

基礎構造に設けられるグラファイトグリース免震スライド機構の挙動

菊地 敏男 後藤 洋三
斎藤 彰
(日本鋼管(株)土建建設部)

Behavior of Vibration-Isolated System on a Foundation Structure

Toshio Kikuchi Yozo Goto
Akira Saito

Abstract

Tests were carried out on a structure having a vibration-isolated system with a horizontal sliding mechanism on the entire base of a large-scale coke-oven foundation. The sliding material was graphite grease (a mixture of graphite and grease), but details of the actual state of the friction phenomenon or dynamic displacement during earthquake were unknown. The friction phenomenon was studied by preliminary dynamic tests in the laboratory, model tests using vibration tables, and field tests, while the appropriateness of the analytical model was examined by comparisons of the results of model tests using the vibration table and the results of analysis. It was concluded from the studies mentioned above that the friction coefficient is greatly influenced by viscosity so that the friction phenomenon is not a general one, that the analysis model must include a viscosity factor along with the friction factor, and that although the earthquake resisting effect of the sliding mechanism is great there is a necessity for further cross examination of residual and maximum displacement, and as a consequence, the design of the sliding structure was partially changed.

概 要

大規模な機械基礎の底面全体に水平スライド機構を設け、免震構造とする試みがおこなわれた。この水平スライド機構は、すべり材にグラファイトグリース（黒鉛粉とグリースの混合物）を使用したものであるが、摩擦現象の実態や動的変位量に関する解析が明らかにされておらず、地震時の挙動に対する検討が不十分であると考えられた。摩擦現象は予備の動的材料試験、振動台を用いた模型実験、現場実験から検討し、解析モデルの妥当性は振動台で行なった模型実験と解析結果を比較することにより検討した。その結果、(1)スライド構造の摩擦係数は粘性の影響を大きく受けるため、一般の摩擦現象ではないこと、(2)解析モデルは摩擦要素と共に粘性要素を含めたものとする必要があること、(3)スライド機構の免震効果は大きい、残留、最大変位については十分検討する必要があること、などが明らかになりスライド機構の設計を一部変更した。

1. まえがき

日本鋼管(株)京浜製鉄所コークス炉の基礎構造には、グラファイトグリース（黒鉛粉とグリースの混合物）を薄い鉄板でサンドイッチにした水平スライド機構が全面にわたって設けられている。このスライド機構の役割は主として温度応力の解除であるが、大きな地震力が作用する場合にもスライドが発生し、上部炉体の地震加速度を低減することが期待されている。しかしスライド機構の摩擦現象の実態や動的変位量に関する解析が明らかにされておらず、地震時の挙動に対する検討が不十分であ

ると考えられた。そのため、スライド機構の耐震性と免震性について一連の実験と解析をおこない、その結果にしたがって設計をすすめることになった。実施した実験の内容は、スライド機構の基本的性質を調べるための予備の動的材料試験、動的性質を調べるための模型振動実験、および実物に近いスライド機構の性質を調べるための現場模型実験である。解析では、模型振動実験の結果をスライド要素を含めたモデルで検討し、次に実物のコークス炉を想定した地震応答計算を行ない強震時におけるスライド機構の挙動を検討した。この報告では実施した実験の中からスライド速度を摩擦係数、振動台に入力

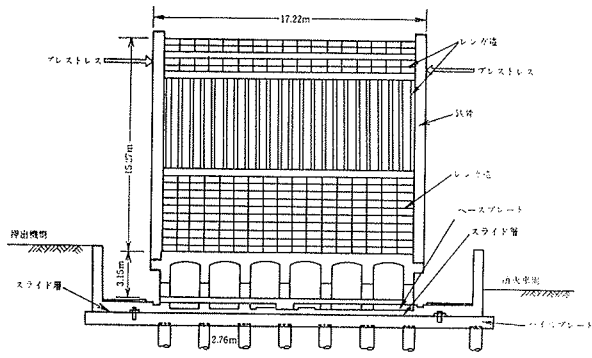


図-1

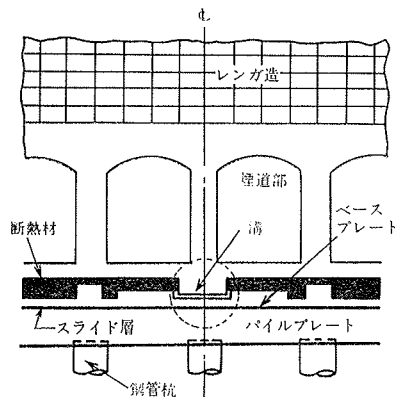


図-2

した最大加速度と模型上最大加速度，変位量に注目し，模型振動実験をもとにしたシミュレーション計算とコークス炉の地震応答計算を実施した。

2. 免震スライド機構の概要

図-1はコークス炉1基の断面方向の概略図を示したものである。コークス炉1基の総重量は約35,000tであり，径813mm，全長40~60mの鋼管杭225本によって支持されている。免震スライド機構はベースプレートとパイルプレートの間に設けられている。スライド機構の部分を拡大したものが，図-2である。スライド面は1mmの鉄板を3枚重ねてあり，その間にグラファイトグリースが塗布されている。

3. グラファイトグリースの性質

グラファイトグリースはグリース（精製鉱油と金属せっけん）にグラフ

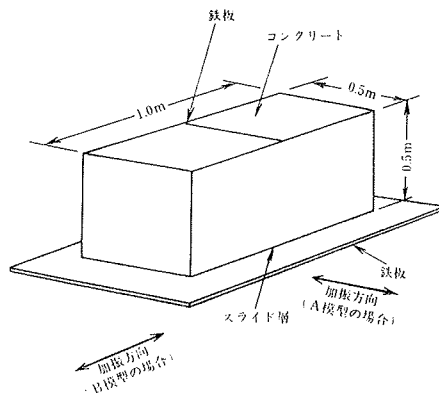


図-3

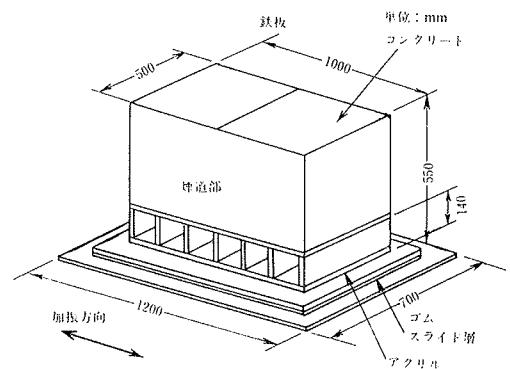


図-4

外観	色調	ちょう度 (柔らかさ)	滴点 (油の分離点)	
バター状	黒色	220 ↓ 250	90°C以上	
灰分	黒鉛含有量	石ケン基	引火点	動粘度 (50°C)
4.5%以下	4~6%	カルシウム	170°C以上	26.5cSt以上

表-1

ァイトを混合したもので，一般には潤滑油として使用され，その品質はJISで規定されている。その組成と基本的な物性値は表-1の通りである。

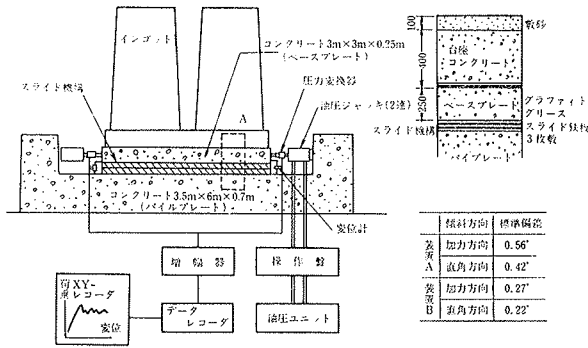
4. 実験方法

4.1. 模型振動実験

実験に使用した模型を図-3と図-4に示した。図-3はスライド現象の基本的な性質を調べるための模型（加振方向によりA，B模型とする）であり，図-4は煙道部とベースプレートに注目した部分的なレプリカ模型（空間相似異質材料模型）である。振動台に入力する地振波としては，エルセントロ，タフト，八戸港の記録を用いて最大加速度を50galから25galピッチに増加させながら，スライドによる変位量と模型の応答を記録した。また摩擦係数は油圧ジャッキを用いて水平方向に加力して求めた。

4.2. 現場模型実験

模型実験で使用したスライド機構の規模は小さく，その抵抗力から実物のスライド抵抗力を推定すると大きな誤差が生じる可能性がある。そのため，実際のコークス炉に用いられる機構の一部分（3×3m）を実際と同じ施



図—5

工法で製作し、そのスライド抵抗力を調査する実験を行なった。図—5は摩擦係数を求めるための装置で、高速のスライド試験を行なう際はレッカー車でけん引した。

5. 実験結果と考察

5.1. スライド模型の応答波形

振動台に地震波を入力して振動台上の模型の応答波形を示したものが図—6である。図はB模型の場合で、地震波はエルセントロである。図より、入力地震波の最大加速度が大きくなっても模型上の最大加速度は増加せず波形は頭打ちになる。しかしスライドによる最大、残留変位は増加する傾向が見られる。残留変位の方向性は一定で同一の地震波がほぼ同じ大きさで入力する場合の応答波形の再現性はよかった。

5.2. 入力最大加速度と模型上最大加速度

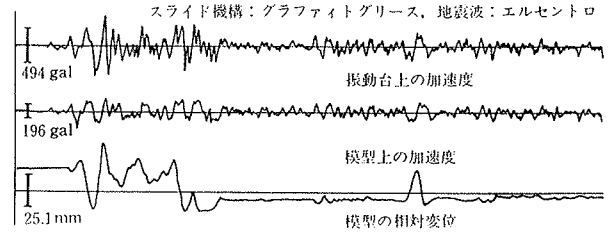
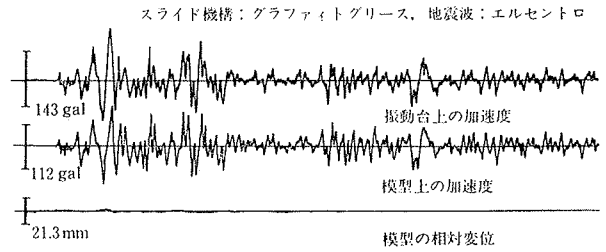
波形より振動台の最大加速度と模型上の最大加速度を読取り、プロットしたものが図—7である。入力最大加速度が100 galを越えると模型上の最大加速度は徐々に頭打ちの傾向を示し、免震効果が現われる。明瞭な変曲点が見られないのは、グラファイトグリースの粘性のためと考えられる。図中に用いた記号は図—8に示した。

5.3. 入力最大加速度と変位量

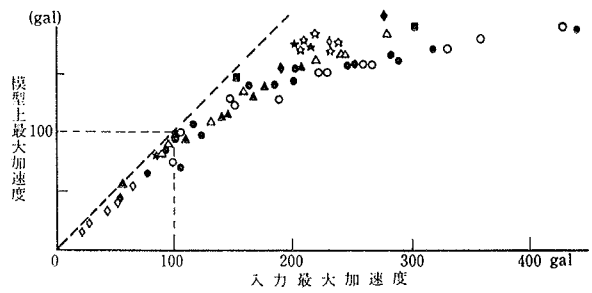
波形より振動台の最大加速度と模型の最大変位を読取り、横軸に最大加速度、縦軸に最大変位量を示したものが、図—8である。図—8では最大加速度が摩擦係数に相当する値を越えるとスライドが発生し、加速度の増加と共に変位も増加している。変位増加の傾向は、摩擦係数と地震波の種類によって異なっているが模型の種類による影響は少ない。残留変位は最大変位と同様の傾向を示すが、値は約1/2である。

5.4. すべり係数とスライド速度

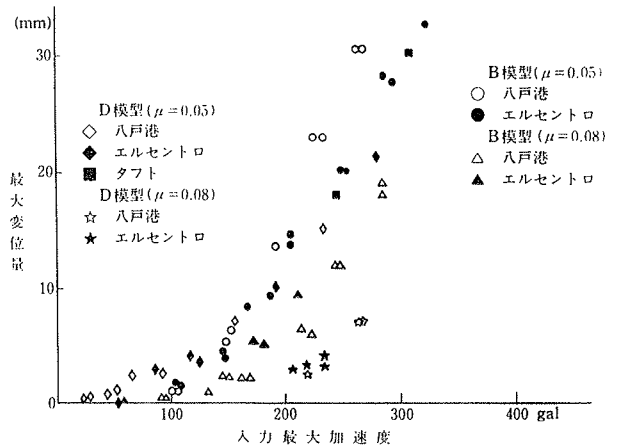
予備実験(鉛直2面せん断スライド試験)、現場模型実験ならびに模型振動実験(B模型の場合)の結果から、



図—6



図—7



図—8

スライド速度とすべり係数(粘性の影響を含む動摩擦係数として新たに定義する)の関係を求めプロットしたものが図—9である。図中、模型振動実験は○、●印、現場模型実験は△▲印、予備実験は×印で示した。図より、すべり係数は若干ばらついているが、スライド速度が増加するとすべり係数も増加しており、粘性の影響を見る

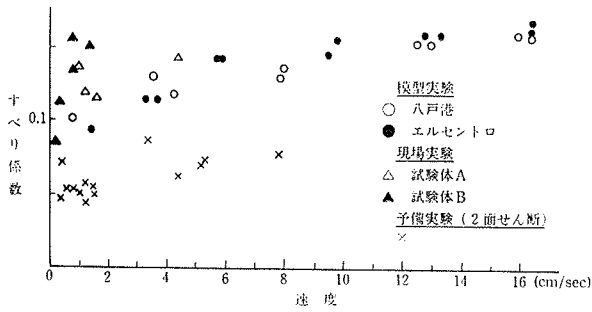


図-9

ことができる。スライド速度が 0 cm/sec の時は静止摩擦係数と一致することを考えると、速度が 0~1 cm/sec の間ですべり係数は急激な増加を示すが、速度が大きくなるとゆるやかな増加を示す。

6. 応答解析

6.1. 解析モデルと数値計算法

(1) 解析モデル

解析モデルは次の 2 つである。i) 実験モデルは B 模型 (図-3 参照) を 1 質点系のスライドモデルに置換した。スライド機構は理想的なクーロン摩擦要素下と粘性ダッシュポット要素 D でモデル化されている。ii) コークス炉のモデル化は実験モデルの要素の他に制振バネ要素 K を用いた。粘性要素 D の値は実験結果 (図-9 参照) を考慮してスライド速度に依存するものとし、図-11 に示すバイリンヤーの特性を持つものとした。

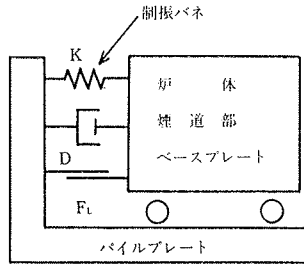


図-10

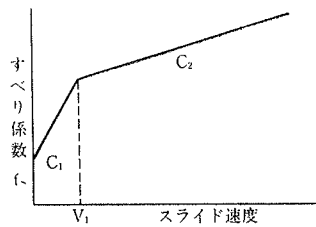


図-11

(2) 数値計算法

運動方程式の解法は線形加速度法による Seep by Step の数値積分で、スライドしている状態とスライドしていない状態の運動方程式を用意し、Step 毎に条件判定を行なって使いわける方法を採用した。

(3) 定数の評価

計算に必要な定数値のうち、摩擦係数は静的な加力試験の結果から求め、粘性要素 D の値は図-11 のすべり係数と速度の関係から求めた。入力する地震波は振動台上で測定した加速度を 0.008 sec ピッチでデジタル化して使用した。諸定数を表-2 に示す。

		$f_s = \mu$	F_i (ton)	C_1 ($\frac{\text{ton}\cdot\text{sec}}{\text{m}}$)	C_2 ($\frac{\text{ton}\cdot\text{sec}}{\text{m}}$)	V_1 ($\frac{\text{m}}{\text{sec}}$)
B 模型 (2 回目)	グラファイトグリースが厚い場合	0.05	0.033	1.34	0.163	0.04
	グラファイトグリースが薄い場合	0.08	0.052	1.80	0.420	0.02

(ただし F_i = 抗力 $\times f_s$ 、 C_1 、 C_2 は図 11 参照)

表-2

6.2. 模型振動実験の解析結果

表-2 に示した諸定数を用いて B 模型の地震応答を計算し、実験結果と比較した。図-12 は実験と計算の結果

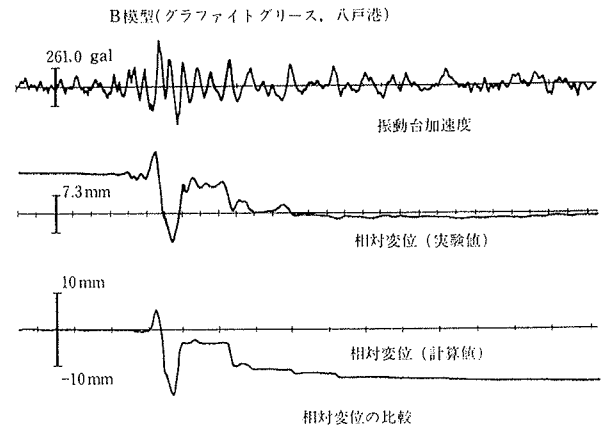


図-12

を時系列の変位波形で比較したもので、その結果両者はよく一致している。

図-13 は縦軸にスライドによる最大変位をとり、横軸に振動台の最大加速度をとって実験値と計算値を比較したものである。計算値は実線で示し、実験値は丸印で示した。計算値は実験値より約 20% 小さいが、傾向は一致している。

図-14 は縦軸に模型上最大加速度をとり、横軸に振動台の最大加速度をとって実験値の平均と計算値を比較したものである。図中、実験値の平均は実線で示し、計算値は丸印で示したが、両者はよく一致している。

図-13 は縦軸にスライドによる最大変位をとり、横軸に振動台の最大加速度をとって実験値と計算値を比較したものである。計算値は実線で示し、実験値は丸印で示した。計算値は実験値より約 20% 小さいが、傾向は一致している。

6.3. コークス炉の地震応答解析

(1) 解析モデルの定数

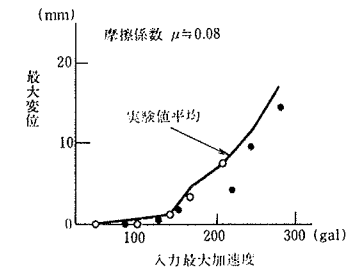


図-13

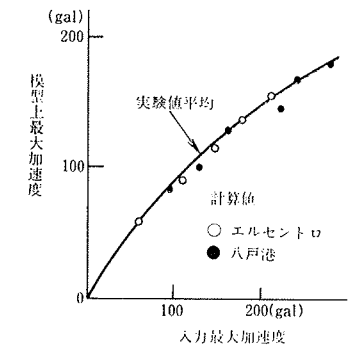


図-14

5.1. で述べた計算方法を用いて地震応答計算を行なった。計算に先行して現場模型実験から得た摩擦係数と粘

質点重量 (ton)	摩擦係数	C_1 ($\frac{\text{ton sec}}{\text{m}}$)	C_2 ($\frac{\text{ton sec}}{\text{m}}$)	V_1 ($\frac{\text{m}}{\text{sec}}$)
35,000	0.01 ~ 0.03	13,780	1,723	0.01

表-3

性係数の概略値を決定した。表-3 はモデルの主要な定数値を示したものである。

(2) 入力地震波

最大加速度が同一であっても、地震波が異なるとスライド変位は異なる。そこで入力地震波には無作為に選定した15種の強震記録を用いて、最大加速度を 200 gal と設定した。

(3) 解析結果

スライド機構の諸定数ならびに地震波の特性と地震応答量の関係を明らかにするために表-3 で評価した値に変動幅を考えてパラメトリックな解析を行なうこととした。パラメータは、摩擦係数、粘性係数、地震波の特性ならびに制振バネの有無とそのバネ定数である。図-15 は摩擦係数を0.01から0.1の間にとって

応答計算を行なったもので、各ケース15種の地震波について計算した結果を平均してプロットしたものである。図より係数が小さくなると最大変位と残留変位が大きくなり、胴体加速度は小さくなる。

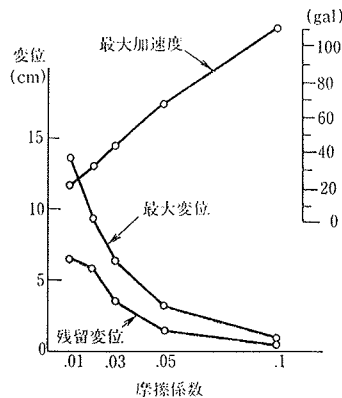


図-15

特に、係数が 0.05 以下になると最大変位は急増している。係数の値にかかわらず、残留変位は最大変位の約 1/2 である。図-17 は摩擦係数を0.02に設定し、粘性係数を表-3 とその 1/2 および 2 倍に変化させて応答計算を行なった結果である。図より、粘性係数が小さくなると最大、残留変位は大きくなり、胴体加速度は小さくなる。しかし、その影響は摩擦係数の影響に比較すると小さい。図-16 は制振バネをパラメータにとった場合である。この場合は摩擦係数と粘性係数を一定値に設定し、制振バネのバネ係数 K を変化させて応答計算を行なった。図より制振バネの効果は顕著で、弱いバネでも変位の拘束効果があり特に残留変位の減少が著しい。一方バネ係数が $15 \times 10^3 \text{ t/m}$ 以上になると、加速度は急激に増加する傾向を示している。地震波15波による最大変

位のバラツキ(標準偏差)は $7 \times 10^3 \text{ t/m}$ の時最小となりバネ係数が大きくなっても減少しない。この様な現象はマスとバネで構成される 1 質点モデルが一部の地震波と共振し大きな応答が発生したものと考えることができる。

7. まとめ

実験と解析による結果をまとめると次の様になる。
(1) グラファイトグリースを使用した

スライド機構の摩擦係数は粘性の影響を大きく受けるため、一般の摩擦現象ではないこと。(2) 解析モデルは摩擦要素と共に粘性要素を含めたものとする。 (3) スライド機構の免震効果は大きい。最大、残留変位については十分検討する必要がある。(4) 実際の構造物に使用する場合は、適当な強度の制振バネを設けることによって免震効果を損うことなく過大な変位の発生を抑制することが可能である。

8. 謝辞

この報告のもととなったコークス炉震動実験工事は日本鋼管(株)扇島土建建設部の計画と監督のもとに(株)大林組が実施したものである。実験および解析をすすめるにあたり適切な助言をいただいた日本鋼管(株)扇島土建建設部、三浦課長、坂東幸一郎氏にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 斎藤, 三浦, 坂東, 他: 基礎構造に設けられる免震スライド機構の実験・解析について, 土木学会第33回年次学術講演会概要集, (昭和53.9)
- 2) 菊地, 後藤: 扇島第2期工事コークス炉震動実験工事報告書一総括編一, 大林組技術研究所報告書, (1978.6)

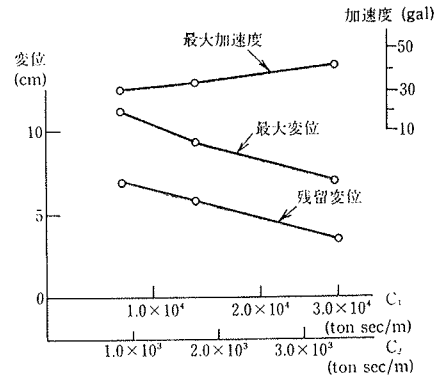


図-16

地震応答15波平均値~バネの影響

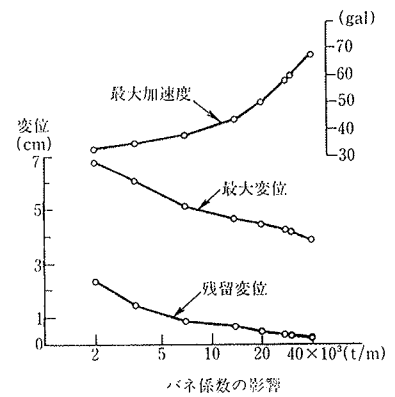


図-17