

衝撃吸収材を用いた竜巻防護対策の事例紹介

Application of shock absorber to tornado protection on power plant equipment

(株)四国総合研究所 野口 新二 Shinji NOGUCHI
四国電力(株) ○堀田 宏司 Kouji HOTSUTA Member
四国電力(株) 池田 和豊 Kazutoyo IKEDA

Shock absorber has been designed for power plant equipment against to the impact load of a tornado missile. Impact energy could be absorbed by axial deformation on the double pipe of aluminum alloy. The compression test was performed by changing material, diameter and thickness of pipe. The obtained stress displacement curve was used for the optimal design of shock absorber for the heavy oil tank. The response acceleration on the heavy oil tank against to the impact load was evaluated by dynamic finite element analysis. The effect of acceleration reduction using shock absorber was confirmed by detailed analysis model. Shock absorber was mounted on the outer surface of the heavy oil tank in Ikata Power Station Unit 3.

Keywords: Shock absorber, Impact load, Tornado missile, Double pipe, Aluminum alloy, Dynamic finite element analysis

1. はじめに

瀬戸内地域で過去発生した竜巻は、気象庁の区分では風速 50~69 (m/s) のレベルとされているが、伊方発電所では、国内最大級の竜巻を考慮し、最大風速を 100 (m/s) とした上で、飛来物発生防止対策や、飛来物から重要安全施設を保護するための竜巻防護対策を実施している。

竜巻防護対策は、飛来物を重要安全施設に到達させないこと、または衝撃力を和らげることを目的に、重要安全施設の構造・設置場所の状況等に応じて、防護ネット・防護鋼板・衝撃吸収材等から適切な対策を選択している。

衝撃吸収材を用いた竜巻防護対策の事例として、非常用ディーゼル発電機の燃料を貯蔵する屋外設置の重油タンクを Fig.1 に示す。重油タンク外面に衝撃吸収材を貼りめぐらせ、飛来物の衝突による衝撃力を緩和させている。

本稿では、衝撃吸収材の緩衝効果により、竜巻に対して、重油タンクの健全性が確保されていることを紹介する。

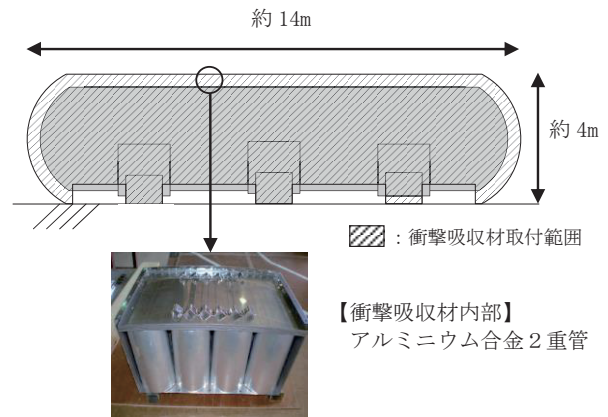


Fig. 1 Shock absorber using double pipe of aluminum alloy(on heavy oil tank)

2. 衝撃吸収材の特性検討

適切な緩衝性能を有する市販の製品がなかったため、アルミニウム製管が軸方向に座屈変形（軸圧壊）する際に、衝突エネルギーを吸収できることに着目して、各種アルミニウム合金管の圧縮試験を行い、最適な特性（緩衝効果）を持つ衝撃吸収材を選定した。Fig.2 に衝撃吸収材の圧縮試験結果から設定した剛性特性を示す。なお、試験過程において、衝撃吸収材は安定的に軸圧壊することを確認している。

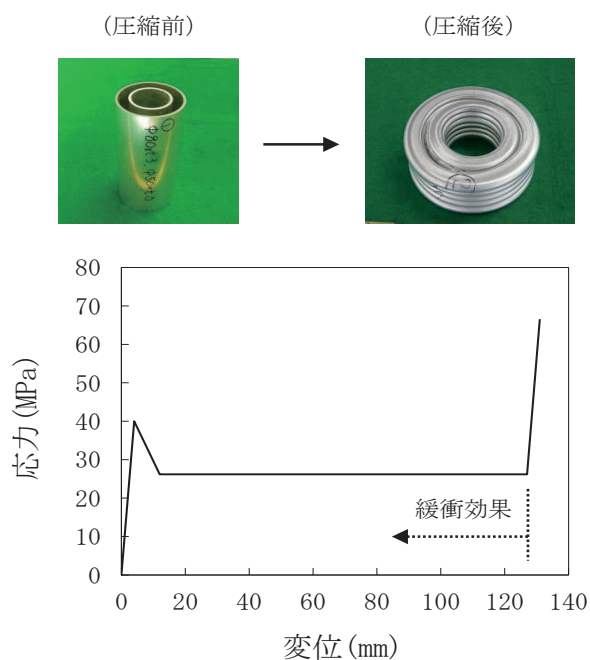


Fig. 2 Stress-displacement characteristics of shock absorber

3. 衝突解析

3.1 竜巻影響評価の飛来物

竜巻影響評価（竜巻による影響を考慮した重油タンク各部位の構造強度評価）に用いる飛来物は、飛来物発生防止対策等を踏まえて、Table 1 に示す鋼製材・乗用車の2種類が選定されている。

衝突速度は、重油タンクに加わる衝撃荷重が大きくなるよう、鉛直方向よりも速い水平方向の値を適用している。

Table 1 Specifications of tornado missiles

飛来物	飛来物形状 (mm)	重量 (kg)	衝突速度 (m/s)	エネルギー (kJ)
鋼製材	長さ 4,200 × 幅 300 × 奥行 200 × 板厚 5	135	57	220
乗用車	長さ 4,600 × 幅 1,600 × 奥行 1,400	2,000	47	2,210

3.2 バネ質量モデルによる応答加速度の評価

衝撃吸収材が取り付けられた重油タンクに、飛来物が衝突する際の評価モデルを Fig.3 に示す。重油タンク及び衝撃吸収材については、バネ質量系でモデル化し、衝撃吸収材の緩衝効果 (k) を評価モデルに取り入れている。飛来物については、鋼製材はシェル要素にて材料 SS400 でモデル化し、乗用車は衝突の際に潰れて自らエネルギーを吸収する構造であるため、車体剛性を以下の式にて求めてモデル化した[1]。

$$C = 588M$$

ここで C は車体剛性 (N/m)、M は車体重量 (kg) である。

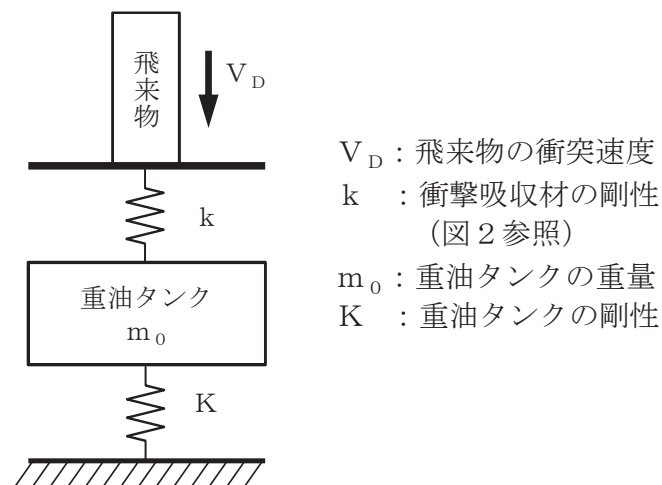


Fig.3 Spring mass system model for evaluating response acceleration

解析には汎用市販コードの LS-DYNA を使用した。LS-DYNA は、衝突問題など短時間の動的現象のシミュレーションに適し、様々な分野において多くの利用実績のある有限要素法解析コードである。

竜巻影響評価に必要となる、飛来物衝突時の重油タンク応答加速度の解析結果を Fig.4 に示し、最大応答加速度（最大絶対値）を Table 2 に示す。衝撃吸収材の緩衝効果により、重油タンク応答加速度が大きく低減している。

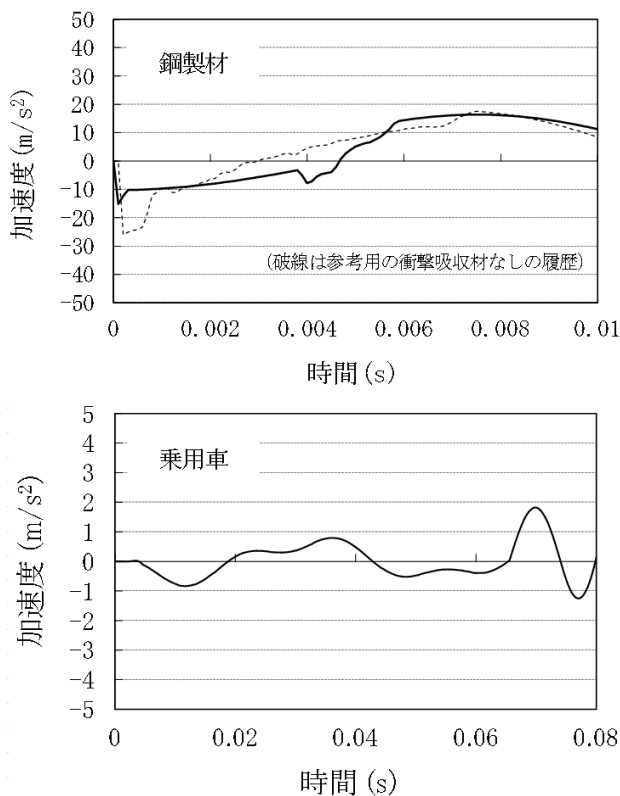


Fig. 4 Response acceleration history on heavy oil tank against the tornado missile impact

Table 2 Maximum response acceleration evaluated by spring mass system model

飛来物	重油タンク応答加速度(m/s ²)
鋼製材	約16 (参考：衝撃吸収材がない場合：約26)
乗用車	約2

3.3 応力評価

竜巻による荷重が重油タンクの重心位置に付加されるため、JEAG4601 [2]の横置円筒形容器の応力評価に準拠し、地震荷重を竜巻による飛来物の衝撃荷重に置き換えて発生応力を求めた。

地震水平荷重が、 $F = m_0 \cdot a_H$ で算出されることから、飛来物による衝撃荷重の重油タンク応答加速度 (a_H) は次式となる。

$$a_H = W_M / m_0$$

$$W_M = m_0 \cdot a_H$$

ここで m_0 は重油タンク満油重量と衝撃吸収材重

量の合計重量である。

原子力発電所の竜巻影響評価ガイドに基づき、竜巻による風圧荷重 (W_W)、気圧差荷重 (W_P) 並びに飛来物による衝撃荷重 (W_M) を組み合わせた複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$) により評価した、重油タンクの胴板、支持脚及び基礎ボルトに関する応力比 (発生応力/許容応力) を Table 3 に示す。衝撃吸収材の緩衝効果により、応力比は全て1未満となり、竜巻に対して重油タンクの健全性が確保されることを確認した。

Table 3 Results of tornado impact assessment

評価部材	材料	応力比
胴板	SS400	0.96
支持脚	SS400	0.26
基礎ボルト	SNB7	0.34

3.4 詳細モデルによる裕度の確認

JEAG4601 に準拠した応力評価では胴板の裕度がほとんどなかった。そこで、Fig.5 のような詳細モデルを作成し、応答加速度を求めた。

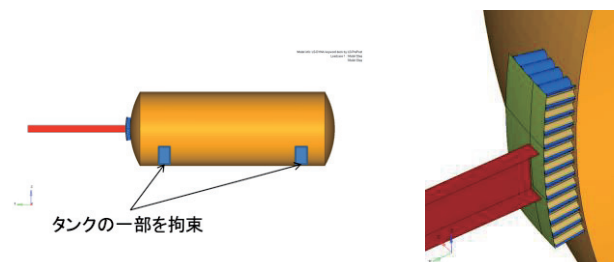


Fig. 5 Example of detailed analysis model (in the longitudinal direction)

加速度応答を Fig.6 に示す。長手方向および横方向に衝突した場合の加速度は、±約 $9m/s^2$ 程度であった。詳細にモデル化して解析することによって、余裕があることが確認できた。なお、タンク表面に生じるひずみも十分小さいことを確認した。

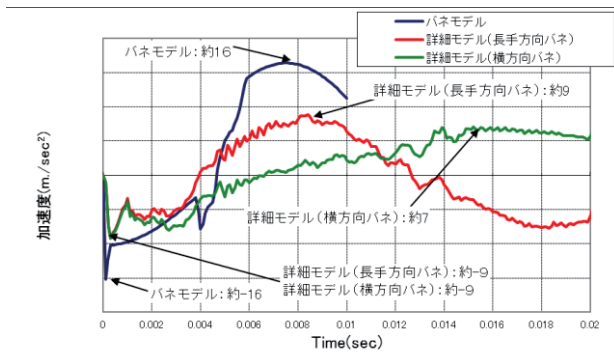


Fig. 6 Response acceleration history calculated by detailed analysis model

4. 設置状況

今回開発した衝撃吸収材は、原子力規制庁による工事計画認可・使用前検査を経て、伊方発電所3号機の重要安全施設（重油タンク）に対する竜巻防護対策として、設置済である。（Fig.7 参照）。



Fig. 7 Shock absorber mounting condition on heavy oil tank

5. おわりに

今後は、低コストで簡易な構造の衝撃吸収材の特徴を生かし、原子力発電所の重要安全施設に対してだけでなく、広く一般的な産業施設、土木・建築構造物等に対する衝突問題の緩和方策として活用していく予定である。なお、本件は「屋外設置物の保護装置及び屋外設置物の保護設備（公開番号 特開 2016-8469 号）」として特許を取得した。

参考文献

- [1] 水野幸治, 自動車の衝突安全 (2012年, 名古屋大学出版会)
- [2] 日本電気協会, 原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAG4601-1987)