

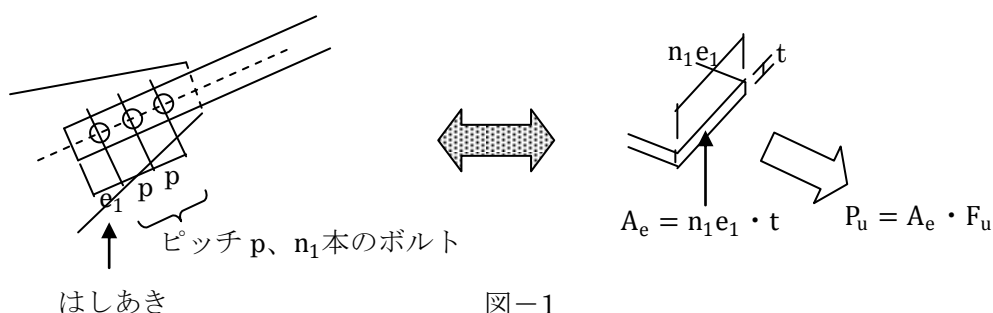
「既存鉄骨造体育館等の耐震改修の手引と事例」や文部科学省の「屋内運動場の耐震性能診断基準」などにおいては、ブレースなどにおける端抜け強度の算定式として

$$P_u = n_1 \cdot e_1 \cdot t \cdot F_u \cdot \dots \cdot (1)$$

n_1 : 応力方向にならぶボルト本数、 e_1 : 端空き長さ、 t : 板厚、 F_u : 最大耐力用基準強度

が示されています。これについては大きな問題があります。本式は、ブレース端部の接合ボルトが応力方向に一直列にならぶもっとも簡明な場合だけに限られることです。ブレース母材が溝形鋼や H 型鋼となり、応力方向にならぶ接合ボルトが 2 列以上になる場合には適用できません。こうした場合には「鋼構造限界状態設計規準」、「鋼構造接合部設計指針」等を参考にしなければなりません。これがまた大問題、「ちぎれ破断」という概念のもとに、その一形態として「端抜け破断」が定義され、全く異なった式表現のもとに統括的に取り扱われます。同じ力学的現象を記述しているはずなのに、なぜこれほど異なるのかとあきれほどで、おそらく一見しただけでは、とても統一的な観点を得ることはできないと思われまふ。いずれこれも扱いますが、まず、上式の意味するところから始めていきましょう。

この式は、大変面白い構成になっています。すなわち、 $P_u = \{(n_1 e_1) \cdot t\} \cdot F_u = A_e \cdot F_u$ と書き換えると、 $n_1 e_1$ は幅、 t は厚さ、 F_u は引っ張り強度ですから、 $A_e = n_1 e_1 \cdot t$ という断面の引っ張り耐力式になっていることです。



これはたまたまこのように読めるということであって、破壊の性状を反映したものではありません。「端抜け破断」あるいは「ちぎれ破断」は、図-2 に示すように引っ張り力を受ける最前面のボルトから、材端部までがスポンとちぎれるがごとく抜け落ちる破壊を意味します。この破壊は、明らかにボルトの左右両側面を結ぶ破断線に沿うせん断力による

破壊であって、これに抵抗する断面は、「最前面のボルト中心から端部までの長さ」から「列をなすボルトによる欠損面積」を差し引いたものとなります。（鋼構造限界状態設計規準、鋼構造接合部設計指針、あるいは建築鋼構造の理論と設計（井上一朗・京都大学学術出版会）などでは、もうすこし精密に取り扱っていますが、大局的にはこれで十分です）。抵抗面は、ボルトの左右側面の2面、すなわちボルトの2面せん断と似た状況となり、また、せん断破壊ですから引っ張り強度 F_u ではなく、せん断強度の $F_u/\sqrt{3}$ に支配され、これより次式であらわされる強度が、それが端抜け耐力、あるいはちぎれ破断耐力となります。

$$P_u = 2 \times \{(n_1 - 1)p + e_1 - (n_1 - 0.5)d\} \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3} \cdot (2)$$

ただし、 n_1 : 1列にならぶボルト数、 p : ボルトピッチ、 d : ボルト孔径、 t : 板厚

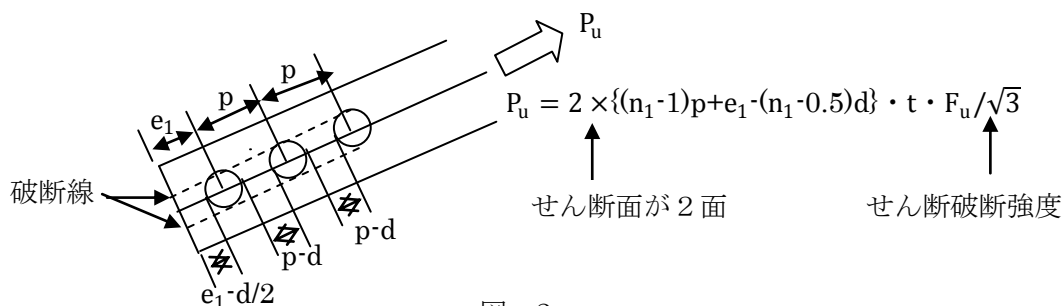


図-2

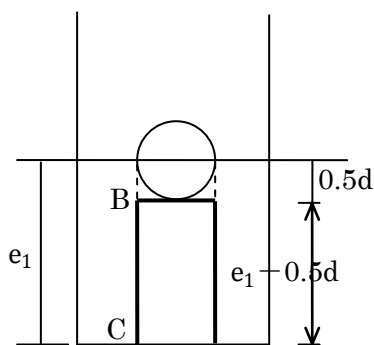
これがどのようにして $P_u = n \cdot e \cdot t \cdot F_u$ に変換されるのでしょうか。これは次のような単純化を経てのことです。まず、ボルトのピッチの最小値としては、ボルト軸径 d の 2.5 倍、端明きも同じくボルト軸径を基準として最小値 $2d$ とするのが常識となっています（ちなみに標準ピッチは、最小ピッチの 1.4-1.6 倍、最大ピッチは $4d$ 、端明きは設計者によってさまざまですが、ボルト径の如何にかかわらず 4-5cm の一定値とする例が多いようです。また、設計者が指示したとしても、鉄骨加工業者がこれに従うとは限りません、独自の標準寸法を定めている場合もあり、単純ではありませんが、最小ピッチ、最小端明きだけはさすがに承知しており心配はないようです。耐震診断など既存建物を取り扱う場合には、やはり実地調査を行い、どのようなおさまり寸法体系に従っているかを推察すべきでしょう）。この最小寸法に従うと $p=2.5d$, $e_1=2d$ ですから、 $d = 0.5e_1$ $p = 1.25e_1$ となり、これを代入すると、以下のようになります。

$$\begin{aligned} P_u &= 2 \times \{(n_1 - 1)1.25e_1 + e_1 - (n_1 - 0.5)0.5e_1\} \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3} \\ &= 2 \times \{1.25n_1e_1 - 1.25e_1 + e_1 - 0.5n_1e_1 + 0.25e_1\} \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3} \\ &= 2 \times 0.75n_1e_1 \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3} = 1.5/\sqrt{3}n_1e_1 \cdot t \cdot F_u \\ &= 0.866 n_1e_1 \cdot t \cdot F_u \end{aligned}$$

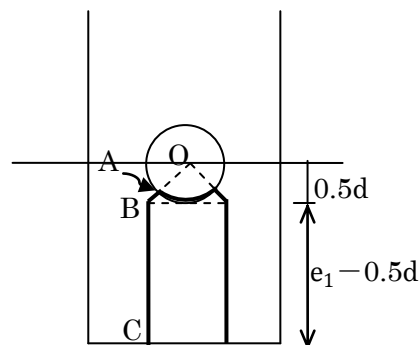
上式における 0.866 を 1 とすれば、 $P_u = n_1 \cdot e_1 \cdot t \cdot F_u$ となり、これが耐震診断関係にもっぱら使われているのです。

ところで、 $0.866 \Rightarrow 1.0$ という切り上げには、違和感を感じる方も多いでしょう。普通なら安全側ということで、 $0.866 \Rightarrow 0.85$ とするならわかるとか、あるいは、ボルト本数 $n=1$ の場合には、 $P_u = (e_1 - 0.5d)tF_u$ のところ、 $P_u = e_1 t F_u$ と過大評価しているようにみえるが、これでよいのかなどです。実はこれでよいのです。というのは、端抜けあるいはちぎれ破壊を起こす状況になると、ひずみが大きくなるため、ポアソン効果により板厚が減少、これによって高力ボルトに導入されていた軸力も減少、したがって摩擦により伝達される分が減少することになります。導入軸力が完全にゼロとなることはありません。すなわち、板のせん断強度のほかに、残存軸力によるせん断耐力が残っているので心配はないのです。（高力ボルトの最大せん断耐力は、摩擦（すべり）係数を 0.6 として評価されていますが、端抜け（ちぎれ）破断時には 0.45–0.5 程度に落ちるにしても、これに伴うせん断耐力が残されているとの実験結果があります）。

以上のように、(1) 式の $P_u = n_1 \cdot e_1 \cdot t \cdot F_u$ は、ボルトピッチが最小であることを前提とした略算式ですから、端抜け耐力を過小評価しているきらいがあります。現在の設計思想の大きな流れは、建物の持っている保有耐力を正しく評価することにありますから、「鋼構造接合部設計指針」ではさすがに (1) 式は採用されていません。では、(2) 式によるのかというと、これも違います。破壊性状を実験により確認すると、図-3 に示すように (2) 式において想定した破断線長さ l_{BC} に、斜めの破断線 l_{AB} が存在します。



(2)式における破断線



$$l_{AB} = l_{OB} - l_{OA} = \frac{\sqrt{2}}{2}d - \frac{d}{2} = \frac{\sqrt{2}-1}{2}d$$

実際の破断線— l_{AB} の部分が存在する

図-3

端抜け強度に対し、この斜めの破断線 l_{AB} の部分がどのように寄与するかは、簡単ではあ

りません。平面応力場における降伏条件、塑性理論、仮想仕事の原理などやや高級な知識を必要とし、これを論ずることは当面の課題からかなり外れることになるので、結果だけを示すと斜めの破断線 l_{AB} を考慮した場合の耐力式は次のようになります。

$$P_u = 2(e_1 - (\sqrt{2} - 1)/2 d) \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3}$$

(2)式による場合は

$$P_u = 2(e_1 - 1/2 d) \cdot t \cdot F_u / \sqrt{3}$$

であったことと比較すると、ボルト穴径の欠損による差引分が $0.5d$ であったものが、

$\frac{\sqrt{2}-1}{2} d = 0.207d$ と半分以下の 41%に低下し、その分強度が上昇、実情に近づくわけです。

上式は応力方向に並ぶボルトが 1 本の場合ですが、 n 本の場合は簡単に次のように拡張されます。

$$P_u = 2[(n_1 - 1)\{p - (\sqrt{2} - 1)d\} + (e_1 - (\sqrt{2} - 1)/2 d)] \cdot t \cdot \frac{F_u}{\sqrt{3}} \cdot \cdot (3)$$

これが「建築鋼構造の理論と設計」(井上一朗著・京都大学学術出版会 1900 円)に示されている式で、これが「鋼構造接合部設計指針」における算定式の基本となっています。

では、「鋼構造接合部設計指針」における算定式はどうなっているのでしょうか。(3)式は次のように書き換えられます。

$$P_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[(n_1 - 1)\{p - (\sqrt{2} - 1)d\} + \left(e_1 - \frac{\sqrt{2} - 1}{2} d \right) \right] \cdot t \cdot F_u$$

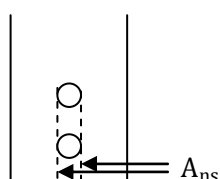
$$= 1.1547 \left[\underbrace{(n_1 - 1)p + e_1}_{\text{ボルト穴欠損を無視したときの破断線長さ}} - \underbrace{\{(n_1 - 1)(\sqrt{2} - 1) + \frac{\sqrt{2} - 1}{2}\}d}_{\text{ボルト穴欠損による差引分}} \right] \cdot t \cdot F_u \cdot \cdot (3')$$

この式は、次のように読み取ることができます。すなわち、有効破断線長さは、ボルト穴による欠損分を差し引くことによって決定されるが、差し引き分が大きすぎるので、1.1547 倍して補っているのだと。もし、ボルト穴による欠損分を差し引くことをやめる代わりに 1.1547 倍することもやめるとすれば、次の (4) 式のように極めて簡略に表わされることになります。

$$P_u = [(n_1 - 1)p + e_1] \cdot t \cdot F_u \cdot \cdot \cdot (4)$$

さいわいなことに、これでうまくいくのであって、「鋼構造接合部設計指針」の解説に示さ

れているように、端明きを $2d$ の一定、ピッチを $2.5d \sim 4d$ まで変化させたとき、(3') 式と (4) 式との差はわずかに 3% 以内に収まるのです。かくして (4) 式が「鋼構造接合部設計指針」における端明き破断耐力式となります。とはいっても (4) 式の形ではありません。なぜなら (4) 式の形では、どう見ても引っ張り破壊時の算定式にしか見えないからです。あくまで破壊形式としてはせん断破壊ですから、「鋼構造接合部設計指針」においてはこのことを明確にする意味で、次のような表現がなされています。(4) 式と(5)式とはまったく同一であることは明らかでしょう。



The diagram shows a vertical section of a steel plate with two bolts. A horizontal arrow labeled A_{ns} points to the left, representing shear force. A dashed vertical line indicates the shear plane passing through the bolts.

$$P_{u3} = 0.5A_{ns}F_u \quad \dots (5)$$

$$A_{ns} = 2\{(n_1 - 1)p + e\}t$$

しかしながら、断面積記号として A_{ns} を用いていることから、せん断有効断面積（添え字の s は **shear**（せん断）の意味）であることがわかりますし、 A_{ns} の算定式をみると 2 という数字が入っていますが、これは破断面がボルトの両側の 2 面にあることを意味し、さらに係数 0.5 は、本来せん断破壊式なので

$$P_{u3} = \frac{A_{ns}F_u}{\sqrt{3}} = 0.577A_{ns}F_u$$

となるところを $P_{u3} = 0.5A_{ns}F_u$ と丸めていることなど、力学的意味が極めて明瞭に見通すことができるようにされています。

以上のところで、屋体診断基準に提示されている端抜け強度式の不思議さーボルトピッチに無関係で、端明き e_1 を n_1 倍した値によって耐力が決定されるという不思議さというより奇妙さーが理解されたかと思えます。耐震診断の基本的課題は、保有している耐力を可能な限り正確に評価することにあるのですから、屋体診断基準式に従うことなく、「鋼構造接合部設計指針」式に従うべきと考えます。なお、屋体診断基準の (1) 式に従った場合と、「鋼構造接合部設計指針」の (5) 式に従った場合の比較例を端明き $e_1 = 2d$ の一定値としたときの比較例を示しておきます。

。

端明き $e_1 = 2d$ 、ピッチ $2.5d$

ボルト本数	$n_1=1$	$n_1=2$	$n_1=3$	$n_1=4$
(1)式	$2dt$	$4dt$	$6dt$	$8dt$
(5)式	$2dt$	$4.5dt$	$7dt$	$9.5dt$
(1)/(5)	1	0.89	0.86	0.84

端明き $e_1=2d$ 、ピッチ $3d$

ボルト本数	$n_1=1$	$n_1=2$	$n_1=3$	$n_1=4$
(1)式	$2dt$	$4dt$	$6dt$	$8dt$
(5)式	$2dt$	$5dt$	$8dt$	$11dt$
(1)/(5)	1	0.80	0.75	0.73

既存建物のブレースにおいては、ボルト本数 2 本というのが圧倒的に多数を占めますから、これを基準としてみると、屋体診断基準式 (1) 式による耐力は、実情より 10~20% 低く見積もっていることがわかります。

応力方向に並ぶボルトが 2 列となった場合を考えましょう。単純に考えますと、前記でボルト 1 列あたりの耐力が定められるから、その 2 倍とすればよいのではないかと思いがちですが、そうはいきません。ボルト列間の距離を「ゲージ」(記号 g)、最外縁のボルト列中心から材側面までの距離を「へり明き」(記号 e_2)とありますが、これらの関係によって破壊性状が異なってくるからです。すなわち、ゲージ、へりあきのいずれもが十分に確保されているのであれば、図-4 (a) のように、各ボルト列に沿う端抜けに、ゲージ、すなわち、ボルト列間の距離が狭まれば、図-4 (b) のように、ボルト群が囲む領域全体の抜け落ちに、へりあきが小さすぎれば、図-4 (c) のように外側の板が抜け落ちる形式へと変化してくるはずで、このように応力方向についてのボルト列数が複数になると、1 列ボルトの場合のような単純なことにはなりません。そこで、「鋼構造接合部設計指針」では、こうした抜け落ち破壊を総称して「ちぎれ破壊」といい、図-4 (a) を「端抜け破断」、(b) を「中抜け破断」、(c) を「外抜け破断」と区別しています。

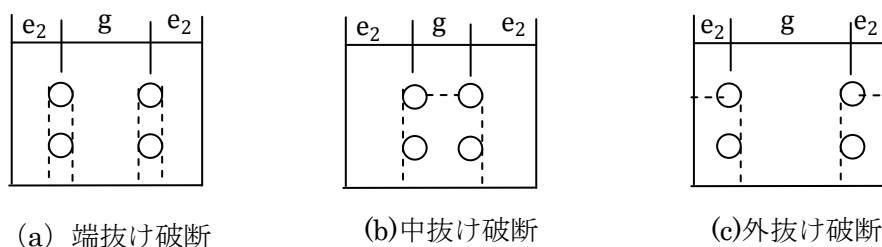


図-4 ちぎれ破断

「ちぎれ破断強度」、あるいは「ちぎれ耐力」は、当然のことながらこれら 3 種類の破断モードに対応する強度のうちの最小値として決定されるわけで、それぞれの強度は、図-4 のモード図から簡単に算定することができます。すなわち、(a) の端抜け破断強度は、4 本のせん断破断線に対応するせん断強度として、(b) の中抜け破断強度は、2 本のせん断破断線に対応するせん断強度と、ボルト列間の引っ張り破断線に対応する引っ張り強度の和とし

て、(c) は (b) と基本的に同じで、引っ張り強度がへりあき部分についてのそれに代わるだけです。したがって、引っ張り破壊線に対応する断面積を A_{nt} 、せん断破壊線に対応するそれを A_{ns} とすれば、それぞれの強度は、 $A_{nt}F_u$ 、 $\frac{A_{ns}F_u}{\sqrt{3}} = 0.577A_{ns}F_u \rightarrow 0.5A_{ns}F_u$ ですから、それらの和として (6) 式のように統一的に表現することができます。これが鋼構造接合部設計指針に採用されている表現式です。

$$P_{u3} = (A_{nt} + 0.5A_{ns})F_u \cdots (6)$$

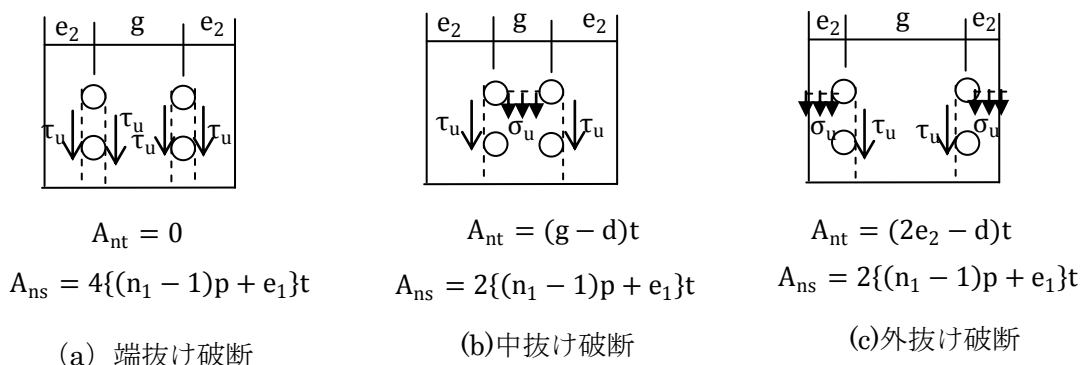
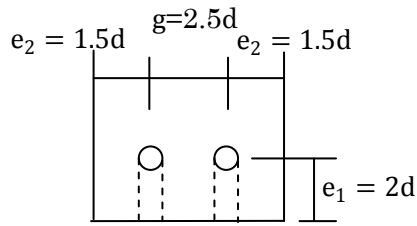


図-5 ちぎれ破断耐力算定式 (鋼構造接合部設計指針)

(6) 式はまた次のように書き換えることができます。

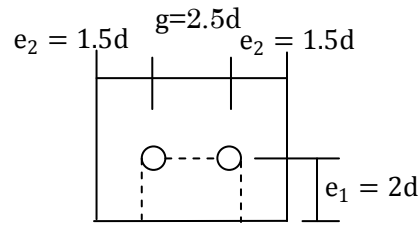
$$P_{u3} = (A_{nt} + A_{nte})F_u \quad A_{nte} = 0.5A_{ns}$$

これより、せん断破壊面の断面積 A_{ns} は、その 1/2 の引っ張り破壊面の断面積として換算できるということがわかります。板厚 t が共通であれば、断面積の違いは、断面の幅、すなわち破断線長さの違いに帰着されますから、せん断破壊線の長さ l_s は、その 1/2 の引っ張り破壊線長さに、あるいは、引っ張り破壊線長さ l_t は、その 2 倍のせん断破壊線長さに換算してよいということになります。ちぎれ破断耐力がどの破壊形式によって決定されるかは、この簡単な換算関係からみていけばよいわけで、その算定例が図-6) で、ちぎれ破断強度の最小値は、中抜け破断によって決定されています。図-6) は各列のボルト数が 1 本の場合ですが、これが 2 本になるとせん断長さが大きくなるのに、引っ張り長さは変化しませんから、中抜け破断強度 < 外抜け破断強度 < 端抜け強度の順になることが容易に見通せます。すなわち、応力方向に対するボルト列数が 2 以上におけるちぎれ破断強度は、中抜け破断モードで支配されるというのが常識で、よほど特殊な場合を除き、ボルト 1 列あたりの端抜け破断耐力 × ボルト列数という計算は成り立たないと心得ておかなければなりません。



総せん断長さ = $4 \times 2d = 8d$

(a) 端抜け破断

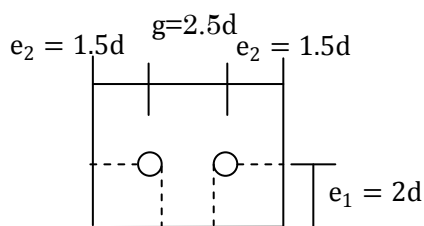


引っ張り長さ = $g - d = 1.5d$

せん断長さ = $2 \times 2d = 4d$

等価総せん断長さ = $2 \times 1.5d + 4d = 7d$

(b) 中抜け破断



引っ張り長さ = $2e_2 - d = 2d$

せん断長さ = $2 \times 2d = 4d$

等価総せん断長さ = $2 \times 2d + 4d = 8d$

(c) 外抜け破断

ちぎれ破断強度 = $\min(7d, 8d, 8d) = 7d$

中抜け破断により決定

図-6

なお、図-6)におけるへりあきの最小値 $1.5d$ は、高力ボルトが登場する以前のリベット、中ボルトの時代からの名残ですが、極めて都合のよい数値になっています。すなわち、高力ボルトにより導入される材間圧縮力の分布範囲は、図-7)に示すように、直径 $2d \sim 3d$ のすり鉢状に分布しますが、その最大値 $1.5d$ にちょうど合致するのです。

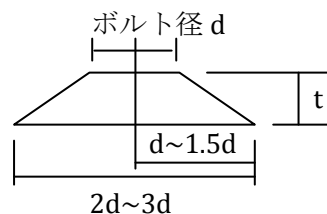


図-7 材間圧縮力の分布

ピッチやゲージなどボルト間について同様の考察をすると、その最小値 $2.5d$ は、図-8)に示すように、隣接する材間圧縮力が重なるか、重ならないかのぎりぎりの数値になっていることがわかります。

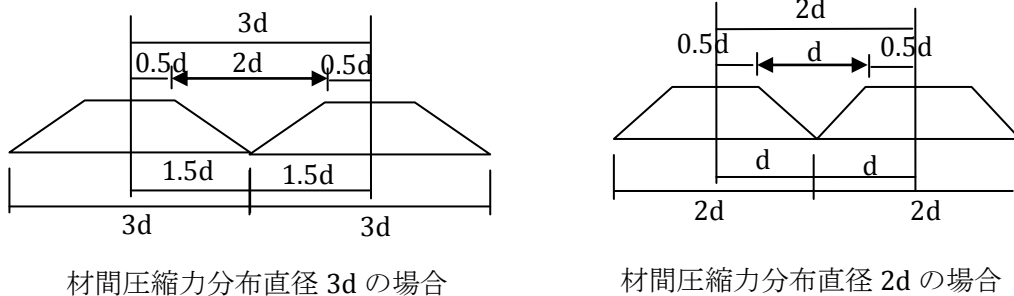


図-8

このようなわけではないでしょうが、M20 以下のボルトの使用を前提としてピッチ、ゲージには $3d=60\text{mm}$ を、はしあきには $2.5d=50\text{mm}$ 、へりあきには $1.5d=30\text{mm}\sim 40\text{mm}$ に定めてボルトの配置を考えるという方が少なくありません。なお、引っぱり材として型鋼を使った場合には、へりあき長さとしてフランジ部分のそれが含まれるので、中抜け破断強度よりも外抜け破断の方が必ず大きくなります。したがって、外抜け破壊モードに関する検討は、省略して差し支えありません（図-9）。

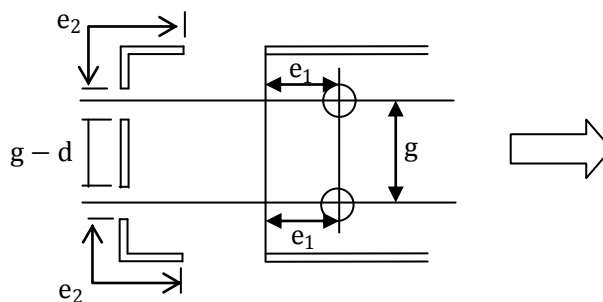


図-9

また、これまで述べてきた検討を、ガセットプレート側についても行わなければなりません。ガセットプレート側の端明きがブレース側の端明きと同一、かつ $A=A$ における断面積がブレース断面積より大きいのであれば検討は不要です。

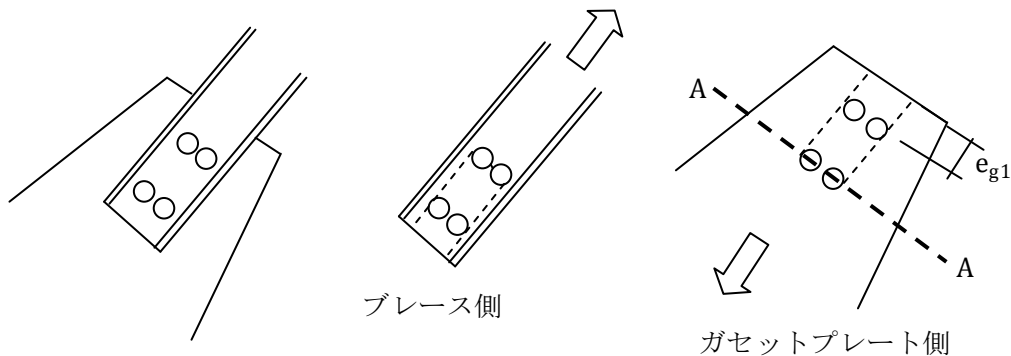


図-10

なお、ブレースがアングル2丁合わせとなっているときは、アングルが完全に一体になっているわけではありませんので、ブレース母材側についての端ぬけは、ボルト列数 1 とし、ガセットプレート側については 2 列ボルトとして、中ぬけ破断モードを考えなければなりません。

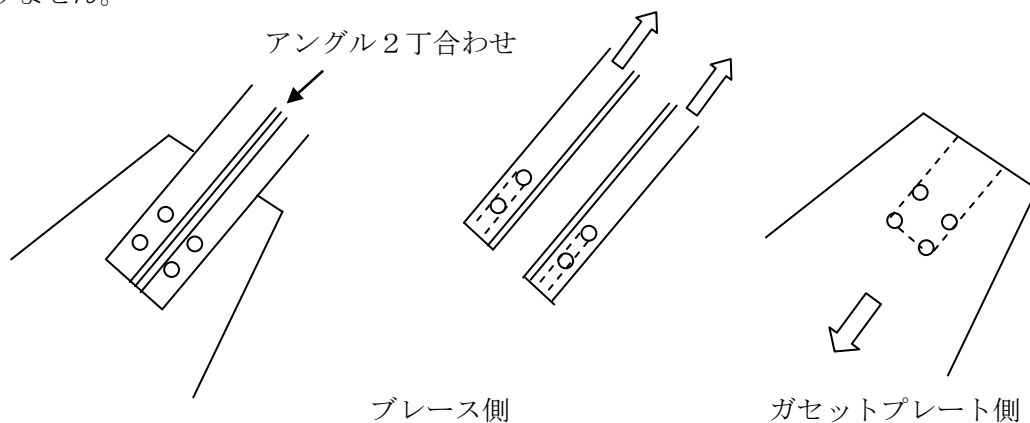


図-11

ボルト列数が 3 以上になると、各ボルト列に沿う端あき破断、3 列のボルト群をカバーする中ぬけ破断のほかに、図-12(c)に示すように外ぬけ破断と端ぬけ破断とを組み合わせたモードが登場してきます。

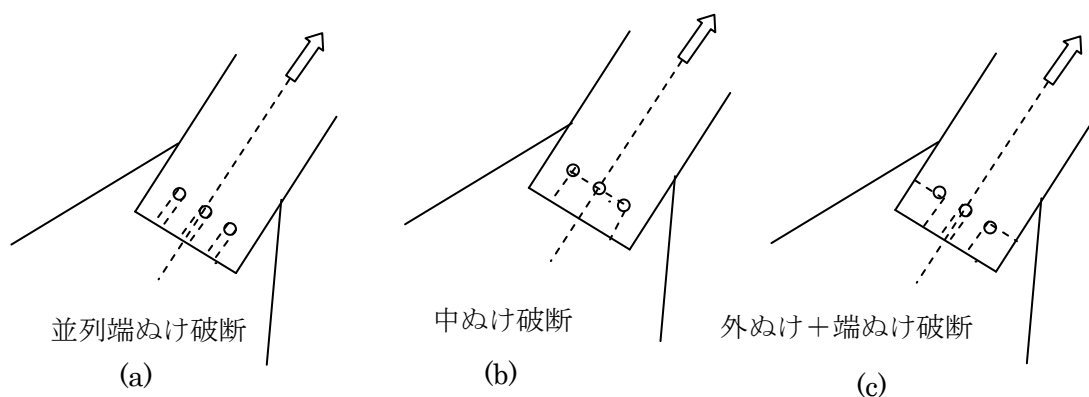
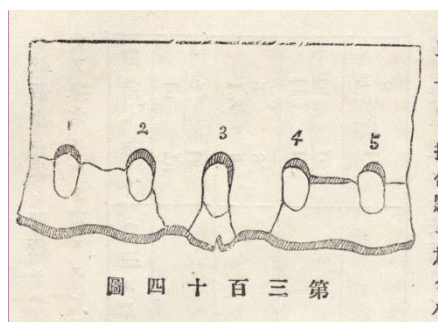


図-12

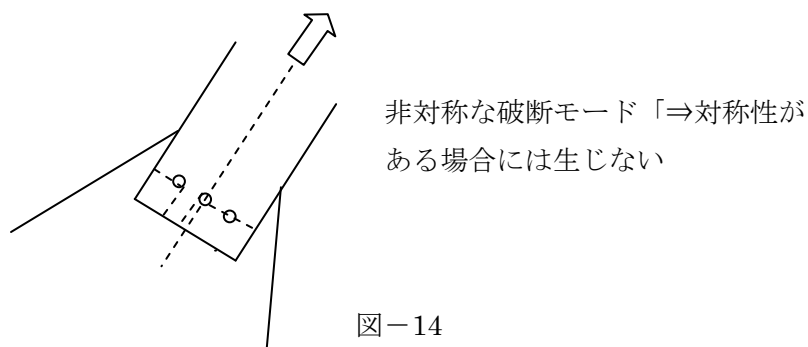
リベット接合において、(c)の破断モードを生じた例を図-13 に示しておきます。



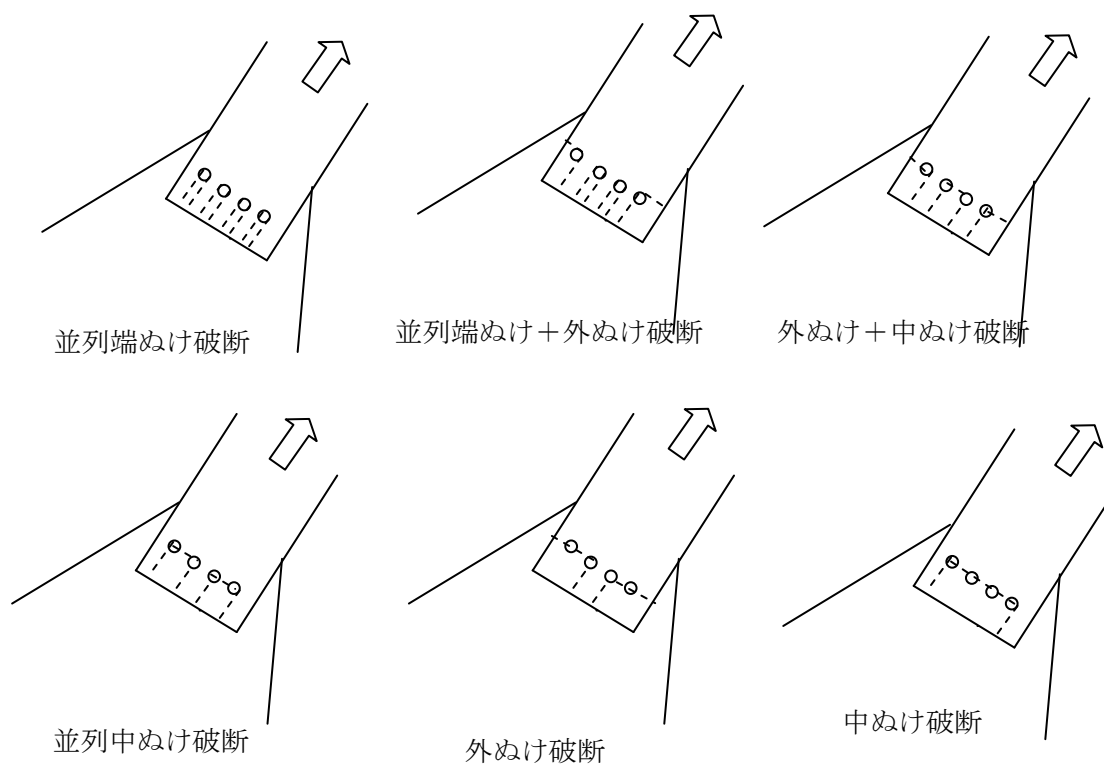
和洋改良大建築学上巻 p.597 明治 37 年
Watertown 造兵局の実験
破壊順序は①1-2間②1の左へりあき③4-5間
④5の右へりあき⑤3のはしあき破断⑥2,4の
せん断破断

図-13

なお、破断モードとしては、図-14 に示すような非対称なものも考えられますが、対称性がある場合には起こり得ません。



ボルト列数が4列になると、図-15のように6種類もの破断モードが想定されることになります。これらのうち、最小値をとるものが、ちぎれ破断強度となるわけです。



ボルト配列が、千鳥配列を含めて、不規則な場合には、まず母材破断を決定する破断線を決し、これをもとにしてちぎれ破断モードを考えていくという手順になります。母材破断を決定する破断線は、ボルト孔による欠損断面積を差し引いた有効断面積が最小となる時として決定され、ボルト孔による欠損断面積は次式によって算定されます。すなわち、

b を力の作用方向に沿うボルト孔のピッチ、 g はこれに直角方向のピッチとして $\frac{b}{g}$ の範囲に応じて次式によります。

$$1.5 < \frac{b}{g} \quad a_e = 0$$

$$0.5 \leq \frac{b}{g} \leq 1.5 \quad a_e = \left(1.5 - \frac{b}{g}\right) a_0$$

$$\frac{b}{g} < 0.5 \quad a_e = a_0$$

ここに $a_0 = \text{ボルト孔径} \times \text{板厚} = dt$ で、 $t = \text{一定}$ とすれば、ボルト孔径 d によって表現してもおなじことで上式は図-16 のように表すことができます。

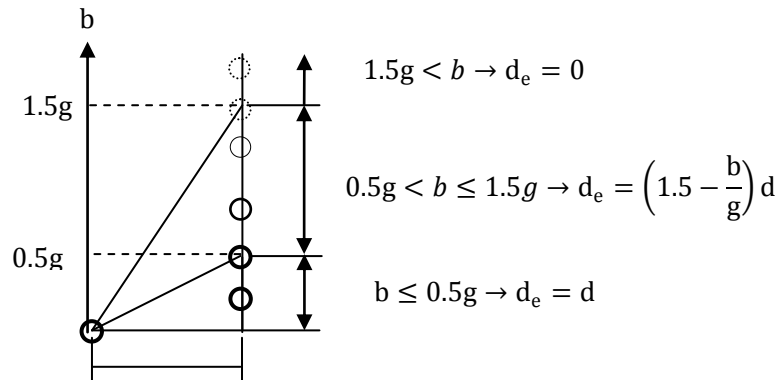
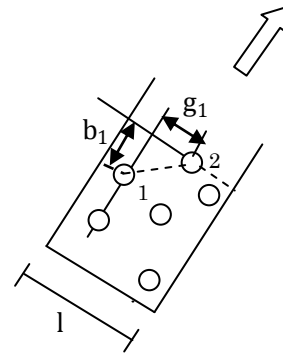
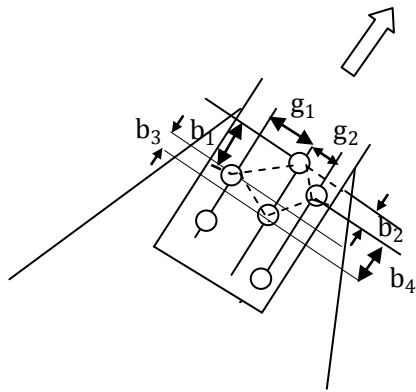
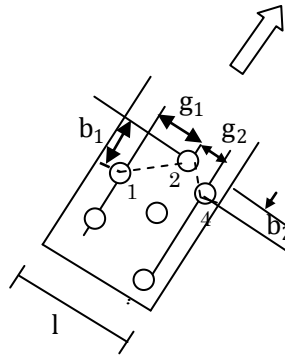


図-16

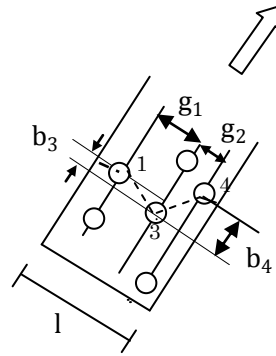
図-16 に従えば $\frac{b}{g} = 0.5$ は 5 寸勾配を、 $\frac{b}{g} = 1.5$ は $1/1.5 = 0.67$ で、6 寸 7 分勾配の返し勾配に相当しますから、隣接するボルト孔を結ぶ線の勾配が 5 寸以下であったなら、位置が多少ずれていても、横 1 列に並んだ場合と同一であるということ、また 6 寸 7 分勾配の返し勾配以上も離れていれば、もはや影響しないということの意味し、これらの中には、勾配に応じて欠損断面の割合が変化するということになります。こうした算定式がどのようにして成立したかは、残念ながら知るよしもありません。おそらくはリベット接合を用いての造船や兵器の開発において、徹底的に研究された事項でしょうから、まず信頼してよいでしょう。なお、算定式の取り扱いの要領を示すために、現実には存在しないでしょうが、ボルト列数が 3 のランダム配置における例を図-17 に示しておきました。最外縁の第 1 ボルト孔を出発点とし、これと第 2 ボルト孔と関係を押さえ、次いで第 2 ボルトと第 3 ボルトとの関係というように、一方通行的な流れに従って算定していく手順にくれぐれも御注意ください。



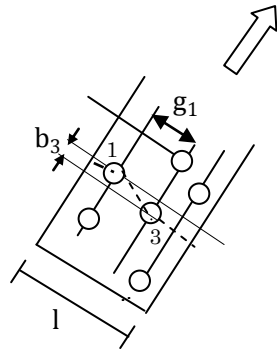
$$l_{e1} = l - \left\{ \underset{\uparrow 1}{1} + \left(1.5 - \underset{\uparrow 2}{\frac{b_1}{g_1}} \right) \right\} d$$



$$l_{e2} = l - \left\{ \underset{\uparrow 1}{1} + \left(1.5 - \underset{\uparrow 2}{\frac{b_1}{g_1}} \right) + \left(1.5 - \underset{\uparrow 4}{\frac{b_2}{g_2}} \right) \right\} d$$



$$l_{e3} = l - \left\{ \underset{\uparrow 1}{1} + \left(1.5 - \underset{\uparrow 3}{\frac{b_3}{g_1}} \right) + \left(1.5 - \underset{\uparrow 4}{\frac{b_4}{g_2}} \right) \right\} d$$



$$l_{e3} = l - \left\{ \underset{\uparrow 1}{1} + \left(1.5 - \underset{\uparrow 3}{\frac{b_3}{g_1}} \right) \right\} d$$

図-17

上記により母材の有効断面積を決定する破断線が決定されたとしたならば、これをもとにして、図-18 のようにちぎれ破断として可能性のある破断モードを想定し、最小となる破断荷重を求めればよいわけです。

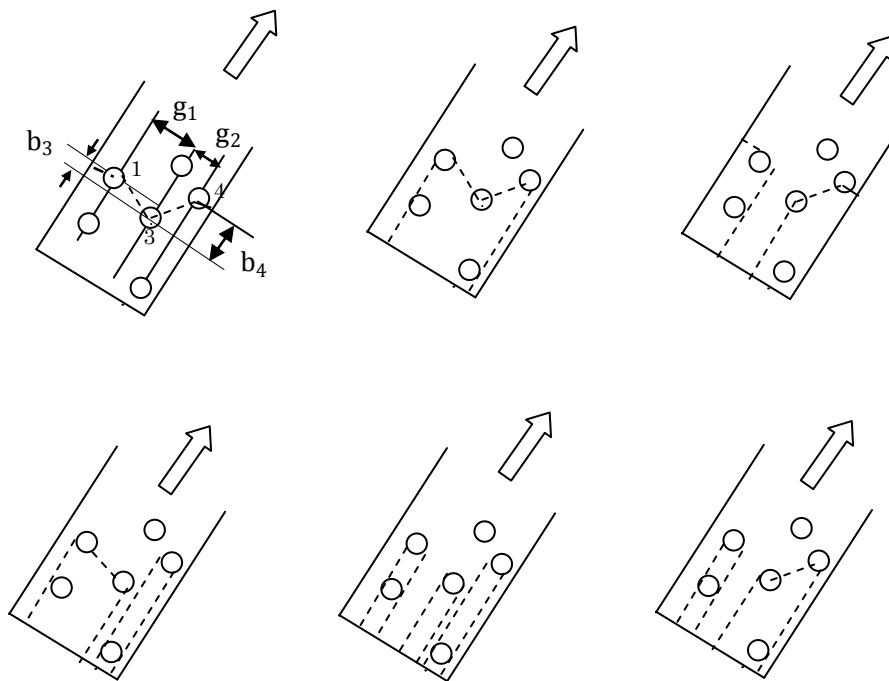


図-18

なお、斜めの破断線部分の耐力をどう評価するかが気になりますが、母材の破断耐力算定において、このことは考慮されておらず、単純に材軸に直角な有効断面積×引張強度として取り扱われています。従ってこれと同じ取扱いとしておくのが妥当なところでしょう。ところで、図-17,18は極端な例で、一般的には材軸に対し対称の整然とした千鳥配置とされるのが普通です。従って次はこれを取り扱うこととしましょう。

ボルト配置としては、ボルトピッチを 60 あるいは 70mm とし、これを 1 コマの寸法とする格子の交点に、材軸に関して対称となるよう配置する方法が最も多く採用されます。しかし、この方式による場合、不都合なことがまあります。例えば計算上必要ボルト数が 4.3 本と計算されたとしましょう。0.3 本はありえませんが、4.3→5 本にせざるを得ませんが、もし板幅の制限によりボルト列数として 2 列しか許されない場合は、2 本、3 本の非対称配置とするわけにはいかず、結局 3 本 2 列の合計 6 本が必要ということになります。また既製品の型鋼などにおいては、材幅が中途半端で、ボルト列数 2 に対しては広すぎるが、ボルト列数 3 に対しては足りないという場合が少なくありません。こうした問題がある場合の解決策が千鳥配置で、そのデザイン原則は図-19 に示すように、ボルト位置としてピッチを半径とする円の交点上を選ぶということにあります。

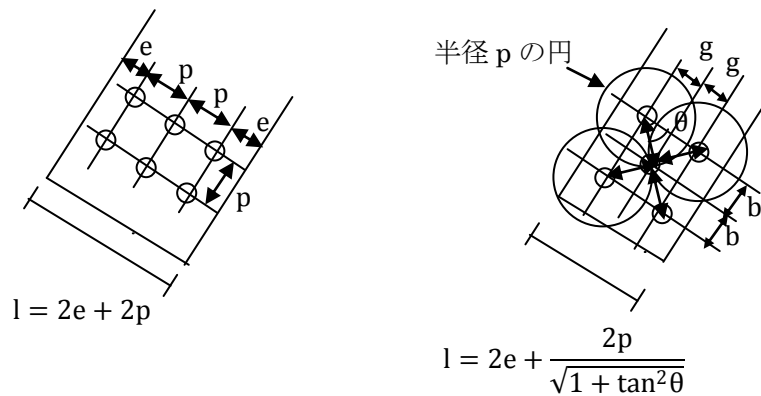


図-19

図-19において、材軸に直角の軸に対する角を θ とすると、 $\tan \theta = \frac{b}{g}$ 、 $b = g \tan \theta$ ですから

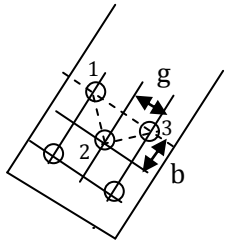
$$\sqrt{g^2 + b^2} = p, \quad g\sqrt{1 + \tan^2 \theta} = p, \quad g = \frac{p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$$

となり、ボルト列数が3の場合、格子状に配列すれば板幅として $l = 2e + 2p$ を要するのに対して、千鳥配置では $l = 2e + \frac{2p}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}$ と狭くすることができます。ピッチを60mmとし

たとき、 $\tan \theta$ の値によって、 g, b の値がどのように変化するかを算定したものが次表です。例えば2列のボルトを平行配置として打つには、へりあきを40mmとすれば、 $40 + 60 + 40 = 140\text{mm}$ の板幅が必要になります。ところが、 $\tan \theta = 1.2$ の千鳥配置とすれば $g = 39\text{mm}$ となりますので、 $40 + 39 + 40 = 119\text{mm}$ と板幅120mmのものに打つことができることになるわけです。

p(mm)	$\tan \theta$	g(mm)	b(mm)
60	0.5	54	27
	0.6	52	31
	0.7	50	35
	0.8	47	38
	0.9	45	41
	1.0	43	43
	1.1	41	45
	1.2	39	47
	1.3	37	48
	1.4	35	49
	1.5	34	50

次はボルト列数が 3 列の千鳥配置を取り上げましょう。この場合はまず母材の破断線が図-20 において 1-3 となるか、それとも 1-2-3 となるかが問題です。



$$1-3 \quad \sum d_e = 2d$$

$$1-2-3 \quad \sum d_e = \left\{ 1 + \left(1.5 - \frac{b}{g} \right) + \left(1.5 - \frac{b}{g} \right) \right\} d = \left\{ 1 + 2 \left(1.5 - \frac{b}{g} \right) \right\} d$$

図-20

破断線 1-2-3 の場合の欠損断面積が $\frac{b}{g} = \tan\theta$ によってどのように変化するかを計算すると次表のようになります。

$\tan\theta$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$\sum d_e$	3d	2.8d	2.6d	2.4d	2.2d	2d	1.8d	1.6d	1.4d	1.2d	1d

これより、 $\tan\theta$ が 0.5 以下においては、3 個のボルト孔が一直線上に乗った場合とおなじ 3d となって 2d より大きくなりますから、1-2-3 の破断線となり、0.6 以上になっても同じ 1-2-3 の系列にありますが、 $\tan\theta = 1$ になると 1-3 における 2d の値と同一になることがわかります。すなわち、 $\tan\theta = 1$ においては、1-3、1-2-3 のどちらも生じ得るということになります。これを超えると 1-2-3 における系列における欠損断面積が 2d 以下となりますから、もっぱら 1-3 の破断線に従うことになります。これを表したものが図-21 です。

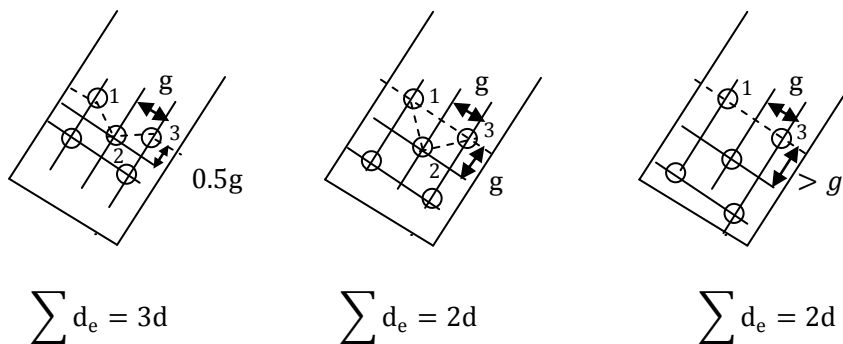
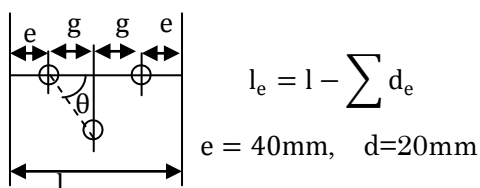


図-21

ところで、 $\tan\theta$ が大きくなるにつれ板幅が減少しますが、これにより母材耐力の絶対値も減少します。しかし、ボルト孔の欠損断面積は上に示したように $\tan\theta$ に比例するわけではありませんので、板幅が減少割合にくらべて母材耐力の減少割合が小さいという意味で最も効率的な場合が存在するはずでです。次表は、へりあき 40mm、ピッチ 60mm、ボルト径

20mm (本来は孔径によるべきでしょうが、ここでは簡単のため軸径をそのまま使います)、ボルト列数が 3 としたとき、必要板幅は 200mm、耐力算定用の有効板幅は $200-3 \times 20=140\text{mm}$ となる場合に対して、 $\tan\theta$ に伴う必要板幅の減少割合 $l/200$ 、有効板幅の減少割合 $l_e/140$ を算出、効率を表す係数としてこれらの比 $\frac{l_e/140}{l/200}$ を定義した場合の結果を示したものです。結果は $\tan\theta = 1$ すなわち、 $\theta = 45^\circ$ の場合が最も効率がよいということになりました。コンパクトで美しいかたち、それが力学的にも最も合理的であるという例に合致しているわけです。



$\tan\theta$	$g(\text{mm})$	$l(\text{mm})$	$\frac{l}{200}$	$\sum d_e$	$\sum d_e(\text{mm})$	$l_e(\text{mm})$	$\frac{l_e}{140}$	$\frac{\frac{l_e}{140}}{\frac{l}{200}}$
0	60	200	1	$3d$	60	140	1	1
0.5	54	188	0.94	$3d$	60	128	0.91	0.973
0.6	52	184	0.92	$2.8d$	56	128	0.91	0.994
0.7	50	180	0.90	$2.6d$	52	128	0.91	1.016
0.8	47	174	0.87	$2.4d$	48	126	0.90	1.034
0.9	45	170	0.85	$2.2d$	44	126	0.90	1.059
1.0	43	166	0.83	$2d$	40	126	0.90	1.084
1.1	41	162	0.81	$2d$	40	122	0.87	1.076
1.2	39	158	0.79	$2d$	40	118	0.84	1.067
1.3	37	154	0.77	$2d$	40	114	0.81	1.058
1.4	35	150	0.75	$2d$	40	110	0.79	1.048
1.5	34	148	0.74	$2d$	40	108	0.77	1.042

千鳥配置を採用せざるを得ない理由は、まず板幅の制限によると思われませんが、以上のことから、もし千鳥配置とするのであれば、 $\tan\theta$ の値ができるだけ 1 に近く (すなわち θ が 45°) なるものを選ぶべきことがわかります。なお、千鳥配置における端ぬけ破壊モードは、以上により図-22 のように考えればよいでしょう。中ぬけ破断モードの形が $\frac{b}{g} = 1$ を境にして微妙に異なってくることに注意してください。

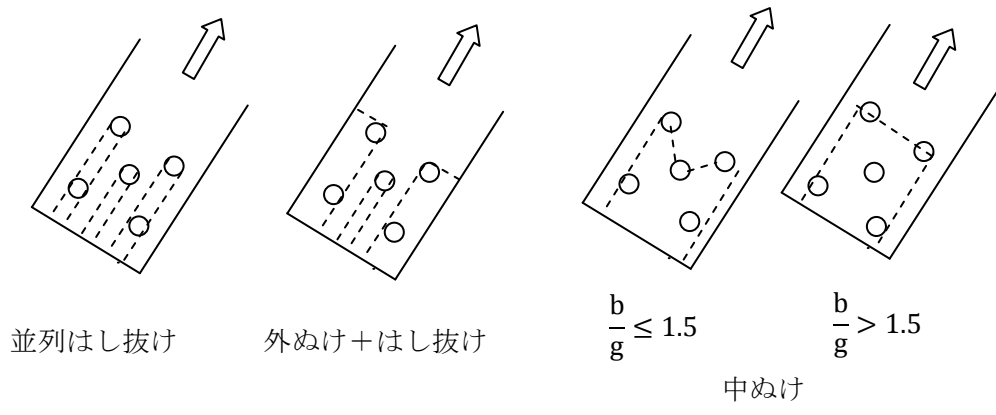


図-22