

緊張時に与える打撃の効果について

宮 口 尹 秀*

1. ま え が き

PC工法の宿命的な短所の一つとして、プレストレス導入時の摩擦による損失があげられる。この損失のため、たいていの場合、最大のプレストレスが必要な設計断面で、鋼材の応力が最小となっている。しかも摩擦による損失は、桁が長大となり、緊張材の延長が増すにつれ、ますます大となってくるため、PC鋼材の使用量、すなわち桁の経済性とも関係が深いといえる。

このため摩擦を減ずる方法がいろいろ実施されているが、その一つとして、Dywidag工法では、緊張中の鋼棒に打撃を与えることによって、摩擦損失を減らしている。この打撃の効果についてはこれまでつぎのように考えられていた。緊張中の鋼棒に打撃を与えると、伸びを全然変えないのに緊張端の緊張力が低下する。伸びが変わらないのであるから、緊張端で応力が低下した分だけ内部の応力が高まっていることになる。すなわち打撃を与えることによって、摩擦力の一部がきれ、鋼棒の応力分布が打撃を与える前より水平に近くなる。この点については本誌 Vol. 6, No. 4. で百島氏らが摩擦係数について述べている¹⁾。しかし打撃を与えることによって、鋼棒の応力状態はどのように変化するのか、打撃による効果はどの程度まで有効なのか、鋼棒の配置状態との関係はというような点についてはあまりわかっていなかった。

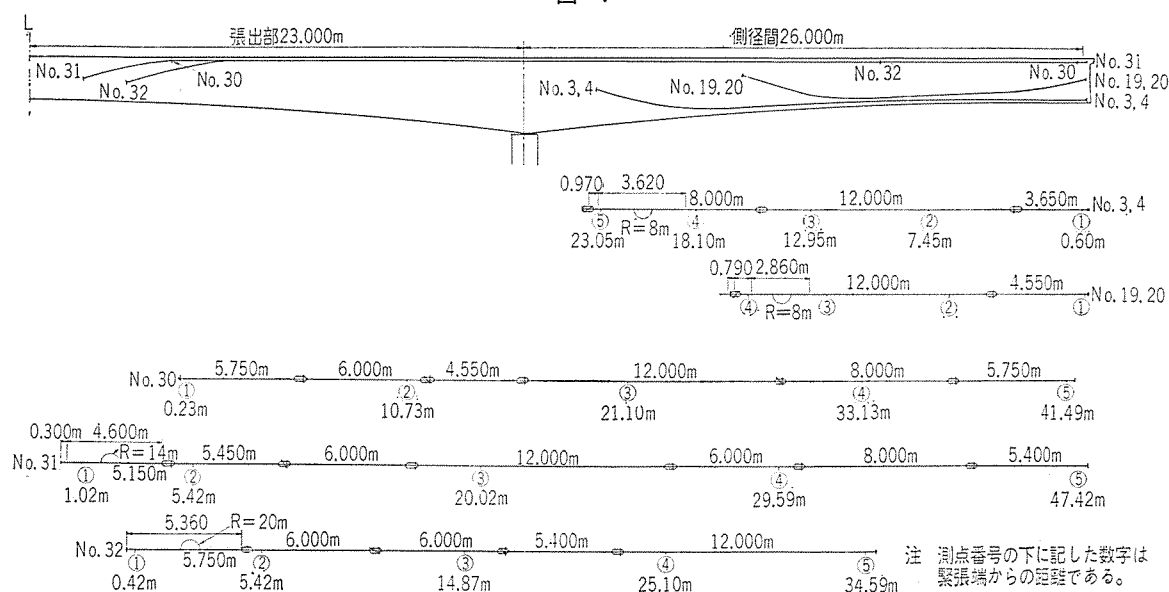
これらのことからついてある程度定量的に明らかにするため、東北線的那珂川橋梁施工の際に、ワイヤーストレインゲージによる応力測定を行なった。

2. 測定計画と方法

鋼棒の延長および配置状態と打撃による効果との関係を調べるため、測定する鋼棒として側径間で緊張するうち、最短の鋼棒 No. 19, No. 20, 最長の No. 3, No. 4, フライフォルパウの最後に緊張する全体で最長の No. 31 など特長のある鋼棒を5種、上流側下流側を合わせて計 14 本を選んだ。これら鋼棒の配置位置、形状などは図-1 に示すとおりである。

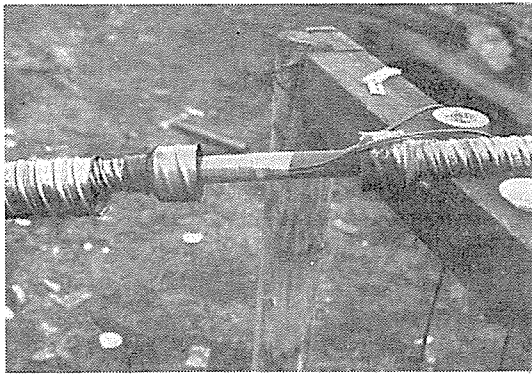
ひずみの測定には防湿を考慮して、共和電業のポリエステルゲージ KP-1 を使用した。ゲージを貼る部分はサンドペーパーで浮きさびを落し、アセトンで有機物をふきとった。ゲージの幅が小さかったので、接着剤で貼りつけ上からビニールテープを巻き付けて押えてやると、鋼棒の丸味にうまくなじんで固定できた。ゲージは、図-1 に示すように、鋼棒の緊張端と定着端および曲線部の始終点には必ず貼りつけ、最端の No. 19, 20 以外は各鋼棒 5 測点とした。測定値の信頼度を高めるため、1 測点につき鋼棒の両側に 1 枚ずつ計 2 枚のゲージを貼った。また、緊張すると鋼棒とともにゲージも移動するが、その際リード線が引っ張られて切れないよう、ゲ-

図-1



* 国鉄盛岡工事局

写真-1



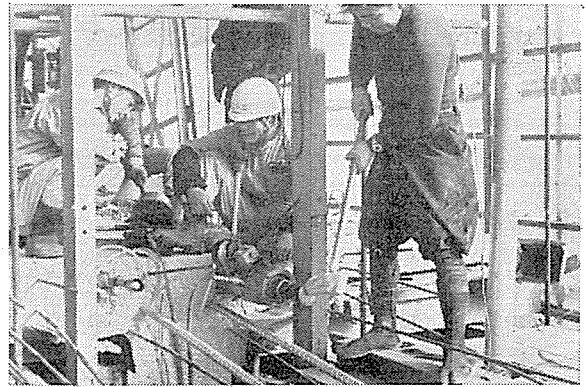
シ貼りつけ部分には $\phi 58$ のカップラー シースを使用し、リード線を十分この中にくり込んでおいた（写真-1）。測定には、5 測点を一緒に測れるよう、10 点の切替ボックスを使用した。測定はつぎの順序で行なった。まず打撃を全然与えないで、5 t から 30 t まで 5 t 刻みに各点のひずみを測る。つぎに荷重計の読み 30 t で鋼棒に打撃を与える。打撃を与えると、荷重計の読みは、最初は大きく次第に小刻みに下っていくが、荷重計がもはや下らなくなったときの荷重のドロップと、このときの各点のひずみを測定する。ついで打撃を与えながら荷重がドロップした分だけポンプをついて荷重をあげ、30 t で引張れるだけ引張っておいて、ひずみを測定する。これは鋼棒の限界摩擦状態ということになる。最後に計算で決められている最高圧力で所定の伸びが出るよう、適当に打撃を与えながら緊張して、ひずみを測定し、さらに所定量だけ引きもどした最終の応力状態の測定をして終了した。

鋼棒に打撃を与えるには、鋼棒を Dywidag ジャッキ（センターホールの油圧ジャッキ）に取り付けているプルロッドの尻に大きなナットをはめ、この頭を大ハンマーで叩いた（写真-2）。大ハンマーで与えられた打撃はプルロッドを介して鋼棒に伝えられる。この際締着用のナットはもちろん少しゆるめられていなければ、打撃の効果は鋼棒に伝わらない。

3. 測定値の整理

測定の結果、同一測定 of 2 つの測定値は大体近い値であり、十分信頼できるものであった。この生のデータからも以下に述べるのと同じ傾向が結論づけられるが、生のデータでは、荷重計の読み 5 t で最初に測定した値が鋼棒およびゲージの初期の不確定要素が入ったためか、計算上予期されるものと多少くい違っていた。それで 5 t 以後の各測定値の差は絶対に正しいものとし、同一測定 of ひずみの差 2 個の平均値をもとに最小 2 乗法で原点補正を行ないこれを基準に各測定値を整理した。ゲージの接着不良、リード線の接続不良などのため、測定中に

写真-2



変な値になったものが少しあったが、これらはデータ整理の際に取りのぞいた。

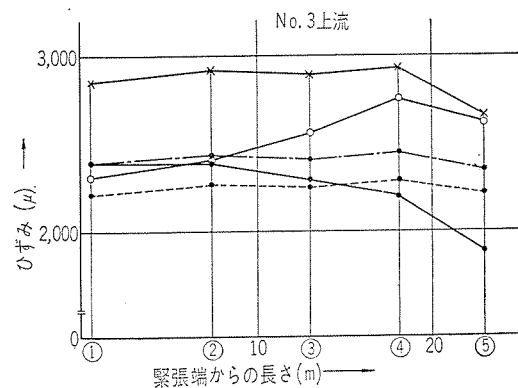
Dywidag で緊張の際打撃を与えるので、荷重計が狂う。このため緊張作業の前には必ずダイナモメータという正確な荷重計によりキャリブレーションを行なう。一度キャリブレーションを行なっても、緊張中にまた狂ってしまうので、測定時の荷重の値は、測定前後のキャリブレーションの値の平均値とした。この結果 0.2~1.1 t 実際の荷重と荷重計の読みに差が認められた。

4. 打撃による影響

打撃によるひずみ分布の変化の状態を各種より一つずつ選んで示したのが図-2 である。図-2 より鋼棒に打撃を与えることによって、いずれも緊張端のひずみは大きく低下し、逆に定着端ではひずみが増していることがわかる。すなわち緊張端側では鋼棒が縮み、定着端側では鋼棒が伸びたことになる。全体の伸びは不変であるから、図で縮みを表わす面積と、伸びを表わす面積は大体等しくなっている。

30 t で荷重計が下らなくなるまで打撃を与えたときの荷重のドロップと、緊張端および定着端のひずみの変化量の関係を示すのが表-1 である。荷重のドロップの最大は、打撃によって緊張力が鋼棒全長につき大体一定となった場合に生ずるはずである。この点より鋼棒の形状

図-2 (a)



と荷重のドロップの関係を考えると、打撃を与える前に緊張端と定着端のひずみの差の大きいほど、また緊張端付近でのひずみの低下の割合が大きいほど荷重計のドロ

図-2 (b)

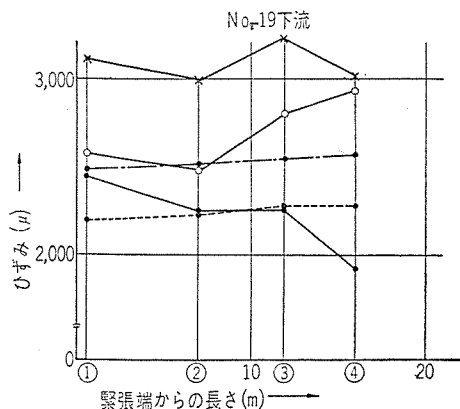


図-2 (c)

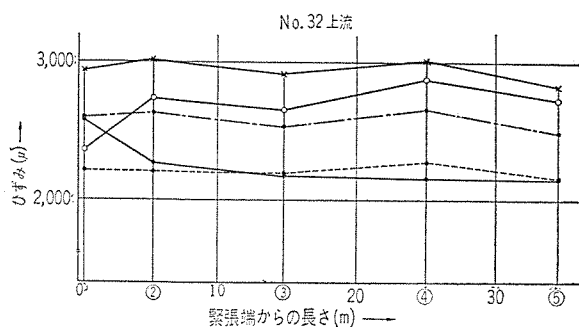


図-2 (d)

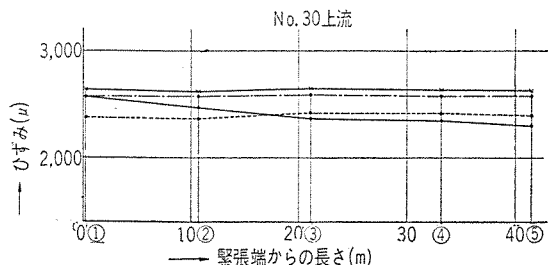
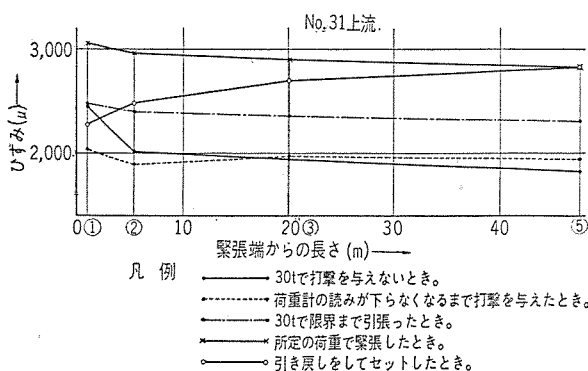


図-2 (e)



ップは大きくなるわけである。それゆえ鋼棒延長の大なるもの、屈曲の大なるもの、特に緊張端付近に曲線部のあるものはドロップが大きくなる。またドロップが限界に達するまでの状態では、当然鋼棒に与える打撃の強さ、打撃の回数によっても低下量は左右されるはずである。以上の観点にたつて図-1の鋼棒の配置状態と表-1の値を比較してみると、その関係が大体上に述べたとおりになっていることがわかる。例えば No. 31, 32 のドロップが大きいのは、鋼棒延長が大きいうえに緊張端付近に曲線部があるためであり、No. 30 のドロップが鋼棒延長の小さい No. 32 より小さいのは、曲線部が全然ないからである。

緊張端近くにある測点①のひずみの低下量は、当然緊張力のドロップと関係が深い。表に荷重の低下 1t 当りの測点①のひずみの低下量をのせているが、この平均値は 81 μであり、バラツキも小さい。この値は損失なしに緊張力が 1t 低下する場合のひずみの減少量 89 μの 91%にあたる。すなわち緊張端から約 50 cm の位置での緊張力の低下は、荷重計のドロップの大略 9 割程度となる。

つぎに定着端近くのひずみの上昇の状態を見ると、やはり鋼棒延長の短いものほど大きく上昇していて、打撃

表-1

| 鋼棒番号 | 測点⑤までの長さ (m) | 測点⑤までの角変化 (ラジアン) | 荷重の低下 (t) | 測点①のひずみ低下 (μ) | 荷重低下 1t 当りの①のひずみ低下 (μ) | 測点⑤のひずみ上昇 (μ) | 荷重低下 1t 当りの⑤のひずみ上昇 (μ) |
|-------------------|--------------|------------------|-----------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| No. 3 { 上流 下流 | 23.05 | 0.625 | 2.5 | 182 | 73 | 338 | 135 |
| | | | 2.8 | 223 | 80 | 284 | 101 |
| No. 4 { 上流 下流 | 23.05 | 0.718 | 3.5 | 267 | 76 | 283 | 81 |
| | | | 3.5 | 288 | 82 | 358 | 102 |
| No. 19 { 上流 下流 | 16.05 | 0.486 | 3.0 | — | — | — | — |
| | | | 3.0 | 254 | 85 | 360 | 120 |
| No. 20 { 上流 下流 | 16.05 | 0.486 | 2.6 | 218 | 84 | 299 | 115 |
| | | | 2.5 | 211 | 84 | 357 | 143 |
| No. 30 { 上流 下流 | 41.75 | 0 | 2.4 | 187 | 78 | 100 | 42 |
| | | | 3.5 | 305 | 87 | 129 | 37 |
| No. 31 { 上流 下流 | 46.40 | 0.328 | 5.5 | 400 | 73 | 123 | 22 |
| | | | 4.5 | 377 | 84 | 60 | 13 |
| No. 32 { 上流 下流 | 34.65 | 0.268 | 4.8 | 380 | 79 | 110 | 23 |
| | | | 4.0 | 352 | 88 | 130 | 33 |

注：No. 19, 20 については表の測点⑤は測点④となる。

の影響を受けやすいことがわかる。しかし、No. 31 のように 50m 近くもある非常に長いものでも、その末端まで確かに影響がおよんでいる。さらに緊張力の低下 1t あたりのひずみの上昇量を検討すると、鋼棒延長の小さいもの、角変化量の少ないものほど上昇量が大きくなっている。この事実より、打撃による効果の伝達は、鋼棒の長さや角変化量の関数であることがわかるが、いわゆる摩擦損失 $\mu\alpha + \lambda l$ の大きさには全然関係がないようである。摩擦損失の場合は角変化量 α の影響が大きいが、この場合はむしろ長さの影響の占める割合の方が大きい。

打撃を与えながら 30 t で限界まで引張ったときのひずみ分布は、30 t で荷重計が下らなくなるまで打撃を与えたときのひずみ分布と、ほとんど同じ形をしており、ちょうど荷重のドロップの分だけこれを上方に平行移動したものにほぼ一致する。

5. 摩擦係数についての検討

測定したひずみからつぎの方法で摩擦係数を求めた。すなわち測点①での緊張力を P_1 、測点 i で P_i 、同じくひずみを ϵ_1 と ϵ_i 、測点 ① から測点 ① までの鋼棒延長を l_i 、角変化量を α_i とすると、つぎの近似式が成立する。

$$P_i = P_1 (1 - \mu\alpha_i - \lambda l_i)$$

ここで鋼棒のヤング率が全長につき一定だとすると、

$$\epsilon_i = \epsilon_1 (1 - \mu\alpha_i - \lambda l_i)$$

となる。厳密には曲線部分のヤング率は直線部より少し低くなるが、最小曲げ半径が 8m であり、摩擦係数の算出におよぼす影響は小さい。上式において μ, λ 以外は既知だから、測点が 3 つ以上のときは最小 2 乗法により μ, λ を決定しうる。

自然の摩擦係数と打撃による限界摩擦係数を比較する

表-2

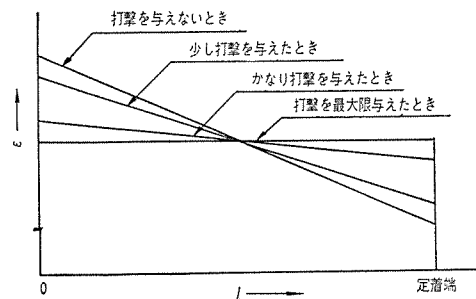
| 鋼 棒 番 号 | 荷重 30 t で打撃を 与える前 | | 30 t で打撃を与えな がら限界迄引いた時 | |
|-------------------|----------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | μ | λ | μ | λ |
| No. 3 { 上流 下流 | 0.26 | 0.0015 | 0.10 | -0.0023 |
| | 0.24 | 0.0025 | 0.31 | -0.0051 |
| No. 4 { 上流 下流 | 0.13 | 0.0053 | 0.23 | -0.0050 |
| | 0.16 | 0.0050 | 0.12 | -0.0035 |
| No. 19 { 上流 下流 | — | — | — | — |
| | 0.43 | 0 | 0 | -0.0022 |
| No. 20 { 上流 下流 | — | — | — | — |
| | 0.41 | 0 | 0.04 | 0.0019 |
| No. 30 { 上流 下流 | — | 0.0031 | — | 0 |
| | — | 0.0048 | — | 0.0014 |
| No. 31 { 上流 下流 | 0.52 | 0.0019 | 0.18 | -0.0003 |
| | 0.83 | 0.0014 | 0.45 | 0.0020 |
| No. 32 { 上流 下流 | 0.42 | 0.0027 | -0.06 | 0.0012 |
| | 0.43 | 0.0024 | 0.10 | 0.0001 |
| 平 均 | 0.38 | 0.0026 | 0.15 | -0.0010 |

ため、荷重計 30 t で打撃を与えないときのひずみと、30 t で打撃を与えながら引張られるだけ引張ったときのひずみから計算した μ, λ の値を示すのが表-2 である。

打撃を与える前の自然の摩擦係数は、多少バラツキが大きいが、 μ が平均値で 0.38、 λ は 0.0026 である。一方打撃を十分与えた限界摩擦係数は、平均値で $\mu = 0.15$ 、 $\lambda = -0.0010$ となり、 μ で 0.23、 λ で 0.0036 と大幅に摩擦が減じられていることがわかる。設計で使用した摩擦係数は指針にしたがい $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.003$ であるが、以上の結果より、自然状態のままでは計算の摩擦係数より μ が少し大きいが、打撃を与えるなどの減摩法を行えば、設計で使用した摩擦係数まで、望むならそれ以下にまで摩擦係数を減じて緊張作業が行なえることがわかる。

λ が負号になるのはおかしいが、これは図-2 を見ればわかるように、打撃を与えることにより鋼棒の緊張端よりも内部のひずみの方が大きくなり、中高のひずみ分布となったため計算上このようになったもので、 λ が負号になったものは実際上 $\lambda = 0$ と考えてよいと思われる。これまで打撃による効果は図-3 に簡略に示すように、打撃にともなって順次ひずみ分布の傾斜が緩くなってゆくが、最大限でも摩擦係数=0 の状態、すなわち、ひずみ分布が水平になる程度だと考えていた。しかし以上

図-3



のように λ が計算上負号で表わされる中高のひずみ分布を見ると、打撃による効果は、単に摩擦を切って見かけの摩擦係数を減ずることのほかに、一種の引越し引もどし効果のようなものがあるのだと思われる。

また各荷重でのひずみ分布を描いてみると、すべての鋼棒について、打撃を与えるまでは、荷重が増加するにつれてひずみ分布の傾斜が急になること、すなわち荷重が大きくなるにつれて摩擦係数が大きくなってゆくことに気づいた。摩擦係数の定義からして荷重の大きさに関係ないはずであり、どうしてこんな傾向が現われたのかわからないが、事実だけを記しておく。

6. 最終的な応力状態の検討

打撃の効果については以上に述べたとおりだが、普通

表-3

| 鋼 棒 番 号 | 所定の最高荷重で緊張したときのひずみ (μ) | | | | 引もどしてセットしたときのひずみ (μ) | | | |
|------------------------|------------------------------|----------------|-------|----------------|----------------------------|----------------|-------|----------------|
| | 緊 張 端 | | 定 着 端 | | 緊 張 端 | | 定 着 端 | |
| | 計 算 値 | 実 測 値 | 計 算 値 | 実 測 値 | 計 算 値 | 実 測 値 | 計 算 値 | 実 測 値 |
| No. 3 { 上 流 下 流 | 3.110 | 2.850 2.951 | 2.490 | 2.657 2.989 | 2.360 | 2.309 2.498 | 2.490 | 2.625 2.993 |
| No. 4 { 上 流 下 流 | 3.110 | 3.136 3.059 | 2.440 | — 2.580 | 2.300 | 2.411 2.382 | 2.440 | — 2.667 |
| No. 19 { 上 流 下 流 | 3.110 | — 3.106 | 2.630 | — 3.107 | 2.360 | — 2.578 | 2.630 | — 2.957 |
| No. 20 { 上 流 下 流 | 3.110 | 3.210 3.073 | 2.630 | 2.962 3.009 | 2.360 | 2.758 2.573 | 2.630 | 3.009 3.004 |
| No. 30 { 上 流 下 流 | 2.710 | 2.645 2.658 | 2.410 | 2.633 2.737 | — | — | — | — |
| No. 31 { 上 流 下 流 | 3.080 | 3.060 3.507 | 2.490 | 2.830 2.783 | 2.270 | 2.280 2.747 | 2.490 | 2.833 2.783 |
| No. 32 { 上 流 下 流 | 3.110 | 2.925 2.676 | 2.640 | 2.831 3.041 | 2.230 | 2.365 2.255 | 2.640 | 2.728 2.851 |

施工しているように、適当に打撃を与えながら、所定の荷重で緊張した場合について検討した。Dywidagでは摩擦損失の大きい鋼棒の場合は、引越し引もどしを実施している。所定の最高荷重で引越したときのひずみと、引もどして鋼棒をセットしたときのひずみについて、緊張端と定着端で、計算値と実測値を比較したものが表-3である。ここに計算値とは設計どおりの緊張力が与えられ、しかも摩擦係数 $\mu=0.25$, $\lambda=0.003$ のときのひずみのことである。

表-3 の最高荷重で緊張したときのひずみを見ると、緊張端では計算値より実測のひずみがやや小さいが、定着端では逆にすべて実測値の方が大きくなっている。このことは、打撃の効果がよくおよび、設計上の摩擦より小さな摩擦状態で緊張していることを意味する。また荷重計の読みは最高まであげているが、打撃によってすぐ荷重が低下するため、最終状態では緊張端に所定の最高荷重より小さな緊張力しか作用していないことになる。

引もどしてセットしたときのひずみを見ると、定着端については、値にあまり変動がないので前と同じ状態だが、緊張端の方は計算値より実測値の方がやや大きくなっている。引越したときのひずみ分布が設計のものより傾斜がゆるいことから、一定量の引もどしに対しこのようになるのは当然のことであろう。このため引もどしによる緊張端のひずみの低下は計算値よりはるかに小さい。結局打撃を与えながら緊張して、引越し引もどしを行えば、定着端の応力は計算値よりかなり高められ、応力分布も設計で仮定したものよりずっと均一な状態になっていることがわかった。

7. あとがき

最後に打撃の効果について要約すると、緊張中の鋼棒に打撃を与えることにより、緊張端の応力は低下し、逆

に定着端の応力は上昇する。この効果は鋼棒の長さの主として関係し、短いものほど効果が顕著であるが、鋼棒の角変化量にも若干関係するようである。測定の結果では、延長 20 m 前後のもので効果が特にいちじるしく、40 m 前後になると大分効果が小さくなるが、それでも 50 m 近いものでも確実に先端まで影響を受けていることがわかった。いずれにしても、打撃により鋼棒全長についての摩擦損失は大幅に減ずることができ、見かけの摩擦係数 μ, λ は指針に示されている数値よりかなり低下させることが可能である。このほか、打撃の効果の中に、一種の引越し、引きもどし作用のようなものがあることも認められた。また普通行なっている程度の打撃を与えながら緊張しても、所定の引越し引きもどしをした後の応力分布は、設計上のものよりずっと均一になり、定着端の応力も設計値よりかなり高くなっていることがわかった。

以上のとおり緊張時に打撃を与えることは、摩擦損失の減少、鋼棒応力の均一化に相当の効果が認められるので、ナットで締着するレオバや BBRV のような他の工法でもこれを実施すれば、よい結果が得られるのではないかと思う。打撃の与え方については、打撃による荷重計のドロップから判断して、大体限界までの効果をおよぼしているようなもので、現在行なっているような大ハンマーでたたく方法で十分であろう。

終りに本測定に協力していただいた鹿島建設那珂川作業所の方と、測定およびデータの整理にあたってくれた国鉄盛岡工務局の森口、竹原の両職員に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 百島・小林：Dywidag 工法の緊張について，協会誌 Vol. 6, No. 4, p. 30 (1964)
- 2) 協会誌 Vol. 6, No. 4, p. 84 (1964) 工事ニュース