

# R.C. スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究 (その5)

——はね出しスラブ実験結果——

高橋久雄 小柳光生  
武田寿一

## Studies of Deflection of Reinforced Concrete Slabs under Sustained Loads (Part 5)

——Results of Experiments on Cantilevered Slabs——

Hisao Takahashi Mitsuo Koyanagi  
Toshikazu Takeda

### Abstract

Part 1 and Part 2 of this report described experimentation plans and the results of measurement of long-term deflection on simple supported slabs. The present part describes the results of measurements for a period of about 5 years. In case of cantilevered slabs, it is necessary to consider added deflection due to slippage of reinforcing steel in the slabs. Calculated values of added deflection are compared with experimental values.

### 概 要

前報(その1), (その2)で実験概要および単純支持スラブの長期変形挙動などについて検討したが, 本報告は, はね出しスラブの約5年間の実測結果をまとめた。はね出しスラブの場合曲げたわみの他にスタブ内の鉄筋抜出しによる付加たわみを考慮する必要がある。今回, 付加たわみ計算式を提案し, 測定結果と比較, 検討を行なった。

## 1. まえがき

本報告は, RC 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変形性状の予測計算法の確立のための基礎実験として行なった持続荷重による一方向スラブ模型実験結果をまとめたものである。

同題目(その1): 所報 No. 12 では実験概要および約200日間にわたる実測結果について, また, 同題目(その2): 所報 No. 15 では単純支持スラブの約2年間にわたる実測結果について報告したが, 今回, はね出しスラブ試験体 (No. 9, No. 10) 計2体の約5年間にわたる実測結果をまとめ, 報告する。

試験体 No. 9, No. 10 は同一強度で, スランプがそれぞれ 18 cm, 8 cm になるようにコンクリート調合を計画したが, 8週シリンダー強度はそれぞれ 189, 141 kg/cm<sup>2</sup> となり, 結果的にはコンクリート強度の異なる比較試験になった。その他の条件は全く同一になるよう計画した。

このはね出しスラブは, はり付きキャンチレバースラ

ブを想定したもので, たわみ挙動を把握するためには曲げたわみの他にスラブ内の鉄筋抜出しに伴う付加たわみを考慮する必要があると思われる。長期の曲げたわみ挙動については同題目(その2)で計算式を提案し, その妥当性を検討しており, 今回は主に付加たわみの取扱い方について実験結果と比較, 検討を行なった。

## 2. 実験結果

### 2.1. たわみ

試験体の形状と測定状況を図-1に示す。また中央たわみ測定結果を図-2に示す。加力直後のたわみは No. 9, No. 10 それぞれ 0.90, 1.45 mm で, 自重たわみを含めれば 1.10, 1.73 mm である。代表的な材令におけるたわみを整理して表-1に示す。

この結果から, 載荷後10日におけるたわみは, 加力直後の3.0~3.5倍という大きいたわみ増加を示し, その後, 徐々に緩慢な動きになるが200日あたりから再びたわみが急増してくる。この現象は室内湿度の変化と密接な関係があると思われ, その対応性については前報告(その

2) の中で考察しているためここでは除いた。載荷後1年経過のたわみは加力直後の7倍前後となり、5年経過のためみは8~9倍の大きなたわみを示した。このたわみ進行度は単純支持スラブの場合とほぼ同じ傾向であるが、単純支持の材令10日におけるたわみは、加力直後の2.0~3.0倍であったため、載荷後初期のたわみ進行度ははね出しスラブの方がやや大きかった。

### 2.2. ひびわれ

材令1年における試験体側面ひびわれ図を図-3に示す。No. 9 試験体のひびわれは実線で示し、No. 10 試験体のひびわれは破線で示す。No. 10 は加力直後にひびわれ発生が目視できたが、No. 9 は加力後数時間経てひびわれ発生に気づいた。ひびわれ幅の動きは後に述べるコンタクトゲージによるひずみ測定結果から推測できる。材令1年における最大ひびわれ幅は No. 9 で 0.4 mm, No. 10 で 0.7 mm 程度であった。

### 2.3. 側面ひずみ

試験体のスパン中央付近側面にコンタクトゲージ標点を図-3のように貼り、圧縮側、引張側それぞれのひずみ挙動を測定し、その結果を図-4に示す。この結果は加力直前を原点としており、コンタクトゲージによる読取り値を標点間 10 cm で除してひずみとして表わしたものである。なお材令0日のグラフは加力後数時間経て測定したものである。この結果からつぎのことが分かった。(1)材令0日において最大曲げ応力の作用する位置⑩、⑪付近での圧縮ひずみ(上面より2 cm 位置)は No. 9 で  $200 \times 10^{-6}$ , No. 10 で  $300 \times 10^{-6}$  程度のひずみをしめした。(2)スタブ部におけるひずみは圧縮側、引張側ともに小さかった。(3)長期における測定結果から、材令27日から153日までの圧縮ひずみの動きは殆んど見られないが、材令153日から366日までの期間における圧縮ひずみの増

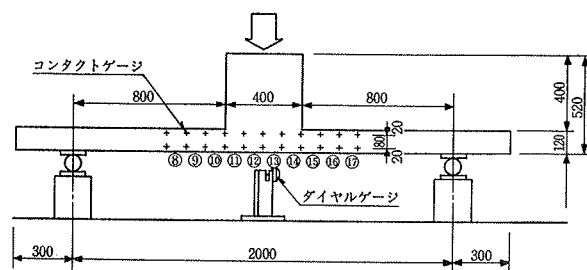


図-1 試験体の形状および測定状況

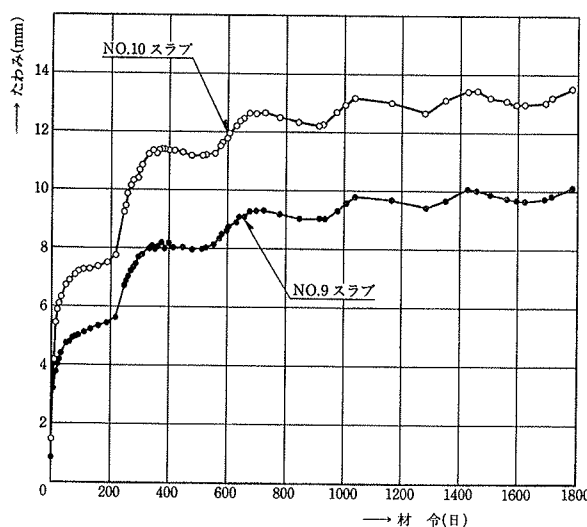


図-2 試験体 中央たわみ

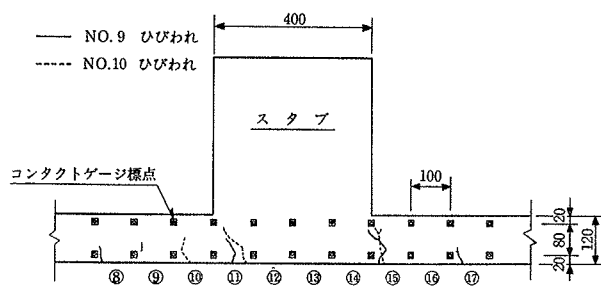


図-3 試験体 ひびわれ

加力後 材令(日)	No.9 スラブ			No.10 スラブ		
	たわみ測定 値(mm)	加力直後た わみに対する たわみ比	t=10日た わみに対する たわみ比	たわみ測定 値(mm)	加力直後た わみに対する たわみ比	t=10日た わみに対する たわみ比
加力直後	1.10	1.00	—	1.73	1.00	—
1日	2.51	2.28	—	3.49	2.02	—
3日	3.19	2.90	—	4.58	2.65	—
10日	3.87	3.52	1.00	5.53	3.20	1.00
50日	4.96	4.51	1.28	7.04	4.07	1.27
111日	5.31	4.83	1.37	7.46	4.31	1.35
191日	5.58	5.07	1.44	7.74	4.47	1.40
261日	7.05	6.41	1.82	10.08	5.83	1.82
365日(1年)	8.30	7.55	2.14	11.62	6.72	2.10
726日(約2年)	9.49	8.63	2.45	12.95	7.49	2.34
1,041日(約3年)	10.00	9.09	2.58	13.43	7.76	2.43
1,431日(約4年)	10.28	9.36	2.66	13.70	7.92	2.48
1,842日(約5年)	10.40	9.45	2.69	13.85	8.01	2.50

表-1 たわみ測定値の動き

加は大きく、その増加量は  $300 \sim 400 \times 10^{-6}$  を示し、これは、同期間中のコンクリート自由収縮ひずみとはほぼ一致している。(4)スタブ付け根付近の引張ひずみはひびわれのためかなり大きい。

### 2.4. 鉄筋ひずみ

試験体の引張鉄筋のスパン中央位置およびスタブとの付け根位置の計4ヶ所に W.S.G. (4ゲージ法) を貼り、約500日間にわたり鉄筋ひずみを測定した。その結果を図-5に示す。原点は加力直前である。なお、鉄筋引張試験を行ない鉄筋ひずみ-応力関係を調べたのでその結

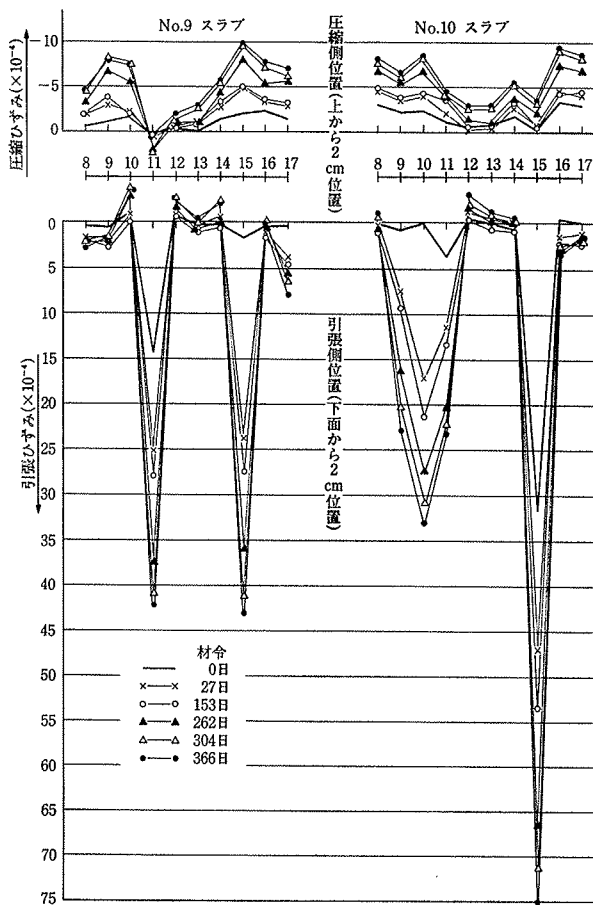


図-4 試験体側面ひずみの動き

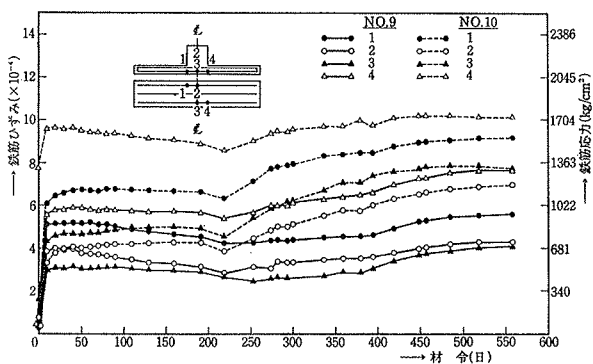


図-5 試験体鉄筋ひずみの動き

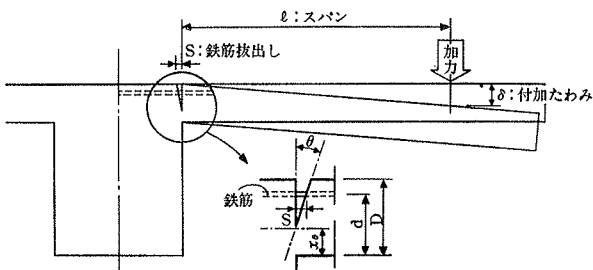


図-6 付加たわみの考え方

果を利用して図-5中の縦軸に鉄筋応力も表示した。この図から、No. 9の場合、固定端(スタブとの付け根)の応力は材令500日で $1,300 \text{ kg/cm}^2$ 程度であり、これは載荷計画時の設計応力 $2,000 \text{ kg/cm}^2$ より小さい。No. 9の場合、材令500日で $1,750 \text{ kg/cm}^2$ を示し、設計応力に近い値であった。

### 3. 解析方法

#### 3.1. 載荷荷重の大きさ

試験体の固定端で長期設計曲げモーメント ( $M_d = 0.337t \cdot m$ ) が作用するように載荷荷重を設定する。

スラブ自重 ( $w = 0.144 \text{ t/m}$ ) による曲げモーメント:

$$M_w$$

$$M_w = 1/2 \cdot w \cdot l^2 = 1/2 \times 0.144 \times 0.80^2 = 0.046 \text{ t} \cdot m$$

スタブ自重 ( $P_1 = 0.124 \text{ t}$ ) による曲げモーメント:  $M_{P1}$

$$M_{P1} = P_1 \cdot l = 0.124 \times 0.80 = 0.099 \text{ t} \cdot m$$

載荷荷重  $P_2$  は

$$P_2 = (m_d - M_w - M_{P1}) / l = (0.337 - 0.046 - 0.099) / 0.8 = 0.240 \text{ t}$$

つまり  $240 \text{ kg}$  とする。ただし、この荷重は片側だけの荷重分で、全載荷荷重は  $240 \times 2 = 480 \text{ kg}$  となる。荷重物としては鋼塊を用いた。

#### 3.2. 瞬時弾性たわみ計算

前報告(その2)と同じ計算法を用いる。

#### 3.3. 長期たわみ計算

3.3.1. 基本的な考え方 はね出しスラブの中央たわみは曲げたわみの他に、スタブ内からの鉄筋抜出しに伴う付加たわみを考慮する。

3.3.2. 長期曲げたわみ計算 長期曲げたわみ計算における仮定条件、仮定定数およびその計算方法については前報告(その2)と同じ計算法を用いる。

3.3.3. 長期付加たわみ計算 付加たわみの計算は、その固定端の回転角:  $\theta$  から

$$\delta = l \times \theta \quad \dots \dots (3.1)$$

$\delta$ : 付加たわみ  $l$ : スパン長  $\theta$ : 回転角

として求めることができると仮定する。

この回転角の大きさは、前報告(その1)で、コンタクトゲージを用いて測定した固定端回転角から、付加たわみを計算し、その結果、計算たわみと測定たわみはほぼ近似したことを述べているが、本文では、回転角の大きさを計算式から誘導する。その場合の条件は、固定端断面で平面保持が成立し、回転角:  $\theta$  は下式から求まると仮定する。

$$\theta = S / (d - x_\theta) \quad \dots \dots (3.2)$$

$S$ : 鉄筋抜出し量  $d$ : 有効せい  $x_\theta$ : 回転軸

#### 3.3.4. 鉄筋抜出し量計算式 試験体の固定端部鉄筋

位置ひびわれ幅測定値は、鉄筋抜出しの他にスラブの曲げ応力による鉄筋すべりも含まれており、梁形からの鉄筋抜出し量を調べる目的でスラブ実験後2年経て、同一鉄筋 (SP 30-D 10) でかつ同一付着長をもつ両引き付着試験体を図-7のように製作、実験し既に所報 No. 19 (同題目: その4) に報告している。この結果を図-8にしめす。この図は鉄筋引張荷重と伸びひずみ (伸び変形量/測定長さ) の関係を加力直後についてしめたものである。なお、森田博士の実験結果<sup>2)</sup> も同図に示す。森田博士の実験に使用した鉄筋径は D 16 で、筆者等の付着実験 D 10 と異なるため、同一鉄筋応力で作用する付着応力は D 10 の1.67倍と大きい。しかし、その反面コンクリート強度が1.23倍と大きいこと、鉄筋が断面中心に埋込まれていることなどのため結果的には同等の条件であると判断する。また、持続荷重における平均伸びひずみの挙動を整理して図-9に示す。

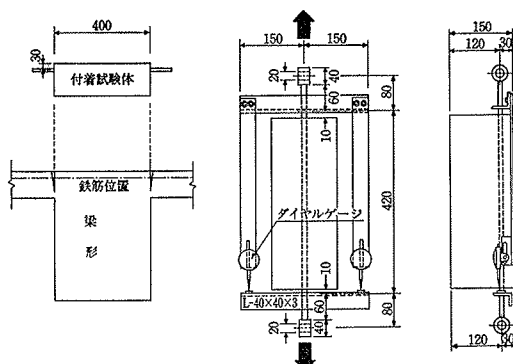


図-7 付着クリープ実験用 試験体

以上の実験結果を参考にして、鉄筋抜出し量計算式を以下に提案する。

両端鉄筋引張り直後の抜出し量:  $S_L$  は、下式で表わされる。

$$S_L = d \times \epsilon_{av} \quad \dots\dots (3.3)$$

d: 付着長  $\epsilon_{av}$ : 平均伸びひずみ

また、伸びひずみ:  $\epsilon_{av}$  は、付着長: d と鉄筋引張荷重:  $\delta_s$  の関数式で表わし、その関係は図-10に示す通りとする。

$$\epsilon_{av} = f(d, \delta_s) \quad \dots\dots (3.4)$$

次に持続荷重時の鉄筋抜出し量について考える。持続荷重によってコンクリートと鉄筋の付着性能が低下し、経時的な抜出しクリープ挙動が考えられるが、鉄筋材のクリープは考えられないため裸鉄筋伸び変形:  $S_v$  以上に増加することはあり得ない。そのため、抜出しクリープを考える場合に ( $S_v - S_L$ ) の変化量を取扱うこととし、持続期間: t における抜出し量:  $S_{L,t}$  は、

$$S_{L,t} = S_L + (S_v - S_L) \cdot \varphi_t \quad \dots\dots (3.5)$$

として表わす。この時、 $\varphi_t$  は付着クリープ係数比と定義する。この  $\varphi_t$  は最大値1.0で、 $\varphi_t = 1.0$  の時、 $S_{L,t}$  は裸鉄筋伸び変形を示す。 $\varphi_t$  の値は下式で表わす。

$$\varphi_t = 1/4 \cdot (\log(t+1))^{1/3} \cdot k \quad \dots\dots (3.6)$$

t: 持続期間 (日数) k: 応力レベルによる係数

Kの値は  $\sigma_s = 1.0 \text{ t/cm}^2$  の時  $K = 1.0$ ,  $\sigma_s = 2.0 \text{ t/cm}^2$  の時  $K = 2.0$  とし、その他の場合、直線補間とする。ただし、 $\varphi_t$  は1.0を越えないこととする。図-9から得られる実験値  $\varphi_t$  と計算式 (3.6) から求まる計算値  $\varphi_t$  を比較し、図-9中に示す。

以上の計算式を整理して、鉄筋抜出し量:  $S_{L,t}$  は

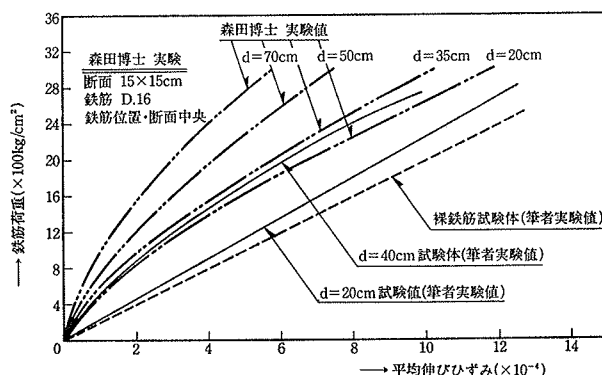


図-8 両引き付着試験結果—加力直後—

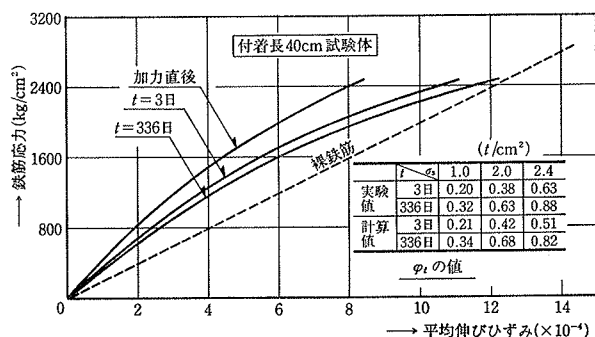


図-9 両引き付着試験結果—持続荷重時—

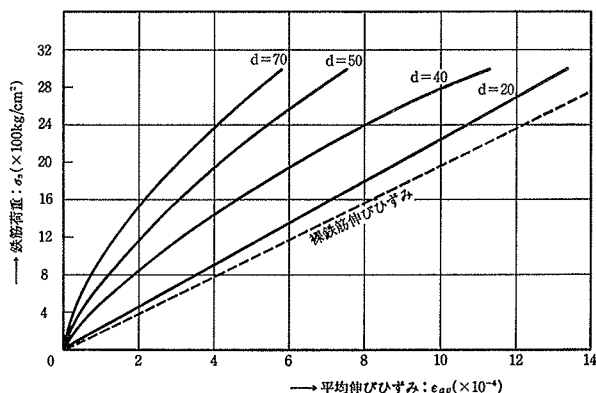


図-10 加力直後の平均伸びひずみ曲線

$$S_{Lt} = d \cdot \varepsilon_{av} + (d \cdot \varepsilon_v - d \cdot \varepsilon_{av}) \cdot (\log(t+1))^{1/3} \cdot 1/4 \cdot K \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$\varepsilon_v$ : 裸鉄筋伸びひずみ (図-10参照)

となる。

3.3.5. 回転軸の考え方 回転軸:  $x_\theta$  位置として, 東博士等<sup>3)</sup> はひびわれ断面における中立軸:  $x_n$  を用いて, 付加たわみを計算している。この考え方は, 固定端での圧縮ひずみが図-11のハッチで示すひずみ分布になることを前提としているが, 実際にはスタブ内で圧縮応力拡散などにより, 見かけ上ひずみ分布が多少小さくなると予想される。そのため,  $x_\theta$  として  $x_n$  を採用することは付加たわみを実際より大きく見込む恐れがある。

そのため, 本文で用いている簡便な回転角による付加たわみ計算法の妥当性およびその場合の回転軸位置の選び方について調べるために, F.E.M. 法を用いてスラブたわみ解析を行ない検討する。

試験体の要素分割を図-12に示す。この時要素④, ⑤は鉄筋を想定したもので任意に要素④, ⑤の剛性を変化させることで抜出し量を任意に設定し, その時のたわみとの関係を調べる。

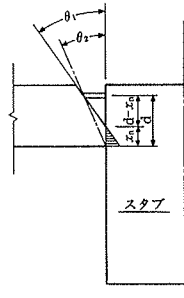


図-11 回転軸の考え方

鉄筋抜出しと付加たわみの FEM 法による解析結果を整理して図-13に示す。この解析結果からも付加たわみと鉄筋抜出しの関係はほぼ比例しており, その時の回転軸としては中立軸:  $x_n$  を用いた計算法の結果とほぼ近似していることが分かった。以上の結果から, 付加たわみ計算に用いる回転軸として今回はひびわれ断面における中立軸:  $x_n$  の値を使用することとする。

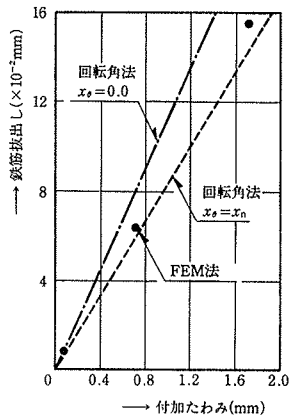


図-13 鉄筋抜出しと付加たわみ

任意のスパンおよび断面寸法をもつキャンチレバー部材の鉄筋抜出し量が分かっている時, 簡単に付加たわみを計算できる計算図を図-14に示す。この図は, F.E.M. 解析法を用いて  $d/D=0.75, 0.85$  および  $x_n/d=0.1, 0.2, 0.3$  の組合せについて解析した結果を整理したものである。鉄筋比の影響は  $x_n/d$  の中に入っている。なお, 本試験体 No. 9 は  $d/D=0.75, x_n/d=0.28$  である。

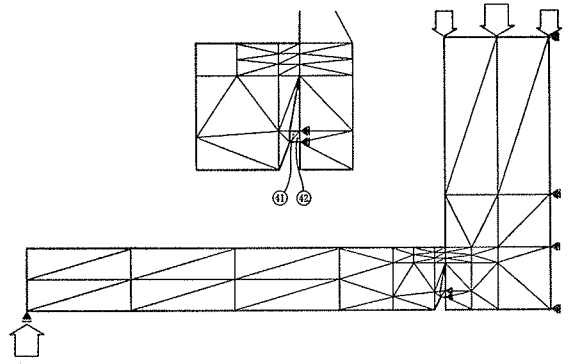


図-12 F.E.M. 法による付加たわみ計算

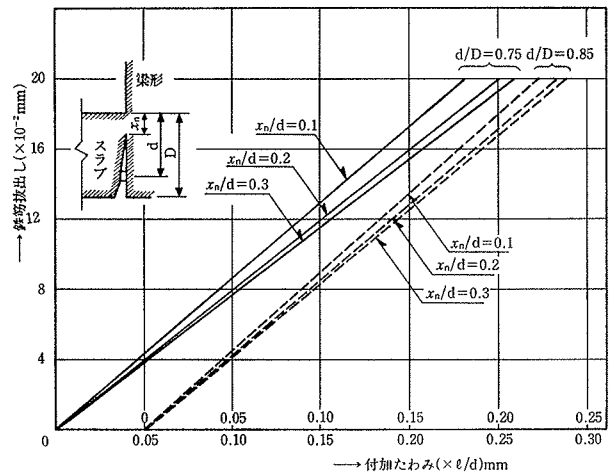


図-14 付加たわみ計算図

#### 4. たわみ実測値と計算値の比較

##### 4.1. 加力直後のたわみ比較

3.2瞬時弾性たわみ計算を用いて求めた No. 9, No. 10 スラブの中央たわみ計算値は, それぞれ0.64, 1.29 mm で, これは実測値の  $0.64/1.10=0.58, 1.29/1.73=0.75$  であり, 計算値の方がかなり小さい。前報告(その2)の中で単純支持スラブの場合近似性が良好であったことと比較して, はね出しスラブの場合に近似性が良くなかった理由は, 加力直後の計算値の中に付加たわみを考慮しなかったためと思われる。

##### 4.2. 長期たわみ比較

3.3長期たわみ計算を用いて(曲げ+付加)たわみ計算し, その結果を実測たわみと比較して図-15に示す。付加たわみ計算値だけのグラフも同図中に示す。この結果から, No. 9 スラブの計算たわみと実測たわみはほぼ近似していると言える。一方 No. 10 スラブの場合計算たわみに比べて実測たわみの方が大きいことが分かる。また, 全計算たわみに占める付加たわみ計算値の割合は, かなり大きく材令1年では No. 9, No. 10 ともに35%前後を示す。

次に2.2 側面ひずみの測定結果を使って材令1年での曲率実測値を求め、曲率計算値と比較して図-16にしめす。なお計算値の中で固定端の回転角の影響は、回転角計算値を検長10cmで除した値を付加曲率として重ね合わせている。この曲率の比較からNo.9の場合は良い対応を示すもののNo.10では固定端の曲率測定値はかなり大きいことが分かる。このために前に述べたNo.10の実測たわみが計算たわみに比べて大きくなったものと推定されるが、このように端部曲率が大きくなった原因は不明であるもののNo.10のコンクリート強度がかなり低いにもかかわらず固定端部圧縮側コンクリートに過大な応力が作用し、そのためコンクリートが弾性範囲を越えて、端部回転を増幅させたのではないかとおもわれる。

### 5. まとめ

スパン80cm、スラブ厚12cmのキャンチレバースラブNo.9 ( $F_c=189 \text{ kg/cm}^2$ )、No.10 ( $F_c=141 \text{ kg/cm}^2$ )に設計荷重の大きさを持続载荷したところ、約5年経過時のたわみはそれぞれ10.4、13.9mmであり、これはスパンたわみ比で1/77、1/58を示し、かなり大きいたわみを生じた。このように大きいたわみを生じた原因は、曲げたわみの他にスタブ内からの鉄筋拔出に伴う付加たわみによるものと考えられる。

付加たわみを考慮した変形計算法を用いて検討したところ、コンクリート強度の違いがたわみに及ぼす影響は、計算値ではそれほど差が認められないものの測定結果ではコンクリート強度が低い場合たわみ変形の面でもかなり不利という結果であった。No.9スラブは本文の解析手法を用いてほぼ長期たわみの動きを推測できたが、コンクリート強度の低いNo.10スラブは、測定たわみの方が大きかった。

付加たわみの計算を任意の部材にも適用できるよう簡便な鉄筋拔出し量計算式と付加たわみ計算図を提案した。

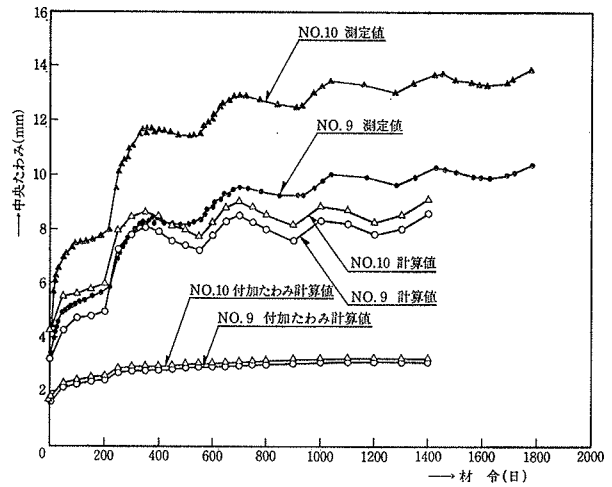


図-15 たわみ測定値と計算値の比較

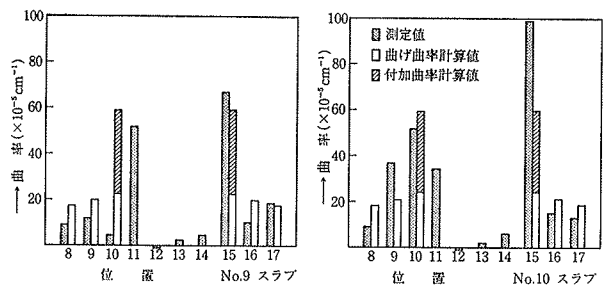


図-16 曲率測定値と計算値の比較

### 参考文献

- 1) 小柳, 他: R.C. スラブの長期におけるひびわれ変形に関する研究, 大林組技術研究所報, (その1) No. 12, (その2) No. 15, (その4) No. 19
- 2) 森田司郎: 鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究, 学位論文, (昭和43. 4)
- 3) 東 洋一, 他: 鉄筋コンクリート帯スラブのたわみとスタブ内の付着について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和43. 10)