

太陽光発電用架台の開発

Development of the Frame for Solar Power Generation

河原 一雄 (K. Kawahara)
(第一技術グループ)

概要

大きく3つに分けています。第1に、太陽電池モジュールの簡単な説明と一般的に採用されている架台構造および使用されている材料、防食方法についての説明。防食方法では5%亜鉛アルミ合金めっきについて少し触れてみました。第2に、架台の強度設計で、共通事項である材料許容応力の取り方、風圧荷重、積雪荷重、地震荷重の算出方法。第3に、架台の主要構成部材であるモジュール取付材、柱材、ステー、基礎梁について、簡単な荷重モデルと基礎的な手法を用いての部材に発生する荷重、曲げモーメント、応力の算出方法。アンカーについてはケミカルアンカーの引抜荷重算出方法を取り上げています。

1. まえがき

太陽からの光を太陽電池モジュール(以下モジュールという)により、直接電気エネルギーを得る装置の設置が、年々増加傾向にあります。環境汚染がないことから小規模のものは家庭用の数十ワットから、大規模なものでは数百kWに達するものまで様々なものがあります。モジュールの形状や大きさ、種類も色々なものを使用されています。モジュールの取付け形態も、自身が屋根材や壁材を兼ねた建材と一体となったもの、既設の屋根に支持金具で取付けたもの、架台に取付けたもの等があります。一方、装置の太陽受光部分は屋外で使用するので、風圧荷重や積雪荷重、地震荷重に耐える強度が要求されます。

本稿は太陽受光部分である架台をとりあげ、風圧荷重等の外力の求め方や、部材に発生する荷重に対する材料の選定方法等についての概要を述べます。

2. モジュール

太陽の光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する、シリコンで出来た10cm~15cm角の最小単位である太陽電池セルを数十枚、耐風、耐候性のある薄い長方形の容器に納め、直列に電氣的に接続し、所要の電圧を得るようにしたものです(図1参照)。通常、所要の発電量を得るために、多数のモジュールを縦横に連結します。連結したモジュールの集合体をアレイと呼んでいます。

3. 架台構造

架台は設置場所毎に設計するので、据付け場所により夫々形状が違っていますが、基本的には図1に示す様に、モジュールを固定するモジュール取付材、モジュール面が受ける荷重を支える柱材やステー、さらに全体を支える基礎梁で構成されています。架台上面は、太陽から多くの光エネルギーを得るため、モジュールを傾斜して取付けられるようになっていきます。一般的にこの傾斜角度は 10° ~ 30° の範囲です。また架台基礎と基礎梁を固定するためのアンカーボルト穴を、基礎梁に溶接したベース板や基礎梁自身にあけています。

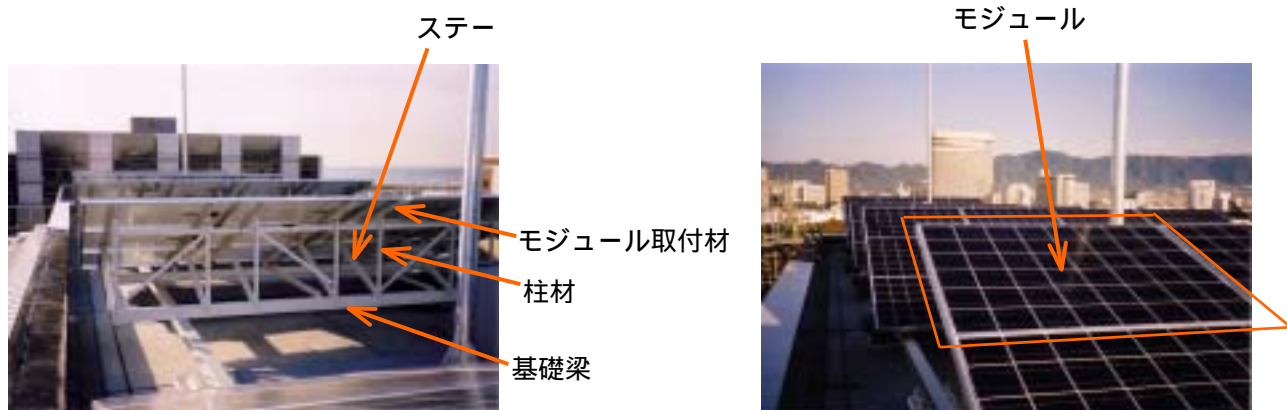


図1 モジュール設置状況

4. 架台材料

架台のフレーム材料は安価で耐強度，加工性，市販性，耐食性に優れているものが要求されますが、耐用年数を考え、一般的には JIS 規格の材質 SS400 で製造された熱間圧延鋼材が多用されています。また、鋼材種類としては JIS 規格品の次のようなものが使用されています。

モジュール取付材：軽量溝鋼，等辺山形鋼
 柱材：等辺山形鋼，H型鋼
 基礎梁：溝形鋼，H型鋼

5. 架台防食方法

架台の防食方法は、一般的には鋼材に溶融亜鉛めっきした、めっき付着量 500 g / m² のものが多く使用されています。塩害地域に設置する架台は、溶融亜鉛めっきした上にさらに塗装をして2重防食にしたり、あるいはステンレスを使用したりしています。ステンレスは耐食性に極めて優れ塩害にも強いのですが、材料費が高く加工性が悪いという欠点があります。塗装も防食性能は良いが、塗装面に傷がつかないように慎重に取扱う必要があります。最近、耐食性が溶融亜鉛めっきよりかなり良好な、亜鉛にアルミが5%程入った溶融亜鉛5%アルミ合金めっき浴に品物を浸漬してめっきする、いわゆる「どぶ漬けめっき」製品が塩害地域で使用されるようになってきました。このめっきをした製品の取扱性は、従来の溶融亜鉛めっきと同等です。塗料との密着性も溶融亜鉛めっきより良好です。このようなことから、塩害地域用架台材料の防食方法として有望であると思われる。

6. 架台材料の許容応力度

許容応力の種類は荷重状態により、常時加わっている荷重に対する長期許容応力と、短時間たまたに加わる荷重に対する短期許容応力の2種類があります。具体的数値で表される許容応力度の種類は、材料を破壊しようとする力学的形態により、引張許容応力度，圧縮許容応力度，曲げ許容応力度，せん断許容応力度，支圧許容応力度の5種類があり、応力の種類、使用材料の材質や厚さによって値がそれぞれ定められています。標準値としては、次の値が使用されています。

(1) 長期許容応力度

引張許容応力度 = 圧縮許容応力度 = 曲げ許容応力度 = 材料の降伏点または耐力値 ÷ 1.5
 せん断許容応力度 = 材料の降伏点または耐力値 ÷ (1.5 × 3)
 支圧許容応力度 = 材料の降伏点または耐力値 × 1.1

(2) 短期許容応力度

長期許容応力度の1.5倍。

7. 架台に加わる荷重

架台には、長期荷重の自重，短期荷重である風圧荷重または積雪荷重，あるいは地震荷重が自重にさらに加わります。短期荷重は算出方法が建築基準法で定められており次式で求めます。

(1) 風圧荷重

アレイ面に垂直に加わる風圧荷重 F_w は、速度圧 q に風力係数 C_w およびアレイ面積を乗じて求めます。

$$F_w = q \cdot C_w \cdot A_a \text{ (N)}$$

$$q = 0.6E \cdot V_0^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

ただし、 E : 建築基準法施行令 第 87 条に従って求める係数

V_0 : 建築基準法施行令 第 87 条により定められている設置場所の風速 (m/秒)

A_a : アレイ表面積 (m²)

$C_w = 0.79 \sim 1.06$: 順風の場合のアレイ傾斜角度 15° ~ 45° における風力係数

$C_w = 0.94 \sim 1.43$: 逆風の場合のアレイ傾斜角度 15° ~ 45° における風力係数

(2) 積雪荷重

積雪荷重 W_s は次式で求めます。

$$W_s = C_s \cdot P_s \cdot Z_s \cdot A_a \text{ (N)}$$

ただし、 C_s : アレイの勾配係数で 0 ~ 1.0 の間の値

P_s : 積雪量 1 cm 当たり、面積 1 m² 当たりの雪の平均単位質量で、20 N 以上
(ただし、多雪区域の場合は別途手法により求める)

Z_s : 地上垂直最深積雪量で設置場所により定められている値 (cm)

A_a : アレイ表面積 (m²)

(3) 地震荷重

地震荷重 F_j は次式で求めます。架台の設置場所が一般地域か、あるいは多雪地域かによって違ってきます。

$$F_j = G + K \text{ (一般地域)}$$

$$F_j = G + 0.35S + K \text{ (多雪地域)}$$

ただし、 G : 架台固定荷重 (モジュールも含む) (N)

S : 積雪荷重 (N)

K : 地震力によって生じる力で、架台固定荷重値と、建築基準法施行令 第 88 条第 1 項に規定する Z 値 (0.7 ~ 1.0 の値をとる) を乗じ、さらに 1.0 以上の数値を乗じて得た値 (N)

8. 架台材料の強度的選定

図 2 に示す一般的な架台の主要構成部材であるモジュール取付材，柱材，ステー，基礎梁に対する強度的要求に依る材料選定方法は次のとおりです。なお紙面の都合もあり、短期荷重としては、以降風圧荷重だけを扱います。

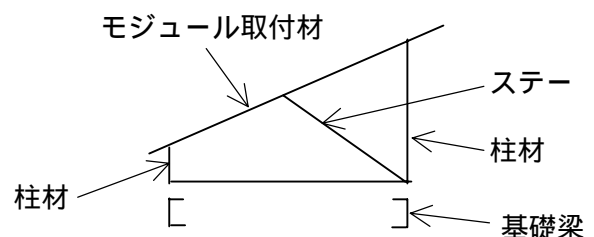


図 2 一般的な架台の構造

(1) モジュール取付材

常時荷重としては材料自身とモジュールの固定荷重、短期荷重としては風圧荷重が分布荷重 P_w として作用するものとします。この時、モジュール取付材に発生する曲げモーメントを次式で求めます。

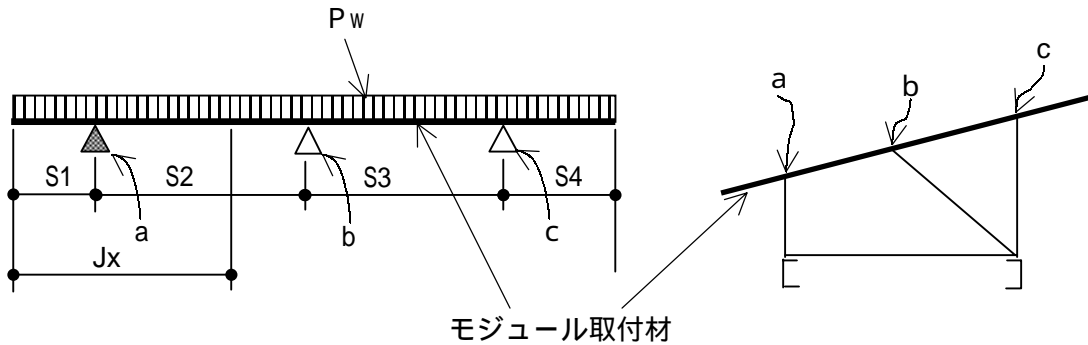


図3 モジュール取付材荷重モデル

モジュール取付材の左端から次の J_x 位置における曲げモーメント M_{sn} ($n = 1 \sim 4$) は、

- J_x S1 の場合

$$MS1 = - P_w \cdot J_x^2 / 2$$

- S1 J_x (S1 + S2) の場合

$$MS2 = MS21 + MS22 + MS23$$

ただし、 $MS21 = P_w \cdot (J_x - S1) \cdot (S2 - (J_x - S1)) / 2$: S2 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

$MS22 = - (P_w \cdot S1^2 / 2) \cdot (S2 - (J_x - S1)) / S2$: S1 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

$MS23 = - M_n \cdot (J_x - S1) / S2$: S3 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

$$M_n = P_w \cdot ((S1^2 \cdot S2 - S3 \cdot S4^2) + (S2^3 + S3^3) / 2) / (4 \cdot (S2 + S3))$$

- (S1 + S2) J_x (S1 + S2 + S3) の場合

$$MS3 = MS31 + MS32 + MS33$$

ただし、 $MS31 = P_w \cdot (J_x - S1 - S2) \cdot (S3 - (J_x - S1 - S2)) / 2$: S3 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

$MS32 = - M_n \cdot (S3 - (J_x - S1 - S2)) / S3$: S2 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

$$M_n = P_w \cdot ((S1^2 \cdot S2 - S3 \cdot S4^2) + (S2^3 + S3^3) / 2) / (4 \cdot (S2 + S3))$$

$MS33 = - (P_w \cdot S4^2 / (2 \cdot S3)) \cdot (J_x - S1 - S2)$: S4 間の分布荷重が及ぼす J_x 位置での曲げモーメント

- (S1 + S2 + S3) J_x の場合

$$MS4 = - P_w \cdot (S1 + S2 + S3 + S4 - J_x)^2 / 2$$

求まった計算結果群の例を図4に示します。

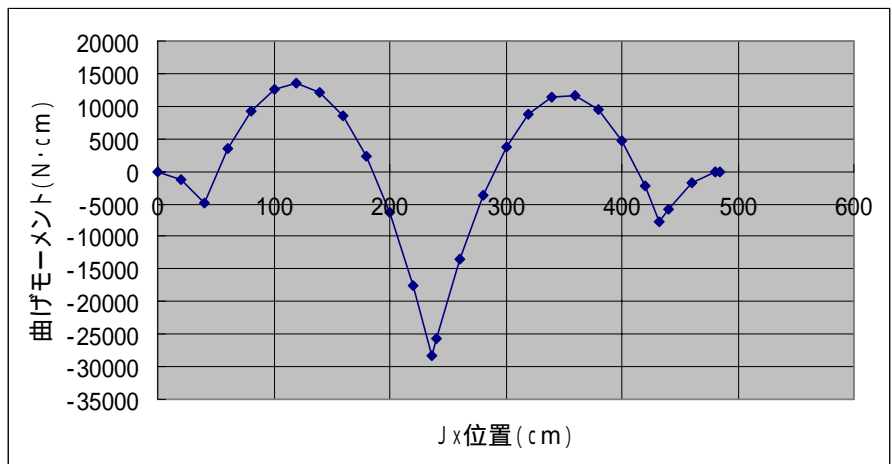


図4 曲げモーメントの表示例

図と計算結果群から曲げモーメントの最大値（絶対値）とその位置を求め、使用材料の最大曲げモーメントが発生している箇所の断面係数で除して曲げ応力度を求めます。求めた値が短期曲げ許容応力度以下になるような断面形状の材料を、モジュール取付材として選定します。

(2) 柱材およびステー

風圧荷重 F_w によって柱材下部に発生する反力 R_1, R_2 を図5の荷重ベクトル図から求め、さらにこの反力と柱材およびステーに加わっている固定荷重を合成し、柱材1本当たりに加わる荷重 F_{cL}, F_{cR} 、およびステーに加わる荷重 F_{st} を次式で求めます。なお柱材とステーの両端部はピン継手としています。

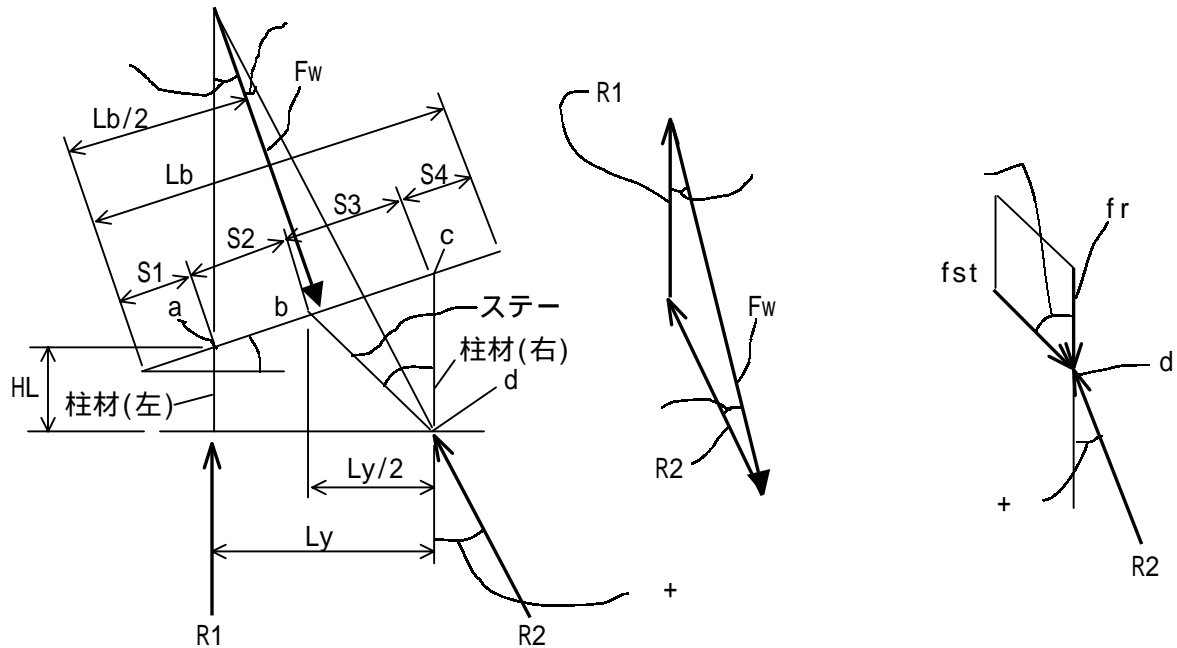


図5 風圧荷重と反力ベクトル図

柱材(左)に加わる荷重 F_{cL}

$$F_{cL} = (W_{cL} + R_1) / (2 \cdot J \text{列}) \text{ (N)}$$

ただし、 W_{cL} : 柱材(左)に加わる固定荷重 (N)

$$R_1 = F_w \cdot (\cos \theta - \sin \theta / \tan(\alpha + \theta)) \text{ (N)}$$

$$= \tan^{-1}(Ly / (Ly / (2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) + HL)) - \theta \text{ (度)}$$

F_w : 風圧荷重 (N)

J 列 : アレイの長手方向モジュール列数

柱材(右)に加わる荷重 F_{cR}

$$F_{cR} = (W_{cR} + f_r) / (2 \cdot J \text{列}) \text{ (N)}$$

W_{cR} : 柱材(右)に加わる固定荷重 (N)

$$f_r = F_w \cdot \sin \theta \cdot (1 / \tan(\alpha + \theta) - 1 / \tan \theta) : \text{風圧荷重のステー方向分力 (N)}$$

ステーに加わる荷重 F_{st}

$$F_{st} = f_{st} / (2 \cdot J \text{列}) \text{ (N)}$$

$$f_{st} = F_w \cdot \sin \theta / \sin \alpha : \text{風圧荷重の柱材(右)方向分力 (N)}$$

求めた各荷重を各部材断面積で除し、圧縮応力度を夫々求めます。次に各部材の許容圧縮応力度を次式で求めます。

$$\text{細長比} = Lk / i_v$$

ただし、 L_k : 座屈長さで、柱材、ステーのボルト穴中心間距離 (cm)
 i_v : 座屈軸についての使用材料の最小断面 2 次半径 (cm)

a . の場合の許容圧縮応力度 f_c

$$f_c = (1 - 0.4(\lambda / \lambda_c)^2) \cdot F / \gamma_m \quad (\text{N/cm}^2)$$

ただし、 $\lambda_c = 120$: SS400 の場合の定数

$F = 23,500 \text{N/cm}^2$: 基準許容応力度

$$\lambda_c = 3/\lambda + (2/3) \cdot (\lambda / \lambda_c)^2$$

b . $\lambda > \lambda_c$ の場合の許容圧縮応力度 f_c

$$f_c = 0.277 \cdot F / (\lambda / \lambda_c)^2 \quad (\text{N/cm}^2)$$

求まった部材毎の許容圧縮応力度 f_c と、先に得られた圧縮応力度を比較し、許容圧縮応力度以下になるような断面材料を柱材やステーとして選定します。

(3) 基礎梁

1 スパンの間に柱材とステーが多数あるので、基礎梁が受けるこれら部材からの荷重を分布荷重と見なし、基礎梁に発生する最大曲げモーメント M_b と分布荷重 B_w を次式で求めます。

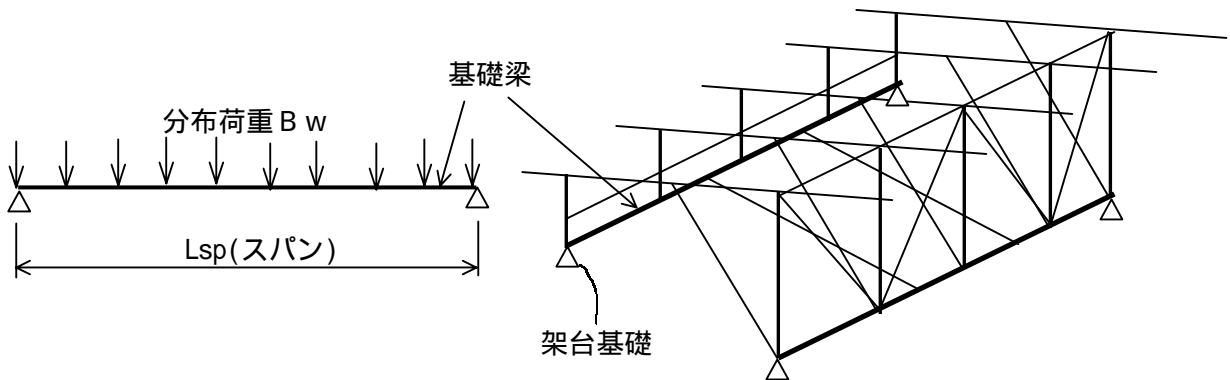


図6 基礎梁荷重モデル

$$M_b = B_w \cdot L_{sp}^2 / 8$$

ただし、 $B_w = F_{cL} \cdot N / L_{sp}$ または $B_w = F_{cR} \cdot N / L_{sp}$

F_{cL} : 柱材(左) 1 本に加わる荷重

F_{cR} : 柱材(右) 1 本に加わる荷重とステーの柱材方向荷重

N : 1 スパン間の柱材本数

得られた値を基礎梁の断面係数で除し、最大曲げ応力度を求めます。この値が曲げ許容応力度以下になるような断面形状の材料を基礎梁として選定します。

9 . アンカーの引抜強度

アンカーの種類も多種ですが、架台用の後打アンカーとしてはケミカルアンカー(以下アンカーという)を使用しています。当該アンカーの引抜荷重は次のように求めます。

アンカー 1 本当たりの引抜荷重を次の(a), (b), (c)で算出し、最も小さい値を求めます。

$$Pa1 = 1 \cdot 100 (F_c/2100) \cdot A_c \quad : \text{コンクリートの円錐状破壊耐許容荷重 (N)} \dots (a)$$

$$Pa2 = 2 \cdot \gamma \cdot A_e \quad : \text{アンカーボルト材料の降伏荷重 (N)} \dots (b)$$

$$Pa3 = 3 \cdot a \cdot D \cdot L_e \quad : \text{樹脂のコンクリートに対する付着許容荷重 (N)} \dots (c)$$

1, 2, 3 は低減係数で、次表の値を取ります。

荷重種類	1	2	3
長期	0.4	2/3	0.4
短期	0.6	1.0	0.6

また、(a), (b), (c)式中の値は次のとおりです。

$F_c = 1,764$: コンクリート設計基準強度 (N/cm²)

D = アンカーボルト径 (cm)

A_e = アンカーボルトのねじ部有効断面積 (cm²)

LD = 穿孔深さ (cm)

L_e = 有効埋込深さ ($L_e = LD - D$) (cm)

y = アンカーボルト材料の降伏点 (N/cm²)

A_c = コンクリート破壊円錐の有効水平投影面積 (cm²) (図7の斜線を施した面積)

$a = 1,000 \cdot (F_c / 2,100)$: 樹脂とコンクリートとの許容付着応力度 (N/cm²)

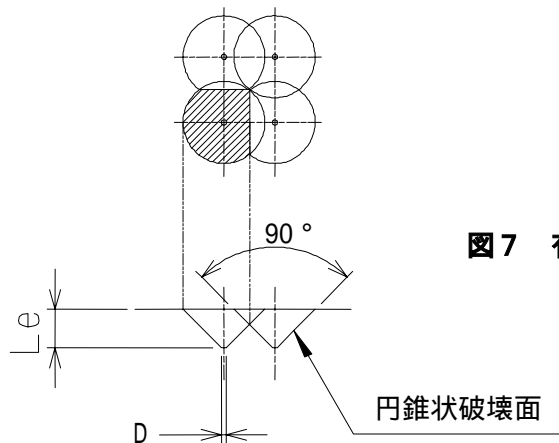


図7 有効水平投影面積

係数 1~ 3 に所要の値を用い、得られた最小荷重値より、外力によって発生するアンカーボルトの引抜荷重値の方が小さくなるように、アンカーボルトのサイズと穿孔深さを決定します。

10 . あとがき

本稿は内容的に材料力学的知識が多少必要であり、説明不足の箇所も多々あるかとは思いますが、架台をはじめて設計する人や、太陽光発電架台とはどんなものかを知りたい人の一助になれば幸いです。今後は軽量化材料等の検討を進めてまいりたいと思います。