

[9] 高炉スラグを混和材として用いたコンクリートの性質

正会員 ○依田 彰彦 (足利工業大学工学部)

正会員 横室 隆 (足利工業大学工学部)

1. まえがき

本報は、既にコンクリート用混和材としても有用と認められている急冷、徐冷の高炉スラグ粉末の使用範囲を明確にすることを目的として、スランプ18cmを主対象とした、いわゆる建築分野のコンクリートの諸性質について総合的に実験研究して得られた結果を取り纏めたものである。

2. 実験に供した高炉スラグ

表1に示す通り、高炉急冷スラグ粉末が2種類(記号①、②)及び高炉徐冷スラグ粉末(記号③)が1種類である。

3. 高炉スラグ以外の使用材料

- a. セメント：表2に示す通り、4社の普通ポルトランドセメントを等量混合して用いた。
- b. 骨材：表3に示す通り、鬼怒川産の砂及び砂利を用いた。
- c. 水：表4に示す通りの水を用いた。
- d. 化学混和剤：主成分がオキシカルボン酸塩のAE減水剤(e社製品)を用いた。

4. コンクリートの練りませ及び供試体の作り方

コンクリートの練りませには45ℓの強制攪拌ミキサーを用い、砂・砂利は、ともに表乾状態のものを用いた。またコンクリート試料はJIS A 1138(試験室におけるコンクリートの作り方)によって作った。なお、高炉スラグ粉末のセメント重量に対する内割添加量は既往の研究から、いらんで急冷スラグは5、10、30、50、(60)、70、90%とし、徐冷スラグは5、10%とした。また、コンクリートのW/Cは50、60、70%とし、スランプは原則として18cmとしたがW/C50%の場合10cm、W/C60%の場合8cm、も追加した。したがって調合の数は全部で89である。

表1 使用高炉スラグ粉末の品質

| 高炉スラグ粉末の種類 | 真比重 | 比表面積 (cm ² /g) | 化学成分 (%) | | | | | | | | 塩基度 (CaO+Al ₂ O ₃ +MgO/SiO ₂) | ガラス化率 (%) |
|------------|------|---------------------------|----------|--------------------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|-----|---|-----------|
| | | | CaO | Al ₂ O ₃ | MgO | SiO ₂ | MnO | TiO ₂ | FeO | S | | |
| ① (急冷) | 2.91 | 4020 | 39.6 | 13.7 | 5.8 | 32.4 | 0.5 | 1.5 | 0.3 | 1.2 | 1.82 | 99.5 |
| ② (急冷) | 2.92 | 3930 | 41.1 | 15.0 | 6.1 | 32.1 | 0.4 | 1.3 | 0.3 | 1.5 | 1.94 | 99.1 |
| ③ (徐冷) | 2.98 | 4040 | 41.6 | 14.0 | 4.8 | 33.2 | 0.9 | 1.6 | 0.4 | 0.9 | 1.81 | 3.7 |

表2 使用普通ポルトランドセメントの品質 (各社報告)

| 会社名 | 比重 | 比表面積 (cm ² /g) | 凝結 (h-m) | | | 安定性 | 圧縮強さ (ka/cm ²) | | | 化学成分 (%) | | | | | | | |
|-----|------|---------------------------|----------|------|------|-----|----------------------------|-----|-----|----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|
| | | | 水量 | 始発 | 終結 | | 3日 | 7日 | 28日 | igloss | insol | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| a社 | 3.16 | 3160 | 28.0 | 2-47 | 4-14 | 良 | 136 | 232 | 402 | 0.5 | 0.2 | 22.0 | 5.1 | 3.0 | 64.9 | 1.3 | 2.2 |
| b社 | 3.16 | 3310 | 25.8 | 2-35 | 3-43 | 良 | 138 | 236 | 410 | 0.5 | 0.0 | 22.3 | 5.2 | 3.1 | 64.8 | 1.5 | 1.7 |
| c社 | 3.17 | 3200 | 27.1 | 2-15 | 3-18 | 良 | 138 | 236 | 419 | 0.6 | 0.0 | 22.0 | 5.2 | 3.2 | 65.2 | 1.2 | 1.9 |
| d社 | 3.17 | 3200 | 27.2 | 2-27 | 3-24 | 良 | 140 | 230 | 412 | 0.6 | 0.1 | 21.9 | 5.4 | 3.0 | 65.1 | 1.4 | 1.9 |

表3 使用骨材の品質

| 種類 | 表乾比重 | 吸水率 (%) | 単位容重 (ka/l) | 洗い出し量 (%) | ふるいを通るものの重量百分率 (%) | | | | | | | | | | | 相対率又は最大寸法 (mm) |
|-----|------|---------|-------------|-----------|--------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|----------------|
| | | | | | ふるい目 (mm) | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | 2.5 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | | |
| 川砂 | 2.59 | 2.15 | 1.66 | 2.0 | - | - | - | - | 100 | 92 | 75 | 44 | 12 | 2 | 2.8 | |
| 川砂利 | 2.57 | 1.63 | 1.66 | 0.8 | 100 | 80 | 66 | 30 | 4 | - | - | - | - | - | 25 | |

表4 使用水質 (足利保健所報告)

| 色度 | 濁度 | 水素イオン濃度 (pH) | 蒸留残留率 (ppm) | 塩素イオン (ppm) | 過マンガン酸カリウム消費量 (ppm) |
|------|------|--------------|-------------|-------------|---------------------|
| 5度以下 | 2度以下 | 6.8 | 290 | 14.9 | 3.9 |

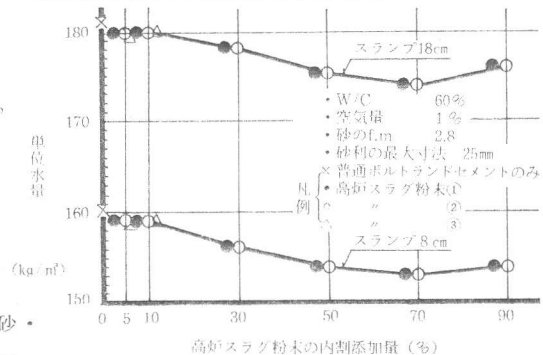


図1 添加量と単位水量との関係

5. 実験の項目と方法 表5に示す。

6. 実験結果と考察 図1～図12及び表6～7に示す。

a. 練り混ぜた89調合のコンクリートのワーカビリティは、すべて良好であった。

b. 急冷、徐冷にかかわらず、高炉スラグ粉末を混和材として用いたコンクリートの調合は無添加のコンクリート(×印)と比較すると、単位水量は内割添加量5、10%は補正なし、内割30%は2%減、内割50、90%は3%減、内割70%は4%減とするとよい(図1参照)。また、この場合粗骨材はすべて補正なし、細骨材率は0～1.0%の範囲で、高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど(ただし、90%は50%と同じ)大きくする。

c. ブリージング量は、図2に示す通り、組合せによって若干差違が認められた。しかしその最大は0.5cc/cm²程度なので、JASS 5の“常用”に適用できる。

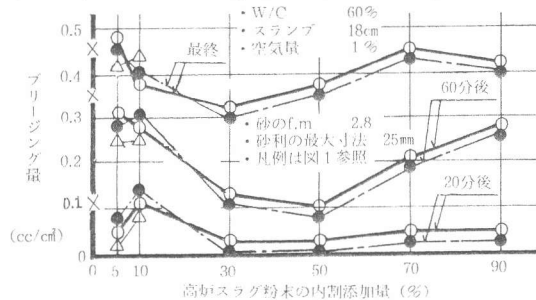


図2 添加量とブリージング量との関係

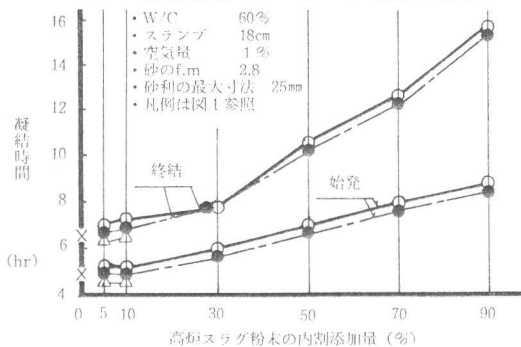


図3 添加量と凝結時間との関係

d. 凝結時間は、図3に示す通り、高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど長い。

e. 簡易断熱温度上昇量は図4に示す通り、高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど低い。

f. 圧縮強度は、高炉スラグ粉末の内割添加量が多いほど、短期材令では小さいが、長期材令に至ると、極小の添加量90%を除いて、差違はほとんどなくなる(図5参照)。急冷、徐冷した高炉スラグ粉末の差違を見ると、材令28日までは、差違はほとんど認められないが、材令91、365日では、若干であるが、塩基度が最も大きい高炉スラグ粉末②が最も高く、以下高炉スラグ粉末①、高炉スラグ粉末③、無添加コンクリートの順である(図6参照)。本実験結果から、図7及び表6に示す通り、空気量1%とした場合の高炉スラグ粉末コンクリートの材令28日圧縮強度(F_{28})

表5 実験の項目と方法

| 実験項目 | 実験方法 |
|---------------------------|--|
| ワーカビリティ | スランブ試験におけるコンクリートの状態から判定した。 |
| スランブ | JIS A 1101(コンクリートのスランブ試験方法)によった。 |
| 空気量 | JIS A 1128(または固まらないコンクリートの空気量の圧力による試験方法)(空気圧力方法)によった。 |
| ブリージング量 | JIS A 1123(コンクリートのブリージング試験方法)によった。 |
| 凝結 | ASTM C 403 (Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance) によった。 |
| 簡易断熱温度上昇量 | 20cm厚の発泡スチロールで覆った20φ×20cmのコンクリートの中心部に熱電対を埋込んで、温度の上昇量を測定した。 |
| 圧縮強度 | JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) によって供試体を作り、圧縮強度試験はJIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) によった。 |
| 静弾性係数 | 圧縮強度の測定時にコンプレックスメーターを用いて歪を測定し、最大荷重の点における点の静弾性係数を求めた。 |
| 引張り強度 | 10φ×20cmの金属製型枠を用い、JIS A 1132によって供試体を作り、引張り強度試験はJIS A 1113 (コンクリートの引張り強度試験方法) によった。ただし、W/Cは60%、スランブは18cmのみ。 |
| 曲げ強度 | 10×10×40cmの型枠を用い、JIS A 1132によって供試体を作り、曲げ強度試験はJIS A 1106(コンクリートの曲げ強度試験方法) によった。ただし、W/Cは60%、スランブは18cmのみ。 |
| 鉄筋との付着強度 | 縦15×横15×高さ15cmの金属製型枠を用い、JIS A 1132に準じて供試体を作り付着強度試験はASTM C 234 (Standard Method of Test of the Bond Developed with Reinforcing Steel) によった。ただし、W/Cは60%、スランブは18cmのみ。配筋方向は垂直。 |
| 長さ変化率 | JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) コンパレーター法によった。なお、供試体はJIS A 1132に準じて作った。 |
| 重量変化率 | 長さ変化の測定時に併せて1gまで測られる天秤を用いて測定した。 |
| 凍結融解作用に対する抵抗性 | ASTM C 666「水中における急速凍結融解試験方法」に準じた。なお、サイクル数は300。 |
| 中性化深さ及びコンクリート中の鉄筋のさびの発生状況 | 10×10×40cmの型枠を用い、JIS A 1132に準じて2本の16φコンクリート中の磨き鉄筋を埋込んだ(かぶり厚さ2.3cm) 供試体を作った。中性化深さ(フェノールフタレインアルコール1%溶液噴霧)及びコンクリート中の磨き鉄筋のさびの発生(肉眼観察)は材令28日を起点とし、ごく普通の屋外に置いた。 |
| 硫酸塩の作用に対する抵抗性 | 草津温泉(白旗、温度63°C、pH 1.1)に材令28日から浸漬した。なお、浸漬期間は28日間。 |

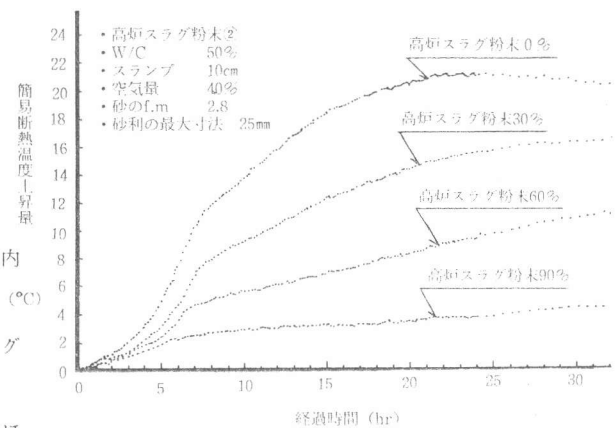


図4 コンクリートの簡易断熱温度上昇経時変化

とセメント水比(C/W)との関係式を最小二乗法によって求めたので、ここに提案する。

g. 材令28日の引張り強度は、極小の内割添加量90%を除いて、0~70%の範囲では大差ない(図8参照)。

h. 材令28日の曲げ強度は、最小の内割添加量90%、及び2番目に小さい70%を除いて、0~50%の範囲では大差ない(図9参照)。

i. 材令28日の鉄筋とコンクリートとの付着強度は、極小の内割添加量90%を除いて、0~70%の範囲では大差ない(図10参照)。

j. 静弾性係数は、圧縮強度と大略同様な傾向が認められる。すなわち、内割添加量が多いほど、短期材令に至ると、極小の90%を除いて、差違はほとんどなくなる(図11参照)。

またいずれの場合も、日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準に定められてい

る、コンクリートのヤング(静弾性)係数Eはコンクリートの設計基準強度(Fc)とコンクリートの単位容積重量(γ)との関係式($E = 2.1 \times 10^5 \times (\frac{\gamma}{2.3})^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{200}}$ kg/cm²)を満足する。

k. 長さ変化率は、いずれの乾燥期間においても、内割添加量(0~90%)に関係なく同程度といえよう(図12参照)。重量変化率は、長さ変化率の傾向と、近似している。

1. ごく普通の環境条件下の屋外に供試体を、現在長期材令に向かって自然暴露しているが、材令365日におけるコンクリートの中性化深さは、表7に示す通り、高炉スラグ粉末添加の有無の差違は認められない。また、同

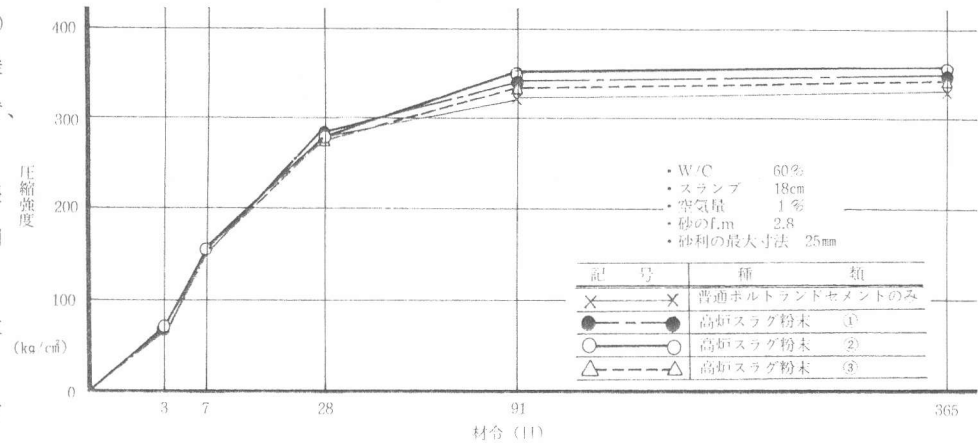


図6 材令と圧縮強度との関係(高炉スラグ粉末の内割添加量10%の場合)

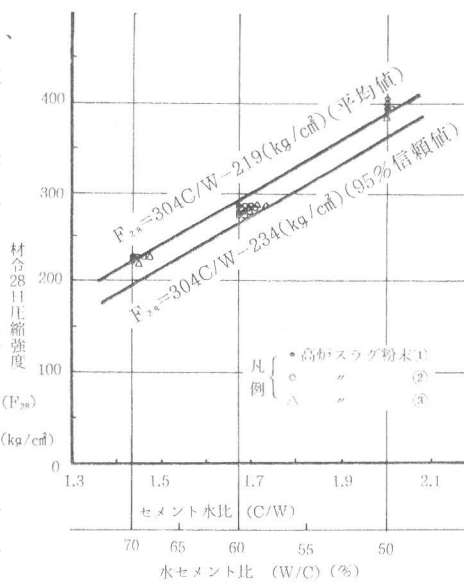


図7 セメント水比と材令28日圧縮強度との関係(内割添加量5及び10%の場合)

表6 高炉スラグ粉末コンクリートの強度算定式

| 高炉スラグ粉末の内割添加量(%) | 材令28日圧縮強度(F ₂₈)とセメント水比(C/W)との関係式(平均値) |
|------------------|--|
| 5.10 | F ₂₈ = 304c/w - 219 (kg/cm ²) |
| 3.0 | F ₂₈ = 294c/w - 209 (kg/cm ²) |
| 5.0 | F ₂₈ = 273c/w - 194 (kg/cm ²) |
| 7.0 | F ₂₈ = 263c/w - 188 (kg/cm ²) |
| 9.0 | F ₂₈ = 173c/w - 121 (kg/cm ²) |

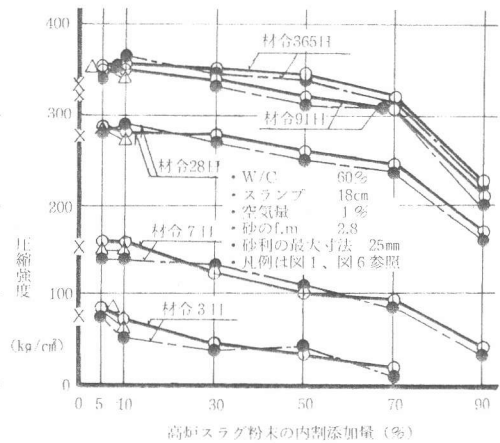


図5 添加量と圧縮強度との関係

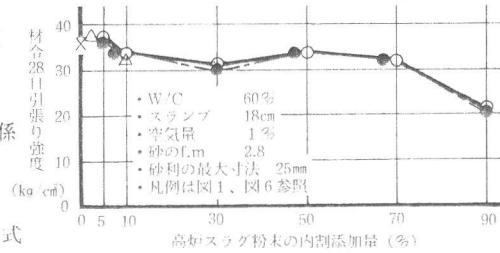


図8 添加量と材令28日引張り強度との関係

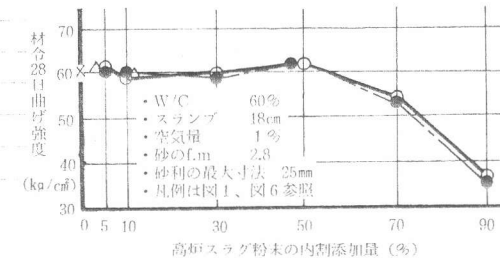


図9 添加量と材令28日曲げ強度との関係

表7 高炉スラグ粉末を混和材として用いたコンクリートの耐久性

| 高炉スラグ粉末の種類 | セメント重量に対する高炉スラグ粉末の内割添加量(%) | W/C | スランブ | 空気量 | 中性化深さ mm | コンクリート中の鉄筋のさびの発生状況 | 凍結融解作用に対する抵抗性 | | | | | 硫酸塩の作用に対する抵抗性 | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|-----|------|-----|-------------|--------------------|---------------|-----|-----|-----|-----|---------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------|----------|----------|--|----------|
| | | | | | | | 相対弾性係数(%) | | | | | 10φ×20cm | | | | | | | | |
| | | | | | | | サイクル数 | | | | | 重量変化率(%) | 長さ変化率(%) | 曲げ強度(kg/cm ²) | 圧縮強度(kg/cm ²) | 中性化深さmm | 重量変化率(%) | 長さ変化率(%) | 静弾性係数(cgs/cm ²) ×10 ⁵ kg/cm ² | |
| | | | | | | | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | | | | | | | | | 10φ×20cm |
| ①(急冷) | 0 | 60 | 19.5 | 3.5 | 2.9 | なし | 100 | 99 | 98 | 97 | 96 | ○ | -2.4 | +1.0 | 38 | 254 | 2.5 | ○ | 174 | 2.09 |
| ②(急冷) | 10 | 60 | 20.5 | 3.3 | 2.8 | なし | 101 | 102 | 102 | 101 | 99 | ○ | -1.9 | +0.1 | 35 | 244 | 2.8 | ○ | 169 | 1.74 |
| ③(徐冷) | 10 | 60 | 20.0 | 3.0 | 2.9 | なし | 101 | 102 | 101 | 100 | 99 | ○ | -1.4 | +0.3 | 40 | 269 | 2.8 | ○ | 171 | 2.09 |
| ③(徐冷) | 10 | 60 | 20.5 | 4.0 | 3.2 | なし | 100 | 101 | 101 | 101 | 100 | ○ | -1.8 | +0.4 | 42 | 252 | 2.8 | ○ | 182 | 2.18 |

[注] ○印は損傷なし。●負符号は減を示す。●正符号は膨張を示す。

時に肉眼観察した、コンクリート中に埋込んだ磨き鉄筋には、さびの発生は認められなかった。

m. 凍結融解作用に対する抵抗性は、表7に示す通り、高炉スラグ粉末コンクリートは無添加コンクリートと、同程度ないし、若干有利である。

n. pHが1.1、温度が63°Cの極めて過酷な条件下の草津温泉「白旗」に、28日間浸せしめたコンクリート供試体の硫酸塩の作用に対する抵抗性は、表7に示す通り、高炉スラグ粉末コンクリートと無添加コンクリートは同程度であった。

o. 今回用いた3種類の高炉スラグ粉末によるコンクリートの諸性質は種々の調査条件において大略同程度であった。

7. 結論

急冷した高炉スラグ粉末①及び②をコンクリート用混和材として、普通ポルトランドセメント重量に対して内割で、5、10、30、50、(60)70、90%ならびに徐冷した高炉スラグ粉末③を5、10%添加した主として建築分野のコンクリートの諸性質について総合的に実験研究した。その結果、高炉スラグ粉末の種類による差は小さく、添加量によって性質は異なるので、それらの性質に応じた用途に適した使い方をすれば、高炉スラグ粉末はコンクリート用混和材として広範囲に使用できることを確認した。例えば添加量0~50%程度までは、ワーカビリティの改良を、はじめとして性質が大きくかわらないので、ごく一般のコンクリートに適し、60%程度以上はマスコンクリートなどに適する。ただし、混和材料に共通していることであるが、より均質なコンクリートを得るためには高炉スラグ粉末の計量・練りませに対して十分な管理を必要とする。

本研究には、(株)神戸製鋼所、三菱鉱業セメント(株)中央研究所、本学卒業生らの協力を得た。ここに付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 依田、枝広:セメント技報 31、P174 (1977)
- 2) 依田、枝広:セメント技報 33、P192 (1979)
- 3) 依田、枝広:セメント技報 34、P160 (1980)
- 4) H.EI-Didamony,B.A.Sabrah:ZKG,P245 (1982)

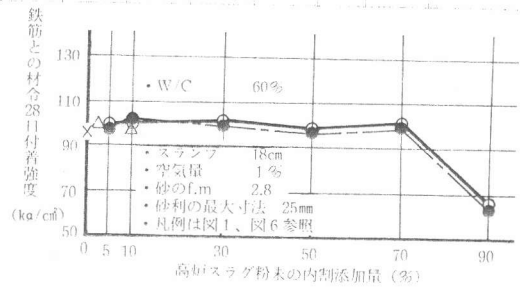


図10 添加量と鉄筋との材令28日付着強度との関係

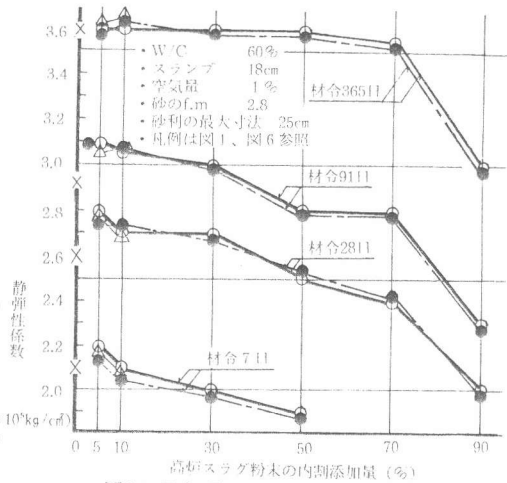


図11 添加量と静弾性係数との関係

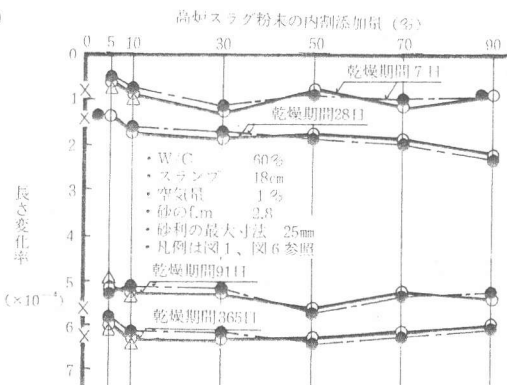


図12 添加量と長さ変化率との関係