

(45) 変圧器用免震スライド装置の実証試験と免震挙動の分析

東京電力(株) 高橋由多加
 東京電力(株) 山本 康博
 東京電力(株) 堀口 潤一
 日本工営(株) 真柴 純治

1. まえがき

近年、重要設備の耐震安全性向上の一手法として「免震システム」に着目した研究例、適用例が増えてきている。筆者等は電力設備の中で震害事例のある変電設備のうち、変圧器を対象とした免震装置の開発を昭和56年から進めており、現在までに変圧器の特性を考慮して開発した「免震スライド装置」について、模型振動実験、数値解析、実証試験等によって、その免震効果の確認を行ってきた。今回は、免震スライド装置で支持した実変圧器の地震観測によって得られた実証試験結果について報告するものである。

2. 実証試験概要

図-1に実証試験に用いた免震スライド装置の基本構造を、写真-1に構成部品を示す。装置は上沓、下沓、ベアリングプレート、復元ラバーで構成されており、次のような特徴がある。

- (1) 変圧器荷重は上沓、ベアリングプレート、下沓で支持し、復元ラバーには荷重負担がかからない
- (2) 同上理由より、重荷重の支持に適しているとともに、復元ラバーによる変圧器のロッキングの誘発は生じない。
- (3) 構造が軸対象であり、水平面内のあらゆる方向に対して同等の挙動を示す。

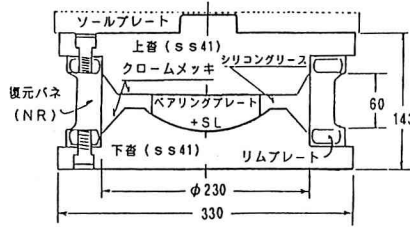


図-1 免震スライド装置の基本構造

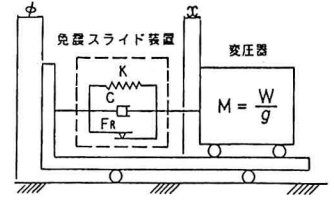


図-2 力学モデル

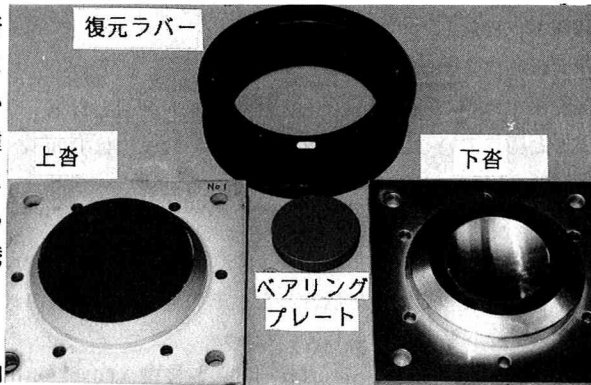


図-3 作動状況

- (4) ベアリングプレート下面は球面加工してあり、スライド面に生じる面圧を均一に分布させる。
- (5) 形状規模がコンパクトである。

この装置を簡単な力学モデルで示すと図-2のようになり、バネ、ダンパーとともに摩擦が並列に組み合わせられている。そのため、図-3の作動状況に示すとおり、入力する加速度レベルが大きくなり変圧器に作用する慣性力が摩擦力を越えた時に上沓とベアリングプレートの間がスライドし装置が作動する。

実証試験の内容を表-1に示す。実証試験は昭和59年9月から栃木県小山市にある当社小山変電所にて継続している。対象とした変圧器は容量105,000KVA重量235tonfであり、クーラーと防音カバーは取りはずした状態である。

写真-1 構成部品

表-1 実証試験内容

項目	内容
試験期間	59年9月～61年3月(予定)
試験場所	栃木支店小山変電所構内
対象変圧器	105,000KVA変圧器(死線、クーラー、防音カバーなし) 重量: 235ton
免震スライド装置	鋼 数: 8個 摩擦係数: 0.03 ~ 0.05 駆動材料: グラファイト グリス 復元バネ: 200kg/cm/1個 定数 形状寸法: 300×300×143
取測項目	加速度: 6点, 18成分 地表地震, 地中地震, コンクリート基礎上面, トラックベース上, 変圧器本体上部, フッキング部 相対変位: 3点, 3成分 コンクリート基礎と トラックベースの間

図-4および写真-2, 3に地震観測用の計器配置と実証試験状況を示す。免震対象とした変圧器は8個の免震スライド装置でコンクリート基礎上に支持されている。装置はなるべく小さな地震動でも作動するように、摺動材料としてグラファイトグリースを使用し摩擦係数を極力押えてある。

計測計器は変圧器本体およびその周辺にサーボ型加速度計を6点18成分、免震スライド装置の上下間に生じる相対変位を計測する差動トランス型相対変位計を3点3成分の配置としている。記録の収録は約100m離れた変電所本館内でデジタル式データレコーダー（SAMTAC-85, 16bit）を用いている。

図-5に小山変電所地点の地質柱状図を示す。この地点は地表部G.L. -0.9mまでが盛土であり、それ以降G.L. -35.5mまでは砂、シルト、粘土が互層となっている。N値はシルト層および粘土層がほぼ10以下、砂層では10~50であり変化が大きい。またG.L. -35.5m以深は砂礫層または砂層となっておりN値50以上と締っている。S波速度はG.L. -35.5mまでは100~290m/sであり、それ以深は385~510m/sと大きな値を示している。

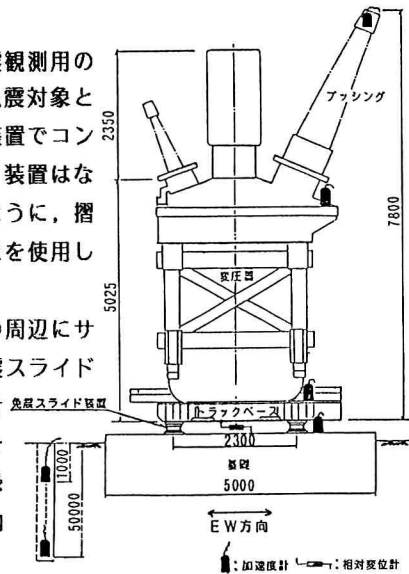


図-4 計器配置

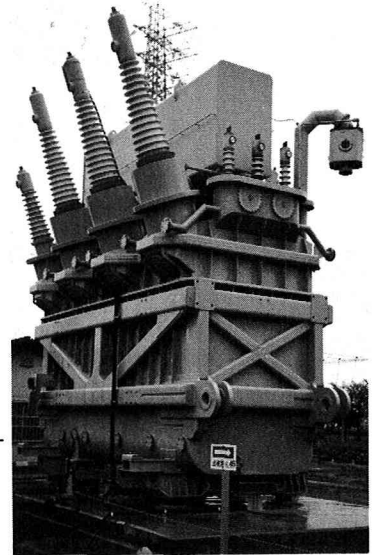


写真-2 全景

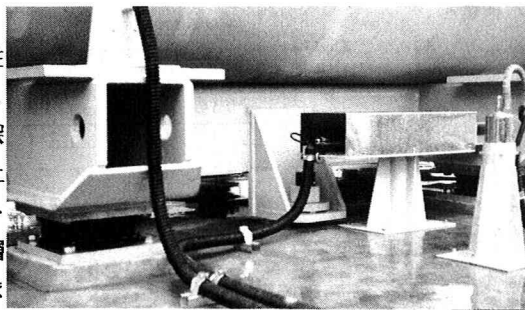
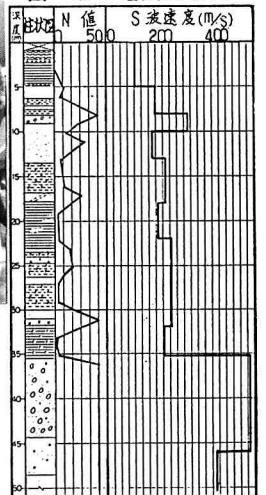


写真-3 免震スライド装置と計器

図-5 地質柱状図



3. 観測記録と免震挙動

昭和60年3月20日、茨城県南西部に発生した地震により地表で173galの加速度記録が観測され、免震スライド装置の作動が確認された。その他にも約20回の地震記録が得られているが、加速度レベルが小さく免震スライド装置は作動していない。

表-2に観測地震の諸元を示す。マグニチュードは4.9、震源深さ60km、小山地点までの震央距離は約22kmである。

図-6, 7に地表の加速度波形とそのフーリエスペクトルを示す。これらの図より、震央距離が小さく、

表-2 観測地震の諸元

発生年月日	昭和60年 3月20日 14時53分
観震地	茨城県南西部 北緯36.1° 東経139.9°
マグニチュード	4.9
震源深さ	60km
震央距離	22km
各地の震度	VI: 宇都宮 III: 鹿谷, 水戸, 前橋, 日光 II: 東京, 横浜, 秩父, 白河 I: 鎌子, 河口湖, 福島, 伊豆大島

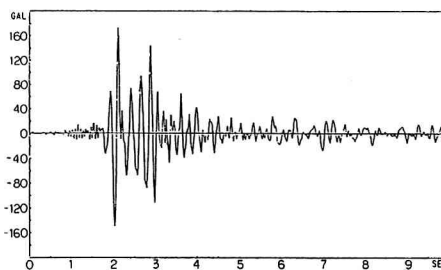


図-6 地表の加速度波形 (G.L.-1m, NS方向)

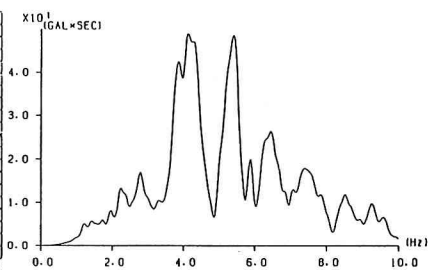


図-7 地表加速度波形のフーリエスペクトル

内陸部に発生した地震動の特徴が次のように表現されている。

- (1) 加速度レベルが他と比べて大きい主要動と見なされる部分が約1秒程度であり非常に短い。
- (2) マグニチュードが4.9と小さいのに対して最大加速度は173 gal と大きい。
- (3) 振動数成分は4~6Hzが卓越しており、地盤特性から予想される1.4Hz程度の振動数成分はあまり目立たない。

図-8に観測波形のうち免震スライド装置の上下の記録であるコンクリート基礎上面と変圧器下端の加速度波形、並びに免震スライド装置に生じた相対変位波形を示す。この図より、本装置の作動の特徴が次のように認められる。

- (1) 加速度レベルの大きい2~3秒付近では変圧器下端の波形がコンクリート基礎上面より小さくなっており、加速度の低減効果が見られる。
- (2) それと同時に相対変位が生じている。
- (3) 加速度レベルが30gal程度以下の4秒以降においては相対変位波形が示すとおり免震スライド装置は作動しておらず、加速度波形も装置の上下で同一である。
- (4) 最終的に相対変位が若干残留している。

表-3に各観測点での波形の最大値を示す。また、図-9にはNS方向の各観測点間のフーリエスペクトル比を示す。これらの図表より地震時挙動が次のように理解される。

- (1) 基礎(G.L.-50m)から地表(G.L.-1m)への伝達特性は、地盤の持つ卓越振動数が顕著に現われている。その1次のピークは1.4Hzであり、S波速度と地盤厚さから求めた値とほぼ一致する。
- (2) 地表とコンクリート基礎のスペクトル比は3.5Hz程度にピークを持ち、地盤バネと基礎および変圧器質量より

定められる固有周期であろうと考えられる。また4Hz以上ではスペクトル比が1より小さくなる傾向があり入力損失が見られる。これと対応して最大加速度値も173galから141galに低減している。

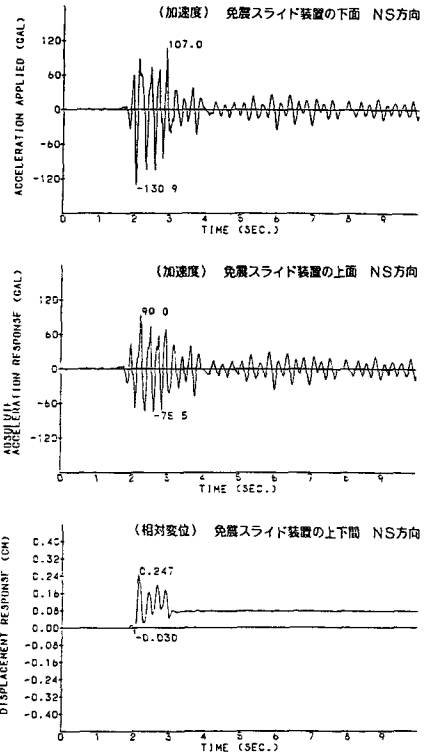


図-8 観測波形(昭和60年3月20日)

表-3 観測波形の最大値(昭和60年3月20日)

観測位置	方向	N-S	E-W	U-D	備考
基礎(G.L.-50m)		40gal	33gal	15gal	
地表(G.L.-1m)		173gal	141gal	55gal	
コンクリート基礎上面		131gal	134gal	36gal	免震装置の下面
変圧器下端		90gal	101gal	34gal	免震装置の上面
変圧器本体上部		113gal	211gal	64gal	
プッシング頂部		543gal	355gal	99gal	
相対変位		2.5mm	3.9mm	7mm	免震装置上下間

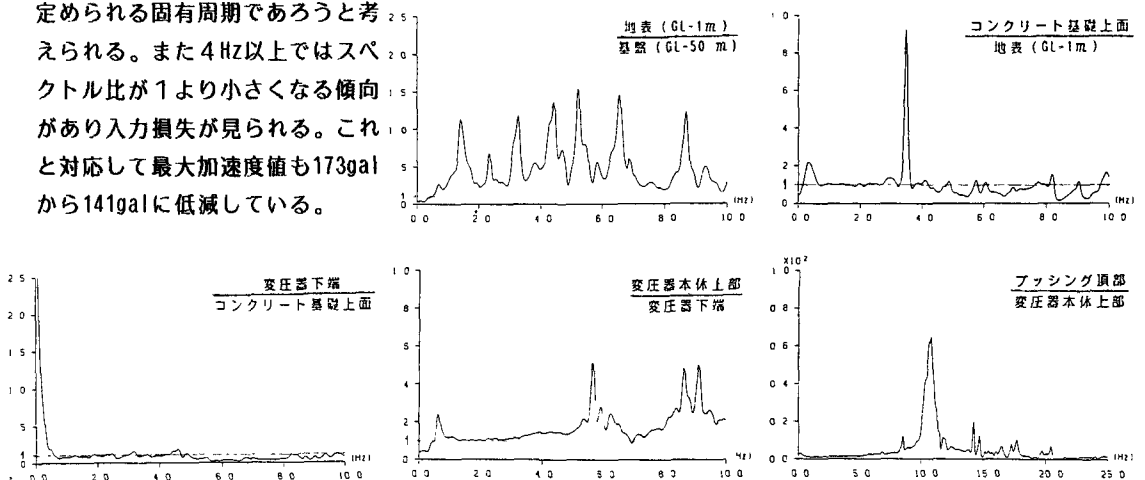


図-9 各観測点間のフーリエスペクトル比

- (3) 免震スライド装置の上下（コンクリート基礎上面と変圧器下端）では、水平面の最大加速度値がNS方向で131 gal から90gal に、EW方向で134galから101galにそれぞれ3割程度低減している。最終的に相対変位が残留していることと関連して、フーリエスペクトル比は低振動数側で大きくなっている。
- (4) 変圧器下端と変圧器本体上部のフーリエスペクトル比より変圧器本体は 5.5Hz程度の固有周期を持つものと想定される。
- (5) 変圧器本体上部とプッシング頂部のフーリエスペクトル比はプッシングの固有周期と見られる11Hzでの増幅が大きく、最大加速度値もプッシング頂部では543galと大きな値になっている。

4. 免震挙動の数値計算

免震挙動を数値計算により再現するとともに免震スライド装置の機能について若干考察する。計算モデルは図-2に示した1質点系のモデルであり、コンクリート基礎上面の加速度波形を入力波とし、計算結果の比較は変圧器下端の加速度波形および相対変位波形とした。基本方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} & |M(\ddot{X} + \ddot{\phi}) + C\dot{X} + KX| > Fr \text{ のとき } M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + \text{sign}(\dot{X}) \cdot Fr = -M\ddot{\phi} \\ & |M(\ddot{X} + \ddot{\phi}) + C\dot{X} + KX| \leq Fr \text{ かつ } \dot{X} = 0 \text{ のとき } M\ddot{X} = 0 \end{aligned} \right\} \text{式-1}$$

M: 変圧器の質量, \ddot{X} : 相対加速度, $\ddot{\phi}$: 入力加速度, C: 減衰係数, \dot{X} : 相対速度
 K: バネ定数, X: 相対変位, Fr (= μMg): 摩擦係数, μ : 摩擦係数, g: 重力加速度

表-4に入力定数値を示す。

表-4 入力定数値

項目	入力値	設定根拠
M	24ton(235tonf)	変圧器重量測定結果
C	580tonf・sec/m	別記
K	160tonf/m	復元力特性試験結果
μ	0.03	摩擦特性試験結果

減衰係数Cについてはトライアル計算を行い、比較的再現性のよい値を用いた。この値は減衰定数hで表現すると400%を超える非常に大きい値である。これは摺動材料に用いたグラファイトグリースを装置内に充填させたため、スライド面内のグリースが摩擦係数の低下には寄与したものの粘性抵抗を増加させる作用をしたものと考えられる。減衰係数はC=580tonf・sec/m程度であり、この値を用いた計算結果を図-10に示す。なお現在、粘性抵抗試験を実施しておりC値の確認を行っている。

また、摺動材料としてグラファイトだけを用いた場合は、昭和58年に実施した模型振動実験で減衰係数はC=3.7tonf・sec/m程度であることが確認されており、この場合は図-11に示すように変圧器の応答がさらに低減するものと予想される。

5. あとがき

今回の実証試験記録から免震スライド装置の作動を確認することができた。それとともに実変圧器の免震挙動をある程度分析できたと思われる。今後、粘性抵抗試験の結果を反映させた数値計算を行うとともに、地盤のバネによる変圧器のロッキング挙動を考慮した解析を行ない、プッシングを含めた変圧器各部位に対する免震スライド装置の効果を評価したいと考えている。

(参考文献)

- (1) 堀口, 山本, 橋本: 変電機器の免震スライド装置に関する研究, 電力土木, NO.190, 1984.5
- (2) 橋本, 堀口, 山本, 真柴: 復元力を有するすべり支承の免震性能について, 土木学会第39回年次学術講演会概要集, 第1部 1984.10

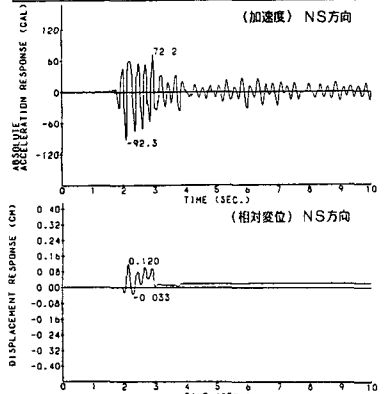


図-10 数値計算結果 (C=580tonf・sec/m)

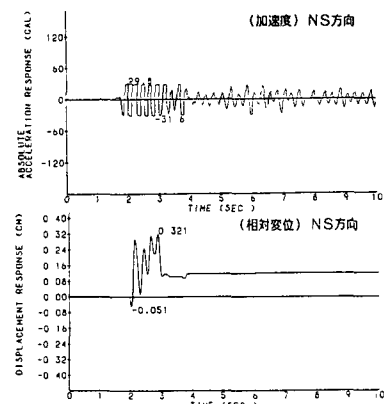


図-11 数値計算結果 (C=3.7tonf・sec/m)