

## P C 片持ばりの塑性変形に関する実験的研究 (1)

中 島 儀 八\*・中 島 泰 一\*  
山 本 隆 治\*・山 内 博 司\*

## 1. 序 論

戦後、プレストレスト コンクリートが広く実用に供されるようになって以来、その需要量は増加の一途をたどり、とくに橋梁の分野において大きな発展をとげた。また最近では長大スパンの橋梁もさかんに建設されるようになった。数多くある P C 工法のなかでもドイツより技術導入した Dywidag 工法は、P C 固有の、ならびにこの工法独自の特徴を発揮して、長大橋梁を比較的立地条件を超越して、安全に経済的に、確実に施工できる可能性をもっている。

しかし、最近議論の対象とされているように、P C 片持ばりの塑性たわみが問題となってきた。この塑性たわみを解明するために模型を製作し、従来設計計算に用いられている諸数値あるいは計算式の妥当性を確かめようとしたのが、この一連の実験である。

コンクリートの塑性変形に関する一連の実験として、

- 1) P C 片持ばりの塑性たわみに関する実験
- 2) 応力が変化するときのクリープについて
- 3) 弾性ひずみ、弾性係数に関する実験
- 4) 乾燥収縮に関する予備の実験
- 5) ブロック打ちコンクリートのクリープについて

などの実験を行なった。1) はコンクリートの塑性ひずみによる片持ばりのたわみを実測したものであり、2) は遅発弾性ひずみに関するもの、3) はコンクリートの弾性係数とその増大による弾性ひずみの変化を調べようとした実験である。4) は通風状況と鉄筋比を変化させたときの乾燥収縮の変化を調べようとしたものであり、5) はブロック打ちと一体打ちコンクリートの塑性ひずみの差を調べようとするものである。当報告では 1) と 3) についてのべ、2) は次号に報告する。4) と 5) については実験開始後間もないので、またの機会にゆずりたい。

## 2. 塑性たわみ計算式

はりの施工後のたわみはコンクリートの時間依存の塑性変形によることは明白である。その塑性変形は、クリープ、乾燥収縮、回復クリープの三つが考えられる。これらの実験データは種々の条件に左右される<sup>1)2)3)</sup>。よってデータのばらつきも相当大きいことは覚悟しなければならぬ。したがって日本の気候、地理条件を考え合わせて種々の条件に対して妥当な数字を設計に取り入れるより方法がない。現在クリープに関してつぎの二つの実験法則が成立すると考えられている。

a) クリープひずみは導入時弾性ひずみに比例する (比例定数がクリープ係数  $\phi$  である)。

b) 同一コンクリートではクリープ係数  $\phi$  の進行は一定不変である。

a) はクリープのフックの法則といわれ、導入応力と、コンクリート圧縮強度の比が 1/3 以下の範囲ではほぼ成立し、比がこれより大きくなるにつれて急激に上昇し、a) はまったく成立しなくなる。b) は重ね合わせの法則と呼ばれ、導入後初期のあいだは遅発弾性変形が存在するから成立は認めたいが、計算上、施工中、施工後のクリープ量を区別して把握するのに便利な法則である。

乾燥収縮と鋼棒の応力弛緩は理論の便利さから、クリープに比例すると仮定される。最後に回復クリープについては、応力が変化する場合にのみ問題になる。一般に回復クリープは、導入材令のおそいコンクリートでは問題にならない程度の量であるが、硬練りの早期導入のコンクリートでは、必らずしも無視できないと思われる。当然応力変化量に比例する<sup>4)</sup>。これについては次号にのべたい。

たわみの原因となる力学的あるいは幾何学的なモーメント、緊張力の減少量の理論式は、坂・岡田<sup>5)</sup>、Busemann<sup>5)</sup>、Leonhardt<sup>6)</sup>、その他などの研究者が発表されているがいずれも基本的な内容は同じである。仮定のなかには、疑問点のつくものもあるが、コンクリートの塑性

\* 住友建設株式会社

ひずみは不明確なものであるから、むやみと厳密に解いても無意味である。要するに、ほぼ妥当な理論で、安全側の絶対量をつかむことができれば十分としなければならない。このように考えるとたわみの原因となる曲率変化をもたらすモーメントは、

$$M = M_i \cdot \varphi + \Delta P \cdot e \cdot (1 + R \cdot \varphi)$$

ここに、 $M_i = (M_d - P_0 \cdot e)$  : 施工直後のモーメント

$\varphi$  : クリープ係数

$P_0, e$  : 導入緊張力とその偏心量

$\Delta P$  : 緊張力の減少量

$k$  : ある定数

上式中第一項は、「塑性たわみは初期弾性たわみの  $\varphi$  倍だけおこる」ことを示しているから、 $e=0$  の桁を製作してたわみを測定すれば、クリープ係数  $\varphi$  を簡単に測定することができる(実験桁II群)。第二項は鋼棒が偏心している影響を示し、鋼棒応力の減少による弾性たわみとそれのなすクリープたわみとから成り立っている。式中  $k$  の値は、回復クリープがない場合は  $1/2$  と理論上計算され、ある場合は定数とは考えられないが  $0.5 \sim 0.75$  程度の値となる(実験桁I群)。鋼棒応力減少量  $\Delta P$  は、次式で表わすことができる。

$$\Delta P = \frac{A_P \cdot \epsilon_{ce0} \cdot \varphi + \epsilon_s E_P + r \sigma_{P0}}{1 + \frac{E_P A_P}{E_C A_C} \left(1 + \frac{A_C e^2}{I}\right)}$$

ここに  $A_C I$  : コンクリートの断面積

断面二次モーメント

$A_P, E_P, \sigma_{P0}$  : 鋼棒の断面積, 弾性係数, 初期応力

$r$  : 鋼棒のリラクゼーション

$\epsilon_{ce0}$  : コンクリートの鋼棒位置における初期弾性ひずみ

$\epsilon_s$  : 乾燥収縮量

### 3. 実験概要

a) 実験供試体の種類 実験供試体の種類は 表-1 に示すとおりである。

b) 供試体寸法図 実験供試体の寸法を 図-1 に示す。図-1 供試体寸法図

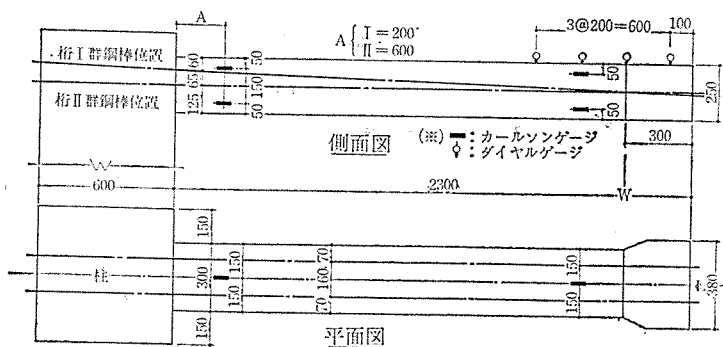


表-1 供試体種類

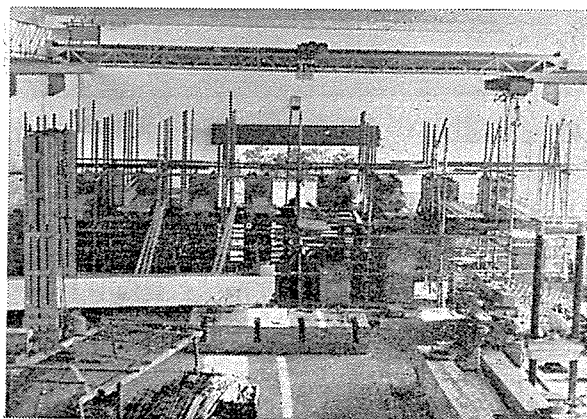
	荷重 (kg/cm <sup>2</sup> )	緊張力 (ton)	載荷点の初期たわみ (mm)	導入材令 (日)	桁番号	
$M_i \neq 0$	桁 I $\sigma_{c0}=73$ ( $W=1.4t$ )	54.8	0.1306	2.5	I-2.5-14	
		53.0	0.1238	3	3	
		53.4	0.1147	4	4	
		55.0	0.1005	7	7	
	群 II $\sigma_{c0}=36$ ( $W=0.6t$ )	24.7	0.0964	2.5	I-2.5-6	
		27.5	0.0914	3	3	
		28.6	0.0847	4	4	
$e=0$	桁 I $W=0.5t$	49.1	2.7183	2.5	II-2.5-5	
		51.6	2.5753	3	3	
		51.7	2.3869	4	4	
		51.6	2.0911	7	7	
	群 II $W=0.1t$	58.5	1.1968	2.5	II-2.5-1	
		51.0	1.1338	3	3	
		48.3	1.0509	4	4	
		47.7	0.9206	7	7	
	クリープ桁 I	$\sigma_{c0}=65$	51.6		7	
	クリープ桁 II	$\sigma_{c0}=65$	50.0		3	
	乾燥収縮					

す。

c) コンクリート打設 1965. 2. 1

d) コンクリート配合 配合として通常 PC に用いられるものを採用し ( $\sigma_{28}=400 \text{ kg/cm}^2$ ),  $C=400 \text{ kg}$ ,  $S=645 \text{ kg}$ ,  $G=1215 \text{ kg}$ ,  $w/c=41.3\%$ , 粗骨材の最大寸法  $25 \text{ mm}$  とした。1. のすべての実験においてこの配合を用いた。セメントは早強セメントを用いた。

写真-1 ステージング全景

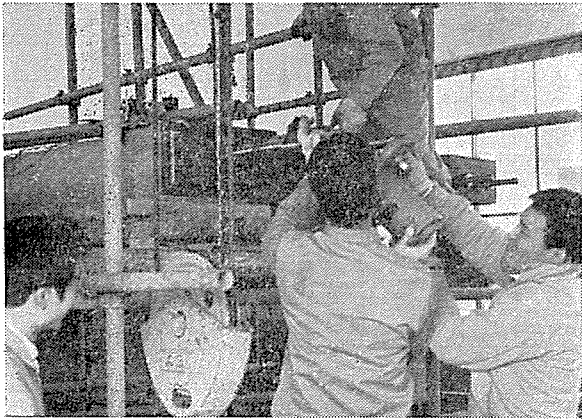


e) 外的条件 養生は行なわず、温度、湿度の管理も行なわなかった。温度は測定的一年間に、最高  $36^\circ\text{C}$ 、最低  $3^\circ\text{C}$  の季節変化、日変化を行ない、湿度は  $30 \sim 60\%$  の低湿度であった。

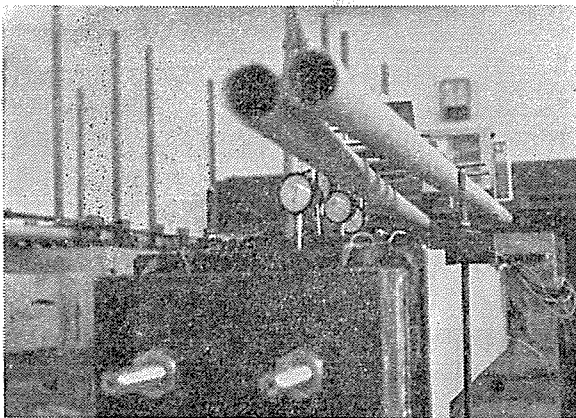
f) 供試体の製作、導入、載荷  $600 \times 600 \times 2000 \text{ mm}$  の柱を立て、鋼棒でアンカーし、つぎにステージングを組んで(写真-1)片持ばりの型わくを組み、鉄筋および鋼棒の

配置，ゲージのセットを行なったのち型わくの調整を行ない，2台の生コン車でいっせいにコンクリートを打設した。所要時間は5時間であった。そして所定の材令経過後，2台のジャッキにてプレストレスを導入し，その後荷重を載せた（写真—2，3）。

写真—2 緊張作業



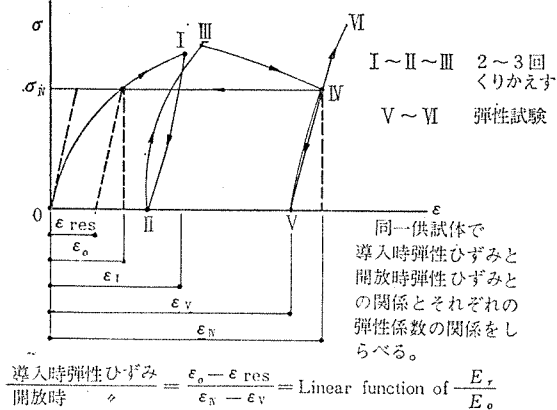
写真—3 測定箇所（ダイヤルゲージ）



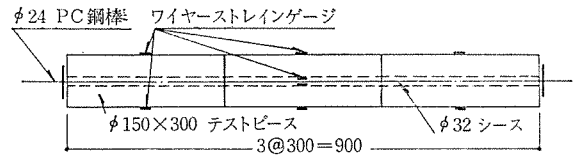
g) 測定計器 図—1 に示すごとく，ダイヤルゲージでたわみを（写真—3），カールソン型ひずみ計でコンクリートのひずみを測定した（写真—4）。

h) 関連実験 「弾性ひずみはヤング係数の増大について減少するか否か」また「ヤング係数と強度との関

図—2 (a) 基本的概念



図—2 (b) 供試体



係はどうか」などを調べるために，図—2 (a) の考え方で図—2 (b) に示す供試体を用いて一連の実験を行なった。供試体の種類は，導入応力を 0, 40, 80, 120 kg/cm<sup>2</sup> の4種類に分け，それぞれの種類について，導入材令を 2, 3, 4, 7 日とした。測定材令は 2, 3, 4, 7, 14, 28 日とした。その場合，応力履歴のある供試体には必ず無応力の供試体をとって対応させた。

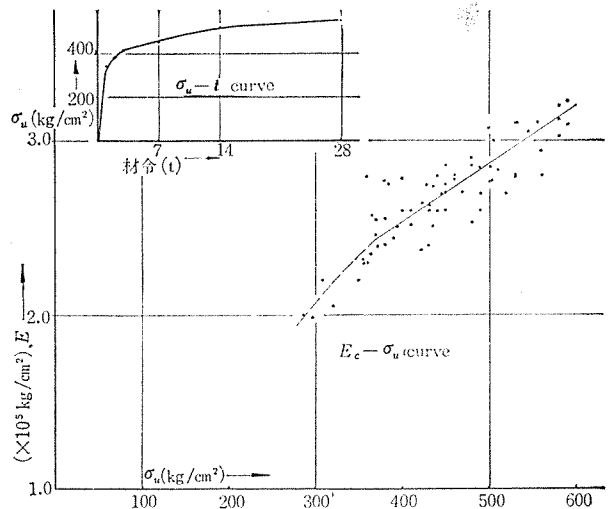
#### 4. 測定結果とそれに対する若干の考察

論点をせばめる意味でここであつかう議論は，橋梁の構造形式として，一般に Dywidag 工法に用いられる片持ばり形式の橋梁を念頭におき，コンクリートにおいても，3. に示すような一般に P C 橋梁に用いられる富配合なコンクリートを議論の対象にすることを最初にお断わりしておかなければならない。

##### (1) コンクリートの弾性係数 $E_c$

前述の関連実験を行なった結果 図—3 のようになった。当初の他の一つの目的であった弾性ひずみと弾性係数の時間的変化に関する問題に対しては明確な解答は得られなかったが，理論的には  $E_c$  が増大すれば応力一定時においては，導入時弾性ひずみは減少しなければならない。しかしながら，コンクリートは粘弾性体であり，早期のコンクリートは不安定であると考えられるので，とくに超早期材令時において導入した弾性ひずみが完全に可逆的であるとは考えられない。実際には比率的なものである。図—3 の曲線は応力履歴のない供試体に関するものである。強度，弾性係数は他の条件が同じであ

図—3 弾性係数試験結果



れば、部材の大小、部材の形状、応力履歴によって異なると思われるようであるが、その関係は量的には明確でない。

当実験においては、無載荷のものに対して、応力履歴が  $40 \text{ kg/cm}^2$  あるごとに、5% 程度上昇する結果が得られた。実際の橋梁のコンクリートヤング係数が、この実験で得られた値より小さいとは思われないが、得られた値は意外に小さい。この弾性係数は  $\sigma_c = 100 \text{ kg/cm}^2$  における接線をとったものである。コンクリートの強度、弾性係数については基本的なものであるから数多くの研究者がデータを残されているがとくにヤング係数が、PC指針<sup>7)</sup>の  $3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma_{28} = 400 \text{ kg/cm}^2$ ) とくらべて差が大きいことは注目にあたいする。

(2) コンクリートのクリープ

実験桁Ⅱ群は、理論上「クリープは弾性ひずみに比例する」という Davis-Granville の法則に根拠をおいた曲げクリープ量の測定を行なったものである。よって塑性たわみは初期弾性たわみに比例するから、比例定数であるクリープ係数  $\phi$  をプロットしたものである。星印の曲線は、クリープ桁によって軸方向クリープひずみを測定し、クリープ係数  $\phi$  を計算してグラフにしたもので

図-4 (a) クリープ進行曲線

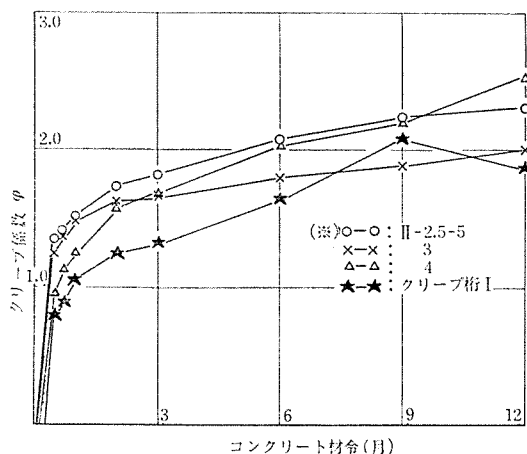
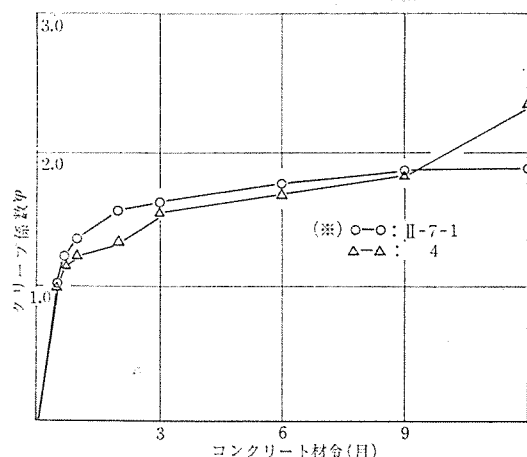


図-4 (b) クリープ進行曲線



ある。

この図からまずわかることは、導入材令による区別が判然としないことである。これは導入材令 2.5, 3, 4, 7日を  $\sigma/\sigma_{\infty}$  で表わせば、それぞれ 33, 37, 43, 54% であり、非常に近接して導入を行なった結果、誤差の方が大きかったとも考えられる。また、変位というひずみより単位の大きいもので測定したことにもよるであろうが、超早期のまだ不安定な時期においては、必ずしも大小関係ははっきりしなくて、ばらつきが大きくなるとも考えられるのではないか。クリープの一実験であるこれらの数少ないデータから推断を下すことは無理であるかもしれないが、概略 Davis-Granville の法則は成立すると考えられる。たわみから計算したクリープ係数(曲げひずみクリープ)と星印で表わす軸方向力によるクリープ係数(クリープ桁)とを比較すると、曲げひずみクリープの方が軸方向力によるクリープよりも大きいことがわかる。

つぎにクリープの量についてふれてみる。

図-4 から明らかなごとく、硬練りの超早期導入のコンクリートにおいても、むやみと大きな値とはならない。このグラフでは、材令の区別が判然としないので実験式には、わざとあてはめなかったが、グラフから推測すると、二、三カ月で 50%, 1年で 80%, 2~2.5年で、ほとんど終了するであろうと思われる。その最終値は、2.5~2.7 程度であろう。同様な環境条件における他の研究者のデータをいくつかひろってみると、坂・岡田・六車著「プレストレストコンクリート」の pp.181~184 によると、DIN 4227 の規定が適当であるとされており、猪股博士は Leonhardt とほぼ同様な試験結果であったと報告された<sup>2)</sup>。また六車・竹原氏<sup>8), 9)</sup> は湿度は違うが普通セメントの富配合なコンクリートの試験で、7日導入( $\sigma_u = 280 \text{ kg/cm}^2$ )のコンクリートで  $\phi_{\infty} = 5.8$ , さらに当実験室と同じような配合で、普通セメントを用いて試験された結果  $\phi = 2.48 \sim 3.63$  であったと報告された。Leonhardt の著書を見ると  $\phi = 3.6 \sim 4.2$  程度、猪股氏の著書から転記させていただくと  $R_{0.5}$  によれば、 $\phi = 4.0$  程度となる。これらを見ると当実験の結果がずいぶん小さな値であることがわかる。これはつぎの項でふれるように乾燥収縮が非常に大きい場合の特徴ではなかろうか。つぎに PC 指針の規定から  $\sigma_{\infty} = 440 \text{ kg/cm}^2$  であると考えれば、DIN 4227<sup>10)</sup> では、 $\phi = 3.5 \sim 6$ , PC 指針では  $\phi = 3 \sim 5.5$  となる。一方、施工の面から考えると、一般に導入はコンクリートの圧縮強度が約  $250 \text{ kg/cm}^2$  に達してから行なうから  $\phi = 3.8$  と計算される。実際には、最終強度は  $500 \sim 550 \text{ kg/cm}^2$  に達するのが普通であるから、 $\phi = 4.5 \sim 5$  となる。

以上のような比較からPC指針の規定における諸数値は適当な数字を与えていることがわかるであろう。しかも非常に低湿度なものと比較しているから、規定はほぼ湿度の影響を超越していると考えてさしつかえない。コンクリートのクリープは、コンクリートに考えられるすべての要素が影響因子と考えられ、すべてを網羅する式を与えることは不可能にちかい。主なものは一般に湿度、配合、 $\sigma/\sigma_0$  が考えられている。湿度は低湿度、配合は  $w/c$  が高いほど、 $\sigma/\sigma_0$  は小なればなるほど、クリープは大きくなる。くわしいことはここでは論外であるので省略する。

最後に、クリープの進行速度について簡単にふれる。クリープの進行速度もクリープ量以上にばらつきが大きいのであるが、一般に筆者らの経験では、実験室における速度は比較的速く、導入後1年もたてば90%以上終了しているようであるが、実際の橋梁、たとえばドイツの実施例やわが国の実施例を参照しても、その速度は室内のものにくらべてずいぶん遅いようである。その値はほぼ2~3年で95%程度である。

(3) 乾燥収縮

片持ばり供試体と同寸法の供試体で測定した結果図-5のとおりとなった。材令1年において  $500 \times 10^{-6}$  最終値は  $600 \times 10^{-6}$  程度に達するのであろう。乾燥収縮は  $\epsilon_s$ 、水・セメント比、セメント量、モルタル量、部材厚さ、温度、湿度、通風状況、締固め方法、養生状態、鉄筋比などの影響をうけるが、ここでとくに問題になるのは、湿度、通風状況、鉄筋比である。

上記の乾燥収縮度測定結果は、PC指針に規定される乾燥収縮度の2倍以上の値である。したがって、湿度を超越した規定にしたがうと湿度いかによっては小さくとりすぎることも起りうるのではなからうか。

箱型断面の場合、上スラブは舗装・地覆によって外気からしゃ断されている面があり、下スラブは全然ない。鉄筋比は、上ス

図-5 乾燥収縮

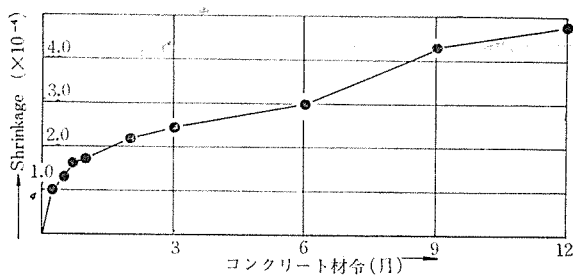
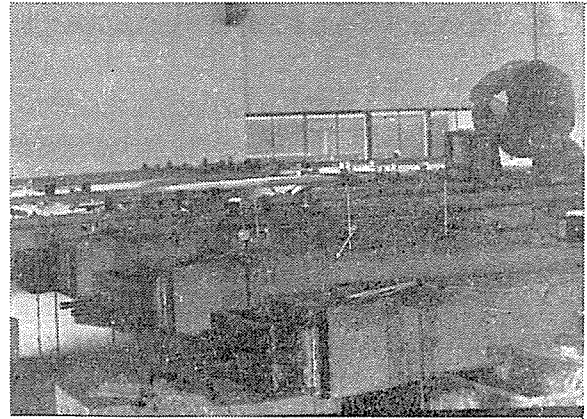


写真-4 供試体全景



ラブは鉄筋・鋼棒を合わせると3%程度にもなり、下スラブは0.5%になるかどうかという程度である。

この上下スラブの条件の差違が上下スラブの乾燥収縮度に相異を生ぜしめ、はりにたわみを生じさせる原因となる。計算上の塑性たわみの小さいものでは、とくにこれによるたわみが相対的に大きく表われる結果となる。こ

図-6 (a) 桁 I 群たわみ計算値と実測値の比較

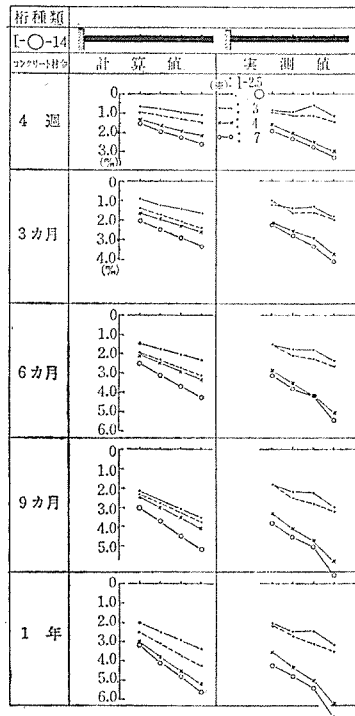
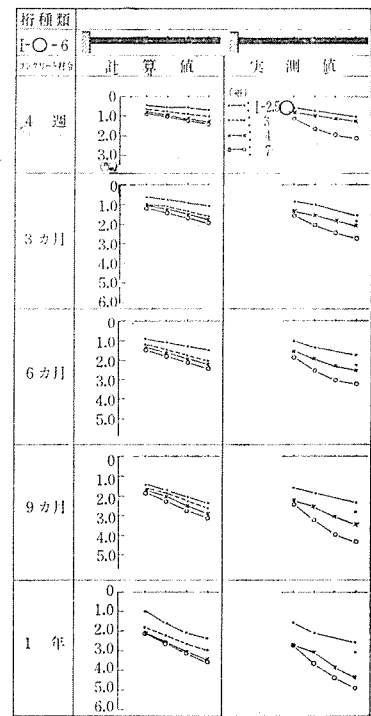


図-5 (b) たわみ計算値と実測値の比較



の差による変位は力に関係のない、まったく幾何学的な変形であることは、合成桁をのぞいては明白である。上スラブの乾燥収縮度が前述のごとき大きな値となるとは考えられない。おそらく規定の値以下で十分であろう。以上のような考察から建設地点の湿度を知る必要があることは当然であり、上下スラブの  $\epsilon_s$  の差によるたわみは  $w = \iint 4\epsilon/h \cdot dx \cdot dx$  で表わされ ( $h$ : 上下スラブの中

心間隔),  $d\epsilon/h$  はピアー上で最大, ヒンジで0となる三角または放物線分布ぐらいを考えればよいのではないかと考える。

(4) たわみの計算値と実測値の比較

(2), (3) の諸資料より桁I群のたわみを2. の理論式によって計算し, 実測値と比較すると図-6のようになる。ただし計算値には, 鋼棒のリラクセーションを3%と仮定し, 2. の理論式における  $k$  の値は0.5とした。図から計算値の方が実測値よりたわみが小さいことがわかる。

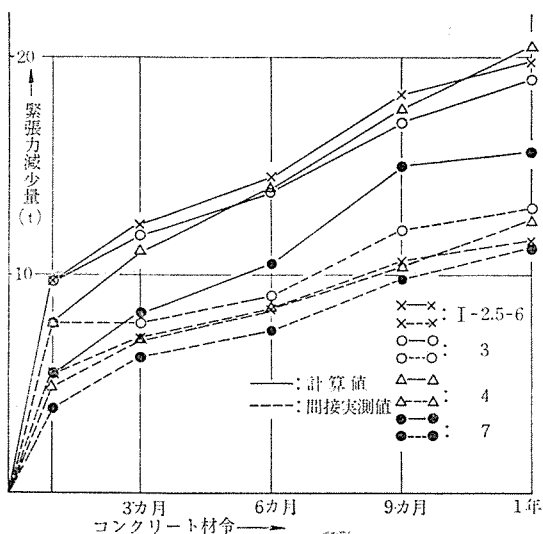
たわみ曲線の形状をみると実測値の方が計算値よりわずかではあるが急変化であることがわかる。これは計算値は桁の中心におけるデータを全断面に適用したが, 桁の先端の方が空気に接している面が多いために塑性ひずみが何%か割増しされた結果ではないかと考えられる。

鋼棒応力減少量の計算値とカールソンひずみ計によるコンクリートひずみ実測値から推定した間接実測値を比較すると図-7のようになる。若い材令で導入した2種類の供試体のデータにおいて間接実測値と計算値とでは減少量が大きくく違っていることがわかる。

(5) 回復クリープおよびその他の影響

前項でみたように, たわみについては計算値より実測値の方が大きいこと, 鋼棒応力減少量については計算値より間接実測値の方が小さいことから考えると, 負のクリープすなわち応力が変化したときの遅発弾性変形が, 硬練り早期導入コンクリートでは大きく影響をすることはないかと疑問をもつにいたった。これについての実験, 考察についてはまたあらためてのべることにする。その他の影響としてせん断応力, 斜引張鋼棒の影響があるが, これらの塑性変形機構がよくわからないので断定できないが, 斜引張鋼棒が密に入っている断面ではその

図-7 鋼棒応力減少量



水平成分によって, クリープ変形が増加しているとも考えられる。一般にPC片持ばりは自重を軽減するために断面を比較的急に変化させるが, 十分連続的であり, 応力集中が起るほどの急変化とは考えられないから, 材料力学的な応力集中が起るとは想像できない。せん断力については, 弾性学的にはそう大きく影響するとは考えられない。数%の域を出ないのではなからうか。

5. む す び

1) クリープ係数の最終値は, 土木学会PC指針の規定にしたがって十分である。進行速度は2~3年で95%程度をとりたい。

2) 乾燥収縮について: 上スラブについては規定にしたがって十分であろうが, 下スラブについては必ずしも規定にしたがって十分安全とはいえないのではないか。架橋地点の湿度を知り  $Ro\delta$  のグラフにあてはめるのも一方法である。

上下スラブにおける乾燥収縮度の差により, とくに, 塑性たわみの小さい橋では相対的にたわみが大きくなるから設計には一考を要する。

3) 2. の諸式は途中はどうであれ, コンクリートの塑性変形終了付近では, ほぼその変形量を追うことができる。しかしその場合, 第1式の第1項, すなわち初期弾性たわみに比例する塑性たわみの計算には「クリープは初期弾性係数を基準とする」という原則からいっても導入時弾性係数をとる必要がある。したがって, 最終ブロック緊張時の各断面の弾性係数  $E_C$  をとる。第2式の  $E_P \cdot \epsilon_{ceo} \cdot \phi$  の  $\epsilon_{ceo}$  の計算も, 導入時のそれを考えてやるべきである。

参 考 文 献

- 1) 岡田 清: コンクリートのクリープ, 日本セメント技術協会パンフレット第29号
- 2) 猪股俊司: プレストレストコンクリートの設計および施工, 技報堂
- 3) 坂・岡田・六車: プレストレスト コンクリート, 朝倉書店
- 4) F. Roll: "Long-Time Creep-Recovery of Highly Stressed Concrete Cylinders", Symposium on Creep of Concrete SP-9, pp. 95~114.
- 5) Busemann; "Kriechberechnung von Verbundträgern unter Benutzung von zwei Kriechfasern", Bauingenieur, Heft 11 (1950)
- 6) Leonhardt: "Spannbeton für die Praxis"
- 7) 土木学会: プレストレスト コンクリート設計施工指針, (昭 36)
- 8) 六車・竹原: "かた練りコンクリートのクリープ" 日本セメント技術協会 XVIII, pp. 373~376 (昭. 39)
- 9) 竹原: 硬練り"コンクリートのクリープに関する実験的研究" PC技術協会第6回年次学術講演会概要, pp. 11~12 (1966. 2)
- 10) DIN 4277: Bestimmungen des deutschen Ausschusses für Stahlbeton-Spannbeton-Richtlinien für Bemessung und Ausführung Okt. (1953)

(1966.6.10・受付)