

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1977

立位作業における外力による転倒限界に関する一考察 —柱上作業との関連において—

山 野 英 記
田 畠 泰 幸
寺 沢 正 義

立位作業における外力による転倒限界に関する一考察

—柱上作業との関連において—

山野 英記* 田 嶋 泰 幸* 寺 沢 正 義*

Balance of Human Body Working on Electric Pole

Eiki YAMANO Yasuyuki TABATA Masayoshi TERASAWA

Accidents often result from the unbalance of human body working on the electric pole. A temporary platform, however, fitted on a pole may contribute to the balance of such worker's body. In the present research, the problems that on what factors and how the balance of body on the platform depends, are investigated.

First, an external force tolerable for static balance is theoretically analyzed, on the assumptions that the human body is rigid and the shoes are not slippery on the platform. Stability of standing posture on the platform is also discussed on the same assumptions.

The tolerable force is a function of its direction, body weight, position of feet, centre of gravity of body, and point of force action. Force in opposite direction to the safety rope is proportional to the tension of safety rope. The stability of standing posture is further influenced by the height of the centre of gravity and the length of a safety rope.

Experiments have been made on the maximum strengths of subjects in various conditions and the results of them showed a good agreement with the theoretical ones.

Secondly, in case where the shoes may be slippery, the friction between the shoes and the platform was taken into account.

Using a theoretical model which is constituted by rigid segments and has movable hip joints allowing the feet to move respectively, the value of coefficient of friction required to keep balance has been estimated to be about 0.6—1 in typical conditions.

Measurements of the coefficient of friction were made on site in various conditions, and the majority of the data was observed in the range of 0.6 to 1.

It can be considered that the platform or the circumstances of labor leaves something to be improved. The results in this article is available to improve it.

* 電気研究部

1. は し が き

作業姿勢は作業者の安全が確保されるための重要な要因である。作業者は身体が安定に保持される姿勢でなければならない。特に架空線関係の柱上作業、その他の高所作業、危険物近接作業などでは、不安定な姿勢による身体の振れ、転倒などは即命取りにもなりかねない。また時によってはこれが電撃など他の災害の原因になることも少なくない。

以上のように、身体の安定、もしくは立位保持は安全工学の立場からも、人間工学の立場からも基本的な問題であり、この問題は一般に力学的、生理学あるいは制御工学的な多くの要因に依存している。しかし中でも力学的問題はもっとも基本的である。したがって本研究では、立位保持に必要な、あるいは有利な力学的条件を調べることを目的とし、主として静力学的検討を行なった。本研究は特に仮足場を使用した柱上作業を想定し、この場合の身体の安定について静力学的検討を行なった。ただし、身体の安定については静力学的範囲に限定しても、一般には未知数が多く解析できないことが多い。このため理論解析では目的に応じ、いくつかの仮定を採用した。また、ここで考察したことは柱上作業における身体の安定であるが、その内容の大半は他の場合にも共通な基本的問題である。ただ、「歩けない」という制約、および胴綱の束縛という点で柱上作業の特徴が現れている。

身体の立位保持を静力学的に取り扱うときには、足がすべらない場合と足がすべる場合の2つに大別される。前者については、身体に外力が作用してつりあいがかくずれ転倒に至る。したがって、つりあいが保持される最大の外力が問題であり、これを理論および被験者を使った実験によって求めた。またつりあいの安定性についても比較考察した。これらの解析からは身体の安定性に関する重心の位置、外力作用点の影響も明らかとなった。

一方後者の足がすべる場合については、これが転倒などの新たなきっかけとなり、身体が不安定になるため立位が保持されない。したがって、立位を保持するために足の受ける反力と、これに必要な足と床(足場)との摩擦係数について、理論的・実験的考察を行ない、その効果を示した。

2. 予 備 的 考 察

身体の力学的挙動を取扱うとき、身体はしばしば関節で結合されたいくつかの剛体セグメントでモデル化される*。任意のセグメントの静止は、セグメントに作用する力の和、および力のモーメントの和がいずれも0となる状態である。そのとき、当然であるが、関節において作用する力や関節モーメントも算入されねばならない。

関節モーメントは筋力に基づく能動的なものを含み、これが運動機能を代表していると考えられる。上記のつりあいの状態では、関節モーメントは関節の回りの力のモーメントとちようど大きさが等しく反対向きである。

静的な場合という仮定のもとでは、身体の立位保持は立位静止に等しい。本稿では第4章を除きほとんど、立位「保持」を立位「静止」で置き換える静力学的取扱いを行なう。これは大きい省略ではあるが、成立する場合も少なくないように思われる。もちろんある程度大まかで近似的であり、転倒前後の運動の経過などはわからない。

また、立位静止は立位保持の十分条件であるから、上記の仮定は立位保持に対しより厳しい条件を課することになる。

上体に作用する外力が除々に増加するとき、足がすべらない場合の転倒前の経過はだいたい次のようである。まず外力と反対方向に腰を下げ気味に動かす。これによって外力のモーメントと反対向きの重力のモーメントが生じられる。条件が許せばさらに上体を動かす、それでも不足のときには上体をそらせる。腰を低く落とす場合もある。

しかし、このような順応にも限界があってある程度で停止する。この順応の限界に達した時点から考えると、身体はあまり変形しない。下肢や胴体は突っ張り、関節は外力に対して強くなる。したがって、身体は剛体で近似される。

さらに外力が増加すると、身体は静止の姿勢から全体的に回転を始め、転倒に向かう。

足がすべる場合は、上記に対し腰を下げる動きや足のすべりに備える動きが大きくなる。ある時点で足がすべり、身体はそれまでのつりあいを失い、転倒に向

* たとえば文献 1), 2)

かう。

足のすべりが転倒のきっかけになる場合には、全身を一剛体と考えられる場合と関節を考慮せねばならない場合とがある。後者においては、身体は剛体セグメントの結合体と考えねばならない。

3. 足がすべらない場合の外力の限界

3.1 理論的検討

身体に対し、図1のような座標系を考える。両足の足底の点 A_L, A_R を通る右向きを x 軸とする。 A_L, A_R はそれぞれ左および右の足首の真下の点である。 A_L と A_R との中点を原点 O とし、鉛直上向きに z 軸、水平前向きに y 軸を定める。

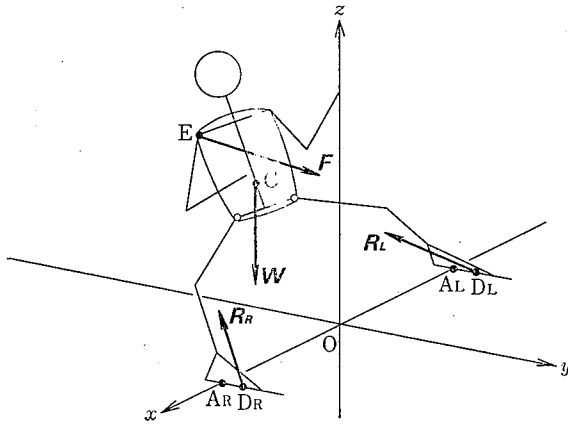


図1 身体に作用する力と座標系

身体のつりあいは次のような方程式で与えられる。

$$\mathbf{R}_L + \mathbf{R}_R + \mathbf{F} + \mathbf{W} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{r}_{DL} \times \mathbf{R}_L + \mathbf{r}_{DR} \times \mathbf{R}_R + \mathbf{r}_E \times \mathbf{F} + \mathbf{r}_C \times \mathbf{W} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{R}_L, \mathbf{R}_R$ はそれぞれ左および右足に作用する反力、 $\mathbf{F}$ は外力、 $\mathbf{W}$ は身体に作用する重力である。また、 $\mathbf{r}$ はそれぞれの力の作用点の位置ベクトルである。式(2)から $\mathbf{R}_R$ を消去すると、

$$(\mathbf{r}_{DL} - \mathbf{r}_{DR}) \times \mathbf{R}_L + (\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_{DR}) \times \mathbf{F} + (\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{DR}) \times \mathbf{W} = 0 \quad (3)$$

したがって、 y 軸のまわりのモーメントについては次式が成り立つ。

$$-(x_{DL} - x_{DR})R_{Lz} + z_E F_x - (x_E - x_{DR})F_z + (x_C - x_{DR})W = 0 \quad (4)$$

ただし、 $z_{DL} = z_{DR} = 0$ 、 $\mathbf{W} = (0, 0, -W)$ である。

身体が D_R を支点として回転を始めると左足が床を

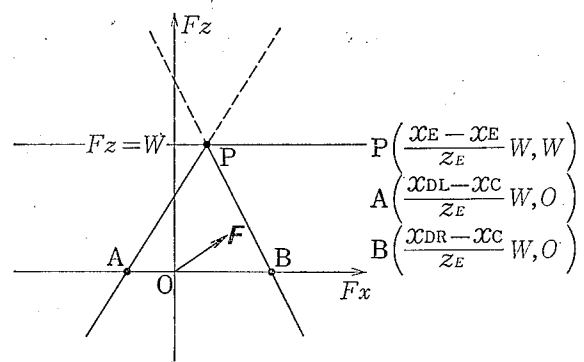


図2 (x, z) 平面における外力の限界

離れ、 $R_L = 0$ となる。これが立位静止の限界である。式(4)に $R_L = 0$ を代入すると、

$$z_E F_x - (x_E - x_{DR})F_z + (x_C - x_{DR})W = 0 \quad (5)$$

A_R の座標を $(x_A, 0, 0)$ とすると、 x_{DR}, x_{DL} はそれぞれ $x_A, -x_A$ で近似される。式(5)は F_x, F_z を変数と考えると直線 (y 方向に変化がないとき F_y 軸に平行な平面) の方程式であり、この直線は図2の点 B を通る。 B は F_x 軸上で、 $F_x = (x_{DR} - x_C)W/z_E$ の点である。

外力が反対向きになって左足 D_L が支点となるときも、 x_{DR} を x_{DL} と置き換えれば式(5)はそのまま成立する。特に身体は剛体で姿勢は元のままのときには、外力の限界は結局図2の実線のように2つの直線がつくる屋根形で示される。この図は、原点 O を起点とする外力ベクトルがこの屋根以内のものであれば、つりあいが保持されることを意味している。

屋根形の頂点 P の座標は、 $F_x = (x_E - x_C)W/z_E$ 、 $F_z = W$ で与えられる。したがって x_E, z_E, x_C などが変化すると、それに応じて P は $F_z = W$ の線上を、 A および B は F_x 軸上を移動する。剛体において外力の作用点 E が自由に選べる場合は、重心 C とは独立に E の変化を考えることができる。しかし、外力作用点 E を右肩など身体上の特定の部位と考えると、 E の変化には姿勢の変化が伴うので C もともに変化する。

支点が右足から左足に移ると実際には、姿勢が変化し x_E, x_C なども変化する。したがって、右足のときには屋根の右側、左足のときには別の屋根の左側が意味をもち、これらは $F_z = W$ の水平面で結ばれて台形屋根形になると考えられる。

また、力の成分が

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \sin \theta \cos \varphi \\ F_y &= F \sin \theta \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$F_z = F \cos \theta$$

のように極形式で与えられるときには、上式を (5) に代入して、

$$F = \frac{(x_D - x_C) W}{(x_D - x_E) \cos \theta + z_E \sin \theta \cos \varphi} \quad (7)$$

となる。 F は (x, z) 平面内の限界の外力である。また x_D は、支点が右足のとき x_{DR} 、左足のとき x_{DL} とする。

(y, z) 平面 (x 軸の回りのモーメント) に関しても同様にして次のような結果が得られる。

$$F = \frac{(y_D - y_C) W}{(y_D - y_E) \cos \theta + z_E \sin \theta \sin \varphi} \quad (8)$$

y_D は、外力が前向きときには足のつま先、後向きときにはかかと y 座標とする。あるいは近似的には $y_D = y_{AR} = 0$ と置くこともできる。

つりあい保持のためには、外力の大きさは式 (7)、(8) のいずれをも超過してはならない。したがって、それらの内の小さい方が外力の限界となる。外力の限界は (F_x, F_y, F_z) 空間では、屋根形が交差した形、すなわち四角錐で表わされる。四角錐の頂点の F_y 座標は、 $F_y = (y_E - y_C) W / z_E$ である。 F_y 軸を切る点の座標は式 (8) に、 $\theta = \pi/2$, $\varphi = \pi/2$ を代入すれば得られる。また水平断面は長方形である。

以上は、足が y 軸に平行という理想的配置の場合である。その他のときには、それに応じて水平断面の形が変化する。

3.2 外力の限界の実測

図3のようにして実験的に、人間の立位保持の限界の外力を調べた。ただし本実験においては、被験者が立位を保持しつつ出すことのできる最大の張力を外力の限界と考えることにした。向きは反対である。

被験者は、作業ぐつをはき指定された場所に足を置いて立つ。そして測定用ロープを全力で引っ張る。このときの張力をひずみゲージ式張力計で記録するので

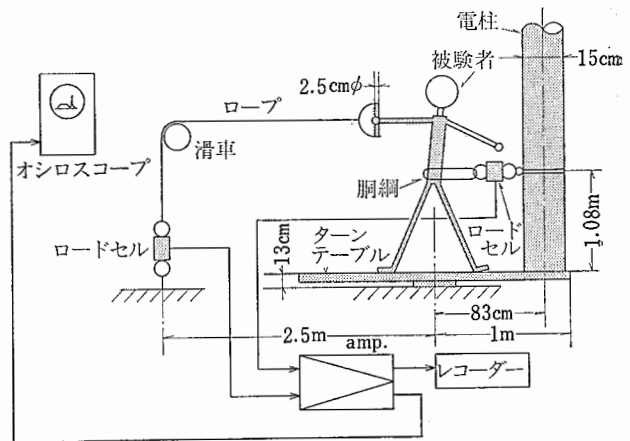


図3 外力の限界測定実験の配置図

ある。また測定項目によっては、柱上作業を想定し、銅網を装着させて実験した。

床面は、鉄板の上にすべり止めシートをはりつけたもので、後述のように作業ぐつとの間の静摩擦係数は約1.2である。足の位置は直径29cmφの円で指定、足の向きなどは円内では自由とした。測定ロープは始め、上体を直立して腕を伸ばしたときに届く長さに設定する。引っ張るときの姿勢も自由であるが、ロープの長さなどが制約となる。滑車の高さは測定ロープが水平になるように調整しておく。

最大張力は、約3s持続する持続的（静的）な力と瞬発力との2種類を測定した。後者では一時的に身体がぐらつくことが多かった。

各被験者について測定項目の順列ができるだけ不規則になるように、乱数によって測定順序を決めた。被験者はオシロスコープによって自分の張力信号を見ることができる。

被験者は表1に示すような若年の男子で、配電工14人と未経験者（おもに学生）6人で、きき腕は全員右であった。

表1 被験者の特性とそのばらつき

被 験 者	人間要因	年 令	身 長 cm	体 重 kg	下肢長 cm	背筋力 kgf	片足立ち 時 間 s	足 長 cm
	測定値							
配 電 工 14人	平 均	20.7	173.6	65.0	81.9	165	80.2	28.3
	変 動 係 数	0.100	0.0240	0.110	0.0338	0.116	0.942	0.0613
未 経 験 者 6人	平 均	23.0	171.3	59.6	79.8	160	27.3	
	変 動 係 数	0.128	0.0390	0.0896	0.0511	0.146	0.479	

3.3 実験結果

(1) 最大張力と両足の間隔

両足の間隔を増加させたときの最大張力の変化を図4～図6に示す。配電工の場合で胴綱はつけていない。図の横軸は、両足の位置を指定する円の中心間の距離の半分に5cmを加えた長さである。縦軸の最大張力（限界の外力）には、理論値 F_t 、実測値の静張力 F_s および瞬発張力 F_i の3つを図示した。実験値は標準偏差も示す。

図4は $\varphi=0^\circ$ 、すなわち右方向のロープを引っ張った場合である。理論値 F_t は、下肢を左右対称に開き上体を鉛直にした理想的な場合について計算した。式(7)に $x_c=0$, $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$ を代入すると、

$$F_t = \frac{x_D W}{z_E}$$

となる。外力作用点の高さ z_E は対称姿勢では x_D の増加にしたがって減少する。しかし、その変化は小さいので、ここでは一定値、すなわち測定のために設定したロープの高さを z_E とした。したがって、 x_D の増加にしたがい F_t は直線的に増加している。

F_t に比べて静張力 F_s がずっと大きいのは重心の移

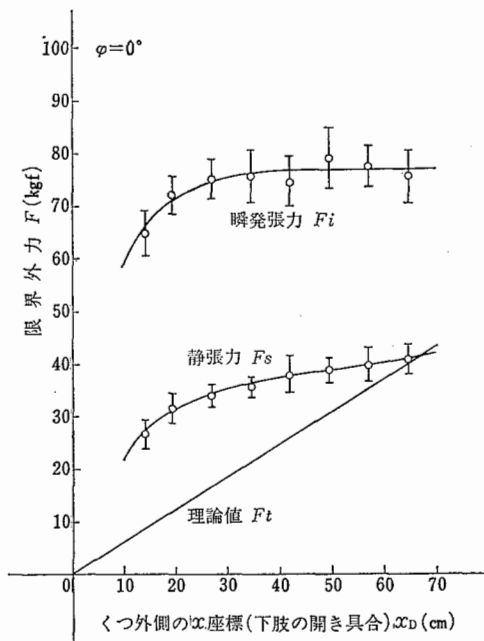


図4 限界外力（最大張力）と下肢の開きとの関係 ($\varphi=0^\circ$ のとき)

動による。しかし、 F_s の増加率はすぐに減少し飽和するように見える。

瞬発張力 F_i は静張力 F_s の約2倍の大きさである。

図5は外力の方向 $\varphi=45^\circ$ (右斜め前) の場合、図6は $\varphi=90^\circ$ (前方) の場合である。図5において限界外力の理論値は、はじめ式(7)によって決定され、

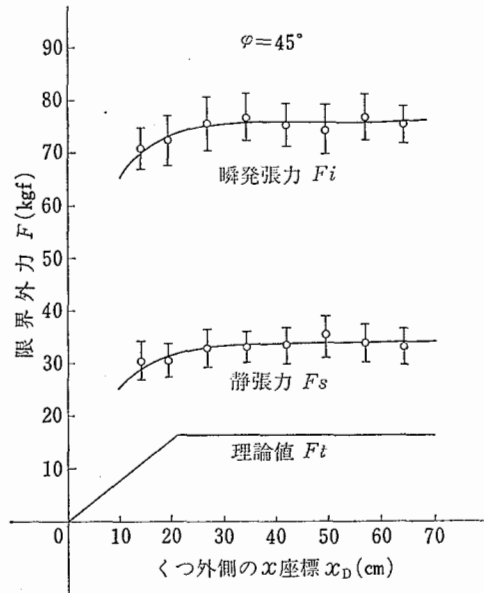


図5 限界外力（最大張力）と下肢の開きとの関係 ($\varphi=45^\circ$ のとき)

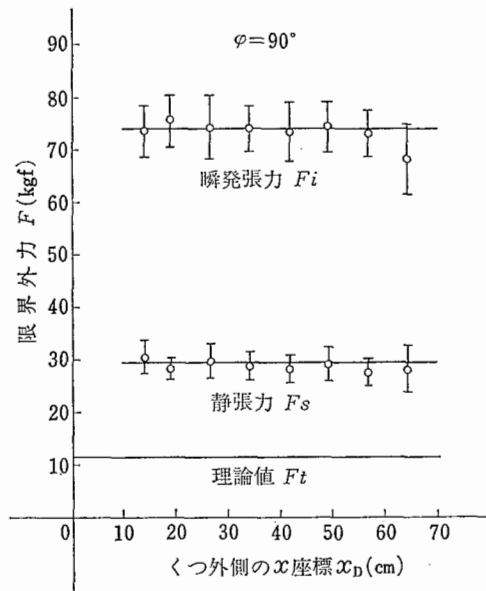


図6 限界外力（最大張力）と下肢の開きとの関係 ($\varphi=90^\circ$ のとき)

$$\frac{y_D - y_C}{x_D - x_C} = \tan \varphi \quad (9)$$

となる点から式(8)に従う。すなわち、 x_D に独立で一定値となる。式(9)が成り立つのは、水平面内($\theta=90^\circ$)で式(7)および(8)の与える限界外力が等しくなる点である。図6の前方の場合は、全領域で足の外側の座標 x_D に独立になる。

限界の水平外力の最大値は 30~40kgf 程度の大きさで、体重の約半分であった。条件が良ければ人間はもっと大きい外力に耐えられるであろうが、本実験もある程度自由に身体を動かせるという点で比較的良好条件であったと言える。

(2) 姿勢の影響

外力が突然とぎれるようなことがある場合には、あまり大きく身体を曲げたり、重心を移動したりすることはできない。柱上作業でも、前記の実験のように外力に対して重心を大きく移動させることはほとんどない*。

身体の変形が小さいときには実験値と理論値とはより近づくはずである。このことを調べたのが、図7、図8、図9の結果で、前項と同じく限界外力とくつ外側の x 座標 x_D との関係である。ただし被験者は未経験者中の A, B の2人であった。

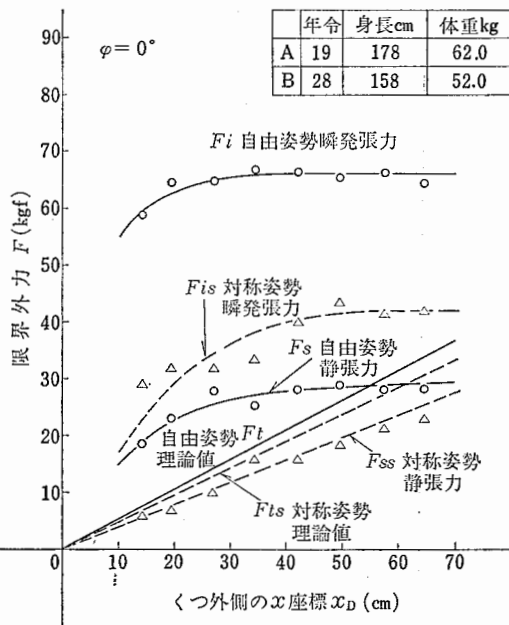


図7 姿勢による限界外力 $F(x_D)$ の変化

* 被験者に対するアンケート調査結果

図中の○印あるいは実線は前項と同じ自由な姿勢における最大張力、△印あるいは破線は下肢を左右対称に開いて伸ばし上体を鉛直にした姿勢を保持するよう

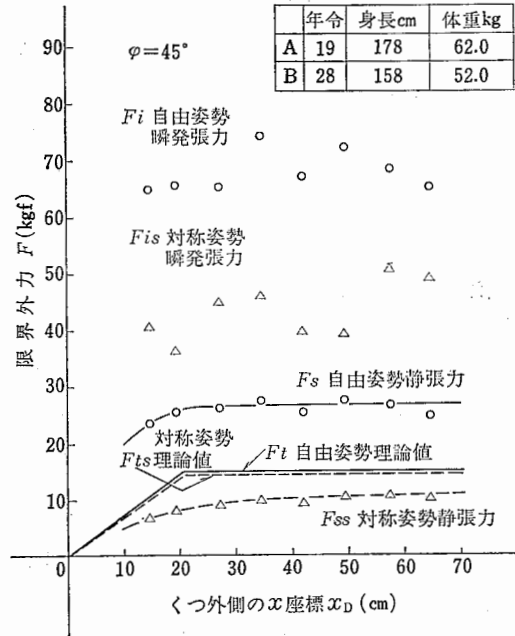


図8 姿勢による限界外力 $F(x_D)$ の変化 ($\varphi=45^\circ$ のとき)

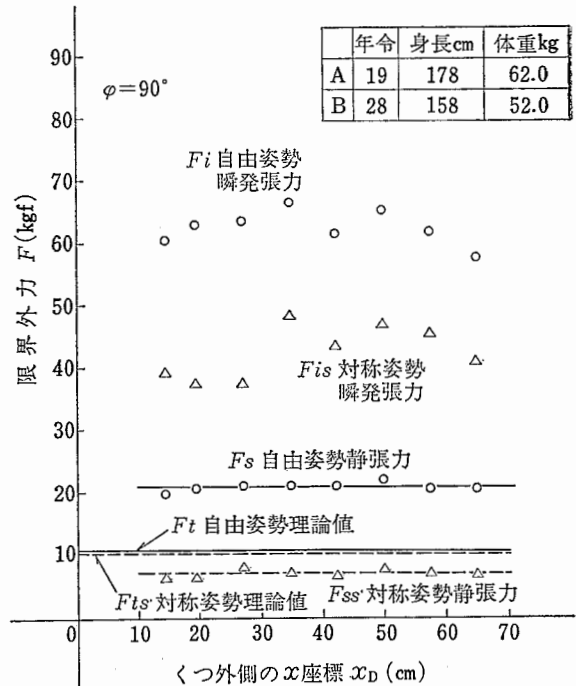


図9 姿勢による限界外力 $F(x_D)$ の変化 ($\varphi=90^\circ$ のとき)

に努めたときの最大張力である。また、図の番号順に $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合である。

まず自由な姿勢の限界外力（静張力） F_s は、大きさこそ小さいが、前項の実験結果(1)と全く同じ傾向を示している。

次に対称な姿勢の限界外力 F_{ss} は、いつもその理論値 F_{ts} 未満となっている。この理由としては、転倒を警戒して十分に張力を出せないこと、姿勢保持のために注意力と筋力とが奪われることなどが考えられる。 F_{ts} と F_{ss} との差は、 $\varphi=0^\circ$ のときには F_{ts} の約 $1/6$ であるが、 $\varphi=45^\circ, 90^\circ$ のときには約 $1/3$ と増加している。ここで $(y_D - y_C)$ はくつの長さの $3/4$ としたが³⁾、足指・足首の剛性が不十分なためにその長さ全部が有効ではないことを示している。

このような結果を見ると、第2章のような近似のもとでは足（くつ）の長さや向きなどを詳細に論じてもあまり有意義ではないように思われる。

しかし、限界外力 F_{ss} の x_D による変化のしかたは理論値 F_{ts} のそれによく一致している。 $(y_D - y_C)$ などの値を考慮すれば、差はさらに減少する。また柱上作業でも実際にはある程度の重心の移動が起こるので F_{ss} は増加し、 F_{ts} を超過するほどになる。したがって、剛体で対称な姿勢のときの理論値 F_{ts} は立位保持の限界外力の目安としてかなり役立つと思われる。

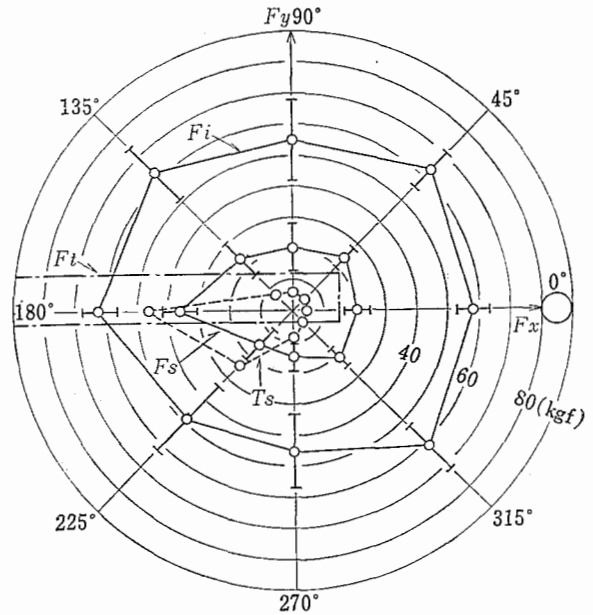
(3) 最大張力と測定ロープの方向（胴網装着時）

柱上作業では、仮足場の上に立ち胴網を装着した状態で作業する場合が少なからず起こる。このようなときのつりあい限界の外力は胴網（あるいは電柱）と反対方向でかなり大きくなる。本章の仮定のもとでは無限大になるが、実際には床の摩擦力、関節の堅さなどの限度によって制限される。

本項では、水平面内 ($\theta=90^\circ$) において測定ロープの方向 φ を変え、そのときの最大張力の変化を調べた。配電工10人に関する結果を図10, 11, 12, 13に示す。始めの3図はターンテーブル上に立った場合で、順番に胴網が 0° （右）、 45° （斜め前）、 90° （前）の方向に有るときである。左の方にあるときはほぼ対称な結果が得られた。 $x_D=27.5\text{cm}$ である。

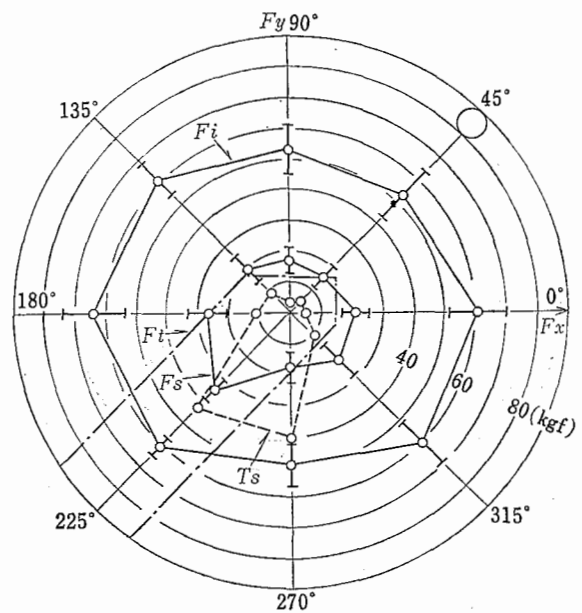
図では半径方向に同心円で限界外力が目盛られている。 T_s は静張力 F_s が得られたときの胴網の張力である。

静張力 F_s は、胴網と反対方向を除いて、理論値 F_t を超過していることが多い。これは前と同じく、測定



F_t 限界の理論値 T_s 胴網の静張力
 F_s 静張力 F_i 瞬発張力
 $\varphi_r=0^\circ$ のとき 1目盛 10kgf

図10 限界外力 F とその方角 φ との関係



F_t 限界の理論値 T_s 胴網の静張力
 F_s 静張力 F_i 瞬発張力
 $\varphi_r=45^\circ$ のとき 1目盛 10kgf

図11 限界外力 F とその方角 φ との関係

ロープを引っ張るときの姿勢を自由としたことによる。

胴網と反対方向の F_s は、おもに被験者の筋力の限界のようである。瞬発張力 F_i は身体の運動を利用

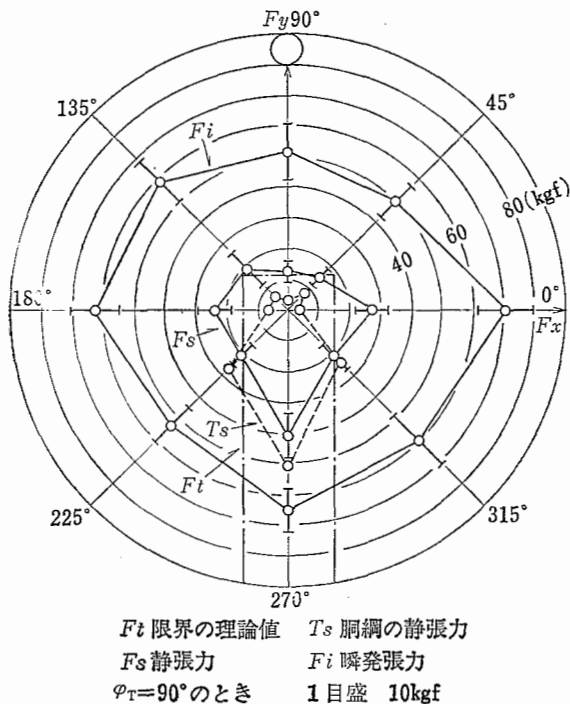


図 12 限界外力 F とその方角 φ との関係

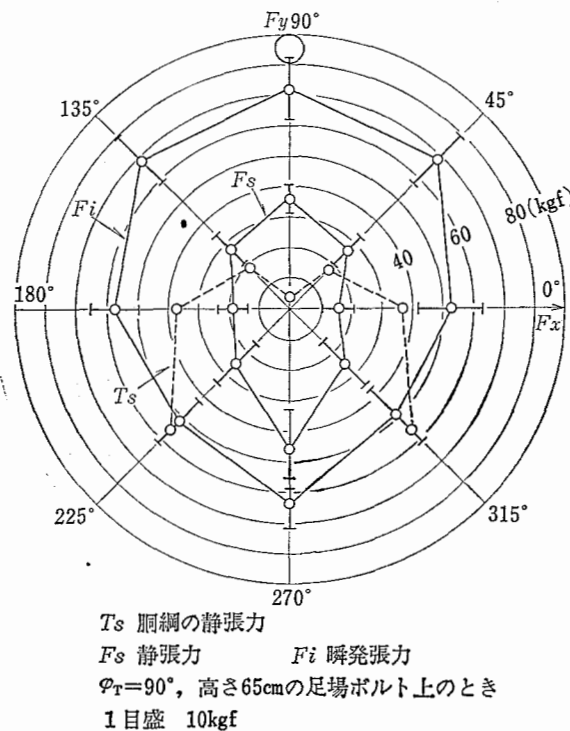


図 13 柱上での限界外力とその方角 φ

きるのでこれよりも大きい。

3図の F_s を比較しても、3つの場合は大差ないように見える。しかし当然ながら、図10、11の場合に比べて図12の場合がはるかに安定感がある。

図13は、電柱上の高さ 65cm の足場ボルトに登り下肢が電柱と $40^\circ \sim 45^\circ$ の角度をなすように胴綱の長さを設定したときの、最大張力とその方向 φ との関係である。図12に比べ、 F_s の領域が前後に長く伸びているのがわかる。

(4) 人間要因の影響

最大張力（各被験者の平均）と体重・背筋力その他の人間要因との関係をグラフに描くと、片足立ち時間との間に小さい相関が見られる。この相関が認められるのは片足立ち時間の変動係数が大きいからである。張力の大きさは配電工の方が未経験者よりも各条件において 5~10kgf 大きい。

表 1 に挙げた他の要因は平均の近くに集中しておりデータ数も少ないので、これらの測定データからははっきりした結論は得られない。また、表 1 の程度の要因を考える限り、作業者の身体条件よりも下肢を開いたりすることのできる外的条件の方が重要である。

4. 姿勢の安定

4.1 姿勢安定の尺度

本章でも身体は剛体と考える。剛体のつりあいは剛体の位置エネルギーが極小のとき安定と言われる。その安定の程度はつりあっている剛体を別な状態に移すために要するエネルギーの大きさで表わすことができる。

位置エネルギーは身体に働く重力と重心の高さとの積である。人間個々については重力は一定であるから、位置エネルギーは重心の高さに比例する。そして身体が別な状態に移る（倒れる）ために要するエネルギーは、そのとき重心の描く軌跡の頂上と初期位置との高さの差に比例する。したがって、この差は身体の安定を評価するための一尺度になると考えられる。

身体の運動に束縛が無いときには、比較的容易に安定度の比較を行なうことができる。すなわち、横方向に関しては両下肢を開くほど安定度が増加する。前後方向については足の長さに依存する。また重心の初期位置を低くすることはどちらにとっても有効である。この重心の高さ z_c の影響は前章の解析には現れなかったことである。

4.2 胴網で束縛された身体の安定度

柱上作業では原則として胴網を着用し、仮足場上でも胴網にいくぶん体重をかけて作業する。このときの身体の運動は胴網の束縛を受ける。

(1) 重心の高さの変化

まず、電柱を正面にして左右対称に下肢を開き、1本の胴網を張って立っている理想的配置について考慮する。この配置を身体の側面（右側）から見ると、図14のようになる。B, P を結ぶ線が初期安定位置における胴網で、P は電柱上の胴網固定点である。両足 (A_L と A_R) の中点Hから電柱中心までの距離 d 、左足 A_L と右足 A_R との距離を $2x_A$ 、真横から見たとき下肢が z 軸となす角を α と置く。

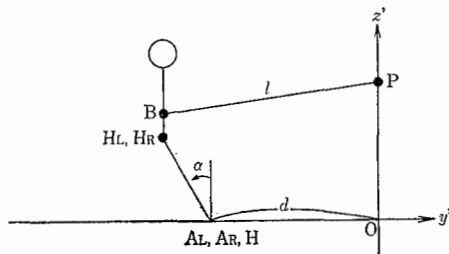


図14 身体の配置と d, α の定義

ここで、身体は剛体であること、さらに身体の重心は胴網装着点Bと同じ点であることを仮定する。また、身体が左側に倒れるときは左足 A_L が支点となり、右側に倒れるときは右足 A_R 、前（後）に倒れるときは A_L および A_R が支点になるとする。

まず、右足 A_R が支点となる場合を考えてみる。重心Bから右足 A_R 、電柱Pまでの距離をそれぞれ a, l とすると、重心Bは点 A_R を中心とする半径 a の球面上になければならない ($r_{BAR}=a$)。また重心Bは点Pを中心とする半径 l の球内になければならない ($r_{BP} \leq l$)。重心Bは上記2つの条件を満足する場所しか移動できないのである。

このような重心の位置と高さとの関係を等高線を使って表わすと図15のようになる。図で曲線 B_1 は中心 A_R 、半径 a の円の一部分、曲線 B_2 は中心 P、半径 l の球の一部であるが、 (x, y) 平面上では楕円の一部分になる。

Lは重心Bの初期位置である。身体が倒れるには、重心はポテンシャルの山脈を越えねばならない。山脈の内でも重心がもっとも越えやすい点（峠）は、図の点 M, N_L および N である。実際にもこの点を通

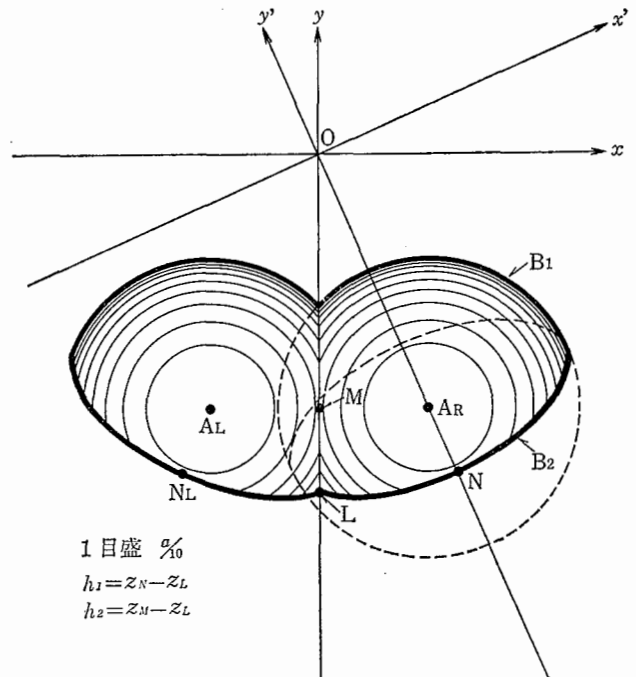


図15 重心の高さと峠 M および N

て転倒することが多い。したがって本稿ではこれらの峠と初期位置との高さの差、すなわち

$$h_1 = z_N - z_L^*, \quad h_2 = z_M - z_L$$

によって、身体の安定を比較することにする。

胴網が短かく両足間隔が大きいような場合には、N が右足 A_R よりも電柱0に近くなることがある。このときには上体を後ろにもどすような力が無いがぎり、Nを通して倒れることはできない。通常はMを通して転倒する。

(2) 身体の安定度と幾何学的パラメータ

身体の安定度 (h_1, h_2) と電柱から両足の midpoint H までの距離 d との関係を図16に示す。また、両足間隔の半分 x_A および下肢傾斜 α との関係をそれぞれ図17, 図18に示す。これらの安定度の絶対値は他のパラメータによって変化する。しかし傾向は同じで、表2のようにまとめられる。人体模型を使用した転倒実験でも同様の傾向が確かめられている。

表2によれば、 h_1 (横の安定度) の増加には両足の開き x_A が、 h_2 の増加には α が大きく寄与する。後者は胴網の存在によるものである。 h_2 は d には独立であるが、このときの h_2 は α の効果により胴網が無いときより大きい。点 A_R, M, A_L, N_L, L, N に囲まれる領域は安定な領域である。

*左右対称な場合を考えるので、 $z_N = z_{N_L}$ である。

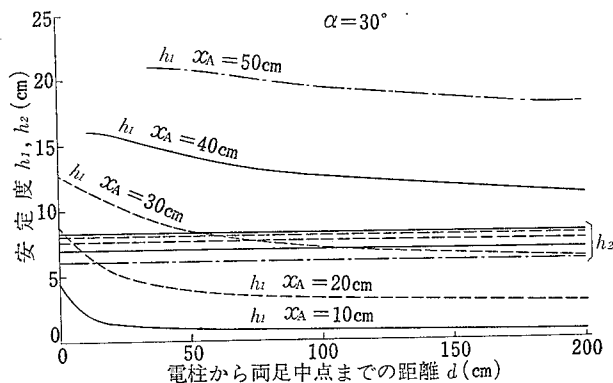


図 16 身体の安定度と電柱からの距離との関係

表 2 身体の安定度と幾何学的パラメータ

要因(増加)	安定度 横の安定度 h_1	前(電柱の)方 向の安定度 h_2
両足の横への 開き $2x_A$	増 加 (急)	減 少 (ゆるやか)
下肢と z 軸と の角度 α	増 加 (ゆるやか)	増 加 (急)
電柱からの距 離 d	減 少 (ややゆるやか)	独 立

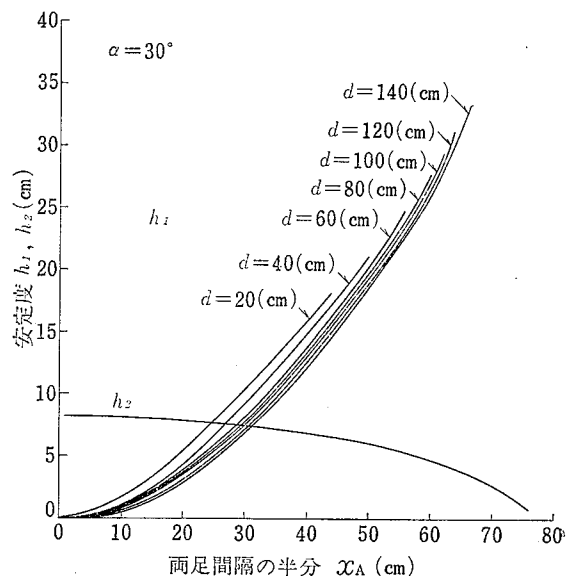


図 17 身体の安定度と下肢の開き (の半分) との関係

初めに重心と胴網装着点とが等しいと仮定したが、この仮定を検討のため人体模型を使って重心の大体の位置を測定した。下肢を最大 60° まで曲げ、上肢を上、前、下などに動かしたとき、重心 C の B からのずれは

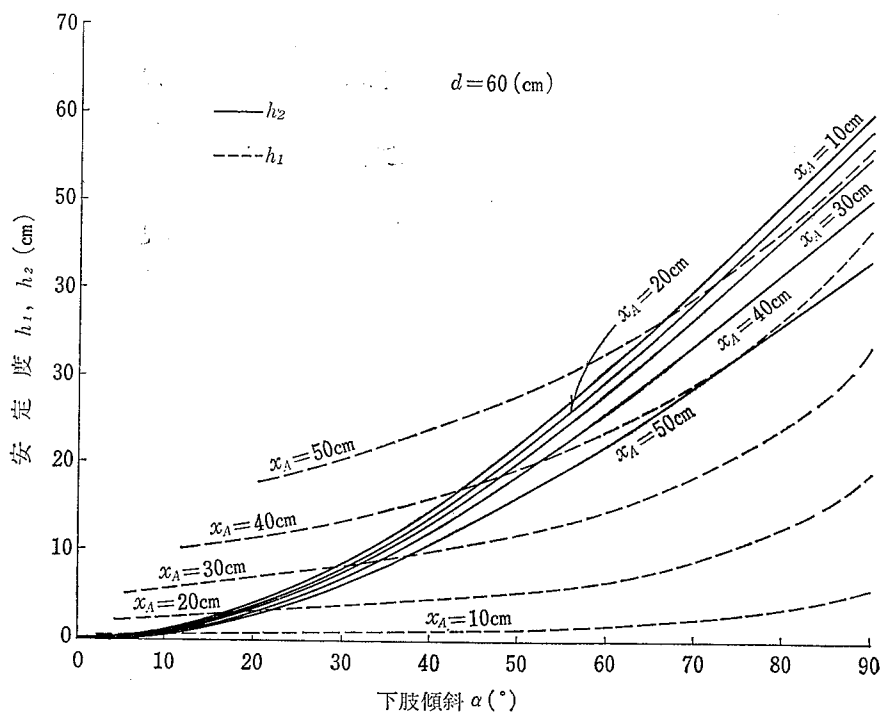


図 18 身体の安定度と下肢傾斜 α との関係

上下、前方向ともに最大約 10cm であった。このため
 厳密には B の高さや位置エネルギーは比例しない。し
 かし、 h_1 および h_2 が差(変化分)であること、実際
 には安全帯に工具がつくことなどを考えると、表 2 に
 示す結果は変わらないと思われる。また、ひざが曲が
 った姿勢のように少々姿勢が違って表 2 の結果に大差
 はないと推察される。

5. 足がすべる場合の摩擦係数

足がすべる場合とは、足のすべりによって身体の立
 位(静止)がくずれる場合である。すべりやすさは、
 くつと床との摩擦係数で表現される。

本章ではまず、実用されている作業ぐつと仮足場と
 の摩擦係数を実測によって調べた。次に、必要な摩擦
 係数の大きさについて解析的検討を行なった。

5.1 摩擦係数の測定

(1) 測定の方法

摩擦係数の測定は図 19 のようにして行なった。すな
 わち、仮足場の足場板を水平に固定し、その上に足型
 を入れた作業ぐつを乗せて荷重をかける。荷重(垂直
 外力)は、荷重ケージのボルト(10mmφ)で足型に
 加えられ、一定である。水平外力は、ロープを巻くと
 徐々に増加し、くつがすべったとき急激に減少する。
 ここでロープの巻き取りをやめると、その値は 0 には
 もどらずある値で一定する。この水平外力は、ひずみ
 ゲージ式張力計により変換・記録される。

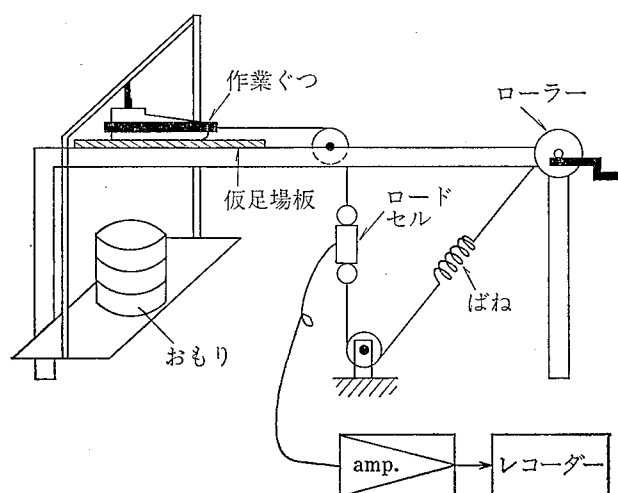


図 19 摩擦係数の測定

本測定では、くつがすべる直前の最大水平外力と垂
 直外力との比を静摩擦係数 μ とした。また、すべった
 後の一定値と垂直外力との比を動摩擦係数 μ' とした。
 単純には、水平外力がこれより大きければくつはすべ
 り続けたと考えられるからである。

くつのすべる向きはすべて前方とした。また摩擦係
 数は、各場合について 5 回実験しその平均を採用した。

(2) 結果——摩擦係数と足場板・くつの条件——

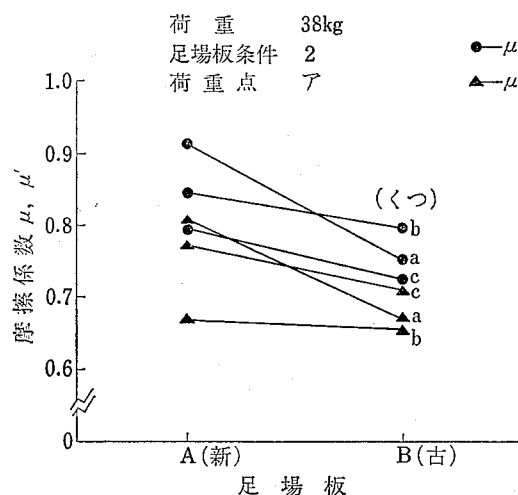


図 20 摩擦係数と足場板の摩耗

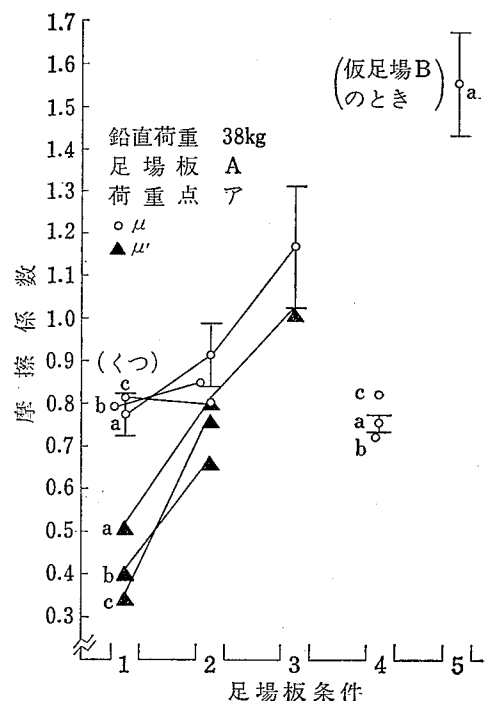


図 21 摩擦係数と足場板の条件

摩擦係数測定結果の1例を図20に示す。ただし、横軸は足場板の違いを表わし、足場板Aは新品、Bは摩耗品である。いずれも幅23cm、長さ70cmの木板で斜めに格子状の溝があり、すべり止めの木が3本間隔を置いてねじくぎで止められている。

Bはかなり摩耗しているが、格子状の溝は残っている。図20はすべり止め木をはずしたときの結果である。くつは、a, b, cの順番に新しい。垂直外力38kgfは、くつの前からその長さ1/4の中心線に加えられた場合である。

足場板が古くなると、 μ , μ' が減少していることがわかる。なお、新品のくつとなめらかで塗装された木板との組合せでは、 $\mu=0.45\sim0.5$ であった。

足場板表面の条件をいろいろに変えてやると、 μ , μ' は図21のように変化する。足場板は3を除いて新品Aである。1, 2, 3はすべり止め木をはずした状態で、まず1は表面に水をかけた場合、2は普通の乾燥状態、3は足場板にすべり止めシートをはり付けた場合である。すべり止めシート*は目のあらいサンドペーパーに似たものである。

4, 5はすべり止め木がついた通常の状態、その内4はくつのかかとをすべり止め木の上に乘せた場合である。このとき荷重点の0~3cmくらい前の点が1つ前のすべり止め木の上になる。5はくつのかかとをすべり止め木にひっかけた場合で、このときはくつのつま先から1cmくらい後の点が前のすべり止め木にひっかかる。

すべり止め木は幅2cm、厚さ1cmの角棒で15~16cmの間隔で止められている。また図で、くつa(新)の静摩擦係数については標準偏差も示した。

足場板がぬれているときには、静、動いずれの摩擦係数も減少しているが、特に動摩擦係数 μ' の減少が著しい。足場条件5のデータは古い足場板Bの場合のものである。新品Aの場合の摩擦係数は大きすぎて測定できなかったが、 $\mu>2$ であることが確認された。これはすべり止めの木とかかととがひっかかり合うためであるが、かかとが止め木にかからないときや止め木と平行方向にすべるときなどには、すべり止め木の効果は期待できない。

5の場合を除外すれば、現在使用されている仮足場(作業台)と作業くつとの静摩擦係数は0.6~1程度である。

* 倉本産業製

5.2 検 討

(1) 足に作用する反力

人間の足がすべらないかどうかは、足に作用する反力の水平成分 T と垂直成分 N との比(T/N)が静摩擦係数 μ より小さいかどうかで決められる。 T/N は姿勢、関節モーメント、外力などの関数である。

身体を、頭・首・胴体および上肢を含む上体と左右両下肢との3つの剛体セグメントが、股関節(H_L, H_R)で結合した剛体リンクモデルで考える。このときの各セグメントのつりあいの方程式は、

$$Q_L + Q_R + W_B + F = 0 \quad (11)$$

$$M_{HL} + M_{HR} + r_{HL} \times Q_L + r_{HR} \times Q_R + r_B \times W_B + r_E \times F = 0 \quad (12)$$

$$-Q_L + R_L + W_L = 0 \quad (13)$$

$$-M_{HL} - r_{HL} \times Q_L + r_{DL} \times R_L + r_{CL} \times W_L = 0 \quad (14)$$

$$-Q_R + R_R + W_R = 0 \quad (15)$$

$$-M_{HR} - r_{HR} \times Q_R + r_{DR} \times R_R + r_{CR} \times W_R = 0 \quad (16)$$

(11)と(12)が上体、(13)と(14)、および(15)と(16)がそれぞれ左下肢、右下肢に関するもので、外力 F は上体に作用するとしている。表記のしかたは第3章に準ずるが、 M は関節モーメント、 Q は股関節に作用する反力、また添字の B, HR, HL はそれぞれ上体、右股関節、左股関節を表わすものとする。

当然ながら式(11)~(16)から M_{HL}, M_{HR}, Q_L, Q_R を消去すると式(1), (2)が得られる。式(1), (2)の r_{DL}, r_{DR} も通常は未知数であるが、近似的に r_{AL}, r_{AR} に等しいと置いても実際上さしつかえないと考えられる。

$$\left. \begin{aligned} r_{DL} &\doteq r_{AL} = (-x_A, 0, 0) \\ r_{DR} &\doteq r_{AR} = (x_A, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

このとき式(1)と(2)から、足に作用する反力 R_L, R_R の各成分が次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} R_{Ly} &= -\frac{F_y}{2} + \frac{M_z}{2x_A} \\ R_{Ry} &= -\frac{F_y}{2} - \frac{M_z}{2x_A} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{Lz} &= \frac{W - F_z}{2} - \frac{M_y}{2x_A} \\ R_{Rz} &= \frac{W - F_z}{2} + \frac{M_y}{2x_A} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$R_{Lx} + R_{Rx} = -F_x \quad (20)$$

ただし, M_z は F による z 軸のまわりのモーメント, M_y は F および W による y 軸のまわりのモーメントで, 次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} M_z &= x_E F_y - y_E F_x \\ M_y &= z_E F_x - x_E F_z + x_C W \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

なお式 (17) の近似により, M_x はつりあうためには近似的に 0 でなければならない。

(2) 股関節は固定と見なせるとき

また右足については式 (15), (16) から次の関係が得られる。

$$\begin{aligned} z_{HR} R_{Rx} + (x_A - x_{HR}) R_{Rz} - (x_{CR} - x_{HR}) W_R \\ = -M_{HRy} \end{aligned} \quad (22)$$

左足についても式 (13), (14) から同様の結果が得られる。

式 (22) を見ると, R_{Rx} と M_{HRy} とは相互に依存していることがわかる。股関節モーメントの y 成分 M_{HRy} は, 実際は筋力に因るが, ここでは関節の摩擦に因る反力モーメントと考えることにする。すなわち, 左辺の力のモーメントが関節モーメントの限度未満のとき式 (22) が成立し (下肢のモーメントがつりあう), 限度以上になると運動が起こる。

関節モーメントの限度が無量大, あるいは十分に大きいとき, 身体は剛体と考えてよい。このようなとき R_{Lx} , R_{Rx} は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_{Lx} &= -F_x \left(\frac{R_{Lz}}{R_{Lz} + R_{Rz}} \right) = -\frac{F_x}{2} + \frac{F_x}{W - F_z} \cdot \frac{M_y}{2x_A} \\ R_{Rx} &= -F_x \left(\frac{R_{Rz}}{R_{Lz} + R_{Rz}} \right) = -\frac{F_x}{2} - \frac{F_x}{W - F_z} \cdot \frac{M_y}{2x_A} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

摩擦に関する法則から, 式 (20) の摩擦力 (水平反力) は垂直反力に比例して配分されるからである。

式 (19) および (24) を式 (22) に代入すれば, 関節モーメント M_{HRy} が次のように求められる。

$$\begin{aligned} M_{HRy} &= \left\{ \frac{F_x z_{HR}}{W - F_z} - (x_A - x_{HR}) \right\} \\ &\quad \cdot \left(\frac{W - F_z}{2} + \frac{M_y}{2x_A} \right) + (x_{CR} - x_{HR}) W_R \end{aligned} \quad (25)$$

足に作用する反力の水平成分 T および垂直成分 N は, たとえば右足についてはそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_R &= \sqrt{R_{Rx}^2 + R_{Ry}^2} \\ N_R &= R_{Rz} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

また外力・重力のモーメント M_y , M_z が 0 のときには, 左右の足を区別する必要がなく, 次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ N &= W - F_z \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

(3) 股関節が動くとき

股関節が動くときにも, 足がすべらないための条件 ($T/N < \mu$) は同じである。しかし, ここでは条件

$$|M_{HRy}| < \lambda \quad (28)$$

も考慮せねばならなくなる。λ は関節モーメントの限度である。

$R_R \neq 0$, $x_A > x_{HR}$ のときを考えることにすると, $-M_{HRy} > 0$ (右下肢が広がらないようにする方向) となる。 $-M_{HRy}$ は右下肢に作用するモーメントで, M_{HRy} は上体に作用するモーメントである。式 (22) に, $-M_{HRy} < \lambda$ を代入すると次のようになる。

$$z_{HR} R_{Rx} + (x_A - x_{HR}) R_{Rz} - (x_{CR} - x_{HR}) W_R < \lambda \quad (29)$$

ここで式 (29) が成立しなくなると右下肢 (および他のセグメント) は運動を起す。これが条件 (28) の第 1 の結果であるが, ここでは取扱わない。

式 (29) は極限においては,

$$z_{HR} R_{Rx} + (x_A - x_{HR}) R_{Rz} - (x_{CR} - x_{HR}) W_R = \lambda \quad (30)^*$$

式 (30) は, 次の 2 式の両辺をそれぞれ加えたものと解釈してもよい。

$$\begin{aligned} z_{HR} R_{Rx0} + (x_A - x_{HR}) R_{Rz0} - (x_{CR} - x_{HR}) W_R &= \lambda \\ z_{HR} (R_{Rx} - R_{Rx0}) + (x_A - x_{HR}) (R_{Rz} - R_{Rz0}) &= 0 \end{aligned}$$

ただし, R_{Rx0} は式 (24) によるものとする。 R_{Rz} はいつも式 (19) によって決まる。

式 (30) から R_{Rx} は,

$$R_{Rx} = -\frac{(x_A - x_{HR})}{z_{HR}} R_{Rz} + \frac{(x_{CR} - x_{HR})}{z_{HR}} W_R + \frac{\lambda}{z_{HR}} \quad (31)$$

ここでは式 (31) が式 (24) に代わるものとなる。また R_{Ry} は式 (18) で与えられる。これらの R_{Rx} , R_{Ry} , R_{Rz} を式 (26) に代入したとき, 足がすべらないための条件が満足されれば, 身体の静止は保持される。

(4) 左右対称, 剛体の身体をうしろに傾けた姿勢の場合 (図 22)。

胴網をつけて電柱の前に立った場合に相当する。 M_y , $M_z = 0$, また $F_x = 0$ であるから式 (27) により,

$$\frac{T}{N} = \frac{F_y}{W - F_z} = \frac{y_C}{-z_E - y_C \tan \alpha + y_E \tan \alpha} \quad (32)$$

ただし上式の右辺は, $F_z/F_y = \tan \alpha$ が与えられると仮定し, これと $M_x = y_E F_z - z_E F_y - y_C W = 0$ の関係と

* 前項では R_{Rx} は独立変数であったのに対し, ここでは従属変数となる。

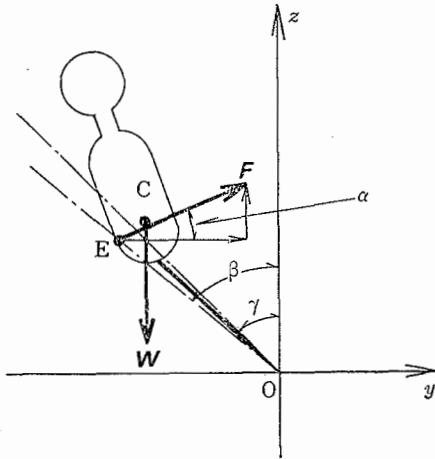


図 22 左右対称でうしろに傾いたとき

を使って, F_y, F_z を消去した結果である。さらに, $\tan \beta = y_E/z_E$, $\tan \gamma = y_C/z_E$ と置くと,

$$\frac{T}{N} = \frac{\tan \gamma}{-1 + \tan \alpha (\tan \beta - \tan \gamma)} \quad (33)$$

柱上作業においては, $\alpha = 0$ (胴綱水平) に近いことも多く, また $\beta \approx \gamma$ である。これらの仮定が満足されるとき, 足がすべらないための条件は,

$$\frac{T}{N} \approx -\tan \gamma < \mu \quad (34)$$

となる。 $|\gamma| = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ のとき T/N はそれぞれ 0.6, 1, 1.7 となる。

(5) 左右対称, 股関節モーメントの限度 $\lambda = 0$ で外力が鉛直下向きとき

両下肢をやや開いて重量物を持ち上げるような場合である。式 (19) と (31) とにより,

$$\frac{R_{Rx}}{R_{Rz}} = \frac{-(x_A - x_{HR})(W - F_z) + (x_{CR} - x_{HR}) \cdot 2W_R}{z_{HR}(W - F_z)} \quad (35)$$

ここで,

$$\begin{cases} (x_A - x_{HR}) = l \sin \theta \cos \varphi \\ -z_{HR} = l \cos \theta \\ (x_{CR} - x_{HR}) = l_C \sin \theta \cos \varphi \\ W = 60.6 \text{ kgf}, W_R = 0.172 W^{(4)(5)} \\ l_C/l = 0.407^{(5)(6)} \end{cases}$$

と仮定する。ただし l_C/l は下肢をまっすぐに伸ばしたときである。これらを (35) に代入して整理すると,

$$\frac{T}{N} = \frac{F_z + 52.1}{F_z + 60.6} \tan \theta < \mu \quad (36)$$

T/N は F_z と θ の関数であるが, T/N がたとえば 1 となるような F_z と θ の組を求めると表 3 のよ

表 3 T/N が 1 になる組合せ

$F_z(\text{kgf})$	θ	$F_z(\text{kgf})$	θ
0	49.3°	50	47.3°
10	48.6°	60	47.1°
20	48.2°	70	46.9°
30	47.8°	80	46.8°
40	47.5°	90	46.6°

うになる。 F_z の影響は下肢の傾斜 θ の影響に比べて小さいことがわかる。

2つの数値解から実際の場合にも T/N が 0.6~1 になることは十分に想定されるし, そのひん度も無視できないと思われる。しかし, 柱上作業の現場は平らな床ではなく, 電柱や足場ボルトなどがあって仮足場の摩擦係数の不足分を補っていると考えられる。しかしこれらを利用する余裕の無いときなどは問題となる。

6. む す び

本研究では身体のつりあいが保持される力学的条件について検討し, またつりあいの安定性についても論じた。

まず足がすべらない場合の, つりあいが成立する外力の限界について理論的, 実験的検討を行なった。外力の限界は, 左右方向では下肢の開きに大きく依存する。また前後左右を問わず, 外力と反対側に重心を移動することは外力に耐えるに有効である。

ほとんどの場合, 重心の移動なしとした理論値は実験値よりも小さい。小さめに評価しておく方が安全側になるので, この理論値は外力の限界の目安となる。

足がすべらない場合の理論では身体は剛体と仮定した。また足がすべる場合には関節をもつ剛体セグメントモデルを用いた。当初剛体モデルは単純すぎないかと心配されたが, 目的によっては (本稿の場合も) 容認できると思われる。むしろこの仮定のために見通しのよい結果が得られたと言えよう。

柱上作業用仮足場と作業ぐつとの摩擦係数を実測したところ 0.6~1 程度であった。理論的検討の結果から判断しても摩擦係数の要求値が 1 近くまで増大することは少なくないと思われる。

本研究については, 東京電力(株)および関東電気工事(株)に種々協力をいただいた。これらのかたがた, および被験者のかたがたに深く謝意を表する。

文 献

- 1) Priel, V. Z., A Numerical Definition of Posture, Human factors, 16, 6, 576~584(1974)
- 2) 山崎信寿, 計算機シミュレーションによる2足歩行の力学的解析, 人間工学, 11, 4, 105~110(1975)
- 3) 人間工学ハンドブック編集委員会編, 人間工学ハンドブック 第Ⅷ章, 金原出版(1962)
- 4) Woodson, W. E., Conover, D. W., Human Engineering Guide for Equipment Designers, University of California Press (1964)
- 5) 大島正光ほか, 航空自衛隊パイロットの身体計測, 航空医学実験隊報告, 2, 2, 71~114(1962)
- 6) 大島正光, 人間工学, コロナ社(1970)
(昭和52年2月18日受理)

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-76-8

昭和 52 年 5 月 15 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所
東京都港区芝5丁目35番1号
電話 (03) 453 - 8 4 4 1 番 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

郵便番号 108