

## 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度

---

文献調査委員会

---

### 1. はじめに

文献調査委員会では、ひろく海外文献にみられる諸外国の研究開発の情報にもとづいて、土木工学上注目すべき世界的な新技術の動向を解説資料としてまとめ、会員読者の参考に供するべく、さきに「揚水発電の展望\*」を解説したが、今回は「組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度」について記事をまとめてみた。

近年、アーチダム、モノレール、シェル構造物など、各種の曲線または曲面構造物が盛んに築造される趨向に当って、これらのコンクリート構造物をより合理的に設計するために、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度を解明することが重要な研究問題となってきた。そこでこの問題に関して近年発表された主要な研究成果をひろく内外の文献について総括整理し、その研究の現状と残された問題点を解説した。また、種々の破壊理論と比較し、これまでの破壊理論がいずれも組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度を十分な精度では表現し得ないことを指摘し、さらに、これらの研究成果を設計面へ利用する試みについても若干言及した。

本解説記事をまとめるに当って、中央大学助教授 西沢紀昭氏ならびに小野田セメントKK中央研究所 堀素夫氏から貴重な御教示をいただいた。ここに厚く感謝の意を表する。

取り扱う問題の性格から内容が専門的に片寄り、一般読者にとっては説明不足な点が多く、専門の方々から見れば調査不十分な点が目立つことと思われるが、今後資料の修正を行なう上で、本記事の文責を負う当委員会に対して批判のお言葉をいただければ幸いである。

### 2. 序説

コンクリートは、土、岩盤、鋼材などとともに土木技術者にとって身近かな材料であるが、コンクリートの基礎的な性質は、他の材料の場合と同様に、少數の専門家の研究の対象には取り上げられても、一般の読者には関心の薄い問題であるかも知れない。しかし、コンクリートの分野にも、各種の曲線または曲面構造が盛んに採用されるようになり、土木技術者すべてに、高度な基礎的な洞察力が要求されているから、今後は、この方面にも無関心でいるわけにはいかないであろう。

\* 本誌第 48 卷 10 号, pp. 44~51

柱に用いるコンクリートは単純な圧縮応力を受けた状態で破壊するから、主として、コンクリートの単純圧縮強度を設計の基準としてきた。はり部材の場合、はりが受ける軸方向引張応力とこれに直交する方向のせん断応力に対しては、鉄筋を用いてコンクリートを補強しているが、コンクリートの強度の基準としては、ここでも単純圧縮強度が用いられてきた。コンクリートのせん断強度を考慮する場合でも、せいぜい直接せん断強度であった。しかし、引張応力に対して十分な鉄筋を用いて補強した鉄筋コンクリートはりの場合、はりの破壊を支配するのは、軸方向の圧縮応力を受けたコンクリートの軸に直交する方向のせん断強度か、または軸に直交する方向にせん断応力を受けたコンクリートの軸方向の圧縮強度、すなわち、組み合わせ応力を受けたコンクリートの破壊強度である。

アーチダムの場合には圧縮一引張り、モノレールなどでは曲げ一ねじり、シェル形状の構造物では、3軸引張り、または圧縮一圧縮または曲げ一ねじりなどの組み合わせ応力、または組み合わせ荷重状態におけるコンクリートの破壊強度が、構造物の安全性に關係している。

また、重力ダムなどマスコンクリートにおいては、三次元的な組み合わせ応力状態が内在するから、このような組み合わせ応力状態下にあるコンクリートの破壊強度が問題になることがある。このように、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度は、コンクリート構造物の破壊荷重、すなわち安全性に關係するものであり、今後、構造物の破壊荷重を設計の基準とする塑性設計法または極限強さ設計法が普及するにともなって、ますます重要な問題になるものと思われる。ここで、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度を取り上げたのも、このような材料の基礎的な性質に対する技術者の注意を喚起し、コンクリート構造物をより合理的にかつ安全に設計するための参考に供したいと考えたからである。

最後に、材料の強度すなわち破壊現象は、もちろん、土木技術者だけの問題ではなく、他の分野の多くの技術者や科学者が興味を持っている問題である。特に、これを材料の内部組織と関連して考える物性論的な研究が、物理、金属の分野では非常に進んでいる。外国文献の調査と合わせて、他の分野の研究成果に注目することも大切であると考え、延性材料の転位論とならんで、脆性材料の破壊を微視的に考察した Griffith 理論の概要を、組

み合わせ応力を受けるコンクリートの強度と関連して紹介した。

### 3. 組み合わせ応力の定義

組み合わせ応力を受ける材料の強度とは、二次元的または三次元的な応力状態下にある材料の破壊条件を、後に述べるように応力座標上に表示したものであり、理論的にも、また実用的にも重要な材料の基礎的な性質の一つである。

組み合わせ応力とは、同時に作用している方向の異なる2種類以上の応力のことであるが、一般には、2種類以上の主応力、主応力とせん断力、または互いに直交する方向の軸荷重、曲げモーメント、ねじりモーメントなどもふくめた広い意味で使われている。

このような組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度試験には、かなり複雑な試験装置を必要とするため、既往の研究の数多くはないが、表-1にこれまでに実現された各種の組み合わせ応力状態を分類して示した。また、表-1の方法で試験した場合のコンクリートが受ける組み合わせ応力状態の概略を表-2に示した。

コンクリートは引張りに弱い材料であるから、引張りに対しては鉄筋を用いて補強し、コンクリートが引張応力を受けて破壊しないようになるのが普通である。しかし、2方向版などの応力状態は、3軸引張系 ( $\sigma_1=0, \sigma_2=\sigma_3<0$ ) に近いかから、この方面的研究は今後の課題であろう。

表-1の①には、無筋コンクリート版の2軸曲げ試験を引張一引張系として分類したが、引張側に十分な量の鉄筋を用いた2方向鉄筋コンクリート版の曲げの場合、コンクリートの破壊を支配するのは、圧縮一圧縮系または圧縮せん断系の組み合わせ応力状態である。もちろん、複雑なコンクリート構造物の設計に当たっては、これ以外の組み合わせ応力状態が問題になることもありうる。

### 4. 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度

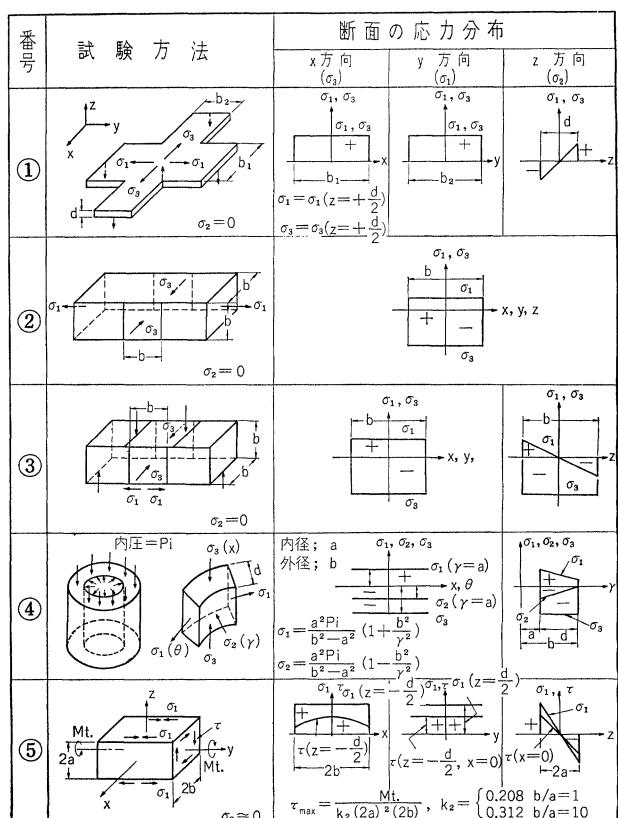
一般に、材料の破壊条件は、三次元主応力座標 ( $\sigma_1-\sigma_2-\sigma_3$ ) 上の曲面によって表示するか、または、破断面に働く垂直応力 ( $\sigma$ ) とせん断応力 ( $\tau$ ) とできる二次元座標 ( $\sigma-\tau$ ) 上の曲線によって表示する<sup>15), 16), 17)</sup>。

コンクリートの場合、3軸圧縮試験が ( $0>\sigma_1=\sigma_2>\sigma_3$ ) の条件 (供試体に不透水性の膜を被せて試験する場合および表-1 ⑪の場合) で行なわれ

表-1 試験方法の分類

	応力の種類	試験方法	研究者名
系 力	1. 引張一引張	① 縁引張一縁引張 (曲げ) ② 単純引張一単純圧縮	坪井、末永 <sup>1)</sup> 西沢 <sup>2)</sup>
	2. 引張一圧縮	③ 縁引張一単純圧縮 (曲げ) ④ 周引張一単純圧縮 (中空円筒の内圧による)	関、西沢、畠野 <sup>3)</sup> G.M. Smith <sup>4)</sup> D.McHenry & J. Karni <sup>5)</sup> 関、西沢、畠野 <sup>3)</sup>
	3. 引張一せん断	⑤ 縁引張一せん断 (曲げ) (ねじり) ⑥ 単純圧縮一直接せん断	S. Armstrong <sup>6)</sup> H.J. Cowan <sup>7)</sup> 坪井、末永 <sup>1)</sup> K.P. Веригин <sup>8)</sup>
	4. 圧縮一せん断	⑦ 単純圧縮一せん断 (ねじり)	L.P. Brice <sup>9)</sup> B. Bresler & K.S. Pistor <sup>10)</sup>
せん 断	5. 圧縮一圧縮	⑧ 単純圧縮一単純圧縮 ⑨ 単純圧縮一周圧縮 (中空円筒の外圧による)	J. Glomb <sup>11)</sup> C.J. Bellamy <sup>12)</sup>
	1. 圧縮一圧縮一圧縮	⑩ 3軸圧縮試験 軸圧 ( $\sigma_3$ ) > 側圧 ( $\sigma_1=\sigma_2$ )	伊東、坂口 <sup>13)</sup>
		⑪ 鋼管被覆コンクリートの1軸圧縮試験	Я.П. Семененко <sup>14)</sup>
3軸応力系			

表-2(1) 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度の試験方法と応力分布の略図



注: ⑪の場合をのぞいて、最大応力または最小応力を  $\sigma_1$  または  $\sigma_3$  で示した。

表-2(2) 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度  
の試験方法と応力分布の略図

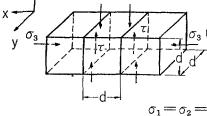
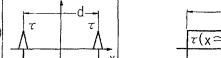
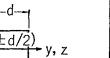
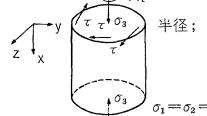
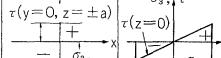
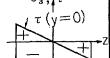
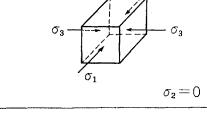
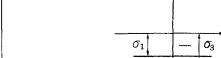
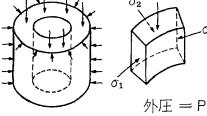
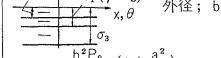
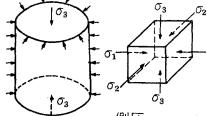
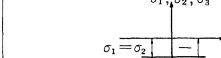
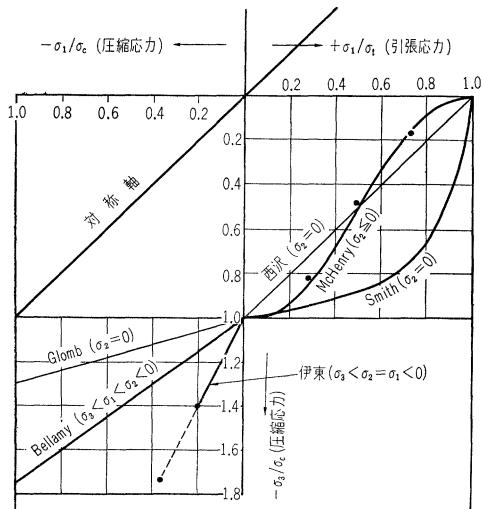
番号	試験方法	断面の応力分布		
		x 方向 ( $\sigma_3$ )	y 方向 ( $\sigma_1$ )	z 方向 ( $\sigma_2$ )
⑥				
⑦				
⑧				
⑨				
⑩				

図-1 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度の実験結果



注:  $\sigma_c$ ; コンクリートの単純圧縮強度

$\sigma_t$ ; コンクリートの単純引張強度

点線: Bellamy の実験結果から  $\sigma_2$  を  $\sigma_1^*$  として表示し直したもの

ているか、表-2(9) の場合 ( $0 > \sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_3$ ) でも  $(\sigma_2)_{max} = p_0$  が小さく、これを無視しているから<sup>12)</sup>、過去の実験

結果はすべて、近似的には  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  系または  $(\sigma - \tau)$  系の二次元座標上に表示できる。

図-1 は、それぞれ、引張応力を単純引張強度 ( $\sigma_t$ ) で無次元化し、圧縮応力を単純圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) で無次元化した 2 軸主応力座標系上に、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度に関するこれまでの実験結果の概略を表示したものである。

図-1 の実験結果は、軸に直交する方向から引張応力または圧縮応力を受けている場合、コンクリートの軸方向の圧縮強度または引張強度が、いずれも、単純圧縮強度または単純引張強度よりも小さくなることを示している。しかし、どの程度の組み合わせ応力を受けた場合に、コンクリートが引張破壊または圧縮破壊のいずれを示すかを表わしてはいない。

この図-1 から、さらにつぎのことがいえそうである。

1) 引張り一圧縮の 2 軸応力を受けるコンクリートの強度は、引張応力の分布によって（すなわち、単純引張り、縁引張り、周引張りのいずれであるかによって）、若干となる。特に、縁引張りに比べて、単純引張り、周引張りの方が条件としては厳しい。

2) 後に述べるように、Mohr の破壊理論によれば、破壊条件は中間応力 ( $\sigma_2$ ) の影響を受けないものであるが、図-1 の実験結果は、引張り一圧縮系、圧縮一圧縮系のいずれについても、コンクリートの破壊条件が中間応力 ( $\sigma_2$ ) に大きく影響されることを示している。

特に、圧縮一圧縮応力系の組み合わせに対して、中間応力が圧縮であれば ( $\sigma_2 < 0$ )、コンクリートの強度はいちじるしく大きくなる。もっとも、3 軸応力状態においても、コンクリート中の間げき水圧が側圧 ( $\sigma_2 = \sigma_1 < 0$ ) と同程度になる場合（不透水膜を被せない供試体の 3 軸圧縮試験などの場合）には、単純圧縮強度とあまり変わらなくなることが指摘されているから注意を要する<sup>3)</sup>。

3) しかし、中間応力 ( $\sigma_2$ ) が、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度におよぼす影響について、まだ定量的な傾向は結論できない。

4) 表-2 の注にも述べたように、Bellamy は、中空円筒の周圧縮一軸圧縮試験において、破壊が中空円筒の内側面から出発しているとして  $\sigma_2 = 0$  を解析の基礎にしているが<sup>12)</sup>、外側面で破壊が起ると仮定すれば、表-2 の⑨に示したように 3 軸応力状態となり、 $\sigma_2$  は最小応力（図-1 の  $\sigma_1/\sigma_c$  に対応する）で、中間応力は  $\sigma_1$  となる。このように考えなおして、実験データを整理すれば、伊東の実験結果とほぼ一致する。この場合、円筒の

壁厚を変えて試験すれば、上記の中間応力 ( $\sigma_2$ ) の影響がある程度判明するものと思われる。今後の検討を要する問題である。

つぎに、ねじりによるせん断応力または直接せん断応力を組み合わせた場合のコンクリートの強度の実験結果と、2軸主応力を組み合わせた場合のコンクリートの強度、コンクリートの3軸圧縮強度の実験結果から推定されたコンクリートの破壊条件とを ( $\tau-\sigma$ ) 座標上に表示し、図-2 に示した。

図-2 組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度の ( $\sigma-\tau$ ) 表示

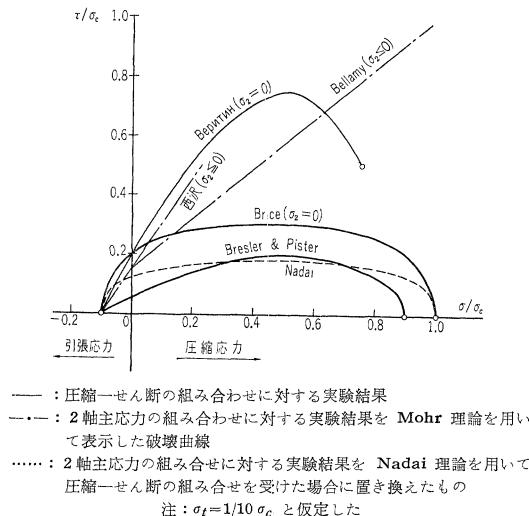


図-2 は、2軸主応力の組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度から推定したコンクリートの破壊条件が、せん断一主応力の組み合わせ応力を受けるコンクリートの実際の破壊強度といちじるしくことなることを示している。

せん断一主応力の組み合せに対して、コンクリートは明らかに Mohr の破壊理論にしたがわない。

しかし、中空円筒の周圧縮一軸圧縮試験から推定した Bellamy の曲線が示しているように、この場合にも、中間応力 ( $\sigma_2$ ) が、組み合わせ応力を受けるコンクリートの破壊強度にいちじるしく影響することは考えられる。

また、せん断応力の分布（表-2 参照。ねじりによる単純せん断か、直接せん断か）が、コンクリートの破壊条件にいちじるしく影響することが伺われる。Carlson もこの点を指摘していた。彼はまた、高い重力ダムの下流面コンクリートについては、圧縮応力よりも、この圧縮せん断の組み合わせ応力が破壊条件を決定すると考えているようである<sup>18)</sup>。図-2 の B. Bresler と K.S. Pistor の実験結果が、横軸と  $\sigma/\sigma_c \approx 0.9$  の点で交差しているのは、実験に中空円筒供試体を用いたことによるものである。一般に、中空円筒の圧縮強度が、中実円柱

の圧縮強度より約1割程度低くなることは、すでに杉木らによっても確認されている<sup>19)</sup>。

## 5. 破壊理論との比較

### (1) von Mises (M.I. Huber, H. Hencky) の理論<sup>15), 16)</sup>

塑性的に破壊する等方性金属材料について成立するもので、破壊が静圧力に関係せず、せん断ひずみエネルギーだけによって定まるとしている。この場合、破壊条件が次式で表示できる。

$$W = 1/12 G [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \text{const.} \quad (1)$$

または

$$W = \frac{1}{3G} [\tau_3^2 + \tau_1^2 + \tau_2^2] = \frac{9}{12G} (\tau_{\text{oct}})^2 = \text{const.} \quad (1)'$$

ここに  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 直交デカルト座標系上の主応力成分  
 $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  : それぞれ  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  の方向を示す主軸をふくみ、他の2箇の主軸がはさむ角を2等分する面に働く主せん断応力

$\tau_{\text{oct}}$  : 式 (1), (1)' で定義される、いわゆる 8面体せん断応力

この理論によれば材料の引張強度と圧縮強度とが等しくなり、コンクリートなどの脆性材料には適合しない。同様に、引張強度と圧縮強度とが等しくなる最大せん断応力説 (Tresca) などもコンクリートには適合しない。

### (2) Mohr の理論<sup>15)</sup>

Mohr の破壊条件は、破壊のときの応力状態を表わす Mohr の円群の包絡線であり、一般に次式で表わされている。

$$\tau = f(\sigma) \quad (2)$$

ここに  $\tau$  : 破壊面に作用するせん断応力、  $\sigma$  : 破壊面に作用する垂直応力、特に、 $f(\sigma)$  を  $\sigma$  の線形関数に仮定したのが、Coulomb-Mohr の破壊理論であり、鉄、コンクリート、土など、脆性材料の破壊条件として多く用いられている。すなわち

$$\max(|\tau| + \mu\sigma) = \text{const.} \quad (2)'$$

いずれも、コンクリートの引張強度が圧縮強度の 1/10 以下であるという実験事実にはよく適合させることができるが、単純圧縮一ねじりせん断の組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度とは必ずしも一致しない（図-2 参照）。

### (3) A. Nadai の理論<sup>15)</sup>

Nadai の理論は、材料の破壊条件がせん断ひずみエネルギー  $W = 9/12 G (\tau_{\text{oct}})^2$  だけでなく、静圧力  $\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  にも関係することを仮定するものであり、

次式で表示できる。

2軸主応力の組み合わせに対するコンクリート強度の実験結果を整理すると、 $f(\sigma_{oct})$  が  $\sigma_{oct}$  の1次関数になることもあるが<sup>2), 3)</sup>、中間応力  $\sigma_2 \neq 0$  の場合、必ずしも直線にはならない<sup>12)</sup>。

特に  $f(\sigma_{oct})$  が  $\sigma_{oct}$  の一次関数の場合、単純圧縮直角せん断の組み合わせ応力  $(\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{2\sigma_1^2 + 6\tau^2}, \sigma_{oct} = \frac{1}{3}\sigma_1)$  に対して、コンクリートの破壊条件は図-2 に示したようなだ円曲線となり、中空円筒について実験した Bresler と Pistor の破壊条件に近くなり、他の実験結果とは一致しない。

以上のように、これまでに述べた破壊理論はすべて、組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度を統一的に説明するには不十分であるようと思われる。

#### (4) Griffith の理論

上記の破壊理論は現象論であって、この方向からのアプローチは一応壁にぶつかっているように思われる。つぎに微視的な立場から、脆性材料の強度を考えてみる。

Griffith は、脆性材料の強度が、材料内部に存在するひびわれなど次陥の安定性によってきまるものと考えた<sup>20), 21)</sup>。この場合、長さ ( $2c$ ) のだ円形ひびわれの形成に必要な表面自由エネルギー  $W_s = 4\nu'c$  と、ひびわれの形成によって解放される弾性エネルギー  $-W_e = \pi c^2 \sigma^2 / E$  とから、ひびわれが成長できる条件は

$$\frac{\partial(W_s + W_e)}{\partial c} = 0$$

したがって

$$\sigma = \left( \frac{2 \nu E}{\pi c} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (4)$$

ここに  $\sigma$ : 材料の引張強度,  $\nu$ : 比表面エネルギー,  
 $E$ : 弾性係数

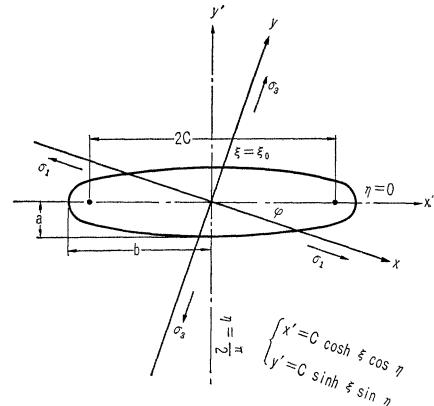
コンクリートに対してほぼ妥当な値,  $\sigma=30 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E=3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\nu=400 \text{ erg/cm}^2 \approx 4 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^{22)}$  を代入すれば, 引張破壊を導く内部ひびわれの限界長さは, (2c)  $\approx 1.7 \text{ cm}$  となる。これはコンクリート中の細骨材の寸法と同じオーダーの値である。最近, コンクリートについても, この種の先在ひびわれが粗骨材とモルタルとの界面に存在することが, X線を用いて確認された<sup>23)</sup>。しかし, これだけで上記の理論が実証されたと考えることは危険である。

ここでは詳しい演算を省略するが、この理論によれば組み合わせ応力を受ける材料の破壊条件は、図-3において最大引張応力を最大にするような方向を持つひねれ剛羽の集中応力の最大値によって決定する。<sup>20)</sup>すなわち

$$(\sigma_{\xi})_{\xi=\xi_0} = \frac{1}{4\xi_0} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

いま  $\sigma = 90^\circ$ ,  $\tau = 0$ ,  $\phi = 0$  の時の  $a_1$  を材料の単純引

図-3 だ円形ひびわれ周辺の応力を考える場合のだ円座標



張強度を  $\sigma_t$  とすれば

だ円形ひびわれの長軸と短軸の長さの  $1/3$  を、それぞれ  $b, a$  とすれば、 $\xi_0 = a/b$  ( $a/b \ll 1$ ) となるから、 $2/\xi_0 \simeq 2(b/a)$  は応力集中係数にほぼ等しい。

式(5)'は、この種の内部的な欠陥を持つ材料の単純圧縮強度が、単純引張強度の8倍になることを微視的な考察から予言したものである。また、この式は、一定の範囲 ( $\sigma_3 < -3\sigma_1$ ) で、2軸系組み合わせ応力を受けるコンクリートの強度を定性的には再現している<sup>24)</sup>。しかし、せん断応力を組み合わせた場合についてはまだ解が求められていないようである。

Griffith の理論は、材料が完全に弾性的であることを仮定しているから、コンクリートの圧縮破壊のような非弾性的な現象に対しては、今後さらに進んだ議論を要することは言うまでもない。

### (5) その他の理論

以上のように、コンクリートの破壊条件を応力状態だけで表示しようとする試みはいずれもまだ不十分である。坪井らは、このため、引張一引張または引張一せん断の組み合わせ応力を受けるコンクリートの破壊条件として、最大主ひずみ（引張）説が成立することを<sup>1)</sup>実験によって指摘しているが、これはまだ研究途上にあり、今後の成果が期待される。

コンクリートの破壊強度が、一般に最大引張ひずみによって支配されるとする考え方は外国にもみられるが、系統的な実験が少ないから、ここではこれ以上の議論を省略する(251, 261)。

## 6 設計への利用

さて、以上に検討してきた実験結果を設計面で考慮しようとすると、種々の困難に遭遇することになる。これは材料の強度というものが非常にあいまいな特性であつ

て、まだ科学的に明確な基礎づけができていないことに原因している。たとえばコンクリートの単純圧縮強度自体が、寸法効果、形状効果を示すだけでなく、載荷速度、荷重の繰り返し、および温度、含水量などの影響を受けて大きく変動する（単純圧縮強度の50～150%）。

このため、組み合せ応力を受けたコンクリートの強度特性を設計に利用した例はまれである。わずかに、ドイツの鉄筋コンクリート基準（DIN 1045）において<sup>27)</sup>、2軸曲げを受ける版コンクリートの圧縮強度が  $10 \text{ kg/cm}^2$

（許容圧縮強度の約10%）高く許容されており、また、曲げと同時にねじりを受けるコンクリートはりの最大せん断強度が  $3\sim 5 \text{ kg/cm}^2$ （許容せん断強度の20～30%）高く許容されている例が見られただけである。

一方、1964年イギリスで開催される第8回世界大ダム会議においては、この「組み合せ応力を受けるコンクリートの強度」の問題が、主要議題のひとつとして取り上げられており、日本からもいくつかの論文が提出される予定である。この中で、主としてアーチダムの場合について、引張一圧縮の組み合せ応力を受けるコンクリートの強度として、西沢の式 ( $\sigma_1/\sigma_c + \sigma_3/\sigma_c = 1$ ) を基準とすることが提案されている<sup>3)</sup>。また、大きな水圧を受けるコンクリートの3軸圧縮応力状態に対しては、コンクリートを porous media ( $\sigma_2=0$ ) と考える方が安全であることを指摘し、図-1のJ. Glomb ( $\sigma_2=0$ ) の場合に近い関係を用いることを提案している<sup>3)</sup>。しかし、さきにも述べたとおり、R.W. Carlson の指摘にしたがって、重力ダムにおいても、コンクリートの破壊を支配する応力状態として、圧縮一せん断の組み合せ応力を考へる場合には、圧縮応力の高い範囲 ( $\sigma/\sigma_c > 0.5$ ) で、図-1の関係曲線から推定される ( $\sigma-\tau$ ) 系座標上の破壊条件は、事実を正しく再現せず、いちじるしく危険な側の推定をすることがあるから、注意を要する。

また、鉄筋コンクリートのはりや版の塑性設計において、圧縮一せん断の組み合せ応力を受けるコンクリートの強度を基準にしようとする試みは、欧州において特に活潑であり、欧州コンクリート委員会（CEB）の重要な課題のひとつになっている<sup>28), 29)</sup>。この場合にも、まず、圧縮一せん断の組み合せ応力を受けるコンクリートの強度に関して、さらに多くの実験結果を集積することが必要である。

## 参考文献

- 1) 坪井・末永：「Combined stress の下におけるコンクリートの破壊」：日本建築学会論文報告集63号（1959.10）
- 2) 西沢：「引張と圧縮との組み合せ荷重を受けたコンクリートの強度」：電力技術研究所報、Vol. 11, No. 3, 4 (1961.6)
- 3) 関・西沢・畠野：第8回世界大ダム会議、予定（1964）
- 4) Smith, G.M. : Failure of Concrete under Combined Tensile & Compressive Stresses : Journ. A.C.I., Vol. 25, No. 2, pp. 137～140 (1953. 11)
- 5) McHenry, D. & Karni, J. : Strength of Concrete under Combined Tensile and Compressive Stresses ; Journ. A.C.I., Vol. 29, No. 10, pp. 829～839 (1958. 4)
- 6) Armstrong, S. : The Strength of Concrete Members in Combined Bending and Torsion ; Proc. of Symp. on the Strength of Concrete Structures, pp. 101～122, London (1958)
- 7) Cowan, H.J. : The strength of plain, reinforced and prestressed concrete under the action of combined bending and torsion of rectangular sections ; Mag. of Concr. Res., Vol. 5, No. 14, pp. 75～86 (1953. 12)
- 8) ベリギン, K.P. : Сопротивление бетона при совместном воздействии осевых и поперечных сил ; Бетон и железобетон, No. 10, pp. 479～480 (1960, 10).
- 9) Brice, L.P. : Résistance du béton en contraintes multiples ; IIIrd Congr. of F.I.P., discussion, (1958).
- 10) Bresler, B. & Pistor, K.S. : Strength of Concrete under Combined Stress ; Journ. A.C.I., pp. 321～345 (1958. 9).
- 11) Glomb, J. : Die Ausnutzbarkeit zweiachsiger Druckfestigkeit des Betons in Flachentragwerken ; IIIrd Congr. of F.I.P., (1958).
- 12) Bellamy, C.J. : Strength of Concrete under Combined Stresses ; Journ. A.C.I., pp. 367～381 (1961. 11).
- 13) 伊東・坂口：「組合せ応力状態におけるコンクリートの強度について」；建設省土木研究所報告、100号、pp. 93～105. (1959. 1).
- 14) Семененко, Я.П. : Определение несущей способности бетонного ядра, заключенного в сплошную стальную обойму ; Бетон и Железо-Бетон, No. 3, pp. 125～129 (1960. 3).
- 15) Nadai, A. : Theory of Flow and Fracture of Solid ; Vol. 1, McGraw-Hill (1950).
- 16) 吉村：塑性力学；共立出版（昭和32）
- 17) ソコロフスキイ：塑性学；朝倉書店（昭和34）
- 18) Carlson, R.W. : Dvorjak dam に関する講演会；大ダム会議日本国内委員会主催（昭和38年10月）
- 19) 杉木：土木学会論文集、第88号（昭和37年12月）
- 20) Odé, H. : Faulting as a Velocity Discontinuity in Plastic Deformation ; Rock Deformation(A Sympos) ; New York (1960).
- 21) 久保・木渡・中川：粉体—理論と応用；p. 233, 丸善 (1963)
- 22) 堀：コンクリートの破壊現象の確率論的研究；東京大学学位論文（1961）
- 23) Hsu, T.T.C. et al. : Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strains curve ; Journ. A.C.I., Vol. 60, No. 2, (1963, 2)
- 24) 横堀：材料強度学；技報堂（1955）
- 25) Blahey, F.A. : Discussion on "The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure" by Jones, R., & Kaplan, M. F. ; Mag. of Conc. Res. No. 28, (1958).
- 26) Kaplan, M.F. : Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and Near Failure ; Journ. A.C.I., Vol. 60, No. 7, pp. 853～879 (1963. 7).
- 27) Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton pp. 55～57; Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1960).
- 28) Erdei, C. : Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear & Bending ; Symp. on Effort Tranchant, Wiesbaden (1963).
- 29) Louis, H. et al. : Étude Experimentale des Critères de Rupture par Flexion dans les Dalles en Beton Armé ; Dalles et Planchers dalles (Bulletin D'information No. 38), CEB (1963).

[担当委員 波木 守 正員：小野田セメントKK中央研究所]