

PRC 桁の実橋測定について

谷内田 昌 熙*
石橋 忠 良*
金森 真*
吉野 伸 一*

1. PRC 桁の実橋測定について

PRC 桁のひびわれ制御，設計については，桁の耐久性上重要であるが，その設計法はまだ十分確立されていない。経済性にすぐれている PRC 桁の実用化のために「PRC 桁の設計・施工について」（本誌掲載）で紹介したように，国鉄では既に何橋かの PRC 桁の設計・施工を行っている。この中で現在，特に次の三橋について，ひびわれ性状を中心に，ひずみ，たわみ等について測定を行っている。

(1) 桜井線ボケラ B (奈良県)

土木学会プレストレストコンクリート標準示方書の分類による「Ⅲ種」プレストレストコンクリートとして設計している。この橋梁は昭和 57 年 12 月に施工し，昭和 59 年 3 月に使用を開始した。

(2) 東北新幹線田端中部 Bi (東京都)

この橋梁は，Ⅲ種 PC 桁とほぼ同様の設計であるが，死荷重時のコンクリートの引張応力度に特に許容値を設けていない。

○設計荷重作用時……鉄筋の引張応力度を 2000 kg/cm² 以下とし，鉄筋，PC 鋼材の疲労の検討を行う。

この橋梁は昭和 59 年 4 月に施工され，昭和 60 年 3 月に使用開始される予定である。

(3) 東北新幹線および通勤別線新田口 Bi (埼玉県)

この橋梁はアウトサイドケーブルで荷重による曲げモーメントと逆向きに曲げを加える方法を採用しており，その他については RC 桁の計算によっている。

○全死荷重作用時……全断面を有効としてコンクリートの引張応力度を 40 kg/cm² 以下，RC 断面の計算をして鉄筋の引張応力度を 1000 kg/cm² 以下としている。

○設計荷重作用時……鉄筋の引張応力度を 2000 kg/cm² 以下とする。

表—1 測定項目

橋梁名	調査項目	鉄筋ひずみ	コンクリートひずみ	有効応力計	桁たわみ	ひびわれ分布
ボケラ B	死荷重時	○	○	—	○	発生せず
	設計荷重時	○	○	—	○	発生せず
新田口 Bi	死荷重時	○(末)	○(末)	—	○(末)	○(末)
	設計荷重時	(末)	(末)	—	(末)	(末)
田端中部 Bi	死荷重時	○(末)	○(末)	○(末)	○(末)	○(末)
	設計荷重時	(末)	(末)	(末)	(末)	(末)

(注) (末) は調査予定であるが，まだ実施していない項目

なお，この橋梁は昭和 58 年 10 月～59 年 2 月に施工し，昭和 60 年 3 月使用開始の予定である。

これら 3 橋の測定項目を表—1 に示す。

2. ボケラ B の測定

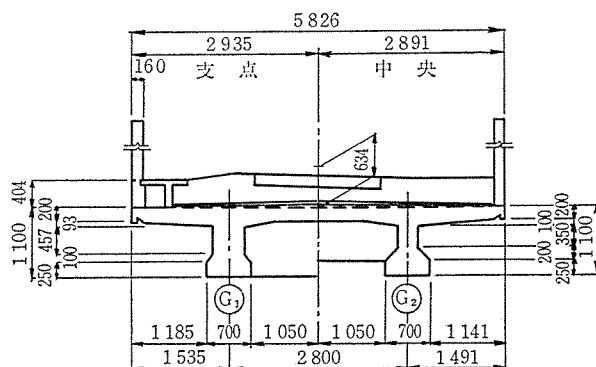
2.1 測定方法

本橋梁は図—1 に示す断面を持つ桁長 17.0 m (スパン 16.2 m)，幅 5.826 m の単線 (KS-16)，2 主 T 形桁である。施工は支保工により場所打ちされた。図—2 に中央断面の主鋼材配置を示し，ひずみ測定位置を図—3 に示す。

2.2 測定結果

(1) ひずみ，応力度

図—4 にプレストレス導入後および 8 か月後の死荷重状態での鉄筋のひずみ測定より求めた応力度分布を示す。また，図—3 に示す R₇ の鉄筋応力度の経時変化を図—5 に示す。桁に配置されている鉄筋にはプレスト



図—1 断面図

* 国鉄構造物設計事務所

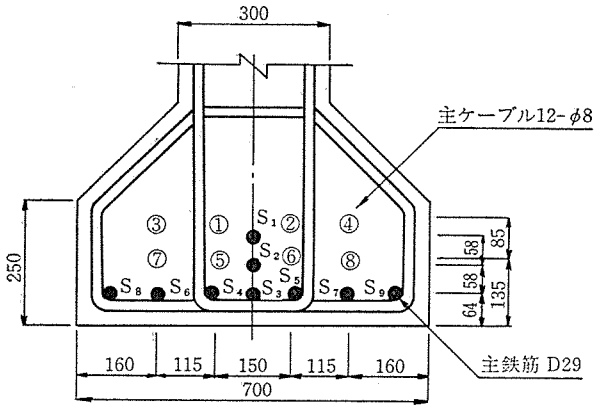


図-2 中央断面主鋼材配置

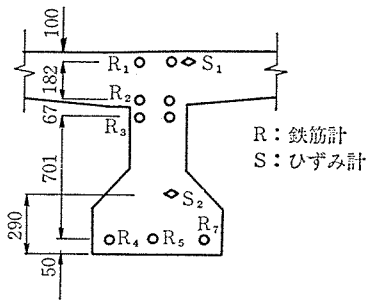


図-3 測点配置

レッシングによる桁の弾性短縮により圧縮力が生じる。この圧縮力は鋼材のレラクセーションにより、若干減少する要素があるが、コンクリートのクリープ・乾燥収縮により、時間とともに鉄筋の圧縮力は増加する傾向にある。

列車荷重載荷時のコンクリートひずみの変動量の一例

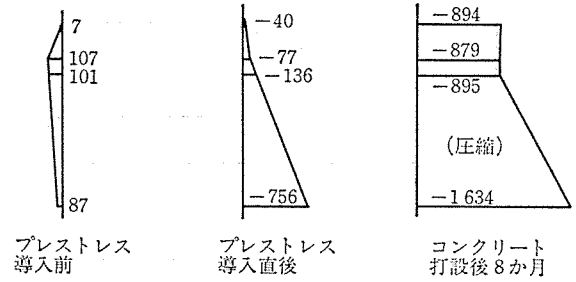


図-4 鉄筋応力度分布 (単位: kg/cm²)

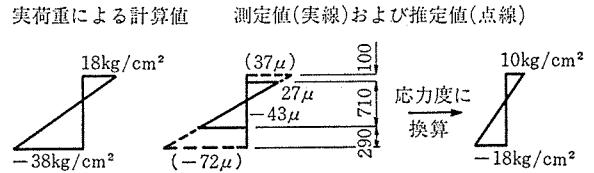


図-6 列車荷重によるコンクリートひずみ (変動量)

を図-6 に示す。別途テストピースにより測定したコンクリートのヤング係数 $E_c \approx 2.6 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ を用いて応用度に変換した値は、実際の列車荷重 (衝撃を含まない) を用いて全断面有効として求めた応力度の約 1/2 である。このことは、高らん、レールによる断面剛性の増のほか、走行列車のような短期載荷に対する桁の応答の鈍感さによると考えられる。

(2) 桁のたわみ

死荷重時の桁のたわみは測定期間を通して全断面有効とした計算値と良く一致している。しかし、列車荷重による値は、スパン中央の測定値が 2 mm であり、衝撃を含まない実列車荷重に対して全断面有効として計算した

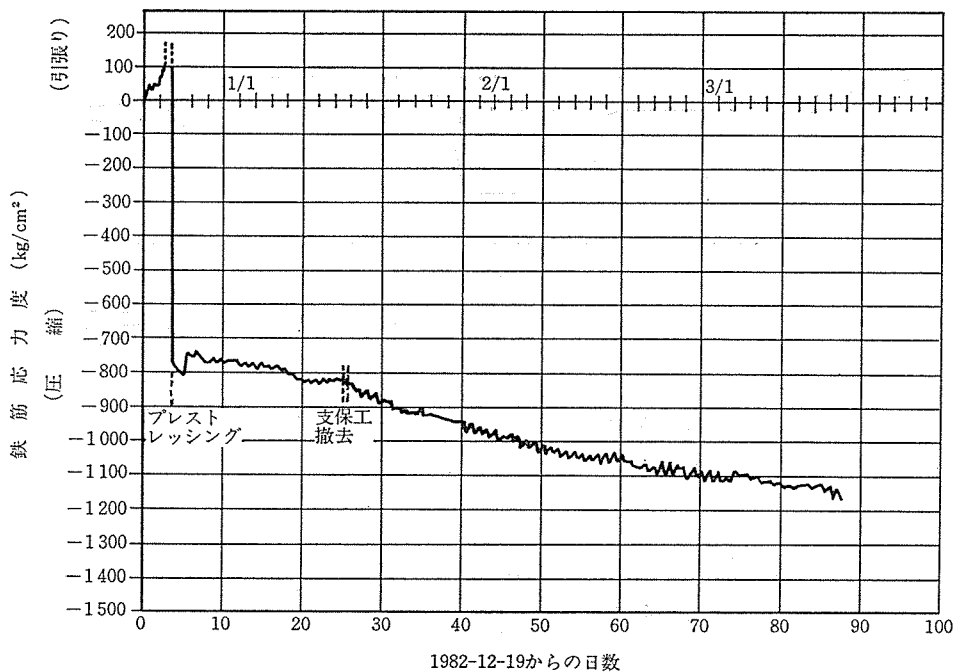


図-5 鉄筋の応力度変化 (鉄筋計による R, 測点)

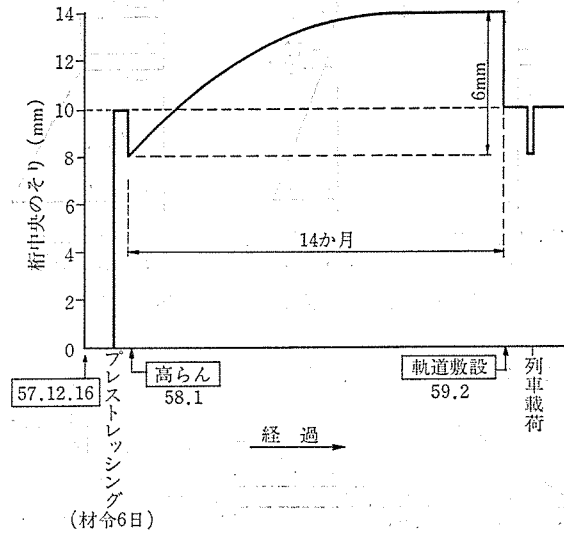


図-7 たわみの測定値

値 4 mm に比べて約 1/2 となり、ひずみ測定のと一致している。図-7 に列車荷重時までのたわみ変化の測定値を示す。高らん施工後、軌道載荷までの変形量から求めたこの期間のクリープ係数は約 $\phi=0.75$ である。

(3) ひびわれ

現在までの列車荷重では、ひびわれは生じていない。このことは、主として設計活荷重 (列車荷重+衝撃) に比べて、現在、運行されている列車の重量が小さいことによると考えられる。

3. 田端中部 Bi の測定

3.1 測定方法

田端中部 Bi は8連の PRC 桁からなっており、桁長

25 m (スパン 23.6 m) で設計活荷重は新幹線用の N-18, P-19 で構造は複線二室箱形桁である。施工は支保工上で場所打ちされた。このうちの2連について測定を行った。測定に用いた桁を「A桁」および「B桁」とする。A桁は桁中央に電車線柱が付くため PC ケーブルを 10 本配置している。施工中、試験的に完成時の全死荷重時の応力度 (全断面有効として下縁コンクリートに 15.4 kg/cm^2 の引張応力度) となるように、型枠脱型後、10 本の PC ケーブルのうち 3 本のみを緊張し、調査測定を行った。B桁は電車線柱が付かないため、PC ケーブルは全部で 9 本である。この桁では完成時の単線載荷時の応力状態 (全断面有効として下縁コンクリートに 33.9 kg/cm^2 の引張応力度) になるように、型枠脱型後 1 本のケーブルのみを緊張し (一次緊張)、支保工を撤去し調査測定を行った。更に、PC ケーブルを 2 本追加緊張し (二次緊張)、ひびわれ幅の変化を調査した。その後、4 日後に残ケーブルをすべて緊張した。A桁および B桁についてはその後適時測定を行うほか、列車荷重載荷時にも測定を行う予定である。ひずみおよび応力度

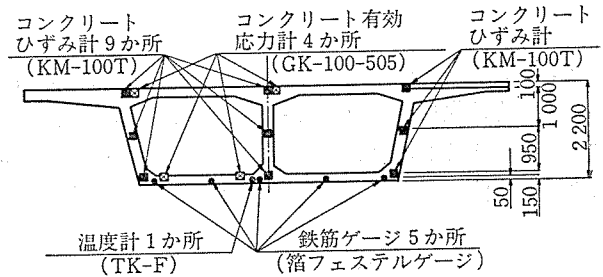


図-8 測定器の配置 (A桁, B桁共通)

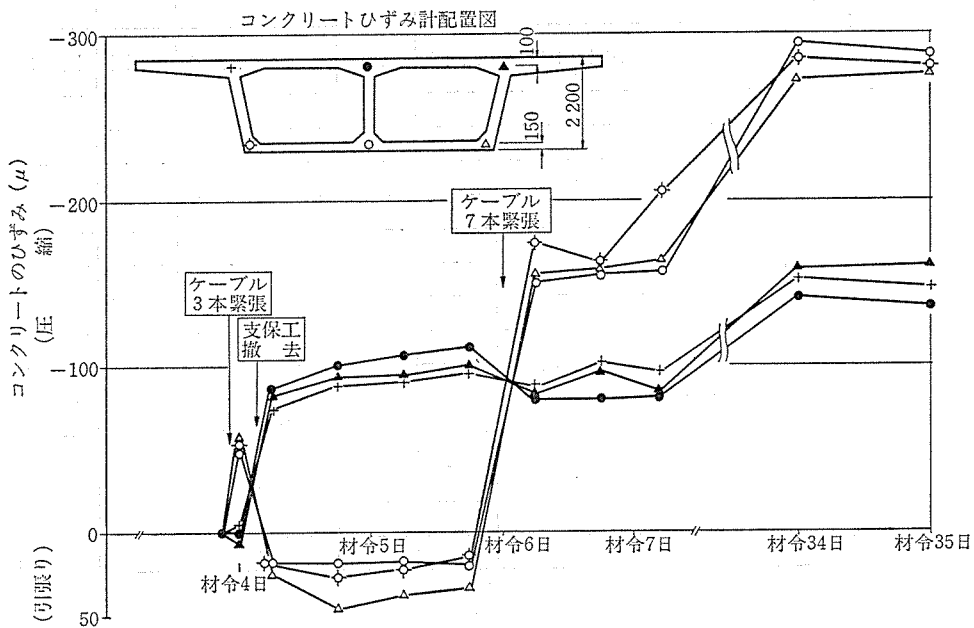


図-9 コンクリートひずみの経時変化 (A桁)

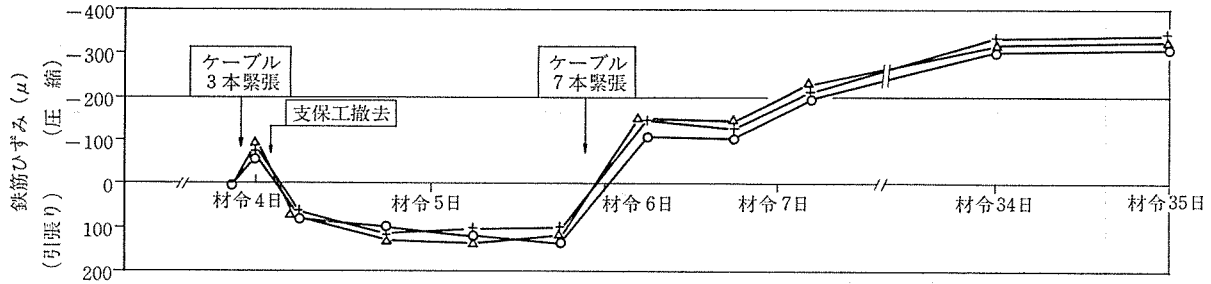


図-10 鉄筋ひずみの経時変化 (A桁)

表-2 乾燥収縮およびクリープひずみ

測定位置	4月3日6時 材令7日 (μ)	5月1日8時 材令35日 (μ)	差 (μ)
左ウェブ上側	-91	-147	-56
中央ウェブ上側	-102	-135	-60
右ウェブ上側	-97	-160	-63
左ウェブ下側	-169	-280	-111
中央ウェブ下側	-169	-287	-118
右ウェブ下側	-159	-278	-119

の測定断面はスパン中央で計器の位置を図-8 に示す。

3.2 測定結果

(1) コンクリートおよび鉄筋のひずみ, 応力度

A桁のコンクリートひずみの経時変化を図-9 に示す。この桁は材令7日から材令35日までの28日間は増加荷重がなかったためクリープひずみと乾燥収縮ひずみの合計が測定された。これを表-2 に示す。A桁の鉄筋のひずみの経時変化を図-10 に示す。材令7日から材令35日までの28日間のクリープ・乾燥収縮により鉄筋に生じる圧縮応力度について、実測値と計算値の比較を表-3 に示す。

計算値は次の3ケースで求めた。

乾燥収縮ひずみ 30×10^{-6} 43×10^{-6} 80×10^{-6}
 クリープ係数 0.6 0.8 0.8

実測値の方が計算値よりもかなり大きい結果となっている。この傾向はボケラBにおいても同様であり、実測値と合わせるためには計算に用いる乾燥収縮ひずみ、クリープ係数をかなり大きくして計算しなければならない。現行の基準に用いられている乾燥収縮ひずみは鉄筋による拘束等を含んだ値であると考えられる。鉄筋による乾燥収縮拘束効果は非常に大きいので(図-11 参照)²⁾、鉄筋に生じる圧縮応力度を求める場合は本来の

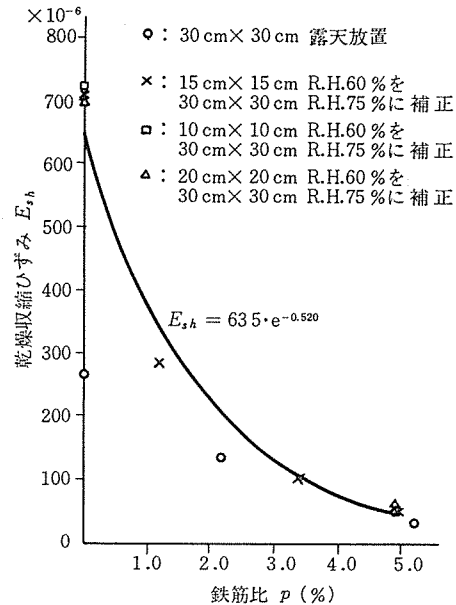


図-11 鉄筋による乾燥収縮の進行

無筋コンクリートとしての乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数を用いる必要があると思われる。今後更に検討を進める予定である。有効応力計によるコンクリート応力度の測定結果を図-12 に示す。有効応力計は、クリープ・乾燥収縮の影響を受けず、直接コンクリート応力度をロードセルで測定できると期待していたが、図-13 からわかるように、クリープ・乾燥収縮の影響を受けていると考えられる。A桁の各ウェブのコンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、有効応力計によるコンクリート応力度をまとめて図-13 に示す。図-13 には計算値も合わせて示した。実測値はケーブル緊張直前の値を基準にしているため、それ以前に生ずるひずみ、たとえば、支保工の沈下、たわみにより桁に生じる自重によるひずみ等は

表-3 クリープ・乾燥収縮による鉄筋圧縮力 (A桁)

測定した鉄筋の位置	4月3日16時 (材令7日) (μ)	5月1日8時 (材令35日) (μ)	差 (μ)	鉄筋の応力度に換算 (kg/cm ²)	測定値の平均値 (kg/cm ²)	計算値 (kg/cm ²)		
左ウェブ下側	343	167	-176	370	ウェブ 378 スラブ 480 全平均 419	$\epsilon_s = 30 \times 10^{-6}$ $\varphi = 0.6$	$\epsilon_s = 43 \times 10^{-6}$ $\varphi = 0.8$	$\epsilon_s = 80 \times 10^{-6}$ $\varphi = 0.8$
下スラブ左側	91	-139	-230	483				
中央ウェブ下側	485	292	-193	405	152	206	275	
下スラブ右側	63	-164	-227	477				
右ウェブ下側	21	-150	-171	359				

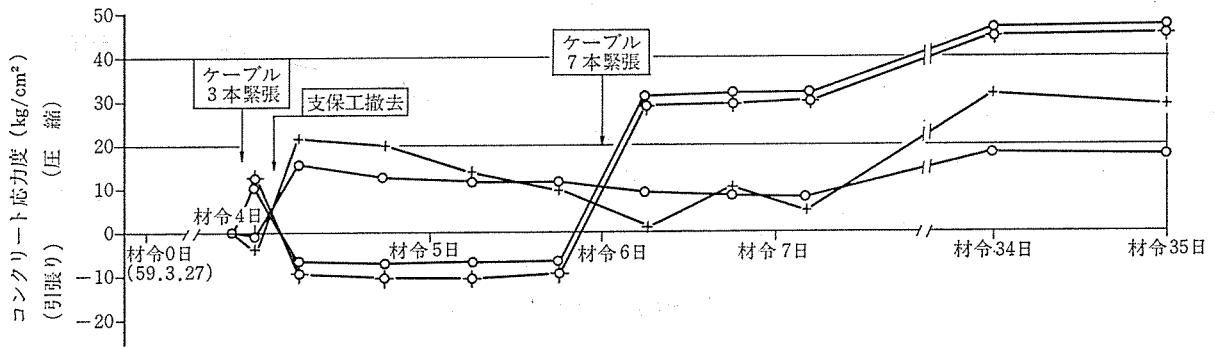


図-12 有効応力計によるコンクリート応力度の経時変化 (A桁)

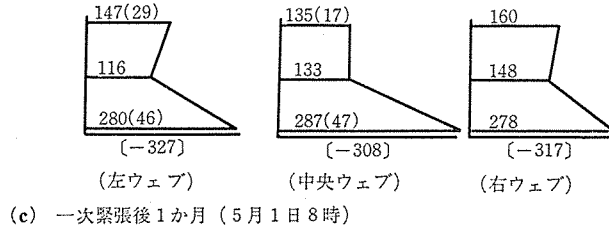
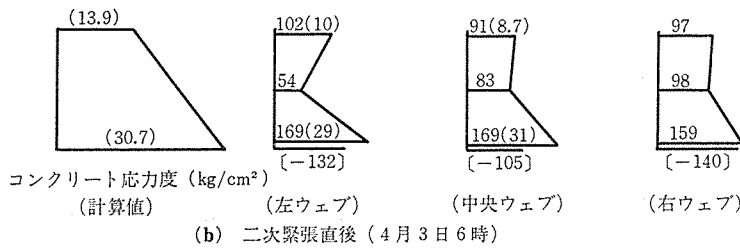
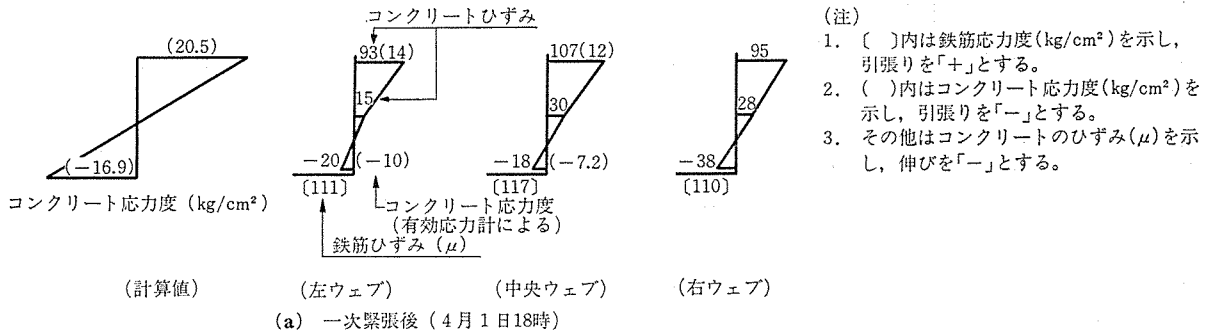


図-13 断面のひずみ, コンクリート応力度の分布

含まれていないことが、計算値より実測値が小さい値となっている理由と思われる。

す。桁下縁のコンクリートの引張ひずみは、ひびわれ位置との関係で、この程度の測定値の差が生じるものと思われる。有効応力計によるコンクリート応力度を図-15

B桁のコンクリートひずみの経時変化を 図-14 に示

表-4 計 算 結 果

(単位: kg/cm²)

桁 別	A 桁					B 桁						
	自 重		設 計 荷 重			自 重			設 計 荷 重			
ケーブル緊張本数	3 本		10 本			1 本		3 本		9 本		
設 計 方 法	全断面	PRC	全断面	全断面	PRC	全断面	PRC	PRC	全断面	全断面	PRC	
上縁コンクリート応力度	20.5	32.1	13.9	59.3	80.0	20.7	38.0	29.4	15.1	58.4	80.0	
下縁コンクリート応力度	-16.9	ひびわれ	30.6	-45.5	ひびわれ	-27.5	ひびわれ	ひびわれ	23.0	-48.8	ひびわれ	
鉄 筋 応 力 度	-	1042	-	-	1833	-	1788	835	-	-	1929	

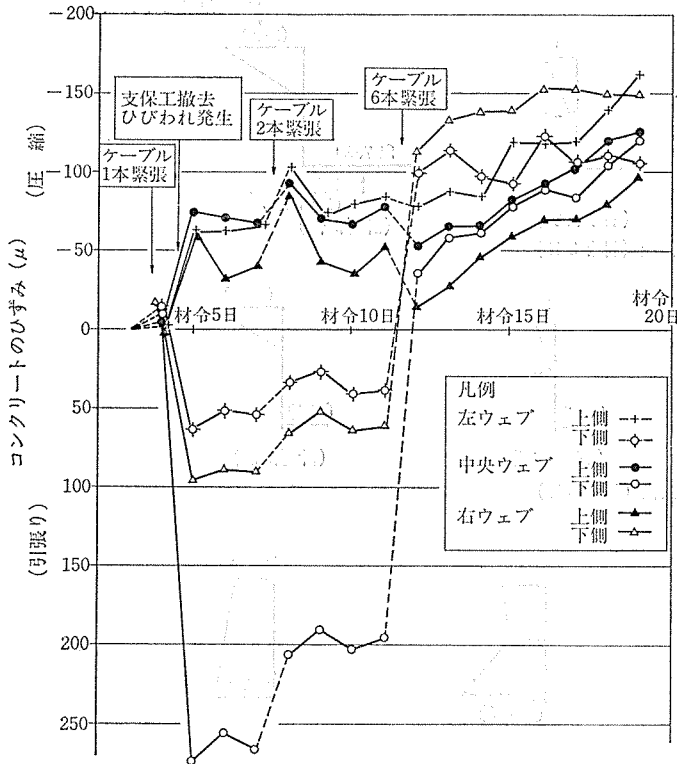


図-14 コンクリートひずみ (B桁)

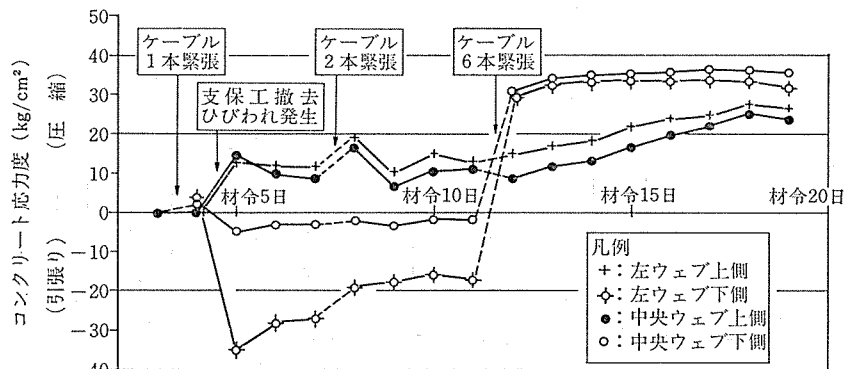


図-15 有効応力計によるコンクリート応力度 (B桁)

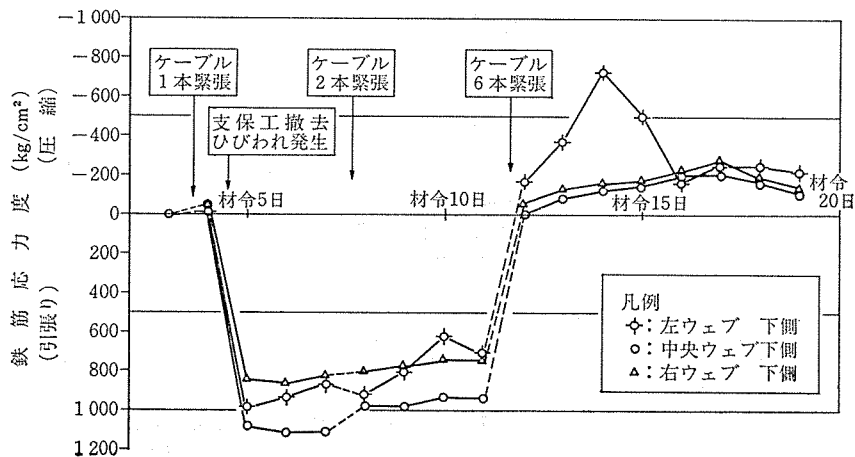


図-16 鉄筋応力度 (B桁)

に、鉄筋のひずみの測定値にヤング係数を乗じて求めた鉄筋応力度を図-16に示す。中央断面における各ウェブのコンクリートのひずみ、有効応力計によるコンクリート応力度、鉄筋のひずみから計算した鉄筋応力度をまとめて図-17に示す。図-17には計算値も合わせて示した。

(2) 桁のたわみ

桁のたわみを表-5に示す。測定期間を通じていずれも比較的計算値と良く一致している。

(3) ひびわれ

A桁にはひびわれが発生しなかった。B桁において、ケーブルを1本のみ緊張後、支保工を撤去し、観察しているとひびわれが発生した。ひびわれ状態をスケッチしたものを図-18に示し、ひびわれ幅、ひびわれ間隔を集計したものを図-19、図-20に示す。

比較のために角田氏の式³⁾およびCEB-FIP(1978年)の計算式⁴⁾に実測鉄筋ひずみを代入して計算した結果を表-6に示す。

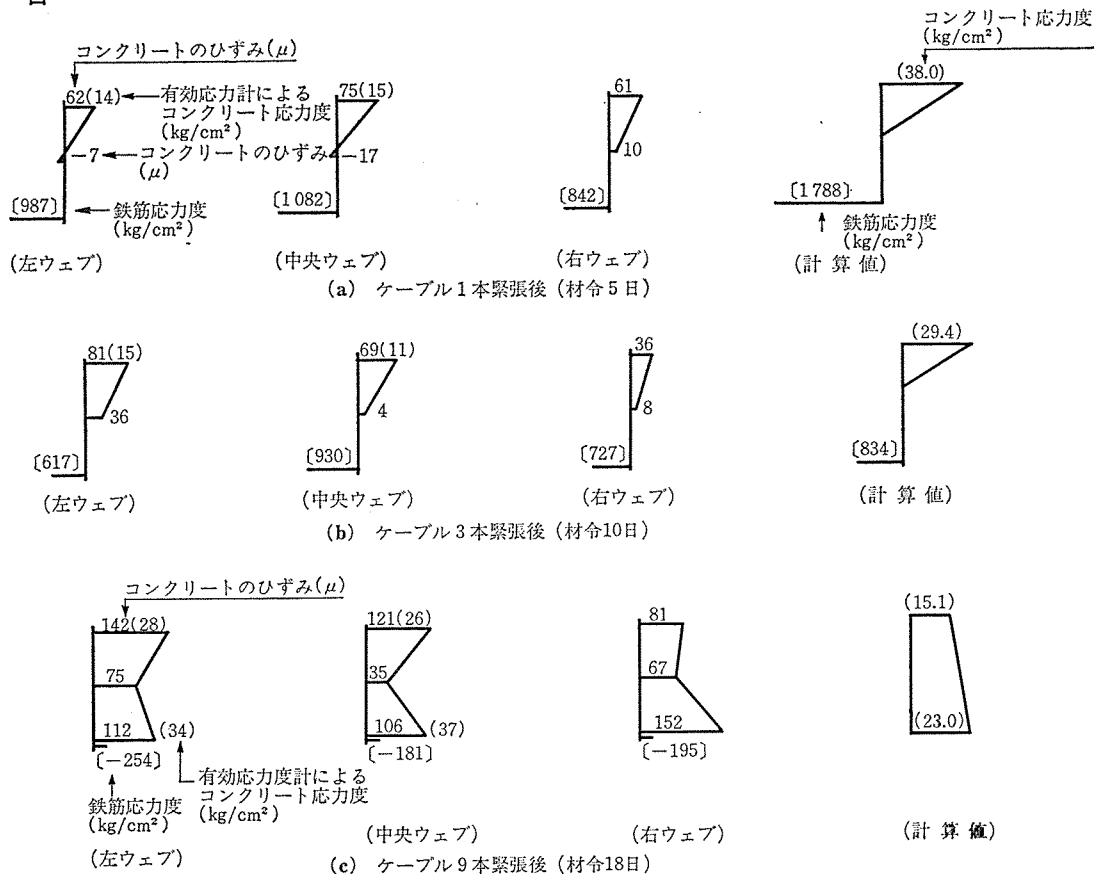
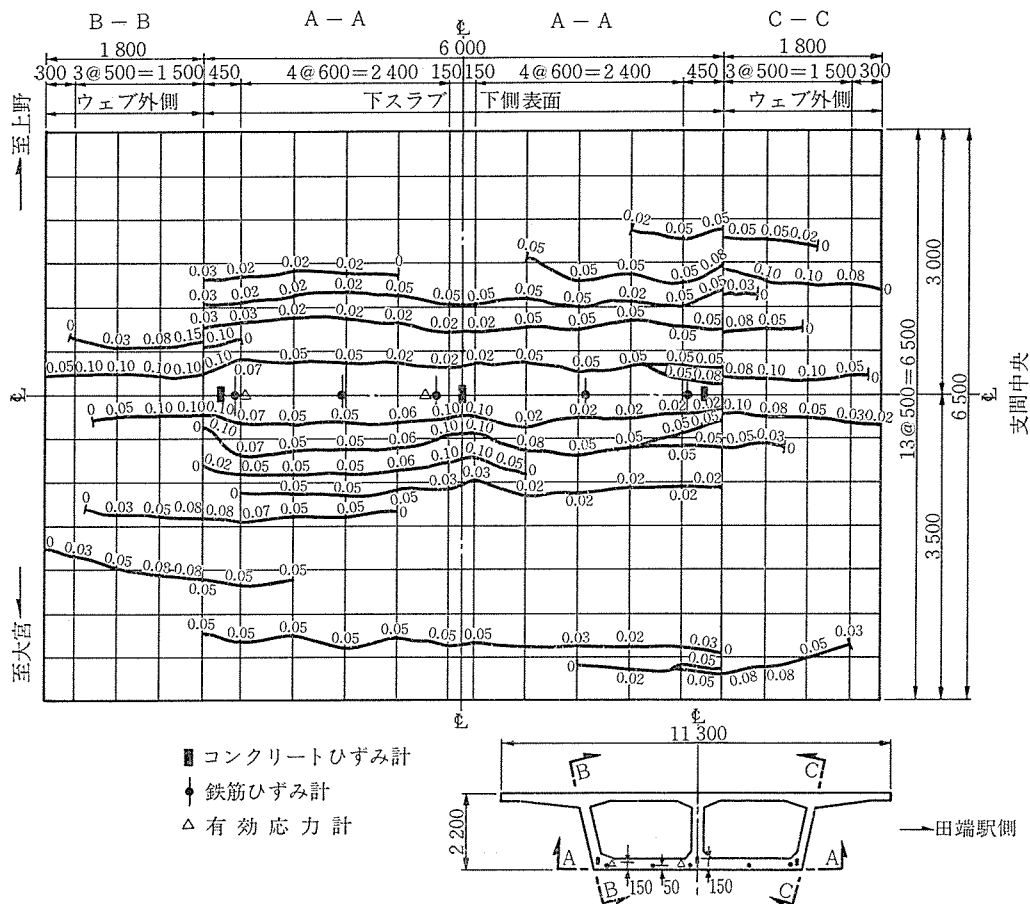
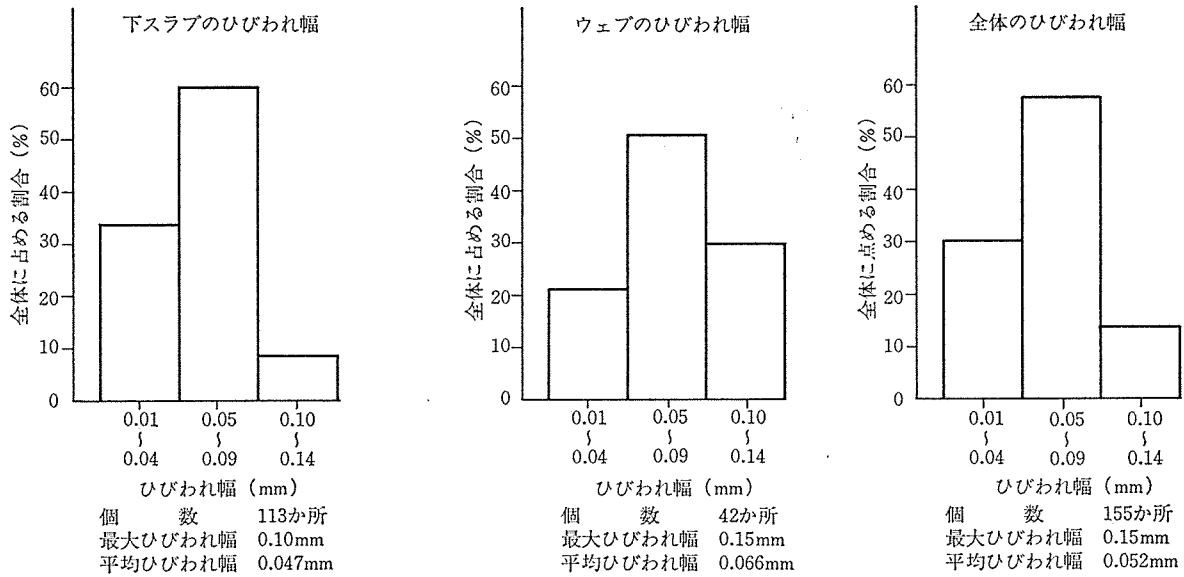
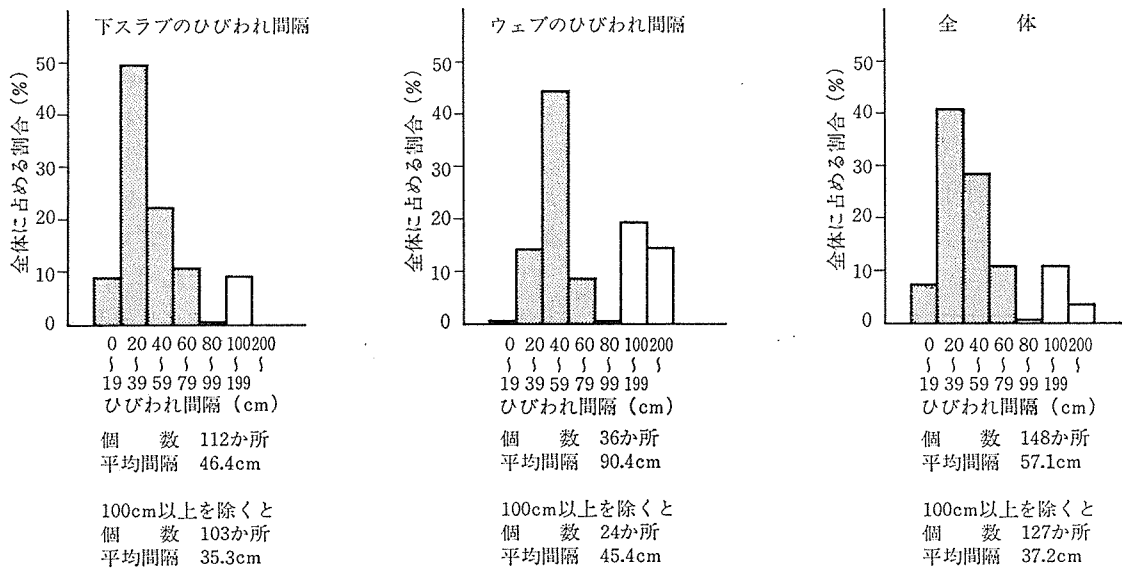


図-17 断面の応力状態(B桁)





図—19 ひびわれ幅 (B桁)



図—20 ひびわれ間隔 (B桁)

表—5 桁のたわみ

A桁 (単位: mm)				
項 目	年月日	変位量	合 計	計算値
コンクリート打設	59.3.27	0	0	0
ケーブル3本緊張	59.3.31	↑2	↑2	↑2
支保工撤去	59.3.31	↓5	↓3	↓4
ケーブル7本緊張	59.4.2	↑5	↑2	↑2
B桁 (単位: mm)				
項 目	年月日	変位量	合 計	計算値
コンクリート打設	59.4.11	0	0	0
ケーブル1本緊張	59.4.16	0	0	0
支保工撤去	59.4.16	↓7	↓7	↓4
ケーブル2本緊張	59.4.19	↑3	↓4	↓3
ケーブル6本緊張	59.4.23	↑7	↑3	↑2

表—6 ひびわれ幅および間隔

	最大ひびわれ間隔 (cm)	平均ひびわれ間隔 (cm)	最大ひびわれ幅 (mm)	平均ひびわれ幅 (mm)
角 田 式	27.0	—	0.12	—
CEB-FIP(1978年)	—	—	※0.09 0.01	※0.05 0.006
実測値(下スラブ)	—	46.4	0.1	0.047

※ 上欄は繰返し載荷, 下欄は初載荷の場合である。

4. 新田口の測定

4.1 概 要

RC 桁のひびわれを制御するために, その断面引張側に PC 鋼材をアウトサイドケーブルとして用いた東北新幹線, 通勤別線新田口 BI の桁において, ひびわれ, 鉄筋の応力度, たわみ等を測定した。

測定は東北新幹線（以下A桁という）および通勤別線（以下B桁という）それぞれ2連について行った。ひびわれ発生時期の違いによる影響を調査するためにプレストレスの導入時期を変えている。A, B 桁各 1 連は自重、地覆・防音壁、および路盤コンクリート施工後にプレストレスを与えた（以下 1A, 1B 桁という）。他の 2 連はプレストレスを与えた後に支保工を撤去し自重を作用させた（以下 2A, 2B 桁という）。

4.2 測定および結果

(1) ひびわれ

1A, 1B 桁においては支保工撤去後（自重作用後）、地覆・防音壁および路盤コンクリート施工後、プレストレス導入後にそれぞれひびわれ状況を調査し、主としてひびわれ幅、本数、間隔を測定した。地覆、防音壁および路盤コンクリート施工後のひびわれ発生状況を図-21 に示す。図から明らかなように、ひびわれはコンクリー

トの縁引張応力度が約 30 kg/cm² を超えた範囲に発生している。

下スラブ下面およびウェブ側面に橋軸方向に基準線を設け（下スラブ 6 本、ウェブ左右各 3 本）、それと交わるひびわれの幅とひびわれ間隔を測定した。1/2 点（スパン中央）付近 5.4 m および 1/4 点（スパンの 1/4 点）左右各 5.4 m にわけてひびわれ幅、本数、間隔を整理した（図-22 参照）。図に示した平均ひびわれ幅 w_m 、平均ひびわれ間隔 l_m は各測定区間 5.4 m における平均値である。

一方、CEB マニュアル⁹⁾および角田式⁹⁾によりひびわれ幅、ひびわれ間隔を計算し測定値と比較すると、計算値よりも測定値の方が大きい傾向であった。

2A, 2B 桁はウェブ下面に長さ 30 cm、幅 0.05 mm 程度のひびわれが若干見られた（プレストレス導入、支保工撤去後）。このひびわれの発生は、コンクリートの乾燥収縮がウェブ下部および下スラブに配置した多量の主鉄筋（有効引張断面積に対して 5.3~5.5%）により拘束されること、およびプレストレスによる軸力が主鉄筋により減少することが理由と考えられる。

プレストレス導入後で 1A, 1B 桁と 2A, 2B 桁を比較すると、その応力状態はほぼ等しい（前者は自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート+プレストレスでコンクリートの縁引張応力度はそれぞれ 4.0, -1.8 kg/cm²、後者は自重+プレストレスでコンクリートの縁引張応力度はそれぞれ 5.1, -2.3 kg/cm²）が、施工の初期にひびわれを発生させた 1A, 1B の方にのみ曲げひびわれが発生している。

(2) 主鉄筋応力度の測定

各桁スパン中央の主鉄筋に鉄筋計を取り付け（図-23 参照）、応力度を測定した。1A, 1B 桁の鉄筋応力度の変化を図-24 に示す。図は各点測定値の平均値を示してあり、計算値は通常の RC 断面の計算により求めた値である。

曲げひびわれの発生していない 2A, 2B 桁の鉄筋応力度の変化を図-25 に示す。

(3) たわみの測定

スラブ上面の水準測量によりたわみ量を測定した。測定点はスパンの 6 等分点である。1A, 1B 桁についてひびわれを考慮した平均有効断面二次モーメントを用い

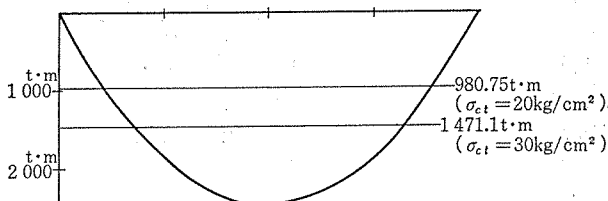
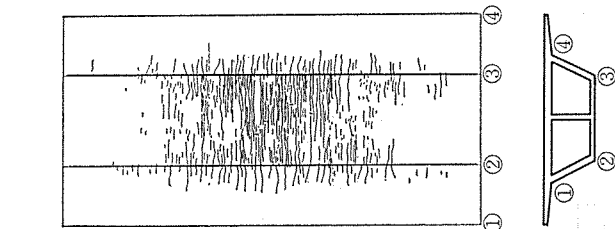


図-21(a) ひびわれ状況とコンクリートの縁引張応力度 (1A 桁)

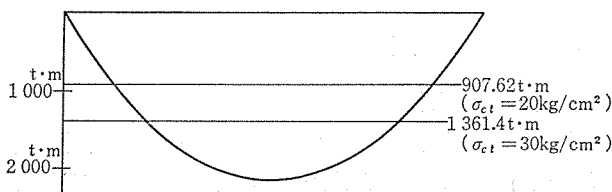
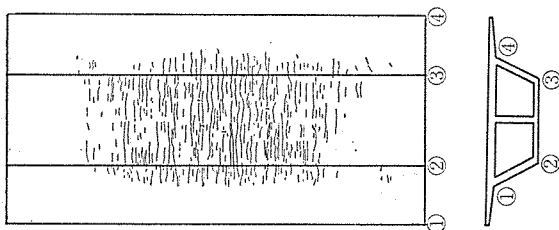
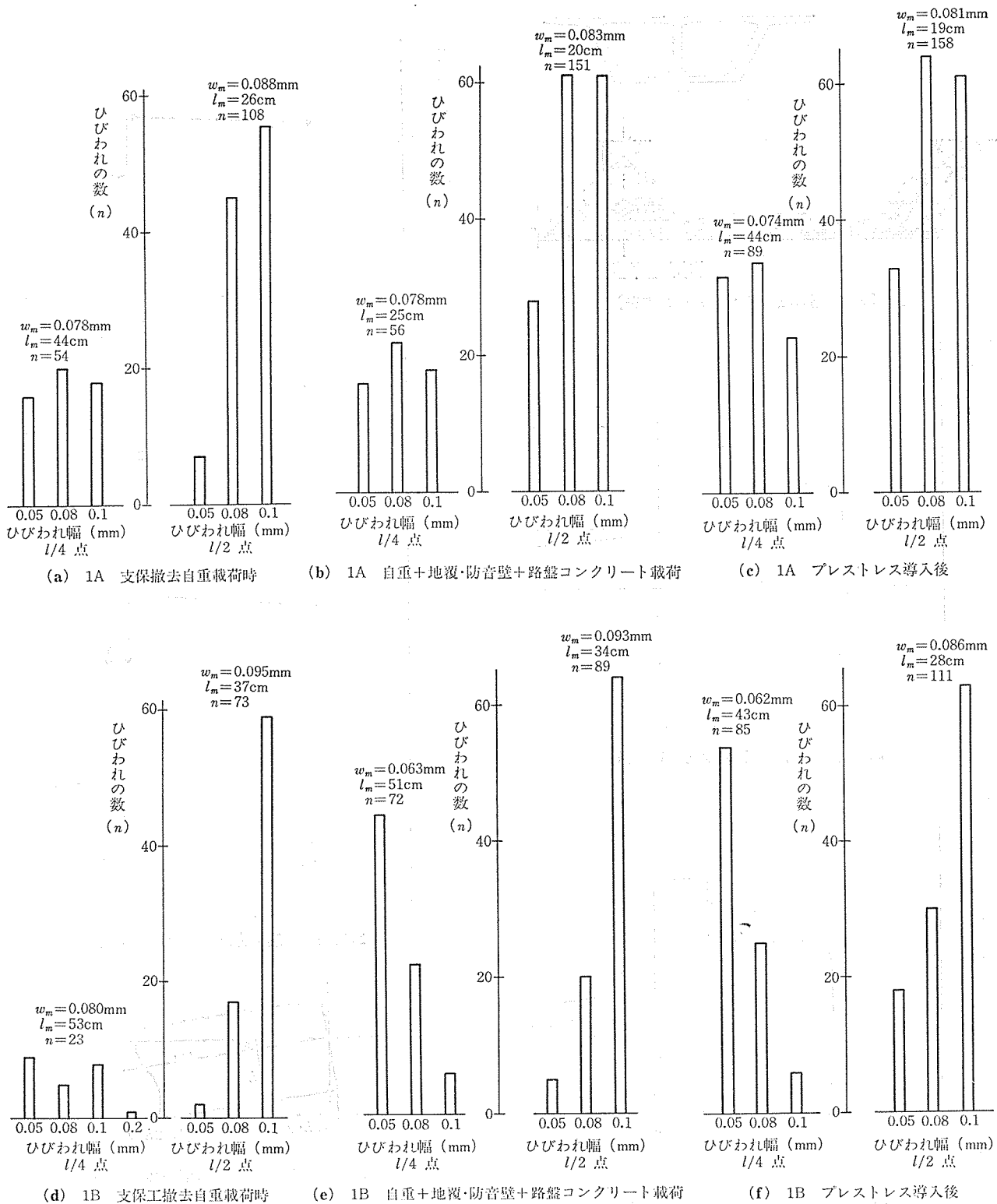


図-21(b) ひびわれ状況とコンクリートの縁引張応力度 (1B 桁)

表-7 荷重によるたわみ量 (単位: mm)

	1A		1B	
	自重のみ	自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート	自重のみ	自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート
測定値	12.0	24.0	11.5	23.8
計算値	10.7	23.3	10.4	22.6



図—22 平均ひびわれ幅と平均ひびわれ間隔

てたわみ量を計算すると表—7 のようになり、ほぼ実測値と一致する。ここで、平均有効断面二次モーメント I_e は ACI で提案している次式を用いた。

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^3\right] I_{cr}$$

ここに、 M_{cr} ：ひびわれモーメント $\sigma_{cta} = 30 \text{ kg/cm}^2$

として求めた

M ：作用曲げモーメント

I_g ：全断面有効断面二次モーメント

I_{cr} ：ひびわれを考慮した断面二次モーメント

なお、自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート作用時

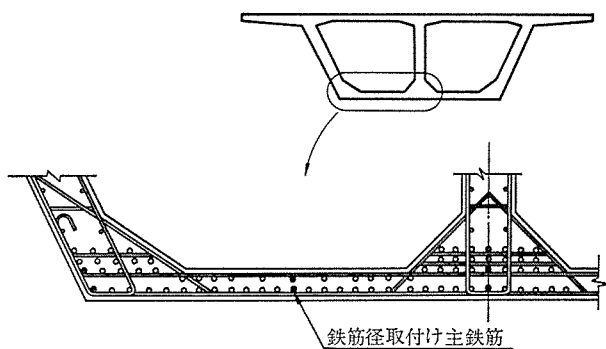


図-23 鉄筋計埋設位置 (スパン中央)

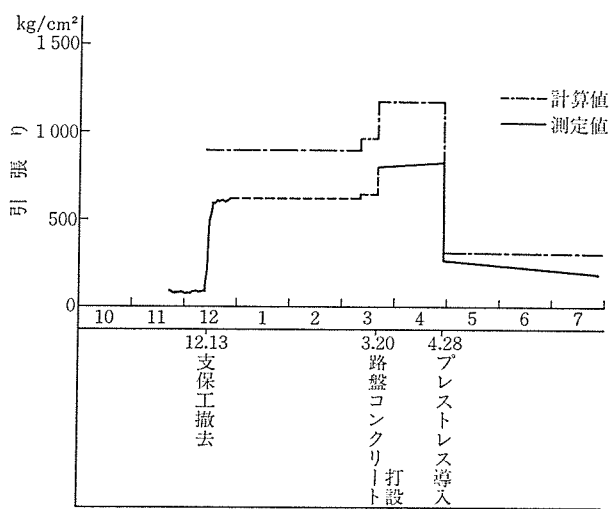


図-24(a) 鉄筋応力度の変化 (1A 桁)

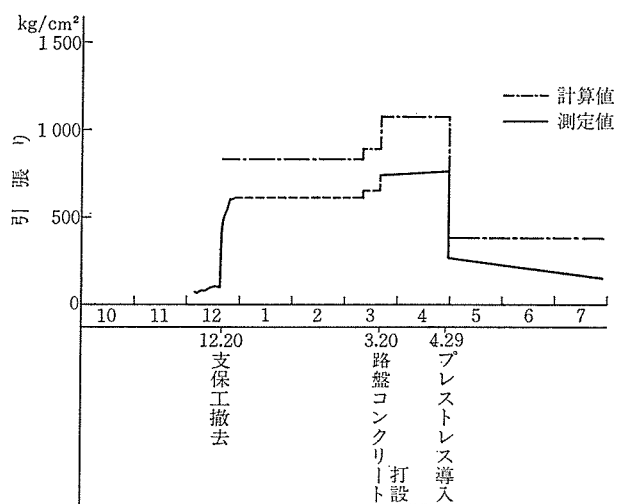


図-24(b) 鉄筋応力度の変化 (1B 桁)

の計算では、CEB により、自重によるたわみ量にクリープの影響を考慮している。

表-8 はプレストレスによるたわみ量 (そり量) の測定値と計算値を示しているが、両者はほぼ一致することがわかる。なお、計算値は全断面有効断面二次モーメントを用いている。

(4) 支承部移動量の測定

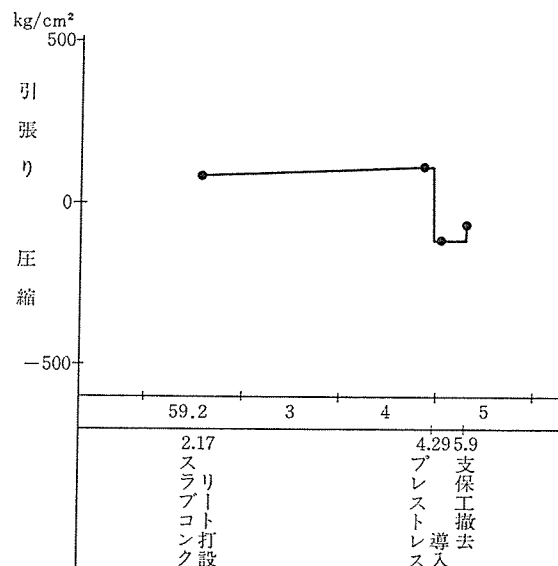


図-25(a) 鉄筋応力度の変化 (2A 桁)

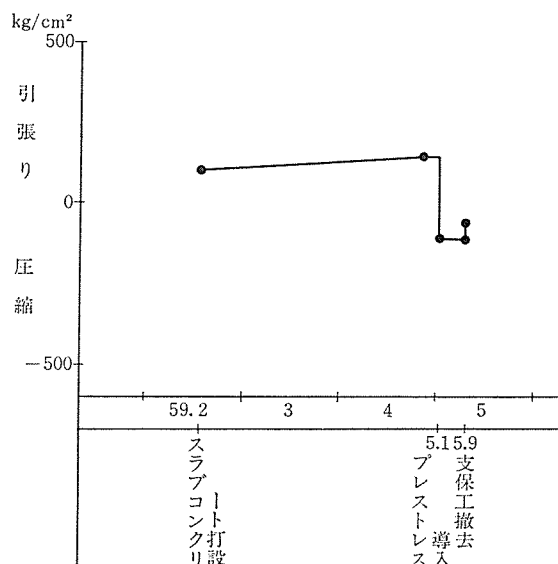


図-25(b) 鉄筋応力度の変化 (2B 桁)

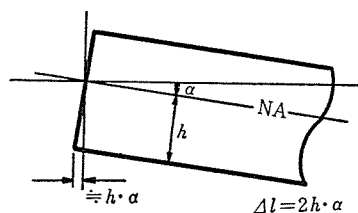


図-26 たわみによる支承部の移動量 Δl

支承部の移動量の測定を行った。移動量は温度変化・乾燥収縮による移動量、たわみによる移動量およびプレストレスによる短縮量である。たわみによる移動量を図-26 により求め、プレストレスによる短縮量 Δl_p を次式により求めた。

$$\Delta l_p = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \cdot l$$

ここに、 σ_c : プレストレスによる曲げ圧縮応力度

表—8 プレストレスによるたわみ量
(単位: mm)

	1 A	1 B
測定値	12.2	9.3
計算値	9.6	8.2

表—9 支承部の移動量

(単位: mm)

	1 A		
	自重のみ	自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート	プレストレス導入後
測定値	3.2	8.4	2.0
計算値	4.1	8.2	2.3

(単位: mm)

	1 B		
	自重のみ	自重+地覆・防音壁+路盤コンクリート	プレストレス導入後
測定値	2.9	7.8	2.8
計算値	3.8	7.8	2.0

E_c : コンクリートの弾性係数

l : スパン

測定値と計算値を表—9 に示すが、よく一致することがわかる。

5. おわりに

今回は各橋梁の測定の途中経過を報告した。大部分の橋梁は昭和 60 年 3 月の使用開始であるため、今後更に測定および検討を進め PRC 桁の実用化を図ってきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 小須田紀元: III種 PC 鉄道橋実施設計例, プレストレストコンクリート第 25 巻 1 号 (1983 年)
- 2) 石橋忠良, 他: RC ラーメン高架橋の温度・乾燥収縮の影響に関する調査, 国鉄構造物設計資料 No. 77 (1984 年)
- 3) 角田与史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅, コンクリートジャーナル第 8 巻 9 号 (1970 年)
- 4) 猪股俊司: III種プレストレストコンクリート, コンクリートジャーナル第 22 巻 9 号 (1974 年)。
プレストレストコンクリートの設計に関する各国の規定, プレストレストコンクリート技術の現況 (1982 年)
- 5) CEB-Mannual: Cracking and Deformation by Com-mite Euro-International du Beton (1981 年)

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集 (第 2 集)

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならない編集した、その第 2 集です。協会誌第 10 巻より 21 巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けるべき格好の資料と考えます。

希望者は代金 (現金為替または郵便振替 東京 7-62774) を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁: B 4 判 224 頁

定 価: 9,000 円 (会員特価 7,000 円) 送 料: 1,000 円

内 容: PC 橋梁 (道路および鉄道) 74 件, PC 建築構造物 25 件, その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先: (社) プレストレストコンクリート技術協会

〒102 東京都千代田区麹町 1-10-15 (紀の国やビル) 電話 03 (261) 9151