

I — 4 薄肉円筒体の曲げ衝撃特性について

室蘭工業大学	正員	岸 純光
		松岡健一
北大 工学部		能町純雄
電力中央研究所		高野 博

1. まえがき.

土木、建築構造物の衝撃的荷重に対する耐衝撃性の問題は未解明の部分が多く、合理的な設計手法の確立が急がれている。特に電力、とりわけ原子力発電施設構造物の場合その重要性から、世界各国で実規模の耐衝撃実験を行っている。米国における Tornado ミサイル防護壁の耐衝撃実験はそのよい例である。我が国でも使用者燃料輸送容器の耐衝撃性に関する系統的な実証試験研究がなされているようである。電力中央研究所ではこのような種々の耐衝撃性の問題に対処すべく中速度(載荷初速度 $15 \text{ m/sec} \sim 20 \text{ m/sec}$)衝撃荷重を想定した大型耐衝撃実験装置を設置して、電力関連 RC, PC 構造物の耐衝撃性に関する本格的な研究を推進中である。著者等はこれまで、このような破壊を含む構造物の耐衝撃性に関する問題の足がかりとして構造物の基礎部材である直線矩形梁、複合合成梁、円弧梁あるいはリブ付矩形板等の鋼製あるいはアクリル模型による弾性衝撃実験を行い、衝撃応答特性に関する簡便法や、解析理論の適用性の有無について検討を行ってきた。

ここでは、配電系や供給路器の円筒部分の耐衝撃性に関する基礎資料を得ることを目的としてアクリル円筒模型に落錐による衝撃荷重を作用させ、円周方向、軸方向への波動伝播の問題や、構造体の動的応答性状について調べ、さらに有限要素法を用いた解析を行って実験結果との比較検討を行っている。

2. 実験装置および計測方法.

実験は写真-1に示すような載荷装置を用いて行った。支点部は写真に示されているように剛なタリヤフレームを用いプランマーブロックに固定しているので支点部はピン支持状態となっている。衝撃荷重は $W=1.9 \text{ kg}$ 重の落錐を用い、アクリル製の入力波検知用丸棒を介して円筒部中央部に限定して載荷している。応答歪は箔金ゲージ(ゲージ長 1 mm , ゲージ抵抗 120Ω)を用いて一枚ゲージ法により測定している。写真-2には測定用の計測システムを示している。

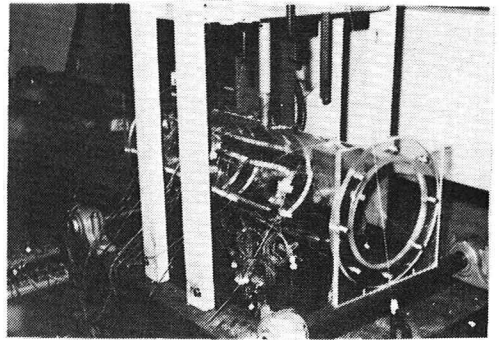


写真-1. 実験装置

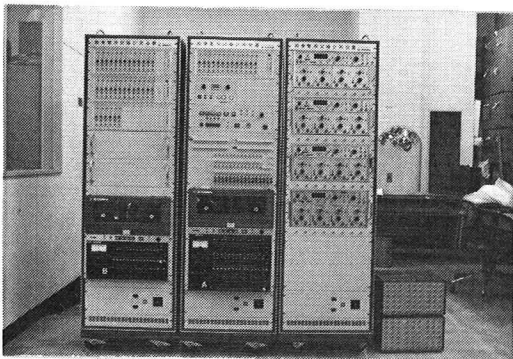


写真-2. 耐衝撃用計測装置

図-1は写真-2のシステムを用いた成分計測フロー図である。図より主に記録部と再生部、波形処理部に分割されており、記録部はメインコントローラーを用いることにより最大42chまで同時計測が可能である。高周波成分を含むため直流増幅器、データレコーダーは周波数範囲が0~20kHzの高帯域用のものを使用している。再生部はウェーブメモリー(16ch)を用いて衝撃初期あるいは長期的な振動性状を最小1μsecのサンプリングで再生可能にしてある。

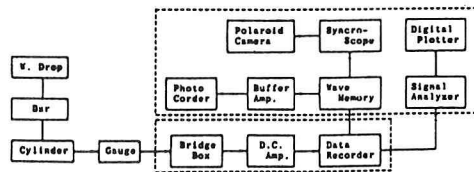
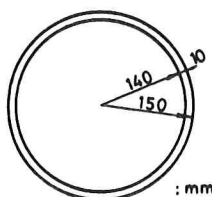


Fig. 1 Measurement Block Diagram.

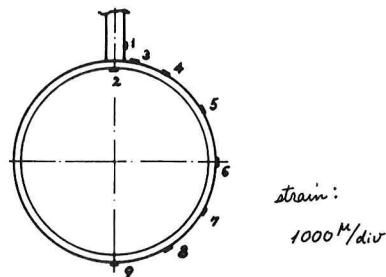


Span Length	l = 100 cm
Elastic Rod	l = 50 cm
	φ = 30 mm
Drop Weight	W = 1.9 Kg
	d = 25 cm
Acryl resin	E = 30000 Kg/cm ²
	= 0.38
	= 1.18 g/cm ³

Fig. 2 Specification of the cylinder and elastic rod.

3. 実験結果

図-3にスパン中央部断面各点の軸方向歪の時刻歴を示している。ゲージ番号①は入力波様知用丸棒の入力波形を、②は載荷点直下の円筒体内表面の応答歪波形を示し、③~⑨は外表面各点の応答歪波形を示している。図より、本実験における衝撃荷重の載荷時間は6 msec前後であることがわかる。円筒体の応答歪波形は衝撃初期にかなり局所的状態となっており、荷重除荷後徐々に自由振動状態に移行して行くようである。最大応答歪は無限梁同衝撃初期に生じており、載荷点直下で約2000μstrainとなっている。また特に③と⑨を調べると、衝撃の初期にのみ、自由振動状態に移行後も波形の位相が等しくなっており、梁としての下用よりも断面変形作用が卓越していることが明かとなる。さらに詳細に検討すると、軸方向、周方向ともほぼせん断速度(約1000 m/sec)前後で振動が伝播していることが明かとなった。



4. 理論解析

円筒体、衝撃応答解析法には、軸対称シェル構造の解析にも応用可能なコンカルシェル要素を要素とする有限帯域法を用いる方法や、微分方程式を直接解く方法などが考えられるが、ここでは、円筒体を多角形に分解して矩形要素を要素とする有限帯域法を用いて解析を試みるものとする。

図-4に示すような任意の薄板要素において、局所座標系をx-y-z, 対応する変位をu, v, w, 回転角をθ, 時間をtとする。要素内のx方向の変位分布は、面内変形に関しては線形変化を、面外変形に関しては3次放物線変化を仮定する。

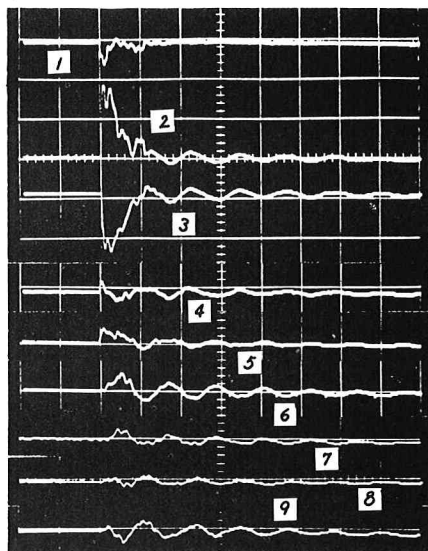


図-3 スパン中央部の各点の軸方向歪の時刻歴

面内変形に関して：

u, v は i, j 点の変位を $u_k, v_k (k=i, j)$ とおき、さらに試験関数を $u^{(k)}, v^{(k)}$ とおくと

$$u = u^{(i)} u_i + u^{(j)} u_j \quad \dots (1)$$

$$v = v^{(i)} v_i + v^{(j)} v_j \quad \dots (2)$$

ただし、 $\eta = y/b_i$ とすると $u^{(k)}, v^{(k)}$ は

$$u^{(i)} = v^{(i)} = 1 - \eta \quad \dots (3)$$

$$u^{(j)} = v^{(j)} = \eta \quad \dots (4)$$

である。 x, y 方向の直応力を σ_x, σ_y とし、せん断力を τ_{xy} とする。

二次元弾性論に基づく x, y 方向の力の釣合の式に慣性項を考慮しさらに式(3), (4)を用いてガラーキン法を適用すると、

$$\int_0^{b_i} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) u^{(k)} dy = 0 \quad \dots (5) \quad \int_0^{b_i} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) v^{(k)} dy = 0 \quad \dots (6)$$

ただし、 $k=i, j$ である。式(5), (6)に Hooke の法則に基づく応力と変位の関係式を代入して部分積分を施し、境界条件に留意して整理すると帯板要素の面内変形に関する境界応力は全て境界変位の関数で x, t に関する2階の線形連立偏微分方程式の形として示される。

面外変形に関して：

w, θ は面内変形の場合と同様に $w_k, \theta_k (k=i, j)$ とおくと w は次のように示される。

$$w = w^{(i)} w_i + w^{(j)} w_j + \theta^{(i)} \theta_i + \theta^{(j)} \theta_j \quad \dots (7)$$

ただし、試験関数は次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} w^{(i)} &= 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3, & \theta^{(i)} &= b_i (7 - 2\eta^2 + 3\eta^3) \\ w^{(j)} &= 3\eta^2 - 2\eta^3, & \theta^{(j)} &= b_i (-\eta^2 + \eta^3) \end{aligned} \right\} \quad \dots (8)$$

面外変形に関する動的基礎微分方程式に式(8)を用いてガラーキン法を適用すると、

$$\int_0^{b_i} \left\{ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right\} w^{(k)} dy = 0 \quad \dots (9)$$

$$\int_0^{b_i} \left\{ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right\} \theta^{(k)} dy = 0 \quad \dots (10)$$

上式(9)(10)にキルヒホッフ-ラブの仮定に基づく断面力と曲率の関係式を考慮に入れて部分積分を施し整理すると、 x に関して4階、 t に関して2階の線形連立偏微分方程式が得られる。

面内、面外変形の線形連立偏微分方程式において、式(5)から求まる方程式に関しては cosine、式(6), (9), (10)から求まる方程式に関しては Sine の有限 Fourier 変換を施す。境界条件に注意して整理すると次のような剛性マトリックスが得られる。

$$[K] \{ \bar{S}_m[\delta] \} + [M] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{ \bar{S}_m[\delta] \} = \{ \bar{S}_m[f] \} \quad \dots (11)$$

ここで $[K], [M]$ はそれぞれ剛性マトリックス、質量マトリックスであり、 $\{ \bar{S}_m[\delta] \}, \{ \bar{S}_m[f] \}$ はそれぞれ

$$\{ \bar{S}_m[\delta] \} = [C_m[u_i] \quad S_m[v_i] \quad S_m[w_i] \quad S_m[\theta_i] \quad C_m[u_j] \quad S_m[v_j] \quad S_m[w_j] \quad S_m[\theta_j]]^T$$

$$\{ \bar{S}_m[f] \} = [C_m[T_i] \quad S_m[S_i] \quad S_m[Q_i] \quad S_m[M_i] \quad C_m[T_j] \quad S_m[S_j] \quad S_m[Q_j] \quad S_m[M_j]]^T$$

ただし $T = h \tau_{xy}$, $S = h \sigma_y$ である。

以上より帯板要素の動的関係式が示されたが、構造全体の動的剛性マトリックスはこれを全体座標系へ変換しなければならない。座標変換マトリックスを $[T]$ とすると、構造全体の動的関係式は、

$$\{K_{st}\}\{\bar{S}_m[\Delta_{st}]\} + [M_{st}]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\bar{S}_m[\Delta_{st}]\} = \{\bar{S}_m[F_{st}]\} \quad \dots (12)$$

ただし、 $\{\bar{S}_m[\Delta]\} = [T]\{\bar{S}_m[\delta]\}$, $\{\bar{S}_m[F]\} = [T]\{\bar{S}_m[f]\}$

$$[K] = [T][K][T]^T, \quad [M] = [T][M][T]^T$$

式(12)において、荷重項を零として固有値、固有ベクトルを求め、モードマトリックスを $[\phi]$ とし、規範関数ベクトル $\{S_m[\psi]\}$ を導入すると $\{S_m[\Delta_{st}]\}$ は

$$\{\bar{S}_m[\Delta_{st}]\} = [\phi]\{S_m[\psi]\} \quad \dots (13)$$

式(13)を式(12)に代入して直交関係を考慮し、さらに比例減衰を考慮に入れると、 n 番目の固有値 ω_n に対しては、

$$S_m[\ddot{\psi}_n] + 2\omega_n\eta_n S_m[\dot{\psi}_n] + \omega_n^2 S_m[\psi_n] = P_n/M_n \quad \dots (14)$$

ただし、 $\eta_n = \frac{1}{2}(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta\omega_n)$, $M_n = \{\phi_n\}^T [M_{st}] \{\phi_n\}$, $P_n = \{\phi_n\}^T \{S_m[F_{st}]\}$

であり、 $\frac{\partial}{\partial t}$ は $\frac{\partial}{\partial t}$ を意味するものとする。

$S_m[\psi_n]$ は式(14)をDuhammel積分することにより求め、これを式(13)に代入すると $\{\bar{S}_m[\Delta_{st}]\}$ が求まる。従って $\{\Delta_{st}\}$ はこれを X 方向に逆変換すればよい。変位が求まれば、断面力も容易に求めることができる。

5. 実験結果と理論解析結果の比較

解析は円筒を38等分割にし、入力波形を三角形分布に近似してFourier級数の項数を $m=51$ 項まで考慮して考慮して行った。図-5に各時間におけるスパン中央部外表面周方向歪の分布図を示しているが、3でも示しているように断面変形作用が卓越している状態が明確に示されている。理論解析結果は $t=4.0$ msec前後より実験値との間にモード的な差が生じているが、衝撃初期には実験結果をよく近似しているものと考えられる。

6. 参考文献

1) 4th Smirt session J7., Missile impact and transit loads., 1977. 2) H. Takano,

et al., On dynamic behavior of beams with rectangular cross section under impact load., J.N.C.T.

M. Vol. 28 (1980). 3) H.

Takano, et al., On the

bending impulse of simple

supported composite beams.

J.N.C.T.M. Vol. 29 (1981).

4) H. Takano, et al., The

dynamic response of arches

under impact load., J.N.C.

T.M. Vol. 30 (1981)

5) H. Takano, N. Kishi, et

al., The dynamic response

of plate with two ribs un-

der impact load., Memoirs

of the Muroran Institute

of technology Vol. 10,

No. 4, Nov., (1982)

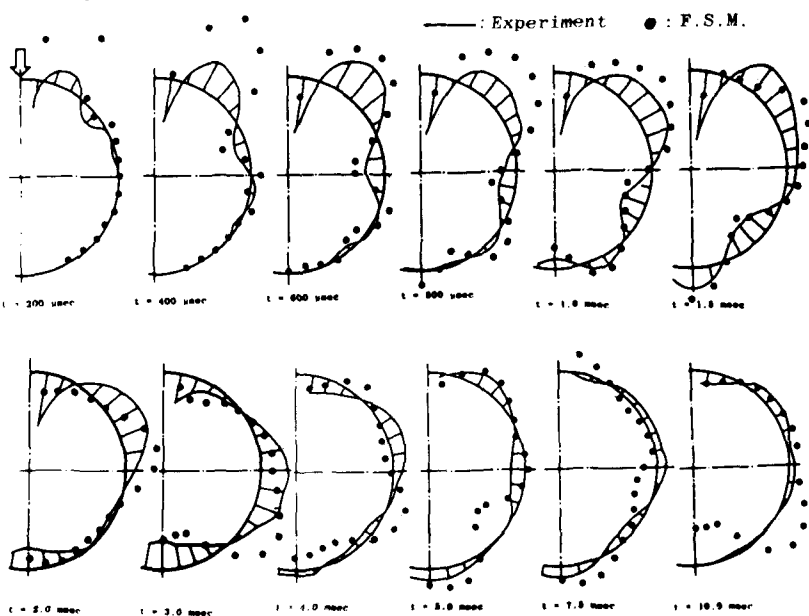


図-5. 衝撃荷重載荷後の各時間におけるスパン中央部外表面周方向歪の分布図。