骨折馬および非骨折馬の骨の力学的特性と骨密度*

白崎 芳夫**, 立石 哲也**, 片 桐 祐***

Mechanical Properties and Bone Density of Bone Samples from Horses with and without Suffering Fracture

by Yoshio SHIRASAKI, Tetsuya TATEISHI, and Yuh KATAGIRI

Mechanical properties and bone density of bone from the horse were studied. Two kinds of bone samples were used: one was taken from legs of horses suffering in racing (fractured sample) and the other from legs horses which were killed for other reasons (non fractured sample). The dynamic stiffness and $\tan \delta$ were measured by a viscoelastic spectrometer. A bone densitometer was used in density measurement. No substantial difference in values of dynamic stiffness and density was observed in two kinds of samples. On the other hand, the values of $\tan \delta$ for the fractured sample were definitely lower than those for the non fractured one. It was inferred that the fractured sample was more brittle than the non fractured sample.

Key Words: Mechanical Properties, Dynamic Stiffness, Phase Lag, Bone Density, Bone

1. は じ め に

競走馬の骨折は、馬自体とそれに携わる多くの人達に損失を与えることになる。馬の骨の力学的特性について調べられた報告は著者らの知る範囲では皆無に近く、馬の骨折予防という意味からも骨の力学的特性を測定することは重要な研究課題である。

本報では、骨折馬および非骨折馬^{*1}の力学的特性の差異を明らかにする目的で、骨折馬および非骨折馬の第3中手骨の下部1/3の中央部から試験片を切り出し、骨の硬さの目安となる動的スチフネスと粘弾性効果の指標となる振動荷重と変位の位相差($\tan \delta$)を測定し、骨密度との相関を調べた。その結果、骨折馬および非骨折馬の力学的特性の相違と骨密度との相関を明らかにしたので、それについて述べる。

2. 試料および実験方法

本実験に用いた馬の年齢、性別、骨折および非骨折の別を表1に示した。骨折馬27例、非骨折馬14例の

計41例である。試料は新鮮屠殺死体より第3中手骨を採取し、保存は冷凍(−20℃以下)で行った。実験時に下部1/3の中央より図1に示す寸法^{*2}にダイヤモンドカッタにて採形し、骨面2箇所を測定して、その平均値を測定値とした。実験中は試料の乾燥を防止するため生理食塩水を点滴した。

力学的特性の測定には、機械技研で開発したBiomechanical spectrometer(東洋ポールドウィン製)を用いた。本装置は駆動方式として電磁サーボ式垂直定振幅強制振動方式を採用しており、最大荷重振

表1 本実験に用いた馬の試料

No	AGE	SEX	Fractured	Non Fractured	No	AGE	SEX	Fractured	Non Fractured
1	3	F	○		22	5	M		○
2	5	M		○	23	1	M		○
3	4	F	○		24	5	F		○
4	3	M		○	25	3	M	○	
5	7	M	○		26	4	M		○
6	4	M	○		27	3	F		○
7	4	M	○		28	4	F	○	
8	23	F		○	29	4	M	○	
9	21	F		○	30	4	M	○	
10	5	M		○	31	4	F	○	
11	5	M	○		32	4	M	○	
12	4	F	○		33	5	M		○
13	4	F	○		34	2	M		○
14	4	F	○		35	4	M	○	
15	4	M	○		36	4	M	○	
16	4	M	○		37	6	M	○	
17	5	M		○	38	3	M	○	
18	3	M	○		39	4	M	○	
19	3	M	○		40	4	M	○	
20	4	M	○		41	4	F		○
21	4	M	○						

* 昭和60年4月2日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年10月25日。

** 正員、工業技術院機械技術研究所(〒305 茨城県新治郡桜村1-2)。

*** 東京都馬主会。

*1 本報における非骨折馬とは、と殺の直接の原因が骨折以外、例えば心臓破裂などの内臓疾患による。

*2 骨幅の寸法は個体差により若干異なる。

幅は、100 N (p-p) である。変位の検出には非接触光電式ポジションセンサを使用している。測定周波数は 35 Hz, 測定には曲率半径 2.0 mm, 直径 4.0 mm のステンレス製の圧子を用いた。測定は静的荷重 10.0 N を負荷し、次に振幅 5.0 N の振動荷重を重畳させ、変位、荷重応答を測定した。すなわち、荷重 $F = F_0 + F_1 \sin \omega t$ に対する変位 $D = D_0 + D_1 \sin(\omega t - \delta)$ より、動的スチフネス F_1/D_1 kN/mm および位相差 δ を測定した (図 2)。

骨密度の測定には、Bone densitometer (骨塩量定量分析装置・Norland 社製) を用い、この結果は単位骨幅当たりの骨塩量がディスプレイにデジタル表示される。骨形態の測定には光学顕微鏡から直接画像分析可能な TAS plus (Leitz 社製) を用いた。

3. 実験結果および考察

図 3 はスチフネスと $\tan \delta$ の値を示す。図 3 中の黒丸印は非骨折馬、白丸印が骨折馬である。骨折馬と非骨折馬の $\tan \delta$ の値を比較してみると、全体的に非骨折馬の値が骨折馬より大きいことがわかる。スチフネスと $\tan \delta$ の相関については、非骨折馬の $\tan \delta$ の値はスチフネスの増加に従って減少していく。すなわち、骨が硬くなるに従って $\tan \delta$ が減少して、骨が弾性的になる傾向を示している。

骨折馬においては、 $\tan \delta$ の値はスチフネスの高低

図 1 試験片寸法

図 2 スチフネスと位相差の定義

に関係なくほぼ一定の値を示し、非骨折馬とは傾向が異なっている。骨折馬の $\tan \delta$ の値が非骨折馬より全体的に低いということは、骨折馬の骨が非骨折馬の骨より粘弾性効果が減少していることを示す。

したがって、この結果から骨折馬の骨が非骨折馬の骨より弾性的 (脆性的) な材料であることが明らかになった。なお、図 3 中骨折馬の※印の馬は妊娠中であり、胎児のカルシウム吸収のため他の骨折馬より $\tan \delta$ の値が高くなっていると考えられる。

図 4 は骨折馬および非骨折馬のスチフネスと $\tan \delta$ の平均値と標準偏差を示す。スチフネスの平均値については、骨折馬の値が非骨折馬より高くなっている。 $\tan \delta$ の値については、骨折馬の平均値が非骨折馬より低くなっている。

骨折馬と非骨折馬のスチフネスと $\tan \delta$ の値の統計的な有意差を t 検定 (5% 両側検定) を用いて計算してみると、スチフネス間では有意差は認められず、 $\tan \delta$ 間ではその有意差は認められた。この結果から、

図 3 スチフネスと $\tan \delta$ の関係

図 4 スチフネスと $\tan \delta$ の平均値と標準偏差

骨の硬さの目安となるスチフネスでは骨折馬の平均値が非骨折馬より高くなっているものの、その有意差は認められなかった。これは、骨折馬、非骨折馬ともにスチフネスの値のばらつきが大きいことを示している。 $\tan \delta$ の値については、骨折馬の平均値が非骨折馬のそれより低く、有意差も認められたという事実は、さきにも述べたように骨折馬の骨が非骨折馬の骨より粘弾性効果が減少して弾性的（脆性的）な材料であることを示している。

次に、馬の骨折部位と部位別スチフネスの分布を図5と図6に示す。スチフネスの分布では、種子骨骨折（Sesamoid）9個体のうち6個体が5.0 kN/mmの高い値を示し、骨折部位では平均値が他の部位に比較して最も高くなっている。中足骨骨折（Metatarsal）5個体においては、スチフネスの値が1.85～5.0 kN/mmまでばらついている。骨折部位別では前足については手根骨（Carpal）より先に多く発生し、後足ではけい骨（Tibia）より先端に多発している。本実験例中の前足（手根骨より先端）骨折は15例、後足（けい骨より先端）骨折は8例であり、前足の骨折例が後足の約2倍になっている。これは、走行中においては馬の体重の重心が後方より前方にかかり、しかも、コーナ（競走馬の骨折の大部分はコーナで起きている）におい

てはかえし足となるため単なる垂直荷重だけではなく、曲げ、ねじりを伴う複合衝撃荷重が加わるため骨折が生じやすくなると考えられる。また、種子骨骨折が多く、そのスチフネスの値が高いという問題は馬の運動生理学、解剖学的な見地から詳細に検討を加えなければならない。

図7はスチフネスと骨密度の関係を示す。この結果から明らかなように、スチフネスと骨密度との間には骨折馬、非骨折馬ともに明白な相関関係が存在しない。

したがって、力学的特性の指標であるスチフネスの高低と骨密度との相関より、スチフネス、骨密度の値は馬自体の個体差によるばらつきが大きいことを意味している。また、骨折馬と非骨折馬の骨密度の差異については、この結果から明白な結論はだせない。

図8は骨密度と $\tan \delta$ の関係を示す。骨折馬の $\tan \delta$ の値は、骨密度の増加に従って減少し負の相関をもっていることがわかる。これに対し、非骨折馬の場合は全体的に $\tan \delta$ の値が骨折馬より高く、骨密度による $\tan \delta$ のばらつきが骨折馬より大きいことがわかる。

図9は骨形態を光学顕微鏡から直接、自動画像解析装置（TAS plus）によって、単位面積当たりのハバー

図5 馬の骨折部位

図6 骨折部位別のスチフネスの分布

図7 スチフネスと骨密度の関係

図8 骨密度と $\tan \delta$ の関係

図9 単位面積当たりのハバース管の数と面積率

ス管^{*3}の数と、ハバース管の面積率を示す。単位面積当たりのハバース管の数は骨折馬、非骨折馬ともに大差がない。しかし、ハバース管の面積率では骨折馬が非骨折馬より高い値を示している。この結果から、骨折馬のハバース管の平均直径が非骨折馬のそれより大きくなっている。骨折馬のハバース管の平均直径が非骨折馬のそれより大きいということは、骨中に占める空孔率 (Porosity) が骨折馬では非骨折馬より大きくなっていることを意味している。したがって、空孔率が高い骨折馬の骨が非骨折馬の骨より骨折が生じやすい材料であることが明らかになった。

図10は骨折馬の第3中手骨の中央部より30 mm下部分のX線CT像である。図10中矢印方向に大きな欠損部がみられる。これは、骨代謝異常によって生じたものと考えられる。

4. ま と め

最近問題となっている、競走馬の骨折について種々の原因が考えられている。しかし、骨自体の力学的特性が骨折馬および非骨折馬では、どの程度の差異があるのかという点については明白にはわかっていなかった。

本報では、骨折馬および非骨折馬の骨の力学的特性と骨密度を測定したことによって、次の点が明らかになった。

(1) 骨の硬さの目安となるスチフネスの値については、平均値では骨折馬が非骨折馬より高くなっているが、統計的な有意差は認められなかった。

(2) 骨の粘性と弾性に関係する $\tan \delta$ の値については、骨折馬が全体的に非骨折馬より低く、また、両者の間には統計的な有意差が認められた。この結果

図10 骨折馬第3中手骨のX線CT像の一例

から、骨折馬の骨が非骨折馬の骨より粘弾性効果が減少して、弾性的 (脆性的) な材料であることが判明した。

(3) スチフネスと $\tan \delta$ の関係については、骨折馬ではスチフネスの高低に関係なく、 $\tan \delta$ の値はほぼ一定値を示している。これに対し、非骨折馬ではスチフネスの増加に従って、 $\tan \delta$ の値が減少して負の相関をもち骨折馬とは異なった傾向を示している。

(4) 馬の骨折部位別では、前足については手根骨より先に多く発生し、後足においてはけい骨より先端に多発している。本実験例での骨折は、前足が後足の約2倍になっている。

(5) スチフネスの値と、骨密度との相関関係は認められなかった。これは、スチフネス、骨密度ともに馬の個体差による値のばらつきが大きいためと考えられる。

(6) 骨密度と $\tan \delta$ の関係は、骨折馬では骨密度の増加に従って $\tan \delta$ の値が減少し負の相関をもっている。非骨折馬では、骨密度と $\tan \delta$ の間には明白な相関関係は認められなかった。

(7) 骨形態の測定から、ハバース管の平均直径が骨折馬では非骨折馬より大きくなっている。したがって、骨中の空孔率が骨折馬では非骨折馬より大きいいため、骨折馬の骨が非骨折馬の骨より骨折が生じやすいことが明らかになった。

最後に本論文の作製にご協力頂いた、筑波大学〔院〕高橋恭彦君に感謝致します。

^{*3} ハバース管は骨中に栄養を送るための血管が通る微細な管である。