平面ひずみ場における圧子インデンテーションの光塑性解析*

島 本 聡*¹, 高 橋 賞*²Experimental Studies on the Photo-Plastic Analysis
of Indentation in the Plane Strain Field

Akira SHIMAMOTO and Susumu TAKAHASHI

Using a polycarbonate specimen, a wedge-type indenter was applied to the straight edge of a semi-infinite plate under a plane strain condition to conduct photo-plastic and Moiré analyses. As a result, it was found that the strain distribution at the tip of the indented depth was largely dependent on the shape of the wedge applied.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Photoplasticity, Plasticity, Plane Strain.

1. 緒 言

一般構造物における dead load による応力・ひずみおよび溶接構造物の残留応力・ひずみの解析において、光弾性実験法が理論弾性学とならぶ一つの実験手法であるのと同様に、光塑性実験法も理論塑性学とならぶ一つの実験手法としてめざましい発展を遂げつつある。

構造物を設計するに際して、Plastic design または limit design がしばしば行われる。したがって新しい実験手法として、降伏点を越えた塑性領域を含む応力、ひずみ解析のほかに圧延、引き抜き、ならびに単純なポンチあるいは圧子 Indentation によって塑性変形の流れや塑性変形領域を明らかにすることは、塑性機構を解明するうえでもっとも重要な方法である。しかしながら、応力・ひずみの関係が簡単な Hooke の法則にしたがう弾性学と違って、複雑な非線形関係にある塑性学では、弾性問題とは比較にならぬ解の難しさがあるために、あまり研究はなされておらず、ほとんどその機構が明らかにされていないのが現状である。

最近、中村・戸沢ら⁽¹⁾は金属による圧子の平面ひずみ押し込みにおける材料流れについて報告している。西田・本堂⁽²⁾⁽³⁾らは光塑性法による塑性変形の研究について報告し、(1)理想的弾性を呈すること、(2)しま次数 N と主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) の間の各関係が比例関係であることの二つの条件をあげている。(1), (2)の条件について著者⁽⁴⁾⁽⁵⁾はすでに前報で明らかにした。

そこで、本研究はこれまでの研究ではいずれも不明確であった平面ひずみ場における Indentation の光塑性問題を明らかにするために、半無限板の直線へりに平面ひずみ状態でくさび形圧子角度 θ を系統的に変えて押し込み、くさび形圧子先端の光塑性しま次数とひずみの関係および押し込み圧子先端のひずみ分布がどのような状態の過程をへて進められていくかについて、ポリカーボネイト材の試験片を用いて、モアレ法ならびに光塑性法を併用し考察を行った。

その結果、特にくさび形圧子の形状によって Indentation が異なる機構でなされることを見だし、圧子先端のしま次数および塑性領域の長さとはひずみが比例関係にあることを明らかにした。

* 昭和62年11月3日 北陸信越支部北陸地方学術講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月20日。

*¹ 正員、埼玉工業大学 (〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

*² 正員、関東学院大学 (〒236 横浜市金沢区六浦4834)。

2. 試験片および実験方法

2.1 供試材および試験片 試料は、市販のポリカーボネイト(レキサン 9030)の帯板を供試材とした。試験片の厚さは $t=2\pm 0.05$ mm で、図 1 に示すような幅 $b=90$ mm, 長さ $d=120$ mm の試験片を作成した。試験片表面には図 2 に示すような 1 ピッチ $25.4\ \mu\text{m}$ (1 000 本/in) の直交格子を写真焼付け法によって刻んである。またくさび形圧子は、快削黄銅(C36 O 4 B)の $\phi 10$ mm を用い、その形状は図 3 に示すように厚さ 2 mm, 幅 10 mm で頂角は 30, 45, 60, 90, 120° のくさび形である。

2.2 実験方法 本実験では光塑性法とモアレ法を併用して図 4 に示すような装置を用い、試験片①を厚み方向の変形を 2 枚の強化ガラス板と金属の拘束板②とボルト③によって拘束してある。したがって試験

図 1 試験片の形状と寸法

図 2 PR-格子の顕微鏡写真

図 3 くさび形圧子の形状

片厚み方向のひずみ $\varepsilon_z (= \varepsilon_3)$ は完全に拘束されており, $\varepsilon_z = 0$ のいわゆる平面ひずみ場になっている。荷重は段階的に負荷し、くさび形圧子の押し込みを行った。光塑性じまおよびモアレじまの各パターンを同時に観察し、各荷重点において順次写真撮影を行った。また各圧子荷重は約 15 s 間一定に保持し、平面ひずみ場におけるひずみ算出は各荷重点において写真撮影したモアレじま写真のネガフィルムを拡大投影機にかけ、無荷重状態の格子じまを基準(1 格子間隔 $25.4\ \mu\text{m}$)にして求めた。

3. 実験結果および考察

半無限板の直線へりに平面ひずみ状態で段階的に荷重を負荷することによりくさび形圧子を押し込み、圧子角度 θ を系統的に変えて実験を行い、塑性変形が圧

図 4 試験片の拘束装置

図 5 光塑性じま次数と主ひずみ差の関係

図 6 30~90° くさび形圧子の押込荷重 392 N による光塑性じま写真

子角度 θ による影響ならびに、圧子先端の広い領域のひずみ分布の変化の過程を光塑性じまおよびモアレにより調べた。

3.1 光塑性的性質 平面ひずみ場における光塑性じま次数 (N) と主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) との関係を図 5 に示す。図 5 からわかるように平面ひずみ場における光塑性じま次数は、圧子角度 θ の影響を受けることなく実験した全範囲にわたって直線関係が認められ、光塑性じま次数 (N) は主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) と比例関係にあることが明らかになった。

3.2 くさび形圧子下の材料の変形 図 6 は、30°~90° のくさび形圧子を半無限板の直線へりに平面ひずみ状態で、押込荷重 $p=392$ N における写真である。図 6 からわかるように圧子角 $\theta=30, 45, 60^\circ$ では最大ひずみの点 (写真でしまが円形に密集している点) は、くさびの左右に分離して 2 箇所存在し、引裂形 Indentation であるのに対し、圧子角度 $\theta=90, 120^\circ$ では上から下に圧縮され、分離はなされず、いわゆる圧縮形 Indentation で変形が領域 I, II, III の三つに大別されることがわかる。しかし変形領域 I は、圧子直下で材料の変形が上から下に圧縮される圧縮変形であり、領域 III は直線へりに平行な方向の圧縮変形、すなわち押込方向の伸び変形で直線へりの盛り上に影響することがわかった。さらに領域 I と III の間の領域 II は表面の沈降に影響する押込方向のせん断変形である。以上のことから、光塑性じま写真から圧子下の変形状態が視覚的に認められる。

また圧子との接触境界近傍のひずみは領域 III が大で

図 7 最大ひずみと圧子角度の関係

あるのに対し、変形領域の広さは領域 I (圧子の押込方向) が広いことがわかった。

3.3 くさび形圧子角度 θ の影響 押込面が平面ひずみ状態の試験片に圧子角度 $\theta=30\sim120^\circ$ のくさび形圧子を押し込んだ場合、圧子角度 θ が大きくなるにしたがって変形領域 I が変形領域 III に比して大きく、表面の盛り上がりが小さくなり材料の変形は荷重の増加とともに圧子角度 θ によって変化するが、荷重がある一定の所まで増大すると変形 (しまパターン) は、ほぼ一定となることがわかった。

したがってこれらを詳しく調べるために、押込過程における変形の増分を求める必要から、各荷重点における最大ひずみ $\epsilon_{\max}$ と圧子先端における塑性領域の長さ d [mm] (圧子先端から黒い扇形に近い先端までの距離をここでは塑性領域の長さとして定義する) を求め示したのが図 7 と図 8 である。

図7からわかるように最大ひずみは圧子角度 $\theta = 30^\circ$ から 45° の間ではわずかな低下が見られるが, $\theta = 45^\circ$ から 120° では圧子角度 θ の影響は認められずほぼ一定であった. 図8は左子先端における塑性領域の長さ(d)と圧子先端の主ひずみ差($\epsilon_1 - \epsilon_2$)の関係でほぼ直線関係にあることが確かめられ, かつ塑性領域の成長に比例して主ひずみ差($\epsilon_1 - \epsilon_2$)も増加することがわかった. このことは圧子点の十分離れた領域では変形が弾性変形であるのに対し, 圧子との接触面近傍の変形は円形状の完全塑性変形を示している. したがって塑性領域の長さ d [mm] を測定すれば一義的に主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) が求められることがわかった.

一方圧子角度 90° と 120° の場合, 接触表面近傍に変形の小さな領域(圧子先端の最大ひずみ点)が存在している. この現象は, 摩擦が大きく圧子角度の大きな場合に接触表面近傍がデッドメタルになるというHaddowらの解析結果⁽⁶⁾に対応する.

図8 圧子先端の塑性領域の長さと主ひずみ差の関係

圧子下の変形は, 押込みによって生じた変形による変形抵抗が影響しているものと思われる. また圧子との接触表面近傍に変形の小さな領域(圧子先端の最大ひずみ点)が存在することは, 圧子と材料表面との相対変位が少ないことによる. このような押込みでは摩擦状態の多少の変化は圧子下の変形にほとんど影響しない. このことについては中村らも報告⁽¹⁾している.

3.4 くさび形圧子の押込深さの影響 圧子の押込深さ h [mm] と主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) の関係を図9に示す. 図9からわかるようにくさび形圧子の押込深さ h は圧子角度 θ の違いによる影響はあまり認められず, ばらつきはあるものの一つの曲線上にのり圧子の押込深さ h とともに主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) も増加することが確かめられた.

図9 圧子の押込深さと主ひずみ差の関係

図10 45°と90°くさび形圧子の押込荷重1470 Nによる光塑性およびモアレじま写真

図 11 図 10 での対称軸に沿った主ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) 分布

3.5 光塑性およびモアレを併用する方法の有効性

段階的に荷重を負荷することによりくさび形圧子を押し込みモアレじま、および光塑性じまの両模様を観測し、図 10 に示すように各荷重点において写真撮影した。押し込み荷重 $p=1470\text{ N}$, $\theta=45^\circ$ および 90° のくさび形圧子を押し込んだ場合の代表的しま模様写真を図 10 に示す。図 10 の a と b, c と d において光塑性じま模様からはくさび形圧子先端近傍に大きな変形領域の存在が定性的ではあるが視覚的に確認することができ、変形領域の広さも容易に知ることができる。しかし、ひずみ成分 ϵ_1, ϵ_2 を分離して求めることは、非常に困難である。一方、モアレじま模様には大きな変化はなく、変形領域の広さはもちろん、変形の進行状況も視覚的に知ることがむずかしい。しかし、従来の研究ではモアレじま間隔の変化を 0.01 mm までしか測定できなかったが、本研究では写真撮影したしま写真のネガフィルムを拡大投影機にかけ 0.001 mm まで測定することで、光塑性法では困難であったひずみの定量測定が可能となり、光塑性法で確認した変形領域での定量的ひずみ分布を知ることができた。例えば図 10 の a と c の光塑性じま写真で確認された、ひずみ集中の最も著しいくさび形圧子の押し込み先端近傍の(図 10 での対称軸に沿った)ひずみ分布をモアレ法で求めると図 11 のようになる。図 11 よりわかるように図 10 の b と d のモアレじま写真の変化はほとんど肉眼では識別できない場合でも光塑性じまは変化しており、それによってモアレじま間隔を測定すると、図 11 のようにくさび形圧子先端において明確なひずみ集中が存在していることがわかる。また、圧子角度 $\theta=45^\circ$ と 90° の場合はほぼ $\epsilon_2=|\epsilon_1|$ で圧入先端からの深さが $h=0.6\text{ mm}$ までは主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 の減少は認められずほぼ一定

であるが、 $h>0.6\text{ mm}$ を超えると $\theta=45^\circ$ では急激に主ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) は減少する。しかし、 $h=3.0\sim 5.5\text{ mm}$ の間では主ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) は減少せずほぼ一定であるが、 $h>5.5\text{ mm}$ を超えると再び主ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) の減少が認められた。また、 $\theta=90^\circ$ の場合は急激な主ひずみ (ϵ_1, ϵ_2) の減少は認められず、 $h>3\text{ mm}$ を超えるとほぼ比例関係にあることがわかった。

4. 結 論

光塑性用材料であるポリカーボネイト材を用いて、半無限板の直線へりに平面ひずみ状態でくさび形圧子を押し込み、Indentation という塑性変形が圧子角度 θ によってなされる機構について光塑性およびモアレ法を併用して調べた結果次の知見が得られた。

(1) 平面ひずみ場における光塑性じま次数 (N) と主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) は圧子角度に関係なく直線関係であることが明らかとなった。

(2) くさび形圧子の押し込みによる材料の変形領域は三つに大別され、圧子直下から十分離れた押し込み方向の圧縮変形領域 I と直線へり近傍のへりに平行な圧縮変形領域 III および領域 I と III の間にあるせん断変形領域 II であることが確かめられた。

(3) くさび形圧子の圧子角度 θ が大きくなるにしたがって、領域 III に比べて領域 I が大きくなり、圧子角度 $\theta=30, 45, 60^\circ$ は最大ひずみが左右に分離して 2 箇所存在するのに対し $\theta=90, 120^\circ$ では圧子の先端に 1 箇所存在することがわかった。

(4) 主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) と塑性領域の長さ (d) は直線関係にあることが確かめられた。したがって主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) を求めることによって従来測定が不明確であった塑性領域の範囲を明確にすることができた。

(5) くさび形圧子の押し込み深さ (h) と主ひずみ差 ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) との間には指数関数的関係があり、かつ圧子角度 θ の違いによる相異が若干認められた。

(6) 平面ひずみ場におけるくさび形圧子の押し込み軸上での主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 は、ほぼ $\epsilon_2=|\epsilon_1|$ で二次元変形の実験条件が満たされることがわかった。

(7) 光塑性法を単独で用いるよりもモアレ法を併用することにより今までは不明確であった平面ひずみ場におけるしま次数とひずみの関係が明らかとなり、くさび形圧子の押し込み先端におけるひずみ解析が可能となった。

文 献

- (1) 中村・戸沢, 塑性と加工, 17-180(昭51), 23.

(2) Nishida, M. and Hondo, M., <i>Proc 6th JNC Appl Mech.</i> , (1956), 137.	(4) 島本, 機論, 47-421, A(昭56), 959.
(3) 西田・ほか2名, 光弾性実験法, (昭49), 469-486, 日刊工業.	(5) 島本, 機論, 51-472, A(昭60), 2765.
	(6) Haddow, J. B. and Johnson, W., <i>Int. J. Mech Sci.</i> , 3 (1961), 229.

討 論

〔質問〕 國 尾 武〔慶応大学理工学部〕

論文を興味深く拝見させていただいた。次の二点について質問する。

(1) 圧子下における試験片と拘束板との摩擦力によって、主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 は影響を受けるのではないかと思うが、いかがか。

(2) 圧子先端における塑性領域に関連して、光弾性等色写真の圧子先端の黒い部分とモアレ写真の黒い部分とが、略々一致していると考えてもよろしいか。

〔回答〕 (1) 圧子との接触表面近傍に変形の小

い領域があることは圧子と材料表面との相対変位が少ないことを意味する。したがってこのような押込みで試験片と拘束板（強化ガラス板）との間の摩擦状態の多少の変化は圧子下の ϵ_1, ϵ_2 に対してはほとんど影響しないものと思われる。

(2) ご指摘の点については論文中の等色線しま写真とモアレしま写真とは倍率が異なるのでこの写真の比較だけでは塑性領域が異なるように見える。しかし、倍率を一致させれば両写真とも塑性領域の扇形状の黒い部分が一致している。