

組合せ圧縮荷重によるコンクリートの変形と破壊

DEFORMATION AND FAILURE OF CONCRETE UNDER COMBINED COMPRESSIVE STRESSES

畑 野 正*

By Tadashi Hatano

1. 緒 言

著者はコンクリートの破壊が、ひずみ説により説明されるであろうことを各種の場合につき実証してきた。すなわちある常温下のコンクリートにつき一軸圧縮または引張りを行なえば、強度は破壊時間（荷重をほぼ一様の速度で増加した場合、荷重開始より最大荷重に到る時間）にしたがって著しく変化するにかかわらず、荷重方向の破壊ひずみ（最大荷重時のひずみ）は破壊時間の長短に関せず一定となるのを見た^{1),2)}。ここに強度を最大荷重時の平均応力と定義している。また、くり返し荷重を加えれば、永久ひずみが累積しいわゆる疲労現象を生ずると推定されるが、この際の全体の破壊ひずみは前述一行程の荷重を加えたときの破壊ひずみと一致するのを見た³⁾。つぎにコンクリートが水結するとか、特別な高温下にあるとか等の温度により物性の変化を生ずると考えられる範囲を除外すれば、温度が変化しても破壊ひずみは一定であり、強度はその絶対温度に逆比例するものであることを見た⁴⁾。

以上の実証はすべて一軸荷重の場合であって、さらに広い立場からひずみ説を確立するためには立体的応力状態における破壊をひずみの観点から観察して、一般的な関係を見出す必要がある。著者はここにいわゆる三軸破壊試験を行なってこの問題を明らかにしようとする。

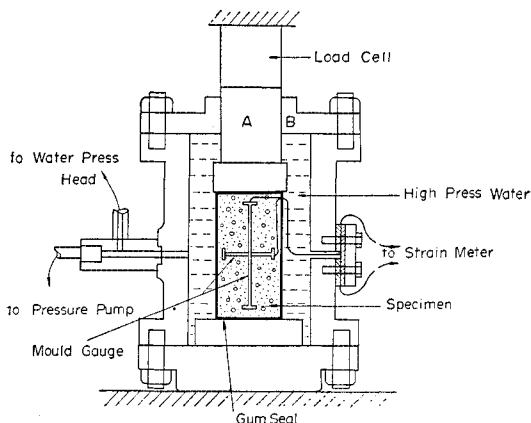
コンクリートの三軸破壊試験は現在まで多数の実験例があるが⁵⁾、残念ながら破壊ひずみの観点から実験された例は見あたらない。その結果はモール説や八面体応力説などで説明されている。なおコンクリートの破壊論にはその他物性論にもとづいた新しい説もあるが、すべて強度に立脚した議論である。これらの説明は、時間や温度をある一定の値に限定した場合に適用されるものであり、一般化された破壊論としてはなお不十分なものといえる。

なお、従来の三軸試験は円柱供試体の上下端面に鋼板を直接接触させ、円柱側面のみ不透膜をあてて流体圧をかけているのが一般である。円柱上下端面はしたがって鋼板との間の摩擦により水平方向の力をうけ、周圧ならびに軸圧に対応する移動を制限され、正しい意味での三軸試験を行なっていることにはならない欠点がある。本研究ではこの点をも考慮に入れ、供試体端面の摩擦の影響の少ない場合の実験、摩擦の影響のある場合の実験を行ない両者を比較することとした。

2. 実験の方法

実験装置の概要は 図-1、写真-1 のごとくである。すなわち鋼製高水圧容器をアムスラー試験機の上に置き荷重計と円柱鋼片を通じて軸圧力を供試体に与えた。水圧は圧力ポンプにより 250 kg/cm^2 まで与えることがで

図-1 Schematic View of Test Apparatus



Environment of the Test Piece

Test Series I

Test Series II

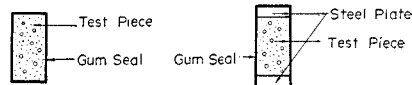
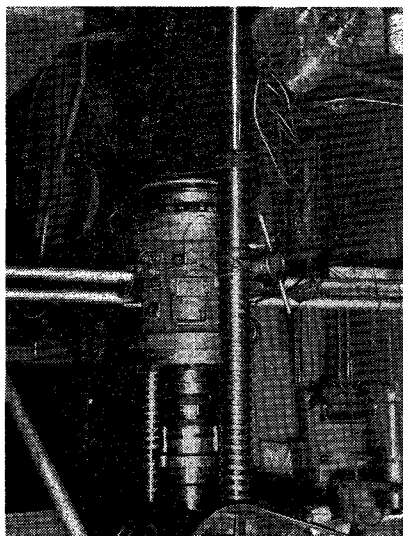


写真-1



* 正会員 工博 電力中央研究所 技術研究所

きる。供試体は直径 10 cm, 高さ 20 cm の円柱形で、これを厚さ約 1 mm のかたいゴム膜で被覆したものを用いた。Test Series I においては供試体上下端面および側面に直接ゴム膜が接するようにした。Test Series II においては供試体上下端面に円形鋼板が直接接触するようにし、その外側と供試体の側面にゴム膜が接するようにした。供試体のひずみを測定するためモールド ゲージを使用した。一つは縦方向ひずみ測定のため全長 19 cm のアクリル樹脂製の細長い板 2 枚の間に全長にわたり、170 オームのひずみ抵抗線を入れたものである。他の一つは横方向のひずみを測定のため全長 9 cm の長さにしたモールド ゲージで抵抗値は 120 オームである。アムスラー試験機による軸荷重と供試体の側水圧は時間に比例して増大するようにし大略 100 sec で破壊するようにした。

側水圧の上昇速度の大きい場合の実験は、高水圧容器の能力の関係上側水圧をある時間から以後一定に保ち軸荷重を増大して破壊した。

圧力計、水圧計、縦横 2 個のモールド ゲージの出力を電磁オシロに同時記録した。なお、図一における高水圧容器の蓋 B と鋼円柱ブロック A との間の摩擦はほとんど 0 に近いことを実験的に確かめておいた。試験時の材令は 28 日であって、供試体に使用した材料の性質は 表一、2.3 に示すとおりである。

3. 実験の結果

測定記録の例を 図一、2.3 に示す。軸圧力による上下方

表一 Properties of Cement

1)												
Ig. Loss	Ins. R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Ca ₃ SO ₄
0.9	0.8	23.3	4.1	4.0	63.3	1.0	1.9	41.9	35.3	4.1	12.2	3.2
2)		3) Strength of Standard Mortar										
Sp. gr.	Fines (Blaine)	3 day		7 day	28 day	Flow						
3.19	3 300 cm ² /gr	108 kg/cm ²	170	411	250 mm							

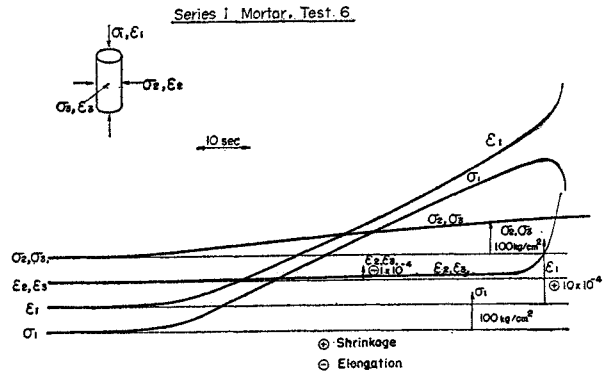
表二 Properties of Aggregates

	Sp. gr.	max size	Gradation	
			Gravel	Sand
			Sagami River Natural Agg.	2.75

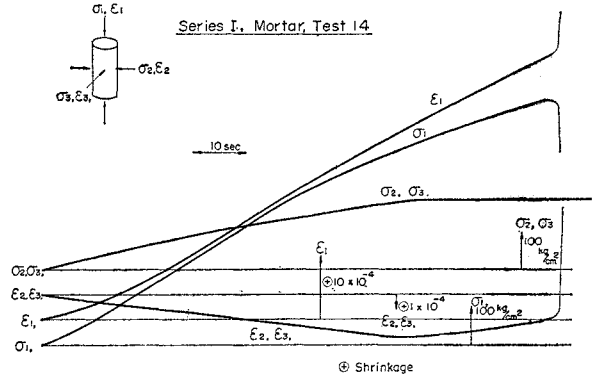
表三 Tested Concrete & Mortar

	Age in Weeks	Mix Proportion					Slump & flow
		Cement	Water	Sand	Gravud	W/C	
Concrete	4	300 kg/m ³	150 kg/m ³	710 kg/m ³	1 264 kg/m ³	50%	7.3 cm
Mortar	4	511 "	255.5 "	1 533 "	—	50 "	160 mm

図一 Example of Test Record (1)



図二 Example of Test Record (2)



向の応力を σ_1 , 側水圧を $\sigma_2 = \sigma_3$ とし, σ_1 方向のひずみを ϵ_1 , これと直角方向のひずみを $\epsilon_2 = \epsilon_3$ としている。

図一の例ではモルタル供試体を側水圧 200 kg/cm² の条件で破壊しており, 軸圧力方向のひずみ ϵ_1 はもちろん,

これと直角方向のひずみ $\epsilon_2 = \epsilon_3$ もともに圧縮ひずみの状態で破壊したことを示している。上述のように軸圧力の最大値を示したときの軸方向の応力を σ_{1u} としてこれを軸方向の破壊強度とする。ひずみについても σ_{1u} に達したときの, 軸方向ひずみを ϵ_{1u} とし, これと直角方向のひずみを $\epsilon_{2u} = \epsilon_{3u}$ とする。

いまこれら $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u} = \epsilon_{3u}$ と破壊時の側水圧 $\sigma_{2u} = \sigma_{3u}$ との関係を図示すれば, 図一、四~七となる。ただし, 図一

図-4 $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u} = \epsilon_{3u} \sim \sigma_{2u} = \sigma_{3u}$

Series I. 1:3 Mortar w/c = 50%, 4Ws.

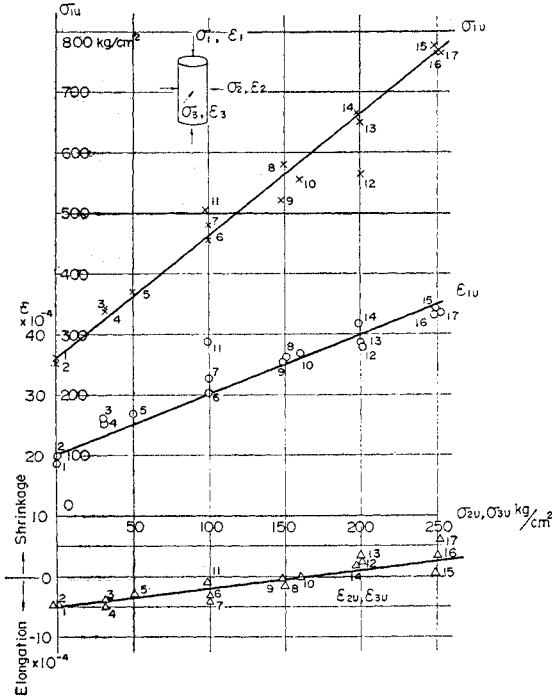


図-6 $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u} = \epsilon_{3u} \sim \sigma_{2u} = \sigma_{3u}$

Series II. 1:3 Mortar W/C = 50%, 4Ws

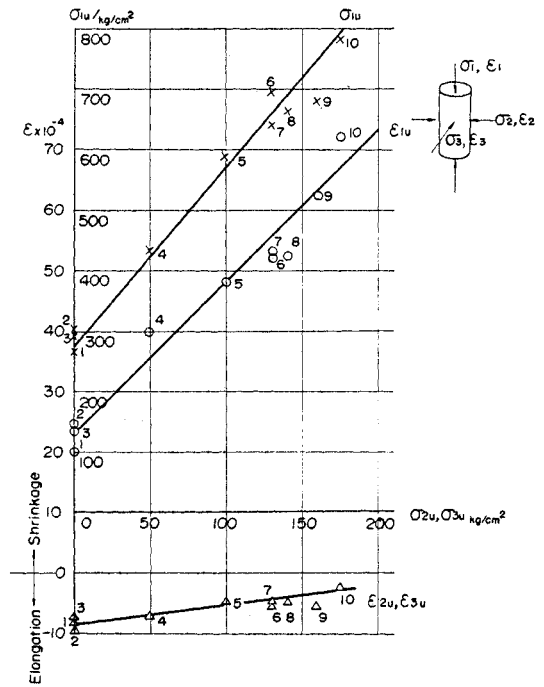


図-5 $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u} = \epsilon_{3u} \sim \sigma_{2u} = \sigma_{3u}$

Series I. 1:3:5 Concrete W/C = 50%, 4Ws

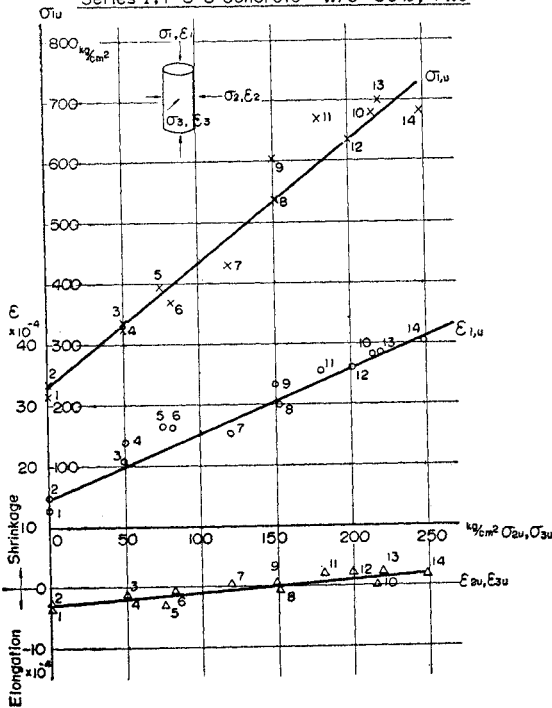
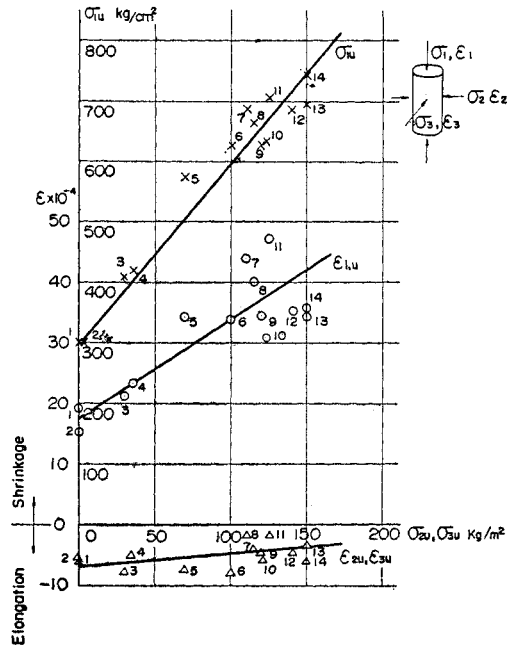


図-7 $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u} = \epsilon_{3u} \sim \sigma_{2u} = \sigma_{3u}$

Series II. 1:3:5 Concrete. w/c = 50%, 4Ws,

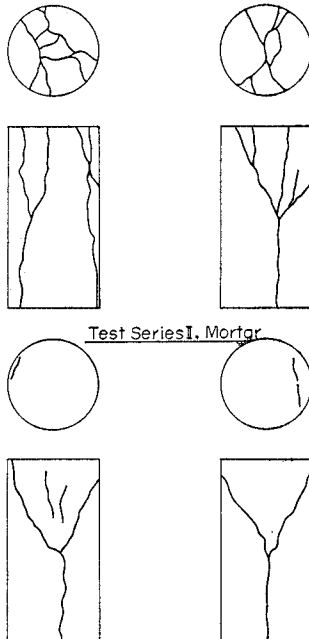


4,5 は Test Series I の場合すなわち供試体全面がゴム膜に直接接している場合であり, 図-6,7 は Test Series II の場合すなわち供試体側面がゴム膜に接し, 上下端面が鋼製板に接している場合である。破壊時の側水圧 $\sigma_{2u}=\sigma_{3u}$ と, $\sigma_{1u}, \epsilon_{1u}, \epsilon_{2u}=\epsilon_{3u}$ との関係はこれらの図に見られるごとくいずれもほぼ直線関係を示している。Test Series I においては σ_{1u} の値は, 側水圧 0 のときの強度に破壊時側水圧の 2 倍を加えた値となっており, 一方 Test Series II においては 3 倍を加えた値となっている。また破壊時のひずみ特に ϵ_{1u} は Test Series II の場合のほうが Test Series I にくらべて著しく大となっている。破壊強度, 破壊ひずみに対する供試体端面の摩擦の影響がきわめて大きいことがこれらの結果から知られる。破壊実験終了後の供試体の状況を Test Series I, II の間で比較すると 図-8 のように相当の差異が見られる。供試体上下端面に鋼板を接した Test Series II では一般のコンクリート試験のように供試体上部に円錐体を残し供試体下部は縦割れを示している。上部の円錐体の上面は試験前の供試体のままか,あるいはわずかのクラックをともなっている。全面をゴム膜で直接被覆した Test Series I では上面に多数のほぼ半径方向のクラックをともなっており, 沿直断面では供試体上半部にすべりによる破壊を示し, 供試体下半部は縦割れを示している。

特に注目すべきことは Test Series I において破壊時側水圧 $\sigma_{2u}=\sigma_{3u}$

が約 150 kg/cm² 以上のときは, 軸方向の破壊ひずみ ϵ_{1u} はもちろん, 水平方向の破壊時ひずみ $\epsilon_{2u}=\epsilon_{3u}$ もまた圧縮ひずみを示していることである。すなわち側水圧が大きくなると供試体はすべての方向に圧縮変形の状態破壊されているのである。Test Series II の場合は, 破壊強度 σ_{1u} は Test Series I の場合よりはるかに大きく試験機的能力の関係上水平方向の破壊時ひずみ $\epsilon_{2u}=\epsilon_{3u}$ が圧

図-8 Sketches of Typical Condition of Specimens after Tests
Test Series I. Mortar



縮ひずみの状態で破壊することを実現することができなかった。

4. 考 察

上述実験結果を通覧して, コンクリートの三軸圧縮応力下の破壊をいかに説明することができるかをひずみ説の立場から考察してみよう。側水圧を増大すれば軸方向の圧縮破壊ひずみは増大し, また軸に直角方向の破壊時引張りひずみは側水圧の増大とともに減少し, ある値以上の側水圧になると圧縮ひずみの状態で破壊を生じている。これらの事実はコンクリートがせん断により破壊することを物語っていると考えられる。しかし一方 図-4~7 の示すように ϵ_{1u} と $\epsilon_{2u}=\epsilon_{3u}$ の差は破壊時側水圧の増大とともに増加を示しており一定のせん断ひずみで破壊するというにはならない。

著者はここにある応力状態に対応した, ひずみの大きさとして, 平均垂直ひずみ ϵ をとり, これに対応したせん断ひずみ強度 S の関係を求め, これを破壊点に適用してひずみ破壊説を説明したいと考える。

主ひずみ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ に対し,

平均垂直ひずみ

$$\epsilon = \frac{1}{3} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \dots \dots \dots (1)$$

せん断ひずみ強度

$$S = \sqrt{\frac{1}{6} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \dots \dots \dots (2)$$

と定義される。また主せん断ひずみ r を用うれば,

$$r_1 = \frac{1}{2} (\epsilon_2 - \epsilon_3), r_2 = \frac{1}{2} (\epsilon_3 - \epsilon_1), r_3 = \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \dots \dots \dots (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{2}{3} (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2)} \dots \dots \dots (4)$$

と表現され, また塑性論⁶⁾の示すところでは

$$S \cong 1.08 |r|_{\max} \dots \dots \dots (5)$$

として, せん断ひずみ強度の近似値を最大せん断ひずみから得ることができる。

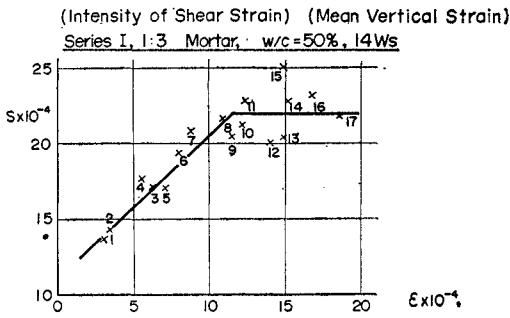
図-4~7 の各破壊点における主ひずみ $\epsilon_{1u}, \epsilon_{2u}=\epsilon_{3u}$ により式 (1), (2) によって ϵ, S を求め, これを図上にのせると Test Series I に対して 図-9 Test Series II に対して 図-10 を得る。

これらの図から

$$S = f(\epsilon) = a + b\epsilon \quad (a, b \text{ は定数}) \dots \dots \dots (6)$$

の関係が見出され, 立体的圧縮応力状態におけるひずみ論による破壊の基準が知られることになる。すなわちコンクリートのあるひずみ状態を平均垂直ひずみ ϵ で表現すれば, これに対応して定まるせん断ひずみ強度 S が式 (6) に示される値に達すればコンクリートは破壊すると思えるのである。この実験では ϵ と S の関係は直線関係にあり, またモルタルの場合は大きな ϵ の値に対

図-9 $S \sim \epsilon$



Series I, 1:3:5 Concrete, w/c=50%, 4Ws

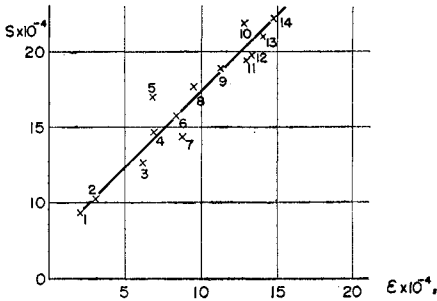
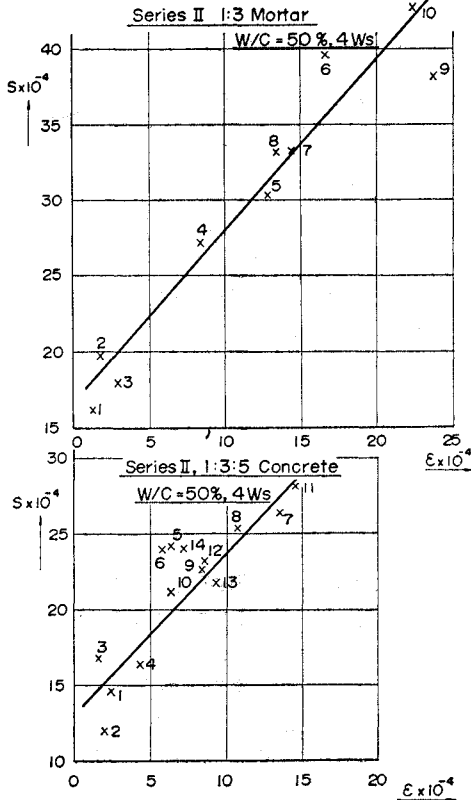


図-10 $S \sim \epsilon$



して S の値は飽和してしまうことを示している。Test Series II に対応する 図-10 は、Test Series I における同じ ϵ の値に対する S よりも相当大きな S 値を与えるが、これは供試体端面の摩擦の影響によるものであると考えてよいであろう。すなわち鋼板により供試体端面は水平方向の変形をおさえられ供試体側面よりも大きな側圧をうけておると考えられる。図-8 に見るごとく破壊のはじまりは、water gain の多い供試体上部にはじまると考えられる。これが側面より大きな圧縮をうけることにより、全面を直接ゴム膜で被覆した Test Series I の場合に比して、より大きな軸圧力、より大きな軸方向破壊ひずみを与えなければ、破壊を生じないことになると説明できよう。Test Series II においてはもとの供試体の上端面を底とする円錐体を作るように破壊が強制されるが、Test Series I においては供試体上部の任意の弱点から破壊がはじめられる自由度を与えられ、確率的にも Test Series I のほうが II に比し強度が弱く破壊ひずみが小さくなると解される。以上の意味から破壊の基準を与える式 (6) は Test Series I に対応する 図-9 の値を採用すべきであると考える。また従来の一軸試験で側圧のないときの強度に、側圧の3倍以上を加えた値が一軸圧縮時の強度であるという所論は、端面摩擦の影響を考察に入れない過大評価であるといえよう。

本実験は破壊時間を約 100 秒に限定し供試体温度も約 20°C の常温に限定した場合の結果を示したものであるが、ここに得られたひずみによる破壊の基準式はコンクリートの物理的性質の変化しない範囲内において時間と温度に無関係な一般的関係であると推定される。

終りに本実験の過程で得られた二つのデータを付記しよう。その 1 はコンクリートの体積弾性率である。Test Series I におけるモルタルとコンクリートの平均垂直応力と体積ひずみの関係をおのおの数個の例について図示したものが 図-11 と 図-12 である。これによると体積弾性率は破壊に近い応力状態の点までほとんど一様な値を示しコンクリート、モルタルのいずれもほぼ $10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。一軸圧縮の場合の割線弾性率が $22 \sim 13 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度に応力レベルにしたがって大きく変化するに対して、体積弾性率は特異な性質を示している。その 2 は一軸圧縮過程における割線弾性率とポアソン比である。図-13 に示したものは、Test Series I におけるモルタル、コンクリートの一軸破壊過程のものでともに応力レベルによって大きく変化することがわかる。

5. 結 論

著者が従来発表してきたコンクリートの破壊を決定する基準が、物性の変化せざる範囲内において時間と温度に関せず一定のひずみ値であるという説明はいずれも一

図-11

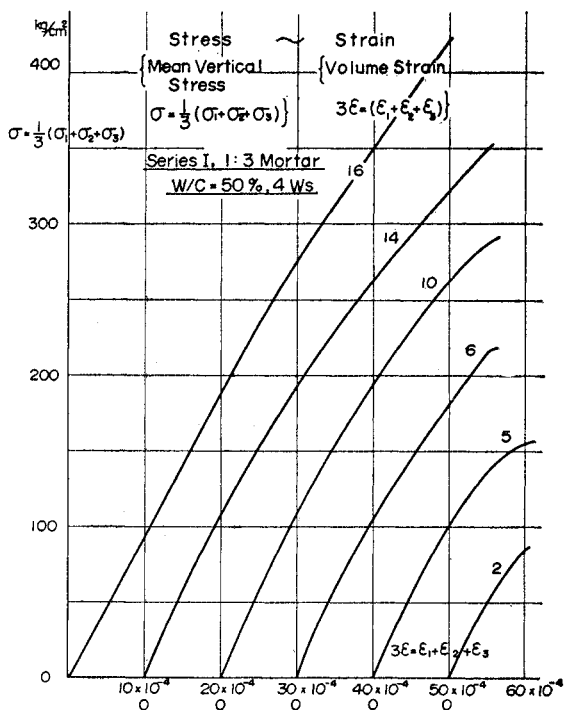


図-12

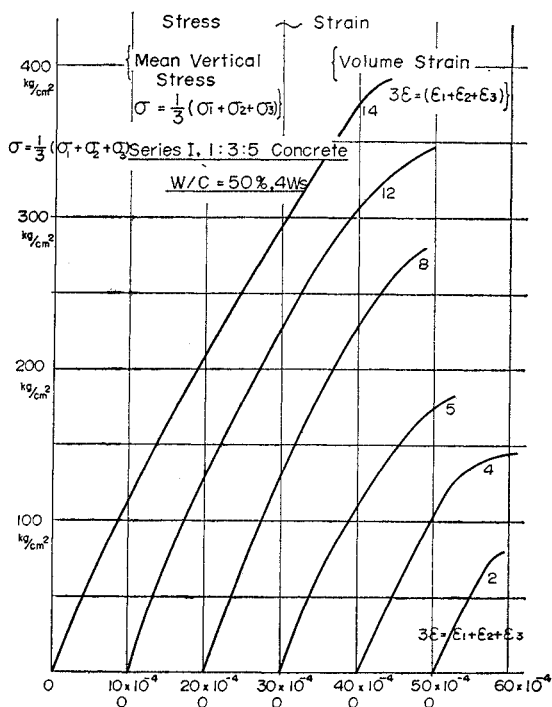
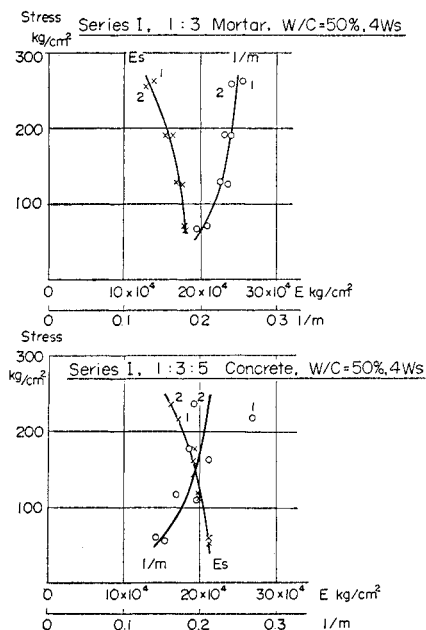


図-13 Second Modulus E_s , 8 Poisson's Ratio $1/m$ (Uniaxial Compression)



軸荷重の場合であった。今回三軸破壊実験を行ない、この説明を拡張して組合せ圧縮応力下の破壊を決定する基準としてつぎのごときものが考えられることが明らかになった。すなわちコンクリートのあるひずみ状態を平均垂直ひずみ ϵ で表現し、これに対応するせん断ひずみ強度 S が $S=f(\epsilon)=a+b\epsilon$ で与える値に到達すると破壊を生ずるのである。

コンクリート供試体の端面の摩擦の影響はきわめて大きく、従来発表されている上下端面に鋼製ブロックを直接接触した場合の三軸圧縮強度は過大に評価されているといえることができる。

引用文献

- 1) 著者：コンクリートの破壊強度、ひずみ能力、弾性率と破壊時間との関係、土木学会論文集 No. 73, 1961
- 2) 著者：衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動、土木学会論文集 No. 73, 1961
- 3) 著者：周期的圧縮荷重によるコンクリートの挙動、土木学会論文集 No. 84, 1962
- 4) 著者：コンクリートの静的圧縮変形、破壊に対する温度効果、土木学会論文集 No. 111, 1964
- 5) たとえば F.E. Richart: A Study of Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses. University of Illinois Bulletin 1928
伊藤：組合せ応力を受けるコンクリートの強度、土木研究所報告 No. 100, 1958
- 6) その他 ソコロフスキー：塑性学

(1966.10.7・受付)