

衝撃荷重を受ける腕の動的応答の数値解析

山口 誉夫 ○ 金井 知幸 藤井 雄作 永井 健一 丸山 真一
(群馬大学) (群馬大学院) (群馬大学) (群馬大学) (群馬大学)

Analysis of Damped Vibration for Elastic Structures Connected by
Nonlinear Springs with Nonlinear Damping Using FEM

Takao YAMAGUCHI
(Gunma Univ.)

Tomoyuki KANAI
(Graduate School of Gunma Univ.)

Yusaku FUJII
(Gunma Univ.)

Ken-ichi NAGAI
(Gunma Univ.)

Shinichi MARUYAMA
(Gunma Univ.)

衝撃荷重が人間の腕に作用した場合について、著者らが提案する非線形ヒステリシス減衰を有する非線形集中ばねの応答解析法を用いて、数値力学モデルの同定、及び復元力、ヒステリシス特性の解析を行いその特徴を再現できるか検討を行った。

生きた人間の筋肉を非線形ヒステリシス減衰を有する非線形集中ばねで表現し、非線形離散化方程式を線形固有振動形を基準座標とする運動方程式に変換し、大規模自由度問題の応答を自由度縮小し高速に解析した。

Key Words : Damping, Computer Aided Analysis, Nonlinear Vibration, Finite Element Method
Vibration of Continuous System

1. 緒言

ロボットが普及している中で、複雑な動きや、ノイズ等による誤作動が起きることにより、これに関連した労働災害が発生しうる。今後、身近な生活においても家庭内ロボットによる人体への接触事故が危惧される。そのためにロボットなどが人体に接触した場合のような衝撃が加わるのかを明らかにすることが重要な課題となる。

Fujii は、生きた人間の腕に、剛体ブロックから衝撃荷重を加えたときの過渡応答を Levitation Mass Method⁽¹⁾で計測する方法を提案している。これにより、腕の筋肉を緊張させた場合と、弛緩した状態での応答、復元力、ヒステリシスの差異を明らかにしている。本報告では、Fujii, Yamaguchi の実験結果⁽¹⁾をもとに、数値力学モデルの同定、及び衝撃荷重が人間の腕に作用した場合について、動的応答を数値解析する。その解析では、著者らが提案してきたヒステリシスを有する非線形集中ばねと構造物が接合された系の応答解析法^{(2)~(3)}を拡張して用いる。

2. 実験方法および実験結果の概要⁽¹⁾

Fujii, Yamaguchi が用いた実験装置の概要を図1に、計測された復元力の例を図2に示す⁽¹⁾。

図1は Fujii により提案された Levitation Mass Method の装置の模式図である。図中の剛なブロックはガイドに沿って z 方向のみの並進運動が可能となっている。ブロックとガイドの間には膜厚 $8\mu\text{m}$ の空気によって圧力が管理され、ブロックは浮上している。これにより、低摩

擦に浮上ブロックの移動を可能としている。左腕をベースに押し付ける。この時、肘と手首を分離された固定台に置き支持する。右手で浮上ブロックを z 方向に初期位置 z_0 から押し出し、初速 v_0 を与え腕に衝突させる。その結果、減衰を伴う衝撃応答が発生する。浮上ブロックに設置したコーナークューブに他の固定部よりレーザー光をあてる。光波干渉計を用いてドップラー効果によりブロックの運動速度を計測する。求められた速度から積分により位置を、微分により加速度を求める。加速度とブロック質量を乗じて慣性力を求める。慣性力の符号を変えて復元力を得る。この復元力と位置の関係からヒステリシス曲線を求める。

図2は腕を緊張させ力を入れている条件と腕を弛緩させ力を抜いた条件で測定されたヒステリシス曲線である。図中、それぞれの条件で複数の曲線が描かれているが、浮上ブロックの初速度を変えて計測された結果である。被験者は40歳代の男性である。図より両条件とも腕の復元力特性には漸硬型の非線形ばね特性を含むことがわかる。特に腕を弛緩させ力を抜いている条件では、緊張させ力を入れた条件に比べて、非線形性が著しい。腕の復元力を考えた場合、柔軟な筋肉組織と剛性が高い骨組織の二つに大きく要因を分けることができると考えられる。弛緩させ力を抜いた条件では、両組織の剛性差が大きく柔らかいばねと硬いばねが接続された二段の非線形ばね特性が現われている。腕を緊張させた条件では、筋肉組織と骨組織の剛