

## TLCD による浮屋根式石油タンクのスロッシング制震について

FS 技術事務所 フェロー会員 ○坂井 藤一  
茨城大学 正会員 井上 涼介

### 1. まえがき

2003 年十勝沖地震において、苫小牧地区の石油タンクに多大な被害が発生した。この原因は、過大なスロッシングが長周期地震動によって励起され、それにより石油タンクの浮屋根に大きな力が作用して、浮屋根ポンツーンが座屈破壊したことによると思われる。この破壊パターンは、すでに 1983 年の日本海中部地震の際にも観察されており、当時坂井等は弾性的な浮屋根を考慮したスロッシング解析の立場から、これについての原因推定を行っていたが、今回の被害についても同様の観点から分析している[1]。

この破壊メカニズムを究明するためには、浮屋根の存在を考慮したスロッシング挙動を解明する必要があるが、この点についての研究は最近に至るまであまり多くない。従来からのスロッシングに関する研究は、浮屋根のない自由表面状態を扱っているものがほとんどであり、浮屋根を考慮した研究も浮屋根は剛体として扱うことが多い。浮屋根の耐震強度と耐震安全対策を論じるには、このような浮屋根スロッシングの挙動の忠実な解明とそれに沿った耐震対策の研究が望まれる所である。

### 2. 浮屋根スロッシングの解析と耐震・免震対策

著者等は、浮屋根スロッシングの新しい耐震等の対策を検討する前提として、以前に坂井等[2]により開発された弾性的浮屋根を考慮したスロッシング挙動解析手法を用いて、浮屋根スロッシングの挙動を分析し[3]、その結果を参考に新しい浮屋根構造の耐震・免震の方式を提案している[4]。

このような耐震・免震対策は、浮屋根強度を確保する対策であるが、スロッシング波高応答そのものを低減する対策ではない。このことは、文献[3]等の結果を見ても明らかであり、浮屋根のある場合の結果を自由表面の場合の結果と比べると、波高応答はいずれもスロッシング 1 次モードの応答に支配されており、その固有周期はほとんど変わらず、波高応答は浮屋根のある場合の方が若干大きくなる傾向にあることが分る。

本研究は、そのような観点から、強度対策と相俟って、スロッシング波高を低減する制震対策を以下に提案し、そのフィージビリティを検討することを目的としている。

### 3. 浮屋根スロッシングの制震対策

スロッシングの 1 次モード応答を抑制する対策として、ここでは坂井等が先に提案・開発した TLCD (Tuned Liquid Column Damper: 液柱管ダンパー) の利用を提案する。図-1 に TLCD の概念図を示す。TLCD は同調質量型の受動ダンパーであり、それを制震対象としての石油タンク浮屋根に設置し、式(1)で与えられる固有周期をタンクのスロッシング 1 次固有周期に同調させ、かつ質量と減衰を適切に付与することにより、タンクのスロッシングを抑制することができる。

任意な平行・回転運動に対する TLCD の一般的な理論は文献[5]に与えているので、これより図-2 のように地震動  $X(t)$  が作用する半径  $a$  のタンクにおいて、浮屋根上に TLCD を設置する場合の基礎方程式は式(2)のようになる。これより TLCD の効果と適切なパラメータの設定が可能となる。ここでは、このような解析に基づく TLCD の実用化検討を行うことにする。実用化に際しては、以下のような諸点に留意する必要がある。

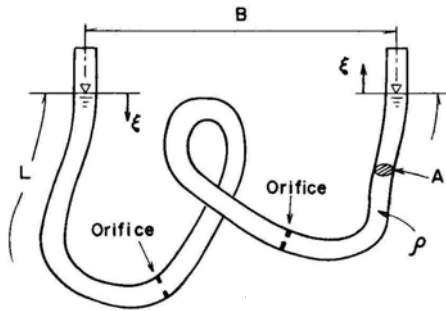
- 1) TLCD を浮屋根に設置するには、前記文献[4]で述べたように、シングルデッキ浮屋根の場合、デッキ部を補強することを前提に、その補強部材と液柱管水平部材を兼用させることが望ましい。

---

キーワード 制震, 石油タンク, 浮屋根, スロッシング, TLCD

連絡先 〒168-0072 東京都杉並区高井戸東 2-22-12 (有) FS 技術事務所 TEL 03-3306-1048

- 2) 地震入力方向の任意性を考え、TLCD を直交 2 方向の入力に対応させるように構成する必要がある。
- 3) 石油タンクの貯液量は使用状態により変動するので、スロッシングの固有周期は常に一定ではない。TLCD は液体（たとえば、水）の量を加減することが容易であり、対象石油タンク貯液量（固有周期）の変動に追従して、容易に固有周期を合わせることができる。
- 4) 同調ダンパーは、単一周波数の応答を制御するのに効果的であり、通常の非定常短周期地震入力を制御するには必ずしも便利では無い。しかしながら、タンクのスロッシング応答は単一周波数応答が卓越する現象であり、同調ダンパーである TLCD の適用は有効と考えられる。



$\rho$  : 液体の質量  
 $A$  : 液柱管の断面積  
 $L$  : 液柱管の液体長さ  
 $B$  : 液柱管立ち上り部の間隔  
 $\xi$  : 液面移動量

図-1 TLCD の概念図

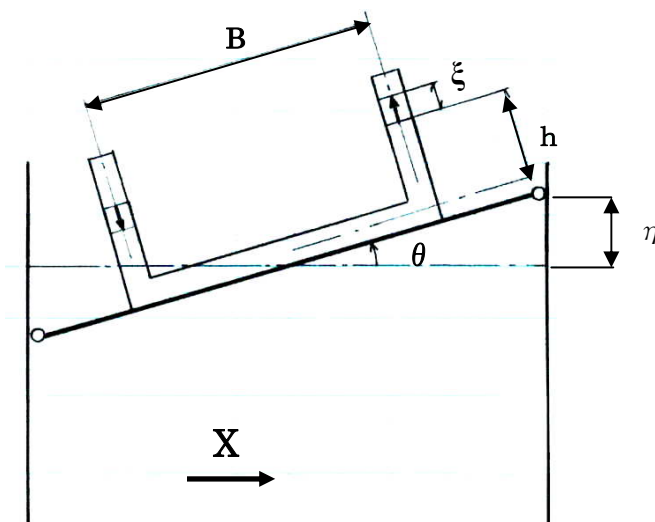
液柱管の固有周期式(1)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{2g}}$$

TLCD の基礎方程式（液柱管液面変動とタンクスロッシングの連成振動方程式）(2)

ここでは文献[3]の結果から浮屋根は剛体と仮定されている。

$$\begin{bmatrix} \rho AL & \rho ABh/a \\ \rho ABh/a & \frac{\rho A}{a} \left\{ \frac{1}{2} B^2 (h + B/6) + \frac{2}{3} h^3 \right\} + \frac{1}{a^2} (I_l + I_r) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\xi} \\ \ddot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho A \kappa |\dot{\xi}|/2 & 0 \\ 0 & C_\eta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\rho Ag & 0 \\ 0 & k_\eta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} Z_\xi \\ Z_\eta \end{Bmatrix} \ddot{X}$$



ここで、

$\eta$  (スロッシング波高) =  $a \theta$

$\theta$  : 浮屋根回転角

$h$  : 液柱管の液位

$L = B + 2h$

$\kappa$  : オリフィスの圧力損失係数

$I_l$  : タンク内液の有効回転慣性

$I_r$  : 浮屋根と液柱管の回転慣性

$Z_\xi, Z_\eta$  : 刺激係数

図-2 浮屋根スロッシングへの TLCD の適用

参考文献 [1] 坂井 : JSSC、No.52、2004-4、 [2] Sakai, Nishimura & Ogawa : Computers & Structures, Vol.19, No.1-2, 1984、 [3] Sakai, Inoue & Hayashi : Proc. 2006 ASME Pressure Vessels & Piping Conf., Vancouver, 2006-7、 [4] 坂井・井上 : 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム、土木学会、2005-7、 [5] 坂井・高枝・玉木 : 構造工学論文集、土木学会、Vol. 35A, 1989-3