983.
- 6) (財)日本体育施設協会：屋外体育施設の建設指針—各種スポーツ施設の設計・施工—，pp. 172~173, 1987.
- 7) 牧 恒雄・壁谷紀郎・金井利浩：舗装の弾性に関する研究，土木学会 44 回年次学術講演会講演概要集第 5 部，pp. 64~65, 1989.10.
- 8) Brown, R. P. : Specifications and Tests for Artificial Sports Surfaces, Polymer Testing 3, pp. 85~98, 1982.
- 9) DIN 18035 Teil 6 : Sportplatze Kunststoff-Flachen Anforderungen, Prufung, Pflege, 1978.4.
- 10) 増田 稔：木質床の衝撃特性に関する研究，第33回日本木材学会大会研究発表要旨集，pp. 84, 1983.4.
- 11) 小野英哲・三上貴正：屋外スポーツサーフェイスのかたさ測定装置の設計・試作—屋外スポーツサーフェイスのかたさの評価方法に関する研究（第1報）—，日本建築学会構造系論文報告集，第369号，pp. 1~8, 1986.
- 12) 小林一敏・菅原秀二：身体に与える合成樹脂系舗装材の力学的特性，順天堂大学保健体育紀要，Vol. 18, pp. 24~35, 1975.
- 13) Der Schbearbeiter Koltitzus, Der Abteilungsleiter Henke : Forschungsauftrag Sportplatzbelage, OTTO-GRAF-INSTITUT, 1971.1.
- 14) 福田萬大・佐藤育正・西村尚志：各種ジョギング道路の路面評価結果，第18回日本道路会議論文集，pp. 632~633, 1989.10.
- 15) 三上直樹：デジタル信号処理入門，CQ出版社，pp. 96~104, 1989.
- 16) 白井支朗・伊藤宏司・三田勝巳：生体信号処理の基礎，オーム社，pp. 36~39, 1985.
- 17) 井上 健：脳波のパワースペクトル（V）—脳波のパワースペクトルの推定方法—，臨床脳波，Vol. 30, No. 10, pp. 684~688, 1988.10.
- 18) 芝 祐順 編：統計用語辞典，新曜社，pp. 170~171, 1984.
- 19) Basmajian, J. V. : Muscle Alive, Willams and Wilkins Co. Baltimore, pp. 94~100, 1974.
- 20) 金井 格・梅沢篤之介・岸塚正昭・小林 章・鈴木 敏・牧 恒雄：人のための道と広場の舗装，技報堂出版，1987.5.

(1990.6.4・受付)