

# RC スラブの長期たわみに関する研究 (その6)

——固定支持スラブ実験結果——

武田 寿一      高橋 久雄  
小柳 光生

## Studies of Deflection of Reinforced Concrete Slabs Under Sustained Loads (Part 6)

——Results of Experiments on Fixed Loads——

Toshikazu Takeda   Hisao Takahashi  
Mitsuo Koyanagi

### Abstract

In order to study deflections from sustained loads on slabs, a series of tests with variable factors was performed. This report describes the result of measurements on fixed slabs for a period of about 8 years, and propose an analysis method in terms of bond creep under supported beams. The results show the deflections to be 16~19 times the elastic deflections, and calculated deflections are compared with experimental values.

### 概 要

床スラブの長期におけるたわみ挙動を調べるため、要因の異なる一連のスラブ実験を行なっているが、今回、約8年間にわたる固定支持スラブ実験結果を示すとともに、支持端部の鉄筋抜出しを回転バネとして考慮した解析法を提案している。その結果、最終たわみは弾性たわみ計算値の16~19倍であること、実験値と解析値との対応は良好であることなどが分かった。

## 1. まえがき

本報告は、床スラブの過大なたわみに及ぼす要因を探りその障害防止とともに、長期たわみ変形の予測計算法を確立するための基礎実験として行なった一方向スラブ実験結果をまとめたものである。

本実験は、昭和49年3月に載荷開始して以来、約8年の持続載荷によるたわみを測定したもので、8年では、たわみ進行はほぼ停止状態にある。スラブ試験体は、単純支持スラブ、はね出しスラブ、固定支持スラブの3種類からなり、単純支持スラブ実験結果(約2年間)およびはね出しスラブ実験結果(約5年間)についてはそれぞれ所報 No. 15, No. 21に報告済みである<sup>1),2)</sup>。

今回、約8年わたる固定支持スラブ実験結果およびその解析的検討を中心に報告するとともに、単純支持スラブ試験体の2年以降のたわみの動きについても報告する。今回の報告が昭和49年3月に載荷開始した一連のスラブ実験に関する最終報告である。

## 2. 固定支持スラブ実験結果

### 2.1. 実験概要

実験の概要を以下に述べるが、詳細は既報(所報 No. 12, 1976)<sup>3)</sup>を参照されたい。試験体の形状は、図一1に示す幅50 cm, スラブ厚12 cm, スパン内のり寸法300 cm(実測値308 cm)の一方試験体である。試験体数は、計2体で、それぞれ調合スランプを変えた他は全く同一条件としており、そのコンクリートは生コン使用、 $F_c=210 \text{ kg/cm}^2$ , スランプ18 cm, 8 cmで、調合表および圧縮強度試験結果を、表一1, 2に示す。表一2から分かるとおり、コンクリート調合の違いによって強度差を生じたため結果的には強度の異なるたわみ比較試験となった。配筋は鉄筋SD30を用い、端部上端・中央下端とも3-D10(全断面に対する鉄筋比: 0.36%)とした。端部定着長さは $36 \text{ cm}^2$ である。材令8週で、材端に設計モーメント(鉄筋応力度 $\sigma_t=M/(7/8 \cdot d_t \cdot a_s)=2.0 \text{ t/cm}^2$ となるモーメント)が生じるよう、図一1の形に載荷した。

| コンクリート調合 | 水セメント比 W/C(%) | 所要スラブランプ(cm) | セメント | 水   | 細骨材 | 粗骨材  | 混和材          |
|----------|---------------|--------------|------|-----|-----|------|--------------|
| A(No.11) | 58.4          | 18           | 308  | 180 | 751 | 1053 | ビーンゾール 0.092 |
| B(No.12) | 58.4          | 8            | 262  | 153 | 759 | 1154 | ビーンゾール 0.092 |

コンクリート 1 m<sup>3</sup>中の重量 (kg/m<sup>3</sup>)

表一1 コンクリート調合

| コンクリート調合 | スラブランプ(cm) | 空気量(%) | 練上がり温度(℃) | 8週圧縮強度(kg/cm <sup>2</sup> ) | 8週弾性係数(×10 <sup>4</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 4週標準水中強度(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|------------|--------|-----------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| A        | 21.3       | 1.6    | 6.8       | 189                         | 1.99   | 337                           |
| B        | 10.7       | 2.0    | 6.5       | 141                         | 1.40   | 248                           |

表一2 コンクリートの性質と圧縮強度

### 2.2. たわみ

載荷直後のたわみ測定値は No. 11 (Fc=189), No. 12 (Fc=140) 試験体それぞれ 1.14 mm, 2.03 mm (自重たわみ0.24, 0.33 mm を含む) であった。載荷約8年間のスパン中央たわみの動きを、図一1に示す。この結果、約8年間の最大たわみは載荷直後の弾性たわみ計算値 No. 11, No. 12 それぞれ0.85, 1.21 mm (計算法は後述する) の16~19倍という大きいものであった。

たわみの進行がほぼ停止したと思われる材令2,550日での値を1として、主な材令のたわみを比率で表し、プロットしたものを図二に示す。最終たわみに対して1年で70~75%, 2年で85%のたわみを生じたことが分かる。

### 2.3. ひびわれ

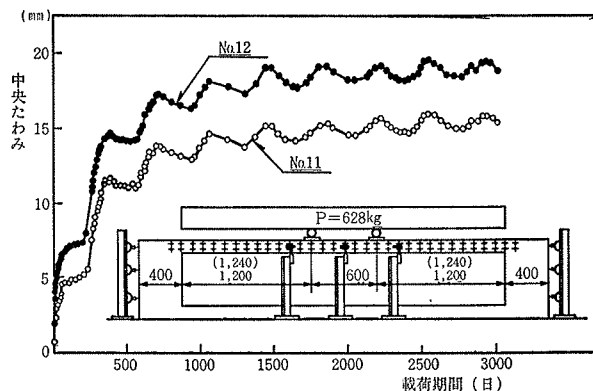
ひびわれの状況は、加力直後に No. 11, No. 12 スラブとも支持端上面およびスパン中央下面に 0.1 mm 以下のひびわれが2~3本ずつ発生し、その後、数日のうちにそのひびわれ本数は多少増加したもののその後は、本数の増加はほとんど見られなかった。No. 11, 12スラブのひびわれ幅の動きを図三に示すがこれはコンタクトゲージの測定結果を使って、上面もしくは下面から2 cm 位置でのコンクリートひずみより求めたものである。この結果によれば、支持端部のひびわれは No. 11スラブで 0.18, 0.57 mm (5年時点), No. 12スラブで0.45, 0.70 mm という大きなひびわれ幅であることが分かる。

### 2.4. 鉄筋ひずみ

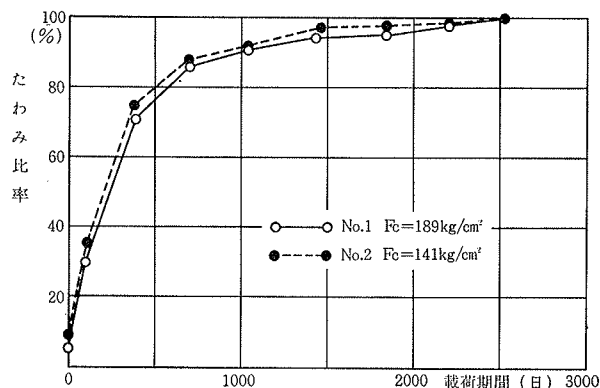
支持端の鉄筋ひずみの動きを調べるため、スラブ支持端付け根およびそこから定着 20 cm 位置の引張筋に W. S. G. を張り、鉄筋ひずみの動きを測定した。約600日にわたる測定結果を、図四に示す。なお、コンクリートの乾燥収縮に伴い、鉄筋もその影響を多分に受けるためここではダミースラブの鉄筋ひずみを使って補正している。

### 2.5. コンクリート収縮ひずみ

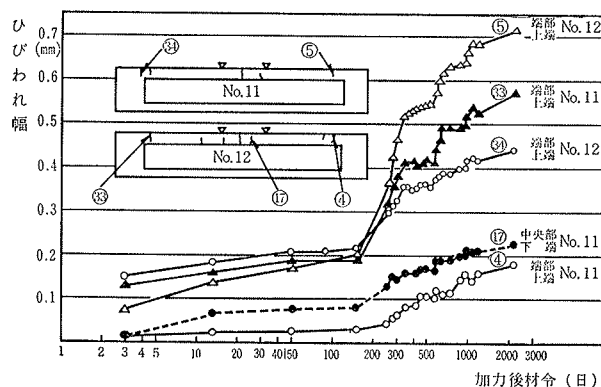
ダミースラブを用いてコンクリートの収縮ひずみを測定し、その結果を、図五に示す。このダミースラブは A 調合コンクリートの測定結果であり、B 調合の場合は



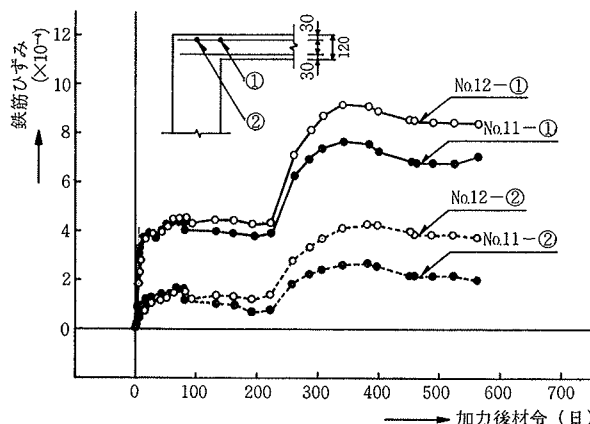
図一1 固定支持スラブ試験体とその中央たわみ



図二2 最終たわみに対するたわみ比率



図三3 ひびわれ幅の動き



図四4 鉄筋ひずみの動き

省略するが、ほとんど同一収縮挙動であった。なお測定法はダイヤルゲージ法によった。この図から、材令1年以降、室内温度、湿度の年間サイクリックな影響を受け、コンクリートが収縮、伸張を繰返しているものの材令2年以降、最大収縮ひずみはほとんど増加していない。

3. 解析方法

3.1. 加力直後の弾性たわみ計算

外力 P=628 kg による弾性たわみは、モールの定理を使って計算すると、No. 11, 12それぞれ0.85, 1.21 mm (ともに自重たわみを含む) が得られた。この時、弾性係数  $E_c$  は表-2の実験値を使う。なおこの全荷重による支持端コンクリート引張縁応力計算値は 28.8 kg/cm<sup>2</sup> であった。

3.2. 長期たわみ解析法

3.2.1. はじめに 固定支持スラブのたわみ解析にあたっては、支持端で曲げひびわれが起きる場合、支持定着部からの鉄筋拔出しに伴う固定度の低下、たわみ増加の影響を無視できないと考えられるため、今回、定着部からの鉄筋拔出しを考慮した固定支持スラブたわみ解析法を提案し、実験結果と比較、検討する。

3.2.2. クリープと収縮を考慮したたわみ解析 クリープと収縮を考慮したたわみ解析については、既報(所報 No. 15ないしは No. 26) に述べているのでここでは省略する。

3.2.3. 固定条件をもつ部材の変形解析の基本的考え方 完全固定支持という状態は「支持端部の回転角がゼロであるという条件を満足すること」として定義される。そのため、両端固定支持部材に生じる端部モーメント:  $M_e$  は、同一スパン、同一荷重の単純支持部材の支点回転角:  $\theta_s$  を打消すために必要な支点曲げモーメントとして表わされる。つまり、固定端の回転角  $\theta=0$  という条件から対象荷重の場合、スパンを  $L$  とすれば

$$\theta = \theta_s + \frac{M_e}{(2 \cdot EI/L)} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

となり、この式から、 $M_e$  が求まる。以下、この基本的な考え方を応用して曲げひびわれや端部拔出しを考慮した固定支持スラブのたわみ計算を行なう。

3.2.4. 曲げひびわれを考慮した固定支持部材の解析 固定支持スラブに曲げひびわれが発生すると、曲げモーメントの再配分が起こる。固定支持端部の引張筋拔出しを考えない場合。

$$\int_0^{0.5 \cdot L} (M_x/EI_x) \cdot dx = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

という関係が成立つような再配分曲げモーメント分布を求め、スラブ変形解析を行なえばよい。しかし、 $M_x$  がひびわれ荷重を越える範囲では  $EI_x$  も変化するため、こ

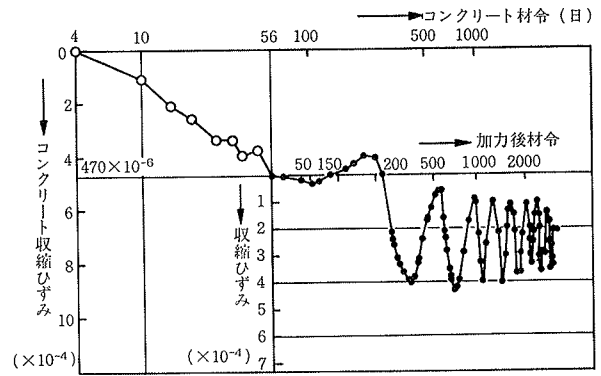


図-5 コンクリート収縮ひずみ測定結果

の(2)式を直接解くことは困難であり、ここでは反復法によってこの式を解いている。

3.2.5. 固定端からの鉄筋拔出しを考慮した解析 支持ばりからの鉄筋拔出し現象を材端の回転ばねという考え方でモデル化し、端部拔出しを考慮したスラブたわみ計算を行なう。回転ばねのモデル図を図-6に示すが、この時引張筋の拔出し量:  $d_s$  は後述する付着クリープ実験を参考に設定する、またこの回転ばねの回転軸:  $x_0$  はひびわれ断面時の中立軸と仮定する。これは、はね出しスラブに関する実験研究<sup>2)</sup>によりその妥当性を確認している。この結果、回転ばねの回転角:  $\theta_k$  は、鉄筋応力との関係で下式のように表わされる。

$$\theta_k = \Delta S / (x_n - y_1) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$x_n$ : ひびわれ断面時の中立軸

$y_1$ : 上面から引張筋までの距離

その結果、支持条件を満足するような回転角の釣合い式は

$$\int_0^{0.5 \cdot L} (M_x/EI_x) \cdot dx + \theta_k = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

で表わされるから、この式を満足するような端部モーメント  $M_e$  が求める解となる、具体的な解析は、前述した反復法を用いて(4)式が成立するまで繰返し計算し、再配分されたモーメント分布を使ってたわみを求めれば固定支持スラブの長期たわみ計算が可能となる。なお軸力については無視する。

4. 付着クリープ実験

4.1. 実験概要

筆者等は、鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状に関する基礎実験として、両引きおよび片引き試験体について付着クリープ実験を行ない、既報<sup>1)</sup>に述べているが、今回、支持端定着部からの引張筋拔出し量を推定する目的で、付着長の十分大きい片引き試験体の付着クリープ実験を行なった。

試験体は付着長 40 cm, 20 cm の2形状とし、その試験体形状および測定法を、図-7に示す。鉄筋は SD30-

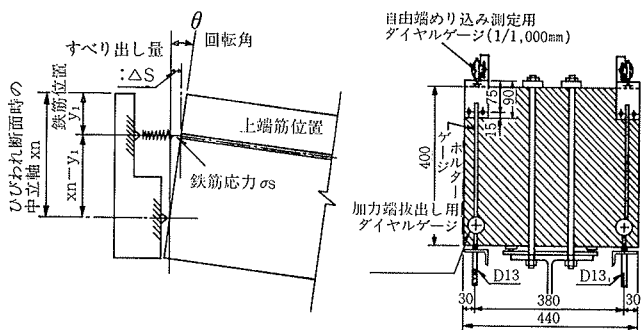


図-6 回転バネのモデル図

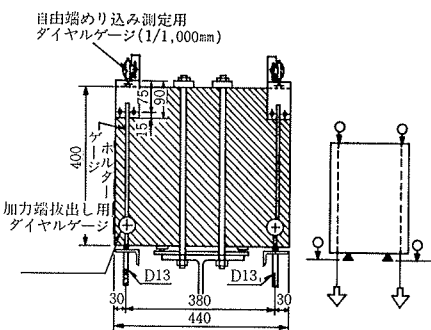


図-7 付着試験体加力状況

D13 を使用し、コンクリートは普通セメント、川砂、川砂利使用で、その強度は載荷 4 週時  $F_c=238 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_c=2.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  であり、コンクリート打込みは横打ち、打設口はかぶり 7.5 cm 側から打込んだ、加力の大きさは鉄筋応力  $1.5 \text{ t/cm}^2$ 、 $1.0 \text{ t/cm}^2$  (付着長 20 cm の場合  $1.0 \text{ t/cm}^2$  のみ) とし 4 週で載荷した。長期載荷用試験体数は、40 cm シリーズ 2 水準計 4 体、20 cm シリーズ 1 水準計 2 体の計 6 体であり、他にダミー試験体も製作した。

4.2. 実験結果

持続載荷に先立って、4 週にて静的加力した鉄筋拔出し測定結果を図-8 に示すが、鉄筋応力  $2.0 \text{ t/cm}^2$  付近までは付着長 20 cm, 40 cm に関わりなく大よそ

$$d_s = 5 \times 10^{-6} \cdot \sigma_t - (d_s: \text{cm}, \sigma_t: \text{kg/cm}^2) \dots\dots(5)$$

で表わされた。

持続載荷試験結果を図-9 に示すがこれは加力端の拔出し量の経時的な動きを

$$K_t = \frac{\text{期間 } t \text{ における加力端拔出し}}{\text{加力直後の加力端拔出し}} - 1.0$$

とした係数  $k_t$  (付着クリープ係数と定義する) で表わしたものである。付着長 40 cm シリーズは応力レベルに関わりなく載荷期間 200 日で  $k_t=0.6 \sim 0.8$  を示した。なおこの時の拔出し量はダミー試験体の結果を用いて補正済みである。付着長 40 cm シリーズの付着クリープ係数の動きを最小 2 乗法で分数式として表わすと下式が得られた。

$$K_t = \frac{t}{1.28 \cdot t + 17.5} - (t: \text{載荷日数}) \dots\dots(6)$$

5. 固定支持スラブ実験結果と解析結果

5.1. 計算定数の決定

コンクリート弾性係数は、表-2 の圧縮強度試験結果

| 材令(日)                      | 0 | 25   | 50   | 100  | 200  | 250  | 350  | 730  | 1070 | 2200 |
|----------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 収縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ ) | 0 | 0    | 20   | -40  | -50  | 200  | 370  | 550  | 560  | 560  |
| 係数 d                       | — | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.9  | 0.9  | 0.9  | 0.9  | 0.9  |
| クリープ係数                     | 0 | 0.75 | 1.09 | 1.41 | 1.65 | 3.08 | 3.21 | 3.40 | 3.46 | 3.53 |

表-3 変形計算定数

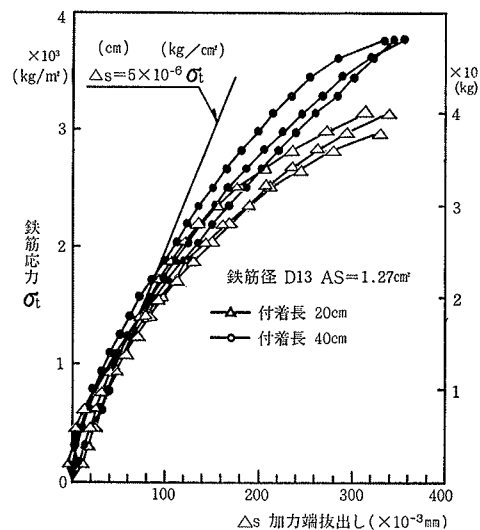


図-8 短期加力による付着試験結果

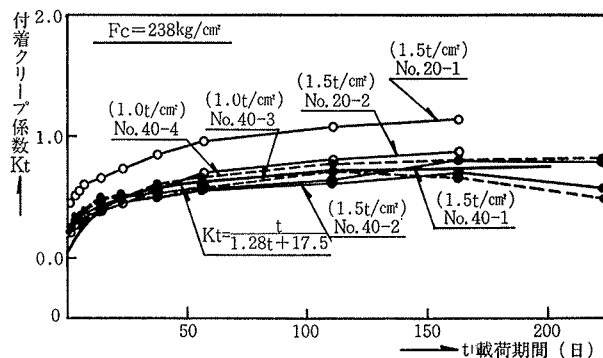


図-9 付着クリープ係数の動き

を用いる。長期変形解析に用いるクリープ係数、収縮ひずみは No.11, No.12 試験体とも、表-3 の数値を使用する。この表で、収縮ひずみ値は、図-5 の測定結果を採用しているが、クリープ係数値は、下式から求めている。

$$\phi_t = \frac{d \cdot t}{10.5 + 0.25 \cdot t} \dots\dots(7)$$

d: 湿分に関する係数、乾燥時(10月~3月) 0.9, 湿潤時(4月~9月)0.5

t: 載荷期間(日数)

なおこのクリープ係数式は追加実験によってその妥当性を確認している<sup>1)</sup>。

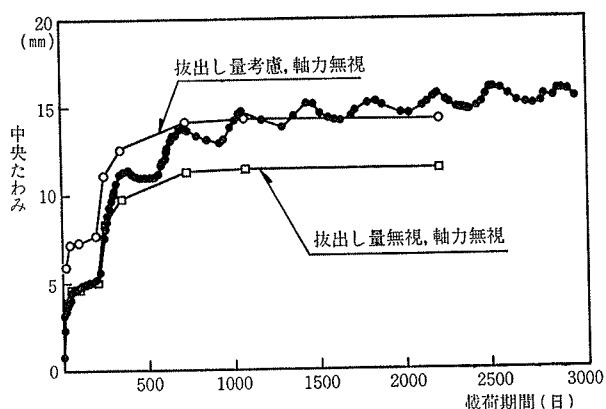
鉄筋拔出し量の大きさ  $d_s$  は、付着クリープ実験結果を参考にして、付着長の違い (36 cm)、鉄筋径の違い (D10) はあるもののこの違いを無視して、No. 11 の場合(8)式を用いる。また No. 12 の場合は、コンクリート強度、弾性係数ともかなり低いため、便宜的に弾性係数比  $1.99/1.40=1.42$  倍だけ拔出し量を割増すこととする。

$$d_s = 5.0 \times 10^{-6} \cdot \sigma_t \times \left( \frac{t}{1.28 \cdot t + 17.5} + 1 \right) - (\text{cm}) \dots(8)$$

$\sigma_t$ : 端部引張筋応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

t: 載荷期間(日)

5.2. 実験結果と解析結果の比較



図一10 No. 11スラブたわみ測定値と計算値

3.2. 節長期たわみ解析法を用いて解析を行ない、実験結果と比較して図一10, 11に示す。また参考として抜出しを考慮しない計算値も示すが、これらの図からNo. 11の場合、抜出しを考慮すれば長期的には測定値との近似性は良好となることが分かる。一方No. 12試験体はNo. 11に比べて約1.3倍の大きいたわみを示しているがNo. 12の解析結果はこのたわみ挙動に比べて幾分低い評価であった。これは低強度コンクリートのため実際のクリープ性状などが設定値よりも多少大きくなっていることも考えられる。

次にNo. 11試験体の曲率分布について、載荷期間1年での測定値と計算値の比較を行ない、図一12に示す。この図で端部回転角計算値の取扱いは、検長10cmで除し、曲率の形で曲げによる曲率計算値に加算し測定値と比較している。この図からも、計算値と実験値との対応は大よそ良好であったと言えよう。

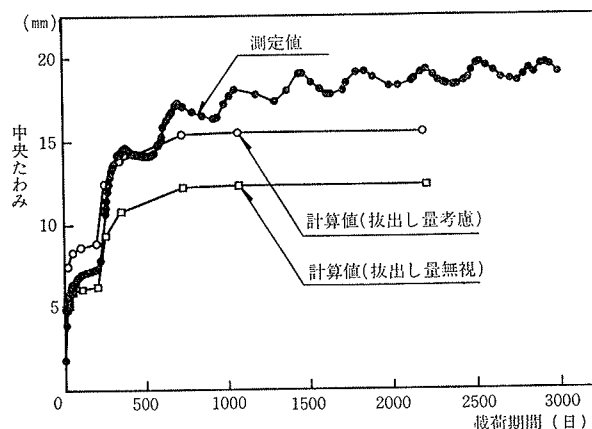
### 6. 単純支持スラブのたわみ挙動

単純支持スラブに関する前報告(所報No. 15, 1977: その2)は約2年間までの結果であるが、その後約8年までのたわみの動きを測定し、計算結果と比較し、図一13に示す。この結果から全体としてほぼ良好な対応であった。

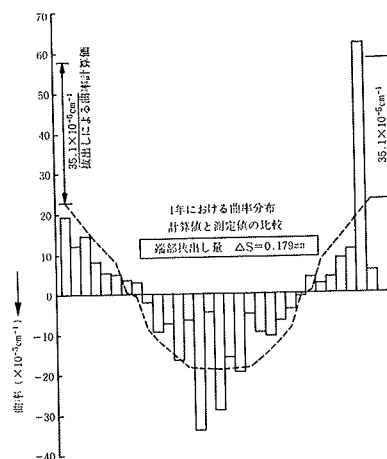
### 7. まとめ

RCスラブの長期たわみに及ぼす影響は、クリープ・収縮性状、曲げひびわれの他に、固定端の引張筋抜出しの要因があげられる。本文では一方向固定支持スラブ実験を行ない、約8年間にわたる長期たわみ挙動を測定するとともに付着クリープ実験を行ない、端部抜出しを考慮した解析法を示し、実験結果と比較、検討した。

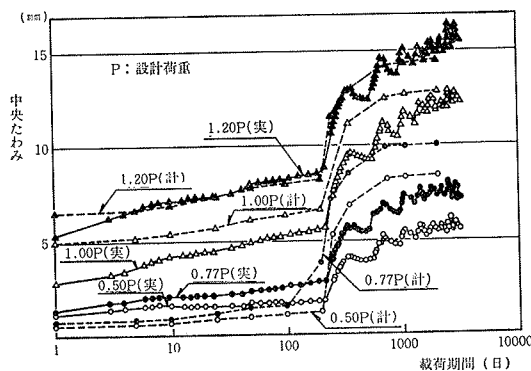
その結果、①固定支持スラブの最終たわみは、弾性たわみ計算値の16~19倍であった。②載荷1年後のたわみは最終たわみの70~75%であった、③端部抜出しの影響を考慮した解析結果と測定結果は良い対応を示した。④端部抜出しを考慮したたわみ計算値は考慮しないたわみ



図一11 No. 12スラブたわみ測定値と計算値



図一12 スラブ曲率分布(1年時)



図一13 単純支持スラブたわみ測定値と計算値

計算値の1.2~1.3倍になることなどが明らかになった。

### 参考文献

- 1) 高橋, 武田, 小柳, 大池: RCスラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977), pp. 37~42
- 2) 高橋, 武田, 小柳: 同上(その5), 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 75~80
- 3) 高橋, 武田, 小柳, 大池: 同上(その1), 大林組技術研究所報, No. 12, (1976), pp. 43~47
- 4) 高橋, 武田, 小柳: 同上(その4), 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 64~68