

円孔を有する引張部材の有効断面積に関する考察

塩 見 弘 幸*

Effective Net Section of a Tension Member with Circular Holes

Hiroyuki, SHIOMI*

(Received August 23, 1972)

In this paper, the experimental study of the effective net section of the tension member with circular holes is described.

The efficiency of a tension member is defined as the ratio of limit load on net area to the limit load of solid tensile specimen.

From the experimental result obtained by the photo-elastic coating method, a design formula for tension members, expressed by an equation of the second degree, is proposed.

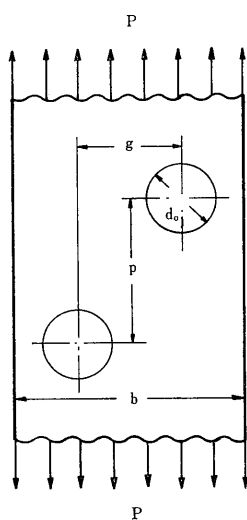
1. はじめに

円孔を有する引張部材の有効断面積を決定するため、これまで、いくつかの設計式が提案され用いられている。部材の長さ方向に対し直角に一直列の孔が配置されている場合には、部材の全幅から孔の直径の総和を控除すれば良い。しかし第1図に示すように、2円孔がちどりに配置されている場合の板の有効巾は、 $b-d_0$ と $b-2d_0$ の間にあり、ピッチ p とゲージ g の函数であると考えられている。

T.A. Smith は1915年次式を提案した。¹⁾

$$d/d_0 = g/d_0 - \frac{2(g^2 + p^2 - d_0\sqrt{g^2 + p^2})}{d(g + \sqrt{g^2 + 4p^2})} \quad \dots(1-1)$$

しかし(1-1)式に対しては、後にC.R. YoungとW.B. Dunbarの実験によって、安全側すぎるという報告がなされた。C.R. Youngは²⁾



第1図 2円孔の配置図

$$d/d_0 = 1.50 - 1.25p/g \quad \dots\dots(1-2)$$

を提案し、またCochanは次式を提案した。³⁾

$$d = d_0 - p^2/4g \quad \dots\dots(1-3)$$

(1-3)式は、1955年以来一般に用いられるようになり、AREA, AISC, AASHOで採用されており、日本の土木学会における関係方書もこれに準じている。日本建築学会における鋼構造計算規準には、次式が用いられている。⁴⁾

$$d/d_0 = 1.50 - p/g \quad \dots\dots(1-4)$$

以上の式は、いずれも実験式的な意味合いが濃い。理論的解析を試した例は少ないが、W.G. BradyとD.C. Druckerは、最大せん断応力降伏条件とMissesの降伏条件とを用い、上限および下限値を計算し、(1-3)式は上限値に近似していると報告した。⁵⁾一方、加藤等は降伏条件として、H. Trescaの条件を用い千鳥円孔群を有する板の降伏の上限値および下限値を求めたが、上限値と下限値との差が大きくあまり有用でないと述べている。⁶⁾

従来の実験方法は、千鳥円孔群を有する供試体に軸方向引張力を与え、その降伏荷重を求め無孔の場合の降伏荷重との比を算定し、有効断面積を決定した。すなわち応力とひずみの関係において、応力の微少の増加に伴ってひずみが急増する点に注目するわけであるが、応力-伸び曲線からこの点を求める場合、明確に捉え難い場合がある。光弾性皮膜法は、特に塑性域における実験的応

* 土木工学科 (Department of Civil Engineering)

力解析に対しすぐれた方法とされている。そこで、円孔を有する板の降伏点をより正確に捉え、板の有効巾を決るためにこの方法の応用を試した。その結果、従来からの値と若干異った傾向が認められたのでここに報告することにした。

2. 実験方法

2-1 光弾性皮膜法について

光弾性皮膜が貼布された供試体に軸方向引張力を与え徐々にその荷重を増加した場合、円孔を含む全断面に塑性域が貫通する状態を観察し、貫通した瞬間を降伏荷重とした。光弾性皮膜法によって弾塑性域の境界のみを求めるため、次の方法で行った。⁷⁾

平面応力状態における Tresca の降伏条件式は

$$\tau_{max} = 1/2(\sigma_1 - \sigma_2) = 1/2\sigma_y \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad \dots\dots(2-1)$$

で表される。ここに σ_1 および σ_2 は主応力、 σ_y は単純引張による鋼材の降伏点応力。一方光弾性法則是

$$n = \frac{2\alpha t E_c}{1+\nu_c}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = K(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot 2t \quad \dots\dots(2-2)$$

ここに n : 観察されるしま次数

$(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$: 皮膜のひずみ差

α : 光弾性感度

t : 皮膜の厚さ

E_c, ν_c : 皮膜のヤング率およびポアソン比

$K \equiv \alpha E_c / (1 + \nu_c)$: 主ひずみ差感度

(2-1) 式を (2-2) 式に代入すれば

$$n = K(1 + \nu)\varepsilon_y \cdot 2t \equiv n_y \quad \dots\dots(2-3)$$

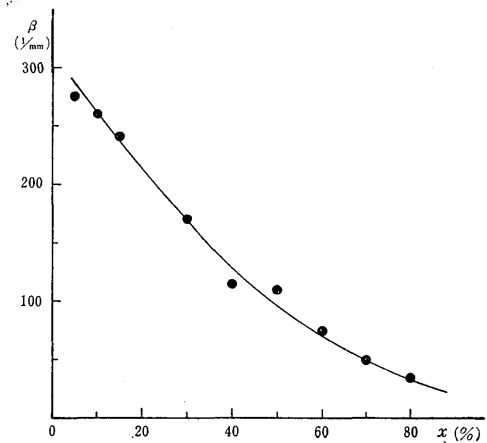
ここに ν は鋼材のポアソン比、 $\varepsilon_y = \sigma_y / E$ は鋼材の弾性限ひずみである。しま次数 n_y が弾塑性境界を表わすわけであるが、これは鋼材片の単純引張りまたは純曲げ試験によって、応力とひずみの関係 ($\sigma - \varepsilon$ 曲線) の $\varepsilon = \varepsilon_y$ に対応するしま次数と一致する。

2-2 皮膜の特性

実験は予備試験と本実験にわけられる。予備試験では皮膜の特性、鋼材と皮膜の関係、皮膜の補強効果等を検討し、さらに応力集中の影響を調べた。

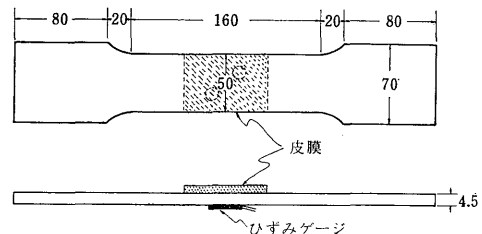
実験に用いた皮膜材料は、チオコール Lp-3、エピコート 828、ジェチレントリアミンを重合させたものである。重量比によってその性質は変化し、エピコートの重量を100とした場合、ジェチレントリアミンを10、チオコールを x のものを今後 $x\%$ の皮膜と呼ぶことにする。本実験に最適な配合を決定するために、 $x=5, 10, 15, 30, 40, 50, 60, 70, 80\%$ の9通りの皮膜を作製し、これから小片の供試体を切り出して、光弾性感度およびヤング率の測定結果からひずみ感度を求めた。第2図はその結果であるが村上氏の報告ともほぼ一致している。⁸⁾

チオコールの量を増せば皮膜は軟化し、塑性域においても鋼材との適用性は良くなるが、感度に乏しくなる。この結果と後に述べる皮膜の補強効果を考慮して、 $x=50\%$ の配合のものを本実験で用いることにした。

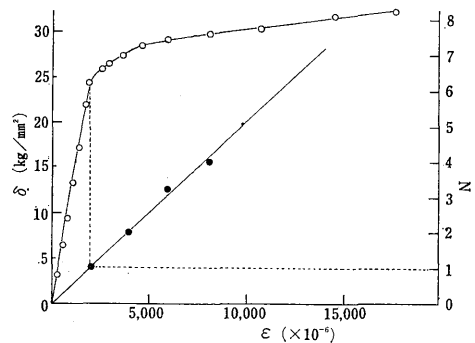


第2図 光弾性皮膜の特性

次に $x=50\%$ に対する主ひずみ差感度の検定のために次のような試験を行った。鋼材として SS41 相当材を用い本実験で使用する供試体と同寸法の引張試験片を作製し、片面に上記の皮膜を貼布し、その裏面には抵抗線ひずみゲージを接着した (第3図)。万能試験機 (島津製作



第3図 供試体諸元



第4図 応力—ひずみ—等色線次数曲線

所製)を用い引張試験により、応力—等色線次数の関係および応力—ひずみ曲線を求めた。その結果の一例を第4図に示す。この図より、弾塑性の境界線は、等色線が1次の線であることが確認された。

2-3 皮膜の補強効果

鋼部材に接着された皮膜は応力を分担するが、特に鋼部材が塑性域に入るとその剛性が低下するため、応力分担も大きくなると考えられる。そこで、予め皮膜の鋼部材に対する補強効果を調べた。接着された個所では、皮膜と鋼部材のひずみは等しいと仮定すると

$$\sigma_r/\sigma_m = \varepsilon E_r/\varepsilon E_m = E_r/E_m \quad \dots\dots(2-4)$$

ここに添字の r は皮膜を、 m は鋼部材を意味する。

$x=50\%$ の皮膜を使用すると、 $E_r=70\text{kg/mm}^2$ 、また試験の結果、鋼部材の降伏点ひずみは 0.002 、降伏点応力は 25kg/mm^2 であった。これらの値を(2-4)式に代入すると σ_r/σ_m の値は 0.0056 となる。すなわち塑性域における皮膜の応力分担率は約 0.6% であった。

2-4 円孔の配置について

有限幅の板に円孔を配置する場合、板端から円孔までの距離を決定するため、一個の偏心円孔を持つ帯板に軸方向荷重を与え、偏心率の変化による塑性域の進行状況を光弾性皮膜法によって調べた。¹⁰⁾ その結果、例えば板幅 50mm 、孔径 10mm 、偏心率 0.7 の場合、板端と円孔との間の狭少部に局部的降伏が進展し、塑性域が貫通するが応力の再配分が起るため、反対側の帯状部に塑性域が貫通するまでは狭少部は破断しなかった。従って本実験で使用する孔径 9mm までならば、板端と孔の中心距離はピッチの長さと同程度にすれば問題はないと思われる。

2-5 供試体と実験方法

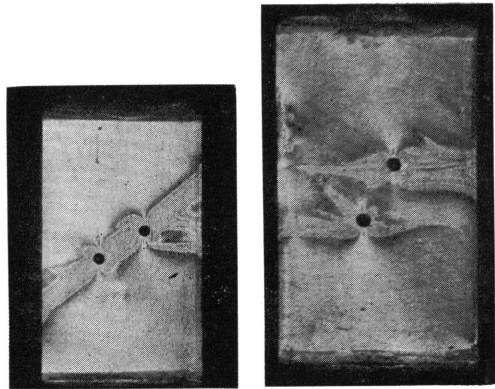
本実験に用いた供試体を第3図に示す。鋼部材の降伏点と引張強さは、3本の無孔の供試体について引張試験をした結果、それぞれ 25kg/mm^2 、 40kg/mm^2 であった。

孔径 d を 3mm 、 4.5mm 、 6mm 、 9mm の4種類とし、その各々について g は一定とし p を5段階に変化させた。同じ寸法の供試体を3本ずつ計60本作製し実験に供した。軸方向引張力は万能試験機(島津製作所製、最大能力 100T 、切換使用時 10T)によって与えた。皮膜の長さは $6\text{mm} \sim 8\text{mm}$ とし板の全幅に接着し、軸方向の両端は常に0次のしまが観察できるように楔状に削った。等色線の観察には反射型光弾性皮膜装置(理研計器製)を使用した。試験機によって荷重を徐々に増加させ、孔を含む全断面が塑性域に達した瞬間の荷重の大きさを記録すると同時に、他方、供試体の孔の前後に伸び計を取り付け荷重—伸び曲線も併せて測定した。そして両者の比較に用いた。

3. 実験結果および考察

3-1 塑性域の拡がり

第5図および第6図は、供試体に軸方向引張力を与えた場合の塑性域の拡がりを示す光弾性写真である。荷重の増加に従って、まず応力集中の大きい個所が塑性域に入りさらに荷重を増加すると、この例の場合はピッチ p がゲージ g に比べ小さいために、ふたつの孔を結ぶ線上に塑性域は進展する。次いで荷重の増加によって塑性域はついに板の両端へと貫通する(第5図)。巾が g に比較して大きい場合には(第6図)のように塑性域は板の両端が先に進みその後孔を結ぶ線上へと拡がる。



第5図 塑性域の進展状況 ($g > p$) 第6図 塑性域の進展状況 ($g < p$)

奥村博士等は板の単純引張において板幅方向の応力比 σ_2/σ_1 、板厚方向の応力比 σ_3/σ_1 を与え、板のすべり面の方向角 θ を VonMises の降伏条件を用いて説明されている。¹¹⁾ これによると、板厚方向の応力比 $\sigma_3/\sigma_1=0$ の場合、板巾方向の応力比 σ_2/σ_1 の値が大きくなるにしたがって、すべりの方向角 θ は小さくなり、 $\sigma_2/\sigma_1=0.5$ で $\theta=0^\circ$ になるとしている。本実験の場合のすべり面を観察した結果、最初 $\theta=35^\circ \sim 40^\circ$ ですべり面が応力集中の高い点から進行し始め、その後急速に 0° に近づく。この現象は塑性域が進展した結果、応力の再配分が生じ新しい応力集中のため σ_2 の値が大きくなりすべり面の方向角が 0° になるものと思われる。前述の p と g との距離関係により塑性域の進展の状況が異なるのは以上のことによって説明がつく。

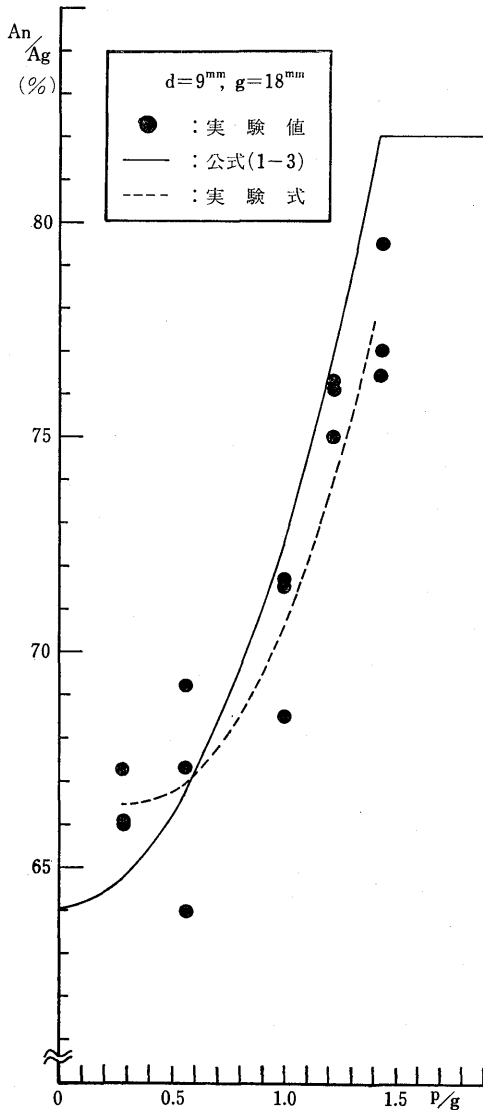
3-2 純断面積

第7図および第8図は、実験結果をとりまとめたものの一例で、 p/g の変化によって純断面積 A_n が総断面積 A_g に対し取り得る率を示したものである。孔径の大きさに拘らず p/g が小さい間は、(1-3)式よりも、純断面積を大きく取り得るが、 p/g が大きくなると(1-3)式

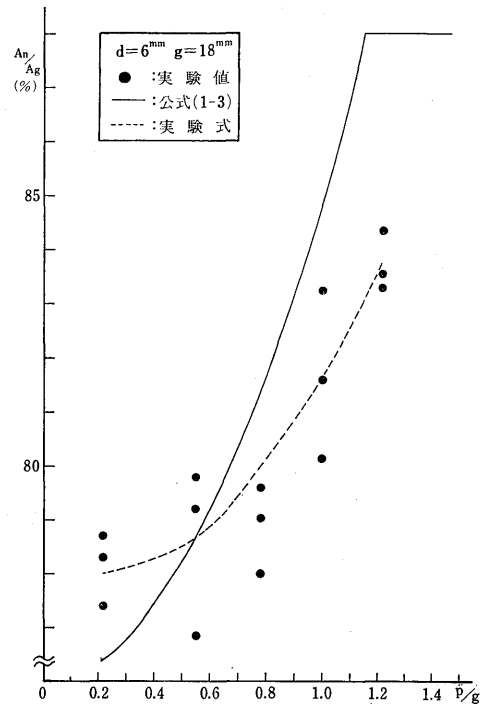
の方が純断面積は大きく取り得る。実験の結果を(1-3)式と同様な形で表示すると

$$d = n' d_0 - p^2 / ng \quad \dots\dots (3-1)$$

n' および n をそれぞれ $n'=1$, $n=4$ とした場合が (1-3) 式であるが、本実験結果から $n'=0.9$, $n=5.5 \sim 8$ とすると実験結果に良く適合するようである。 n の値が幅をもっているのは、孔径によって異なるためである。いま孔径 d と板厚 t との関係を考えてみると、実用的には $d/t=2.0$ 前後といえる。本実験において、孔径 9 mm の場合 $d/t=2.0$ であるから、この場合の n の値が一般的と



第7図 総断面 A_g に対する純断面 A_n と p/g との関係



第8図 総断面 A_g に対する純断面 A_n と p/g との関係

いえるであろう。したがって、実験結果の孔径 6 mm 以下のものについては、実用的な実験式を論ずる場合には不適当である。そこで $n=5.5$ として次式で表わす。

$$d = 0.9 d_0 - p^2 / 5.5 g \quad \dots\dots (3-1')$$

(3-1') 式を実験式として提案したい。ただし (3-1') 式においては $p=0$ あるいは 0 に近い値に対する場合には論外であるが、上式で充分実用的であろう。

光弾性皮膜法で観測すると同時に、荷重一伸び曲線も記録したが全断面降伏荷重の大きさが明確に記録できない場合があった。これは、荷重一伸び曲線中のいわゆる「おどり場」が明瞭に表れなかったことによる。このことから、塑性域の進展状況が直接観察される本実験の方法は有効であると言えよう。

4 結 論

現在鋼橋の設計は、一般的に許容応力度設計の立場に基づいて行なわれているが、例えば継手等の部分構造に関しては、暗に最終状態における応力の再配分が考慮され、平均応力を対象としている。この点については、しばしば問題にされるところで、根本的な問題として、さらに検討されねばならないと思われるが、¹²⁾ ここでは単に従来の実験方法の代りに光弾性皮膜法を応用して、引

張有孔部材の有効断面積を求めることを試みた。

まず皮膜の特性を調べ、次に単純引張を受けた場合、塑性域の進展状況を観察した。また、2円孔の配置についても考察を行った。これらの予備的試験の後、60本の供試体について実験を行い純断面積を求めた。これらの実験から得れた結論を次に列挙する。

(1)実験の結果から孔の控除率を(3-1')式のように提案した。板厚が孔径より大きい場合には、提案した実験式の適用は困難であるが、実際には板厚が孔径に比べ薄いものが用いられているため、実用性はあると思われる。

(2)塑性域の進展状況については、 p/g が 0.7~0.8 程度までは、2円孔間を結ぶ線上にまず塑性域が進展し、つぎに板の両端へと拡る。 p/g が 0.8 程度以上になると板の両端が先に塑性域となり、その直後、孔を結ぶ線上が急速に貫通されてゆくのが観察された。

(3)本皮膜法と、従来から行われている荷重一伸び曲線から全断面降伏荷重を求める方法とを比較すると、いわゆる「おどり場」が明確に表れる場合には、両者の全断面降伏荷重の大きさは良く一致した。しかし、「おどり場」が表れない場合、若くは判別し難い場合に対しては本法の方が、塑性域の貫通状態が直接目で確かめられるため有利であると思われる。

最後に終始ご指導をして頂いた本学結城朝恭博士、また助言を頂いた名古屋大学、川本桃万博士に対し紙上を借り心から謝意を表したい。実験には本学技術員、加藤、和田、野々山各氏の協力があった。なお本研究の一

部は本学46年度奨励研究費に依った。合せて関係各位に対し深く感謝する次第です。

文 献

- 1) T. A. Smith: Diagram for Net Section of Riveted Tension Members, Engineering News, Vol.73, pp.893, 1915
- 2) C.R. Young: True Net Sections of Riveted Tension Members, Engineering Research bulletin, No. 2, pp. 233, 1921
- 3) Victor H.Cochrane: Rules for Rivet-Hole Deductions in Tension Members, Engineering News-Record, Vol. 89, pp.847, 1922.
- 4) 日本建築学会：鋼構造計算規準，技報堂，1967
- 5) G.W. Brady, D.C. Druker: Investigation and Limit Analysis of Net Area in Tension, Trans. Soc. Civil Eng, Vol. 120, pp. 1133, 1969.
- 6) 加藤勉・青木博文・稲村真平：千鳥円孔群を有する引張材の有効断面積，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 1051, (昭.44). 8
- 7) 宇佐美勉・川本桃万・榎本嘯士：光弾性皮膜法による鋼部材の弾塑性域の拡がりに関する研究，土木学会編文集，第152号，pp. 16(昭.43). 4.
- 8) 村上正・斉藤利一郎・藤田寛考：皮膜法に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要，第23，pp.443, (昭.43). 10
- 9) 例えば，川本桃万著：応用弾性学，共立出版，(昭.43) 6
- 10) 塩見弘幸：応力集中部周辺の弾塑性域の拡がりについて，土木学会年次講演会概要，第26回，pp. 43, (昭.46). 10
- 11) 奥村敏恵・堀川浩甫：鋼板の延性切欠破壊，土木学会論文集，第155号，pp.1, (昭.43). 7
- 12) 伊藤学・多田安夫・猪股俊司・菊地洋一：橋梁設計の原則と問題点，土木学会誌，第57巻，第4号，pp. 1, (昭.47). 4