

PC 鋼材 について

武尾 敬之 助

長生橋が七尾市でわが国初めてのPC橋として誕生したのが1951年で、プレストレスト コンクリート工業の歴史も10年になろうとしている。最初からPC鋼材の研究製造をしてきた著者は、ますます拡大するPC工業のために一そう適切な各種PC鋼材の研究開発に努力しなければならないと思う。わが国のPC鋼材は最近急速に発達したアメリカ合衆国のPCに、ヨーロッパ製品に代って多量使用され、その種類も2本より、3本より、7本よりのストランドを始め、ポストテンション用4.9mm~6.35mm径の単線など多種にわたっている。輸出総量は毎月1500~1600tにおよんで全くヨーロッパ諸国を圧しており、一昨年来、日本製品ブランドの信用は相当高く評価されている。例えば一昨年秋テキサス州の某PCメーカーを訪問したとき、居合わせた同州ハイウェイデパートメントの監督官は筆者に日本製ストランドの品質形状など国内品に優っていることを、お世辞ぬきに述べていたほどである。PC鋼材がわが国で本格的に採用されるまでに、PC鋼材として具備しなければならない諸性質に関する研究調査および、ある程度の実用化が材料メーカーと設計施工者との間に緊密に行なわれていたため、PC鋼材の寸法、性質および試験方法等の統一規格化が早期に行なわれたことは、使用者側にとっても便宜なものとなったし、このことがまた輸出にも益したと考えられる。昨年来検討されていたPC鋼材(プレテン用)のJISが本年3月制定された。JISに制定されることになればPC鋼材が高い引張り負荷を常にうけている長い材料であるため、PC鋼材に使用される圧延材が長さの全域にわたって信頼できるものでなければならないために、特にバネ用などに用いられるピアノ線材使用が指定されていることは、もっともであると考えられる。

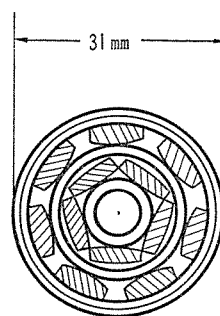
各種のPC鋼材がそれぞれの構造物に使用されているが、設計によっていずれのPC鋼材を選ぶかが決められるであろう。筆者はここに将来の問題として取上げられるようなPC鋼材について以下ふれてみたいと思う。

1. インデンテッド ワイヤーおよび異形線

イギリスでプレテン用に凹痕を線の表面につけた、いわゆるインデンテッド ワイヤーがさかんに用いられたようだが、わが国では私鉄のまくら木や小さな桁で試用されたにすぎない。インドでは4~5mmのインデンテ

ッド ワイヤーは今日もさかんに使われており、今日なお日本からも輸出されている。わが国では2.9mm径の2本よりが最も経済的に使用されているので4~5mm径のインデンテッド ワイヤーが、これに代ってゆくとは思われない。くぼみをつけたインデンテッド ワイヤーないし異形線は、どうしてもくぼみと直角方向の曲げに弱いので、コンクリート中でこの方向に曲げを受けるよう

図-1 21t 応力導入用のケーブル断面



に張られた場合は、疲労に関して安全とはいえないと思われる。むしろストランドを用いる方が信頼できることは当然だろう。しかしながら異形線にもすてがたい特徴もある。例えばドイツのPolensky & Zoellner 工法では図-1に示すようなオーバル断面のオイルテンパー線のケーブルを、ポストテン用に使っている。8×2.8mmの

20mm²の断面積をもち丸線の5.05mm径に相当する。抗張力は165kg/mm²、降伏点は145kg/mm²で線の長辺にリブが出ており、ボンド効果を上げるとともに定着の際このリブが定着コーンの内面に圧入するため、完全な滑り防止が期待できるといわれている。

丸線に凸痕をつけたインデンテッド ワイヤーに対してワーティ(warty)ワイヤーと称すべきオイルテンパー線はプレテン用にはもちろんボンド効果が大きいし、またケーブルにしてポストテンに使えば上述のリブつきオーバル線と同様に、定着についても信頼がおける。

インデンテッド ワイヤーとワーティ ワイヤーを100×100mm~400mmのコンクリート供試体でリラクゼーション試験機を用いて、線の降伏点の75%(2190kg)の引張荷重をかけた状態のもとに、コンクリートを打込みコンクリートの強度が出て後に線の引抜き試験を行なった結果は、表-1に示すとおりである。インデンテッド ワイヤーでは二面に凹痕をつけたものと四面に凹痕をつけたものと比較すると、後者の方がボンド効果はバラツキが少なく安定しているが、線自身の持つ物理的特性の低下はまぬがれにくい。ワーティ ワイヤーはこれに比べてボンド効果は大きく、しかも安定していることがわかる。しかしながら、一般的に言ってワーティ ワイヤーの経済的製造法としてはオイルテンパー方式がとられ

表-1

打込長		100 mm		200 mm		300 mm		400 mm		備 考
線 種										
イン デン テ ッ ド ・ ワ イ ヤ ー	500-2(A)					760kg 840 "	(2 200 kg) (2 760 ")	3 400kg (3 470kg)		いずれも線引抜け
	5.5P二面					1 080 " 1 400 "	(2 835 " (3 130 ")	3 450 " (3 500 ")		
						1 490 " 1 170 "	(3 170 " (3 480 ")			
	500-2(B)					1 400 " 1 400 "	(3 450 " (3 460 ")	3 470 " (3 470 ")		同 上
	5.5P四面					1 700 " 1 800 "	(3 462 " (3 480 ")	3 510 " (3 510 ")		
	500-1(C)					1 400 " 1 480 "	(2 440 " (2 610 ")	2 230 " (3 050 ")		
	3.4P二面					1 900 " 2 200 "	(2 850 " (3 090 ")	3 500 " (3 500 ")		同 上
						2 400 " 1 600 "	(3 180 " (3 250 ")			
	500-1(D)					2 100 " 2 170 "	(3 310 " (3 340 ")	3 450 " (3 450 ")		同 上
	3.4P四面					2 200 " 3 090 "	(3 350 " (3 380 ")	3 470 " (3 470 ")		
Normal Rod						1 193 " 1 350 "	(1 193 " (1 380 ")			同 上
(60C)						1 440 " 1 490 "	(1 440 " (1 492 ")			
ワ ー テ ィ ー ・ ロ ッ ド	60C	400 kg 470 "	(1 220 kg) (1 480 ")	1 220 kg 800 "	(1 890 kg) (1 820 ")					100 mm 長はコンクリートわれ
		285 " 390 "	(1 075 " (1 703 ")	1 000 " 970 "	(1 935 " (2 710 ")					200 mm 長線破断
	Si-Mn	340 "	(1 700 ")	860 " 780 "	(2 620 " (2 500 ")					同 上
	Si-Mn Oil	200 "	(760 ")	900 "	(3 015 ")	2 450 kg	(4 160 kg)			100 mm } コンクリートわれ 200 mm }
	Temper	200 "	(805 ")	900 "	(2 225 ")	1 605 "	(3 950 ")			300 mm 1 回 } 線破断 300 mm 1 回 }

註：始めの数字は微動開始時の荷重，後の（ ）内数字は最大荷重

るので、いわゆるストレス コロージョンに対して信頼すれば、もっと用途はひろげられてもよいのではなかろうか。プレテンのみならずポステンにおいても、上述のドイツ方式と同様の効果を期待することができるだろう。

2. ストレス コロージョン

硬引鋼線に比較してオイル テンパー線はストレス コロージョンを起しやすいと特に米国でいわれているが、ドイツを中心に欧州ではオイル テンパー線が非常に多く使用されている。わが国でも車両関係のコイル バネにオイル テンパー線が、最近非常に多く使用されるようになって、PC鋼材としても、われわれの会社だけが7mm級のオイル テンパー PC鋼線を供給している。硬引鋼線と特性上の多少の相違もあることから取扱い、あるいは製造の面で、初期にはコイル状で保存していたオイル テンパー線が一部折損するというような事故に直面したことがあって、いわゆるストレス コロージョンではないかと種々実験を試みたが、これに起因する折損は考えることができなかった。ストレス コロージョンをしらべる一法として、8ノルマンの硝酸アンモニアの水溶液を容器に入れ、水溶液の温度を室温および50°Cに加熱した状態にして5.0mm径の硬引線とオイル テンパー線を、その容器を通してリラクゼーション試験機で、長時間の試験を行なった結果は表-2のとおりである。初荷重2.2t(抗張力の68%)のときには、リラ

クゼーション%は空気中のものと変わらないがコロージョンを起して、試験後の線の抗張力は大幅に低下しているが、硬引線とオイル テンパー線の差はみとめられない。初荷重1.8tのときは試験後の抗張力は一般的にこの程度の低下をするものであるから、コロージョンの影響はないといえる。

表中オイル テンパー線のリラクゼーションが、硬引線にくらべて大きいのは抗張力の差によるものである。50°C試験では、リラクゼーションが2倍以上になっていることが注目される。

表-2

温度	種 類	試験前の抗張力		初荷重時間		リラクゼーション%	試験後の抗張力
		kg/mm ²	t	h			
室温	オイル ンパー	165	2.2	48	1.15	145	
	硬 引	166	2.2	48	2.4	145	
	オイル ンパー	172	1.8	90	1.8	168	
50°C	硬 引	179	1.8	90	1.0	175	
	オイル ンパー	172	1.8	90	4.5	168	
	硬 引	179	1.8	90	2.6	176	

このように硬引線とオイル テンパー線のストレス コロージョンは差が認められない。なお線の顕微鏡組織からいえば、硬引線にくらべてオイル テンパー線は結晶粒が小さく従って粒界面が多いので、粒界での電位差による陽極化のため腐食(酸化)の進展が早いとFvilz氏はいっているが、実際に材料をとって顕微鏡組織を見

でも硬引線、オイル テンパー線の、製造過程の熱処理によって生ずる焼入組織（パーナイト組織）から粒界の相違を検出することは、困難で粒界論も実証しがたい。10% 硝酸で線を表面から溶解して、線の持つ残留応力を測る Heyn の方法によって調べた結果、ブルーイングした硬引鋼線は最大 36 kg/mm^2 の引張応力を線の表面近くに有し、中央部では圧縮応力約 30 kg/mm^2 になっているが、オイル テンパー線では $\pm 4 \text{ kg/mm}^2$ の引張圧縮が表面から交互に残っており、これは温度変化による膨張収縮の影響も考えられるので、ほとんど残留応力がない。従って同じコイル径にした場合には、ブルーイング硬引線はオイル テンパー線にくらべて、引張側に大きな引張応力を受けることになるが、実際にはブルーイング硬引線は、オイル テンパー線にくらべて若干曲がりが残っているので、オイル テンパー線の引張側表面にかかる曲げ応力は、ブルーイング硬引線にくらべて大きい。

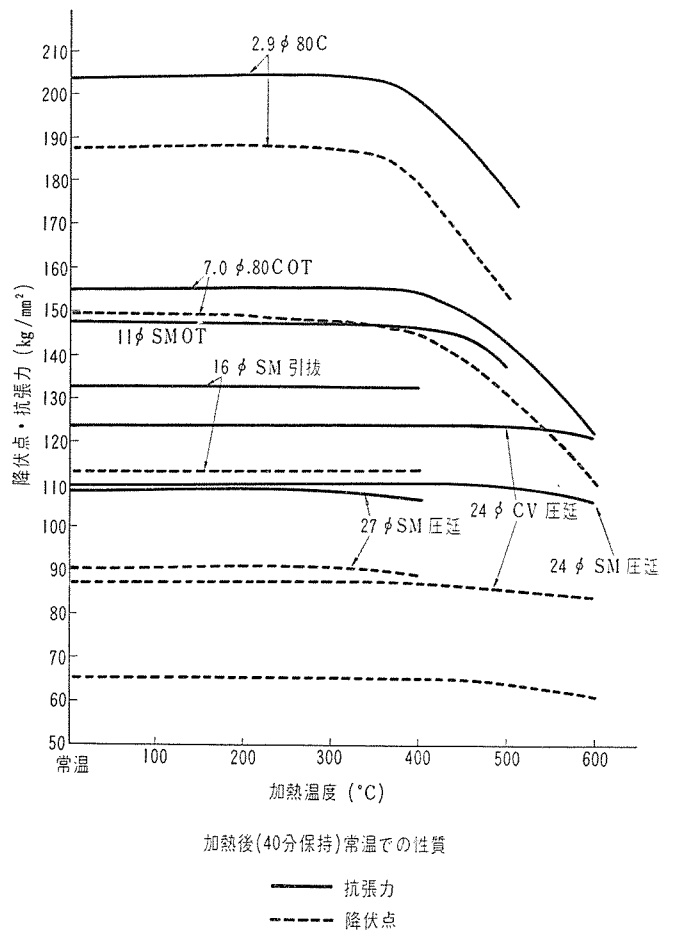
7 mm のオイル テンパー線をコイル径 1000 mm, 1100 mm, 1200 mm に巻けば線の表面にかかる引張応力は、それぞれ 140 kg/mm^2 , 127 kg/mm^2 , 117 kg/mm^2 で抗張力の 86%, 78%, 72% となる。これらのコイルを 5% 食塩水に浸漬して屋外に放置した結果 1000 mm 径コイルは 4 日で折れが出 1100 mm 径は折れず、1200 mm 径コイルは 72 日で折れが出た。表面の引張応力が抗張力の 70% をこえると、線の表面の酸化の相違などから起る、マイクロクラックの成長を促進させ、折れに進展させることになる。従って真直性のよいオイル テンパー線はコイル径を大きくとることが安全だということになる。まず 1500~2000 mm 径に巻けば応力集中による折れの心配は皆無になってくる。

材料の粘さを比較するために 5.0 mm のブルーイング硬引線とオイル テンパー線に 0.2 mm 深さのノッチを入れて、シャルピー衝撃試験機で衝撃による変形量をくらべると、オイル テンパー線の方が、吸収エネルギー $3 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 変形量（角度） 36° 以上で、ブルーイング硬引線にくらべて次第に大きくなっている。線のしぼり率を測定してもオイル テンパー線は 53%, 硬引線は 33% で、これらからみてオイル テンパー線の粘さは、硬引線におとるものではないことがいえるであろう。

3. PC 鋼材の加熱の影響

PC が火災等の熱を受けたとき、緊張鋼材の抗張力、降伏等がどの程度影響を受けるであろうか。2.9 mm 径の硬引線、7 mm 径のオイル テンパー線、11 mm 径のシリコン マンガン鋼材オイル テンパー線、16 mm 径のシリコン マンガン鋼引抜き棒、24 mm 径のシリコン

図-2



マンガン鋼棒およびクローム バナジウム 鋼棒と 27 mm 径のシリコン マンガン鋼棒を、100~600°C に 40 分間加熱したのち常温で抗張力、降伏点を測定すれば 図-2 のようである。

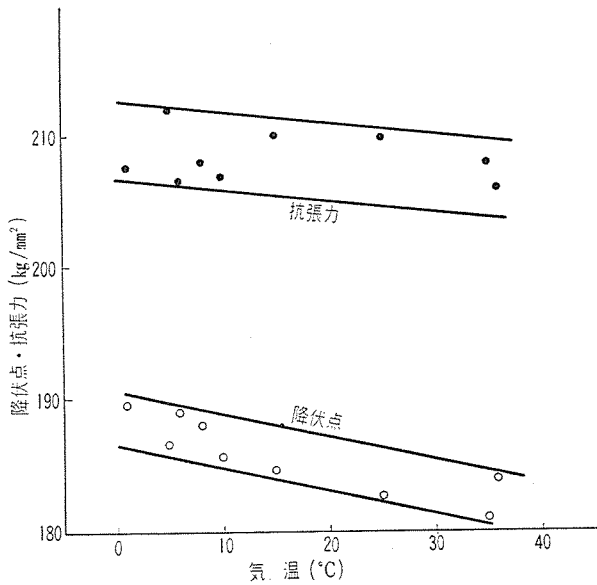
2.9 mm 径鋼線は 350°C からその抗張力、降伏点の低下が急進するが、オイル テンパー線(7 mm)は 400°C まで安定している。シリコン マンガン鋼 11 mm 径では 400°C 以上まで安定する。鋼棒はさらに安定し、特にクローム バナジウム鋼棒は 600°C までほとんど変化しない。

このように線種あるいは棒の種類によって特性が異なるので、使用目的によって適当に選択する必要がある。なお加熱中の温度の影響は、鋼種全般について 300°C までは抗張力は低下しないが、降伏点はこの温度で徐々に低下を始めることをつけ加えておく。

4. PC 鋼材の気温変化による性質の変化

寒冷、酷暑とその気温の差は、PC 鋼材の性質にどの程度影響を与えるものだろうか。いま 2.9 mm 径の PC 鋼線で抗張力と降伏点を 0°C から 35°C の範囲で、測

図-3



定した結果を図-3に示している。抗張力は 14 kg/mm^2 のバラツキが多少気温の上昇とともに低下している。降伏点は 10 kg/mm^2 のバラツキはあるが、抗張力の低下にくらべると相当大きいことがわかる。実際には $15 \sim 33^\circ\text{C}$ の範囲で測られるので設計上問題になることはない。温度の低い側には抗張力も降伏点も上昇しているので、リラクゼーションは小さくなっていく。むしろ鋼材として低温 ($-10^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$) におけるじん性の方を、問題にしなければならぬ。

5. スtrandについて

米国で急速に発達した7本よりstrandを用いる工法はわが国においてもJISが制定されたので、strandの持つ特性すなわち太径でボンド効果が大きいこと、緊張が確実容易なこと、可撓性が大きく、取扱いに便利なこと、1本のstrandは2000~4000mと単長を容易に長くすることができるので運搬費が安くつくこと、材料ロスが非常に少ないこと等、単線や鋼棒にくらべていくつもの特長があるので、今後の用途の拡大は大いに期待される。

strandは製造の都合上その素線を溶接継ぎ合わせを行なう必要がある場合が少なくない。そのためにJISにもその溶接箇所はstrandの1緊張長さを考慮して45mの

範囲に、1カ所をこえないよう規定している。9.3mm外径のstrandの荷重-伸び曲線を調べると、図-4のとおりで、図中A曲線は7本全部溶接箇所のないもの、Bは伸線前熱処理過程で1カ所溶接したもの、Cはより線過程で1カ所溶接したものである。これらのstrandの引張荷重は表-3のとおりである。このように線の引張荷重は規格に対して一般に1割程度高くなるように製造しているので、(B)による溶接、あるいは(C)による溶接であって定められた許容引張荷重に対しては安全である。伸びは溶接箇所を持つ素線が図-4のように、引張試験において最も早く切断するため小さいが、実際に溶接箇所のあるよりピッチの部分に、緊張のさい応力が集中することがないので、切断のうれいは全く考える必要がない。溶接部をふくむstrandの引張疲労に関するデータがないが、ボンドがよいために溶接局所で疲労破断があったとしても、strandの引張荷重と許容引張荷重の比からみて、心配はないように考えられる。

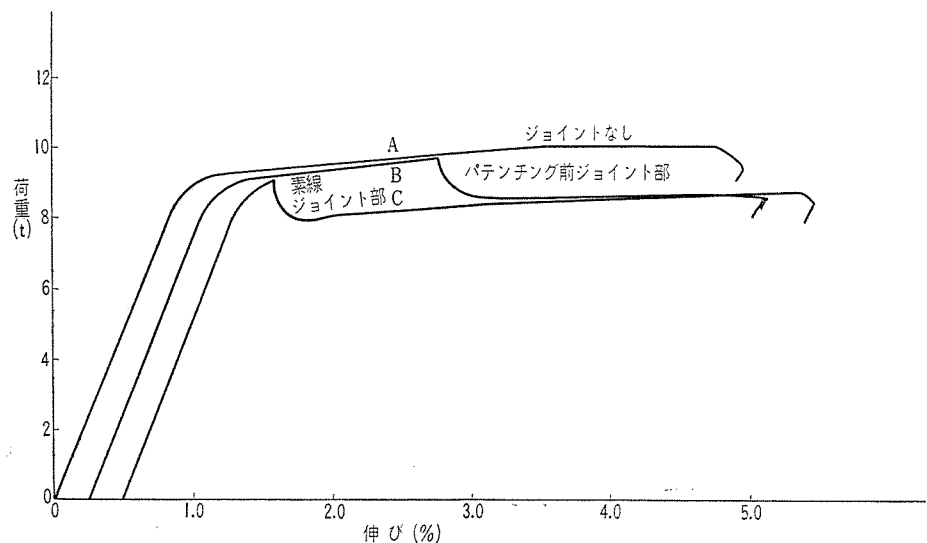
表-3

9.3mm strand	引張荷重	全対規格	伸 び	全対規格
溶接なし (A)	10 100 kg	111.0 %	4.70 %	134 %
熱処理前溶接 (B)	9 700 ♪	106.5 %	2.80 %	80 %
より線時溶接 (C)	9 100 ♪	100.0 %	1.65 %	47 %

しかしながらstrandは多数の素線でできているので、各素線にむらがあるとか、溶接部が完全であるとか、あるいは溶接部の径がヤスリがけが過ぎていないかなどの製造上のメーカーの責任に帰すべき問題もあるので、信頼のあるメーカーのものを使用することも、重要なことだと思われる。

strand用グリップについては、グリップそのもの

図-4 9.3mm PC 鋼より線「荷重伸び曲線」



(住友電気工業KK 提供)

には問題はないようだが、使用上グリップが抜けにくいようなトラブルがあるようである。今後さらに改良されたグリップを研究する必要はあるだろう。

なおアメリカでは6~12本のストランドをリールから同時に引出して、ベッドに張っているが、数十本のストランドを同時に緊張するために、ストランドのストレインが異なると各ストランドに均一に応力が入らない。そのためできるだけ同一メーカーのものを使用したが、またそのメーカーのストランドのEはいくらくらいだと要求してくる。しかしEについてはこの種の大量生産方式において、単線とくらべてバラツキも大きくないのが一般である。

6. PC 鋼棒について

わが国ではPC鋼棒使用の発達過程から3種の異なる製法の鋼棒が一般に使われている。そしてその性質もそれぞれ異なっているために、使用者側に多少設計上に迷惑をかけているように思われる。これもいずれは解決されてゆかねばならない問題だと考えられる。とくにディビダーク工法がわが国で採用されるようになって以来、鋼棒を主桁の緊張材に使われるようになってくると思われるので、Bar Benderで曲げて使用しなければならなくなってくると曲げ加工後の鋼棒の特性の変化の有無も、調べておかねばならない。われわれの試験した圧延鋼棒で曲げ、半径2000~5400mmに塑性曲げ加工をした27mm鋼棒では、加工の前後の物理的性質に差が認められなかったため、鋼棒施工指針に示されている棒径の700倍の規定は、100倍まで安全であるといえよう。

鋼棒が有効な緊張材として使われるようになったのは両端のネジ部がネジ転造塑性加工によって、鋼棒の製造最終過程にネジ成形ができるようになったからで、この方法でネジ部の強度は鋼棒平行部と差異がない強度を持っている。熱処理前にネジ加工を行なえば、ネジ部の繊維組織がこわれて強度が下がり、往々にしてネジ部における破断事故をおこすことがあるので、注意すべきであろう。また一そうネジ部の強度を増す目的と、鋼棒にネジ転造加工を行なう転造ロールは、被加工材が相当かたいためにロール寿命が割合に小さいので、ロールの溝山を

丸くすることによってこれを大きくする目的で、ドイツでは鋼棒ネジの谷を丸くする「横断面が非対称なネジの形状」が、最近使われはじめたようである。また鋼棒の全長にわたって対照の二面に熱間圧延、あるいは冷間プレスの際にネジのテーパを有するリップをつけ、ナットのめすネジに対応するように成型すれば、定尺に裁断する鋼棒の製造も容易となり、また緊張時にもネジ長を考える必要がなくなり、鋼棒のコストはさらに安価となるであろう。

鋼棒に用いるアンカープレートの設計は、JSTMの解説に評述されているよう適切に配慮されなければならない。またナット、ワシヤの形状材質等も、合理的になってゆかねばならない。これらについて今後一そう研究が必要だろうと思われる。

鋼棒の引張り許容応力をDINでは、引張り強さの55%または耐力(降伏点応力)の75%すなわち降伏比73.3%を有する材料が鋼棒のリラクゼーションを考慮して、最も有効であるとしている。降伏比がこれより大きいと耐力の割合に引張り強さが小さくなり、リラクゼーションが悪くなり耐疲労性も問題になるかも知れない。また降伏比がこれより小さいときは引張り強さが大きくなり、鋼材の伸びしぼりや粘りが小さくなるため、耐疲労性は明らかに悪くなるのであろう。鋼棒を経済的に使うためにはリラクゼーションを考慮して、経済的降伏比を有する鋼材によって、線の場合と同様、大きな許容応力をとるようにすれば、鋼材の節約は可能であろう。

7. むすび

わが国のPC工業の創始以来の各種PC鋼材に関して、線ストランド、鋼棒等に関する二、三の問題点についてふれてみた。高速道路、国鉄新幹線など土木関係のPC分野の拡大は、さらに期待されるようであるので、PC鋼材の特性、特に疲労特性など、さらに深く解明してゆかねばならない。また建築関係にも次第に需要を増しつつあるので、メッキ線材は、より線など米国では一部屋根等に使われているようであるが、新しい材料の開発にも努力しなければならないと思う。

(筆者：住友電気工業KK特殊線事業部技術部長)

PC 技術協会「学術講演会」開催のお知らせ

本協会では会員各位の御要望により明年1月下旬ないし2月上旬、東京において学術講演会を開催する予定であります。講演募集要項など詳細につきましては10月号に発表いたしますが、講演を希望される方は今から御準備下さいませよう御願ひ致します。