

テニスラケットの最適設計に関する研究

山口哲男, 大貫正秀, 岩壺卓三

本誌, 第58巻, 551号, (1992-7), 2165~2170 ページ掲載

〔質問者〕 川 副 嘉 彦〔埼玉工業大学〕

(1) 図2について: 衝突速度一定(30 m/s)でガットのばね定数の影響を数値計算されているが, 衝突速度あるいは変形が小さい範囲を除くと, 硬化ばね特性によりボールとガットの等価的ばね定数は衝突速度の大小でほぼ決まり, 衝突速度一定のもとでは初期張力によりばね定数を大きく変えるのは不可能なはずである⁽¹⁾. 30 m/sのときのガットとボールのばね定数はどの程度と考えればよいのか.

(2) 図5について: 以下の解釈のほうが本質的だと質問者は考える. ご見解を伺えたら有難い. (i) はりの中央で衝突するとき最も反発がよいのは1次(2節曲げ)振動の腹にあたるためではなく, 重心に近いことによりはりの剛体的回転運動が少ないからであり, 中央から離れるほど反発が悪くなるのは重心から遠くなることによりはりが回転するからである. (ii) また, 衝突点が $0.7L$, $0.8L$ (L ははりの長さ) の場合, はりの剛性の影響が非常に小さいのは1次振動の節に近いからである. (iii) はりの中央付近で衝突する場合, はりの剛性が低いと反発が大きく低下しているのは, 1次振動の腹に近いからである. (iv) したがって, 反発速度に関しては, 30 m/sでは2次振動(3節曲げ)の影響はあまり大きくなく, 1次振動の影響がはるかに大きい.

(3) 図3のフレームと図5のはりの固有振動数が大きく異なるのはなぜか.

(4) 結論(2)に関連して: ガットの膜振動に関しては一般にはフレームの振動モードと分離して扱ってもよいであろう. しかし, ボールはガットのばねを介してフレームに衝突し, しかもボールとガットのばね剛性は比較的近い. したがって, ボール単独の固有振動数ではなく, ボール・ストリングス複合系の固有振動数とフレームの固有振動数を対比すべきではないか.

(5) 図6および結論(4)に関連して: 1次振動の節(ラケット打撃面のほぼ中心)では1次振動が小さく, 衝突速度30 m/s程度では2次振動は絶対値が小さいから, フレーム剛性の影響は面の中心でありなく, むしろ面の中心を外れた場合に影響が大きいと解釈するのが本質的ではないか.

(6) 結論(1)に関連して: インパクトは瞬時の過渡現象であり, ボール・ガット系の固有振動数は非線形性により変形の増大とともに変化し, スペクトルは周波数零からの成分を含む. また, 衝突速度が異なるとボール・ガット系の固有振動数も大きく異なる. このような現象において機械インピーダンス, あるいは振動数のマッチングはどのように考えればよいのであろうか.

(質問受付 平成4年9月25日)

〔回答者〕

有益な討論をいただき, 感謝する.

(1) ボールとの接触時間中にガットのばね定数は変位と共に変化し非線形性を示すが, その様子はガット材質, ガットパターンによって異なり一義的に表せない. 本論文では, ガットとボールのインピーダンス・マッチングに関する定性的な検討を目的としており, ガットのばねを線形と仮定してその目的は達せられるものと考えている.

(2) 図5に示す結果において, 衝突位置がはりの重心位置に近いほど全体的に反発が高くなっているのは, 剛体的回転運動が少ないことに起因すると考えている. しかしながら, はりの剛性が約 $0.2 \times 10^3 \text{ Nm}^2$ 以下でははりの重心に衝突した場合が最大とはなっておらず, はりの重心に衝突する場合が他の衝突位置に比べて常に最大であるとはいえないことから, 剛体的回転運動が少ないということのみでは説明できない.

次に解釈(ii)に関し, 著者らはインピーダンス・マッチングに関する定性的な検討を目的とし, 実際のラ

ケットの打撃位置が中心付近であることを考慮して、衝突点が $0.7L$, $0.8L$ の場合の反発に及ぼすはりの剛性の影響は小さいとは考えていない。また、はりの剛性変化に対して、生じている反発速度の極大は高次の振動モードを考慮することにより説明することができる。

また、はりの中央付近で衝突する場合に、はりの剛性が低いと反発が大きく低下しているのは、ボールの1次固有振動数にはりの1次固有振動数が一致するはりの剛性が高いところにあるためである。

したがって、1次振動の影響は大きいものの、衝突現象の解明や高反発なラケットの開発のためには高次の振動も重要である。

衝突現象はエネルギーの伝達であり、衝突物の持つ運動エネルギーが衝突中にひずみエネルギーや運動エネルギーの形で保存されても、最終的に被衝突物の運動エネルギーとして効率良く伝わればよく、その伝達の効率を支配するのが機械インピーダンスのマッチングであると考えている。

(3) 図3においては2章に記述しているとおりはりにガットモデルを取付けたラケットモデルを用い、フレームが主体的に変形する固有振動モードの2次まで求めている。一方、図5においては3・2・3節に記述しているとおりはりにガットモデルを取付けていないフレームモデルを用い、フレームの固有振動モードの3次まで求めている。したがって、フレームが主体的に変形するモードの1次同士または2次同士を比較すれば、ほぼ等しい値であることがわかる。

(4) 本論文では、ガットとフレームから成るラケットがボールと衝突したときのボールの反発速度について検討しており、問題はラケットからボールへのエネルギーの伝達である。こうしたときにボールとガットを一体の系としてとらえてはその目的にそぐわな

い。さらに、現象を表すのに妥当なモデル化を行い、そのモデルに適切な境界条件や初期条件を与えて解くことが解析の基本であることを考えると、ラケットとボールをそれぞれ独立にモデル化し、それぞれの固有振動数を対比するのが本質的であると考えられる。

なお、ボールとガットのばね定数はご指摘のように近い値をとるが、動的特性について考察するには質量をも考慮した固有振動数をもって比較すべきであると考えられる。

(5) ご指摘のとおり、面の中心をはずれた場合はフレームには1次の振動モードが励起されやすいため1次固有振動数とボールの固有振動数の関係の影響が大きく現れ、2次の影響はそれに比べて小さい。しかしながら、実際にラケットでボールを打撃するのは面の中心付近であり、それを前提にしてしかも反発を高めるためには2次の振動モードに着目することが必要である。

(6) 物体の特性は厳密には常に非線形性を有しており、どの程度までを線形として取扱って現象を解明できるかがモデル化の重要な点である。我々は先にゴルフにおける衝突現象に対し線形特性を有するばね-質点モデルを適用し、機械インピーダンスのマッチングの概念を導入して反発特性を十分に説明することができた⁽²⁾。このことを前提として、テニスの衝突の解析モデルとして線形のモデルを用い、定性的に動特性を調べることは、反発係数の大きなラケットを開発する上で重要であると考えている。ただし、このモデルの適用に限界があると判断すべきときには、新たに非線形性を考慮できるようなモデルを適用すればよい。

文 献

- (1) 川副, 機論, 58-552, C (1992), 2467.
- (2) 岩壺・ほか4名, 機論, 56-524, C (1990), 1053.