

鉄筋コンクリート外壁のひびわれに関する研究 (その1)

——乾燥収縮拘束ひびわれ実験——

武田 寿一 中根 淳
小柳 光生 増田 安彦

A Study on Shrinkage Cracks in Reinforced Concrete Walls (Part 1)

——Result of Experiment on Restraint——

Toshikazu Takeda Sunao Nakane
Mitsuo Koyanagi Yasuhiko Masuda

Abstract

With reduction of cracks in walls due to drying shrinkage as the objective, restraint crack experiments were conducted for about one year in a constant-temperature, constant-humidity room. Seven specimens of full size with wall thickness of 30 cm were used, and the parameters for the tests were concrete mix proportions and reinforcement ratio. As results of the tests the relations of cracks with water content and reinforcement ratio were obtained. Crack width was controlled at less than 0.1 millimeter when the reinforcement ratio was 0.1 percent.

概 要

乾燥収縮に起因するひびわれの制御を目的として、約1年間にわたる拘束ひびわれ実験を恒温恒湿室内にて行なった。試験体数は7体で、実寸大(壁厚15cm)とし、調合と鉄筋量をパラメータとした。その結果、単位水量、補強筋量とひびわれの関係について把握することが出来た。また鉄筋量を1.0%にするとひびわれ幅を0.1mm以下に抑えることが出来た。

1. はじめに

鉄筋コンクリート造外壁のひびわれの原因として、乾燥収縮・外気温の変動・水和熱による自己変形などがあげられるが、このうち最も大きな要因は乾燥収縮といわれる。外壁のひびわれ防止をめざして、これまで材料、調合をパラメータにした拘束ひびわれ実験は数多く報告されているが、無筋のものが多く、使用鉄筋量をパラメータにした部材のひびわれ発生後の長期挙動についての報告は少ない。

この報告は、乾燥収縮に起因するひびわれの制御を目的とし、調合および鉄筋量をパラメータにして実施した拘束ひびわれ実験報告である。特色は、実寸大レベルの有筋の試験体をかなり大きいフレーム拘束によって温度変動の無い恒温恒湿室内で試験していることである。計7体の試験体であるが、同一条件で繰り返し実験できるよう拘束フレームを工夫した。すなわち、1フレームに

つき、上層、下層の2体の試験体から成る。今回は下層分の1年間の測定結果について述べる。

2. 実験概要

2.1. 試験体概要

図-1に、拘束試験体の外観図を示す。試験体は、実構造物の壁体の一部を想定して、壁厚15cm×高さ30cmとしており、端部では多少ハンチを付け高さ40cmとしている。上下面は水分蒸発を避けるためエポキシ樹脂を塗布した。拘束方法は後述するが、完全拘束状態に近いように工夫している。試験体長さは、ひびわれ分散効果を調べるには出来るだけ長いことが望ましいが、試験室のスペースの都合で内り寸法250cmとした。

拘束試験体数は計7体で、表-1にその内訳を示す。No.1~No.4は、配筋量をそれぞれ0.28%、0.63%、0.95%、1.52% (鉄筋断面積/全断面積)に変えた。No.5~No.7は、No.2と同じ鉄筋量で、それぞれ軟練り、

硬練り及び収縮低減剤混入と調合を変え、その影響を調べた。配筋図を図-2に示す。

表-2, 3に、コンクリートの調合表及びコンクリートの性質を示す。硬練りの空気量がやや大きく、収縮低減剤混入の空気量がやや少なかったが、四週圧縮強度はこの調合も 280~300 kg/cm² とほぼ同じ値であった。

自由収縮ひずみを把握するため、10×10×40 cm の供試体の他、ダミーを製作した。ダミー試験体 (15×30×40 cm) は、4種類の調合の他、防水性の大きい仕上げ材の収縮低減効果を調べるために当社の補修・保護工法 (コンパーマ工法) を施したものの計5体とした。

2.2. 拘束及び測定方法

拘束には図-1で示す水平フレーム (H形鋼250×250×9×14, 断面 92.2 cm²) と鉛直フレーム (SRC 造) を使用し、これらを緊結するように組み立てた後、壁体と一体になるよう柱内のコンクリートを打設した。この時、拘束断面積に対する鋼材比は、 $92.2 \times 2 / 450 = 41\%$ でありかなり剛な拘束としている。

ひびわれの測定方法は、図-1中に示すように、試験体両面に全長にわたりコンタクトゲージポイントを貼付け、ひびわれを含む 10 cm 標点間の読み取り値をそのままひびわれ幅進展の測定値と見なした。さらにクラックスケールも併用した。フレーム全体の変形挙動は、ダイヤルゲージ (精度 1/1,000 mm) を図-1中に示すように取り付け、計測した。ダミーの自由収縮変形は、コンタクトゲージ法による。

試験室は、温度変動を受けない恒温恒湿室を使用している。打ち込み後3日間の湿潤養生後に脱型し、20℃, 60% RH の条件として測定開始し、1年後の現在も継続中である。

3. 実験結果

3.1. 自由収縮ひずみ

各調合コンクリートの1年間までの自由収縮ひずみ測定結果を、ダミーについては図-3、10×10×40 cm 供試体については表-4に示す。ダミーの場合、標準 (スランプ 18 cm) で 700×10^{-6} 程度の収縮ひずみであるが収縮低減剤使用ではその 0.6 倍と少ない。また軟練りに比べて硬練りの収縮は小さい傾向にあるがその差は僅か

| 調合名称 | スランプ (cm) | 水 (kg) | セメント (kg) | 水セメント比 (%) | 細骨材 (kg) | 粗骨材 (kg) | 細骨材率 (%) | ボツリス No70 (ℓ) | 混和剤 | 備考 |
|----------|-----------|--------|-----------|------------|----------|----------|----------|---------------|-----|-----------------|
| H 軟練り | 21 | 185 | 308 | 58.5 | 801 | 978 | 45 | - | | 細骨材: 木更津山砂 |
| M 標準 | 18 | 170 | 291 | '' | 863 | 973 | 47 | 0.58 | | 粗骨材: 青梅砕石 |
| L 硬練り | 12→18 | 158 | 270 | '' | 885 | 997 | 47 | 0.54 | | 流動化剤NP-20 1.08ℓ |
| LL 収縮低減剤 | 18 | 170 | 291 | '' | 863 | 973 | 47 | 0.58 | | テトラガード 7.5ℓ |

表-2 コンクリート調合表

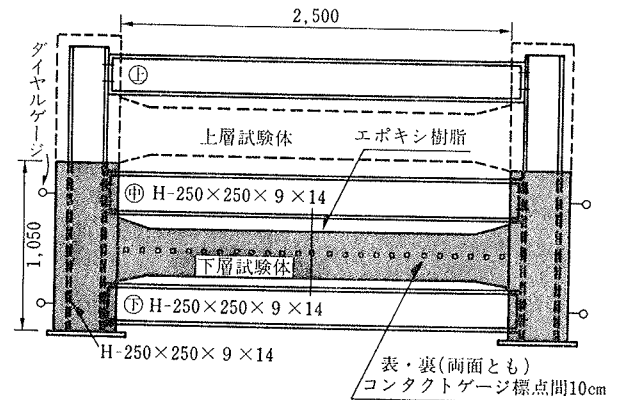


図-1 拘束試験体概要

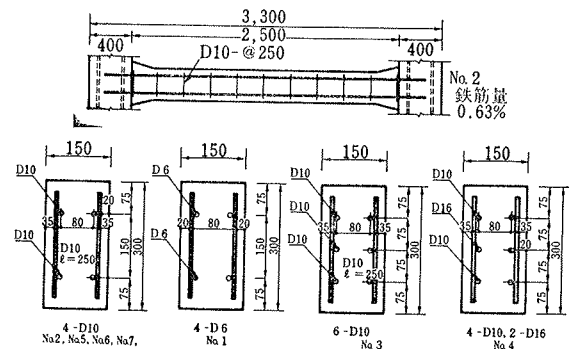


図-2 試験体配筋図

| 試験体 No. | 配筋法 (主筋) | 使用鉄筋量 (%) | 調合 | 要因 |
|---------|----------------------|-----------|------|---------|
| No. 1 | 2 - D 6 | 0.28 | M | 鉄筋量少 |
| No. 2 | 4 - D 10 | 0.63 | | 標準 |
| No. 3 | 6 - D 10 | 0.95 | | 鉄筋量多 |
| No. 4 | 4 - D 10 2 - D 16 | 1.52 | | 太径鉄筋 |
| No. 5 | | | H | 軟練り |
| No. 6 | 4 - D 10 | 0.63 | L | 硬練り |
| No. 7 | | | L, L | 収縮低減剤使用 |

表-1 拘束試験体の内訳

に 40×10^{-6} 程度である。10×10×40 cm 供試体も同様な傾向にある。コンパーマ工法は防水性・伸縮性に優れており、図-3から、乾燥収縮の面でもかなり効果があることが確認できた。

3.2. ひびわれ発生時期

| 名称 | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 単位重量 (kg/m ³) | コンクリート (温度℃) | 7, 29打込み 四週気中 (kg/cm ²) | | |
|----|-----------|---------|---------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------------|------|
| | | | | | 圧縮強度 | 弾性係数 | 割裂強度 |
| H | 21.5 | 4.1 | 2,297 | 28.0 | 281 | 2.33×10^5 | 23.7 |
| M | 19.1 | 3.9 | 2,324 | 26.9 | 294 | 2.62×10^5 | 25.9 |
| L | 13.8→18.1 | 4.5→5.8 | 2,263 | 28.4 | 282 | 2.56×10^5 | 23.9 |
| LL | 19.9 | 2.3 | 2,361 | 28.3 | 303 | 2.85×10^5 | 22.7 |

表-3 コンクリートの性質

試験体を貫通するようなひびわれが発生した時のコンクリート材令を表-5にまとめて示すが、その材令は、No. 7を除き23~49日の範囲であった。鉄筋量の多いものほど貫通ひびわれの発生が遅くなる傾向にあり、一方、単位水量の違いがひびわれ発生材令に及ぼす影響はあまり認められなかった。これは自由収縮ひずみの違いが小さかったことと関連していると思われる。収縮低減剤を使用したNo. 7は、かなり遅く162日で発生した。

3.3. ひびわれの動きの検討

図-4に、2箇月時点のひびわれ状況をスケッチして示す。鉄筋量の多いものほどひびわれ分散している様子が分かる。

図-5に、材令1年時点での試験体両面のひびわれ幅の大きさを示す。図中に示す記号●は貫通ひびわれ、○は表面ひびわれであり、コンタクトゲージ法で0.01mm以上のひびわれだけをプロットしている。そのため目視による図-4の結果とは多少異なる。×は各試験体の表、裏側のひびわれ幅総和をそれぞれ求め、表、裏の数値を平均したものである。

この図から、鉄筋量の少ないNo. 1は貫通ひびわれ1本のみで、その他は表面ひびわれ(0.01mm以上)も全く無かったが、そのひびわれ幅は両面平均で0.75mmと他の試験体と比べてかなり大きい。鉄筋量0.63%のNo. 2は貫通ひびわれ3本で、最大0.23mm(表側)であった。鉄筋量が増えるに従いひびわれは分散し、その幅は小さい傾向にあること、同じ鉄筋量では軟練りの最大ひびわれはやや大きく、硬練りはやや小さい傾向にあることが分かる。自由収縮の違いがわずかである割に、最大ひびわれ幅・幅総和とも硬練りでやや有利となった理由としては、ブリージングの違いによる鉄筋下端の付着力への影響の可能性も考えられる。

また今回のようにかなり剛な拘束でしかも1年という長期間の乾燥収縮に対して、鉄筋量1.0%以上にすると最大ひびわれ幅を0.1mm以内に制御することが明らかになった。

収縮低減剤使用のNo. 7の場合、自由収縮ひずみも少

| 試験体 Na | 鉄筋料 (%) | 調合 | 貫通ひびわれ時 | | 収縮応力 曲線 | 貫通ひびわれ時収縮 応力計算値 | 応力計算値 割裂強度 比 | |
|--------|---------|------|----------|----------------------------|---------|-----------------|--------------|------|
| | | | 発生材令 (日) | 割裂強度 (kg/cm ²) | | | | |
| Na 1 | 0.28 | M | 23 | 23.2 | A | 16.0 | 0.69 | |
| Na 2 | 0.63 | | 29 | 25.9 | A | 19.5 | 0.75 | |
| Na 5 | | H | 29 | 23.7 | A | 19.5 | 0.82 | |
| Na 6 | | | L | 32 | 22.6 | A | 20.7 | 0.92 |
| Na 7 | | | LL | 162 | 21.5 | B | 18.8 | 0.87 |
| Na 3 | | 0.95 | M | 35 | 25.5* | A | 21.9 | 0.86 |
| Na 4 | 49 | | | 24.6* | A | 26.2 | 1.07 | |

*強度推定値

表-5 貫通ひびわれ発生日数とその時の強度

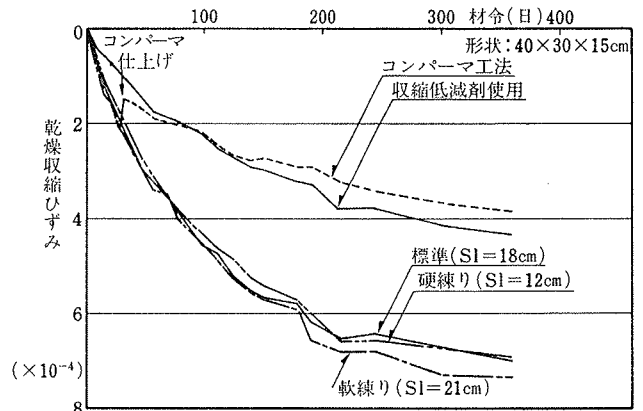


図-3 コンクリート自由収縮ひずみ (ダミー)

| 名称 | スラブ (cm) | 材令 水量 (kg/m ³) | コンクリート自由収縮ひずみ(x10 ⁻⁶) | | | |
|-------|----------|----------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|
| | | | 4 W | 3 M | 6 M | 1 Y |
| 軟練り | 21 | 185 | 466 | 692 | 729 | 784 |
| 標準 | 18 | 170 | 474 | 693 | 722 | 774 |
| 硬練り | 12 | 158 | 432 | 666 | 696 | 741 |
| 収縮低減剤 | 18 | 170 | 248 | 434 | 500 | 529 |

●細骨材・粗骨材ともに表乾比重2.63

表-4 コンクリート自由収縮ひずみ (10×10×40 cm)

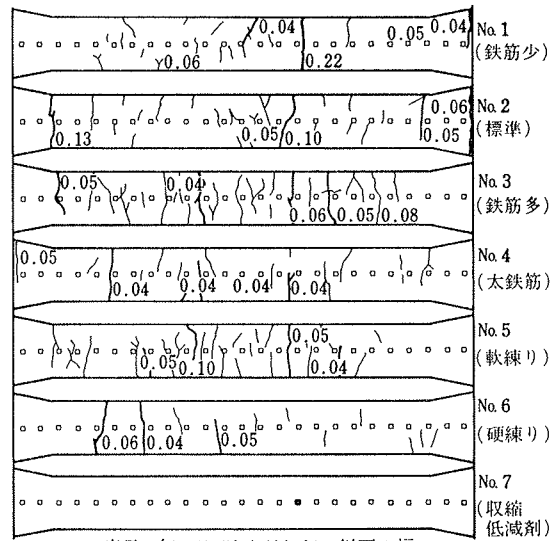


図-4 ひびわれ発生状況 (材令2箇月)

なくひびわれ発生材令は約5箇月とかなり遅かったものの最大幅は0.2mm近い数値であった。またひびわれ幅総和もNo. 3と同程度であった。

鉄筋量と単位水量の因子を最大ひびわれ幅の動きとの関係で整理したものを図-6に示す。この図のグラフの勾配から、これらの因子の影響度をおおよそ把握できる。鉄筋量が0.6~0.7%を下回る場合、急激にひびわれ幅が増加してくる傾向にある。

4. 収縮応力解析による検討

4.1. 解析法の概要

外的拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮応力解析法を以下に示す。断面内は一樣ひずみ分布であるとする。

逐次計算法を用いて、コンクリート試験体の変形と拘束鋼材の変形が等しいという条件から、以下の計算式が誘導される¹⁾。

$$\sum_{j=1}^i \Delta \epsilon_j - \sum_{j=1}^i (\Delta P_j \cdot (1 + \phi(t_i, \tau_j)) / E_j \cdot A_c) = \sum_{j=1}^i \Delta P_j / E_s \cdot A_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

$\Delta \epsilon_j$: 試験体乾燥収縮増加分

ΔP_j : 時間 $t_j - t_{j-1}$ にコンクリートに生じた引張力増分

$\phi(t_i, \tau_j)$: 時間 τ_j に荷重し時間 t_i におけるクリープ係数

E_j : 時間 t_j におけるコンクリートの弾性係数

A_c, A_s : コンクリート, 鋼材の断面積

(1)式は, ΔP_i を求める式として開展すると,

$$\Delta P_i = \left(\sum_{j=1}^i \Delta \epsilon_j - \sum_{j=1}^{i-1} (\Delta P_j \cdot (1 + \phi(t_i, \tau_j)) / E_j \cdot A_c) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_j / E_s \cdot A_s \right) / (1/E_s \cdot A_s + 1/E_i \cdot A_c)$$

となる。

この解析で使用するコンクリートの弾性係数, 乾燥収縮ひずみ, クリープ係数は以下の通り。

弾性係数: Neville の下式を用いる²⁾。 $E(28) = 2.4 \times 10^5$ 前後で, 実験値より若干低いが大差無い。

$$E(t) = 14,000 (f_{c28} / (0.75 + 7/t))^{1/2}$$

f_{c28} : 4週圧縮強度 t : 材令(日)

乾燥収縮ひずみ: CEB-FIP 1978 Model Code による。

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{so} (\beta_s(t) - \beta_s(t_0))$$

ϵ_{so} : 環境, 有効部材厚による係数であるが, 自由収縮実験値に合うよう調合 H, M, L では 0.0011, LL では 0.0005 とする。図-7 に示す。

β_s : 収縮関数 CEB-FIP 1978 Model Code の係数 t, t_0 : 求める材令, 乾燥開始材令

クリープ係数: CEB-FIP 1978 Model Code による。参考に28日荷重のクリープ係数曲線を図-7 に示す。

4.2. 解析結果と実験値の比較

図-8 に, 拘束試験体に生じる収縮応力解析結果を太実線で示す。調合 LL (収縮低減剤使用) を除き, 他の調合 H, M, L はひびわれの発生する50日以内では自由収縮ひずみにほとんど差がないこと, 圧縮強度, 弾性係数もほぼ等しい(表-3) ことから同じ解析結果となっている。それに対して割裂引張強度試験値を●で示す。参

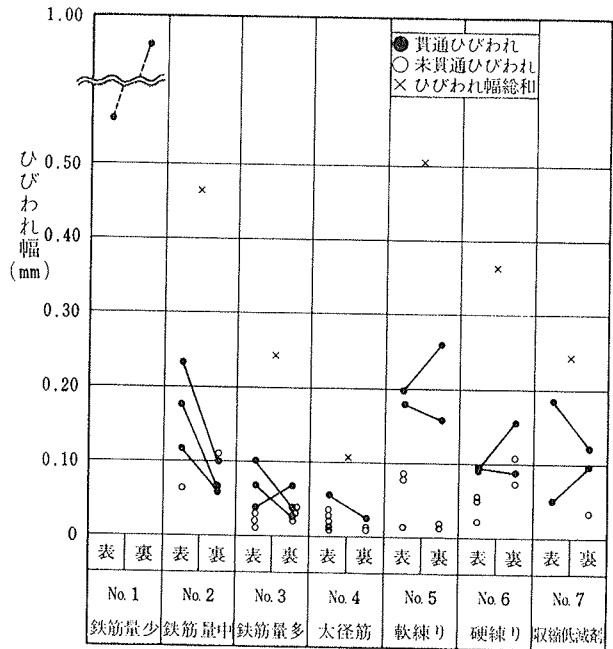


図-5 ひびわれ幅の大きさ (材令1年)

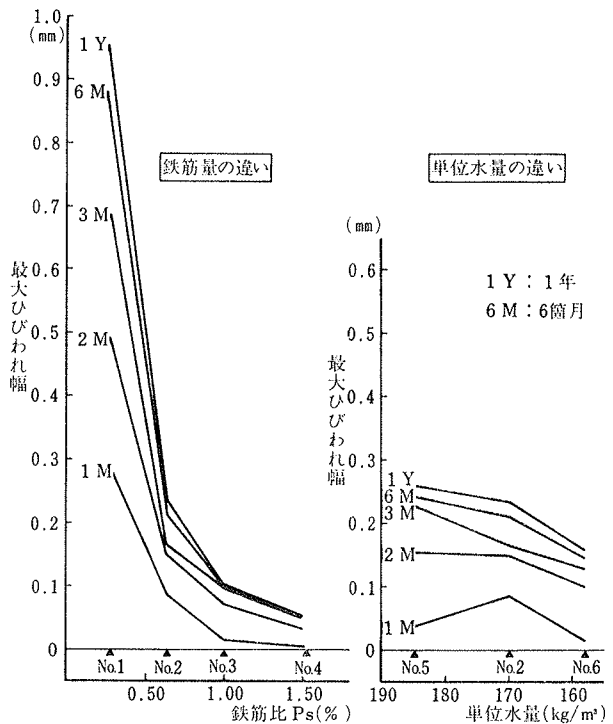


図-6 最大ひびわれ幅と鉄筋量, 単位水量の関係

考にその強度試験結果とほぼ同等な引張強度曲線式 (Neville 式) も細実線で示す²⁾。この図から予想されるひびわれ発生時期は, 試験体の実際の貫通ひびわれ発生日数よりやや長い傾向にある。

牧角等の無筋コンクリートを用いた拘束部材の実験報告³⁾ によれば収縮ひびわれが発生する収縮応力は, コンクリート引張強度の 0.7 倍であると提案している。鈴木等の拘束実験報告⁴⁾ でも同じ趣旨の見解を示している。

このように低減される理由は, 収縮応力が持続応力の

一種と考えられることによる引張クリープ限の影響などがあるとされている。この考え方に基づき図-8中に Neville 曲線を0.7倍したものを破線で示し、鉄筋量の最も少ない No. 1 のひびわれ発生日数と比較したところ、前述の報告とほぼ同じ結果が得られた。

鉄筋量が増えるに従い、貫通ひびわれ発生材令が長くなるがこれは鉄筋の補強効果によって初期ひびわれが貫通ひびわれに進展する速度が遅くなるためと考えられる。

図-9に、ダイヤルゲージより得た No. 2 試験体の拘束鉄骨フレームの全変形量の動きを全長で除して平均ひずみとして表した曲線を示す。2箇月程度で 25×10^{-6} であり、自由収縮ひずみに比べてかなり小さく、拘束がかなり剛であることが確認された。No. 1 試験体のフレーム変形は、図示していないが、No. 2 と全く同じ変形量を示した。

同図に解析結果のひずみ値を比較して示すが、測定値と良く一致している。一方、コンタクトゲージによる測定値は脱型初期のひずみがやや大きいものの、その後の動きはほぼ一致している。なお、完全拘束状態の解析結果は示していないが図-8の解析値の約1割アップする。

5. まとめ

乾燥収縮に起因する有害なひびわれを制御するための方法として補強鉄筋と調合をパラメータとして壁厚 15 cm の拘束ひびわれ実験を実施し、約1年間にわたる測定を行なった。その結果を要約する。

(1) 鉄筋量が0.63%の当社ひびわれ指針レベル相当の場合、最大幅は、0.23 mm (材令1年)であるが、鉄筋量が0.28%の場合 1.0 mm 近い大きなひびわれ幅を生じた。

(2) 鉄筋量が多いほど、ひびわれの発生及び幅が制御され、分散効果も認められた。特に鉄筋量が 1.0% 以上であると最大ひびわれ幅を 0.1 mm 以下に抑えることができた。

(3) 単位水量の違いによる自由収縮ひずみの差はやや認められたもののその値は 40×10^{-6} 程度と僅かであった。しかし、硬練りの方がひびわれ制御で有利となる傾向は見られた。

(4) 収縮低減剤を用いると、乾燥収縮ひずみを0.6倍程度に抑える効果が認められた。そのためひびわれは他よりもかなり遅れて発生した。しかし、最大0.2 mm 近いひびわれを生じており、幅の制御という点ではまだ検討の余地がありそうである。

今回報告した内容は、拘束ひびわれ実験全体のうち、拘束フレーム下層の部材について行なった実験報告であり、4箇月後に再度同じ実験を上層の部材で実施しており、今回の結果と合わせて検討し、次報に報告する予定

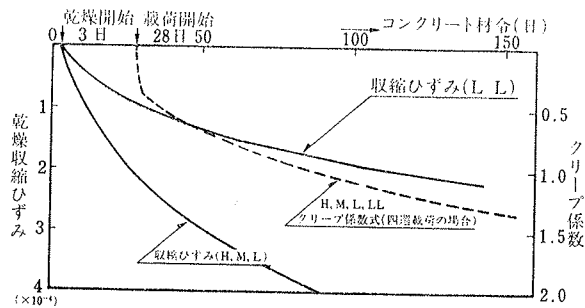


図-7 解析用乾燥収縮・クリープ係数定数

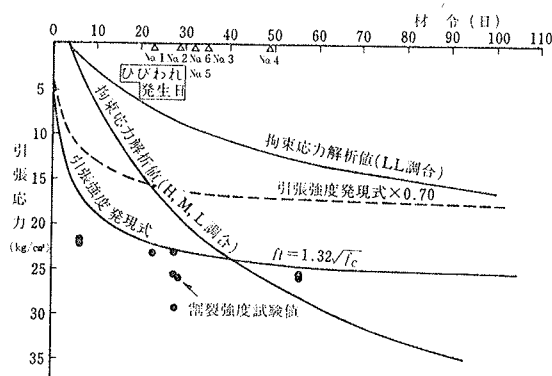


図-8 コンクリート収縮応力解析結果

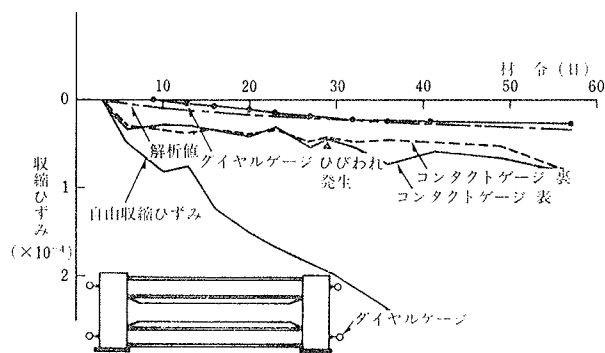


図-9 部材全長変形の動き (No. 2)

である。

参考文献

- 1) 鈴木, 大野, 中川: コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演会梗概集, (昭和51.10), pp. 177~180
- 2) A. M. Neville: Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, (1970), p. 453
- 3) 牧角, 徳光: 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, 第5回コンクリート工学年次講演会論文集, (1983), pp. 185~188
- 4) 鈴木, 大野, 中川: コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験装置の性能について, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, (昭和58.9), pp. 135~136