

# RC 10 径間連続床版橋における長期測定解析結果

## MEASUREMENTS ON AN ACTUAL RC 10 SPAN CONTINUOUS SLAB BRIDGE

星 埜 正 明\*・内 田 道 雄\*\*

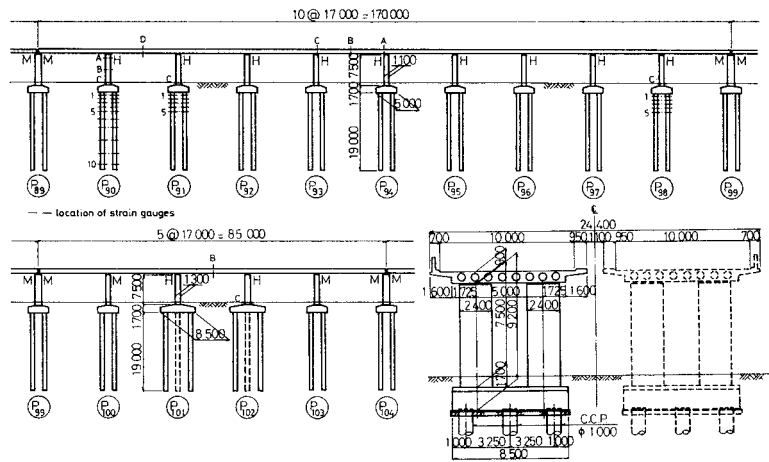
By Masaaki HOSHINO and Michio UCHIDA

### 1. 序 言

本報告は RC 10 径間連続中空床版橋において 3 年間にわたって行った長期測定の解析結果について述べるものである。

高速道路における高架橋では、走行性あるいは維持管理上の問題から、できるだけ伸縮装置の数を少なくした多径間連続形式を採用することが望ましいといえる。このような形式を自重の大きい RC 構造に用いた場合、地震時の慣性力の分散を

図るために、多くの橋脚上で上部工を橋軸方向にも固定支持とすることが必要となる。この場合、一方では、上部工の温度変化あるいは乾燥収縮による伸縮の影響が大きくなり、特に、橋脚および基礎の設計が厳しくなる。このような構造的な特徴を有する多径間連続高架橋に関して一連の調査研究が実施され、従来より広く使用されている 5 径間連続橋を 10 径間あるいは 20 径間にまで拡張することが検討された<sup>1)~3)</sup>。その最初の具体的な成果として北陸自動車道金沢高架橋の一部に RC 10 径間連続床版橋が施工された。その際、設計の考え方を検証すると同時に、この種形式の高架橋の設計に対する資料の収集を目的として実橋で組織的な試験あるいは測定を行った<sup>4)</sup>。ここで述べる長期測定もその一つで、高架橋の温度変化あるいは乾燥収縮の大きさを定量的にとらえるとともに、それに伴って生じる構造各部の動きを詳細に追跡することを意図している。



図一 10 径間連続および 5 径間連続高架橋とひずみ測定位置

### 2. RC 10 径間連続中空床版橋の概要

測定を行った RC 10 径間連続橋の概略図を 図一1 に示す。上部工は中空部を有する床版桁である。橋脚は独立な 2 脚柱から成っている。基礎はくい基礎であり、場所打ち RC ぐい (φ 1 m, l=19 m) が 1 橋脚につき 6 本ずつ使用されている。図一2 に簡単な施工工程を示す。床版のコンクリート打設は全支保工をあらかじめ組んだうえで 3 回に分けて相前後して行った。

10 径間連続橋の前には 従来から 広く用いられてい

施 工 程 序	年 月			
	1976	1977	1978	1979
基礎ぐい	—	—	—	—
フーチング	—	—	—	—
脚 柱	—	—	—	—
床 版	—	—	—	—
高欄・地覆	—	—	—	—
橋 設	—	—	—	—
交通への供用	—	—	—	—
測定	—	—	—	—
日 変 化	—	—	—	—

図二 施工工程と測定日時

\* 正会員 工博 Dr.-Ing. 新日本技研(株)

\*\* 正会員 日本道路公団広島建設局六日市工事事務所

る5径間連続橋が続いている。測定は比較の意味から5径間連続橋でも行った。10径間連続橋と5径間連続橋を比べたとき構造上の大きな相違は、前者では9つの橋脚上(P90~P98)で床版が橋軸方向に固定支持(メナーゼヒンジで結合)されているのに対し、後者では中央の2橋脚(P101, P102)でのみ固定支持されていることである。このような構造上の相違は死荷重あるいは活荷重等の鉛直荷重に関してはあまり重要な意味をもたない。これに対して、橋軸方向の地震荷重あるいは床版の温度変化、乾燥収縮に関しては大きな影響を及ぼす。地震荷重については、多脚固定の10径間連続橋の方が、1橋脚当たりの分担する慣性力は小さくて済むということは明らかである。一方、温度変化あるいは乾燥収縮による床版の伸縮量は、長さにはほぼ比例すると簡単には考えてよいので、10径間連続橋の端部の橋脚、たとえば、P90およびP98に生じる曲げの大きさは5径間高架橋のP101, P102に比べ著しく大きくなる。その際、床版と橋脚の間に生じる水平力の大きさは脚柱および基礎の剛性に依存する。したがって、設計では、脚柱および基礎の変形を考慮した解析を行うようにしている。このように、床版の温度変化あるいは乾燥収縮の影響が10径間連続橋では5径間連続橋の場合より著しく大きくなり、これが多径間連続高架橋を特徴づける1つの重要な点になると同時に、設計上の大きな問題となっている。

### 3. 測定項目および要領

すでに述べたように測定は10径間高架橋とそれに隣接する5径間高架橋で行った。床版端部の伸縮量、床版の温度・ひずみ、脚柱の温度・ひずみ・傾斜角、くいのひずみ等を測定している。このうちひずみの測定位置は図-1に一点鎖線で示している。以上のほか、乾燥収縮測定用の供試体を6体製作し、3体を床版の円筒型枠内に、残り3体を測定小屋内に置いた。測定点は全部で264か所であった。ひずみの測定は主として鉄筋計(ひずみゲージ式、標点距離90mm)によったがコンクリートひずみ計(ひずみゲージ式、標点距離250mm)も一部併用した。このほか、種々の材令の供試体で使用コンクリートの弾性係数と圧縮強度を求めている。また百葉箱を設置し気温と湿度を自動記録している。

測定計器の配置にあたっては、図-1からもわかるように、同じ条件下にあると考えられる位置に重複して測点を設けるなどして、測定結果の信頼性を高めるような配慮をした。結果だけからみればやや過大な測点を設けているような印象を受けるが、測定計器の信頼性をあらかじめ正確に把握することが難しかったこと、あるいは

測定がやり直しのきかない作業であること等を考え合わせると適切な処置であったと思っている。

測定は床版打設前の1976年11月に開始し、その後3年間にわたって行った(図-2)。1977年3月までは手動で行い、その後1か月間の空白を経た後、同年4月よりすべて自動に切り換えている。測定開始直後は慎重を期し毎日測定したが、徐々に頻度を落としている。測定は原則として午前10時に行った。

測定解析では、10径間高架橋に対し1976年11月22日を、5径間高架橋に対しては同年11月3日を初日としている。いずれも床版コンクリート打設終了の翌日であり、硬化熱がかなり生じた時点である。はじめの1週間は床版の温度が急激に変化することもあり、1日に1度の測定値を採用しているが、それ以後の1年間は3日に1度に行っている。さらに、2年目、3年目では7日に1度の割合に落としている。

以上の長期測定(以下年変化の測定とよぶ)と並行して、2年目の1978年6月に2日間、8月から9月にかけて4日間、10月に4日間にわたって、気温の日変化に対する測定を行った(以下日変化の測定とよぶ、図-2)。6月および8月の測定は1時間ごとであり、11月は2時間ごとである。

## 4. 年変化の測定解析結果

### (1) 床 版

#### a) 温度と伸縮

図-3に10径間高架橋のB断面における床版の温度の3年間にわたる変化を示す。3本の線は断面の上段、中段、下段のそれぞれ3つの測定値の平均値である。D断面でも同様な測定を行っている。図-4にはB断面、D断面の平均温度(図で実線)と外気温(図で破線)の比較を示している。これらの図で縦軸は温度であり、横軸は1976年11月22日より1979年11月21日の3年間である。これらの図から次のことがいえる。

① コンクリートの硬化熱により床版の温度は外気温より約20K高くなっている。

② 床版の平均温度の年最低は1~2月に記録されている。3年間の最低は $-0.5^{\circ}\text{C}$ である。一方、年最高は7~8月に生じ、3年間では $35.6^{\circ}\text{C}$ が最大である。

③ 断面内の温度差は冬の間は小さい。その他の時期、特に、夏期は床版の上側の温度がかなり高い。断面上段の測点(表面より約70mm下がった位置)における温度と平均温度との差の最大は約9Kである。

④ 平均温度と外気温は類似の変化を示している。床版の温度の方が変化は多少緩やかである。

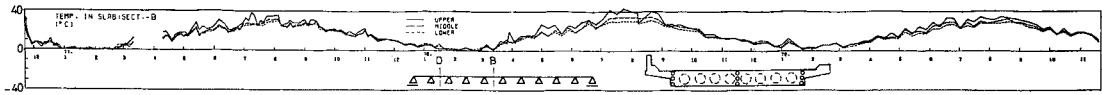


図-3 床版の温度変化

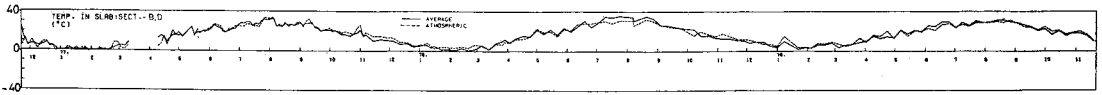


図-4 床版の平均温度と外気温の変化

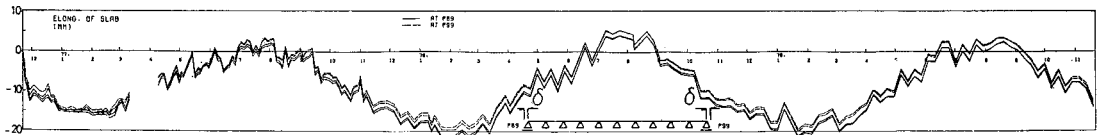


図-5 床版端部の伸縮量の変化 (10 径間高架橋)

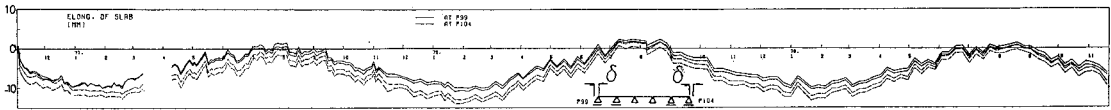


図-6 床版端部の伸縮量の変化 (5 径間高架橋)

以上は午前 10 時における温度の年変化についてであり、日変化については後で述べる。

このような温度変化に伴い床版は伸縮する。端部に設置した継目計による伸縮量の測定結果を示したのが図-5, 6である。両端での4つの測定値はよく一致していることが認められる。床版の伸縮が両端でほぼ対称に生じていることを示している。5径間高架橋における伸縮量は10径間高架橋の約1/2になっている。

床版の温度変化と比べてとき、端部の伸縮がほぼ温度と相似な動きを示していることが認められるが、実際には端部の伸縮の中にはコンクリートの乾燥収縮によるものも含まれている。このことから、逆に、床版の温度変化量と端部の伸縮量を用いて乾燥収縮度を求めることが可能である。これについては c) で述べる。

床版の温度変化  $T$  と端部の伸縮量  $\delta$  の関係をさらに明瞭に示したのが図-7である。10径間高架橋と5径間高架橋の結果を一緒にまとめている。1年目、2年目、3年目に分けて描いているが、それぞれ 20 K ずつ平行

移動し線が重ならないように配慮している。この図からも、5径間高架橋の伸縮量  $\delta$  は10径間高架橋のほぼ1/2になっていることがわかる。さらに興味あることは、2年目、3年目では  $\delta$  と  $T$  の関係が直線状になっているのに対して、1年目では伸縮量  $\delta$  が負の方向へずれていることである。これは乾燥収縮の影響と考えられる。このことから逆に、乾燥収縮は2年目以降でほとんど生じていないということがいえる。これについては c) で触れる。

図-7に示す直線の勾配からコンクリートの線膨張係数  $\alpha$  を求めることができる。1年目では上述のように乾燥収縮の影響により、長期的にみた場合  $\delta$  と  $T$  の関係は直線になっていない。そのため短期間(3日間)に生じる伸縮量は温度変化のみによるものと考え、この間の  $\delta$  と  $T$  の関係から  $\alpha$  を数多く計算し、平均値を求めた。ただし、この場合5径間高架橋では  $\delta$  の値が小さく誤差が大きいものと判断し、計算しなかった。以上のようにして求めた  $\alpha$  の値と、2年目、3年目における1年間の

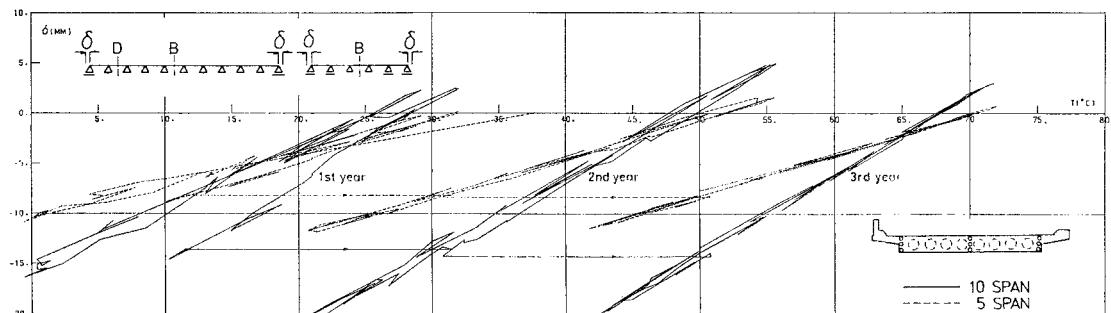


図-7 床版の温度  $T$  と端部の伸縮量  $\delta$

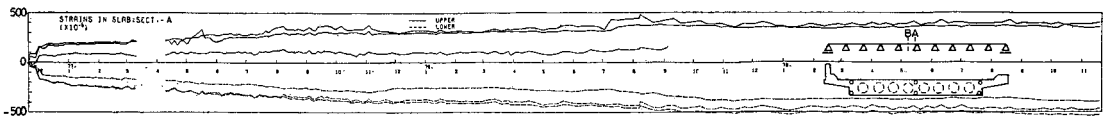


図-8 床版の断面Aにおけるひずみの変化

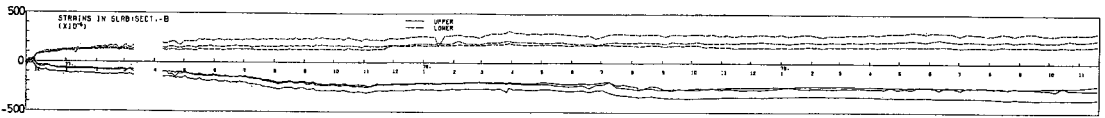


図-9 床版の断面Bにおけるひずみの変化

$\delta$ - $T$  関係から求めた  $\alpha$  の値を記すと次のようになる。

1年目短期(3日間)の  $\delta$ - $T$  関係より(10 径間)

$$\alpha = 0.91 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

2年目長期(1年間)の  $\delta$ - $T$  関係より(10 径間)

$$\alpha = 0.89 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

2年目長期(1年間)の  $\delta$ - $T$  関係より(5 径間)

$$\alpha = 0.93 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

3年目長期(1年間)の  $\delta$ - $T$  関係より(10 径間)

$$\alpha = 0.95 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

3年目長期(1年間)の  $\delta$ - $T$  関係より(5 径間)

$$\alpha = 0.95 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$\alpha$  は時間の経過とともにいくらか大きくなっているが、計算誤差の問題もあり、そのように断定はできない。いづれにしても、おおよその値としては

$$\alpha = 0.90 \sim 0.95 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

といえる。なお、ひずみの解析では一貫して  $\alpha = 0.90 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  として温度補正している。

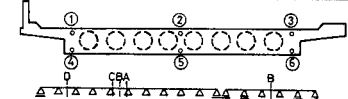
**b) ひずみ**

床版のひずみ測定は 10 径間高架橋で 4 断面、5 径間高架橋で 1 断面で行っている(図-1)。鉄筋計による測定が主であるが断面 B ではコンクリートひずみ計も併用している。測定値には計器の特性との関連もあり、温度変化が複雑に作用している。詳細については省略するが、測定値はすべて温度補正を行い、温度の影響を取り除くようにした。

以上のようにして求めたひずみの 3 年間にわたる変化を示したのが 図-8, 9 である。10 径間高架橋の断面 A と B について示している。実線は上段に配置した 3 つの計器からの値であり、破線は下段のものである。10 径間高架橋では、1976 年 11 月 29 日と 12 月 3 日の間に床版の支保工が取りはずされている。この間に自重が床版に作用したと考えられる。図にこのことは明瞭に認められる。その後のひずみの変化は主としてコンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるものである。クリープの作用はひずみを同符号の方へ動かすことになり、乾燥収縮によってはひずみは全体に圧縮側へ移行することになる。これについては後で再び触れることにして、ここで

表-1 床版自重による床版のひずみ

断面と位置	測定値 ( $\times 10^5$ )		計算値 ( $\times 10^5$ )		測定値 / 計算値	
	実測値	平均値	計算値	計算値		
10 径間	断面 A	①	112.4	87.0	63.1	1.38
		②	74.4			
		③	74.3			
	断面 B	④	-119.8	-56.7	-44.9	1.26
		⑤	-85.3			
		⑥	-117.6			
5 径間	断面 Bc	⑦	-57.4	-56.2	-44.9	1.25
		⑧	-61.9			
		⑨	-52.4			
	断面 C	⑩	64.9	53.2	50.9	1.05
		⑪	37.0			
		⑫	57.7			
10 径間	断面 D	⑬	74.3	68.0	62.7	1.08
		⑭	67.0			
		⑮	62.6			
	断面 E	⑯	-111.6	-101.7	-78.7	1.29
		⑰	-71.5			
		⑱	-122.1			
5 径間	断面 B	⑲	-68.5	-66.8	-37.4	1.79
		⑳	-70.4			
		㉑	-61.5			
	断面 Bc	㉒	60.9	50.2	43.0	1.17
		㉓	36.6			
		㉔	53.0			
10 径間	断面 B	㉕	-37.8	-46.2	-48.9	0.94
		㉖	-51.8			
		㉗	-48.9			
	断面 Bc	㉘	62.0	60.6	55.5	1.09
		㉙	51.6			
		㉚	68.2			
5 径間	断面 Bc	㉛	-40.3	-42.3	-48.9	0.87
		㉜	-34.2			
		㉝	-52.3			
	断面 B	㉞	56.3	55.8	55.5	1.01
		㉟	49.1			
		㊱	62.0			



はまず床版の自重によるひずみを検討する。

表-1 に床版自重によるひずみの測定値と計算値と比較して示している。表中 Bc と記してあるのはコンクリートひずみ計による測定値であることを表わしている。計算値は断面二次モーメント一定の連続ばりで全断面有効として求めている。弾性係数は供試体の試験結果から  $E_c = 24 \text{ GN/m}^2$  としている。表からわかるように測定値と計算値は一般に良好な対応を示している。10 径間高架橋では測定値の方が若干大きい傾向にあるが、これは計算値を求める際に使用した弾性係数  $E_c$  がやや大きめであったことおよびひび割れの影響があったためと考えられる。なお、実橋で床版のひび割れは実際に観察されており、10 径間高架橋と 5 径間高架橋での発生状況の相違などについて、他工区のものも含めて、測定開始前に調査を行っている。その結果によると、ひび割れはいわゆるヘヤクラックであり、支点上で上側に支間中央で

下側に生じるようなものである。必ずしもすべての支間で生じているわけではなく部分的である。他工区も含めて全体としてみると、10 径間高架橋と 5 径間高架橋で明瞭な差は認められないが、測定対象区間については 10 径間高架橋の方が多く、5 径間高架橋ではわずかしか生じていなかった。

床版の打設後に加わる高欄と地覆あるいは舗装の重量は床版の重量のそれぞれ、5~10% 程度であり、ひずみへの影響は小さい。1978 年 10 月から供用開始されているが、交通量が少ないこと、活荷重は死荷重に比べ一般に小さいこと等により、ひずみの測定値にはほとんど影響が認められない。

ここでは省略したが、他の断面における長期測定結果も合わせてみたとき、一般に、圧縮側のひずみは 3 つの測点でよく合っていることが認められる。これに対して、引張側のひずみは 3 つの測点で異なった動きをしている。引張ひずみのこのようなばらつきはひび割れの影響と考えられる。ひび割れの生じた断面ではコンクリートの圧縮応力も当然増加するがその増加量はあまり大きくない。一方、引張側の鉄筋は引張力の大部分を分担しなければならぬためひずみは飛躍的に増加するのである。ただし、測定値はある点でのひずみ値ではなく、ある長さ(標点距離)にわたっての平均的なひずみ値を表わしている。したがって、ひび割れの影響はいくらか緩和された形で測定値に入ってくるが、いずれにせよひび割れは局部的な性質を有するため、引張ひずみの値が、測定する場所によって異なった変化を示しているものと考えられる。

次に、ひずみの測定値からコンクリートのクリープ係数  $\varphi$  と乾燥収縮度  $\epsilon_s$  を求めることを考えよう。温度の影響を除去したひずみの値は、死荷重によるものといつてよいはずであるから、次の式が導ける。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_u &= \epsilon_{Du} \cdot \varphi + \epsilon_s \\ \epsilon_l &= \epsilon_{Dl} \cdot \varphi + \epsilon_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\epsilon_u$  : 断面上段のひずみ測定値、

$\epsilon_l$  : 断面下段のひずみ測定値、 $\epsilon_{Du}$  : 断面上段の死荷重によるひずみ測定値、 $\epsilon_{Dl}$  : 断面下段の死荷重によるひずみ測定値

この式の中で未知数は  $\varphi$  と  $\epsilon_s$  であり、他の値は測定されているので、 $\varphi$  と  $\epsilon_s$  を計算することができる。このようにして求めた  $\varphi$  と  $\epsilon_s$  の値は c) でまとめて検討することにする。

c) 乾燥収縮度とクリープ係数

乾燥収縮度の値は供試体におけるひずみ測定値と a) で述べたように床版端部の伸縮量あるいは b) で記したような床版のひずみ測定値から求めることが可能である。円筒型枠内の 3 つの供試体で得られた乾燥収縮度の平均値と端部の伸縮量から求めた値とを示したのが 図-10 である。前者については供試体の温度は床版の温度と等しいと仮定して、温度補正を行っている。図からわかるように端部の伸縮量から求めた乾燥収縮度は 10 径間高架橋と 5 径間高架橋で類似の変化をしているが、円筒型枠内の供試体の測定値は一部大きく乱れている。この乱れの原因はよくわからないが、円筒型枠内の温度あるいは湿度等の条件がかなり異常なものとなっていたことも考えられる。いずれにしても測定精度は落ちているといえる。

同様なグラフを式 (1) から求めた乾燥収縮度  $\epsilon_s$  およびクリープ係数  $\varphi$  についても描くことができるはずで

表-2 乾燥収縮度  $\epsilon_s$  とクリープ係数  $\varphi$  の経年変化

年 月	1976 12.3			1977 3			1978 3			1979 3					
	6	9	11	6	9	11	6	9	11	6	11				
乾 燥 収 縮	10 径間	B	0	-0.6	1.9	5.1	5.9	2.3	3.9	7.2	6.3	5.4	5.7	6.4	6.2
		C	0	0.2	2.0	5.7	6.7	2.2	4.8	5.9	4.7	3.8	3.7	4.2	2.8
		平均	0	-0.6	1.2	4.4	5.3	1.2	3.5	4.4	3.3	2.4	2.2	2.4	1.5
		平均	0	-0.3	1.7	5.1	6.0	1.9	4.1	5.8	4.8	3.9	3.9	4.3	3.5
5 径間	B	0	-1.7	-2.1	2.1	4.7	0.5	1.5	3.8	4.7	3.6	1.2	2.3	4.1	
	C	0	-1.1	-0.4	3.5	5.2	0.6	2.6	5.0	5.0	4.0	2.4	3.4	3.7	
	平均	0	-1.5	-1.3	2.8	4.6	0.7	2.1	4.4	4.8	3.8	1.8	2.8	3.9	
	平均	0	-1.5	-1.3	2.8	4.6	0.7	2.1	4.4	4.8	3.8	1.8	2.8	3.9	
10 径間 5 径間 平均	B	0	0.5	1.1	2.5	2.8	-1.0	-0.2	-0.1	-0.9	-2.0	-3.0	-3.7	-4.1	
	C	0	-0.1	0.9	4.2	5.6	1.7	2.9	4.7	4.7	3.7	2.4	2.9	3.3	
	平均	0	2.5	5.0	8.5	10.0	7.8	8.5	9.8	9.6	9.2	6.4	8.9	8.7	
	平均	0	1.9	5.0	7.1	8.0	6.3	6.3	7.8	7.7	7.0	6.1	6.5	6.1	
10 径間 5 径間 平均	B	0	-1.1	4.1	7.9	8.5	5.5	10.9	28.2	17.2	13.2	25.5	27.6	19.4	
	C	0	0.6	1.1	1.6	1.7	1.8	2.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	
	平均	0	0.5	1.4	1.5	1.6	1.5	1.8	2.1	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1	
	平均	0	1.1	2.3	3.0	3.1	3.4	3.2	3.9	3.8	3.7	3.9	3.9	4.0	
5 径間	B	0	0.9	1.6	2.3	2.4	2.4	2.5	3.1	3.0	3.1	3.2	3.4	3.4	
	C	0	0.8	1.5	2.2	2.3	2.4	2.4	2.8	2.6	2.6	2.8	2.8	2.7	
	平均	0	1.1	2.2	3.0	3.1	3.3	3.2	3.7	3.7	3.7	3.8	3.9	4.0	
	平均	0	1.0	2.0	2.9	3.1	3.2	3.3	3.9	3.9	3.9	4.0	4.1	4.1	
10 径間 5 径間 平均	B	0	0.9	1.6	2.1	2.2	2.3	2.3	2.5	2.4	2.4	2.6	2.6	2.4	
	C	0	0.8	1.6	2.1	2.1	2.0	2.4	2.8	2.7	2.6	2.8	2.8	2.8	
	平均	0	0.6	2.0	2.9	2.9	3.4	3.1	3.5	3.3	3.3	3.6	3.6	3.4	
	平均	0	0.7	2.1	2.8	2.8	2.9	3.0	3.3	3.1	3.1	3.5	3.5	3.5	
5 径間 平均	B	0	0.8	2.2	2.8	2.8	2.9	2.8	3.2	2.8	2.7	3.3	3.2	3.0	
	C	0	0.5	1.6	2.0	2.1	2.4	2.6	3.0	2.9	2.9	3.2	3.4	3.2	
	平均	0	0.6	1.9	2.6	2.7	2.8	2.9	3.2	3.0	2.8	3.3	3.3	3.0	
	平均	0	0.7	2.0	2.6	2.6	2.8	2.8	3.2	3.0	2.9	3.3	3.4	3.2	

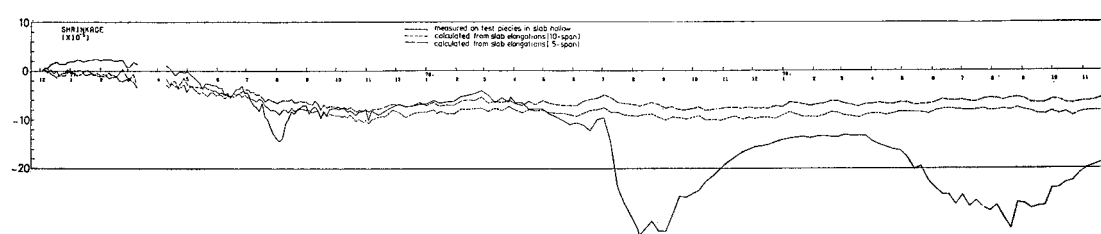


図-10 乾燥収縮度の進行

あるが、 $\epsilon_s$  の値がかなりばらついていたため、次のようなまとめ方をした。すなわち、 $\epsilon_s$  および  $\phi$  の値は1 か月間ではほとんど変化しないはずのものであることを考慮し、1 か月間における数個の値の平均値をとった。表-2 に結果を示す。3月、6月、9月、11月で計算している。乾燥収縮度  $\epsilon_s$  は比較的妥当な値が得られた断面についてのみ値を示したが、クリープ係数  $\phi$  は計器の生きている断面すべてについて値を示している。表には比較のため、床版端部の伸縮量  $\delta$  から求めた乾燥収縮度  $\epsilon_s$  の値および円筒型枠内供試体で測定した  $\epsilon_s$  の値も記入してある。なお乾燥収縮度  $\epsilon_s$  の符号は縮む場合を正にとっている。

式 (1) により乾燥収縮度  $\epsilon_s$  とクリープ係数  $\phi$  を求めるとき、前者の  $\epsilon_s$  は断面の上段と下段のひずみの絶対値の差に関係し精度がよくない。一方、後者の  $\phi$  は和に関係するのでばらつきが小さい。計算結果からもこのことは明瞭に認められる。このような乾燥収縮度  $\epsilon_s$  の計算値におけるばらつきにはひび割れの影響が大きいと考えられる。前にも述べたように、ひび割れによって圧縮ひずみより引張ひずみの方が大きく増加する。このため、乾燥収縮度  $\epsilon_s$  の計算値は小さめにできることになる。計算結果をみても  $\epsilon_s$  の値は小さい方へとばらついておりひび割れの影響が大きいことを示している。クリープ係数  $\phi$  についてはひび割れの影響が薄められるので一般に妥当な値になっているが、ひび割れの影響が当然その中に含まれており若干大きめの値になっているといえる。

表-2 をグラフにしたのが 図-11 である。 図-10, 11

からわかるように、円筒型枠内供試体のひずみ値を除いて他の乾燥収縮度の値およびクリープ係数は最初の1年間で著しく増加しそれ以降はほとんど進行していない。特に、乾燥収縮度の増加は小さく、むしろ減少しているようにさえ見える。一般に乾燥収縮度はもっと長期にわたって漸増していくことが認められている。本高架橋の測定でやや異なる結果が得られた理由は必ずしも明らかではない。(2) で述べるように、10 径間高架橋では床版の打設直後短期間に約 -10 K に相当する縮みが生じ、その結果床版には橋脚の拘束による引張応力が発生する。この引張応力にクリープが作用し、長期的に縮みを元に戻すため、みかけ上乾燥収縮が小さくなっていることが1つの理由として考えられる。しかしながら、この初期の縮みは10 径間高架橋に限られるため、5 径間高架橋の測定結果に対する説明とはならない。このほかにも理由はいくつか考えられようが、現象を正確に説明することは難しいと思われる。

乾燥収縮度  $\epsilon_s$  の測定結果はばらついておりどれを信頼すべきか難しいところであるが、床版端部の伸縮量  $\delta$  より求めた値および床版のひずみ値より求めた値の最大をよりどころとすれば

$$\epsilon_s \approx 10 \times 10^{-5}$$

という値がほぼ妥当ではないかと思われる。ただし、10 径間高架橋では (2) でみるように初期値を設定した1976年12月3日以前に -10 K に相当する圧縮ひずみが床版に生じておりこれを含めると

$$\epsilon_s \approx 20 \times 10^{-5}$$

という値になる。

(2) 脚 柱

脚柱のひずみ測定は10 径間高架橋 P 90 橋脚の A, B, C 3 断面、P 91, P 98 橋脚のそれぞれ C 断面および5 径間高架橋 P 102 橋脚の C 断面で行った(図-1)。2つの脚柱に4個ずつ計8個のひずみ計を1断面に配置した。鉄筋計による測定が主であるが一部コンクリートひずみ計も併用した。図-12 は P 90 橋脚 C 断面におけるコンクリートひずみ計による測定結果を示

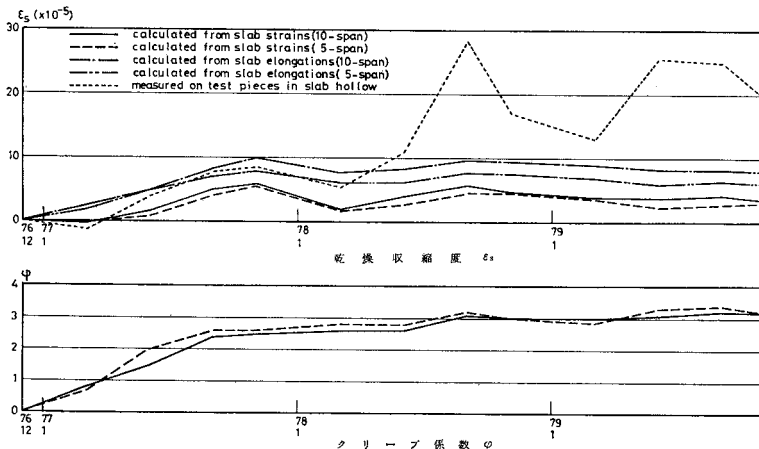


図-11 乾燥収縮度  $\epsilon_s$  とクリープ係数  $\phi$  の進行

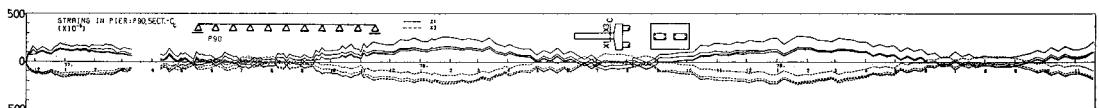


図-12 脚柱の断面Cにおけるひずみの変化

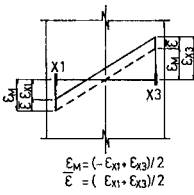


図-13 脚柱のひずみの分離

している。測定値は簡単な温度補正を行っている。初期値を床版コンクリート打設後硬化温度がほぼ最大の11月22日としている。硬化熱が下がり床版の温度が低くなると床版が縮むがそれに伴って脚柱には曲げが生じる。図でX1側が引張になるような曲げである。そして11月29日から12月3日の間に床版の支保工が撤去されると床版の自重が作用し、X1側、X3側の両方ともに圧縮側にひずみが動いている。その後は床版の伸縮に応じた変化を示している。

脚柱の性状を考えるとひずみの測定値を2つの成分に分解することが理解しやすい。図-13に示すように一つは曲げひずみ  $\epsilon_M$  であり、他の一つは軸ひずみ  $\epsilon$  である。ただし、この場合全断面有効と仮定している。曲げひずみ  $\epsilon_M$  は主として床版の伸縮に伴って生じる弾性ひずみであり、一方軸ひずみ  $\epsilon$  は鉛直方向の荷重によって生じる弾性的なひずみと乾燥収縮およびクリープによる塑性的なひずみから成る。

床版の打設が始まるまでは脚柱には自重が作用するのみであるが、床版の打設により種々の影響を受ける。コンクリート打設直後の硬化熱により、床版は伸びるが温度の硬化とともに縮む。床版が完全に弾性的であるかあるいは伸縮が拘束されていなければ硬化熱降下後なんらの変形も残留しない。ところが、コンクリートの物理的性質は硬化熱発生中に大きく変化し、しかも塑性的な性状も生じる。一方、10径間高架橋のように多くの橋脚上でピン結合されている構造では橋脚による拘束も大きい。このような場合、硬化熱による温度上昇中の伸びは床版の剛性が小さいため橋脚でかなりの程度拘束される。逆に、温度下降中は床版の剛性が大きくなっているため、相対的に橋脚による拘束が小さくなる。そのため硬化熱の消滅後、床版は縮んだ状態にあることが考えられる。この縮み量は床版打設前と硬化熱消去後の脚柱の変形状態から逆算できる。打設前の11月18日と硬化熱のほぼ消え去ったと考えられる11月27日の間の10径

間高架橋断面Cにおける曲げひずみ  $\epsilon_M$  の変化を計算すると表-3のようになる。表中添字cはコンクリートひずみ計による測定値を表わしている。この  $\epsilon_M$  の値から床版の伸縮量を温度換算で示したのが表中の  $\Delta T$  である。平均して約 -10 K に相当する縮み量が床版に残留し

表-3 床版打設前後の脚柱の曲げひずみの変化  $\epsilon_M$  と床版の温度換算の縮み  $\Delta T$

断面		$\epsilon_M$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\Delta T$ (K)
P90	C	-55.4	-9.9
	Cc	-52.6	-9.5
P91	C	-28.2	-6.8
P98	C	78.7	-13.7

ていることがわかる。ただし、この中には当然乾燥収縮によるものも含まれているし、床版を分割施工したための影響も入っていることに注意する必要がある。

この初期の縮みは、すでに述べたように、橋脚による拘束の大きい10径間高架橋に限られ、5径間高架橋ではほとんど生じない。このことは床版端部での継目計による伸縮量の測定結果からも確認されている。

以上の曲げひずみ  $\epsilon_M$  のほかに脚柱には床版自重によって軸方向ひずみ  $\epsilon$  が生じる。測定値と計算値をまとめて表-4に示す。P90橋脚の断面Aの計算値がB、Cより大きいのは鉄筋量が少ないためである。弾性係数は  $E_c = 26 \text{ GN/m}^2$  として計算している。P98橋脚を除いては10径間高架橋では一般に測定値は計算値より大きい。測定値に一部温度の影響が含まれていることあるいは計算で用いた弾性係数が実際より大きかったこと等がその理由として考えられる。なお、P98橋脚の測定値がきわめて小さいのは支保工撤去前にすでに床版の自重の一部が脚柱に移っていたためと考えられる。

表-4 床版自重による脚柱のひずみ

断面		測定値	計算値	測定値
		( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )	計算値
P90	A	-37.3	-19.6	1.90
	B	-39.6	-18.5	2.14
	C	-27.9	-18.5	1.51
	Cc	-18.2	-18.5	0.98
P91	C	-25.4	-16.0	1.59
P98	C	-7.0	-18.5	0.39
P102	C	-16.7	-14.1	1.18
	Cc	-14.0	-14.1	0.99

表-5 脚柱の軸方向ひずみ  $\epsilon$  の経年変化

断面		$\bar{\epsilon}$ ( $\times 10^{-5}$ )		
		1977.11	1978.11	1979.11
P90	A	-10.9	-15.3	-18.2
	B	-7.0	-10.3	-12.5
	C	-0.6	-1.4	-3.5
	Cc	-0.2	-0.9	0.0
P91	C	0.5	-1.2	0.7
P98	C	-0.2	-0.8	-0.6
P102	C	2.4	1.6	1.6
	Cc	1.7	1.6	2.4

支保工撤去後の軸方向ひずみ  $\epsilon$  の変化は主として脚柱自身のクリープ・乾燥収縮によるものといえる。1976年12月3日を初期値に選んで、1年後、2年後、3年後の  $\bar{\epsilon}$  の値を記すと表-5のようになる。断面Cは土中にあるため、クリープ、乾燥収縮がほとんど生じていないものと考えられる。断面Aのひずみ  $\bar{\epsilon}$  はクリープによるものと乾燥収縮によるものが混在しているが、両者を分離することは困難である。断面Bのひずみ  $\bar{\epsilon}$  についても同様であるが、断面Aに比べると値は小さく約65%になっている。断面Bでひずみ値が小さくなる理由はよくわからない。なお、脚柱の施工は1976年7月~8月に行われており、床版に比べ約4か月材令が古いことに注意する必要がある(図-2)。

一方、脚柱の曲げひずみ  $\epsilon_M$  の長期にわたる変化は床版の伸縮に伴って生じる。いまP90橋脚のC断面における曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  との関係

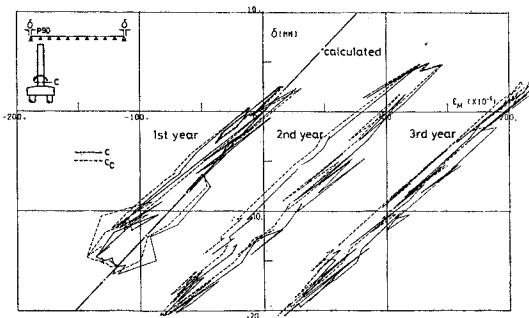


図-14 脚柱の曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (年変化, P 90, 断面 C)

を示すと 図-14 のようになる。図中  $C_c$  というのはコンクリートひずみ計による測定値である。3年間の測定結果を1つにまとめており、1年ごとに  $\epsilon_M$  の値を  $100 \times 10^{-6}$  だけ右へずらして線が重ならないようにしている。図からわかるように鉄筋計とコンクリートひずみ計の結果は良好な対応を示している。1年目の測定値はやや乱れているが、2年目になると若干のループを描くものの直線性は良好である。3年目になると直線性は一層よくなる。計算値と比べると測定値の方が  $\epsilon_M$  はいくらか大きめになっている。なお計算値は、脚柱の曲げおよび基礎の回転と水平変位を考慮して行っている。その際、くいの軸方向ばね定数  $K_V$  は設計で用いたと同じ  $K_V=75\,000\text{ t/m}$  としている。水平地盤反力係数  $K_H$  は設計では  $K_H=2\,000\text{ t/m}^3$  と  $K_H=4\,000\text{ t/m}^3$  の2通りに変えているが、ここでは後者の値を用いている。

これらの地盤反力係数の値は設計前に行われた土質試験の結果から定められているが、その後、現場で広範な静的載荷試験が行われ数値の妥当性について詳細な検討がなされている<sup>1), 2), 4)</sup>。

(3) く い

くいの測定は 10 径間高架橋の P 90, P 91, P 98 の各橋脚で行っており、5 径間高架橋では行っていない。P 90 橋脚では 19 m のくいの全長にわたって 10 断面でひずみを測定しているが、P 91, P 98 橋脚では上部の 5 断面に限っている (図-1)。6本のくいのうち2本のくい

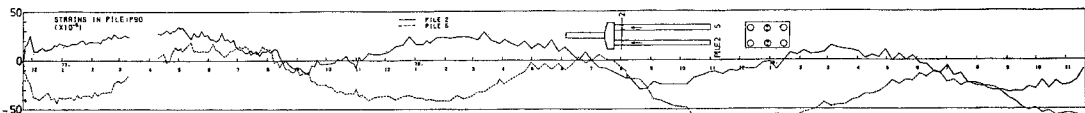


図-16 くいの軸方向ひずみの変化 (P 90, 断面 2)

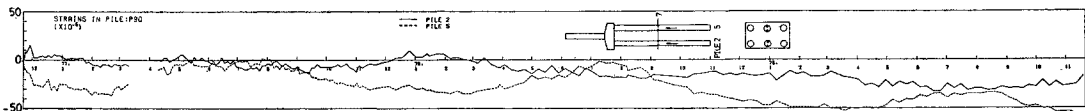


図-17 くいの軸方向ひずみの変化 (P 90, 断面 7)

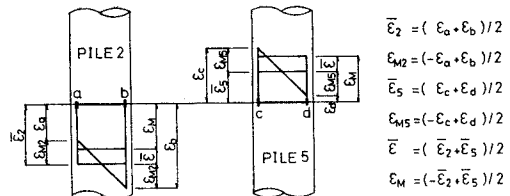


図-15 くいのひずみの分離

(くい2とくい5)に鉄筋計を配置している。

ひずみの測定値は 図-15 に示すような整理をしている。測定値  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c, \epsilon_d$  から最初に軸方向のひずみ  $\bar{\epsilon}_2, \bar{\epsilon}_5$  と曲げによるひずみ  $\epsilon_{M2}, \epsilon_{M5}$  に分離する。次に  $\bar{\epsilon}_2, \bar{\epsilon}_5$  を使ってくい基礎全体としての軸方向ひずみ  $\bar{\epsilon}$  と曲げによるひずみ  $\epsilon_M$  を求める。これらのひずみと外力を関係づけると次のようになる。基礎全体に鉛直荷重が作用したときにくいに生じるひずみは  $\bar{\epsilon}$  である。モーメント荷重が作用したとき、この荷重はくいの軸力が形成するモーメントによって主として分担されるが、一部はくい自身の曲げによっても分担される。前者が  $\epsilon_M$  になり、後者がそれぞれ  $\epsilon_{M2}, \epsilon_{M5}$  になる。なお、くいのひずみ測定値に対しては温度補正は行っていない。

まず床版の自重によって生じるひずみ  $\bar{\epsilon}$  を計算値と比較しよう。脚柱の場合と同様に 11 月 29 日と 12 月 3 日の差として求めている。また、測定値はくいの最上段の断面でのものであ

表-6 床版自重によるくいのひずみ

橋脚	測定値 ( $\times 10^{-6}$ )	計算値 ( $\times 10^{-6}$ )	測定値 計算値
P90	-15.6	-18.6	0.84
P91	-15.2	-16.2	0.94
P98	-8.6	-18.6	0.46

る。結果を 表-6 に示す。測定値と計算値は比較的合っていると見えるが、P 98 橋脚のくいでは測定値がかなり小さい。これは脚柱のひずみについても同じような傾向になっており、P 98 橋脚では支保工撤去前に床版自重の一部がすでに橋脚へ移っていたのではないかと考えられる。その他の測定値はいくらか計算値より小さめである。計算値を求める際のコンクリートの弾性係数の値のとり方などにも一部原因はあるが、鉛直荷重のいくらかはフーチングから直接基礎地盤へ流れていることも考えられる。



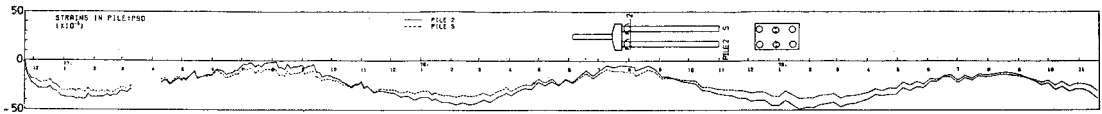


図-18 くい2の曲げひずみの変化 (P 90, 断面 2)

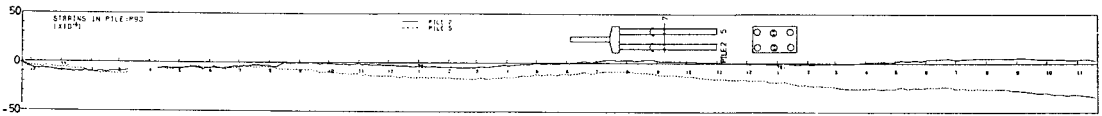


図-19 くい5の曲げひずみの変化 (P 90, 断面 7)

次にひずみの3年間にわたる変化を検討しよう。図-16, 17にP90橋脚のくい2, くい5の軸方向ひずみ $\bar{\epsilon}_2, \bar{\epsilon}_5$ をプロットしている。断面2, 7について示している。横軸の原点は床版および脚柱の場合と同様に11月22日をとっている。実線はくい2を示し、破線はくい5を示している。断面2と断面7の測定結果は類似した傾向を示している。床版の自重が作用した11月29日と12月3日の間で $\bar{\epsilon}_2$ と $\bar{\epsilon}_5$ はともに圧縮側に動いていることが確認できる。その後の $\bar{\epsilon}_2$ と $\bar{\epsilon}_5$ の動きは床版の伸縮と密接な関係を有し、床版が伸びれば $\bar{\epsilon}_2$ が圧縮側へ、 $\bar{\epsilon}_5$ が引張側へ動く。床版が縮めばその逆の現象が生じる。このことはちょうど図-12に示す脚柱のひずみ $\epsilon_{x1}$ と $\epsilon_{x3}$ の動きと類似である。しかしながら、脚柱のひずみ $\epsilon_{x1}$ と $\epsilon_{x3}$ がほぼ0線を境にして圧縮側と引張側に分かれているのに対し、くいのひずみ $\bar{\epsilon}_2$ と $\bar{\epsilon}_5$ の平均値は0になっていない。つまり、脚柱では $\bar{\epsilon}$ がほぼ0であるのに対し、くいでは $\bar{\epsilon}$ が0にはなっていないということである。床版の自重の作用後橋脚の鉛直力はほとんど変化しないので、この $\bar{\epsilon}$ の変化は外荷重による弾性的なものとは考えにくい。クリープ、乾燥収縮が関係していると思われるが、くいの置かれている環境、すなわち、温度とか湿度についての資料がないので、 $\bar{\epsilon}$ の変化を正確に説明することは困難である。測定ひずみを $\bar{\epsilon}$ と $\epsilon_M$ に分離する際に誤差が入り込んだ可能性も考えられる。

すでに述べたようにくいの各断面における測定値は類似した傾向を示しているが量的にはやはり差がある。くいの下にいくに従って明らかにひずみの値は小さくなる。これはくいの力が摩擦により徐々に地盤へ流れているためである。

図-18, 19はP90橋脚のくいの曲げひずみ $\epsilon_{M2}, \epsilon_{M5}$ を断面2, 7について示している。断面2ではくい2とくい5の測定値がほぼ等しくなっている。断面7では測定誤差がやや大きい、曲げによるひずみは著しく小さくなっている。

以上は測定結果のごく一部であるが、他の結果も参照すると、各橋脚のくいのひずみ測定結果は量的に多少の

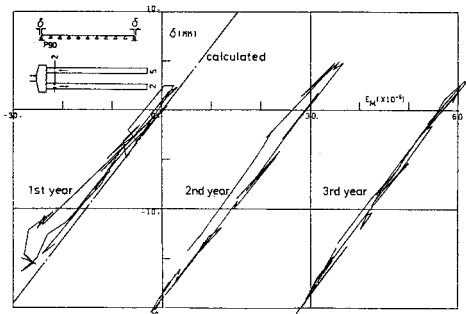


図-20 くい基礎全体としての曲げひずみ $\epsilon_M$ と床版端部の伸縮量 $\delta$ (年変化, P 90, 断面 2)

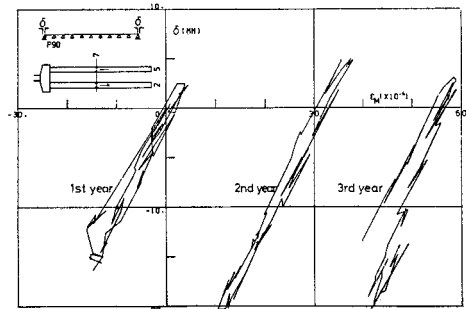


図-21 くい基礎全体としての曲げひずみ $\epsilon_M$ と床版端部の伸縮量 $\delta$ (年変化, P 90, 断面 7)

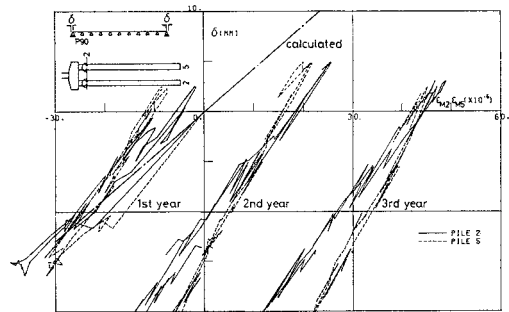


図-22 くい2の曲げひずみ $\epsilon_{M2}, \epsilon_{M5}$ と床版端部の伸縮量 $\delta$ (年変化, P 90, 断面 2)

差はあるものの傾向はまったく同じになっている。特に、くいの曲げひずみはかなり局所的な性質を有するも

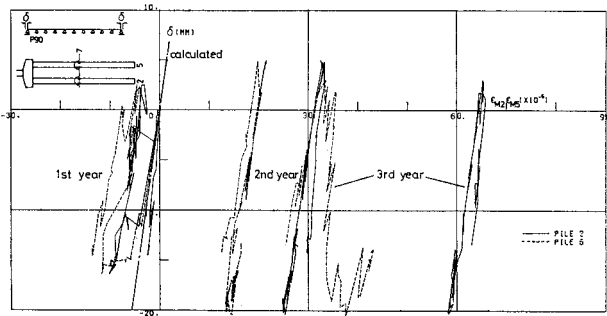


図-23 くい曲げひずみ  $\epsilon_{M2}$ ,  $\epsilon_{M5}$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (年変化, P 90, 断面 7)

のと考えられるが、これについてもほぼ一定の傾向が認められ、測定はきわめて精度が高く行われているといえる。

くいのひずみの変化も当然床版の伸縮量と関係する。脚柱のひずみの場合と同様に床版の端部の伸縮量  $\delta$  と関係づけてプロットを行った。

図-20, 21 は P 90 橋脚のくいのひずみ  $\epsilon_M$  と  $\delta$  の関係を示している。測定結果はほぼ直線状になっていることが認められる。断面 7 におけるひずみ値は断面 2 におけるものより小さく、くいの力が徐々に基礎地盤の中に流れていることがわかる。断面 2 における計算値と測定値の対応は良好である。図-22, 23 はくいの曲げひずみ  $\epsilon_{M2}$ ,  $\epsilon_{M5}$  について同様に  $\delta$  との関係プロットしたものである。くいの曲げひずみはかなり局所的な性質を有し、基礎地盤の影響を直接受けるためいくらか測定値は乱れている。しかしながら、くい 2 とくい 5 でほぼ同じ傾向を示し、かつ、一部を除き直線性も良好であるといえる。

### 5. 日変化の測定解析結果

#### (1) 床 版

年変化の測定では原則として午前 10 時に測定値がとられていた。ところが気温は 1 日の間

でかなり変化する。このような気温の日変化に床版各部の温度も影響を受ける。床版各部の温度がどのような変化をするのか 10 径間高架橋の断面 B で示したのが 図-24 である。6 月, 8 月, 10 月の結果を 1 つの図にまとめている。4 本の線が 1 組となっており、一点鎖線が上段, 長い破線が中段, 短い破線が下段, そして実線が気温を表わしている。図-25 はいくつかの断面における平均温度と外気温の関係を示している。これらの図から次のことがいえる。

- ① 床版上段の温度は日照の影響を強く受け気温よりかなり高くなる。8 月に特に顕著で約 15 K 高い。床版の平均温度よりは 10 K ほど高い。最大値は 15 時間後に生じ気温より 1 時間ほど遅れている。
- ② 床版下段の温度は気温と似た変化をする。ただし気温より変化量は少なくしかも時間的に多少遅れを示

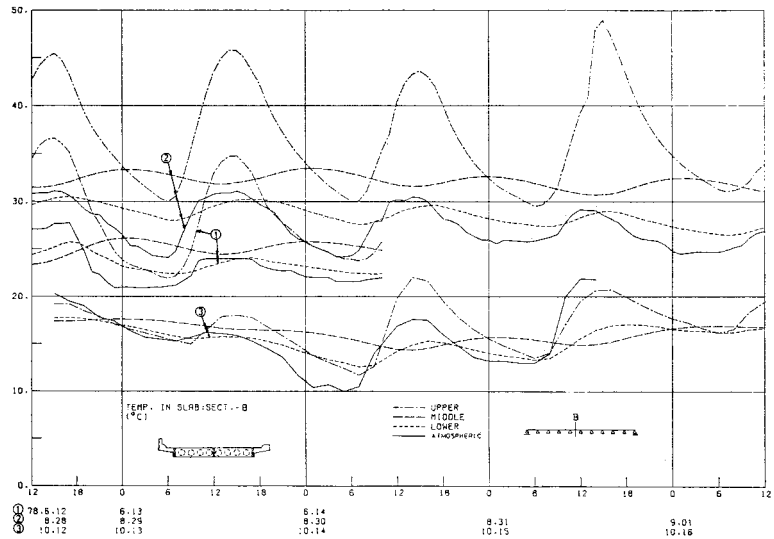


図-24 床版の温度の日変化

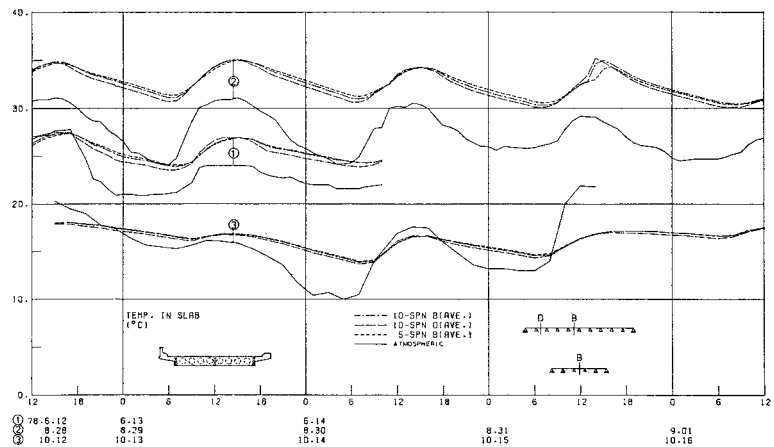


図-25 床版の平均温度と外気温の日変化

す。

③ 床版中段の温度変化は小さい。気温の変化とほぼ12時間ずれている。

④ 6月, 8月における床版の平均温度は一般に気温より高い。日照の影響が強いためと考えられる。8月で5K前後高くなっている。

⑤ 床版の平均温度は気温に2時間程度遅れた変化を示す。変化量は気温より少ない。最低温度は午前7時頃, 最高温度は15時頃に生じている。最低と最高の差は8月で約5Kである。

以上のようになるが, 8月31日には舗設が行われており, その影響で一部温度が上昇していることを付け加えておく。

温度変化に伴い床版は当然伸縮する。端部の伸縮量は温度変化とほぼ相似の動きをしていることが認められている。

(2) 脚 柱

脚柱のひずみの解析は年変化の場合とまったく同じようにして行った。ここではP90橋脚の断面Cにおける曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  との関係を図-26に示す。6月, 8月, 10月の測定結果を1つにまとめている。図から  $\delta$ - $\epsilon_M$  関係がいずれの場合もループを描いているのが認められるが, これからただちに非弾性的な性状が生じているということとはできない。伸縮量  $\delta$

およびひずみ  $\epsilon_M$  がかなり小さい値であるので測定誤差が含まれていることも考えられる。

年変化における  $\delta$ - $\epsilon_M$  関係と日変化における  $\delta$ - $\epsilon_M$  関係はほとんど変わらない(図-14と図-26)。計算値との対応も類似の結果を示している。このことは短期における高架橋の性状と長期における性状とがほぼ等しいことを意味しており, 基礎地盤のクリープなどの影響はあったとしても小さいことを表わしている。

(3) く い

くいの解析も年変化の場合とまったく同様にして行った。床版端部の伸縮量  $\delta$  とくいのひずみとの関係の一例を図に示す。くいの軸力の形式するモーメントに対応するひずみ  $\epsilon_M$  と  $\delta$  との関係をP90橋脚の断面2でプロットしたのが図-27である。6月, 8月, 10月の測定結果を一緒にまとめているが, 結果はよく一致していることが認められる。直線性も良好であり, 計算値ともよく合っている。図-28に示す断面7の結果をみると断面2より  $\epsilon_M$  の値は小さくなっており, くいの軸力が基礎地盤の中へ徐々に流れていることが明瞭である。

曲げによるくいのひずみ  $\epsilon_{M2}$  と  $\delta$  との関係を示したのが図-29, 30である。直線性はいくらか劣るが, ある一定の傾向は読み取れ, 著しく小さなひずみを対象としていることを考えると満足できる結果といえる。計算値と比べたとき断面2では測定値の方がかなり小さなひずみ値を示していることがわかる。

なお, これらの図(図-27~30)において, すでに触れたように, きわめて小さなひずみ値を対象としているが, くい5の結果あるいは他橋脚の結果も同様な結果を示しており, 測定結果は十分信頼できるものと考えている。

上で示した日変化に対する結果を年変化のものと比較すると両者で類似の傾向になっている(図-20~23

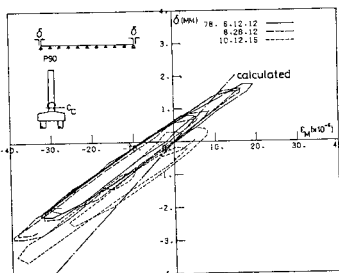


図-26 脚柱の曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (日変化, P90, 断面 C)

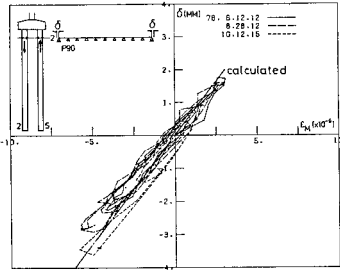


図-27 くい基礎全体としての曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (日変化, P90, 断面 2)

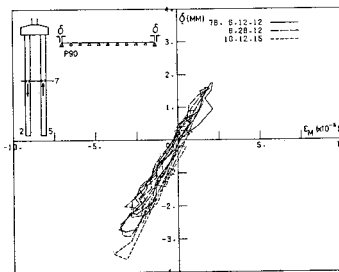


図-28 くい基礎全体としての曲げひずみ  $\epsilon_M$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (日変化, P90, 断面 7)

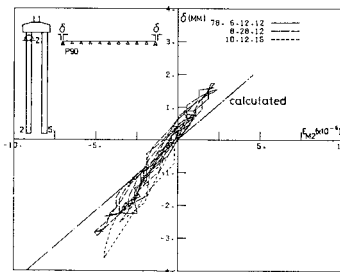


図-29 くいの曲げひずみ  $\epsilon_{M2}$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (日変化, P90, 断面 2)

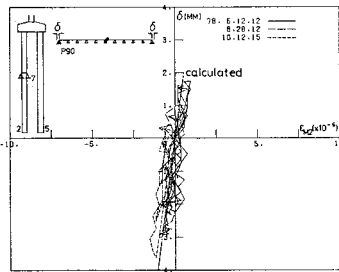


図-30 くいの曲げひずみ  $\epsilon_{M2}$  と床版端部の伸縮量  $\delta$  (日変化, P90, 断面 7)

と 図-27~30). 細部での相違は当然あるが、全体としてみると基礎地盤も含めて長期的にも短期的にも弾性的な性状を示しているといえる。このことから、また、少なくとも高架橋各部の変形に影響を与えるほど大きな基礎地盤のクリープ現象は生じていないということが確認できる。

## 6. 測定解析結果のまとめと多径間連続高架橋の設計

いままでは3年間にわたる長期測定結果を床版、脚柱、くいというように各構造部分に分けて解析してきた。ここではこれらの解析結果を全体として見直し、さらに、2年目に行った日変化に対する短期測定結果も参照して、多径間連続高架橋の設計方法について考察を加える。

はじめに荷重状態を明確にしておく必要がある。測定の対象となった外荷重の主たるものは床版の自重による鉛直荷重である。外荷重以外のものとして、内的につり合い力を生じさせる床版の温度変化および乾燥収縮は測定の対象となった重要な荷重である。

10径間高架橋および5径間高架橋における測定結果からも明らかなように、床版の自重のような鉛直外荷重に対しては多径間高架橋を特別に扱う必要はない。構造解析も従来の方法によれば十分である。

温度変化について考えてみよう。温度変化は構造各部で生じると考えられるが、設計で考慮する必要のあるものは床版の温度変化だけであるといえる。温度変化は2つに分けるのが理解しやすい。一つは軸方向の一律な温度変化であり、他の一つは断面内の各点における温度差である。前者は断面全体の平均的な温度変化になり、後者は断面の各点における温度と平均温度とのずれとみることができ。

床版の温度変化をもたらす原因としてはコンクリートの硬化熱および気温の変化を挙げることができる。コンクリートの硬化熱は打設直後に限られ短期的なものである。硬化熱により床版の温度は気温より約20K高くなっていることが認められている。硬化熱自体ある期間を過ぎれば消え去るものであるから構造物が完全に弾性体であるかあるいは伸縮が拘束されていなければならぬの影響も残らない。ところが、実際には、この間にコンクリートの物理的性質は大きく変化する。一方、多くの橋脚上でピン結合された10径間高架橋では、橋脚による拘束が大きい。そのため、硬化熱が消え去ったとき、床版にひずみが残留する。10径間高架橋における測定結果からは約-10Kの温度変化に相当するひずみが見られている。この中には初期の乾燥収縮によるものも含ま

れていると考えられるが、いずれにせよコンクリートに十分な強度が出る前に生じるので慎重な配慮が必要である。なお硬化熱によって断面内に温度差も生じるであろうが、これについての詳しい検討は今回の解析では行っていない。

気温の変化に伴う床版の温度変化についてまとめると次のようになる。床版の平均温度は気温と同じような変化をするが、夏期において日照の影響により最大で約5K高くなることもある。冬期における日変化の測定は行っていないが、床版の最低温度は気温の最低よりは高く1日平均の最低気温程度と考えられる。今回の測定によれば、年によって差はあるが、夏の日中の最高気温は30~35°Cであり、冬の1日平均の最低気温は0°C程度であるから、床版の最高温度は35~40°C、最低温度は0°Cということになる。したがって、1年間における温度差は最大で35~40Kになる。しかしながら床版が最高温度に達するのは夏期において数日程度であり、しかも日中の3~4時間に限られる。さらに、温度荷重は地震荷重と組み合わせたときに最も厳しくなることが多いが、地震発生時に床版の温度が最高あるいは最低になっている確率は小さいといえる。したがって、設計で考慮すべき温度変化は高架橋全体の設計の中で決定する必要があり、測定結果よりただちに40Kの温度変化を考慮すべきであるということにはならない。

床版断面内の温度差については、測定結果によると、日照の影響により床版上部の温度は平均温度よりかなり高くなっていることが認められる。舗装の影響が十分つかみきれていないが、床版上段の測定で平均温度より10Kほど高くなることもある。床版表面ではこの差はさらに大きくなると考えられる。いまこのような温度差が近似的に直線分布する温度勾配とみなせると仮定しよう。単純桁であればこのような温度勾配によって上に反るような変形が生じるが、桁にはなんらの応力も生じない。一方、連続桁では変形が拘束されその結果応力が生じる。この応力は許容応力に比べ決して小さくなく、設計で十分配慮する必要がある。ただし、これは多径間高架橋特有の問題ではなく、連続桁一般についていえることである。

コンクリートの乾燥収縮は一律な温度変化と同じような作用を及ぼす。したがって、多径間高架橋の設計では床版の乾燥収縮が重要な問題となる。床版の乾燥収縮度の大きさは種々の方法により測定値から求めている。その結果によると乾燥収縮は1年目で大きく増加し、それ以降はほとんど進行していない。むしろ逆に減少しているようにさえ見える。これの理由は必ずしも明らかでない。測定値自体かなりばらついており、どれを信頼すべきか難しいところであるが、床版端部の伸縮量より求め

た値、および床版のひずみ値より求めた値の最大をよりどころとすれば、本高架橋における乾燥収縮度  $\epsilon_s$  は

$$\epsilon_s \approx 10 \times 10^{-5}$$

ということになる。ただし、先にみたように 10 径間高架橋では、コンクリート打設直後に  $-10\text{ K}$  に相当する縮みが生じており、これも含ませるとすると

$$\epsilon_s \approx 20 \times 10^{-5}$$

という値になる。

次に床版の様な温度変化が高架橋構造各部に及ぼす影響について考察しよう。乾燥収縮も様な温度変化と同じような作用をするのでこれも含めて考えることにする。温度変化によって床版が伸縮するとピン結合された橋脚の天端もそれに伴い移動する。この橋脚天端の水平変位は自由に起こり得ず、したがって、水平力が橋脚に作用することになる。逆に、床版には橋脚の拘束力として軸力が導入される。このような拘束力はそこで生じる変位量と拘束度に依存する。10 径間高架橋では端部の橋脚上における温度変化による床版の伸縮量は明らかに 5 径間高架橋の場合より大きい。橋脚による拘束の結果生じる弾性ひずみにより床版の伸縮量はいくらか戻されるが、高々 5% 程度であるので、ある 2 点間の温度変化による伸縮量はその間の距離に比例すると簡単には考えてよいからである。したがって、10 径間高架橋では 5 径間高架橋に比べ温度変化による伸縮量は最大で約 2 倍になる。しかも、多径間高架橋では一般に端部の橋脚を除いて床版とピン結合することが多いので、床版の伸縮の影響が著しいといえる。このことが多径間高架橋を特徴づける一つの主要な点である。したがって、設計でもこの影響をできるだけ正確に求めるため、脚柱および基礎の変形を考慮した解析を行うのが適当と考えられる。測定結果との比較によればこのような解析は構造各部の性状を全体としてかなり正確にとらえていることがわかる。ただし、くいの曲げ変形に関しては測定値と計算値の差が比較的大きかった。これは、くい自身の曲げには変形の適合条件が重要な役割を果たしており、基礎地盤の性状に大きく影響を受けるためと考えられる。実際に、たとえば、基礎地盤のばね定数を変化させて計算すると、脚柱の曲げひずみの値あるいはくいの軸方向ひずみの値に比べくいの曲げひずみの値が著しく大きく変化することもこのことを裏付けている。

上で述べたように、解析方法自体は多少の問題はあるものの実用的には十分適用可能といえる。ここで注意しなくてはならないのは実際の計算では材料定数のとり方によって結果がかなり左右されるということである。外荷重による断面力の計算と異なり、温度変化のように内的な拘束によって生じる断面力の計算では系の剛性の評価が結果に大きく影響する。多径間連続高架橋の場合、

床版の温度変化の計算で重要な材料定数は、脚柱の弾性係数、くいの弾性係数および基礎地盤のばね定数である。また、系の剛性の評価とは関係しないが、床版コンクリートの線膨張係数も重要な材料定数の一つである。これらの定数は示方書あるいは指針に従って定めることが一応は可能である。しかしながら、これらの定数はいずれにせよあるばらつきを有するものであり、示方書等に定められている数値は平均的な値と考えられる。いまここで考察している多径間高架橋ではこれらの定数が直接設計断面力に影響することもあり、一層精度の高い定数を用いる必要があるといえる。ただし、一方ではひび割れの影響あるいは基礎地盤を弾性ばねで置き換えるという問題もあり、材料定数のみ精度を高くしても全体としての精度は必ずしも上がらないことに十分注意すべきである。

## 7. 結 語

本報告はある特定の高架橋における測定結果について述べたものであり、必ずしも一般性があるわけではない。特に、温度変化の大きさは建設地点によって異なるであろうし、コンクリートの乾燥収縮度の大きさも湿度あるいは使用材料等に依存するため地域特性を示すものと考えられる。地盤の性状も場所によって当然異なるものである。したがって、他の地域で同様な測定を行い資料を集積していく必要がある。すでに、いくつかの高架橋で測定が計画され、一部は実施に移されている<sup>5)</sup>。それらの測定結果も合わせて、多径間連続高架橋の特性を一層明確にし、より合理的な設計方法を確立することが今後の課題であると考えている。

最後になったが、本測定の遂行にあたっては多くの方のご協力をいただいた。日本道路公団新潟建設局構造技術課、同金沢工事事務所、同金沢管理局には測定の計画に始まり、計器の設置およびその後の測定を万全の態勢で行っていただいたことに対し、深く感謝するものである。また、財団法人高速道路調査会の多径間連続高架橋研究班（故 国広哲男委員長）の委員の方々には測定全般にわたって貴重なご意見およびご討論をいただいている。厚く感謝の意を表するものである。

なお、本測定の間接結果の一部はすでにいくつか公表されている<sup>9)~11)</sup>。上でも述べたように、本測定の遂行にあたっては数多くの方が関係されているため、他の著者による結果の紹介もこの中には含まれている。本報告では測定の全容をできるだけ正確に述べることを意図しており、そのため、わずかであるが内容の一部が既発表のものと同重複することを避けられなかったことをお断りしておく。

## 参 考 文 献

- 1) (財) 高速道路調査会 : 多径間連続床版橋に関する調査研究報告書 (その 1), 1976.2.
- 2) (財) 高速道路調査会 : 多径間連続床版橋に関する調査研究報告書 (その 2), 1977.2.
- 3) (財) 高速道路調査会 : 多径間連続床版橋に関する調査研究報告書 (その 3), 1978.2.
- 4) 日本道路公団新潟建設局・新日本技研株式会社 : 北陸自動車道金沢高架橋 RC 10 径間連続床版橋解析総括報告書, 1981.3.
- 5) 田中徹也・檜山義光・諸岡 卓・角 昌隆 : 11 径間連続鉄筋コンクリート中空床版橋の設計・施工, 橋梁と基礎, Vol. 14, No. 4, 1980.
- 6) 小林賢一・星埜正明 : 金沢高架橋における測定解析結果, 第 13 回道路会議, 1979.10.
- 7) 小林賢一・船本 治 : 10 径間連続 RC 中空床版橋の温度変化と乾燥収縮, コンクリート工学, Vol. 18, No. 5, 1980.5.
- 8) Jun Mise and Michio Uchida : Soil-Structure Interaction on Multispan Continuous Bridge, 11. IABSE Congress, 1980.9.

(1981.7.16・受付)