

論文

[1121] 光弾性実験によるコンクリートのせん断試験用供試体の主せん断応力分布

正会員 浅井貞重 (東洋大学土木工学科)

1. まえがき

材料の強さを検べるには色々の試験方法があるが、それらの試験方法は、大抵、試験断面が最弱断面で弾性時における応力分布は一様か単調な変化となっているのが普通であって

$$\text{破壊時の応力分布} = \text{弾性時の応力分布} \times \frac{\text{破壊時の荷重}}{\text{弾性時の荷重}}$$

なる仮定の下に「材料の固有の強さ」を求めている。そこで、この思想をせん断試験に適用しようとすると、上記の条件を満す供試体と実験装置を作ることが理論的に難しいので、現在は金属でもコンクリートでもせん断強さを求めるための統一された試験方法は規格化されていない。それゆえ、材料のせん断強さは、その材料に作用する力の方向によっては引張強さや圧縮強さよりも重要性を持つ場合があるにもかかわらず、各自は適当な方法、たとえば一様な厚さの材料については図-1のようなものを、せん断強さの実験と称して求めているが、^{註1)} それらの試験断面是最弱で単純せん断応力状態とはなっていないので、求めたせん断強さは当然、実験の方法により異なる。したがって、それらから得られた実験結果を比較検討してもあまり意味はないし、また、その値を他に適用するときには注意を要しよう。以上は周知のことである。しかし、図-1の方法は現在広く用いられているので、弾性時における主せん断応力の分布と応力集中係数を求めておくことはせん断応力が生じる部材の設計に際して一義があろう。

2. 光弾性実験

前章の主せん断応力分布を検べる場合、光弾性実験を用いると等色線写真の縞次数 n と主せん断応力 τ_1 の関係は、光弾性試験片の厚さと光弾性感度を、それぞれ t 、 α とすると式(1)で表わされるので、試験片全面についての等色線写真を撮れば、試験片全面についての主せん断応力分布が可視的に直接判明するので都合がよい (ただし、主せん断応力方向は、これだけでは不明)。そこで本論文では光弾性実験の諸元を表-1として、

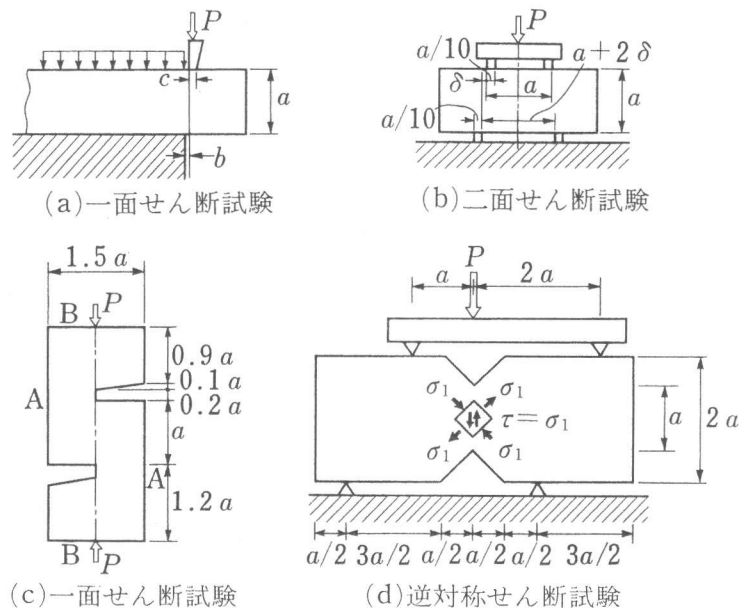


図-1 現在よく用いられているせん断強さの試験法

注1: 他に破壊包絡線をかいて、せん断母強度を求める方法がある。しかし、この方法は論理的には名答であるが、実験のとき境界条件を満たすのが難しいので、ここでは省いた[1]。

等色線写真は荷重状態がわかるように明視野で撮って示すことにした。つぎに上記の条件の下に図-1の荷重状態につき光弾性実験を行なうと、図-2のような等色線写真を得た。図-2を説明すると、まず図-2(a)は図-1(a)の「一面せん断試験」を単純化したもので、試験片を左側の遠方で支え、 $a=18\text{mm}$ 、 $b=0.36\text{mm}$ 、 $c=0.75\text{mm}$ 、 $P=20\text{kgf}$ とした場合の光弾性写真である。すなわち図-2(a)において、光弾性縞次数 n は式(1)より τ_1 に比例するから、 τ_1 の分布は上下がほぼ逆対称で刃先部に集中しており、その最高値 n_{max} は刃先が鋭利であればあるほど、いくらでも増大し、弾性理論上では無限大となる。しかし、実際の場合には刃先が材料内に食い込み、荷重点の近傍は既に塑性状態となっているので弾性体として探究しても意味はないので、ここでは割愛する。

$$\tau_1 = \frac{n}{2at} \quad (1)$$

表-1 光弾性実験の諸元

光弾性材料=DAP樹脂

光弾性感度 $\alpha=0.85\text{mm}/\text{kgf}^{(2)}$

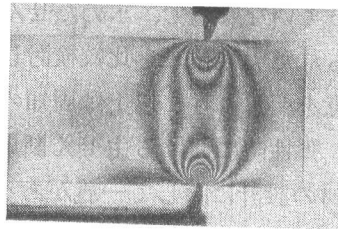
試験断面(長さ×板厚)= $18\text{mm} \times 6\text{mm}$

せん断荷重= 20kgf

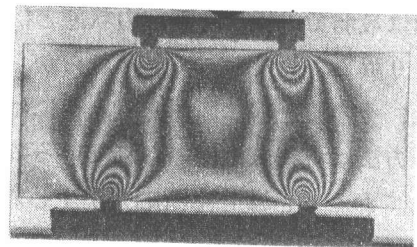
本実験の刃先の幅 c は 0.75mm であるので、光弾性感度の式によ

り、刃先部の最大縞次数 n_{max} は式(2)となる。また n_{max} の位置 y は材料力学の公式より、境界面から式(3)の値だけ入った所となる。つぎに図-2(a)の縞の頂点を連ねた線が破断面になるとして、その線上の n の値をグ

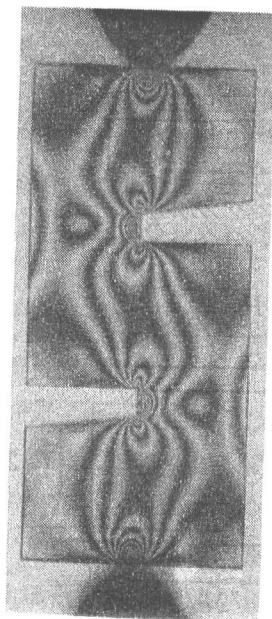
ラフにすると図-3(a)となり、 n の平均値 n_{mean} を、試験片の半幅を4等分してシンプ



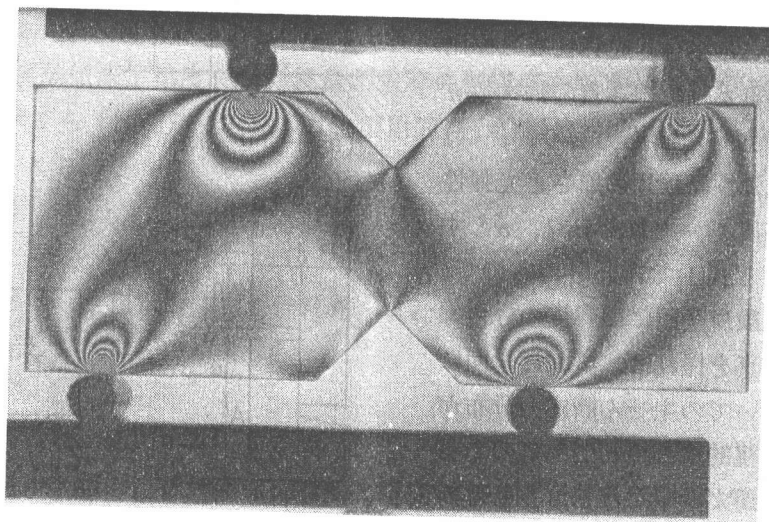
(a)一面せん断試験法



(b)二面せん断試験法



(c)一面せん断試験法



(d)逆対称せん断試験法

図-2 図-1の光弾性等色線写真(各試験の断面積の大きさは等しくしている)

注2: 図-7(b)より $\alpha = \frac{\pi D}{8} \cdot \frac{n}{P} = \frac{\pi \times 18}{8} \cdot \frac{2.8}{20} = 0.85\text{mm}/\text{kgf}$

ソンの1/3則を適用して求めると式(4)となる。ただし式の(4) n の値は、縁において理論的にはゼロとなるべきものである。換言すれば、22.7より0.29mmの間にゼロになるべきであるが、ここでは22.7として計算している。また破断線は図-1(a)の**b**と**c**の大きさにより緩い曲線となるが鉛直線としている。

ここで n_{max} を n_{mean} をで除した商を以って応力集中率 K とすると式(5)と求まる。ただし、ここで注意をしたいのは、式(5)より K は一応、4.03と求まったが、 n_{max} の値は式(2)の c の値により如何様にも変化をするので、

$$n_{max} = \frac{\alpha P}{c} = \frac{0.85 \times 20}{0.75} = 22.7 \quad \text{f.o.} \quad (2)$$

$$y = 0.786 \times \frac{c}{2} = 0.29 \text{mm} \quad (3)$$

$$n_{mean} = \frac{9/4}{9 \times 3} (1 \times 22.7 + 4 \times 6.2 + 2 \times 3.7 + 4 \times 2.6 + 1 \times 2.3) = 5.63 \quad \text{f.o.} \quad (4)$$

$$K = 22.7 / 5.63 = 4.03 \quad (5)$$

K の値も、それに付随して変化をするということである。なお、本論文とは直接の関係はないが、 τ_{xy} の分布については载荷方法が本法とは少々異なるが、Filon [2]の研究が有名であって、 a/b の値により大きく変化をすることが発表されており、実験によっても証明されている。

つぎに図-2(b)は「二面せん断試験」であり、試験片の形状とスパンとの関係は試験法基準[3]による。この方式は図-1の(c)および(d)と比べると試験片を作るのが容易であり、かつ実験もやり易く、 τ_1 の分布状態

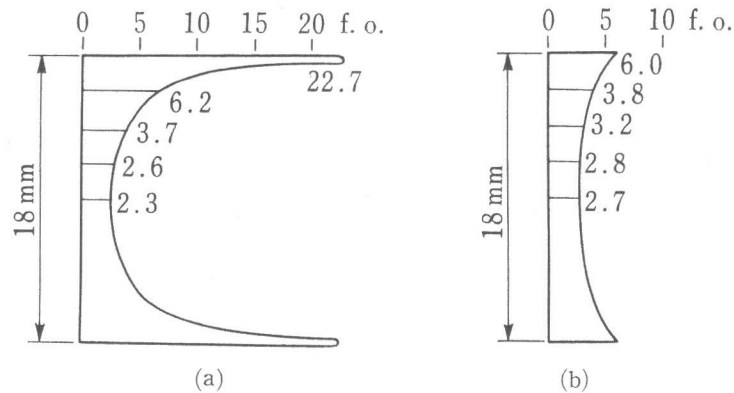


図-3 図-2の(a)と(c)の試験断面の n 分布

は「一面せん断試験」の約1/2となることが多くの実験により確かめられている。それゆえに、ここでは図-1(b)で $P=40\text{kgf}$ 、 $\delta=1\text{mm}$ として実験をし、 τ_1 と K の計算は割愛することにした。なお図-2(b)のスパンの中央をみると、点载荷による応力集中の影響があるのと、4点载荷方式なるがゆえに若干の繊維応力が惹起しているのがわかる。この「二面せん断試験法」はボルトや鉋のせん断強さを求めるのによく応用されているが、図-2(b)のように多くの場合、試験断面は純せん断応力状態とはなっていないことに注意を要しよう。

つぎに図-2(c)の試験片の形状・寸法は規格案[1]による。この試験片の試験断面は中央部の垂直面であり、 n の分布は図-2の(a)(b)と同様に上下の切欠き底部に集中しているが、その最大値 n_{max} を実測すると約6.0である。そこで図-2(a)と同様に n の分布を求めると図-3(b)のようになるので K の値は式(4)と同様にして求めると式(6)(7)と求まる。なお、ここで式(4)と(6)が一致しないのは、式(4)で述べた仮定もあるが、 τ_1 につき考えているためで、 τ_{xy} につき考えれば一致するものと思われる。注意として、図-1(c)の試験方法は図-1の(a)(b)と比べると、試験断面の主せん断応力の変化率は小さいが、切欠きの背部Aには大きな引張応力が、また载荷点Bには大きな応力集中が生じ、それらの応力は試験断面の破断応力よりも卓越するので、AおよびBの部分

強することが必要となろう。

つぎに図-2(d)は一般に「ルーマニアせん断試験法」[1]または「Iosipescuの試験法」[4]と呼ばれているものであるが、我が国では「奥田克巳の特異点の研究」[5]として、それ以前より、よく知られているものである。図-2(d)の試験片の形状は規格案[1]を参考にして作ったもので、上下のノッチの底間が試験断面であり、 $P=60\text{kgf}$ とすると、せん断荷重 $=20\text{kgf}$ となる。ここで試験断面の n の値を一定と仮定して梁理論により求めると、 $\tau_{xy}=(P/3)/(a \times t)$ であり、図-1(d)より $\sigma_1 + \sigma_2 = 0$ であるから、 $\tau_{xy} = \tau = \tau_1$ とおくことにより、式(1)より式(8)となる。これに対して図-2(d)の試験断面の n の値はノッチ低部に少量の応力集中が認められるものの、ほぼ、 $n=1.8 \text{ f.o.} = \text{const.}$ となっているので、単純せん断応力場とみなせることがわかる。

なお図-1(d)の試験片について実験をすると、試験断面の破壊よりも点荷重の面圧による破壊の方が先行することが図-2(d)より明かなので、これを防ぐためには当金・補強が必要となることがわかる。しかし、それにより応力分布が大きく変化をしたり、三次元応力問題とならぬように考慮しなければならない。また、実験およびFEMによればノッチの角度が 90° で、ノッチの深さが試験片の深さの22.5%のときが最も一様なせん断応力場となるという論文[4]がある。さらにノッチが浅いときは、ノッチ角を 102.6° にして、ノッチの底に小さい丸味を付けると、よいという解析論文もある[5]。

$$n_{\text{mean}} = 3.46 \quad \text{f.o.} \quad (6)$$

$$K = 6.0 / 3.46 = 1.73 \quad (7)$$

$$n = 2 \quad a t \tau_1 = \frac{2 \alpha P}{3 a} = \frac{2 \times 0.85 \times 60}{3 \times 18} = 1.9 \quad \text{f.o.} \quad (8)$$

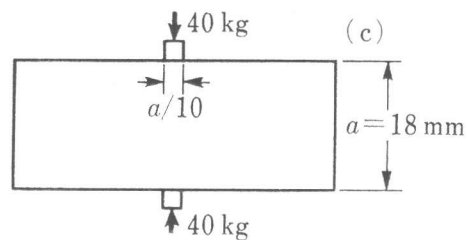
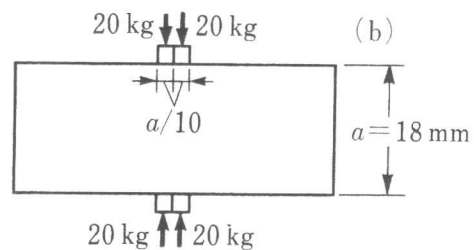
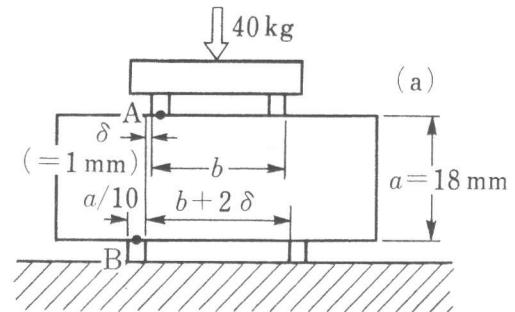


図-4 スパンと荷重の変化による載荷

3. 二面せん断強さと一面せん断強さの境界

前に示した図-1(a)~(d)の試験法について、 τ_1 の分布の均等性、試験片作成の手間および実験の難易度などを考えると、最も実用的なものは通常よく用いられている「二面せん断試験法」であろう。そこで二面せん断試験法のせん断破壊につき、つぎのような拡大解釈を考えた。すなわち、図-4(a)は図-1(b)のスパンを b で置き換えているものであるが、 $a=18\text{mm}$ 、 $\delta=1\text{mm}$ 、 $P=40\text{kgf}$ として、 b が24、21、...3.6mmの場合と、図-4の(b)(c)につき記号を表-2のように付けて一連の等色線写真を撮ると図-5を得る。図-5において、せん断破壊が生じ易い断面としてはA B断面(図4(a)参考)と中央断面の二つが考えられるので、この両断面における n の分布

を示すと図-6(a)(b)となり、 n により囲まれた面積はせん断力を示すことになるから、何れの場合も中央面よりAB断面において破壊する公算が大きいことを示している。ただし、iとjの場合はAB断面と中央断面はほとんど一致をしている。ここで図-6(a)につき、a, b …… jの各場合の n 分布を観ると、jはaの2倍となり、二面せん断から一面せん断に移行する過程がわかる。一方、図-6(b)については、a, bは図-2(b)と同様に4点荷重方式による曲げと点荷重による面圧の影響が存在しているのがわかる。d~hについては $n \doteq 0$ (すなわち、 $\tau_1 \doteq 0$)の位置が上下の縁部に1個または2個存在し、かつ梁の中央部の n の値は縁部の n の値と同位となって、梁としての繊維応力と載荷重による支圧応力が複雑に干渉合っているのがわかる。また、上下の縁において、スパンが $b-a/10, b+2\delta+a/10$, 縁から $n \doteq 0$ までの距離が δ_1, δ_2 とすると、その比は式(9)となるので、スパンが小さいときは点載荷でも平板載荷でも、載荷部近傍を除けば τ_1 の分布はほぼ同じである。

表-2 図-4のスパンと記号との関係

$b(\text{mm})$	24	21	18	15	12	9	6	3.6	図-4(b)	図-4(c)
記号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j

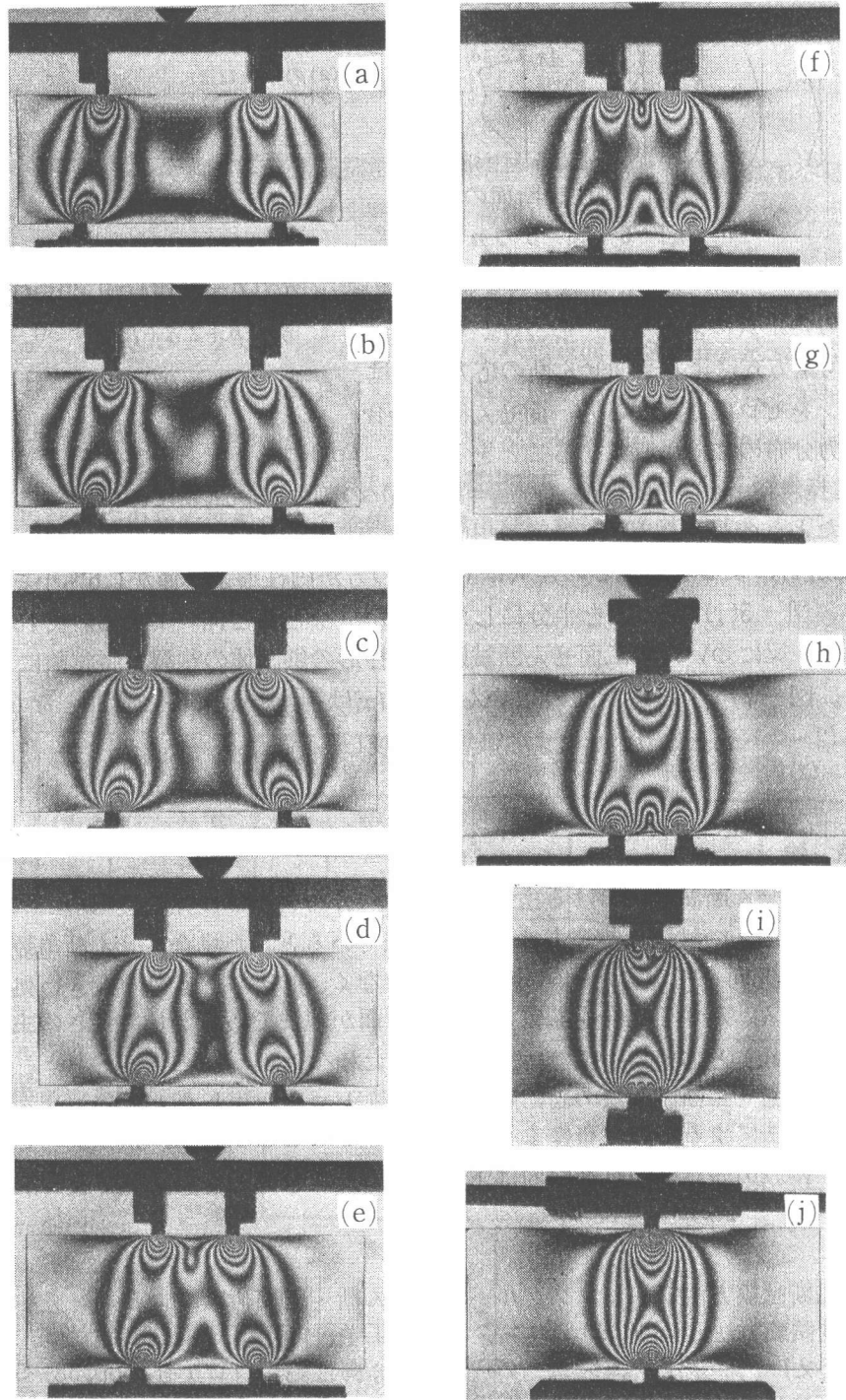
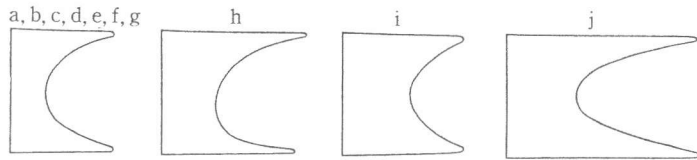
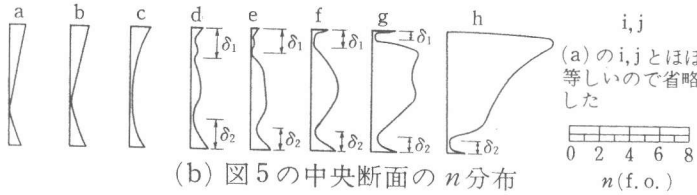


図-5 図-4についての等色線写真

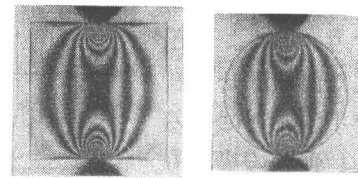


(a) 図5のAB断面の n 分布



(b) 図5の中央断面の n 分布

図-6 図-5の n の分布



(a) (b)

図-7 正方形と円柱形の割裂引張試験の n の分布

なお式(9)の値が上縁と下縁で異なるのは繊維応力の正負によるものであろう。以上は、4点荷重方式による二面せん断の応力分布はスパンをゼロに収束すると一面せん断の場合

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 / (b - a/10) &\doteq 0.36 = \text{const.} \\ \delta_2 / (b + 2\delta + a/10) &\doteq 0.24 = \text{const.} \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\tau_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) / 2 = (2 / (1 - \eta^2)) \cdot P / \pi r t \quad (10)$$

の応力分布の2倍に収束することを示した。自明のことであろう。そこで図-7(a)と(b)は立方形(一辺長=18mm)と円柱形(直径=18mm)の割裂引張試験法の供試体に載荷重 $P=20\text{kgf}$ が作用したときの等色線写真であるが中央の垂直断面における n の分布状態は、ほとんど同じである(理論解析による引張強さの差異は立方形の方が円柱形より僅か1.6%小さい[6])。これは図-2(a)と、図-5(j)で n の値を半分にしたものが、ほとんど同一である。それゆえ、これを等しいとおくと、梁についての二面せん断試験は円柱形の供試体の割裂引張試験により代替できることになる。図-7(b)の試験断面の主せん断応力 τ_1 は $\eta = y/r$ とすると式(10)となり、 $P / \pi r t = \sigma_1$ とおくと、 $\tau_1 = (2 \sim \infty) \sigma_1$ となり、 τ_1 による破壊を示唆している。

4. 結論

通常のせん断試験における主せん断応力の分布を光弾性実験で求め、次ぎの結論を得た。

- 1) 図-1の試験片が等方性材料で出来ているとした場合、せん断亀裂の伝播は特定の面要素や応力の方向を指定した τ_{xy} や τ_{xz} などではなく、主せん断応力の大きい処へと順次に進行すると考えられる。かかる場合を想定し、せん断断面が弾性であるとしたときの主せん断応力の不均一性 (shear lag) と応力集中係数につき統系的に検べた。
- 2) 二面せん断試験法のせん断断面の間隔をゼロに収束したときの、せん断断面の応力分布は割裂引張試験法による応力分布により近似ができることを示した。
- 3) 割裂引張試験の試験断面は主せん断応力で破壊する可能性があることを示した。

参考文献

- 1) せん断試験方法ワーキンググループ：せん断・圧縮荷重によるコンクリートの見かけのせん断強度試験方法 (JIS 原案)、コンクリート工学、vol. 23, No. 3, pp. 25-26, 1985. 3
- 2) たとえば、ティモシエンコ・グーディア：弾性論、コロナ社、pp. 58-59, 1977
- 3) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準、日本コンクリート工学協会、pp. 25-26, 1984
- 4) Sullivan, J.L., et al : Shear properties and a stress analysis obtained from vinyl-ester Iosipescu specimens, Exp. Mech., No. 24, pp. 223-232, 1984
- 5) 奥田克巳：二次元弾性問題に於ける特異点、造船協会会報、No. 56, 65-125, 1935.
- 6) 土木学会：土木工学ハンドブック、技報堂、642-644, 1957.