日本機械学会論文集(C 編)
50 巻 453 号(昭 59-5)

ケーブルを利用した構造体の振動・衝撃特性*

大　滝　英　征**
Hideyuki OTAKI

Key Words: Vibration Analysis, Natural Frequencies, Impact Impeadance, Anisotropic Cable Networks, Membrane Analogy

1. まえがき

金属あるいは無機繊維製のケーブルを網目状に配置し構成した構造体は，建築構造物から防じん(塵)用フィルタに至るまで多方面で使用されている．このような使用分野の拡大に伴い，構造強度，振動姿態等について，簡便にして正確に把握できる計算手法の誘導が増々必要となってきている．従来，力学的つりあい条件をもとに，等価な薄板に置換え，固有振動数等を求めることも行われてきた．しかし，網目数が少ない場合には精度が悪くしかも網目が斜交している場合とか，荷重が負荷する場合の解析は難しかった．元来当該構造体は，ケーブルで構成されていることから，不連続体として扱わねばならず，網目の幾何学的形状，負荷形態を考慮に入れると解析はきわめて困難なものである．最近になって，Argris[1]，Knudon[2]，Sun[3]，Afshari[4]，Soler[5]，Batchelor[6]等により，有限要素法，ガレルキン法を駆使しての解析が簡単な構造体について行われるようになった．しかし，計算には多大な労力と費用を要するようである．

そこで，本報告では，網目状に構成された構造体(以後，ケーブル構造体と呼ぶ)を，変形に伴う運動エネルギ，ひずみエネルギを加味して力学的に等価な薄板に置換え，ガレルキン法等に代わって振動姿態等を簡便にして比較的精度よく解析しうる手法を導き出した．さらに，それによってしばしば問題となるケーブル構造体の衝撃特性を検討した．

2. ケーブル構造体と等価な薄板

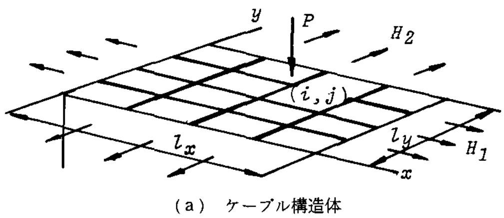
図1に，ケーブル構造体と力学的に等価になると想定した薄板を示した．ここで，H_1, H_2 はケーブルの引張力，T_x, T_y は等価な薄板の外縁に加わる単位長さ当たりの引張力である．ケーブル構造体は，一般に曲げ剛性を無視しうるので，等価な薄板も曲げ剛性を無視し膜理論にて扱う．

以下に，力学的に等価な薄板の諸元を求めてみる．そのために，ケーブル構造体と薄板の両者の変形によるひずみエネルギ，運動エネルギおよび固有振動数が互いに等しくなるようにした．

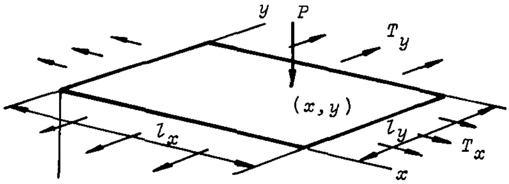
まず，ケーブル構造体について検討する．

図2は，ケーブル構造体の変形状態を示したものである．これより

$$\left.\begin{aligned} {}^1V_{ij} &= H_1\frac{\xi_{i+1,j}-\xi_{i,j}}{d} \\ {}^4V_{ij} &= H_f\frac{\xi_{i-1,j}-\xi_{i,j}}{d} \\ {}^3V_{ij} &= H_2\frac{\xi_{i,j+1}-\xi_{i,j}}{a} \\ {}^2V_{ij} &= H_2\frac{\xi_{i,j-1}-\xi_{i,j}}{a} \end{aligned}\right\} \quad\cdots\cdots(1)$$



(a) ケーブル構造体



(b) ケーブル構造体と等価な薄板

図 1 ケーブル構造体およびそれと等価なものとした薄板

* 昭和58年6月19日　北陸信越支部北陸地方講演会において論文講演として講演，原稿受付　昭和58年2月28日.
** 正員，埼玉大学工学部(〠338 浦和市下大久保 255).

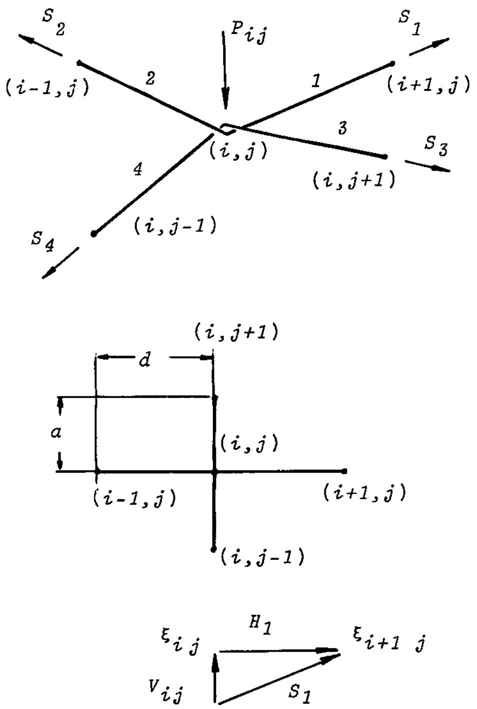
H_1, H_2：ケーブルに加わる軸引張力

V_{ij}：網目の結合点に作用する鉛直方向の力

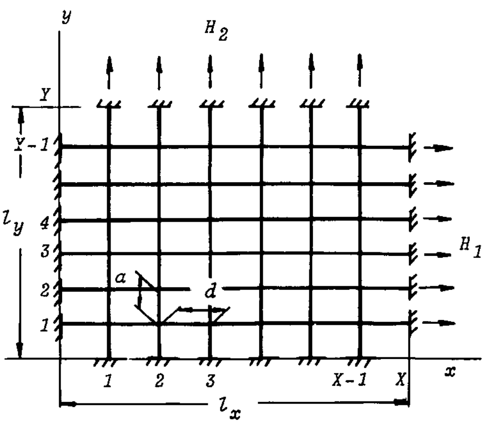
ξ_{ij}：(i, j) 点の変位

であるから，これを総和することにより，つりあい条件式は次式で表される．ただし，ケーブルの質量は，網目の結合点に集中しているものとした．

$$\frac{H_1}{d}(\xi_{i+1,j}-2\xi_{i,j}+\xi_{i-1,j})$$



(a) ケーブルに作用する力



(b) ケーブル構造体の形状寸法

図 2 ケーブル構造体に加わる力

$$+\frac{H_2}{a}(\xi_{i,j+1}-2\xi_{i,j}+\xi_{i,j-1})$$

$$=\ddot{\xi}_{ij}\rho(A_1d+A_2a)+P \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

d, a：網目の x, y 軸方向寸法

A_1, A_2：x, y 軸方向に張られたケーブルの軸断面積

ρ：ケーブル材の密度

P：(x, j) 点に作用する荷重

また，境界条件としてケーブルは端末で剛壁に固定されているものとする．

いま，式(2)および境界条件を満足する自由振動の解として

$$\xi_{i,j}=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}A_{mn}\sin\frac{n\pi id}{l_x}$$

$$\times\sin\frac{m\pi ja}{l_y}\sin\omega_{mn}t \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

を選ぶと，固有振動数 ω_{mn} は，

$$\omega_{mn}=\sqrt{\frac{4}{\rho(A_1d+A_2a)}\left\{\frac{H_1}{d}\sin^2\left(\frac{n\pi d}{2l_x}\right)+\frac{H_2}{a}\sin^2\left(\frac{m\pi a}{2l_y}\right)\right\}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

にて与えられる．

次にケーブルの変形に伴うひずみエネルギを求める．$(i+1, j)$, (i, j) 点間のケーブルの伸びは，

$$\Delta u=d\sqrt{1+\left(\frac{\xi_{i+1,j}-\xi_{i,j}}{d}\right)^2}-d$$

$$\cong\frac{1}{2}\left(\frac{\xi_{i+1,j}-\xi_{i,j}}{d}\right)^2 d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

である．変形によるケーブルの引張力の増加は，無視しうるものとすると，ひずみエネルギ U_{ij} は

$$U_{ij}=\frac{1}{2}H_1\left(\frac{\xi_{i+1,j}-\xi_{i,j}}{d}\right)^2 d$$

同様にして，他のケーブルについてもひずみエネルギを求め総和すれば，ケーブル構造体全体のひずみエネルギ U が求まる．

$$U=\sum_{i=0}^{X-1}\sum_{j=1}^{Y-1}\frac{1}{2}H_1\left(\frac{\xi_{i+1,j}-\xi_{i,j}}{d}\right)^2 d$$

$$+\sum_{i=1}^{X-1}\sum_{j=0}^{Y-1}\frac{1}{2}H_2\left(\frac{\xi_{i,j+1}-\xi_{i,j}}{a}\right)^2 a \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

$Y-1, X-1$：x, y 軸方向に張られたケーブルの数

式(6)に式(3)を代入し，かつ

$$\left.\begin{aligned}&\sum_{r=1}^{N}\sin^2 rx=\frac{N}{2}-\frac{\cos(N+1)x-\sin Nx}{2\sin x}\\&\sum_{r=1}^{N}\cos^2 rx=\frac{N}{2}+\frac{\cos(N+1)x\ \sin Nx}{2\sin x}\\&l_x=Xd,\quad l_y=Ya\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

であることに留意すると

$$U=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{A_{mn}^2}{2}\sin^2\omega_{mn}t\left\{\frac{H_1}{d}\sin^2\left(\frac{n\pi d}{2l_x}\right)+\frac{H_2}{a}\sin^2\left(\frac{m\pi a}{2l_y}\right)\right\}\frac{l_xl_y}{ad}\quad\cdots\cdots(8)$$

となる.

さて，次にケーブル構造体全体の有する運動エネルギ E を求めてみる．運動エネルギは,

$$E=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{X-1}\sum_{j=1}^{Y-1}\dot{\xi}_{ij}^2\rho(A_1d+A_2a)\quad\cdots\cdots(9)$$

で与えられるので，式(3)をこれに代入し，かつ式(7)の関係を用いて整理すると

$$E=\frac{1}{8}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}A_{mn}^2\rho(A_1d+A_2a)\omega_{mn}^2\times\cos^2\omega_{mn}t\frac{l_xl_y}{ad}\quad\cdots\cdots(10)$$

次に，ケーブル構造体と力学的に等価なものと想定した薄板について，同様検討する．

薄板のつりあい条件式は

$$T_x\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}+T_y\frac{\partial^2\xi}{\partial y^2}=\rho h\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}+P\quad\cdots\cdots(11)$$

で表される．式(11)の自由振動の解として

$$\xi=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\tilde{A}_{mn}\sin\frac{n\pi x}{l_x}\sin\frac{m\pi y}{l_y}\sin\tilde{\omega}_{mn}t\quad\cdots\cdots(12)$$

を選ぶと，固有振動数 $\tilde{\omega}_{mn}$ は

$$\tilde{\omega}_{mn}=\sqrt{\frac{1}{\rho h}\left\{T_x\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+T_y\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2\right\}}\quad\cdots\cdots(13)$$

ひずみエネルギ U は

$$\begin{aligned}U&=\frac{1}{2}\int_0^{l_x}\int_0^{l_y}\left\{T_x\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^2+T_y\left(\frac{\partial\xi}{\partial y}\right)^2\right\}dxdy\\&=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\tilde{A}_{mn}^2\frac{l_xl_y}{8}\left\{T_x\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+T_y\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2\right\}\sin^2\tilde{\omega}_{mn}t\quad\cdots\cdots(14)\end{aligned}$$

運動エネルギ E は

$$\begin{aligned}E&=\frac{1}{2}\int_0^{l_x}\int_0^{l_y}\rho h\left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)^2dxdy\\&=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{8}\tilde{A}_{mn}^2\rho hl_xl_y\tilde{\omega}_{mn}^2\cdot\cos^2\tilde{\omega}_{mn}t\quad\cdots\cdots(15)\end{aligned}$$

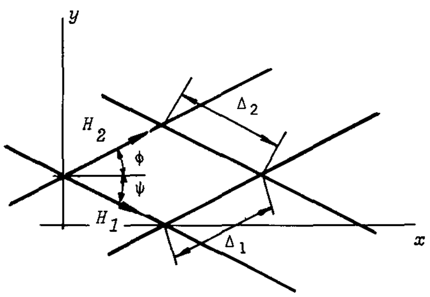


図 3　網目が斜交している場合

式(4)と式(13)，式(8)と式(14)，および式(10)と式(15)を等置し，等価な薄板について，T_x, T_y 等の諸元を求めると以下のようになる．

$$\left.\begin{aligned}\rho h&=\frac{\rho(dA_1+aA_2)}{ad}\\T_x&=S_x\left\{\frac{\sin\frac{n\pi d}{2l_x}}{\frac{n\pi d}{2l_x}}\right\}^2\\T_y&=S_y\left\{\frac{\sin\frac{m\pi a}{2l_y}}{\frac{m\pi a}{2l_y}}\right\}^2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(16)$$

ただし，$S_x=H_1/a$, $S_y=H_2/d$

さて，以上は，網目が互いに直交する場合として扱ったが，斜交する場合には，S_x, S_y がケーブル構造体外縁に沿う単位長さ当たりの引張荷重となることを勘案し，図3より帰納的に推察しうる．すなわち

$$\left.\begin{aligned}S_x&=\frac{H_1\cos\psi+H_2\cos\phi}{\Delta_1\sin\phi+\Delta_2\sin\psi}\\S_y&=\frac{H_1\sin\psi+H_2\sin\phi}{\Delta_1\cos\phi+\Delta_2\cos\psi}\\\rho h&=\frac{\rho(\Delta_1A_1+\Delta_2A_2)}{ad}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(17)$$

となる．したがって，この場合の固有振動数は，式(16)の S_x, S_y に対し，式(17)の値を置換え，さらに式(14)に代入すれば求まる．

3. ケーブル構造体の自由振動

網目が直交あるいは斜交している構造体の例として，すでに Batchelor, Soler 等によってガレルキン法，有限要素法を利用し振動姿態が解かれている例を用い，本解析手法による値と比較検討した．

図4は，ここで取りあげた構造体を示したものである．いずれの構造体も，ケーブルの断面積は，$A_1=A_2=3\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2$ である．この例でもわかるように，ガレルキン法等は，計算時間等の関係上，網目の比較的少ないものが対象とされる．さて，表1は，第一次～第三次固有振動数について，これらの手法による値を比較したものである．本手法による値は，斜交の場合の第二次固有振動数について多少の差異を生じるものの，概して他の手法による値ともよく一致している．

4. ケーブル構造体の衝撃特性

上記のようにして，ケーブル構造体を力学的に等価な薄板に置換し，振動姿態を論じても，かなり精度よく求まった．それゆえ，各種の振動問題も，この薄板

を利用し解析すれば，簡便に求めうることが推察される．

ここでは，ケーブル構造体に衝撃荷重の負荷する場合の振動挙動の検討の必要性が増している状況をかんがみ本手法による解析を試みる．ちなみに，衝撃荷重による振動をガレルキン法等を利用して解析した例は著者の知る限りではないようである．

さて，解析を進めるに際し，衝撃特性は，以下に定義されるような衝撃インピーダンスで評価するのが便利である．すなわち，線形挙動を示す衝撃体の衝突面にステップ状の単位垂直力を加えた場合，衝突面の負荷方向への変位速度 $v=f(t)$ を衝撃インピーダンスとする．

この定義に従うと，衝突面力が時間の関数 $P(t)$ である場合には，変位速度は，Duhamel の積分を用いて次のように表すことができる．

$$v(t)=P(0)f(t)+\int_0^t \frac{dP(\tau)}{d\tau}f(t-\tau)d\tau \quad \cdots(18)$$

部分積分によれば

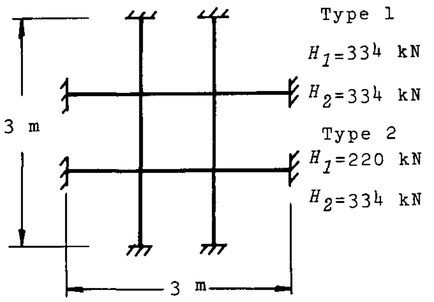
$$v(t)=P(t)f(0)-\int_0^t P(\tau)\frac{df(t-\tau)}{d\tau}d\tau \quad \cdots(19)$$

のように変形される．式(19)は，また次のように変形される．

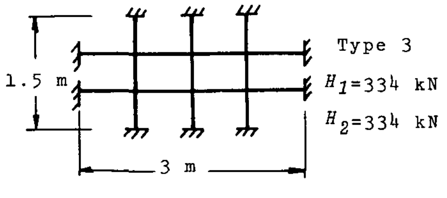
$$v(t)=\frac{d}{dt}\int_0^t P(\tau)f(t-\tau)d\tau$$

表 1　ケーブル構造体の固有振動数

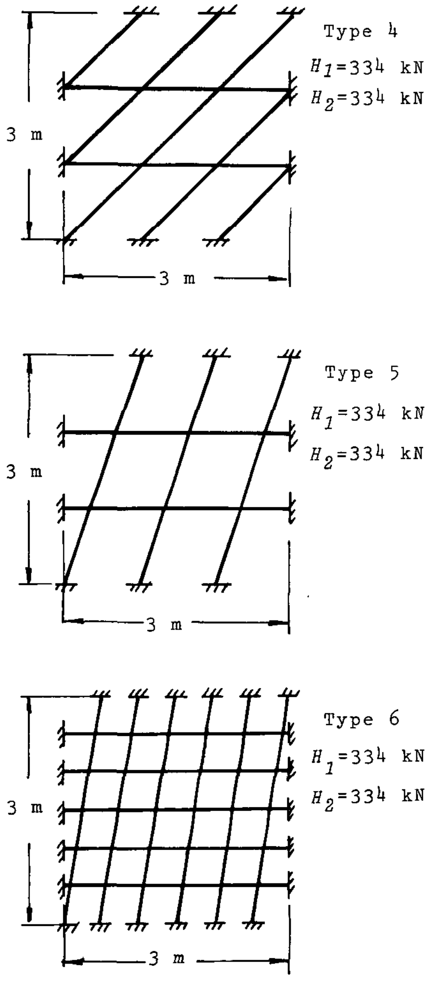
Type	Mode	F.E.M Method	Galerkin's Method	Proposed Method
1	1	61.62	58.92	59.36
	2	97.44	93.12	93.86
	3	97.44	93.12	93.86
2	1	56.25	53.90	54.06
	2	84.38	80.60	80.03
	3	93.29	90.00	90.06
3	1	92.34	93.40	88.54
	2	122.93	117.48	120.16
	3	——	147.30	157.33
4	1	57.34	64.00	54.82
	2	71.20	91.00	67.46
	3	92.38	115.00	102.33
5	1	60.59	62.50	59.00
	2	90.01	98.00	84.51
	3	102.10	99.00	101.26
6	1	59.40	61.30	59.73
	2	91.90	90.40	84.95
	3	96.95	96.50	97.19



(a)　網目が直交しているケーブル構造体



(b)　網目が直交しているケーブル構造体



(c)　網目が斜交しているケーブル構造体

図 4　ケーブル構造体

それゆえ，衝突面の負荷方向への変位は

$$u(t)=\int_0^t v(t)dt$$

$$=\int_0^t P(\tau)f(t-\tau)d\tau \quad \cdots\cdots(20)$$

すなわち，ケーブル構造体について，変位を求めれば容易に衝撃インピーダンスが求まることとなる．そこで，図1に示したケーブル構造体の (s_0, q_0) 点に衝撃荷重が負荷する場合を検討する．

衝撃荷重 P は，フーリエ級数により

$$P=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{4P_0(t)}{l_x l_y}\sin\frac{n\pi s_0}{l_x}\sin\frac{m\pi q_0}{l_y}$$

$$\times\sin\frac{n\pi x}{l_x}\sin\frac{m\pi y}{l_y} \quad \cdots\cdots(21)$$

式(11)に式(21)を代入し，微分方程式を解き，境界条件を満足する解 ξ を求めると

$$\xi=$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{4\sin\frac{n\pi s_0}{l_x}\sin\frac{m\pi q_0}{l_y}\sin\frac{n\pi x}{l_x}\cdot\sin\frac{m\pi y}{l_y}}{\rho h l_x l_y\sqrt{\frac{T_x}{\rho h}\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+\frac{T_y}{\rho h}\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2}}$$

$$\times\int_0^t P(\tau)\sin\left\{\sqrt{\frac{T_x}{\rho h}\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+\frac{T_y}{\rho h}\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2}\right.$$

$$\left.\times(t-\tau)\right\}d\tau \quad \cdots\cdots(22)$$

これより，衝撃点での変位から衝撃インピーダンス f を求めると

$$f=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{4\sin^2\left(\frac{n\pi s_0}{l_x}\right)\sin^2\left(\frac{m\pi q_0}{l_y}\right)}{\rho h l_x l_y\sqrt{\frac{T_x}{\rho h}\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+\frac{T_y}{\rho h}\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2}}$$

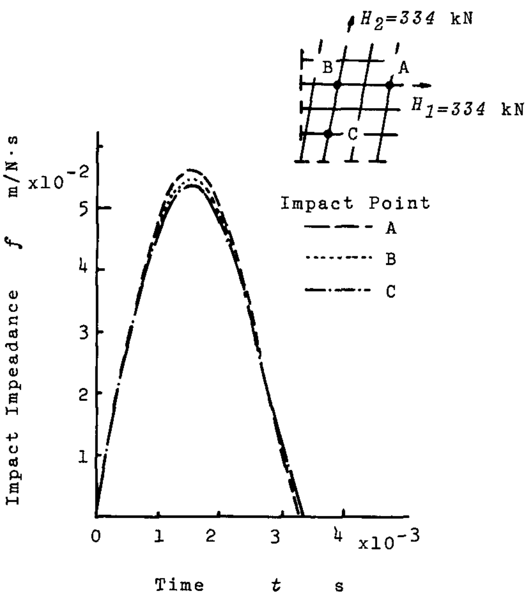
$$\times\sin\left\{\sqrt{\frac{T_x}{\rho h}\left(\frac{n\pi}{l_x}\right)^2+\frac{T_y}{\rho h}\left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2}\,t\right\} \quad \cdots(23)$$

ここで，T_x, T_y は，式(16)で計算される値である．図5は，一例として図4(c)のケーブル構造体について求めた衝撃インピーダンスである．衝撃インピーダンスの最大値は，衝撃点が外縁に近づくにつれ小さくなるが，持続時間（$f=0$ となるまでの時間）はほぼ同じである．また，引張力を増すほど最大値は減小し持続時間も短くなることがわかる．しかし，衝撃インピーダンスの衝撃初期における立ち上りは，いずれの場合ともほとんど変わらないようである．

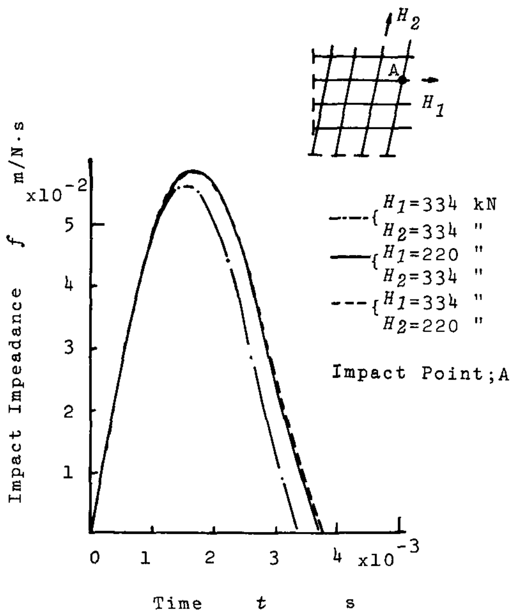
衝撃インピーダンスは，衝撃面の移動速度を表すゆえ，防じんフィルタ等において粘状物質が付着し，移動する場合の運動量の時間的変化状態を知りうる．すなわち，外部からの衝突体（質量 m）の持っていた運動量は

$$\mu=\int_0^t mf(t)dt$$

に従って吸収されることとなるから，$f(t)$ の立ち上りが急な場合ほど，衝突初期段階でより運動量を吸収することとなる．ちなみに，著者は，車のガイドフェンス等への衝突時における挙動解析を重ねてきたが，乗員の安全に対して短時間のうちに運動量を吸収すべ



（a） 衝撃点による影響



（b） ケーブル引張力による影響

図5 ケーブル構造体の衝撃インピーダンス

きか，時間をかけて吸収すべきか大きな課題となっている．本研究により，ケーブル構造体への衝突部位，引張力による影響が簡便に把握されることとなったので，安全問題へ還元できるものと考えている．

5. む す び

本研究では，ケーブル構造体を力学的に等価な薄板に置換し，簡便にして比較的精度よく固有振動数等を求める手法を導いた．また，本手法による薄板を用いて，ケーブル構造体に衝撃が加わる場合の衝撃インピーダンスを導き，衝突部位等の影響を検討した．

ケーブル構造体は，多方面で使用されており，曲げ，ねじり等の負荷条件下に置かれる場合も多い．このような条件下でも，等価な薄板に置換し扱えば，比較的容易に振動挙動等が解析しうるものと考えられる．

文 献

(1) Argris, H., *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, ST 3, (1972), 633.
(2) Knudon, C., *Proc. 1971 IASS Pacific Symposium,* Paper No. 1-6 (1971).
(3) Sun, C. T. and Yung, T. Y., *Trans. ASME*, Ser. E, **40**-1 (1973), 186.
(4) Afshari, H. and Soler, A. I., *Trans. ASME*, Ser. E, **41**-1 (1974), 131.
(5) Soler, A. I. and Afshari, H., *Trans. ASME,* Ser. E, **37**-3 (1970), 606.
(6) Batchelor, B., *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, EM 6, (1980), 1249.

討 論

〔質問〕 **白 樫 正 高**〔長岡技術科学大学〕

式(16)において，T_x, T_y は振動のモード n, m に依存しているが，このことは，あるケーブル構造体と等価な薄板がモードごとに異なると解釈してよいか．そうである場合，任意の条件に対するケーブル構造体の挙動をここで提案された方法で求めるには，どのような手順で計算を行うのか．

〔回答〕 本解析では，各振動モードにおける固有振動数が等価な薄板のそれと等しくなるものとしている．したがって式(16)は，各振動モードに対応した形で誘導されている．これを任意の条件に対する挙動を求めるのに適用するには

$$\left.\begin{aligned} T_x&=S_x\sum_{n=1}^{\infty}\left\{\frac{\sin\dfrac{n\pi d}{2l_x}}{\dfrac{n\pi d}{2l_x}}\right\}^2\\ T_y&=S_y\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\frac{\sin\dfrac{m\pi a}{2l_y}}{\dfrac{m\pi a}{2l_y}}\right\}^2\end{aligned}\right\}$$

とし，式(11)に代入し

$$\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[S_x\left\{\frac{\sin\dfrac{n\pi d}{2l_x}}{\dfrac{n\pi d}{2l_x}}\right\}^2\frac{\partial^2\xi_{mn}}{\partial x^2}+S_y\left\{\frac{\sin\dfrac{m\pi a}{2l_y}}{\dfrac{m\pi a}{2l_y}}\right\}^2\frac{\partial^2\xi_{mn}}{\partial y^2}\right]=\rho h\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$$

より ξ を求めればよい．すなわち，ξ は

$$\xi=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\xi_{mn}$$

$$=\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\tilde{A}_{mn}\sin\frac{n\pi x}{l_x}\sin\frac{m\pi a}{l_y}\sin\tilde{\omega}_{mn}t$$

の形で求まることとなる．

〔質問〕 **根津 紀久雄**〔群馬大学工学部〕

(1) 斜交のケーブル構造体の第二次固有振動数が他の方法(有限要素法，ガレルキン法)による結果と多少異なっていることを指摘しておられるが，その理由を，固有振動モードの観察あるいは定式化の過程から説明することが可能でしたらお示し願いたい．

(2) 式(16)あるいは式(17)で等価な薄板の板厚 h および張力 T_x, T_y を求めておられるが，ケーブル構造体の構造不規則性(網目であること)は張力 T_x, T_y にのみ反映されていると解釈してよろしいか．

〔回答〕 (1) 斜交ケーブルの場合は，その構造不規則性を引張力 T_x, T_y のみに反映させている．それゆえ，斜交ケーブル構造体では，個々のケーブルの長さが異なるが，これを一様に，薄板の端部長 l_x, l_y を持つものとして計算している．

一方，有限要素法では，ケーブルの長さを正確に考慮しうるものの，剛性マトリックス $[k]$，質量マトリックス $[m]$ を

$$[k]=\frac{T}{l}\begin{bmatrix}1&-1\\-1&1\end{bmatrix}$$

$$[m]=\frac{\rho A_r l}{6}\begin{bmatrix}2&1\\1&2\end{bmatrix}$$

T：張力，A_r：断面積，l：ケーブルの結合点間長

と近似的に扱っており，実際より多少高めの固有振動数を与えるといわれている．

以上を考慮すると，l_x, l_y に比し，個々のケーブル

の長さがかなり長い構造体とか，高次振動の場合には，本手法と有限要素法ではかなり差異の生じる場合もあると考えられる．その差異の程度については，今後の検討課題としたい．

（2） ご指摘のとおりである．

〔質問〕 沢 俊行〔山梨大学工学部〕

（1） FEM，ガレルキン法による固有振動数の結果の比較を行っているが，両結果とも近似解法であるため貴解析の妥当性を示すにはいかがなものか．特に固有振動数以外の特性（姿態）としてのモード，振幅などが必要と思われるがいかがか．

（2） 網目の比較的小さい場合が扱われているが，多い場合でも十分適用可能であるのか．

（3） 曲げ剛性が考慮されていないように思われるが，この影響についてのご見解をお教え願いたい．特に衝撃特性においては主共振以外の所での挙動がどのようになるのかお教え願いたい．

〔回答〕 （1） ケーブル構造体の組立ては現場裁量に委ねられる場合が多く，随時の変更に対して簡便に解析できる手法が望まれる．本解析手法で，FEM等による計算値に近いものが得られれば十分活用価値があると考えられる．なお，本解析では，ケーブル構造体のひずみエネルギ，運動エネルギが等価な薄板のそれと等しくなるものとして固有振動数の解析を行ったが，ご指摘のように観点を変え，振動モード，振幅等が互いに等しくなるものとして解析することもできよう．

（2） 従来は，運動エネルギ，ひずみエネルギ等を考慮することなく

$$\left.\begin{aligned} T_x &= \sum_{j=1}^{Y-1} \frac{H_{1,i}}{l_y} \\ T_y &= \sum_{i=1}^{X-1} \frac{H_{2,i}}{l_x} \\ h l_x l_y &= \sum_{i=1}^{X-1} A_{rx\cdot i} l_x + \sum_{j=1}^{Y-1} A_{ry\cdot j} l_y \end{aligned}\right\}$$

として，T_x, T_y, h を求め式(11)を利用し固有振動数を求めていた．これは，網目数が多い場合は，それほどでもないが，網目数が少なくなると近似度が低下する．本手法は，従来と異なって，網目の運動エネルギ，ひずみエネルギが薄板のそれと等しくなるようにして解析し，網目の少ない場合にも対処するようにした．したがって，ご指摘の網目の多い場合にも十分適用できるものと考えている．

（3） 比較的剛なケーブルで製作された構造物では，ケーブル同士の結合点での曲げ剛性が極めて複雑になる．また曲げ変形に対応した伸び変形（したがって軸力の変化）も考慮に入れると解析はきわめて難しく，たんなる線材の場合(付1)と同様，曲げ剛性の存在によって振動の性質が著しく複雑になるものと考えられる．

衝撃特性の主共振以外の挙動に関しては，付図1のごとく，網目に沿っての衝撃波伝ぱ情況を考えなくてはならず，各結合点での反射，透過等を加味すると解析は難しくなる．しかし，定性的には，以下のようにして挙動を把握できる．すなわち，付図にて

$f_1(\xi - c_{tx}t)$ ：x 方向への入力波

$f_2(\xi - c_{tx}t)$ ：x 方向への透過波

$g(\xi + c_{tx}t)$ ：x 方向への反射波

$h(\xi - c_{ty}t)$ ：y 方向への分散波

とすると，結合点での連続条件から

$$\dot{h} = \dot{f}_2 = \dot{f}_1 + \dot{g} \qquad (\text{ただし}\ \dot{}\ \text{：時間微分})$$

また，張力のつりあい条件から

$$2T_y \frac{\partial h}{\partial \xi} + T_x \frac{\partial f_2}{\partial \xi} = T_x \left(\frac{\partial f_1}{\partial \xi} + \frac{\partial g}{\partial \xi} \right)$$

上式より，衝撃挙動の概略がつかめる．すなわち

$$\frac{\partial f_1/\partial \xi}{\partial f_2/\partial \xi} = 1 + \frac{T_y c_{tx}}{T_x c_{ty}}$$

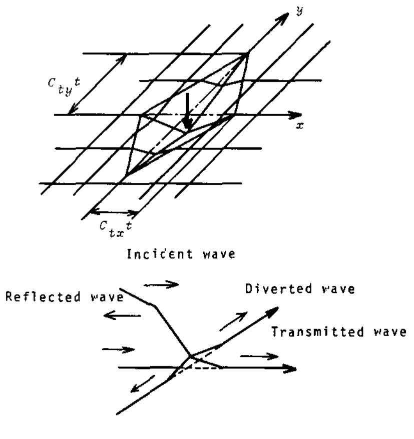
$$\frac{\partial g/\partial \xi}{\partial f_1/\partial \xi} = \frac{1 + \dfrac{T_y c_{tx}}{T_x c_{ty}}}{\dfrac{T_y c_{tx}}{T_x c_{ty}}}$$

$$\frac{\partial h/\partial \xi}{\partial f_1/\partial \xi} = \frac{\dfrac{T_y c_{tx}}{T_x c_{ty}}}{1 + \dfrac{T_y c_{tx}}{T_x c_{ty}}}$$

の関係を保ちながら伝ぱすることがうかがい知れる．

〔質問〕 長 屋 幸 助〔群馬大学工学部〕

（1） 本報ではケーブルの分布質量を節点質量とし，糸の方程式で解析を行っているので，網目が粗い



付図 1

場合は精度が減少すると思われる．しかし表1では例えばタイプ1とタイプ3の振動数を比較すると，タイプ3の方が網目が細いにもかかわらず，誤差が大きいように思われる．これは主としてどのような理由によるものか．

（2） 衝撃を受ける場合は，振動数に大きな差がなくても荷重の時間変化の割合いおよび荷重の作用する位置によってモデル化された系の解と厳密解との間に大きな差がでる場合がある．したがって本解の衝撃応答の結果は，荷重が網目膜中心に近くかつ荷重の時間変動がゆるやかな場合に精度よい結果が得られるものと思われる．このようなことから本解の適用上の注意が必要と思われるが，いかがか．

〔回答〕 （1） 本手法では，沢氏の質問(2)でも述べたように網目が粗い場合にも近似度を上げるようにしたが実際的には，振動モード，振幅，境界条件(本解では，方程式中に拘束を与えている)，構造の不規則性等も加味しなくては，よい精度を得るわけにはいかない．それゆえ，ご指摘のように，構造体によっては，FEM等の結果と多小差異の生じる場合もある．網目が細いにもかかわらず，粗い場合に比較して大きな誤差を生じる場合もあり，またその逆の場合もあるものと考えられる．

（2） 衝撃波は，通過するケーブルの結合点ごとに反射，透過を繰り返すので，境界近傍に衝撃荷重が加わると，境界での反射の影響も振動挙動に絡み合ってくる．本解では，節点質量とし方程式中に拘束の条件等をも与えているので，衝撃点は，比較的構造体の中心近くで，かつ荷重の時間的変動がゆるやかな場合に適用しうるものと考えている．

（付1） 中鉢，機論，21-103（昭30），193.