

(129) キャスクの転倒現象に対する

個別要素法の適用性

○ (財) 電力中央研究所 白井 孝治
前田建設工業 (株) 龍 博志

1. はじめに

使用済燃料の輸送容器 (キャスク) を輸送する過程において、キャスクを縦置きで使用する場合があり、地震に対するキャスクの転倒評価が重要となる。キャスクの地震時の浮き上がり転倒現象は、本質的に円筒剛体の動的振動問題として取り扱うことができる。剛体のロッキング振動と転倒現象については、過去に数多くの研究がなされてきたが¹⁾、現象が基本的に変形の大変形現象であること、理論的な検討が困難であることから、まだ十分に解明されるに至っていない。本研究では、キャスクの浮き上がり転倒現象を解析するにあたり、Cundall の提案した個別要素法²⁾を適用し、キャスクの小型模型を用いた振動試験結果と比較して、解析手法の有用性を検討した。

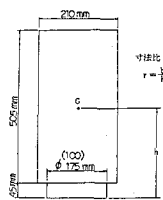


図-1 模型の形状・寸法

2. キャスクの小型模型を用いた転倒試験

2.1 転倒試験の概要

二次元加振振動台上に、小型円筒模型と床面模型をセットして加振を行い、模型のロッキング振動および滑動の測定を行った。図-1に模型の形状・寸法を、図-2に計測点を示す。試験体に角度計および角速度計を取付け、滑動量は非接触型のレーザー変位計により計測した。模型の寸法は $\phi 210 \times 550 \text{ mm}$ 、寸法比は 1/5 と 1/3、重量は約 145 kgf である。

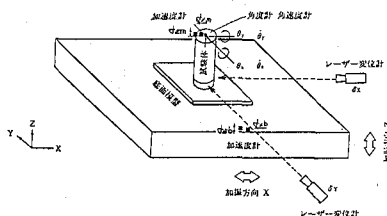


図-2 計測点

転倒試験に先立ち、試験体底部の動摩擦係数と試験体の反発係数の測定を行った。動摩擦係数の実測値の平均は約 0.25 であった。反発係数は角速度の減衰の割合で表し、式(1)で定義した。

$$\dot{\theta} \rightarrow \delta \times \dot{\theta} \text{ at } \theta=0 \quad (0 < \delta \leq 1) \quad \text{----- (1)}$$

以後、この δ を角速度減衰率と呼ぶ。また、 δ は衝突周期を用いて、式(2)からも算定できる¹⁾。

$$\delta = (G_{i+1} - 1 / G_{i+1} + 1) / (G_i - 1 / G_i + 1) \quad \text{----- (2)}$$

$$\text{ここに、} \quad G_i = e^{\lambda (T_{i+1} - T_i)}, \quad \lambda = n\sqrt{g}, \quad n^2 = MR / (I_G + MR^2)$$

(M: 質量, I_G : 重心回りの慣性モーメント, R: 回転半径,
g: 重力加速度, T_i : i 番目の衝突時刻)

式(1)で算定した値と式(2)で算定した値は、ほぼ同じ値が得られることが知られている¹⁾。 δ の実測値の平均は、寸法比が 1/5 の場合が 0.980、寸法比が 1/3 の場合が 0.941 であった。加振波形は、正弦波 (1.5~5.0 Hz) と地震波形 (El Centro N-S, 1940) であり、最大入力加速度は 100 gal~700 gal とした。なお、地震波については、水平 1 方向加振と水平・上下 2 方向加振 (上下方向の最大加速度は、水平方向の最大加速度の 0.6 倍³⁾) の 2 種類とした。

2.2 試験結果

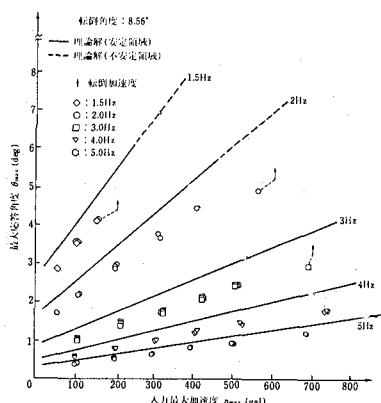


図-3 正弦波加振試験

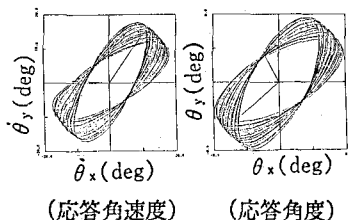


図-4 リサージュ

図-3に、寸法比 1/5の試験体を用いた場合の正弦波加振試験結果を、図-4に応答角度と応答角速度のリサージュの一例を示す。実線および点線は、模型の諸元と角速度減衰率 δ を用いて計算した最大応答角度の理論曲線¹⁾である。図中の↑は転倒した試験を示す。これらの結果より、加振振動数が小さいほど試験体が転倒する限界の加速度（以後、転倒加速度と呼ぶ）が小さくなる傾向にあり、試験結果が理論値より20%程度小さめの値を示している。これは、理論解では一方向のロッキングのみを考慮しているのに対し、転倒試験では試験体がこま回りのような三次元的な挙動を示したためと考えられる。また、転倒時には回転転倒が多くみられた。

図-5に、寸法比 1/5の試験体と寸法比 1/3の試験体を用いた場合のEl Centro 波形による加振試験結果を示す。寸法比が小さい場合ロッキング振動が卓越し滑動は生じず転倒に至っており、上下動の影響により転倒加速度が小さくなっている。一方、寸法比が大きい場合、ロッキング振動よりも滑動が卓越し、上下動の影響はみられなかった。

3. 剛体の転倒現象への個別要素法の適用性

3.1 解析コードの特徴

転倒解析には、多角形要素を用いた個別要素法解析コード（UDECE）を改良したものを用いた。個別要素法は、模型と床面を剛体ブロックと仮定し、個々のブロックの重心において立てられる運動方程式に基づき、系全体の運動状態を中央差分を用いて数値解析的に解く手法である⁴⁾。

ブロック間の不連続性や接触による変形、摩擦特性は、図-6に示すバネ・滑動系で表現し、法線およびせん断方向の2成分に分解して考える。ブロック間の反力は、微小時間 Δt の間に生じたブロックの頂点と辺の相対的な変位量から計算される。せん断方向については、摩擦力のみを考慮した。なお、図-7に示すように、接触の判定を円滑に行うためにブロックの頂点の形状は円弧とした。また、解を安定させるために質量比例型のRayleigh減衰を適用し、減衰の係数は $2\omega \cdot h$ (ω : 系の固有円振動数、 h : 減衰定数) で与えた。

重力 g_1 が作用する時刻 t における運動は、式(3)で表される。なお、時間増分 Δt については、Cundall が解の安定性を得るための条件から推奨した上限値 ($=2\sqrt{k/m}$) に、安全率 $f(=1/10)$ を乗じた値を用いた。

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_1(t+\Delta t/2) &= \dot{u}_1(t-\Delta t/2) + (\Sigma F_1(t)/m + g_1) \cdot \Delta t \\ \dot{\theta}(t+\Delta t/2) &= \dot{\theta}(t-\Delta t/2) + \Sigma M_1(t)/I \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \text{ただし、} \Delta t = f \cdot 2\sqrt{k/m} \quad (3)$$

ここに、 $\dot{u}_1$ はブロック重心位置の速度成分、 $\dot{\theta}$ はブロック重心位置の角速度であり、 m はブロックの質量、 I はブロック重心に関する慣性モーメントである。

(3)式より得られた速度から変位増分を求め、これを前回の時間ステップの変位に加え合わせることで、ブロックの新しい位置が決定される。これらの計算をすべてのブロックについて Δt 毎に逐次行うことにより、小型模型の転倒現象を経時的に追跡できる。

3.2 解析モデル

図-8に、解析モデルを示す。この解析モデルは二次元平面角柱モデルで、小型模型と床面模型は剛体で

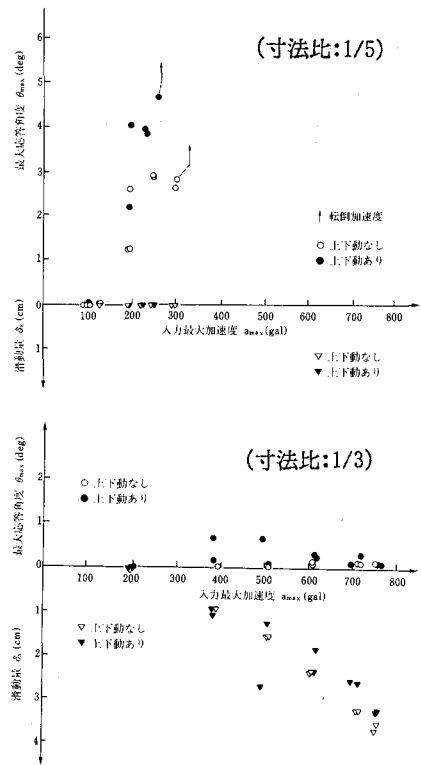


図-5 El Centro 波形加振試験結果

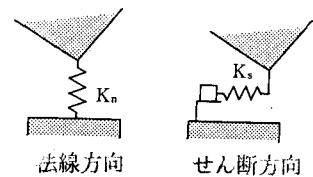


図-6 ブロック間の構成

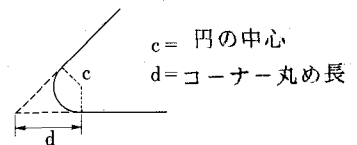


図-7 接触判定の円滑化

モデル化した。小型模型モデルの密度は試験体と等価になるように設定し、加振波形は床面より入力した。解析に用いたバネ剛性と減衰定数は、反発係数試験で測定された角速度の自由減衰振動波形と等価になるように設定した。図-9に、バネ剛性と減衰係数の設定フロー図を示す。バネ剛性は、模型の材料の弾性係数を基準にして適宜に変化させてパラメータ計算を行い、式(1)と式(2)で計算される δ がほぼ同じ値であり、かつ δ のばらつきが最も小さいものを選定した。また、減衰については、ロッキングの固有円振動数を一意に求められないので、反発係数試験で実測された δ と解析により得られた δ が一致するように、 ω と h を試行錯誤的に求めた。なお、摩擦係数は一定とした。表-1に解析に用いたバネ剛性と減衰定数を示し、図-10に角速度の自由減衰振動波形の試験結果と解析結果を示す。

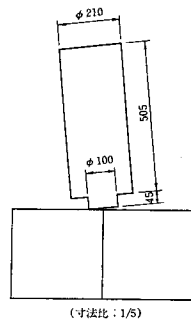


図-8 解析モデル

表-1 解析に用いた定数

寸法比	バネ剛性 (kgf/cm)		減 衰 定 数	
	k_n	k_s	h	ω
1/5	5.6×10^6	5.6×10^6	なし	なし
1/3	5.6×10^6	5.6×10^6	0.03	20

3.3 解析結果

図-11に、寸法比 1/5の模型を対象として、入力の変位振幅 α/ω^2 を一定にして正弦波を入力した場合の最大応答角度について、ロッキングのみを考慮した理論応答曲線と解析結果とを比較して示す。縦軸は、最大応答角度を転倒角度で除して無次元化したものである。解析

では、滑りや跳躍を考慮しているため、理論曲線よりもやや小さい値を示しているものの、良い対応がみられることから、解析モデルが妥当であると判断される。

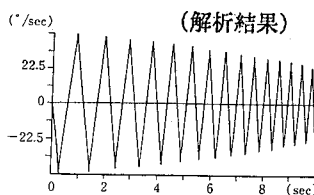


図-12に入力変位振幅 0.3cm、振動数 5 Hzの正弦波入力の場合の応答角度波形について、試験結果と解析結果を比較して示す。解析結果は試験結果とほぼ良い一致を示している。また、図-13に、ロッキング振動が卓越する寸法比1/5の解析モデルに、El Centro波形を入力した場合の

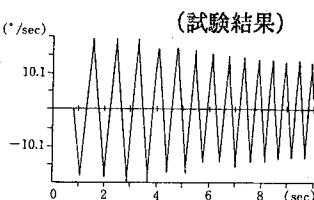


図-10 角速度の自由減衰振動波形 El Centro波形を入力した場合の転倒挙動を示す。試験では240galを超えたあたりから転倒したのに対し、解析では入力最大加速度210galの時に転倒に至った。以上のことから、円筒の転倒現象については、略算的には二次元角柱モデルで推定可能であると考えられる。

図-14に、寸法比1/5の解析モデルに、El Centro波形（入力最大加速度190gal）を水平1方向で入力した場合と、水平・上下2方向で入力した場合の応答角度を比較して示す。上下動を考慮した場合、応答角度が大きくなっており、試験結果と同様に上下動の影響により転倒しやすい傾向になる結果が得られた。

図-15に、滑動が卓越する寸法比1/3の試験体に、El Centro波形（最大入力加速度760gal）を入力した場合の滑動量の時刻歴について、試験結果と解析結果を比較して示す。最終的な滑動量はほぼ良い一致を示しているものの、解析では摩擦係数を一定として取り扱っているため、滑動直後の波形に相違がみられる。

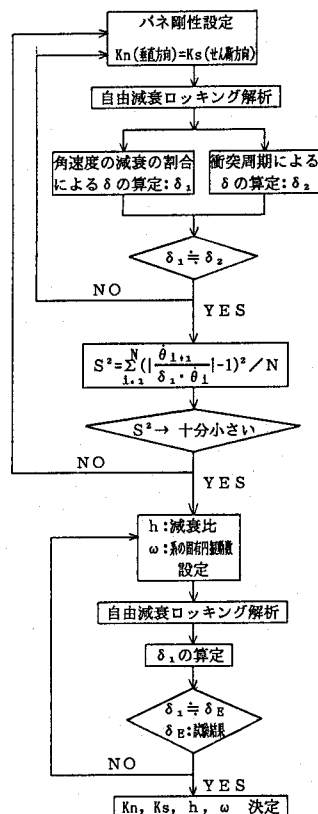


図-9 バネ剛性、減衰係数設定フロー図

4. まとめ

キャスクの小型模型を用いた転倒試験により、キャスクの転倒現象への個別要素法の適用性を検討し、以下の知見を得た。

(1) 小型模型に正弦波を入力

した場合、加振振動数が小

さくなると転倒加速度が小

さくなり、転倒時の挙動は、回転転

倒が多く発生した。また、上下動を

考慮した場合、小型模型の転倒加速

度が小さくなる傾向がみられた。

(2) 小型模型のロッキング振動におい

て、重要なパラメータは角速度減衰

率 δ であり、解析ではこの δ を適切

に評価する物理定数（バネ剛性・減

衰定数）を用いる必要がある。

(3) 摩擦係数の特性が、滑動直後の応答に大きく影響することが明らか

となった。したがって、摩擦係数の面圧やすべり速度への依存性

を明らかにし、摩擦係数を適切にモデル化する必要がある。

(4) キャスクの転倒現象は、略算的には二次元角柱モデルで推定可能

であり、個別要素法がキャスクの地震応答を十分評価し得る手法で

であると判断される。

今後、実規模スケールのキャスクを用いた転倒試験により、本解析手法の妥当性を確認する。さらに、回転転倒に至る条件を明らかにするため、本解析手法を三次元に拡張し、転倒挙動をさらに詳細に追跡する予定である。なお、プログラムの開発に当たり、楢応用工学研究室の菊田利雄氏に有益なご意見、ご助言を頂いた。また、計算業務については、楢電力計算センターの桜井良方氏の協力を得た。ここに記して、深謝の意を表するものである。

[参考文献]

- 1) 小川：剛体の転倒振動に関する研究，日本建築学会論文報告集，No.287,1980
- 2) Cundall,P.A.:The measurement and analysis of accelerations in rock slopes,Ph.D.Thesis,University of London,1971
- 3) K.Isida.et al:Tentative Design Response Spectrum for Seismically Isolated FBR,the 10th SMIRT,1989
- 4) 石田他：個別要素法のプログラム開発とブロックモデルによる実験的検討，電力中央研究所 研究報告 383014,1983.9.

(連絡先) 〒 270-11 千葉県 我孫子市 我孫子 1646 TEL 0471-82-1181

(財)電力中央研究所 我孫子研究所 原燃サイクル部 輸送・貯蔵研究室

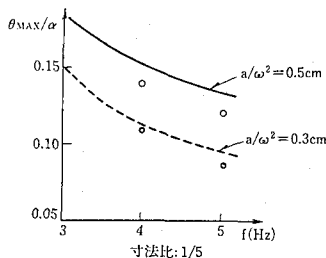


図-11 正弦波入力最大応答角度

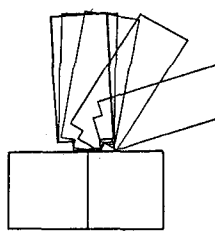


図-13 解析モデルの転倒挙動

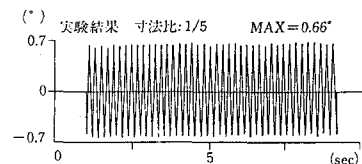
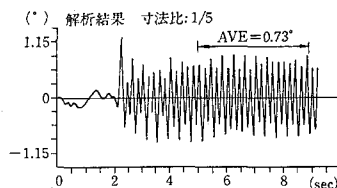


図-12 正弦波応答角度波形

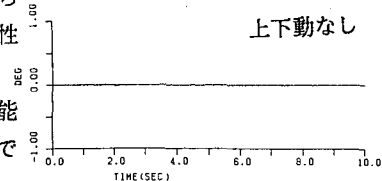
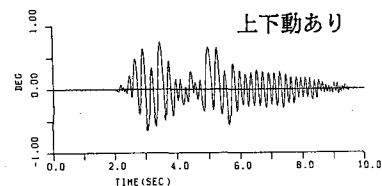


図-14 上下動の影響

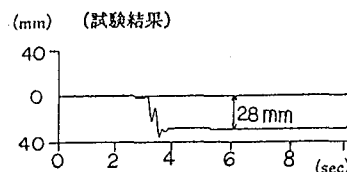
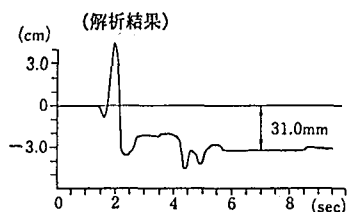


図-15 滑動量の時刻歴