

# 直動転がり免震支承 (CLB) の摩擦特性に関する実験的研究 — 傾斜・捻れによる摩擦係数の変化について —

## Experimental Study on Friction Characteristics of Cross Linear Bearings (CLB) - Variation in Coefficient of Friction under Inclination or Torsion Conditions -

原田 浩之 HIROYUKI HARADA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

免制震技術部 木田 英範 HIDENORI KIDA

直動転がり免震支承 (CLB) は、リニアガイドを利用した低摩擦の支承材であり、基本的な摩擦特性はすでに明らかにされている。しかし、地震動や暴風などにより CLB が取り付く部材に傾斜や捻れが生じた場合の摩擦特性については、十分に検討されていない。そこで筆者らは、CLB の上下フランジプレート間に相対的な傾斜や捻れを強制的に与えた状態で圧縮せん断実験を行い、摩擦係数の変化について検討した。その結果、傾斜や捻れによる摩擦係数の変化を定量的に評価することができた。

キーワード：免震，転がり支承，リニアガイド，摩擦係数，変化率

The friction ability of the CLB has already been clarified under the usual conditions, but has not yet been verified under conditions in which the flange plates are inclined or twisted. A series of compression-shear tests were executed to clarify the performance of the CLB under inclined or twisted conditions. By undertaking these tests, variations in the coefficient of friction relating to inclination and twist were evaluated quantitatively.

**Key Words:** Base Isolation, Rolling Isolator, Linear Motion Guide, Coefficient of Friction, Variation Rate

### 1. はじめに

免震構造の適用範囲の拡大や免震性能の高性能化，あるいは設計自由度の拡大を目指し，様々な免震部材が開発・実用化されている。筆者らも，戸建て住宅のような軽量建築物や高層マンションなどの塔状建築物の免震化，もしくは免震周期の超長周期化を目指し，直動転がり免震支承 (Cross Linear Bearing : 以下 CLB)<sup>1)</sup> を開発し実用化した。

しかし，実用化に至るまでの初期の研究開発では，地震動や暴風などにより，CLB が取り付く部材 (梁や基礎など) に傾斜や捻れが生じた場合の摩擦特性の変化については十分に検討できておらず，その定量的評価は以降の研究課題として取り残されていた。

本報は，CLB の上下フランジプレート間に相対的な傾斜や捻れを強制的に与えた状態で圧縮せん断実験を行い，傾斜や捻れによる摩擦特性の変化についてパラメトリックに検討した結果を報告するものである。

### 2. CLB (Cross Linear Bearing)

CLB は単体では 1 方向にしか稼動しないリニアガイドを応力緩和用のゴムシムを介して直角に配置し，平面上のどの方向にも低摩擦で稼動できるようにした免震支承である。図-1 に示すように，+ 型・キ型・井型の 3 タイプがあり，キ型は + 型 2 基を，井型は + 型 4 基を一つの支承に集約している。

### 3. 実験概要

実験は二つに大別でき，一つは CLB の上下フランジプレート間に相対的な傾斜を与えた状態で圧縮せん断を行うもの (以下，与傾斜摩擦実験)，もう一つは相対的な捻れを与えた状態で圧縮せん断を行うもの (以下，与捻転摩擦実験) である。

#### (1) 試験体

表-1 に試験体の諸元を示す。試験体は + 型・キ型・井型の各タイプ 1 種類ずつとし，タイプ間相互の比較が

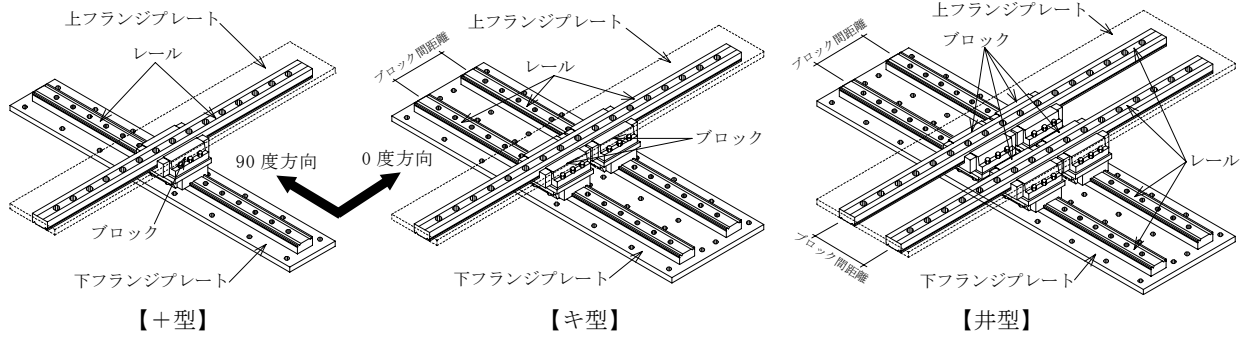


図-1 CLBの構成

表-1 試験体の諸元

タイプ	+型	キ型	井型
基本型番	CLB250	CLB500T	CLB1000F
長期許容荷重 $P_0$ (kN)	2450	4900	9800
限界荷重 (kN)	圧縮 $P_{cr}$ 引張 $P_{cr}$	8185 1420	16370 2845
静定格荷重 (kN)	圧縮 $P_0$ 引張 $P_0$	2450 1670	4900 3340
基準剛性 (kN/mm)	圧縮 $k_0$ 引張 $k_1$	3590 360	7180 720
静的許容モーメント (kN・m)		23	117
全高さ (mm)	448	533	538
ブロック[平面寸法] (mm)		330×419	
ブロック間距離 (mm)	---		437
レール幅 (mm)		130	
フランジプレート	幅 (mm) 厚さ (mm)	465 40	465[上],905[下] 60[上],55[下] 60

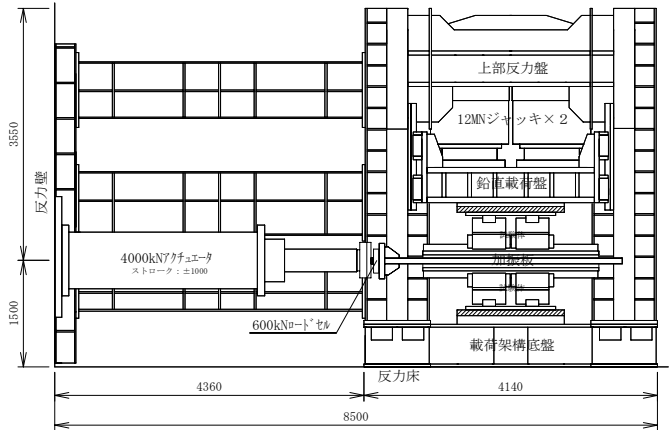


図-2 実験の全体図

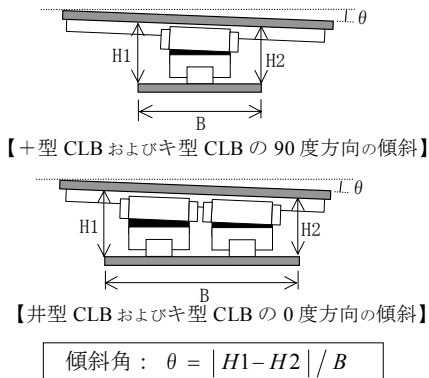


図-3 傾斜と傾斜角の説明図

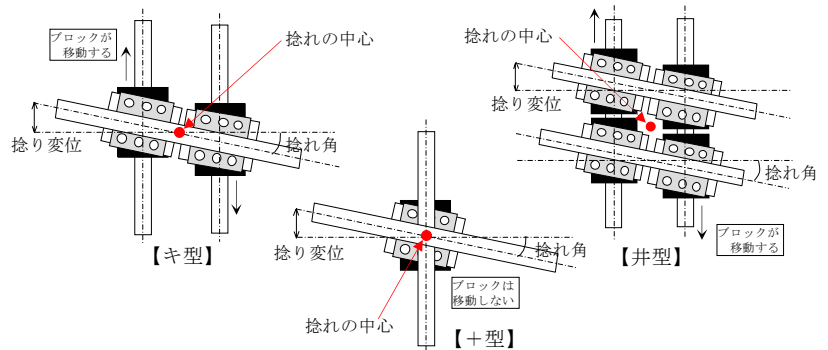


図-4 捻れと捻れ角の説明図

容易に行えるように同型番のリニアガイドを使用したものを選定した。

(2) 試験機と計測項目

図-2に実験の全体図を示す。実験は同一型番の試験体2基をアクチュエータに接続された加振板の上下に固定し、鉛直荷重を載荷した後に水平方向に正弦波加振するという手順で行った。

与傾斜摩擦実験では、図-2中に斜線で示した試験体の上部および下部の平板プレートを傾斜プレートに交換することにより、上下フランジプレート間に相対的な傾斜(図-3参照)を与えた。傾斜の程度は、鉛直荷重載荷後に実測した上下フランジプレート間の相対的な傾斜角

(以下、傾斜角)を用いて評価した。

与捻転摩擦実験では、鉛直荷重を載荷する前に図-2中に斜線で示した2枚のプレートを反対方向に捻り、CLBの上下フランジプレート間に相対的な捻れ(図-4参照)を与えた。捻れの程度は、上下フランジプレート間の相対的な捻れ角(以下、捻れ角)および捻りモーメントの実測値を用いて評価した。

計測項目は、水平加振を行う際には水平荷重・水平変位・鉛直荷重・鉛直変位(参考値)の4項目とし、鉛直載荷を行う際には鉛直荷重と鉛直変位の2項目とした。また、与捻転摩擦実験においてフランジプレートを捻る際の計測項目は、捻り変位(図-4参照)と捻り荷重とした。図-5に変位計の取り付け位置を示す。

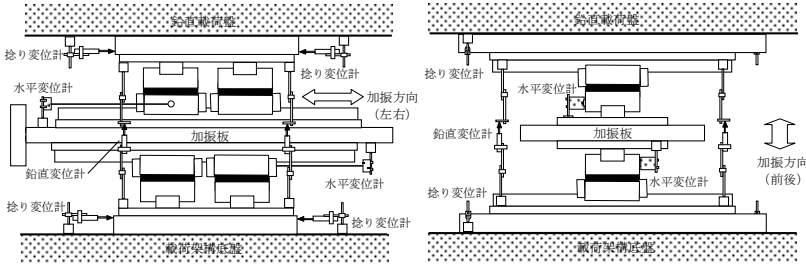


図-5 変位計の取り付け位置(キ型CLBの場合)

表-2 実験パラメータ

鉛直荷重	長期許容荷重 ( $P_0$ )				
傾斜角 (rad)	0, 0.003 <sup>註)</sup> , 0.005, 0.007				
捻れ角 (rad)	0, 0.012, 0.017, 0.022 <sup>註)</sup>				
加振条件	方向: 0度または90度方向(レールに平行な方向)				
波形	正弦波				
振動数 (Hz)	0.036	0.018	0.012	0.009	0.007
振幅 (mm)	200	400	600	800 <sup>註)</sup>	1000 <sup>註)</sup>
回数 (回)	3 または 4				

<sup>註)</sup> 一部の試験で実施しない場合あり

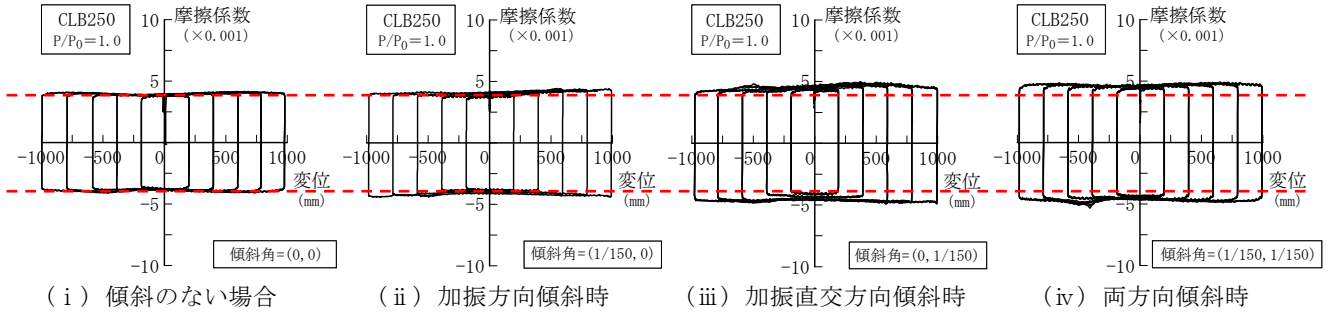


図-6 +型CLB (CLB250) の履歴ループ [0.007rad 傾斜時]

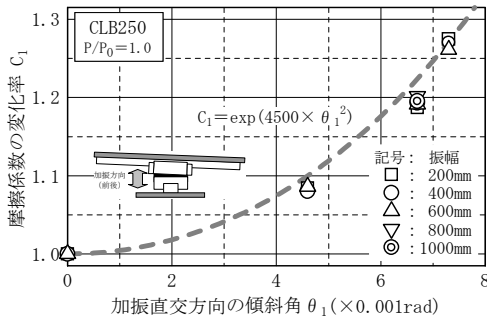


図-7 加振直交方向の傾斜角と摩擦係数の変化率との関係 (CLB250)

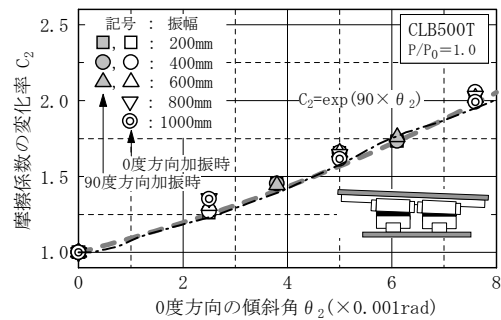


図-8 0度方向の傾斜角と摩擦係数の変化率との関係 (CLB500T)

(3) 実験パラメータ

表-2に実験パラメータの一覧を示す。鉛直荷重は各試験体の長期許容荷重とし、傾斜角は0.007rad、捻れ角は0.017radを基準に各4段階を設定した。また、水平方向の加振波形は正弦波、加振振幅は±200～±1000mm (200mmピッチ)とし、加振振動数は最大速度が45mm/sになるように設定した。

4. 実験結果

(1) 与傾斜摩擦実験

a) +型CLB (CLB250)

図-6に傾斜角0.007radにおける摩擦係数の履歴ループを示す。加振方向に傾斜を与えた場合、摩擦係数はほとんど変化しておらず、加振方向の傾斜による摩擦係数の変化は、工学的には無視できる程度であるといえる。一方、加振直交方向に傾斜を与えた場合、摩擦係数は2割程度大きくなっており、両方向に傾斜を与えた場合とほぼ等しくなっている。よって、+型CLBの傾斜による摩

擦係数の変化は、加振直交方向の傾斜角に支配されているといえる。

図-7に加振直交方向の傾斜角  $\theta_1$  と摩擦係数の変化率  $C_1$  との関係を示す。摩擦係数は傾斜角  $\theta_1$  の増大と共に大きくなる傾向を示しており、その変化率  $C_1$  を指数関数で回帰すると図中に破線で示した次式となる。

$$C_1 = \exp(4500 \times \theta_1^2) \quad (1)$$

式(1)は+型CLBが加振直交方向に傾斜した時の摩擦係数の変化率を与える実験式であるが、CLBの構造上、キ型CLBが90度方向(図-1参照)に傾斜した時の摩擦係数の変化率も式(1)で与えられるとして問題ないとする。

現時点での式(1)の適用範囲は、実験でその整合性が確認されている傾斜角0.007radまでであり、それ以上の傾斜が生じる場合には更なる検討が必要となる。しかし、標準的な免震建築物について、大地震時における免震支承の傾斜角を試算したところ、RC造で0.002rad、S造でも0.003rad未満であったため、CLBの傾斜角が0.007radを超える可能性は極めて低いと考える。

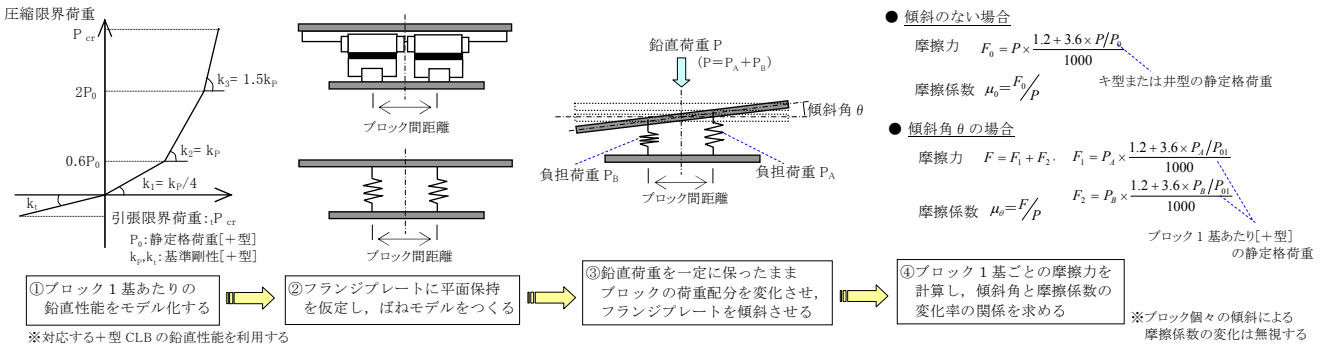
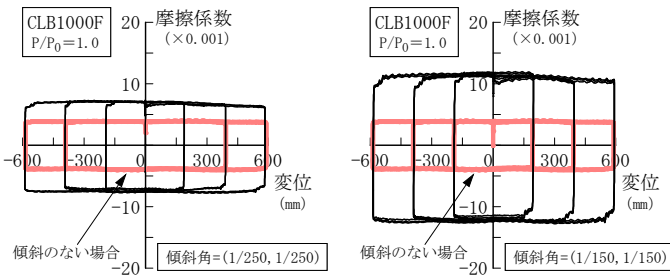


図-9 キ型CLBの0度方向傾斜時における摩擦係数の計算方法



(i) 0.004rad 傾斜時 (ii) 0.007rad 傾斜時  
 図-10 井型CLB (CLB1000F) の履歴ループ

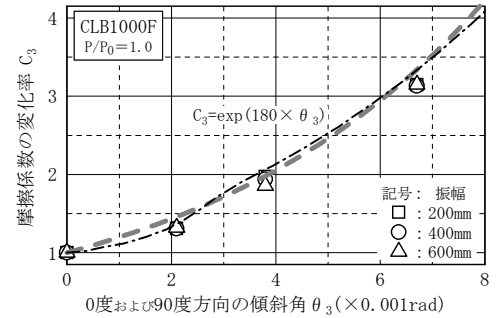


図-11 0度および90度方向の傾斜角と摩擦係数の変化率との関係 (CLB1000F)

b) キ型CLB (CLB500T)

図-8に0度方向の傾斜角  $\theta_2$  と摩擦係数の変化率  $C_2$  との関係を示す。図中、各プロットは実験結果であり、一点鎖線は図-9に示す方法で求めた摩擦係数の変化率の計算値である。実験結果と計算値はよく一致しており、図-9に示した計算方法の妥当性が確認できる。ここで、簡単のために計算値を指数関数で近似すると図中に破線で示した次式が得られる。

$$C_2 = \exp(90 \times \theta_2) \quad (2)$$

式(2)は、キ型CLBが0度方向に傾斜した時の摩擦係数の変化率を与える式であるが、CLBの構造上、井型CLBが0度または90度のいずれか片方向のみに傾斜した時の摩擦係数の変化率も式(2)で与えられるとして問題ないとする。式(2)によれば、0.004rad、0.007radの傾斜による摩擦係数の変化はそれぞれ+43%、+88%となり非常に大きく感じられるが、実際は摩擦係数0.005が0.007~0.009に変わる程度の変化であるため、免震建築物の地震応答性状に与える影響は小さいと考える。

c) 井型CLB (CLB1000F)

図-10に0度および90度の両方向に同じ傾斜を与えた時の摩擦係数の履歴ループを示す。摩擦係数は傾斜のない場合に比べ、0.004radの傾斜で2倍、0.007radの傾斜で3倍程度にまで大きくなっているが、摩擦係数の値は0.007radの傾斜時でも0.013と十分に小さく、履歴ループの形状も良好である。よって、CLBは直交する2方向に

0.007radの傾斜が同時に生じた場合でも、所要の性能を保持しているといえる。ちなみに、直交する2方向の傾斜角がそれぞれ  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  である場合、最大傾斜角  $\theta_{max}$  は式(3)で与えられるため、直交する2方向に0.007radの傾斜を同時に生じるということは、45度方向に0.010radの傾斜を生じることと同値となる。

$$\theta_{max} = \theta_x \times \cos\left(\tan^{-1} \frac{\theta_y}{\theta_x}\right) + \theta_y \times \sin\left(\tan^{-1} \frac{\theta_y}{\theta_x}\right) \quad (3)$$

図-11に0度および90度の両方向に等しい傾斜角を与えたときの傾斜角  $\theta_3$  と摩擦係数の変化率  $C_3$  との関係を示す。図中、各プロットは実験結果、一点鎖線は前項と同様の方法により求めた変化率の計算値、破線は計算値を指数関数で近似した次式である。

$$C_3 = \exp(180 \times \theta_3) \quad (4)$$

実験結果と計算値の近似式はよく一定しており、井型CLBが0度および90度の両方向に同じだけ傾斜した際の摩擦係数の変化率は、式(4)で与えられることがわかる。

(2) 与捻転摩擦実験

a) +型CLB (CLB250)

図-12に捻れを与えた際の摩擦係数の履歴ループを、図-13に捻れ角と摩擦係数との変化率の関係を示す。

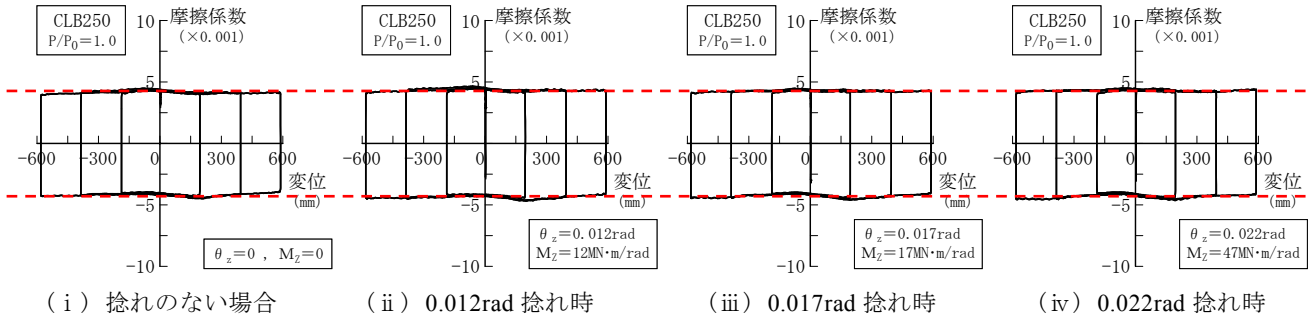


図-12 +型CLB (CLB250) の履歴ループ

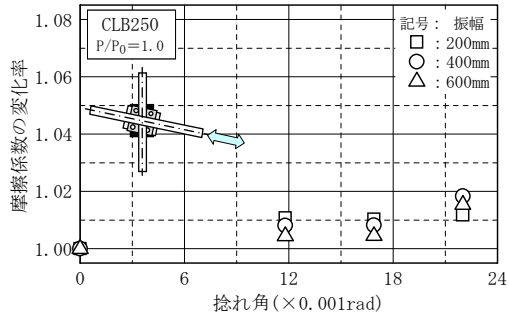


図-13 捻れ角と摩擦係数の変化率との関係 (CLB250)

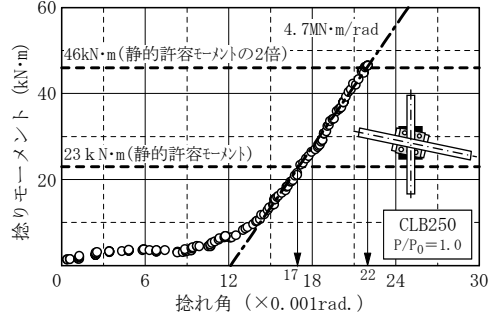
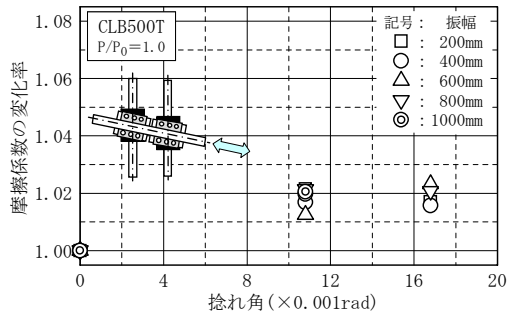
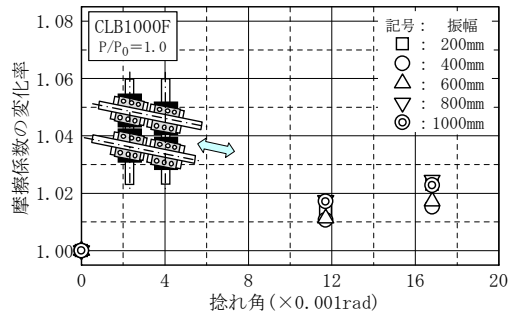


図-14 捻れ角と捻りモーメントとの関係 (CLB250)

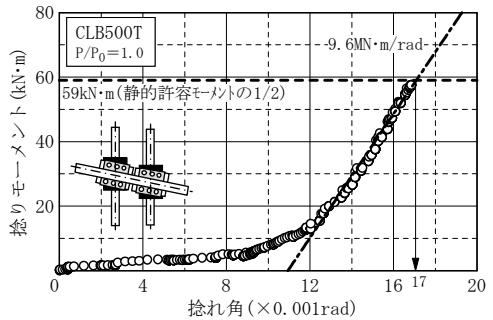


(i) キ型CLB (CLB500T)

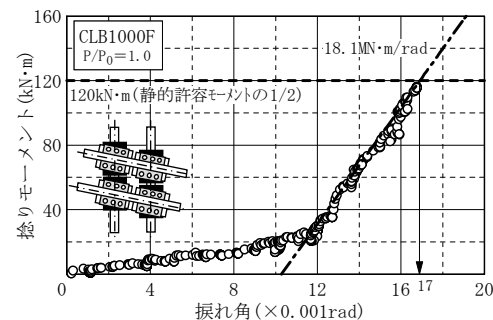


(ii) 井型CLB (CLB1000F)

図-15 捻れ角と摩擦係数の変化率との関係



(i) キ型CLB (CLB500T)



(ii) 井型CLB (CLB1000F)

図-16 捻れ角と捻りモーメントとの関係

捻れ角が0.022rad (捻りモーメント46kN・m) 以下の範囲では、履歴ループに大きな変化は認められず、摩擦係数の数値的な変化も+2%以下であるため、捻れによる摩擦係数の変化は工学的には無視できると考える。

図-14に捻れ角と捻りモーメントとの関係を示す。捻りモーメントは捻れ角0.017radでリニアガイドの静的許容モーメント (ブロック内のボールに長期許容圧縮荷重

載荷時と同じ接触応力を作用させるモーメント) と等しくなり、捻れ角0.022radでその2倍になっている。したがって、鉛直荷重 (圧縮) と同じ考え方<sup>1)</sup>をすれば、+型CLBの捻れ角の許容値は長期で0.017rad、短期で0.022radになる。なお、CLBに生じる長期的な捻れとしては、設置誤差によるものや、地震や暴風等により免震層が変形した後の残留変形によるものなどが考えられる。

## b) キ型CLB (CLB500T)・井型CLB (CLB1000F)

図-15に捻れ角と摩擦係数の変化率との関係を示す。捻れによる摩擦係数の変化は、捻れ角が0.017radまでの範囲では、キ型・井型CLBの場合も+型CLBと同様に非常に小さく、工学的には無視できる程度であるといえる。

図-16に捻れ角と捻りモーメントとの関係を示す。キ型・井型CLBでは、捻りモーメントがブロックの移動を誘発する(図-4参照)ため、捻れ角が等しい場合には、リニアガイドの静的許容モーメントに対する捻りモーメントの比(以下、モーメント比)は、+型CLBよりも小さくなっている。たとえば、0.017radの捻れを生じさせるモーメント比は+型CLBでは1.0であるのに対し、キ型・井型CLBでは0.5になっている。

したがって、本質的にはキ型・井型CLBの方が+型CLBよりも大きな捻れを許容できると考えるが、現在、摩擦特性が確認できている範囲は捻れ角0.017radまでであるため、実際の使用は捻れ角0.017rad以下に留めるのが穏当であると考え。なお、数種の免震建築物について大地震時における免震支承の捻れ角を試算した結果、大きな偏芯(偏芯率3%)を与えた場合でも捻れ角は0.003rad程度にしかならなかったため、捻れ角が0.017radを超える可能性は極めて低いと考える。

ここで、参考までに、図-16中に示した捻れ剛性より、モーメント比が1.0および2.0になる捻れ角を求めると、それぞれ0.023rad、0.027radになる。

## 5. まとめ

3タイプ(+型・キ型・井型)の直動転がり免震支承(CLB)について、上下フランジプレート間の相対的な傾斜や捻れが摩擦特性に及ぼす影響について検討した。

得られた知見は以下のとおりである。

- ①+型CLBの加振方向の傾斜による摩擦係数の変化は、傾斜角が0.007rad以下の範囲では、工学的には無視できる程度に十分小さい。
- ②+型CLBの加振直交方向の傾斜およびキ型CLBの90度方向の傾斜による摩擦係数の変化率は、傾斜角の2乗の関数で評価できる。
- ③キ型CLBの0度方向の傾斜および井型CLBの任意方向の傾斜による摩擦係数の変化率は、傾斜時に各ブロックが負担する鉛直荷重を、ブロック1基あたりの鉛直剛性から推定することにより、十分な精度で決定できる。また、それらの変化率は、指数関数を用いて簡略表現できる。
- ④捻れによる摩擦係数の変化は、捻れ角が0.017rad以下の範囲では+3%以下であり、工学的には無視できる程度である。

## 参考文献

- 1) 原田浩之, 鈴木亨, 浅野幸一郎: リニアガイドを用いた転がり免震支承(CLB)に関する実験的研究, 構造工学論文集Vol.50B, pp.539-552, 2004.3
- 2) 原田浩之, 鈴木亨, 古橋剛: 直動転がり免震支承(CLB)の極限摩擦特性 - 取り付け部材の回転による摩擦係数の変化について -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005.9
- 3) 鈴木良二, 田中久也, 村尾秀己: 直動転がり支承免震装置(CLB)の実験検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005.9
- 4) 日本免震構造協会: 免震材料認定に伴う実大試験資料調査に基づく積層ゴムの限界性能とすべり・転がり支承の摩擦特性の現状, 2003.8