

環境因子によるコンクリートの応力歪関係について

北海道工業大学 正員 大塚 雅生
 学生員 〇田名部 淳
 学生員 久保公一郎

1. 概説 今日、コンクリートの非弾性的な応力、歪関係を実験的に求める場合、少数の因子に焦点を絞り、他の多くの要因を固定する方法が多くとられている。このような実験に及いて、ある1つのファクターを1個ずつ研究するのでは他のファクターの条件が変わっても測定結果がほぼに一定であるという保証があるわけではない。従って、ここではコンクリートに及ぼすと思われる環境因子を取り上げ、それらがコンクリートに及ぼす影響と互いの関連を知り、かつ総合的な影響と独立性検照の資料を得る為にコンクリートの圧縮試験における応力と歪の関係について実験結果の解析を行なったものである。

2. 実験方法

2-1. 計画法 実験計画法 (Ref.1) は、通常分散分析を行うことを前提とし、種々のコントロールできない環境条件や未知の原因による実験データに対するバラツキ、更に影響の程度を客観的、定量的に評価し、再現性の高い要因を重点的に見いだす為のものである。また、直交表の使用により、F検定や要因の寄与率の評価が、比較的容易に行うことができる。

2-2. コンクリートの配合設計 目標平均強度は、材令28日で圧縮強度 300 kg/cm^2 とし、スランプ $\pm 1.5 \text{ cm}$ 、骨材最大寸法 15 mm とする。現場配合は行わず、5 mmフルイにより細骨材、粗骨材に分ける。

配合基準

	粗骨材の 最大寸法	スランプ 範囲	水セメン ト比 (%)	細骨材率 s/a	単 位 量 (kg)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
単 位 量	15 cm	6 $\pm$ 1.5 cm	45 %	48.5 %	167	424	876	888
1バッチ40L	15 cm	6 $\pm$ 1.5 cm	45 %	48.5 %	6.68	16.96	35.04	35.52

2-3. 予備実験 環境因子 (荷重の歴史、荷重もどし点) を調べることを目的に、直交配列表 $L_{27}(3^3)$ (Ref.2) を用い、1列に供試体直径、2列に細長比を割りつけ最大荷重を調べた。

予備実験結果

尚、実験値は3個の供試体の平均値であり、荷重速度は全て $5 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ とした。

供試体直径 \ 細長比	0.5	1.0	2.0
5 cm	8698 kg	7323 kg	6420 kg
10 cm	34467 kg	32750 kg	27450 kg
15 cm	78400 kg	72267 kg	68400 kg

表 (2-1)

2-4. 実験手順

2-4-1. 要因および水準の決定

コンクリートの圧縮試験における応力と歪の関係は、多くの環境因子によって左右されるので、実験計画法を用い、表 (2-1) の要因と水準によって実験を進める。

記号	要 因	単 位	水準1	水準2	水準3
A	供試体直径	cm	5	10	15
B	細 長 比	h/d	0.5	1.0	2.0
C	荷重速度	$\text{kg/cm}^2/\text{sec}$	3	5	7
D	繰り返し回数	回	1	5	10
E	荷重の歴史	%	30	60	90
F	荷重のもどし量		1/3	2/3	3/3
G	荷重上限での時間	分	0	2	4
H	荷重下限での時間	分	0	2	4

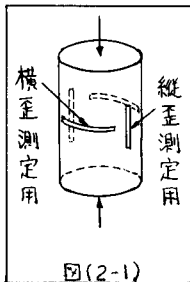
2-4-2. 割り付け 検討しようとする

因子は8因子で、直交配列表は $L_{27}(3^3)$ 表を用い、表(2-2)のように1列に供試体直径を割り付け、2列に細長比を割り付けると供試体直径と細長比との交互作用の情報は、3列と4列に表われてくる。その為、5列に荷重速度を割り付けると、供試体直径と荷重速度の交互作用は、6列と7列に表われてくる。この列には他の5因子を割り付けしないで、8列に繰り返し回数、9列に荷重の歴史、11列に荷重のもどし、12列に荷重上限での時間、13列に荷重下限での時間をそれぞれ割り付けた。

(表 2-2)

NO.	径 状 (cm)	細長比	荷重速度 kg/cm ² /sec	繰り返し 回 数	荷 重 歴 史(%)	荷 重 もどし	荷重上限 (分)	荷重下限 (分)
1	5	0.5	3	1	30	1/3	0	0
2	5	0.5	5	5	60	2/3	2	2
3	5	0.5	7	10	90	3/3	4	4
4	5	1.0	3	5	60	3/3	4	4
5	5	1.0	5	10	90	1/3	0	0
6	5	1.0	7	1	30	2/3	2	2
7	5	2.0	3	10	90	2/3	2	2
8	5	2.0	5	1	30	3/3	4	4
9	5	2.0	7	5	60	1/3	0	0
10	10	0.5	3	1	60	1/3	2	4
11	10	0.5	5	5	90	2/3	4	0
12	10	0.5	7	10	30	3/3	0	2
13	10	1.0	3	5	90	3/3	0	2
14	10	1.0	5	10	30	1/3	2	4
15	10	1.0	7	1	60	2/3	4	0
16	10	2.0	3	10	30	2/3	4	0
17	10	2.0	5	1	60	3/3	0	2
18	10	2.0	7	5	90	1/3	2	4
19	15	0.5	3	1	90	1/3	4	2
20	15	0.5	5	5	30	2/3	0	4
21	15	0.5	7	10	60	3/3	2	0
22	15	1.0	3	5	30	3/3	2	0
23	15	1.0	5	10	60	1/3	4	2
24	15	1.0	7	1	90	2/3	0	4
25	15	2.0	3	10	60	2/3	0	4
26	15	2.0	5	1	90	3/3	2	0
27	15	2.0	7	5	30	1/3	4	2

2-5 実験方法



供試体表面に図(2-1)に示すようにストレインゲージをはり、圧縮試験機(50t, 200t)により、各段階における供試体のひずみ度を電気式ひずみ計により測定する。

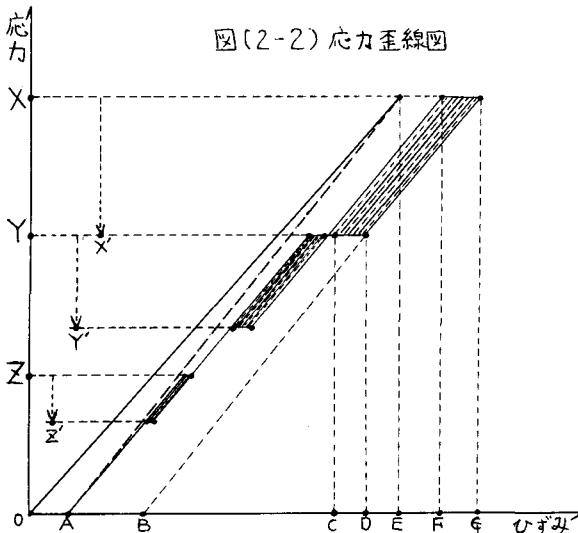
なお表(2-3)は、各々の供試体に用いたゲージの種類と、ゲージファクターの値を示した。図(2-8)は、応力歪線図の1列を表わし、各々の点において歪度の測定を行った。表(2-4)は、測定する点及び区間の説明をした。

表(2-3)

直径 \ 細長比	0.5	1.0	2.0
5 cm	5mm (2.09)	5mm (2.09)	30mm (2.08)
10 cm	5mm (2.09)	30mm (2.08)	67mm (2.03)
15 cm	30mm (2.08)	67mm (2.03)	67mm (2.03)

表(2-4)

0~A	荷重歴史 90% 時における残留歪
0~B	荷重 90% における 残留歪
F~G	荷重上限での歪 ずれ
C~D	荷重下限での歪 ずれ
0~E	処女荷重時の歪
X	荷 重 90% 点
X'	荷重 90% 点から荷重を 1/3 もどした点
Y	荷 重 60% 点
Y'	荷重 60% 点から荷重を 1/3 もどした点
Z	荷 重 30% 点
Z'	荷重 30% 点から荷重を 1/3 もどした点



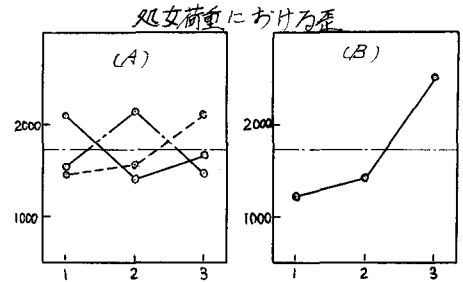
図(2-2) 応力歪線図

3 実験結果

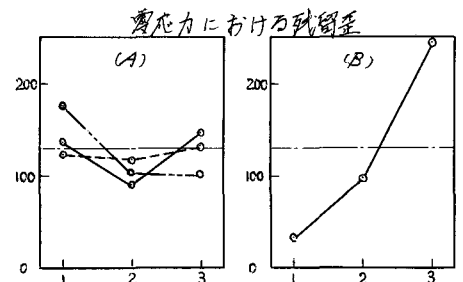
結果の整理および表示方法 予備実験で得た平均最大荷重に対する応力を様々な条件での歪を表(2-1)で因子別に示して種々な線によって主効果を表す。横軸(1,2,3)は水準を示し、縦軸は歪(単位 10^{-6})とする。又要因を分散分析によって統計量をF分布表示より危険率(1%~5%)有意水準であるものを取りあげ、結果の評価をする。

A 図	B 図	
供試体直径	荷重履歴	—○—○—
細長比	荷重もどし量	—○—○—
荷重速度	荷重上限	—○—○—
繰り返し	荷重下限	—○—○—

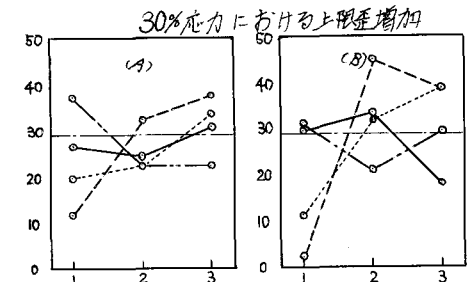
3-1 処女荷重における歪 通常のコンクリート圧縮試験に見る通りに初めて荷重履歴の応力歪を測定した。直交表にあげた(供試体直径)(細長比)(荷重速度)(荷重履歴)4因子を割り分けてる。結果は当然ながら(荷重履歴)が1%危険率有意水準を満足しボグネシュタッドは曲線の軌跡を描く。しかし他因子の影響による分散が相当な範囲に及んでいる。このことは処女荷重試験による応力歪関係を正確に求めることの難しさを物語するものといえるよう。



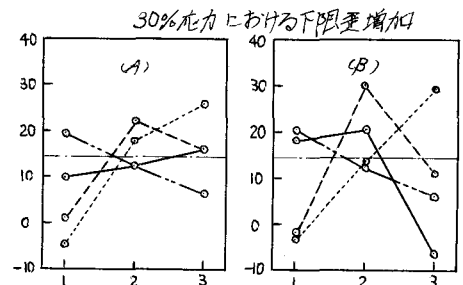
3-2 要応力における残留歪 処女荷重を取り去った時の瞬回歪を測定した。直交表にあげた(供試体直径)(細長比)(荷重速度)(荷重履歴)4因子の影響を調べる。結果は1%危険率有意水準として(荷重履歴)(細長比)が表れた。供試体には外力として処女荷重しか加っていないので荷重履歴が有意に表れるのは当然であるが、細長比は小さくてもほどほど大いなる効果を身についている。このことは単純に見る一軸圧縮試験が、実際は複雑な応力分布を持って構造体として挙動することを示すといえるよう。



3-3 30%応力における上限歪増加 要応力における残留歪がのこる供試体に予備実験で出された平均最大荷重を100%とし、30%応力における上限での増加歪を測定した。結果は荷重上限での時刻が1%危険率有意水準を満足している。また他因子の影響による分散が相当な範囲に及んでいる。

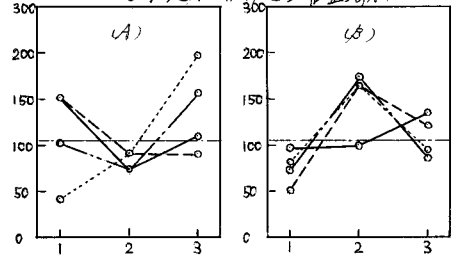


3-4 30%応力における下限歪増加 30%応力における上限で荷重もどしによって定まる30%応力下限での増加歪を測定した結果は供試体直径と細長比の交互作用が1%危険率有意水準を満足し、(繰り返し)(荷重上限の時間)(荷重下限の時間)の4因子が5%危険率有意水準を満足している。



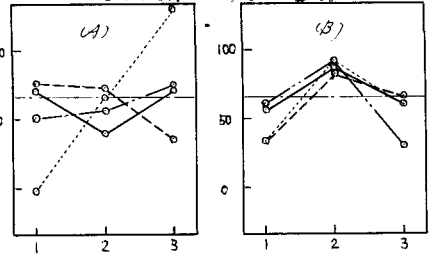
3-5 60%応力における上限歪増加 30%応力における上限歪増加と同様に、60%応力における上限歪増加を測定する。結果は(繰り返し)と(供試体直径×細長比の交互作用)がノ%危険率有意水準を満足し(荷重もど)と(荷重上限の時間)が5%危険率有意水準を満足している。30%点附近迄は、履厂条件の影響はそれ程顕著ではない。このことは低応力における挙動がほぼ、弾性的なものであると云えよう。しかしこの点附近から現れる有意因子は応力歪関係における履歴が錯綜して影響している。

60%応力における上限歪増加



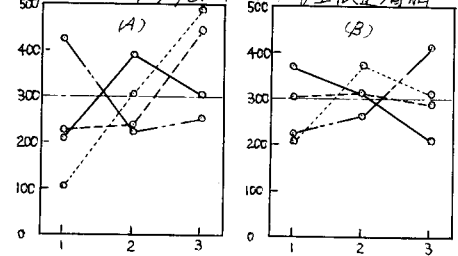
3-6 60%応力における下限歪増加 30%応力における下限歪増加と同様に、60%応力における下限歪増加を測定する。結果は(繰り返し)がノ%危険率有意水準を満足し、(荷重もど)と(荷重上限の時間)が5%危険率有意水準を満足している。除荷過程におけるくり返し数の影響は低応力においても現われているが、それが他の因子の影響を抜いて大きく効く臨界応力は30%点と60%点の間にあると考えられヒステシスループの上昇、下降共に時間の影響は始まる点の近傍のようである。

60%応力における下限歪増加



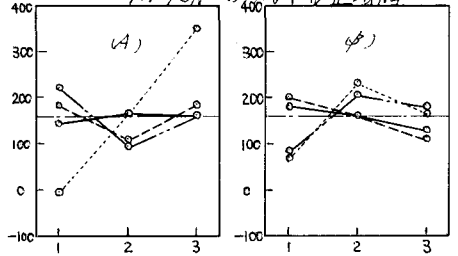
3-7 90%応力における上限歪増加 30%応力における上限歪増加と同様に、90%応力における上限歪増加を測定する。結果は(繰り返し)がノ%危険率有意水準を満足し、(荷重速度)と(供試体直径×速度)の交互作用が5%危険率有意水準を満足している。これは一定直径の供試体を他の条件を等しくして、歪ませる場合、歪の最大値と歪速度が定まる。時間的経過に因する因子の消失は変形プロセスの一応の安定化と考えられる。

90%応力における上限歪増加



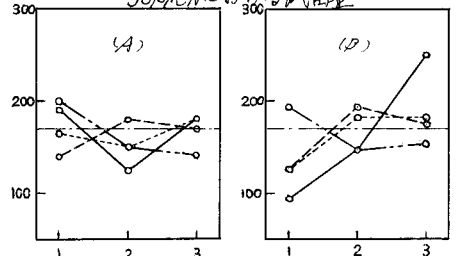
3-8 90%応力における下限歪増加 30%応力における下限歪増加と同様に、90%応力における下限歪増加を測定する。結果は(繰り返し)がノ%危険率有意水準を満足し、(細長比と荷重下限の時間)が5%危険率有意水準を満足している。

90%応力における下限歪増加

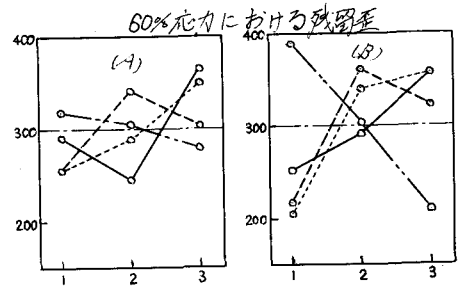


3-9 30%応力における残留歪 30%応力を零応力にもどした時の残留歪を測定した。結果は(荷重速度)がノ%危険率有意水準を満足している。ほぼその応力値に比例するの、除荷における弾性降伏によるものと思われる。

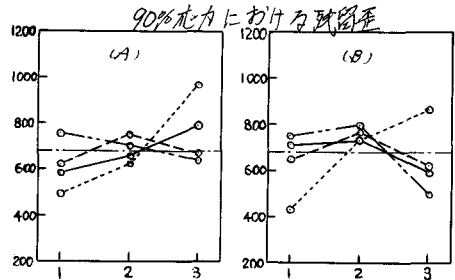
30%応力における残留歪



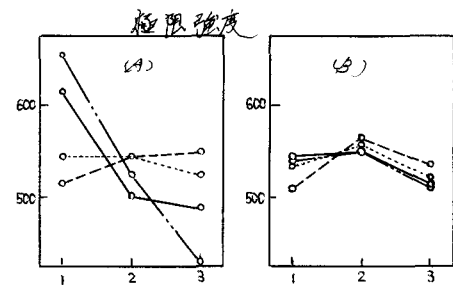
3-10 60%応力における残留歪 60%応力を要応力にもどした時の残留歪を測定した。結果は荷重もどし、荷重上限での時間、荷重下限での時間、供試体直径×細長比の交互作用のおおのが1%危険率有意水準を満足し、(繰り返し)と荷重丁度か5%危険率有意水準を満足している。これにより60%点近傍に、時間経過と応力くり返しによる内部エネルギーの散失が開始されると考えられ、そのメカニズムは供試体の形状や大きさ、密接に関連していると云えよう。



3-11 90%応力における残留歪 90%応力を要応力にもどした時の残留歪を測定した。結果は繰り返しと供試体直径×細長比の交互作用が1%危険率有意水準を満足し、荷重もどしと荷重下限での時間か5%危険率有意水準を満している。90%点に達することにより短時間の経過に依存する供試体内部の機構変化がほぼ完了してしまい、ヒステリシス損耗的なエネルギーの影響が大きくなると考えられる。



3-12 極限強度 極限強度とは様々な応力履歴を経過し、破壊に至る直前に示された最高応力をもって定義する。結果は供試体直径と細長比が1%有意水準で表れている。これは過去の多くの研究者により示された試験法が正しく、また研究で前提とされた因子の独立性が実験より明らかとなった。なお直径10cmの供試体は直径15cmのものより強度は2%程度強くなるのと、及び、細長比1.5のものは1.0のものより14%弱くなることか、見られる。



4 まとめ

コンクリートの構造解析力、単純と均合いの条件を基礎にする限り、計算のいずれの段階かで、応力-歪の関係式を使わなければならないのであろうが、応力の構成方程式が、多くの変数を持つ、多元関数であること及び、その各変数(因子)の影響の強さを実験的に明らかにした、その変数の数は多いため、コントロールが可能な数であることも明らかになった。このため完全弾性体であれば梁部材の破壊挙動解析に最小要素として断面をとりあげようか、上に見えるように、コンクリートにフープは、それをさらに小さく分けたものを最小要素としなければならぬ。そこで用いられる式は実際に起る、応力降荷や時間等を変数に持たせなければならず、又それが可能であることをこの実験が示すものと云えよう。

参考文献

Ref 1) Fisher, R.A. "The Design of Experiments" Oliver and Boyd, 1966.

2) 田口玄一著 実験計画法

3) Hognested, E. "A Study of Confined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members" 11/11大学 Bulletin No. 399, 1951

4) Gonnerman, H.F. "Effects of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength on Concrete" Proc. ASTM Vol. 23, 1925

5) Mather, B. "Effect of Type of Test Specimen on Apparent Compressive Strength of Concrete" Proc. ASTM Vol. 15, 1945

6) 田口清, 小柳治「コンクリートの破壊条件と破壊過程」材料20, 1971

7) 中川若二 「圧縮荷重下でのコンクリートの破壊機構に関する研究」 京都大学工学部学位論文, 1973.