

B-1-12 スキー板の弾性パラメータの同定に関する研究

発表者 M99210 水上孝志 M99216 水野亮 M99229 森山晃裕
 指導教員 細川 健治

1. 緒言

毎年、多種多様のスキー板が市販されているが、スキー板の設計開発においては、主に設計者の経験や実際に滑走試験を行なった滑走者の主観によって行なわれており、非常に時間とコストがかかっている。その原因の1つとして、スキー板の特性、スキーヤの特性および雪面の特性が滑走性能にどのような影響を及ぼすのかが明らかにされていないからである。そこでこれらを力学的に考慮した設計法が提案されればスキー板の設計開発に有用であると考え、著者の1人はスキー板の曲げ変形を考慮したスキーターンシミュレーション法を提案している⁽¹⁾。このスキーターンシミュレーションを行う場合、スキー板の弾性パラメータは特に重要となる。そこで我が研究室では、有限要素法による固有値解析の結果からスキー板の弾性パラメータを同定する同定法を提案した⁽²⁾。しかしながら、提案されている同定法では、あらゆる特性を持つスキー板への有効性の検討がされていない。本研究では、提案されている同定法を用いて、異なる特性を持つ3種類のスキー板の弾性パラメータの同定を行う。さらに同定された弾性パラメータを用いてスキー板の長手方向の曲げ剛性分布およびねじり剛性分布を求め、静的曲げ実験⁽³⁾によって求めた長手方向の曲げ剛性分布およびねじり剛性分布を比較検討することにより、提案されている同定法のあらゆる特性を持つスキー板への有効性を明らかにする。

2. 同定手法

提案する同定手法は、有限要素法と感度解析法の組み合わせによるものである。有限要素法による固有値解析では不均質な構造物に対応したソリッド要素を用いて解析できるようにモデル化を行っている。また感度解析法については以下で説明する。

2.1 感度解析法 提案する同定手法では、感度解析法を用いる。弾性パラメータの変化量に対する固有振動数の変化量を表す感度マトリックスAの各成分を次式により求める。

$$A_{ji} = \frac{f_j}{e_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここで f_j は、 i 番目の弾性パラメータの変化量を e_i としたときの j 次の固有振動数の変化量である。実験的に求めた固有振動数を観測値とし、解析による固有振動数をこれに一致させるために必要なパラメータの変更量ベクトル E は、式(2)の成分をもつ感度マトリックスAの逆マトリックス A^+ および固有振動数の観測値との差のベクトル F を用いて、

$$E = A^+ F \dots\dots\dots (2)$$

として求められる。ここで、 α は発散を防ぐための修正係数で1以下の値を用いて、収束計算を行う。一般に、感度マトリックス A は正方マトリックスではないため、式(2)の同定問題では不適切となる。そこでこの逆マトリックス

を、次に示す特異値分解による Moore-Penrose の一般逆マトリックスを用い、NUMPAC によって求める。 A が m 行 n 列であるとき適当な直交マトリックス U, V を選ぶと、 A の逆マトリックス A^+ を式(3)のように分解することができる。

$$A^+ = VB^+U^T \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 U および V はそれぞれ m 行 m 列、 n 行 n 列のマトリックスであり、 B^+ は m 行 n 列の対角マトリックス B の一般逆マトリックスである。

$$B^+ = \begin{pmatrix} 1/ & 1 & & 0 & & \vdots \\ & & 1/ & 2 & & \vdots \\ & & & \dots & & \vdots \\ 0 & & & & 1/ & n \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

: Singular value of A

2.2 感度解析法を用いた同定方法

まず、3次元 CAD の Solid works によって同定対象のスキー板の幾何学形状を描いた後、有限要素解析ソフトである NASTRAN に取り込み材料特性および拘束条件を考慮して解析モデルを作成し弾性パラメータの初期値を入力して固有値解析を行う。次に入力した弾性パラメータの初期値を微小変化させながら固有値解析を行い、式(1)における変化量 e_i および f_j を求め、感度マトリックスを作成する。さらに、特異値分解を用いて感度マトリックスの一般逆マトリックスを求め、加振実験によって求めた固有振動数(観測値)と解析値の差とかけあわせることにより弾性パラメータの変更量を算出する。本研究では観測値は昨年度に求めた値を用いた。最後に弾性パラメータの変更量を初期値に考慮し、固有値解析を行い、その結果得られた固有振動数が観測値に収束していれば同定を終了し、そうでなければ収束するまで同定解析を繰り返す。また異方性パラメータの同定過程において、弾性パラメータの初期値によっては、実験により測定したモードの順序と解析によるモードの順序が異なるという問題が生じる場合があるので、これに対しては MAC (Modal Assurance Criterion) を用いて、モードを対応づけることにより適切な同定を可能とする。

3. 同定結果

提案する同定法のスキー板への適用性を検討するために異なる特性を持つ3種類の特性を持つスキー板の弾性パラメータの同定を行った。ここでは、一例としてカービングモデルのスキー板()の弾性パラメータの同定について示す。スキー板は複合構造部材であり、方向により材料定数が異なるため、材料特性を二次元直交異方性とした。同定する弾性パラメータとしては、曲げの固有振動数に最も影響する繊維方向の縦弾性係数 E_1 、ねじれの固有振動数に

最も影響する繊維方向と垂直方向の縦弾性係数 E_2 、せん断弾性係数 G_{12} の 3 つとした。ポアソン比 ν_{12} は同定せず過去の経験上 0.4 のままとした。繊維方向の縦弾性係数 E_1 の同定はスキー板の 1 次～5 次までの曲げの固有振動数に注目し、繊維方向と垂直方向の縦弾性係数 E_2 、およびせん断弾性係数 G_{12} の同定はスキー板の 1 次～4 次までのねじれの固有振動数に注目して、すべての固有振動数において観測値との誤差が 6 % 以内になったときに収束したと判断した。

3.1 スキー板()の弾性パラメータの同定

提案する同定法をカービングモデルのスキー板()に適用した。初期値としてフリーライドモデルのスキー板()の弾性パラメータを用いた。表 1 に同定された弾性パラメータを用いて求めたスキー板()の曲げの固有振動数を、表 2 にねじれの固有振動数をそれぞれ示す。また、加振実験によって求めたスキー板()の固有振動数を併せて示す。表 1、表 2 から明らかなるように同定された弾性パラメータを用いて求めたスキー板()の曲げおよびねじれの固有振動数の数値計算結果と実験結果は誤差が最大で 5.94% とすべて収束範囲内に収まっていることがわかる。

3.2 スキー板の長手方向の曲げおよびねじり剛性分布

図 1 に同定された弾性パラメータを用いて求めたカービングモデルのスキー板()の長手方向の曲げ剛性分布、図 2 にねじり剛性分布を示す。図中の実線は静的曲げ実験⁽³⁾より求めた長手方向の曲げ剛性分布を示す。図 2 より、長手方向の曲げ剛性分布の数値計算結果と実験結果は tail, center, top 付近で多少誤差が見られるものの、実験結果との誤差は最大で 7.80% であるため、曲げおよびねじり剛性分布の数値計算結果は良く一致していると言える。

4. 結論

提案されている同定法のあらゆる特性を持つスキー板への適用性を検討するために、同定対象とは異なる特性を持つスキー板の弾性パラメータを初期値として用いて、異なる特性を持つ 3 種類のスキー板の弾性パラメータの同定を行った。その結果、同定された弾性パラメータを用いて求めたスキー板の曲げおよびねじれの固有振動数の数値計算結果と実験結果は最大で 5.94% とすべて収束範囲内に収まることがわかった。さらに同定された弾性パラメータを用いて求めたスキー板の長手方向の曲げおよびねじり剛性分布の数値計算結果と実験結果は tail, center, top 付近で多少誤差があるものの、最大でも 7.80% 以内であり、よく一致していると言える。よって提案されている同定法のあらゆる特性を持つスキー板への適用性が明らかになった。

参考文献

- (1) Sakata, T., Kawai, S. and Kato, K., New Approach of Design of Skis, International Conference on Multidisciplinary Design in Engineering CSME-MDE 2001.
- (2) Hosokawa, K., Sato, Y. and Sakata, T., Identification of Equivalent Elastic Parameter for Skis, International Conference on Multidisciplinary Design in Engineering CSME-MDE 2001.
- (3) 坂田敏行, 森下武志, スキー板の機械特性に関する研究, 中部大学工学部紀要, Vol.27, (1991), 19-26.

表 1. スキー板()の長手方向の曲げの固有振動数

モード数	実験結果	数値計算結果	誤差
1st	20.11 (Hz)	20.95 (Hz)	-4.18 (%)
2nd	43.61 (Hz)	44.26 (Hz)	-1.51 (%)
3rd	74.69 (Hz)	78.29 (Hz)	-4.82 (%)
4th	117.24 (Hz)	123.32 (Hz)	-5.19 (%)
5th	171.55 (Hz)	180.95 (Hz)	-5.48 (%)

表 2. スキー板()の長手方向のねじれの固有振動数

モード数	実験結果	数値計算結果	誤差
1st	77.81 (Hz)	82.28 (Hz)	-5.74 (%)
2nd	159.37 (Hz)	165.43 (Hz)	-3.79 (%)
3rd	236.87 (Hz)	249.58 (Hz)	-5.36 (%)
4th	321.56 (Hz)	340.68 (Hz)	-5.94 (%)

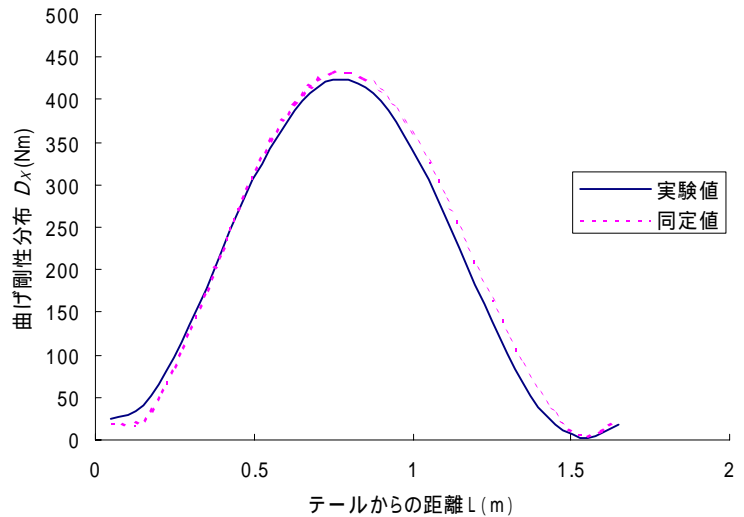


図 1. スキー板()の曲げ剛性分布

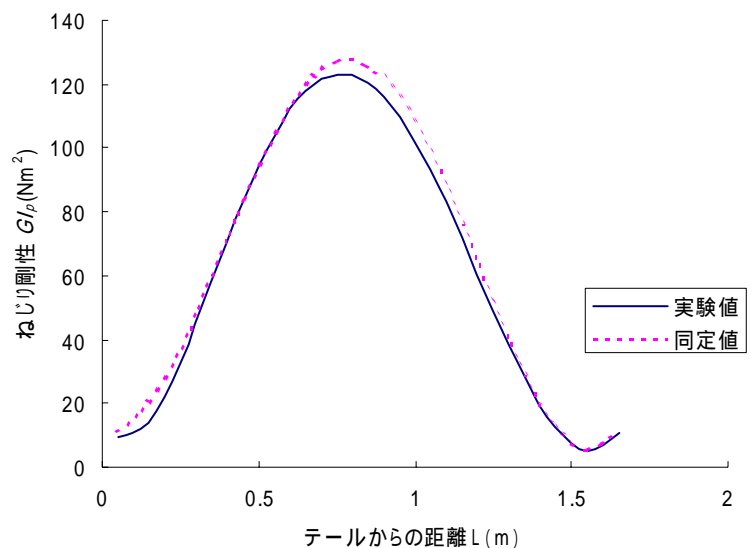


図 2. スキー板()の長手方向のねじり剛性分布