

パット型ゴム支承に作用する支圧力と摩擦抵抗性に関する検討

Examination of the effect of bearing pressure on the frictional resistance of pad-type rubber bearings

寒地土木研究所	○ 正 員	佐藤 京 (Takashi Sato)
寒地土木研究所	正 員	寺澤 貴裕 (Takahiro Terasawa)
ゴム支承協会	正 員	今井 隆 (Takashi Imai)
ゴム支承協会	正 員	久慈 茂樹 (Shigeki Kuji)
寒地土木研究所	正 員	安中 新太郎 (Shintaro Yasunaka)

1. はじめに

1961 年国鉄東北本線鬼怒川橋梁に初めて適用されたパット型ゴム支承は、小規模な橋梁の固定可動構造の支承として採用される場合が多く、支承本体を上下部構造に固定せず直接脊座に置いて用いられることが多い。この支承は、水平力により支承と上下部構造が滑動しないようにするため、平成 30 年に改定された道路橋支承便覧では、機能分離型支承と位置付けられ滑動防止構造を設けることを標準としている。滑動防止構造の必要性を支承に作用する最小支圧応力により、確認するよう平成 16 年の道路橋支承便覧では示されており、平成 29 年以前では、これにより滑動に対する照査がなされている。しかし、こうした設計照査が行われているにも係わらず、橋梁点検において滑動流出しているパット型ゴム支承が確認されている。

そこで、パット型ゴム支承の滑動要因を検討するため、ゴムとモルタル境界面に作用する摩擦力に関する試験を行い摩擦抵抗性に関する検討を行った。

本検討では、この試験を基に支圧力と摩擦に着目した考察を報告する。

2. ゴムの摩擦

接触表面に生じる摩擦については、金属のように接触面で塑性変形が主に生じる物質と弾性変形が主のゴムとでは、摩擦の発生機構が大きく異なり、ゴム材料においては、Amonton-Coulomb の摩擦の法則に当てはまらないことが知られている¹⁾。ゴムとその他材料が接触する表面では、荷重やすべり速度、温度といった要因によってゴムの摩擦特性が影響を受ける。

ここで、文献2)や3)を基に、ゴムの摩擦係数に対する鉛直荷重依存性と載荷速度依存性に関する整理をする。

2.1 鉛直荷重依存性

ゴムとモルタル境界における最大静摩擦係数 μ_0 について式(1)の関係が成り立つとする。

$$\mu_0 = F/W = \tau_m \cdot A_r / W \dots (1)$$

F ; 摩擦力

τ_m ; 平均せん断応力

A_r ; 真実接触面積

W ; 鉛直荷重

ゴムとモルタルの微小接触面に着目する。その接触面の突起一つの面積を A_m 、作用荷重を w とし、図-1 に示

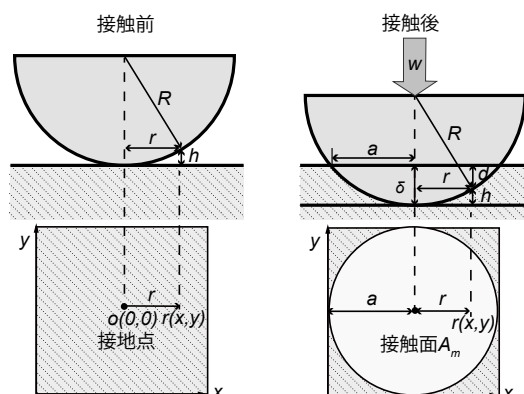


図-1 ヘルツの弾性接触モデル

すヘルツの接触モデルで接触面積を表すと式(2)となる。

$$A_m = \pi \cdot \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \cdot \frac{3R}{4} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot w^{\frac{2}{3}} \dots (2)$$

ν ; ポアソン比

E ; 弾性係数

R ; 曲率半径

ゴムとモルタルの接触突起総数 N とすると真実接触面積 $A_r = N \cdot A_m$ 、鉛直荷重 $W = N \cdot w$ となり、これらと式(2)を式(1)に代入すると鉛直荷重依存性を考慮した最大摩擦係数として式(3)が示される。最大静摩擦係数は、Amonton-Coulomb の摩擦の第一法則（摩擦係数は載荷荷重に依存しない）に従わず、接触面がヘルツの弾性接触モデルに従う場合、鉛直荷重の $-1/3$ 乗に比例することが示される。

$$\mu_0 = \frac{\tau_m \cdot A_r}{W} = \tau_m \cdot \pi \cdot N^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{1 - \nu^2}{E} \cdot \frac{3R}{4} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot W^{-\frac{1}{3}} \dots (3)$$

(2)速度依存性

次に載荷速度依存性に関する仮説を示す。一般にゴムの摩擦は、粘着摩擦とヒステリシス摩擦の成分からなるとされており、ゴムがすべっている場合の摩擦力は、2成分の摩擦で生じる力の和で示される。その機構を図-2 に示す。粘着摩擦成分には、2.1 で示した鉛直荷重依存

が適用される。一方、ヒステリシス摩擦成分については、接触によるゴム材料の体積 V の変化分とそのひずみエネルギーを熱に交換する指標 $\tan \delta$ の積が摩擦係数に比例するとされている。これらの摩擦係数は、図-3や図-4に示すように滑り速度により変動する。ここで、水平荷重の載荷速度が異なる場合を考える。載荷条件が異なる場合、ゴム材料の変形により体積 V と指標 $\tan \delta$ の変化量が変化すると想定され、すべり速度依存性の結果に類似することが予想される。

このことから、本検討で対象とするパット型ゴム支承の滑動現象を検討する上で、摩擦係数と荷重や載荷速度の依存に関する表現を式(4)と仮定して整理をすると水

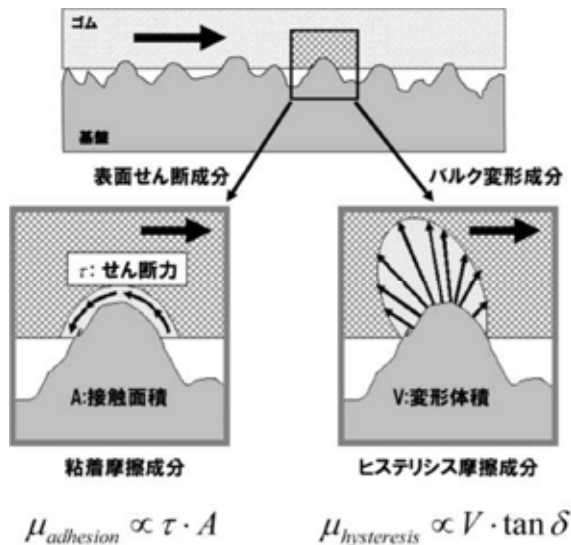


図-2 ゴム摩擦境界面における変形挙動モデル³⁾

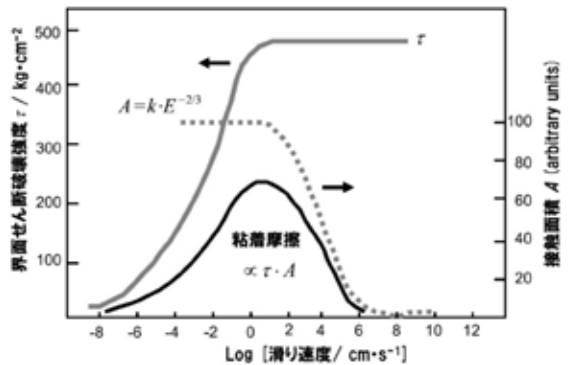


図-3 粘着摩擦のすべり速度依存性³⁾

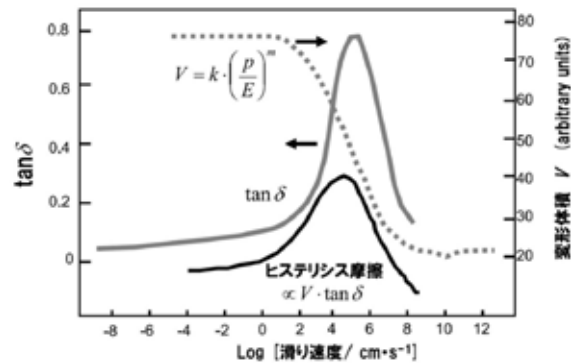


図-4 ヒステリシス摩擦のすべり速度依存性³⁾

平載荷速度と摩擦係数は、対数関数で示すことが出来る。

$$\mu_0 \propto (\tau \cdot A) \cdot (V \cdot \tan \delta) \cdots \cdots (4)$$

$$\mu_{adhesion}(\tau \cdot A) = \frac{\tau_m \cdot A_r}{W} = \frac{a \cdot \log v \cdot A_r}{W}$$

$\mu_{adhesion}$: 粘着摩擦成分

τ_m : $a \cdot \log v$

a : せん断応力 τ に関する定数

v : 載荷速度

$$\mu_{hysteresis}(V \cdot \tan \delta) = V \cdot \tan \delta = A_r \cdot k_1 W^{\alpha} \cdot \tan \delta$$

$$V = A_r \cdot k_1 W^{\alpha}$$

$$\tan \delta = \log((v - b)^{\beta} - c)$$

$$\mu_0 = a \cdot \log v \cdot A_r^2 \cdot k_1 W^{\alpha-1} \cdot \log((v - b)^{\beta} - c)$$

A_r : 載荷荷重 W の γ 乗に比例するとおく

$$\mu_0 = a \cdot \log v \cdot A_r^2 \cdot k_1 k_2 W^{2\gamma+\alpha-1} \cdot \log((v - b)^{\beta} - c) \cdots (5)$$

なお、 τ_m や $\tan \delta$ は、図-3 と図-4 中に示した曲線に従う関数となるように仮定した。

3. 試験概要

試験に用いた装置は、試験体に面圧を与える鉛直方向に設置したアクチュエータ(油圧サーボ)、せん断ひずみを与える水平方向に設置したスクリー式ジャッキ、パット型ゴム支承(試験体)を支持する架台で構成されている(図-5)。パット型ゴム支承への水平載荷は載荷ブロックに取り付けられたせん断キーにより、ゴム支承の上鋼板に荷重を伝達し、せん断変形をさせる。この装置では、パット型ゴム支承下面とコンクリート版の境界です

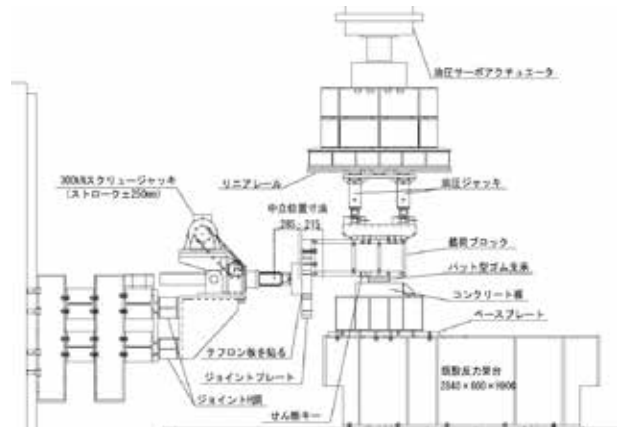


図-5 載荷装置概要図

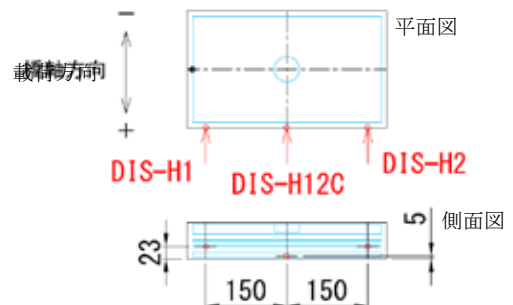


図-6 試験体のせん断方向変位を測定する機器位置図

べりを変位として取得し、そのときの鉛直荷重と水平荷重から摩擦係数を評価する。取得する水平変位の位置を図-6に示す。支承中央部最下ゴム層の DIS-H12C と示した位置におけるレーザー変位計測定量をゴムに発生したすべりの判定に用いた。鉛直、水平の荷重と変位は、載荷装置に設置した荷重計と変位計により取得している。

試験ケースを表-1に示す。評価は、ケースに示すようにモルタル面の粗さ、鉛直荷重による影響、載荷速度による影響について行った。対象としたパッド型ゴム支承を図-7に示す。また、接触材料として図-8に示す形状のモルタル版の表面をコテ仕上げ、化粧板仕上げの2種類としている。

表-1 試験ケース一覧

モルタル版種	鉛直荷重	水平載荷速度	試験数	No.
化粧板仕上げ	140kN (2N/mm ²)	0.001mm/sec	3	5-1, 5-2, 5-3
		2mm/sec	3	5-1, 5-2, 5-3
コテ仕上げ	120kN (1.78N/mm ²)	0.001mm/sec	3	1-1, 1-2, 1-3
		2mm/sec	3	4-1, 4-2, 4-3
		0.1mm/sec	1	2-1
		1mm/sec	1	3-1
	420kN (6N/mm ²)	2mm/sec	1	1
	210kN (3N/mm ²)	2mm/sec	1	2
	140kN (2N/mm ²)	2mm/sec	1	3

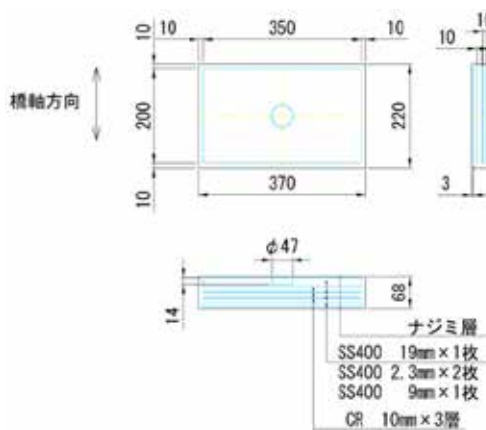


図-7 パッド型ゴム支承（寸法単位:mm）

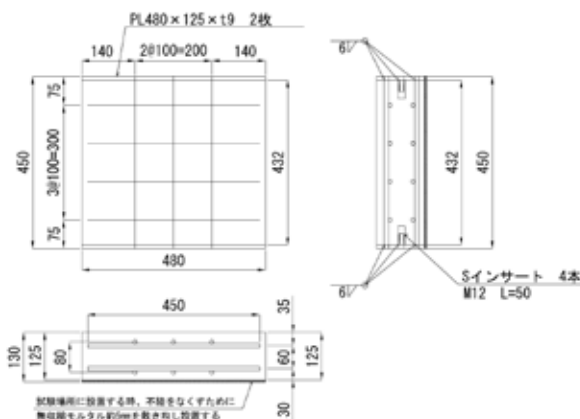


図-8 モルタル版詳細図（寸法単位:mm）

4. 試験結果と考察

4.1 鉛直荷重の影響

コテ仕上げのモルタルを対象とし、載荷速度が2(mm/sec)の鉛直荷重が異なるケースを整理した結果を表-2に示す。表には、ゴム硬度（TypeA 法による）、温度も合わせて示している。硬度や内部温度は極端な値となっておらず、摩擦係数に大きな影響を与えないものと判断している。図-4にこれらのケースについての鉛直荷重と水平荷重から単純に求めた最大静摩擦係数の関係を示す。鉛直荷重の増加に伴い、最大静摩擦係数が低下する傾向が確認され、Dr.Otsuki & Dr.Matsukawa¹⁾の結果に調和的で、ゴムとモルタルの境界で生じる摩擦には、Ammonton-Coulomb の摩擦の第一法則が成り立っていないことが本試験で示された。本試験ケースのみではあるが、最小二乗法による回帰結果は式(6)となり、ヘルツの接触モデルで示した鉛直荷重の指数と同程度の値であり、真実接触面積を算定することができれば、式(3)により最大静摩擦係数の近似値が得られると考えられる。

$$\mu_0 = 58.871W^{-1.0434} \dots \dots (6)$$

表-2 鉛直荷重を検討要素した試験結果一覧

No.	硬度	表面温度 ℃	内部温度 ℃	水平荷重 kN	鉛直荷重 kN	水平変位 mm	最大静摩擦係数 μ_0
1	62A	9.7	10.9	48.1	420.4	5.3	0.11
2	63A	9.8	10.1	44.9	210.5	3.9	0.21
3	63A	9.7	10	49.3	139.9	3.7	0.35
4-3	62A	17.1	15.7	47.8	120.0	6.2	0.40

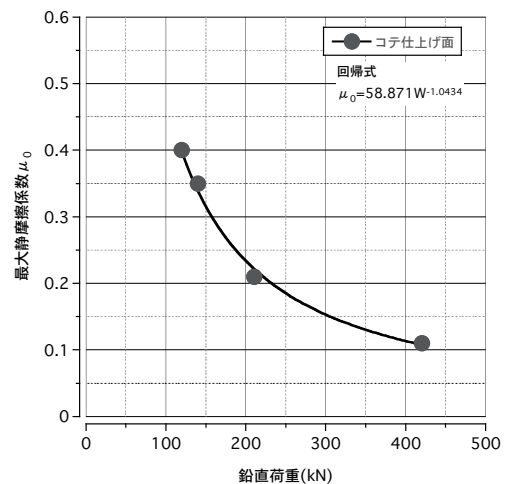


図-9 鉛直荷重と最大静摩擦係数の関係（ゴムとコテ仕上げ面による試験結果）

4.2 載荷速度の影響

水平載荷速度による摩擦係数への影響を確認するため、コテ仕上げ面に対する載荷速度0.001, 0.1, 1, 2(mm/sec)の結果を表-3に示す。ここで示す摩擦係数も水平荷重から単純に算出したものである。また同様に化粧板面による試験では、載荷速度0.001, 2(mm/sec)の結果を表-4に示す。なお、コテ仕上げ面による試験結果の内、No.1-1は、同一試験条件のNo.1-2とNo.1-3の試験結果と大きく異なる最大静摩擦係数を示しており、特異結果として扱っ

た。

これらの結果からゴムとの接触面の荒さの違いによらず、载荷速度が速くなるに従い、最大静摩擦係数が大きくなる傾向にあることがわかる。

表-3 载荷速度を検討要素した試験結果一覧
(コテ仕上げ面による試験)

No.	硬度	表面温度 ℃	内部温度 ℃	水平載荷速度 mm/sec	水平荷重 kN	鉛直荷重 kN	水平変位 mm	最大静摩擦係数 μ_0
1-1	62A	12.2	9.5	0.001	36.5	119.8	5.0	0.30
1-2	62A	16.1	13.8	0.001	21.0	119.9	2.6	0.18
1-3	62A	15.1	12.8	0.001	22.1	120.0	2.9	0.18
2-1	62A	11.4	12	0.1	34.2	119.9	4.8	0.29
3-1	63A	14.7	12.9	1	44.7	120.0	5.8	0.37
4-1	62A	15.2	12.5	2	53.2	120.0	6.2	0.44
4-2	63A	16.2	14.8	2	46.0	120.0	5.1	0.38
4-3	62A	17.1	15.7	2	47.8	120.0	6.2	0.40

表-4 载荷速度を検討要素した試験結果一覧
(化粧板面による試験)

No.	硬度	表面温度 ℃	内部温度 ℃	水平載荷速度 mm/sec	水平荷重 kN	鉛直荷重 kN	水平変位 mm	最大静摩擦係数 μ_0
5-1	63A	15.8	11.2	0.001	23.1	140.8	2.9	0.16
5-2	63A	17.6	16.5	0.001	19.5	139.8	2.2	0.14
5-3	62A	15.6	15.4	0.001	23.7	139.8	2.3	0.17
6-1	64A	13.4	9.3	2	79.4	141.3	5.6	0.56
6-2	62A	15.1	10.9	2	71.2	140.9	4.6	0.51
6-3	63A	16.6	16.1	2	75.3	141.0	5.9	0.53

図-10 にコテ仕上げ面，化粧板面の载荷速度と最大静摩擦係数の関係を示す。载荷速度が遅い場合は，ゴムと接触する面の違いが最大静摩擦係数に与える影響は小さい。しかし，载荷速度が速くなるとコテ仕上げ面よりも滑らかな化粧板面の最大静摩擦係数が高くなること示された。

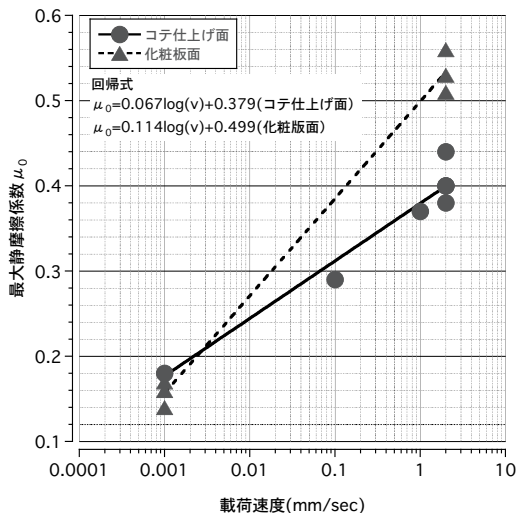


図-10 载荷速度と最大静摩擦係数の関係

得られた結果を式(5)と比べると最大摩擦係数のピーク値が得られない载荷速度域での試験結果であったことより，ここでは，単純に最小二乗法による回帰により対数関数に帰着し，式(7)，(8)を得た。

$$\mu_0(\text{コテ仕上げ}) = 0.067 \log(v) + 0.379 \dots \dots (7)$$

$$\mu_0(\text{化粧板}) = 0.114 \log(v) + 0.499 \dots \dots (8)$$

ここで，図-10 に示した载荷速度の影響のうち，コテ仕上げ面を対象とした $v=2.0\text{mm/sec}$ で得られる最大静摩擦係数を基準値とし，各载荷速度に対する比を係数 M_v とし，さらに式(6)にこの係数を乗加味した式(9)を次に示す。

$$\mu_0 = 58.871 M_v W^{-1.0434} \dots \dots (9)$$

$$M_v = (0.067 \log(v) + 0.379) / (0.067 \log(2.0) + 0.379)$$

式(9)から求めた支圧応力と最大静摩擦係数の関係について载荷速度 v を 0.001, 0.1, 1, 2 と 10mm/sec の 5 ケースを図-11 に示す。支圧応力とは，パット型ゴム支承の有効断面積を用いて式(9)の W を応力に換算したものである。

例えば，支圧応力 1.5N/mm^2 における最大静摩擦係数は，速度 0.001mm/sec では 0.18，速度 10mm/sec では 0.46 となり，その差は 2.5 倍になる。この結果より，支圧応力が同じでも载荷速度が異なると最大静摩擦係数に大きな違いが生じ，その差は支圧応力が低い程，大きくなる。

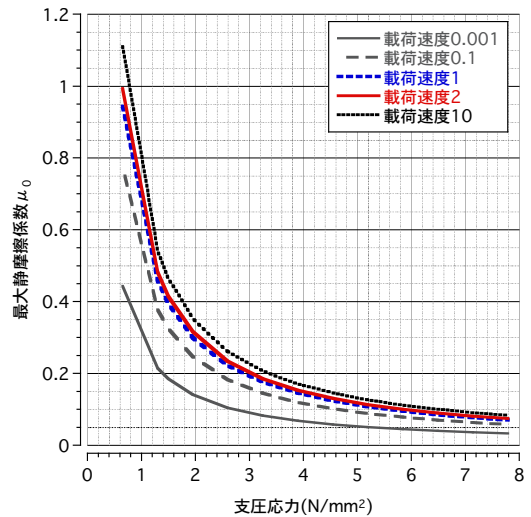


図-11 载荷速度を考慮した支圧応力と最大静摩擦係数の関係

5. まとめ

パット型ゴム支承の滑動要因を検討するため，ゴムとモルタル境界面に作用する摩擦力に関する試験を行い，支圧力と载荷速度の影響について検討した。その結果，1)パット型ゴム支承では，鉛直荷重が増加すると最大静摩擦係数が低減する。2)载荷速度が高くなると最大静摩擦係数が上昇する。3)鉛直荷重と载荷速度の双方を考慮した最大静摩擦係数においては，支圧応力が低い程，载荷速度の影響を受ける。

参考文献

- 1) Dr.Otsuki, Dr.Matsukawa: Systematic Breakdown of Amontons' Law of Friction for an Elastic Object Locally Obeying Amontons' Law, Nature Scientific Reports,2013.
- 2) 大原利一郎: 摩擦の理論，日本ゴム協会誌，第 68 巻 第 9 号，1995.
- 3) 日本ゴム協会誌編集委員: 入門講座やさしいゴムの物理 補講④，日本ゴム支承協会誌，第 83 巻第 4 号，2010.