

I-269

円筒形石油タンクの耐震設計指針に対する一考察

川崎重工業（株）○正員 磯江 暁 川崎重工業（株）正員 坂井 藤一

1. はじめに

円筒形石油タンクは、通常アンカーせず基礎に設置されているため、地震時に底板の一部が浮き上がりを生じ、これが側板下部の座屈や底板隅角部の亀裂発生に深く関係すると言われている。しかしながら、この現象はきわめて複雑であり、未解明であることから、現行の各種のタンク設計基準において、底部浮き上がり挙動を考慮した耐震設計法を明確に記述しているものはほとんどない。その中で1979年API Standard 650 Appendix E¹⁾や1990年3月に改定された日本建築学会「容器構造設計指針案・同解説」²⁾などに底部浮き上がり挙動に関する取り扱いが見られる。著者等は、最近大型相似模型を用いた傾斜実験により、この挙動を詳しく調査しているので³⁾、ここでは著者らの実験データから、上記指針に置ける取り扱いについて若干の考察を行ってみる。

2. 指針における底板浮き上がり挙動の取扱い

API基準では、底板の浮き上がり部はFig.1(a)に示すように、最終的に板曲げの状態で2つの塑性関節が出来（膜力は無視）、軸引張り力 N_z はこの状態の値以上にはなり得ない、と仮定している。これより出発して、転倒モーメントとの釣合から全周における軸力を求めたものがFig.2(a)である。API基準では、このようにして求めた軸圧縮力による座屈を耐力の限界としてチェックするが、浮き上がり部については、底板の強度などについて何も言及していない。一方、建築学会(AIJ)指針では、Fig.1(b)のように、極限状態として隅角部の一点が塑性関節になる時を考え、軸引張り力 N_z の上限値を定める。その後、浮き上がり側底板に関する耐力限界モーメントを、このような軸引張り力が全周に及ぶ状態を想定して(Fig.2(b))決定する。

3. 考察対象となるタンクの諸元

著者等が用いた実験模型と対応する実機の諸元をFig.3に示す。相似性が成り立っているので実験値は実機の値に換算できる。模型と実機の相似比率（形状寸法では略4、応力では略3）を考慮すると、実機タンクでの液深は18.4m ($H=4.6$ m)、材料の降伏応力は $\sigma_y=390\text{N/mm}^2$ （アルミニウム合金 $\sigma_y=130\text{N/mm}^2$ ）に相当する。

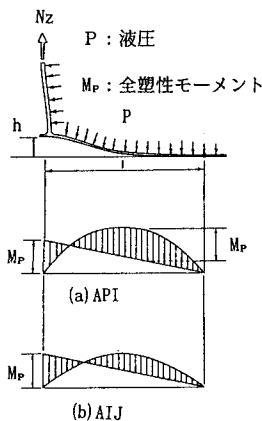


Fig.1 Uqlifting Part

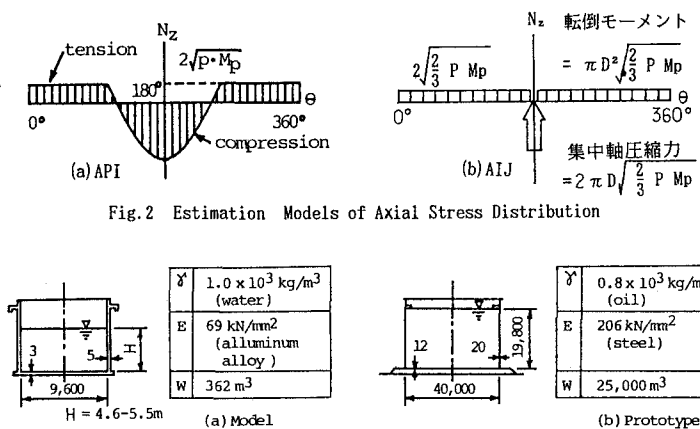


Fig.3 Dimension of Model

4. 極限転倒モーメントに対する考察

AIJ指針による極限転倒モーメントを計算し、実験の傾斜角に換算すると 5.7° になるが、実験では $10.2^\circ \sim 12.3^\circ$ においても十分な耐荷能力を示しており、指針の評価値は過小なものと思われる。また、実験ではFig.1のような底板の浮き上りに伴い、大きな半径方向膜力が発生しており、この作用が浮き上りに対する抵抗を増している。したがって、API 基準あるいは AIJ指針におけるように底板を純板曲げ材として扱うことは、底板の浮き上り抵抗力を過小評価することになるとと思われる。実際、底板の曲げと伸びを考慮した有限変位解析を実施してみると、Fig.4のように両指針の評価値よりずっと大きな軸引張り力に底板が耐えられることが分かる。このような点から、今後の底板浮き上りの検討には、底板の半径方向膜作用の影響を考慮に入れる必要がある。

5. 側板の軸圧縮座屈の取扱いに対する考察

API 基準によれば、軸圧縮力をFig.2(a)のように求め、これを次の座屈限界応力でチェックするようになっている。

$$\sigma_{cr} = \frac{0.25 Et}{1.5 D} + \frac{0.4 pD}{t} \quad \text{ただし,} \quad \sigma_{cr} < \frac{0.5 Et}{1.5 D} \quad (1)$$

一方 AIJ指針では、軸圧縮力の集中は最終的には考えないこととし、エレファントフットバルジについて、次のような座屈限界応力でチェックする。

$$\sigma_{cr} = \frac{0.8 E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{D}{2t} \right) \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_v} \right) \quad (2)$$

両者の軸圧縮応力と座屈限界応力に関し、実験結果との比較をFig.5に示す。実験で計測された最大軸圧縮応力は、実機換算で約 40 N/mm^2 であり、両者により計算される座屈荷重と近い所にあるが、 σ_{cr} には安全裕度があり、座屈は発生していない。

API 基準の計算は、屋根有りのケース（●印）では圧縮軸応力を比較的良好に捉えているように見えるけれども、屋根無しの場合（○印）ではその集中度を過大評価しているように思われる。

AIJ 指針では、浮き上りによる軸圧縮力の集中を最終状態では考慮しないでよいとしているため、かなり大きな転倒モーメントまで耐荷力があることになる。屋根有りのケース（●印）の実験結果によれば、この場合かなり早期に座屈に至るであろうことは明らかであり、それからさらにどの程度の耐荷能力があるか、ということなど、今後より詳細に検討される必要があろう。

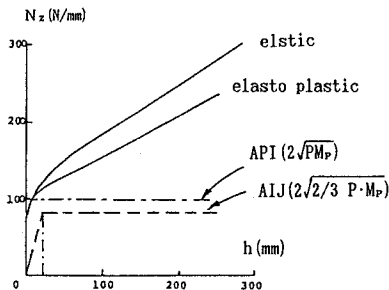


Fig.4 Relationship between Axial Force and Uplifting Height

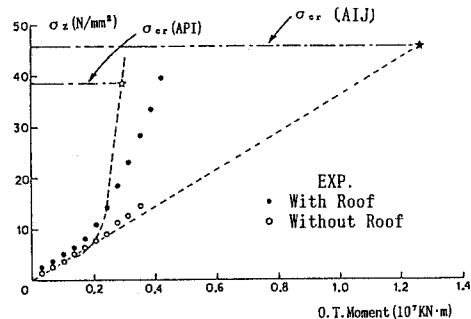


Fig.5 Relationship between Axial Compressive Stress and Overturning Moment

1) API 650 Appendix E 1978

2) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説、1990-3

3) 坂井、磯江：大型模型傾斜実験による円筒貯槽の浮き上り挙動に関する研究、土木学会論文集 1991-7