非線形ばねの緩衝特性の検討*
(海底光中継器用緩衝体の設計)

角 田 正 豊**, 中 村 信 二**

Shock Isolation Using a Non-linear Spring
(Design of Shock Absorber for Submarine Optical Repeaters)

by Masatoyo SUMIDA and Shinji NAKAMURA

This paper studied characteristics of a shock absorber using a non-linear spring. The theoretical results were in good agreement with the experimental ones and the validity of the present analysis was confirmed. This paper developed a relationship between shock isolation performance and the absorber's dimensions and viscosity. The performance is mainly determined by the dimension along the direction of the shock acceleration struck. This dimension has a lower limit, above which the absorber meets performance requirements. This limit decreases as viscosity increases. The results of the present analysis were applied to design a absorber for a submarine optical repeater. Cable laying experiments were conducted to measure shocks struck on the repeaters in laying process.

Key Words: Shock Isolation, Shock Absorber, Non-linear, Non-linear Spring, Submarine Optical repeater

1. ま え が き

光ファイバを用いた海底ケーブル伝送方式には、中継間隔および伝送容量の増大など多くの利点があるため、各国で研究実用化が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。光中継器には、サブミクロンの光軸合せ精度が要求される光部品が使用されており⁽³⁾、また、実装される電子部品点数も非常に多くなっている。このため、布設時の船体との衝突などによる衝撃から中継器回路を保護することは、海底光ケーブル方式の実用化において、重要な研究課題のひとつになっている。

海底中継器には20年以上の高信頼性が要求されるので使用される電子部品の信頼度を向上するため、緩衝体の設計においては、放熱性の良いことが重要な要求条件である。この放熱性の改善に加え、中継器きょう体の収納容積を大きくすることからも、緩衝体の厚みを薄くすることが必要である。しかし、緩衝体が薄くなるに従って、衝撃時の緩衝体のひずみが大きくなり、非線形効果が顕著になってくる。したがって、海底光中継器用緩衝体の設計においては、非線形効果を

考慮して緩衝体の特性を検討しなければならない。

非線形な緩衝体に関する従来の報告では、被緩衝物の時間応答性といった現象的な検討にかぎられており設計法等詳細な検討は行われていない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本論文では、非線形ばねの緩衝特性について解析し、海底光中継器のように緩衝体が大変形を強いられる場合の緩衝体の設計法の検討を行う。

2. 理 論 検 討

2.1 運動方程式 非線形ばねの緩衝特性を理論的に検討するため、図1に示すばねとダッシュポットが並列に組合わされた力学モデルを考える。質点と基盤の変位を、それぞれ、 x と x_0 とすると、本モデルの運動方程式は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta\omega\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) + \omega^2\{(x-x_0) + \alpha(x-x_0)^3\} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで、 $\omega^2 = k/m$ 、 $\delta = \eta/2m\omega$ であり、 m は質点の質量、 η はダッシュポットの粘性係数である。対称性を考慮して、復元力は変位の一次と三次で展開した。ゴムなど一般に使用されている緩衝体は硬化形の非線形性を有しているの、以下では $\alpha > 0$ とする。また、粘性係数 η には非線形性がないものとし

* 昭和59年7月9日 第925回講演会において講演、原稿受付 昭和59年2月2日。

** 正員、日本電信電話公社 (〒238 横須賀市武1-2356)。

た。

外力として、基盤が式(2)で表されるような正弦半波状の衝撃加速度運動を行うものとする。

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = a \sin \omega_0 t, \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega_0} \quad (2)$$

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} = 0, \quad \frac{\pi}{\omega_0} < t$$

力学モデルの固有振動数 ω と基盤の衝撃値 a を代表値として、以下のように無次元化を行う。

$$x = \frac{a}{\omega^2} \bar{x}, \quad x_0 = \frac{a}{\omega^2} \bar{x}_0$$

$$t = \frac{1}{\omega} \bar{t} \quad \alpha = \left(\frac{\omega^2}{a} \right)^2 \bar{a} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \omega Q$$

式(1)～(3)より、無次元化運動方程式

$$\frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{t}^2} + 2\delta \left(\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} - \frac{d\bar{x}_0}{d\bar{t}} \right) + (\bar{x} - \bar{x}_0) + \bar{\alpha} (\bar{x} - \bar{x}_0)^3 = 0 \quad (4)$$

と、無次元化境界条件

$$\frac{d^2 \bar{x}_0}{d\bar{t}^2} = \sin Q \bar{t} \quad \text{for } 0 \leq \bar{t} \leq \frac{\pi}{Q} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 \bar{x}_0}{d\bar{t}^2} = 0 \quad \text{for } \frac{\pi}{Q} < \bar{t}$$

が得られる。したがって、式(2)に示される外力を受ける場合の図1の力学モデルの運動特性は、 $\bar{\alpha}$ 、 Q と δ の3値で決定されることがわかる。特に、 $\bar{\alpha}$ は力学系の非線形性を表すパラメータであり、緩衝体のもつ非線形項 α と外力の衝撃加速度値 a の増加とともに、大きくなる。

2・2 計算結果 質点の時間応答を図2に示す。時間軸は衝撃作用時間 π/Q で規格化し、衝撃開始時間を原点とした。加速度は衝撃値 a で無次元化した。計算条件は、 $Q=1.0$ 、 $\delta=0.05$ であり、 $\bar{\alpha}$ は 0, 1, 10 とした。非線形パラメータ $\bar{\alpha}$ の増加とともに、質点加速度の立ち上がりが急しゅんになり、また、衝撃比、すなわち $d^2 \bar{x} / d\bar{t}^2$ の最大値も増加している。

衝撃比と Q の関係を図3に示す。 δ は 0.05 とし、 $\bar{\alpha}$ は、0 0.5 2.5 とした。 $\bar{\alpha}$ の増加とともに、共振点が Q の大きいほうへ移動している。このこと、および図2の応答の急しゅん化は、硬化形の非線形性のためばね定数が実質的に増加したことが原因である。図2と図3に示された衝撃比の増加は、硬化形の非線形性によりばねの変形が大きくなると、いわゆる「底付状態」になるためである。図3の共振点の左側の小さな山は、質点が系の固有振動数で基盤運動に追従するためである。

3. 緩衝体の設計指針

緩衝体の衝撃方向の代表値を d 、衝撃方向に垂直な代表面積を S とする。変形力 F と変位 x の関係は、

$$\frac{F}{S} = \gamma \left\{ \frac{x}{d} + \frac{d}{dt} \left(\frac{x}{d} \right) \right\} \quad (6)$$

で表される。ひずみ x/d の三次、ひずみ速度 $(d/dt) \cdot (x/d)$ の一次までで展開して、

$$F = SK_1 \left\{ \frac{x}{d} + K_2 \left(\frac{x}{d} \right)^3 \right\} + \eta' \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

となる。ここで、 K_1 、 K_2 および η' は、緩衝体の材質と形状から決まる定数である。式(1)、(3)、(7)より、

図1 力学モデル

図2 質点の時間応答

図3 衝撃比の周波数特性

$$\bar{a} = K_2 \left(\frac{am}{K_1} \right)^2 \frac{1}{S^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$Q = \omega_0 \sqrt{\frac{m}{K_1}} \cdot \sqrt{\frac{d}{S}}$$

となる。式(8)から S を消去して

$$Q = \frac{\omega_0}{\sqrt{a}} \frac{1}{(K_2)^{1/4}} \sqrt{d} \bar{a}^{1/4} = A \bar{a}^{1/4} \dots\dots\dots (9)$$

となり、 Q と $\bar{a}$ には、 $Q \propto \bar{a}^{1/4}$ の関係がある。

衝撃比が1となる Q と $\bar{a}$ の関係を、 $Q = Q(\bar{a}) = Q\bar{a}$ として、図4に破線で示す。 δ は0.05とした。 $Q > Q\bar{a}$ の領域で衝撃比は、1以下になっている。 $Q\bar{a}$ は $\bar{a}$ の増加関数であるので、非線形性を無視して、 $Q > Q_0$ となるように緩衝体を設計すると、実際に得られる緩衝効果は設計値以下のものになる。したがって、海底光中継器のように大変形が予想される緩衝体の設計においては、非線形効果を考慮して設計することは重要なことである。

式(9)の曲線群を図4に実線で示す。曲線のパラメータ $A = \omega_0 \sqrt{d} / \sqrt{a} / (K_2)^{1/4}$ は、緩衝体の形状・材質、衝撃値および d で決まる値である。 S の減少に従って、力学モデルの状態は実線上を右側に移動する。 d の増加に伴って、モデルの状態はパラメータ A の大きな実線すなわち、上方の実線に移動する。 $\bar{a}$ が小さな範囲では、実線と破線は交点をもつが、 $\bar{a}$ が大きくなると両者はほぼ平行になっている。このことから、加わる衝撃が小さい場合には、 S を小さくすることによっても緩衝効果を得ることができるが、衝撃が大きくなると、 S を変えても緩衝効果にほとんど改善がみられないことがわかる。したがって、 $\bar{a}$ が大きい場合に緩衝効果を得るためには、 A がある値 A_{cr} 以上になるように、緩衝体を設計しなければならないことが示された。式(9)より

$$d = \frac{a}{\omega_0^2} \sqrt{K_2 \cdot A_{cr}} \dots\dots\dots (10)$$

図4 緩衝体の特性

であり、 d に下限値が存在し、したがって、緩衝体の厚みを任意に薄くできないことがわかる。衝撃値 a および非線形項 K_2 が大きくなると、 d の下限値も大きくなる。一方、線形性を仮定した従来の設計では、 $Q > Q_0$ となるように比 d/S を決めてやればよいので、 d と S は設計上対等なパラメータである。

粘性の影響を調べるため、種々の δ の値での衝撃比を1にする Q と $\bar{a}$ の関係を図5に示す。 δ が大きくなるに従って、衝撃比1の曲線は Q の小さいほうへ平行移動している。したがって、粘性の大きな材質を使用すると、 A_{cr} が小さくなり、緩衝体の厚みを薄くできることがわかる。

4. 布 設 実 験

4.1 海底光中継器の構造 図6に海底光中継器の基本構造を示す。中継器は、中継器回路が収納されている耐圧きょう体、および、両端のケーブル引留装置から構成されている。中継器回路を振動・衝撃から

図5 粘性の影響

図6 海底光中継器の概要

図7 衝撃測定装置の構成

保護するため、耐圧きょう体と中継器回路の間にゴムクッションが配置されている。光ケーブルから出た光ファイバは、耐圧きょう体のカバーに設けられたフィードスルを通して、中継器回路に接続されている。

4・2 衝撃測定装置 布設時に中継器耐圧きょう体に加わる衝撃を測定するため、きょう体内に搭載できる衝撃測定装置を試作した。測定装置のブロックダイアグラムを図7に示す。加速度計はZ軸が耐圧きょう体の軸方向に一致するように、図6のM点に取付けられている。オペアンプを用いて加速度計のX軸・Y軸出力より、きょう体の半径方向の衝撃を演算し、軸方向衝撃とともに、ステレオテープコードに記録されるようになっている。

本衝撃測定装置の周波数特性を図8に示す。加速度計に正弦波振動を加え録音後、再生信号を選択レベルメータで測定し、周波数特性を求めた。150～2 000 Hzの間でほぼフラットであり、60～2 000 Hzの範囲の測定が可能ながわかる。測定衝撃値のダイナミックレンジは、5～100 Gである。

4・3 布設実験結果 ケーブル敷設船黒潮丸(3 400 t)を用いて布設実験を実施した。実験の概要を図9に示す。ケーブルタンクに収納された海底中継器およびケーブルは、ドラム式布設機によってけん引され、ベ

ルマウス、布設機を通過後、船首または船尾シーブより、海底に布設される。

船首布設の場合に中継器耐圧きょう体に加わる衝撃加速度値を、布設工程に従って図10に示す。またドラム布設機衝突時の衝撃波形を図11に示す。船首・船尾各3回行った今回の実験で観測された衝撃最大値は40 Gであった。衝撃の作用時間は、いずれも5 ms以下のものであった。

5. 海底光中継器の緩衝設計

図6からわかるように、中継器きょう体の主要な放熱経路はきょう体の半径方向であるので、緩衝体の設計において軸方向の放熱特性を特に考慮する必要はない。故に、軸方向に対しては、非線形効果を十分無視できる程度まで緩衝体を厚くできるので、この方向については従来の手法で緩衝体を設計することが可能である。以下では、半径方向の緩衝特性についてのみ検討する。

中継器回路の耐衝撃規格が50 Gであるので、布設実験結果を考慮すると、作用時間5 ms以下(100 Hz以上)で50 G以下の衝撃に対して、衝撃比を1以下にすることが、緩衝体に要求される。

5・1 ゴムクッションの機械的性質 予備試作し

図8 衝撃測定装置の周波数特性

図10 布設時に加わる衝撃(例)

図9 布設実験の概要

図11 衝撃波形の一例

た緩衝体(ゴムクッション)の形状を図12に示す。放熱性を良くするため、材質にはAl粉末入クロロプレンゴム⁽⁶⁾を使用した。緩衝体の代表値 d と S を、それぞれ、厚み D と $l \times 2R$ とする。予備試作では、 $d=8$ mm, $S=40$ mm $\times$ 176 mm $=7$ 040 mm²である。耐圧きよう体内で、中継器回路を半径方向に動かすことにより、緩衝体の変位・荷重曲線を求めた。結果は図13に示されるように硬化形の非線形性を有している。最小二乗法で係数 K_1 と K_2 を求めると、硬度50°で、それぞれ、2.2と5.2 N/mm² また硬度60°の場合には、それぞれ、3.1と4.1 N/mm²であった。

5.2 検証実験 理論解析結果を検証するため、海底中継器を用いた衝撃緩衝実験を行った。実験では外径160 mm、長さ500 mm、質量20 kgの鉄円筒を中継器回路の代わりに使用した。耐圧きよう体をゴム板に自由落下させて、ほぼ正弦半波の衝撃加速度を耐圧きよう体に印加した。ゴム板の厚みを調整して衝撃作用時間を変化させた。耐圧きよう体および円筒に加わった衝撃加速度を測定し、衝撃加速度比(円筒/耐圧きよう体)を求めた。

作用時間4.5 msの時の、衝撃比に対する非線形性の影響を図14に示す。硬度50°と60°の理論値を、それぞれ、破線と実線で示す。また、これらの実験値をそれぞれ、白丸印と黒丸印で示す。 Q の値はゴム硬度50°と60°で、それぞれ、1.73と1.47である。 δ は0.2として計算した。 $\bar{\alpha}$ が大きくなるに従って、衝撃比は増加しており、 $\bar{\alpha}=10$ では、非線形性を無視した場合($\bar{\alpha}=0$)の2倍になっている。硬度60°のゴムを使用し

図12 緩衝体の形状

図13 緩衝体の変位・荷重曲線

て、衝撃作用時間を変えた時の $\bar{\alpha}$ と衝撃比の関係を図15に示す。 Q は作用時間2.5, 6.5, 14.5 msに応じて、それぞれ、2.10, 0.91, 0.41となる。

図14, 15に示されるように、理論値と実験値は良く一致しており、本理論検討結果を海底光中継器の緩衝体の設計に適用できることが確認された。

5.3 緩衝体の設計 緩衝に対する要求条件を満足する緩衝体(ゴム硬度50°)の厚み D と長さ l の範囲を、図16に斜線で示す。なお、中継器回路の重量は30 kgとした。一方、線形ばねの場合には、この範囲は図16の破線より下の領域になる。非線形効果のため、線形性を仮定した従来の設計値よりも、実際にはより安全サイドに設計してやる必要があることがわかる。線形ばねと非線形ばねとの設計値の差は、厚み D が薄くなるに従って、より顕著になっている。したがって、海底光中継器のように薄厚の緩衝体が要求される場合は特に、非線形性を考慮して設計することが不可欠である。また、厚みの薄い範囲(図16では、 $D < 8$ mm)では、長さ l を変化させても緩衝特性にあまり影響がなく、この領域では、主として厚みによって緩衝特性

図14 非線形効果による衝撃比の増加

図15 非線形効果による衝撃比の増加

図 16 緩衝体の設計

が決定されることがわかる。

放熱性の点からは、厚み D を薄くし、かつ、長さ l を長くしてやる必要がある。緩衝体の製作性および装着性を考慮にいと、 $D=10$ mm, $l=40$ mm の付近にするのがよいと思われる。

6. ま と め

硬化形の非線形性をもつ緩衝体の特性の理論検討を行い、緩衝体の寸法および物理定数と緩衝効果の関係を明らかにし、非線形緩衝体に対して、以下の設計指針を得た。

(1) 硬化形の非線形性のため、加わる衝撃が大きくなるに従って、緩衝体を介して伝達される衝撃は、立ち上がりが急しゅんになり、また、衝撃値も増大する。このため、線形性を仮定した従来の設計値に比べ、より安全サイドの設計が必要となる。

(2) 加わる衝撃が大きい場合や、緩衝体の衝撃方向の厚みを薄くする必要がある場合に、非線形効果が

顕著になり、緩衝体の特性は、主として衝撃方向の厚みで決定される。したがって、要求される緩衝効果を得るためには、緩衝体の厚みをある値以上にしなければならない。

(3) 上記の緩衝体厚みの下限値は、緩衝体の粘性係数が大きくなると、減少する。故に、粘性の大きな材質を使用すれば、緩衝体の厚みを薄くすることができる。

海底光中継器の緩衝実験を行った。理論値と実験値は良く一致しており、本論文の検討結果を海底光中継器の緩衝体設計に適用できることを確認した。本検討結果に基づき、海底光中継器用緩衝体の設計を行い、要求条件を満足する緩衝体の厚みと長さの関係を導出した。厚みが薄くなるに従って、本検討の設計値と線形性を仮定した従来の設計値との差異が大きくなり、故に、厚みを薄くすることが要求される場合には、非線形性を考慮した設計が不可欠であることが明らかとなった。

終わりに、本研究を進めるにあたり貴重なご助言を頂いた日本電信電話公社横須賀研究所 北沢調査員、茨城研究所 森光調査役に深謝いたします。また、日ごろご指導いただく吹抜海洋通信研究室長に感謝の意を表します。布設実験でご協力頂いた黒潮丸の各位にお礼申し上げます。

文 献

- (1) Washio, M., ほか 3 名, *Proc. 8th ECOC*, (1982), 472.
- (2) Wagner, R., ほか 2 名, *Proc. 4th IOOC* (1983), 29A4-1.
- (3) Sumida, M., *Proc. 4th Topical Meet. GI Imaging System*, (1983).
- (4) Harris, C. M., *Shock and Vibration Hand Book*, (1961), chap. 31, McGraw-Hill.
- (5) Snowdon, J. C., *Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems*, (1968), chap. 14, John Wiley & Sons.
- (6) 森光・ほか 2 名, 電子通信学会技報, CS-80-117, (昭 55).