

I-567 個別要素法のキャスクの転倒現象への適用性 (その2)

○(財)電力中央研究所 正員 白井 孝治
前田建設工業(株) 正員 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ことがあり、地震に対するキャスクの転倒評価が重要となる。筆者等はすでに、キャスクの転倒現象に対して、個別要素法が有用な解析手法であることを明らかにしている¹⁾。本研究では、解析手法の信頼性を図るため、キャスクの大型模型を用いた振動試験を実施し、解析手法の定量的な検討を行った。

2.大型模型振動試験 一軸大型振動台上にキャスク模型と床面模型(実機キャスクの約1/3縮尺模型:重量 12.6tonと約1/5縮尺模型:重量 12.6ton)をセットして加振を行い、キャスク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・寸法を示す。図-2に、計測点を示す。床模型は、鉄筋コンクリート床版を用いた。振動試験に先立ち、キャスク模型の反発係数とキャスク底面と床面の間の動的な摩擦係数の測定を行った。ロッキングの反発係数は角速度最大振幅の減衰の割合で表すこととした。反発係数の実測値は、1/3模型が0.963、1/5模型が0.951であった。摩擦係数は、面圧には顕著な依存性はみられず、滑り速度に依存する傾向がみられた。図-3に摩擦係数と滑り速度の関係を示す。加振波形は、正弦波とEl Centro波形(1940,S00E)および八戸波形(1968,E-W)を用いた。図-4に、試験結果の一例を示す。比較的長周期の成分を有する八戸波形に対し、キャスクの応答角度が大きくなる傾向がみられた。

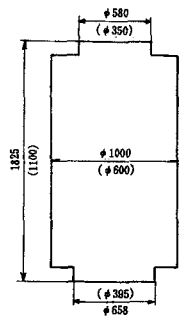


図-1 模型の形状寸法

3.解析モデル 図-5に、解析モデルを示す。解析モデルは二次元平面角柱モデルで、キャスク模型と床面は剛体でモデル化し、加振波形は床面より入力した。なお、キャスクモデルの底面の半径は、底面端部回りの回転半径が試験体と等価となるようにモデル化した。接触面のバネ定数は、表-1に示される半無限弾性体地盤上の矩形基礎の復元力バネを用いた²⁾。減衰定数は、Rayleigh減衰を用いて反発係数が一致するように試行錯誤的に求めた。動摩擦係数は、摩擦係数試験結果を用いて滑り速度に依存させた。表-2に解析に用いた物性値を示す。解析により得られた角速度減衰率は1/3模型が0.964で、1/5模型が0.948であった。

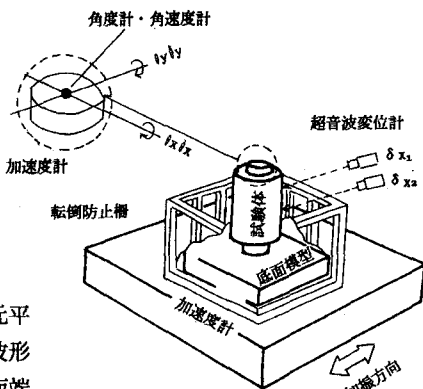


図-2 計測点

4.解析結果 図-6に、入力の変位振幅 a/ω^2 を一定にして、1/3模型に正弦波を入力した場合の最大角度応答について、理論応答曲線³⁾と実験値および解析結果を示す。解析結果は、理論曲線よりもやや小さな値を示しているものの、実験値とほぼ良い対応がみられ、解析モデルが妥当であると判断される。

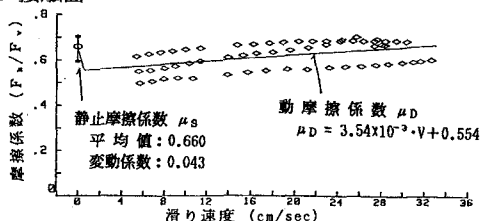


図-3 摩擦係数と滑り速度の関係

図-7に、八戸波形(入力最大加速度 400gal)を1/3模型に入力した場合のキャスク模型に発生した応答角度の時刻歴応答波形について、解析結果と試験結果を比較して示す。

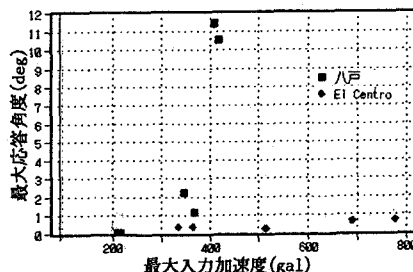


図-4 地震波加振結果

最大応答角度およびロッキングの現象時間は、試験結果と良い一致を示している。

図-8に 1/3模型と1/5模型を用い、八戸波形を入力した場合の最大応答角度について、解析結果を試験結果と比較して示す。

試験結果も解析結果も寸法の小さい方が応答角度が大きくなる傾向(スケール効果)がみられ、定量的にも良い対応を示している。

5. まとめ

(1) 正弦波を入力した場合、試験結果は理論解と良い一致を示しており、

キャスクの転倒現象は二次元で評価できることが明らかとなった。また、解析結果も理論解と良く一致しており、解析のモデル化手法の妥当性が確認された。

(2) 地震波を入力

した場合、摩擦係数の速度依存性を考慮することにより、最大応答角度やロッキングの現象時間、およびスケール効果についても解析と試験結果は定量的にも良い一致を示しており、本解析手法によりキャスクの転倒現象を定量的にシミュレートできることが明らかになった。

(3) 個別要素法解析コードを鉄筋コンクリート床版上のキャスク転倒現象に適用するに際し、以下のパラメータに留意する必要がある。

- ①パネ定数は表-1で与えられる式により求める。
- ②減衰は、剛性比例型のRayleigh減衰を用い、①の法線方向のパネ定数とキャスクの重量よりえられる固有振動数に対し、5~6%の減衰を考慮する。
- ③時間刻みは、解の収束安定性から求められる最大時間増分値の0.01程度とする。

[参考文献]

- 1) 白井、龍：キャスクの転倒現象に対する個別要素法の適用性, 第21回地震工学研究発表会, 1991.
- 2) 土質工学会編：土と構造物の動的相互作用
- 3) 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.

表-1 パネ定数の算出式

パネ種類	パネ定数 (Barkan:1962)
法線	$K_n = G \cdot \beta_z \cdot a / (1 - \nu)$
せん断	$K_s = 2(1 + \nu) G \cdot \beta_x \cdot a$
	ν :ポアソン比 $\beta_z:2.1$
	G :せん断弾性係数 $\beta_x:1.0$

表-2 解析に用いた物性

模型縮尺	1/3	1/5	
模型密度 (g/cm ³)	8.743		
パネ定数 (bar/cm) (分布パネ)	法線方向	2.38 × 10 ⁹	4.07 × 10 ⁹
	せん断方向	2.21 × 10 ⁹	3.76 × 10 ⁹
時間刻みの安全率	0.01		
ブロック頂点の丸め長さ (cm)	0.50		
摩擦係数	図-3 参照		
減衰定数 (%) (固有振動数)	5.6%	5.6%	
	(135Hz)	(220Hz)	

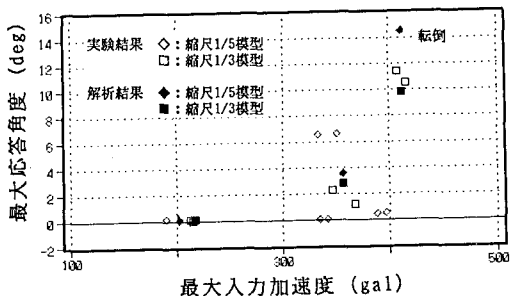


図-8 スケール効果の試験結果と解析結果の比較

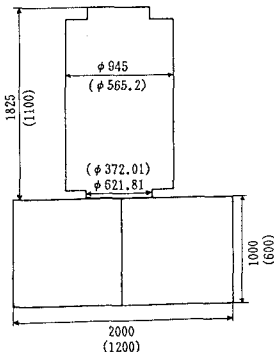


図-5 解析モデル

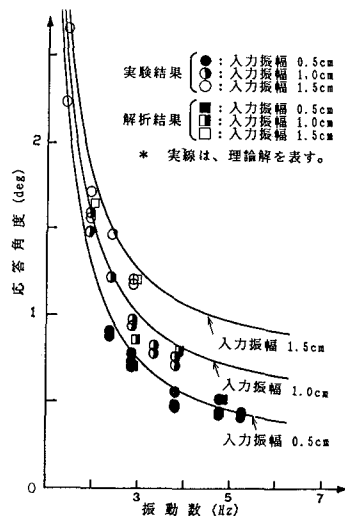


図-6 正弦波加振結果と解析結果の比較

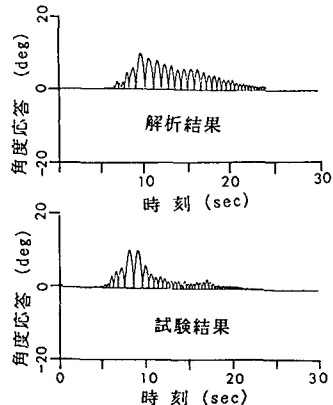


図-7 地震波応答角度波形の時刻歴