

PC 鋼材の製造とその取扱いについて (第3回)

—PC 鋼材の取扱い面における注意事項—

坂 村 晃*

1. まえがき

PC 鋼材の製造とその取扱いについてと題し、第1回には PC 鋼線および PC 鋼より線の製造方法について、第2回には PC 鋼棒の製造方法についての解説が連載された。前2回の解説論文において詳述されたように、PC 鋼材は、自体のレラクセーションやコンクリートの弾性変形、乾燥収縮およびクリープによるプレストレスの減少が生じたのちにおいて、できるだけ大きい有効緊張力が残存しているよう高強度のものであることが絶対必要条件とされている。大きい引張強さ、高い弾性限および降伏点の PC 鋼材をうるためには、一般に PC 鋼線や鋼より線のように高炭素鋼のピアノ線材をパテンティングしたのち冷間加工（一般に冷間伸線）を施して引張強さを高め、そののちブルーイングによって残留応力を除去するとともに弾性限、降伏点を高める方法とか、高炭素合金鋼を熱間圧延して高強度の圧延鋼棒を作り、ストレッチング・ブルーイング処理によって降伏点を高める方法とか、高炭素合金鋼あるいは炭素含有量が 0.35% 程度の機械構造用炭素鋼に焼入れ焼もどし処理を施して高強度の鋼棒をうる方法とかがとられている。いずれの場合においても炭素含有量が 0.6~0.9% 程度の高炭素鋼を材料として塑性加工を施すか、低炭素鋼を用いる場合には熱処理を施して高強度の特性を得ている反面、一般構造用鋼などに比べてじん性の面で劣り、熱影響によって材質の変化をおこしやすく、また、複合応力が作用したり、ある限度以上の加工を施すと機械的性質が低減するといった性質を備えている。したがって、PC 鋼材の特性を正しく認識し、高強度という特性を完全にいかすようにして使用するべきであって、誤って PC 鋼材の短所を露呈するような使用方法をとったり、取扱い方をすると所期の目的が得られないばかりでなく、重大な事故を招く原因ともなりかねない。

過去に発生した PC 鋼材に関する事故は、なかには鋼材の材質上の局部的欠陥や製造工程中におけるミスに起因するものもあったが、運搬中および保管中における

損傷や使用現場における取扱い上の不注意、あるいは作業者の PC 鋼材の性質に関する知識の不足などに起因するものが非常に多い。これらのトラブルや破断事故の原因を大別すると以下ようになる。

- 1) アークストラーク・溶接・局部的加熱などの熱影響を受けた場合。
- 2) 適切な加工が行なわれていなかった場合。
- 3) 適切な定着または接続方法がとられていなかった場合。
- 4) 腐食雰囲気さらされた場合。
- 5) 異常な荷重が加わった場合。
- 6) 運搬中、保管中あるいは配筋作業時の不注意によるもの。

以下これらの項目を2回に分け、PC 鋼材の特性と関連づけながら取扱いにあたっての注意事項について概説する。

2. 熱影響による性能の変化

PC 鋼材が熱影響を受けるケースとしては、PC 構造物が火災を受けた場合のように非常に大きい範囲にわたって長時間高温にさらされる場合、高温蒸気養生される部材や原子炉压力容器に使用されるもののように 200℃ 程度までの温度を一時的または継続して受ける場合、あるいは電気溶接棒によるアークストライクのように、局部的高温を受け急冷される場合などに大別される。最初のケースは PC 構造物全体の事後の安全率が問題となり、加熱温度と継続時間によって異なるが、一般に徐冷されることが多いので PC 鋼材の機械的性質は劣化するが、ただちに破断するようなことは少ない。高温蒸気養生などの場合は PC 鋼材の強度的な問題よりもレラクセーションの増進による有効プレストレスの程度が問題として取り上げられる。最後の場合は熱影響を受けた局部が材質変化をおこし、低い引張荷重のもとでも破断することが多いのできわめて危険である。この局部的熱影響に起因する鋼材の破断事故例はかなり多い。

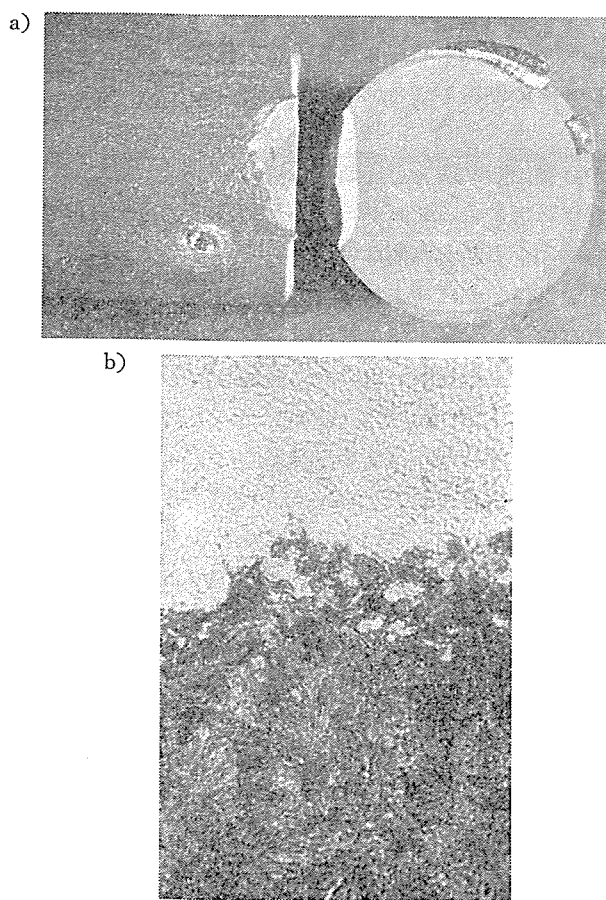
(1) 局部的熱影響の事例

PC 鋼材が局部的熱影響を受けると、その局部のみ

* 住友電気工業(株)特殊線事業部

がきわめて短時間に鋼の変態温度以上に加熱されるが、周辺の鋼は常温であるために、これが大気に急速に熱を奪われて急冷し、ちょうど熱処理における焼入れの場合と同じ現象が現われ、加熱された部分だけがマルテンサイトと呼ばれる組織に変態する。このマルテンサイトという組織はきわめて硬くかつもろく、引張荷重が加わるとかなり低い荷重においてひびわれが生じる。局部的に発生したマルテンサイト部にいったん横割れが生じると、それが、たとえきわめて微細なものであっても、ひびわれの先端に応力集中現象が現われ、PC鋼材が瞬時に破断するという結果を招くことになる。局部的熱影響を受けた部分の金属組織の一例を写真-1に示す。写真で白く見える部分がマルテンサイトである。

写真-1 アークストライクによる破断面と金属組織



局部的熱影響を受ける事例としては次のようなものがある。

a) アークストライク 電気溶接棒の先端のフラックスをとり除くため溶接棒を鉄材に断続的にたたきつけると、もり上っていたフラックスがとれた瞬間にアークがとび鉄材に溶融金属の痕跡が残る。これを一般にアークストライクと呼んでいる。これと似た現象は溶融金属がPC鋼材の上に落下して付着した場合や、電気のアースにより火花がとんだような場合にも生じる。

工事現場において普通鉄筋を溶接したり、伸縮目地などのアンカーを溶接したりするとき、誤ってシースの上からPC鋼材にアークストライクをつけることがある。シースで保護されていても、きわめて薄い鋼板であるために瞬間的に溶融して穴があき、溶接棒の先端が直接PC鋼材の表面をたたいてしまう。シースの上から溶接棒を軽くあてた場合のアークストライクのつき方を参考のために写真-2に示す。

写真-2 シースの上からアークストライクがついた状況



溶接棒を直接PC鋼材にあてなくてもPC鋼材にアースをとったり、PC鋼材に電流が流れるような状態によって火花が溶接作業中連続してPC鋼材とアース扱やアンカープレートとの間にとび、局部的に熱影響を受けたという事例がある。PC鋼棒を垂直な緊張材として使用し、その下端を埋殺しアンカーとしたが、下端の位置固定のため定着板と周囲の鉄筋を溶接した際のアースのとり方が悪く、鋼棒がゆれるたびに定着板と鋼棒の間に火花がとび、ひどいものでは定着板と鋼棒が溶着するほどになっていたため、緊張時に鋼棒が破断したという例もある。この場合、ナットと定着板とはあらかじめ溶接しておいて鋼棒に装着するなど配慮されていたにもかかわらず、わずかな不注意が破断事故につながったという例の一つである。

溶融金属がPC鋼材の上に落下し局部的熱影響を与える可能性があり、現場監督者が注意しなければならないのはコンクリート端面上に突出したシースを、なかにPC鋼材を収めたままガス切断する場合である。この場合、溶接されたシースの溶鉄がPC鋼材の上に落ち、ガスの焰があたっているために融着する。シースを溶断したのち、ただちに定着板を装着するため熱影響を受けた部分が隠れ、監督者の目に触れぬまま緊張作業が行なわれ事故につながったという例もある。定着板にあらかじめシースを取り付けてコンクリート中に埋設する方法をとるようにつとめるべきであるが、どうしてもあとから定着板を装着せねばならず、コンクリート端面より突出したシースが定着板装着のじゃまになり切断しなければならない場合には、まず金鋸か金挟みを用いることが

好ましく、ガス切断せざるを得ない場合は P C 鋼材をシースの裏に押し込んだうえで行なうだけの指導と配慮が必要であろう。また既設構造物にひびわれが生じ、これを補修するために P C 鋼材をその構造物の外側に沿わせて裸で配置し、端部定着用ブロックを介して緊張し、その後コンクリートを打設するという方法のとられる場合がある。このような場合、裸の P C 鋼材の外側にスターラップが配筋されるが、このスターラップと縦筋とを溶接すると溶融金属が P C 鋼材の上に滴下する危険性があるので注意が肝要である。

アークストライクの大きさと引張強さ低減率についてはよく聞かれるところであるが、表面から見たアークストライクの大きさのみでは正確な判断を下すことができない。参考のため P C 鋼棒について行なったアークストライクの大きさと破断荷重との関係を 図-1 に示す。アークストライクの大きさが大きいほど破断荷重は低減するという傾向は認められる。しかし、いったんアークストライクがつけば、たとえ緊張時には破断しなくても遅れ破壊をおこす危険性は、きわめて高いものであるから、アークストライクをつけないこと、アークストライクのついた鋼材は取替えることを厳重に守るべきである。

b) 溶 接 P C 鋼材を溶接してつなぐこと、あるいは P C 鋼材に普通鉄筋を溶接することの危険性については、いまさら論ずるまでもない。しかし、きわめてわずかではあるが過去にこのような事例のあったことは確かである。P C 構造物に経験のない建設業者が、高張力鋼材で細径であるという点にのみ着目し、仮設用材として使用する場合に間々このような危険性があ

り、P C 鋼材製造業者はかかる場合とくに十分な啓もうを行なうべきであろう。

溶接についての例外的事例としては、P C くい用異形 P C 鋼棒の自動編成機によるスポット溶接がある。この場合は、らせん筋が予熱されているため、この熱がスポット溶接部を通して鋼棒に伝達され、溶接部のマルテンサイトが、かなりの程度まで焼もどされる。これによってスポット溶接部のじん性が再び回復し、性能低下を避けることができる。P C くいの場合には一般に低炭素鋼を熱処理した P C 鋼棒が使用されていること、機械的に管理された状態で焼もどしが行なわれること、およびくい自体が大きな繰返し荷重を受けるものではないことなどの理由によって、上記のようなスポット溶接が認められているのであって、一般の繰返し荷重が加わる重要構造物に使用する P C 鋼材に対しては、たとえスポット溶接部をなんらかの方法で焼もどしたからといって、その使用が許されるものではない。

c) ガス切断 P C 鋼材を緊張したのちに定着具から突出した部分を切断する場合、手間を省くために通常ガス炎による切断が行なわれている。この場合にも切断端面からある範囲は焼きが入りもろくなるので、この部分が定着部に含まれないよう定着具端よりある程度離れた位置で切断すべきである。12.4 mm P C 鋼より線についてガス切断の場合の熱影響範囲を調べた結果を図-2 に、 $\phi 26$ mm P C 鋼棒について測定した結果を図-3 に示す。切断作業者の熟練度によっても、この熱影響範囲の大きさは変わるものと考えられるので、P C 鋼より線では定着具端より少なくとも呼び径の 1.5 倍離れた位置で、P C 鋼棒では少なくとも棒径だけ離れた

図-1 アークストライク径と強度低下の傾向 ($\phi 26$ mm 鋼棒)

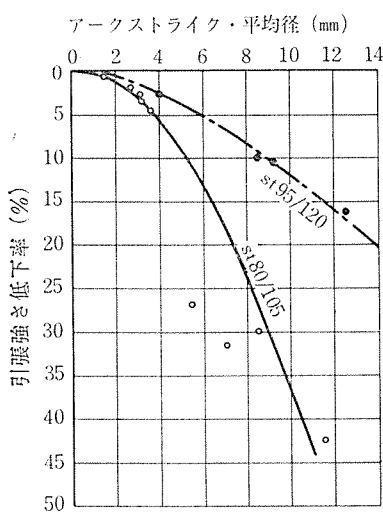


図-2 ガス切断による硬度変化 ($\phi 12.4$ mm P C 鋼より線)

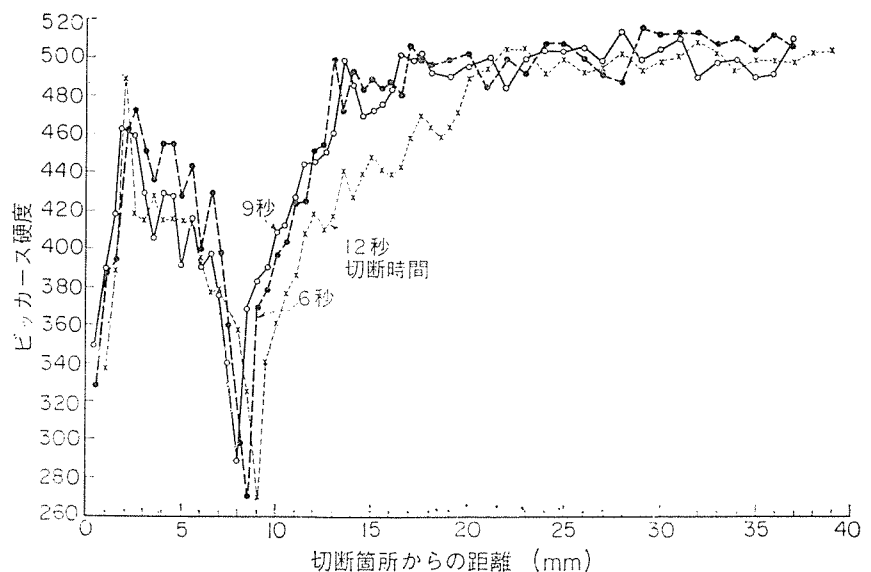
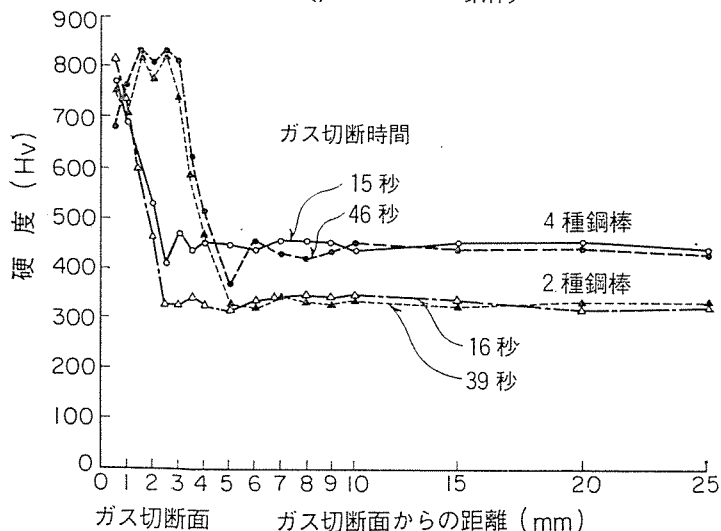


図-3 ガス切断による硬度変化
($\phi 26$ mm PC 鋼棒)



位置で切断することが好ましい。

最近ガス炎のかわりにプラスチック製の回転切断砥石で切断することがある。この場合も作業者の熟練度によって熱影響範囲の大きさが変わるので安全を見てガス炎の場合と同等の値をとっておけばよい。PC 鋼棒のねじ部をこの回転切断砥石で切断し、カップラー・ジョイント部に使用することは推奨されるものではないが、止む得ない場合には作業者を決め、あらかじめ熱影響範囲の大きさを測定し、ねじ部耐力に影響しないことを確認しておく必要がある。

(2) 高温下における PC 鋼材の性質

PC 鋼材が高温にさらされた場合の性能変化についてはすでに発表されているので、ここではそのうちの主要な結果のみを示す。図-4, 5 は常温から 600°C まで 100°C ごとの各温度下における各種 PC 鋼材の引張強さと降伏点の変化を示したものである。また、図-6 は $\phi 7$ mm PC 鋼線を 100°C から 800°C までの高温下で 30

図-4 加熱温度と引張強さ

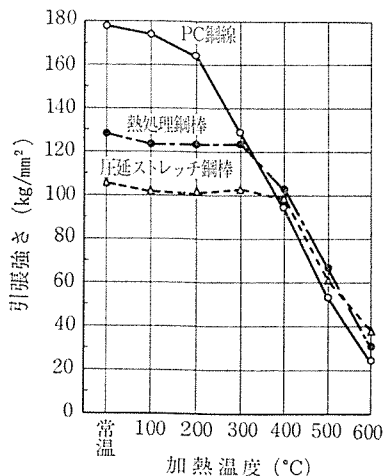
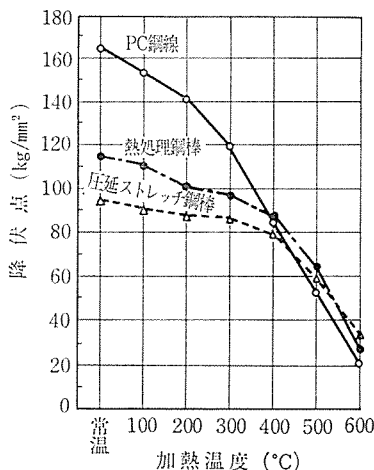


図-5 加熱温度と降伏点



分間保持したのち空冷し、常温にもどした状態での荷重一伸び曲線を示したものであり、図-7 は空冷後における機械的性質の変化の状況を、高温保持時間 5 分および 30 分の場合について示したものである。冷間伸線・ブルーイング処理された PC 鋼線では、高温下にあつては温度が高くなるに従って引張強さ、降伏点とも低下するが、これを再び冷却したのちにおいてはブルーイング温度である 350°C 程度まではほとんど変化せず、そのうち急激に低下し、700°C の高温に 30 分間さらされたものでは引張強さはほぼ半減している。PC 鋼棒では高温中においても、冷却されたのちにおいても 300°C まではあまり変化なく、その後次第に低減する。熱処理鋼

図-6 $\phi 7$ mm PC 鋼線加熱後の荷重一伸び曲線
(高温保持時間 30 分)

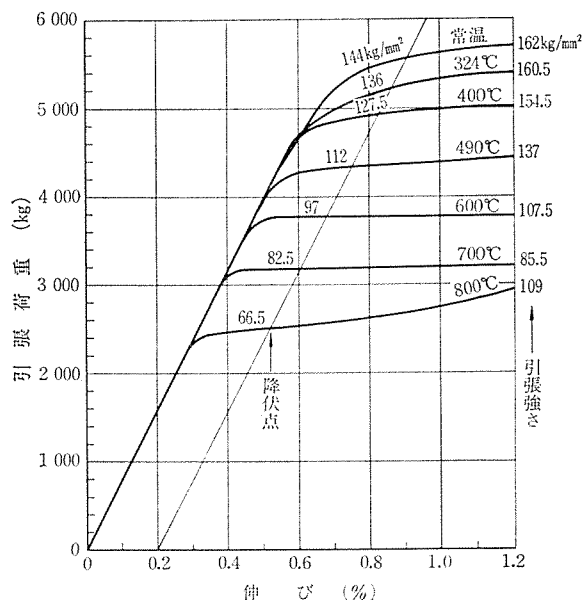
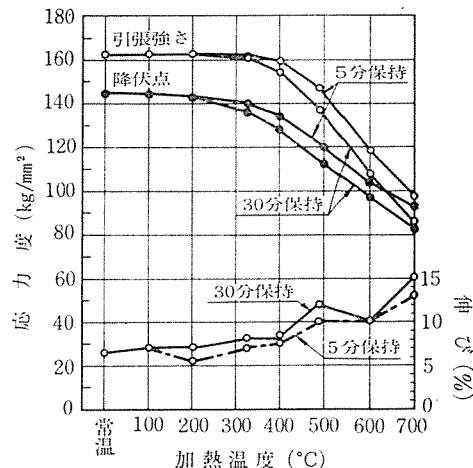


図-7 加熱空冷後の性能変化
($\phi 7$ mm PC 鋼線)



棒について冷却後の性能を調べた結果では、600°C の熱履歴を受けた場合、引張強さ、降伏点とも常温の約半分の値になることが報告されている。

いずれにしても 300°C くらいまでの温度ではあまり性能の変化は現われないが、300°C を越えると性能は急激に低下するので、かかる熱影響を受けた PC 鋼材の使用については事前に鋼材製造者の見解をたずなど慎重な配慮を必要とする。

熱影響を受けた場合の PC 鋼材の性能で強さのほかに問題となるものとしてリラクセーションの変化があげられる。図-8 は緊張ベッドによるプレテンション部材

図-8 蒸気養生によるリラクセーションの変化
(φ2.9mm PC 鋼線)

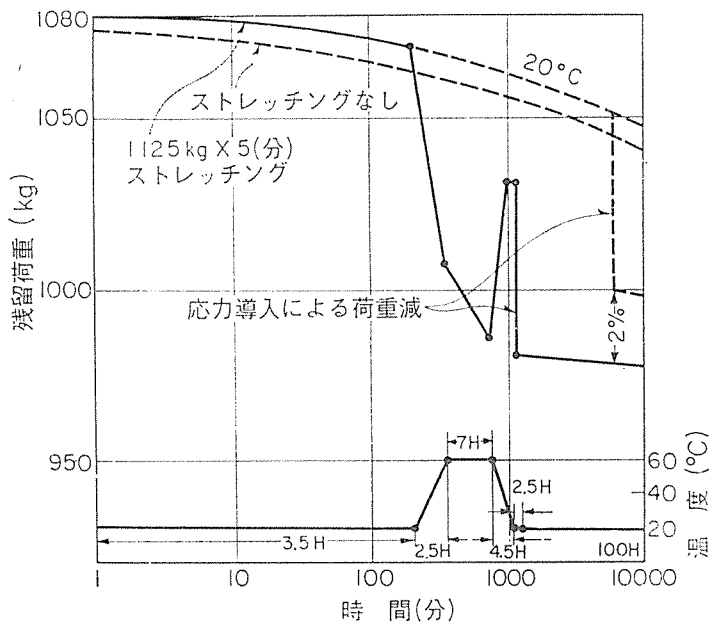
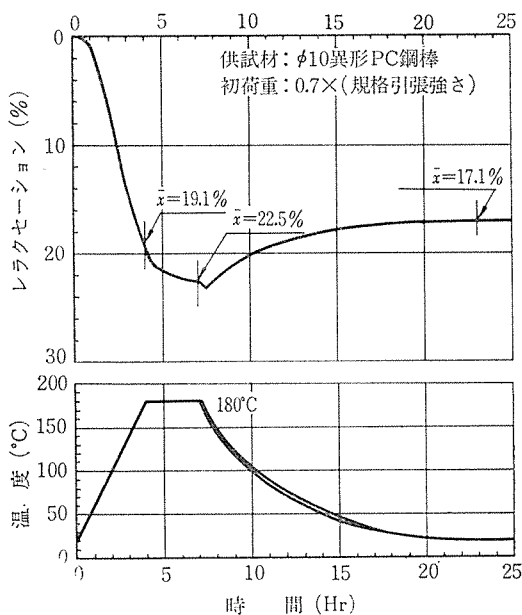


図-9 オートクレーブ養生条件によるリラクセーション
時間 (Hr)



が蒸気養生を受けた場合の緊張力の変化を測定した結果である。図-9 はオートクレーブ処理のように高温養生を受けた場合の緊張力の変化状況を一例として示したものであり、これについては別途くわしく報告されるものと思う。また、図-10 は原子炉压力容器のように持続して高温にさらされる場合を想定してリラクセーションの増大の程度を測定した結果である。これらの高温によるリラクセーションの変化は、PC 鋼材の取扱いに直接関係するものではないが、構造物の耐力に関連してくるものであり設計に際して十分考慮する必要がある。

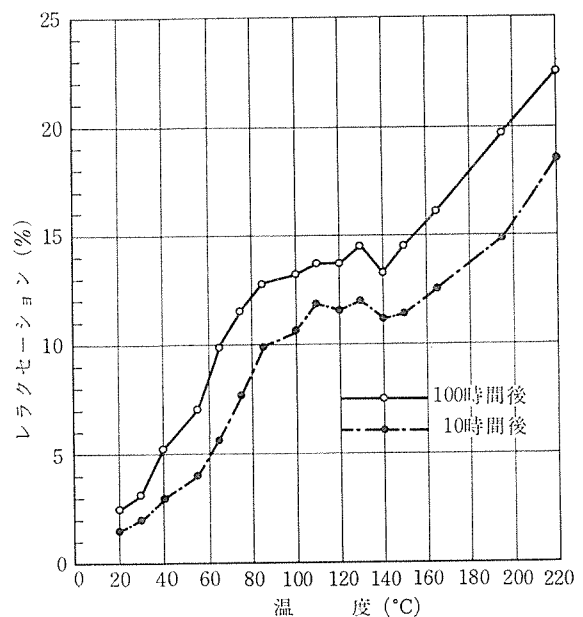
3. 各種の加工による影響

PC 鋼材は使用する前にへヤピン状に曲げられたり、波付けや製頭加工が施されたりすることがある。また、曲線配置する場合、かなり小さい曲率半径に曲げる必要が生じ、塑性曲げ加工をあらかじめ施すこともある。波付け加工や製頭加工については、できるだけじん性に富んだ鋼種を用いることが必要である。引張強さや機械的性質に影響を及ぼすものとしては、PC 鋼線・鋼より線の局部的塑性曲げ加工と PC 鋼棒の曲線配置の場合の塑性曲げ加工があげられる。以下これらの問題点について述べる。

(1) PC 鋼線・鋼より線の局部塑性曲げの影響

PC 鋼線・鋼より線を緊張材とする工法のデッドアンカーとして、これらの鋼線はかなり小さい曲げ半径でループ状に曲げて使用する例

図-10 高温化におけるリラクセーション
(φ12.4mm PC 鋼より線)



が最近ふえてきている。また、プレテンション方式による PC 部材の曲げ上げ鋼材においても、曲げ上げ部がかなり小さい半径で曲げられている例が欧米などにおいて見られる。このような局部的曲げ加工が PC 鋼材の引張強さに及ぼす影響を試験した結果を 図-11~14 に

示す。

図-11 はループ状に曲げて引張った場合の引張荷重の低下率をループ内側直径と鋼線径（鋼より線の素線径）の比 D/d と対比して示したものである。 D/d の比が 20 以上であれば鋼種、鋼線径のいかんにかかわらず、実引張荷重に対するループ端破断荷重の比は 95% 以上の値を示している。 D/d 比が 20 以下の場合については、実際に使用する場合に鋼種を選定したり製造工程での特別な配慮を施すなどの手段を講じ、この低下率ができるだけ小さくすむようにし、また実破断荷重に対する比のみでなく規格破断荷重に対する比についても考慮すべきであろう。

図-12 は局部曲げ部の引張強さの変化を、曲げ半径と曲げ角度を変えて試験した結果を総括して示したものである。図-13 は曲げ角度が 5° ~ 7° の範囲の測定値のみをとり出し、規格引張荷重に対する破断荷重の低下率と曲げ直径 D と線径（より線径） d の比 D/d とを対比して示したものであり、図-14 は曲げ角度が 15° ~ 25° の測定値について同様の方式でまとめたものである。曲げ角度については試験治具の関係から約 30° までしかとれていないが、ループ端引張試験結果とあわせて考察すると、曲げ角度が小さいほど荷重低下率も小さいという側向が明らかに認められる。図-13, 14 よりもわかるように規格引張荷重に対する低下率という面より見れば、 $\phi 5$ mm, $\phi 7$ mm PC 鋼線や PC 鋼より線では D/d が 5 以上であればほとんど規

図-11 PC 鋼線・鋼より線のループ端引張荷重の変化

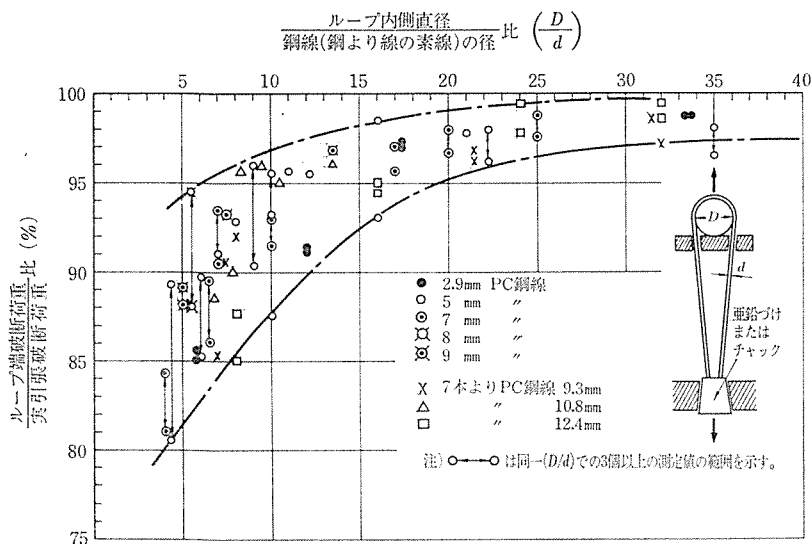


図-12 局部曲げ部の引張強さの変化

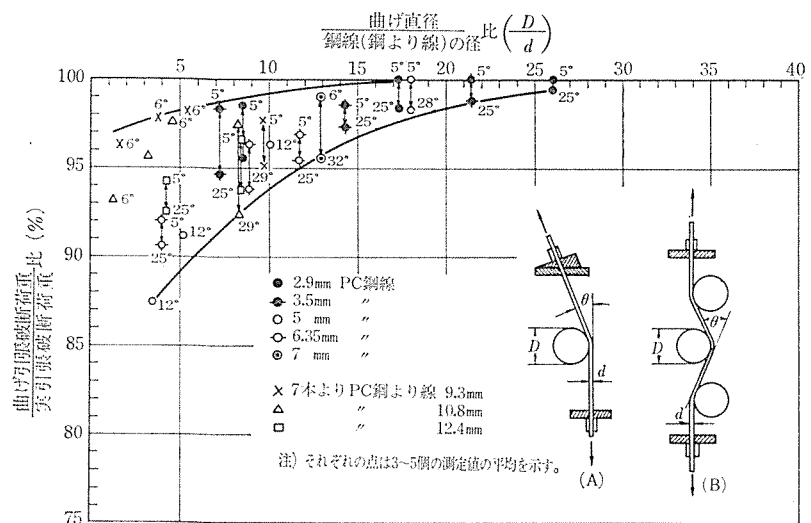


図-13 局部曲げ部強度・規格引張強さに対する低下率

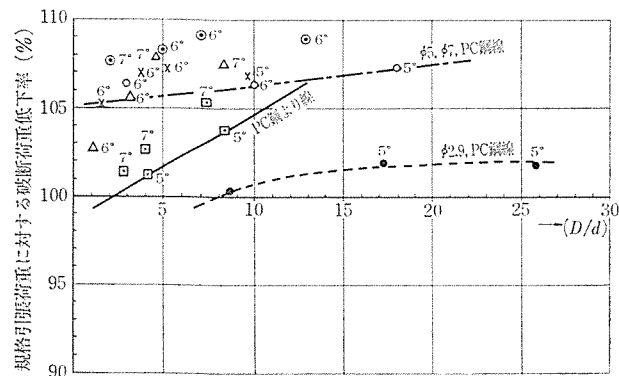
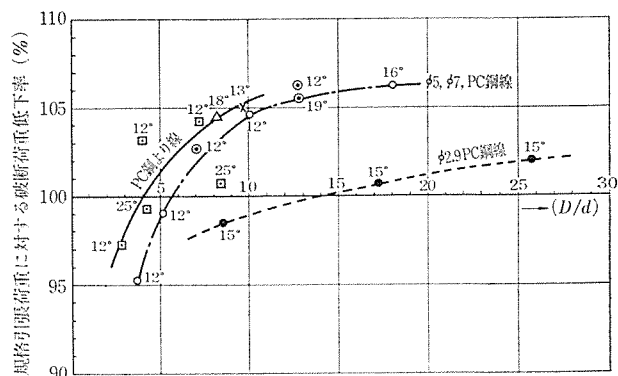


図-14 局部曲げ部強度・規格引張強さに対する低下率



格値を満足するというのが実態のようである。

このような局部曲げ引張を受ける場合、引張り荷重の低下はさほど大きいものではないが、実際に曲上げ緊張材として使用するとき、支持金具の形状については十分に配慮するべきであり、図-15に示されるように支持金具の角が P C 鋼材にあたらないようにすべきである。

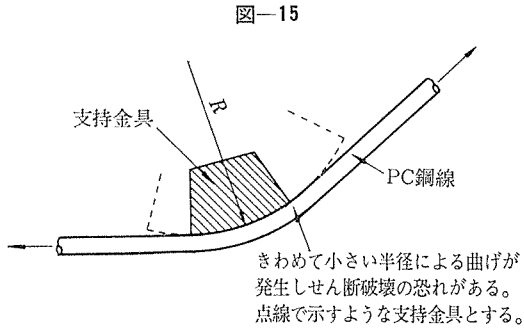


写真-3 バーベンダー

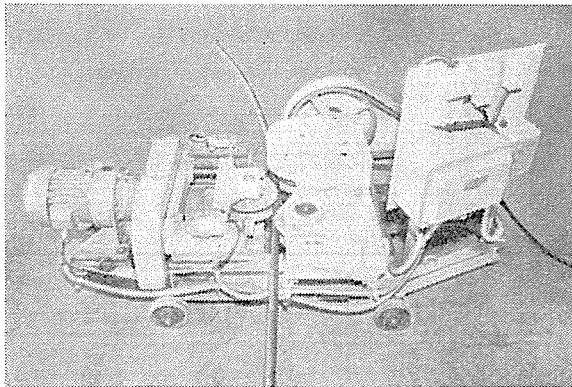
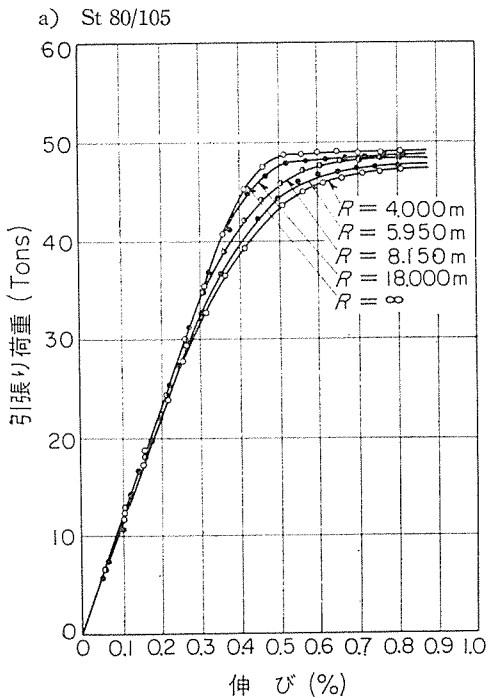


図-16 PC 鋼棒の塑性曲げ加工が荷重-伸曲線に及ぼす影響
($\phi 26$ mm PC 鋼棒)



(2) PC 鋼棒の塑性曲げ加工による影響

太径の P C 鋼棒を曲げ配置する場合、鋼線に比して曲げ剛性が大であるため、曲げ半径が小さくなると Bar-Bender を用いてあらかじめ所要半径に塑性曲げ加工する。当然のことながらレール・ベンダーのように局部的に曲げを加え、全体としてある曲げ半径を構成する

