

# 制振構造について

株式会社 プラント耐震設計システムズ  
池 田 雅 俊

## 1. まえがき

免震構造について、一般の耐震構造（地震時に大きな荷重が作用する部材に強度部材を配して耐震性を確保する構造）と比して、大地震時の安全性の向上、設計の信頼性及び経済設計の面で様々な利点がある。ここでは、類似の構造である制振構造について述べる。

制振構造は、地震エネルギーを吸収する機構を設けて、対象構造物に入力される地震エネルギーを低減させる構造である。

有効に適用することにより免震構造と同様に様々なメリットを得ることができる。その上、たとえば、制振技術は新規設備に適用されると同時に、既存設備に制振技術を適用することにより、高い耐震性能を得ることが可能である。地震時の揺れのエネルギーを制振構造が吸収するので、免震構造と比して小規模な補強により耐震性を向上させることができる。

## 2. 制振構造とは

制振技術は、制振装置を設置して当該構造物に減衰力を作用させ振動を抑制する技術である。設計応答スペクトルの山を低くする技術とすることができる。

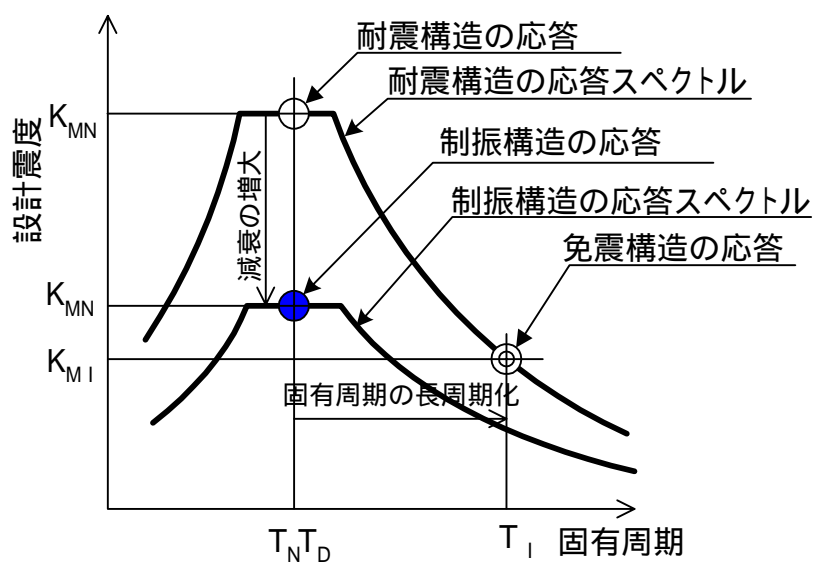


図-1 設計応答スペクトル

設計震度は、構造物の固有周期（その構造物がもっとも揺れやすい周期）によって異なる値をとるので、図-1に見られるように横軸に固有周期をとり、縦軸に当該固有周期の構造物の設計震度をとった応答スペクトルで表示する。制振技術とは、構造物に制振装置を取り付けて、応答スペクトルの高さを低減させる技術をいい、当該構造を制振構造という。耐震構造の応答は、制振構造では応答スペクトルが下がり、となる。

免震構造は免震装置を取り付けて、構造物の周期を長周期化（ゆっくり揺れるように）して設計震度を低減させる構造である。（免震化すると揺れ変位が大きくなるのでエネルギー吸収要素をいれて変位量を小さくするのが一般的に行なわれている。）耐震構造の応答は、免震構造では固有周期が長くなり、となる。

### 3. 制振構造の分類

制振装置とは、構造物に減衰力を作用させ振動を抑制する装置をいう。大別すると質量に作用する慣性力を利用する同調形機械式制振（TMD：Tuned Mass Damper）型と入力される地震エネルギーを熱に変換するエネルギー吸収型の2種類に分けられる。

同調形機械式制振機構（TMD）については3.2、エネルギー吸収型制振については3.3に概要を述べることにする。

TMDタイプの制振装置は、当初、作動のために動力を使わない形で開発が行なわれてが、減衰装置の固有振動数、減衰などの最適条件が厳しく、対象構造物の振動特性に変化が生じた場合には、制振効果が大きく減退するなどの問題があり、構造物の動きをセンサーで感知して、アクチュエータで制振装置の作動条件を制御するアクティブ方式が開発されている。これに対して従来方式はパッシブ方式といわれる。

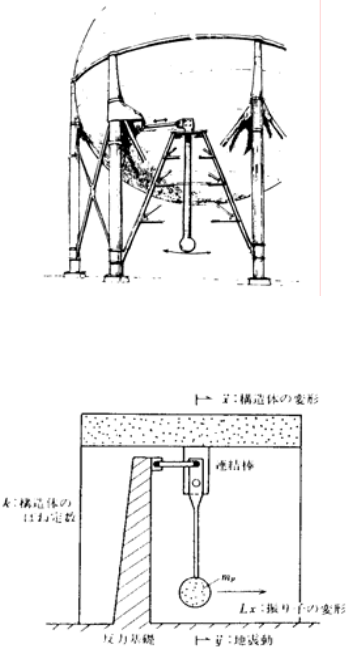
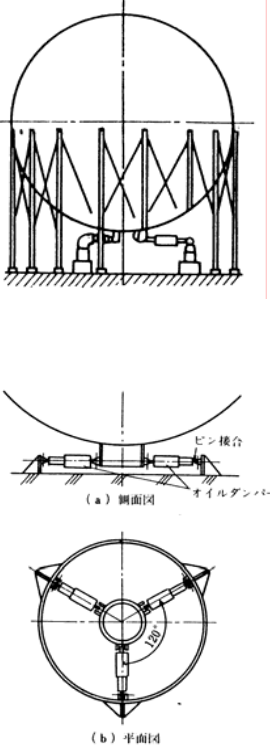
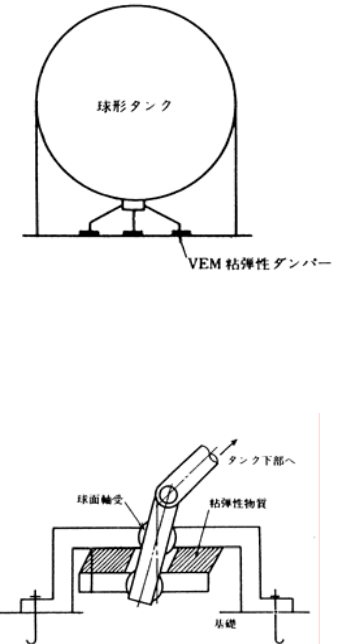
また、近年はセミアクティブ方式といわれる制御効率の高いものも注目されている。これは、エネルギー吸収要素を油圧切換、粘度切換および剛性切換などを行なう方式であり、自動車や鉄道のサスペンションなどに実用化されている。

本節では、パッシブ制振について解説するものとし、アクティブ方式やセミアクティブ方式については省略する。

#### 3.1. 適用事例

球形貯槽を例に取り制振装置の適用事例を示す。

表-1 球形タンクに制振構造を適用した例

分類	TMD装置(振り子・てこ方式)	エネルギー吸収装置(粘性ダンパー)	エネルギー吸収装置(粘弾性ダンパー)
構造概要			
原理・特長	<p>・タンクに振り子構造を取り付け、振り子運動が付加質量として見掛け上の質量を増加させ、固有周期を伸ばすタイプ</p> <p>・一種の免震構造とも考えることができる。</p>	<p>・タンク底部にオイルダンパー3本を120°間隔で配置して、構造系の減衰を高めたもの</p> <p>・減衰定数: 0.10 ~ 0.15程度</p>	<p>・タンク底部に粘弾性ダンパーを設置して、粘弾性ダンパーのせん断変形によるエネルギー吸収を利用したもの</p>
参考文献	<p>・千代田加工建設(株)技術資料</p>	<p>・わかりやすい免震技術, 理工図書, 1987.</p>	<p>・球形タンク用VEM耐震ダンパーの開発, 日本鋼管技報, No.76, 1968.</p>

### 3.2. 同調型機械式制振(TMD)

#### (1) TMD 機構の原理

同調型機械式制振機構(TMD)は、対象構造物の上部に同構造物の総重量の1/100～1/200程度の可動重量を水平方向に振動させて対象構造物のゆれと反対方向に力を作用させ振動を抑制させるものである。

応答解析モデルは図-2 に示すようになる。

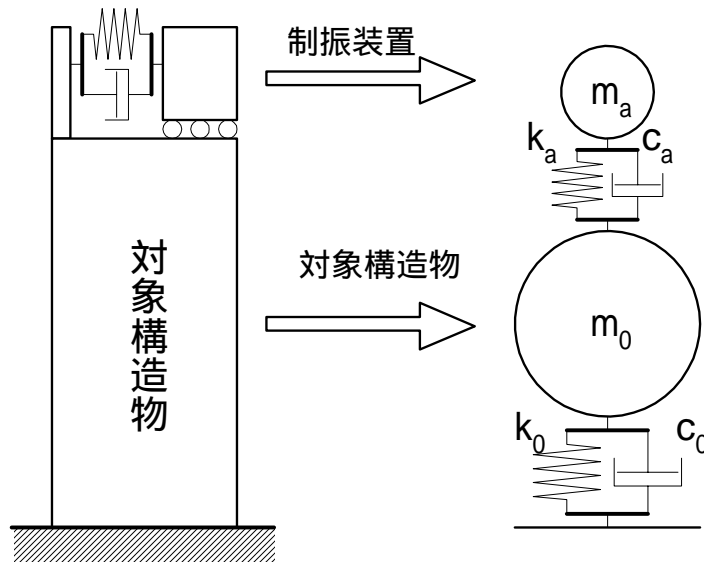


図-2 TMD 応答解析モデル

図-2 による応答解析モデルにサイン波  $\sin 2\pi\lambda \frac{t}{T_0}$  で加振を行なった場合、TMD 制振機構

を有する構造物で  $m_a/m_0 = 0.2$  の場合の動特性(共振曲線)をに示す。ここで、 $T_0$ は制振装置を取り付けない場合の構造物の固有周期、 $\zeta$ は制振装置の減衰定数である。横軸は振動数比、縦軸は変位量である。なお、 $k_a$ は及び  $C_a$ は最適化した値を取っている。

同図で、たとえば、 $\zeta = 0.25$  の場合、変位量が 3.32 となり、制振装置がない場合には、15%減衰定数に相当するので、各種基準で与えられている地震波の応答スペクトルで考えると、設計修正震度は 6.5%に低減することになる。すなわち、制振装置により、構造物の減衰定数を大幅に増大させたことに相当するといえる。

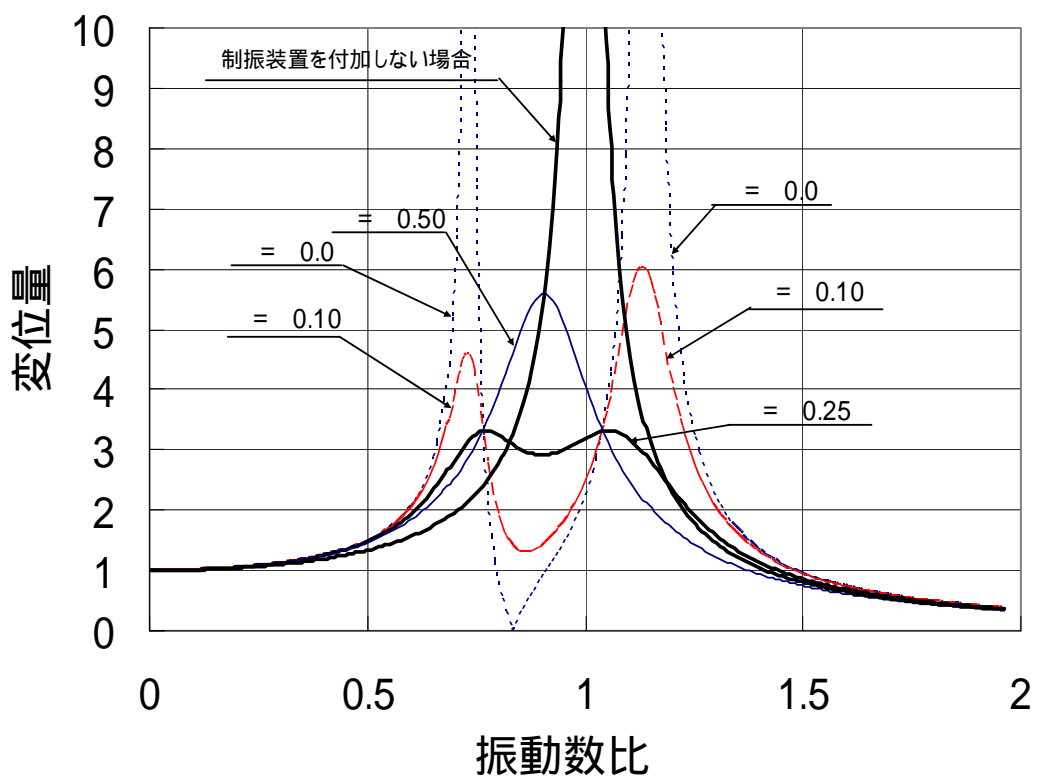
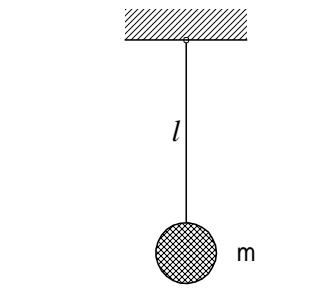
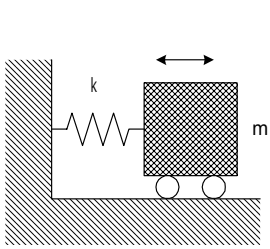
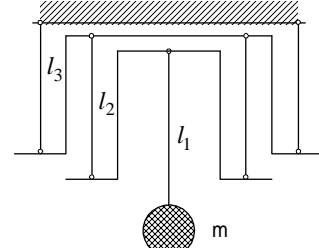
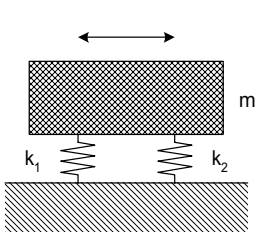


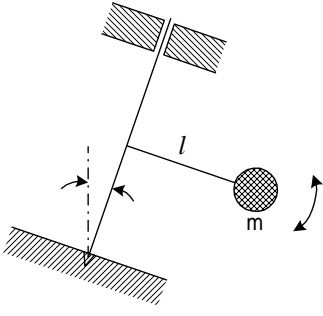
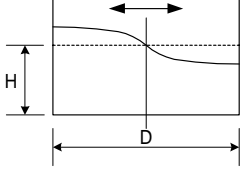
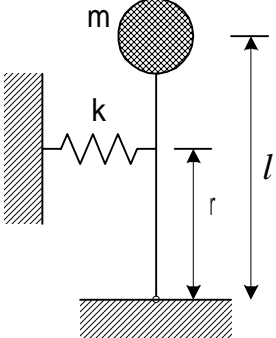
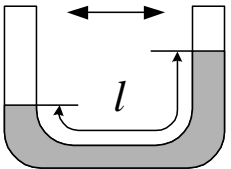
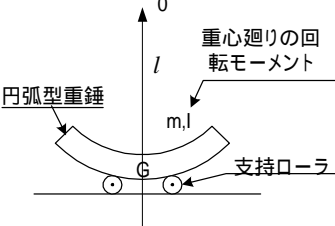
図-3 TMD 制振構造の振動特性

(2) TMD 制振装置の代表例

TMD 制振装置の代表例を表-2 に示す。

表-2 TMD 制振装置の代表例

振 り 子 式	鉛直振り子 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$		ば ね 支 持 式	コイルばね $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	
	多段振り子 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\bar{l}}}$ $\bar{l} = \sum_i l_i$			ゴム支持 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	

傾斜振り子 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{l}}$		スロッシング式 $\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha g}{D}} C$ $C = \tanh\left(\frac{\alpha H}{D}\right)$	 = 3.16 (矩形タンク) = 3.68 (円筒タンク)
倒立振り子 $\omega_0 = \omega_m \sqrt{\frac{g}{l}}$ ただし、 $\omega_m = \frac{r}{l} \sqrt{\frac{k}{m}}$		連通管式 $\omega_0 = \sqrt{\frac{2g}{l}}$	 $l$ : 液中の全長
円弧重錘 $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l'}}$ $l' = \left(1 + \frac{I}{ml^2}\right) l$ $G$ : 重心		なお、記号 $l$ 、 $m$ 、 $k$ 、および $g$ は、 $l$ : 長さ $m$ : 質量 $k$ : ばね定数 $\omega_0$ : 角固有振動数 $g$ : 重力加速度 を意味する。	

### 3.3. エネルギー吸収型制振

#### (1) エネルギー吸収型制振機構の原理

エネルギー吸収型制振装置を架構に生じる層間変位を利用して、制振装置に変形や速度を与え振動によるエネルギーを吸収させ振動応答を低減させる方法について解説する。

架構にエネルギー吸収制振装置を配置する例を図-4 に示す。(a)のように集中配置させる場合と(b)のように各層に分散配置させる場合がある。一般には免震装置を各層に均等に配置させ、入力エネルギーがばらつかない配分となるようにする。

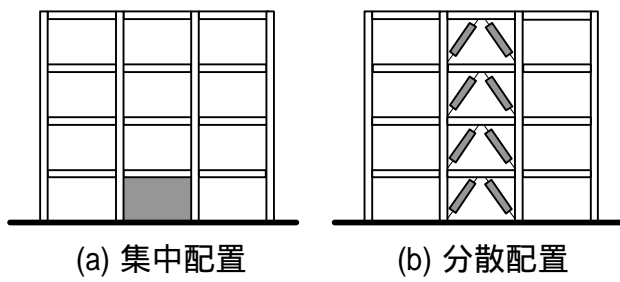


図-4 エネルギー吸収制振機構

エネルギー吸収型制振機構は、対象構造物に入力された地震エネルギーをオイルダンパー、粘性ダンパー、弾塑性ダンパー、摩擦ダンパーなどに吸収させ、熱変換して大気中に消散し、振動を減衰させるものである。

オイルダンパー、粘弾性材等は粘性系制振装置で、速度に比例した制振力が作用する。弾塑性ダンパー、摩擦ダンパーは履歴系制振装置で、変位に比例した制振力が作用する。

設計解析で制振装置は、それぞれの制振装置はプロトタイプ試験で得られた特性を図-5 制振装置の解析モデルに示すような Dashpot モデル、Maxwell モデル又は Voigt モデルに置き換える。架構は、多質点モデルとして、制振装置モデルを図-6 制振架構の多質点解析モデルに示すように全体モデルに組み込み地震時の状態をシミュレーションして設計に利用する。

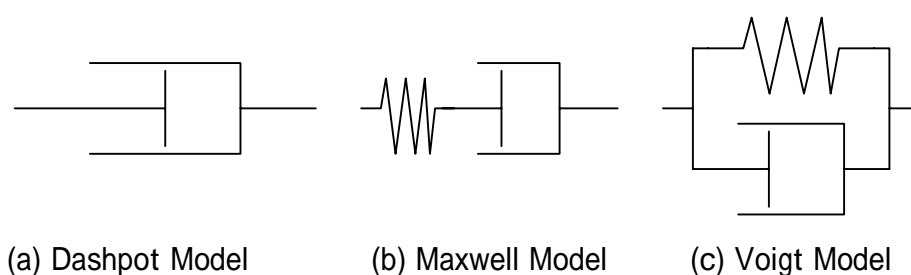


図-5 制振装置の解析モデル

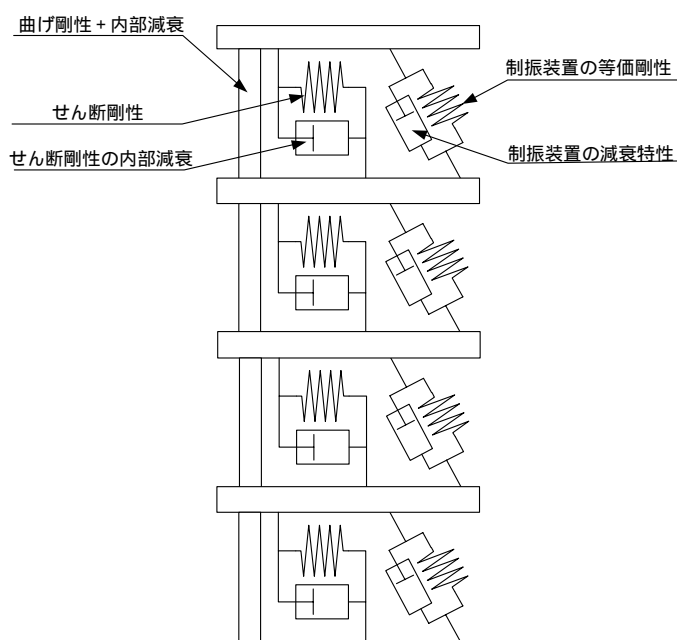
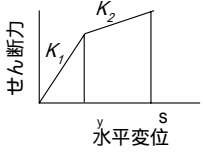
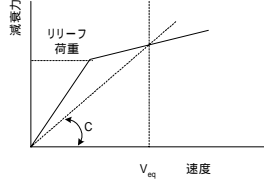


図-6 制振架構の多質点解析モデル

## (2) エネルギー吸収型制振装置の代表例と特徴

エネルギー吸収型制振装置の代表例と特徴を表-3 に示しておく。

表-3 エネルギー吸収型制振装置の代表例と特徴

原理	<p>材料の塑性化に伴う履歴エネルギー吸収減衰</p> 	<p>材料の粘弾性抵抗に伴う振動減衰</p> 	<p>滑り面の摩擦抵抗履歴ループによるエネルギー吸収減衰</p>
減衰材料	鉛、鋼材	オイル、高分子系粘性体、弾塑性体	
減衰特性	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 減衰効果は変位振幅に依存</li> <li>2) 減衰効果は加振振動数には依存しない</li> <li>3) 運動方程式で弾塑性復元力特性項としモデル化</li> <li>4) 正規バイリニア型の復元特性</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 減衰効果は速度（及び変位）に依存</li> <li>2) 減衰効果は環境温度、加振振動数の影響有り</li> <li>3) 運動方程式の速度減衰項（及び付加剛性）項としてモデル化</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 減衰効果は摩擦抵抗力に依存</li> <li>2) 減衰効果は変位振幅に依存</li> <li>3) 減衰効果は加振振幅に依存</li> <li>4) 運動方程式で速度と反対方向に働く摩擦項又は復元力特性項</li> </ol>
設計	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 安定変形限界（動荷重に対する座屈、溶接部の破断）</li> <li>2) 累積塑性変形限界</li> <li>3) 幾何的な変形限界</li> <li>4) 復元力特性の対称性及び安定性（加工硬化等）</li> <li>5) 経年劣化（発錆等）</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 減衰特性の速度依存性</li> <li>2) 減衰特性の温度依存性</li> <li>3) 稼働時の温度上昇に伴う材料劣化</li> <li>4) 幾何的な変形限界</li> <li>5) 粘性体の内圧限界</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 累積走行限界</li> <li>2) 幾何学的変形限界</li> <li>3) 局部座屈</li> <li>4) 摩擦による温度上昇</li> <li>5) 火花の発生環境</li> </ol>
使用条件	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 耐久性確保のための累積塑性変形量</li> <li>2) 発錆等による劣化の監視</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) オイルダンパー：内圧シール部劣化、材料経年劣化監視</li> <li>2) 高分子系粘性体：水の浸入による性能劣化監視</li> <li>3) 粘弾性体：材料経年劣化</li> <li>4) 装置のガタ等の装置の特性に応じた対策</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 累積走行限界</li> <li>2) 摩擦面の経年変化の監視</li> </ol>



## 4. 制振構造に関する基準

制振構造に関しては、日本では特に独立して規定されることはなが、米国では、文献(4) FEMA 450, NEHRP に 2003 edition より独立した章に規定された。(ただし、エネルギー吸収型に関する記述のみのとなっている。)

ここでは、高圧ガス保安法での扱いと、FEMA 450 の内容を簡単に示す。

### 4.1. 高圧ガス

「高圧ガス設備等耐震設計基準」(以下「耐震告示」という。)では、制振構造に関して次のように規定及び取り扱いとしている。

#### 1) 耐震告示第2条第4項

免震構造等の地震影響の低減が図られる構造を有する対象構造物にあって、当該対象構造物の耐震評価は、耐震告示規定する計算方法にかかわらず、耐震性能評価を行なってよいと規定している。「免震構造等」に制振構造も含まれると解釈する。この場合、平成9年6月1日付け立局第6号第2条関係通達第7項で、当該規定による耐震性能の評価を行なう場合は本省に照会されたいとしている。

この場合は、原則として時刻歴解析法による場合で詳細な照査・プロトタイプ試験による確認等が必要となる。

#### 2) 耐震告示第6条第1項第1号

耐震告示第6条は修正震度法による応答解析法を規定している条文で、基準応答倍率(応答スペクトル)を設定に関して減衰定数の補正を行なうとき、「減衰を与える機構を付加した場合は、この限りでない」とし、既定の減衰定数より大きな減衰係数を採用して応答解析を行なってよいとしている。この場合も、平成9年6月1日付け立局第6号第6条関係通達第3項で、次のように規定している。「“減衰を与える機構”、機構上減衰を目的として取り付けられるものであって、油圧、振り子等により減衰を与えるものとするが、適用に当たっては、本省に照会されたい。」としている。この場合は、原則として対象構造物は修正震度法の適用範囲であり、信頼性が確認された制振装置が適切に配置されているものとする。

#### 3) 制振構造設計に関しては、文献(1)にしめす「産業設備の免震構造等設計法」の参考資料として、記述がある。ここでは、制振構造設計を行なう場合、次の要請を満たすことが望ましいとしている。

- a) 制振構造の検証は時刻歴応答解析に基づくことを原則とすること。
- b) 制振機構、制振装置、・特殊部材を組み込んだ応答解析モデル及び解析手法は、実際の地震時の挙動を適切に表現するものであること。
- c) 制振機構の特性は、あらかじめ実験などにより確認及び検証が行なわれていることが望ましい。
- d) 制振機構の機能が適切に発揮されるよう、必要な設計特性値・環境条件の維

持・点検を定期的に行なうこと。

- e) 風荷重等の他の荷重条件と整合する設計とすること。

#### 4.2. FEMA 450,NEHRP における制振設計基準

「新設建築物等の耐震規定」(FEMA 450,NEHRP), 2003 Edition, BSSC の「第 14 章エネルギー吸収型制振構造物」に規定している。

エネルギー吸収型制振構造物の設計基本方針方針は次のように規定している。

- (1) 変位依存減衰要素(履歴又は摩擦系)及び速度依存減衰要素(粘性又は粘弾性系)を有するパッシブ制振系に適用する。
- (2) 制振系は強度要素を配置し制振装置荷重の伝達経路を確保すること。この強度要素は従来の耐震基準を満たすこと。ただし、制振系は変位限界に係る要請を満たすこと。
- (3) 制振装置(damping devices)の設計及び制振装置の性能確認試験では、最強地震に対する変位、速度、地震力をカバーすること。
- (4) 原則として線形解析による静的震度法又は修正震度法による設計法に行なってよい。この場合、配置・構造上の規定や制限基準を定めている。(たとえば、ねじり変位を防止するために各層に最低 2 個以上の制振装置を取り付けること等)
- (5) 線形解析だけでは適切な評価ができないようなケースでは、最大応答に適合させるために非線形時刻歴解析を行なうこと。(断層に近い構造物に関しても同様)

### 5. あとがき

今回は、プラント設備関係の制振構造に関する紹介を行なった。

現状、プラント設備に制振構造を適用した事例は少ないが、制振構造を採用する様々な利点があるが、特に、既存設備の増強や耐震性能(要求対象地震動の強さ)の向上などで効力を発揮する。

主として、制振構造に関する導入のための解説をおこなった。文献(1)~(4)などに設計の詳細が述べられているので参考として欲しい。

#### 参考文献

- (1) 高圧ガス保安協会:「産業設備の免震構造設計法」,平成16年度石油精製業保安対策に関する報告書、2005.3
- (2) 日本振動技術協会:「振動技術総覧2005」,2005.10
- (3) (社)日本電気協会:「原子力発電所免震構造技術指針 JEAG 4614-2000」,2001.1
- (4) Building Seismic Safety Council:“National Earthquake Hazards Reduction Program For Seismic Regulations for New Building and Other Structures”,2003 Edition, FEMA 450,NEHRP