

# ジュール熱利用プレストレッシングの研究

竹 本 靖

## 概 要

電熱加熱プレストレッシングとはどのようなものか、実用化に際してはどのような問題を解決しなければならないか、などにつき文献および若干の実験データから考察を行なった。

その結果、プレハブ用プレキャストパネルにプレストレスを導入する場合などには、比較的容易に利用が可能で、経済性も期待されるが、大型の本格的な PC 工事に応用することは、目下のところ困難な点が多い、という結論が得られた。

### 1. まえがき

PC 用鋼材に電流を通じ、発生するジュール熱によって長さが伸びることを利用したプレストレスコンクリートは、早くからその可能性が見出され、すでに一部（ソ連）では実用化もされている。

ただし、その基礎的な技術資料や施工上の問題点、さらに経済性などについては、わが国ではまだ十分知るところとなっていない。本研究では、これら問題点を追求し、基礎的な資料を得て、実用化の可能性を論ずることが目的である。

### 2. ジュール熱プレストレッシングの原理

鋼材に電流を通ずると発生する熱量は

$$Q=0.24I^2 \cdot R \cdot T \text{ カロリー} \dots\dots\dots(1)$$

Q: 発生熱量 カロリー T: 時間 秒  
I: 電流量 アンペア R: 抵抗 オーム

この熱量により鋼材の上昇する温度は

$$H = \frac{Q}{C \cdot \rho \cdot l \cdot S} \cdot \alpha \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots(2)$$

C: 鋼材の比熱 cal/g<sup>o</sup>C ρ: 鋼材の比重  
l: 鋼材の長さ cm S: 鋼材断面積 cm<sup>2</sup>  
α: 放熱量によって決まる係数

$$(1)(2)\text{式より } H = \frac{0.0305I^2RT}{CS} \cdot \alpha \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots(3)$$

H<sup>o</sup>C に加熱された鋼材をベッドに固定し冷却すると引張応力が発生する

$$\sigma_s = E_s \nu H \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots(4)$$

E<sub>s</sub>: 鋼材弾性係数 (温度により若干変動する)  
ν: 鋼材線膨張係数

鋼材温度がある程度以下になってからコンクリートを打ち、必要な強度の発生を待って、鋼材の切断また

は定着の解除によりプレストレスを導入する。

$$P = SE_s \nu H (1 - \rho n) \text{ kg} \dots\dots\dots(5)$$

p: 鉄筋比 n: 弾性係数比

### 3. 鋼材の機械的特性

鋼材が高熱にさらされたときの諸特性については、これまでも主として耐火上の見地から追求されてきたが、この熱特性は、高温下での特性、および一度加熱され再び冷却されてからの特性の二つに分けて考えられる。

電熱加熱の場合は、高温の下で大きな力を受けることとはない、すなわち、緊張力の発生は鋼材の除冷と共に進み、高応力は、すでに相当低温になってから現れる。

鋼材が一度加熱され、常温に冷えてからの諸特性は加熱温度がある限度以下の場合には、ほぼ元通りに回復する<sup>1)</sup>。その限度を越えると急激に劣化(破断強度、降伏点、弾性係数)し、PC の緊張材としては使えなくなる。この鋼材の加熱可能限度は、鋼材の材質、製造方法、各種処理法、材径、形状などで異なる。

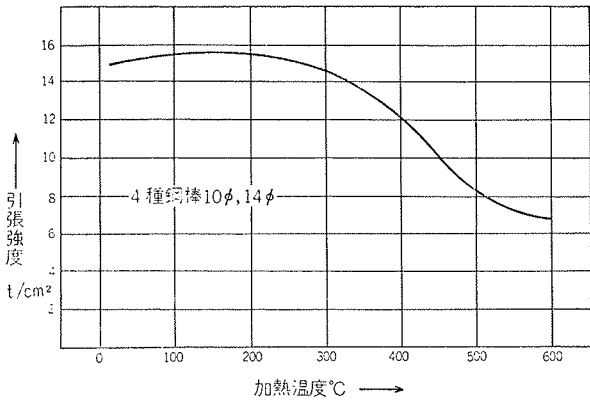
第1図は、高周波熱練製 10φ、14φ 4種鋼棒について、筆者が電気炉を用い、加熱後常温で引張試験を行なった結果である(加熱時間は20~30分)。

この場合、350<sup>o</sup>C程度が限界値であることが判る。

なお、高温時の強度は、350<sup>o</sup>Cでも、常温時の70%位まで下るのが普通である。

強度、弾性係数以外の鋼材の諸特性についても、鋼の成分により、また温度により変動する。PC 鋼材として用いられることの多い炭素成分 0.4%前後のものについて、温度0~400<sup>o</sup>Cの範囲での各特性は

抵抗係数	20~40 × 10 <sup>-6</sup> Ω·cm
比熱	0.11~0.14
線膨張係数	11~13 × 10 <sup>-6</sup>



図一 加熱冷却後の鋼材引張強度変化

#### 4. 加熱装置

電熱加熱プレストレッシングでは、ジャッキによるプレストレス導入と異なり、鋼材に通電するための特別な装置を必要とする。

##### 4.1. トランス

鋼材の電熱加熱に必要な電流は、低圧・大電流という特殊な形をとる。これは、鋼材がその長さに比して断面積が大きく、したがって抵抗値が非常に小さな値となるためである。

このため、電熱加熱には特別なトランスを必要とする。電力容量としては、10kVA あるいは 20kVA 程度で済むが、通常の、たとえば溶接電源に用いるトランスでは、300~500A 程度の電流（2次側）にしか耐えない。

ちょっとした鋼棒でも1000Aを越える大電流を必要とするので、容量 20kVA、ただし 2次側電流 2000A といった仕様のトランスを用意しなければならない。

##### 4.2. コードおよび通電チャック

鋼材を、常置した加熱台上で通電するか、緊張ベッド上に配筋した状態で通電するか、さらにポストテンションでコンクリート部材に埋まった状態で通電のかなどによって条件は違うが、いずれにせよ、ある長さのコードが必要となる。銅の抵抗係数は、鉄の  $1/15 \sim 1/20$  であるから、加熱する鋼材断面積とほぼ同じか、それ以上の断面積とすれば、コード自体の温度上昇は問題とならず、また電流のロスも、延長が無闇に長くない限り無視できる。しかし、加熱すべき鋼材が太径になると、コードも大断面積を必要とし、可撓性や機動力が損われる。

鋼材とコードとの接続には、通電チャックを必要とする。この部分での接触抵抗が大きいと、局部的に高熱を発生し、鋼材に悪影響を及ぼしたり、チャックを痛めたりする。したがって、チャックと鋼材がかみ合う

部分はピッタリするとともに、十分な圧力で締めつけられていなければならない。

加熱された鋼材の定着は速に行なうべきなので、チャックは着脱の容易なものとする。したがって、たとえば、仮設足代に使われる接続用のクランプとか、溶接棒のホルダーとかのようなものが考えられる。

##### 4.3. 加熱台

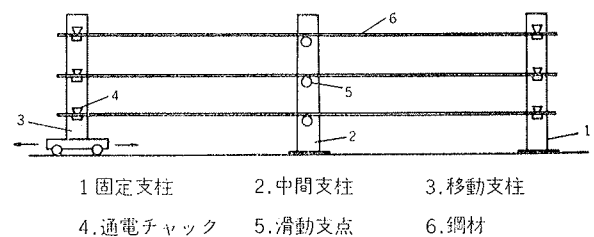
プレテンション法による場合、鋼材への通電方法は2種ある。すなわち、鋼材を定着ベッド上にセットした状態で通電する方法と、ベッドとは別の加熱台上で通電し、必要な伸びが得られたところで台から外してベッドに運び定着する方法とである。

前者は、定着位置でそのまま加熱されるから、得られた最高温度を定着温度にとることができるが、定着ベッド（形枠）に接して通電するため、トランス、チャック等が、かなりの距離・範囲について移動可能でなければならない。また、ベッド自体に電流の絶縁の考慮が必要であるし、鋼材の伸びの管理のためにもベッドに細工が要ることになる。このような“高度化”したベッドが、コンクリートの硬化、プレストレスの導入の時期まで占領されることは、投資効率の悪さに結びつく。

したがって、若干の温度ロスが避けられないにしても、鋼材の通電加熱は、ベッドとは別の加熱台で行なうのが実際的ということになる。

鋼材の各サイズに応じた適当な加熱台を造っておけば、伸びの管理も同時にでき、電圧・電流のロスを最少限に抑えることができる。

第2図はソ連におけるプレキャストスラブ用鉄筋加熱台の一例である<sup>2)</sup>。



図二 鋼材加熱台

本図において、まず鋼材端を1、3の支柱にチャックで十分締めつける。中間支柱は、鋼材長に応じて適当な間隔に設置する。通電チャックを通して所定の電圧電流を流すと、鋼材は発熱し伸び始める。それに応じて移動支柱が動き、その量がインジケータによって示される。移動がある値に達したとき、自動的にスイッチが切れ、温度上昇が止まる。作業員が直ちにチ

ジャックを外し、鋼材を定着ベッドに移し定着する。

このシステムで、長さ24mまでの鉄筋を加熱しているという。

## 5. 加熱作業

### 5.1. 加熱時間のコントロール

作業能率を上げ、設備の回転率をよくするために、鋼材1本当たりの加熱時間はなるべく短くしたいが、一方では、加熱温度すなわち伸び長さの正確な把握という点からはあまり急激な加熱は好ましくない。また急速な加熱には高電圧が、したがって大電流が必要となりそのための加熱装置は、より大がかりなものとなる。

このような種々のファクターから、それぞれの鋼材に適した推奨可熱時間というものがある。通常、この値は、細径の鋼材（鋼線・鋼より線）で15～20秒、比較的太径のもの（細径の鋼棒）で30～60秒位である。

電流の管理は、2次電源の電圧によって行なうのが最も容易であるから、適当な加熱時間となるような電圧を選ぶ。(3)式より

$$T = \frac{HC^2 r}{0.0305 \alpha \cdot V^2} \text{秒} \dots \dots \dots (6)$$

C, r,  $\alpha$  が温度によって変動するから単純ではないが、時間Tは電圧Vの2乗に、ほぼ反比例する。

使用する電圧があまり高くない（10～60V程度）ので、電源電圧にわずかな変動があっても、可熱時間は敏感に影響を受ける。したがって、使用するトランスの精度を高くすると共に、一次電源の電圧も十分管理しなければならない。

### 5.2. 熱量のロス

加熱時の熱量（電流）のロスには、コード・チャック部分の抵抗によるロス、および鋼材自身の放熱によるロスの2種がある。

鋼と鋼の抵抗係数の比は15～20：1であるから、コードの銅線断面積を鋼材とほぼ等しくし、長さも同程度以下とすれば、回路全体の抵抗は鋼材のみの場合から数%増しに止まる。したがってチャックの加圧部分での接触抵抗を無視し得る程度にすれば、コード等の抵抗が原因となる熱量のロスは、とるに足らない。

コード自体の温度上昇も、鋼材の数%、例えば、鋼材が400°Cまで上るのに対し、20～30°C程度で納まる。

コード等による熱量のロスは、装置に固有のもので予めキャリブレーションを行なって定量的に把んでおくことができるのに対し、鋼材の放熱によるロスは、多くの不確定要素に左右され、扱いが難しい。

鋼材の放熱は、対流によるものと、放射によるものとに分けられる。さらにポストテンション法では、鋼材からシーsthroughしてコンクリートへの伝導がある。

対流による熱の損失量は、気温（室温）、風速などによって決まる他、鋼材の加熱時のポジションにも影響される。放射の程度は、周囲の状況、鋼材の表面形状、錆び具合などで左右される。

これらの諸要素は、それぞれ無関係に変動するので一つ方程式上に載せて処理することは困難である。

したがって、実用的には、全要素を含めて、実験データから、放熱によるロス量を係数として表わすことが望ましい。

## 6. 定着および導入作業

電熱加熱プレストレッシングでの緊張材の定着方法は、ジャッキによる場合と同様であるが、その特性上2, 3の問題点が存在する。

ポストテンション法で、クサビを用いる場合、ジャッキによる緊張であれば、ジャッキ圧の解除と共に直ちにクサビに締めつけ力が働き、クサビ効果が出る。

電熱加熱では緊張力の発生が鋼材の除冷と共に進行するので、鋼材の太さ方向の縮少も手伝って、クサビ作用が働きにくい。もとよりフレシネ法のようにダブルアクションのジャッキで一気に押し込むというわけにいかない。

プレテンション法で、緊張ベッドで直接通電する時には定着部付近の絶縁の問題が、加熱台で別に通電する時には定着時の熱量ロスの問題がある。

加熱台で電源のスイッチを切ってから鋼材をベッドに運び定着するまでの時間が長くなってはいけぬ。せいぜい加熱に要する時間程度に押える。このため、加熱台のチャックの操作がスムーズであると共に、ベッドの定着端もその旨工夫する。たとえば、鋼材（この場合は鋼棒）の端にヘッダー加工（頭を叩き出す）を施しておき、ベッドの定着端を櫛もしくはフォークの形に作り、これに鋼棒のヘッダーを引っかけて定着する。上から落とし込むだけなので作業はごく簡単である。

ただし、鋼材の切りそろえ長さおよび伸び長さが正確でないと、フォークの刃との間に座金を入れるとか刃自身を動かせるようにしておくが必要となる。

## 7. 鋼材引張力の管理

ジャッキによる緊張の場合、引張力の管理は、ポンプについた圧力計で読むか、鋼材の伸び長さをスケー

ルで計るか、時にはジャッキのロッド部分に抵抗線歪計を貼って電氣的に測定したり、ロードセルを用いたりして行なわれる。

電熱加熱の場合、鋼材に大電流が通っていること、温度が高いこと、といった事情から、鋼材やチャックに接して測定することが難しい。

### 7.1. 加熱時の管理方法

7.1.1. 加熱時間で管理 特定の鋼材に対する電圧—時間—上昇温度の関係は、実験的に定めた係数を含む理論式で表わされるので、装置のキャリブレーション、電源電圧の管理、気温等外的条件の把握を完全にしておけば、一定時間の通電により一定の伸びが得られることになり、管理方法としては楽であるが、誤差の範囲の点で疑問が残る。

7.1.2. 鋼材温度で管理 加熱された鋼材の温度が分れば伸び量も把める。しかし、これにも、温度測定上の問題があり実際に管理手段として採ることは困難である。

鋼材の表面からは絶えず熱量を放出しているので、表面温度を測って全断面の上昇温度を推定することは誤差の点で問題がある。また、どのような温度計を用いても、温度表示に“おくれ”があり、加熱時間が秒単位の短かさなので正確さは期し難い。

7.1.3. 鋼材の伸びで管理 直接鋼材の伸びを測れば最も信頼の置ける引張力管理ができる。

伸びの測定方法としては、端部の伸び出し長さをスケールで測るか、両端の移動を固定して中央の垂れ下がりを測るかの2種がある。

前者は比較的太径で鋼材自身の曲げ剛性が大きい場合や、鋼材が長く中間支点がいくつもある場合に用いる。比較的細径の鋼材で長さも短かく支点が両端だけの場合、支点での水平移動を抑えておき、加熱伸長と共に生ずる中央の垂れ下り量を測って伸びを計算する。

両者共、電源スイッチと連動した加熱台が実用化されている<sup>2)</sup>。

### 7.2. 定着、冷却後の管理方法

加熱直後の伸び長さが上記いずれかの方法で分っていても、それ以後、ベッドに固定し、引張応力が発生するまでに、いくらかの誤差が生じているので、最終的な鋼材引張力は分らない。実用的には、ある一定のプロセスを前提に、応力の損失係数を考え、加熱時の伸び量のコントロールを以って引張力管理とすることができ、その場合でも、一種の抜き取り検査的な最終引張力のチェックが必要である。

7.2.1. 横方向加力計による方法 ベッド上で緊張

状態にある鋼材に横方向力を加えるとたわみを生じ、その時加力とたわみおよび鋼材の引張力との間に方程式が成り立つ。この原理を利用し加力量とたわみ量が表示される加力計を製作すれば、ごく簡単に鋼材引張力がチェックできる。

引張応力Pでベッドに張られた鋼材の材長l中央に集中荷重Fが加えられたとき、たわみがfであれば、

$$P = \frac{Fl}{4f} \text{ kgcm/cm}$$

7.2.2. 固有振動数を計る方法 弦材（ベッド上に緊張された鋼材）は、その引張応力度によりそれぞれ固有の振動数を持つ。したがって、その振動数を知れば、弦材の応力度は計算により求まる。

引張応力度σと固有振動数ω（サイクル/秒）の関係は、

$$\sigma = 0.32l^2 \cdot \omega^2 \text{ kg/cm}^2$$

固有振動数の測り方としては、共鳴効果を利用した測定器が開発されている<sup>3)</sup>が、加力計による場合と比べて、精度および測定範囲の点で劣るようである。

## 8. 経済性

### 8.1. 消費電力

電熱加熱に必要な電流は、アンペア数は大きいが高電圧が低いことおよび通電時間が短いことのため、単位鋼材量当りの消費電力量は、あまり多くない。

$$\text{電力量} = I \cdot V \cdot h \text{ ワット} \cdot \text{時}$$

(1)(2)式を用いて書き直すと

$$\text{電力量} = \frac{CGH}{0.24\alpha} \quad G: \text{鋼材量}$$

となり、ロス程度の差を考えなければ、鋼材の形状（長さと同断面積の比）や、抵抗係数とは無関係であることが分る。

今、比熱C=0.12、上昇温度H=400°C、有効係数α=0.8とすれば

$$\text{鋼材トン当り必要電力量} = \text{約 } 70\text{kWh}$$

### 8.2. 必要人員および作業能率

加熱台を用いるプレテンションの場合は1台につき2~3人の作業員で細径の場合、100~150本/時、太径なら、30~50本/時の加熱処理を行なうことができる。

この生産能率の良さが電熱加熱法最大の利点である。

さらに、プレテンション法において、緊張ベッド上に予め配筋した鋼材のかんりの部分を結線し、一つの回路として通電すれば、定着の問題が残るとはいえ、飛躍的に能率向上が果せる。

ポストテンションの場合は、1ヶ所につき3人程度を必要とし、能率は、鋼材がかなり大型となるので、プレテンション加熱台の場合のように上らない。

## 9. むすび——問題点のまとめ

### 9.1. 緊張能力の問題

鋼材の成分、処理法により若干違いがあるとはいえ鋼材の耐え得る温度（冷却後機械的性質が劣化しない限度）は、おおむね400°C、実用的には350°Cを以て限度としなければならない。すると、 $\sigma = E \cdot \nu \cdot H$  より、 $E = 2 \times 10^6$ 、 $\nu = 12 \times 10^{-6}$ 、 $H = 350$  として、鋼材が受ける引張応力度の最高限は、約8400kg/cm<sup>2</sup>ということになる。したがって、鋼材の品質を選択するときにはこの値が規準となり、たとえば鋼棒では4種まで使えるが、鋼線・鋼より線では、鋼材の持つ許容応力度に近い値まで緊張することができず、コンクリートのプレストレス力を保証するためには、鋼材量を増さなければならない、といった問題が生ずる。

### 9.2. 加熱装置の問題

鋼材の電気抵抗の低さから、必然的に装置の通電部分の抵抗値を小さく設計しなければならない。

このため、装置の材質を抵抗係数の小さいものとする；断面積を大きくする；延長を短かくする、といった配慮をする。あとの2点は、装置の機動性、扱い易さなどと矛盾する。固定した加熱台を用いるのは、この矛盾を避けたものであって、プレテンションのパネル状のものには適するが、現場打ちや、ポストテンションの場合には使えない。この辺に、電熱加熱法の限界があるということになる。

### 9.3. 当面の応用

現在、われわれの持つ技術ですぐ電熱加熱法を利用するとすれば、ソ連で実用化されているようなプレキャストパネルの製作であろう。比較的細径の鋼材（鋼線2.9φからせいぜい5φ程度まで）を用い、前記の加熱台を設置し、20～30V、300～500Aの電流によって、15～25秒程度の通電加熱を施せば、 $\sigma_s = 600 \sim 800$  kg/cm<sup>2</sup>の引張応力度は容易に得られ、コンクリート部材に30～50kg/cm<sup>2</sup>のプレストレスが導入できる。

この程度のものであれば、過大な設備投資を必要とせず、また特に綿密な調査研究も必要でない。ジャツキによる方法に比べて、非常に有利とは言えないまでも、少くとも時間当り生産量は、緊張材に関する限りかなり上る（50～100%）。

### 9.4. 今後の研究課題

(a) 各製法・各処理法・各形状の鋼材について、電熱特性（リラクセーションを含む）を試験し、本工法

に適した鋼材を選び出すこと

(b) 電熱特性のすぐれた新鋼材（品質および形状について）を開発すること

(c) 断熱性・耐熱性・絶縁性および機械的性質のすぐれたシース材を開発すること

(d) 放熱による熱量のロス、各種実験を行なって係数の形で表わすこと

#### 参考文献

1) リスキント：冷間加工異形鉄筋の特性に及ぼす電熱加熱の影響、ベトン・イ・ジリエザベトン誌8（1960）

マダティヤン：熱間加工筋30×12Cの特性に及ぼす電熱加熱の影響、同上誌、10（1960）

イゴロフ他：高張力鋼線の電熱応力、同上誌4（1963）

ガラドニッキー他：電熱を受けた高張力鉄筋の特性、同上誌、10（1965）

2) バラチェフ他編：組立式RC製品製造便覧（1965）

シロビドフ他：電熱緊張法により中間支持点で緊張した鋼材を持つPC構造、ベトン・イ・ジリエザベトン誌、9（1966）

3) ゲルシベルグ：コンクリート・鉄筋コンクリート製品製造技術、17章

4) イチコビッチ：共鳴式振動数測定器、メハニザツィヤ・ストロイチェリストバ誌、5（1961）