1）－4　応答スペクトルに基づく免震材料のエネルギー吸収にかかる分配則の検討【安全・安心】

Study on the Distribution of Dissipated Energy among Base Isolation Devices for the Response Spectrum Based Design Rules integrated under the Long-Period Earthquake

（研究開発期間　平成 30～令和元年度）

構造研究グループ　　井上　波彦
Dept. of Structural Engineering　　INOUE Namihiko

In designing a base isolated building against a so-called long period earthquake, it is necessary to take into account the repetitive dependency of isolation devices during a long-time continuing cyclic response. To determine such a repetitive dependency as the change of device mechanical characteristics due to the cumulative energy absorption, the time history analysis is required. On the other hand, the long period earthquakes have been published not only as the acceleration history but also as the pseudo response velocity spectrum (pSv), and the response spectrum based design rules has been described in the notification of the Building Standard Law of Japan. To conduct the repetitive dependency into the notification and establish more simplified design method of base isolated structures against the long period earthquake, the value of equivalent viscous damping (h_{eq}) of each damper is utilized to estimate the distribution of input energy during the earthquake.

［研究開発の目的及び経過］

平成28年６月に国土交通省より技術的助言が発出され、大臣認定の免震建築物については、長周期地震動への対応として、関東圏 KA、静岡圏 SZ、中部圏 CH 及び大阪圏 OS で定められた地震動[1]に対して免震材料の繰り返し依存性を考慮した検討が必要となっている。

免震材料の繰り返し依存性は、地震動が作用する間における各免震材料のエネルギー吸収量を直接算出し、吸収量に応じて規定された基準値の変動を応答解析に反映することとされているが、時刻歴応答解析を前提としていることから、告示（平成 12 年建設省告示第 2009 号）に従い応答スペクトルに基づき設計される免震建築物（告示免震）には直接適用できないという問題がある。したがって、告示免震にも適用できるよう、各免震材料へのエネルギー分配則を簡略化する必要がある。そこで、各免震材料において吸収されるエネルギー量を略算的な方法で推定するため、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰積層ゴム、弾性すべり支承など免震層に設置される各種の免震材料の組み合わせを変化させた解析的検討を行った。

［研究開発の内容］

まず、長周期地震動に対する繰り返し依存性の影響の大きな免震材料として鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）を用いた免震建築物[2]を参考としたモデルにおいて、減衰材として付加するオイルダンパーの減衰係数の設定（低減衰（1.0×10^7[N/(m/s)]）及びその５倍の高減衰（5.0×10^7[N/(m/s)]）の２種類）を変化させた場合の影響について、公開された長周期地震動を用いて免震層変位及び免震層内のエネルギー吸収等の検討を行った[3]。モデルの免震時（使用を想定した LRBφ800 のせん断ひずみとして 250%相当）の等価固有周期は 4.03 秒である。長周期地震動 SZ1 の時刻歴波形を用い、LRB の繰り返し依存性を考慮して計算した、免震層に入力される全エネルギーに対する LRB の吸収エネルギーの比率及び免震層の最大応答変位時の等価粘性減衰係数 h_{eq}（告示免震における式に基づき計算した数値）の比率を図１に示す。免震材料が吸収するエネルギーは、繰り返し依存性を考慮した場合でも等価粘性減衰定数とよい対応を示した。

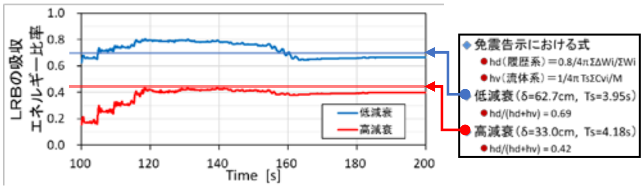

図１　LRB の吸収エネルギー比率と h_{eq}

次に、SZ1、CH1 及び OS1 を対象に、告示免震との整合を確認するための検討を行った。図２に繰り返し依存性を考慮した告示免震の手法のフロー[4]を示す。繰り返し依存性の考慮にあたり必要となる建築物への入力エネルギー（図中①）に関しては、エネルギースペクトル Ve(h=10%)と長周期地震動の擬似速度応答スペクトル（pSv）との比較[5]より、それぞれ pSv の 2.0 倍（SZ1）及び 2.5 倍（CH1 及び OS1）とし、図中②の変動評価において、前述の各免震材料の h_{eq} に応じた吸収エネルギー

の分配を行う。依存性の評価式は各メーカーより提供されたものを用いる。対象とする免震構造は、日本建築センター発行「ビルディングレター」の性能評価シートを参考に表１の５モデルを設定した。

表１　検討用モデル概要（免震層構成及び周期）

	構成*（下線の依存性考慮）	レベル２想定積層ゴムひずみ［%］	等価固有周期［s］
A	HDR+OD	225	4.981
B	HDR+CLB+OD	225	6.369
C	HDR+ESB+OD	200	6.090
D	LRB+RB+ESB+OD	163	4.741
E	LRB+RB+ESB+OD	187	4.795

*)HDR：高減衰ゴム系積層ゴム，　OD：オイルダンパー，　CLB：直動転がり支承，　ESB：弾性すべり支承(低摩擦)，LRB：鉛プラグ入り積層ゴム，　RB：天然ゴム系積層ゴム

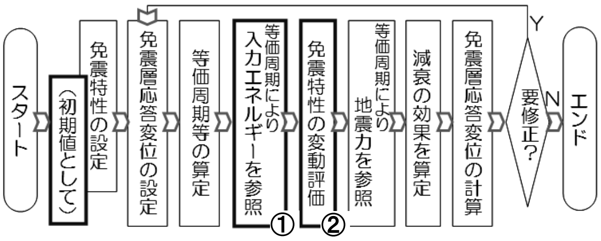

図２　繰り返し依存性を反映した告示免震の手法 [4]に加筆

図３に、積層ゴム（HDR及びLRB）の吸収エネルギーの分担率について、時刻歴応答解析と告示免震との比較を示す。時刻歴応答解析では解析終了時の値、告示免震では図１囲み内の式に基づく数値とした。地震動に関してはSZ1よりCH1、OS1で、モデルに関しては支承をHDRとしたＡ～Ｃで、告示免震における分担率が時刻歴応答解析より小さく評価される結果となった。また、等価固有周期がモデルＢ、Ｃより短くなるＡ、Ｄ、Ｅでは、分担率が 50%以下程度となり、告示免震の分担率が地震動によらず頭打ちとなる傾向が見られた。この分担率の比を取り、告示免震における加速度の低減係数Fhの数値と比較したものを図４に示す。いずれのモデルに関しても、Fhの増大に伴って分担率比は低下する傾向を示した。

図５に、免震層の応答変位について、時刻歴応答解析と告示免震（図３の手法を適用）との比較を示す。モデルの差異によらず SZ1 では時刻歴に対し告示の応答が小さく、また CH1 や OS1 では告示の応答が時刻歴の 1.5 倍から 2.0 倍程度となった。また、等価固有周期が 6.0 秒程度であるモデルＢ及びＣでは、卓越周期の近い OS1 の応答が特に大きくなった。これは図３・図４に示すように、分担率が過小に評価され、加速度の低減係数Fhが大きな数値となったことからと考えられる。

［研究開発の結果］

告示免震において長周期地震動に対する安全性を検証する方法として、各免震材料の h_{eq} に応じた吸収エネルギーの分配を行う手法の妥当性について検討した。繰り返し依存性を考慮するための分担率については LRB を支承とするものや SZ1 で時刻歴応答との整合を確認した一方で、応答変位の評価では逆に危険側の結果を示すなど、個々の数値だけでなく全体的な評価の必要性が示された。今後は、より多くのモデルや地震動の位相の考慮、また告示に規定された以外のFhの計算式についても比較検討を行い、適切な手法の提案につなげる予定である。

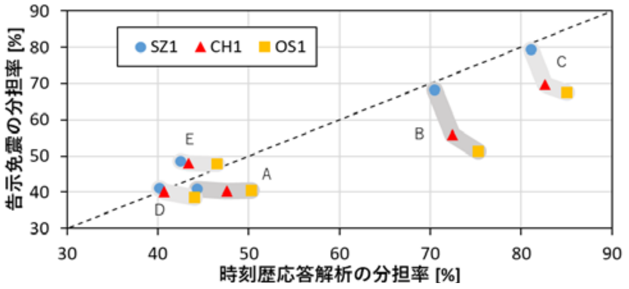

図３　吸収エネルギーの分担率の比較

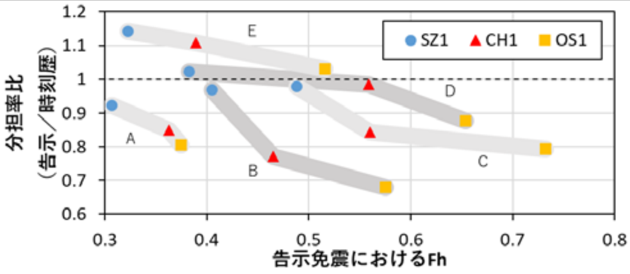

図４　分担率比と Fh との関係

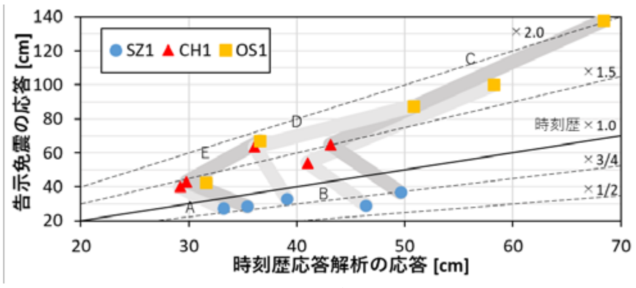

図５　最大応答変位の比較

［参考文献］
1)建築研究所：長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ，https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html，2017.6
2)日本建築学会：免震構造設計指針　第Ⅲ編　設計例２（病院建物），pp.209-212，2013.10
3)井上ほか：二段階制御を適用した免震構造物の長周期地震動に対する応答低減効果の検討，構造工学論文集，Vol.65B，pp.115-121，2019.3
4)飯場ほか：加速度応答スペクトルを用いた長周期地震動に対する免震建物の応答評価（その１：入力エネルギーと加速度応答スペクトル平滑化の考え方），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.585-586，2014.9
5)井上ほか：公開波及び異なる位相に基づく長周期地震動に対する免震構造物の応答，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.59-60，2019.9