

「実在構造物の応力測定法と測定結果」

押当式ひずみ計（技研式）によるPC桁のクリープ測定

菅 原 操 国鉄大阪工事事務所土木課

要旨

日本国有鉄道では、1954年4月～9月の間に信楽線第一大戸川橋梁に、スパン30mのポストテンショニング式プレストレストコンクリート鉄道橋を架設した。この桁の設計に必要なクリープ量は、それまでの実験結果を参考にし、DIN 4227より推定したものを使用した。設計に使用したクリープ量をCheckし、また今後の設計資料を得るために、桁にはクリープ測定用埋込金具を設置し、施工後適當の時間間隔をおいてクリープ量を測定しており、今後も測定を継続する予定である。測定器として押当式ひずみ計（技研式）を使用しているが、ゲージ長は400mmで、測定精度は 1×10^{-5} 程度であるので、コンクリートのクリープ測定に使用して適當であると思う。

測定結果は未だ結論に至らないが、現在までの測定値では、この桁のコンクリートのクリープ係数は0.94～1.74であつて、空気中におかれた桁としては、DIN 4227に示された値の下限に近い値を示しており、ドイツにおける実際の桁の測定結果とほぼ同様な傾向であつた。

1. はしがき

コンクリートに一定の応力度を生じさせておくと、時日の経過とともにコンクリートのクリープによりひずみが増加してゆく、クリープひずみは弾性ひずみの4～5倍に達することも少なくないといわれて居り、弾性ひずみに比較してこれを軽視することはできず、これによるPC鋼線の張力の低下、したがつてプレストレスの減少量を慎重に考慮する必要がある。コンクリートのクリープに影響する物理的な要素は、載荷期間中の湿度、載荷時の材令、供試体の大きさ、型状、コンクリートの配合、骨材の種類、セメントの種類、載荷期間中の湿度、載荷前の湿度、締固めの程度、空気量、荷重の性質等であり、これらの影響を求めるために各種の試験が行われている。

国鉄では、1954年に信楽線第一大戸川橋梁の災害復旧工事として、スパン30mのポストテンション式プレストレストコンクリート桁を架設したが、その設計に当つてプレストレストコンクリートのクリープ量が研究問題の一つであつた。当時国内における多くの研究は、いずれもその理論と室内実験とを主としていたので、これらの実験結果を参考にして、DIN4227より推定した、クリープ係数、すなわち緊張後 $\psi_1 = 2.6$ 、死荷重積載後 $\psi_2 = 2.3$ を用いてコンクリートのクリープによるプレストレスの減少量を算出した。この計算をCheckし、また今後の設計資料を得るために、實際施工の桁についてクリープ量の現場測定が必要が生じたのである。そこで主桁4本の24測点について、クリープ量の時間的変化を求めることとし、緊張直後より現在に亘つて測定を続けている。測定結果はまだ結論に至らないが、桁下にこの測定に使用した機器測定方法、および現在までの測定結果について御報告する。

2. 測定機器

(1) 一般

コンクリートのひずみの測定には、従来オクイゼン型ひずみ計がよく使用されており、近くはワイヤーストレインゲージも使用されている。オクイゼン型ひずみ計は室内実験、模型実験等には便利であるが、取付けたまま放置しなければならない点で現場における長期測定には不向きである。ワイヤーストレインゲージは、多測点の同時測定、動応力測定等に必須のものではあるが、コンクリートに使用した場合多くの問題がある。コンクリートはヤング係数の異つた器材、填充材、と空隙とよりなつていて、それらの性質と配合とが千差萬別であるので、ゲージ長をいくらにすればよいかということと、湿気、水分の影響を受け易くゲージとの間の電氣的絶縁抵抗を長期間高く保つことが難しいことなどがそれである。この欠点を補うためにゲージ長の長いもの、ベークライト製のものなどがあるが、いずれも完全とはいえない。また長期測定となるとゲージを貼布する接着材自体がクリープして、被測定体のひずみを正確に示さなくなるおそれがある。鋼材の応力測定ならば、測点を高温に可熱してゲージを貼布することができるので、融点の高い接着材を使用することによりその影響は少くできるが、コンクリートのように加熱することの好ましくない材料の測定では、接着材について特別の考慮が必要である。

またワイヤーストレインゲージを使用した場合長期測定で問題とされるのは温度変化であるが、これに対してはダブルブリッジ構成のカールソンメーター等があつて、これは単辺ゲージ使用の場合にくらべて感度も上昇して好成績を挙げているようである。本工事施

工当時にもカールソンメーターについて若干の記録もあつたが、この測定は将来は現場機関に依託することになるので、取扱の簡単な機械式の方が便利であると考え、カールソンメーターは使用しなかつた。

機械式のクリープ測定器として、当時ペリー式のものが使用されていたが、鉄道技術研究所で在来使用されていた技術式ひずみ計に若干の改良を加えることにより、押当式歪計として適当なものが得られることになつたので、これを使用することとした。

(2) 技研式ひずみ計をコンクリートのクリープ測定に使用する事の検討

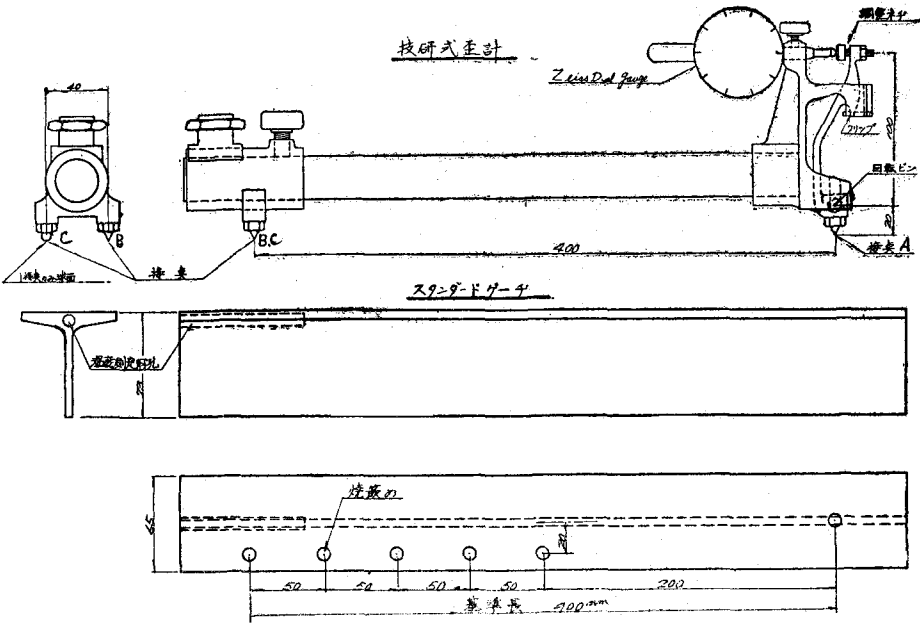
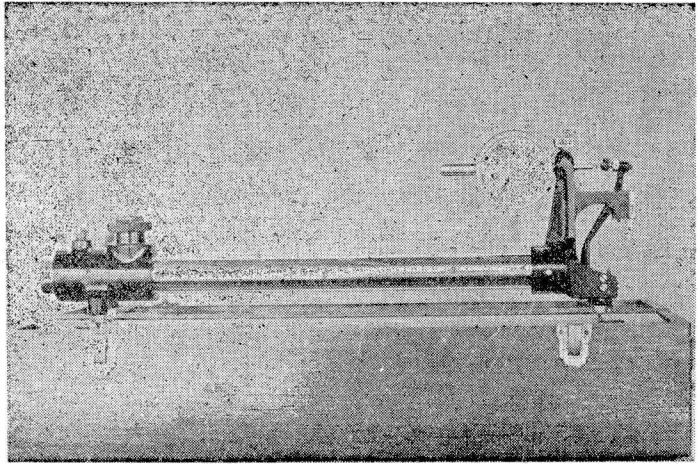


図 - 1

技研式ひずみ計は図-1に示す構造であり(写真-1)これを押当式ひずみ計として使用するために図-2のとおりコンクリートに4.0cmのゲージで埋込金具を設置し、その頂面にポンチし、または小孔をあけ、コンクリートのクリープによるそのゲージ長の変化を測定することとした。このひずみ計は、従来二等辺三角形の各頂点の位置に相当する3接

点A、B、C、をもちいて居り、この3接点を同時にポンチ孔に押当てるためには、金具の埋込みが非常に厳密なことを要求され、また不均等のクリープが生じてポンチ孔の位置が二等辺三角形の各頂点の位置でなくなる

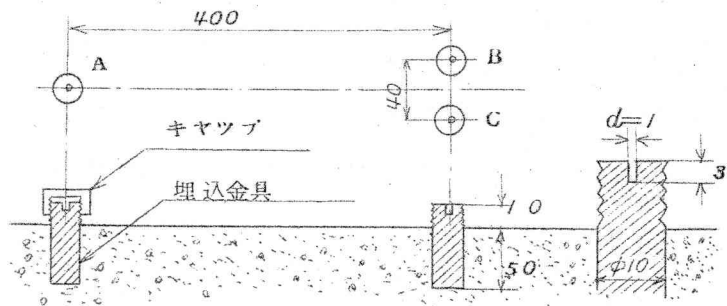


写 1

と測定に無理を生ずることとなる。

図 - 2 クリープ測定用埋込金具
(真鍮製キヤツプ共)

これを防ぐために、3接点中の1点Cは球面とし、これに対応する埋込金具の



頂面は平面

として、自由にスライドできるようにした。つぎに埋込金具頂面のポンチ孔の形により、測定精度が異なると考えられたので、これを3種類に変えて精度を検討した。測定の対象はゲージ長400mmの鋼製スタンダードゲージであり、(a) (b) (c) (d) (d') の5つの条件で検定を行った。

a 普通取付けに使用するポンチ孔

ポンチの角度は90°であり、技研式の接点尖端の角度は60°である。(図-3)

b 計器自身をポンチとする。

技研式ひずみ計を測点上に押当て、各接点の上部を木槌で軽くたたき、ひずみ計の接点の形のポンチ孔を作る。

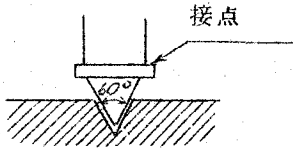


図-4 (b) の条件

c 径1mmの孔をあけ周囲を焼入れする。

(図-5)

d (c)の接点の1つを球面に直す。(前段

(前段参照)。(図-6)

以上(a) (b) (c) (d)はツァイスダイヤルゲージを使用した。

d' (d)と同じ条件でカールマー小型ダイヤルゲージを使用したもの。

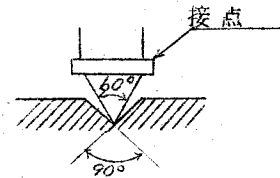


図-3 (a) の条件

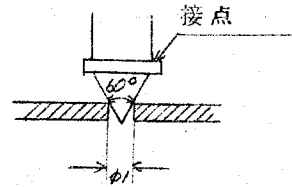


図-5 (c) の条件

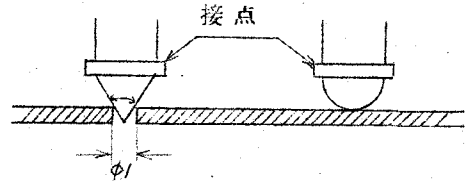


図-6 (d) の条件

以上の5条件で測定を繰返した結果ダイヤルゲージの読みについて表-1の信頼限界が得られた。

表 - 1

条 件	不偏推定値 u_2	信 頼 限 界		資 料 数 n
		最 大	最 小	
a	110.07	348.16	51.66	14
b	5.58	17.64	2.62	14
c	0.259	0.82	0.12	14
d	0.16	0.776	0.0637	9
d'	0.0867	0.373	0.0359	10

これらの測定条件の間の有意差を検討した結果、つぎのことが考察された。

(c) (d) (d') の間に有意差は認められない。

(a)と(b)、(b)と(c)との差は極めて有意である。

以上の結果から(c)、(d)、(d') を同一に取扱うこととし、表-2により測定値の精度を検討する。

表 - 2

条 件	不偏推定値 U^2	標準偏差の推定値	3 $\hat{\sigma}$	精 度
a	110.07	10.49	31.47	15.7×10^{-5}
b	5.58	2.36	7.08	3.6×10^{-5}
c	0.1693	0.411	1.23	0.6×10^{-5}

プレストレストコンクリートのクリープおよび収縮の大きさは通常の条件で次の範囲であると考えられる。

クリープ $25 \sim 1300 \times 10^{-5}$

収 縮 $7.5 \sim 37.5 \times 10^{-5}$

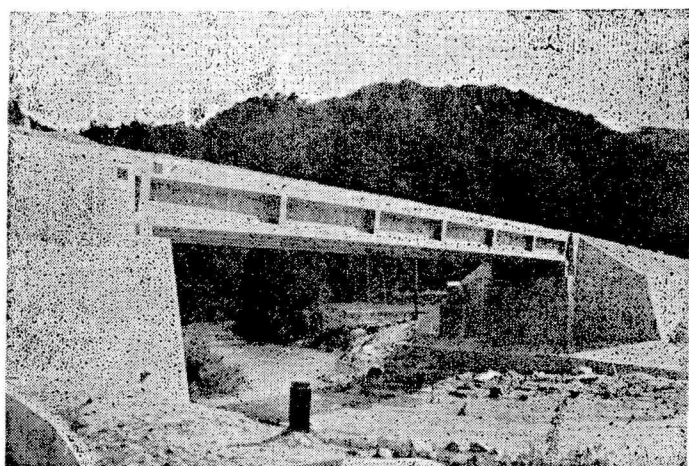
故に(a)の条件では望ましい測定はできない。

(b)の条件ではクリープ、収縮量が相当大きい場合にのみに測定可能である。

(c)の条件では所要の精度を有して居り、接点、尖端の形状の差による差は認められないから、コンクリートのクリープ測定に使用する場合は、先に述べた理由で1接点を球面でスライドできるようにするのがよい。

3. 測定方法

本橋梁は図-7のとおり主桁4本を併列とし、横締めを行つたものである。(写真-2) 測点は24ヶ所とし、それぞれ図-2の配置でクリープ測定用埋込金具を設置し、埋込金具頂面にあけられた小孔の中心間隔の時間的変化を測定しフリースミとすることとした。



写 2

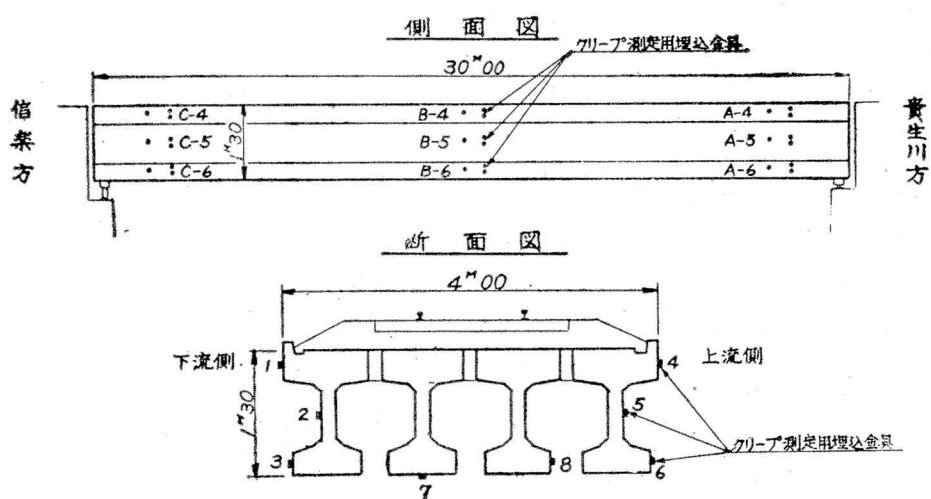


図 1-7

しかしこの観測値の中には次の要素が含まれている。

- (1) コンクリートの収縮
- (2) 弾性変形
- (3) クリープひずみ

したがって純粋なクリープひずみを求めるためには、観測値から(1)と(2)の影響を差引かねばならない。(1)を除くためには主桁と同一

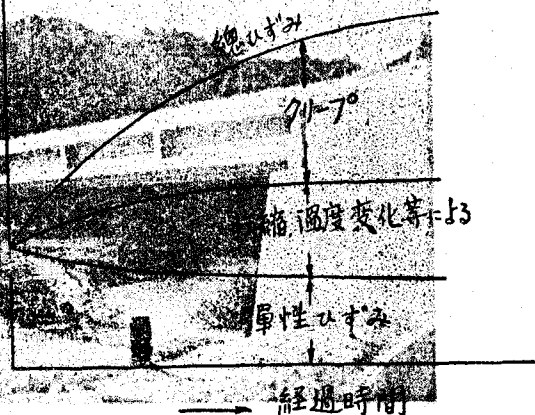


図 - 8

断面で、同一条件で製作され、同一条件におかれた無載荷の桁について測点間の距離変化を測定すればよい。(2)を除くためには、同一配合の供試体を数多く作り、各測点毎に破壊試験を行い、弾性係数の変化を求めておけばよい。しかも現在の計算方式によれば(2)の影響は実質的に考慮する必要がない。

そこで(1)の影響を去除するため、桁製作の際に主桁と同一断面の標準桁(図-9)2個を作成し、主桁と同様の埋込金具を設置して、プレストレスを生じさせないで測点間の距離変化を測定している。(写真-3)

標準桁の長さは2mであるので、端面からの乾燥の影響をさけるため、両端面に封緘剤を塗布した。

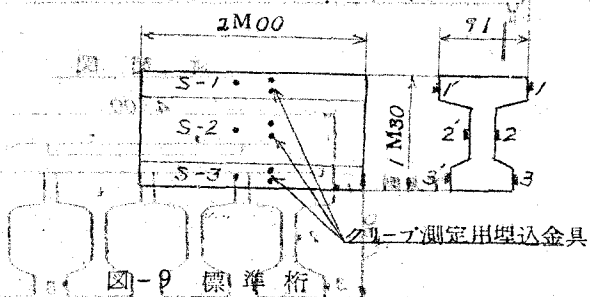


図-9 標準桁

ひずみ計は押当式であるので、測定の都度検定する必要がある。そのため鋼製スタンダードゲージ(図-1)を製作し、測定に当って先ずスタンダードゲージの基準長にひずみ計を押当てて、ダイヤルゲージの目盛をよみとりついで桁の測点にひずみ計を押当ててダイヤルゲージの読みをとり、その差から測点間の距離変化を計算した。(写真-4)そのため、スタンダードゲージの基準長は不変であることが望まれ、接点を押当てる小孔は焼はめにより摩損を防止し、またスタンダードゲージの温度を測定し基準長の変化を修正した。その後アルミ製のスタンダードゲージを製作したが、この工事の間に合合わなかつたので、この工事

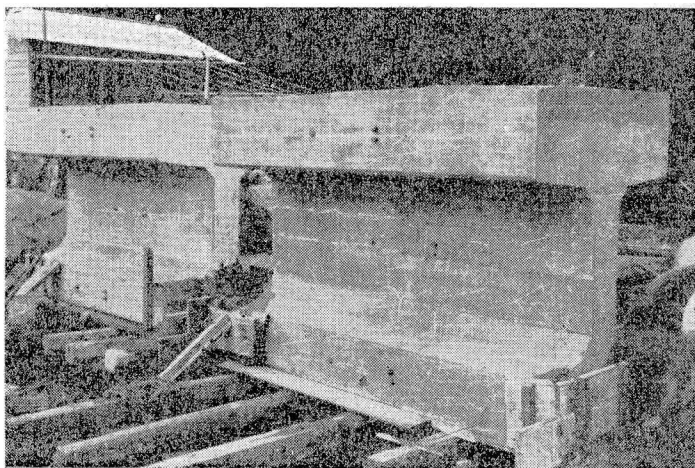
では前記のスタンダードゲージを引続き使用している。

4. 測定結果

現在までの測定結果を図-10に示す、図において実線は主桁測点、点線は標準桁測点、鎖線は温度変化による伸縮の推定値を示す。したがって実線、点線間の距離がクリープひずみの大きさを示して居り、点線と基準線との間は、収縮、温度変化、湿度変化の影響を示している。温度変化の影響をも含めた収縮量は点線と鎖線とから大略知ることができる。

なおこの橋梁は、緊張後37日～57日の間に死荷重が積載され65日目より列車が通過している。緊張時のコンクリート材令は9日であり、圧縮強度は $f_c = 440 \text{ Kg/cm}^2$ $f_{28} = 508 \text{ Kg/cm}^2$ であつた。

図-10より見て、クリープ量は大体終局値に近づいたようである。緊張後725日におけるフリース量を表記すると表-3のとおりである。

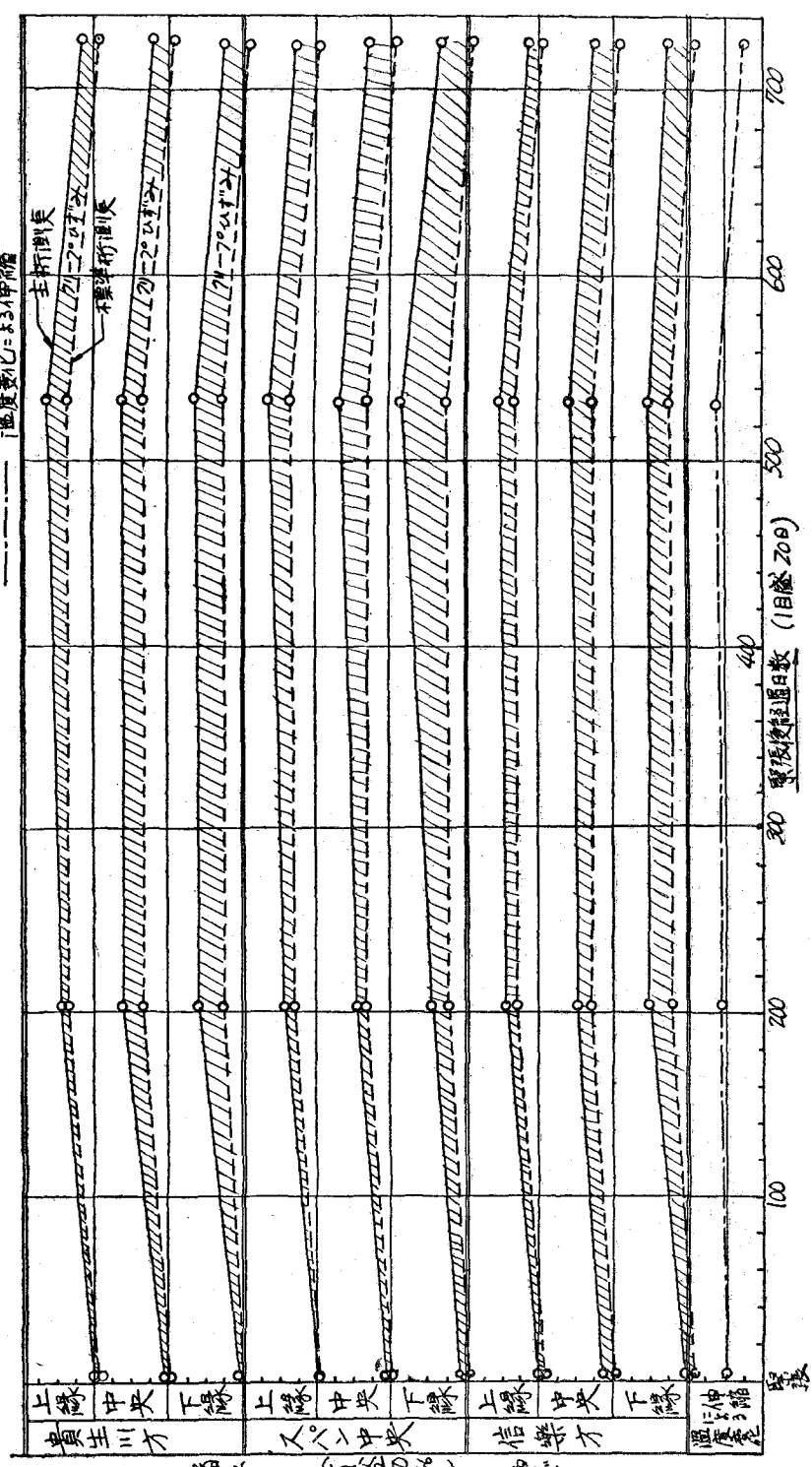


写3



写4

主桁測候
標準桁測候
温度変化による伸縮



(134)

表-3 緊張後725日におけるクリープ量

測 点		弾性ひずみ($\times 10^{-6}$)			ひずみの増加 ($\times 10^{-6}$)					クリー プ係数	記 事
		緊張時	死荷重 積 載	計	緊張直 後から の全量	収縮量 の修正	温度変 化 の 修 正	死荷重 ひずみ の修正	純クリ ープ量		
貫 生 川 方	上 縁	82	5	87	95	-100	135	-5	125	1.43	
	中 央	135	-1	134	170	-85	135	1	221	1.65	
	下 縁	215	-7	208	200	-45	135	7	297	1.43	
ス パ ン 中 央	上 縁	150	38	188	220	-100	135	-38	217	1.15	
	中 央	300	-8	292	260	-85	135	8	313	1.07	
	下 縁	435	-58	377	270	-45	135	58	418	0.94	
信 楽 方	上 縁	75	5	80	60	-100	135	-5	90	1.20	
	中 央	150	-1	149	210	-85	135	1	261	1.74	
	下 縁	270	-7	263	295	-45	135	7	392	1.45	

緊張直後からと、死荷重積載後からのクリープ量を分離して測定することができなかつたので、表-3のクリープ係数は正確には両者の中間のものなるが、緊張時の弾性ひずみの方が、死荷重ひずみよりはるかに大きいから、クリープ係数は大体において緊張直後からの大きさを示すと考えてよいと思う。

DIN4227によれば計算に用いるクリープ係数は表-4のとおりである。

表-4 クリープ係数

状 態		クリープ係数(ψ)
水 中		0.50k~1.00k
空気中	非常に湿った場合	1.50k~2.00k
	一般 の 場 合	2.00k~3.00k
	乾 燥 し た 場 合	2.50k~4.00k

表-4のkは図-11から求める。図-11において

：プレストレスを与えるときのコン

きのコンクリート圧縮強

度、この場合 440 Kg/cm^2

： $= 1.156 \quad 28$

（早強セメント使用であ

るから）この場合

$1.15 \times 508 = 585 \text{ Kg/cm}^2$

$= 0.75$ 故に $k = 1$

したがってこの測定結果は空気
中で非常に湿つた場合に相当し、
特にスパン中央のクリープ量は
それ以下である。

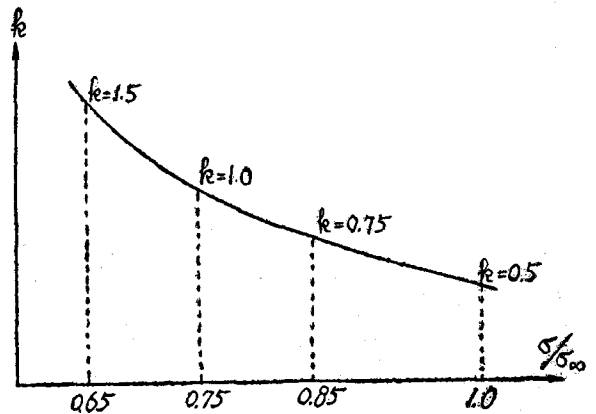


図 - 11

また収縮量についても、DIN 4227によれば空気中で非常に湿つた場合最少寸法 20 cm 未満のポストテンショニングの桁では $125 \times 0.6 k \times 10^{-6} = 75 \times 10^{-6}$ と示されている。実測値は $45 \sim 100 \times 10^{-6}$ であるからこの仮定によれば大体正しいようである。ドイツにおける最近の測定結果では、クリープ係数 $2.00 k$ の計算値に対し、実際の総収縮量は、その $60 \sim 80 \%$ であつて、上記の測定値と大体同じ傾向を示している。

なお本桁は水面上約 5.8 m の高さであり、標準桁は地面上約 15 cm に置かれている。

5. 結 び

現在までの測定結果では、この橋梁コンクリートのクリープ係数は $0.94 \sim 1.74$ であり、収縮ひずみは $45 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度であることがわかつた。これらの測定値は DIN 4227 に示された空気中で非常に湿つた場合の値に近いものであり、またドイツにおける測定結果と大体一致した。この橋梁は平水面上約 5.8 m にあつて常識的にはむしろ湿つた場合ではなく、一般の場合に相当するものであるから、実測値は DIN 4227 に示される値よりも相当小さく表れていることになる。収縮量測定のための標準桁の設置状態は特に湿気の点で本桁を若干の相異があると思うが、湿気についての記録がないのは残念である。クリープは大体終局値に近づいたようであるが今後しばらく測定を継続して行きたい。

この測定は吉田徳次郎先生、国分正胤先生、国鉄施設局友永特殊設計室長、高坂土木課長、

仁杉技師、川口技師、技研三浦コンクリート研究室長、F. K. K. 猪股技師ほか諸先輩の御指導のもとに行われた。また技研式ひずみ計の整備、検査は鋼構造研究室の協力により行われたものである。

参考文献

仁 杉 徹：「鋼弦コンクリートの設計法に関する実験的研究」

猪 股 俊 司：「プレストレストコンクリート桁に関する実験」

土木学会論文集、第17号 昭28. 8

岡 田 清：「Pre-Stressed Concrete の収縮とクリープについて」

土木学会誌、第37巻第1号 昭27. 1

川 口 輝 夫：「プレストレストコンクリート設計、施工指針の解説について」

鋼橋設計示方書とプレストレストコンクリート指針、土木学会
昭30. 8

Finster walder：「Ergebnisse Von Kriech-und Schwindmessungen
on Spannbetonbauten」

Beton-und Stahlbetonbau Heft 1 Jan. 1955