

[46] 二軸圧縮応力状態のコンクリートの変形と破壊挙動

正会員 ○ 佐伯 昇 (北海道大学工学部)
 高田宣之 (北海道大学工学部)
 正会員 藤田嘉夫 (北海道大学工学部)

1. まえがき

終局状態設計法において経済的かつ安全な設計をするためには、コンクリート自身の終局時における強度あるいは変形挙動を把握することがこれまでより重要な問題となる。コンクリートの1軸圧縮挙動は多数の実験によって、その弾塑性的挙動が明らかにされているが、2軸あるいは多軸荷重下におけるこれらの挙動については有効な実験があるが十分に整理されているとはいえない。本研究では2軸圧縮応力状態の破壊および変形挙動について、基礎的な資料を提供するもので、破壊に対する骨材の影響を検討するためにペースト、モルタルおよびコンクリートの供試体を用いて実験を行った。破壊挙動の解析法はペースト、モルタルについては八面体応力理論を用い、粗骨材を有するコンクリートについては、コンクリートの構造モデルを考へMohr理論を基礎にして八面体応力理論と同型の解析法を誘導して検討した。

2. 材料・供試体および実験方法

供試体の材料はセメントに普通ポルトランドセメント(比重 3.15 , $\sigma_{28} = 398 \text{ kgf/cm}^2$) 細骨材には標準砂、粗骨材には静内産川砂利(粒度 $5 \sim 10 \text{mm}$, 比重 2.79)を用いた。配合はペースト、モルタル、コンクリートで行い、水セメント比(W/C)は 0.4 , 0.5 , 0.6 の3種類を用いた。モルタルの砂セメント比(S/C)は 1 で、コンクリートの細骨材率は 35% である。供試体寸法は図-1に示すように 10cm の立方体で、供試体の作製には鋼製型枠が用いられ、コンクリートが打込まれた後、そのまま1日湿潤養生され、その後試験日まで水中養生(20°C)が行われた。試験はほほ材令28日で行われた。載荷装置は図-2に示すように、垂直載荷には 100t 万能試験機を用い、水平載荷には 100t 手動油圧ジャッキを用いて、供試体に2軸圧縮を作用させた。載荷面での摩擦を除くために図-1に示すように供試体載荷面にグリースを塗り、その上に 0.05mm のテフロンシートを貼り、さらにシリコングリースを塗ったテフロンシートを重ねた状態で載荷した。荷重の検出は垂直荷重についてはロードセルを用い、水平荷重はフレームの引張部材の歪みから取り、これらの荷重をXYレコーダーに表示した。載荷過程はXYレコーダーを見ながら手動で行い、比例荷重方式をとった。比例させた荷重応力比の種類は垂直応力を σ_x 、水平応力を σ_y とすると、荷重応力比 σ_y/σ_x は 0 , 0.3 , 0.5 , 0.8 および 1 である。載荷されない面に縦横に 70mm ストレーンゲージを貼り、ひずみを測定した。実験は各3本行った。

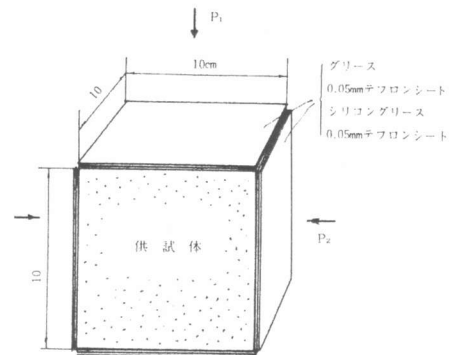


図-1 供試体

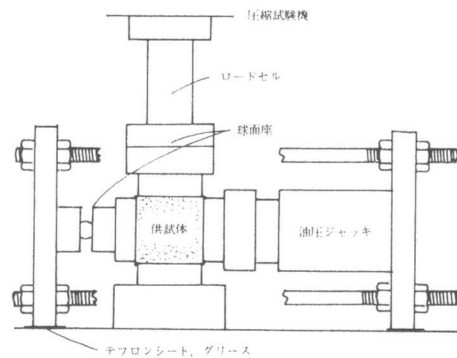


図-2 載荷装置

3. 破壊挙動の実験結果

図-3に $W/C = 0.4$, 0.5 および 0.6 のペーストの各応力比での破壊

強度を単純圧縮強度 (σ_0) で除した値で示した。荷重応力比 σ_y/σ_x が 0.3~0.5 で σ_x/σ_0 の値が最大を示し、その値はほぼ 1.2 倍程度を示した。その後応力比が大きくなると σ_x/σ_0 は低下し、2 軸応力が $\sigma_y/\sigma_x = 1$ の近傍では σ_x/σ_0 はほぼ 1 に近づく傾向を示した。図-4 はペーストと同様に $W/C = 0.4, 0.5$ および 0.6 のモルタル破壊強度を示したものである。荷重応力比の増加によって強度が変化する割合は少なく、 σ_y/σ_x が 0.3~1.0 で σ_x/σ_0 はほぼ 1.2 倍程度である。水セメント比による差異は $W/C = 0.4$ では 2 軸荷重による強度の増加は少なく、 $W/C = 0.5$ で 2 軸による破壊強度の増加が他に比して大きい。図-5 は同様に水セメント比 0.4, 0.5 および 0.6 の場合のコンクリートの破壊に挙動を示したもので、荷重応力比が 0.5 で σ_x/σ_0 の最大を示しその時の値は 1.3 倍程度である。水セメント比による破壊挙動の差異は顕著でない。

ペーストの破壊状況を観察すると荷重方向に平行に 1~数 cm の層状に破壊し、より大きな骨材が入ると、すなわちモルタル、コンクリートになると、骨材のクラックアレスト作用によって破壊面は荷重方向に対して傾斜を持ち、V 状に破壊する。また応力比が 0.5 近傍でこの V 状の傾向が強くなる。供試体表面において摩擦を低減する方法では 0.005~0.01 程度の摩擦係数にすることができたので、破壊荷重の補正は行わなかった。ひずみの測定はばらつき大きく正確に測定するのはかなり難しい。自由面でのひずみのため、ひびわれと平行の位置にあり、比較的弾的な挙動を示した。(図-9,10)

4. 破壊包絡線の解析方法

複合荷重下のコンクリートの破壊挙動を一元的に論じるとは難しい。それは同一複合応力状態であっても、その応力状態に到達するまでの荷重過程の種類によって、コンクリート内部のひびわれ発生伝播が異なり、それに影響されて破壊挙動も変化するからである。単軸圧縮荷重下のひびわれ挙動を観察すると、荷重の比較的初期の段階(破壊荷重の 2~3 割)において大きな骨材とモルタルとの界面に付着ひびわれが生じ、コンクリートは弾性挙動から外れ始めるが、骨材のクラックアレスト作用(ひびわれ発生伝播を止めて遅らす作用)によって安定したひびわれ挙動を示す。さらに荷重が増加すると、粗骨材近傍のモルタル部分のひびわれ、すなわち比較的小さな骨材の付着ひびわれが発生し、新しい骨材界面のひびわれと連結して破壊に至る。このようにコンクリートの破壊は骨材の付着ひびわれによって支配されている。本解析では上述のひびわれ挙動の考察からコンクリート体の破壊に対する構造モデルとして図-6 のように球状の骨材にマト

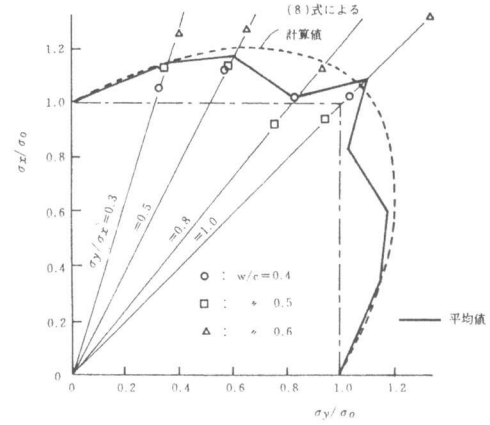


図-3 ペーストの破壊包絡線

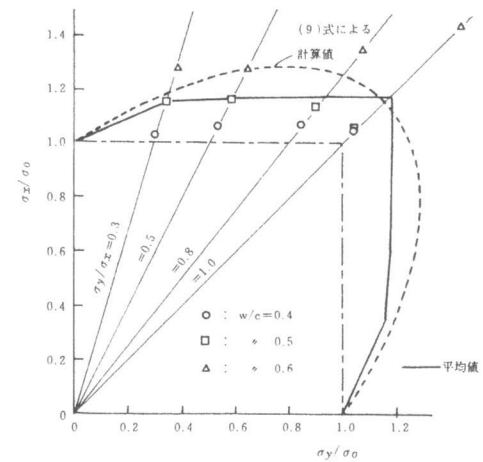


図-4 モルタルの破壊包絡線

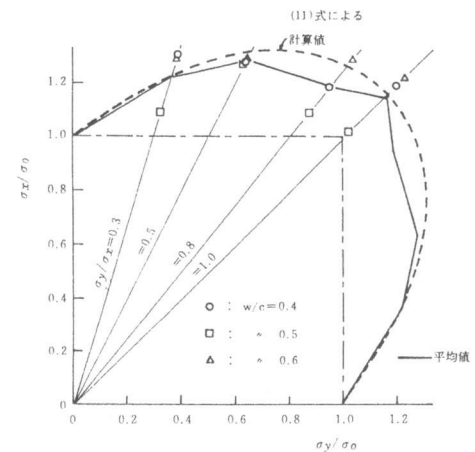


図-5 コンクリートの破壊包絡線

リックスが取り巻く構造を想定した⁴⁾。弾性解析によって外力 P_1, P_2, P_3 による、 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ の方向に直角な骨材表面の合垂直応力 (σ_a)、および合せん断応力 (τ_a) は、

$$\sigma_a = \sum_{i=1}^3 P_i (\beta_1 + \beta_2 \cos 2\theta_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_a^2 = \sum_{i=1}^3 \beta_2^2 (P_i \sin^2 2\theta_i - 8\xi_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= P_1 P_2 \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 \\ \xi_2 &= P_2 P_3 \cos^2 \theta_2 \cos^2 \theta_3 \\ \xi_3 &= P_3 P_1 \cos^2 \theta_3 \cos^2 \theta_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ の点の σ_a, τ_a がある限界値になると、ひびわれが生じ破壊するという仮定を用い、2軸圧縮応力状態 (σ_x, σ_y) の場合を考えると、次式のようなになる

$$\bar{\sigma}_a = \frac{1}{3} r_1 (\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{\tau}_a^2 = \frac{2}{9} r_2^2 (\bar{\sigma}_x^2 + \bar{\sigma}_y^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$r_1 = \frac{3(1-\nu_1)\zeta}{2(1-2\nu_2) + (1+\nu_1)\zeta} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$r_2 = \frac{15(1-\nu_1) + (1+\nu_1)\zeta}{(7-5\nu_1)(1+\nu_2) + (8-10\nu_1)(1+\nu_1)\zeta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_a / \sigma_0, \quad \bar{\tau}_a = \tau_a / \sigma_0, \quad \bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_0, \quad \bar{\sigma}_y = \sigma_y / \sigma_0,$$

σ_0 は一軸圧縮強度である。図-7に r_1, r_2 を示した。

5. 考察

5.1 破壊強度の骨材による影響

ベスト、モルタルおよびコンクリートの差異は細骨材、粗骨材の有無によるものであり、モルタル、コンクリートは骨材によってクラックアレスト作用を受け、ベストに比較してひびわれ発生伝播に対して安定性を増大している。図-8はベストの2軸圧縮強度を基準とした場合のモルタル、コンクリートの強度との比を示したもので、モルタルがベスト強度の1.1~1.3倍であり、コンクリートより大きく、モルタルがひびわれ発生伝播に対してより安定性が高いことを示している。

5.2 ベストの破壊および変形挙動

(4),(5)式の $r_1 = r_2 = 1$ として、 $\bar{\sigma}_a$ および $\bar{\tau}_a$ を計算し、 $\bar{\tau}_a$ が $\bar{\sigma}_a$ の一次式として $\bar{\sigma}_y = 0$ の時 $\bar{\sigma}_x = 1$ を通る直線を最小2乗法で決め(4),(5)式を用いて整理すると、破壊包絡線は

$$(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y - 0.043)^2 - 3.001 \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y = 0.957^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

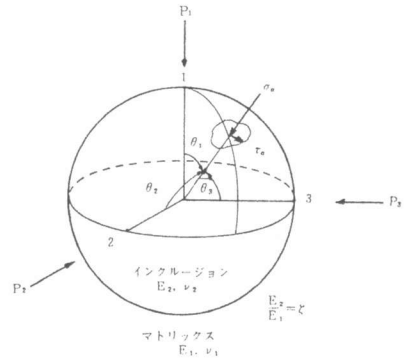


図-6 コンクリートの構造モデル

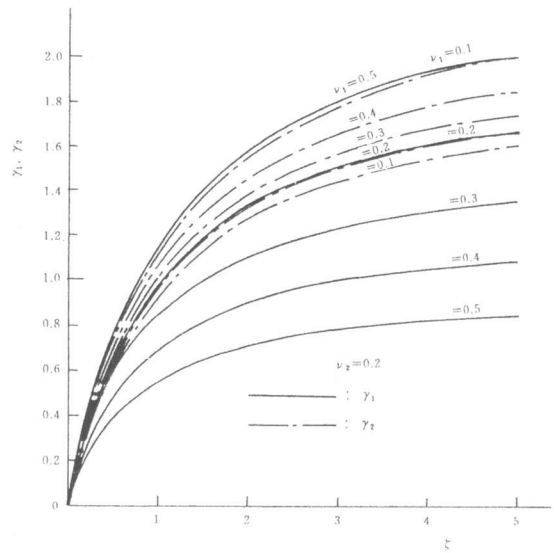


図-7 r_1, r_2 の値

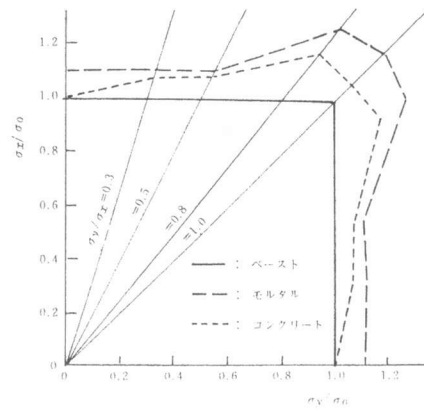


図-8 破壊強度の骨材による影響

図-9に $W/C = 0.6$ のペーストの $\sigma-\epsilon$ 曲線を示した。ひずみはほぼ直線を示し、脆性的破壊挙動を示した。

5.3 モルタルの破壊挙動

ペーストと同様にして八面体応力理論で解析した結果、破壊包絡線は

$$(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y - 0.109)^2 - 3.046 \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y = 0.891^2 \quad (9)$$

で表示された。図-4にこの曲線を示した。

5.4 コンクリートの破壊および変形挙動

図-10に示す $\sigma-\epsilon$ 曲線から破壊近傍の割線ヤング率(平面応力状態として計算した値)を求めると

$E = 260 \text{ t/cm}^2$ 、一方骨材のみのヤング率およびポアソン比を産地の玉石から切出した石材から求めると、 $E_2 = 535 \text{ t/cm}^2$ 、 $\nu_2 = 0.20$ であった。複合材としてのヤング率(E)を次式で算定する。

$$\frac{1}{E} = \frac{V_1}{E_1} + \frac{V_2}{E_2} \quad (10)$$

V_1, V_2 は全体の体積を1とした時のそれぞれマトリックスおよび骨材の体積である。上述の値および(10)式から

$\zeta = E_2/E_1$ を求めると3.34であった。破壊時なので $\nu_1 = 0.5$ 、および上述の値を用いると(6)、(7)式より $r_1 = 0.811$ 、

$r_2 = 1.853$ が計算される。これらの値を(4)、(5)式に代入して $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y$ を求め、 $\bar{\sigma}_a$ を $\bar{\sigma}_a$ の一次式として最小2乗法で決めて、破壊包絡線を求めると

$$(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y - 0.1183)^2 - 3.055 \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y = 0.882^2 \quad (11)$$

で表示された。図-5にこの破壊包絡線を示した。

6. 結論

(1)1軸に対する2軸圧縮応力状態の破壊強度の増加はモルタル、コンクリート、ペーストの順に大きい。

(2) $\sigma_x = \sigma_y$ において、単純圧縮強度に比してペーストでは1.1倍、モルタルでは1.2倍、コンクリートでは1.2倍の増加を示した。

(3)ペースト、モルタルの破壊包絡線の解析において八面体応力理論が有効であった。またコンクリートではマトリックスと骨材の変形挙動を考慮できる修正八面体応力理論が実験値とよく一致した。

参考文献

- 1) H. Kupfer, H. K. Hilsdorf and H. Rusch: Behaviour of Concrete under Biaxial Stresses, J. of ACI, No. 66-52, Aug. 1969
- 2) M. E. Tasuji, F. O. Slate and A. H. Nilson: Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading, J. of ACI, No. 75-33, July 1978
- 3) 藤田、佐伯: コンクリートのひびわれ発生、伝播、コンクリート工学, Vol. 16, No. 11, Nov. 1978
- 4) 佐伯、高田、藤田: 圧縮-ねじり荷重下のコンクリートの変形と破壊挙動、土木学会論文報告集308号, 1981年4月

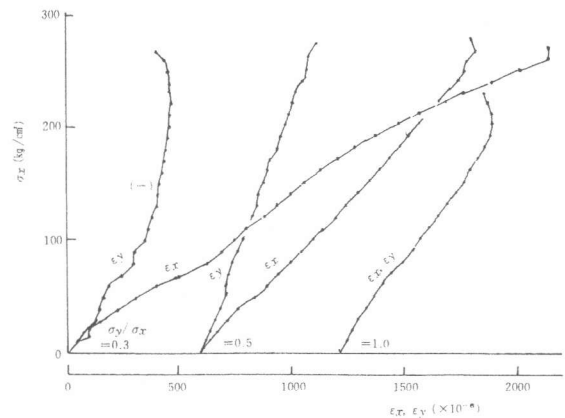


図-9 ペーストの $\sigma-\epsilon$ 曲線 ($w/c=0.6$)

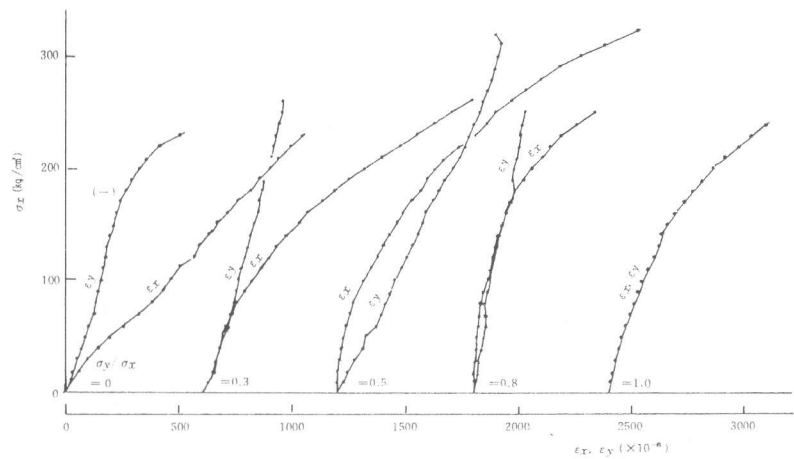


図-10 コンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線 ($w/c=0.6$)