

プレストレスによるシュー反力調整について

西 村 嘉 隆*
 灰 谷 隅 夫**
 小 林 勲***

1. ま え が き

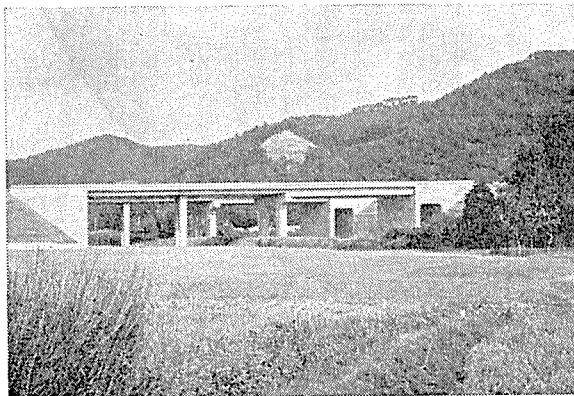
プレストレスを利用する設計には種々の方法があるが、ここに報告するものは、橋梁の橋台上、または橋脚上の横桁の中にPCケーブルを配置して、これを緊張することにより、横桁下に配置されたシューの反力を調整しようとするものである。このプレストレスの効果を調べるため、プレストレス前後にシュー反力を測定したところ、目的の成果が得られた。簡単な試験工事であったが、特殊なプレストレスの利用として、今後のシューの設計施工上の参考になればと思ひ報告する次第である。

2. 工 事 概 要

この試験は、東名高速道路に架けられた鉄筋コンクリート床版橋で行なったもので、橋梁の概要はつぎのとおりである(写真-1、図-1参照)。使用した測定器具はジャッキ(最大荷重100t)4台、ダイヤルゲージ10基、カールソンひずみ計10個、ワイヤーストレインゲージ12ヵ所である。

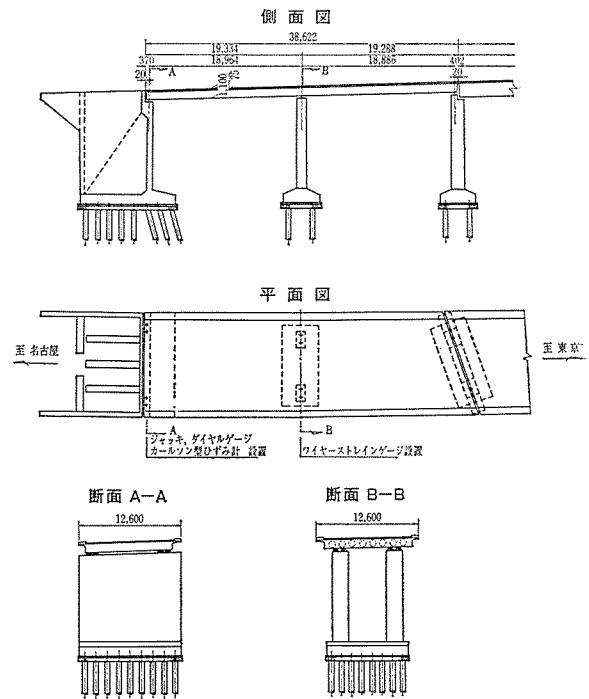
工事場所：静岡県三ヶ日町東名高速道路釣橋川橋
 橋 種：鉄筋コンクリート ホロスラブ2径間連続桁
 橋 長：19.3m×2=38.6m

写真-1 釣橋川橋全景



* 日本道路公団高速道路静岡建設局 三ヶ日工事事務所長
 ** 同 同 工事長
 *** 八千代エンジニアリング(株) 土木第三部調査第一課長

図-1 釣橋川橋シュー反力測定工事一般図



幅 員：12.6m (有効幅員 10.95m)
 PC鋼材：フレシネーケーブル 12φ7mm

3. シューの配置と反力

この橋梁には、シューが橋台、橋脚にそれぞれ4個ずつ配置されており、そのうち2個は図-2に示すように橋梁の幅員の端に並列して配置されているため、シュー反力は内側のシューが外側のシューより大きくなるであろうことが予想される。シューの沈下がないものと仮定したとき、つぎの反力が考えられる。

- 1) 反力が均等の場合

$$R_A = R_B = 45 \text{ t}$$
- 2) 横桁を4点支持の連続桁とみなした場合

$$R_A = -45 \text{ t}, R_B = 135 \text{ t}$$
- 3) 横桁は4点支持の連続桁であるが、シューは負の反力を取れないものとした場合

$$R_A = 0 \text{ t}, R_B = 90 \text{ t}$$

図-2 ジャッキ、ダイヤルゲージならびにカールソン型ひずみ計設置図(橋台上)

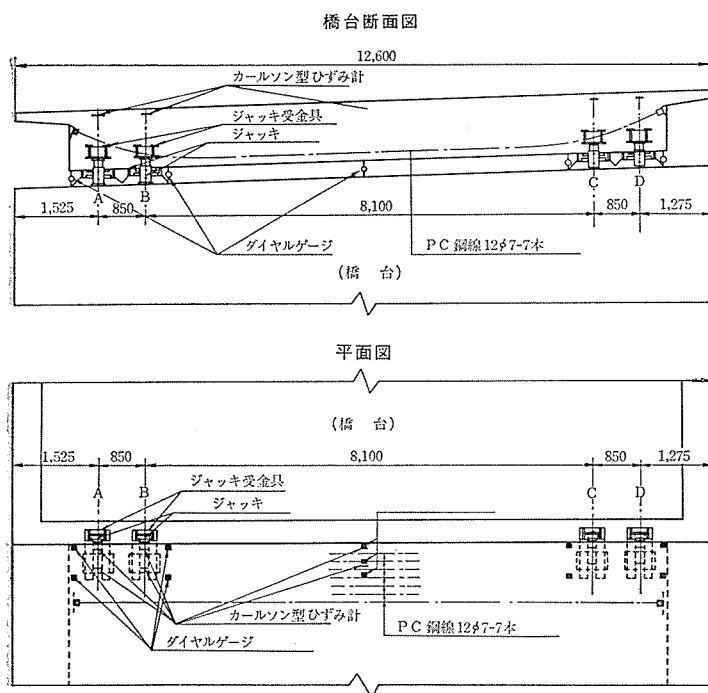
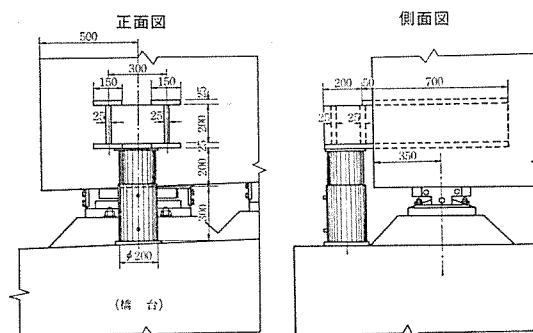


図-3 ジャッキおよびジャッキ受金具詳細図



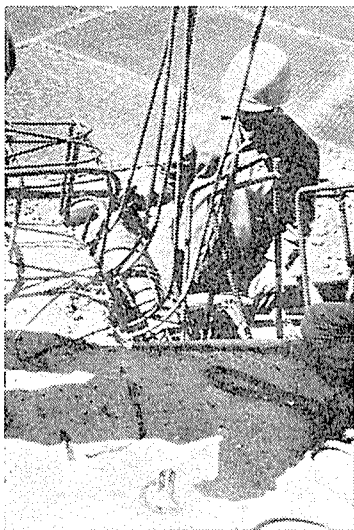
まず、桁端のシュー位置にジャッキ受け金具を図-3のように埋め込んだ。コンクリート硬化後シュー付近の型わくを取りはずし、4台のジャッキ(最大荷重 100 t)と、10 個のダイヤルゲージ(精度 1/100 mm)を図-2 の位置にすえ付けた。支保工撤去後、ジャッキの荷重を上げることによって、シューの反力をすべてジャッキで受け、桁を持ち上げる。このとき桁は平行に持ち上げねばならず、このためにはダイヤルゲージの変動量

実際にはシューが沈下することが考えられるので、つぎの反力状態が予想される。

$$0 \leq R_A \leq 45 \text{ t}, 45 \text{ t} \leq R_B \leq 90 \text{ t}$$

これに対して、PCケーブルを図-2に示すように配置して、これを緊張し、外側のシューを支点として横桁をそり上げらせ、内側のシューの反力を小さくするように反力を内側のシューから外側のシューに移行する(写真-2 参照)。

写真-2 PC鋼線緊張



$$\bar{R}_A = R_A + X$$

$$\bar{R}_B = R_B + X$$

X: 反力調整荷重

\bar{R}_A と \bar{R}_B : 反力調整後のシュー反力

これによって、シュー-Aとシュー-Bの反力を調整することができると思われる。

4. 反力測定方法

前節で想定したシュー反力、ならびにプレストレスによる反力調整を測定するためにつぎの三方法を用いた。

(1) ジャッキとダイヤルゲージによる方法(橋台上)

が同じになるように、各ジャッキの荷重を徐々に上げてゆく。シューの反力が0になり、桁の荷重を、すべてジャッキで受けたと判断されたとき、ジャッキの荷重を測定し、これを各シューに生じている反力と推定する。続いて、プレストレス後も同様な測定を行なう(写真-3~5 参照)。

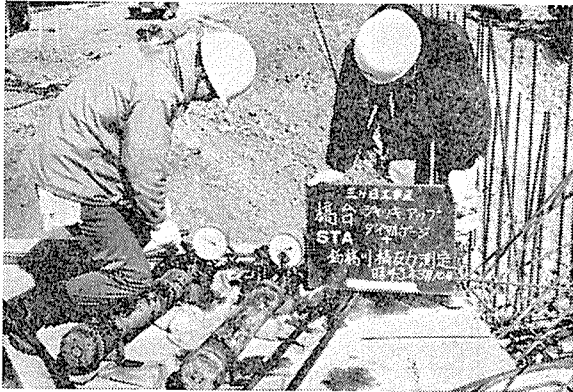
写真-3 橋台ジャッキ設置



写真-4 橋台ダイヤルゲージ設置



写真-5 ジャッキ反力測定



(2) カールソン型ひずみ計による方法(橋台上)
 カールソン型ひずみ計 CS-10 F を 10 個、橋台上の横桁の上縁端に 図-2 のように配置しコンクリートの中に埋込む。支保工撤去前後とプレストレス後にカールソン型ひずみを測定し、横桁上縁コンクリートのひずみを測定する。これより間接的にシュール反力を推定するわけであるが、横桁の有効断面が不確定であるため、コンクリートのひずみから曲げモーメント、さらにシュール反力を推定することは難しい。しかし、反力変動の傾向は測定できると思われる(写真-6, 7 参照)。

写真-6 カールソン型ひずみ計埋込み

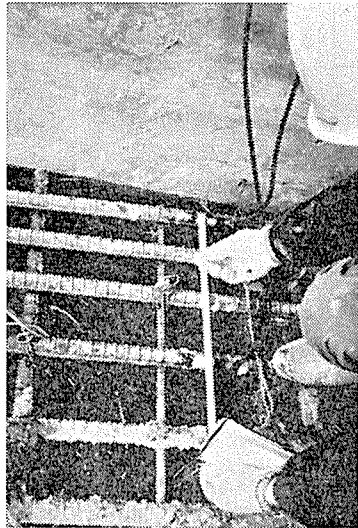


写真-7 カールソン型ひずみ計測定



(3) ワイヤーストレインゲージによる方法(橋脚上)
 橋脚上のシュール反力は大きく、また橋脚上も狭いためジャッキを用いて直接反力を測定することはできない。そこで橋脚の頭部コンクリートの周囲に、図-4 のよう

図-4 ワイヤーストレインゲージ設置図(橋脚上)

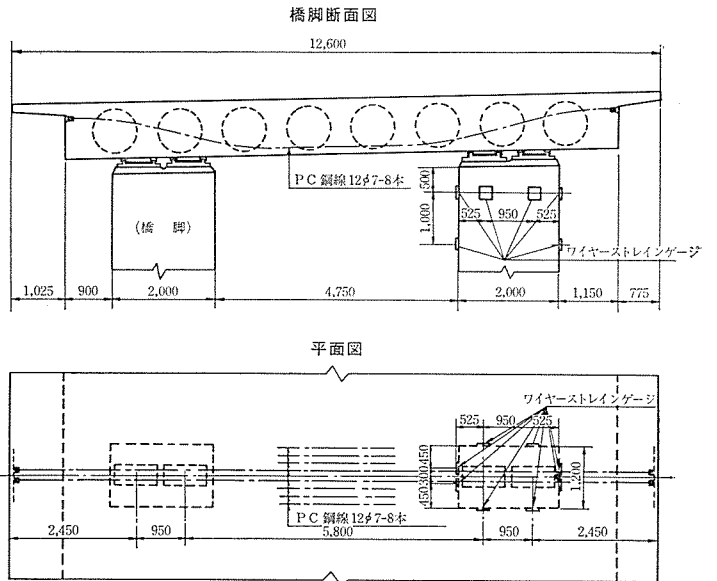


図-5 4ゲージ法

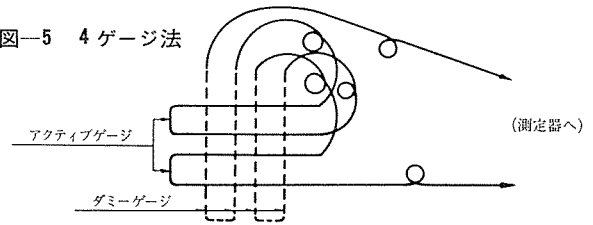
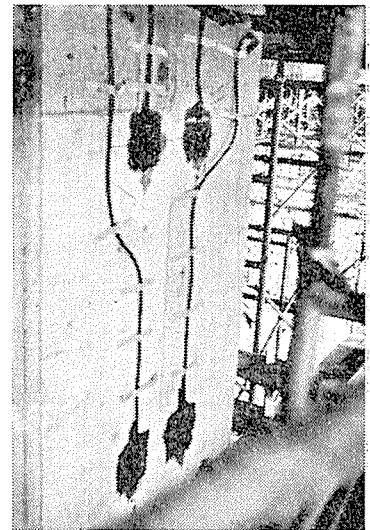


写真-8 ワイヤーストレインゲージ貼付



に ワイヤーストレインゲージを 12 組貼り付け、橋脚の縁コンクリート応力度を測定しこれによって間接的にシュール反力の変動を推定する。ワイヤーストレインゲージを 図-5 のようにブリッジに組合わせて配置し(4ゲージ法)、コンクリートの温度変化ならび

写真-9 ワイヤーストレインゲージ測定



に長時間測定 of 誤差をなくした (写真-8, 9 参照)。

5. 測定器具の検査

測定試験をする前に、ジャッキ、ダイヤルゲージ、カールソン型ひずみ計、ワイヤー ストレイン ゲージ等の検査を行なって、異状のないことを確かめた。このほか、桁コンクリートの圧縮強度試験ならびに、弾性係数測定試験を行なった。試験時 (材令 18 日) のコンクリートの圧縮強度は、 340 kg/cm^2 、静的弾性係数は約 320 t/cm^2 であった。

6. 測定結果と考察

測定はつぎの状態について行ない、比較検討した。

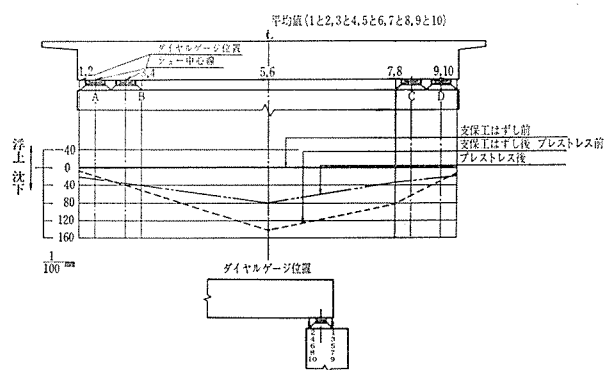
- a) 支保工撤去前
 - b) 支保工撤去後 (横桁プレストレス前)
 - c) 横桁プレストレス後
- つぎに各測定方法別に測定結果を記し、考察してみる。

(1) ダイヤルゲージによる橋台上のシュー変位測定

支保工撤去前、ダイヤルゲージを各シュー付近の橋台頂面と横桁の間に配置し、このときの横桁の変位量を原点として、支保工撤去後のダイヤルゲージの動きをみると、4 個のシューのうち、内側のシュー (B と C) の方が、外側のシュー (A と D) より、多く沈下していることが図-6 よりわかる。このことから外側のシューより

図-6 横桁変位置

ダイヤルゲージによる方法-その1 (橋台上)



内側のシューに、より多く荷重がかかって沈下したことが推定される。しかしながら、左右のシューの沈下量を比べると、同一傾向ではあるがその絶対量は異なっている。特にシューDは無反力かもしれない (これについては、後に述べるジャッキによる反力測定の項を参照されたい)。

つぎに横桁にプレストレスを与えたあとの横桁の変位を見ると、プレストレス前 (支保工撤去後) に比べ内側のシュー (B と C) はあまり変動しないが外側のシュー (A と B) が多く沈下している。このことから、横桁プ

レストレスにより、外側のシューに荷重が加わり出したことがわかり、反力調整が行なわれたことが推測される。

(2) ジャッキ アップによる橋台上のシュー反力測定

支保工撤去後、ジャッキを各シュー位置の橋台上にすえ付け、ジャッキ受け金具を用いて桁をせり上げた。4 個のジャッキを除々にポンプアップし、横桁を平行に 1 mm (ダイヤルゲージ目盛 100) せり上げ、桁をシューから浮き上がらせ、各シュー位置の 4 個のジャッキで桁を支持した。このときのジャッキ反力を図-7、表-1 に示す。

図-7 4シュー位置のジャッキ反力

(4個のジャッキで桁をせり上げ1mm平行移動した時のジャッキ反力)

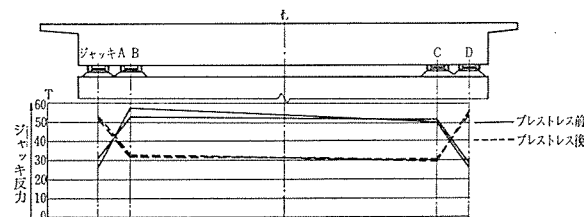


表-1 ジャッキ反力測定値表

ジャッキ位置	左 側		右 側		合 計
	外	内	外	内	
ジャッキ名	A	B	C	D	
ジャッキ反力	28.5 ^t	55.5 ^t	50.5 ^t	27.5 ^t	162 ^t
	52.5	32.5	29.5	54.5	169

横桁プレストレス前のジャッキ反力は外側のジャッキ反力 (A と D) が、内側のジャッキ (B と C) より小さくなっており、予想したとおりシュー反力は不均等であることが推定される。シュー反力不均等の場合は、ほぼつぎのとおりである。

$$\text{外側シュー} : \text{内側シュー} = 3 : 5$$

この数値から、最も心配された内側シュー (B と C) の 2 点支持ではなく、内側シューが沈下することによって外側シューにも反力が生じていることがわかる。

つぎに横桁プレストレス後のジャッキ反力を見ると、前記の逆で、外側のジャッキ反力が内側のジャッキ反力より大きくなっており、シュー反力の割合は、ほぼつぎのとおりである。

$$\text{外側シュー} : \text{内側シュー} = 5 : 3$$

この数値から横桁プレストレスによるシュー反力調整の効果があったことが推定される。

このときの横桁プレストレス量は、計算によって決定した $50 \text{ t} \times 7 \text{ 本}$ に対して、その約 7 割 $50 \text{ t} \times 5 \text{ 本}$ で

十分であった。これは横桁プレストレス前の不均等反力の比率が予想より小さかったからである。

なお現在、外側シューの反力の方が大きい、今後載荷される舗装荷重ならびに活荷重によるシュー反力は、外側シューが小さく内側シューが大きいので合計のシュー反力は、外側シューと内側シューが均等になるものと予想される。

以上の測定結果より、シュー反力は内側と外側で不均等であったが、横桁プレストレスによって反力調整が行なわれたことがわかる。しかし、測定をつどジャッキ反力測定値を見るとその絶対量は異なり、4個のジャッキ反力の合計も異なり、また左右のジャッキ反力も対称ではなく、疑問を残している。この差の生じた原因について考察してみると、つぎの点が挙げられる。

- 1) ジャッキのポンプゲージの誤差
- 2) ゲージ目盛読みの誤差
- 3) ジャッキ操作誤差
- 4) 横桁平行移動誤差

4個のジャッキで、横桁を平行に移動させる操作は、相当にむずかしく、10個のダイヤルゲージの変動を全く同じにすることは不可能である。また、最終時10個のダイヤルゲージの変動をまったく同じにすることは不可能である。また、最終時10個のダイヤルゲージがほぼ等しくなったとしても、途中の10個のダイヤルゲージの変動の仕方が異なる場合は、結果的にジャッキ反力も異なっている。

つぎに、問題を前節にもどして、ダイヤルゲージによるシュー変位測定の際、シューDは浮き上がって反力が0であったかとの推測について、ジャッキ反力測定結果と対比して考察してみる。実際には表-1のようにシューDも反力27.5tが測定されたのであるから、シューDは見かけ上、浮き上がって見えただけと思われる。それではなぜ浮き上がって見えただけという問題を検討してみると、浮上がりと比較する原点としたダイヤルゲージすえ付け時以前に、すでにシューに荷重が加わっており、支点沈下があったのではないと思われる。もしそうであるならば支保工撤去後、シューDの点で横桁は浮き上がったのではなく、他のシューと比べて沈下量が小さかっただけである。事実、ダイヤルゲージすえ付け以前に支保工を多少ゆるめてあった部分があり、荷重がすでにシューに加わっていたことが考えられる。

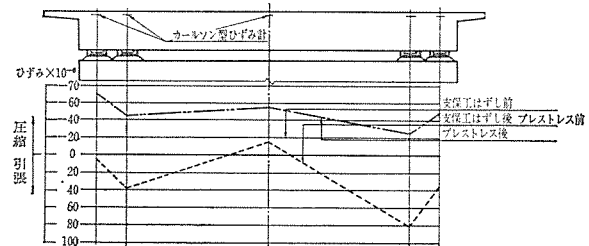
(3) カールソン型ひずみ計による橋台上の横桁ひずみの測定

橋台上の横桁上縁コンクリートに埋込まれたカールソン型ひずみ計の測定結果を図-8に示す。支保工撤去前のひずみを原点として、支保工撤去後の横桁上縁コンク

リートのひずみを見ると、内側のシュー(BとC)上のひずみと、外側のシュー(AとD)上のひずみに大きな差がある。もし、内側のシューと外側のシューに均等な荷重が加わっているとすれば、両者のひずみは近似しているはずである。この推論から、内外のシューには不均等荷重が加わっていることが推測される。

つぎに横桁プレストレス後の横桁上縁のひずみを、横桁プレストレス前と比べると、図-8よりわかるとおり

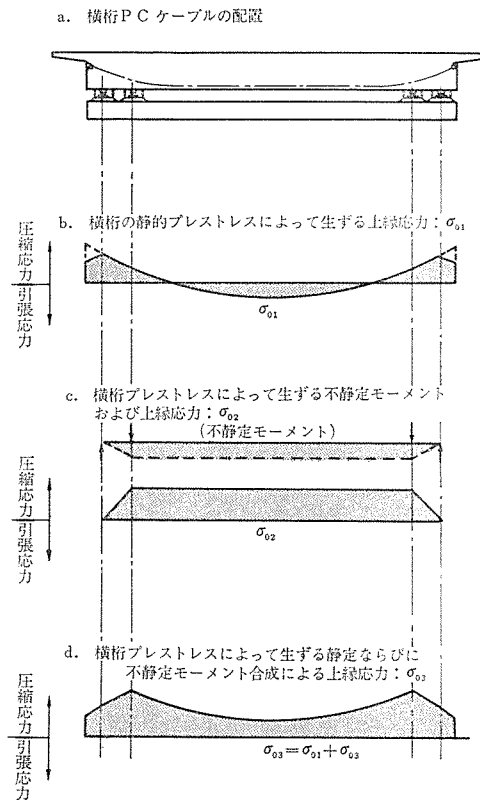
図-8 カールソン型ひずみ計測定値(平均値)



全点とも圧縮側にひずみ移行をしている。この結果から横桁プレストレスによる反力調整の効果があったかを考察してみると、つぎの理由が考えられる。

横桁を単純桁と考えるならば、横桁プレストレスによって上縁コンクリートは引張側にひずみ移行するはずである(図-9(b)参照)。ところが、横桁は4点支持された連続桁であるから、プレストレスによって不静定モ

図-9 横桁プレストレスによる曲げモーメント図ならびに上縁コンクリート応力図(橋台上)

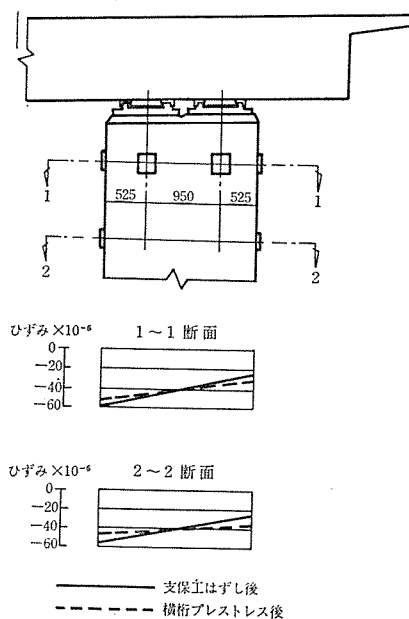


ーメントを生じ(図-9(c)参照), 先の静定モーメントと合成されたとき, 上縁コンクリートのひずみは圧縮側に移行することが考えられる(図-9(d)参照)。この不静定モーメントを生じさせたものはプレストレスによって生じた反力である。すなわち, 桁中央上縁コンクリートのひずみが, プレストレスによって圧縁移行したことは, プレストレスによって反力調整が行なわれことを意味している。その反力の絶対量については, 前節で述べたとおり, 横桁の有効幅が不明確であるから, ひずみ計による横桁のひずみ測定から, 曲げモーメントさらに反力の絶対量の算定はできない。

(4) ワイヤーストレインゲージによる橋脚頭部コンクリートのひずみ測定

橋脚上のシュー反力を測定するため橋脚頭部周囲に貼ったワイヤーストレインゲージの測定結果を図-10に示す。支保工撤去直前にストレインゲージの原点調整

図-10 ワイヤーストレインゲージ測定値 (橋脚上)



を行ない, 支保工撤去後測定したところ, 内側シューに近い側の橋脚頭部のコンクリートのひずみが, 外側シューに近い側より大きくなっていった。これより, 内側シューと外側シューの反力が不均等であることが推定され, 内側シューより多く荷重が加わっていることがわかる。

つぎに, 横桁にプレストレスを与えたのち測定したところ, 内側シューに近い側のひずみが減少し, 外側シューに近い側のひずみが増加した。これは横桁プレストレスによる反力調整の効果があり, 内側シューの反力が小さくなり, 外側シューの反力が大きくなったことが推定される。しかし, この反力調整によるひずみの変動は少なく, 変動はしたものの, いまだに内側シューに近い側のひずみの方が外側シューに近い側のひずみより大き

い。この理由については不明であるが, 測定値に多少の問題があった。まず, 現場長時間測定によって影響される温度変化の問題を除くため, 4ゲージ法を採用したにもかかわらず原点移動らしきものが入ったので, この修正を行なったこと。つぎに測定値の絶対量が予想したような大きさのひずみであらわれず, 非常に小さな測定値のため, この結果から問題をさらに検討するには不十分な測定値であったかと思われる。

7. 検討と問題の提示

シュー反力測定という簡単な目的のために行なった試験工事であったが, 測定ならびに解析の中に種々の問題があった。ここでは, 今後の研究課題として, あるいは以後同様な測定をされる場合の参考として, 問題点の提示を行ないたいと思う。

(1) ダイアルゲージのすえ付け時点について

今回の測定においては, 前節で問題としたとおり, すでにシューにいくばくかの荷重が加わったのちに, ダイアルゲージをすえ付けたようである。ダイアルゲージすえ付け時点は, シューが無反力のときであるべきで, そのためにはダイアルゲージをすえ付けたい場所のみの型わくおよび, 支保工を取りはずすことができるようにしておく必要がある。

(2) ダイアルゲージの保護について

ダイアルゲージのスピンドルに水がかからないようにビニール等を用いて保護する必要がある。

(3) ダイアルゲージの接するコンクリート面

ダイアルゲージのスピンドルの接するコンクリート面に凹凸があったりした場合, 測定値が不正確になる恐れがある。すなわち, もし桁が水平移動した場合, スピンドル先端が桁と一緒に移動してしまっ, 横桁の真の上下移動量を測定できないことも考えられる。そこでスピンドルの接するコンクリート面にセルロイド板等を貼り付けることが望ましい。

(4) 左右非対称の測定結果について

前節(1)で述べたジャッキ反力の左右非対称について付けたせば, 前節報告外の試験としてジャッキ2台で横桁を支持した場合は, 左右対称の約82tであった。こうなるとジャッキ4台によるジャッキアップの操作上の誤差が問題であり, これが非対称反力の測定値の原因の大きな一つと考えられる。しかし, ダイアルゲージ, カールソン型ひずみ計の測定値にも左右非対称な結果が出ており, さらに検討する必要があると思われる。

(5) 他の計測器による反力測定について

今回の計測器において, ジャッキを用いた方法は直接的な反力測定法ではあったが, ジャッキ位置がシュー位

置より 70 cm も離れており、ここにも測定誤差を起す問題があったかと思われる。すなわち 4 個のシューに対しては、確かに平行に 4 個のジャッキはすえられたが、橋軸方向に対してシュー位置と多少離れた位置のジャッキ反力は、橋軸方向に対して予想以上に大きなたわみ角を生じており、この結果シューをはさんだ内外のダイヤルゲージの差が相当大きくあらわれた。

この欠点を除くために他の計測器の利用を考えたい。まず、シューにならべてフラット ジャッキを用いる方法であるが、現在利用されている範囲のフラット ジャッキでは平面寸法が大きく、改良の必要性がある。他の計測器としてはシューの上下のコンクリートに埋め込む方法が考えられ、この目的のための製品もあるが現場で使用するのにはむずかしい。

(6) 横桁の有効幅について

この測定結果を利用して、横桁の有効幅の推定をたわみ法の方法で試みてみた。

- 1) 支保工撤去後の横桁のたわみ量より
- 2) 横桁プレストレスによる横桁上縁コンクリートの応力変動量より。

これらの検討より、橋台上の横桁の有効幅はほぼ 2m 前後であることがわかった。この結果は単にコンクリートホーラスラブ橋の端横桁の有効幅で、支承位置によっても異なると思われる。

(7) シュー位置の横桁の沈下量からシュー反力の推定について

ダイヤルゲージによってシュー位置の横桁の沈下量を測定し、これより反力を推定することはできないだろうか。例えば、次式が提案されよう。

$$R = K (\delta - \delta_0)$$

P: シュー反力 δ₀: 修正定数

δ: シュー位置の横桁の沈下量 K: ばね定数

この目的で測定結果の整理をしようとしてみたところ資料数が少なく、報告できる結果を得られなかった。

(8) コンクリートのクリープとシュー反力の変動について

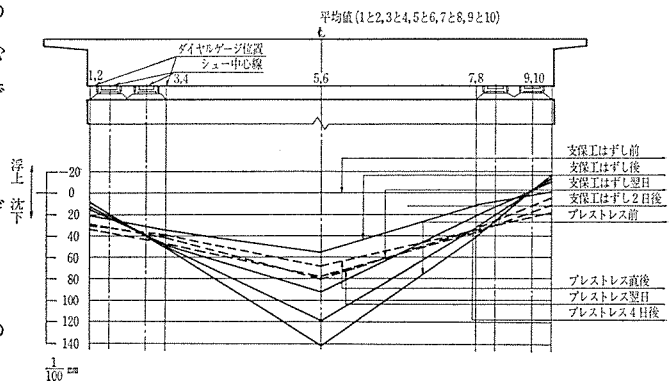
横桁プレストレスによってコンクリートがクリープしてゆくとき、シュー反力は変動しないであろうか。今回は短期間の測定であったため、反力変化の様子を測定することができなかったが、今後の試験では長期間のシュー反力測定を行なって、コンクリートのクリープによるシュー反力の変動を測定する必要がある。

(9) コンクリート構造物の変形状況(コンクリートの遅れ弾性変形)について

支保工撤去直後あるいはプレストレス直後において、コンクリート構造物は弾性変形量のすべてを起さず、

数時間あるいは数日間を要して弾性変形が進行するとみなされる変形状況が観測された。荷重が載荷されたときに、まず弾性変形が起こり、これより塑性変形が長時間にわたって起こるものと思われていたが、初めの弾性変形量に対しその後の数日間の塑性変形量が相当に大きく単に塑性変形と考えるわけにはいかない。図-11にダイヤルゲージで測定した横桁の日々の変形量を示した。この図より、支保工撤去後の横桁中央部の変形量に注目し、

図-11 横桁変位置 ダイヤルゲージによる方法 (橋台上) —その2—



支保工撤去直後のたわみ量 0.55 mm に対する日々の累計たわみ量の比率を示したのが表-2である。この日々の変形量はだんだん小さくなってゆくようであるが、こ

表-2 支保工撤去後の横桁スパン中央の変形量

	支保工撤去直後	翌日(24時間後)	2日後	3日後
変形量 (1/100 mm)	55	90	120	140
比率	1.0	1.6	2.2	2.6

のまま進むと1週間後には、支保工撤去後ただちに起こった変形量の3倍以上の変形を起こすものと思われる。もし、支保工撤去直後起こった変形を弾性変形量とし、その後の変形を塑性変形量とみなすならば、終局においてクリープ係数は5以上となってしまうことが推定され、従来一般の設計に用いられているクリープ係数 2.0 とは大分差がある。これゆえに、支保工撤去直後の変形量のみを弾性変形とみなす考え方に問題があり、理論でいう弾性変形量は数日間を要して起こるものではないかと思われる。このことを実証するために、今回の測定結果と計算による弾性変形量とを比べたところ、実測の3日位後の変形量が、理論計算の弾性変形量と一致した。また同様なことが主桁の橋軸方向たわみ角についても実証された。しかし、この理論計算は横桁の有効幅の仮定と不静定構造の問題を含んでいる。

以上の検討結果から、理論計算の弾性変形量は荷重載荷後数日間を要して生ずるものと推定し、これを一応

「遅れ弾性変形」と名付けてみる。しかし、数日間後の変形量測定の中には、遅れ弾性変形と多少の塑性変形も入っているし、また温度変化の影響も入っているので、この解析には問題がある。

8. む す び

このシュー反力調整の測定結果として、つぎのことがわかった。

- 1) 本橋のシュー配置の場合、実際にシューに加わっている反力は不均等であり、内側と外側のシューの反力は、ほぼ 5:3 の比率であると推定された。
- 2) 反力調整用のために横桁に配置した PC ケーブルを緊張した結果、シュー反力調整の効果が十分にあらわれ、内側と外側のシュー反力は、ほぼ 3:5 の比率になったと推定された。

これによって、各シューの反力はその許容値以下となり、安全性が確保されたと思われる。この結果を今後の特殊設計に大いに利用できると思われる。一例として、橋台上で桁を 2 個のシューで支持しようとする時、シュー

ーが特に大きくなり、製作、運搬、すえ付けに問題があるので、4 個のシューにしてシューを 2 個ずつならべて配置した場合、シューの沈下があることから、計算に予想するほど不均等荷重が生じないということを利用した設計が考えられる。もちろん、横桁プレストレスを利用するならば、各シューに均等荷重を与えることもできる。

今後さらに研究すべき問題として、シュー反力測定器具、横桁の有効幅、コンクリートのクリープとシュー反力の変動、コンクリート遅れ弾性変形があげられる。

最後にこの試験工事にたづさわった筆者ら以外のつぎの各位の御指導、御協力に感謝申し上げます。

日本道路公団静岡建設局特殊設計課長	三瀬 純
同 三ヶ日工事事務所	谷 芳樹
八千代エンジニアリング株式会社	三戸 完五
同	内藤 武彦
同	石橋 長和
大日本土木株式会社	越智 正孝

(1968.11.30・受付)

PC 構造物設計図集発売について

当協会では、先に「PC 構造物設計図集」の出版を企画し、予約募集いたしました。諸般の事情にて大幅に発刊が遅れ、ご予約された方々に大変ご迷惑をおかけし誠に申し訳ございません。

このほど本会編集、(株)技報堂発行の形で出版となりましたのでお知らせ致します。

本書は、本協会誌「プレストレストコンクリート」の末尾に掲載致しております折込付図を、協会誌編集委員会の手により、PC の設計・施工に携わる方々のご使用に便利なように、土木編 (32 編)・建築編 (28 編)・その他 (4 編) の三部門にわけ、それぞれに写真・説明等を入れ、わかりやすく編集したものです。皆様のお手元に是非お備え下さいませよう、おすすめ申し上げます。

出版社と協議のうえ、500 部に限り会員特価を設けましたので、希望者は本誌 Vol. 10, No. 4 に貼付の申込用紙御使用の上お申込み下さい。特価部数が売切れますと定価となります。

体 裁	: B 4 判	138 ページ	活版印刷
定 価	: 1500 円	会員特価	: 1200 円
送 料	: 150 円		