

参考資料 7

屋外貯蔵タンクに作用する津波波力の算
定方法

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!屋外貯蔵タンクに作用する津波波力の算定方法

(a) 検討概要

既往の検討¹⁾で用いられていた屋外貯蔵タンクに作用する津波波力算定式は、津波の最大浸水深のみによって評価を行っていたため、流速が小さい場合には過大に波力を評価する可能性があった。そこで、屋外貯蔵タンクに作用する津波波力をより精確に算定できるよう、既往の津波波力算定式を、津波の流速の影響を考慮することにより、改良することとした。

(b) 既往の津波波力の算定方法

既往の検討¹⁾では、津波波圧は、タンク側面および底面に、図 3.2-7 に示すような分布形状となつて算定されていた。水平波力および鉛直波力の算定方法は次のようになる。

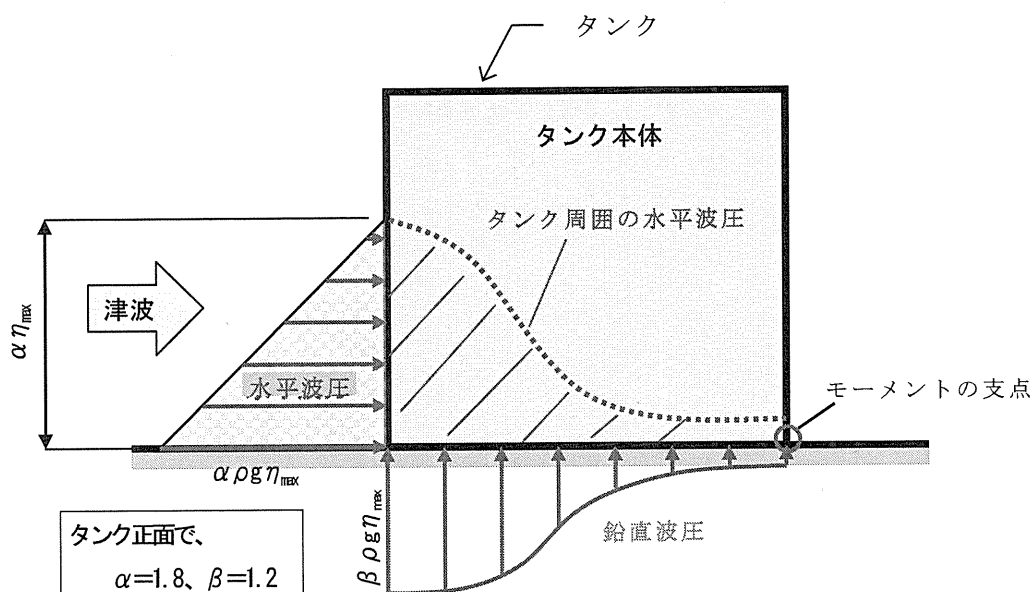


図 3.2-7 タンク本体に作用する津波波圧分布 (既往の検討¹⁾)

① 水平波力と水平モーメント

過去に実施された水理模型実験³⁾では、さまざまな周期と波高の模擬津波を発生させて水位、模型タンクに作用する水平波力等の計測が行われた。その結果、タンクに津波が当たっている状態において模型タンクに作用する水平波力が最大となる時点で計測されたタンク前面における津波水位 η_d^{\max} は、入射波の最大水位、すなわち、タンクを置かない状態におけるタンク設置位置での津波水位の最大値(最大浸水深 η_{\max})の1.8倍程度であった。すなわち、タンク前面における津波水位 η_d^{\max} は、下式で計算できるものとされた。

$$\eta_d^{\max} = 1.8\eta_{\max} \quad (\text{式 3.2-9})$$

また、同じく水理模型実験³⁾から、模型タンクに作用する水平波力が最大となる時点でのタンク周囲の津波水位(津波到来方向となす角度が θ の方向の側板での津波水位) $h_d^{\max}(\theta)$ は、次のフーリエ級数で近似できることがわかった。

$$h_d^{\max}(\theta) = \eta_d^{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta = 1.8\eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta \quad (\text{式 3.2-10})$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035$$

参考のため図 3.2-8 に、 η_{\max} に対する $h_x^{\max}(\theta)$ の比率を示す。

さらに、水理模型実験³⁾からは、模型タンクに作用する水平波力が最大となる時点においてタンクの前面で計測された水圧の高さ方向分布は、その時点でのタンク前面における水位からの静水圧分布で近似可能であることがわかった。これに基づいて、津波を受けるタンクに作用する水平波力の最大値 F_{IH} は、下式で評価できるものと考えられた。

$$F_{IH} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^2 R \cos \theta d\theta \quad (\text{式 3.2-11})$$

ここで、R はタンクの半径である。(式 3.2-11)から計算された水平波力と水理模型実験³⁾で計測されたタンクに作用する水平波力を比較したところ、計算結果は測定結果とおおむね一致していたことから、(式 3.2-11)により最大浸水深 η_{\max} から津波を受けるタンクに作用する水平波力の最大値 F_{IH} を算定できるとすることが提案された。

本報告書では、(式 3.2-10)の中の値「1.8」を「タンク水平波力に係る浸水深係数」と呼ぶことにし、「 α 」と表記することとする。これにより、津波を受けるタンクに作用する水平波力の最大値 F_{IH} を算定する式として提案された式は次のように表される。

$$F_{IH} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^2 R \cos \theta d\theta \quad (\text{式 3.2-11 再掲})$$

$$h_x^{\max}(\theta) = \alpha \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 p_m \cos m\theta \quad (\text{式 3.2-12})$$

$$p_0 = 0.680$$

$$p_1 = 0.340$$

$$p_2 = 0.015$$

$$p_3 = -0.035$$

津波を受けるタンクに作用する水平波力モーメントは、モーメントの支点であるタンク背後基部ら水平波力の作用線までの高さ方向の距離 $h_x(\theta)/3$ を掛けたもので評価することができると考えられた。この考え方に基づき、水平波力 F_{IH} がタンクに作用する場合の水平モーメント M_{IH} を算定する式として次の式が提案された。

$$M_{IH} = \frac{1}{6} \int_{-\pi}^{\pi} \rho g [h_x^{\max}(\theta)]^3 R \cos \theta d\theta \quad (\text{式 3.2-13})$$

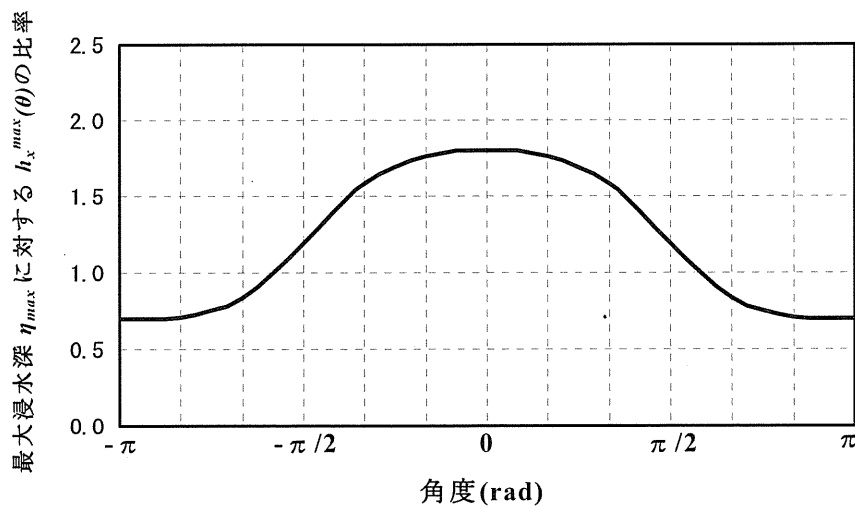


図 3.2-8 タンク円周方向の最大浸水深 η_{\max} に対する $h_x^{\max}(\theta)$ の比率

(「タンク水平波力に係る浸水深係数」(α))

② 鉛直波力と鉛直モーメント

津波を受けるタンクに作用する鉛直波力の最大値 F_{IV} と鉛直波力 F_{IV} がタンクに作用する場合の鉛直モーメント M_{IV} を算定する式については、「①水平波力と水平モーメント」と同様の考え方で次式が提案された。

$$F_{IV} = 2 \int_0^\pi \rho g h_V^{\max}(\theta) R^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (\text{式 3.2-14})$$

$$h_V^{\max}(\theta) = \beta \eta_{\max} \sum_{m=0}^3 q_m \cos m\theta \quad (\text{式 3.2-15})$$

$$q_0 = 0.720$$

$$q_1 = 0.308$$

$$q_2 = 0.014$$

$$q_3 = -0.042$$

ここで $h_V^{\max}(\theta)$ は、津波を受けるタンクにおいて鉛直波力が最大となる時点でのタンク周囲における水位である。水理模型実験³⁾によると、鉛直波力が最大となる時点は、水平波力が最大となる時点とは異なっており、鉛直波力が最大となる時点におけるタンク側板における水位は、最大浸水深 η_{\max} の 1.2 倍程度であった。このため、(式 3.2-15)の β の値は 1.2 とされている。本報告書では、 β を「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」と呼ぶことにする。参考のため図 3.2-9 に、 η_{\max} に対する $h_V^{\max}(\theta)$ の比率を示す。

鉛直モーメント M_{IV} は、モーメントの支点（タンク背後基部）から鉛直波力 F_{IV} の作用点までの距離 $R(1 + \cos \theta)$ を掛けたもので評価することができると考えられた。この考えに基づき、鉛直波力 F_{IV} がタンクに作用する場合の鉛直モーメント M_{IV} を算定する式として次の式が提案された。

$$M_{IV} = 2 \int_0^\pi \rho g h_V^{\max}(\theta) R^3 \cos^2 \theta (1 + \cos \theta) d\theta \quad (\text{式 3.2-16})$$

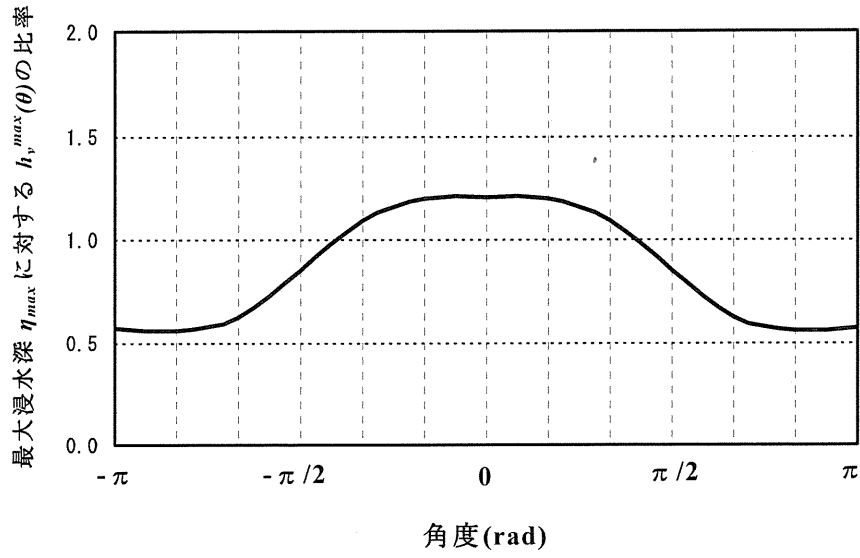


図 3.2-9 タンク円周方向の最大浸水深 η_{max} に対する $h_v^{max}(\theta)$ の比率
 (「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」(β))

流速の効果を考慮した津波波力の算定方法に関する検討

流速の効果を考慮した津波波力算定式の作成は、既往の津波波力の水理模型実験³⁾で計測されている最大浸水深 η_{max} と最大流速 V_{max} に基づいて行った。これは、防油堤は存在するものの、タンクがない場合（図 3.2-10）のタンク位置において計測されたものである。

水理模型実験結果³⁾による検討内容の詳細は、資料-3に記載した。

この水理模型実験データによると、既往の津波水平波力算定式の修正方法は、「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α ($=1.8$) と「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」 β ($=1.2$) は、フルード数 $F_r = V_{max} / \sqrt{g\eta_{max}}$ （式中の g は重力加速度）によって変化させることが適当であると考えられた。なお、今回のフルード数の算定に用いた最大浸水深 η_{max} と最大流速 V_{max} は、同時性を考慮せずに、 η_{max} は浸水深が最大となった時点での浸水深、 V_{max} は流速が最大となった時点での流速とすることとした。

本来、フルード数は、同時刻の浸水深と流速のから算出する数値であるが、ここで参照した既往の水理模型実験結果では、最大浸水深および最大流速の発生時間に大きな差異が生じていなかったため、異なる時刻の最大浸水深と最大流速を用いてフルード数を計算しても、問題はないと考えた。

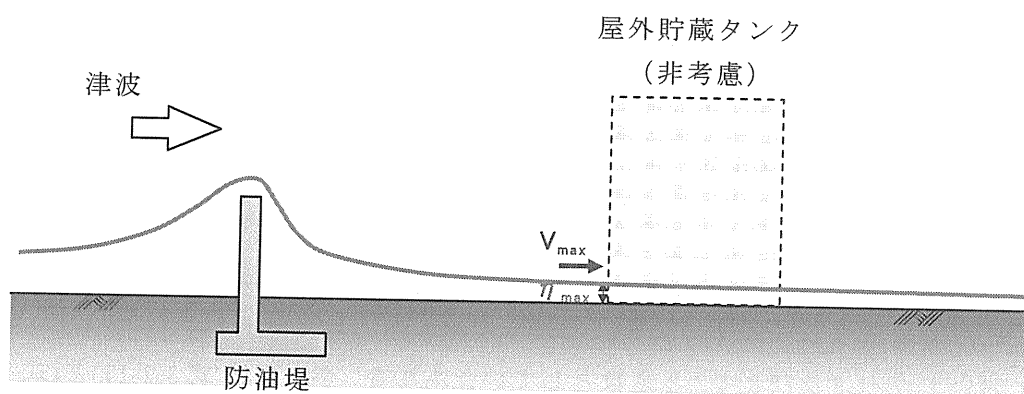


図 3.2-10 屋外貯蔵タンクの波力算定に用いる最大浸水深 η_{max} と最大流速 V_{max}

（なお、津波等により防油堤が被害を受けてその機能をはたさなくなる場合には、防油堤はないものとして取り扱うこととする）

図 3.2-11 に、水理模型実験結果³⁾に基づいて、フルード数 F_r と「(タンク前面における津波水位) / (入射波水位)」の関係を示す。「タンク前面における津波水位」は、文字通り、タンクに津波が作用した時の実験において、タンク前面で測定された津波の水位であり、「入射波水位」はタンクを置かない場合の実験で測定されたタンク位置での津波の水位である。この「(タンク前面における津波水位) / (入射波水位)」は、「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α を表していることとなる。フルード数 F_r は、同じくタンクを置かない場合の実験において、タンク位置で測定された η_{max} と V_{max} から計算されたものである。この図から、 F_r が 1 程度の値を上回ると、入射波水位に対するタンク前面における津波水位の比が大きくなるのがわかる。そこで、「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α は、図 3.2-11 の破線で図示したように、上限は既往の津波波力算定式と整合させて $\alpha=1.8$ 、下限はタンクがない状態に等しい $\alpha=1.0$ とし、その間を実験結果の上限を取るように直線で近似することとした。これにより、 α は次式で表される。

$$\alpha = \begin{cases} 1.8 & F_r \geq 1.3 \\ 2.0F_r - 0.8 & 1.3 \geq F_r \geq 0.9 \\ 1.0 & 0.9 \geq F_r \end{cases} \quad (\text{式 3.2-17})$$

また、「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」 β については、 α と同様、上限は既往の津波波力算定式と整合させて $\beta=1.2$ 、下限はタンクがない状態に等しい $\beta=1.0$ とし、その間も、 α に連動するとして、次式で表されると考えた。

$$\beta = \begin{cases} 1.2 & F_r \geq 1.3 \\ 0.5F_r + 0.55 & 1.3 \geq F_r \geq 0.9 \\ 1.0 & 0.9 \geq F_r \end{cases} \quad (\text{式 3.2-18})$$

結局、ここで提案する「流速の効果を考慮した津波波力算定式」は、(式 3.2-12)及び(式 3.2-15)において、 $\alpha=1.8$ 及び $\beta=1.2$ と定数としていたものを、それぞれ(式 3.2-17)と(式 3.2-18)に置き換え、図 3.2-12 に示すような津波波圧分布を想定したものである。

図 3.2-13 に、「流速の効果を考慮した津波波力算定式」による波力算定結果と水理模型実験³⁾で測定されている波力の比較を示す。この図には、流速の影響を考慮せず、最大浸水深のみに基づく既往の津波波力算定式により算定された波力も示されている。今回提案している「流速の効果を考慮した津波波力算定式」のほうが、実験事実をよく説明している。すなわち、「流速の効果を考慮した津波波力算定式」は、既往の津波波力算定式よりも、タンクに作用する津波波力をより精確に算定することができると言える。

ところで、図 3.2-11 には津波の先端部分が個々の短周期成分となって到来するソリトン分裂波の結果も示されており、これらのデータは、同図に引いた破線からは外れている。しかしながら、図 3.2-13 に示す実験結果との比較では、今回の提案式による波力算定結果はソリトン分裂波のデータも包絡しているので、「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α の算定式(式 3.2-18)の作成において、ソリトン分裂波のデータを無視したことは、結果的には問題はなかったものと考えられる。

以上をまとめると、屋外貯蔵タンクに作用する津波波力は、屋外貯蔵タンクに作用する津波の最大浸水深のみがわかる場合には、 $\alpha=1.8$ 及び $\beta=1.2$ として、(式 3.2-13)及び(式 3.2-17)により算定することが可能であるが、これによる算定結果は、場合によっては、実際の津波波力よりも過大となる可能性があるため、屋外貯蔵タンクに作用する津波について、最大浸水深のほか最大流速もわかる場合には、(式 3.2-18)及び(式 3.2-19)により「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α 及び「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」 β の値を修正し、津波波力をより精確に算定できるようにしたものを用いることが適当であると言える。

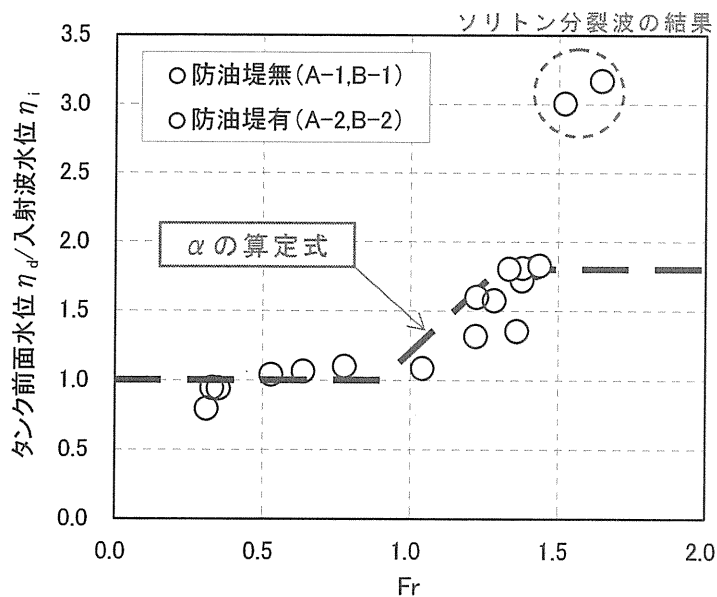


図 3.2-11 提案した「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α の算定式

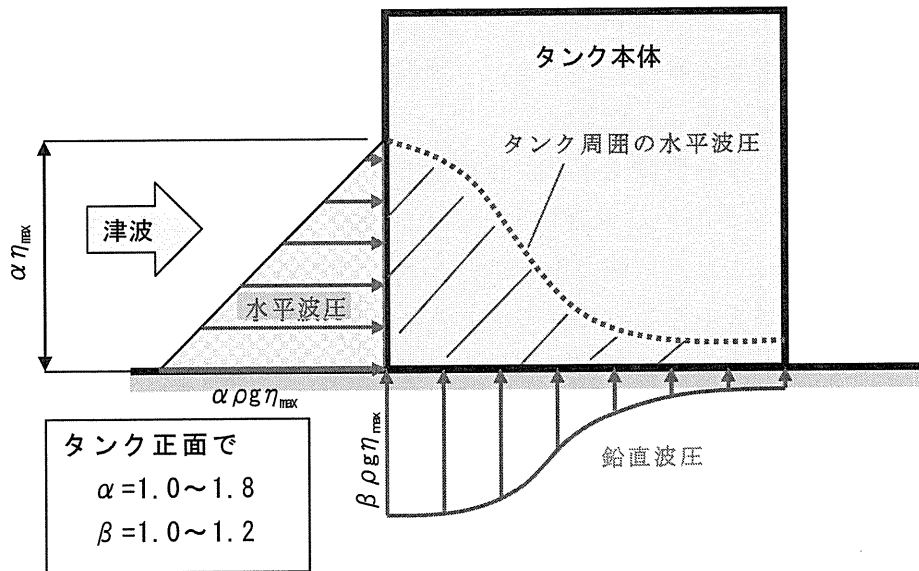


図 3.2-12 提案した「タンク水平波力に係る浸水深係数」 α 及び「タンク鉛直波力に係る浸水深係数」 β によるタンク本体に作用する津波波圧分布

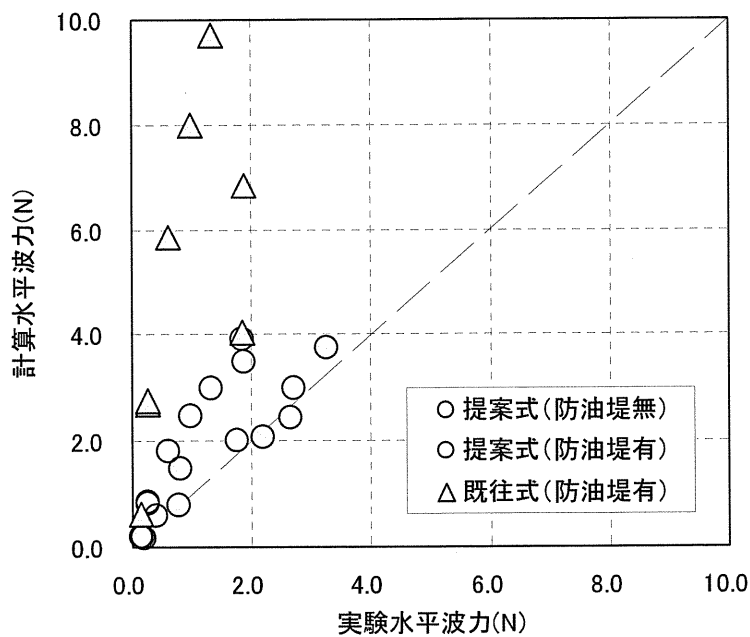


図 3.2-13 実験結果と津波波力算定式による水平波力の比較

屋外貯蔵タンクの被害形態発生可能性の評価方法

表 3.3-2 に、タンクの 4 つの被害形態（「浮き上がり」、「滑動」、「転倒」、「内外水圧差による側板座屈」）の発生可能性を簡易に予測するための「屋外貯蔵タンクの津波被害簡易予測手法」の一覧を示す。

表 3.3-2 屋外貯蔵タンクの被害発生可能性の簡易予測手法

被害形態	発生可能性の簡易予測手法
浮き上がり	<p>浮き上がり安全率： $F_{sa} = \frac{W_T + W_L}{F_H}$</p> <p>浮き上がりの可能性あり： $F_{sa} \leq 1.0$ --- " ---可能性なし： $F_{sa} \geq 1.0$</p> <p>W_T：タンク本体の重量 W_L：タンク内容液の重量 F_H：タンクに作用する鉛直力（津波波力）</p>
滑動	<p>滑動安全率： $F_{sb} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_H)}{F_H}$</p> <p>滑動の可能性あり： $F_{sb} \leq 1.0$ --- " ---可能性なし： $F_{sb} \geq 1.0$</p> <p>μ：タンク基礎とタンク本体の摩擦係数 W_T：タンク本体の重量 W_L：タンク内容液の重量 F_H：タンクに作用する津波の鉛直力 F_H：タンクに作用する津波の水平力</p>
転倒	<p>転倒安全率： $F_{sc} = \frac{M_W - M_H}{M_H}$</p> <p>転倒の可能性あり： $F_{sc} \leq 1.0$ --- " ---可能性なし： $F_{sc} \geq 1.0$</p> <p>M_W：津波に対する抵抗モーメント M_H：津波による鉛直モーメント M_H：津波による水平モーメント</p>
側板座屈	<p>座屈が発生する津波浸水深： $H_0 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$</p> <p>座屈の可能性あり： $H_0 \leq \eta_{\max}$ --- " ---可能性なし： $H_0 \geq \eta_{\max}$</p> <p>$A = \frac{\rho g RL^2}{2 \pi^2 D}$</p> <p>$B = \left(\frac{\rho_1 g RL^2}{2 \pi^2 D} H_1 + 0.3168Z^{1/2} \right)$</p> <p>$C = -1.152LZ^{1/2}$</p> <p>$D = \frac{EH^3}{12(1-\nu^2)}$</p> <p>$Z = \sqrt{1-\nu^2} \frac{L^2}{RH}$</p> <p>$\rho_1, \rho$：内容液の比重，津波水の比重 R, L, H：タンクの半径，高さ，側板厚 H_1：タンク内容液高さ， Z, ν, E：形状係数，ポアソン比，ヤング率</p>

(a) タンク本体の被害予測における荷重条件

タンク本体の被害判定においては、次の荷重を考慮する。

- ・タンク本体重量
- ・タンク内容液(危険物)の重量
- ・津波波力
- ・浮力

(b) タンク本体の浮き上がり発生可能性の予測

タンク本体の浮き上がり発生可能性の有無は、タンク本体及び危険物の重量と津波による鉛直力の比で表す浮き上がり安全率 F_{Sa} にて判定した。

次式にタンク本体の滑動安全率の算定式を示す。

$$\text{浮き上がり安全率} \quad F_{Sa} = \frac{W_T + W_L}{F_{IV}} \quad (\text{式 3.3-14})$$

$$F_{Sa} \leq 1.0 : \text{浮き上がりあり}$$

$$F_{Sa} \geq 1.0 : \text{浮き上がりなし}$$

ここで、 W_T : タンク本体重量、 W_L : 内容液の重量、 F_{IV} : 津波の鉛直波力である。

(c) タンク本体の滑動発生可能性の予測

タンク本体の滑動発生可能性の有無は、タンク本体及び危険物の重量、津波の鉛直波力と津波波力による水平力の比で表す滑動安全率 F_{Sb} にて判定した。

次式にタンク本体の滑動安全率の算定式を示す。

$$\text{滑動安全率} \quad F_{Sb} = \frac{\mu(W_T + W_L - F_{IV})}{F_{IH}} \quad (\text{式 3.3-15})$$

$$F_{Sb} \leq 1.0 : \text{滑動あり}$$

$$F_{Sb} \geq 1.0 : \text{滑動なし}$$

ここで、 μ : 基礎とタンク本体の摩擦係数、 F_{IH} : 津波の水平波力である。

なお、本検討での摩擦係数 μ は、JIS 規格書⁷⁾から、土面に対する乾いた石の静止摩擦係数である 0.5 を用いた。