

長周期長時間地震動を受ける免震病院の室内被害評価 -キャスター付き医療機器類の被害を表現する応答工学量の分析-

長江研究室 井上莉彩子

1. はじめに

大震災後の事業継続を目的として、免震構造を採用する医療施設が増加している。一方、各種医療行為の効率を高める必要性から、医療施設における関連機器類は、下端部のキャスターによってモビリティを確保している。

南海トラフ巨大地震では、長周期長時間地震動の発生が確実視されるが、これを模した免震構造の医療施設に対する振動実験では、キャスター付きの医療機器類が移動と衝突を繰り返した¹⁾。事業継続が阻害されるだけでなく、手術や集中治療などの医療環境が破壊されれば、生命が危険にさらされる問題である。しかし、長周期長時間地震動における免震医療施設被害を系統的、定量的に評価する手法は確立されておらず、実務設計時における検証、医療現場における対策等は遅々として進んでいない。

本研究では、評価手法に向けた基礎的な取り組みとして、既往の実験資料を詳細に見直すことから、内部空間損傷・被害程度と関係が深いと思われる地震応答工学量を分析する。また、最新の予測地震動を用いることで、室内のキャスター付き医療機器の移動状況を定量的に考察する。

2. E-ディフェンス実験の分析

2.1 実験概要

対象とする実験は、平成20年度にE-ディフェンスにおいて実施された、免震医療施設を模した大規模振動台実験である(図1)。試験体の室内には実際の医療機器などが配置されており、特に手術室、集中治療室にはキャスター付きの医療機器類が多く、透析用機器類、病室ベッドもキャスター付きの条件である。実験時のビデオを参照すると、兵庫県南部地震の記録波・JMA 神戸波を入力した際には免震効果を発揮し、約10秒の間位に機器類がわずかに移動するのに対し、南海トラフ地震の予測波・三の丸波を入力した際は、免震構造が共振現象を起こし、キャスター付きの医療機器が移動し続けること(図2)が確認できた。



図1. 試験体全景



図2. 機器類が動き続ける手術室

2.2 床応答分析と床応答累積変位の提案

対象とする免震層は天然ゴム系積層ゴム4基と鋼製U型ダンパー1基によって構成されており、その構造特性を評価する。対象とする入力地震波はJMA 神戸波と三の丸波である。各階最大加速度を図3に示す。

JMA 神戸波入力時は、振動台と比べて上部構造への入力加速度が約1/4に低減されている。三の丸波入力時は上部構造の応答加速度が振動台の入力加速度よりも大きくなっており、共振の影響が現れている。いずれの地震動入力時でも、上部構造の各階の最大加速度に大きな違いはなく、ほぼ剛体的な挙動を示している。よって、対象の免震構造を1質点系の線形モデルと仮定して、実験結果に基づき、等価周期および等価減衰定数を評価する。加速度を1階床で代表して縦軸にとり、免震層の水平変位を横軸にとった履歴ループを図4に示す。変位振幅が異なり、等価周期はJMA 神戸波に対して、2.3秒(最大振幅11cm)、三の丸波に対して2.7秒(最大振幅44.6cm)となった。

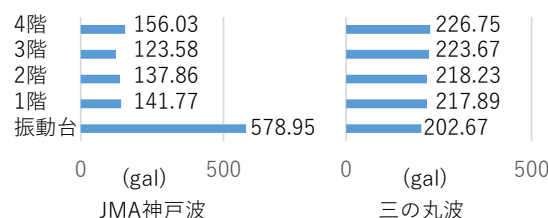


図3 各階最大加速度

等価減衰定数の評価には下記の式を用いる。この平均等価減衰定数 h_s は、等価周期の線形システムが実験と同じ変位時刻歴を与えられたときに総エネルギー消費量が等しくなる減衰定数を選ぶことを意味するが、この値も地震動および振幅に依存しており、JMA 神戸波入力時で0.11、三の丸波で0.19となった。

$$h_s = \frac{-\int_0^T \ddot{y}_0 \dot{y} dt}{-2\omega_e \int_0^T \dot{y}^2 dt}$$

$\ddot{y}_0$: 振動台加速度 $\dot{y}$: 代表速度 ω_e : 最大点円振動数

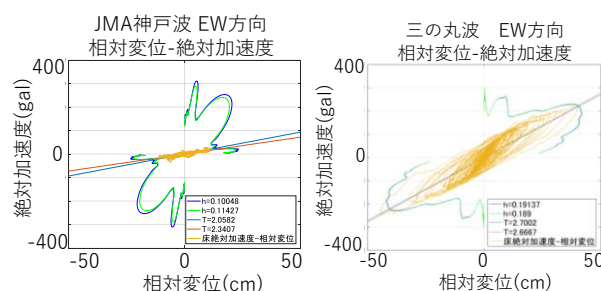


図4 加速度-変位関係と平均等価減衰定数

図4に、入力地震動に対して上記等価減衰定数を採用した応答スペクトル(縦軸 S_a 、横軸 S_d)を重ねて示しているが、履歴ループの最大ピーク点が当該スペクトルと触れる条件となり、平均等価減衰の妥当性が示された。線形システムにより最大応答加速度・変位を適切に評価できる。一方、長時間キャスター付き機器類が移動し続ける状況

を表現する応答工学量として、床応答絶対変位の累積値に注目する。キャスターの床に対する水平抵抗力がゼロであれば、機器の床に対する移動は床の絶対変位に一致する。その累積値をもって機器の動き続ける状況を間接的に評価することを意図した。図5には三の丸波・JMA 神戸波入力時の床の絶対変位総移動量実験値を、図6には、等価周期・等価減衰定数を用いた線形システムに振動台計測波形を入力した計算値を合わせて示している。最終的な総移動量について、三の丸波の値はJMA 神戸波の値の10倍以上に達することがわかる。三の丸波では、解析値は実験値を5%程度上回るがほぼ対応した。

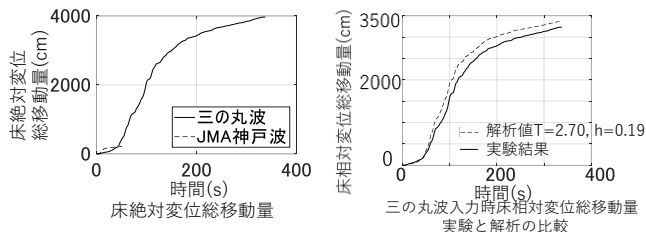


図5 総移動量実験結果

図6 等価線形による評価

3. キャスター付き医療機器の移動解析

キャスター付き医療機器類の挙動把握用の解析モデルとして、完全剛塑性に近似した1質点系モデルを作成した。図7に概要を示す。キャスターの水平抵抗力を既往研究も参考に摩擦係数 μ 換算で0.04, 0.05, 0.06と変化させた。図8において、三の丸波では大きく移動し続ける様子が表現できた。また、摩擦係数設定によって結果が大きな影響を受けた。

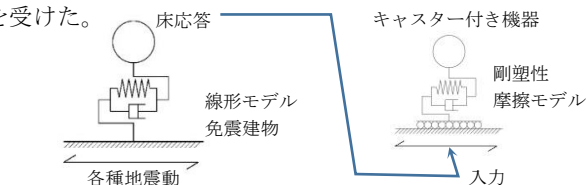


図7 キャスター付き機器移動の計算概要

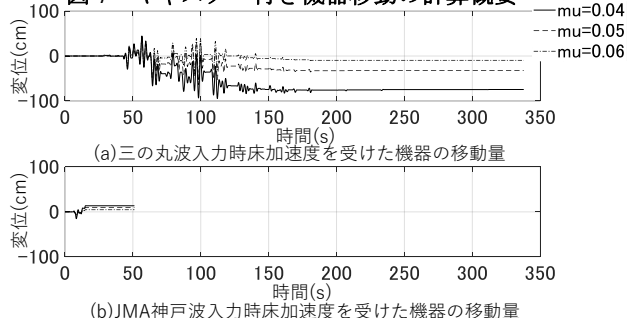


図8 解析時刻歴波形

4. 南海トラフ地震の予測波を含めたスペクトル検討

線形システムによって免震建物をモデル化する。振幅の増大の傾向も踏まえ減衰定数は20%とする。文部科学省シミュレーション波²⁾は統計的な視点により、同一サイトにおいて100を超える数の波が示されている(ここでは、愛知県庁を選択)。周期3秒に対するスペクトル振幅に着目し、中央値およびそこから標準偏差の2倍離れた位置に対応する50パーセンタイル、95パーセンタイル相当の波(ACI50, ACI95)を抽出して用いる。東北地方太平洋沖

地震の築館観測波を含め、地震応答スペクトルを図8に示す(速度スペクトルには、滑り出しの条件式も付記)。

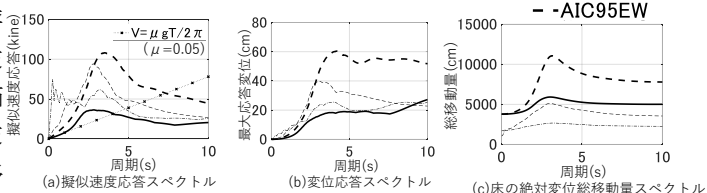


図9 地震動の応答スペクトル(減衰定数20%)

一方、数値解析によって、キャスター付き医療機器の最大変位と総移動量を評価しスペクトル化した(図10キャスター機器スペクトル)。ここでは $\mu=0.05$ としている。

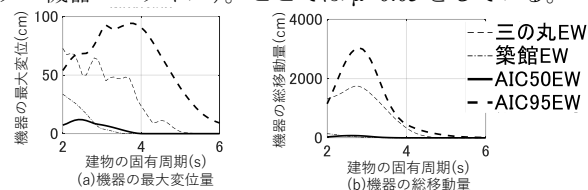


図10 キャスター機器解析の最大変位量と総移動量

図9において免震建物の周期帯2~6秒に注目すると、床応答最大変位について三の丸波は文科省波の中央値AIC50とAIC95の間、築館波はAIC50と同等であった。一方、床総移動量では三の丸波とAIC50が同等となり、築館波ではAIC50の5割程度となった。

図10のキャスター機器スペクトルでは、地震波ごとの相対関係は大きく変わらないが、最大変位量は床の絶対変位量に影響され、三の丸波とAIC95入力時の機器の最大変位量はそれぞれ60cm、90cmに達し、床の変位応答の最大値の約1.5倍となった。機器の総移動量は、床の絶対変位の総移動量の約0.3倍となった。

以上のキャスター機器解析の最大変位量、総移動量については、最大応答速度が滑り出し条件の速度を上回る周期帯において、成り立つ傾向と理解できる。また、機器の総移動量は、刻々と変化する床の応答速度の条件に依存するため、床総移動量スペクトルに、このような条件を組み込む方法が必要であることが示唆された。

5. 結語

新たな南海トラフ予測波、著名な三の丸波により免震医療施設のキャスター付き機器が動き続ける状況を床総移動変位量スペクトル、キャスター付き機器解析スペクトルにより表現する方向性を提示した。

今回用いたキャスター付き機器解析モデルでは、等価摩擦係数を0.04, 0.05, 0.06と変えて見たが、移動量は大きく異なった。実際のキャスター付き医療機器の挙動、ひいては医療施設内の被害様相の判断のためには、実験と解析評価との相対関係資料を整備する必要がある。

参考文献

1. 独立行政法人防災科学技術研究所「重要施設の耐震実験報告」平成21年
2. 前田宜浩他：震源モデルの不確実性を考慮した南海トラフの海溝型巨大地震の長周期地震動ハザード評価、第14回日本地震工学シンポジウム、2014