604 懸垂索の差分モデル制御則に基づく波動制御
Wave Control of Suspended Rope Based on Finite Difference Model

○ 鄭　小蘭（東洋大院）　　　正　西郷　宗玄（東洋大）
Xiao Lan ZHENG, Graduate School of Engineering, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama
Muneharu SAIGO, Toyo University, 2100 Kujirai, Kawagoe, Saitama

This paper describes the wave control of suspended rope by using the control law based on a finite difference (FD) model. The non-existing term in the boundary node equation due to the boundary condition is restored by control, which is computed with the wave propagating solution of the interior node equation as if no boundary existed. The wave propagating solution of the finite difference suspended rope system is newly derived in this paper by introducing the new variable of the difference between adjacent displacements. A similar process to the multiple pendulums system study [2] is applied to the finite difference rope system and the displacement transfer function between adjacent node displacement in frequency domain and the convolution integral kernel function in time domain have been obtained. The frequency analysis and numerical time simulation have confirmed the wave control characteristics of the control law. The simulation of the suspended rope system with load at the bottom has also been conducted and shown the controllability superior to wave control of the non-homogeneous multiple simple pendulum system.

Key Words: 懸垂索，波動制御，振れ止め制御，クレーンロープ

１．はじめに

近年，ロープやはりなどの一次元構造体の波動制御研究が着目されている．長大構造体の振動エネルギーを構造体の周辺で効果的に吸収するには，振動を定在波として扱うのではなく波動伝播特性を利用してエネルギー吸収することが有効である．西郷らは波動制御の実用機器への適用を目標として，1 次元構造体の制振に仮想系のオンラインシミュレーション技法を用いる波動伝播特性を利用した制御法の研究に取り組んできた．その適用例に多重単振子懸垂系の支持点加速度制御法がある[1]．さらに，多重単振子系でオンラインシミュレーションを必要としない波動伝播解を考案して制振性を向上させ，多重単振子系を介したクレーンロープ系の新しい制振構造の提案を行っている[2]．しかしながら，多重単振子を介した吊荷ロープ懸垂系は非均質系であるためロープ長が長くなると制振に時間がかかることも明らかにしている．

そこで，本研究は，多重単振子系の波動伝播に基礎を置くのではなく，懸垂ロープを直に波動吸収制御を行う場合の懸垂ロープ系の制御効果を，単振子系を介したロープ系の制振効果と比較することによって明らかにすることを目的としている．懸垂ロープの固定上端近傍で波動制御を行うため，懸垂ロープの差分近似運動方程式を導き，境界近傍（境界節点）でインピーダンス整合制御による波動吸収制御を行っている．

２．運動方程式と制御則

図 1(a)に示す懸垂索の運動方程式は次式で与えられる

$$\partial^2 y/\partial t^2 = g\left[z\left(\partial^2 y/\partial z^2\right)+\partial y/\partial z\right]=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

式(1)を図 1(b)に示す差分によって差分近似式で表すと，

$$(2\Delta z/g)\ddot{y}_m + [-(2m+1)y_{m+1} + 2(2m)y_m - (2m-1)y_{m-1}] = 0 \quad (m \neq n) \cdots(2)$$

境界条件 $y_{n+1}=0$ より，境界節点方程式は，

$$(2\Delta z/g)\ddot{y}_n + [+2(2n)y_n - (2n-1)y_{n-1}] = 0 \quad \cdots(3)$$

式(3)で境界条件を考慮しない式(4)が実現すれば境界が除去され無限構造が実現する．

$$(2\Delta z/g)\ddot{y}_n + [+2(2n)y_n - (2n-1)y_{n-1}] = (2n+1)y_{n+1} \cdots(4)$$

すなわち，式(4)右辺が制御項である．差分モデル計算では変位を制御量として扱えばよい．分布乗数系計算では式(4)の左辺を，単位長さあたり質量を μ として，$(\mu\Delta z)\ddot{y}_n$ となるように整理したときの Δz 区間に作用する制御力として扱えばよい．

次に仮想的変位 y_{n+1} の計算方法を示す．式(4)は内部節点方程式と同じであるので内部節点方程式の波動伝播解を用いる．波動伝播解は以下のように求められる．

第 m 節点運動方程式と第 $m-1$ 節点運動方程式の差をとり $y_m - y_{m-1} = b_m$ と置いてラプラス変換 $L[b_m] = B_m$ すると，

$$mB_{m+1} - \left[2+\left(s/\omega_0\right)^2\right](m-1)B_m + (m-2)B_{m-1} = 0 \quad \cdots(5)$$

$$\omega_0^2 = g(2m-1)/(2\Delta z)$$

式(5)の一般解を

$$B_m(s/\omega_0) = (2m-1)^{-1}\gamma(s/\omega_0)^m \quad \cdots(6)$$

と仮定すると，特性根

$$\gamma(s/\omega_0) = \left[\sqrt{s^2+4\omega_0^2}-s\right]^2 \Big/ 4\omega_0^2 \quad \cdots(7)$$

を得る．式(7)を逆ラプラス変換すると，

$$L^{-1}\left[\gamma(s/\omega_0)\right] = 2J_2(2\omega_0 t)/t \quad \cdots(8)$$

ここで J_2 は位数 2 の第一種ベッセル関数．

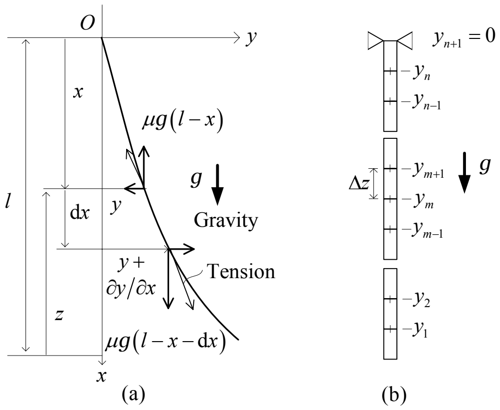

Fig. 1 Suspended rope system
(a): Distributed system (b): Finite difference system