

免震・耐震に関する研究

柴田 耕一 (数理情報工学科)

序. 本研究は建造物の免震、美術品の免震の研究をする上で振動特性を把握するために必要な振動応答解析手法の開発を行い、解析結果を実験と比較している。ここで研究している免震システムは、高減衰型積層ゴムをばね要素としている場合とすべり支承に曲面を用いて、重力による復元力をばね要素としたものとの二種類である。

一方、容器構造として、円筒型サイロの耐震のために、座屈前から座屈後に至る振動応答解析の手法の研究開発を行っている。この場合も円筒型サイロが弾性域から座屈後までの実験結果を正弦波入力、ランダム波入力に対して比較し、手法の妥当性を検証している。

以上の研究内容について12年度に得られた成果を以下に順次述べる。

1. 免震用積層ゴムを用いた振動系の応答解析に関する研究 文献1

—履歴系解析手法の改良と実験による検証—

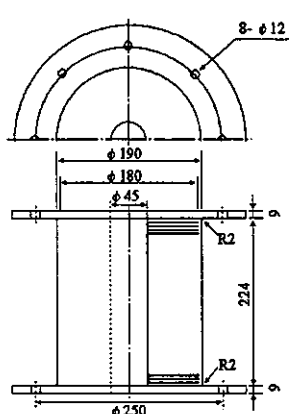
免震用積層ゴムを用いた免震構造の動的挙動をより正確に求めるために、ゴムの振動特性を把握し、動的振動応答解析を精度良く行うことが重要となる。(図1,2)

一般に、積層ゴムに使用されている高減衰ゴムは変位振幅、周波数および面圧に依存して変化する非線形振動特性(剛性、減衰)を示すため、その振動特性を反映した動的振動応答解析を困難なものとしてきた。しかし、既に我々は変位振幅、周波数および面圧に依存する振動特性を精度良く求めるために、履歴曲線の形状が類似しているべき関数型復元力モデルを用いて解析的に算出する手法を提示し、また、積層ゴムをばね要素とする一質点系に強制外力が作用する場合の振動応答解析手法として、べき関数型等価線形系解析手法(PFT-ELS法: Equivalent Linear System using the Restoring Force Model of Power Function Type)およびべき関数型履歴系解析手法(PFT-HYS法: Hysteresis System using the Restoring Force Model of Power Function Type)を報告した。

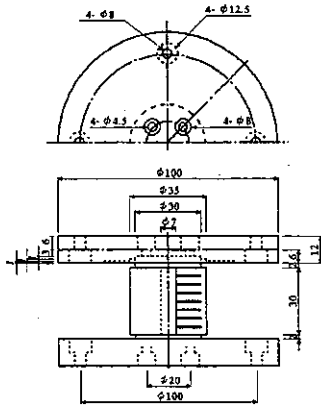
周波数、変位振幅に依存して求まる減衰量と剛性量を線形の運動方程式に逐次置き換える ELS 法に比べ、HYS 法は履歴曲線の形状が類似しているべき関数型復元力モデルを運動方程式に適用して解析を行うため、履歴復元力を的確に表現できると考えられる。しかし、履歴本線のみ定義する従来の HYS 法は変位振幅が原点付近で折り返す場合や、周波数が急激に変化する場合に復元力に不連続点が生じる。

そこで本論では、この HYS 法の更なる解析精度の向上を目的として、車両用防振ゴムに用いた手法と同様に周波数、変位振幅依存の履歴本線のみ定義する従来の履歴則に、周波数、変位振幅に依存する履歴支線までも定義する方法を適用する。この方法を適用するにあたり振動特性に影響する周波数および履歴支線時における変位振幅の決定方法について改良する。(図3~6)

改良した手法の妥当性については、ソフトニング型復元力特性を有する積層ゴムをばね要素とした一質点系に地震波が作用する場合の振動応答解析結果に対して ELS 法および従来の HYS 法と比較することで考察し、また、人工的なランダム波を入力加速度とした場合の振動実験結果と解析結果を直接比較することで検証をした。



Rubber sheet : 3.41mm × 51
Steel plate : 1.0mm × 50



Rubber sheet : 3.225mm × 8
Steel plate : 0.6mm × 7

図1 試験体1の形状

図2 試験体2の形状

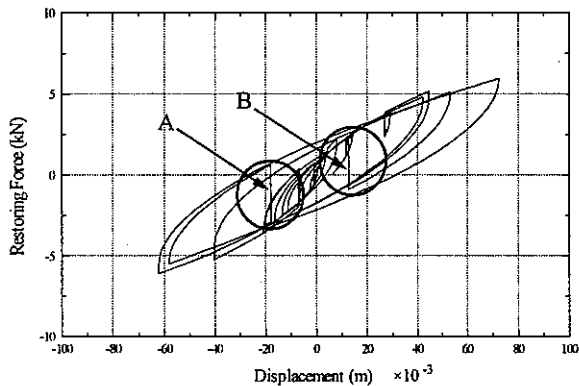


図7 従来のHYS法による履歴復元カーループ (EL CENTRO, 試験体1)

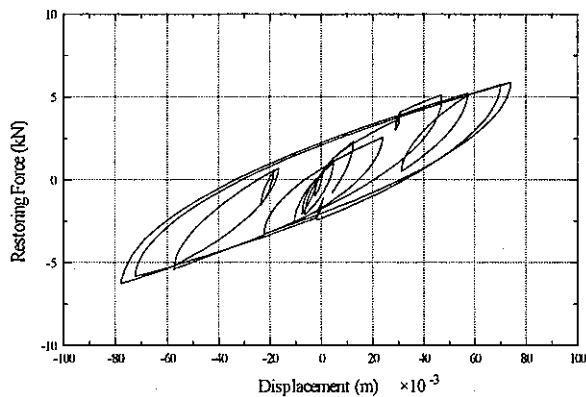


図8 改良後のHYS法による履歴復元カーループ (EL CENTRO, 試験体1)

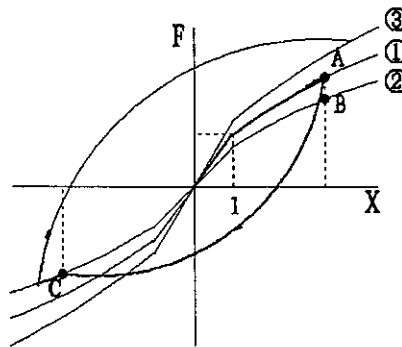


図3 動的履歴則 (I)

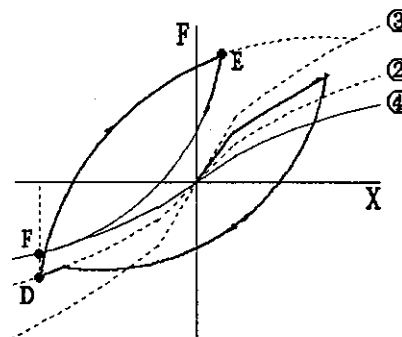


図4 動的履歴則 (II)

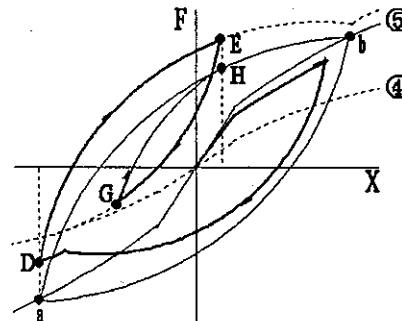


図5 動的履歴則 (III)

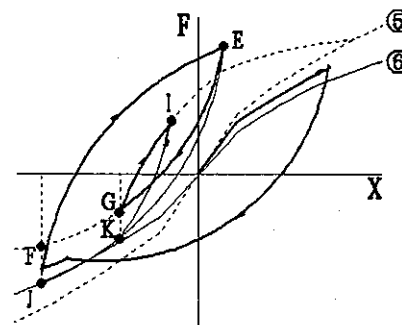


図6 動的履歴則 (IV)

結論

本論では、変位振幅の折り返し点において周波数が大きく変化する場合に従来のHYS法に見られた、応答波形および履歴復元カーループの不連続点を解消するために履歴則の改良を行い、また、振動実験による実験値とELS法および改良型HYS法による解析値を直接比較することで手法の検証を示した。その結果、次の

ことが明らかになった。

(1) 地震波入力による解析結果の比較 (図 7,8) から、改良後の HYS 法は絶対応答加速度波形において不連続点がなくなり、その結果、改良前に見られた履歴復元力ループの不連続点を解消する事ができた。また、連続的な応答計算が可能となったことから信頼性も向上していると考えられる。

(2) 振動台上実験から得られた振動応答値と解析値の比較により、ELS 法の信頼性を示すことができたと同時に、改良した手法についても確かめることができた。また、手法の検証からは、いずれの手法とも実験値とよい対応を示しているが、ELS 法に比べ改良型 HYS 法による解析結果は実験による応答をより反映していると考えられる。

(3) 非線形振動系の応答解析に従来の HYS 法と改良後の HYS 法が有効な手法であると考えられる。しかし、履歴復元力ループの形状で免震効果を判断し、あらかじめ特徴のある理想的な履歴を考慮する場合や、累積塑性変形等を調べる場合、ELS 法、従来の HYS 法では復元力ループに不連続点がありループの形状や、囲む面積を正確に判断することは困難である。その点において改良型 HYS 法は連続的な応答波形を表現できるため、従来の手法に比べ優位であると言える。

2. 免震用積層ゴムを用いた振動系の履歴本線のみを使う応答解析手法について 文献 2

—連続的な履歴復元力について—

免震構造に用いられる積層ゴムアイソレータに高減衰ゴムを用いている場合に対する振動応答解析をより正確にして免震構造の信頼性を高めることを目的とし、積層ゴム系の履歴特性と応答解析について、解析手法の改良を試みている。これにより、累積塑性変形倍率が必要となる履歴系に対しても正確な累積値を得ることが出来るものと思われる。

以下に、その成果について述べる。

1. これまでに改良されたべき関数型応答解析手法は、履歴支線までも含めて、解析が精密な一方、計算手法が煩雑であった。
2. 応答周波数の変化に応じて、履歴曲線の拠所となる骨曲線を変化させる方法があるが、計算が簡単な一方、応答の履歴曲線に不連続点が生じた。
3. より精密に振動応答解析を保ちつつ、より簡単な手法として、これまでのような履歴支線を用いず、履歴本線のみ定義して用いることにより、不連続点のない振動応答解析が可能となり、応答の履歴曲線についても不連続点のない手法を開発した。
4. 最後に、振動台上実験を行い、解析値と比較することにより、その精度と、有効性を確かめることが出来た。

以上の結果は他の履歴を示す振動系の応答解析に応用することが出来、更により精度の良い振動解析が可能となることを期待することが出来る。

3. すべり摩擦型免震に関する研究 文献 3

—振動応答とすべり摩擦係数について—

美術品を対象とした免震システムについて研究している。室内の場合は地動に対する応答のみで、風力に対する外力は考慮する必要がない。さらに軽量な美術品に対する場合は、高価な材料を使用しなくとも、文具店、ホームセンター等の市販の材料を用いることにより、免震の目的を達成することが可能であることが分かった。

- a). 美術品の展示ケースは、奥行きが狭く、地震動に対する運動範囲は約±10cmに限られる。
- b). 振幅を大きく取って周期を長く (3sec 以上) して地震エネルギーを吸収することが免震の特色であるが、変位振幅を制限すると応答加速度が大きくなり、美術品は転倒しやすくなる。

以下にその研究成果について述べる

1. 今回はすべり面に曲率を付けた為に、重力により復元力を得ることができるようになっている。
2. 振動解析を行う前にあらかじめ摩擦材の摩擦係数の圧力と速度の依存性を実験的に調べている。

3. 以上のことをふまえて、4種類の地震波を最大70kineに調整して振動応答解析を行った。
4. 振動解析の結果、本論の摩擦材を使用する場合、4種類の入力地震波に対し、応答は荷重1.0~1.5kgfに対して、最大約10cm、加速度250gal以内に抑えることが出来た。
5. 解析手法の妥当性を確かめる為に、ランダム波入力による模型実験を行い応答波形が解析結果と一致することを確かめた。

以上の結果、軽量な美術品については、この免震システムで免震が可能であることが分かった。

4. 容器構造の周波数特性を考慮した振動応答解析に関する研究 文献4

—サイロ試験体の解析と実験による検証—

容器構造の内、サイロの耐震に必要な保有耐力に関係したエネルギーの吸収能力を知るために、地震動に対する振動解析を用いて、弾性域から剛性が急激に退化する座屈後も含めて振動解析を研究している。

1. あらかじめ地盤に固定し、上部に繰り返し加力して、加力周波数、振幅を変化させて試験体の弾性域、座屈後、倒壊するまで、多くの試験体により、周波数、変位に依存したサイロの履歴特性を調べた。
2. この履歴特性を整理し、あらかじめ関数化している。(ループの面積、剛性の変化等)
3. 周波数、振幅に依存した復元力特性を用いた、新しい解析手法の提案をしている。
4. 次に、別の試験体を用いて振動台上で振動実験を行った。始めに正弦波入力に対する振動応答が、座屈前から後にわたり応答加速度、相対速度、相対変位について解析結果と一致することを確かめている。
5. さらに、ランダム波入力による振動台上実験を行っている。座屈前から後にわたり応答加速度、速度、変位について解析結果と比較している。特に、ランダム波入力に対し、応答加速度、速度について解析結果と良い一致を見た事は初めてである。
6. これにより、周波数、振幅に依存した容器構造に対する新しい解析手法の妥当性を確かめることが出来たと同時に、さらに手法の改良の必要性についても示している。

最初に地盤に固定された試験体による復元力の振動特性を求め、次にそれを用いた地震応答解析を行い、これとは別の試験体による振動台上実験を行い、弾性域から座屈後にわたる振動応答波形が一致したことから、本論の解析手法は容器構造の振動特性を良くとらえていることを確かめることが出来た。

以上1~4項の研究の結果、高減衰型積層ゴム型免震の解析では、履歴に関して不連続な応答を解消していることにより、地震エネルギーの吸収量にも関係する累積塑性変形量をこの解析手法により正確に求めることが出来るようになった。すべり支承については美術品を地震に対して安全に守る糸口がつかめた。容器構造の耐震に関しては周波数と振幅に依存して履歴特性が変化する解析モデルを提案して、座屈前と後にわたり、正弦波入力に対しては応答加速度、応答変位について、ランダム波入力に対しては応答加速度について解析、実験が一致した事から、これらの解析モデルを使用することにより他のバイリニア型に置換しないで他の多くの非線形振動系の振動性状を知る事が可能であると考えられる。

参考文献

1. 柴田康弘、岡本修一、柴田耕一：免震用積層ゴムを用いた振動系の応答解析に関する研究（履歴系解析手法の改良と実験による検証）、日本建築学会構造系論文集、第532号、p71~78、Jun.,2000
2. 大熊友和、柴田康弘、柴田耕一：免震用積層ゴムを用いた振動系の履歴本線のみを使う応答解析手法について（連続的な履歴復元力について）、日本大学生産工学部第33回学術講演会、p57~60、Dec.,2000
3. 金子靖、柴田康弘、畠山忠、柴田耕一：すべり摩擦型免震に関する研究（振動応答とすべり摩擦係数について）、日本大学生産工学部第33回学術講演会、p53~56、Dec.,2000
4. 丸山貴由、柴田康弘、柴田耕一：容器構造の周波数特性を考慮した振動応答解析に関する研究（サイロ試験体の解析と実験による検証）、日本大学生産工学部第33回学術講演会、p49~52、Dec.,2000