

# 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

## EFFECTS OF STRAIN DISTRIBUTION ON THE STRAIN ABILITY AND STRENGTH OF CONCRETE

畑 野 正\*  
By Tadashi Hatano

**要 旨** コンクリートおよびモルタル各一種の断面 10 cm 角、50 cm 長の供試体に軸圧力と曲げ荷重を加えて、断面内にひずみ分布の傾斜のある状態で圧縮破壊実験を行なった。この結果、ひずみ分布の傾斜が大となるほど破壊時のひずみ能力が大となることが明らかにされた。しかし、その増大には限度があり、部材内のひずみ値が、ひずみ分布の傾斜のない、すなわち通常の一軸破壊試験のときのひずみ能力の、コンクリートの場合約 2 倍、モルタルの場合約 1.5 倍になると、さらに、その傾斜を大としてもこれ以上ひずみ能力の増大は見られなかった。これらの結果を従来の慣用法すなわち外力や応力の面と比較するため破壊時間一定のときの強度という立場で説明すれば、ひずみ分布の傾斜が大なるほどコンクリートの強度が増大することが明らかにされた。しかし、その増大には限度があり部材内の計算応力値（軸圧力の平均値と曲げ荷重による計算縁応力の和）が、ひずみ分布の傾斜のない、すなわち通常の一軸破壊試験のときのコンクリートおよびモルタルの強度の 1.5 倍になると、さらにひずみ分布の傾斜を大としても、これ以上、計算上の強度は増大しなかった。

以上の結果はコンクリートの破壊を確率的に取り扱うべきであることを示唆し、また現用コンクリート部材の設計における許容応力の採り方に重大な変換を要求するものであると考えられる。

### 1. 緒 言

著者はコンクリートの基本的な材料力学的性質につき、これまで数回にわたって報告してきた。すなわち、一行程の圧縮や引張荷重に対してひずみ能力が時間に関せず一定であり、破壊強度および弾性率がともに時間の対数値と一定関係にあること<sup>1)</sup>、くり返し圧縮荷重に対してもひずみ能力一定の法則が成立し、動的弾性率が時間の対数値と一定関係にあること<sup>2)</sup>、また以上の場合のコンクリートの挙動が Maxwell-Kelvin body などの粘弾性体で説明できることなどがその主たる結果であった。これらの結論はすべて一軸荷重によって、ひずみ分布が断面を通じて一様と考えられる場合につき得られたものである。

ここに述べようとするのは、これらの問題をさらに発展させ、コンクリートの断面内におけるひずみ分布が一様ではなく、ある傾斜をもったときにそのひずみ能力や破壊強度がどのように変化するかという問題である。

この種問題のうちコンクリートの曲げ試験の場合の伸び能力が、ひずみ一様分布の純粋引張試験の場合の伸び能力の約 2 倍に達するという点はすでに多数の人により知られた事実である。しかし、圧縮材であるコンクリートに関して最も重要な圧縮ひずみ、圧縮強度に関するひずみ分布の影響については全く知られていないのが実情である。そこで著者はここにこの問題を取りあげて実験を行ない、これから一般的な結論を導きたいと考えるのである。この問題の包含するところはコンクリートの破壊論をふくめて、コンクリート部材の設計上きわめて重要な課題であり、安全率決定に大きく影響を与える問題であると考えられる。

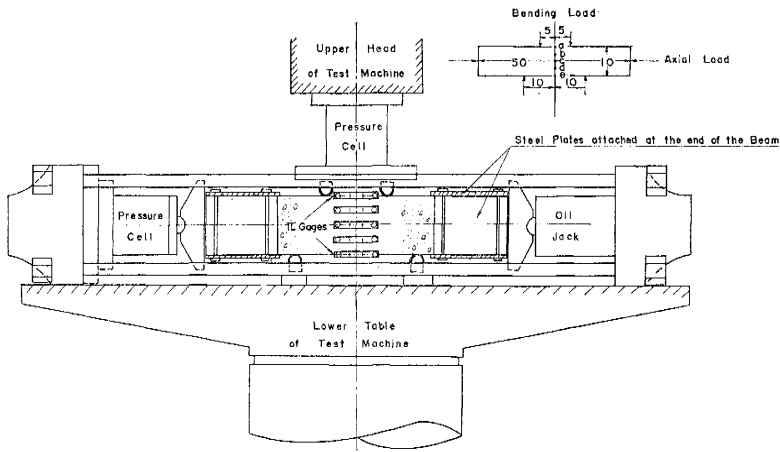
### 2. 実験の方法

コンクリート部材にひずみ分布の傾斜がある状態で圧縮破壊試験を行なうため、著者はコンクリートはり状供試体に軸圧力を加えると同時に、軸に直角方向に曲げを加える方法をとった。その実験装置の概略は **図-1** および **写真-1** に見ることができる。すなわち、10 cm 角の断面をもつ 50 cm 長のはり状供試体を、4 本の径 40 mm の鋼棒を通じて油圧ジャッキにより軸圧力を加えることのできる軸圧力荷重装置の中に装着する。油圧ジャッキは手動式であって、SR ゲージによる圧力セルによりこの圧力の大きさが測定される。はりが曲げをうけて、その両端面が回転してもよいようにはりに対するあて鉋が端面の中央の水平軸の回りに回転できるようになっている。この荷重装置の容量は 50 t と設計され、圧力セルの容量は 100 t である。

はり供試体を装着した軸圧力荷重装置は 100 t 耐圧試験機の上におかれ、20 cm 間隔の曲げ用枕の上に供試体がのるようにされる。耐圧試験機の上部ヘッドには SR ゲージによる 100 t 圧力セルが固定され、この下部に 10 cm 間隔の曲げ用枕が装着される。はりの両端部には鋼鉋を四辺にボルト締めしておき、破壊が常に供試体の中央部でおこるようにした。供試体の中央部一側面には上

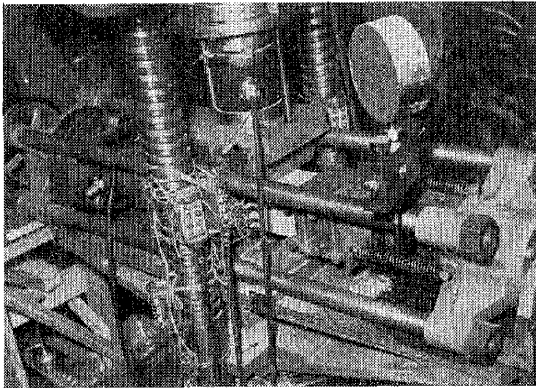
\* 正員 工博 電力中央研究所技術研究所 第 2 部構造研究室

図一

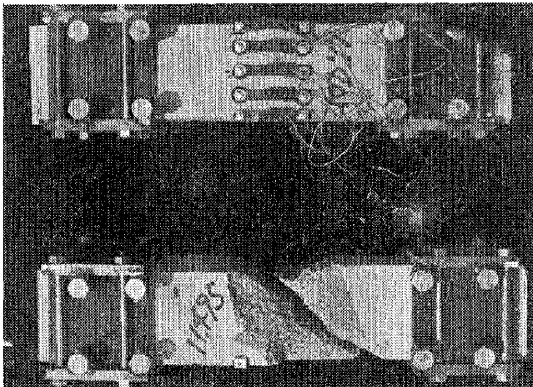


SCHEMA OF TEST ARRANGEMENT

写真一



写真二



辺 a から 2.5 cm 間隔に下辺 e に至るまで a, b, c, d, e の 5 点のひずみを測定するよう  $\pi$  ゲージを配してある。 $\pi$  ゲージは  $\pi$  型の薄い燐青銅板に SR ゲージをはったものでゲージ長 6.6 cm である。ナットを接着剤で供試体に固着しビスで試験のつど  $\pi$  ゲージを供試体に装着した。これらの状況は 図一 および 写真二 に見ることができる。軸圧力、曲げ荷重および 5 点のひずみがオシログラフに同時記録される。

実験は第一段階に油圧ジャッキにより軸圧力を加え、第二段階に耐圧試験機により曲げ荷重が加えられる。このとき c 点のひずみが引張ひずみにならない範囲に曲げ荷重を止め、第三段階で軸圧力を増加して破壊した。かくて第一段階の圧力の大きさにしたが、破壊時の断面のひずみ分布の傾斜の変化を得ることができた。試験はすべて静的荷重と称すべき荷重速度で行なわれたが、荷重をかけ初めてから、破壊までの全所要時間は 約 100~200 sec であった。

コンクリートおよびモルタルの各一種の配合について実験した。

使用材料の性質、配合などは 表一 1, 2, 3 に示すとおりである。試験時の材令は 28 日で、 $\pi$  ゲージ装置のためのナット接着のため試験前 5 日まで水中で標準養生したが以後空中で乾燥した。test I および test II の各 2 回の実験を行なったが、test I では破壊軸圧力が曲げ荷重が相当大きい状態でもほぼ一定となる結果となったので

Table 1. Properties of Cement

(1)							
Ig. loss	InS. k.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
0.9	0.6	23.5	4.1	4.0	63.4	1.0	1.8
(2)							
sp. gr.		Fineness (Blaine)					
3.18		3 210 cm <sup>2</sup> /gr					
(3)							
Flow	Strength of Standard Mortar						
	3 day	7 day	28 day				
250 mm	98 kg/cm <sup>2</sup>	168	398				

Table 2. Properties of Aggregates

Sagami River Natural Aggregates				
sp. gr.	Maxsize	Gradation		
		2.75	25 mm	Gravel 25~20 mm 25%
20~15 25%	2.5~1.2 15%			
15~10 25%	1.2~0.6 25%			
10~5 25%	0.6~0.3 25%			
	0.3~0.15 15%			
		0.15~ 5%		

Table 3.

Test.	Age in day	Mix Proportion					Slump Flow (mm)
		Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Gravel (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	
I, II Concret	28	300	150	710	1 264	50	100
I, II Mortar	28	511	255.5	1 533	—	50	172

test II では第一段階の軸圧力を相当大きくとることにより、ひずみ分布の傾斜ができるだけ大きくなるようにして実験した。この場合、第三段階に至らず第二段階で破壊した場合もふくまれている。

### 3. 実験の結果

実験は各 test ごとにまず軸圧力のみによる破壊試験を行なって断面におけるひずみ分布の傾斜がない状態でのひずみ能力強度ならびに応力ひずみ曲線を求めた。図-3, 4, 5, 6 の 1, 2, 3, ①, ② にこの結果が示されている。図から明らかなように破壊時における a, b, c, d, e の 5 点のひずみ値には凹凸があるが、平均ひずみ値に対して

±数 % の変動にとどまっているので、この場合のひずみ分布の傾斜をいずれも 0 と考えることにした。なお、ここに破壊時というのは圧力セルのオシロ記録上の示度最大になっているときのことであって、このときのひずみ値をひずみ能力と定義し最大荷重を破壊荷重としている。以下、破壊の定義を曲げを加えて試験した場合についても同様に考えるものとする。

曲げを加えて破壊した実測の記録の例を図-2 にあげてある。このような記録を用いて数種の荷重時における断面内のひずみ分布を読みとり荷重ひずみ分布図として表現したのが図-3, 4, 5, 6 である。破壊時のひずみ分布の傾斜には大きな凹凸は見られず、ほぼなめらかな直線

図-2

Examples of Test Records

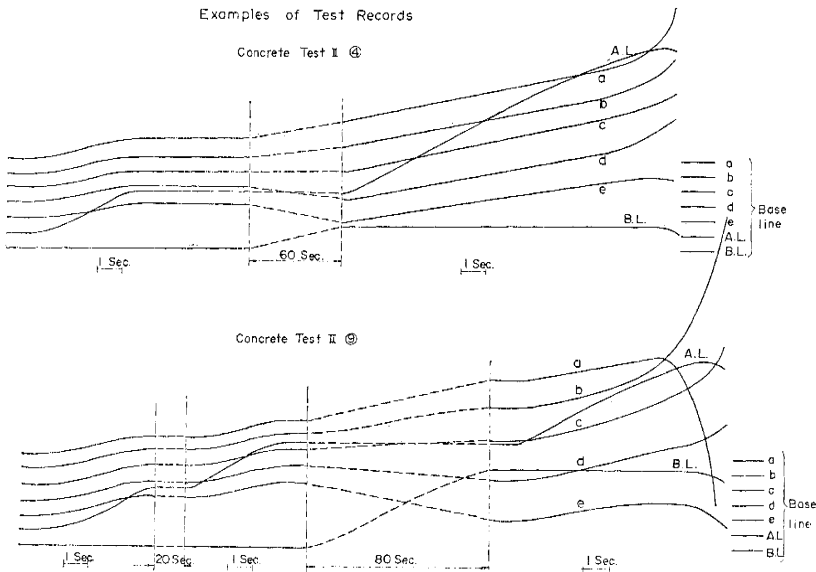


図-3 (a)

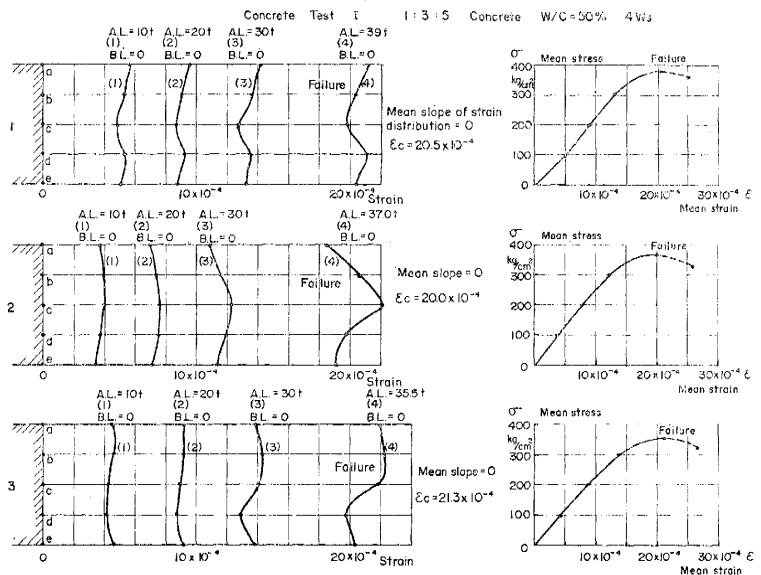
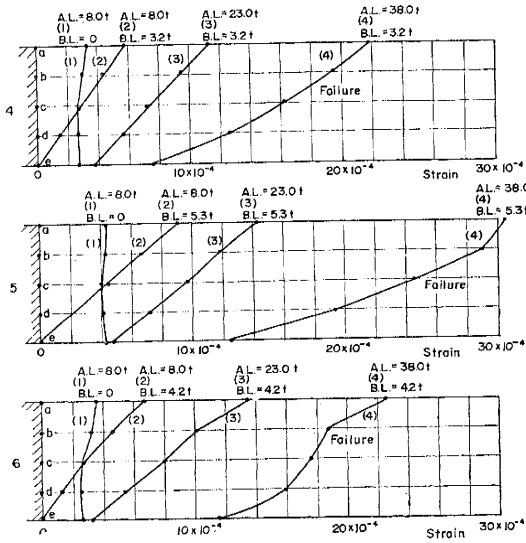


图-3 (b)

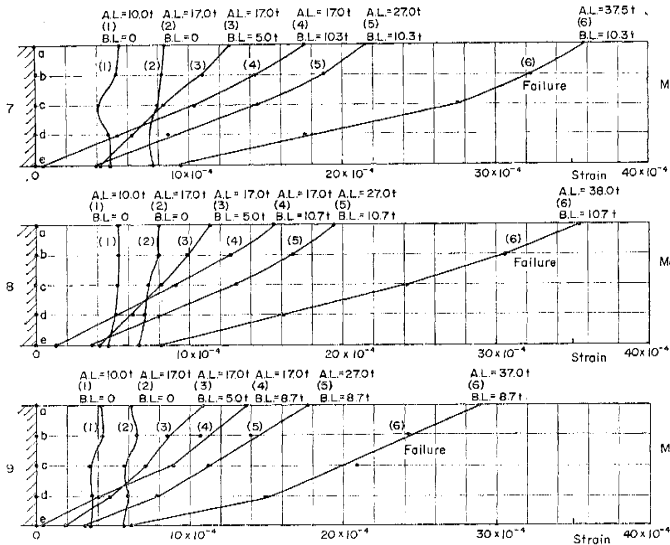


Mean slope =  $1.42 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 21.8 \times 10^{-4}$

Mean slope =  $1.92 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 30.5 \times 10^{-4}$

Mean slope =  $1.10 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 22.6 \times 10^{-4}$

图-3 (c)



Mean slope =  $2.63 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 35.8 \times 10^{-4}$

Mean slope =  $2.76 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 35.5 \times 10^{-4}$

Mean slope =  $2.29 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 29.0 \times 10^{-4}$

写真-3

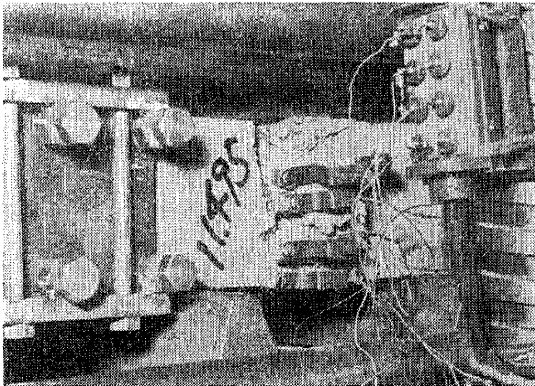


写真-4

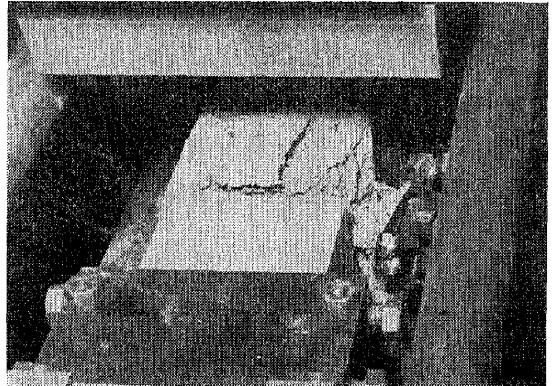


図-3 (d)

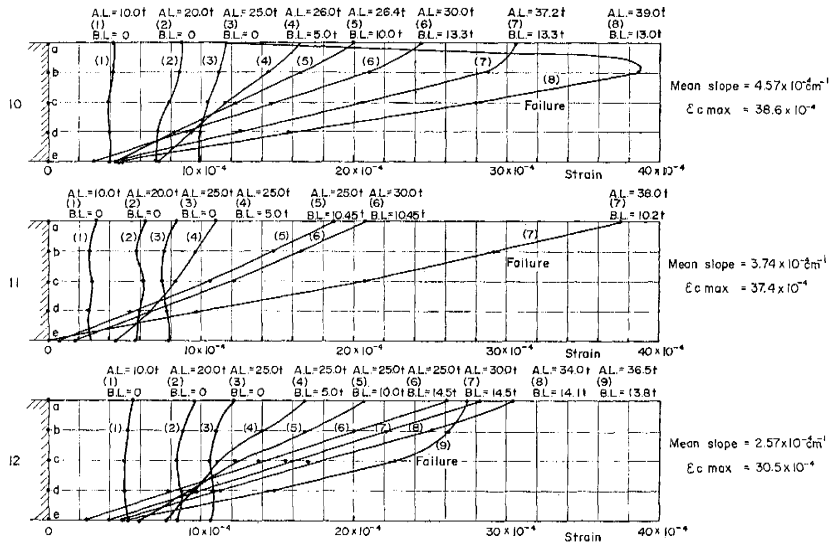
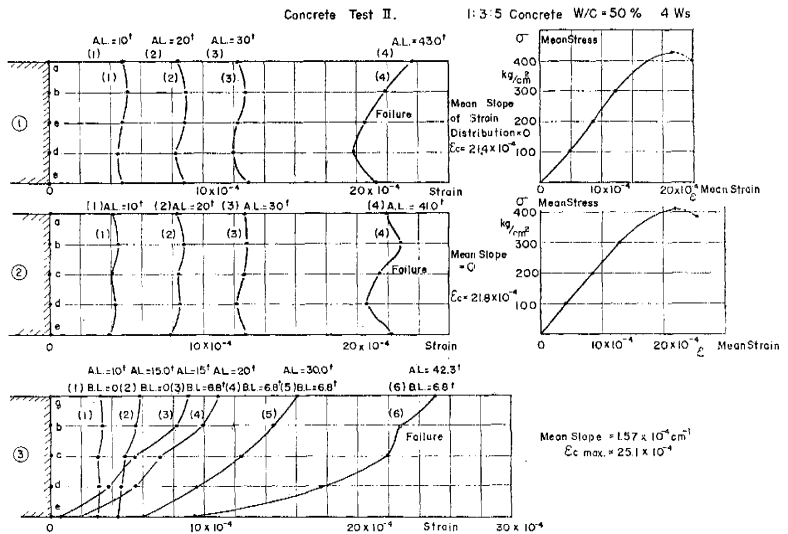


図-4 (a)

をなしている。このときの a, b, c, d, e 間のひずみ分布の平均勾配を mean slope, a 点の最大ひずみを  $\epsilon_{cmax}$  として図中に記してある。なお、この場合、曲げ荷重が大きい実験では、例えば図-3~10に見るように破壊時において a 点のひずみが減少し、b, c, d, e の区間に一つの直線勾配をなしている。これは図-2の下段の記録に見られるようにある程度以上の荷重になるとはり全体としては破壊していないのに a 点のひずみ回復が生じているのであって、micro 破壊により a の部分の圧縮ひずみが緩和されるものと見なされる。このような場合には破壊時のひずみ分布の傾斜としては b, c, d, e 間のひずみの平均勾配をとり最大ひずみは b 点の最大ひずみを採用している。写真-2,3,4 は破壊状況の一例を示したもので、はり上縁 a 付近に大きな緑応力が生じ、この部分がもりあがって破壊しその下部にすべり破壊を生じている状況が明瞭に見られる。いずれも破壊時には大音響を発生して爆発的破壊を生じた。

以上の荷重ひずみ分布図において注意を要する一つの点がある。例えば図-3の4,5,6におけるように第一段階の軸圧力が小さな値であるときは第二段階の曲げ荷重を加えても中立点 c のひずみは変化なく c 点が中立軸上にあることを示している。しかし図-3の7,8,



9, 10のように第一段階の軸圧力が大きくなると、第二段階の曲げ荷重を加えた過程で中立点 c 点のひずみが増加して、あたかも中立軸がはりの中央より下方に移動したかのように見える。しかし、これは第一段階から第二段階にうつるのに数10秒の時間を要し、この間大きな圧力下のコンクリートにクリープひずみを生じ、断面における全般的なひずみの増大をきたしていることによる結果であって、中立軸の移動と考える必要はないものと考えられる。図-6の⑥, ⑧, ⑨に軸圧力が一定でも時間とともにひずみがいちじるしく増大している実例を見ることができる。

#### 4. 考 察

破壊時における断面のひずみ分布の傾斜とこのときの最大ひずみ値、すなわちひずみ能力との関係を図に示すと図-7を得る。この図はきわめて重要な事項を物語っていると思われる。すなわち、ひずみ分布の傾斜が大きくなるにつれてひずみ能力は増大している。しかも、この増大には限度があり、この実験においてはコンクリートの場合ひずみ分布の傾斜のないときのひずみ能力の約2倍がその限度であり、モルタルの場合は約1.5倍がその限度であることを示している。

これらの結果から一軸破壊によって得られたひずみ能力の値を、ひずみ分布に傾斜がある場合の破壊にあてはめることはできず、図-7に与えられるようにひずみ分布の傾斜に応じて定まるひずみ能力の値に達したときコンクリートに初めて破壊が起こるといふことになるのである。

このような破壊の基準を外力または強度の点から説明するとどのようになるか。時間効果を考えれば外力や応力の大きさが破壊の基準にはならないことはすでに著者の諸研究でくわしく指摘したところであるが、破壊時間を一定にした場合を考えて慣用の方法にしたがって、外力または強度の点から説明を試みよう。すなわち、この場合、本実験のように破壊時間を100~200 secに限定するものとし、このような破壊時間に相応した一定外力または強度で破壊が生ずることを考えるのである。図-8はこれらの関係を示したもので軸圧力による応力と曲げ荷重による計算縁応力の和がある限度以下であるとき破壊の軸圧力が一定であることをこの実験は教えている。従来の慣用の考え方、すなわち軸圧力による断面平均圧応力と曲げによる縁応力の和が一軸圧縮の破壊強度に達すると破壊するという取り扱い方をこの実験結果はまったく否定しているのである。

本実験ではひずみに対応する応力の測定をしなかった

図-4 (b)

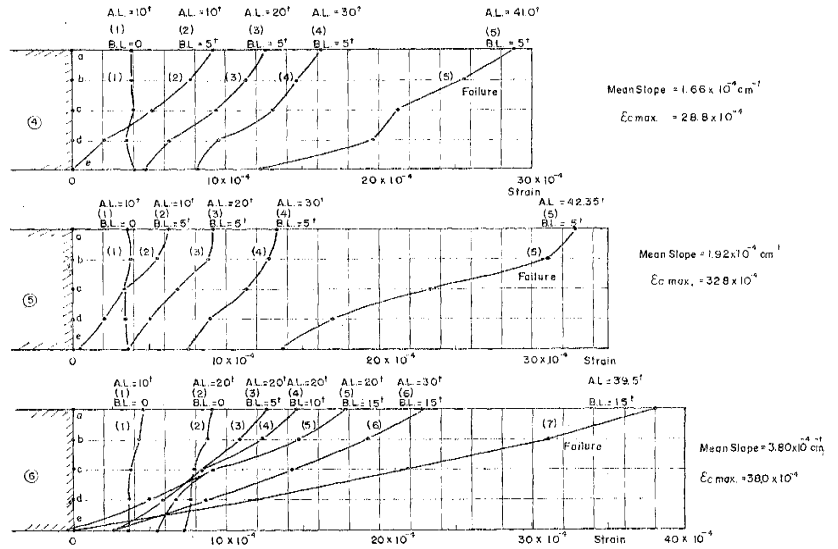
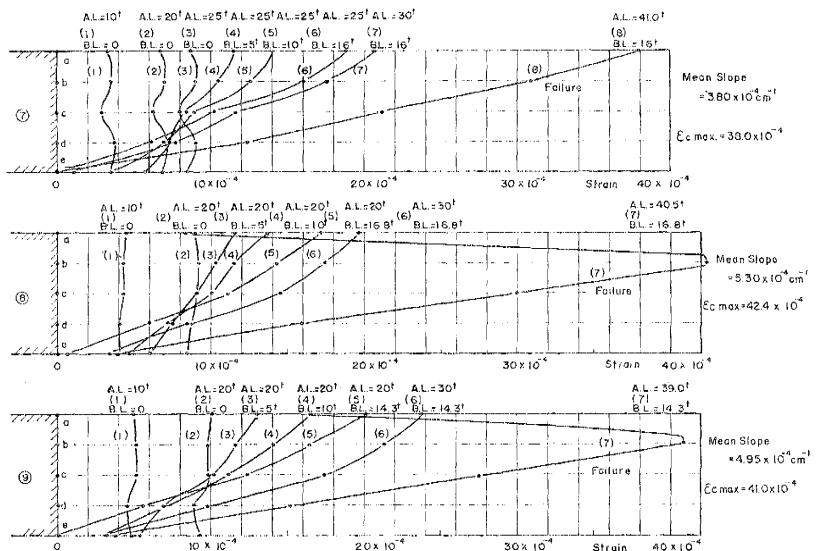
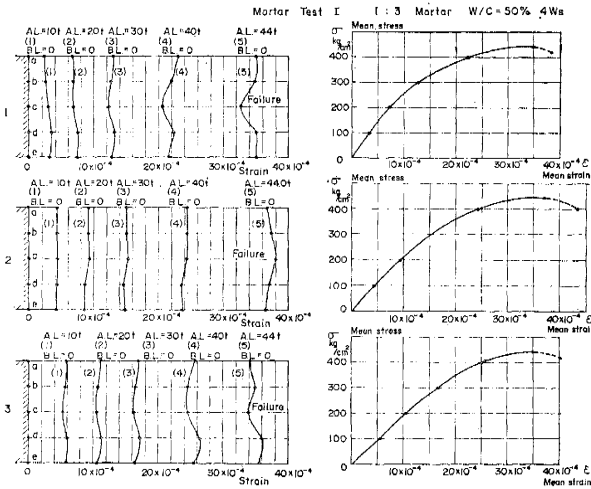


図-4 (c)



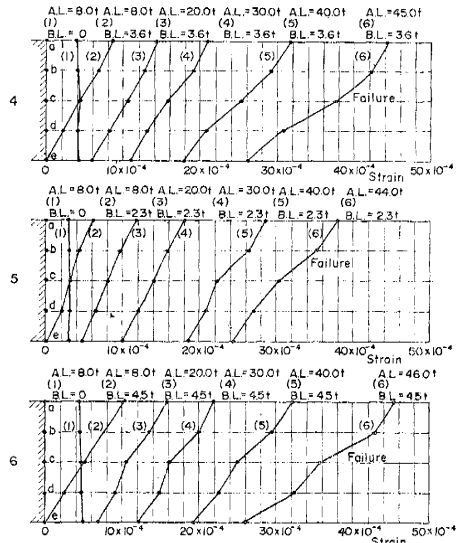
から、厳密に局部的な破壊強度を論ずることができないが、ひずみ分布の傾斜の増大するにつれて強度が増加するというのもまた事実であるといわねばならない。計算上の曲げによる縁応力  $M/I = h/2$  と破壊軸圧の断面平均  $L/A$  の和に対する一軸破壊強度  $\sigma_u$  との比を、ひずみ分布の傾斜の関係で表現した図-8は、計算上の強度がひずみ分布の傾斜の増大とともに増大し、かつコンクリート、モルタルともに一軸破壊強度の1.5倍という限度をもつものであることを示している。これから慣用の設計法にしたがい縁応力を計算して許容応力を決定するときは、考えられるひずみ分布の傾斜に応じて従来の値に比して1.5倍までこれを増大してよいことになる。また、曲げによる縁応力があまり大きくない範囲では、曲

図-5 (a)



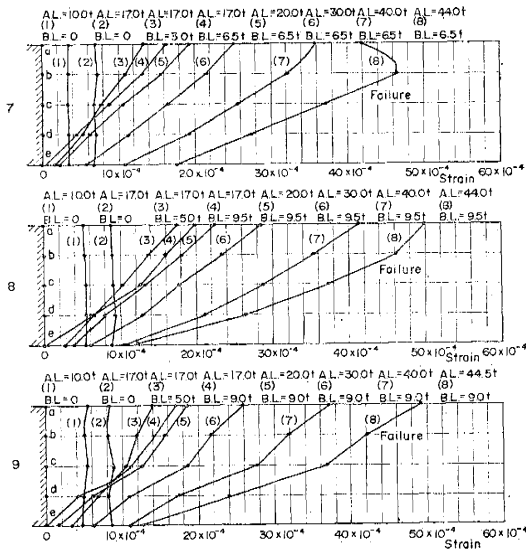
1. Mean slope of strain distribution = 0  
 $\epsilon_c = 37.1 \times 10^{-4}$   
 $\epsilon_c = 34.7 \times 10^{-4}$
2. Mean slope = 0  
 $\epsilon_c = 37.1 \times 10^{-4}$
3. Mean slope = 0  
 $\epsilon_c = 35.0 \times 10^{-4}$

図-5 (b)



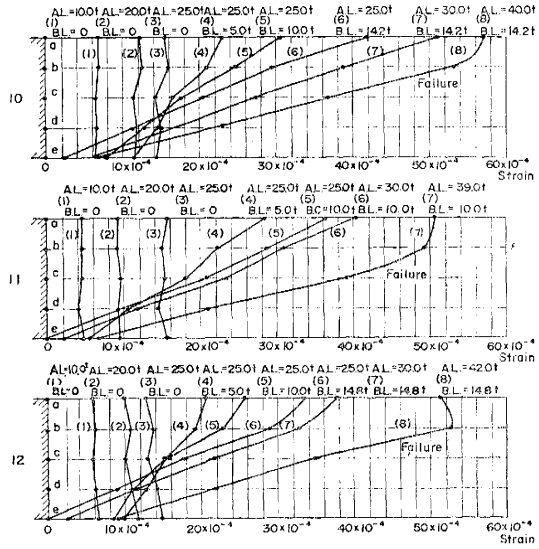
4. Mean slope =  $1.82 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 44.5 \times 10^{-4}$
5. Mean slope =  $1.34 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 37.9 \times 10^{-4}$
6. Mean slope =  $1.93 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 45.5 \times 10^{-4}$

図-5 (c)



7. Mean slope =  $3.92 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 47.0 \times 10^{-4}$
8. Mean slope =  $3.77 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 50.0 \times 10^{-4}$
9. Mean slope =  $3.76 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 49.3 \times 10^{-4}$

図-5 (d)



10. Mean slope =  $5.22 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 57.0 \times 10^{-4}$
11. Mean slope =  $4.38 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 50.5 \times 10^{-4}$
12. Mean slope =  $3.90 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   
 $\epsilon_c \text{ max} = 53.0 \times 10^{-4}$

げのあるなしに関係せず、断面内の平均応力が一定値に達したとき破壊が生ずるという表現をしてもよい。

しからば、このような事象が起こる原因を何に求めたらよいかという問題を考えて見よう。

ひずみ分布によってひずみ能力や強度が変化するという事は、破壊の性質を確率論的に取り扱うべきものであるということを示すものであるということができよう。コンクリート内部に一樣にひずみ分布していないと

き、そのひずみ最大部分にまず micro の破壊が生ずるとしても、その周囲のまだひずみの極大になっていない部分が力を受けもって、部材としての macro の破壊を生じない。これに反し、一樣のひずみ分布であるときは、一部分の micro 破壊を周囲の部分が背おう余裕は少なく、macro 破壊に早く到達してしまっ、前の場合に比してひずみ能力強度が小さな値となると考えることができる。このような説明は 30 年も前に中西不二夫

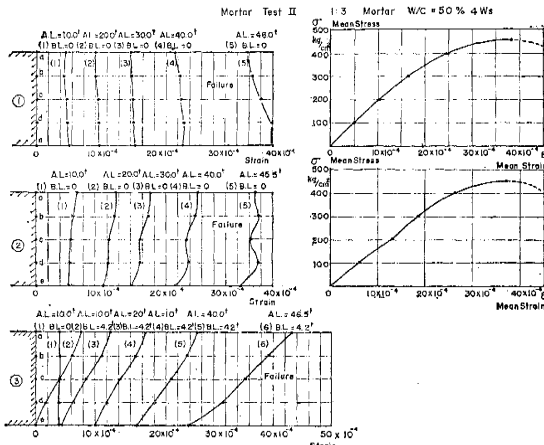
教授<sup>3)</sup>によって鑄鉄の曲げ破壊について述べられたものであるが、確率論的破壊を抽象的に説明したものでコンクリートの破壊についても、まさにこの説明があてはまると考えられるのである。数理的に、この説明を取り扱う方法には例えば堀素夫氏<sup>4)</sup>は確率過程理論をコンクリートはりの曲げ破壊に適用して、曲げ強度が引張り強度

より大きいことの数値的説明を試みた例などがある。

コンクリートの圧縮の領域における破壊立体的応力状態での破壊などにつき適用できる確率論的破壊論を展開することが将来の重要な課題であるといえる。

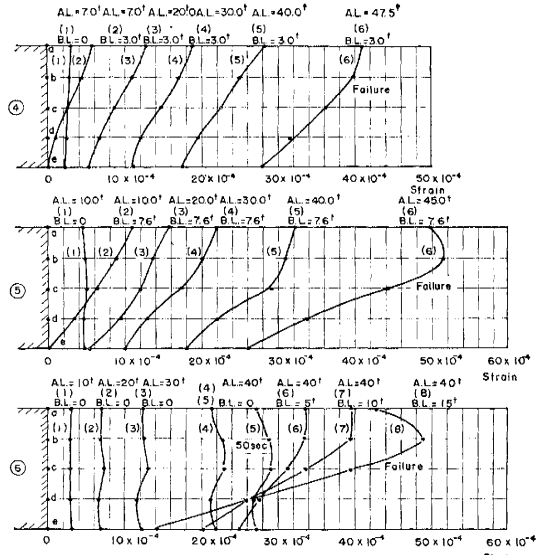
5. 結 論

図-6 (a)



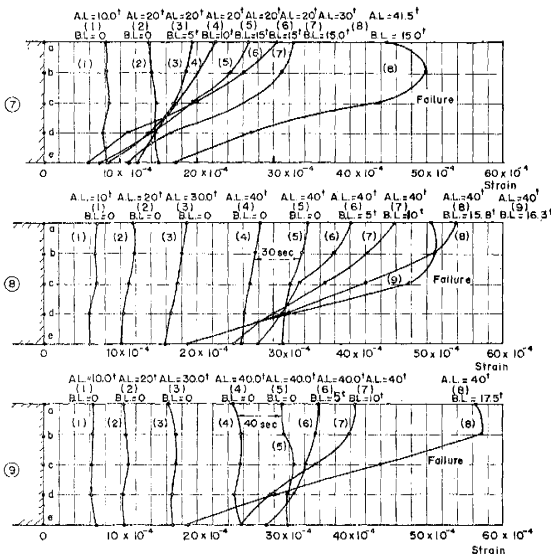
- 1. Mean Slope of Strain Distribution = 0  $\epsilon_c \max = 38.0 \times 10^{-4}$
- 2. Mean slope = 0  $\epsilon_c = 36.7 \times 10^{-4}$
- 3. Mean slope = 0  $\epsilon_c \max = 43.2 \times 10^{-4}$

図-6 (b)



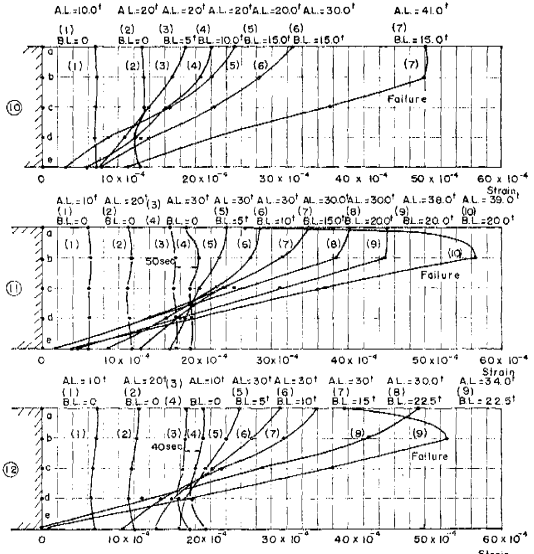
- 4. Mean slope =  $1.28 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 41.0 \times 10^{-4}$
- 5. Mean slope =  $3.32 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 51.5 \times 10^{-4}$
- 6. Mean slope =  $4.60 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 49.0 \times 10^{-4}$

図-6 (c)



- 7. Mean slope =  $4.35 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 50.0 \times 10^{-4}$
- 8. Mean slope =  $3.50 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 54.0 \times 10^{-4}$
- 9. Mean slope =  $5.13 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 5.75 \times 10^{-4}$

図-6 (d)



- 10. Mean slope =  $5.31 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 50.0 \times 10^{-4}$
- 11. Mean slope =  $7.00 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 56.8 \times 10^{-4}$
- 12. Mean slope =  $7.86 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$   $\epsilon_c \max = 53.0 \times 10^{-4}$



以上述べたところを要約すればつぎのようである。

(1) コンクリートはりに軸圧力と曲げ荷重を加え、断面にひずみ分布の傾斜を与えた状態で破壊した結果、ひずみ能力はひずみ分布の傾斜が大きいほど大となることが明らかにされた。しかし、この増大の程度には限度があり、本実験例ではコンクリートの場合、ひずみ分布の傾斜のないときのひずみ能力の約2倍、モルタルの場合、約1.5倍がこの最大限度であって傾斜がどれほど大きくなってもこの限度以上にはひずみ能力は増加しなかった。

(2) 破壊時間を一定とした場合の強度について比較すると、断面のひずみ分布の傾斜が大になると、曲げによる計算上の縁応力と破壊軸平均応力の和は大となり、曲げ荷重がある限度内では、曲げ荷重の存在に関係なく軸圧力による断面内の平均応力が一定値すなわち一軸破壊強度になると破壊を生じた。しかし、計算上の縁応力と軸圧力による応力の和にも限度があり、コンクリートとモルタルのいずれの場合もひずみ分布の傾斜のないときの破壊強度の1.5倍が最大限度であってひずみ分布の傾斜がどれほど大になってもこれ以上に計算破壊強度は増加しなかった。

(3) 以上の現象を説明するためにはコンクリートの破壊を確率論的に論ずる必要があり、本実験のような圧縮の範囲での破壊に適用するための確率論的取り扱いが望まれる。

(4) これらの結果をコンクリート構造物の設計に実際に適用するとき、従来の慣用法すなわち計算された最大応力に安全率を乗じた値をコンクリートの一軸破壊試験により得られる破壊強度として採用する方法は不定され、断面内におけるひずみ分布と最大応力値をあわせて考えるべきであることが明らかにされた。今後このような観点にたち、さらに広範囲な実験を進めるとともに、これらの現象を確率論的に取り扱い、従来の許容応力に

図-7

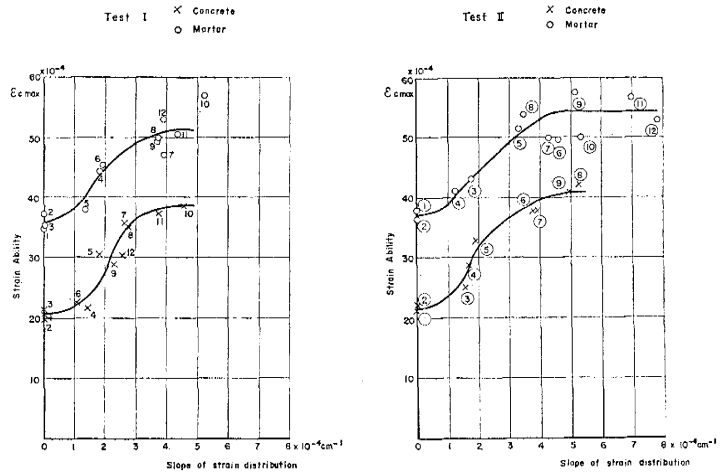
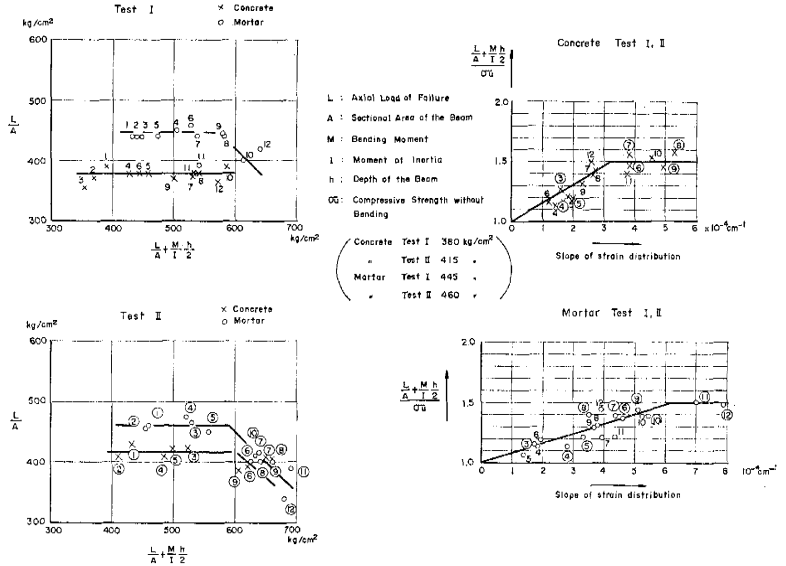


図-8



対する考え方を改め、より経済的、理論的設計を確立すべきである。

参考文献

- 1) 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、土木学会論文集第73号
- 2) 畑野 正：周期的圧縮荷重によるコンクリートの挙動、土木学会論文集第84号
- 3) 中西不二夫：鑄鉄梁の曲げによる破壊について、機械学会誌第36巻195号。
- 4) 堀 素夫：Statistical Aspects of Fracture in Concrete S. Physical Society of Japan Oct. 1939.

(原稿受付：1963.7.6)