

コンクリートの多次元の応力ひずみ関係について

北海道工業大学 正員 犬塚 雅生  
 正員 畑中 裕  
 正員 堀口 敬  
 学生員 清水 正樹  
 〃 古川 滋郷

1. 概説

本論文は、コンクリートの非弾性的な応力ひずみ関係（応力-ひずみ関係式）を解析すると応力の構成方程式が多くの変数を持つ多元関数であるため、実験的方法を選んだ。本実験は、環境因子を数種取り上げ、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、また総合的な影響と独立性検定の資料を得るためにコンクリートの圧縮試験における応力ひずみ関係についての実験結果の分散分析を行なったものである。

2. 実験方法

2-1 実験計画法

実験計画法は、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を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ためのものである。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なうことができる。

2-2. コンクリートの配合設計

設計基準強度は材令28日で圧縮強度  $300 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  とし、スランプ  $6 \pm 1.5 \text{cm}$ 、粗骨材の最大寸法  $25 \text{mm}$  とする。与えられた材料を試験した結果、次のような結果を得た。

	粗骨材 の寸法 $\text{mm}$	スランプ の範囲 $\text{cm}$	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	水 (W) $\text{kg}$	単 位 量 $\text{kg}$		
						セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
単位量	25	$6 \pm 1.5$	45	46.2	183	416	789	958
1バッチ 20L	25	$6 \pm 1.5$	45	46.2	4.24	29.66	18.22	21.75

細骨材比重：2.60      粗骨材比重：2.76      セメント比重：3.15

2-3 強度試験

最大応力を知ることにより、本実験で環境因子の応力の割りつけをするための実験を行なった。なお、実験値は5個の供試体の平均値、荷重速度は  $3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2/\text{sec}}$ 、細長比は2.0で一定とした。

強度試験結果

供試体直径	破壊荷重
5cm	3533 kg
10cm	28367 kg
15cm	64467 kg

本実験では、供試体  $15 \times 30 \text{cm}$  だけで実験を進めることにした。

2-4 要因及び水準の決定

コンクリートの圧縮試験における応力ひずみの関係は、環境因子によつて左右されるので実験計画法を用いた下の要因と水準によつて実験を進める。

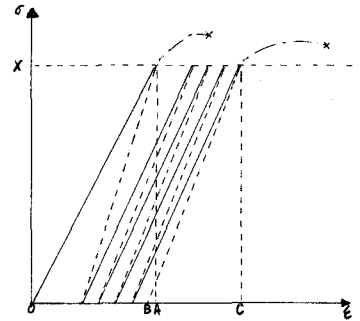
記号	要因	単位	水準1	水準2	水準3
F	繰り返し	回	1	5	20
c	経験応力	%	81	54	27
A	応力上限までの時間	分	0	3	6

応力速度は、3 (kg/cm<sup>2</sup>/sec) と一定とする。細長比も2.0と一定とし、供試体は、15x30cmのものを使用

2-5 割りつけ表

NO	要因	繰り返し(回)	経験応力(%)	荷重上限時間(分)	実験順序
1	/	/	81	0	25
2	/	/	81	3	3
3	/	/	81	6	5
4	5	/	81	0	6
5	5	5	81	3	7
6	5	5	81	6	24
7	20	/	81	0	26
8	20	/	81	3	13
9	20	/	81	6	9
10	/	/	54	0	10
11	/	/	54	3	8
12	/	/	54	6	4
13	5	/	54	0	17
14	5	5	54	3	27
15	5	5	54	6	23
16	20	/	54	0	16
17	20	/	54	3	11
18	20	/	54	6	21
19	/	/	27	0	19
20	/	/	27	3	22
21	/	/	27	6	18
22	5	/	27	0	20
23	5	5	27	3	14
24	5	5	27	6	15
25	20	/	27	0	1
26	20	/	27	3	2
27	20	/	27	6	12

2-6 応力ひずみ線図



X : 応力81%点  
 O~B: 応力81%の残留ひずみ  
 O~A: 初生応力時81%のひずみ  
 A~C: 応力上限時間のひずみ変化

応力ひずみ線図は、応力81%、繰り返し5回、応力上限時間3分の場合を例に上げた。

### 3 実験結果

F	繰り返し回数	○——○
C	経験応力	○---○
A	応力上限時間	○----○

5%危険以上の有意因子について各水準とひずみとの関係をグラフに示す

状態 因子	縦	横	上	上
	残	残	限	限
	留	留	時	時
	ひ	ひ	間	間
	ず	ず	縦	横
	み	み	ひ	ひ
繰り返し回数	**		**	**
経験応力	**	*	*	**
応力上限時間	*			*

\*\* → 1%危険率有意水準

\* → 5%危険率有意水準

#### (1) 縦残留ひずみ

1) 繰り返し回数の実験値に対する影響(F)

1 1回  $F_1 = 96.6$

2 5回  $F_2 = 91.5$   $S_F = 0.84 \times 10^5$

3 20回  $F_3 = 211.9$

2) 経験応力の実験値に対する影響(C)

1 81%  $C_1 = 178.11$

2 54%  $C_2 = 103.77$   $S_C = 0.91 \times 10^5$

3 27%  $C_3 = 48.0$

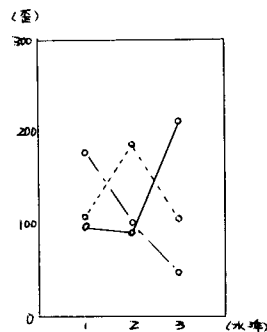
3) 応力上限時間の実験値に対する影響(A)

1 0分  $A_1 = 107.78$

2 3分  $A_2 = 186.33$   $S_A = 0.38 \times 10^5$

3 6分  $A_3 = 105.78$

図(1) 縦残留歪と水準とのグラフ



要因	$S^2$	自由度	MS	F	判定	寄与率(%)
ST	$0.67 \times 10^5$					
F	$0.84 \times 10^5$	2	$0.42 \times 10^5$	10.5	**	27.4
C	$0.91 \times 10^5$	2	$0.46 \times 10^5$	11.5	**	41.0
A	$0.38 \times 10^5$	2	$0.19 \times 10^5$	4.75	*	17.0
FC	$1.83 \times 10^5$	4	$0.02 \times 10^5$	0.5		1.8
FA	$1.28 \times 10^5$	4	$0.02 \times 10^5$	0.5		1.8
CA	$1.31 \times 10^5$	4	$0.01 \times 10^5$	0.3		1.0
誤差	$0.35 \times 10^5$	8	$0.04 \times 10^5$			

縦残留ひずみ～応力における縦残留ひずみの結果は、繰り返し回数、経験応力が1%危険率有意水準を満足し、応力上限時間から5%危険率有意水準を満足させている。繰り返し回数のひずみは3水準が目立って大きい。経験応力は1水準が大きく、2、3と続く。応力上限時間では、2水準が頂点に正三角形をなしている。

表(1) 縦残留ひずみの分散分析表

(2) 横残留ひずみ

1) 繰り返し回数の実験値に対する影響 (F)

- 1 1回  $F_1 = 47.33$
- 2 5回  $F_2 = 18.22$       $SF = 0.039 \times 10^5$
- 3 20回  $F_3 = 30.00$

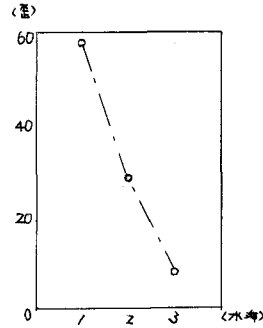
2) 経験応力の実験値に対する影響 (C)

- 1 81%  $C_1 = 58.89$
- 2 54%  $C_2 = 28.89$       $SC = 0.12 \times 10^5$
- 3 27%  $C_3 = 7.78$

3) 応力上限時間の実験値に対する影響 (A)

- 1 0分  $A_1 = 48.33$
- 2 3分  $A_2 = 24.11$       $SA = 0.027 \times 10^5$
- 3 6分  $A_3 = 23.11$

図(2)横残留歪と水準とのグラフ



要因	S	自由度	MS	F	判定	寄与率 (%)
ST	$0.12 \times 10^5$					
F	$0.039 \times 10^5$	2	$0.02 \times 10^5$	1.5		9
C	$0.12 \times 10^5$	2	$0.06 \times 10^5$	4.6	*	27
A	$0.037 \times 10^5$	2	$0.019 \times 10^5$	1.5		9
FC	$0.36 \times 10^5$	4	$0.05 \times 10^5$	3.9	*	23
FA	$0.25 \times 10^5$	4	$0.04 \times 10^5$	3		18
CA	$0.29 \times 10^5$	4	$0.03 \times 10^5$	2.3		14
誤差	$0.104 \times 10^5$	8	$0.013 \times 10^5$			

横残留ひずみ～応力における横残留ひずみの関係は、経験応力対5%危険率有意水準を満足した。水準は1～3へと反比例の形を呈している。

表(2) 横残留ひずみの分散分析表

(3) 上限時間の縦ひずみ

1) 繰り返し回数の実験値に対する影響 (F)

- 1 1回  $F_1 = 5.89$
- 2 5回  $F_2 = 37.00$       $SF = 0.049 \times 10^5$
- 3 20回  $F_3 = 31.22$

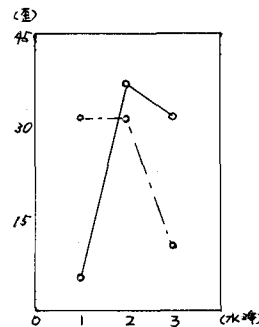
2) 経験応力の実験値に対する影響 (C)

- 1 81%  $C_1 = 31.44$
- 2 54%  $C_2 = 31.67$       $SC = 0.025 \times 10^5$
- 3 27%  $C_3 = 11.00$

3) 応力上限時間の実験値に対する影響 (A)

- 1 0分  $A_1 = 28.11$
- 2 3分  $A_2 = 22.67$       $SA = 0.0016 \times 10^5$
- 3 6分  $A_3 = 23.33$

図(3)上限時間の縦歪と水準とのグラフ



要因	$S^2$	自由度	MS	F	判定	寄与率(%)
ST	$0.03 \times 10^5$					
F	$0.049 \times 10^5$	2	$0.025 \times 10^5$	12.5	**	4.8
C	$0.03 \times 10^5$	2	$0.015 \times 10^5$	7.5	*	2.9
A	$0.002 \times 10^5$	2	$0.001 \times 10^5$	0.5		2
FC	$0.08 \times 10^5$	4	$0.0025 \times 10^5$	0.13		0.5
FA	$0.065 \times 10^5$	4	$0.004 \times 10^5$	2		8
CA	$0.055 \times 10^5$	4	$0.006 \times 10^5$	3		12
誤差	$0.019 \times 10^5$	8	$0.002 \times 10^5$			

上限時間の横ばすみへ応力における上限時間の横ばすみは、繰り返し回数が1%・経験応力が5%危険率有意水準を満足した。繰り返し回数は、1水準が目立って低く、2・3水準は同じくらいで平均を上回っている。経験応力は、1水準と2水準が同じくらいの値で平均を上まわり、3水準が低い。

表(3) 上限時間の横ばすみ分散分析表

(4) 上限時間の横ばすみ

1) 繰り返し回数の実験値に対する影響(D)

- 1 1回  $F_1 = 2.22$
- 2 5回  $F_2 = 20.22$        $S_F = 0.015 \times 10^5$
- 3 20回  $F_3 = 9.44$

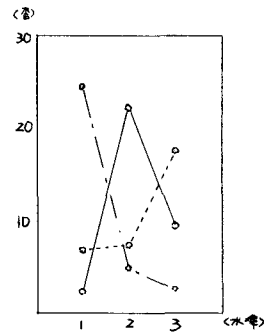
2) 経験応力の実験値に対する影響(C)

- 1 81%  $C_1 = 24.56$
- 2 54%  $C_2 = 4.78$        $S_C = 0.026 \times 10^5$
- 3 27%  $C_3 = 2.56$

3) 応力上限時間の実験値に対する影響(A)

- 1 0分  $A_1 = 6.89$
- 2 3分  $A_2 = 7.33$        $S_A = 0.007 \times 10^5$
- 3 6分  $A_3 = 17.67$

図(4) 上限時間の横ばすみと水準とのグラフ



要因	$S^2$	自由度	MS	F	判定	寄与率(%)
ST	$0.02 \times 10^5$					
F	$0.015 \times 10^5$	2	$0.008 \times 10^5$	10	**	2.3
C	$0.026 \times 10^5$	2	$0.013 \times 10^5$	16	**	3.7
A	$0.007 \times 10^5$	2	$0.004 \times 10^5$	5	*	11.5
FC	$0.057 \times 10^5$	4	$0.004 \times 10^5$	5	*	11.5
FA	$0.047 \times 10^5$	4	$0.004 \times 10^5$	5	*	11.5
CA	$0.042 \times 10^5$	4	$0.002 \times 10^5$	2.5		5.5
誤差	$0.006 \times 10^5$	8	$0.0008 \times 10^5$			

上限時間の横ばすみへ応力における上限時間の横ばすみは、繰り返し回数、経験応力が1%・応力上限時間が5%危険率有意水準を満足している、繰り返し回数は1水準が低く、2水準を頂点に3水準と続いている。経験応力は1水準が大きく、2と3水準と続いている。応力上限時間は1と2水準が同じくらいで、3水準が大きく扱っている。

表(4) 上限時間の横ばすみ分散分析表