

使用済燃料貯蔵容器の合理的な地震時転倒安定評価手法の提案

背 景

縦置き・非固縛で貯蔵中の金属キャスク(使用済燃料を貯蔵するための金属製の乾式容器)が地震力を受けた際の転倒評価手法として、従来のエネルギースペクトル^{*1}を用いた場合、継続時間が比較的短く、加速度応答スペクトルに明瞭なピークがある地震波に対しては合理的な浮上り予測値を与える。一方、加速度応答スペクトル形状がフラットで継続時間が長い地震波では、エネルギースペクトルは全継続時間における累積エネルギーより算定されるため、過度に保守的な浮上り予測値を導く。このため、貯蔵容器の浮上りや滑りに寄与する合理的な転倒評価指標を構築する必要がある。

目 的

キャスクの浮上りに有効な入力エネルギーと、ある一定の継続時間内に入力されるエネルギーとの関連に着目し、貯蔵容器の浮上りに寄与する合理的なエネルギースペクトルの算出方法を提案する。

主な成果

1. ウインドウエネルギースペクトル

縮尺率 1/3 の相似模型キャスク(外径 1.3m×高さ 1.9m, 重量 10ton)を用いた振動試験結果より、最大応答角度の発生時刻と入力エネルギー増分に良い相関が見られることが判明した。そこで、有効な転倒評価指標として、一定の評価時間内のエネルギースペクトルで表されるウインドウエネルギースペクトル(図 1)を定義した。

2. ウインドウ幅の提案

エネルギースペクトルの算出の対象となる周期変動範囲($T_0 \sim T_1$)を考慮し、評価時間($T_0 \sim 1.5T_1$)をパラメータとして、全継続時間にわたりウインドウエネルギースペクトルを算出し、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における観測地震波(JMA 神戸波)や人工的に作成した地震波(人工地震波)を用いた振動試験結果との比較を行った。JMA 神戸波の場合、主要動付近での瞬間入力エネルギーがほぼ全体の累積エネルギーに相当し、ウインドウ幅にかかわらず振動試験で発生した浮上りエネルギーとほぼ一致する。一方、人工地震波の場合、ウインドウ幅が長くなるにつれて瞬間入力エネルギーが増加し、実験値に対して過度に浮上りエネルギーを与える傾向にある。これらの結果より、ウインドウ幅として周期変動範囲の長周期側の値 T_1 を用いれば、ウインドウエネルギースペクトルは実験値の 2 倍程度の妥当な値を与えることが判明した(図 2)。

3. 実規模大キャスクへの適用

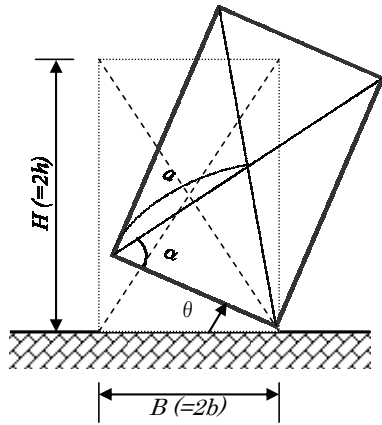
実物大キャスク(外径 4.0m×高さ 6.0m, 重量 180ton)を用いた振動試験結果において、浮き上がりと大きな滑り変位(80cm 以上)が発生した振動試験に対し、ウインドウエネルギースペクトルの適用性を検証した。その結果、ウインドウ内に入力されるエネルギーを、全て浮き上がりに必要な位置エネルギー、もしくは滑りの仕事量に変換されると仮定することにより、最大浮上り量と最大滑り量を定量的に評価できることが判明した(図 3)。

今後の展開

現在、電気事業が検討中である使用済燃料の中間貯蔵施設における貯蔵容器の取扱中における地震時安定性評価に活用する。

主 担 当 者 地球工学研究所 バックエンド研究センター 上席研究員 白井 孝治

*1 :地震が継続する時間内において剛体に入力されるエネルギー



$$V_E(a) = \sqrt{\int_{T_0}^{T_1} f(T)(V_{E0}(T))^2 dT}$$

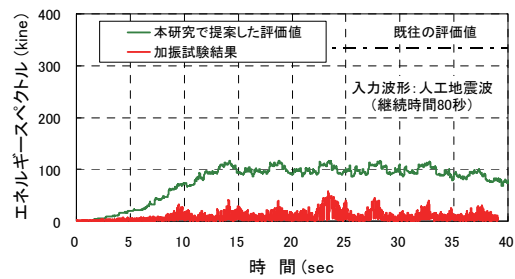
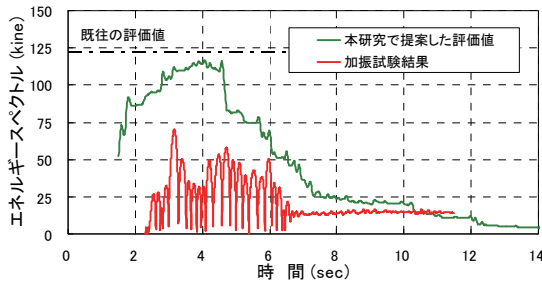
$$f(T) = -\frac{2(T-T_1)}{(T_1-T_0)^2}, T_0 = 0.02\sqrt{a}, T_1 = 0.3\sqrt{a}$$

$V_{E0}(T)$: 無減衰系のエネルギースペクトル

コンクリートキャスクは円柱体であり、回転振動を伴うロッキング応答を示すことから、エネルギー算出に有効な周期変動範囲を相似模型の振動実験で求め、修正転倒エネルギースペクトルとして提案した。したがって、コンクリートキャスクが転倒しないための判定条件は、
 転倒エネルギースペクトル < 転倒に必要なエネルギー速度換算値となり、次式で与えられる。

$$V_E(a) < V_{Ereq} = \sqrt{g(\sqrt{B^2 + H^2} - H)}$$

図1 コンクリートキャスク転倒限界評価のための修正エネルギースペクトル



縮尺率 1/3 の相似模型を用いた振動試験結果より、一定の評価時間 T_{window} (ウインドウ) 内のエネルギースペクトルをウインドウエネルギースペクトルと定義する。ウインドウ幅として周期変動範囲の長周期側 T_1 の値を用いれば、ウインドウエネルギーは実験値の 2 倍程度の包絡値を与えることが判明した。

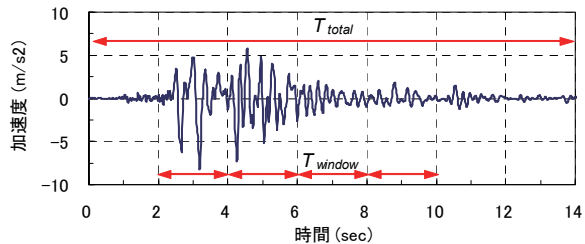


図2 ウインドウエネルギースペクトルの定義



防災科学技術研究所の実大三次元振動破壊実験施設 (E-ディフェンス) において、実物大キャスク (外径 4.0m×高さ 6.0m, 重量 180ton) を用いた振動試験を実施した。浮上りと滑り変位が発生した JMA 神戸波による振動試験に対し、ウインドウエネルギースペクトルの適用性を検証した結果、最大浮上り量と最大滑り量が定量的に評価できることが判明した。

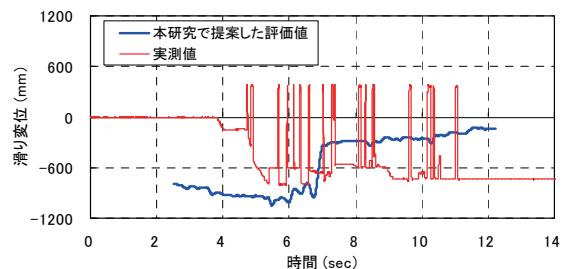
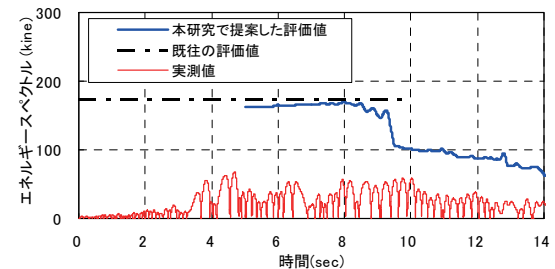


図3 実物大コンクリートキャスクを用いた振動試験に対する評価結果