弾塑性型配管支持装置の配管系への適用に関する研究*
(第 1 報, 単体特性試験および配管系の振動特性試験)浪田 芳 郎*¹, 重 田 政 之*¹, 川 畑 淳 一*²
好 永 俊 昭*², 後 藤 伸 穂*²,Study on the Application Elasto-Plastic Support Device for A Piping System
(1st Report, Device Test and Vibration Test of Piping System)Yoshio NAMITA, Masayuki SHIGETA, Toshiaki YOSHINAGA,
Nobuho GOTOO, and Junichi KAWAHATA

Mechanical snubbers have often been used as supports for the piping in nuclear plants, but, recently the elasto-plastic-type piping support devices (named energy absorbers), which are low-cost and maintenance-free, are planned for use instead of snubbers. Under these circumstances, to establish the concept of the piping design method using the elasto-plastic-type piping support devices, device test and vibration test of the piping system supported by elasto-plastic devices were performed. By the results of these tests, we confirmed the following items: (1) The evaluation formulas for the force-displacement relation and the dissipated energy of devices were established and considered to be reasonable in comparison with the test results. (2) In the case of the piping system investigated, the maximum damping ratio is about 10%.

Key Words: Piping System, Mechanical Snubber, Elasto-plastic, Energy Absorber, Vibration Test

1. 緒 言

従来, 原子力プラントにおいて配管支持装置として用いられてきたメカニカル方式およびオイル方式スナッパ(以下, スナッパと記す)は, 配管の熱伸びによる荷重は逃がし, 地震等の急激な荷重に対しては, 配管を剛に固定する機能を有している。しかし, この機能を持たせるために, スナッパは構造が複雑となり, メンテナンス面, コスト面および信頼性において改良の余地があった。

近年, 機器, 配管系を支持装置により系全体を剛に設計する剛設計手法から, 支持構造の設計においては地震応力および熱応力など他の応力と適切なバランスをとった合理的な設計へと設計手法を変更するための検討が行われている。そのような流れの中で, スナッパの代替として, 部材の弾塑性特性を利用した弾塑性型配管支持装置(以下, エネルギーアブソーバと記す)が注目されるようになってきた。弾塑性型配管支持装置を用いた配管系の振動試験は米国の EPRI(Electric

Power Research Institute)とベクテル社が共同でカルフォルニア大学で行った試験⁽¹⁾および東京都立大学の鈴木が同じくカルフォルニア大学で行った検討⁽²⁾⁽³⁾等が挙げられる。しかし, 日本においては部材を塑性域まで用いるという概念は研究レベルの話に留まっていた。今回用いたエネルギーアブソーバは米国ベクテル社が開発した概念を発展させたもので, 実機配管でも使用可能な構造となっている。本報ではエネルギーアブソーバ単体の特性および支持配管系の応答を実験的に検討したので, その結果を報告する。

2. 試 験 方 法

2・1 支持装置単体試験

2・1・1 試験体 エネルギーアブソーバ単体の試験体としては 4 種類について行った。図 1 にケースには型番 EA 2 S 3 を用い, 内部の塑性変形する X 形状プレートを 4 枚用いたエネルギーアブソーバを示す。この他に, ケースに型番 EA 2 S 3 を用い, X 形状プレートを 2 枚用いたものとケースに型番 EA 3 S 4 を用い, X 形状プレートを 1 枚もしくは 2 枚用いた三つの試験体がある。ケースの型番 EA 2 S 3 と EA 3 S 4 の違いは, 内部の X 形状プレートの一つの三角形の底

* 昭和 63 年 8 月 26 日 東北支部米沢地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 63 年 3 月 2 日。

*¹ 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町 502)。

*² 正員, (株)日立製作所日立工場 (〒317 日立市幸町 3-1-1)。

辺と高さ、および板厚が25 mm, 25 mm, 5 mm か、38 mm, 38 mm, 6 mm か、の違いによる。今後、エネルギーアブソーバの種類はケースの型番で表し、型番の後の一の後の数字はそれぞれのケース内のX形状プレートの枚数を示すこととする。

2・1・2 試験方法 試験体としては2・1・1項で述べた四つの試験体を用い、試験項目としては振動応答試験および静的応答試験を行った。振動応答試験では、振動試験機に両端ピン結合の状態試験体を取付け、加振周波数を3 Hz, 5 Hz, 10 Hzに設定して、片振幅が10 mmまで加振した。なお、高い加振周波数では振動試験機の性能から加振できない変位があった。測定方法としては、変位と荷重のリサージュ図を記録、測定する。また、この時の発生するメカニカルギャップも合わせて記録測定する。

静的応答試験では、振動試験機に両端ピン結合の状態試験体を取付け、試験機ピストン速度を0.1 cm/s程度に設定し、徐々に変位させ、最大片振幅20 mmまで変形させる。測定方法としては、設定された試験機ピストン速度の場合の変位と荷重を記録、測定する。振動試験機への取付け方法および計測フローチャートを図2に示す。

2・2 支持配管系の振動特性試験

2・2・1 試験体 試験に用いた配管系は図3に示す原子力プラント実機配管系のモデルである。振動台

の大きさの制約から1/4の縮尺モデルを用いた。また、実機と同等な系の固有値とするために、付加質量を系に付加した。振動台上の配管系やサポートの支持架台は、すべての支持点において配管系と動的に連成しないように十分に剛にした。また、配管系はすべての試験について水で満たした。

試験体としては、上記の配管系をスナッチで支持したスナッチモデルとエネルギーアブソーバで支持したアブソーバモデルの2種類とした。

2・2・2 試験方法 試験方法としては、上記のスナッチモデルおよびアブソーバモデルを振動台上に設置し、地震波で加振して、配管の主要点の応答加速度、応力、変位、反力を測定した。振動台の入力として用いた地震波は、原子力プラントのタービン建屋のスウェイロッキングモデルに通産省改良標準化のS1人工地震波を入力した場合のモデル対象配管系相当位置での応答波である。図4にS1地震応答波の時刻歴波形と応答スペクトルを示す。加振レベルとしては、S1地震応答波の加速度振幅(229 Gal)の0.5倍から2.5

図1 エネルギーアブソーバの構造

図2 単体試験方法

図3 試験体

(1) Acc. Wave Time History

(2) Acc. Response Spectrum

図4 入力地震波

倍までの加振を行った。また、加振方向は X 方向, Z 方向各単独で行った。

3. 試験結果

3.1 支持装置単体試験

3.1.1 力-変位関係 図5に X 形状プレートの諸元を示す。弾性域, 塑性域における力-変位関係は次式のようになる。

(1) 弾性域

$$F = \frac{Ebt^3n}{12a^3}d, \quad K = \frac{Ebt^3n}{12a^3} \quad \dots\dots\dots(1)$$

(2) 塑性域

$$F = \frac{3}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{d_y}{d} \right)^2 \right\} F_y \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$F_y = \frac{\sigma_y t^2}{6} \frac{b}{a} n \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$d_y = \frac{2\sigma_y a^2}{Et} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで,

E : 縦弾性係数

F_y : 降伏力

d_y : 降伏変位

σ_y : 降伏応力

n : X 形状プレートの枚数

図6に X 形状プレートの力-変位特性の実験値と計算値の比較を示す。 X 形状プレートの力-変位特性で平板の枚数が増すに従って, 変位が増加しても反力が減少する部分が顕著に現れるなど, 計算結果との相違点が見られるが, 定性的にはよく一致している。

3.1.2 消散エネルギー特性 X 形状プレートの力-変位履歴ループは以下の仮定に基づくものとする。

(1) 弾性域 ($|F/F_y| < 1.0$) 载荷, 除荷時において, 変位-力関係は式(1)で与えられる。

(2) 塑性域 ($|F/F_y| > 1.0$) 载荷時の力-変位関係は式(2)~式(4)で与えられる。

(3) 塑性域での除荷時の剛性は, 弾性域のそれに等しい。

(4) 正と負の降伏力は同一である。

図7に力-変位履歴ループを示す。消散エネルギーは1サイクルにおける履歴ループの囲む面積で与えられる。1サイクルでの消散エネルギー E_n は次式で与えられる。

$$E_n = 3F_y(d + d_1) + \frac{d_y^2 F_y}{d + d_1} - 3d_y F_y - \frac{F_y^2}{K} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで d_1 は履歴ループが定常状態となった場合のループと変位軸との交点の原点からの距離である。

図8に1サイクル中の消散エネルギー-変位特性の実験値と計算値の比較を示す。実験値は加振周波数5 Hz の場合の値を用いた。計算値が実験値を上回る結果となっているが, これは力-変位履歴ループの理論計算における仮定に検討の余地があることを示している。

3.2 支持配管系の振動特性試験

3.2.1 地震波加振試験 図9にスナッチモデルとアブソーバモデルの配管系を地震波で X 方向に加振した時の各部の最大応答加速度の比較を示す。アブソーバモデルの場合は応答加速度が飽和する現象が見

図6 力-変位特性 (EA2S3)

図5 X 形状プレート諸元

図7 力-変位履歴ループ

図8 消散エネルギー-変位特性 (EA2S3)

図10 減衰比-応答変位特性 (A13X)

図9 応答加速度-入力加速度特性 (X 方向加振)

られる。それは、エネルギーアブソーバの X 形状プレートが 1.0 S 1 波加振レベルで塑性域まで変形したため、アブソーバ部での消散エネルギーが増大し配管系としての減衰が大きくなって、応答加速度が飽和したものと考えられる。また、応力については、応答変位が大きくなるため、アブソーバモデルのほうがスナッパモデルより大きくなっている。

図 10 に AR 法⁽⁴⁾により同定した地震波加振の場合のアブソーバモデルの代表点 (A13X) の伝達関数より求めた減衰比-応答変位特性を示す。横軸の応答変位は、地震波の各加振レベル (0.5 S 1 ~ 2.5 S 1) におけるエネルギーアブソーバの変位 D 4 の値とする。減衰比特性については、1.0 S 1 加振を境としてエネルギーアブソーバが塑性域に入るため減衰比が急激に増加し、その後飽和する特性を示す。また、減衰比として

は最大 10% 程度の値となる。しかし、高次の振動モードにおいては減衰比が加振レベルによらず一定の場合がある。これは高次モードにおいて、エネルギーアブソーバ取付点が節となるような振動モードが存在するためと考えられる。

4. 結 言

エネルギーアブソーバ単体の応答試験およびエネルギーアブソーバ支持配管系の振動台での加振を行い、以下の結論を得た。

- (1) 力-変位関係、消散エネルギーの評価式を導入し、実験値と比較して、その妥当性を確認した。
- (2) エネルギーアブソーバ支持の配管系はスナッパ支持の配管系に比べて、応答加速度、反力は減少させることができるが、応答変位、応力は増大する。
- (3) 実験を行った配管系で、最大 10% 程度のモード減衰比が期待できる。
- (4) エネルギーアブソーバの取付位置が節となるような振動モードは、エネルギーアブソーバによる減衰効果が期待できない。よって、そのような振動モードが刺激係数の大きな低次のモードに現れないように、配管サポート位置を選定する必要がある。

文 献

- (1) Schneiden, S. ほか 2 名, EPRI NP-2902, Project 1586-1, Final Report, (1983-3).
- (2) 鈴木, 機論, 46-407, C, (昭 55), 723.
- (3) 鈴木, 超塑性合金を使用した配管サポートの研究, 配管技術, (昭 60), 100.
- (4) 鈴木, ほか 1 名, 機論, 48-433, C, (昭 57), 1389.