

[47] コンクリートの乾燥収縮ひびわれ発生条件に関する研究

正会員 ○牧角 龍憲 (九州大学工学部)

正会員 徳光 善治 (九州大学工学部)

1 まえがき

コンクリートの乾燥収縮ひびわれは、鉄筋コンクリート構造物に発生するひびわれの中で最も一般的なものであり、構造物の耐久性や防水性あるいは美観の面から、その防止対策の確立が早くから望まれてきた。しかしながら、コンクリートの乾燥収縮を拘束する状態は多種多様であることや、それにより生じる応力やひずみの計測が難しいこと、また、収縮拘束試験において理想的な拘束状態を作成するのが難しいことなどから、未だひびわれ発生条件は定量的に十分明らかにされてはいない。そのため、ひびわれ防止対策としては、主にコンクリートの材料、配合および施工面における経験的な対策が講じられており、構造設計面においては十分な検討がなされていないのが現状である。そこで本研究は、定量的な乾燥収縮ひびわれ発生条件を明らかにするため、外部拘束方法による乾燥収縮拘束試験結果および他研究者の試験結果を合わせて検討考察したものであり、その結果、(1)拘束ひずみ(乾燥収縮が拘束されることにより生じる引張ひずみ)を ϵ_R ならびに自由収縮ひずみを ϵ_f とすると、 $\epsilon_R \geq (2/7) \epsilon_f + 71.4(\times 10^{-6})$ 、(2)収縮応力(収縮拘束により生じる引張応力)を σ_{ct} ならびに引張強度を F_t とすると、 $\sigma_{ct} \geq 0.7 F_t$ の2式がひびわれ発生条件として得られた。ここにその報告をする。

2 乾燥収縮拘束試験の概要

本研究では、乾燥収縮を拘束する方法として、図-1に示すような拘束装置によつて線拘束する外部拘束方法を用いた。本装置は、拘束材とコンクリート供試体の固定が確実に先行、拘束鉄筋径を変えることによつて広範囲にわたる拘束度を得ることができ、拘束により生じる応力やひずみの測定ならびにひびわれの観察が容易であるなどの長を有している。その詳細については既に報告した¹⁾写真-1に、拘束鉄筋の組立て状況および型枠を示す。また、写真-2および写真-3に測定状況およびひびわれ状況をそれぞれ示す。

実験は3つに分けて行なつた。実験²⁾Iでは拘束度を、実験IIでは養生日数を、実験III³⁾では補強筋の有無をそれぞれ要因にして行い、いずれの実験においてもコンクリートは、骨材最大寸法20mm、W/C = 50%、スランプ 6 ± 2 cmのものを使用した。

コンクリートのひずみはモールドゲージおよびコンタクトゲージにより、拘束鉄筋のひずみはワイヤ

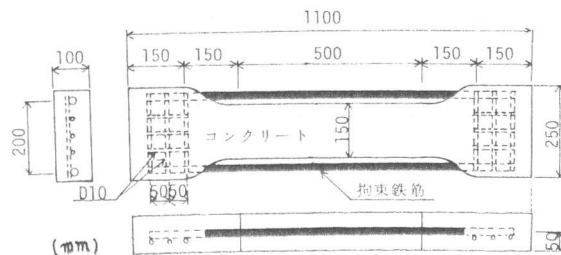


図-1 乾燥収縮拘束供試体

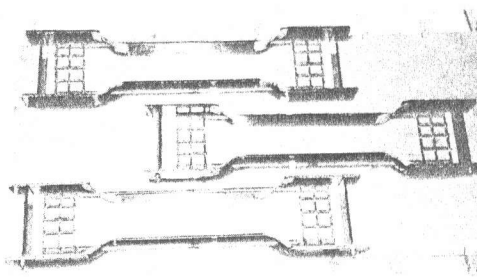


写真-1 拘束鉄筋と型枠の状況

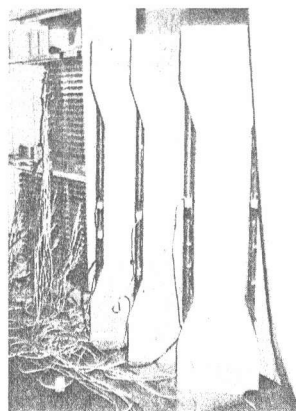


写真-2 測定状況

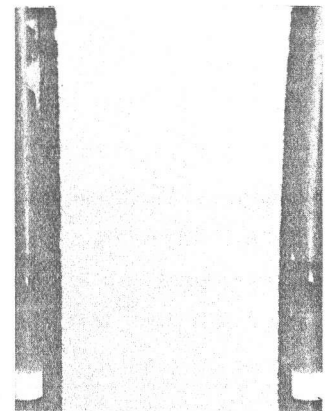


写真-3 ひびわれ状況

ストレインゲージによりそれぞれ測定した。測定時間間隔は、1日あるいは半日である。

3 乾燥収縮ひびわれ発生時のひずみおよび応力

表-1に乾燥収縮拘束試験の結果を示す。

表-1 乾燥収縮ひびわれ発生時の諸数値

値はそれぞれひびわれ発生時の日数 t 、自由収縮ひずみ ϵ_f 、拘束収縮ひずみ（拘束供試体の収縮ひずみ） ϵ_s 、拘束ひずみ ϵ_R 、拘束度（ $=\epsilon_R/\epsilon_f$ ） R 、収縮応力 σ_t 、割裂引張強度（ $10 \times 20 \text{ cm}$ 供試体） F_t および収縮応力/引張強度比 σ_t/F_t である。表-1から次のようなことがいえる。

収縮ひびわれ発生日数は拘束度により大きく異なり、それに伴ってひびわれ発生時の自由収縮ひずみも変化するため、ひびわれ発生限界とみなせる一定の自由収縮ひずみはみとめられない。ひびわれ発生時拘束ひずみは、クリープの影響により発生日数が長いほど増加するが、そのばらつきの範囲は $150 \sim 350 \times 10^{-6}$ であり、自由収縮ひずみのばらつきに比べると小さい。また、発生日数が長くなるにつれて拘束ひずみの増加は小さくなっており、ひびわれ発生時拘束ひずみには上限値が存在する傾向がみられる。

収縮応力は、発生日数が長くなるにつれてやや増加する傾向がみられ、材令に伴う強度の

増加に影響されることがうかがえるが、いずれの場合も割裂引張強度よりかなり小さな値となつている。このひびわれ発生時の収縮応力と引張強度の比は、材令によらず $0.55 \sim 0.75$ のほぼ一定の範囲内でばらついており、引張強度の変動を考慮すればこのばらつきの範囲は小さいといえる。

以上のことから、乾燥収縮ひびわれ発生指標としては、拘束ひずみおよび収縮応力/引張強度比が考えられる。そこで次に、他研究者⁴⁾⁷⁾の試験結果もあわせて、ひびわれ発生条件について検討する。

従来の研究は、コンクリートの変形性状からひびわれ発生条件を論じたものがほとんどである。すなわち、コンクリートの自由収縮ひずみとコンクリートが有する伸び能力やクリープ変形などの量的関係を示したものが多く、実際に乾燥収縮を拘束してひびわれを発生させ、その拘束供試体に生じた応力やひずみからひびわれ発生条件について論じた報告は数少ない。したがってここでは、実際にひびわれを発生させた拘束供試体における、ひびわれ発生時の諸数値により検討を行なつた。また、拘束状態が明確な外部拘束方法による実験結果を用い、その他の方法による実験結果は除外した。

図-2に拘束度と収縮ひびわれ発生日数との関係を示す。図から拘束度が小さくなるにつれて収縮ひびわれ日数が長くなることおよびかなり小さな拘束度においてもひびわれが発生することがわかる。この拘束度は、自由収縮ひずみ ϵ_f に対する拘束ひずみ ϵ_R の比であり、

| 実験 No | 供試体 No | t (日) | ϵ_f ($\times 10^{-6}$) | ϵ_s ($\times 10^{-6}$) | ϵ_R ($\times 10^{-6}$) | R (%) | σ_t (kg/cm^2) | F_t (kg/cm^2) | σ_t/F_t |
|-------|--------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------|---------------------------------|----------------------------|----------------|
| I | 1-13 | 131 | 802 | 500 | 302 | 37.7 | 18.6 | 30.3 | 0.614 |
| | 1-16 | 67 | 659 | 344 | 315 | 47.8 | 19.3 | 27.8 | 0.694 |
| | 1-19 | 27 | 396 | 178 | 218 | 55.1 | 14.1 | 24.4 | 0.578 |
| | 1-22 | 25 | 374 | 146 | 228 | 61.0 | 15.5 | 24.1 | 0.643 |
| | 1-25 | 18 | 305 | 92 | 213 | 69.8 | 12.6 | 22.9 | 0.550 |
| II | 2-1 | 18 | 398 | 176 | 222 | 55.8 | 18.7 | 34.0 | 0.550 |
| | 2-2 | 21 | 429 | 184 | 245 | 57.1 | 19.6 | — | — |
| | 3-1 | 20 | 428 | 193 | 235 | 54.9 | 20.6 | 33.6 | 0.613 |
| | 3-2 | 28 | 503 | 207 | 296 | 58.8 | 22.0 | 33.8 | 0.651 |
| | 7-1 | 19 | 385 | 164 | 221 | 57.4 | 17.5 | 30.9 | 0.560 |
| | 7-2 | 33 | 464 | 222 | 242 | 52.2 | 23.6 | 30.9 | 0.764 |
| | 14-1 | 16 | 356 | 179 | 177 | 49.7 | 18.1 | 32.9 | 0.581 |
| | 14-2 | 26 | 426 | 208 | 218 | 51.2 | 22.2 | 32.5 | 0.683 |
| III | 28-1 | 23 | 411 | 218 | 193 | 47.0 | 23.2 | 30.9 | 0.750 |
| | 28-2 | 31 | 452 | 222 | 230 | 50.9 | 23.6 | 38.2 | 0.618 |
| | A-01 | 38 | 511 | 231 | 280 | 54.8 | 24.5 | 31.2 | 0.785 |
| | A-02 | 18 | 384 | 170 | 214 | 55.7 | 18.0 | 29.6 | 0.608 |
| | A-11 | 16 | 365 | 147 | 218 | 59.7 | 18.5 | 29.4 | 0.629 |
| | A-12 | 40 | 529 | 180 | 349 | 66.0 | 22.7 | 31.3 | 0.725 |
| | A-21 | 24 | 444 | 172 | 272 | 61.3 | 21.7 | 30.2 | 0.719 |
| | A-22 | 36 | 501 | 193 | 308 | 61.5 | 24.3 | 31.1 | 0.781 |
| | B-0 | 68 | 547 | 245 | 302 | 55.2 | 19.5 | 32.9 | 0.593 |
| | B-1 | 43 | 450 | 222 | 228 | 50.7 | 22.2 | 31.0 | 0.716 |
| B-2 | 46 | 467 | 220 | 247 | 52.9 | 22.0 | 31.3 | 0.703 | |

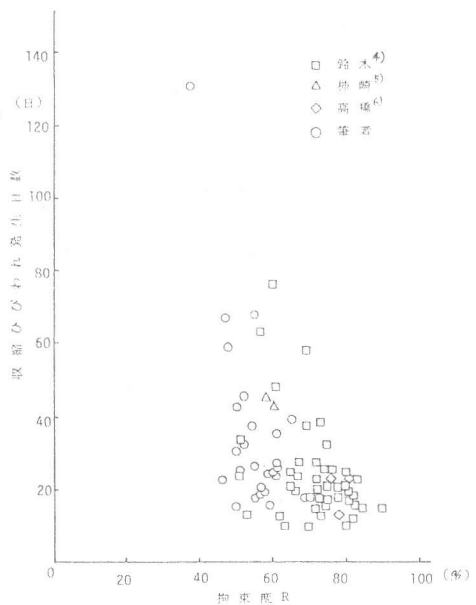


図-2 拘束度とひびわれ発生日数

また、拘束ひずみは引張弾性ひずみとクリープひずみの和であるため、ごくわずかの拘束をうける場合でもクリープの影響により拘束度は10~20%程度になる。このことから、拘束度40%前後はかなり小さな拘束度であると考えられるが、そのような小さな拘束であつてもひびわれが発生しており、ひびわれ発生条件を検討する場合、拘束度の影響を無視することはできないといえる。

図-3にひびわれ発生日数と自由収縮ひずみの関係を示す。図にみられるように、自由収縮ひずみがかなり小さい値でもひびわれが発生しており、また日数とともに $200\sim 800 \times 10^{-6}$ と大きくばらついている。図中の一点鎖線は、大野博士⁸⁾が提案した亀裂限界収縮率 400×10^{-6} を示すものであるが、その値をかなり下回つたひずみでも数多くひびわれが発生している。ただし、乾燥収縮が拘束される場合は収縮ひずみ速度が大きく影響するため、自由収縮ひずみが 400×10^{-6} に達するまでに長い日数を要するようなコンクリートでは、限界収縮率が適用できるかもしれない

が、その点は確認するに至っていない。次に図中の点線は、材令によりひびわれ発生限界の自由収縮ひずみが増大するとして大島博士⁹⁾のひずみ限界値を示すものであるが、やはり限界以下の収縮ひずみでもひびわれが発生している。しかしながら、 W/C が50%で拘束度が40~60%程度である筆者の実験結果はすべて限界値以上の値となつており、配合条件や拘束度によつては、この自由収縮ひずみ限界値は適切な値を与えると考えられる。

次に図-4に、ひびわれ発生日数と拘束ひずみの関係を示す。このひびわれ発生時の拘束ひずみは、コンクリートの伸び能力と密接な関係にあるが、図にみられるように日数の経過とともに 100×10^{-6} 前後から 300×10^{-6} 前後まで増大している。このことから、伸び能力には時間の影響を考慮する必要があるといえ、またひびわれ発生条件は、拘束ひずみの値だけでは論じられないといえる。

図-5に、ひびわれ発生時の自由収縮ひずみと拘束ひずみの関係を拘束度とあわせて示す。図から、ひびわれ発生限界となる自由収縮ひずみと拘束度ならびに拘束ひずみの間には、ある一定の関係があると考えられる。すなわち、①拘束が厳しい場合は 100×10^{-6} 程度、拘束がゆるやかな場合は 300×10^{-6} 程度の拘束ひずみがひびわれ発生の限界値となること、②拘束がゆるやかな場合、 $700\sim 800 \times 10^{-6}$ 程度の自由収縮ひずみがひびわれ発生限界となること、③コンクリートにクリープが生じる限り、ひびわれが発生しない拘束度の限界があり、その大きさは10%程度であることなどである。そこで、ひびわれが発

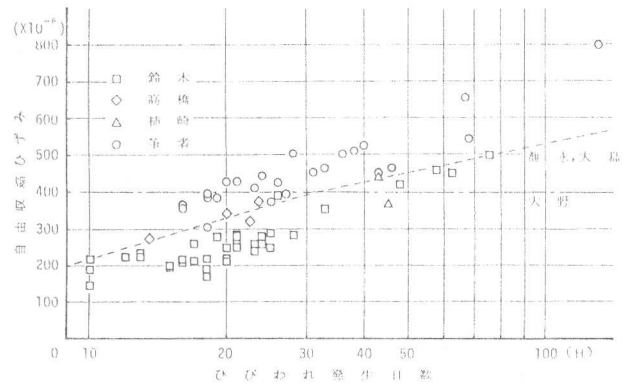


図-3 ひびわれ発生日数と自由収縮ひずみ

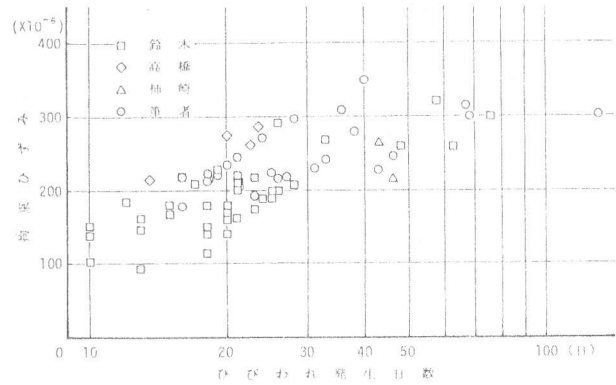


図-4 ひびわれ発生日数と拘束ひずみ

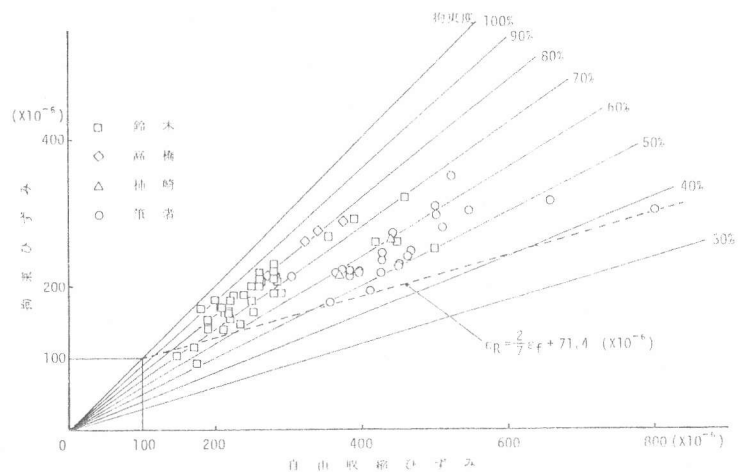


図-5 ひびわれ発生時の自由収縮ひずみと拘束ひずみ

生しない限界の拘束ひずみを、完全拘束（拘束度 100%）の場合 100×10^{-6} 、自由収縮ひずみが 800×10^{-6} となる長期の場合 500×10^{-6} として次式を求めた。

$$\epsilon_R = \frac{2}{7} \epsilon_f + 71.4 \quad (X10^{-6}) \quad \text{----- (1)}$$

図-5に(1)式による値を破線で示すが、ほとんどの結果が破線より上にあり、(1)式がひびわれ発生限界をあらわす式として妥当であることがわかる。この式を用いて自由収縮ひずみと拘束度の関係を示したのが図-6である。図から、拘束度が小さくなるにつれて、ひびわれが発生しない限界の収縮ひずみが急速に大きくなることわかる。したがって、拘束度に応じて自由収縮ひずみを制限することが適当であるといえ、換言すれば自由収縮ひずみに応じて、目地などの拘束緩和対策をとることが必要であるといえる。

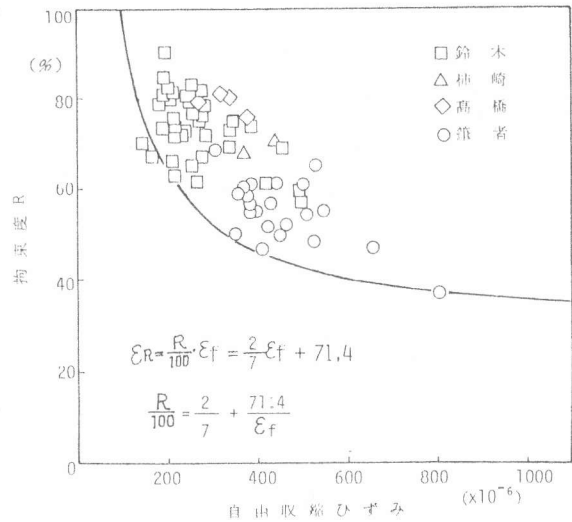


図-6 自由収縮ひずみと拘束度の関係

しかしながら、(1)式は自由収縮ひずみと拘束度の関係をあらわすため、構造物などにおける拘束条件が定まるときに適用できるひびわれ発生条件であり、コンクリートの品質から定まるひびわれ発生条件ではない。そこで次に、ひびわれ発生時の収縮応力について検討する。

従来、乾燥収縮ひびわれは、収縮応力がコンクリートの引張強度に達したときに発生するとされてきた。しかしながら、収縮応力は、乾燥開始時から持続してコンクリートに作用する引張応力であり、収縮ひずみに伴ってその大きさは変わるものの持続応力の一形態であるといえ、したがってひびわれ発生時の収縮応力は、コンクリートの引張クリープ限に近いと考えられる。この引張クリープ限に関する研究は数少なく、柿崎¹⁰⁾、波木¹¹⁾および仕入¹²⁾の研究しかみあたらないが、いずれの研究者も引張クリープ限は静的強度の0.7倍程度であるとしている。

図-7に、ひびわれ発生時の収縮応力/引張強度比 σ_{ct}/F_t とひびわれ発生日数の関係を示す。図にみられるように、 σ_{ct}/F_t は、ばらついてはいるものの、日数によらずほぼ一定した範囲内にあり、統計53個の平均は0.696、標準偏差は0.093であった。拘束条件や配合の違いならびに静的引張強度の変動を考慮すれば、このばらつきはかなり小さいといえる。また、平均値は、前述の引張クリープ限と同様同じ値である。これらのことから、乾燥収縮ひびわれが発生する限界の収縮応力は次式で求められる。

$$\sigma_{ct} = 0.7 F_t \quad \text{----- (2)}$$

4 結論

本研究で得られた乾燥収縮ひびわれ発生条件をもつて結論とする。

(1)収縮目地や収縮ひずみからひびわれ制御をする場合： $\epsilon_R = (2/7) \epsilon_f + 71.4 \quad (X10^{-6})$

または $R = (2/7 + 71.4/\epsilon_f) \times 100 \quad (\%)$

(2)収縮応力および補強筋の設計計算をする場合： $\sigma_{ct} = 0.7 F_t$

参考文献：1)筆者，セメント技術年報34，昭55。2)筆者，第2回コンクリート工学年次講演会。3)筆者，第4回コンクリート工学年次講演会。4)鈴木計夫，大野義昭，中川隆夫，建築学会大会講演集昭51，52，53。5)柿崎正義，セメントコンクリートNo.317，昭48。6)高橋久推，長尾覚博，建築学会大会講演集昭55。7)飛坂基夫，続コンクリートのひびわれ資料集昭54。8)大野和男，北大研究報告No.9，昭28。9)池永博威，大藤久次，建築学会論文集No.217，昭49。10)柿崎正義，セメントコンクリートNo.316，昭48。11)波木守，小野田研究報告No.16，昭39。12)仕入豊和，建築学会大会講演集昭37。