

コンクリートの乾燥収縮におよぼす要因効果に関する研究

中西正俊

§ 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮については、すでに多くの研究があり、収縮に関係のある因子やその効果もかなり明らかになっている。ここでは、従来検討されたものに新たなものを加えた計10個の因子について、実験計画法にもとづく長さ変化率測定実験を行ない、これらの各因子の主効果およびその一部の交互作用を検討した。

§ 2. とりあげた因子と水準

2.1 因子

材料的な因子としては、セメントの粉末度、粗骨材の種類、細骨材の粒度、および混和剤として $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 Al_2O_3 、 CaCO_3 をとりあげた。

コンクリートの調合に関する因子としては、水セメント比とスランプをとりあげた。

同じく、養生に関する因子としては、水中養生の期間とその後の空中養生湿度をとりあげた。

2.2 水準の決定

水準の決定は下記による。

- A. 水中養生の期間：とりあげた因子の中で比較的变化しやすいものであることと、重要な因子であることが予測されていたから、特に、4水準とし、JIS 試験方法(6日)を中心として、0, 1, 6, 27日とした。
- B. その後の空中養生湿度：重要な因子であるが、試験設備によって支配される。当所地下実験室の養生室および恒温恒湿室の湿度を水準とし、70%, 45%(R.H.)とした(実際の湿度は表-9 に示す)。
- C. セメント粉末度：従来の文献により、あきらかに収縮に関係のある材料因子であるのでとりあげた。このため、チチブセメント社に、粉末度の異なる2種類のセメントの製作を依頼し、比表面積 $2920\text{cm}^2/\text{g}$ および

$3470\text{cm}^2/\text{g}$ とした。

- D, E. 水セメント比、スランプ：現行JASS(昭和39年9月現在)の標準調査表を参考にし、水セメント比は50%と70%、スランプは5cmと22cmにした。
- F, G, H. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 Al_2O_3 、 CaCO_3 ：混和剤は多くの既往の研究があるが、今回は前記3種の混和剤使用の有無を水準とした。
- I. 粗骨材種類：水準には、川砂利および碎石をとりあげ、粒大は同一(20mm以下)とした。
- J. 細骨材粒度：種類は川砂とし、水準はJASSに規定された最大と最小、すなわち5mm以下と0.6mm以下とした。

以上をまとめると、表-1 のようになる。

| 要 因 | 水 準 |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| A. 水中養生の期間 | (1)ナシ (2)1日 (3)6日 (4)27日 |
| B. その後の空中養生湿度 | (1)70% (2)45% |
| C. セメント粉末度 | (1)2920 cm^2/g (2)3470 cm^2/g |
| D. 水セメント比 | (1)50% (2)70% |
| E. ス ラ ン プ | (1)5cm (2)22cm |
| F. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の有無 | (1)ナシ (2)アリ |
| G. Al_2O_3 〃 | (1)ナシ (2)アリ |
| H. CaCO_3 〃 | (1)ナシ (2)アリ |
| I. 粗 骨 材 種 類 | (1)川砂利 (2)碎石 |
| J. 細 骨 材 粒 度 | (1)5mm以下 (2)0.6mm以下 |

表-1

【付記】 上記のほか、セメントの種類、連行空気量、粗骨材の粒度、養生温度、AE剤、分散剤等、混和剤の使用などとりあげたい因子はあったが、試験設備等から実験規模に制約があるため、今回はとりあえず前記各因子について行なった。

§ 3. 実験方法

3.1 実験に用いた材料

a) セメントおよび骨材:

セメントは実験用として特に粉末度を調整したチチブ普通ポルトランドセメント2種を使用した。その物理試験結果は表-2に示すとおりである。

また、使用した骨材は表-3に示すとおりである。

| 試料 | 粉末度 比表面積 (cm ² /g) | 凝 結 | | | | 安定性 |
|----|-------------------------------------|------------|-----------|--------------|--------------|-----|
| | | 室温 (°C) | 水量 (%) | 始 発 (時-分) | 終 結 (時-分) | |
| A | 2920 | 20.0 | 27.3 | 2-20 | 3-25 | 良 |
| B | 3470 | 20.0 | 27.8 | 2-10 | 3-05 | 〃 |

| 試料 | フロー (mm) | 曲げ強さ(kg/cm ²) | | | 圧縮強さ(kg/cm ²) | | |
|----|-------------|---------------------------|------|------|---------------------------|-----|-----|
| | | 3日 | 7日 | 28日 | 3日 | 7日 | 28日 |
| A | 256 | 29.9 | 48.4 | 68.8 | 120 | 228 | 392 |
| B | 258 | 34.4 | 52.0 | 72.4 | 146 | 254 | 419 |

表-2 セメントの物理試験結果

| 種 類 | 産 地 | 粒 大 (mm 以下) | 比 重 | ふるい分け試験 (通過重量百分率 o/wt) (mm) | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------------|-------------------|------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|--|--|--|
| | | | | 0.15 | 0.3 | 0.6 | 1.2 | 2.5 | 5 | 10 | 15 | 20 | | | |
| 細骨材 | 利根川 | 0.6 | 2.62 | 6 | 74 | 95 | 98 | 100 | 100 | | | | | | |
| | 鬼怒川 | 5 | 2.63 | 4 | 25 | 44 | 70 | 84 | 99 | | | | | | |
| 粗骨材 | 鬼怒川 相模川 (原石) | 20 | 2.63 | | | | | 0 | 6 | 41 | 88 | 100 | | | |
| | 〃(碎石) | 20 | 2.64 | | | | | 0 | 24 | 78 | 99 | 100 | | | |

表-3 骨材

b) 混和剤:

使用した混和剤とその使用量(セメント重量比)は、下記のとおりである。

- (1) CaSO₄·2H₂O : CaSO₄ 分5%をセメントと置換
- (2) Al₂O₃ : 1%添加
- (3) CaCO₃ : 5%添加

3.2 直交表によるわりつけ

a) 直交表 L₁₆(2¹⁵)およびわりつけ:

用いた直交表 L₁₆(2¹⁵)を表-4に示す。とりあげた因子はA~Jの10個、水準はAのみが4水準、他は2水準である。交互作用については今後の研究課題とし、今回はF×H、F×Gのみを考え、結局、表-5のようになりつた。

| No. | Col. | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 9 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 14 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 15 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 16 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |

表-4 直交表 L₁₆(2¹⁵)

| Col. | 1, 2, 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | |
|------|---------|---|----------------|-----|-----|----|----|----|
| 要因 | A | B | C | F×H | F×G | | | |
| Col. | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 要因 | D | E | e ₁ | F | G | H | I | J |

表-5 わりつけ

b) わりつけによる実験の指示内容:

表-1に示した因子と水準を、表-5にしたがって表-4にわりつけると、具体的な実験の指示内容は表-6のようになる。

3.3 コンクリート

調合は JASS に準じた。実施した調合、ならびにその実際スランプ、4週圧縮強さを表-7に示す。

3.4 試験方法

コンクリート長さ変化率測定のための試験体の大きさは10×10×40cmとし、計48個を作成した。基長はコンクリート打込みから約24時間後の脱型時に測定した。測定方法は pfender type の contact strain gauge を用いた。測定距離は300±0.5mm、測定精度は10⁻³mm、各測定結果は3個平均により示す。養生温度はすべて21±3°Cとした。

| No. | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|-----|----------------|------------------|---------------------------------|---------------|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------|--------------|
| | 水中養生の期間 (日) | その後の空中養生度 (%) | セメント粉末度 (cm ² /g) | 水セメント比 (%) | スランブ (cm) | CaSO ₄ ·2H ₂ O の有無 | Al ₂ O ₃ の有無 | CaCO ₃ の有無 | 粗骨材種 (20mm以下) | 細骨材度 (mm) |
| 1 | ナシ | 70 | 2920 | 50 | 5 | ナシ | ナシ | ナシ | 川砂利 | 5 以下 |
| 2 | ナシ | 70 | 2920 | 70 | 22 | アリ | アリ | アリ | 砕石 | 0.6 〃 |
| 3 | ナシ | 45 | 3470 | 50 | 5 | ナシ | アリ | アリ | 砕石 | 0.6 〃 |
| 4 | ナシ | 45 | 3470 | 70 | 22 | アリ | ナシ | ナシ | 川砂利 | 5 〃 |
| 5 | 1 | 70 | 2920 | 50 | 5 | アリ | ナシ | ナシ | 砕石 | 0.6 以下 |
| 6 | 1 | 70 | 2920 | 70 | 22 | ナシ | アリ | アリ | 川砂利 | 5 〃 |
| 7 | 1 | 45 | 3470 | 50 | 5 | アリ | アリ | アリ | 川砂利 | 5 〃 |
| 8 | 1 | 45 | 3470 | 70 | 22 | ナシ | ナシ | ナシ | 砕石 | 0.6 〃 |
| 9 | 6 | 70 | 3470 | 50 | 22 | アリ | ナシ | アリ | 川砂利 | 0.6 以下 |
| 10 | 6 | 70 | 3470 | 70 | 5 | ナシ | アリ | ナシ | 砕石 | 5 〃 |
| 11 | 6 | 45 | 2920 | 50 | 22 | アリ | アリ | ナシ | 砕石 | 5 〃 |
| 12 | 6 | 45 | 2920 | 70 | 5 | ナシ | ナシ | アリ | 川砂利 | 0.6 〃 |
| 13 | 27 | 70 | 3470 | 50 | 22 | ナシ | ナシ | アリ | 砕石 | 5 以下 |
| 14 | 27 | 70 | 3470 | 70 | 5 | アリ | アリ | ナシ | 川砂利 | 0.6 〃 |
| 15 | 27 | 45 | 2920 | 50 | 22 | ナシ | アリ | ナシ | 川砂利 | 0.6 〃 |
| 16 | 27 | 45 | 2920 | 70 | 5 | アリ | ナシ | アリ | 砕石 | 5 〃 |

表一6 実験の指示内容

| No. | セメント 粉末度 (cm ² /g) | 粗骨材 種類 (mm) | 細骨材 度 (%) | W/C (%) | スランブ (cm) | 砂率 (%) | 有効 水量 (kg/m ³) | 重量 (kg/m ³) | | | 混和剤 (kg/m ³) | | | 実測ス ランブ (cm) | 4週圧縮 強さ (kg/cm ²) |
|-----|-------------------------------------|-------------------|-----------------|------------|--------------|-----------|----------------------------------|-------------------------|-------|-------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | | | | | | | | セメント | 砂 | 粗骨材 | CaSO ₄ ·2H ₂ O | Al ₂ O ₃ | CaCO ₃ | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2920 | 川砂利 | 5 以下 | 50 | 5 | 48.2 | 165 | 330 | 920 | 990 | — | — | — | 2.5 | 356 |
| 2 | 2920 | 砕石 | 0.6 〃 | 70 | 22 | 42.6 | 245 | 332 | 716 | 965 | 17.49 | 3.49 | 17.49 | 22.5 | 200 |
| 3 | 3470 | 砕石 | 0.6 〃 | 50 | 5 | 37.0 | 195 | 400 | 655 | 1,114 | — | 4.00 | 20.00 | 3.0 | 415 |
| 4 | 3470 | 川砂利 | 5 〃 | 70 | 22 | 54.0 | 216 | 294 | 967 | 825 | 15.45 | — | — | 25.0 | 211 |
| 5 | 2920 | 砕石 | 0.6 以下 | 50 | 5 | 37.0 | 195 | 380 | 655 | 1,114 | 20.00 | — | — | 1.0 | 401 |
| 6 | 2920 | 川砂利 | 5 〃 | 70 | 22 | 54.0 | 216 | 309 | 967 | 825 | — | 3.09 | 15.45 | 23.0 | 292 |
| 7 | 3470 | 川砂利 | 5 〃 | 50 | 5 | 48.2 | 165 | 314 | 920 | 990 | 16.50 | 3.30 | 16.50 | 2.5 | 441 |
| 8 | 3470 | 砕石 | 0.6 〃 | 70 | 22 | 42.6 | 245 | 349 | 716 | 965 | — | — | — | 20.5 | 235 |
| 9 | 3470 | 川砂利 | 0.6 以下 | 50 | 22 | 34.1 | 232 | 441 | 548 | 1,072 | 23.20 | — | 23.20 | 22.0 | 415 |
| 10 | 3470 | 砕石 | 5 〃 | 70 | 5 | 54.0 | 178 | 254 | 1,047 | 890 | — | 2.54 | — | 4.0 | 308 |
| 11 | 2920 | 砕石 | 5 〃 | 50 | 22 | 51.9 | 247 | 485 | 798 | 742 | 25.50 | 5.10 | — | 21.5 | 235 |
| 12 | 2920 | 川砂利 | 0.6 〃 | 70 | 5 | 35.3 | 185 | 264 | 675 | 1,238 | — | — | 13.20 | 4.5 | 164 |
| 13 | 3470 | 砕石 | 5 以下 | 50 | 22 | 51.9 | 247 | 510 | 798 | 742 | — | — | 25.50 | 21.0 | 509 |
| 14 | 3470 | 川砂利 | 0.6 〃 | 70 | 5 | 35.3 | 185 | 251 | 675 | 1,238 | 13.20 | 2.64 | — | 1.5 | 231 |
| 15 | 2920 | 川砂利 | 0.6 〃 | 50 | 22 | 34.1 | 232 | 464 | 548 | 1,072 | — | 4.64 | — | 22.0 | 326 |
| 16 | 2920 | 砕石 | 5 〃 | 70 | 5 | 54.0 | 178 | 241 | 1,047 | 890 | 12.70 | — | 12.70 | 4.0 | 130 |

表一7 コンクリート

また、養生室および恒温恒湿室の測定期間中における実際の湿度を、表—9 に示す。

§ 4. 結果と検討

4.1 測定結果

水中膨張および乾燥収縮による長さ変化率の各測定結果は、表—8および図—1に示すとおりである。ただし、図—1は、試験体3個の平均値による。

4.2 検討 I —分散分析

前記の測定結果に対し、各材令について分散分析を行なう。いま一例として材令26Wの結果を表—10に、各材令については不偏分散比および寄与率を表—11に示す。

| No. | 各材令における変化率 ($\times 10^{-4}$) | | | | | No. | 各材令における変化率 ($\times 10^{-4}$) | | | | | | |
|-----|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|---------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1W | 4W | 8W | 13W | 26W | | 1W | 4W | 8W | 13W | 26W | | |
| 1 | 1 | -1.17 | -2.84 | -4.03 | -4.40 | -4.50 | 9 | 1 | +1.80 | -1.37 | -2.17 | -3.70 | -3.80 |
| | 2 | -1.27 | -2.77 | -4.03 | -4.40 | -4.54 | | 2 | +1.70 | -1.17 | -1.73 | -3.03 | -3.13 |
| | 3 | -1.30 | -2.80 | -4.07 | -4.37 | -4.47 | | 3 | +1.67 | -1.20 | -1.80 | -3.03 | -2.97 |
| | 平均 | -1.25 | -2.80 | -4.04 | -4.39 | -4.50 | | 平均 | +1.72 | -1.25 | -1.90 | -3.26 | -3.30 |
| 2 | 1 | -0.60 | -2.50 | -3.47 | -4.44 | -4.93 | 10 | 1 | +0.33 | -3.07 | -4.47 | -5.90 | -5.17 |
| | 2 | -0.60 | -2.74 | -3.70 | -4.77 | -5.27 | | 2 | +0.30 | -2.77 | -4.14 | -5.61 | -4.97 |
| | 3 | -0.63 | -2.33 | -3.70 | -4.77 | -5.20 | | 3 | +0.37 | -2.97 | -4.33 | -5.67 | -5.04 |
| | 平均 | -0.61 | -2.52 | -3.62 | -4.66 | -5.13 | | 平均 | +0.33 | -2.93 | -4.31 | -5.72 | -5.06 |
| 3 | 1 | -1.93 | -6.37 | -7.67 | -9.07 | -10.00 | 11 | 1 | +2.34 | +0.40 | -2.37 | -3.20 | -5.57 |
| | 2 | -1.80 | -6.37 | -7.58 | -8.94 | -9.90 | | 2 | +2.20 | +0.37 | -2.60 | -3.57 | -5.84 |
| | 3 | -2.20 | -6.64 | -7.87 | -9.30 | -10.40 | | 3 | +2.57 | 0 | -2.94 | -3.97 | -6.34 |
| | 平均 | -1.98 | -6.46 | -7.71 | -9.11 | -10.10 | | 平均 | +2.37 | +0.26 | -2.63 | -3.58 | -5.91 |
| 4 | 1 | -0.80 | -3.17 | -4.53 | -5.37 | -6.37 | 12 | 1 | +0.20 | -2.13 | -5.14 | -5.90 | -6.87 |
| | 2 | -0.57 | -3.03 | -4.24 | -5.24 | -6.44 | | 2 | +0.27 | -2.34 | -5.14 | -5.90 | -6.87 |
| | 3 | -0.60 | -3.53 | -4.84 | -5.90 | -7.27 | | 3 | +0.47 | -2.37 | -5.43 | -6.30 | -7.40 |
| | 平均 | -0.66 | -3.24 | -4.54 | -5.50 | -6.69 | | 平均 | +0.31 | -2.28 | -5.24 | -6.04 | -7.04 |
| 5 | 1 | +0.77 | -1.94 | -3.07 | -4.04 | -4.30 | 13 | 1 | +0.37 | +0.47 | -4.17 | -6.00 | -5.87 |
| | 2 | +0.80 | -1.77 | -2.44 | -3.33 | -3.80 | | 2 | +0.33 | +0.67 | -3.93 | -5.94 | -5.97 |
| | 3 | +0.80 | -1.67 | -2.30 | -3.56 | -3.67 | | 3 | +0.33 | +0.50 | -4.33 | -6.30 | -6.40 |
| | 平均 | +0.79 | -1.79 | -2.60 | -3.65 | -3.92 | | 平均 | +0.34 | +0.54 | -4.14 | -6.08 | -6.08 |
| 6 | 1 | -1.03 | -3.17 | -5.34 | -5.80 | -6.17 | 14 | 1 | +0.97 | +0.67 | -0.57 | -1.93 | -2.10 |
| | 2 | -0.93 | -3.47 | -5.60 | -6.20 | -6.60 | | 2 | +1.13 | +0.70 | -1.20 | -2.70 | -2.97 |
| | 3 | -1.07 | -3.67 | -6.04 | -6.60 | -6.94 | | 3 | +1.07 | +0.57 | -1.20 | -2.80 | -3.17 |
| | 平均 | -1.01 | -3.44 | -5.65 | -6.20 | -6.57 | | 平均 | +1.06 | +0.65 | -0.99 | -2.48 | -2.74 |
| 7 | 1 | +0.03 | -2.60 | -3.60 | -4.54 | -5.57 | 15 | 1 | +0.17 | +0.77 | -3.47 | -4.74 | -6.30 |
| | 2 | +0.03 | -3.00 | -4.10 | -5.07 | -6.24 | | 2 | -0.07 | +0.20 | -4.04 | -5.24 | -6.74 |
| | 3 | -0.33 | -3.07 | -4.14 | -5.14 | -6.14 | | 3 | +0.33 | +0.57 | -3.27 | -4.24 | -5.50 |
| | 平均 | -0.09 | -2.89 | -3.94 | -4.91 | -5.98 | | 平均 | +0.16 | +0.51 | -3.59 | -4.73 | -6.18 |
| 8 | 1 | -1.07 | -6.20 | -8.20 | -9.90 | -11.10 | 16 | 1 | +0.63 | +0.10 | -2.37 | -3.84 | -6.40 |
| | 2 | -1.40 | -6.20 | -8.20 | -10.07 | -10.83 | | 2 | +0.33 | +0.10 | -2.50 | -3.80 | -6.34 |
| | 3 | -1.40 | -6.44 | -8.67 | -10.40 | -10.93 | | 3 | +0.50 | +0.27 | -2.44 | -3.80 | -6.34 |
| | 平均 | -1.29 | -6.28 | -8.35 | -10.12 | -10.95 | | 平均 | +0.49 | +0.16 | -2.43 | -3.81 | -6.36 |

表—8 長さ変化率測定結果

表-10, 表-11より, 主効果についてみると, Gを除くすべての因子は, 材令26Wで高度の有意差があることが明らかである。寄与率ではB, Fの2つの因子が大きい値を示している。交互作用は材令の経過にしたがい, 有意の差がみられなくなる。また, 寄与率が材令とともに

に変化することが注目される。

4.3 検討II—各因子の効果

各因子別に平均変化率を計算した結果を表-12および図-2-A~Jに示す。

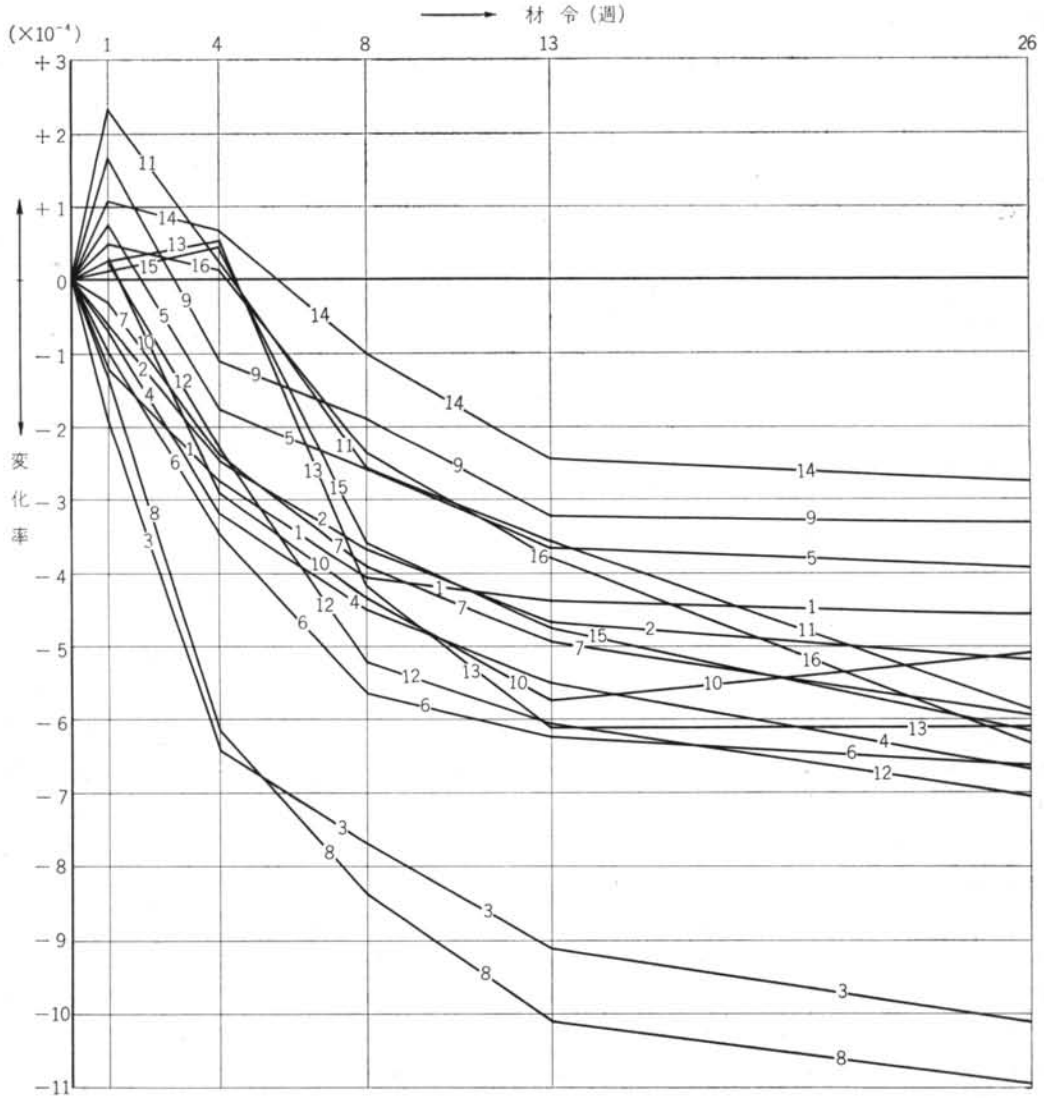


図-1 長さ変化率測定結果

| 室 別 | 期 間 | 昭 和 39 年 | | | 昭 和 40 年 | | | | | 全 期 間 平 均 | 26W測定 時 平均 |
|--------------------|-----|----------|------|------|----------|------|------|------|------|--------------|---------------|
| | | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | | |
| 養 生 室(予定湿度70%R.H.) | | 72.2 | 73.9 | 69.2 | 69.2 | 65.8 | 70.6 | 76.2 | 82.2 | 72.4 | 79.5 |
| 恒温恒湿室(予定湿度45%R.H.) | | 61.9 | 60.6 | 52.0 | 54.4 | 46.6 | 47.2 | 50.2 | 55.9 | 53.6 | 53.1 |

表-9 実際湿度(% R.H.): 各期間中平均

| 要 因 | 変 動 (ss) | 自由度 (df) | 不 偏 分 散 (ms) | 不偏分散比 (F) | 寄与率(%) (ρ) | 備 考 |
|----------------------------------------|-------------|-------------|-----------------|--------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | |
| A 水中養生の期間 | 21,457 | 3 | 7,152 | 64** | 10.0 | (n ₁ =3 Pr(F>4.46)=0.01 n ₂ =32 Pr(F>2.90)=0.05) |
| B その後の空中養生湿度 | 81,099 | 1 | 81,099 | 724** | 42.3 | |
| C セメント粉末度 | 4,740 | 1 | 4,740 | 41** | 2.4 | (n ₁ =1 Pr(F>7.50)=0.01 n ₂ =32 Pr(F>4.15)=0.05) |
| F×H | 438 | 1 | ○ 438 | — | 0 | |
| F×G | 5 | 1 | ○ 5 | — | 0 | |
| D 水セメント比 | 3,519 | 1 | 3,519 | 31** | 1.8 | (** 危険率1%で有意差がある * // 5% // |
| E スランブ | 4,389 | 1 | 4,389 | 39** | 2.2 | |
| e ₁ | 3,218 | 1 | 3,218 | 29** | 1.6 | |
| F CaSO ₄ ·2H ₂ O | 45,695 | 1 | 45,695 | 408** | 23.8 | |
| G Al ₂ O ₃ | 229 | 1 | ○ 229 | — | 0 | |
| H CaCO ₃ | 3,588 | 1 | 3,588 | 32** | 1.8 | |
| I 粗骨材種類 | 18,683 | 1 | 18,683 | 167** | 9.7 | |
| J 細骨材粒度 | 859 | 1 | 859 | 7.7** | 0.4 | |
| (○印: 誤差にプール) | | | | | | |
| e ₂ | 3,606 | 32 | 113 | | 2.2 | |
| 計 | 191,525 | 47 | | | 100 | |
| プ ー ル 誤 差 | 4,278 | 35 | 112 | | 2.2 | |

表—10 分散分析表(材令26W)

| 要 因 | 自由度 | 不 偏 分 散 比 | | | | | 寄 与 率 (%) | | | | |
|----------------------------------------|-----|-----------|---------|-------|-------|-------|-----------|------|------|------|------|
| | | 1 W | 4 W | 8 W | 13W | 26W | 1 W | 4 W | 8 W | 13W | 26W |
| A 水中養生の期間 | 3 | 682** | 1,548** | 245** | 101** | 64** | 61.4 | 63.6 | 26.4 | 17.0 | 10.0 |
| B その後の空中養生湿度 | 1 | 45** | 274** | 364** | 216** | 724** | 1.3 | 3.7 | 13.2 | 12.8 | 42.3 |
| C セメント粉末度 | 1 | 33** | 606** | 122** | 181** | 41** | 1.0 | 8.3 | 4.4 | 10.2 | 2.4 |
| F×H | 1 | 33** | 31** | 7.2* | — | — | 1.0 | 0.4 | 0.2 | — | — |
| F×G | 1 | 11** | 59** | — | — | — | 0.3 | 0.8 | — | — | — |
| D 水セメント比 | 1 | 123** | 222** | 71** | 39** | 31** | 3.7 | 3.0 | 2.5 | 2.3 | 1.8 |
| E スランブ | 1 | 19** | 53** | 26** | 28** | 39** | 0.5 | 0.7 | 0.9 | 1.6 | 2.2 |
| e ₁ | 1 | 2.2 | 127** | 11** | 4.7* | 29** | — | 1.7 | 0.4 | 0.2 | 1.6 |
| F CaSO ₄ ·2H ₂ O | 1 | 930** | 954** | 124** | 747** | 408** | 27.9 | 13.0 | 44.9 | 42.2 | 23.8 |
| G Al ₂ O ₃ | 1 | 0.7 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| H CaCO ₃ | 1 | 56** | 38** | 34** | 27** | 32** | 1.7 | 0.5 | 1.2 | 1.5 | 1.8 |
| I 粗骨材種類 | 1 | 0.5 | 112** | 99** | 142** | 167** | — | 1.5 | 3.5 | 8.4 | 9.7 |
| J 細骨材粒度 | 1 | 1.6 | 157** | 20** | 26** | 7.7** | — | 2.1 | 0.7 | 1.4 | 0.4 |
| e ₂ | 32 | | | | | | 1.2 | 0.7 | 1.7 | 2.4 | 2.2 |
| 計 | 47 | | | | | | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

(注) * 危険率5%で有意差がある ** 危険率1%で有意差がある

表—11 不偏分散比および寄与率

| 要 因 | 水 準 | 平 均 変 化 率 ($\times 10^{-4}$) | | | | |
|---------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 W | 4 W | 8 W | 13W | 26W |
| A 水中養生の期間 | (1) ナシ | -1.13 | -3.76 | -4.97 | -5.91 | -6.61 |
| | (2) 1日 | -0.45 | -3.57 | -5.13 | -6.21 | -6.88 |
| | (3) 6日 | +1.18 | -1.52 | -3.52 | -4.65 | -5.32 |
| | (4) 27日 | +0.50 | +0.47 | -2.85 | -4.27 | -5.34 |
| B その後の空中養生湿度 | (1) 70% | +0.17 | -1.68 | -3.44 | -4.56 | -4.67 |
| | (2) 45% | -0.11 | -2.51 | -4.80 | -5.97 | -7.41 |
| C セメント粉末度 | (1) 2920 cm^2/g | +0.16 | -1.49 | -3.73 | -4.63 | -5.72 |
| | (2) 3470 cm^2/g | -0.10 | -2.71 | -4.52 | -5.89 | -6.36 |
| D 水セメント比 | (1) 50% | +0.23 | -1.72 | -3.82 | -4.96 | -5.75 |
| | (2) 70% | -0.17 | -2.47 | -4.42 | -5.56 | -6.33 |
| E スランプ | (1) 5cm | -0.06 | -2.29 | -3.94 | -5.01 | -5.72 |
| | (2) 22cm | +0.12 | -1.90 | -4.31 | -5.51 | -6.36 |
| F $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | (1) ナシ | -0.55 | -2.88 | -5.38 | -6.54 | -7.08 |
| | (2) アリ | +0.61 | -1.31 | -2.85 | -3.99 | -5.00 |
| G Al_2O_3 | (1) ナシ | +0.05 | -2.09 | -4.16 | -5.35 | -6.11 |
| | (2) アリ | +0.01 | -2.10 | -4.08 | -5.17 | -5.97 |
| H CaCO_3 | (1) ナシ | +0.19 | -1.94 | -3.91 | -5.02 | -5.74 |
| | (2) アリ | -0.13 | -2.25 | -4.33 | -5.51 | -6.34 |
| I 粗骨材種類 | (1) 川砂利 | +0.01 | -1.83 | -3.77 | -4.69 | -5.38 |
| | (2) 砕石 | +0.05 | -2.36 | -4.47 | -5.84 | -6.70 |
| J 細骨材粒度 | (1) 5 mm以下 | +0.04 | -1.79 | -3.96 | -5.02 | -5.91 |
| | (2) 0.6mm以下 | +0.02 | -2.40 | -4.28 | -5.51 | -6.17 |

表-12 要因, 水準別平均変化率

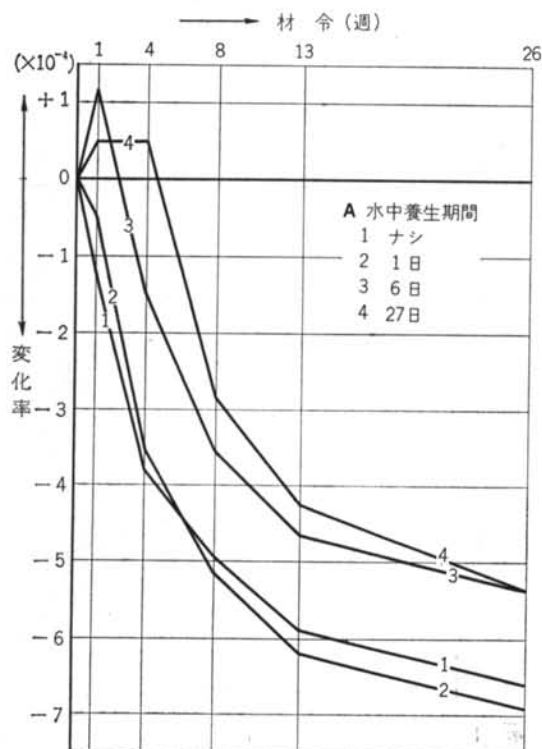


図-2-A A因子による平均変化率

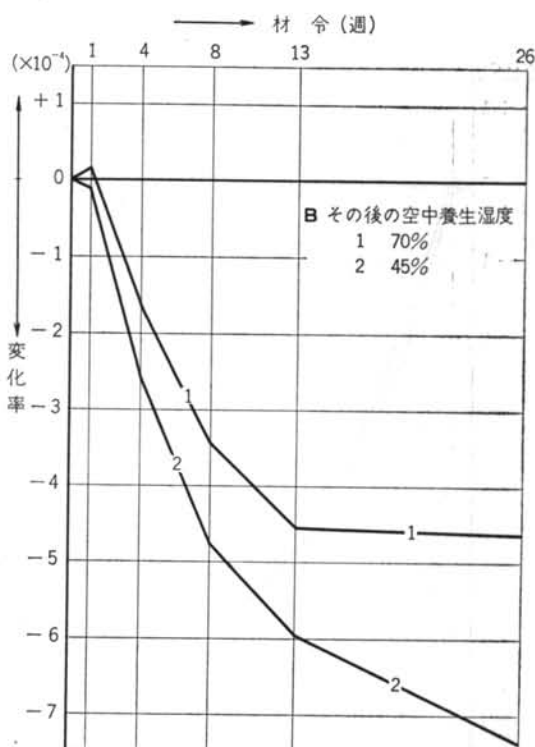


図-2-B B因子による平均変化率

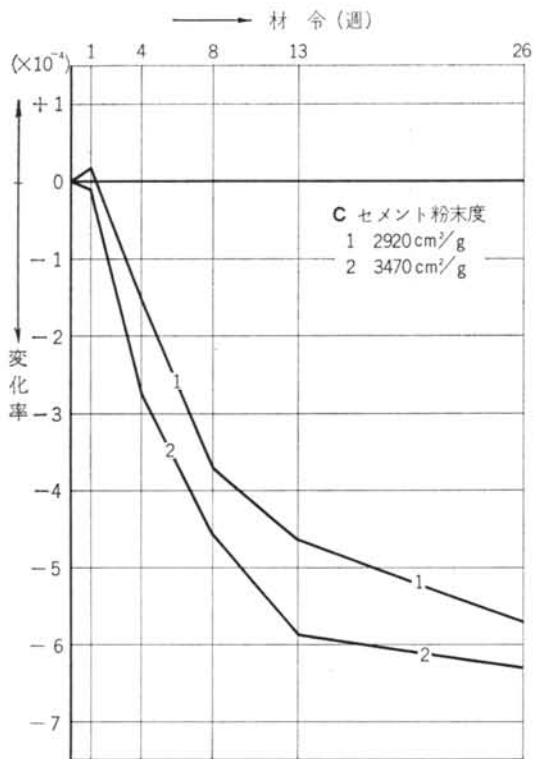


図-2-C C因子による平均変化率

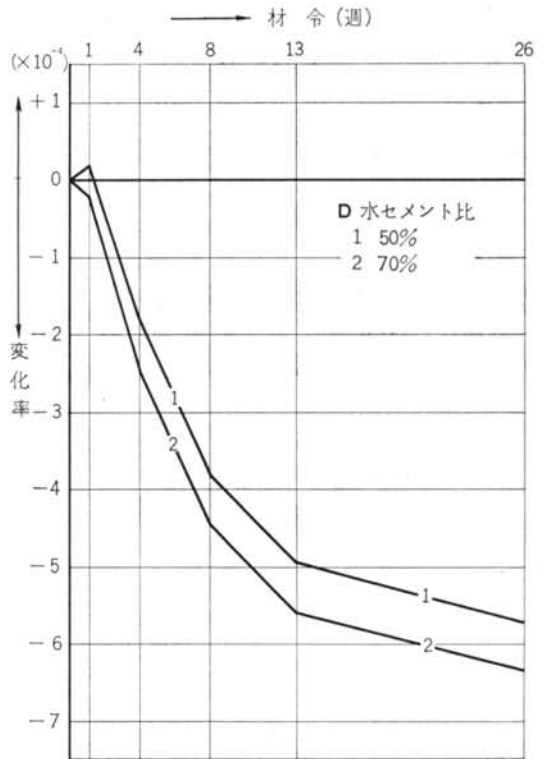


図-2-D D因子による平均変化率

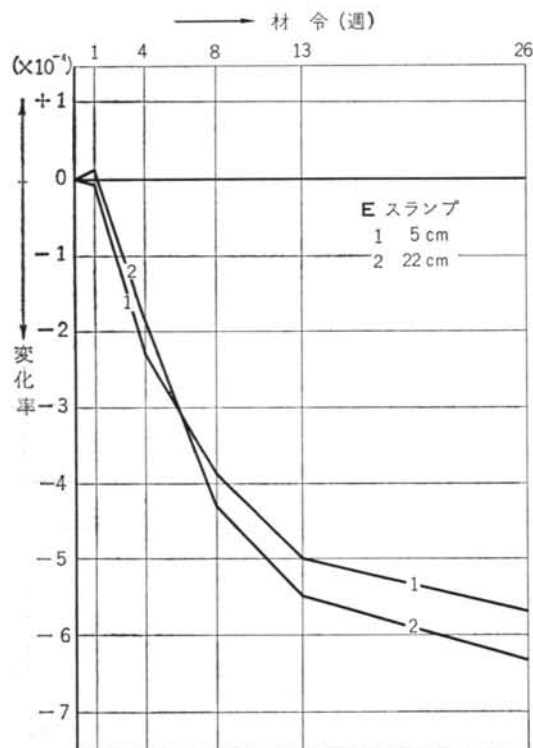


図-2-E E因子による平均変化率

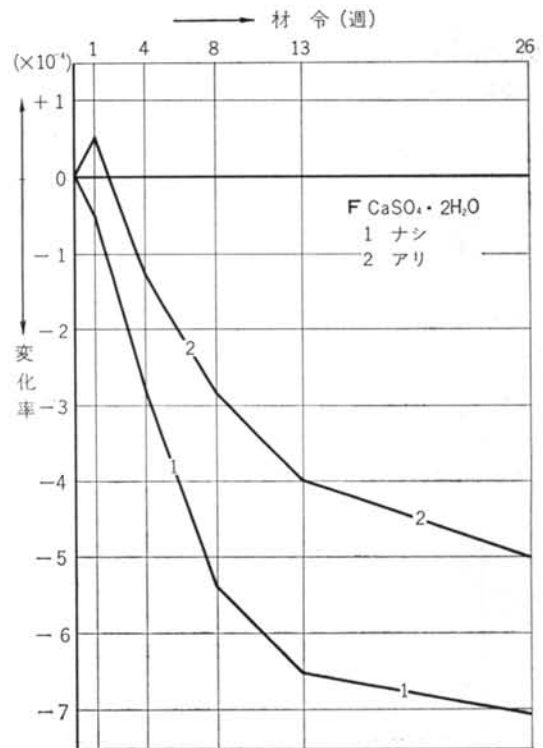


図-2-F F因子による平均変化率

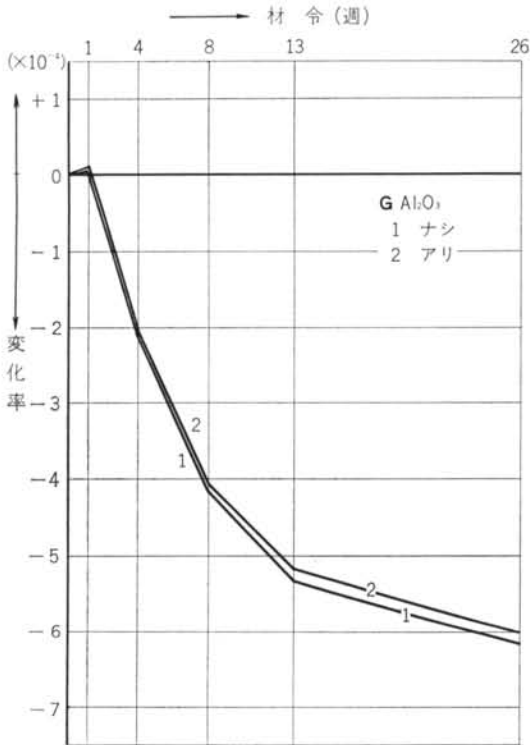


図-2-G G因子による平均変化率

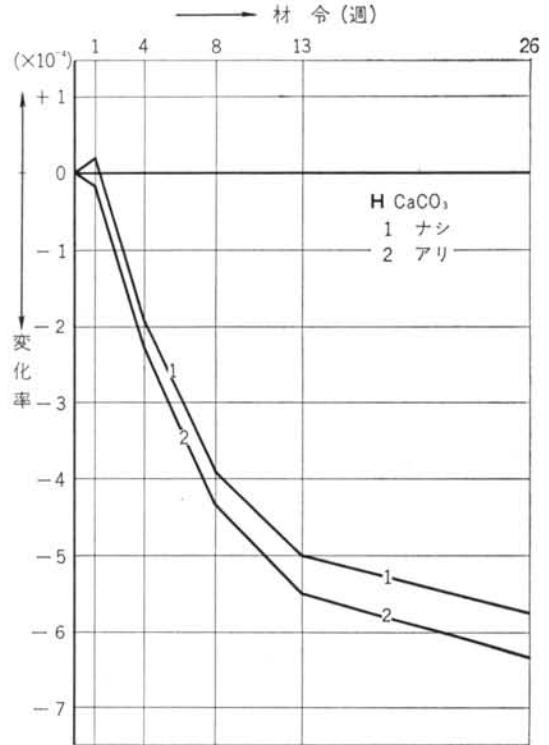


図-2-H H因子による平均変化率

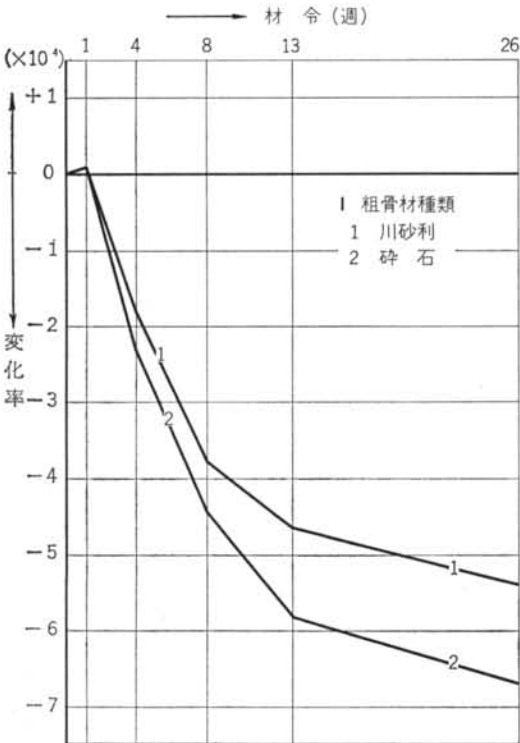


図-2-I I因子による平均変化率

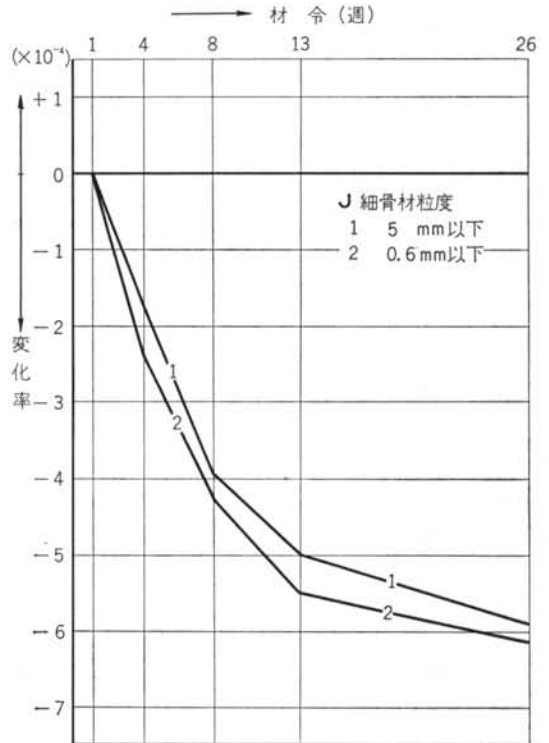


図-2-J J因子による平均変化率

4.4 検討Ⅲ——各因子と収縮量との関係

a) 計算式:

因子Aの自由度は3, 因子B, C, D, E, F, G, H, I, Jの自由度は1, 交互作用F×H, F×Gの自由度は1, 一次誤差項 e_1 の自由度は1であるから, 特性値 y の観測方程式は, つぎのように考えられる(*).

$$y_t = m + a_1 A_t^1 + a_2 A_t^2 + a_3 A_t^3 + b B_t + c C_t + f h F_t \cdot H_t + f g F_t \cdot G_t + d D_t + e E_t + E_1(e_1)_t + f F_t + g G_t + h H_t + i I_t + j J_t \quad \dots\dots(1)$$

ここに,

$i: 1 \sim 16$ m : 一般平均

a_1, a_2, a_3 : 因子Aの効果であり, 自由度3であるから3個で示す.

$b \sim j$: 因子B~Jの効果. 自由度1であるから1個で示す(以下同様).

$f h, f g$: 因子FとGの, および因子FとGの交互作用の効果.

E_1 : 一次誤差項 e_1 の効果.

以上に示す一般平均および各因子等の効果, 計16個が本検討において必要なもので, これらを未知数と考え, 16元の連立方程式を解く.

$A_t \sim J_t$: 各因子の水準によってきまる係数.

A_t のみは因子Aが4水準であるため, 各材令ごとの測定結果より計算し, その他は2水準であるから, 単に水準1のとき係数1, 水準2のとき係数-1とした.

以上によって定まる16元1次方程式を各材令ごとに, すなわち5組(1W, 4W, 8W, 13W, 26W)について解く.

いま, 材令26Wにおける連立方程式を具体的に示すと, つぎのようである.

$$4.50 = m + 0.65a_1 + 0.42a_2 + 0.27a_3 + b + c + f h + f g + d + e + E_1 + f + g + h + i + j \quad \dots\dots(2.1)$$

$$5.13 = m + 0.65a_1 + 0.42a_2 + 0.27a_3 + b + c + f h + f g - d - e - E_1 - f - g - h - i - j \quad \dots\dots(2.2)$$

$$10.11 = m + 0.65a_1 + 0.42a_2 + 0.27a_3 - b - c - f h - f g + d + e + E_1 + f - g - h - i - j \quad \dots\dots(2.3)$$

$$6.69 = m + 0.65a_1 + 0.42a_2 + 0.27a_3 - b - c - f h - f g - d - e - E_1 - f + g + h + i + j \quad \dots\dots(2.4)$$

$$3.92 = m + a_1 + a_2 + a_3 + b + c - f h - f g + d + e - E_1 - f + g + h - i - j \quad \dots\dots(2.5)$$

$$6.66 = m + a_1 + a_2 + a_3 + b + c - f h - f g - d - e + E_1 + f - g - h + i + j \quad \dots\dots(2.6)$$

$$5.98 = m + a_1 + a_2 + a_3 - b - c + f h + f g + d + e - E_1 - f - g - h + i + j \quad \dots\dots(2.7)$$

$$10.95 = m + a_1 + a_2 + a_3 - b - c + f h + f g - d - e + E_1 + f + g + h - i - j \quad \dots\dots(2.8)$$

$$3.30 = m - a_1 + a_2 - a_3 + b - c + f h - f g + d - e + E_1 - f + g - h + i - j \quad \dots\dots(2.9)$$

$$5.06 = m - a_1 + a_2 - a_3 + b - c + f h - f g - d + e - E_1 + f - g + h - i + j \quad \dots\dots(2.10)$$

$$5.91 = m - a_1 + a_2 - a_3 - b + c - f h + f g + d - e + E_1 - f - g + h - i + j \quad \dots\dots(2.11)$$

$$7.04 = m - a_1 + a_2 - a_3 - b + c - f h + f g - d + e - E_1 + f + g - h + i - j \quad \dots\dots(2.12)$$

$$6.08 = m - 0.97a_1 + 0.94a_2 - 0.89a_3 + b - c - f h + f g + d - e - E_1 + f + g - h - i + j \quad \dots\dots(2.13)$$

$$2.74 = m - 0.97a_1 + 0.94a_2 - 0.89a_3 + b - c - f h + f g - d + e + E_1 - f - g + h + i - j \quad \dots\dots(2.14)$$

$$6.18 = m - 0.97a_1 + 0.94a_2 - 0.89a_3 - b + c + f h - f g + d - e - E_1 + f - g + h + i - j \quad \dots\dots(2.15)$$

$$6.36 = m - 0.97a_1 + 0.94a_2 - 0.89a_3 - b + c + f h - f g - d + e + E_1 - f + g - h - i + j \quad \dots\dots(2.16)$$

I.B.M.によるこれら連立方程式の解を表-13に示す.

| 未知数 | 材 令 (週) | | | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 4 | 8 | 13 | 26 |
| m | -0.0257 | 1.6466 | 3.9952 | 5.2416 | 6.0450 |
| a_1 | 1.1485 | 2.1513 | 1.1408 | 0.9727 | 0.8662 |
| a_2 | -0.0030 | -0.0028 | -0.0315 | 0.0021 | 0.0576 |
| a_3 | 0.0053 | -0.0425 | 0.0305 | -0.0039 | -0.0912 |
| b | -0.1400 | -0.4188 | -0.6963 | -0.7087 | -1.3644 |
| c | -0.1275 | -0.6075 | -0.3800 | -0.6313 | -0.3256 |
| $f h$ | 0.1188 | 0.1262 | -0.0825 | -0.0650 | -0.1056 |
| $f g$ | -0.0513 | -0.1925 | 0.0163 | 0.0175 | 0.0031 |
| d | -0.2013 | -0.3775 | -0.2875 | -0.3013 | -0.2906 |
| e | 0.0913 | 0.1963 | -0.1963 | -0.2512 | -0.3244 |
| E_1 | 0.0125 | 0.2700 | 0.1088 | 0.1025 | 0.2781 |
| f | 0.5825 | 0.7838 | 1.2725 | 1.2825 | 1.0344 |
| g | -0.0237 | -0.0075 | 0.0488 | 0.0900 | 0.0669 |
| h | -0.1588 | -0.1562 | -0.2225 | -0.2450 | -0.2944 |
| i | 0.0225 | -0.2675 | -0.3675 | -0.5737 | -0.6519 |
| j | -0.0100 | -0.3013 | -0.1463 | -0.2388 | -0.1331 |

表-13 連立方程式の解

(*) 実験計画法: 田口玄一 著

b) 実験値と計算値の比較:

本実験でとりあげた因子と水準、また、その配置が妥当であるかどうかを客観的にチェックするため、既往の文献にあらわれた実験の結果とその実験内容を、(1)式に代入して計算した値と比較を行なった。

その結果を、表-14および図-3に示す。

ただし、因子Bの“その後の空中養生湿度”に関して予定した湿度が得られなかったため、計算では表-9に示す実測値にもとづいて計算を行なった。

| No. | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | セメント種類 | 混和剤 | コンクリートの調合 (kg/m ³) (重量調合比) | | | | 収縮率 ³⁾ (×10 ⁻⁴) | |
|-----|-----------------|------------------|------------------------------|------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------|-------------------|--------|-------|----------------------------------------|-----|--------------------|--------|----------------------------------------|-----|
| | 水中養生期間(日) | その後の湿度(%) | セメント粉末度 (cm ² /g) | 水セメント比 (%) | スランブ (cm) | CaSO ₄ ·2H ₂ O | Al ₂ O ₃ | CaCO ₃ | 粗骨材種類 | 細骨材粒度 (mm以下) | | | セメント | 粗骨材 | 有効水 | 有 | 実測値 | 計算値 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 7 | 76 | 3,000 ¹⁾ | 70 | 19.8 | ナシ | ナシ | ナシ | 川砂利 | 2.5 | 普ポ | ナシ | (1: 2.22: 3.78) | | 4.37 ²⁾ | (11W) | 4.74 | |
| 2 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 11.3 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.59: 4.41) | | 4.09 ²⁾ | 〃 | 4.33 | |
| 3 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.6 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.96: 5.03) | | 3.46 ²⁾ | 〃 | 3.91 | |
| 4 | 〃 | 〃 | 〃 | 60 | 20.5 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 1.85: 3.15) | | 4.45 ²⁾ | 〃 | 4.39 | |
| 5 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 13.7 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.22: 3.78) | | 4.07 ²⁾ | 〃 | 4.12 | |
| 6 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.2 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.59: 4.41) | | 3.56 ²⁾ | 〃 | 3.61 | |
| 7 | 〃 | 〃 | 〃 | 50 | 15.8 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 1.66: 2.84) | | 4.17 ²⁾ | 〃 | 3.92 | |
| 8 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 4.5 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.04: 3.46) | | 3.99 ²⁾ | 〃 | 3.50 | |
| 9 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 2.41: 4.09) | | 3.47 ²⁾ | 〃 | 3.32 | |
| 10 | 〃 | 〃 | 〃 | 40 | 7.2 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 1.30: 2.20) | | 4.28 ²⁾ | 〃 | 3.30 | |
| 11 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 1.66: 2.84) | | 3.71 ²⁾ | 〃 | 3.03 | |
| 12 | 0 | 60 | 3,010 | 62.5 | 20 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 0.6 | 〃 | 〃 | 350 500 1,231 219 | | 6.6 | (20W) | 7.53 | |
| 13 | 〃 | 〃 | 〃 | 57.3 | 9.5 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 〃 〃 200 | | 9.2 | 〃 | 7.22 | |
| 14 | 1 | 〃 | 3,180 | 65 | 19 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 1.2 | 〃 | 〃 | 355 604 1,136 231 | | 7.35 ⁴⁾ | 〃 | 7.85 | |
| 15 | 7 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 〃 〃 〃 | | 7.02 ⁴⁾ | 〃 | 6.30 | |
| 16 | 6 | 45 ¹⁾ | 3,195 ¹⁾ | 66.5 | 19.6 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 298 834 1,008 198 | | 7.95 | (240日) | 8.47 | |
| 17 | 1 ¹⁾ | 85 | 3,300 ¹⁾ | 50 | 5 ¹⁾ | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 5 | 〃 | 〃 | (1: 2.0: 2.6) | | 3.4 | 〃 | 3.21 | |
| 18 | 〃 | 〃 | 〃 | 35 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | (1: 1.0: 1.5) | | 3.5 | 〃 | 2.78 | |
| 19 | 0 | 70 | 3,195 ¹⁾ | 60 | 3.5 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 252 | 151 | 5.0 | (180日) | 5.51 | |
| 20 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 19 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 316 | 190 | 5.7 | 〃 | 6.10 | |
| 21 | 〃 | 45 | 〃 | 65 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 2.5 | 〃 | 〃 | 305 | | 8.3 | 〃 | 9.37 | |
| 22 | 〃 | 70 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | | 5.5 | 〃 | 6.34 | |
| 23 | 5 | 50 | 3,300 ¹⁾ | 66 | 20 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 300 821 1,015 198 | | 11.9 | (182日) | 7.68 | |
| 24 | 〃 | 〃 | 〃 | 71.3 | 19 | 〃 | 〃 | 〃 | 砕石 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 836 913 214 | | 11.21 | 〃 | 9.10 | |
| 25 | 6 | 45 | 3,195 ¹⁾ | 40 | 2.0 | 〃 | 〃 | 〃 | 川砂利 | 2.5 ¹⁾ | 〃 | 〃 | 368 776 1,176 147 | | 5.7 | 〃 | 5.82 | |
| 26 | 〃 | 〃 | 3,320 | 65 | 19 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 5 | 〃 | 〃 | 305 875 865 198 | | 7.3 | (22W) | 7.22 | |
| 27 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | アリ (5%) | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 〃 〃 〃 | | 4.9 | 〃 | 5.15 (13w) | |
| 28 | 〃 | 〃 | 3,270 | 50 | 10 | ナシ | 〃 | 〃 | 〃 | 2.5 | 〃 | 〃 | 320 682 1,217 160 | | 5.6 | (13W) | 5.45 (13w) | |
| 29 | 1 | 80 | 3,200 | 52.8 | 21 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 5 | 〃 | 〃 | 350 759 997 185 | | 3.62 | 〃 | 5.30 (13w) | |
| 30 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | アリ (3%) | 〃 | アリ (5%) | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 734 〃 〃 | | 3.27 | 〃 | 4.25 | |
| 31 | 6 | 70 | 3,300 ¹⁾ | 60 | 18.5 | ナシ | 〃 | ナシ | 〃 | 〃 | 〃 | A E A | 315 938 845 | | 9.1 | (180日) | 4.66 | |
| 32 | 〃 | 45 | 3,300 | 65 | 19 | 〃 | 〃 | 〃 | 〃 | 2.5 | 〃 | ナシ | 297 808 1,054 193 | | 7.36 | 〃 | 7.28 | |

表-14 既往文献⁶⁾による実験値と計算値との比較

注: 1) 不明のため仮定 2) 基長は水中養生終了時

3) 材令は特記のほか26W 4) モルタルの収縮率より換算 5) グラフから推定 6) 文献詳細は末尾に掲載

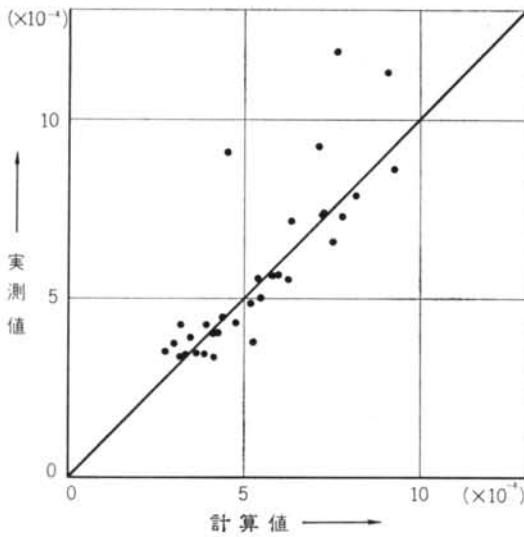


図-3 実験値と計算値の比較

[参考]

計算値算出の手順を、表-14におけるNo. 26, 27を例に示すと、つぎのとおりである。

- a) 文献：二水石膏混和によるコンクリートのきれつ防止：藤松進：日本建築学会論文集92号，'63.11
 - ・使用したセメントの粉末度：3320 cm²/g
 - ・使用した粗骨材の種類：川砂利（20mm以下）
 - ・使用した細骨材の粒度：5 mm以下
 - ・コンクリートの割合：W/C=65%
 - スランブ=19cm
 - セメント量=305kg/m³
 - S/A=50%
 - ・二水石膏の添加量：CaSO₄ 分をセメントに対して 5.0 o/wt 添加
 - ・養生：材令1日脱型（収縮基準長）
 - 材令1週まで湿空養生（約95% R.H.）
 - 材令22週まで地下室広間に放置
 - ・実験結果：次表のとおりである。

| 項目 | 材 令 | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------|------|------|------|------|------|
| | 1W | 4W | 8W | 15W | 22W | |
| 収縮率(×10 ⁻⁴) (-:収縮) | No. 26 (プレーン) | -0.0 | -2.6 | -5.3 | -6.0 | -7.3 |
| | No. 27 (混和量5%) | +0.3 | -1.4 | -2.5 | -3.7 | -4.9 |
| 測定時温湿度 | °C | 29 | 31 | 31 | 19 | 14 |
| | %R.H. | 84 | 81 | 78 | 37 | 40 |
| 期間平均温湿度 | °C | 29 | 30 | 31 | 24 | 14 |
| | %R.H. (湿空) | 73 | 73 | 63 | 46 | |

b) 計算上の仮定，方針およびその結果

A（水中養生期間）は6日，B（その後の空中養生湿度）は45%と仮定する。C（セメント粉末度），D（水セメント比），E（スランブ）は，いずれもとりあげた水準の中間にあるため，直線的に比例すると仮定して計算する。F，G，H，I，Jは，とりあげた水準そのままの値であるから問題ない。

計算は材令26Wで行なった。結果を次表に示す。

No. 26

| 要因 | 水 準 | | 係 数 x | 係 数 y | xy |
|----------|------------------------|-----|----------|----------|---------|
| A | 6日 | (3) | -1.0000 | 0.7174 | -0.7174 |
| B | 45% | (2) | -1.0000 | -1.3644 | 1.3644 |
| C | 3320cm ² /g | | -0.4545 | -0.3256 | 0.1480 |
| D | 65% | | -0.5000 | -0.2906 | 0.1453 |
| E | 19cm | | -0.6471 | -0.3244 | 0.2100 |
| F | ナシ | (1) | 1.0000 | 1.0344 | 1.0344 |
| G | ナシ | (1) | 1.0000 | 0.0669 | 0.0669 |
| H | ナシ | (1) | 1.0000 | -0.2944 | -0.2944 |
| I | 川砂利 | (1) | 1.0000 | -0.6519 | -0.6519 |
| J | 5mm以下 | (1) | 1.0000 | -0.1331 | -0.1331 |
| m | | | | | 6.0450 |
| 計(計算値) | | | | | 7.2172 |
| 実測値(22W) | | | | | 7.3 |

No. 27

| 要因 | 水 準 | | 係 数 x | 係 数 y | xy |
|----------|------------------------|-----|----------|----------|---------|
| A | 6日 | (3) | -1.0000 | 0.7174 | -0.7174 |
| B | 45% | (2) | -1.0000 | -1.3644 | 1.3644 |
| C | 3320cm ² /g | | -0.4550 | -0.3256 | 0.1480 |
| D | 65% | | -0.5000 | -0.2906 | 0.1453 |
| E | 19cm | | -0.6471 | -0.3244 | 0.2100 |
| F | アリ | (2) | -1.0000 | 1.0344 | -1.0344 |
| G | ナシ | (1) | 1.0000 | 0.0669 | 0.0669 |
| H | ナシ | (1) | 1.0000 | -0.2944 | -0.2944 |
| I | 川砂利 | (1) | 1.0000 | -0.6519 | -0.6519 |
| J | 5mm以下 | (1) | 1.0000 | -0.1331 | -0.1331 |
| m | | | | | 6.0450 |
| 計(計算値) | | | | | 5.1484 |
| 実測値(22W) | | | | | 4.9 |

§ 5. ま と め

5.1 結 論

以上の研究により知り得ることを要約すると、つぎのとおりである。

a) この実験の範囲内、かつ材令26W現在で、コンクリートの乾燥収縮におよぼす因子について、その影響の大きいものから列記すると、①水中養生後の空中養生湿度、②二水石膏混和の有無、③水中養生の期間、④粗骨材の種類、⑤セメントの粉末度、⑥スランプ、⑦炭酸カルシウム混和の有無、⑧水セメント比、⑨細骨材の粒度となる。特に、①、②の影響が大きい。また、酸化アルミニウム混和の有無は、収縮に影響を与えない。

各因子の水準と乾燥収縮量の大小関係（例えば、セメントの粉末度が大きいほど収縮量は大きい）は、若干のものをのぞき、既往の文献と一致している。粗骨材の種類、炭酸カルシウム混和の有無の2因子については、逆の結果となった。各因子の寄与率は、材令とともに変化している。

b) この実験から得られた数値を用いて計算式（4.4項の(1)式、係数は表-13に示す）を作成した。これは、種々の条件（材料、調査、養生）を数量化して代入すれば、収縮率が計算できるものである。

この式に、既に発表された文献中の実験内容を代入して求めた数値と、その実測値を比較した結果、一部のものをのぞき、よく一致している。したがって、今回の実験でとりあげた因子と水準、およびそのわりつけは、一部のものをのぞいて、おおむね妥当であることが、客観的に確かめられたと考えてよい。

5.2 応用例

乾燥収縮量をおよぼす一定限度におさえる必要のある場合コンクリートの材料、調査、養生方法を数量化して計算することで、事前のチェックが可能である。

<例> 乾燥収縮率を 4×10^{-4} 以下(26W) にする条件を求む。

解：いま、

使用するセメントの粉末度：3,300 cm²/g

使用する粗骨材：川砂利 20mm以下

使用する細骨材：川砂 2.5mm以下

水セメント比：60%

スランプ：19cm

混和剤：ナシ

水中養生期間：6日

空中養生湿度：57.5%

と仮定すると、収縮率(26W) y は、

$$y = 6.038 - 0.569 + 0 + 0.124 + 0 + 0.100 + 1.034 + 0.067 - 0.294 - 0.652 - 0.053 = 5.795 > 4$$

となり、条件に合わない。

そこで、CaSO₄・2H₂O を加えると、 y は、

$$y = 5.795 - 2 \times 1.034 = 3.727 < 4$$

となり、条件に合う(ただし、誤差が最大±0.387ある)。

5.3 残された問題点

既往の文献と逆の結果を示した2つの因子、および各因子間の交互作用の有無に関しては、今後詳細な検討が必要である。

また、今回の実験でとりあげた因子の大部分が2水準であったため、計算式において、各因子の水準点以外のものの取扱いに関しては、一応直線的に変化するものと仮定して比例計算を行なったが、これはもちろん、多くの水準について実験を行なわなければ、厳密な解は得られない。

おわりに、本研究について終始ご指導いただいた当所次長近藤博士、ならびに主任研究員鳥田氏に対して、また、数値計算でお世話になった当社設計部電子計算課宮崎課長、三雲主任、研究所藤井氏に、深く感謝します。

また、文献を引用させていただいた諸先生がたに対して、深く感謝します。

<表-14 文献>

- No. 1~11 モルタルおよびコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究：大野和男：北海道大学工学部研究報告 9号, 1953.12
- No. 12~13 コンクリートの乾燥収縮による自由収縮とキレツ：田中一彦：日本建築学会論文集 52号, 1956.3
- No. 14~15 コンクリートのキレツ防止のための養生方法に関する研究：田中一彦：日本建築学会研究報告集 40号, 1957.12
- No. 16 コンクリートの乾燥収縮略算法：福島正人：日本建築学会論文集 66号, 1960.10
- No. 17~18 かつ練りコンクリートの硬化収縮ひずみ：坂静雄, 六車照：セメントコンクリート, 1960.12

- ・ No. 19~20 セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮量に関する実験的研究：仕入豊和：日本建築学会研究報告集 58号, 1961.6
- ・ No. 21~22 キレツによるコンクリートの水密性低下の防止に関する 2, 3 の実験的検討：仕入豊和：日本建築学会論文集 69号, 1961.10
- ・ No. 23~24 碎石コンクリートにおよぼす混和物の影響：十代田知三：日本建築学会論文集 69号, 1961.10
- ・ No. 25 軽量骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮と耐熱性に関する実験：丸安隆和, 他 2 名：土木学会第18回年次学術講演会講演概要, 1963.5
- ・ No. 26~27 二水石膏混和によるコンクリートのきれつ防止：藤松進：日本建築学会論文集 92号, 1963.11
- ・ No. 28 原子力発電所クーリングボンド用コンクリート：烏田専右, 他 3 名：清水建設研究所報第 3 号, 1964.4
- ・ No. 29~30 コンクリートの乾燥, 収縮, キレツ防止に関する研究：重倉祐光, 他 3 名：日本建築学会論文集 107号, 1965.6
- ・ No. 31 人工軽量骨材コンクリートの乾燥収縮：仕入豊和, 他 1 名：日本建築学会関東支部発表会概要集, 1965.6
- ・ No. 32 セメント分散剤 “Mighty 100” および “Mighty 100A” の性能試験報告（主として乾燥収縮量, 鉄筋との付着力）：中西正俊：清水建設研究所報告, 1965.7.11