

コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論

THEORY OF FAILURE OF CONCRETE AND SIMILAR BRITTLE SOLID ON THE BASIS OF STRAIN

畠 野 正^{*}
By Tadashi Hatano

1. 緒 言

コンクリートのごとき脆性体の破壊論は、古典的な決定論の立場に立つ各種の破壊論から近年の物性論に立脚した確率論の立場に立つ破壊論に至るまで多種多様のものが展開されていることは周知のとおりである。

Lamé および Rankine の唱えた Max. Principal Stress Theory に始まり、Roš や Mesnager の唱えた材料内の気泡の周囲に生ずる引張破壊の説、Griffith の毛状裂目の説、Coulomb, Navier, Boussinesq, Mohr ら一連の Max. Shear Theory に類する破壊説、さらに Beltramic らの唱えた Max. Strain Energy Theory, Mises や Hencky らの Principal Shear Stresses を用いた破壊の説等は古典的な決定論の立場に立つ一種の応力説である。これらのうちとくに Griffith の説と Mohr によって代表される説は本質的に等価¹⁾であり、最も使いやすくかつ信頼できるものとされているのが現状である。

一方近年の確率論の立場に立つ脆性体の破壊論もたとえば Griffith の理論を基本とした破壊の確率論²⁾、平田教授により創始されたガラスの破壊の確率過程論³⁾、堀助教授によりコンクリートの破壊に適用された確率過程論⁴⁾ら盛んに行なわれるようになった。しかしこれら近代論のよって立つ所も前述古典論と同様に一種の応力説である。

著者はここ数年にわたってコンクリートの供試体につき各種の破壊実験を行ない、すべてひずみを基本にして説明すれば、応力説では説明のできない時間、温度、荷重のくり返し等の影響を含めた統一的な破壊論を成立させうることを実証してきた。すなわち一つのひずみ値に對してひずみ速度や温度が変わった場合または荷重がくり返された場合無数の応力値が対応し、ひずみ説でなければ破壊現象を統一的に説明できないのである。

ひずみに立脚した脆性体の破壊論には古典的な St. Venant の説があるが、観念的なものであり、また確率論の立場に立つひずみを基本にした破壊論は未だ見あたらない。

著者が述べてきたひずみに立脚した破壊論は実験された各種の場合のそれぞれの平均値につき議論したもので、古典的決定論の立場において応力をひずみにおきかえたものである。しかし、破壊ひずみにはバラツキがあ

り、著者が実証したごとく圧縮ひずみ分布が一樣でない時のひずみ能力の増大等確率論的に説明しなければならない点が多く、著者の従来の研究を確率論をもって集約する必要がある。とくに確率過程論で説明されている脆性体の破壊が、ひずみの立場から説明可能かどうかは最も興味のある問題である。

以下著者の従来のひずみに立脚した破壊論の概要を述べ、つぎに確率論的にこれをいかに取り扱うべきかを論じたい。

2. 破 壊 の 定 義

コンクリートの供試体につき破壊実験を行なうときいかなる状態に達したときを破壊点とするか。まずこの問題を定義する必要がある。コンクリートの円柱供試体に圧縮荷重を加え、通常の静的軸圧縮試験を行なう場合すなわちほぼ一様のひずみ速度の荷重を加える場合を考える。荷重が最大値に近くなるとひずみ増大が容易となるて荷重速度は下り、最大値に達しなお供試体に破断を生ぜずひずみが増大する過程で荷重は減少し、さらにひずみが増大して最後に供試体に破断を生ずる。一般にいう破壊強度はこの過程における最大荷重時の平均応力である。平均応力が増大し破壊強度の約 1/2 に達すると供試体中を伝播する超音波綫波速度は低下を始め、しだいに低下度合を増加して破壊強度に達するまで十数パーセントの低下を見ることは既知のこと⁵⁾である。また破壊強度の 2/3 近くの応力で供試体の外辺に微小なクラックの発生することは日常われわれの体験しているところである。すなわち微小なクラックが破壊強度以下の応力で多数発生しているが、供試体はさらに大きな応力に耐えることができ、ついに破壊強度まで至るのである。著者はここにこの最大荷重に達した時点をもって供試体の破壊点と定義する。最大荷重の大きさはひずみ速度により大きく変化するが、いずれの場合でも最大荷重時をもって破壊点とするのである。微小なクラックが増加しても耐荷力が十分あれば破壊とは考えないのである。

さらに最大荷重に達した後で、未だ破断を生じない過程を考えると、この状態は静的破壊試験のとき、とくにひずみ速度の小さな場合に顕著にあらわれるが、ひずみ速度が大きくなるとほとんど現われない。かつこの過程は不確定であり時間的に短い。とくに最大荷重まで載荷して除荷した場合、供試体は形を保っているが、これ

* 正会員 工博 電力中央研究所技術研究所

に再び圧縮荷重を加えて行けば、最初の最大荷重に至らないで破断を生ずる。これを確率論的に正しく表現すれば“破壊強度近くまで載荷し破断せざる前に除荷して再び荷重を増加して行けば、最初に加えた破壊強度近くの応力より小さな応力のもとで破断する確率がきわめて大きい”ということになる。前述の定義によりこの場合供試体は最初の破壊強度近くの応力で破壊したと考えるのである。同一周期によるくり返し荷重を n 回加え、 $n+1$ 回目に破断試験を実施して供試体を破断に至らしめるとき、最後の $n+1$ 回目の最大荷重が最初から n 回目までの荷重のいずれよりも大きければその供試体は n 回のくり返し荷重の経過中破壊しなかったと考える。 $n+1$ 回目の最大荷重が n 回のくり返し荷重のいずれかの荷重よりも小なるときは、供試体は n 回のくり返し荷重の経過中に破壊したと考える。

以上のごとき破壊の定義は供試体の最大耐荷力を基準にしており、したがって従来の破壊強度の定義ともその時点を同じくしており、破壊点以前に現われる微小なクラックの状況や、その後における不安定な破断の条件とは異なり、工学的に最も合理的な基準に立っているものといえる。

3. 著者の従来の研究

コンクリート、モルタルの各種の供試体についての多数の実験による著者の研究のうち、同一種類のコンクリートにつき各種の場合について例示しよう。

コンクリート供試体はすべて材令4週、水セメント比50%，セメント 300 kg/m^3 、砂 710 kg/m^3 、砂利 1264 kg/m^3 、粗骨材最大粒径25mmのもので直径10cm、高さ20cmの円柱供試体によった。ただしこれら一連の実験は数年間にまたがっているので供試体の材質は同一ではないが、非常に近似した性質のものと考えてよい。

図-1 は破壊時間を $10^{-2} \sim 10^4$ sec の範囲に変化させた一軸圧縮実験の場合の応力ひずみ曲線の例である。ここに破壊時間 t_u とは荷重開始から最大荷重に達するまでの時間である。この場合の強度と圧縮ひずみ能力を図示したのが図-2 である。圧縮ひずみ能力 ϵ_c は最大荷重のときすなわち応力が破壊強度 σ_u に達したときの一軸荷重方向のひずみ値である。これらの実験から著者はつぎの結論⁷⁾を導いた。

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 8000 \text{ sec.}$$

$$1/\sigma_u = A + B \log t_u \dots \dots \quad (2)$$

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 8000 \text{ sec}$$

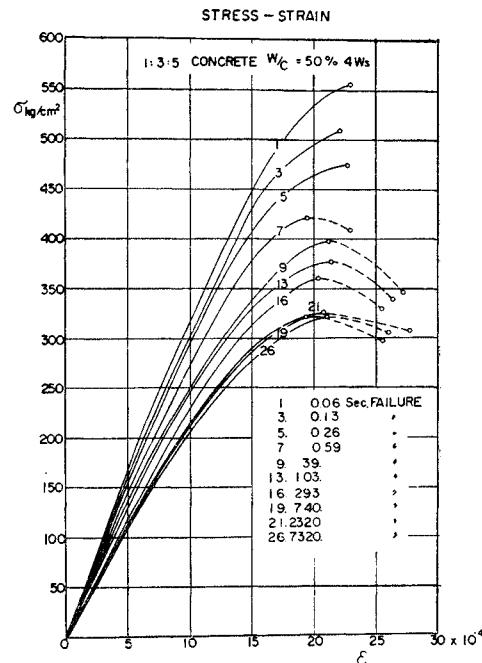
図-3 は一軸引張の場合の応力ひずみ曲線の例であり
図-4 は引張強度 σ_u と引張ひずみ能力 ϵ_e を図示したものである。この場合も同様につぎの結論⁸⁾を導いた。

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 100 \text{ sec}$$

$$0.03 \text{ sec} < t_u < 100 \text{ sec}$$

以上の実験は温度条件として約 20°C の場合であるが、つぎに破壊時間 t_u を約 100 sec に限定し供試体温度を変

图 1



— 2 —

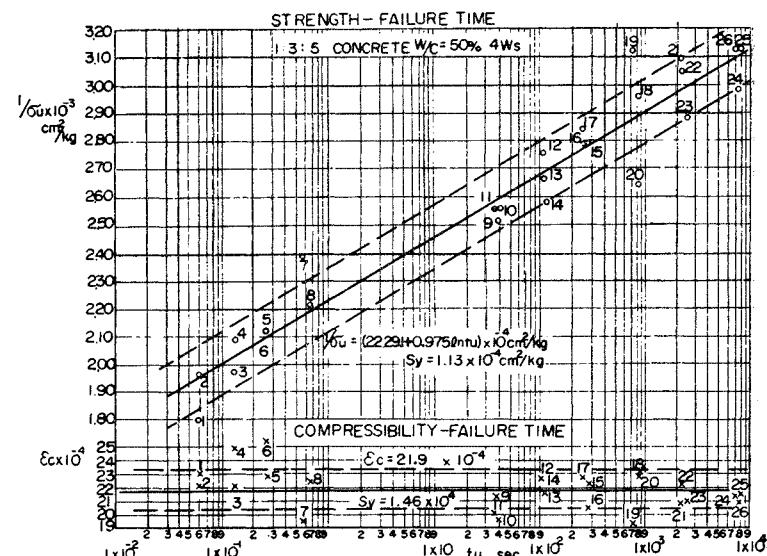
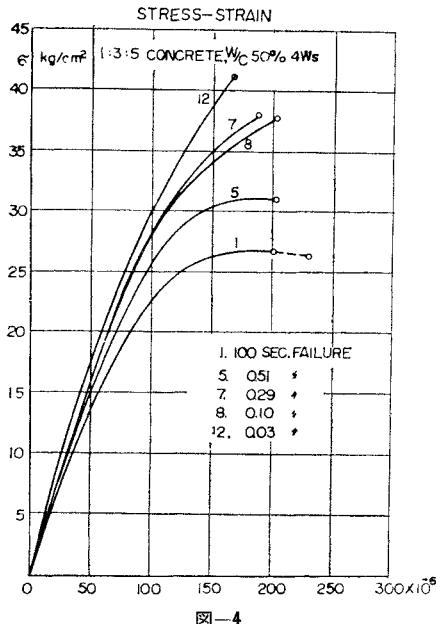
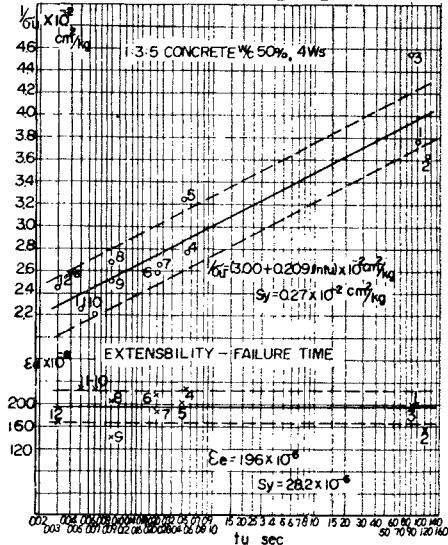


図-3



四—4

STRENGTH-FAILURE-TIME



化させた場合の結果を示す。図-5 は応力ひずみ曲線の例であり、図-6 は圧縮強度 σ_u 、図-7 は圧縮ひずみ能力 ϵ_c の例である。これら実験から得られた結論⁹⁾はつぎのとおりである。

$$270^\circ < T_0 < 340^\circ$$

$$1/\sigma_u = T_0(E + F \log t_u) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

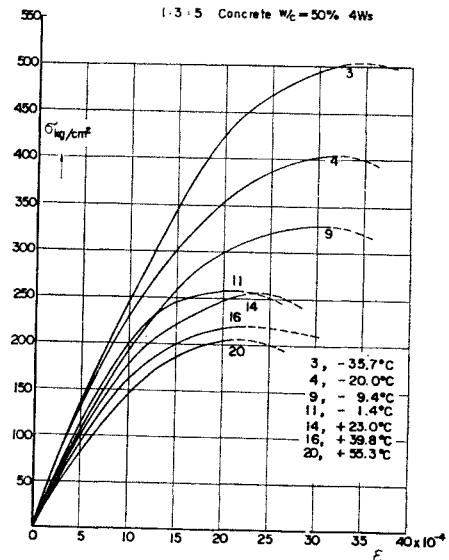
$$270^\circ < T_0 < 340^\circ$$

ここに、 T_0 は供試体の絶対温度である。すなわち温度により物性の変化しない範囲内ではひずみ能力は一定であるが、強度は絶対温度に逆比例するのである。

つぎに圧縮ひずみ能力 ε_c の約 $1/2$ 以下のひずみを与

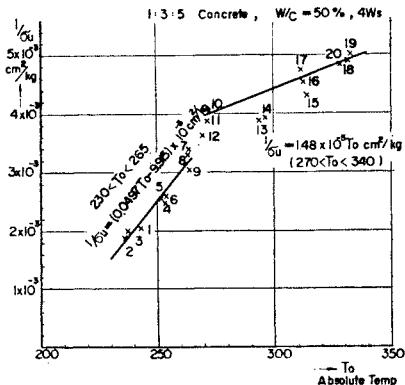
—5

STRESS - STRAIN



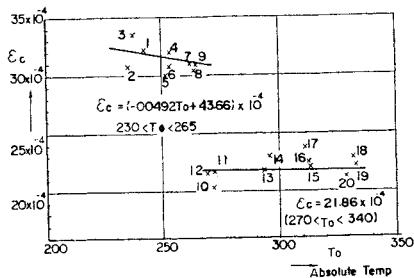
—6

STRENGTH - ABSOLUTE TEMPERATURE



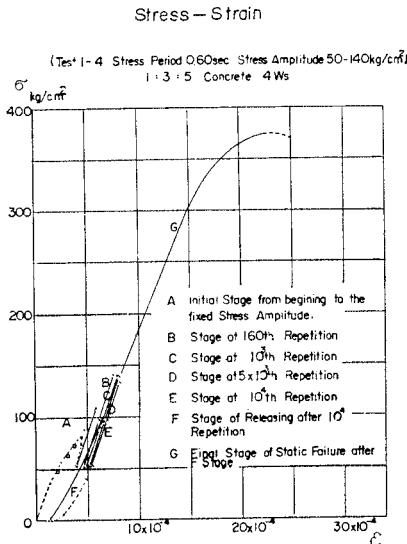
2-7

COMPRESSIBILITY-ABSOLUTE TEMPERATURE

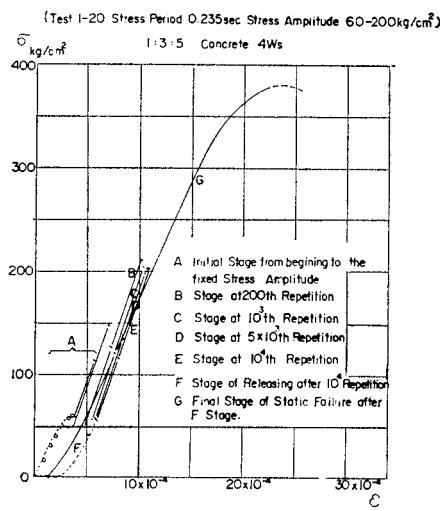


えるくり返し荷重を1万回加え、荷重を除いてから通常の静的ー軸破壊を行なった時の応力ひずみの経過を図-8, 9に示す。くり返しの応力振幅 $50\text{ kg}/\text{cm}^2$ ~ $140\text{ kg}/\text{cm}^2$

图—8



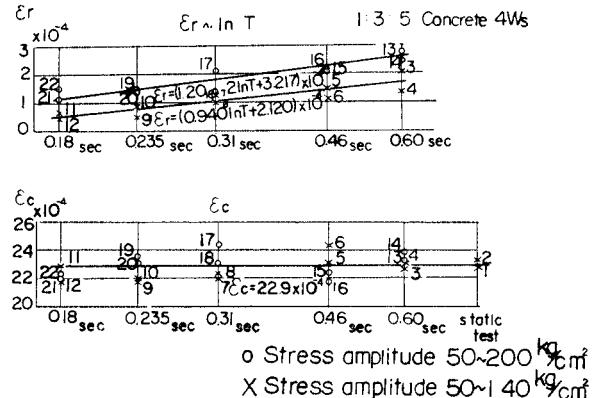
图—9



cm^2 の場合が前者で、 $50 \text{ kg/cm}^2 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$ の場合が後者である。この実験では荷重周期として $0.18 \sim 0.60 \text{ sec}$ の間の 5 種類を選んだが、1万回後の残留ひずみ ϵ_r は図-10 に示すように荷重周期 T が大きいほど大となっている。また 1 万回後の静的破壊実験時の圧縮ひずみ能力 ϵ_c (残留ひずみ ϵ_r を含んだ全体の破壊ひずみ) は図-10 に見るごとく荷重振幅、周期のいかんにかかわらず、くり返し荷重を加えないで最初から静的破壊実験を行なった供試体の圧縮ひずみ能力と同一の値となった。すなわち、くり返し荷重に対してもひずみ能力一定の関係¹⁰⁾ はつぎのごとく成立したのである。

以上の結果から残留ひずみが累積して、全体のひずみ

图—10



能力が消費されしだいに疲労を生ずると解釈することができた。かつ全体のひずみ能力を破壊の基準と考えるとひずみ履歴が影響せず常に現時点のひずみ量でコンクリートの破壊を論ずることが可能であるとの結論を得たのである。

以上の結果はすべて一軸試験であるが、三次元的応力状態ではいかになるか。著者は任意のひずみ状態を表現するのに平均垂直ひずみ ϵ を考え、これに対応して定まるせん断ひずみ強度 S がつぎの条件に達するとコンクリートは破壊するという事実¹¹⁾を三軸圧縮実験により実験的に知ることができた。

$$S = f(\varepsilon) = a + b \varepsilon \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

$a, b : \text{const.}$

ただし、

$$\varepsilon = \frac{1}{3} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

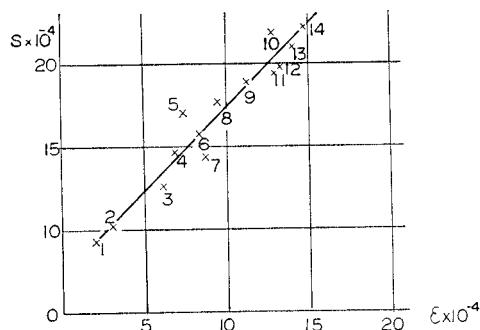
$$S = \sqrt{\frac{1}{6} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]}$$

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: principal strain

図-11 は式(8)の具体的実験結果の例である。すでに述べた式(1), (3), (5), (7) は式(8)の中の

图-11

$S \sim \epsilon$
 (Intensity of Shear Strain) (Mean Vertical Strain)
 Series I, 1:3.5 Concrete, w/c=50%, 4Ws



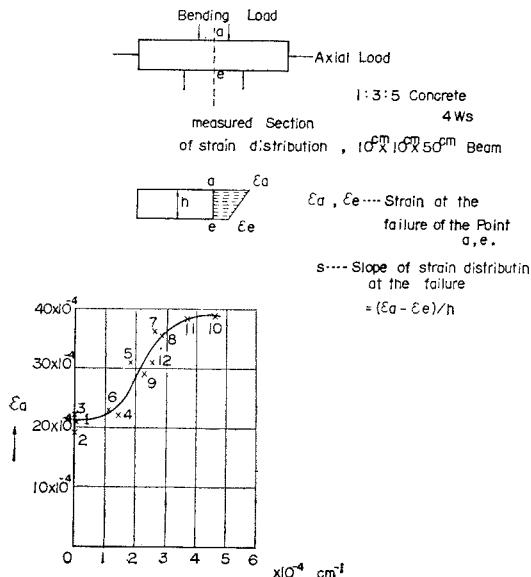
一軸荷重のみの時の一点に対応するものであると解釈できる。

つぎに 10 cm 角, 50 cm 長のコンクリートばりに軸方向に圧縮を, 軸に直角方向に曲げを与え, 断面内にひずみ分布の傾斜を与えて圧縮破壊した結果⁵⁾を示す。

図-12 はこの一例でひずみ分布の傾斜が 0 の場合すなわち曲げ荷重を加えないで軸圧のみを加えたときの軸方向平均ひずみ能力 ϵ_c は約 21×10^{-4} であったが、曲げ荷重を加えてひずみ分布の傾斜を増大して行くと、断面内の破壊時の最大ひずみ能力は増大して行き、傾斜を最大にしたとき、すなわち図中の e 点で圧縮ひずみを 0 としたときの a 点の圧縮ひずみ能力は約 39×10^{-4} となってほとんど 2 倍の増加を示した。本研究において著者はこの現象を説明するのに、確率論的取扱いを必要とするとのみ述べておいた。

図-12

Strain Distribution Effects on the Strain Ability



4. 確率論的破壞論

決定論的立場に立つ場合コンクリートのごとき脆性体の破壊は前述のごとく式(1), (3), (5), (7)もしくは一般的に式(8)をもって規定することができ、かつ過去のひずみ履歴に関係しないということが明らかにされたのである。一方同種供試体のひずみ能力のバラツキ、ひずみ分布によるひずみ能力の増大、強度の寸法効果等は確率論的説明によらなければならぬものである。以下確率過程論の適用の可否を含めて著者の行なった実験とその考察を述べることとした。

(1) ひずみに立脚した破壊の確率過程論

前述のごとく脆性体の破壊の確率過程論⁴⁾は応力に立

脚しており、その根拠は供試体に一定応力を加えたときの破断に至る時間のバラツキにある。ひずみを立脚点とするとき一定ひずみの状態で破壊に至る時間を測ることは困難なので一定ひずみ速度を与えて破壊する場合を考える。

いま、 $r(t)$: 任意の時刻 t において単位時間に破壊の起る確率、破壊の推移確率

$P(t)$: 時刻 t までに破壊しない確率

すると、時刻 t までに破壊しないでつぎの dt 時間内にはじめて破壊する確率は $P(t)r(t)dt$ であり、これはまた $-dP(t)$ に等しいから次式を得る。

$$\frac{dP}{dt} = -rP \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

この関係は破壊の確率過程論の基本式としてよく知られたところ¹²⁾である。

破壊の確率が過去のひずみ履歴に関せず、現在のひずみにより定まると考えると、 t とともに変化するひずみ $\epsilon(t)$ のもとにおける破壊の推移確率 $r\{\epsilon(t)\}$ と非破壊の確率 $P(t)$ との間の関係は、したがってつぎのごとく書くことができる。

$$P = \exp \left[- \int_0^t r\{\varepsilon(t)\} dt \right] \dots \dots \dots \quad (11)$$

いま、等速ひずみ載荷を行ない最大ひずみ ε_1 に至って急速に荷重を除去する三角波荷重を n 波加えるとするとき、

$$\int_0^t r\{\varepsilon(t)\} dt = \int_0^{t_1} r\{\varepsilon(t)\} dt + \int_{t_1}^{t_2} + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n}$$

各段階の残留ひずみが ϵ_1 に比し十分小さいと考えれば、

$$\int_0^t r\{\varepsilon(t)\} dt \doteq n \int_0^{t_1} r\{\varepsilon(t)\} dt = nR(\varepsilon_1)$$

したがって ϵ_1 を最大ひずみとした n 波の三角波荷重を与える間の非破壊の確率は次式のごとく計算される。

$$P(\varepsilon_1)_n \doteq \exp\{-nR(\varepsilon_1)\} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

ひずみに立脚した破壊の確率過程論が成立すると仮定すれば、三角波荷重の波数により式(12)に示すとく非破壊の確率が大きく変化しなければならない。まずこの問題を実験的に検討してみよう。

表-1, 2, 3 に示す材料により、コンクリート モルタルの各一種の供試体をそれぞれ 100 個作った。材令 4 週、標準養生、供試体径 10 cm、高さ 20 cm である。2 個の π ゲージにより上下方向の供試体の変形を測定するとき、その出力と等速ひずみ制御装置内のシンクロナスモーター駆動によるひずみ速度一定の標準ブリッジ回路よりの出力とを比較しその過不足を零にしながらアムスラー耐圧試験機により荷重を与えた。ひずみ速度はすべて $43 \times 10^{-6}/\text{sec}$ とした。図-13 は実験記録の一例で

コンクリート供試体に最大ひずみ ϵ_1 を 21×10^{-4} としたときの三角波荷重を2波与え、その後に破断実験した例を示す。上段は最後の荷重が最大で、したがって前述の定義により2波の過程中に破壊しなかった場合であり、下段は最後の荷重が第1波の荷重より小であり、したがって2波の過程中に破壊したと考えられる場合である。100個のうち10個につき通常の破壊試験を行ない、平均の圧縮ひずみ能力 ϵ_c を求め、残りの90個につき各10個ずつ最大ひずみ ϵ_1 を数段階に分けて三角波荷重を1波ないし5波加えてから最後に破断試験を実施し、前述定義にしたがって各10個中の非破壊の確率を求めた。

表-4はこの結果をまとめたものであり、これを図にしたのが図-14である。

この結果は荷重の波数により非破壊の確率が影響されないことを示し、明らかに式(12)の成立を否定している。

表-1 Properties of Cement.

1)	Ig loss	Ins. R.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
	0.5	0.6	23.2	4.0	4.1	64.0	1.0	1.9
2)								
Sp. gr.	Finess (Blaine)			3 day	7 day	28 day	Flow	
3.20	3160 cm ² /g			114 kg/cm ²	178 kg/cm ²	376 kg/cm ²	247 mm	

表-2 Properties of Aggregates

	Sp. gr.	Max. Size	Gradation	
			Gravel	Sand
Sagami River Natural Agg.	2.75	25 mm	25~20 mm—25%	5.0~2.5 mm—15%
			20~15 mm—25%	2.5~1.2 mm—15%
			15~10 mm—25%	1.2~0.6 mm—25%
			10~5 mm—25%	0.6~0.3 mm—25%
			10~5 mm—25%	0.3~0.15 mm—15%
			0.15~	— 5%

表-3 Tested Concrete & Mortar

	Age in Weeks	Mix Proportion					Slump & Flow
		Cement	Water	Sand	Gravel	W/C	
Concrete	4	300 kg/m ³	150 kg/m ³	710 kg/m ³	1264 kg/m ³	50%	2.5 cm
Mortar	4	511 kg/m ³	255.5 kg/m ³	1533 kg/m ³	—	50%	170 mm

つぎにこれをさらに確かめるために非破壊の確率0.9程度に相当する最大ひずみ ϵ_1 の三角波荷重を選び、100波のくり返しの後に破断試験した例を図-15, 16に示す。

図-13

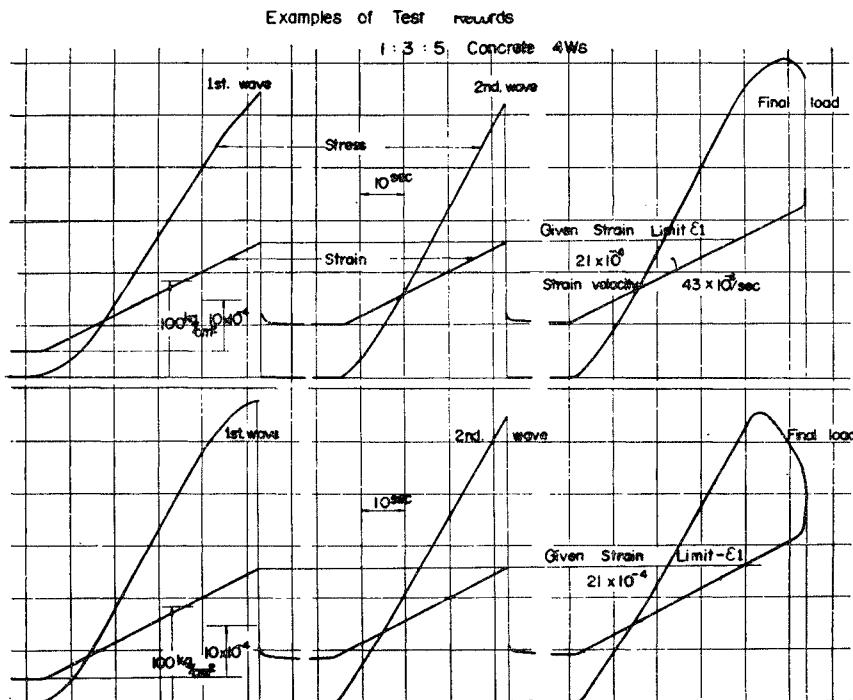


表-4 Strain limit ϵ_1 and Probability of Non Failure $P(\epsilon_1)$

1:3:5 Concrete 4W _s (Compressive Strain Ability ϵ_c Mean of 10 Pieces = 21.6×10^{-4})				
ϵ_1	One wave	2 waves	3 waves	5 waves
20×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.9$	—	—	$P(\epsilon_1) = 0.8$
21×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.6$	$P(\epsilon_1) = 0.6$	$P(\epsilon_1) = 0.7$	—
22×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.3$	$P(\epsilon_1) = 0.2$	$P(\epsilon_1) = 0.2$	—
23×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0$	—	—	—

1:3 Mortar 4W _s (Compressive Strain Ability ϵ_c Mean of 10 Pieces = 33.5×10^{-4})				
ϵ_1	One wave	2 waves	3 waves	5 waves
29×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.8$	—	—	$P(\epsilon_1) = 0.8$
30×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.7$	—	$P(\epsilon_1) = 0.7$	—
31×10^{-4}	—	$P(\epsilon_1) = 0.4$	$P(\epsilon_1) = 0.5$	—
32×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.3$	$P(\epsilon_1) = 0.2$	—	—
33×10^{-4}	$P(\epsilon_1) = 0.1$	—	—	—

図-14

Repetition of Loads does not affect Probability of Non-failure $P(\epsilon_1)$

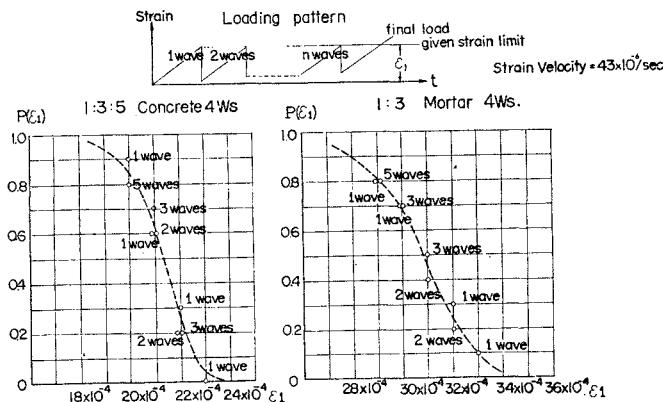
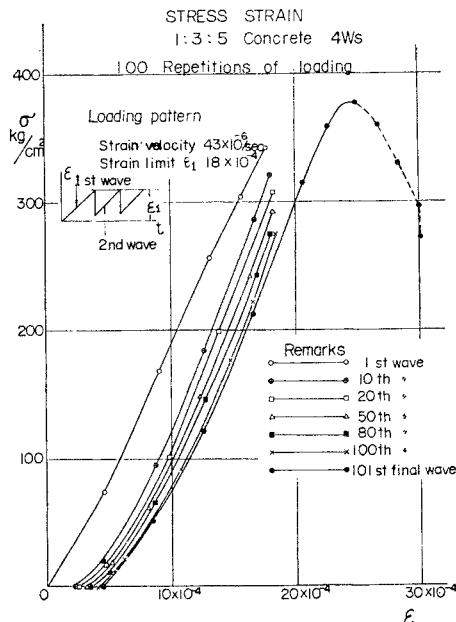
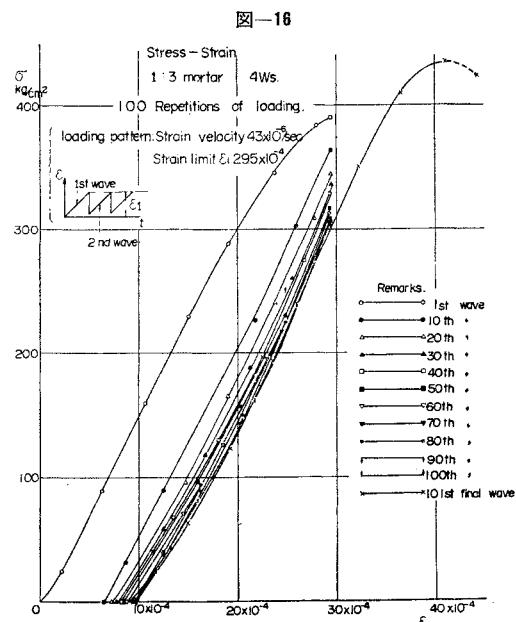


図-15



式(7)が成立した。しかし今回のごとく破壊ひずみ近



す。共に100波の荷重経過中に破壊せざる最後の荷重で破壊したことなどを知ることができる。この結果もまた明らかに式(12)の成立を否定しているということができる。

以上からコンクリートのごとき脆性体に、あるひずみを与えるとそのひずみの程度に応じて定まる破壊の推移確率、すなはち単位時間あたりの破壊確率ありといふ概念が成立しないことが立証されたのである。したがつてあるひずみにおいてこれに相応した破壊確率

をもつと考えれば十分なのである。コンクリートのごとき脆性体はひずみを立脚点とするときいわば静的な確率論を破壊に対して考えればよいのである。

ここに上述の実験を通じて一つの注目すべき事実が見られた。図-15, 16に示した最後の破断試験における圧縮ひずみ能力 ϵ_c はコンクリートにおいて 25.0×10^{-4} , モルタルにおいて 41.0×10^{-4} と測定され最初から通常の破壊試験したときの圧縮ひずみ能力コンクリートの 21.6×10^{-4} , モルタルの 33.5×10^{-4} に比べてかなり増大している点である。前節に述べたごとくひずみ能力の1/2以下のひずみを生ずるくり返し荷重下では、ひずみ履歴の影響は現われず

表-5 Distribution of Compressive Strain Ability ϵ_c

1:3:5 Concrete 4W _s																							
$\epsilon_c \times 10^{-4}$	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0							
No. of Pieces	5	6	9	11	12	10	12	10	11	5	5	3	—	—	—	1							
1:3 Mortar 4W _s																							
$\epsilon_c \times 10^{-4}$	26.0	27.0	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	
No. of Pieces	1	1	2	2	1	1	4	5	6	5	9	4	12	9	9	8	7	3	6	1	2	2	Total 100

くまで変形した場合には、一種の加工硬化現象が生じたと考えることができよう。したがって、破壊ひずみに近いひずみ履歴を与えた場合には、その memory なしと断することはできないが、少なくとも工学的範囲のひずみ履歴を対象とするときは非破壊の確率は過去のひずみ履歴によらないと考えてよいと思われる。

(2) ひずみに立脚した破壊の静的確率論

コンクリートのごとき脆性体の破壊は確率論で説明する必要はなく、古典的な静的確率論で説明してよいとの見通しが以上のごとく明らかになった。そこでコンクリート、モルタル各一種につき 100 個宛の供試体による一軸圧縮ひずみ能力 ϵ_c の分布を求めた。材料その他に(1)に述べたと同様ですべて $43 \times 10^{-6}/\text{sec}$ のひずみ速度で実験した。

表-5 は 100 個の供試体について得られたひずみ能力 ϵ_c 別の個数を示しており、この結果を極値型に一般に採用されている Weibull 分布²⁾に適用して見ることにする。圧縮ひずみ能力 ϵ に対する非破壊の確率 $P(\epsilon)$ は Weibull の方法によればつぎのごとく表現できる。

$$P(\epsilon) = \exp(-\alpha\epsilon^\beta) \quad \dots \dots \dots (13)$$

上式において $\log \epsilon$ と $\log\{-\log P(\epsilon)\}$ は直線関係にあり、表-5 の値により $P(\epsilon)$ を求め直線のあてはめにより α , β を計算する。図-17 の○印は実験から得られ

図-17

Calculation of Weibull Distribution

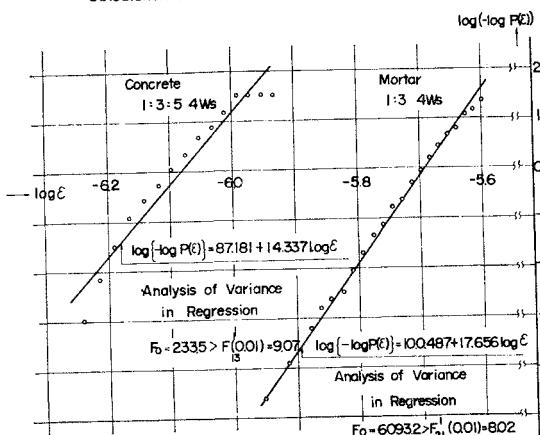
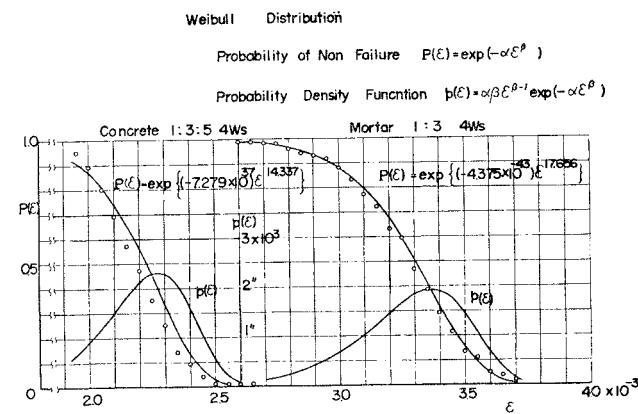


図-18



た ϵ と $P(\epsilon)$ の関係点を示し実線は理論直線を示す。得られた結果はそれれつぎのごとくでこれを図にすると図-18 のごとくなる。

コンクリート

$$P(\epsilon) = \exp\{(-7.279 \times 10^{37})\epsilon^{14.337}\} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\beta \text{ の } 95\% \text{ 信頼限界} = 14.337 \pm 2.026$$

モルタル

$$P(\epsilon) = \exp\{(-4.375 \times 10^{43})\epsilon^{17.656}\} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$\beta \text{ の } 95\% \text{ 信頼限界} = 17.656 \pm 0.470$$

また回帰分析の結果は、 $\log \epsilon$ と $\log\{-\log P(\epsilon)\}$ との間の直線性として図-17 に記入したごとく高度の有意性をもつことを示している。

以上により式(13)具体的には式(14), (15)のごときひずみ ϵ に応じて定まる非破壊の確率 $P(\epsilon)$ により破壊を論ずればよいとの結論となるのである。

これらの結果は前節に述べた式(1), (5), (7)に対応するものであり、三次元応力状態の破壊を規定する式(8)に対応させるためには、任意の平均垂直ひずみに対するせん断ひずみ強度を基準にした Weibull 分布を必要とする。これを得るために莫大な実験を必要とするが、ここに得られた結果から類推することも可能であろう。

以上得られた結果を用いてひずみ分布によるひずみ能力の増大に関する著者の実験結果を説明して見よう。

図-12において断面 a~e における破壊時のひずみ分布は

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \frac{x}{h} (\varepsilon_a - \varepsilon_e) \quad \dots\dots\dots (16)$$

と表現される。この断面の破壊確

率を最弱リンク説によって計算し、一様ひずみ分布のときの破壊確率と等しいとおいて次式を得る。

$$h \left\{ 1 - \exp(-\alpha \varepsilon_c^\beta) \right\} = \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_a} \{ 1 - \exp(-\alpha \varepsilon^\beta) \} d\varepsilon \quad \dots \dots \dots (17)$$

式(17)における ϵ_c , ϵ_a , ϵ_e の関係を求めるにあたって, $P(\epsilon)$ の中央値におけるひずみで比較すると, 式(14)から $P(\epsilon)=0.5$ に対して $\epsilon_c=22.22 \times 10^{-4}$ が得られ, ϵ_e を数段階に変化させて式(17)を満足させる ϵ_a を求めると表-6のごとくなる。

この結果は 図-12 に示した実験結果をよく説明しており、 ϵ_e が 0 のとき ϵ_a の値は ϵ_c の約 2 倍に増大している。

本実験で得られた Weibull 分布はひずみに対して得られたものであるから、圧縮強度の寸法効果に対する説明にただちに適用することはできないが、表-6 に示したひずみ能力とこのとき得られた静的圧縮強度との相関がきわめて高い事実から、圧縮強度に対しても適用できると仮定すると、Weibull 分布を使用したときの寸法効果を示す次式¹³⁾の β の値に式(13), (14), (15) の β の値を適用できるであろう。

σ_{1u}, σ_{2u} : 体積それぞれ V_1, V_2 のときの強度

式(18)の具体的適用例はここには述べないがこの関係により強度の寸法効果を適切に説明できるものと考えられる。

5. 結論

上述の論議の要約を結論として述べればつぎのごとくである。

(1) コンクリートのごとき脆性体の破壊論は、ひずみを立脚点としてはじめて、時間、温度、くり返し荷重の影響等を含めて統一的に成立させることができ、決定論的には式(8)のごとき形で一定ひずみ論として表現され、確率論的には式(13)のごとく非破壊の確率をひ

表-6 Strain Distribution Effects on the Strain Ability

ε_e	22.22×10^{-4}	20.00×10^{-4}	15.00×10^{-4}	10.00×10^{-4}	5×10^{-4}	0
ε_a	22.22×10^{-4}	23.59×10^{-4}	28.60×10^{-4}	33.59×10^{-4}	38.59×10^{-4}	43.59×10^{-4}

すみによる Weibull 分布で表現できる。

(2) 近来の物性論にもとづいた確率過程論はひずみを立脚点とするとき、コンクリートのごとき脆性体の破壊には成立せず、(1)に述べた静的確率論で十分である。換言すればあるひずみ値に応じて破壊の確率が定まるとしてよく、したがってこの確率論によりひずみ分布の破壊におよぼす影響、寸法効果等破壊確率の空間分布を適切に説明できるが、確率過程論による破壊確率の時間分布の説明は否定されねばならない。

(3) コンクリート、モルタルを材料として破壊を論じたが、これらの議論は岩石はもちろん適当な取扱いを加えて岩盤にまで拡張できるものと考えられる。

謝辞 本研究の過程において種々有益なご討議をいただいた大阪大学堀 素夫助教授に対し厚く謝意を表する。

引用文献

- 1) Murrel : "Mechanical Properties of Non Metallic Materials" (1958).
 - 2) Weibull : Ing. Vetengkaps Akad. Handle. No. 151 (1939).
 - 3) 平田森三：物理学会講演 (1948.5).
 - 4) M. Hori : Statistical Aspects of Fracture in Concrete, J. Physical Society of Japan 1959 Oct.
 - 5) 畑野 正：コンクリートのひずみ能力、破壊強度に対するひずみ分布の影響、土木学会論文集 100 号、1963.
 - 6) R. Jones : A method of Studying the Formation of cracks in a material subjected to Stress, B.J. Applied Physics. 1952.
 - 7) 畑野 正：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 73 号、1961.
 - 8) 畑野 正：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 73 号、1961.
 - 9) 畑野 正：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 111 号、1964.
 - 10) 畑野 正：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 84 号、1962.
 - 11) 畑野 正：組合せ圧縮荷重によるコンクリートの変形と破壊、土木学会論文集 143 号、1967.
 - 12) 横堀武夫：材料強度学 (1955).
 - 13) B. Epstein : Statistical Aspects of Fracture Problems, I. Applied Physics. 19, 1948.