

浮屋根タンクのスロッシングに対する耐震・制震・免震設計の提案

FS 技術事務所 正会員 ○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ものであり、詳しい状況は文献[1,2]等で報告されている。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[3,4]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[5]。

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ように思われる。従来からスロッシングに関する研究は数多くなされているが、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、スロッシングの速度ポテンシャル解を与えた千田・中川[6]や新潟地震のスロッシング被害を分析した山本[7]、あるいはその後の浮屋根を考慮した研究においても、浮屋根は剛体として扱われている。

波高応答を論じる限りにおいては、スロッシング1次モードの応答が支配的であり、自由表面あるいは剛体浮屋根の仮定に基づく議論で十分な点もあるが、浮屋根の強度的な耐震安全性を論じるには、それでは不十分な点が多々あるように思われる。十勝沖地震被災を受けて、危険物保安技術協会の場に浮屋根強度に関する検討委員会が設けられ、浮屋根の応力照査式が検討され[8]、消防庁新告示[9]として基準化されたことは、従来の旧告示に規定がなかった状態から見ると大変な進歩と言える。また、最近に至り、FEMの詳細な解析を通じて、浮屋根についての耐震性を論じた西口等[10]の研究や、坂井等と同じ線形理論から出発して、浮屋根スロッシングの解析解を与えた松井[11]の研究等も見られるようになった。しかしながら、浮屋根スロッシングの挙動解明はまだ不十分な状態にあり、それに沿った観点からどのような耐震対策を考えるべきかという研究も非常に不十分な状態にあると言えよう。

ここでは、まず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、坂井等[3]の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た結果[12,13]を参考にして、新しい耐震・制震・免震の方式を提案している（一部は、すでに文献[14]に発表済）。本報告は、消防法新告示に規定が示されている慣用的なシングルデッキ・ダブルデッキ形式の浮屋根とは異なる新しい構造形式概念を提示しており、このように従来の概念に囚われない、より一般的な浮屋根の構造を適切な解析手法で検討することは、今後想定される巨大地震等に対する対策を講じるためにきわめて重要なことと考える。

2. 耐震性の高い浮屋根構造

長周期地震動の入力レベルが高く、たとえば速度応答スペクトル200kineの応答（消防法新告示の最大レベル）が予想される場合を考える。文献[13]で説明されているように、そこで例示されたシングルデッキ浮屋根のタンクにおいては、スロッシング波高応答は1次モードでは側板位置で約3.5m、2次モードでは半径12m位の所で約1mになる。結果として、1次モードの応答により、側板近くにあるポンツーンに大きな周方向の曲げモーメントが作用し、これに基づくポンツーン上板・下板の早期の座屈がポンツーンの耐荷力を急速に低下させる。また、2次モードの応答によってデッキ部が大きく撓むことにより、大きな半径方向膜力がデッキ部に発生し、この膜力によってポンツーンに大きな曲げモーメントや軸圧縮力が作用し、これもポンツーンの座屈破壊の要因となる[9]。

キーワード タンク スロッシング 浮屋根 制振・免震

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 TEL: 0294-38-5167 E-Mail: inoue@mx.ibaraki.ac.jp

このような座屈破壊に繋がる現象を誘起する主たる原因は、シングルデッキ浮屋根におけるシングルデッキ部とポンツーン部の極端な剛性差にあり、あまりにも剛性の低いデッキ部の存在が剛性の高いポンツーン部に力の集中を招く結果となっている。したがって、これに対する対策としては、図-1に示すように、適切な剛性を有する補剛材によってデッキ部に必要な剛性を与えてやればよい。

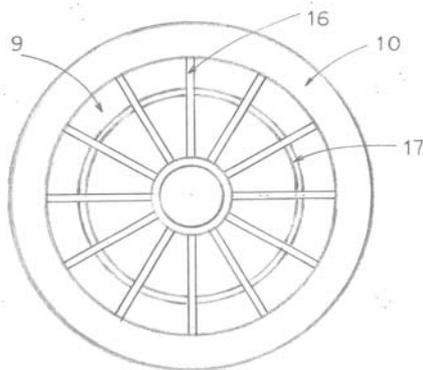


図-1 デッキ部を補剛した耐震浮屋根構造

従来の考え方では、たとえば消防法においても、シングルデッキ・ダブルデッキ両形式の浮屋根について固定的な概念があり、前者は剛性が低く、後者は剛性が高いとされて来た。これに対して、本案はシングルデッキ形式のままダブルデッキ形式と同様に剛性を確保できる、新しい耐震浮屋根構造の提案であることを強調したい。

文献[13]の例に対する著者等の試算によれば、このために付与すべき剛性の程度は例示のダブルデッキ程度にすれば十分であり、そのための補剛材は現実的な範囲で容易に算定することが可能である。

3.2 浮屋根の免震構造

浮屋根ポンツーンの破壊は、従来のシングルデッキ形式の場合、前述したようにスロッシングに伴って大きな曲げモーメントないし軸圧縮力が部分的に剛性の高いポンツーンに作用し、結果として薄板から構成されるポンツーンに座屈破壊を誘起するということであった。したがって、ポンツーンの剛性が極めて低く、変形の能力が十分に高いならば、スロッシング波動に追随して変形はするが、ポンツーンは大きな曲げモーメントないしは軸圧縮力の作用から免れ、その機能を十分に維持できることになる。

これを実現する手段としては、橋梁・建築物等で現在盛んに使用されているゴム系免震部材を剛性の高いポンツーンの間で断続的に介在させて、ポンツーンの全体としての剛性を低くする方法が考えられる（図-2.a）。ポンツーン部だけでなく、全体的に剛性が高い従来のダブルデッキ形式や上記提案の新シングルデッキ形式の場合には、破壊の様式は上記と異なり、高次モードの影響までを含めたスロッシング応答によって、中央部にも大きな曲げモーメントが発生する可能性がある[13]。このような場合に対して免震構造とするためには、周方向ないしは半径方向に断続的に免震部材を設置すればよい（図-2.b）。

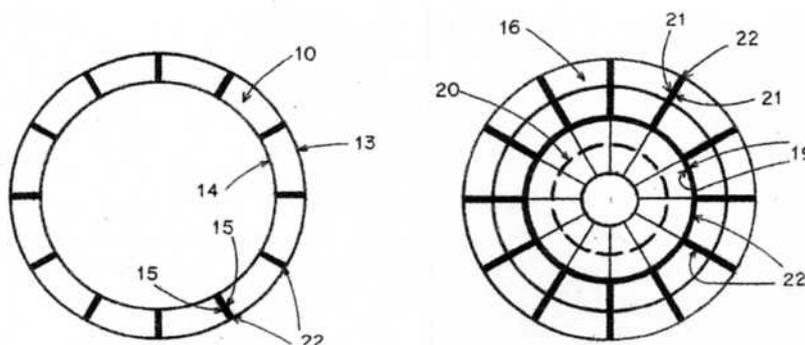
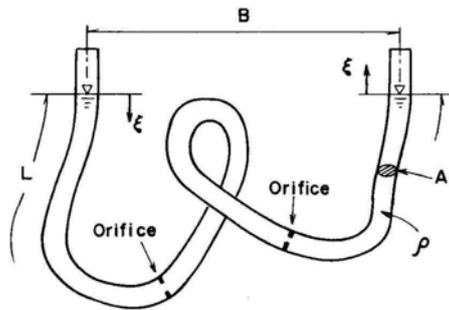


図-2 浮屋根の免震構造 (a.シングルデッキ, b.ダブルデッキ)

3. 浮屋根スロッシングの制震構造

上記のような浮屋根構造の耐震化・免震化対策は、浮屋根強度の耐震性を確保し得る対策であるが、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[12,13]等の結果を見ても明らかであり、波高応答はスロッシング 1 次モードの応答に支配されるので、浮屋根のある場合を自由表面の場合と比べても、その固有周期は変わらず、波高応答は若干大きくなる傾向があることが分る。

このような 1 次モードのスロッシング応答を抑制する対策として、ここでは坂井等が提案・開発した TLCD (Tuned Liquid Column Damper: 液柱管ダンパー[15,16]) の利用を提案する。図-3 に TLCD の概念図を示す。



- ρ : 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
- ξ : 液面移動量

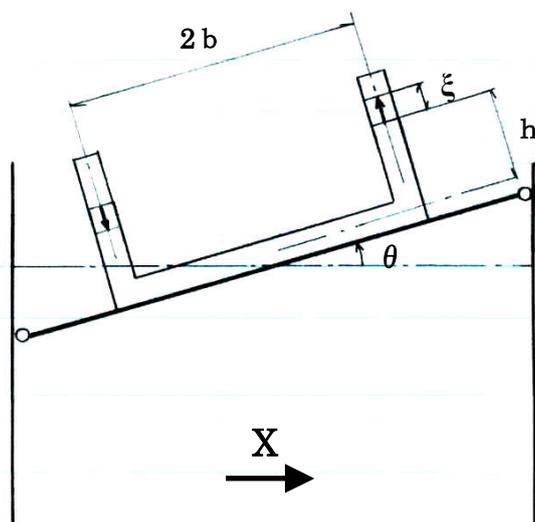
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{2g}}$$

図-3 TLCD の概念図

TLCD は同調質量型の受動ダンパーであり、その固有周期は上式で与えられる。制震対象としてのタンクのスロッシング 1 次固有周期に同調するように TLCD を設計し、それをタンクに設置すればスロッシングを制御することができる。制震の効果は、TLCD の構造寸法により決る有効質量とオリフィスにより決る減衰定数によって左右されるので、効果的なダンパーになるように諸パラメータを決定すればよい。

任意な平行・回転運動に対する TLCD の一般的な理論は文献[15]に与えているので、これより図-4 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を求めると、結果は次式ようになる。これより TLCD の有効な効果を算出可能である。

$$\begin{bmatrix} \rho AL & 2\rho Abh \\ 2\rho Abh & 2\rho Ab^2(h+b/4) + I_l + I_r + I_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\xi} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho AK/2 & 0 \\ 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\rho Ag & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi \\ \theta \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} Z_\xi \\ Z_\theta \end{Bmatrix} \ddot{X}$$



ここで、

- b : 液柱管の幅の 1/2
- h : 液位
- $L=2b+2h$
- K : 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 : 浮屋根の回転慣性
- I_t : 液柱管の回転慣性
- Z_ξ, Z_θ : 刺激係数

図-4 浮屋根スロッシングへの TLCD の適用

TLCD を実際に浮屋根式タンクに設置するには、前記 2. で述べたようなシングルデッキ部の耐震補強材と液柱管水平部を兼用させることが望ましい。また地震入力方向の任意性を考え、TLCD を十字形に構成し、直交 2 方向の入力に対応させることが必要である。なお、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、対象石油タンクの貯液量（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利点を有している。

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、長周期地震動応答の特徴として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 の適用が有効と考えられる。

参考文献

- [1] 「十勝沖地震被害調査緊急報告会」、危険物保安技術協会、2003 年 12 月。
- [2] 畑山健・座間信作・西春樹・山田實・廣川幹浩・井上涼介：「2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害」、地震、第 57 巻、第 2 号、2004 年 12 月。
- [3] 坂井藤一・西村正弘・小川浩：「浮屋根式石油貯槽のスロッシング性状に関する研究」、川崎重工技報、No.74、1980 年 4 月、あるいは Sakai, F., Nishimura, M. and Ogawa, H.: “Sloshing Behavior of Floating-Roof Oil Storage Tanks”, Computers and Structures, Vol.19, No.1-2, 1984.
- [4] Sakai, F.: “Some Considerations on Long-Period Waves in Earthquake Engineering, Japan-PRC-U.S. Trilateral Symp./Workshop on Eng. for Multi. Natural Hazard Mitigation, Beijing, Jan., 1985.
- [5] 坂井藤一：「2003 年十勝沖地震における浮屋根式タンクの被害について」、JSSC、No.52、2004 年 4 月。
- [6] Senda, K. and Nakagawa: “On the Vibration of an Elevated Water-Tank I”, Rep. of Osaka Univ., Vol.4, No.117, 1954.
- [7] 山本善之：「地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力」、高圧力、第 3 巻、第 1 号、1965 年 1 月。
- [8] 「屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書」、危険物保安技術協会、2005 年 1 月。
- [9] 「危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令等の施行について」、消防庁、消防危第 14 号、2005 年 1 月。
- [10] 西口英夫・伊藤雅文・保延宏行・加納俊哉：「長周期地震動による大容量石油タンクのスロッシング挙動解析と安全性評価」、火力原子力協会誌、Vol.56, No.581、2005 年 1 月。
- [11] 松井徹哉：「浮屋根との連成を考慮した円筒液体貯槽の地震時スロッシング応答」、名城大学総合研究所総合学術研究論文集、第 4 号、2005 年 3 月。
- [12] Sakai, F., Inoue, R. & Hayashi, S.: Fluid-Elastic Analysis and Design of Sloshing in Floating-Roof Tanks subjected to Earthquake Motions, Proc. 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Conf., Vancouver, Canada, July 2006.
- [13] 井上涼介・坂井藤一：浮屋根式石油タンクのスロッシング解析・設計への考察、土木学会、第 34 回関東支部技術研究発表会、平成 19 年 3 月。
- [14] 坂井藤一・井上涼介：「大型タンクのスロッシングと耐震・免震提案について」、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 年 7 月。
- [15] 坂井藤一・高枝新伍・玉木利裕：液柱管ダンパー (Tuned Liquid Column Damper) の提案、構造工学論文集、土木学会、Vol. 35A, 1989 年 3 月、または Sakai, F., Takaeda, S. & Tamaki, T.: Tuned Liquid Column Damper – New Type Device for Suppression of Building Vibration, Proc. Int’l. Conf. on Highrise Buildings, Nanjing, China, March 25-27, 1989.
- [16] 北沢正彦・正田正一・坂井藤一・高枝新伍・玉木利裕・恒川昌宏：東神戸大橋主塔および鋼製ラーメン橋脚の振動実験、橋梁と基礎、Vol. 27, No. 2, 1993 年 2 月。