

緊張力解放の手法について

広瀬 晴次^{*1}・島根 征哉^{*2}・萩原 昌明^{*3}・石栗 利宏^{*4}

まえがき

プレストレストコンクリート（以下PCと略す）構造物の利用分野の拡大に伴い、緊張力解放を前提とした設計施工が組上にあがるようになってきた。プレストレッシング技術の自由度が大きくなればPC構造物の高度化、有用性がさらに促進される。最近の緊張力解放の技術思想は外ケーブルの導入に負う所が大きいが、内ケーブルにおいても従来よりその手法は用いられてきたことも事実である。ここに両者共通の緊張力解放の手法の一端を紹介して、今後の展開をはかるうえの資料として供したい。特に緊張力を加熱によって解放する手法はまだ開発途上の技術と言ってしまうかえらないと思われるが、ここに示した加熱方式に関する実験データが実用化のために参考となれば望外の喜びである。

1. 緊張力解放が行われる緊張材の種類と適用条件

PC構造物および部材において、緊張材の緊碇後その緊張力を解放する必要性が生じる場合がある。その場合とは、①架設ケーブル、②一次、二次等段階的に行う緊張方式、③斜張橋用斜材の交換時、④外ケーブルの交換時、⑤何らかのトラブルに起因するもの等に大別することができる。これらのうち、①、②、⑤に関してはいくつかの実施例を認めることができるが、③、④に関してはまだその例は稀有と思われるのが現状である。一般的な緊張力解放の手法としては緊張に用いたジャッキに特殊治具を装備して行う方法があげられるが、最近の外ケーブルの導入に関連して、緊張ジャッキ（以下ジャッキと略す）を用いず緊張状態の緊張材を加熱し熱膨張を利用して緊張力の解放を行う方法が研究されている。この2つの方法は対象とする緊張材がPCグラウト（以下グラウトと略す）で充填されている場合とされていない場合、緊張に要する余長（以下余長と略す）がある場合

とない場合に区分を行い、緊張力の解放をジャッキで行うか、緊張材の加熱によって行うかが決定される。通常グラウトが無充填で余長が確保されている場合はジャッキによる方法を用い、グラウトは無充填だが余長がすでに切断され、確保されていない場合は緊張材の加熱によってそれを行うことが、緊張力を解放する際の基本的な判断基準と考えてよい。しかし斜張橋の斜材、外ケーブルにおいてはグラウトが充填されていても、それらに外科的処置（例えば切断）により緊張材を分断し緊張力を解放する場合もある。ここで述べる緊張力解放の手法は外科的処置によらず、グラウトが無充填であることを前提とし、余長が確保されている場合でジャッキによる方法および余長が確保されていない場合で緊張材の加熱による方法に関するものである。

2. ジャッキによる緊張力の解放

2.1 緊張力解放手法の概要

ジャッキによるくさび式PC定着工法における緊張力解放の手法の概要は次のとおりである。

ジャッキのストロークを緊張時伸び量に多少の余裕量をもたせて予め出しておく。すでに緊碇された緊張材に緊張力解放用専用治具とともにジャッキをセットし、再度緊張力を加える。その時緊張力の増加とともに定着具のくさび（オスコーン、ウェッジ等）はくさび受具（メスコーン、定着ブロック等）から抜け出てくる。この作用により緊張力の保持点は定着具からジャッキのテンポラリーチャックに移動する。くさびは抜け出た状態で当専用治具により固定される。次に油圧ポンプのバルブを操作して減圧すると緊張材はくさびに接触することなく、伸び量分縮む方向に作用し、それに伴ってジャッキのストロークが引き戻され緊張力が解放される。

2.2 作業上の注意点

次にこの作業に当たって注意すべき点をあげると次のとおりである。

1) 緊張力の上限値は緊張材の降伏点荷重の95%を目安とすべきである。理由は緊張力が解放された緊張材は再使用するケースが多いと考えられることおよび緊張作業時の安全管理上からも妥当な値と思われる。

*1 Seiji HIROSE：極東鋼弦コンクリート振興(株)

*2 Masaya SIMANE：極東鋼弦コンクリート振興(株)

*3 Masaaki HAGIWARA：鈴木金属工業(株)

*4 Toshihiro ISHIGURI：鈴木金属工業(株)

2) くさび式定着具は定着時、プルイン(セット)が生じるが、この作用は緊張力解放を行う際に有利に働く。例えばプレストレス中の緊張力を緊張材降伏点荷重の90%と考えると定着時にプルインにより、その値は減少する。これによりくさびを引き抜く際の最大緊張力(降伏点荷重の95%)との差が拡大し、その分くさびをくさび受台より余分に引き戻すことが可能となり、緊張力解放の作業が容易になる。なお、くさびの引戻し量はフレシネーケーブル12 T 13の場合25~50 mmが必要となる。

3) ジャッキをセットする際は緊張材の軸線とジャッキの軸心が一致するように特に注意する必要がある。対象とする緊張材はすでに緊錠されているので、緊張時くさびがくさび受台から抜け出してくるまでに引張力を受ける緊張材の長さはジャッキのテンポラリーチャックと定着具間であり、その長さはせいぜい60 cmと短い。したがって伸び量も少なく、仮にジャッキを緊張材の軸線に対し吊り上げ過ぎたり、吊り下げ過ぎたりした場合は緊張材の上下に過度の応力差が生じ、破断の恐れも生じるので注意する必要がある。緊張材の応力差を求める場合下式を参考にするとよい。

$$\Delta\sigma = \Delta l/l \cdot E_P$$

ここに、

$\Delta\sigma$: ジャッキを傾けてセットした場合の緊張材の応力度 (Kg/mm²)

l : 余長(定着具前面よりジャッキ用テンポラリーチャック間の距離) (mm)

Δl : ジャッキの傾きによる定着具前面とジャッキ先端部との遊間 (mm)

E_P : PC鋼材のヤング係数 (Kg/cm²)

4) 一次および二次等段階的に行う緊張方式で、一次緊張と二次緊張との時差が長期におよぶ場合、定着具と緊張材の防錆には十分注意する必要がある。可能な限り二次緊張を行う前に一次緊張を解放し、定着具および緊張材の過度な錆、定着に有害な異物の有無を確認し、有る場合はそれを除去する必要がある。

5) 余長は必要な長さが確保されていること。緊張材の伸び量と緊張力解放用専用治具の高さおよびジャッキ用テンポラリーチャックをはずすための余裕量を含めた余長があることを確認する。

6) 緊張力解放の作業は両引き緊張の場合でも片端ずつ行い、当作業を行っていない他端にもジャッキをセットしておく配慮が安全管理上必要と思われる。

2.3 緊張力解放の実施例

緊張力解放の実施例を FKK フレシネー工法にとり、くさび式 PC 定着工法におけるこの手法をさらに明確にしたい。

〈条件〉

緊張材の長さ=35 m, 全伸び量=24.5 cm, 緊錠後の余長=90 cm, 両引き緊張, 使用ジャッキ=S6 型, 定着具 12 T 13 M 220

〈検討 1〉

緊張力解放を片端のみで行うか、両端で行うかを次の式で検討する。

$$X \geq Y_1 \text{ or } X \geq Y_2$$

$$Y_1 = A + B + C = 65 + 4.5 + 24.5 = 94 \text{ cm} > 90 \dots \text{out}$$

$$Y_2 = A + B + C/2 = 65 + 4.5 + 12.2 = 82 \text{ cm} < 90 \dots \text{OK}$$

X : 緊錠後の余長 (cm)。本例では 90 cm

Y_1 : 片端のみで緊張力解放を行う場合の余長 (cm)

Y_2 : 両端で緊張力解放を行う場合の余長 (cm)

A : FKK フレシネー工法で定める余長 (cm)。65 cm

B : 緊張力解放装置の高さ (cm)。本例では 4.5 cm

C : 全伸び量 (cm)。本例では 24.5 cm

上式による検討の結果、緊張力の解放は Y_2 が適合するので、片端ずつ、両端で行うこととなる。

〈検討 2〉

ジャッキのストロークを無負荷でどのくらい出しておくかを決定する。

$$Z = D + E/2 = 5 + 24.5/2 = 18 \text{ cm}$$

Z : 無負荷でのジャッキストロークの出 (cm)

D : ジャッキ用テンポラリーチャックを脱楔するために必要なジャッキストロークの出 (cm)。5 cm

E : 緊張材の全伸び量に相当するジャッキストローク (cm)

上式による検討の結果、ジャッキは無負荷でストロークを 18 cm 出した状態で緊張材にセットする。

〈検討 3〉

ジャッキのストローク余裕量の確認を行う。余裕量は緊張時にオスコーンをメスコーンから引き戻すために必要な量である。

$$W \geq Z + F \quad 30 \geq 18 + 5 = 23 \dots \text{OK}$$

W : 使用ジャッキの最大ストローク (cm)

F : 緊張時オスコーンを引き戻すために必要なジャッキのストローク (cm)。本例の場合は 5 cm

以上を総括して本例の場合、緊張力の解放は片端ずつ両端で行い、その時のジャッキは無負荷の状態ですトロークを 18 cm 出して緊張材にセットすればよい。

2.4 緊張力解放の作業手順

1) すでに緊錠されている緊張材に緊張力解放のための専用治具(オスコーン抜き装置)をセットする(写真-1, 図-1 参照)。

2) ジャッキをセットする。このときジャッキの先端

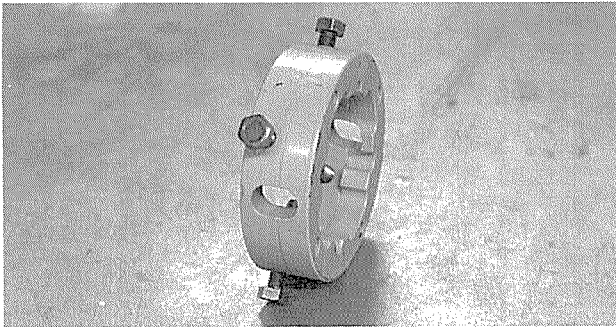


写真-1 緊張力解放装置 12 T 13 用

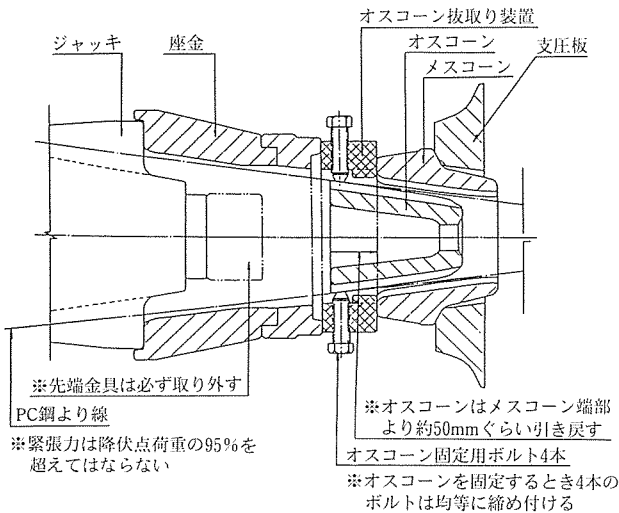


図-1 緊張力解放装置の例 (マルチストランドシステム)

金具をはずしておくとともに所要のストロークが出ていることおよび緊張材の軸線とジャッキの軸心が一致していることを確認する。さらに余長を確認する。

3) 緊張材に引張力を与える。

4) 緊張力が定着時の緊張力を超えた時点よりオスコーンがメスコーンより引き戻されてくることを専用治具の孔より観察する。本例の場合 25~50 mm 引き戻された時点で緊張力の上昇を中止し、その力を保持する。

5) 専用治具に設けてある4本のボルトをオスコーンのリブ (山部) に当ててねじ込みオスコーンを固定する。

6) ポンプの緊張側圧抜きレバーを操作して徐々に緊張力を解放する。

なお参考までに他の緊張力解放装置の例を図-2、図-3に示す。さらにフレッシュVシステムに用いると有効なジャッキS6-V型を写真-2に示す。

3. 加熱による緊張力の解放

PC 構造物にプレストレスが導入されると、緊張材は引張状態となる。このような緊張材の中間部を加熱することによって緊張材には熱膨張や、高温域での塑性伸びが生じ、緊張材の張力を緩めることができ、プレストレス解消の手法として有効な手段となることが考えられ

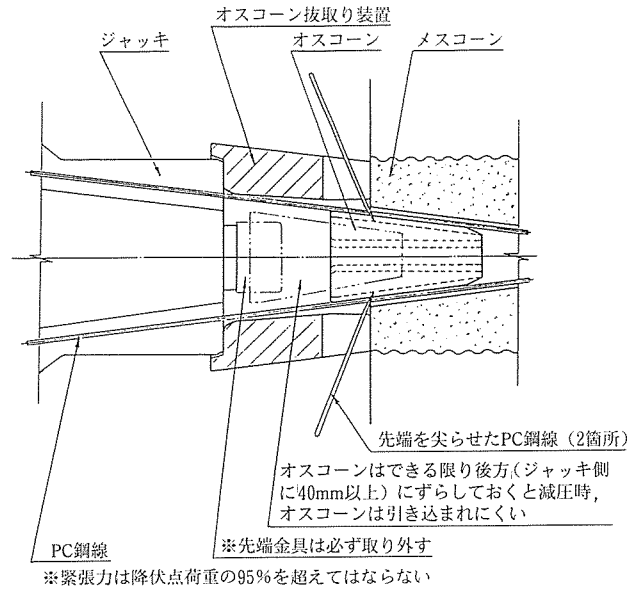


図-2 緊張力解放装置の例 (マルチワイヤシステム)

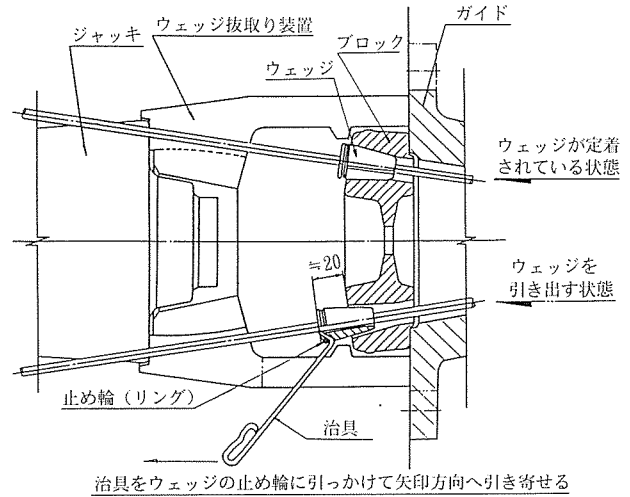


図-3 緊張力解放装置の例 (フレッシュVシステム)

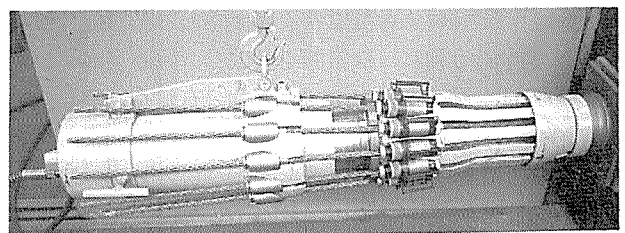


写真-2 フレッシュジャッキ S6-V 型

る。プレストレスによって緊張材に与えられた伸びを ϵ 、弾性伸びを ϵ_e 、塑性伸びを ϵ_p とすると、

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p \dots\dots\dots (1)$$

となり、プレストレスとして有効に作用しているのは弾性伸び ϵ_e である。プレストレス力 = 緊張材張力を P kgf、緊張材のヤング係数を E kgf/mm²、断面積を A mm² とすると、

$$\epsilon_e = \frac{P}{E \cdot A} \dots\dots\dots (2)$$

したがって(1)式は、

$$\epsilon = \frac{P}{E \cdot A} + \epsilon_p \dots\dots\dots (3)$$

となるので、緊張材を加熱することによって緊張材の塑性伸び ϵ_p が $\epsilon_p + \Delta\epsilon_p$ に増加したとき、緊張材の張力が $P + \Delta P$ に変化したとすると、

$$\epsilon = \frac{P + \Delta P}{E \cdot A} + (\epsilon_p + \Delta\epsilon_p) \dots\dots\dots (4)$$

(3)式と(4)式より

$$\Delta\epsilon_p = -\frac{\Delta P}{E \cdot A}$$

すなわち、熱膨張または塑性伸びにより $\Delta\epsilon_p$ が生ずると、 $\frac{\Delta P}{E \cdot A}$ により、張力減少 ΔP が生ずることになる。

3.1 試験方法

(1) 実験装置および緊張材

PC 構造物における緊張材の張力解放を実験室的にシミュレートさせるために、図-4 に示すような鋼製アバットを使用し、緊張材を緊張定着して試験を行った。緊張材についても、実際のケーブルのシミュレーションとなるように、次の PC 鋼材を緊張材として使用した。

- 1) PC 鋼線 5.0 mm
- 2) PC 鋼より線 7 本より 12.7 mm

緊張材の引張力の変化は定着端に設置したロードセルによって測定した。

(2) 加熱方法

緊張材の加熱方法については、一般的なニクロム線ヒーターによる間接加熱方法を採用したが、一方において直接、緊張材に電流を流し、その時のジュール熱で加熱する通電加熱法についても試験を行い、間接加熱法との比較を行った。図-5 に間接加熱の場合の実験装置

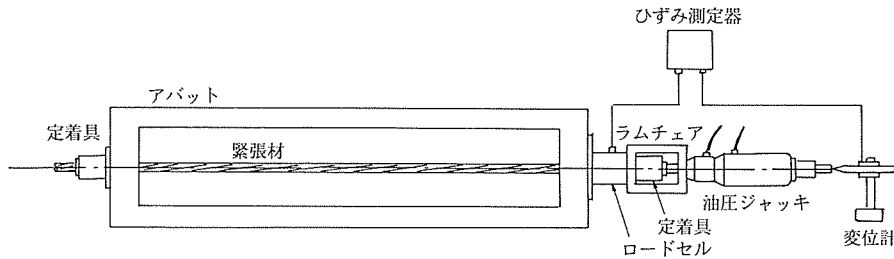


図-4 実験装置

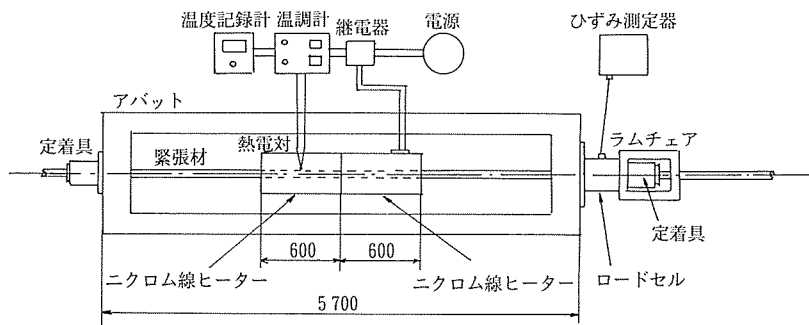


図-5 間接加熱方法

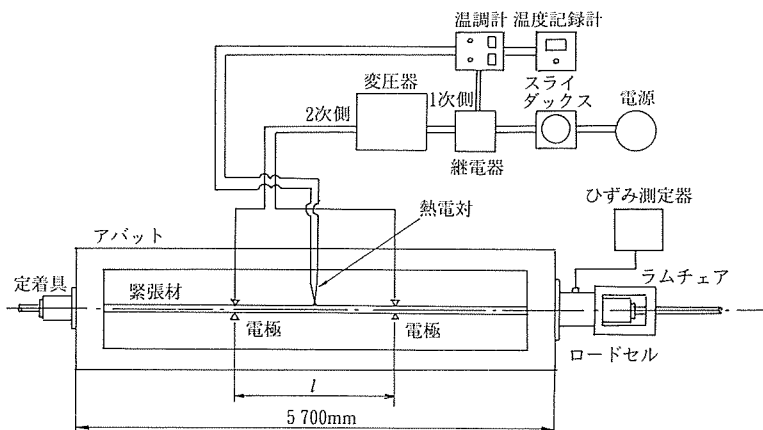


図-6 直接加熱法

◇研究報告◇

を、図-6に直接加熱の場合の実験装置を示す。

3.2 試験条件

1) 緊張材の加熱に際し、次の2種類の緊張状態において、試験を行った。

- ① クリープ現象→荷重一定テスト：
温度による伸びの変化を求める。
- ② リラクゼーション現象→伸び一定テスト：
温度による荷重の変化を求める。

緊張材の伸びや荷重の変化については、加熱する部分の長さも緊張力解放の際に考慮すべき因子の一つであると考えられるので、橋長31mの外ケーブル方式PC橋を想定し、実用加熱長さ10m以下として表-1に示す2水準の加熱長さを定めた。

表-1 緊張材加熱長さ(l)と緊張長さ(L)との比(l/L) [間接加熱の場合]

| 実 際 (仮 定) | | | 試 験 | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| L | l | l/L | L | l | l/L |
| 31 m | 3.1 m | 0.1 | 5.7 m | 0.6 m | 0.105 |
| 31 m | 6.2 m | 0.2 | 5.7 m | 1.2 m | 0.211 |

2) 緊張材の加熱温度を一定に保持した場合 [伸び一定] の緊張力の時間に対する変化を次の温度で行った。

- ①200℃ ②300℃ ③350℃ ④400℃

3.3 試験結果

(1) 間接加熱の場合

1) 荷重一定テスト：温度による伸びの変化

緊張状態において、PC鋼材を加熱することによって生ずるクリープ伸びを測定した結果を図-7に示す。図-7では供試材としてPC鋼線5.0mmを用いて一定荷重2100kgf(0.6 P_u)を載荷した状態で温度を上昇せしめたときの供試材の伸びの変化を求めた。また緊張長

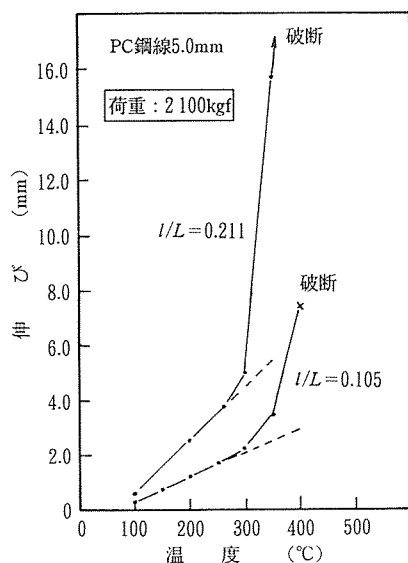


図-7 温度による伸びの変化 [間接加熱の場合]

さ(L)に対する加熱長さ(l)の比 l/L を0.105(0.091)または0.211(0.182)の2水準にて示したが、 $l/L=0.105$ の場合は250℃、 $l/L=0.211$ の場合では260℃で供試材に塑性伸びが発生しており、350℃を超えたところで破断を示している。

2) 伸び一定テスト：温度による荷重の変化

緊張端部は定着具で固定され、引張状態にある緊張材では内部の伸びは常に一定に保たれている。この状態で緊張材を加熱し、温度と引張力の変化を測定した。その結果をPC鋼線5.0mmについては図-8に、PC鋼より線7本より12.7mmについては図-9に示す。図-8、

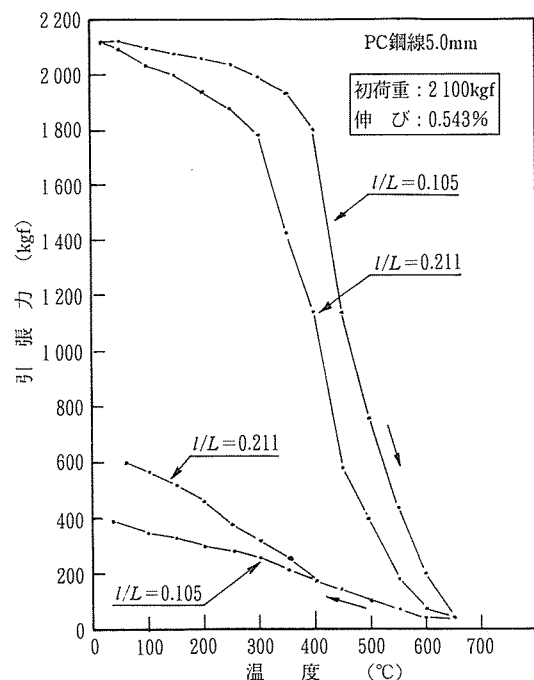


図-8 温度による引張力の変化 [間接加熱の場合]

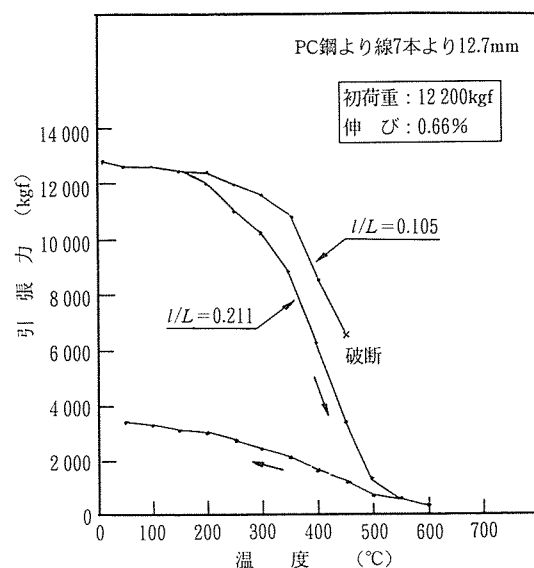


図-9 温度による引張力の変化 [間接加熱の場合]

図-9 とともに、加熱長さ比 $l/L=0.105$ と $l/L=0.211$ とを比較して示したが、図-8 によると、温度の上昇とともに引張力が減少しはじめ、 $l/L=0.105$ の場合、 400°C を超えると、引張力の減少はさらに大きくなる。 $l/L=0.211$ の場合では 300°C を超えると、引張力の減少が大きくなる。 650°C ではいずれの場合でも引張力が 40 kgf (初荷重 $2\,120\text{ kgf}$ の 1.88%) まで低下することを示している。加熱温度 650°C に到達後、温度を下げると、引張力は回復の傾向を示す。その引張力の回復は $l/L=0.211$ の方が $l/L=0.105$ より大きく、 50°C における引張力の回復率は $l/L=0.211$ の場合 26.4% 、 $l/L=0.105$ の場合 16.0% となっており、緊張長さに対して加熱長さを大きくすると昇温時の引張力の回復は大きくなることを示している。図-9 は PC 鋼より線 7 本より 12.7 mm の場合であるが、 $l/L=0.105$ の場合、 450°C で破断しているものの、PC 鋼線の場合とほぼ同じ傾向を示している。

(2) 直接加熱の場合

間接加熱に対して、緊張材に直接電流を流し、そのときの抵抗熱により緊張材を加熱する場合の試験を行っ

表-2 緊張材加熱長さ (l) と緊張長さ (L) との比 (l/L) [直接加熱の場合]

| 加熱長さ l (mm) (電極スパン) | 緊張長さ L (mm) | 加熱長さ比 l/L |
|--------------------------|---------------|-------------|
| 600 | 5 700 | 0.105 |
| 1 200 | 5 700 | 0.211 |
| 1 800 | 5 700 | 0.316 |

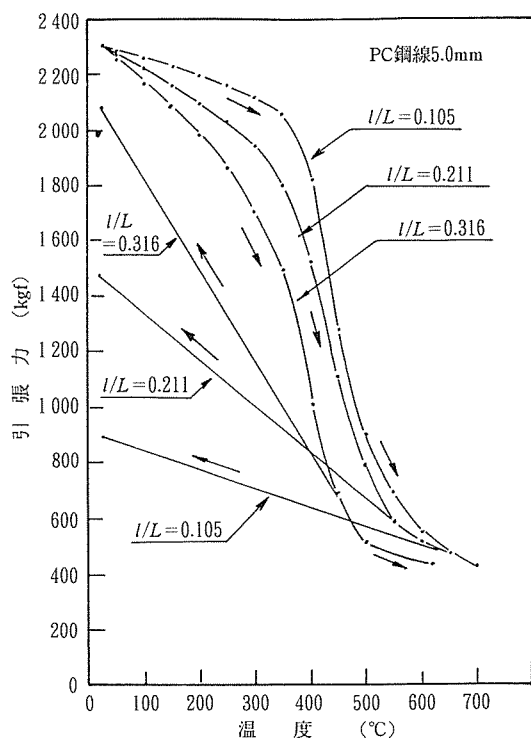


図-10 温度による引張力の変化 [直接加熱の場合]

た。PC 鋼線 5.0 mm を供試材とし、通電加熱の条件は緊張長さ L に対する加熱長さ (電極スパン) l との比 l/L により表-2 に示すごとくである。緊張材を通電加熱した場合の温度と引張力の変化を図-10 に示す。図-10 によると、通電加熱の場合も、温度と引張力の関係は図-8、図-9 に示した間接加熱の場合と同じ傾向にあることがわかる。さらに温度を常温に戻したときの引張力の回復は、間接加熱に比べ、直接加熱の方が大きい傾向を示している。温度と引張力の変化について、間接加熱の場合 (図-8) と直接加熱の場合 (図-10) を比較すると、表-3 のごとくである。表-3 によると、最高温度までの低下率では間接加熱の方が、直接加熱より大きい。常温までに生ずる引張力の回復は直接加熱の方が間接加熱より大きいことがわかる。また l/L が大きくなると、すなわち、加熱長さが長くなると、常温までの引張力の回復が大である。この傾向は直接加熱の方が著しいことが示されている。

表-3 加熱温度に対する引張力の変化 (PC 鋼線 5.0 mm)

| 加熱方法 | l/L | 項目 | 加熱開始 | 最高温度 | 常温 |
|------|-------|---------|-------|------------------------------|-------|
| 直接加熱 | 0.105 | 引張力 kgf | 2 320 | 440(700°C) | 890 |
| | | 低下率 % | - | 81.0 | 61.6 |
| | | 回復率 % | - | - | 19.4 |
| | 0.211 | 引張力 kgf | 2 320 | 440(700°C) | 1 480 |
| | | 低下率 % | - | 81.0 | 36.2 |
| | | 回復率 % | - | - | 44.8 |
| | 0.316 | 引張力 kgf | 2 320 | 440(560°C) | 2 080 |
| | | 低下率 % | - | 81.0 | 10.3 |
| | | 回復率 % | - | - | 70.7 |
| 間接加熱 | 0.105 | 引張力 kgf | 2 120 | 40(650°C) | 380 |
| | | 低下率 % | - | 98.1 | 82.1 |
| | | 回復率 % | - | - | 16.0 |
| | 0.211 | 引張力 kgf | 2 120 | 40(650°C) | 600 |
| | | 低下率 % | - | 98.1 | 71.7 |
| | | 回復率 % | - | - | 26.4 |

(3) 温度保持テスト

温度による引張力の変化の状況を見ると (図-8、図-9、図-10)、各加熱温度における時間経過によって緊張材の引張力が変化することが予想されるので、緊張材の高温域における塑性伸びを生ずる温度を中心として、温度保持による引張力の変化を測定した結果、図-11 に示すごとくである。図-11 は PC 鋼より線 7 本より 12.7 mm に対し、加熱長さ比 $l/L=0.105$ とした場合、加熱温度を 200°C 、 300°C 、 350°C 、 400°C の各温度で保持した場合、緊張材の引張力の変化を示す。図-11 によると、各温度とも 20 時間以上経過すると、引張力はある一定の値に近づき、残留引張力の存在を示している。20 時

◇研究報告◇

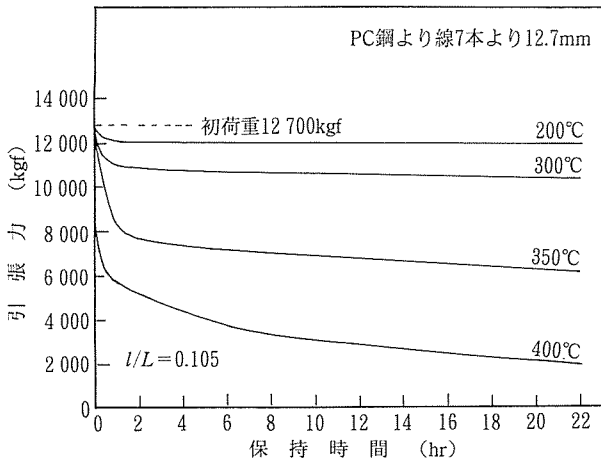


図-11 温度保持による引張力の経時変化 [間接加熱の場合]

表-4 20時間後における緊張材の引張力 (PC鋼より線7本より12.7 mm) [間接加熱の場合]

| 加熱温度 °C | 緊張材引張力 (残留引張力) kgf | 低下率 % |
|------------|-----------------------|----------|
| 200 | 11 900 | 6.3 |
| 300 | 10 500 | 17.3 |
| 350 | 6 300 | 50.4 |
| 400 | 2 100 | 83.5 |

初荷重: 12 700 kgf

間後における緊張材の引張力を各温度ごとに示すと、表-4のごとくである。初期引張力を加えた状態で供試材を加熱し、400°Cで温度保持を行ったのち、温度を常温まで戻し、再加熱を繰り返した場合の緊張材の引張力の変化を求めた。図-12は冷却、再加熱を2回繰り返した場合を示す。図-12に示すように、400°C保持後、温度を常温近くまで戻すと、ほぼ2 000 kgfの引張力の増加がみられ、再加熱後400°Cに戻ると引張力は減少し、冷却時の引張力の増加分と相殺される傾向を示している。

1回目の再加熱と2回目の再加熱との間に、引張力の増

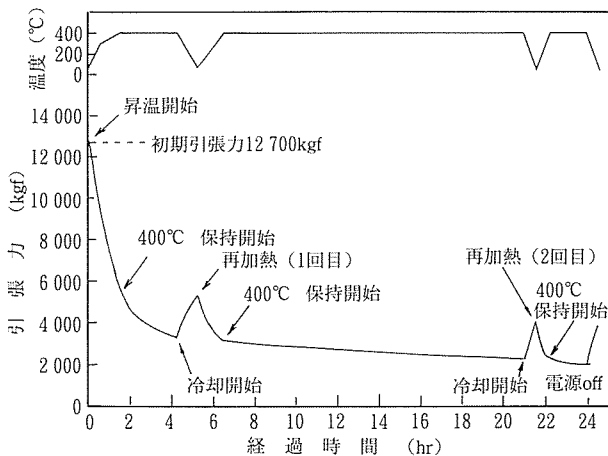


図-12 温度保持による引張力の経時変化 [冷却・再加熱を繰り返した場合]

減に大きな差は発生していない。また、冷却、再加熱によって引張力が増減する現象を示すが、全体としては経過時間による引張力の経時変化が支配的であると考えられる。

3.4 考 察

1) 温度による伸びの変化より 250°C以上の高温域になると、塑性伸びが発生し、緊張力解放が可能となる。

2) 温度による引張力の変化では、引張力が減少し始める温度は 300°C~400°Cにあるので、この温度を超えた高温域まで加熱する必要がある。間接加熱の場合、650°Cで引張力の低下率で 98.1 %、直接加熱の場合、700°Cで 81 % という実験結果が得られた。

3) 加熱方式を採用する場合は、緊張材の再使用は行わないとすべきである。したがって、加熱の際の上限温度は加熱装置の能力や作業の安全面より、実用上 600°Cとすべきである。この場合、完全な張力解放は達成されず、若干の緊張力が残留することが判明した。

4) 加熱方式により緊張力の解放を行う場合、緊張長さ (L) に対する加熱部分の長さ (l) の比 (l/L) が 0.1 以下の場合、断線をひきおこす場合があり、加熱部分の長さ比は l/L=0.2 以上とする必要がある。

5) 温度保持による引張力の経時変化あるいは経時変化後の冷却、再加熱の繰返しによる引張力の変化は 400°Cではほぼ 83 % の低下を示しているが、残りの 17 % の張力は残留していることを示している。

4. ま と め

緊張ジャッキを使用する方法では緊張余長またはジャッキスペースなどの作業条件が満たされていない場合は、緊張力解放の手段として加熱法は必須となる。加熱によって高温域での塑性伸びを与え、さらに温度保持または冷却、加熱の繰返しなどの各手段によって、緊張力の 80 % 程度の解放は可能であることが確認されたが、実用温度においては、完全な張力解放に至らなかったことも明らかとなった。

ジャッキによる緊張力の解放はここで述べた条件の範ちゅうでは容易に実施できるといえる。したがって PC 構造物の計画設計施工に当たり積極的に当該手法を取り上げることが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 極東鋼弦コンクリート振興(株)編：FKK フレシネー工法施工基準
- 2) SETRA (荒川敏雄訳)：外ケーブル方式プレストレッシング (その 1) プレストレストコンクリート, Vol. 33, No. 4, Jul., 1991

【1993年11月2日受付】