

I-23

鋼製免震支承の大変位時動的特性に関する実験

パシフィックコンサルタンツ ○正会員 日榮 民雄
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 池田 憲二
 北海道開発局開発土木研究所 正会員 今野 久志
 日本製鋼所 室蘭製作所 正会員 佐藤 和則

1. はじめに

著者らは鋼製免震支承の特性を調べ、免震装置としての有効性を検証して来た。これまでには、振動台上でランダムに加振する実験を行い、その結果を報告している¹⁾。

本論文では、鋼製免震支承がリンク機構を構成することのできる限界近くまで変位した際の復元力特性を把握する目的で、鋼製免震支承によって支える上部構造を直接にアクチュエーターによって加振する実験を行った結果を報告している。このことによって、一般的な振動台加振に比べて大きな変位を発生させることができた。実験結果を、装置の幾何学的形状と摩擦の効果を元に作成した理論式による解析結果と比較した。

2. 実験方法

実験に用いた供試体および振動台を図-1に示す。鋼製免震支承に大変形を与えるために上部構造をアクチュエーターにより直接水平方向に可動できる構造である。アクチュエーターは、テコ比1:3のテコを介して設けられ、加振を行った。

免震装置は、図-2に示す形状の鋼製免震支承を片端に2基設けて、他の端はローラーとする可動構造とした。この鋼製免震支承は、鉛直荷重に比例する水平方向反力を生じるものであるが、本実験モデルでは、一方の側をローラーによる可動としたため、鉛直荷重に比例する水平方向反力の約2倍の慣性力を分担した場合に相当する。なお、本実験では、20.0tfの上載荷重を用いており、1支承に作用する鉛直荷重は5.0tfである。

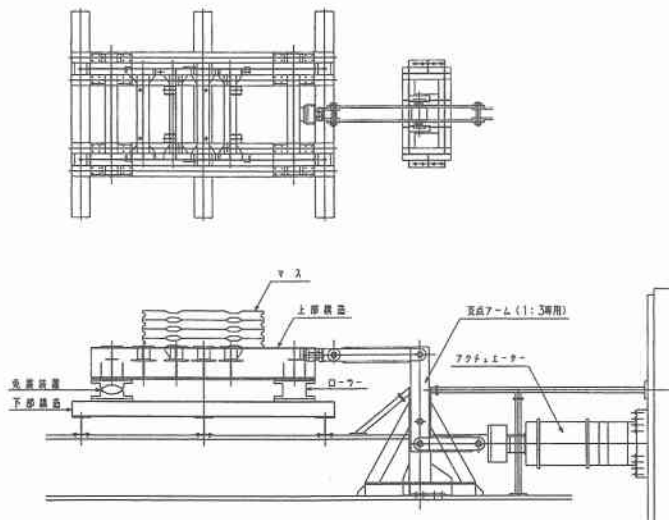


図-1 供試体および振動台

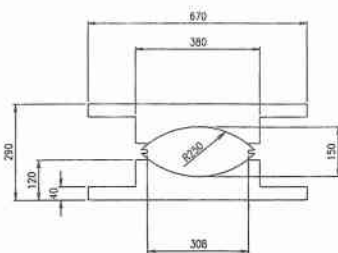


図-2 免震支承の形状

An experiment on a behavior of a seismic-isolation device under large scale displacement
 by Kazunori SATOH, Hisashi KONNO, Kenji IKEDA, and Tamio HIEI

表-2 実験ケース一覧

ケース	波形の説明
定常振動波	5～15cmの変位振幅を持つ低周波数の正弦波形
ピンクノイズ波	0.5Hz～10.0Hzの範囲で一定振動数成分である波形を2～6倍の振巾に正規化したケース
温根沼大橋	1994年10月4日北海道東方沖地震を温根沼大橋P3橋脚付近地盤において測定した波形NS成分
神戸海洋気象台	1995年1月17日兵庫県南部地震を神戸海洋気象台において測定した波形NS成分

免震支承のステンレス鋼製の回転体を受けるすべり面は、充填材グラファイトを含むテフロンを用いている。本実験は免震支承の大変形時の特性に着目し、表-2に示す各振動波形を上部構造に直接加振した。ここで、下部構造は固定状態となっている。定常振動波形は、低振動数レベルであるが大変形時の免震支承の履歴特性を確認するために実施したものである。一方、ピンクノイズ波及び観測地震波形は、免震支承の履歴特性に与える周波数依存性・鉛直動の影響を把握するために実施したものである。ピンクノイズ波は、変位制御によりまた、観測地震波は荷重制御により加震した。上部構造に直接加振を行う場合、免震支承の復元力は、アクチュエーター側からの加力だけではなく、上部構造の慣性力に対する抵抗も考えなければいけない。振動台基部から加振する一般的な加振実験と本実験との対応を考えると上部構造の想定上の加振入力地震動を求める必要がある。そこで上部構造と免震装置で構成される1質点1自由度モデルによる予備動的解析を行い、加振用の入力波形を作成した。ピンクノイズ波の場合は、応答変位波形を、地震波の場合は、応答絶対加速度波形から上載物の質量を乗じて加力波形を入力波として用いた。本実験で用いた地震波の内、温根沼大橋波形は北海道における地震動の特性を端的に表現すると考えたものであり、しかも地震動の主要動部分が比較的長いと言う特徴を持っている。対して、神戸海洋気象台波形は、短周期の成分が多く、地震動の主要動部分が比較的短いと言う特徴を持っている。

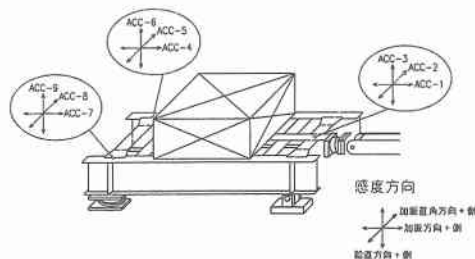
実験における計測項目は、上部構造の水平方向加振力（ロードセル）、水平・鉛直方向加速度及び変位である。図-3に加速度計、変位計、荷重計の計測位置を示す。

3. 実験結果と考察

実験結果の内、代表的な記録波形として、上部構造の応答加速度、免震装置の応答変位を図4～図5に示す。図4は、用意したピンクノイズの3.5倍の結果であるが最大水平加速度で970gal、最大水平変位7cm程度の加振が行われたケースである。一方、図-5は、神戸海洋気象台地震波形を入力した結果であり、最大水平加速度が643gal、最大水平変位が4.6cmであった。いずれの結果とも、鉛直加速度は、水平加速度に対して1/3～1/2程度の値で生じており、この鉛直振動に伴う鉛直力の変動が推定できる。

次に、各実験ケースの免震支承の履歴曲線を図6～図8に示す。各図には、装置の幾何学的形状と摩擦の効果を元で作成した理論式による解析結果を併記し実験結果との比較を行った。

加速度計取付位置図



変位計・荷重計取付位置図

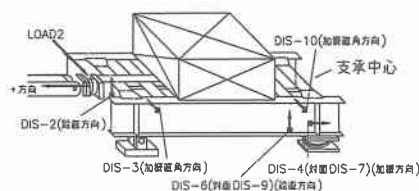


図-3 計測項目と位置図

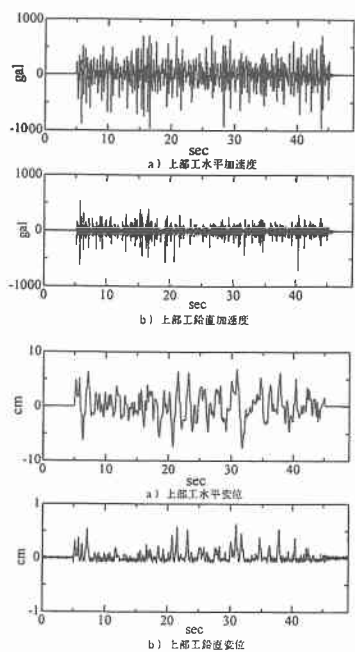


図-4 実験値 (ピンクノイズ×3.5)

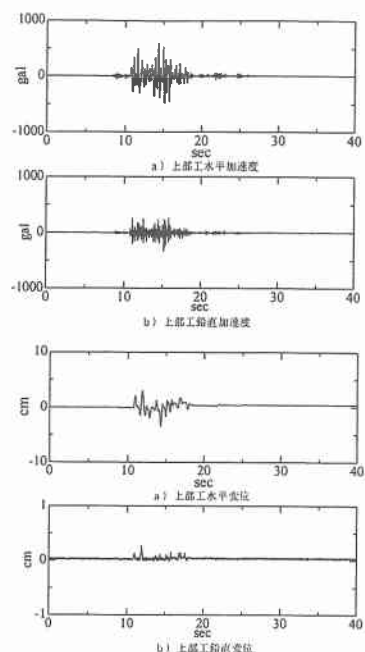


図-5 実験値 (神戸海洋気象台)

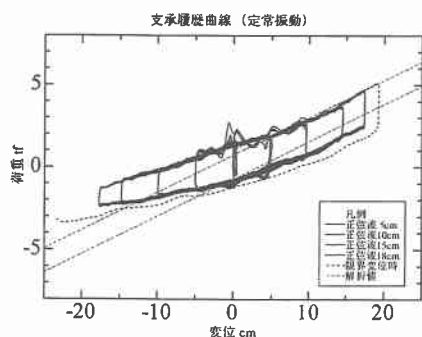


図-6 実験値と計算値の比較

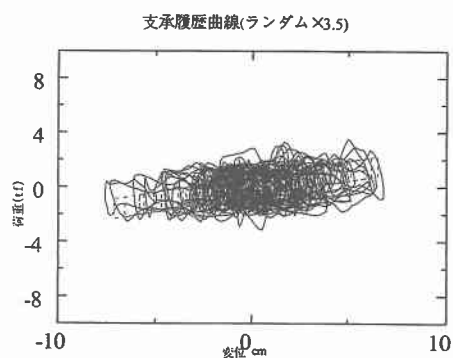


図-7 実験値と計算値の比較

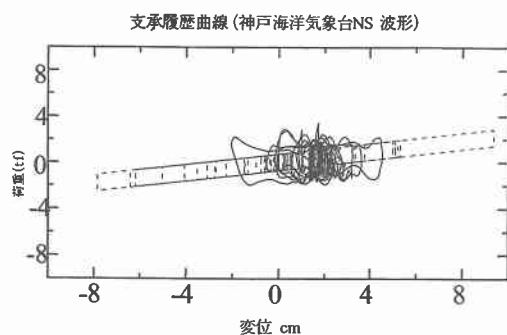


図-8 実験値と計算値の比較

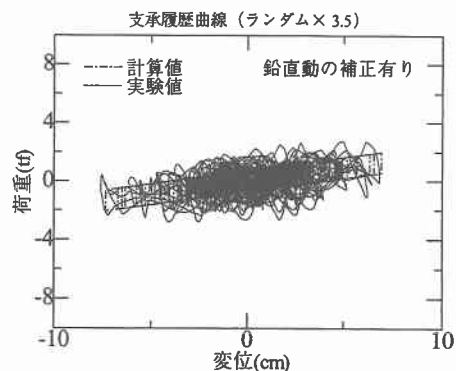


図-9 実験値と計算値の比較

解析は、上部構造に相当するマスと免震装置で構成される1質点1自由度モデルを用いた非線形時刻歴解析を実施した。免震支承の復元力は、式(1)～式(5)に示した理論式により求められる特性を用いた。

$$K_2 = \frac{V \cdot (1 + \tan(\alpha + \rho)^2)}{(2 - C_B) \cdot R \cdot \cos \alpha} \quad \text{式(1)}$$

$$Q_D = V \cdot \tan \rho \quad \text{式(2)} \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{u_B}{R(2 - C_B)} \quad \text{式(3)}$$

$$\rho = \frac{2\mu}{(2 - C_B)\sqrt{1 + \mu^2}} \quad \text{式(4)} \quad C_B = \frac{tr}{R} \quad \text{式(5)}$$

ここに、 V は免震装置に働く鉛直力、 ρ は式(4)による係数、 C_B は式(5)による係数、 α は回転板の回転角、 R は回転板の曲面の半径、 t は回転板の厚さ、 u_B は免震装置の有効変位である。解析では、充填材グラファイトを含むテフロン摩擦係数 $\mu=0.1$ 、粘性係数 $C=5 \text{ Kg} \cdot \text{s}/\text{cm}$ を用いた。

図-6は、低周波加振による定常振動時の支承の履歴曲線を示したものである。プラス側変位時の二次剛性の勾配は、実験値と解析値は概ね一致していると考えられる。一方、マイナス側変位時の二次剛性は、解析値に比較して実験値が緩勾配になる傾向にある。これは、今回の実験モデルが片側のみに免震支承を設けた構造であるため鉛直変位の発生程度の違いから作用軸力の変動が生じていることに起因するものと推測される。この原因については、今後の検討課題としている。次に、図-7は、ピンクノイズ波を3.5倍した時の履歴曲線を示したものである。上図は、水平方向の慣性力のみを補正したケースであり、下図は、水平方向の補正に加えて鉛直動の補正も行ったケースである。解析値と実験値を比較すると履歴曲線の二次勾配は、周波数の依存性は少なく、概ね一致していると考えられる。特に、鉛直動の補正を行ったケースの方が、大変形レベルで良く一致する。また図-8は、神戸海洋気象台で観測された地震波の履歴曲線を示すが、傾向的には、ピンクノイズ×3.5と同様な結果が得られている。

4. まとめ

鋼製免震支承がリンク機構を構成することのできる限界近くまで変位した際の復元力特性を把握する目的で、鋼製免震支承によって支える上部構造を直接にアクチュエーターによって加振する実験を行い、装置の幾何学的形状と摩擦の効果を元に作成した理論式による解析結果と比較した。

その結果わかったことは次の通りである。

- ①低周波加振による大変形時の支承の履歴曲線は、理論値から求められる計算値と実験値は概ね一致することが判った。ただ、今回の実験モデルの構造上発生していると推測される軸力変動の影響については、今後の検討課題としている。
- ②ランダム振動時の履歴曲線は、周波数への依存性は少なく、計算値に概ね一致するようである。また、鉛直動の補正を行ったケースの方が、大変形レベルで良く一致することもわかった。
- ③ランダム振動（ピンクノイズ波や観測地震波）の入力に対して、上巻に発生する鉛直加速度は、水平加速度に対して1/3～1/2程度の値で生じることが確認され、鉛直振動に伴う鉛直力の変動が推察された。今後、水平方向の変形特性を把握するために鉛直方向の振動の影響を定量的に把握する予定である。

参考文献

- 1) 林亜紀夫, 三田村浩, 別所俊彦, 佐藤昌志: ランダム波形入力時の鋼製免震支承の動的特性, 土木学会北海道支部論文報告集 第55号(A), pp.270～275, 1999.2